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

انتشار لیزرهای پرتوان در جو

حسین صیام پور، نبی هادیلو، مهدی علوی نژاد

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

چکیده – روشی عددی برای شبیه‌سازی انتشار لیزرهای پرتوان در جو با در نظر گرفتن همدوسی فضایی لیزر، پدیده‌های خطی و پدیده غیرخطی شکوفه زنی حرارتی ارائه شده است. این روش شامل مجموعه‌ایی از صفحات فازی جهت شبیه‌سازی لیزرهای همدوس جزئی، مدل‌سازی اثرات ذرات معلق ،تلاطم نوری جو و شکوفه‌زنی حرارتی است. با بهره‌گیری از این روش می‌توان انتشار لیزر را در محیط‌های مختلف با توجه به پارامترهای اثر گذار، تحلیل و ارزیابی کرد.

کلید واژه- باریکه لیزر همدوس جزئی، تلاطم نوری جو ، جذب و پراکندگی، شکوفه‌زنی حرارتی، صفحات فازی

Propagation of high power laser beams through atmosphere

Hossein Siampoor, Naby Hadilou and Mahdi Alavinejad

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

Abstract- A numerical method for simulation of high power laser beams propagation through atmosphere has been presented under conditions that include spatial coherence of laser, linear phenomena and nonlinear thermal blooming. The simulation technique involves a sequence of phase screens for creating partially coherent beams and modeling effects of aerosol, optical turbulence and thermal blooming. The approach can be used to analysis and evaluate propagation of laser beam in different environments.

Keywords: Partially coherent laser beam, Atmospheric turbulence, Absorption & Scattering, Thermal blooming, Phase screens

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-14]

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

۱- مقدمه

جو زمین محیطی پیچده‌ایی است که بر انتشار باریکه لیزر و همچنین عملکرد بهینه سیستم‌های ارسال، دریافت و کنترل باریکه لیزر تأثیر زیادی می‌گذارد. هنگامی که باریکه لیزری در جو انتشار می‌یابد انحرافات کاتوره‌ای را به علت تلاطم نوری جو تجربه می‌کند که باعث رقص کاتوره‌ایی لکه پرتو لیزر در صفحه هدف، تغییر شکل و افزایش قطر پرتو بیش از میزان پراش در فضای آزاد می‌شود. پراکندگی به وسیله ذرات معلق نیز باعث تغییر شکل پرتو، پهن‌شدگی پرتو و همچنین کاهش توان ارسالی می‌شود. با افزایش توان لیزر پدیده شکوفه‌زنی حرارتی در نتیجه‌ی برهمکنش غیرخطی تابش لیزری با محیط انتشار پرتو بوجود می‌آید. در نتیجه این برهمکنش، بخشی از انرژی لیزر در نتیجه‌ی جذب کاهش پیدا می‌کند و منجر پهن‌شدگی، کاهش بیشینه شدت و خمیدگی در توزیع شدت باریکه لیزری می‌گردد. باریکه‌های لیزری در عمل همدوس جزئی هستند و در لیزرهای پرتوان بیشتر این موضوع اهمیت می‌یابد. از طرف دیگر کاهش همدوس فضایی لیزر به عنوان روشی جهت کاهش اثرات جو مورد توجه قرار گرفته است هر چند که در شرایط نوسانات ضعیف کارایی دارد. بررسی و شبیه‌سازی انتشار لیزر با در نظر گرفتن شرایط ذکر شده می‌تواند کمک خوبی جهت درک کاملتری از رفتار جو بر خصوصیات لیزر ارائه نماید.

۲- مدل سازی انتشار باریکه لیزر پر توان در جو

با در نظر گرفتن پدیده‌های خطی جذب و پراکندگی به وسیله مولکول‌ها و ذرات معلق، تلاطم‌نوری جو و پدیده غیرخطی شکوفه‌زنی حرارتی، انتشار باریکه لیزری در جو با استفاده از معادله موج پیرامحوری، به صورت زیر قابل توصیف است [۱]:

$$2ik\frac{\partial u}{\partial z}+\nabla_{\perp}^{2}u-k(\delta n_T+\delta n_{TB}+\delta n_A)+ik(\alpha)u=0 \qquad (۱)$$

در این رابطه $k=\frac{2\pi}{\lambda}$ عدد موج، $\nabla_{\perp}^{2}=\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial y^2}$ $\alpha=\alpha_a+\alpha_s$ ضریب میرایی جو، α_a ضریب جذب که به صورت حاصلجمع جذب ذرات معلق و مولکول‌ها تعریف می‌شود، α_s ضریب پراکندگی ذرات معلق و مولکول‌ها، $\delta n_T,\delta n_{TB},\delta n_A$ تغییرات ضریب شکست در نتیجه تلاطم‌نوری جو، پدیده شکوفه‌زنی‌حرارتی، و ذرات معلق است. u میدان چشمه لیزری همدوس جزئی است که در صفحه فرستنده به صورت زیر تعریف می‌شود [۲]:

$$u(x,y,z=0,t)=u_0(x,y,z=0,t)\times\exp[i\varphi(x,y,t)] \qquad (۲)$$

$u_0(x,y,z=0,t)$ میدان نوری منطبق با چشمه لیزری همدوس کامل و $\varphi(x,y,t)$ فاز کاتوره‌ای که از مدل GSM پیروی می‌کند و به صورت زیر تعریف می‌شود [۲]:

$$\varphi(x,y,t)=f(x,y)\otimes r(x,y,t) \qquad (۳)$$

در رابطه (۳) $\otimes$ بیانگر عملگر همپوشانی و $r(x,y,t)$ طرح کاتوره‌ای از اعداد بین صفر و یک و $f(x,y)$ تابع فاز کاتوره‌ای گوسی به صورت زیر است [۳]:

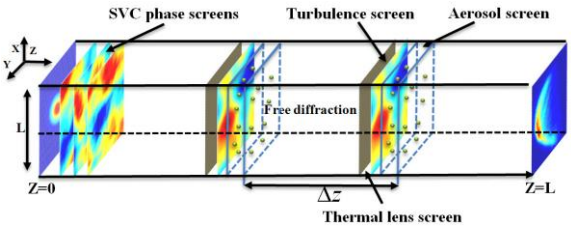
$$f(x,y)=\frac{1}{2\pi\sigma_f^2}\exp[-\frac{x^2+y^2}{\sigma_f^2}] \qquad (۴)$$

روش حل معادله انتشار لیزر در شکل (۱) شرح داده شده است در صفحه $z=0$ صفحه‌های فاز کاتوره‌ایی SVC که از رابطه (۳) پیروی می‌کند برای ایجاد چشمه لیزری همدوس جزئی قرار می‌گیرد. شبیه‌سازی انتشار باریکه لیزری همدوس جزئی در جو براساس تقسیم محیط انتشار لیزر به مجموعه‌ای از لایه‌ها با ضخامت مشخص Δz صورت می‌پذیرد. هر لایه به وسیله صفحات فازی تلاطم نوری جو، شکوفه‌زنی حرارتی و اثر فازی ذرات معلق شبیه‌سازی می‌شود. و میدان لیزری در بین لایه‌ها فقط دستخوش پراش آزاد می‌شود. میدان چشمه نوری در نتیجه این صفحات فازی و پراش در هر لایه تغییر می‌نماید.

تلاطم نوری جو که به صورت افت وخیزهای کاتوره‌ایی در ضریب شکست جو تعریف می‌شود باعث تغییر توزیع شدت، پهن‌شدگی پرتو، رقص‌پرتو، چشمک‌زنی و... می‌شود. جهت شبیه‌سازی آن برای هر لایه یک صفحه فاز کاتوره‌ای منطبق با اغتشاشات فاز ایجاد شده در حین

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-14]

انتشار در نظر می‌گیریم که از مدل طیف فون کارمن تبعیت می‌کند[۵-۴].

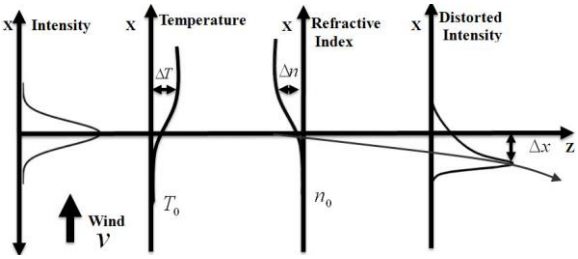


شکل ۱: مدل شماتیک روش تقسیم محیط انتشار لیزر در جو با چشمه لیزری همدوس جزئی

با افزایش توان لیزر به دلیل پدیده جذب ناشی از مولکول‌ها و ذرات معلق، بخشی از انرژی لیزر به وسیله‌ی محیط جذب می‌شود. این انرژی جذب شده، محیط انتشار لیزر را گرم می‌کند و باعث یک افزایش فشار کوچک موضعی می‌شود. در نتیجه چگالی موضعی محیط کاهش می‌یابد، ضریب شکست موضعی محیط انتشار لیزر نیز که متناسب با چگالی است نیز دستخوش تغییر شده و این دگرگونی ضریب شکست همانگونه که در شکل (۲) نشان داده شده است باعث اعوجاج، پهن‌شدگی، کاهش بیشینه شدت و خمیدگی در توزیع شدت باریکه لیزری می‌شود. ارتباط بین ضریب شکست و چگالی محیط به صورت زیر تعریف می‌گردد. [۶]:

$$n = n_0 + (n_0 - 1) \times \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \qquad (۵)$$

در رابطه(۵) n_0 ضریب شکست هوا و ρ_0 چگالی هوا در شرایط استاندارد جهانی است.



شکل ۲: طرح شماتیک پدیده شکوفه‌زنی گرمایی در یک بعد

بررسی پدیده شکوفه‌زنی حرارتی نیازمند حل معادله هیدرودینامیک است که به صورت زیر قابل توصیف است [۶-۷]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + v\frac{\partial \rho}{\partial x} = -\frac{\gamma - 1}{c_s^2}\alpha_a I \qquad (۶)$$

که در این رابطه c_s سرعت انتشار صوت در جو و v سرعت وزش باد در امتداد محور x است.

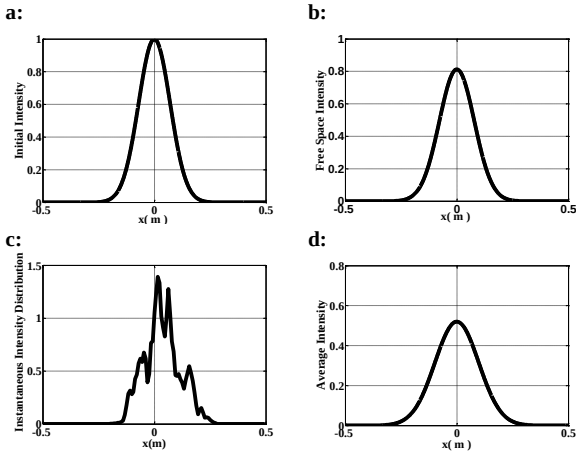
هنگامی که لیزر در یک محیط شامل ذرات معلق انتشار می‌یابد دستخوش پراکندگی چندگانه می‌شود به عنوان یک اثر از این پراکندگی چندگانه، توزیع شدت اولیه دچارگسترش زاویه‌ایی و فضایی می‌شود. شبیه‌سازی اثر ذرات معلق براساس تولید صفحه‌های فازی است که با استفاده از تابع فاز گوسی ایجاد می‌شود. این تابع فازی منجر به ایجاد یک گسترش زاویه‌ایی باریکه لیزری در نتیجه پراکندگی به وسیله ذرات معلق می‌شود که به صورت زیر بدست می‌آید[۹-۸]:

$$\theta_a^2 = \frac{\tau}{3}\left\langle \theta^2 \right\rangle \qquad (۶)$$

پارامتر $\left\langle \theta^2 \right\rangle$ میانگین مربعی زاویه پراکندگی ایجاد شده توسط ذرات معلق بوده و تحت تقریب پراکندگی زاویه‌ایی کوچک بدست می‌آید.

۳- شبیه‌سازی عددی

اثر تلاطم نوری جو بر انتشار باریکه لیزری همدوس جزئی با نمایه گوسی در یک بعد و بدون در نظر گرفتن سایر پدیده‌ها در شکل (۳) نشان داده شده است.

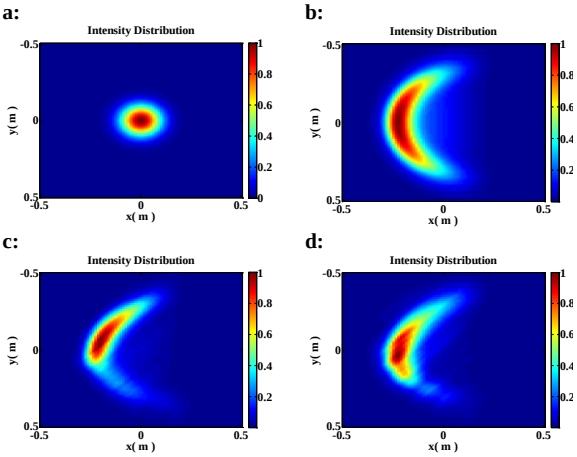


شکل ۳: انتشار باریکه لیزری همدوس جزئی در جو متلاطم

در این شبیه‌سازی پارامترهای چشمه لیزری $w_0 = 10cm$ $\sigma_0 = 1cm, \lambda = 532nm$ و مشخصات جو متلاطم

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-14]

در $z = 4km, C_n^2 = 1\times10^{-14} m^{-2/3}, L_0 = 1m, l_0 = 5mm$ نظر گرفته شده است. شکل a توزیع شدت در صفحه فرستده و شکل b تغییر توزیع شدت در حالت انتشار در فضای آزاد را نشان می‌دهد. شکل‌های c و d به ترتیب نشان دهنده تغییر توزیع شدت لحظه‌ایی و توزیع شدت میانگین پرتو لیزر منتشر شده در جو متلاطم است. به خوبی دیده می‌شود که تلاطم نوری جو باعث تغییر توزیع شدت باریکه لیزری (شکلc) و همچنین پهن شدگی پرتو بیش از مقدار پراش در فضای آزاد (با مقایسه شکل b و d) شده است.



شکل ۴: تغییرات توزیع شدت باریکه لیزری پر توان منتشر شده در جو با در نظر گرفتن پدیده های مؤثر جو و چشمه لیزری

با در نظر گرفتن سایر پدیده‌های اثر گذار بر انتشار پرتو می‌توان شبیه‌سازی بهتر و در نتیجه درک کاملتری از رفتار جو بدست آورد. شکل (۴) انتشار باریکه لیزری با طول موج $\lambda = 10.6\mu m$ و توان $p = 50kw$ را در جوی با $\alpha = 6.5\times10^{-2} km^{-1}$ نشان می‌دهد سایر پارامترهای مرتبط با چشمه لیزری و جو همانند شکل (۳) است. شکل a توزیع شدت در صفحه فرستده را نشان می‌دهد. اثر پدیده شکوفه زنی حرارتی در شکل b نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که در نتیجه این پدیده توزیع شدت پرتو تغییر کرده و در خلاف جهت وزش باد خمیده می‌شود. اثر تلاطم نوری جو علاوه بر شکوفه زنی در شکل c و اثر ذرات معلق به همراه پدیده‌های دیگر در شکل d لحاظ شده است. به خوبی دیده می‌شود که تلاطم نوری جو و ذرات معلق باعث تغییر توزیع شدت باریکه لیزری شده‌اند. اهمیت اثر گذاری پدیده‌های مختلف بر انتشار لیزر به محیط انتشار و همچنین به مشخصات لیزر وابسته است. بر این اساس اثر تلاطم نوری جو با افزایش طول موج لیزر کاهش می‌یابد در حالی که اثر شکوفه‌زنی حرارتی با افزایش طول موج لیزر بیشتر نمود پیدا می‌کند.

۴- نتیجه‌گیری

با در نظر گرفتن پدیده‌های خطی جذب و پراکندگی، تلاطم‌نوری جو و پدیده غیرخطی شکوفه‌زنی حرارتی، انتشار باریکه لیزری پرتوان و همدوس جزئی در جو مدل‌سازی گردید. با استفاده از این روش می‌توان انتشار لیزر را در شرایط متفاوت محیطی و آب و هوایی مدل‌سازی کرد. همچنین انتشار باریکه‌های لیزری با نمایه‌ها و همدوسی فضایی خاص را شبیه‌سازی کرد.

مراجع

[1] Sprangle S., Renano J.R., Ting A., Hafizi B., and Gordon D.F., *Propagation of short, high-intensity laser pulses in Air*, **J. Dir. Energy.** 73 (2003).

[2] Ricardo B., Federico D., *Exponentiated weibull fading model for free-space optical links with partially coherent beams under aperture averaging*, **Optical Engineering.** 52 (2013).

[3] Xiao X., Voelz D., Wave optics simulation approach for partial spatially coherent beams, **Optics Express.** 14 (2006) 6986-6992.

[4] Sedmak G., *Performance analysis of and compensation for aspect-ratio effects of fast-Fourier-transform-based simulations of large atmospheric wave fronts*, **Applied Optics.** 37 (1998) 4605-4613.

[5] Carbillet M., Riccardi A., *Numerical modeling of atmospherically perturbed phase screens: new solutions for classical fast Fourier transform and Zernike methods*, **Applied Optics.** 49 (2010) 47-51.

[6] Youkuan Y., Donquan C., Xislien X and Xinwei Z., *Numerical simulation of thermal blooming in atmospheric laser propagation*, **Atmospheric Propagation and Remote Sensing.** (1993) 424-434.

[7] Chun-ping Y., Yan Z., Mei-lin K., Jing G., Wu-guang H., Jian W., *Numerical Simulation for Effects of High-Power laser propagation atmosphere over land*, **Proc. of SPIE,** (2011).

[8] Ishimaru A., *Wave propagation and scattering in random media*, Academic Press, (1978).

[9] Deepak, A.; Zardecki, A.; Farrukh, U.; Box, M. A., *Multiple scattering effects of laser beams traversing dense aerosols*, **VA: Spectrum Press**. 1982.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-14]