

بررسی تأثیر تلاطم اپتیکی اقیانوسی بر رفتار انتشاری درجه قطبش باریکه لیزری سرفاف آرایه‌ای فاز - ثابت با همدوسی جزئی

مسعود یوسفی، فاطمه دباغ کاشانی، احمد مشعل

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

چکیده - در تحقیق حاضر، با تعمیم اصل هویگنس-فرنل از محیط‌های آزاد به محیط‌هایی با ضریب شکست تصادفی و استفاده از آن جهت کاهش تقریب‌ها و نزدیک شدن به شرایط واقعی، رفتار انتشاری یکی از مهمترین مشخه‌های آماری باریکه‌های لیزری یعنی درجه قطبش یک چشمه آرایه‌ای فاز-ثابت متشکل از باریکه‌های لیزری سرفاف همدوسی جزئی در عبور از محیط تلاطمی اقیانوسی به صورت نظری مورد مطالعه قرار گرفته‌است. برای نیل به این هدف، پس از محاسبه عناصر ماتریس چگالی طیفی، روابط تحلیلی شدت و درجه قطبش باریکه انتشاری استخراج شده و تأثیر تغییرات پارامترهای ساختاری تلاطم اپتیکی محیط از قبیل قدرت نسبی نوسانات شوری و دما در طیف ضریب شکست آبهای اقیانوسی (0)، مقیاس درونی کولموگروف η ، نرخ اتلاف میانگین مربعی دما χ_T و نرخ اتلاف انرژی جنبشی تلاطم ε به همراه تأثیر تغییرات درجه همدوسی منبع آرایه‌ای، بر رفتار انتشاری درجه قطبش مورد بررسی قرار گرفته‌است. نتایج نشان می‌دهند که، دامنه تغییرات درجه قطبش برای حالت غلبه نوسانات دمایی بر شوری، مقادیر بزرگ ε ، η و کوچک χ_T ، افزایش می‌یابد. نتایج به صورت نمودارهای حاصل از محاسبات ارائه گردیده است.

کلید واژه- انتشار لیزر در محیط تصادفی، باریکه لیزری آرایه‌ای، تلاطم اقیانوسی، درجه قطبش.

Influence of Oceanic Optical Turbulence on Propagation Behavior of Polarization Degree of a Partially Coherent Phase-Locked Radial Flat-Topped Laser Array Beam

Masoud Yousefi, Fatemeh Dabbagh Kashani, Ahmad Mashal

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

Abstract- In this research, as one of the most important statistical characteristics of the laser beams, with the extension of Huygens-Fresnel principle from free space to media with random refractive index and using it to reduce approximations and to close to the real conditions, propagation behavior of the polarization degree of a partially coherent phase-locked radial flat-topped laser beam array in oceanic turbulence is investigated theoretically. For achieving this aim, analytical expression for the cross spectral density matrix is derived and then, analytical formula for studying intensity and the spectral degree of polarization are reported. The effects of structural parameters of optical turbulence such as the relative strength of temperature and salinity fluctuations, ω , Kolmogorov microscale, η , and rates of dissipation of the mean squared temperature and turbulent kinetic energy per unit mass of fluid, ε , on polarization have been studied along with the effect of source coherence variations. Results demonstrate that variations range of spectral degree of polarization for larger values of ε , η , smaller values of rates of dissipation of the mean squared temperature and for the condition which temperature fluctuations in the ocean dominate salinity fluctuations, increase. The achieving conclusion indicated by graphs.

Keywords: laser beam propagation through random media, laser array beam, oceanic turbulence, polarization degree.

۱- مقدمه

در سالهای اخیر، توجهات فراوانی توسط محققان حوزه اپتیک آماری به موضوع نحوه رفتار انتشاری قطبش باریکه‌های لیزری به دلیل نقش کلیدی آن در گسترش روز افزون کاربردهای مهم و راهبردی ارتباطات نوری بین کشتیها و شناورهای زیرآب، تصویربرداری زیرآبی، اکتشافات و تحقیقات دریایی، هدفیابی و... در محیط تصادفی دریایی و اقیانوسی معطوف شده است [۱-۳]. علاوه بر اتلاف به سبب پدیده‌های خوش‌رفتار جذب و پراکندگی (ناشی از مواد آلی و معدنی آب)، تلاطم اپتیکی (تغییرات تصادفی ضریب شکست) این محیط نیز می‌تواند باعث ایجاد اختلالات قابل ملاحظه‌ای در عملکرد سیستم‌های مذکور شود. اثر تلاطم اقیانوسی بر برخی مشخصه‌های آماری از قبیل نوسانات شدت و همدوسی تک باریکه‌های لیزری انتشاری در این محیط مورد مطالعه قرار گرفته است [۱-۴]. مطالعه باریکه‌های لیزری آرایه‌ای به دلیل امکان دستیابی به توان بالا و کاربردهای وسیع در سیستم‌های پرتوان، همجوشی سلولی، ارتباطات فیبر نوری، سنسجش از راه دور و... توجهات ویژه‌ای را به خود جلب کرده است [۵-۶]. همچنین، مطالعات صورت گرفته در محیط اتمسفر حاکی از این واقعیت است که استفاده از باریکه‌های آرایه‌ای در مقایسه با باریکه‌های منفرد، موجب کاهش اثرات مخرب تلاطم می‌گردد [۶]. از این رو، با توجه به اهمیت شناخت اثرات تلاطم اقیانوسی بر روی مشخصه‌های باریکه‌های لیزری و همچنین به دلیل تأثیرپذیری کم باریکه‌های سرفاف همدوس جزئی نسبت به باریکه‌های همدوس کامل و یا باریکه‌هایی با نیم‌رخهای دیگر از تلاطم [۴]، در این مقاله به مطالعه انتشار باریکه آرایه‌ای سرفاف همدوس جزئی (دایره‌ای با فاز ثابت)، PCFT، در اقیانوس متلاطم پرداخته شده است. پس از محاسبه و استخراج عناصر ماتریس چگالی طیفی، رابطه تحلیلی درجه طیفی قطبش بیان شده و اثر تغییرات پارامترهای ساختاری تلاطم محیط به همراه اثر تغییرات میزان همدوسی منابع لیزری تشکیل‌دهنده چیدمان آرایه‌ای در طول مسیر انتشار، بر درجه قطبش مورد مطالعه قرار گرفته است.

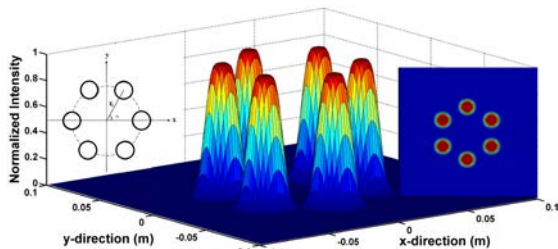
۲- ماتریس چگالی طیفی و درجه قطبش

میدان الکتریکی کل یک باریکه آرایه‌ای فاز- ثابت متشکل

از P باریکه لیزری سرفاف همدوس جزئی با درجه صافی N و تقارن دایره‌ای که به صورت همدوس (فاز- ثابت) و متقارن حول دایره‌ای به شعاع r_0 قرار دارند، در صفحه منبع، $z = 0$ ، به صورت زیر توصیف می‌گردد [۶]:

$$E_i(\vec{r}', z=0) = \sum_{r=0}^{P-1} \sum_{n=1}^N A_i \frac{(-1)^{n-1}}{N} \binom{N}{n} \times \exp \left[-n \frac{(r'_x - a_r)^2 + (r'_y - b_r)^2}{w_0^2} \right], i = (x, y) \quad (1)$$

در رابطه (۱)، w_0 اندازه کمره، $(a_r, b_r) = (r_0 \cos \theta, r_0 \sin \theta)$ و $\theta = 2\pi r/P$ می‌باشند. در شکل ۱ توزیع ۳ بعدی شدت میانگین باریکه لیزری آرایه‌ای در صفحه منبع، $z = 0$ ، نمایش داده شده است.



شکل ۱: توزیع سه‌بعدی شدت باریکه لیزری آرایه‌ای در صفحه منبع

به منظور همدوس جزئی نمودن باریکه لیزری منبع فوق، از تابع همدوسی فضایی زیر استفاده می‌شود [۴]:

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

در روابط (۱) و (۲)، ضرایب A_i و B_{ij} کمیت‌هایی مثبت و مستقل از مکان بوده و σ_{0ij} بیانگر عرض مؤثر درجه همدوسی طیفی منابع فرستنده می‌باشد. عناصر ماتریس چگالی طیفی برای باریکه لیزری آرایه‌ای مورد نظر در دو نقطه گیرنده $(\vec{r}_1, \vec{r}_2)$ عمود بر راستای انتشار، z ، در محیط تلاطمی آب، بر اساس انتگرال تعمیم‌یافته هوینگنس-فرلن، به صورت زیر محاسبه می‌شوند [۴،۷]:

$$W_{ij}(\vec{r}_1, \vec{r}_2, z) = \left(\frac{1}{\lambda z} \right)^2 \iint_{-\infty}^{\infty} d^2 r'_1 \iint_{-\infty}^{\infty} d^2 r'_2 \times \exp \left[\frac{ik}{2z} (|\vec{r}_1 - \vec{r}'_1|^2 - |\vec{r}_2 - \vec{r}'_2|^2) \right] \times \langle E_i(\vec{r}'_1, 0) E_j^*(\vec{r}'_2, 0) g_{ij}(\vec{r}'_1 - \vec{r}'_2) \rangle \times \langle \exp [\psi(\vec{r}_1, \vec{r}'_1, z) + \psi^*(\vec{r}_2, \vec{r}'_2, z)] \rangle, \quad (3)$$

که در آن $\langle \dots \rangle$ بیانگر میانگین آنسامبلی و λ طول موج

قطبش با استفاده از رابطه (۷) بررسی می‌گردد [۷،۲]:

$$P(\vec{r}, z) = \sqrt{1 - \frac{4 \text{Det}(\vec{W}(\vec{r}, \vec{r}, z))}{[\text{Tr}(\vec{W}(\vec{r}, \vec{r}, z))]^2}} \quad (۷)$$

در رابطه (۷)، Det و Tr به ترتیب بیانگر دترمینان و رد (میانگین شدت) عناصر ماتریس چگالی طیفی هستند.

۳- محاسبات و شبیه‌سازی

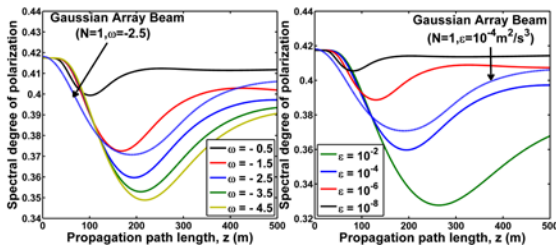
در این بخش با جایگذاری پارامترهای مرتبط با انتشار باریکه آرایه‌ای متشکل از $P=6$ باریکه لیزری سرفاف همدوس جزئی با طول موج ۴۸۸ نانومتر و توان کل ۶۰۰ میلی‌وات، در روابط (۶) و (۷) و پس از انجام محاسبات، تأثیر تغییرات برخی عوامل مهم در تلاطم اقیانوسی و همچنین عرض مؤثر همدوسی منبع لیزری بر رفتار انتشاری درجه قطبش باریکه آرایه‌ای منتشر شونده در آب‌های متلاطم بررسی می‌شوند. به غیر از موارد ذکر شده، مقادیر زیر برای پارامترهای مرتبط با منبع فرستنده حقیقی [۷] و تلاطم انتخاب شده‌اند:

$$A_x = 200, A_y = 125, N = 3, \omega = -2.5, \varepsilon = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^3$$

$$w_0 = 1 \text{ cm}, \sigma_{0ij} = w_0/5, \eta = 1 \text{ mm}, \chi_T = 10^{-7} \text{ k}^2/\text{s}$$

$$B_{xx} = B_{yy} = 1, B_{xy} = B_{yx} = 0.15$$

در شکل ۲، اثر تغییرات نرخ اتلاف انرژی جنبشی تلاطم و قدرت نسبی توزیع نوسانات شوری و دما بر رفتار انتشاری درجه قطبش باریکه آرایه‌ای سرفاف پس از انتشار به طول ۵۰۰ متر نمایش داده شده‌است. همچنین به منظور مقایسه بهتر، تحولات درجه قطبش باریکه آرایه‌ای با سطح مقطع گوسی نیز آورده شده‌است.



شکل ۲: تغییرات درجه قطبش باریکه لیزری آرایه‌ای PCFT بر حسب مسافت انتشاری به ازای مقادیر مختلف راست (نرخ اتلاف انرژی جنبشی تلاطم و چپ) قدرت‌های نسبی نوسانات شوری و دما.

به طور کلی با افزایش مسافت انتشاری در محیط متلاطم زیرآب، درجه قطبش افت پیدا کرده تا به کمینه مقدار خود برسد و سپس یک روند افزایشی (تا نزدیکی مقدار اولیه خود) را تجربه خواهد کرد. با توجه به نمودارها، دامنه تغییرات درجه قطبش به ازای مقادیر بزرگتر ε

می‌باشد. اثر تلاطم محیط انتشاری نیز به صورت زیر اعمال می‌گردد [۴]:

$$\left\langle \exp \left[\psi(\vec{r}_1, \vec{r}_1', z) + \psi^*(\vec{r}_2, \vec{r}_2', z) \right] \right\rangle = \exp \left\{ -M \left[(\vec{r}_1' - \vec{r}_2')^2 + (\vec{r}_1' - \vec{r}_2') \cdot (\vec{r}_1 - \vec{r}_2) + (\vec{r}_1 - \vec{r}_2)^2 \right] \right\}, M = \int_0^\infty k^3 \phi_n(k) dk \quad (۴)$$

در محاسبه رابطه (۴) به منظور اعمال اثر تلاطم با فرض همگن و همسانگرد بودن تلاطم، از تابع طیفی زیر برای توصیف تغییرات ضریب شکست آب استفاده می‌شود [۴]:

$$\phi_n(k) = 0.388 \times 10^{-8} \varepsilon^{-1/3} k^{-11/3} \left[1 + 2.35(\kappa\eta)^{2/3} \right] \times \frac{\chi_T}{\omega} \left(\omega^2 e^{-A_T} + e^{-A_S \delta} - 2\omega e^{-A_{TS} \delta} \right).$$

در رابطه (۵)، ε نرخ اتلاف انرژی جنبشی تلاطم در واحد جرم شاره با بازه تغییرات 10^{-4} تا $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}^3$ مقیاس درونی کولموگروف، χ_T نرخ اتلاف میانگین مربعی دما، ω قدرت نسبی توزیع نوسانات شوری و دما در ضریب شکست آب‌های اقیانوسی با بازه تغییرات $(-5; 0)$ ، $A_{TS} = 9.41 \times 10^{-3}$ ، $A_S = 1.9 \times 10^{-4}$ ، $A_T = 0.01863$ و $\delta = 8.284(\kappa\eta)^{4/3} + 12.978(\kappa\eta)^2$ می‌باشند [۳]. جایگذاری روابط (۵) و (۴) در رابطه (۳)، پس از محاسبات پیچیده و مستقیم، ماتریس چگالی طیفی متقابل بصورت زیر محاسبه خواهد شد:

$$W_{ij}(\vec{r}_1, \vec{r}_2, z) = \left(\frac{k}{z} \right)^2 \sum_{r=0}^{P-1} \sum_{s=0}^{P-1} \sum_{c=1}^N \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \frac{(-1)^{m+n}}{N^3} \Omega \times \binom{N}{m} \binom{N}{n} \frac{A_i A_j B_{ij}}{\sqrt{\beta}} \exp \left[\frac{(g_1 \alpha_1 + g_2 \alpha_2 + g_3 \alpha_3)}{\beta} \right], \quad (۶)$$

که در آن:

$$\Omega = \exp \left[-M (\vec{r}_1 - \vec{r}_2)^2 - \frac{n(a_r^2 + b_r^2) + m(a_s^2 + b_s^2)}{w_0^2} \right]$$

$$\alpha_{(1,2)} = \frac{(n, m)}{w_0^2} - \frac{ik}{2z} - \frac{\alpha_3}{2}, \alpha_3 = \frac{c}{\sigma_{0ij}^2} + 2M,$$

$$\alpha_{(4,5)} = -\frac{2n}{w_0^2} (a_r, b_r) + \frac{ik}{z} (r_{1x}, r_{1y}) + M,$$

$$\alpha_{(6,7)} = -\frac{2m}{w_0^2} (a_s, b_s) - \frac{ik}{z} (r_{2x}, r_{2y}) + M, g_3 = \alpha_4 \alpha_6$$

$$+ \alpha_5 \alpha_7, \beta = 4\alpha_1 \alpha_2 - \alpha_3^2, g_1 = \alpha_6^2 + \alpha_7^2, g_2 = \alpha_4^2 + \alpha_5^2.$$

بر اساس نظریه یگانه قطبش و همدوسی و قرار دادن $\vec{r}_1 = \vec{r}_2 = \vec{r}$ در رابطه (۶)، رفتار انتشاری درجه طیفی

میزان همدوسی منابع لیزری تشکیل دهنده سیستم آرایه-ای و افزایش شعاع r_0 دامنه تغییرات درجه قطبش افزایش می‌یابد.

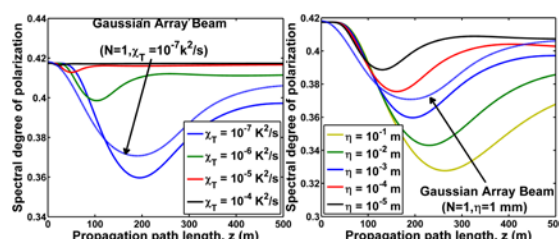
۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، برای اولین بار برپایه روش تعمیم‌یافته هویگنس-فرنل، به منظور مشخصه‌سازی اثرات تلاطم اقیانوسی بر رفتار انتشاری انتشاری باریکه لیزری آرایه‌ای سرفاف دایره‌ای همدوس جزئی، رابطه تحلیلی ماتریس چگالی طیفی متقابل و در نتیجه درجه قطبش استخراج گردید. سپس اثر تغییرات مهمترین پارامترهای ساختاری تلاطم اپتیکی محیطی و همچنین منبعی بر روی رفتار انتشاری قطبش بررسی شده و مشخص گردید که دامنه تغییرات (افت کلی) درجه قطبش برای مقادیر بزرگ ϵ ، η ، r_0 و کوچک χ_T ، σ_0 و همچنین در حالتی که تلاطم اپتیکی ناشی از نوسانات دمایی محیط باشد، بیشتر از حالات دیگر است. در تمامی حالات، درجه قطبش باریکه‌های لیزری آرایه‌ای با سطح مقطع گوسی نسبت به سرفاف در مسافت‌های انتشاری کوتاه‌تری افت پیدا خواهند کرد. نتایج تحلیلی حاصل، می‌تواند در طراحی و ساخت سیستم مخابرات لیزری امن زیرآبی مورد استفاده قرار گیرد.

مراجع

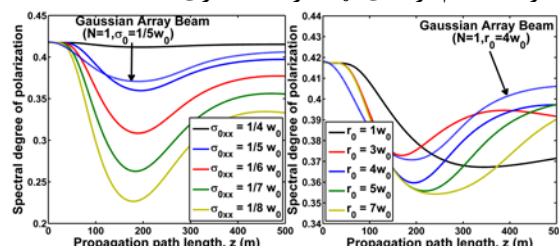
- [1] Zhou, Y., Huang, K., and Zhao, D., "Changes in the statistical properties of stochastic anisotropic electromagnetic beams propagating through the oceanic turbulence", Appl. Phys. B, Vol. 109, pp. 289-294, 2012.
- [2] Korotkova, O., and Farwell, N., "Effect of oceanic turbulence on polarization of stochastic beams", Opt. Communication, Vol. 284, pp. 1740-1746, 2011.
- [3] Giles, J. W., and Bankman, I. N., "Underwater optical communication systems, part 2: Basic design consideration", Military Communications Conference, MILCOM, IEEE, 17-20- Oct., Atlantic, P.1700, 2005.
- [4] Yousefi, M., Golmohammady, SH., Mashal, A., and Kashani, F. D., "Analyzing the propagation behavior of scintillation index and bit error rate of a partially coherent flat-topped laser beam in oceanic turbulence," J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 32, pp. 1982-1992, 2015.
- [5] Bilida, W. D., Strohschein, J. D., Seguin, H. J. J., "High-power 24 channel radial arrays slab RF-excited carbon dioxide laser, gas and chemical lasers and applications", Proc. SPIE 2987, pp. 13-21, 1997.
- [6] Cai, Y., Chen, Y., Eyyuboglu, H. T., Baykal, Y., "Propagation of laser array beams in aturbulent atmosphere", Appl. Phys. B, Vol. 88, pp. 467-475, 2007.
- [7] Andrews, L.C., Phillips, R.L., "Laser Beam Propagation through Random Media", second ed., SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, WA, 2005

(متناظر با شرایط تلاطمی قوی) و کوچکتر η (حالت غلبه نوسانات دمایی بر نوسانات شوری)، افزایش می‌یابد. در هر دو حالت درجه قطبش باریکه لیزری آرایه‌ای گوسی نسبت به سرفاف سریعتر (در مسافت‌های انتشاری کوتاه-تر) افت پیدا خواهد کرد. شکل ۳ تأثیر مقیاس درونی کولموگروف و نرخ اتلاف میانگین مربعی دما را نشان می‌دهد.



شکل ۳: تغییرات درجه قطبش باریکه لیزری آرایه‌ای PCFT بر حسب مسافت انتشاری به ازای مقادیر مختلف راست) مقیاس درونی کولموگروف و چپ) نرخ اتلاف میانگین مربعی دما.

همانگونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، رفتاری مشابه به آنچه که در مورد شکل ۲ گفته شد را می‌توان برای درجه قطبش به ازای مقادیر بزرگتر مقیاس درونی کولموگروف η (اندازه مشخصه سلول‌های تلاطمی محیط) و کوچکتر نرخ اتلاف میانگین مربعی دما χ_T انتظار داشت. در این حالت، کمترین میزان تغییرات در مقادیر بزرگتر χ_T رخ خواهد داد. جهت بررسی کامل و جامع موضوع، علاوه بر پارامترهای محیطی مذکور، در شکل ۴ تحولات رفتار انتشاری درجه قطبش به ازای تغییرات دو عامل مهم مرتبط با منابع لیزری یعنی درجه همدوسی σ_0 و شعاع دایره سیستم آرایه‌ای r_0 نیز شبیه‌سازی شده‌است.



شکل ۴: تغییرات درجه قطبش باریکه لیزری آرایه‌ای PCFT بر حسب مسافت انتشاری به ازای مقادیر مختلف راست) شعاع دایره چیدمان آرایه‌ای و چپ) درجه همدوسی منابع لیزری.

با توجه به این شکل می‌توان نتیجه گرفت که باریکه‌های لیزری ناشی از چیدمان آرایه‌ای دایره‌ای با شعاع برابر با عرض باریکه ($r_0 = w_0$) می‌توانند مسافت طولانی-تری (بیش از صدمتر) را بدون تغییر در میزان قطبش نسبت به دیگر حالات انتشار یابند. در هر حال، با کاهش