بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۲-۱۴ 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

ترکیب همدوس پرتوها با استفاده از الگوریتم SPGD

احمد کامکار، ابراهیم آقایاری، محمد کریمی، امین بابازاده، حسین فتحی، وحید وطنی، محمدصادق ذبیحی، سیدحسن نبوی

مرکز ملی علوم و فنون لیزر ایران، تهران، ایران.

چکیده – در سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی برای دستیابی به لیزرهای پیوسته‌ی توان بالا، از مرتبه‌ی ده‌ها کیلووات و بیشتر انجام گرفته است. چالش اساسی در چنین مقیاس‌هایی، قرار گرفتن کیفیت پرتو، نزدیک حد پراش است. در این مقاله، ترکیب همدوس پرتوها برای سه باریکه‌ی لیزری، شبیه‌سازی شده است. این شبیه‌سازی‌ها با نتایج تجربی به‌دست آمده در آزمایشگاه مقایسه شده‌اند و با یکدیگر در تطابق کامل هستند. در چیدمان آزمایشگاهی، فاز شاخه‌ها به صورت فعال با استفاده از مدولاتور فاز قابل کنترل، با یکدیگر قفل شده که در کشور برای اولین بار انجام شده است. در سیستم کنترلی، از الگوریتم *SPGD* برای اعمال بازخورد تغییرات فاز در مدولاتورهای فاز استفاده شده است. این سیستم کنترلی، فاز پرتوها را به گونه‌ای تغییر می‌دهد که لکه‌ی مرکزی در طرح میدان دور ثابت مانده و دارای بیشینه توان ممکن شود.

کلید واژه- لیزر توان بالا، الگوریتم SPGD، ترکیب همدوس پرتوها، قفل‌شدن فاز.

Coherent beam combination using SPGD algorithm

Ahmad Kamkar, Ebrahim Aghayari, Mohammad Karimi, Amin Babazadeh, Hossein Fathi, Vahid Vatani, Mohammad Sadegh Zabihi, Seyed Hassan Nabavi

Iranian National Center for Laser Science and Technology (INLC), Tehran, Iran.

Abstract- In recent years much effort has been expended toward high-power CW lasers on the order of tens of kilowatts and greater. The key challenge in such scaling is maintaining near-diffraction-limited beam quality. In this paper, the coherent beam combination of three laser beams have been simulated. These simulations are compared to the experimental results which shows complete conformity with each other. In experimental setup the phase of branches are locked to each other using an active controllable phase modulator which is done for the first time in the country. SPGD algorithm, is used in control system for phase change feed-back in phase modulators. This phase control system, changes beam phase in a way that the center spot in the far-field pattern has fix position and gains the maximum accessible power.

Keywords: High-power Laser, SPGD Algorithm, Coherent Beam Combination, Phase locking.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-11-12]

مقدمه

در سال‌های اخیر نیاز روز افزونی به لیزرهای توان بالا، همراه با کیفیت پرتو نزدیک به حد پراش به وجود آمده است. با توجه به محدودیت افزایش توان لیزرهای تک-مد، دستیابی به لیزرهای پرتوان را می‌توان از طریق ترکیب چند لیزر تک-مد با توان چند کیلووات، محقق نمود. برای این منظور از دو روش ترکیب غیرهمدوس و همدوس پرتوها می‌توان استفاده کرد و به توان‌های چند ده کیلووات رسید. روش ترکیب همدوس با توجه به تولید نور خروجی با درخشندگی متناسب با توان دوم تعداد پرتوهای ترکیب شده، مزیت بسیاری نسبت به ترکیب غیرهمدوس پرتوها دارد[۱]. در این مقاله سیستم ترکیب سه پرتو لیزری، به صورت همدوس فعال بررسی شده است. با افزایش توان هر شاخه و همچنین تعداد شاخه‌ها، از این روش می‌توان برای تولید لیزرهای پرتوان با کیفیت پرتو عالی، استفاده کرد.

در ادامه‌ی مقاله به‌ترتیب، مبانی و روش ترکیب همدوس پرتوها به صورت فعال، روابط مورد استفاده برای شبیه‌سازی، توضیح چیدمان آزمایشگاهی و بررسی و نتایج بدست آمده، آورده شده است.

مبانی و روش

در ترکیب همدوس پرتوها به صورت فعال، تعداد N پرتو لیزری باهم ترکیب می‌شوند. در این روش یک چشمه‌ی لیزری، با همدوسی بسیار بالا، به N شاخه تقسیم شده و توان هر شاخه، با استفاده از سیستم تقویت‌کننده، افزایش می یابد. خروجی تقویت‌کننده‌ها به صورت اپتیکی ترکیب شده و یک طرح تداخلی در میدان دور ایجاد می‌کنند. یک سیستم کنترل فاز فعال به کمک تعدادی مدولاتور فاز که در تک‌تک شاخه‌ها قرار داده شده است، فاز پرتوها را به گونه‌ای کنترل و تصحیح می‌کند، که لکه‌ی مرکزی در طرح تداخلی میدان دور، دارای بیشینه توان ممکن گردد و در نهایت یک سیستم لیزری با درخشندگی بالا ایجاد شود. این درخشندگی برای سیستم همدوس فعال، با توان دوم تعداد پرتوهای لیزری همدوس ترکیب‌شده (N^2) متناسب است. از ملزومات اساسی برای ترکیب همدوس پرتوها با بهره‌ی بالا، همدوسی فضایی و زمانی تک‌تک پرتوها با یکدیگر است. بدین منظور لیزرها باید جور-شدگی فضایی مدی داشته و هم‌راستا شده باشند، توان تقریبی یکسان و راه نوری هم‌اندازه داشته باشند و فاز لیزرها با دقت زیاد با یکدیگر قفل شده باشد[۱].

یکی از روش‌های کاربردی، برای هم‌فاز کردن پرتوها، بیشینه‌کردن توان لکه‌ی مرکزی پرتوهای ترکیب‌شده در میدان دور با استفاده از الگوریتم SPGD (Stochastic Parallel Gradient Descent) است. در این روش، فاز کلیه پرتوها به صورت تصادفی و هم‌زمان به میزان کمی تغییر داده می‌شود، سپس اثر این تغییر در میدان دور اندازه‌گیری می‌گردد. متناسب با تغییر ایجاد شده در میدان خروجی، تغییر فاز تک‌تک پرتوها به صورت بهینه تعیین می‌شود. این روش که به SPGD معروف است، به تدریج به سمت بیشینه کردن توان لکه‌ی مرکزی و هم‌فاز کردن پرتوها، پیش می‌رود[۲و۳].

۱-۱- فرمول‌بندی ریاضی

برای محاسبه‌ی طرح تداخلی میدان دور یک آرایه از پرتوها که کنار یکدیگر قرار داده شده‌اند، از معادله‌ی انتشار میدان پرتو گاوسی u، در دستگاه مختصات استوانه‌ای (r, z) استفاده می‌کنیم[۱]،

$$u(\vec{r},z)=E_0\frac{w_0}{w(z)}.\exp\left(\frac{-\vec{r}^2}{w^2(z)}\right).\exp\left(ik\frac{\vec{r}^2}{2R(z)}\right).\exp\left(i\left(kz-\varphi(z)\right)\right) \quad (۱)$$

که E_0 دامنه‌ی بیشینه‌ی میدان اپتیکی، w_0 کمر پرتو گوسی و k بردار انتشار موج است، همچنین برای دیگر پارامترها، داریم:

$$w(z)=w_0\sqrt{1+\frac{z^2}{z_R^2}},\quad R(z)=z\left(1+\frac{z^2}{z_R^2}\right)$$
$$z_R=\frac{\pi w_0^2}{\lambda},\qquad \varphi(z)=\arctan\left(\frac{z^2}{z_R}\right) \quad (۲)$$

که λ طول‌موج و z_R طول ریلی است. با جمع روی میدان تک‌تک آرایه‌ها، میدان کل U از رابطه‌ی ۳ بدست می‌آید:

$$U(\vec{r},z)=\sum_i u_i(\vec{r}_i,z_i) \quad (۳)$$

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

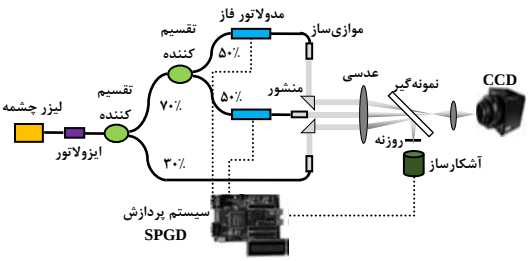
[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-11-12]

که i شمارنده روی تعداد پرتوهای ترکیب شده است. لازم به ذکر است که برای بدست آوردن طرح توزیع میدان دور، از تبدیل فوریه‌ی معادله ۳ استفاده می‌گردد[۱].

۲-۱- چیدمان آزمایشگاهی

در چیدمان اپتیکی طراحی شده‌ی برای ترکیب همدوس پرتوها، از لیزر تزویج شده به فیبر با طول‌موج ۱۰۶۴ نانومتر و پهنای طیفی ۳۰-مگاهرتز به عنوان چشمه‌ی لیزری استفاده شده است. جهت محافظت از چشمه‌ی لیزری در مقابل نور برگشتی، از یک ایزولاتور فیبری، استفاده شده است. بعد از ایزولاتور یک تقسیم‌کننده‌ی فیبری ۷۰/۳۰ قرار گرفته و شاخه‌ی قوی‌تر با یک تقسیم‌کننده‌ی ۵۰/۵۰ مجدداً به دو بخش تقسیم شده است. بدین ترتیب سه پرتو همدوس با اختلاف راه‌های مختلف که به‌صورت تقریبی دارای توان یکسانی هستند خواهیم داشت. طرح‌واره‌ی این چیدمان در شکل ۱ آورده شده است. جهت کنترل فاز پرتوها، بعد از تقسیم‌کننده‌ی ۵۰/۵۰، در دو شاخه، مدولاتور فاز فیبری قرار داده می‌شود.

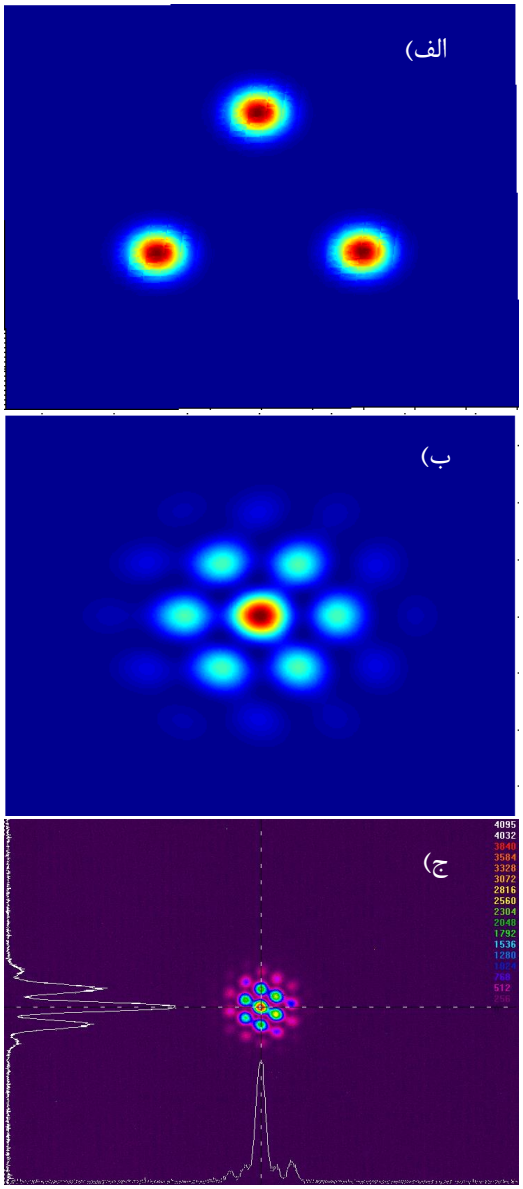
برای ترکیب پرتوها در این گزارش، از روش ترکیب پهلوبه‌پهلو(Tiled) استفاده شده است. در این روش پرتوها، با استفاده از منشورهای راست‌گوشه، در نزدیک‌ترین فاصله ممکن از یکدیگر قرار می‌گیرند. سپس پرتوها را برای هم‌پوشانی مناسب در میدان دور دقیقاً هم‌جهت کرده‌ایم. فاصله‌ی بین پرتوها در میدان نزدیک برابر با ۸-میلی‌متر از یکدیگر است. برای مشاهده‌ی طرح تداخلی در میدان دور، از یک چیدمان اپتیکی شامل دو عدسی استفاده کرده و آشکارساز را در کانون عدسی، قرار داده‌ایم.



شکل ۱: طرح‌واره‌ی چیدمان ترکیب همدوس سه پرتو

۳-۱- بررسی و نتایج

برای مقایسه بهتر نتایج بدست آمده، از شبیه‌سازی همین چیدمان در میدان دور استفاده کرده‌ایم. در شکل ۲، سه پرتو همدوس موازی که دوبه‌دو در فاصله ۸-میلیمتر از یکدیگر قرار دارند، به همراه شبیه‌سازی طرح تداخلی حاصل از ترکیب این سه پرتو در میدان دور و طرح تداخلی دیده شده در آشکارساز با استفاده از چیدمان آزمایشگاهی، آورده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود این دو طرح در تطابق کامل با یکدیگر قرار دارند.



شکل ۲: نمای سه پرتو لیزری موازی همدوس با فاصله ۸-میلی‌متر بین مرکز پرتوها (طرح میدان نزدیک) (الف) و طرح تداخلی بدست آمده در میدان دور، از ترکیب این سه پرتو لیزری در شبیه‌سازی (ب) و تشکیل شده روی آشکارساز (ج) با کنترل فعال فاز.

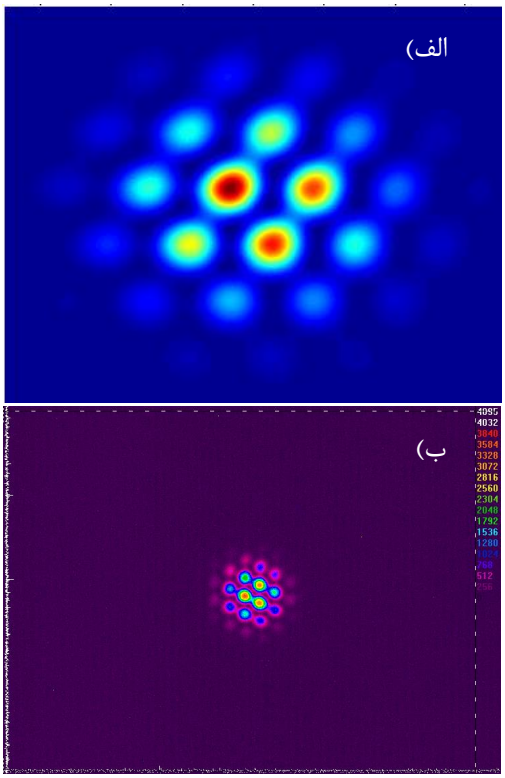
برای کنترل فعال فاز، در دو شاخه از مدولاتور فاز متصل به یک سیستم کنترل فاز (که در این گروه طراحی و ساخته شده) استفاده شده است. سیستم الکترونیکی کنترل فاز در هر لحظه از آشکارساز نمونه‌گیری کرده و با استفاده از

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-11-12]

الگوریتم SPGD، یک بازخورد متناسب برای هر مدولاتور فاز تولید می‌کند. بازخورد اعمال شده در فاز هر شاخه، به گونه‌ای عمل می‌کند که شدت پرتو در لکه‌ی مرکزی بیشینه گردد. بدون کنترل مدولاتور فاز طرح تداخلی دیده‌شده در آشکارساز ثابت نبوده و با تغییرات محیطی که باعث ایجاد اختلاف فاز بین شاخه‌ها می‌شود، تغییر می‌کند. این تغییرات به شکل جابجا شدن لکه‌های تاریک و روشن در آشکارساز مشاهده می‌شود. اما با فعال شدن سیستم الکترونیکی، طرح تداخلی ثابت، و لکه‌ی مرکزی با شدت بیشینه، همواره روشن باقی می‌ماند.

در شکل ۳ نمای طرح تداخلی، در یک لحظه، در حالت خاموش بودن سیستم کنترل، آورده شده است. برای امکان مقایسه بهتر، شبیه‌سازی طرح تداخلی میدان دور برای سه پرتو موازی با فاصله ۸-میلی‌متر از یکدیگر، که با هم اختلاف فاز دارند، نیز آورده شده است.



شکل ۳: طرح تداخلی میدان دور حاصل از ترکیب سه پرتو لیزری همدوس دارای اختلاف فاز، در شبیه‌سازی (الف) و بصورت عملی روی آشکارساز (ب).

همان‌طور که به وضوح دیده می‌شود، در هر دو طرح تداخلی، شدت لکه‌های اطراف لکه‌ی مرکزی، نسبت به حالت قبل افزایش یافته و مکان لکه‌های تاریک و روشن نیز جابجا شده است.

برای بررسی دقیق‌تر، نخست برای توان تک‌تک پرتوها مقادیر ۹٫۵۸، ۹٫۶۳ و ۹٫۶۵ میلی‌وات اندازه‌گیری گردید. سپس یک روزنه، با قطری برابر با قطر لکه‌ی مرکزی روبه‌روی توان‌سنج قرار داده شد تا بتوان شرایط روشن و خاموش بودن سیستم کنترل فاز را به صورت کمی با یکدیگر مقایسه کرد. میزان تغییرات فاز و به تبع آن طرح تداخلی، در حالت خاموش بودن مدولاتور فاز، سریع‌تر از زمان پاسخ توان‌سنج به تغییرات است. بدین ترتیب توان مشاهده شده در توان‌سنج، میانگین فضایی-زمانی پرتو عبوری از روزنه است. در حالت خاموش بودن مدولاتور، توان اندازه‌گیری شده، برای ۳ پرتو، برابر با ۹٫۶ میلی‌وات است. این مقدار با دقت قابل قبولی سه برابر توان تک پرتو است. با روشن شدن مدولاتور فاز لکه‌ی مرکزی دقیقاً روی روزنه، ثابت شده و توان اندازه‌گیری شده در توان‌سنج برابر با ۲۰٫۵ میلی‌وات است، که در مقایسه با توان تک شاخه یعنی ۳٫۲ میلی‌وات در عبور از روزنه، ۶٫۳۴ برابر شده و تقریب خوبی برای N^2 برابر شدن شدت، در ترکیب همدوس ۳ پرتو است. لازم به ذکر است با زیاد شدن تعداد پرتوهای ترکیب‌شده، از شدت لکه‌های جانبی، در طرح تداخلی میدان دور کاسته شده و درصد توان بیشتری در لکه‌ی مرکزی قرار می‌گیرد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله شبیه‌سازی چگونگی ترکیب پرتوها لیزری به صورت همدوس فعال و چیدمان آزمایشگاهی ترکیب پرتوها با روش SPGD، آورده شده است. نتایج این شبیه‌سازی با نتایج چیدمان آزمایشگاهی، در تطابق بوده و در عمل ترکیب همدوس با بازده ۷۱ درصد حاصل شده است. چیدمان اپتیکی و سیستم کنترل فاز ترکیب همدوس، برای اولین بار، در کشور با موفقیت انجام شده است.

مراجع

[1] A. Brignon, *Coherent Laser Beam Combining*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013.
[2] T. J. Wagner, "Fiber laser and beam combining and power scaling progress, air force research laboratory laser division", Proc. SPIE, 8237, 823718, 2012.
[3] M.A. Vorontsof, V.P. Sivokon, "Stochastic parallel-gradient-descent technique for high-resolution wave-front phase-distortion correction.", J. Opt. Soc. Am. A, 15, 2745-2758, 1998.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-11-12]