بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۴-۱۲ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

نوسان‌سنجی همودایِن آینه لیزر دیسک نازک با استفاده از تکنیک انتقال فاز فضایی سه نقطه‌ای

محمدحسین دائمی[۱،۲] و سیف‌اله رسولی[۱،۳]

۱-دانشکده فیزیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان
۲- مرکز ملی علوم و فنون لیزر ایران
۳- مرکز پژوهشی اپتیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان

چکیده – برای اندازه‌گیری مشخصه‌های نوسانی محیط فعال در لیزر دیسک نازک از نوسان‌سنجی لیزر- داپلری همودایِن استفاده شده است. برای تشخیص جهت حرکت جسم متحرک، جهتِ حرکت فریزهای خطی حاصل از تداخل پایش شده است. برای پایش حرکت فریزها، تکنیک انتقال فاز چند نقطه‌ای فضایی فرمول‌بندی شده و سپس برای اثبات کارائی، با استفاده از یک منبع نوسان مشخص مورد راستی‌آزمایی قرار گرفته است. در نهایت این روش برای نوسان‌سنجی محیط فعال در لیزر دیسک نازک استفاده شده است. نتایج حاصل نشان داده است که نوسان این قطعه، کاتوره‌ای است و بایستی از روش‌های تحلیل سیگنال‌های ناپایا مثل تحلیل فوریه زمان کوتاه و یا تبدیل موجک برای مشخصه‌بندی آن استفاده نمود. نتایج این تحلیل‌ها می‌تواند در بهینه‌سازی لیزر استفاده شود.

کلید واژه- انتقال فاز چند نقطه‌ای فضایی، سیگنال‌های ناپایا، لیزر دیسک نازک، نوسان‌سنجی لیزر داپلری همودایِن، نوسان کاتوره‌ای

Homodyne Vibrometry of the mirror of the thin disk laser using 3-point spatial phase shifting technique

Mohammad Hossein Daemi[1, 2] and Saifollah Rasouli[1, 3]

1-Department of Physics, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, Zanjan, Iran
2- Iranian National Center for Laser Science and Technology
3-Optics Research Center, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, Zanjan, Iran

Abstract- In the measurement of the vibration characteristics of the gain medium in thin disk laser, the homodyne Laser Doppler vibrometry was applied. For recognition of the direction of motion of the vibrating element, we developed the N-point spatial phase shift technique to identify the direction of motion of the linear interference fringes. After experimentally establishing the method, in a special case of 3-point technique, it was applied on the measurement of the vibration characteristics of the gain medium in thin disk laser. The results revealed the random nature of the vibration that can be analyzed through non-stationary signals analysis methods such as short time Fourier transform or wavelet transform. The results of such analysis can be used in the optimizing the laser design.

Keywords: Homodyne laser Doppler vibrometry, N-points spatial phase shifting, non-stationary signals, random vibrations, thin disk laser

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

۱- مقدمه

در ساخت محصول لیزر قابل اعتماد، در نظر گرفتن پارامترهای نوسانی قطعات تشکیل دهنده آن ضروری است. چرا که وجود نوسان بویژه در آینه‌ها، مشخصه‌های باریکه لیزر را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۱]. بویژه در لیزرهای حالت جامدِ پرتوان که قطعات سازنده معمولاً با جریان سریع مایع خنک می‌شوند، و این جریان می‌تواند قطعات مربوطه را به صورت ناخواسته به نوسان درآورد. به این دلیل و در راستای بهینه‌سازی محصولات لیزر دیسک پرتوان، اندازه‌گیری‌هایی بر روی مشخصات نوسانی آینه فعّال خنک شونده با سیال انجام گرفت. برای این منظور از نوسان‌سنجی لیزر-داپلری هموداین[1] استفاده شد، روشی که قبلاً برای اندازه‌گیری امواج فراصوت به خوبی توسعه پیدا کرده است و بر مبنای تداخل باریکه بازتابیده از جسم متحرک با باریکه مرجع و ثبت بسامد زنش حاصل، بنا شده است. سیگنال به دست آمده از این روش، جهت حرکت جسم را مشخص نمی‌کند. بیشتر تلاش‌های انجام گرفته در این زمینه مربوط به بکارگیری روش‌هایی با هدف شناسایی جهتِ حرکت مربوط می‌شود، که استفاده از روش هترودین[2] به جای هموداین، یکی از این راه‌ها است [۲]. ماهیّت شگردهایی که در روش هموداین برای شناسایی جهت حرکت استفاده شده است، غالباً بر مبنای پایشِ جهتِ حرکت و دامنه جابجایی فریزهایِ خطی تداخل استوار است ([۳و۴]). یکی از روش‌های پایش حرکت، انتقال فاز فضایی است که در جبران‌سازی ارتعاشات محیطی برای سنجش کیفیت سطوح اپتیکی نیز به کار رفته است [۵و۶]. البته بر آورد دامنه نوسان با نرخ محدود به نرخِ فیلم-برداری نیز با این شگرد صورت پذیرفته است [۷]. در کار حاضر، تکنیک انتقال فاز سه نقطه‌ای برای نوسان سنجیِ نوساناتِ کاتوره‌ایِ آینه فعالِ لیزر دیسک نازک معرفی شده و پس از راستی‌آزمایی با یک نوسانگرِ معلوم، بر روی آینه فعّال لیزر دیسک پیاده‌سازی شده است.

۲- نوسان سنجی لیزر-داپلری

طبق رابطه داپلر اگر چشمه و آشکارساز هردو ثابت باشند ولی نور چشمه پس از بازتاب از آینه‌ای دارای سرعت u، به آشکار ساز برسد تغییر بسامد نور دریافت شده توسط آشکارساز از رابطه $\Delta\upsilon = \frac{2u}{\lambda}$ به دست می‌آید. با توجه به ابعاد قطعه مورد نظر انتظار نداریم دامنه نوسان A بزرگتر از محدوده 0.01mm میلی‌متر باشد. با فرض نوسان هماهنگ در محدوده بسامدی kHz، بیشینه سرعت از مرتبه $A\omega \sim 1\text{cm/s}$ است، بنابراین تغییرات بسامد نور حداکثر از مرتبه 10 kHz خواهد بود که در برابر بسامد $10^{14}\,\text{Hz}$ باریکه لیزر کاوه مورد استفاده در نوسان‌سنجی بسیار ناچیز است. در تداخل‌سنج مایکلسون این اختلاف بسامد خود را بصورت زنش نشان می‌دهد. اختلاف فاز بین باریکه‌های رسیده از هریک از بازوهای سنجه (متحرک) و مرجع (ثابت) بصورت زیر خواهد بود:

$$\Delta\varphi = 2k(L_m - L_r), \qquad (۱)$$

که در آن $k = 2\pi/\lambda$ عدد موج و $L_m = L_{m0} + X_m(t)$ طول لحظه‌ای بازوی سنجه است. سیگنال شدت رسیده به آشکارساز بصورت زیر خواهد بود:

$$I = 1 + V\cos[\Delta\varphi_0 + 2kX(t)], \qquad (۲)$$

که $\Delta\varphi_0 = 2k(L_{m0} - L_r)$ اختلاف فاز بین دو باریکه در حالت تعادل است. به علت ماهیت تابع کسینوس، جهت حرکت با استفاده از این سیگنال قابل شناسایی نیست چرا که مقدار تابع کسینوس از علامت آرگومان مستقل است. مگر در حالت خاص $\Delta\varphi_0 = 2n\pi + \pi/2$ و دامنه نوسان کمتر از $\lambda/4$، شرایطی که برای نوسان نامعلوم کاتوره‌ای فراهم نیست. اینجا روشی بر مبنای پایش حرکت فریزهای خطی و با آرایش هموداین پیشنهاد می‌شود.

۱-۲- پایش حرکت فریزهای تداخلی

جهت حرکت فریزهای خطی نماینده جهت حرکت آینه و جابجایی فضایی این فریزها (X_f) متناسب با جابجایی آینه (X_m) خواهد بود:

$$X_f = \alpha X_m, \qquad (۳)$$

که یک رابطه خطی است و α بزرگنمایی (قابل تنظیم) سامانه و بدون بعد است. برای اندازه‌گیری جابجایی فریزها می‌توان با سرعت مناسب از آنها فیلم‌برداری نموده و حرکت یک قله مشخص از این طرح را دنبال کرد. این روش

[1] Homodyne Laser Doppler Vibrometry (LDV)
[2] Heterodyne

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

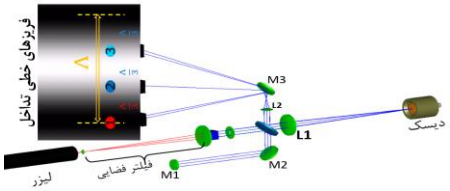
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]

بسامدهایی که کسری از سرعت فیلم‌برداری (حداکثر چند هزار خط بر ثانیه در حسگرهای خطی) هستند، محدود می‌شود. ولی در صورت استفاده از حسگرهای نقطه‌ای مثل فوتودیودهایِ سریع، نرخ داده‌برداری به سامانه داده‌برداریی بستگی دارد که فوتودیود به آن وصل است و می‌تواند از مرتبه GS/s نیز باشد. حال چگونه با استفاده از حسگر نقطه‌ای، حرکت فریزها را دنبال کنیم؟

به جای این که محل قله یک فریز روشن را دنبال کنیم، در یک ناحیه محدود از فضا، فاز طرح شدت کسینوسی را محاسبه می‌نماییم. تغییرات فاز در طرح شدت می‌تواند نماینده جابجایی فریز باشد:

$$\frac{\Phi}{2\pi}=\frac{x-x_0}{\Lambda}, \qquad (۴)$$

که در آن Φ فاز و x_0 محل قله در حالت $\Phi=0$ بوده و Λ گام طرح تداخلی است. بنابراین با دانستن Φ، محل قله به دست می‌آید. در صورتی که یک فریز کامل از میدان دید حسگرها عبور کند، پرشی در فاز خواهیم دید که براحتی قابل شناسایی است و می‌توان آن را در محاسبات گنجاند.



شکل ۱: چیدمان اندازه‌گیری، اندر فریز طرح تداخلی فریزهای خطی و محل نسبی حسگرهای سه‌گانه

۲-۲- انتقال فضایی فاز چند نقطه‌ای

در تشابه با انتقال فاز زمانی در تحلیل تداخلی سطوح اپتیکی[۸]، طرح شدت یک بعدی با رابطه کلی زیر قابل نمایش است (شکل ۱):

$$I(x)=a+b\cos(\frac{2\pi}{\Lambda}x+\Phi). \qquad (۵)$$

مقادیر a و b ثابت‌هایی هستند که نمایانی را تعیین می‌کنند (در حالت $b=a$ نمایانی برابر ۱ است).
حال اگر در چند نقطه از محور x، مقدار I را داشته باشیم، می‌توانیم نمودار کسینوسی به آن برازش نموده و بنابراین فاز Φ را پیدا کنیم. این فاز نماینده مکان فریز و تغییرات زمانی آن نماینده جابجایی آینه خواهد بود.

اگر دوره تناوب طرح تداخلی (Λ) را به تعداد N قسمت مساوی تقسیم نماییم، شدت در ابتدای هر یک از این قسمت‌ها (به مختصات $x_n=(n-1)\Lambda/N$)، بصورت زیر خواهد بود (شکل ۱):

$$I_n=a+b\cos(\frac{2\pi}{\Lambda}x_n)\cos\Phi-b\sin(\frac{2\pi}{\Lambda}x_n)\sin\Phi. \qquad (۶)$$

حال طرفین رابطه بالا را در $\cos(2\pi x_n/\Lambda)$ ضرب کرده و بر روی تمام مقادیر مجاز $n=1,...,N$ میانگین‌گیری می‌کنیم:

$$\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}I_n\cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda}x_n\right)=\frac{b}{2N}\cos\Phi, \qquad (۷)$$

که در آن از این موضوع که در یک دور کامل میانگین جملات فرد سینوس یا کسینوس برابر صفر، ولی میانگین جملات مربعی برابر $\frac{1}{2}$ است، بهره برده شده است. به همین ترتیب با ضرب طرفین $\sin(2\pi x_n/\Lambda)$ و انجام کارهای مشابه، به رابطه زیر می‌رسیم:

$$\frac{b}{2N}\sin\Phi=\frac{-1}{N}\sum_{n=1}^{N}I_n\sin\left(\frac{2\pi}{\Lambda}x_n\right). \qquad (۸)$$

با استفاده از دو رابطه بالا خواهیم داشت:

$$\Phi_{\text{N-point}}=\tan^{-1}\left[\frac{-\sum_{n=1}^{N}I_n\sin\left(\frac{2\pi}{\Lambda}x_n\right)}{\sum_{n=1}^{N}I_n\cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda}x_n\right)}\right]. \qquad (۹)$$

برای حالت خاص سه نقطه‌ای، خواهیم داشت:

$$\Phi_{3-\text{point}}=\tan^{-1}\left[\sqrt{3}\frac{I_3-I_2}{2I_1-(I_2+I_3)}\right]. \qquad (۱۰)$$

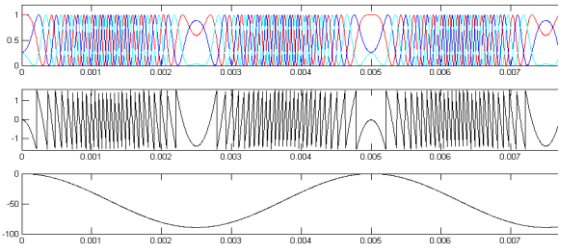
در شکل ۲ نمونه‌ای از نتایج شبیه‌سازی با استفاده از سیگنال‌های چیدمان شکل ۱ آورده شده است.

برای راستی‌آزمایی این روش، نوسان بلندگوی یک دستگاه صوتی را مورد اندازه‌گیری قرار دادیم (شکل ۳). سپس اندازه‌گیری مشخصه‌های نوسانی محیط فعال لیزر دیسک انجام گردید. این قطعه از جنس Yb:YAG به ضخامت حدود 200μm و قطر 14mm است که بر روی شبه آلیاژ

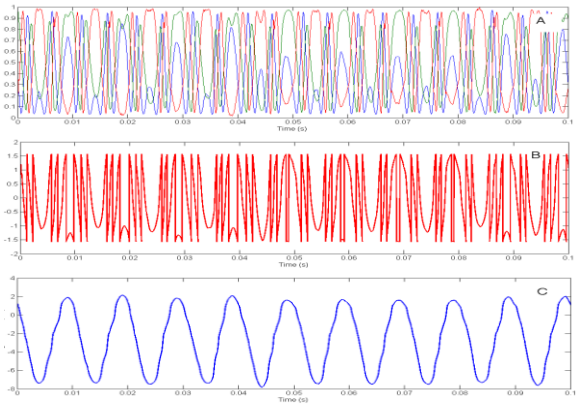
این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]

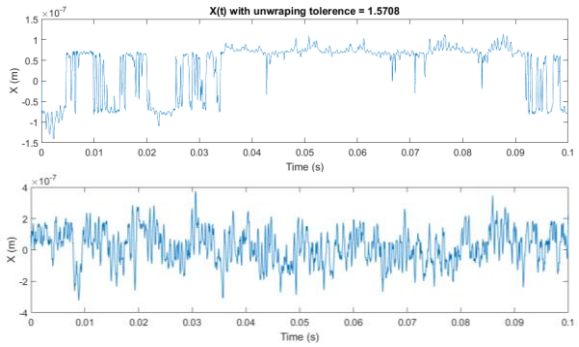
مس-تنگستن به ضخامت 1mm و قطر 30mm چسبانده شده و سپس بر روی بوشنی به قطر 48mm بسته شده و کل مجموعه با قطعه آلومینیومی به ضخامت 15mm روی میز اپتیکی بسته شده است. است. اندازه‌گیری‌ها بر روی نقطه مرکزی این قطعه انجام شده است. بررسی نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که این نوسان کاملاً کاتوره‌ای است (شکل ۴)، و این نوع رفتار کاتوره‌ای بایستی با روش-های تحلیل سیگنال‌های ناپایا بررسی شود. این چنین رفتار دینامیکی پیچیده‌ای به انتخاب مواد، نحوه بستن، نوع پمپ تأمین کننده جریان و ... بستگی دارد که با روش گفته شده در اینجا می‌توان تأثیر هر یک از این عوامل را بررسی و نسبت به بهینه‌سازی آن اقدام نمود. برای افزایش نسبت سیگنال به نوفه، با استفاده از یک لنز استوانه‌ای ابعاد فریزها را در امتداد موازی با فریزها کوچک کردیم تا شدت نور رسیده به فوتودیودها افزایش پیدا کند.



شکل ۲: به ترتیب از بالا به پایین: سیگنال آشکار شده توسط حسگرهای شکل ۱، نمودار به دست آمده از رابطه (۱۰) و شکل موج نوسان پس از unwrap کردن. دامنه نوسان $2.25\,\mu m$ است. بسامد نوسان نیز $200\,Hz$ است.



شکل ۳: (A) سیگنال‌های تجربی دریافت شده توسط سه حسگر در نوسان‌سنجی صفحه دیافراگم بلندگو با بسامد ۱۰۰ هرتز. (B) فاز حاصل از رابطه (۱۰) و (C) شکل موج بازسازی شده. دامنه نوسان حدود $4.6\,rad$ معادل $0.23\,\mu m$ است.



شکل ۴: نوسان دیسک مقادیر متفاوت فشار آب ۱٫۲و۵ بار (به ترتیب معادل ۲٫۸ و ۷٫۲ لیتر بر دقیقه). مقدار قله به دره به ترتیب $0.25\mu m$ و $1\mu m$ است.

۳- نتیجه‌گیری

روش انتقال فضایی فاز سه نقطه‌ای در نوسان سنجی لیزر-داپلری هموداین فرمولبندی شده و با یک نوسانگر مشخص مورد راستی‌آزمایی قرار گرفت. این روش می‌تواند در بهینه سازی طراحی لیزر مورد استفاده قرار بگیرد.

سپاسگزاری

از مرکز ملی علوم و فنون لیزر ایران بخاطر کمک‌هایشان در انجام این تحقیق، تقدیر و تشکر می‌شود.

مراجع

[1] A. E. Siegman, *Lasers*, P. 980, University Science Books Mill Valley, California, 1986.
[2] R. J. Dewhurst, Q Shan, Optical remote measurement of ultrasound, Meas. Sci. Technol. **10**, 1996.
[3] K. Weir, et al., A Novel Adaptation of the Michelson Interferometer for the Measurement of Vibration, J. of Lightwave Technology, Vol. 10, No. 5, May 1992.
[4] Babar HUSSAIN, et al., Analog Processing Based Vibration Measurement Technique Using Michelson Interferometer, Photonic Sensors, Vol. 3, No. 2: 137–143, 2013.
[5] Dong Wu, et al., Transverse spatial phase-shifting method used in vibration-compensated interferometer, Optik 115, No. 8, 2004.
[6] Leslie L. Deck, Suppressing vibration errors in phase-shifting interferometry, Proc. of SPIE Vol. 6704, 670402, 2007.
[7] Suezou Nakadate and Masaki Isshiki, Real-time vibration measurement by a spatial phase-shifting technique with a tilted holographic interferogram, APPLIED OPTICS, Vol. 36, No. 1, 1 January 1997.
[8] P. Hariharan, *Optical Interferometry*, 2nd ed., Academic Press, 2003.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-08]