بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۲-۱۴ بهمن ۱۴۰۰

طراحی و ساخت نمونه عملیاتی دستگاه اندازه‌گیری پارامترهای تلاطم جوی براساس انحراف‌سنجی ماره‌ای

محسن دشتی

گروه فیزیک، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران

Email: dashti.iauz@gmail.com

چکیده – در سالهای اخیر چیدمانهای آزمایشگاهی مبتنی بر روش انحراف سنجی ماره‌ای برای اندازه‌گیری‌های تلاطم جوی معرفی شده‌اند. از مزایای این روش اجرای ساده و ارزان بودن آن است. در این مقاله دستگاهی مبتنی بر این روش برای اندازه‌گیری پارامتر فرید r_0 و ثابت ساختار ضریب شکست جو C_n^2 معرفی می شود. این پارامترها معیاری از شدت تلاطم جو می باشند، دستگاه به راحتی قابل حمل و تنظیمات آن بسیار ساده است. برنامه ای در نرم افزار MATLAB در قالب GUI نوشته شده کار با آن را برای اشخاص مختلف آسانتر می‌کند.

کلید واژه- انحراف‌سنجی، تلاطم، ماره.

Design and fabrication of an operational system for the atmospheric turbulence measurements based on moiré deflectometery

Mohsen Dashti

Department of Physics, Zanjan Branch, Islamic Azad university, Zanjan, Iran

Email: dashti.iauz@gmail.com

Abstract- In recent years, experimental setups based on moiré deflectometry have been introduced to measure the atmospheric turbulence parameters. The advantages of this method are its simplicity and cheapness. In this paper, a device based on this method is introduced to measure the Fried parameter r_0 and the refractive index structure constant, C_n^2. These parameters are a measure of the intensity of atmospheric turbulence. A program written in MATLAB software in the form of a GUI makes it easier for different people to work with it.

Keywords: Deflectometry, Moiré, Turbulence.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-01]

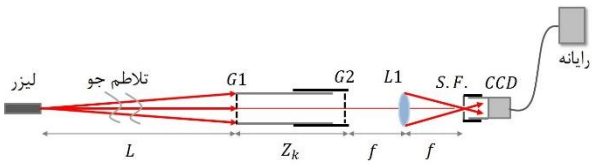
مقدمه

همراه شدن افت و خیزهای دما و فشار با حرکت باد، منشأ تلاطم در جو است. تغییرات تصادفی ضریب شکست جو که از آن به عنوان تلاطم اپتیکی یاد می‌شود، ناشی از همین افت و خیزهاست. توزیع تصادفیِ مکانی و زمانی ضریب شکست تغییراتی را در باریکه‌ی نور عبوری از جو ایجاد می‌کند که خود را به صورت افت و خیزهای زمانی شدت و فاز جبهه‌ی موج باریکه‌ی نور نشان می‌دهد. این امر موجب می‌شود که وضوح تصاویر ثبت شده از اجسام موجود در محیط متلاطم کاهش یابد. هر چه تلاطم شدیدتر باشد تغییرات ضریب‌شکست نیز با شدت بیشتری اتفاق می‌افتند. شدت تلاطم اپتیکی با پارامتری به نام ثابت ساختار ضریب شکست، Cn^2، سنجیده می‌شود. بطور کلی این پارامتر تابع زمان و مکان و شرایط جوی است. در نزدیکی سطح زمین مقدار این پارامتر معمولاً از 10^{-12} برای تلاطم‌های شدید تا مقدار 10^{-16} برای تلاطم‌های ضعیف تغییر می‌کند. مقادیر بزرگ Cn^2، 10^{-13} یا بیشتر، نشان دهنده‌ی یک تلاطم قوی بوده و معمولاً در طول یک روز صاف می‌تواند وجود داشته باشد. در این مقدار تلاطم بالای سطح زمین آسفالته به حالت موجی دیده شده و اعوجاج در تصاویر ثبت شده از اجسام در این حالت به وضوح خود را نشان می‌دهند.

وقتی نور از جو متلاطم شامل بسته‌های هوای با ضریب شکست مختلف و متغیر عبور می‌کند، قسمت‌های مختلف جبهه‌ی موج نور دچار تأخیر فاز نسبت به هم می‌شوند که بصورت آشفتگی جبهه‌ی موج و شکسته شدن آن در قسمت‌های مختلف ظاهر می‌شود. طول متوسطی از جبهه‌ی موج که هنوز تخت باقی مانده است به عنوان پارامتر فرید r_0، تعریف می‌شود. واریانس فاز جبهه موج دراین قسمت در حدود یک رادیان بوده و نیازی چندانی برای اصلاح جبهه‌موج در آن وجود ندارد. چون مقدار فاز در این طول از جبهه‌ی موج قابل پیش‌بینی است، پارامتر فرید را طول همدوسی جو نیز می‌نامند. تاکنون روشهای مختلفی برای اندازه گیری پارامترهای شدت تلاطم استفاده شده است. در یکی از روشها با اندازه‌گیری افت و خیز دما، ثابت ساختار ضریب شکست تعیین می شود [۱]. در روشی موسوم به DIMM با تعیین همبستگی افت و خیز زاویه نور ورودی به تلسکوپ، پارامتر فرید و Cn^2 محاسبه می‌شود [۲]. در سال ۲۰۰۸ رسولی و توسلی بر اساس انحراف‌سنجی ماره‌ای چیدمانی مطابق شکل۱ برای اندازه‌گیری ثابت ساختار ضریب‌شکست جو متلاطم معرفی کردند. مطابق شکل باریکه‌ی نور لیزر پس از عبور از یک فیلتر شدت، D.F.، و پیمودن مسافت L در جو متلاطم، سطح توری اول G^1، را روشن می‌کند. توری دوم G^2 که فاصله‌ی آن از توری اول قابل تنظیم است در یکی از فواصل تالبوت Z_k قرار می‌گیرد تا طرح ماره تشکیل شود. افت و خیزهای تصادفی ضریب شکست منجر به تغییرات تصادفی زاویه ورود پرتوها درسطح توری اول می‌شود که اثر خود را به صورت جابجایی‌های تصادفی فریزهای ماره نمایان می‌کند. عدسی L^1 تبدیل فوریه طرح ماره را در کانون خود تشکیل می‌دهد. یک پالایه‌ی فضایی،S.F، فرکانس‌های مزاحم را در محل کانون حذف می‌کند. یک CCD درست بعد از پالایه‌ی فضایی قرار گرفته تا فریزهای ماره را در یک بازه‌ی زمانی معین ثبت کرده و به رایانه منتقل کند [۳].

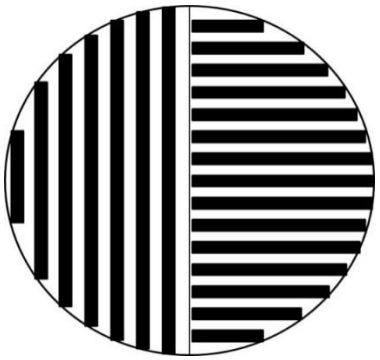
چیدمان دستگاه

برای اینکه بتوانیم هم در راستای افقی و هم در راستای قائم از افت و خیزهای ضریب شکست جو اطلاعاتی داشته باشیم، مانند شکل ۲ توریهایی از نوع رانکی طراحی کردیم که در نصف دهانه ورودی دستگاه راستای خطوط آن افقی و در نصف دیگر دهانه راستای خطوط آن قایم باشد. برای انجام این کار ابتدا نقش توری‌ها با نرم افزار MATLAB رسم شده و سپس نقشهای بدست آمده در مراکز لیتوگرافی بر روی طلق‌های شفاف با دقت بالایی در حدود ۳۶۰۰ نقطه در اینچ به چاپ رسید.



شکل ۱: چیدمان رسولی و توسلی برای اندازه‌گیری شدت تلاطم [۱]

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-01]



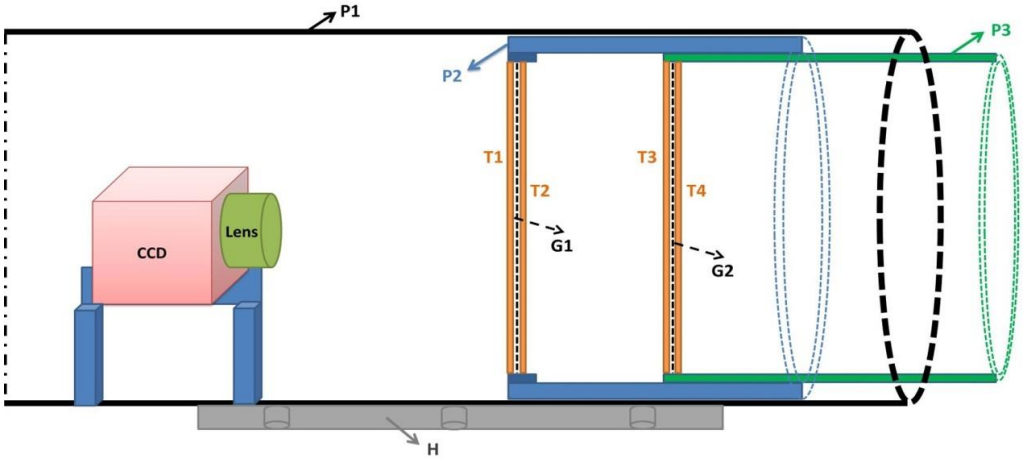
شکل ۲: طرح خطوط توری های مورد استفاده در دستگاه

در شکل ۳ طرحی از دستگاه ترسیم شده است. با توجه به این شکل دستگاه از سه لوله آلمینیوم اصلی تشکیل شده است. لوله P۱ بدنه اصلی دستگاه را تشکیل می دهد. لوله P۲ لوله‌ای است که مکان آن در داخل لوله P۱ توسط دو پیچ ثابت شده و توری G۱ را که بین دو تیغه شیشه‌ای T۱ و T۲ قرار گرفته، نگه می‌دارد. لوله P۳ که توری G۲ را مابین دو تیغه شیشه‌ای T۳ و T٤ نگه داشته می‌تواند با حرکت چرخشی هم فاصله طولی خود و هم زاویه خود را با توری G۱ تنظیم کند. کمینه و بیشینه فاصله دو توری از هم طوری تنظیم شده که دومین فاصله تالبوت برای طول موجهای ۵۳۲ نانومتر و ۶۳۲ نانومتر قابل دستیابی باشد. لازم به توضیح است که تیغه‌های شیشه‌ای برای صاف نگه داشتن سطوح توری‌ها بکار رفته‌اند. نگهدارنده H در قسمت زیرین دستگاه تعبیه شده تا بتوان آن را بر پایه‌های مخصوص دوربین عکاسی سوار کرد.

درقسمت انتهایی دستگاه قسمت تصویر برداری آن قرار دارد که با توجه به نیاز به تصویربرداری با سرعت بالا دوربینی با قابلیت ثبت تصویر ۲۰۰ فریم بر ثانیه با مدل point grey GRAS-۰۳K۲M-C در نظر گرفته شد. همچنین لنز دوربین Hikvision ٤٥١٠M-MPIR با فاصله کانونی متغیر ۴/۵ تا ۱۰ میلیمتر برای تصویر گیری انتخاب و تهیه شد. هم فاصله کانونی و هم دیافراگم ورودی لنز قابلیت تنظیم دستی را دارند. میدان دید این لنز طوری است که از فاصله ۱۰ سانتیمتری، تصویر جسمی با قطر ۱۰ سانتی را به راحتی بر روی صفحه حساس ccd تشکیل می‌دهد.

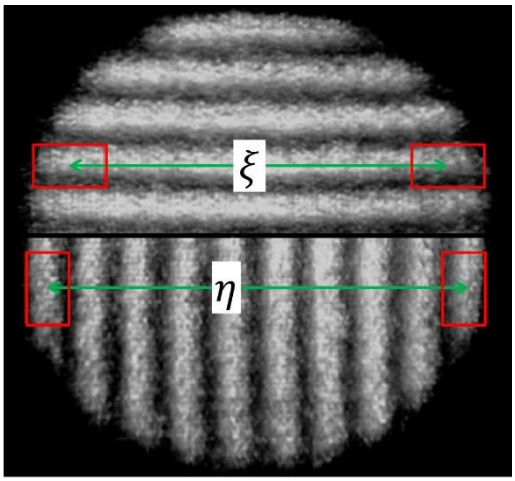
با بررسی دقیق اندازه ها نقشه نهایی در نرم افزار اتوکد با همکاری پرسنل متخصص تراشکاری ترسیم و قطعات مختلف دستگاه تحت تراشکاری قرار گرفت.

برای کار با این دستگاه ابتدا لیزر را درفاصله ای مناسب طوری قرار می دهیم تا جبهه موجهای رسیده به دهانه ورودی تقریباً تخت شوند. باریکه لیزری با عبور از جو متلاطم سطح توری‌های اول را روشن می‌کند. تصویر توری‌های اول در فاصله تالبوت و در محل توریهای دوم که مکان آنها ثابت است، تشکیل می‌شود و طرحهای ماره شکل می گیرند. بلافاصله بعد از توریهای دوم یک صفحه مات وجود دارد که فریزها بر روی آن جایگزیده شده و تصویر آنها توسط لنز تصویرساز بر روی صفحه حساس CCD شکل می‌گیرد.



شکل ۳: طرح اجزای تشکیل دهنده دستگاه

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-01]



شکل ۴ . نمونه طرح فریزهای ماره

محاسبات نظری

برای تحلیل فریزها همانطور که در شکل ۴ مشخص شده است از ابتدا و انتهای یک فریز افقی قسمتی را انتخاب کرده (کادر قرمزرنگ) و مکان نقاط ماکزیمم شدت در آنجا تعیین می‌شود. سپس این کار برای حدود ۲۰۰۰ فریم از فریزهای ماره انجام شده و میزان جابجایی این نقاط در هر فریم نسبت به میانگین فریم‌ها تعیین می‌شود. این روش برای دو قسمت از فریزهای ماره عمودی نیز عیناً تکرار می‌شود. جابه‌جایی فریزهای افقی و عمودی به زاویه ورود باریکه لیزر به دستگاه از طریق رابطه زیر مربوط می شود:

$$[\alpha_x, \alpha_y] = \frac{d}{d_m z_k}[\Delta y_m, \Delta x_m]$$

که در این رابطه α_x و α_y به ترتیب زاویه ورود به پرتوها به دهانه ورودی دستگاه در راستای افقی و قائم، d گام توریها بر حسب میلی‌متر، d_m گام فریزهای ماره بر حسب پیکسل و z_k فاصله تالبوت بر حسب میلی‌متر، Δx_m و Δy_m مقدار جابه‌جایی فریزهای ماره در دو راستای افقی و قائم بر حسب پیکسل است [۴].

کواریانس زاویه ورود برای دو قسمت از فریزهای افقی با فاصله ξ از هم و برای دو قسمت از فریزهای عمودی با فاصله η از هم بصورت جداگانه حساب می‌شود. با استفاده از این مقادیر کواریانس $B(\eta)$ و $B(\xi)$ و با بکار بردن رابطه-های زیر پارامتر فرید r_0 در راستای افقی و عمودی تعیین شده و میانگین آنها به عنوان مقدار نهایی گزارش می‌شود.

$$B_x(\xi) = 0.097(\frac{\lambda}{r_0})^{5/3}(\frac{\lambda}{\xi})^{1/3}$$

$$B_y(\eta) = 0.145(\frac{\lambda}{r_0})^{5/3}(\frac{\lambda}{\eta})^{1/3}$$

که λ در این روابط مقدار طول موج باریکه لیزری است. در نهایت برای تعیین ثابت ساختار ضریب شکست C_n^2 در فاصله افقی L از رابطه زیر استفاده می‌شود [۵]:

$$C_n^2 = 0.06 L^{-1} \lambda^2 r_0^{-5/3}$$

برای انجام محاسبات بالا برنامه‌ای در قالب GUI در نرم‌افزار MATLAB تهیه شده تا اشخاص مختلف به راحتی از دستگاه برای اندازه‌گیری‌های تلاطم جو استفاده کنند.

سپاسگزاری

از آقای طوماری مسئول وقت کارگاه تراشکاری دانشگاه تحصیلات تکمیلی به خاطر کمکهای فراوان در زمینه تراشکاری و ساخت قطعات دستگاه سپاسگزاری می‌کنم.

مرجع‌ها

[۱] L.Andrews, R. L. Phillips, *Laser beam propagation through random media*, SPIE Press, ۲۰۰۵.

[۲] M. Sarazin , F. Roddier , *The ESO differential image motion monitor*, Astron. Astrophys. **۲۲۷** ۲۹۴–۳۰۰،۱۹۹۰.

[۳] S. Rasouli and M. T. Tavassoly, *Application of the moire´ deflectometry on divergent laser beam to the measurement of the angle of arrival fluctuations and the refractive index structure constant in the turbulent atmosphere* Opt. Lett. **۳۳** ۹۸۰–۲, ۲۰۰۸ .

[٤] S. Rasouli, M. Dashti, A. N. Ramaprakash, *An adjustable, high sensitivity, wide dynamic range two channel wavefront sensor based on moire deflectometry* , Opt. Express ۱۸ ۲۳۹۰٦–۱۵, ۲۰۱۰.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-01]

[۵] S. Rasouli, *Use of a moiré deflectometer on a telescope for atmospheric turbulence measurements*, Opt. Lett. **۳۵** ۱٤۷۰–۲, ۲۰۱۰.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-01]