بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

طراحی و ساخت محفظه شبیه ساز تلاطم جوی و ایجاد طیف کلموگروف در آزمایشگاه

سید ایوب موسوی، حسین صیام پور، رضا ترابی و علی اصغر عسکری

پژوهشکده اپتیک و لیزر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان

چکیده – به منظور بررسی اثر واپیچش های جوی بر روی باریکه لیزری همدوس، یک محفظه‌ی ایجاد تلاطم مصنوعی در محیط آزمایشگاه طراحی و پس از شبیه سازی های اولیه ساخته شد. همگنی و همسانگردی تلاطم ایجاد شده را مورد مطالعه قرار دادیم. از آنجا که تلاطم ایجاد شده در لایه‌های جوی از طیف کلموگروف تبعیت می‌کند، طیف تلاطم ایجاد شده درون محفظه بررسی شد و مشخصه‌های تلاطم از قبیل ثابت ساختار و مقیاس داخلی و خارجی تلاطم از روش نوسانات زاویه فرود جبهه موج اندازه گیری شد و با شبیه سازی های تئوری مورد مقایسه قرار گرفت.

کلید واژه- انتشار لیزر، تلاطم جوی، طیف کلموگروف

Design and Construction of atmospheric turbulence simulator and creation of Kolmogorov spectrum

Seyed Ayoob moosavi, Hossein siampour, Reza Torabi, Ali Asghar Askari

Iran, Isfahan, Malek Ashtar University of Technology, Faculty of Optics and Laser

Abstract- In order to investigate the effects of atmospheric Turbulence on laser beam, after simulations a laboratory turbulence chamber is designed and constructed. Homogeneity and isotropy of artificial turbulence has been studied. Since the atmospheric turbulence follows the Kolmogorov spectrum in layers above the earth, the spectrum and characteristic of artificial turbulence such as index of refraction, inner scale and outer scale of fluctuations is measured with variance of angle of arrival method. The results are compared with theorical simulations.

Keywords: Laser propagation, Atmospheric Turbulence, Kolmogorov spectrum

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]

۱- مقدمه

تلاطم و میرایی دو عامل اثر گذار در انتشار پرتو لیزر در جو می‌باشند. بررسی این اثرات و تصحیح آن‌ها نیازمند شناخت جو و بررسی اثرات آن بر روی باریکه نوری است. انجام آزمایش‌ها در فضای آزاد به علت مواجه بودن با مسافت های طولانی افقی و عمودی و حمل و نقل تجهیزات اپتیکی دارای مشکلات عدیده ای است. از طرفی برای بدست آوردن داده‌های معتبر لازم است آزمایش‌ها به صورت تکرارپذیر انجام شود و یا گاهاً ملزم به ثابت نگه داشتن چند مؤلفه و بررسی یک یا دو متغیر است در حالی که در آزمایش های جو آزاد به علت عدم کنترل بر شرایط جوی، این امر امکان پذیر نیست؛ لذا قبل از هرگونه چیدمان فضای آزاد، شبیه سازی تلاطم جوی در آزمایشگاه بسیار مفید است [۱]. شبیه سازهایی مانند صفحات فازی[1] یا SLM[2] ها نیز به علت سرعت پایین و عدم ایجاد اختلاف راه نوری کافی ممکن است نتایج مطلوبی نداشته باشند [۲]. در نتیجه استفاده از محفظه‌های ایجاد تلاطم دینامیک به وسیله هوای داغ، با انعطاف پذیری کافی در تغییر پارامترها یکی از بهترین انتخاب‌ها در این زمینه از انتشار پرتو است.

۲- تئوری ساخت

به منظور مدل سازی جو واقعی در یک محفظه مسلماً نیاز به سنجش و یکسان سازی معیارها و پارامترهایی که مشخص کننده‌ی رفتار و ویژگی های جو و چشمه لیزری است می‌باشیم. مهم‌ترین این معیارها عبارتند از [۳]:

۱- طول محفظه نسبت به طول پراش باریکه لیزر در محفظه بایستی با نسبت به طول مسیر در جو نسبت به طول پراش اتمسفر یکسان باشد.

$$(\frac{l}{l_d})_{cell} = (\frac{Z}{Z_d})_{atmosphere} \qquad (۱)$$

۲-پارامتر اعوجاج غیرخطی تحت شرایط آزمایشگاهی و جو واقعی بایستی برابر باشد $N_{c_{cell}} = N_{c_{freespace}}$

۳-واریانس ریتو جو واقعی و محفظه‌ی آزمایشگاهی بایستی برابر باشد. $\sigma^2_{R_{cell}} = \sigma^2_{R_{atmosphere}}$

$$\sigma_R^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} Z^{11/6} \qquad (۲)$$

افت و خیز های شدت دریافتی در گیرنده به علت انتشار در جو متلاطم را با پارامتر واریانس ریتو مشخص می‌کنند. اگر $\sigma_R^2 < 1$، افت و خیز را ضعیف و $\sigma_R^2 > 1$ را به افت و خیز قوی نسبت می‌دهند.در رابطه فوق C_n^2 ثابت ساختار ضریب شکست و معیاری از نوسانات ضریب شکست را نشان می‌دهد.

به عنوان مثال اگر مقدار پارامتر C_n^2 در نزدیکی سطح زمین از مرتبه $10^{-14}(m^{-2/3})$ باشد برای طول موج ۵۳۲ نانومتر برای شبیه سازی پارامتر ریتو در طول مسیر انتشار یک متری، بایستی تلاطم مصنوعی شدیدی از مرتبه $10^{-9}(m^{-2/3})$ را تولید کرد.

$$C_n^2 = (79\times10^{-6}\frac{p}{T^2})^2 C_T^2 \qquad (۳)$$

$$D_T(R) = \left[T_1(\vec{R}_1) - T_1(\vec{R}_1+\vec{R})\right]^2 = C_T^2 R^{\frac{2}{3}}, l_0 \ll R \ll L_0 \qquad (۴)$$

$$C_T = \sqrt{\delta T^2} R^{-\frac{1}{3}} \qquad (۵)$$

طبق روابط بین ثابت ساختار جو و ثابت ساختار دمایی می‌توان میزان تغییرات ثابت ساختار را بر حسب اختلاف دمای بین توده‌های سرد و گرم تلاطم محاسبه کرد[۴]. در روابط فوق R، فاصله بین منبع گرم و سرد هوا بر حسب متر ، δT اختلاف دما و P, T, C_T^2 به ترتیب ثابت ساختار دمایی، دما و فشار هستند.

جهت اندازه گیری پارامترهای اغتشاش از قبیل مقیاس داخلی (l_0)، مقیاس خارجی (L_0) و پارامتر ثابت ساختار ضریب شکست فرض می‌شود که طیف توان از طیف فون کارمن تعمیم یافته که شکل تعمیم یافته‌ی طیف کلموگرف است تبعیت می‌کند. این مدل طیفی بر روی تمام گستره فرکانس فضایی معتبر است و به صورت زیر تعریف می‌شود

$$\Phi_n(\kappa) = 0.033 c_n^2 \frac{\exp\left(-K^2/K_M^2\right)}{\left(K^2+K_0^2\right)^{11/6}}, 0 \ll \kappa \ll \infty \qquad (۶)$$

در رابطه فوق $k_m = 5.92/l_0$ و $k_0 = 2\pi/L_0$ است. این مدل در شرایط حدی تبدیل به طیف مدل کلموگروف می‌شود. پس کافیست از یک طرف با استفاده از این مدل طیفی و محاسبه واریانس تغییرات طیف توان و از طرف

[1] Phase screens
[2] Spatial Light Modulator

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]

دیگر محاسبه واریانس شدت زاویه نور فرودی در صفحه گیرنده پس از عبور از محفظه دست به مقایسه نتایج زد.

$$\sigma^2=1.19C_n^2\delta h\int_0^\infty f^{3}(f^{2}+\frac{1}{L_0^{2}})^{-11/6}\exp(-l_0^2f^{2})df \qquad (۷)$$

که در رابطه فوق δh ضخامت لایه و f فرکانس فضایی است. حل انتگرال فوق پیچیده است لذا بایستی آنرا بصورت عددی حل کرد. در حالات حدی زمانی که مقیاس کوچک به سمت صفر و مقیاس بزرگ به سمت بینهایت میل کند رابطه فوق دارای حل تحلیلی زیر است .

$$\sigma^2 = 2.8375C_n^2\delta hD^{-1/3} \qquad (۸)$$

طبق رابطه (۸) ، واریانس زاویه فرود با افزایش قطر روزنه پرتو فرودی با ضریب $D^{-1/3}$ کاهش می‌یابد. حال اگر اثرات مقیاس داخلی و خارجی تلاطم را در نظر بگیریم رابطه انتگرالی (۷) تابعی از L_0, l_0 ، قطر پرتو و $C_n^2\delta h$ شده و با تقسیم واریانس زاویه فرود جبهه موج پرتو به واریانس جبهه موج کمترین مقدار قطر پرتو پارامتر $C_n^2\delta h$ حذف می‌شود[۴].

$$\sigma^2_{normal}\left(L_0,l_0,w\right)=\frac{\sigma_\alpha^2\left(L_0,l_0,w\right)}{\sigma_\alpha^2\left(L_0,l_0,w_{\min}\right)} \qquad (۹)$$

مقایسه با منطبق کردن نمودار واریانس زاویه فرود حاصل از اندازه گیری بر حسب قطر پرتو و نمودارهای حاصل از رابطه فوق صورت می‌گیرد. در بخش نتایج تجربی، نمودارهای بدست آمده را شرح خواهیم داد.

۳- مشخصات محفظه

در شکل(۱) نمای کلی از اجزای محفظه‌ی طراحی شده را مشاهده می‌کنید. ابعاد محل تلاطم یا همان منطقه فعال محفظه 25×25×100cm است و در دو طرف محفظه دمنده‌هایی با قابلیت کنترل سرعت تعبیه شده‌اند. در جلوی یک ردیف از دمنده‌ها هیترهایی برای تولید هوای داغ قرار دارد که این هیترها قابلیت تولید هوای گرم تا ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد را دارند.

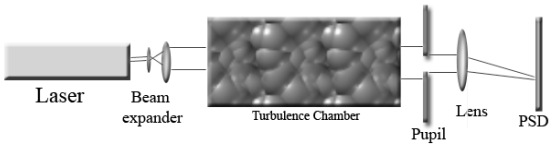
به منظور دمش به صورت همگن، در جلوی دمنده‌ها توری‌هایی با مش‌های خاص قرار دارد و در دو انتهای محفظه دو پنجره برای خروج هوا و دو پنجره هم در دو طرف محفظه برای عبور باریکه لیزری قرار داده شده است.



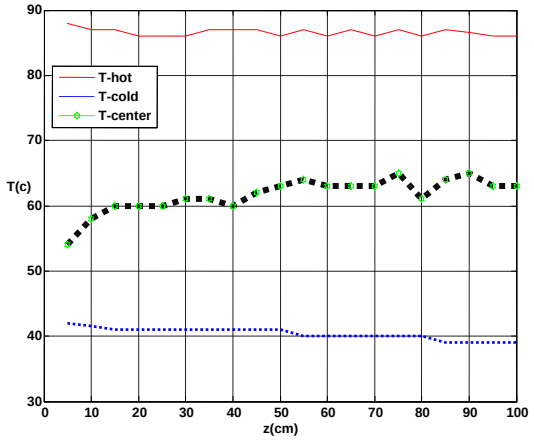
شکل (۲) نمونه ساخته شده از محفظه شبیه ساز تلاطم جوی در آزمایشگاه انتشار پرتو لیزر در جو

۳-۱- نتایج تجربی

برای انجام آزمایشات تجربی از یک لیزر He-Ne با توان ۵ میلی وات با قطر پرتوی $0.88mm$ استفاده شد. با استفاده از یک پرتو گستر پرتو نور تا قطر ۲ سانتی متر پهن کردیم. نمایی از چیدمان آزمایش را در شکل (۳) مشاهده می‌کنید. با استفاده از یک PSD[۳] نوسانات زاویه‌ی فرود پرتو با نرخ ۳ کیلو هرتز ثبت شد . از آنجا که در فرضیات اولیه‌ی طیف کلموگروف، جو را به صورت موضعی همگن و همسانگرد در نظر می‌گیرند لازم بود تا همگنی و همسانگردی کلی محفظه را بررسی می‌کردیم[۵].



شکل (۳) چیدمان تعیین طیف تلاطم محفظه و محاسبه C_n^2



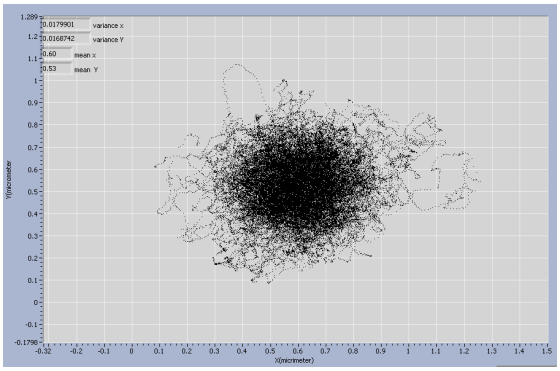
شکل (۴) نمودار تغییرات دما در طول محفظه در ورودی قسمت گرم و سرد و وسط محفظه (جایی که پرتو عبور می‌کند).

در شکل (۴) نمودار تغییرات دما در طول پرتو را مشاهده

[3] Position sensing Detector

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]

می‌کنید. دما توسط دماسنج های نقطه ای در تمام حجم محفظه بررسی شد. همان‌طور که از دادهای تغییرات دمایی مرکز باریکه لیزری دیده می‌شود در فاصله ۱۰۰-۱۵سانتی متری محفظه انتشار، تغییرات دمایی ناچیز است، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که محفظه در طول مسیر انتشار لیزر تقریباً همگن است. همسانگردی تلاطم ایجاد شده در داخل محفظه انتشار با بررسی واریانس نوسانات زاویه فرود جبهه موج در امتداد محور x و y قابل محاسبه خواهد بود (شکل ۵). نسبت مقادیر واریانس زاویه فرود، $\sigma_x^2/\sigma_y^2 \approx 0.90$، برای قطر های مختلف روزنه و در دمای ثابت نشان می‌دهد که محفظه انتشار حداقل در ناحیه‌ای به اندازه قطر باریکه لیزری تقریباً همسانگرد است.

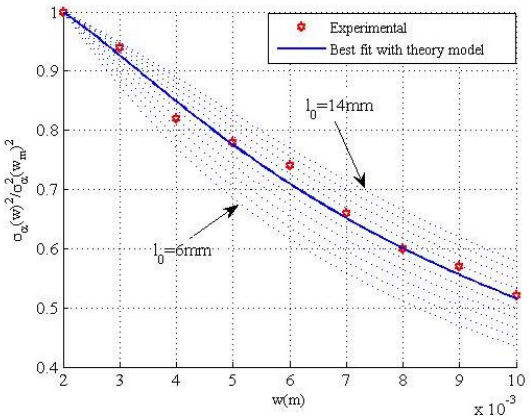


شکل (۵) ثبت تغییرات محل فرود جبهه موج در نمودار XY در بازه ۳۰ ثانیه با فرکانس نمونه برداری ۳ کیلو هرتز

در شرایط شبیه سازی آزمایشگاهی با پارامترهای جدول (۱) و با تحلیل نوسانات زاویه فرود بر حسب قطرهای مختلف پرتو و مقایسه تغییرات طیف توان، همان‌طور که از منحنی های شکل(۶) بر می‌آید میزان C_n^2 و مقیاس-های داخلی و خارجی $l_0 = 10 \pm 2mm$ $L_0 = 300 \pm 100mm$ بدست می‌آید. با جایگذاری مقادیر مقیاس درونی و بیرونی تلاطم در رابطه (۷) و قطر روزنه $w = 2mm$ ، مقدار پارامتر $C_n^2 = 3.8\times10^{-8} m^{-2/3}$ بدست می‌آید که چند مرتبه از تلاطم شدید، قویتر است.

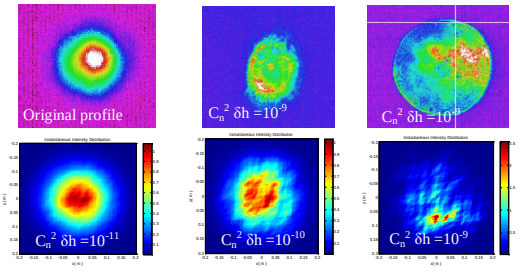
جدول -۱ پارامترهای شبیه سازی اغتشاش

length	1m
width	25cm
height	25cm
P	1000mb
T	334k
T_c	314k
T_H	359k



شکل (۶) واریانس بهنجار شده بر حسب قطر پرتو. منحنی های نقطه چین مربوط به حل انتگرال تئوری بر حسب l_0 و L_0 های متفاوت

تغییرات توزیع شدت در پروفایل باریکه لیزر با $C_n^2\delta h$ رابطه دارد بنابراین پروفایل باریکه لیزر پس از انتشار ده کیلومتر در جو متلاطم ($C_n^2\delta h = 10^{-13}\times10^4 m$) بایستی با پروفایل خروجی محفظه ($C_n^2\delta h = 10^{-9}\times1m$) از لحاظ میزان توزیع شدت ظاهری شباهت داشته باشد. خلاصه ای از این بررسی ها را در شکل(۷) مشاهده می کنید.



شکل(۷)ردیف اول:پروفایل لیزر بدون تلاطم و با حضور تلاطم در محفظه. ردیف دوم :پروفایل شبیه سازی شده در تلاطم های مختلف.مشاهده می‌شود که پروفایل شبیه سازی شده آخر($C_n^2\delta h = 10^{-9}$) با پروفایلهای محفظه مطابق است.

۴- نتیجه گیری

تبعیت از قانون طیف کلموگروف و همگنی و همسانگردی محفظه‌ی طراحی شده به اثبات رسید و از این محفظه می‌توان برای انجام شبیه سازی اثر تلاطم جوی و همچنین کاربردهای اپتیک تطبیقی استفاده کرد.

۵- مراجع

[1] H. Le-Minh, et al ”Experimental Study of Bit Error Rate of Free Space Optics Communications in Laboratory Controlled Turbulence” IEEE 978-1-4244-8865-0/10/26. 00, 2010

[2] Michael E. Thomas"Optical Propagation in Linear Media "ISBN-13 978-0-19-509161-8, 2006, Oxford Uni Press.

[3] N. G. Mel’nikov, V. M. Sazanovich, "Laboratory Modeling of Laser Radiation Propagation in a Turbulent Atmosphere", 2009, Vol. 22, No. 6, pp. 595–606

[4] E. Masciadri and J. Vernin" Optical technique for inner-scale measurement ”APPLIED OPTICS، Vol. 36, No. 6. 20 February 1997

[5] L. C Andrews “Laser beam propagation through random media” ISBN 9780819459480, SPIE Press, 2005

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]