



بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه ۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز



بررسی و تحلیل رفتار انتشاری باریکه لیزری سرصاف بیضوی همدوس جزئی آستیگمات در اقیانوس متلاطم

مسعود یوسفی، شعله گل محمدی نژادی، فاطمه دباغ کاشانی و بیژن غفاری

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

چکیده - در این مقاله به منظور مشخصه‌سازی سیستم مخابرات لیزری امن زیرآبی، بر اساس انتگرال تعمیم‌یافته هویگنس-فرنل و تئوری یگانگی همدوسی-قطبش، انتشار باریکه سرصاف بیضوی همدوسی جزئی با ابیراهی آستیگمات در محیط متلاطم اقیانوسی مورد بررسی قرار گرفته است. برای نیل به این هدف، پس از محاسبه عناصر ماتریس چگالی طیفی متقابل، روابط تحلیلی شدت و درجه طیفی قطبش باریکه انتشاری استخراج شده و تأثیر تغییرات برخی عوامل مهم از قبیل پارامتر قدرت نسبی شوری و دمایی در ضریب شکست آبهای اقیانوسی، نرخ اتلاف انرژی جنبشی تلاطم بر واحد جرم شاره و همچنین اثر ابیراهی آستیگمات در طول مسیر انتشار در آبهای متلاطم بر کمیت‌های مذکور مورد مطالعه قرار گرفته است. بر اساس این روابط مشاهده می‌شود که با قوی‌تر شدن تلاطم اقیانوسی و با غلبه نوسانات شوری بر نوسانات دما در تلاطم، شدت نرمال بیشتر دچار پهن‌شدگی شده و درجه قطبش زودتر ولی به میزان کمتری افت پیدا می‌کند. نتایج بدست آمده به صورت نمودارهای حاصل از محاسبات ارائه گردیده است.

کلیدواژه- ابیراهی آستیگمات، انتشار باریکه سرصاف بیضوی، تلاطم اقیانوسی، شدت و درجه قطبش، مخابرات لیزری زیرآبی.

Investigation of Propagation Behavior of Partially Coherent Astigmatic Elliptical Flat-Topped Laser Beam through Oceanic Turbulence

M. Yousefi, Sh. Golmohammady, F.D. Kashani and B. Ghafari

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

Abstract- In this paper, for characterization of underwater laser communication systems, the propagation of Elliptical Partially Coherent Flat-Topped (EPCFT) laser beam with Astigmatic aberration through an oceanic turbulence is investigated based on the extended Huygens-Fresnel integral principle and the unified theory of coherence and polarization. For achieving this aim, analytical expression for describing the cross spectral density matrix is derived and then analytical formulas for studying the normalized intensity and the degree of polarization are reported. The effects of some important factors such as the relative strength of temperature and salinity fluctuations, the rate of dissipation of turbulent kinetic energy per unit mass of fluid and astigmatic aberration on quantities listed above, have been studied. Based on these analytical expressions, conclusions demonstrate that for stronger turbulence, the normalized intensity is most affected and changes in the behaviour of degree of polarization occur sooner but with smaller magnitudes when salinity fluctuations in the ocean dominate temperature fluctuations. The achieving conclusion indicated by graphs.

Keywords: Astigmatic aberration, Intensity and polarization degree, Oceanic turbulence, Underwater laser communication.

۱- مقدمه

کاربردهای فراوان انتشار باریکه‌های لیزری در محیط‌های تصادفی (مانند اتمسفر و اقیانوس) از قبیل سیستم‌های مخابرات لیزری فضای آزاد (FSO) و زیرآبی و توسعه روزافزون این نوع از ارتباطات در کاربردهای موبایل و سیستم‌های بدون سرنشین (اعم از کنترل از راه دور و خودکار)، موجب رشد و پیشرفت سیستم‌های بی‌سیم در عرصه‌های مختلف از جمله محیط‌های اقیانوسی و دریایی گردیده‌است. از این رو، در سال‌های اخیر، موضوع چالش برانگیز انتشار باریکه‌های لیزری در محیط تلاطمی اقیانوسی و مشخصه‌سازی ارتباطات لیزری زیرآبی توجهات فراوانی را به خود معطوف نموده‌است [۱-۳]. امواج نوری در حین انتشار در آب دچار پدیده‌هایی همچون جذب، پراکندگی و تلاطم می‌گردند. پدیده‌های خوش‌رفتار جذب و پراکندگی (ناشی از مواد آلی و معدنی آب دریا) سبب اتلاف انرژی می‌گردند و تلاطم این محیط و وجود انواع مختلف ابیراهی‌ها نیز می‌توانند باعث ایجاد اختلالات قابل‌ملاحظه‌ای در عملکرد سیستم‌های مذکور شوند. مطالعات تجربی و تئوری محدودی بر روی تأثیرات عوامل مذکور (اغلب در حوزه جذب و پراکندگی) بر باریکه‌های لیزری صورت پذیرفته است که در اغلب این مطالعات، باریکه‌ها با همدوسی کامل و بدون ابیراهی در طول مسیر انتشار در نظر گرفته شده‌اند [۴]. در حالی‌که در عمل بسیاری از باریکه‌ها همدوس جزئی بوده و دارای ابیراهی می‌باشند. بنابراین با توجه به اهمیت شناخت اثرات تلاطم اقیانوسی بر روی باریکه‌های لیزری و به منظور بالا بردن دقت شبیه‌سازی‌ها (نزدیک شدن به شرایط عملی)، در این مقاله به مطالعه انتشار باریکه‌های بیضوی آستیگمات سرصاف همدوس جزئی (EPCFT) در اقیانوس تلاطم پرداخته شده‌است (به دلیل تأثیرپذیری کم باریکه‌های همدوس جزئی نسبت به باریکه‌های همدوس کامل یا پروفایل‌های دیگر از تلاطم [۵]). پس از محاسبه عناصر ماتریس چگالی طیفی متقابل، روابط تحلیلی شدت و درجه قطبش باریکه EPCFT استخراج و اثر برخی عوامل موثر بر شدت تلاطم و اثر ابیراهی آستیگمات در طول مسیر انتشار، بر کمیت‌های مذکور مورد مطالعه قرار گرفته‌است. نتایج به صورت نمودارهای حاصل از محاسبات و شبیه‌سازی‌ها ارائه شده‌است.

۲- مبانی نظری

میدان الکتریکی یک باریکه سرصاف با درجه صافی N و تقارن بیضوی در صفحه منبع، $z=0$ ، را می‌توان به صورت زیر در دستگاه مختصات متعامد، بیان نمود [۵]:

$$E_{iN}(\vec{\rho}', z=0) = \sum_{n=1}^N A_i \frac{(-1)^{n-1}}{N} \binom{N}{n} \times \exp \left[-n \left(\frac{\rho_x'^2}{w_{0x}^2} + 2 \frac{\rho_x' \rho_y'}{w_{0xy}^2} + \frac{\rho_y'^2}{w_{0y}^2} \right) \right] \quad (1)$$

که در آن، w_{0x} ، w_{0y} و w_{0xy} به ترتیب، اندازه کمره باریکه گوسی بیضوی در راستاهای x ، y و جفت‌شده xy می‌باشند. درجه همدوسی فضایی باریکه EPCFT به صورت زیر بیان می‌گردد [۵]:

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

در روابط فوق، ضرایب A_i و B_{ij} کمیت‌هایی مثبت و مستقل از مکان بوده و σ_{0ij} بیانگر عرض مؤثر درجه طیفی همدوسی منبع فرستنده می‌باشد. به منظور وارد کردن اثر ابیراهی آستیگمات در انتشار باریکه‌های EPCFT، از رابطه فازی زیر استفاده می‌گردد [۵]:

$$K(\vec{\rho}'_1, \vec{\rho}'_2) = \exp \{ ik [\varphi(\vec{\rho}'_1) - \varphi(\vec{\rho}'_2)] \} \quad (3)$$

که در آن، k عدد موج و $\varphi = c_a (\rho_x'^2 - \rho_y'^2)$ تابع ابیراهی با ضریب آستیگمات c_a می‌باشد. به منظور بررسی رفتار انتشاری باریکه EPCFT در آب‌های متلاطم از ماتریس چگالی طیفی متقابل به صورت زیر، استفاده می‌شود [۴]:

$$\bar{W}(\vec{\rho}_1, \vec{\rho}_2, z) \equiv W_{ij}(\vec{\rho}_1, \vec{\rho}_2, z) = \langle E_i(\vec{\rho}'_1, 0) E_j^*(\vec{\rho}'_2, 0) g_{ij}(\vec{\rho}'_1 - \vec{\rho}'_2) K(\vec{\rho}'_1, \vec{\rho}'_2) \rangle \quad (4)$$

که در آن $\langle \rangle$ میانگین آنسامبلی و $\vec{\rho}_1$ و $\vec{\rho}_2$ مکان دو نقطه در صفحه گیرنده می‌باشند. ماتریس چگالی طیفی متقابل با استفاده از روش انتگرال تعمیم‌یافته هویگنس-فرنل بصورت زیر محاسبه خواهد شد:

$$W_{ij}(\vec{\rho}_1, \vec{\rho}_2, z; \omega) = \left(\frac{n_r k}{z} \right)^2 \sum_{c=1}^N \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \Omega A_i A_j B_{ij} \frac{(-1)^{m+n}}{N^3} \binom{N}{m} \binom{N}{n} \times \frac{1}{\sqrt{\beta}} \exp \left[- \frac{(g_1 \alpha_8^2 + g_2 \alpha_9^2 + g_3 \alpha_8 \alpha_9)}{\beta} \right]$$

باریکه EPCFT یک لیزر نیمه‌هادی با طول‌موج ۴۸۸ نانومتر و توان ۱۰۰ میلی‌وات، در روابط (۶) و (۷) و پس از انجام محاسبات، تأثیر تغییرات برخی عوامل مهم در تلاطم اقیانوسی و همچنین ضرایب ابیراهی آستیگمات بر رفتار انتشاری درجه قطبش و شدت نرمال‌شده باریکه EPCFT با درجات صافی $N = 4$ منتشر شونده در آب-های متلاطم (در نقطه محوری) 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 [۶] را ارضا می‌کنند. به غیر از موارد ذکر شده، مقادیر زیر برای پارامترهای مرتبط با منبع فرستنده و تلاطم انتخاب شده‌اند:

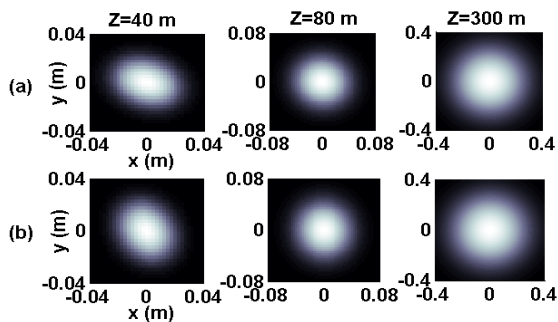
$$A_x^2 = 81, A_y^2 = 36, n_r = 1.345, C_a = 0.005 m^{-1}$$

$$w_{0x} = 10 mm, w_{0y} = 15 mm, w_{0xy} = 20 mm, \omega = -2.5$$

$$\sigma_{0ij} = w_{0ij} / 10, B_{xx} = B_{yy} = 1, B_{xy} = B_{yx} = 0.15$$

$$\varepsilon = 10^{-8} m^2/s^3, \eta = 10^{-4} m, \chi_T = 10^{-5} k^2/s$$

بررسی و تحلیل شدت نرمالیزه باریکه منتشرشونده، یکی از مطالعات مهم رفتار انتشاری می‌باشد. از این رو، در شکل (۱) توزیع دوبعدی شدت میانگین باریکه EPCFT برای سه مسافت انتشاری ۴۰، ۸۰ و ۳۰۰ متری و به ازای ضرایب ابیراهی مختلف نمایش داده شده‌است. با توجه به



شکل ۱: توزیع دوبعدی شدت میانگین باریکه EPCFT برای سه مسافت انتشاری مختلف: (a) $C_a = 0.001 m^{-1}$ ، (b) $C_a = 0.005 m^{-1}$

این شکل مشخص می‌گردد که با افزایش مسافت انتشاری در آب متلاطم، پروفایل بیضوی باریکه تبدیل به پروفایل دایروی شده و پهن می‌گردد. همچنین در مسافت‌های کمتر، افزایش ابیراهی آستیگمات موجب پهن شدگی توزیع بیضوی شدت خواهد شد. اثر تغییر عامل مهم محیطی قدرت نسبی شوری و دما در توزیع ضریب شکست آبهای اقیانوسی، بر شدت نرمال باریکه لیزری EPCFT نیز در شکل (۲) شبیه‌سازی شده‌است.

$$\Omega = \exp \left[-\frac{ik}{2z} (\rho_1^2 - \rho_2^2) - M_m (\bar{\rho}_1 - \bar{\rho}_2)^2 \right]$$

$$\beta = (\alpha_5^2 - 4\alpha_1\alpha_2)(\alpha_6^2 - 4\alpha_3\alpha_4) - \alpha_7^2 (4\alpha_1\alpha_3 + 4\alpha_2\alpha_4 + 2\alpha_5\alpha_6 - \alpha_7^2)$$

$$g_{1,2} = (\alpha_7^2 - 4\alpha_{2,1}\alpha_{4,3})(\alpha_7 + \alpha_{3,4} + \alpha_{1,2}) + \alpha_{2,1}\alpha_6^2 + \alpha_{4,3}\alpha_5^2 - \alpha_5\alpha_6\alpha_7$$

$$g_3 = (2\alpha_7 + 4\alpha_3)(\alpha_1\alpha_6 + \alpha_4\alpha_5) + 2\alpha_7(\alpha_3\alpha_5 + \alpha_2\alpha_6) + \alpha_6(\alpha_7^2 - \alpha_5^2 - \alpha_5\alpha_6)$$

$$\alpha_{1,2} = n/w_{0x,0y}^2 - ik \left(\frac{n_r}{2z} \pm C_a \right) - \frac{\alpha_7}{2}$$

$$\alpha_{3,4} = m/w_{0x,0y}^2 + ik \left(\frac{n_r}{2z} \pm C_a \right) - \frac{\alpha_7}{2}$$

$$\alpha_{5,6} = 2/w_{0xy}^2 (m, n), \alpha_7 = -c/\sigma_{0ij}^2 - 2M_m$$

$$\alpha_{8,9} = in_r k/z \rho_{1x,1y} + M_m (\rho_{1x,1y} - \rho_{2x,2y})$$

در محاسبه رابطه (۵) به منظور اعمال اثر تلاطم اقیانوسی با فرض همگن و همسانگرد بودن تلاطم، از تابع طیفی مرجع [۴] استفاده شده‌است که وابسته به ε نرخ اتلاف انرژی جنبشی تلاطم در واحد جرم شاره با بازه تغییرات 10^{-4} تا $10^{-10} m^2/s^3$ ، η مقیاس درونی کولموگروف، χ_T نرخ اتلاف میانگین مربعی دما، ω قدرت نسبی توزیع شوری و دما در ضریب شکست آبهای اقیانوسی که می‌تواند در بازه $(-5; 0)$ تغییر کند، می‌باشد. معادله (۵) رابطه اصلی این مقاله می‌باشد، به طوری که با استفاده از این رابطه و قرار دادن $\bar{\rho}_1 = \bar{\rho}_2 = \bar{\rho}$ ، میانگین شدت (چگالی طیفی) باریکه لیزری آستیگمات EPCFT به کمک رابطه:

$$\langle I(\bar{\rho}, z; \omega) \rangle = Tr [\bar{W}(\bar{\rho}, \bar{\rho}, z; \omega)] \quad (6)$$

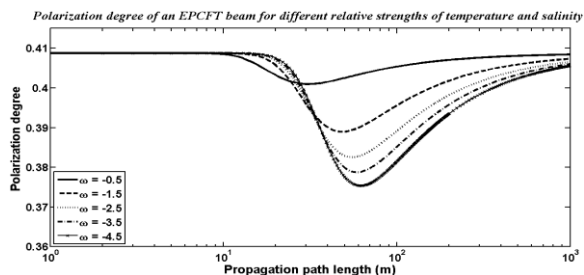
محاسبه می‌گردد. بر اساس نظریه یگانگی قطبش و همدوسی، رفتار انتشاری درجه قطبش باریکه لیزری آستیگمات EPCFT در آب‌های متلاطم نیز با استفاده از رابطه (۷) بررسی می‌گردد [۵]:

$$P = \sqrt{1 - \frac{4 \text{Det} [W_{ij}(\bar{\rho}, \bar{\rho}, z; \omega)]}{\{ \text{Tr} [W_{ij}(\bar{\rho}, \bar{\rho}, z; \omega)] \}^2}} \quad (7)$$

در روابط فوق، (Det) بیانگر دترمینان و (Tr) رد عناصر ماتریس چگالی متقابل می‌باشد. در ادامه محاسبه و شبیه‌سازی‌ها براساس روابط (۵)، (۶) و (۷) انجام خواهند شد.

۳- محاسبه و شبیه‌سازی

در این بخش با جایگذاری پارامترهای مرتبط با انتشار



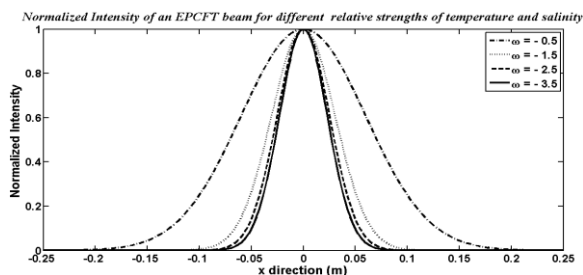
شکل ۴: درجه قطبش باریکه EPCFT بر حسب فاصله انتشار در اقیانوس متلاطم به ازای قدرتهای نسبی شوری و دمایی مختلف

۴- نتیجه گیری

در این مقاله، با استفاده از نظریه یگانگی همدوسی- قطبش و انتگرال تعمیم یافته هویگنس- فرنل، رابطه تحلیلی ماتریس چگالی طیفی متقابل باریکه لیزری EPCFT در حضور ابیراهی آستیگمات در انتشار از آب- های متلاطم استخراج گردید. سپس اثر تغییرات ابیراهی، پارامتر قدرت نسبی شوری و دمایی در توزیع ضریب- شکست محیط و نرخ اتلاف انرژی جنبشی تلاطم در واحد جرم شاره بر روی رفتار انتشاری درجه قطبش و شدت بررسی شده و مشخص گردید که افزایش مسافت انتشاری و ابیراهی آستیگمات، موجب پهن شدگی توزیع بیضوی شدت می گردد. همچنین، با قوی تر شدن تلاطم اقیانوسی و غلبه نوسانات شوری بر نوسانات دما در تلاطم، شدت نرمال بیشتر پهن شده و درجه قطبش زودتر و به میزان کمتری افت پیدا کرده و نهایتاً درجه قطبش پس از طی مسافت انتشاری طولانی، به مقدار اولیه اش در صفحه فرستنده خواهد رسید.

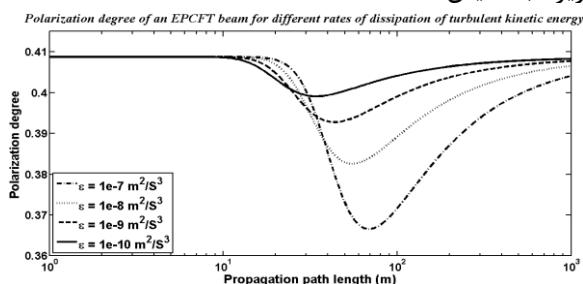
مراجع

- [1] P. V. Kumar, S. S. K. Proneeth and B. Narender Romarsha, "Analysis of optical wireless communication for underwater wireless communication", International Journal of Scientific & Engineering Research, Vol. 2, 2011.
- [2] M. A. Chancey, "Short range underwater optical communication links", M. Sc. Thesis, North Carolina state University, 2005.
- [3] J. W. Giles and I. N. Bankman, "Underwater optical communication systems, part 2: Basic design consideration", Military Communications Conference, MILCOM, IEEE, 17-20- Oct., Atlantic, P.1700, 2005.
- [4] E. Shchepakina, N. Farwell and O. Korotkova, "Spectral changes in stochastic light beams propagating in turbulent ocean", Appl. Phys. B, Vol. 105, P.415-420, 284, 2011.
- [5] M. Yousefi, Sh. Golmohammady, E. Kazemian and F. D. Kashani, "Coherence and Polarization Behavior of Aberrated Elliptical Partially Coherent Flat-Topped Laser Beams Propagating through Turbulent Atmosphere", ASEPE 2013, August 28-30, Tabriz, Iran.
- [6] O. Korotkova, M. Salem, and E. Wolf, "Beam conditions for radiation generated by an electromagnetic Gaussian Schell-model source", Opt. Lett., vol. 29, P. 1173, 2004.



شکل ۵: شدت نرمال باریکه EPCFT منتشرشونده در اقیانوس متلاطم به ازای قدرتهای نسبی شوری و دما مختلف

به طور آشکار، با افزایش ω یعنی غلبه نوسانات شوری بر نوسانات دما در تلاطم اپتیکی، شدت باریکه مورد نظر پهن شدگی بیشتری خواهد داشت. در شکل (۳)، اثر تغییرات نرخ اتلاف انرژی جنبشی تلاطم بر رفتار انتشاری درجه قطبش باریکه EPCFT بر حسب مسافت انتشار در زیر آب نمایش داده شده است.



شکل ۶: درجه قطبش باریکه EPCFT بر حسب فاصله انتشار در اقیانوس متلاطم به ازای نرخ اتلاف انرژی های جنبشی تلاطم مختلف

با توجه به این نمودار مشخص می گردد که برای مقادیر کوچکتر ϵ (قوی تر شدن تلاطم) درجه قطبش زودتر و به میزان کمتری افت پیدا می کند. در هر حال پس از طی مسافت انتشاری نسبتاً طولانی، درجه قطبش به مقدار اولیه اش در صفحه فرستنده خواهد رسید. به منظور بررسی دقیق تر رفتار انتشاری درجه قطبش در آب های متلاطم در حضور ابیراهی آستیگمات، در شکل (۴) این رفتار بر حسب مسافت انتشاری برای قدرتهای نسبی شوری و دمایی مختلف در توزیع ضریب شکست محیط نیز شبیه سازی شده است. همان گونه که مشاهده می گردد، با کاهش ω و غلبه نوسانات دما بر نوسانات شوری آب در تلاطم اپتیکی، درجه قطبش دیرتر و به میزان بیشتری تغییر می کند.

با توجه به شبیه سازی های صورت گرفته، مشخص شده- است که اثر تغییرات دیگر پارامترهای مهم از جمله χ_T و η بر رفتار انتشاری باریکه EPCFT همانند رفتار نمایش داده شده در شکل های (۳) و (۴) می باشد.