

## مدل سازی و شبیه سازی انتشار باریکه لیزری پالسی در جو متلاطم

حسین صیام پور<sup>۱</sup>، نبی هادیلو<sup>۲</sup>، مهدی علوی نژاد<sup>۳</sup> و رسول صدیقی بنابی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup>گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

<sup>۲</sup>گروه مهندسی اپتیک و لیزر، دانشگاه بناب، بناب

<sup>۳</sup>آزمایشگاه فوتونیک، دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

<sup>۴</sup>آزمایشگاه تحقیقاتی لیزر، دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

چکیده - انتشار باریکه لیزری پالس کوتاه در جو متلاطم با معرفی تابع سیستم جو مدل سازی شد. معادله موج سه‌موی با استفاده از روش گام گسسته و ایجاد صفحات فازی شبیه ساز تلاطم نوری جو، بدست آمد. توزیع شدت لحظه‌ای و چگالی انرژی متوسط فضایی باریکه لیزری شبیه‌سازی شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که توزیع فضایی باریکه لیزری تحت تأثیر جو متلاطم تغییر می‌کند و همچنین پالس لیزری در مقایسه با باریکه لیزری پیوسته کمتر تحت تأثیر جو قرار می‌گیرد.

کلید واژه- باریکه لیزری پالسی، تلاطم نوری جو، تابع سیستم، روش گام گسسته

## Modeling and simulation of pulsed laser beam propagation through turbulent atmosphere

Hossein Siampoor<sup>1</sup>, Naby Hadilou<sup>2,4</sup>, Mahdi Alavinejad<sup>3</sup> and Rasoul Sadighi-Bonabi<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Physics Department, Faculty of Basic sciences, Tarbiat Modares University, Tehran

<sup>2</sup>Department of Laser and Optical Engineering, University of Bonab, Bonab

<sup>3</sup>Photonics Laboratory, Physics Department, Iran University of Science and Technology, Tehran

<sup>4</sup>Laser Research Laboratory, Department of Physics, Sharif University of Technology, Tehran

Abstract- Propagation of short pulse laser beam through turbulent atmosphere by introducing atmospheric system function was modeled. Parabolic wave equation based on split-step method and creation of phase planes which simulate the optical atmospheric turbulent was calculated. Instantaneous intensity distribution and spatial average of energy density of laser beam have been simulated. The simulation results show that spatial distribution of laser beam changes in turbulent atmosphere. Also it is found that pulsed laser is affected less than continuous-wave laser under turbulent atmosphere.

Keywords: Pulsed- laser Beam, Atmospheric Optical Turbulence, System Function, Split-Step Method

## ۱- مقدمه

با استفاده از تبدیل فوریه پالس اولیه (۱) در فضای فرکانس به صورت زیر نمایش داده می‌شود.

$$v_i(\omega - \omega_0) = \int_{-\infty}^{\infty} v_i(t) \exp[i(\omega - \omega_0)t] dt \quad (3)$$

$v_i(\omega)$  تبدیل فوریه دامنه  $v_i(t)$  است. به همین صورت تبدیل فوریه پالس در صفحه گیرنده برابر خواهد بود با  $v_o(\omega)$ . با استفاده از روش سیستم‌های خطی ارتباط بین پالس ورودی (۱) و پالس در صفحه گیرنده (۲) در فضای فرکانس به صورت زیر نمایش داده می‌شود.

$$v_o(\omega) = H(\omega)v_i(\omega) \quad (4)$$

$H(\omega)$  تابع سیستم یا تابع تبدیل فرکانس جو نامیده می‌شود. در فضای زمان این ارتباط را می‌توان به صورت زیر نمایش داد [۶].

$$v_o(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} v_i(\omega) H(\omega + \omega_0) \exp[i(\omega)t] d\omega \quad (5)$$

این معادله ارتباط کلی بین پوش مختلط  $v_o(\omega)$  پالس در صفحه گیرنده و دامنه  $v_i(t)$  پالس در صفحه فرستنده را بیان می‌کند. برای درک مفهوم تغییرات زمانی تابع سیستم محیط کاتوره‌ای  $H(\omega)$ ، اگر یک موج نوری منتشر شده در فاصله‌ای به طول  $L$  را در نظر بگیریم، میدان الکتریکی موج در صفحه گیرنده را می‌توان به صورت زیر بیان کنیم.

$$e(\vec{r}, L; \omega, t) = e(\vec{r}, L; \omega) \times \exp[-i\omega t] \quad (6)$$

که  $e(\vec{r}, L; \omega)$  دامنه مختلط موج در جو متلاطم است بنابراین تابع سیستم محیط کاتوره‌ای را می‌توان به صورت  $H(\omega) = e(\vec{r}, L; \omega)$  مشخص کرد.

با صرفه نظر کردن از پدیده‌های خطی جذب و پراکندگی به وسیله مولکول‌ها و ذرات معلق و پدیده‌های غیرخطی تابع سیستم را می‌توان با استفاده از معادله موج که به صورت زیر قابل توصیف است بدست آورد. [۵]:

$$\frac{\partial^2 e(\vec{r}, z; \omega)}{\partial z^2} + \nabla_{\perp}^2 e(\vec{r}, z; \omega) + \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 n^2(\vec{r}, z; \omega) e(\vec{r}, z; \omega) = 0 \quad (7)$$

در این رابطه  $n(\vec{r}, z; \omega)$  نشان دهنده ضریب شکست هوا

امروزه مطالعه و بررسی انتشار باریکه‌های لیزری پالس کوتاه به دلیل کاربردهای گسترده آنها مورد توجه بسیاری قرار گرفته‌است. اما تلاطم نوری جو و ذرات معلق می‌توانند باعث کاهش توان رسیده به گیرنده و همچنین تغییر توزیع شکل پالس در طول مسیر انتشار شوند. اعوجاج‌های کاتوره‌ای غالباً به علت نوسانات ضریب شکست ایجاد می‌گردند و یکی از نمادهای بروز آن افت‌وخیزهای شدت میدان نوری است، که باعث کاهش اثر گذاری سیستم‌های ارتباط نوری فضای آزاد و هوانوردی می‌شود [۱-۲]. مشخصات کلی انتشار و نوسانات زمانی یک پالس مستقیماً با تابع هم‌دوسی متقابل مرتبط می‌شود. این تابع معیاری برای تعیین زمان و پهنای هم‌دوسی فراهم می‌کند. حل این تابع با اعمال شرایط تقریب میدان نزدیک و دور و تلاطم نوری ضعیف به صورت تحلیلی انجام پذیر است [۳-۵]. در این مقاله قصد داریم با استفاده از روش عددی که محدودیت‌های ذکر شده در روش تحلیلی را ندارد، انتشار باریکه‌های لیزری پالسی را در جو متلاطم مورد بررسی قرار دهیم.

## ۲- مدل سازی انتشار باریکه لیزر پالس کوتاه در جو متلاطم

یک پالس ورودی در صفحه فرستنده  $z = 0$  که در یک محیط کاتوره‌ای در فاصله‌ای به طول  $L$  از چشمه انتشار پیدا کرده است به صورت زیر نمایش می‌دهیم [۵].

$$p_i(t) = v_i(t) \exp(-i\omega_0 t) \quad (1)$$

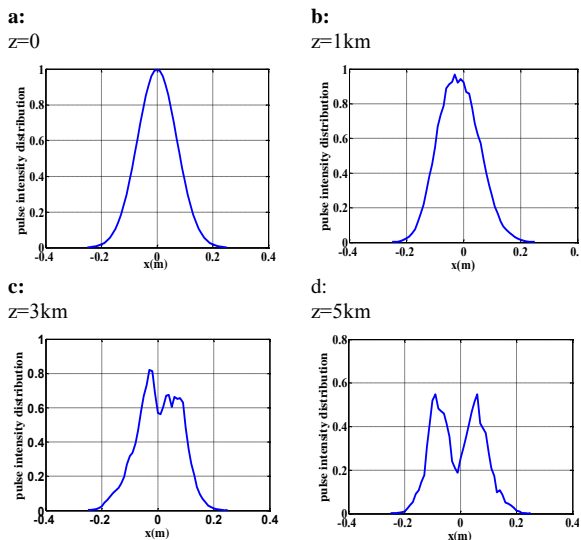
در این رابطه  $v_i(t)$  شکل پالس را نشان می‌دهد و  $\omega_0$  فرکانس حامل نامیده می‌شود. اگر پوش مختلط پالس در صفحه گیرنده به صورت  $v_o(t)$  نمایش داده شود، شکل پالس در صفحه گیرنده می‌تواند دارای توصیف مشابهی باشد.

$$p_o(t) = v_o(t) \exp(-i\omega_0 t) \quad (2)$$

شبیه‌سازی می‌شود [۷-۸]. تابع سیستم در بین لایه‌ها فقط دستخوش پراش آزاد می‌شود. تابع سیستم در نتیجه این صفحات فازی و پراش در هر لایه تغییر می‌نماید. با محاسبه این تابع و بهره‌گیری از معادله‌های ۵ و ۱۳ می‌توان توزیع شدت پالس لیزری را در صفحه گیرنده بدست آورد. به منظور بررسی تغییرات و گسترش فضایی یک موج گوسی در محیط کاتوره ای در حین انتشار در جو فرض می‌کنیم که توزیع فضایی و زمانی پالس به صورت گوسی است.

$$e(\vec{r}, z=0; t) = \exp\left[-\left(\frac{x^2}{2w_0^2} + \frac{t^2}{2T_0^2}\right)\right] \quad (14)$$

کمیت  $T_0$  نیم پهنا پالس در صفحه فرستنده است. اثر تلاطم نوری جو بر انتشار باریکه لیزری در شکل (۱) نشان داده شده است. در این شبیه‌سازی پارامترهای چشمه لیزری  $T_0 = 100 fs$ ,  $\lambda = 1.06 \mu m$ ,  $w_0 = 10 cm$  و  $C_n^2 = 1 \times 10^{-14} m^{-2/3}$ ,  $L_0 = 1 m$ ,  $l_0 = 5 mm$  مشخصات جو متلاطم در نظر گرفته شده‌اند.



شکل ۱: تغییرات توزیع شدت لحظه‌ای باریکه لیزری پالس کوتاه منتشر شده در جو متلاطم

همانگونه که از نمودارهای توزیع شدت لحظه‌ای فضایی پالس لیزری مشخص است، با انتشار پرتو لیزر در جو توزیع فضایی پرتو دستخوش تغییر می‌شود و با افزایش فاصله انتشار، پالس لیزری بیشتر تحت تاثیر جو قرار می‌گیرد. مقایسه بین انتشار باریکه لیزری پیوسته و پالسی در جو متلاطم براساس پارامترهای ذکر شده در

در شرایط آب و هوایی خشک است و به صورت زیر بیان می‌شود [۵]:

$$n(\vec{r}, z; \omega) = 1 + \frac{P_a}{T(z, \vec{r})} \left[ 77.6 + \frac{0.584}{\lambda_0^2} \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 \right] \quad (8)$$

در این رابطه  $\lambda_0$  طول موج برحسب میکرومتر،  $P_a$  فشار جو بر حسب میلی‌بار،  $T(z, \vec{r})$  دما بر حسب کلوین است.

با استفاده از تقریب پیرامحوری در رابطه (۱۳) و اینکه ضریب شکست هوا را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$n(\vec{r}, z; \omega) = \langle n(\omega) \rangle + \bar{n}(\vec{r}, z; \omega) \quad (9)$$

$$\bar{n}(\vec{r}, z; \omega) = \frac{P_a}{T(z, \vec{r})} \left[ 77.6 + \frac{0.584}{\lambda_0^2} \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 \right] \quad (10)$$

$$e(\vec{r}, z; \omega) = u(\vec{r}, z; \omega) \exp\left[i \frac{\omega}{c} \langle n(\omega) \rangle z\right] \quad (11)$$

معادله موج پیرامحوری در فضای فرکانس به صورت زیر بدست می‌آید.

$$2i \left(\frac{\omega}{c}\right) \frac{\partial u(\vec{r}, z; \omega)}{\partial z} + \nabla_{\perp}^2 u(\vec{r}, z; \omega) + 2 \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \bar{n}(\vec{r}, z; \omega) u(\vec{r}, z; \omega) = 0 \quad (12)$$

تابع همدوسی دو زمانه و دو موقعیتی پوش مختلط پالس در صفحه گیرنده به صورت میانگین آنسامل عبارت است از [۵-۶]:

$$R(\vec{r}_1, \vec{r}_1; z; t_1, t_2) = \langle v_o(\vec{r}_1, z; t_1) \times v_o(\vec{r}_2, z; t_2) \rangle \quad (13)$$

با در نظر گرفتن  $t_1 = t_2 = t$  و  $\vec{r}_1 = \vec{r}_2 = \vec{r}$  در رابطه (۱۳) شدت پالس لیزری در صفحه گیرنده بدست می‌آید.

### ۳- شبیه‌سازی عددی

برای حل معادله ۱۲ از روش عددی گام گسسته بهره گرفته شده است براساس این روش محیط انتشار لیزر به مجموعه‌ای از لایه‌ها با ضخامت مشخص  $\Delta z$  تقسیم بندی می‌گردد. هر لایه به وسیله صفحات فازی تلاطم نوری جو

این کمیت در شکل (۳) نشان داده شده است براساس این شبیه‌سازی در نتیجه تلاطم نوری جو پرتو بیش از میزان پراش در فضای آزاد، پهن می‌شود و بنابراین بیشینه چگالی انرژی در سطح هدف کاهش می‌یابد.

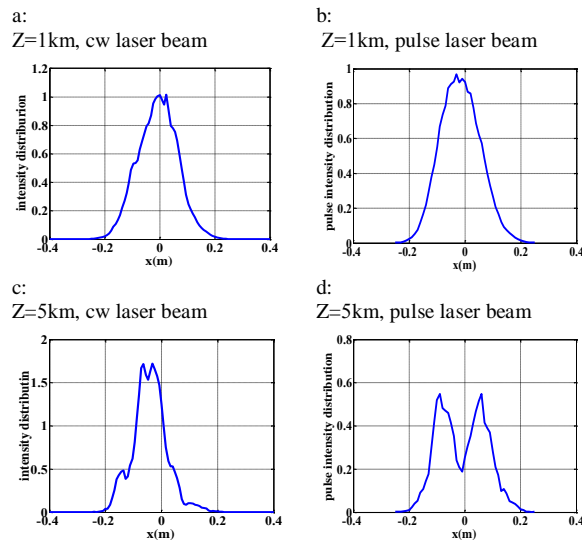
#### ۴- نتیجه‌گیری

انتشار باریکه لیزری پالس کوتاه در جو متلاطم با معرفی تابع سیستم جو مدل‌سازی شد. معادله موج پیرامحوری با استفاده از روش گام گسسته و صفحات فازی شبیه ساز تلاطم نوری جو، محاسبه گردید. توزیع شدت لحظه‌ای و چگالی انرژی متوسط فضایی باریکه لیزری با استفاده از تابع همدوسی دو زمانه و دو موقعیتی شبیه‌سازی شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که باریکه لیزری تحت تأثیر جو توزیع فضایی آن تغییر می‌کند با این وجود پالس لیزری در مقایسه با باریکه لیزری پیوسته کمتر تحت تأثیر جو قرار می‌گیرد.

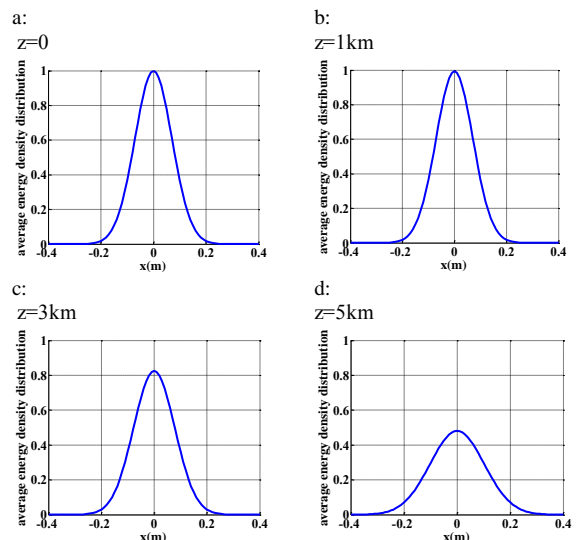
#### مراجع

- [1] G. P. Berman, A. R. Bishop, B. M. Chernobrod, D. C. Nguyen, and V. N. Gorshkov, "Suppression of intensity fluctuations in free space high-speed optical communication based on spectral encoding of a partially coherent beam", *Opt. Commun.*, pp.264-270, 2007.
- [2] J. C. Juarez, A. Dwivedi, A. R. Hammons, S. D. Jones, V. Weerackody, and R. A. Nichols, "Free-Space Optical Communications for Next-generation Military Networks", *IEEE Commun. Mag.* Vol. 44, No. 46, pp.46-51, 2006.
- [3] Ming Gao, Yan Li, Lei Gong, Hong Lv, "Pulse broadening and beam spread of polarized laser pulse beam on slant path in turbulence atmospheric", *Optik*. Vol. 216, pp.4651-4657, 2015.
- [4] Antonio Jurado-Navas, José María Garrido-Balsells, Antonio Puerta-Notario, "Numerical model for the temporal broadening of optical pulses propagating through weak atmospheric turbulence", *Optics Letters*. Vol. 34, No. 23, pp.3662-3664, 2009.
- [5] Larry C. Andrews, Ronald L. Phillips, *Laser Beam Propagation through Random Media*, SPIE Press, 2005.
- [6] Antonio Jurado-Navas, José María Garrido-Balsells, Miguel Castillo-Vázquez, and Antonio Puerta-Notario, "Numerical model for the temporal broadening of optical pulses propagating through weak atmospheric turbulence", *Opt Letters.*, Vol. 34, No. 23, pp.3662-3664, 2009.
- [7] Sedmak G., "Performance analysis of and compensation for aspect-ratio effects of fast-Fourier-transform-based simulations of large atmospheric wave fronts", *Applied Optics*. Vol.37, pp.4605-4613, 1998.
- [8] Carbillet M., Riccardi A., "Numerical modeling of atmospherically perturbed phase screens: new solutions for classical fast Fourier transform and Zernike methods", *Applied Optics.*, Vol.49, pp.47-51, 2010.

نمودارهای قبل در شکل (۲) نمایش داده شده است. براساس نتایج شبیه‌سازی در فواصل انتشار کوچک (یا به عبارت بهتر برای مقادیر کوچک واریانس ریتوف) تغییرات توزیع فضایی باریکه لیزری پالس و پیوسته یکسان است اما با افزایش فاصله انتشار (مقادیر بالاتر واریانس ریتوف) باریکه لیزری پیوسته در مقایسه با پالس لیزری بیشتر کانونی شده است و به عبارت دیگر پالس لیزری کمتر تحت تأثیر جو قرار می‌گیرد.



شکل ۲ تغییرات توزیع شدت لحظه‌ای باریکه لیزری پالس کوتاه و پیوسته منتشر شده در جو متلاطم



شکل ۳: تغییرات توزیع متوسط چگالی انرژی باریکه لیزری پالس کوتاه منتشر شده در جو متلاطم

یکی از پارامترهای مهم در بحث انتشار لیزرهای پالسی توزیع چگالی انرژی در سطح هدف است. تغییرات متوسط