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

مطالعه رفتار همدوسی باریکه لیزری سرصاف همدوس جزئی بیضوی در اقیانوس متلاطم

مسعود یوسفی، شعله گل‌محمدی نژادی، فاطمه دباغ کاشانی و بیژن غفاری

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

چکیده - در این مقاله بر اساس روش انتگرال تعمیم‌یافته هویگنس- فرنل و تئوری یگانه همدوسی و قطبش، انتشار باریکه سرصاف بیضوی با همدوسی جزئی در محیط متلاطم اقیانوسی مورد بررسی قرار گرفته‌است. بدین منظور، پس از محاسبه عناصر ماتریس چگالی طیفی متقابل، روابط تحلیلی درجه همدوسی طیفی و عرض موثر همدوسی باریکه انتشاری استخراج شده و تأثیر تغییرات برخی عوامل مهم از قبیل طول‌موج(λ) (پارامتر منبع)، قدرت نسبی نوسانات شوری و دما در طیف ضریب‌شکست آب‌های اقیانوسی(ω) و نرخ اتلاف انرژی جنبشی تلاطم(ε) در واحد جرم شاره(پارامترهای محیطی) در طول مسیر انتشار در آب‌های متلاطم، بر کمیت‌های مذکور مورد مطالعه قرار گرفته‌است. بر اساس این روابط مشاهده می‌شود که درجه همدوسی طیفی و عرض همدوسی برای مقادیر کوچکتر ε (متناظر با شرایط تلاطمی قوی)، برای حالت غلبه نوسانات شوری بر دما در طیف تلاطم(مقادیر بزرگتر ω) و طول موج‌های کوتاه‌تر، با آهنگ سریع‌تری کاهش می‌یابد. نتایج بدست آمده به صورت نمودارهای حاصل از محاسبات ارائه گردیده‌است.

کلید واژه- انتشار باریکه لیزری سرصاف بیضوی، تلاطم اقیانوسی، همدوسی، مخابرات لیزری زیر آبی.

Analyzing propagation behavior of partially coherent elliptical Flat-Topped laser beam coherency through oceanic turbulence

Masoud Yousefi, Shole Golmohammady Nezhadi, Fatemeh Dabbagh Kashani and bijan ghafary

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

Abstract- In this paper, the propagation of Elliptical Partially Coherent Flat-Topped (EPCFT) laser beam in 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 the cross spectral density matrix is derived, then analytical formula for studying the spectral degree of coherence, effective width of coherence is reported. The effects of some important source factors (such as wavelength, λ) and environmental factors (the relative strength of temperature and salinity fluctuations ω , the rate of dissipation of turbulent kinetic energy per unit mass of fluid, ε) on statistical quantities listed above have been studied. Based on these analytical expressions, conclusions demonstrate that spectral degree of coherence and effective width of coherence for small amount of ε (which is corresponded to strong turbulence) and for the condition which salinity fluctuations in the ocean dominate temperature fluctuations (greater amount of ω) decrease rapidly. Effective width of coherence for shorter wavelengths decreases rapidly in comparison with long wavelengths. The achieving conclusion indicated by graphs.

Keywords: propagation of elliptical flat-topped laser beam, ocean turbulent, coherence, underwater laser communication.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02]

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، به دلیل گسترش روز افزون کاربردهای مهم و راهبردی ارتباطات نوری بین کشتی‌ها و شناورهای زیرآب، تصویربرداری زیرآبی، اکتشافات و تحقیقات دریایی، هدف‌یابی و... بررسی رفتار انتشاری باریکه‌های لیزری در این سیال از جمله موضوعات بسیار حائز اهمیت می‌باشد[۳-۱]. بر خلاف کانال مخابرات اتمسفری، بدلیل رسانایی بالای آب دریا، فرکانس‌های رادیویی و مایکروویو در آب به شدت دچار تضعیف گردیده و انتشار نمی-یابند[۳-۲]. برای رفع محدودیت‌های ارتباطی، کاهش اتلاف، دسترسی به پهنای باند وسیع‌تر و فراهم نمودن سرعت انتقال داده‌ی بیشتر، باید فرکانس‌های بالاتر در طیف امواج الکترومغناطیسی(بازه طیفی فرکانس اپتیکی) مورد استفاده قرار گیرد[۱]. علاوه بر اتلاف به سبب پدیده‌های خوش‌رفتار جذب و پراکندگی(ناشی از مواد آلی و معدنی آب دریا)، تلاطم این محیط نیز می‌تواند باعث ایجاد اختلالات قابل ملاحظه‌ای در عملکرد سیستم‌های مذکور شوند. با توجه به اهمیت شناخت اثرات تلاطم اقیانوسی بر روی مشخصه‌های باریکه‌های لیزری و همچنین به دلیل تأثیرپذیری کم باریکه‌های سرصاف همدوس جزئی نسبت به باریکه‌های همدوس کامل و یا باریکه‌هایی با نیم‌رخ‌های دیگر از تلاطم[۶-۵]، در این مقاله به مطالعه انتشار باریکه سرصاف همدوس جزئی با تقارن بیضوی(EPCFT) در اقیانوس متلاطم پرداخته شده‌است. پس از محاسبه عناصر ماتریس چگالی طیفی، روابط تحلیلی درجه طیفی و عرض موثر همدوسی EPCFT استخراج و اثر برخی عوامل مهم در تلاطم محیط از قبیل پارامتر قدرت نسبی نوسانات شوری و دما در توزیع ضریب‌شکست آبهای اقیانوسی، نرخ اتلاف انرژی جنبشی تلاطم در واحد جرم شاره و همچنین اثر تغییرات طول‌موج 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، $z=0$، به صورت زیر در دستگاه مختصات متعامد، توصیف می‌گردد[۵]:

$$E_{\mathrm{iN}}\left(\vec{r}',z=0\right)=\sum_{n=1}^{N}A_i\,\frac{(-1)^{n-1}}{N}\binom{N}{n}\times\exp\left[-n\left(\frac{r_x'^2}{w_{0x}^2}+2\frac{r_x'r_y'}{w_{0xy}^2}+\frac{r_y'^2}{w_{0y}^2}\right)\right] \quad (۱)$$

در رابطه(۱)، 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 در صفحه به صورت زیر بیان می‌شود[۴]:

$$g_{\mathrm{ij}}\left(\left|\vec{r}_1'-\vec{r}_2'\right|\right)=\sum_{c=1}^{N}B_{ij}\,\frac{1}{N}\exp\left[-c\left(\frac{\left(\vec{r}_{1x}'-\vec{r}_{2x}'\right)^2}{2\sigma_{0ij}^2}\right)\right] \quad (۲)$$

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 منبع فرستنده می‌باشد. به طور کلی، به منظور مطالعه رفتار انتشاری باریکه‌های لیزری در محیط-های تصادفی از ماتریس چگالی طیفی متقابل به صورت زیر استفاده می‌شود[۶]:

$$W_{ij}\left(\vec{r}_1,\vec{r}_2,z\right)=\left\langle E_i\left(\vec{r}_1',0\right)E_j^*\left(\vec{r}_2',0\right)g_{ij}\left(\vec{r}_1'-\vec{r}_2'\right)\right\rangle \quad (۳)$$

که در آن $\langle\ \rangle$ میانگین آنسامبلی و $\vec{r}_1$ و $\vec{r}_2$ مکان دو نقطه در صفحه گیرنده می‌باشند. با استفاده از روش انتگرال تعمیم‌یافته هویگنس-فرنل[۶] میدان الکتریکی باریکه لیزری در صفحه گیرنده پس از انتشار در محیط متلاطم اقیانوسی، ماتریس چگالی طیفی متقابل بصورت زیر محاسبه خواهد شد:

$$W_{ij}\left(\vec{r}_1,\vec{r}_2,z;\omega\right)=\left(\frac{n_r k}{z}\right)^2\sum_{c=1}^{N}\sum_{m=1}^{N}\sum_{n=1}^{N}\Omega\times\frac{(-1)^{m+n}}{N^3}\binom{N}{m}\binom{N}{n}A_iA_jB_{ij}\times\frac{1}{\sqrt{\beta}}\exp\left[-\frac{\left(g_1\alpha_8^2+g_2\alpha_9^2+g_3\alpha_8\alpha_9\right)}{\beta}\right] \quad (۴)$$

که:

$$\Omega=\exp\left[-\frac{ik}{2z}\left(r_1^2-r_2^2\right)-M_m\left(\vec{r}_1-\vec{r}_2\right)^2\right]$$

$$\alpha_{1,2}=\frac{n}{w_{0x,0y}^2}-\frac{ikn_r}{2z}-\frac{\alpha_7}{2}$$

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02]

$$\beta=\left(\alpha_5^2-4\alpha_1\alpha_2\right)\left(\alpha_6^2-4\alpha_3\alpha_4\right)$$
$$-\alpha_7^2\left(4\alpha_1\alpha_3+4\alpha_2\alpha_4+2\alpha_5\alpha_6-\alpha_7^2\right)$$
$$\alpha_{3,4}=\frac{m}{w_{0x,0y}^2}-\frac{ikn_r}{2z}-\frac{\alpha_7}{2}$$
$$\alpha_{5,6}=2/w_{0xy}^2\left(m,n\right),\alpha_7=-c/\sigma_{0ij}^2-2M_m$$
$$\alpha_{8,9}=in_rk/z\,r_{1x,1y}+M_m\left(r_{1x,1y}-r_{2x,2y}\right)$$
$$\beta=\left(\alpha_5^2-4\alpha_1\alpha_2\right)\left(\alpha_6^2-4\alpha_3\alpha_4\right)$$
$$-\alpha_7^2\left(4\alpha_1\alpha_3+4\alpha_2\alpha_4+2\alpha_5\alpha_6-\alpha_7^2\right)$$
$$g_{1,2}=\left(\alpha_7^2-4\alpha_{2,1}\alpha_{4,3}\right)\left(\alpha_7+\alpha_{3,4}+\alpha_{1,2}\right)$$
$$+\alpha_{2,1}\alpha_6^2+\alpha_{4,3}\alpha_5^2-\alpha_5\alpha_6\alpha_7$$
$$g_3=\left(2\alpha_7+4\alpha_3\right)\left(\alpha_1\alpha_6+\alpha_4\alpha_5\right)$$
$$+2\alpha_7\left(\alpha_3\alpha_5+\alpha_2\alpha_6\right)+\alpha_6\left(\alpha_7^2-\alpha_5^2-\alpha_5\alpha_6\right)$$

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

$$\phi_n\left(\kappa\right)=0.388\times10^{-8}\varepsilon^{-1/3}\kappa^{-11/3}\left[1+2.35\left(\kappa\eta\right)^{2/3}\right]$$
$$\times f\left(\kappa,\omega,\chi_T\right),M_m=\int_0^\infty k^3\phi_n\left(\kappa\right)dk \qquad (۵)$$

در رابطه (۵)، 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 نوسانات شوری و دما در ضریب‌شکست آب‌های اقیانوسی که می‌تواند در بازه $[-5;0]$ تغییر کند، می‌باشند[۴]:

$$f\left(\kappa,\omega,\chi_T\right)=\frac{\chi_T}{\omega}\left(\omega^2e^{-A_T}+e^{-A_S\delta}-2\omega e^{-A_{TS}\delta}\right), \qquad (۶)$$
$$\delta=8.284\left(\kappa\eta\right)^{4/3}+12.978\left(\kappa\eta\right)^2$$

در رابطه (۶)، $A_T=1.863\times10^{-2}$، $A_S=1.9\times10^{-4}$ و $A_{TS}=9.41\times10^{-3}$ می‌باشند[۴]. به کمک رابطه (۴) و بر اساس نظریه یگانه قطبش و همدوسی، رفتار انتشاری درجه طیفی همدوسی باریکه لیزری EPCFT در آب‌های متلاطم با استفاده از رابطه(۷) بررسی می‌گردد[۵]:

$$\mu\left(\vec{r}_1,\vec{r}_2,z;\omega\right)=$$
$$\frac{\mathrm{Tr}\left[W_{ij}\left(\vec{r}_1,\vec{r}_2,z;\omega\right)\right]}{\sqrt{\mathrm{Tr}\left[W_{ij}\left(\vec{r}_1,\vec{r}_1,z;\omega\right)\right]}\sqrt{\mathrm{Tr}\left[W_{ij}\left(\vec{r}_2,\vec{r}_2,z;\omega\right)\right]}} \qquad (۷)$$

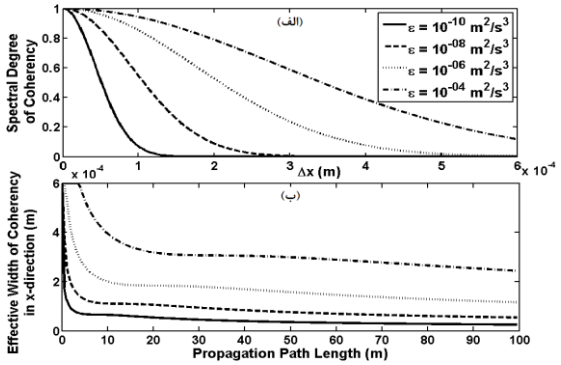
در رابطه فوق، (Tr) بیانگر رد عناصر ماتریس چگالی متقابل می‌باشد. عرض موثر همدوسی، فاصله جدایی دو نقطه در سطح مقطع عرضی باریکه است که در آن $\mu\left(\vec{r}_1,\vec{r}_2,z;\omega\right)$ از مقدار بیشینه به ۱/e مقدار خود می‌رسد.

۳- محاسبه و شبیه‌سازی

در این بخش با جایگذاری پارامترهای مرتبط با انتشار باریکهٔ EPCFT یک لیزر نیمه‌هادی با طول‌موج ۴۸۸ نانومتر و توان ۱۰۰ میلی‌وات، در روابط(۷) و پس از انجام محاسبات، تأثیر تغییرات برخی عوامل مهم در تلاطم اقیانوسی و همچنین طول‌موج منبع لیزری بر رفتار انتشاری درجه همدوسی و عرض موثر همدوسی باریکه EPCFT منتشر شونده در آب‌های متلاطم 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[۷] را ارضا می‌کنند. به غیر از موارد ذکر شده، مقادیر زیر برای پارامترهای مرتبط با منبع فرستنده و تلاطم انتخاب شده‌اند:

$$A_x^2=81,A_y^2=36,n_r=1.345,N=3,\omega=-2.5$$
$$w_{0x}=10mm,w_{0y}=15mm,w_{0xy}=20mm$$
$$\sigma_{0ij}=w_{0ij}/10,B_{xx}=B_{yy}=1,B_{xy}=B_{yx}=0.15$$
$$\varepsilon=10^{-8}\,m^2/s^3,\eta=10^{-4}m,\chi_T=10^{-5}\,k^2/s$$

در شکل (۱)، اثر تغییرات نرخ اتلاف انرژی جنبشی تلاطم بر درجه همدوسی طیفی و رفتار انتشاری عرض موثر همدوسی نمایش داده شده‌است.

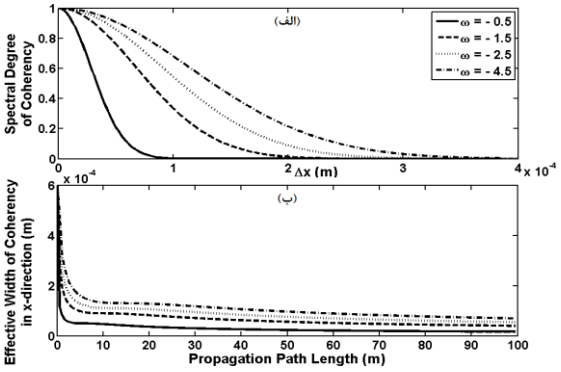


شکل ۱: تغییرات الف) درجه همدوسی در راستای x در z=50m ب) عرض موثر همدوسی باریکه EPCFT بر حسب فاصله انتشار در اقیانوس متلاطم به ازای نرخ اتلاف انرژی‌های جنبشی مختلف.

با توجه به نمودارها آهنگ کاهش درجه همدوسی در مقادیر کوچک‌تر ε که متناظر با شرایط تلاطمی قوی

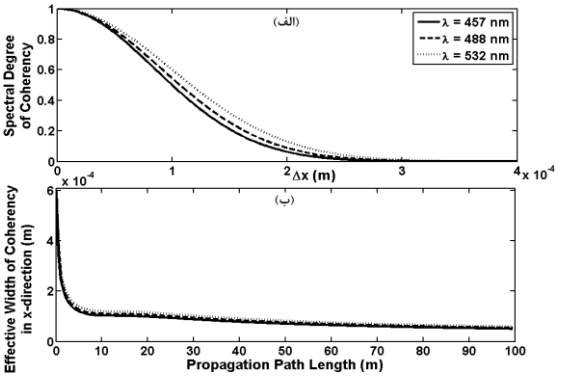
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02]

می‌باشد، سریع‌تر از دیگر حالات بوده به طوری که عرض مؤثر همدوسی در این حالت در چند متر اولیه انتشار در آب متلاطم به شدت افت پیدا خواهد کرد. ولی در شرایط تلاطمی متوسط یا ضعیف در یک مسافت انتشاری معین، علاوه بر بزرگ‌تر بودن عرض مؤثر همدوسی نسبت به حالات متناظر با مقادیر کوچک ε، این کمیت کندتر افت پیدا کرده و کمینه مقدار در مسافت‌های انتشاری طولانی‌تر رخ می‌دهد.



شکل ۲: تغییرات الف) درجه همدوسی در راستای x در z=50m ، ب) عرض موثر همدوسی باریکه EPCFT بر حسب فاصله انتشار در اقیانوس متلاطم به ازای قدرت‌های نسبی مختلف نوسانات شوری و دما.

همانگونه که از شکل(۲) مشاهده می‌گردد، درجه همدوسی باریکه لیزری منتشر شونده در آب‌های متلاطمی که در آن‌ها نوسانات شوری بر نوسانات دمایی (مقادیر بزرگتر ω) غلبه دارد، سریعتر کاهش یافته و عرض مؤثر همدوسی نیز در این حالت بیشتر افت پیدا خواهد نمود.



شکل ۳: تغییرات الف) درجه همدوسی در راستای x در z=50m ، ب) عرض موثر همدوسی باریکه EPCFT بر حسب فاصله انتشار در اقیانوس متلاطم به ازای طول‌موج‌های مختلف.

شبیه‌سازی اثر تغییرات طول‌موج منبع لیزری بر درجه همدوسی طیفی و رفتار انتشاری عرض موثر همدوسی در شکل(۳) نمایش داده شده‌است. با توجه به نمودارها، آهنگ کاهش درجه همدوسی در طول‌موج‌های کوتاه‌تر به نسبت طول‌موج‌های بلندتر، سریع‌تر می‌باشد. همچنین تغییرات طول‌موج تأثیر کمی بر عرض مؤثر همدوسی خواهد داشت. ولی به هرحال این تغییرات کوچک، در رفتار همدوسی باریکه انتشاری و انتخاب منبع مناسب مهم می‌باشند.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، به منظور مشخصه‌سازی اثرات تلاطم اقیانوسی بر رفتار انتشاری برخی کمیت‌های آماری باریکه لیزری EPCFT، رابطه تحلیلی ماتریس چگالی طیفی متقابل استخراج گردید. سپس اثر تغییرات عواملی چون قدرت نسبی نوسانات شوری و دما در توزیع ضریب‌شکست محیط، نرخ اتلاف انرژی جنبشی تلاطم در واحد جرم شاره و طول‌موج بر روی رفتار همدوسی بررسی شده و مشخص گردید که آهنگ افت درجه همدوسی برای مقادیر کوچک ε و λ و همچنین در حالتی‌که تلاطم اپتیکی ناشی از نوسانات شوری محیط باشد، سریع‌تر از حالات دیگر است. در این شرایط، کمینه عرض مؤثر همدوسی در مسافت‌های انتشاری اولیه رخ می‌دهد در حالی‌که با غلبه نوسانات دمایی بر شوری و مقادیر بزرگتر ε، کاهش در درجه و عرض موثر همدوسی کندتر بوده و کمینه عرض در بردهای طولانی‌تر اتفاق می‌افتد. نتایج تحلیلی حاصل، می‌تواند در طراحی و ساخت سیستم مخابرات لیزری امن زیرآبی مورد استفاده قرار گیرد.

مراجع

[1] Schill F., Zimmer U. R. and Trumpf J., "*Visible Spectrum Communication and Distance Sensing for Underwater Application*", **In Proc. Australasian Conf. Robotics and Automation**, Canberra, Australia, 2004.

[2] M. A. Chancey, "*Short range underwater optical communication links*", **M. Sc. Thesis**, North Carolina state Unversity, 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] O. Korotkova and N. Farwell, "*Effect of oceanic turbulence on polarization of stochastic beams*", **Opt. Communication**, Vol. 284, P. 1740–1746, 2011.

[5] M. Yousefi, Sh. Golmohammdy, 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, 2013.

[6] L. C. Andrews and R. L. Phillips, *Laser beam propagation through random media*, **SPIE** Opt. Eng. press, 1998.

[7] 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.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02]