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

الگوریتم بازیابی فاز تفکیک فرکانسی دروازه نوری برای اندازه گیری پالس های لیزری فوق کوتاه

سهیل مددی، فاضل جهانگیری، رضا مسعودی

پژوهشکده لیزرو پلاسما دانشگاه شهید بهشتی

چکیده –با استفاده از الگوریتم بازیابی فاز دو بعدی میدان الکتریکی اسپکتروگرامی که از چیدمان تفکیک فرکانس دروازه نوری با استفاده از تولید هماهنگ دوم ایجاد می‌شود، مورد بازیابی قرار می‌گیرد. دراین مقاله اسپکتروگرام شبیه سازی شده دو پالس ۱۰۰ فمتوثانیه چیرپ و غیر چیرپ مورد بررسی و مشخصات زمانی و طیفی آنها استخراج شده است.

کلید واژه- الگوریتم بازیابی فاز، تفکیک فرکانس دروازه نوری، تولید هارمونیک دوم،

phase retrieval algorithm frequency resolved optical gating for measurement ultrashort laser pulses

Soheil Madadi, Fazel Jahangiri, and Reza Masoudi

Laser and plasma research, Shaid Beheshti university

Abstract- Using two dimensional phase retrieval Algorithm, electric field of spectrogram created in a second harmonic generation frequency resolve optical gating setup is retrieved. Spectrograms of chirped and unchirped femtosecond laser pulses are simulated and their spectral and temporal features are compared.

Keywords: frequency resolve optical gating, phase retrieval Algorithm, second harmonic generation.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-01]

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

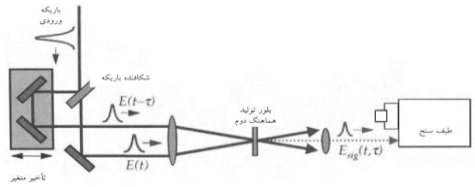
۱- مقدمه

اندازه‌گیری پالس های فوق کوتاه در بسیار از کاربردهای مرتبط با پدیده های زیستی، شیمیایی، مهندسی و فیزیکی که در محدوده فمتوثانیه رخ می‌دهند و همچنین در طی فرایند تقویت این پالسهای از اهمیت فراوانی برخوردار می باشد. این اندازه گیری با استفاده از روش های الکترونیکی متداول که زمان پاسخ آشکارسازی آنها نوعا در محدوده زمانی نانو ثانیه قرار دارد امکانپذیر نمی باشد. لذا برای اندازه‌گیری طول چنین پالس‌هایی از روش های اپتیکی غیرمستقیم مانند خود همبسته‌ساز شدت[1] و خودهمبسته ساز تداخلی[2] استفاده می‌شود[1]. در خودهمبسته ساز تداخلی باریکه پالس توسط یک شکافنده باریکه به دو قسمت تقسیم می‌شود که به یکی از باریکه‌ها نسبت به دیگری تأخیر اعمال می گردد. سپس دو باریکه توسط یک لنز در محیط غیرخطی متمرکز شده و باریکه سیگنال خروجی از این محیط به وسیله آشکارساز نوری به صورت تابعی از تأخیر های مختلف اندازه‌گیری می‌شود. با این روش می‌توان به طور غیر مستقیم با استفاده از آشکارساز نوری که زمان پاسخ آن در محدوده نانو ثانیه می‌باشد، طول پالس لیزری فوق کوتاه فمتو ثانیه را اندازه گیری کرد. در روش خودهمبسته ساز تداخلی علاوه بر طول پالس لیزری امکان مشاهده کیفی چیرپ پالس نیز فراهم می آید. تنها تفاوت این روش با خود همبسته ساز شدت آن است که در این روش دو باریکه به طور هم خط یا به عبارت دیگر به طور تداخلی وارد محیط غیرخطی می‌شوند[2]. اما همچنان اطلاعات فازی میدان الکتریکی پالس به طور کمی در این روش قابل اندازه گیری نیست. از این رو روشی کلی و شهودی برای اندازه‌گیری پالس‌های فوق کوتاه به نام تفکیک فرکانسی دروازه نوری[3] پیشنهاد شده است که می‌تواند به طور کامل پالس را مشخصه‌یابی کند. این روش با توجه به فرایندهای غیرخطی که مورد استفاده در چیدمان آن به چهار دسته اصلی تقسیم می‌شود که عبارتند از: چیدمان تولید هارمونیک دوم[4]، چیدمان خودپراش[5] ، چیدمان دروازه قطبشی[6] و چیدمان تولید هارمونیک سوم[7][3]. به علت این که فرایند تولید هارمونیک دوم نسبت به فرایندهای دیگر به انرژی کمتری نیاز دارد، امکان اندازه‌گیری محدوده بزرگی از پالس‌ها از نظر انرژی را فراهم می‌کند همچنین این چیدمان نسبت به سایر چیدمان‌ها ساده‌تر و ارزان‌تر می باشد به طوری که به صورت تجاری هم درآمده است. در این مقاله به بررسی نحوه استخراج اطلاعات پالس فمتوثانیه مبتنی چیدمان تولید هارمونیک دوم می پردازیم.

۲- تفکیک فرکانسی دروازه نوری با استفاده از تولید هارمونیک دوم

در این روش مطابق شکل (۱) پالس به وسیله یک شکافنده باریکه به دو پالس که نسبت به هم تأخیر دارند تقسیم شده و سپس در یک محیط غیرخطی تولید هارمونیک دوم یکدیگر را قطع و با هم همپوشانی می کنند. در این صورت میدان الکتریکی خروجی از محیط غیرخطی در حالت تطبیق فاز به صورت زیر است:

$$E_{sig}(t,\tau) \propto E(t)E(t-\tau) \quad (1)$$



شکل ۱: چیدمان تفکیک فرکانسی دروازه تولید هارمونیک دوم

ثبت طیف میدان سیگنال خروجی به وسیله یک طیف‌سنج به صورت تابعی از تأخیر بین دو پالس ورودی، اسپکتروگرام میدان E(t) را نتیجه می‌دهد، که اصطلاحاً رد تفکیک فرکانسی دروازه نوری نامیده می شود[4].

$$I_{FROG}(\omega,\tau) \propto \left|\int_{-\infty}^{\infty} E(t)E(t-\tau)\exp(-i\omega t)dt\right|^2 \quad (2)$$

$E(t-\tau)$ تابع دروازه متغیر با زمان می‌باشد. برای

[1] Intensity autocorrelation
[2] Interferometeric autocorrelation
[3] Frequency Resolve Optical Gating (FROG)
[4] Second harmonic generation
[5] Self-diffraction
[6] Polarization gate
[7] Third harmonic generation

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-01]

بازیابی میدان از اسپکتروگرام لازم است که مشخصات تابع دروازه موجود باشد. اما این تابع باید از نظر زمانی کوچکتر از پالس فوق کوتاه مورد نظر باشد. از آنجا که عملا چنین پالسی وجود ندارد، از خود پالس به عنوان تابع دروازه استفاده می کنیم با وجود اینکه اطلاعاتی درباره تابع زمانی آن نداریم. از طرفی می‌دانیم که اسپکتروگرام یک روش شهودی ریاضی برای نمایش یک تابع می‌باشد. به عبارت دیگر رد تفکیک فرکانسی دروازه نوری یک روش بصری برای نمایش پالس لیزری فوق کوتاه می‌باشد. هر چند که این اسپکتروگرام به طور تجربی و مستقیم از چیدمان مورد نظر به دست می‌آید، اما از این رد نمی‌توان به طور مستقیم شدت و فاز را به دست آورد.

رد تفکیک فرکانسی دروازه نوری به طور کیفی اطلاعاتی درباره شدت برحسب فرکانس و زمان می‌دهد. برای بازیابی دقیق مشخصات زمانی پالس و فاز آن باید از الگوریتم بازیابی فاز استفاده شود. دستیابی به این الگوریتم از مهمترین مراحل طراحی چیدمان تفکیک فرکانسی دروازه نوری می باشد.

حال نشان داده می‌شود که از رد تفکیک فرکانسی دروازه نوری با الگوریتم بازیابی فاز دوبعدی می‌توان به طور منحصر به فرد میدان الکتریکی پالس را تعیین کرد. در صورتی که در روش‌های خودهمبستگی، میدان به طور منحصر به فرد مشخص نمی‌شود. در اینجا مسأله بازیابی فاز را به یک مسأله دوبعدی تبدیل می‌کنیم بنابراین میدان الکتریکی سیگنال رد را به صورت تبدیل فوریه آن نسبت به تأخیر باز نویسی می‌کنیم.

$$I_{FROG}(\omega,\tau) \propto \left| \int_{-\infty}^{\infty} E_{sig}(t,\Omega) \exp(-i\omega t - i\Omega\tau) dt \right|^2 \quad (5)$$

در واقع مسأله بازیابی فاز دوبعدی در نگاه اول غیر قابل حل به نظر می‌رسد چون بیشتر اطلاعات فازی با به مربع شدن اندازه از دست می‌رود. اما این مشکل که در مساله بازیابی فاز یک بعدی نمی توان به یک جواب منحصر به فرد دست یافت در مسائل بازیابی فاز دوبعدی وجود ندارد و می‌توان به یک جواب منحصر به فرد دست یافت. چند روش برای بازیابی فاز وجود که یکی از آنها الگوریتم vanilla می‌باشد.

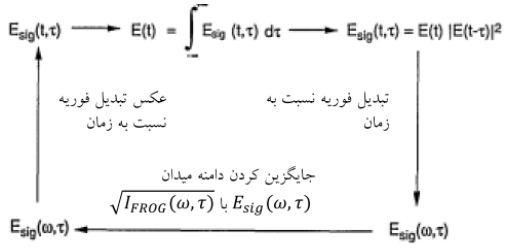
طبق شکل (۲)، در این الگوریتم یک تابع میدان الکتریکی گاوسی را به عنوان حدس اولیه درنظر گرفته و بسته به نوع فرایند غیرخطی چیدمان، میدان سیگنال و سپس با استفاده از مربع قدرمطلق تبدیل فوریه آن نسبت به زمان، اسپکتروگرام تولید می شود. این اسپکتروگرام با رد تجربی به صورت یک تابع خطا مقایسه می شود. اگر این خطا از مقدار معینی کمتر باشد میدان حدسی تقریباً درست می باشد. در غیر این صورت باید حدس جدیدی با تعریف یک میدان سیگنال اصلاح شده تولید شود که برای این کار دامنه میدان سیگنال اصلاح شده با گرفتن جذر از رد تجربی و ترم فازی آن با به هنجار کردن میدان سیگنال به دست می‌آید.

$$E'_{sig}(\omega,\tau) = \sqrt{I_{FROG}(\omega,\tau)} \frac{E_{sig}(\omega,\tau)}{\left|E_{sig}(\omega,\tau)\right|} \quad (3)$$

با گرفتن عکس تبدیل فوریه میدان سیگنال اصلاح شده در حوزه زمان محاسبه و از آن نسبت به تأخیر انتگرال گرفته می شود تا حدس جدید تولید شود.

$$E(t) = \int_{-\infty}^{\infty} E'_{sig}(t,\tau) d\tau \quad (4)$$

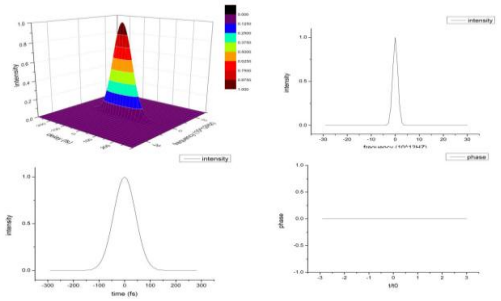
این کار تا زمانی ادامه داده می‌شود که خطا کمتر از خطای مورد نظر شود[5].



شکل ۲:الگوریتم بازیابی فاز vanilla

۲-۱- نتایج عددی الگوریتم:

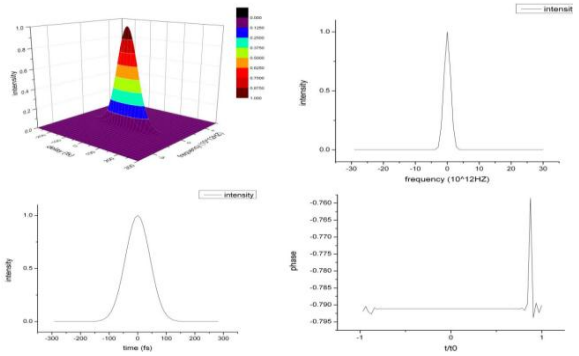
در این قسمت ابتدا یک اسپکتروگرام پالس بدون چیرپ با طول 100fs که مشخصات زمانی، طیفی و فازی آن مطابق شکل(۳) شبیه سازی می شود.



شکل ۳: اسپکتروگرام، پروفایل زمانی، طیف، فاز پالس بدون چیرپ

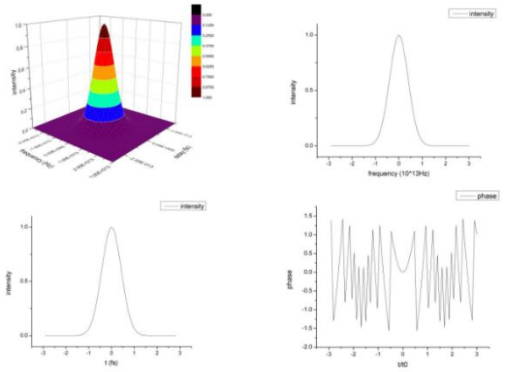
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-01]

اسپکتروگرام پالس فوق را به الگوریتم باز یابی فاز vanilla داده مـی شـود و مشخصـات آن طبـق شـکل (۴) پـالس بازیابی می شود.

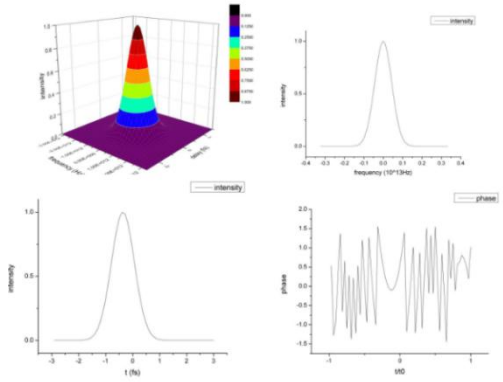


شکل ۴: اسپکتروگرام، پروفایل زمانی، طیف، فاز پالس بدون چیرپ که بازیابی بازیابی شده است.

حال همانطور که در شکل (۵) نشان داده شده است پالس fs ۱۰۰ با چیرپ ۵ را شبیه سازی می‌شود. و الگوریتم مشخصات پالس را بازیابی می کند . همانطور که در شکل (۶) می‌بینید تقریبا تمام اطلاعات پالس به درستی بازیابی می شود.



شکل ۵: اسپکتروگرام، پروفایل زمانی، طیف، فاز پالس با چیرپ۵



شکل ۶ : اسپکتروگرام، پروفایل زمانی، طیف، فاز پالس با چیرپ ۵ که بازیابی شده است

در این مقاله با استفاده از الگوریتم بـاز یـابی فـاز vanilla مشخصات طیفی، زمانی و فـازی پـالس هـای فـوق کوتـاه مورد بازیابی قرار گرفت برای یک پالس بدون چیرپ ۱۰۰ فمتوثانیه با پهنای طیفی ۵ ترا هرتـز تطـابق خـوبی بـین نتایج الگوریتم و شرایط اولیه به دست آمـد همـین کـار را برای پالسی ۱۰۰فمتو ثانیه با چیرپ ۵ و پهنای طیفی ۱۰ تراهرتز به تعمیم دادیم که اطلاعات به خوبی بازیابی شـد. بنابراین می‌توان از این الگوریتم برای بازیابی اسپکتروگرام تجربی پالس های چیرپ و غیرچیرپ استفاده کرد.

مراجع:

[1] J.C.Dielis, and W. Rudolph, *Ultrashort Laser PulsePhenomenaFundamentals,Techniques,and Applications on a Femtosecond Time Scale.* Elsevier, (2006).

[2] C.Rulli`ere, *Femtosecond Laser Pulses Principles and Experiments*, Springer, (2005).

[3] R.Trebino, K .W. DeLong, D.N.Fittinghoff, J.N.Sweetser, M.A.Krumbu¨gel, and B.A.Richman, "Measuring ultrashort laser pulses in the time-frequency domain using frequency-resolved optical gating." *Rev. Sci. Instrum*, vol(68): 2277-2297 ,(1997).

[4] R.Trebino, *Frequency-Resolved Optical Gating: The Measurement of Ultrashort Laser Pulses* , Springer, (2000).

[5] R.Trebino and D.J.Kane, "Using phase retrieval to measure the intensity and phase of ultrashort pulses: frequency-resolved optical gating." *Optical Society of America*, vol(10): 1101-1110, (1993).

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-01]