بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شیراز،
شیراز، ایران.
۹-۱۱ بهمن ۱۳۹۷

طراحی و برپایی چیدمان اندازه‌گیری پاشندگی تأخیر گروه آینه‌های پاشنده

حدیثه تربت اصفهانی[۱]، حمیدرضا فلاح[۱و۲]، مرتضی حاجی محمود زاده[۱و۲]، مهدی مردیها[۳]، محمد ثاقب‌فر[۴]

۱-گروه فیزیک دانشگاه اصفهان hadis21@rocketmail.com

۲-گروه پژوهشی اپتیک کوانتمی دانشگاه اصفهان m.hajimahmoodzade@sci.ui.ac.ir، hfallah@sci.ui.ac.ir

۳-صنایع اپتیک ایران thinfilmgroup@yahoo.com

۴-پژوهشکده اپتیک و لیزر دانشگاه صنعتی مالک اشتر saghebfar@mut-es.ac.ir

چکیده – امروزه پیشرفت زیادی درزمینه‌ی ساخت آینه‌های چرپ حاصل شده است. این آینه‌ها می‌توانند تپ فوق کوتاه تا ۵ فمتوثانیه ایجاد و در نتیجه توان بالایی برای تپ خروجی حاصل کنند. در این مقاله چیدمان تجربی تداخل سنجی مایکلسون را برای اندازه‌گیری پاشندگی تأخیر گروه برپا کرده و بیناب‌های تداخلی مربوطه را ثبت کردیم و سپس با ا ستفاده از الگوریتم تبدیل موجک پا شندگی تأخیر گروه را به د ست آوریم که با اطلاعات ارائه‌شده برای آینه‌ها توسط شرکت سازنده، تطابق بسیار خوبی را نشان می‌دهد.

کلید واژه- آینه‌های چرپ، پاشندگی تأخیر گروه، پاشندگی سرعت گروه، تبدیل موجک، لایه‌های نازک

Design and set up of a Layout for measurement of group delay dispersion of dispersive mirrors

Hadiseh Torbat Isfahani[1], Hamidreza Fallah[1,2], Morteza Hajimahmoodzadeh[1,2], Mehdi Mardiha[3],Mohamad Saghebfar[4]

1-Department of physics, University of Isfahan, hadis21@rocketmail.com

2-IQOG, University of Isfahan, m.hajimahmoodzade@sci.ui.ac.ir, hfallah@sci.ui.ac.ir

3- Industry optic Isfahan, thinfilmgroup@yahoo.com

۴-Optics-Laser Science and Technology Research Center, Malek Ashtar University of Technology, saghebfar @mut-es.ac.ir

Abstract-Nowadays, there has been a lot of development in the production of chrip mirrors. These mirrors are being used to create ultrashort femtosecond pulses for high power lasers. In this study, we setup a Michelson interferometer to record white light interferons. Finally, we caculate the group delay dispersions using the wavelet transform method, which are in good agreement with standard data.

Keywords: chirped mirrors, Group delay dispersion, Group velocity dispersion, Thin Film, Wavelet-transform

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

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

۱-مقدمه

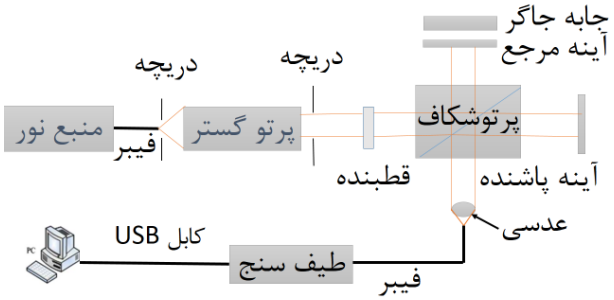
پاشندگی تأخیر گروه (GDD[1]) عناصر اپتیکی پارامتر مهمی برای کنترل و تولید پالس‌های لیزر فمتوثانیه است[۱]. پاشندگی تأخیر گروه می‌تواند پهنای زمانی پالس را افزایش یا کاهش دهد. هرچه پالس لیزر کوتاه‌تر شود تأثیرات پاشندگی تأخیر گروه بااهمیت‌تر می‌شود. به‌طورمعمول، یک آینه با لایه‌های نازک دی‌الکتریک علاوه بر بازتابندگی بالا باید در ناحیه‌ای با پهنای باند مناسب دارای پاشندگی کمی باشد. اگرچه منحنی‌های پاشندگی را می‌توان با توجه با ساختار هندسی چندلایه محاسبه کرد، اما به دلیل اینکه این آینه‌ها دقیقاً مطابق با پارامترهای طراحی ساخته نمی‌شوند اندازه‌گیری تجربی ضروری است.

از روش‌های اندازه‌گیری تأخیر گروه و پاشندگی تأخیر گروه می‌توان به تداخل سنجی نور سفید و تداخل سنجی فابری پرو اشاره کرد[۲, ۳]. در حال حاضر به‌طورمعمول تداخل سنجی نور سفید (WLI) برای اندازه‌گیری پاشندگی عناصر اپتیکی استفاده می‌شود. تداخل سنجی نور سفید معمولاً از نوع تداخل‌سنج مایکلسون است که اندازه‌گیری بر مبنای تغییر طول بازوی حاوی نمونه که باید مشخصه یابی شود است. پس از ثبت بیناب تداخلی باید تأخیر گروه و پاشندگی تأخیر گروه از این اطلاعات استخراج شود. پاشندگی تأخیر گروه از مشتق دوم فاز نسبت به بسامد به دست می‌آید که البته همیشه باید وجود نوفه۲ را نیز در محاسبه منظور کرد. برای استخراج اطلاعات لازم از بیناب تداخلی، الگوریتم‌های مختلفی وجود دارد[۱]. در این مقاله الگوریتم تبدیل موجک۳ استفاده‌شده است، که دقت محاسبات آن از الگوریتم‌های دیگر نظیر تبدیل فوریه بهتر است[۳, ۴].

در روند انجام این کار ابتدا یک چیدمان تداخل‌سنجی مایکلسون برپا شد و سپس بیناب تداخلی برای دو آینه‌ی پاشنده ساخت شرکت Altecna که میزان تأخیر پاشندگی آن‌ها مشخص بود ثبت‌شده، سرانجام با استفاده از الگوریتم تبدیل موجک پاشندگی تأخیر گروه مربوط به هر کدام محاسبه شد که با اعداد گزارش‌شده‌ی شرکت سازگاری مناسبی داشت.

۲-برپایی چیدمان و ثبت بیناب تداخلی

چیدمان آزمایشگاهی شامل منبع نور، بیناب‌سنج، قطبنده، پرتو شکاف، پرتوگستر، عدسی و جابه‌جاگر است که طرح‌واره‌ی آن در شکل ۱ نشان داده‌شده است.



شکل ۱: الگوی طرح وار تداخل‌سنج مایکلسون

با توجه به گستره‌ی بینابی موردنظر و همچنین کافی بودن شدت در تمام فاصله بیناب از یک لامپ هالوژن تنگستن ۱۵۰ وات برای منبع نور استفاده کردیم. آینه‌ی نقره را روی پایه ثابت و آینه‌ی دی‌الکتریک پاشنده را روی پایه‌ی متحرک قراردادیم و با استفاده از جابه‌جاگر قادر به تغییر فاصله‌ی بازوی نمونه هستیم. با استفاده از عدسی و پرتوگستر نور ورودی را داخل چیدمان و بعد از پرتو شکاف روی بیناب‌سنج متمرکز کردیم.

---

[1] Group delay dispersion
[2] Noise
[3] Wavelet taransform

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.
[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-02]

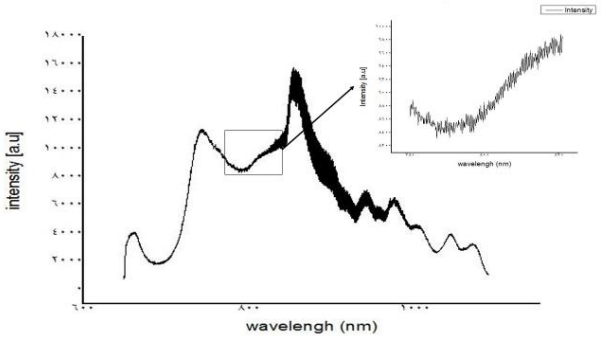
برای ثبت بیناب دو روش زمانی[۳] و بینابی[۵] در تداخل-سنجی وجود دارد که ما روش بینابی را برگزیدیم. به دلیل پهنای بینابی نسبتاً زیاد منبع نور طول همدوسی نورتابشی خیلی کوتاه است درنتیجه اختلاف راه دو بازو باید تقریبا صفر یا طول دو بازو تقریبا یکسان باشد.

در این آزمایش ابتدا طول دو بازو را تقریبا مساوی قرار داده و سپس به کمک جابه‌جاگری که با دقت ۱۰۰ نانومتر جابه‌جا می‌شد تلاش کردیم تا بیناب را دریافت کنیم و این زمانی به دست آمد که طول بازو کاملاً یکسان شد. سپس با کمک یک عدسی با طول فاصله کانونی ۴۰ میلی‌متر نور را داخل فیبر بیناب‌سنج متمرکز کردیم. تنظیم زاویه‌ی پرتو شکاف و آینه‌ها در چیدمان از اهمیت بالایی برخوردار است به‌طوری‌که اگر تنظیم نباشد الگوی تداخلی دریافت نخواهد شد. در این آزمایش بیناب از نوفه‌های زیادی برخوردار بود که ناشی از افت‌وخیزهای ولتاژی منبع نور، لرزش محیط و دقت کم قطعات اپتیکی است درنتیجه با برپایی این چیدمان بر روی میز اپتیکی و با بهره‌گیری از بهترین قطعات اپتیکی، نوفه‌ها را تا حد امکان کاهش دادیم. پس از اطمینان از عملکرد صحیح چیدمان و انتخاب الگوی مناسب تداخلی از دو نمونه آینه استاندارد، بیناب آن‌ها را ثبت کرده که در شکل‌های ۲ و ۳ ارائه‌شده است.

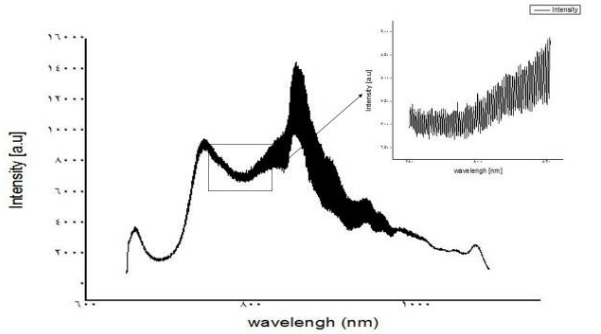
۲-محاسبه پاشندگی تأخیر گروه با استفاده از تبدیل موجک

در این قسمت به‌اختصار مبانی نظری به دست آوردن تأخیر گروه با استفاده از تبدیل موجک توضیح داده می‌شود. تبدیل موجک[۶] الگوی بیناب $f(\omega)$ با فرمول زیر تعریف می‌شود:

$$w(t,\omega) = \frac{t}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} f(\omega')\psi^*[\frac{(\omega'-\omega).t}{2\pi}]d\omega \qquad (۱)$$



شکل ۲: بیناب آینه‌ی نمونه اول با پاشندگی تأخیر گروه $-400fs^2$



شکل ۳: بیناب آینه‌ی نمونه دوم با پاشندگی تأخیر گروه $-250fs^2$

در این معادله $\psi(\omega')$ تابع موجک مادر است و $\Psi[\frac{(\omega'-\omega).t}{2\pi}]$ معادله‌ی موجک دختر است. ω متغیر جابه‌جایی[1] و $\frac{2\pi}{t}$ متغیر مقیاس است. درواقع ضرایب شباهت از تبدیل موجک دختر و بیناب اصلی به دست می‌آید. برای محاسبه‌ی فاز به یک موجک مختلط نیاز داریم که موجک گابور یا گاوسی[۷, ۸] از معروف‌ترین آن‌ها است و بهترین قدرت تفکیک‌پذیری زمان- بسامد را داراست به همین دلیل در این پژوهش این موجک را انتخاب کردیم.

حال برای به دست آوردن تأخیر گروه از روی قله‌ی تبدیل موجک با تعریف "دوره‌ی محلی"[2] $t(\omega)$ که از بیشینه‌ی پوش منحنی ریخت‌شناسی فاز[۸] $w(t,\omega)$ در یک ω ثابت به دست می‌آید، می‌توان بیناب فاز را مطابق رابطه‌ی زیر به دست آورد:

$$\varphi(\omega) = \int t(\omega) * d\omega \qquad (۲)$$

[1] shift factor

[2] Local period

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

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

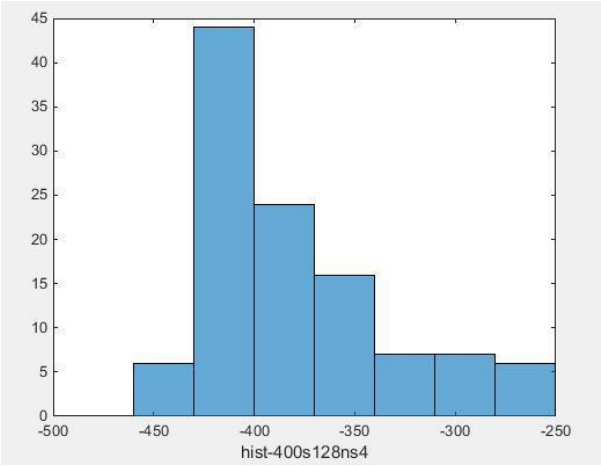
که در آن ω بسامد زاویه‌ای اپتیکی است. تأخیر گروه از مشتق فاز نسبت به بسامد زاویه‌ای ω به دست می‌آید:

$$GD = \frac{d\varphi}{d\omega} = t(\omega) \qquad (۳)$$

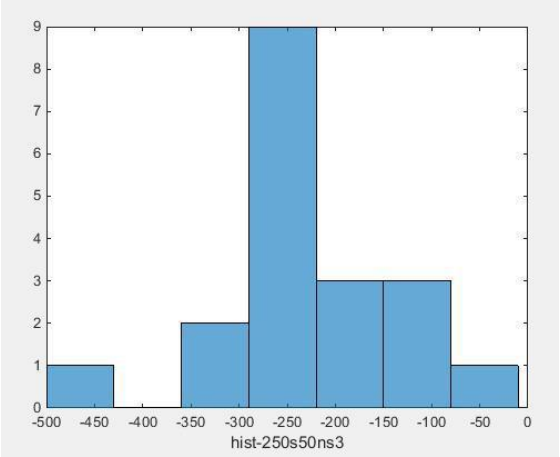
از معادله (۳) دیده می‌شود که بیناب دوره‌ی محلی دقیقاً همان GD یا تأخیر گروه است[۴]که با یک‌بار مشتق‌گیری از تأخیر گروه، پاشندگی تأخیر گروه به دست می‌آید. در اینجا الگوهای بینابی که در قسمت قبل به دست آوردیم را در فرمول ۱ جایگزین می‌کنیم و ضرایب تبدیل موجک را محاسبه می‌کنیم سپس با استفاده از الگوریتم قله‌ی تبدیل موجک[۹] پاشندگی تأخیر گروه را به دست آوردیم.

۴-نتیجه‌گیری

ما برای تداخل‌های ثبت‌شده که در شکل ۲ و ۳ نشان داده‌شده است، پاشندگی تأخیر گروه را محاسبه کرده و نتایج را در شکل‌های ۴ و ۵ آورده‌ایم. طبق رفتار نمودار بیشترین مقدار فراوانی را برای آینه نمونه اول و دوم حول ۴۰۰-و ۲۵۰- مشاهده کنیم که مقدارهای به‌دست‌آمده با اعداد اعلام‌شده توسط شرکت سازنده، سازگاری خوبی دارد. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد با استفاده از الگوریتم تبدیل موجک و تداخل‌سنج مایکلسون با دقت خوبی پاشندگی تأخیر گروه را می‌توان به دست آورد.



شکل ۴: نمودار فراوانی پاشندگی تأخیر گروه اندازه‌گیری شده برای آینه اول با پاشندگی تأخیر گروه ۴۰۰-



شکل ۵: نمودار فراوانی پاشندگی تأخیر گروه اندازه‌گیری شده برای آینه دوم با پاشندگی تأخیر گروه ۲۵۰-

مراجع

[1] Z. Luo, S. Zhang, W.-d. Shen, C. Xia, Q. Ma, X. Liu, and Y. Zhang, "Group delay dispersion measurement of a dispersive mirror by spectral interferometry: comparison of different signal processing algorithms," Appl. Opt. **50**, C239-C245 (2011).

[2] W. H. Knox, N. M. Pearson, K. D. Li, and C. A. Hirlimann, "Interferometric measurements of femtosecond group delay in optical components," Opt. Lett. **13**, 574-576 (1988).

[3] K. Naganuma, K. Mogi, and H. Yamada, "Group-delay measurement using the Fourier transform of an interferometric cross correlation generated by white light," Opt. Lett. **15**, 393-395 (1990).

[4] Y. Deng, W. Yang, C. Zhou, X. Wang, J. Tao, W. Kong, and Z. Zhang, "Wavelet-transform analysis for group delay extraction of white light spectral interferograms," Opt. Express **17**, 6038-6043 (2009).

[5] J. Y. Lee and D. Y. Kim, "Versatile chromatic dispersion measurement of a single mode fiber using spectral white light interferometry," Opt. Express **14**, 11608-11615 (2006).

[6] D. Reolon, M. Jacquot, I. Verrier, G. Brun, and C. Veillas, "High resolution group refractive index measurement by broadband supercontinuum interferometry and wavelet-transform analysis," Opt. Express **14**, 12744-12750 (2006).

[7] Y. Deng, Z. Wu, L. Chai, C.-y. Wang, K. Yamane, R. Morita, M. Yamashita, and Z. Zhang, "Wavelet-transform analysis of spectral shearing interferometry for phase reconstruction of femtosecond optical pulses," Opt. Express **13**, 2120-2126 (2005).

[8] Y. Deng, C. Wang, L. Chai, and Z. Zhang, "Determination of Gabor wavelet shaping factor for accurate phase retrieval with wavelet-transform," Applied Physics B **81**, 1107-1111 (2005).

[9] Y. Deng, W. Yang, C. Zhou, X. Wang, J. Tao, W. Kong, and Z. Zhang, "Direct measurement of group delay with joint time-frequency analysis of a white-light spectral interferogram," Opt. Lett. **33**, 2855-2857 (2008).

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

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