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

بررسی اثر تلاطم آب بر انتشار پرتو لیزری سرصاف دایره ای همدوس جزئی در خلیج فارس با در نظر گرفتن اپتیک گیرنده

اسماعیل کاظمیان[۱و۲] و بیژن غفاری[۱]

۱-دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲-دانشکده علوم، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره)

چکیده - در این مقاله انتشار پرتو لیزری سرصاف دایره‌ای در آب‌های شمالی خلیج فارس بصورت تحلیلی بررسی شده‌است. برای این منظور عناصر ماتریس چگالی طیفی متقابل برای پرتو سرصاف دایره‌ای همدوس جزیی با استفاده از انتگرال تعمیم یافته هویگنس-فرنل محاسبه شده و تغییرات نرخ اتلاف انرژی جنبشی تلاطمی آب‌های شمال خلیج فارس در محاسبات اعمال شده‌است.با استفاده از آن تاثیر تلاطم بر پهن شدگی باریکه لیزری بررسی و اثر روزنه و عدسی استفاده شده در اندازه لکه و توان رسیده به آشکارساز نمایش داده شده‌است.

کلید واژه- انتشار اپتیکی زیرآبی، انتشار پرتو سرصاف، اندازه لکه، مخابرات لیزری زیرآبی.

Analysis the Persian Gulf turbulence effects on partially coherent Circular flat-topped laser beam propagation by regarding the reciever optic

E. Kazemian[1, 2], B. Ghafary[1]

1- Physics Department, Iran University of Science & Technology

2- Science Department, Maritime University of Imam Khomeini

Abstract- In this paper the analytical expression for the elements of the cross-spectral density matrix of a partially coherent circular flat-topped beam propagating in northern part of the Persian Gulf turbulence has been derived. In calculations we have used the extended Huygens-Fresnel integral and variation of the rate of dissipation of turbulent kinetic energy of Persian Gulf. The turbulence effects on beam spreading and the aperture and lens effects on spot size and the detector's received power are calculated. The results may be useful for underwater optical communication systems.

Keywords: Underwater optical propagation, flat-topped beam propagation, spot size, underwater optical communication.

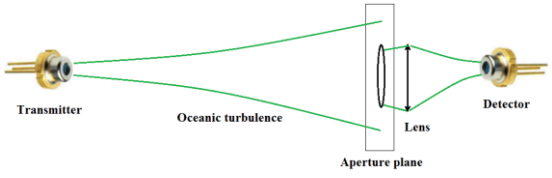
[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-30]

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

۱- مقدمه

یکی از نیازهای مهم در کاربرد پرتو نوری در مخابرات فضای آزاد و محیط‌های متلاطم، داشتن ناحیه‌ای با شدت نور ثابت است. پرتوهای سرصاف دارای این خاصیت هستند و بدلیل واگرایی کم، در طول مسیر انتشار تاثیرپذیری کمتری از محیط انتشار متلاطم دارند. در سالهای اخیر تعداد قابل توجهی از پژوهشگران موضوع مشخصه سازی عبور پرتو سرصاف از هوای متلاطم را مورد توجه قرار داده‌اند[۱].

همچنین تاثیر تلاطم روی رفتار انتشاری پرتو گاوسی و تاثیر آب مناطق مختلف دریا در تضعیف سیگنال پرتو گاوسی بررسی شده‌است[۲]. بررسی‌ها نشان می‌دهد مطالعه‌ای در خصوص اثر تلاطم آب دریا روی پرتو سرصاف دایره‌ای در خلیج فارس گزارش نشده‌است. بنابراین هدف این مقاله مطالعه دقیق این تاثیرات با در نظر گرفتن جزئیات می‌باشد. برای این منظور ابتدا روشی تحلیلی برای یافتن عناصر ماتریس چگالی طیفی متقابل برای پرتو همدوس جزیی سرصاف دایره‌ای در عبور از آبهای متلاطم خلیج فارس با استفاده اصل هویگنس فرنل ارایه شده‌است. سپس با استفاده از رابطه کولینز شدت پرتو رسیده به آشکارساز پس از عبور از اپتیک گیرنده شامل روزنه‌ای به شعاع پنج سانتی‌متر و عدسی همگرا به فاصله کانونی سی سانتی‌متر محاسبه شده‌است. و در آخر با استفاده از رابطه پهنای باریکه، اندازه لکه نوری تشکیل شده روی صفحه گیرنده و روی حساسه آشکارساز محاسبه شده‌است. از آن‌جایی‌که هدف بررسی اثر تلاطم آب بر پهن شدگی باریکه لیزری می‌باشد از پراکندگی ناشی از سایر عوامل و همچنین جذب آب (که در گزارشات قبلی محاسبه شده‌اند[۲]) و تاثیر حبابهای هوای داخل آن صرفنظر شده و توزیع طیف توانی تغییرات ضریب شکست نور ناشی از نوسانات دما و شوری نیز در نظر گرفته‌شده‌است. شکل (۱) شمای کلی سیستم انتشاری مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱: شمای کلی یک سیستم ساده انتشاری لیزری زیرآبی.

۲- انتشار پرتو سرصاف دایره‌ای در آب دریا

میدان الکتریکی ناشی از پرتو سرصاف با تقارن دایره‌ای در صفحه $z=0$ را می‌توان به صورت مجموعی متناهی از پرتوهای گاوسی در سیستم مختصات استوانه‌ای بیان کرد.

$$E_{iN}\left(\vec{r}_1',0;\omega\right)=A_i\sum_{n=1}^{N}\frac{(-1)^{n-1}}{N}\binom{N}{n}\exp\left(-\frac{nr_1'^2}{w_0^2}\right) \quad (۱)$$

که در آن A_i، w_0 و N به ترتیب نشانگر دامنه ثابت، کمره باریکه و درجه سرصافی هستند. وقتی $N=1$ باشد رابطه (۱) به پرتو گاوسی تبدیل می‌شود. $\vec{r}'=(x',y')$ بردار مکان یک نقطه در صفحه فرستنده است و نشانگر بردار انتقال دو بعدی عمود بر راستای انتشار پرتو است. عناصر ماتریس چگالی طیفی در صفحه فرستنده بصورت زیر می‌باشند:

$$W_{ij}\left(\vec{r}_1',\vec{r}_2',0;\omega\right)= \left\langle E_{iN}\left(\vec{r}_1',0\right)E_{jN}^{*}\left(\vec{r}_2',0\right)g_{ij}\left(\vec{r}_1'-\vec{r}_2',0\right)\right\rangle \quad (۲)$$

علامت ستاره نشانگر مزدوج مختلط، و علامت براکت نشانگر میانگین گیری روی مجموعه آماری میدانهای الکتریکی در نظریه همدوسی در فضای فرکانسی می‌باشد. $g_{ij}\left(\vec{r}_1'-\vec{r}_2',0\right)$ درجه همدوسی فضایی است که به صورت زیر بیان می‌شود [۱]:

$$g_{ij}\left(\vec{r}_1'-\vec{r}_2',0\right)=B_{ij}\sum_{l=1}^{N}\frac{1}{N}\exp\left(\frac{-l\left(\vec{r}_1'-\vec{r}_2'\right)^2}{2\sigma_{gij}^2}\right) \quad (۳)$$

$$when\begin{cases} i=j \rightarrow B_{ij}=1 \\ i\neq j \rightarrow \left|B_{ij}\right|\leq 1 \end{cases}$$

که در آن σ_{gij} عرض موثر فضایی درجه همدوسی منبع است. انتشار پرتو سرصاف در آب متلاطم بدون در نظر گرفتن جذب و پراکندگی توسط ماتریس چگالی طیفی که با کمک انتگرال تعمیم یافته هویگنس فرنل محاسبه شده بیان می‌شود. با در نظر گرفتن موارد فوق رابطه (۴) بدست می‌آید. که در آن n_0 ضریب شکست آب خالص دریا و $\vec{r}_1$ و $\vec{r}_2$ بردارهای عرضی در صفحه z و $\psi(\vec{r},\vec{r}',z)$ قسمت آماری فاز مختلط موج کروی منتشر

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-30]

شونده در محیط از نقطه $(\vec{r}',0)$ به نقطه $(\vec{r},z)$ می‌باشد [۱].

$$W_{ij}(\vec{r}_1,\vec{r}_2,z)=(n_0k_0/2\pi z)^2\iint d^2r_1'\iint d^2r_2' \times\exp\left[(jn_0k_0/2z)\left(r_1'^2-2\vec{r}_1.\vec{r}_1'+r_1^2\right)\right] \times\exp\left[-(jn_0k_0/2z)\left(r_2'^2-2\vec{r}_2.\vec{r}_2'+r_2^2\right)\right] \times\Gamma_{ij}(\vec{r}_1',\vec{r}_2',0)\left\langle\exp\left[\psi(\vec{r}_1,\vec{r}_1',z)+\psi^*(\vec{r}_2,\vec{r}_2',z)\right]\right\rangle_m \quad (۴)$$

که در آن:

$$\left\langle\exp\left[\psi^*(\vec{r}_1,\vec{r}_1',z)+\psi(\vec{r}_2,\vec{r}_2',z)\right]\right\rangle_m \cong \exp\left[\left[(\vec{r}_1-\vec{r}_2)^2+(\vec{r}_1-\vec{r}_2).(\vec{r}_1'-\vec{r}_2')+(\vec{r}_2-\vec{r}_2')^2\right]\times\left(\left(-4\pi^4z/3\lambda^2\right)\int_0^\infty\kappa^3\phi_n(\kappa)d\kappa\right)\right] \quad (۵)$$

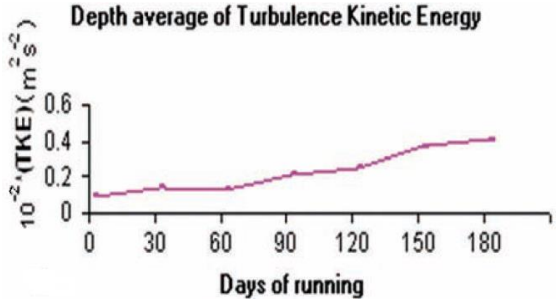
که در آن $\phi_n(\kappa)$ طیف توانی فضایی نوسانات ضریب شکست است که خطی‌سازیی از چند جمله‌ای دو متغییره نوسانات دما و شوری می‌باشد. در این مدلسازی فرض بر همگن و همسانگرد بودن تلاطم است در نتیجه فقط به مشخص بودن طیف یک‌بعدی نیاز است که به شکل زیر است [۲]:

$$\phi_n(\kappa)=0.388\times10^{-8}\varepsilon^{-1/3}\kappa^{-11/3} \times\left[1+2.35(\kappa\eta)^{2/3}\right]f(\kappa,\omega,\chi_T) \quad (۶)$$

که درآن ε نرخ اتلاف انرژی جنبشی تلاطمی در واحد جرم شاره است که در اعماق شمالی خلیج فارس بین $0.1\times10^{-2}\ m^2/s^3$ در زمستان‌ها تا $0.4\times10^{-2}\ m^2/s^3$ در تابستان‌ها تغییر می‌کند شکل (۲). البته در سطح آب تغییرات بین $0.3\times10^{-2}\ m^2/s^3$ در زمستان تا $0.6\times10^{-2}\ m^2/s^3$ در تابستان است[۳]. η مقیاس درونی کولموگرف است که بین $6\times10^{-5}m$ برای تلاطم قوی تا $0.01m$ برای تلاطم ضعیف تغییر می‌کند. χ_T نرخ اتلاف میانگین مربعی دماست که تغییراتی از $7\times10^{-10}\ k^2/s$ برای تلاطم ضعیف تا $10^{-4}\ k^2/s$ برای تلاطم قوی دارد و $f(\kappa,\omega,\chi_T)$ نیز به شکل رابطه (۷) تعریف می‌شود که در آن A_T ، A_S و A_{TS} مقادیر ثابت هستند[۴].

$$f(\kappa,\omega,\chi_T)=(\chi_T/\omega) \times\left(\omega^2e^{-A_T}+e^{-A_S\delta}-2\omega e^{-A_{TS}\delta}\right) \quad (۷)$$

$$\delta=8.284(\kappa\eta)^{4/3}+12.978(\kappa\eta)^2 \quad (۸)$$



شکل ۲: تغییرات نرخ اتلاف انرژی جنبشی تلاطمی در عمق میانگین در شمال خلیج فارس از زمستان تا تابستان[۳].

شدت پرتو رسیده به صفحه روزنه (دهانه ورودی آشکارساز) در مرجع [۴] محاسبه شده‌است. با استفاده از روش پیشنهادی وِن و بریازیل برای وارد کردن دریچه اپتیکی در محاسبات [۵]، اندازه شدت روی حساسه آشکارساز با احتساب اپتیک ورودی با رابطه (۱۰) داده می‌شود [۴]. رابطه شعاع باریکه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$w_r^2(z)=\frac{2\iint\left(x^2+y^2\right)I(x,y,z)dx\,dy}{\iint I(x,y,z)dx\,dy} \quad (۹)$$

۳- دستاوردها

مقادیر پیش فرض استفاده شده درمحاسبات جز در مواردی که مقدار دیگری به صورت مشخص ارائه شده‌باشد به قرار زیر می‌باشند:

$$w_0=0.0045(m),z=100(m),\theta=1.5(mrad)$$
$$P=0.2(watt),\lambda=532(nm),\omega=-2.5,\eta=10^{-4}(m)$$
$$\sigma_{xx}=\sigma_{yy}=\sigma_{xy}=\sigma_{yx}=w/10\,(m),B_{xx}=B_{yy}=1$$
$$n=1.345,A_T=1.863\times10^{-2},A_S=1.9\times10^{-4}$$
$$\chi_T=10^{-5}(k^2/s),\text{Aperture radius}=0.05(m)$$

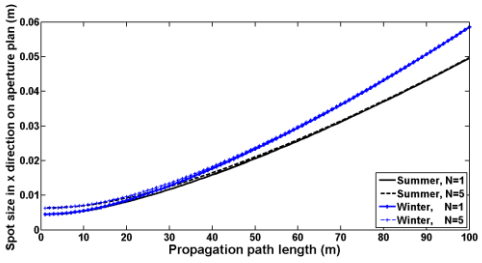
شکل (۳) اندازه لکه $w_x^2(z)$ روی دهانه گیرنده بصورت تابعی از فاصله انتشاری برای درجه‌های مختلف سرصافی

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-30]

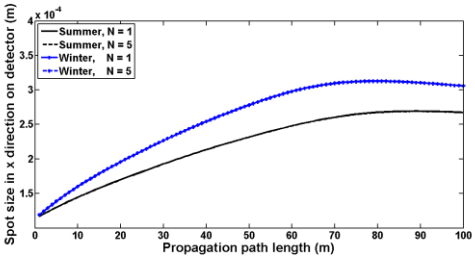
$$I(\vec{r},z)=\frac{n_0^4k_0^6}{B_1^2z^4}\sum_h^H\sum_q^Q\sum_n^N\sum_m^N\sum_l^N\frac{(-1)^{m+n}A_hA_q^*}{N^3}$$
$$\times\binom{N}{n}\binom{N}{n}\left\{\frac{A_xA_x^*\left(4d_{1x}d_{2x}-d_{3x}^2\right)^{-1}}{\left(4\alpha_{1x}\alpha_{2x}-l^2/\sigma_{gx}^4\right)\left(4\gamma_{1x}\gamma_{2x}-\gamma_{3x}^2\right)}\right.$$
$$\times\exp\left(-k_0^2r^2\left(d_{1x}+d_{2x}-d_{3x}\right)/B_1^2\left(4d_{1x}d_{2x}-d_{3x}^2\right)\right)$$
$$+\frac{A_yA_y^*\left(4d_{1y}d_{2y}-d_{3y}^2\right)^{-1}}{\left(4\alpha_{1y}\alpha_{2y}-l^2/\sigma_{gy}^4\right)\left(4\gamma_{1y}\gamma_{2y}-\gamma_{3y}^2\right)}\times$$
$$\left.\exp\left(-k_0^2r^2\left(d_{1y}+d_{2y}-d_{3y}\right)/B_1^2\left(4d_{1y}d_{2y}-d_{3y}^2\right)\right)\right\} \quad (۱۰)$$

انتخابی در فصول مختلف در شمال خلیج فارس نشان می‌دهد. واضح است که پرتوهای سرصافتر دارای پهن شدگی کمتری هستند. همچنین ملاحظه می‌شود با وجود آنکه در چند متر اول پرتوهای سرصافتر پهنای بیشتری دارند اما در فواصل دورتر پرتوهای با درجات سرصافی مختلف به مقدار مشخصی از پهن‌شدگی می‌رسند. کاملا مشابه حالت تلاطم اتمسفری در اینجا نیز می‌توان دید پرتوهای سرصافتر تاثیر کمتری از تلاطم می‌پذیرند. به‌علاوه مشاهده می‌شود نرخ اتلاف انرژی جنبشی تلاطمی در زمستانها بدلیل ورود بیشتر ذرات معلق از رودخانه‌ها تاثیر بیشتری در پهن شدگی پرتو دارد.

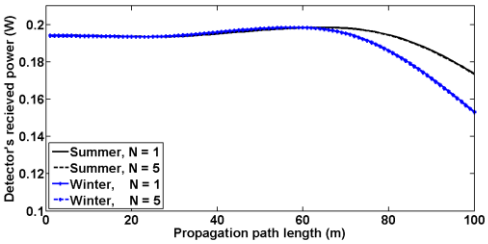
در شکل (۴) پهنای پرتو پس از عبور از دریچه و اپتیک گیرنده، روی آشکارساز نشان داده‌شده‌است. در شکل (۵) توان رسیده به آشکارساز بر حسب طول مسیر انتشار نمایش داده‌شده‌است. آشکارا مشاهده می‌شود طراحی اپتیک گیرنده طوری انجام شده که توانایی کانونی‌سازی پرتوهای سرصاف با درجات مختلف و در فواصل متفاوت را با دقت بالا دارا باشد.



شکل ۳: مولفه x اندازه لکه روی دهانه ورودی گیرنده بر حسب طول مسیر انتشار به‌ازای درجات سرصافی مختلف در زمستان و تابستان.



شکل ۴: مولفه x اندازه لکه روی صفحه آشکارساز بر حسب طول مسیر انتشار به‌ازای درجات سرصافی مختلف در فصول متفاوت.



شکل ۵: توان دریافتی توسط آشکارساز بر حسب طول مسیر انتشار و به‌ازای درجات سرصافی مختلف در زمستان و تابستان.

۴- نتیجه گیری

در این نوشتار رابطه‌ای تحلیلی برای محاسبه میانگین شدت پرتو سرصاف دایره‌ای منتشر شونده در دریای متلاطم (خلیج فارس) محاسبه کردیم. ملاحظه گردید پرتوهای با درجه سرصافی بالاتر در مقایسه با پرتوهای مشابه با درجات سرصافی پایین‌تر تاثیرپذیری کمتری از تلاطم دریایی دارند. مشاهده شد در فصل زمستان تاثیر نرخ اتلاف انرژی جنبشی تلاطمی بر پهن شدگی پرتو بیشتر است. همچنین دیده‌شد پرتوهای با درجه سرصافی بالاتر پهن شدگی کمتری در آبهای متلاطم دریایی دارند.

مراجع

[1] Ghafary B., Kashani F., Kazemian E., *Reliability Analysis of FSO Communication Links Using Aberrated Divergent rectangular Partially Coherent Flat- Topped Beam*, **IJEEE**. 9 (2013) 13-19.

[2] Kazemian E., Kashani F. D., *Reliability analysis of underwater optical communication links in different location through Caspian sea*, **Optik**, 124, (2013) 5184–5188.

[3] Mosaddad S. M., Delphi M., *Numerical simulation of turbulence in northern part of the Persian gulf*, **Indian Journal of Geo-Marine Science**, 43 (2014) 252-257.

[4] Kazemian E., Ghafary b., *Circularflat-topped beam propagation in turbulent seawater*, **2nd International Conference on New Frontiers in Physics (ICNFP 2014)**, 267.

[5] Wen J. J., Breazeale M. A., *A diffraction beam field expressed as the superposition of Gaussian beams*, **J. Acoust. Soc. Am.**, 83, (1988) 1752–1756.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-30]