بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

کاربرد الگوریتم رقابت استعماری در تصحیح تطبیقی ابیراهی‌های باریکه لیزر حالت جامد

رقیه یزدانی[۱]، مرتضی حاجی‌محمودزاده[۱،۲] و حمیدرضا فلاح[۱،۲]

[۱]گروه فیزیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

[۲]گروه پژوهشی اپتیک کوانتومی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده – در این مقاله نشان داده می‌شود که می‌توان به کمک الگوریتم رقابت استعماری در یک سامانه اپتیک تطبیقی بدون حسگر جبهه‌موج، ابیراهی‌های یک باریکه‌ی لیزر حالت جامد را تصحیح کرد. توانایی تصحیح این الگوریتم با الگوریتم‌های ژنتیک و گرادیان نزولی تصادفی موازی مقایسه می‌شود. نتایج این مقایسه توانایی تصحیح بالای الگوریتم رقابت استعماری را نشان می‌دهند.

کلید واژه- اپتیک تطبیقی، الگوریتم رقابت استعماری، لیزر حالت جامد.

Application of imperialist competitive algorithm in adaptive aberration correction of solid-state laser beam

Roghayeh Yazdani[1], Morteza Hajimahmoodzadeh[1, 2], and Hamid Reza Fallah[1, 2]

[1]Department of physics, University of Isfahan, Isfahan, Iran

[2]Quantum optics research group, University of Isfahan, Isfahan, Iran

Abstract- In this paper, it is shown that the imperialist competitive algorithm can be used in a wavefront sensor-less adaptive optics system for correcting the phase aberrations of a solid-state laser beam. The correction capability of this algorithm is compared with that of genetic and stochastic parallel gradient descent algorithms. The comparison results show the very good correction capability of the imperialist competitive algorithm.

Keywords: Adaptive optics, Imperialist competitive algorithm, Solid-state laser.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-16]

۱- مقدمه

اپتیک تطبیقی یک فناوری توانمند برای تصحیح بلادرنگ ابیراهی‌های پویا است و شامل سه بخش مهم می‌باشد: حسگر جبهه موج، تصحیح‌گر جبهه موج که اغلب آینه‌ای است که با اعمال ولتاژ به محرک‌های آن (معمولاً پیزوالکتریک‌ها) تغییرشکل می‌یابد و بخش کنترل. در سال‌های اخیر، استفاده از سامانه‌های اپتیک تطبیقی مبتنی بر روش‌های بهینه‌سازی رایج شده است که در آن‌ها حسگر جبهه‌موج با سامانه‌ای ساده و ارزان‌قیمت‌تر جایگزین می‌شود [۱، ۲]. ابتدا تابع شایستگی که کمیتی مرتبط با کیفیت تصویر است، تعریف می‌گردد. پس از آن به کمک یک الگوریتم بهینه‌سازی دستورالعمل‌های اعمالی به تصحیح‌گر (معمولاً ولتاژهای اعمالی به محرک‌های آینه‌ی انعطاف‌پذیر) تعیین می‌شوند به نحوی که تابع شایستگی بهینه گردد.

یکی از کاربردهای جدید اپتیک تطبیقی تصحیح درون و برون کاواکی ابیراهی‌های باریکه‌ی لیزر می‌باشد [۱، ۲]. در لیزرهای حالت جامد، عیوب المان‌های اپتیکی و همچنین واپیچش‌های گرماییِ حاصل از توان پمپ بالا کیفیت باریکه‌ی لیزر را کاهش می‌دهد. از آنجایی که استفاده از حسگر در این لیزرها امکان‌پذیر یا کارا نمی‌باشد و همچنین ابیراهی‌های موجود کندتغییرند [۳]، اپتیک تطبیقی بدون حسگر جبهه‌موج گزینه‌ی مناسبی برای تصحیح این ابیراهی‌ها و افزایش کیفیت باریکه لیزر است. جهت این کار تاکنون از الگوریتم‌های مختلفی مانند ژنتیک، کلونی مورچه و گرادیان نزولی تصادفی موازی (SPGD) استفاده شده است[۱، ۲]. در این مقاله برای اولین بار از الگوریتم رقابت استعماری در یک سامانه‌ی اپتیک تطبیقی بدون حسگر جبهه‌موج برای حذف برون کاواکی ابیراهی‌های باریکه‌ی لیزر استفاده می‌شود و در نهایت توانایی تصحیح این الگوریتم با الگوریتم‌های ژنتیک (GA) و گرادیان نزولی تصادفی موازی (SPGD) مقایسه می‌گردد.

۲- الگوریتم رقابت استعماری

الگوریتم رقابت استعماری (ICA) از فرایند تکامل اجتماعی و سیاسی انسان الهام گرفته شده است [۴]. این الگوریتم، همانند دیگر الگوریتم‌های تکاملی با جمعیت اولیه تصادفی از راه‌حل‌های موجود آغاز می‌گردد. هر یک از این راه‌حل‌ها "کشور" نام می‌گیرد. تعدادی از بهترین کشورها به عنوان استعمارگر انتخاب شده و بقیه کشورها به عنوان مستعمره در بین آن‌ها تقسیم می‌شوند. بعد از شکل‌گیری امپراطوری‌های اولیه، رقابت استعماری در بین آن‌ها آغاز می‌شود. در جریان این رقابت به تدریج بر قدرت امپراطوری‌های قوی افزوده شده و امپراطوری‌های ضعیف حذف می‌گردند، بطوری که در نهایت تنها یک امپراطوری در جهان باقی می‌ماند. مراحل این الگوریتم به منظور بیشینه کردن تابع f بطور خلاصه در زیر توضیح داده می‌شود.

۱. برای یک مسئله با m متغیر، هر کشور آرایه‌ای m بعدی به شکل زیر است:

$$country = C = [u_1, u_2, u_3, ..., u_m]. \qquad (۱)$$

هزینه‌ی هر کشور بصورت محاسبه‌ی مقدار تابع f در متغیرهای مسئله تعریف می‌شود:

$$f = f(C) = f(u_1, u_2, u_3, ..., u_m). \qquad (۲)$$

در ابتدا تعداد $N_{country}$ کشور بصورت تصادفی تولید شده و N_{imp} تا از بهترین آن‌ها که دارای بهترین مقادیر هزینه هستند به عنوان استعمارگرها انتخاب می‌شوند و بقیه، N_{col}، مستعمره‌های آن‌ها خواهند بود که بر طبق قدرت استعمارگرها بین آن‌ها توزیع می‌شوند. برای این منظور هزینه‌ی بهنجار، F_n، و توان بهنجار، P_n، استعمارگر nام به ترتیب بصورت ریر تعریف می‌شوند:

$$F_n = f_n - \min\{f_i\}, \quad P_n = \left| \frac{F_n}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} F_i} \right|. \qquad (۳)$$

در نهایت تعداد مستعمره‌های مربوط به استعمارگر nام از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌گردد: :

$$NC_n = round\{P_n . N_{col}\} \qquad (۴)$$

۲. استعمارگرها برای افزایش قدرت خود، مستعمره‌های خود را در راستاهای مختلف فرهنگی و زبان به سمت خود جذب می‌کنند. این فرایند در ICA با افزودن X واحد به متغیرهای مستعمره انجام می‌شود، بطوری که X عددی

[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-16]

تصادفی با توزیع یکنواخت است: $x = U(0, \beta \times d)$. d فاصله‌ی میان استعارگر و مستعمره و β یک عدد بزرگتر از ۱ و نزدیک به ۲ می‌باشد.

۳. در حین حرکت مستعمره‌ها به سمت کشور استعمارگر ممکن است بعضی از این مستعمره‌ها به موقعیتی بهتر از استعمارگر یعنی موقعیتی با هزینه‌ی بهتر از هزینه‌ی استعمارگر برسند. در این حالت این دو کشور جای خود را با یکدیگر عوض کرده و الگوریتم با کشور استعمارگر در موقعیت جدید ادامه می‌یابد.

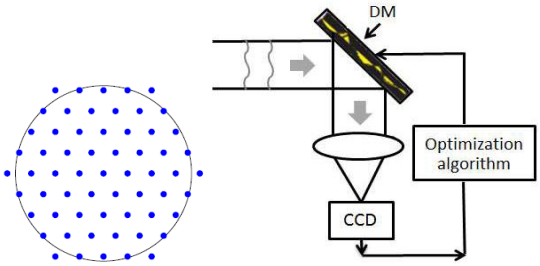
۴. همه‌ی امپراطوری‌ها سعی می‌کنند که مستعمره‌های سایر امپراطوری‌ها را تصاحب کنند. به تدریج امپراطوری‌های ضعیف مستعمره‌های خود را به امپراطوری‌های قوی می‌دهند. برای مدل‌سازی این واقعیت در ICA ضعیف‌ترین مستعمره از ضعیف‌ترین امپراطوری انتخاب می‌شود و برای تصاحب آن رقابتی بین همه‌ی امپراطوری‌ها ایجاد می‌گردد. امپراطوری‌های قوی‌تر احتمال بیشتری برای تصاحب مستعمره‌ی مذکور دارند.

۵. به تدریج امپراطوری‌های ضعیف، مستعمره‌های خود را از دست می‌دهند و حذف می‌شوند و تنها قوی‌ترین امپراطوری باقی می‌ماند. الگوریتم تا برآورده شدن شرط خاتمه ادامه می‌یابد. جزئیات فرمول‌بندی الگوریتم در [۴] آورده شده است.

۳- تصحیح ابیراهی‌های باریکه‌ی لیزربا استفاده از الگوریتم رقابت استعماری

جهت بررسی امکان تصحیح ابیراهی‌های باریکه‌ی لیزر با الگوریتم رقابت استعماری، چیدمان شکل (۱) در نظر گرفته شده است. باریکه‌ای با جبهه‌موج واپیچیده از آینه‌ی انعطاف‌پذیر (DM) بازتاب شده و در صفحه‌ی کانونی یک عدسی از طریق تبدیل فوریه سریع کانونی می‌شود. فرض شده است که آینه ۶۱ محرک دارد. پیکربندی این محرک‌ها و قطر باریکه‌ی لیزر در سمت چپ شکل (۱) نشان داده شده است. توزیع فاز ایجاد شده توسط این آینه از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$\varphi(x, y) = \sum_{i=1}^{61} u_i V_i(x, y) \qquad (۵)$$



شکل ۱: سمت راست: چیدمان مفروض در شبیه‌سازی، سمت چپ: پیکربندی محرک‌های آینه‌ی انعطاف‌پذیر

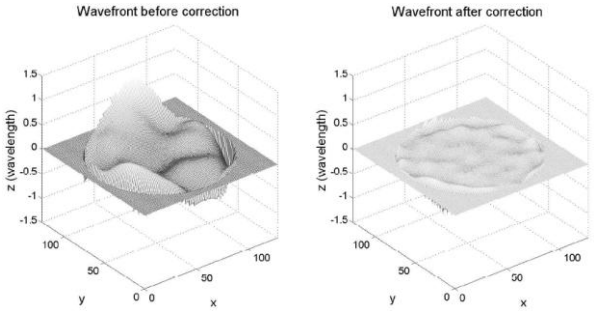
در این رابطه، u_i ولتاژ اعمال شده به محرک iام است و V_i تابع اثر محرک iام بر روی جبهه‌موج می‌باشد که با یک توزیع گوسی تعریف می‌شود [۵]:

$$V_i(x, y) = \exp\left[\ln(\omega)\left(\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}/c\right)^{\alpha}\right] \qquad (۶)$$

(x_i, y_i) موقعیت فضایی محرک iام، ω ضریب جفت‌شدگی، α توان تابع گوسی و c فاصله‌ی بین دو محرک همسایه هستند. در کار حاضر، $\omega = 0.08$ و $\alpha = 2$ در نظر گرفته شده‌اند. در شبیه‌سازیِ ابیراهی‌های جبهه‌موج (شکل (۲))، ۱۰۰ مد اول زرنیک، بدون در نظر گرفتن مد پیستون، با ضرایب تصادفی از طریق برنامه‌نویسی در محیط Matlab تولید و به جبهه‌موج تخت اولیه اضافه می‌شوند. این ضرایب در شکل (۳a) نشان داده شده‌اند. الگوریتم رقابت استعماری برای تصحیح این ابیراهی‌ها بکار می‌رود. نسبت استرل که بصورت نسبت شدت باریکه‌ی واپیچیده به شدت باریکه ایده‌آل و محدود به پراش در مرکز صفحه کانونی تعریف می‌شود، به عنوان تابع شایستگی یا همان تابع هزینه در الگوریتم در نظر گرفته می‌شود. هر کشور در این الگوریتم شامل ۶۱ ولتاژ کنترل به عنوان متغیرهای مسئله می‌باشد. تعداد کل کشورها، تعداد استعمارگرهای اولیه، پارامتر β و تعداد تکرار الگوریتم به ترتیب برابر با ۵۰، ۵، ۲ و ۵۰۰ در نظر گرفته می‌شوند. شکل (۲) توزیع جبهه‌موج و شکل (۳b) ضرایب زرنیک بعد از تصحیح ابیراهی‌ها را نشان می‌دهند. نسبت ضرایب زرنیک باقیمانده به ضرایب زرنیک اولیه ابیراهی‌ها در شکل (۳c) نشان داده شده است. این شکل مشخص می‌کند که بعد از بهینه‌سازی، کدام یک از مدها تضعیف و کدام یک تقویت شده و یا بدون تغییر باقی مانده‌است. برای وضوح بیشتر، نتایج ۴۰ مد اول از شکل (۳c) در شکل (۳d) تکرار شده است. همانطور که مورد انتظار می‌باشد، مدهای مرتبه پایین‌تر که قابل کنترل توسط آینه هستند، بعد از تصحیح بیشتر کاهش یافته‌اند. مقادیر قله تا دره (PV) و ریشه میانگین مربع (RMS) ابیراهی‌های باقیمانده بعد از تصحیح به ترتیب از $(\lambda = 1064nm)$ ۱.۴۹λ و ۰.۱۴λ به ۰۵۴λ و ۰.۰۲λ

[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-16]

کاهش یافته‌اند. این نتایج به همراه مقدار نسبت استرل نهایی که بر روی نتایج حاصل از ۱۰ بار تصحیح میانگین‌گیری شده است در جدول (۱) آورده شده‌اند. این مقادیر نشان می‌دهند که الگوریتم رقابت استعماری توانایی بسیار بالایی در تصحیح ابیراهی‌ها دارد.



شکل ۲: توزیع جبهه‌موج قبل و بعد از تصحیح ابیراهی‌ها با ICA

۴- مقایسه الگوریتم رقابت استعماری (ICA) با الگوریتم‌های GA و SPGD

به منظور مقایسه‌ی الگوریتم رقابت استعماری با الگوریتم‌های استاندارد دیگری که قبلاً جهت تصحیح ابیراهی‌های باریکه‌ی لیزر بکار رفته‌اند، از الگوریتم‌های GA و SPGD نیز برای تصحیح همان ابیراهی‌های شبیه‌سازی شده در بخش قبل استفاده می‌شود. نسبت ضرایب زرنیک باقیمانده به ضرایب زرنیک اولیه برای ۴۰ مد اول بعد از بهینه‌سازی با دو الگوریتم مذکور در شکل‌های (۳.e) و (۳.f) نشان داده شده است. نتایج بهینه‌سازی در جدول ۱ آورده شده‌اند. این نتایج نشان می‌دهند که هر سه الگوریتم دارای توانایی تصحیح یکسان می‌باشند.

جدول ۱: مقایسه نتایج بدست آمده از الگوریتم‌های ICA، GA و SPGD

Algorithm	Averaged SR_{ctr}	Final PV	Final RMS
ICA	0.92	0.54λ	0.02λ
GA	0.92	0.58λ	0.02λ
SPGD	0.92	0.56λ	0.02λ

۵- نتیجه‌گیری

نشان دادیم که می‌توان از یک الگوریتم که مبتنی بر فرایند تکامل اجتماعی و سیاسی انسان است، در یک سامانه‌ی اپتیک تطبیقی برای تصحیح ابیراهی‌های باریکه‌ی لیزر استفاده کرد. مقایسه بین این الگوریتم و الگوریتم‌های GA و SPGD توانایی تصحیح بالای الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد.

۶- مراجع

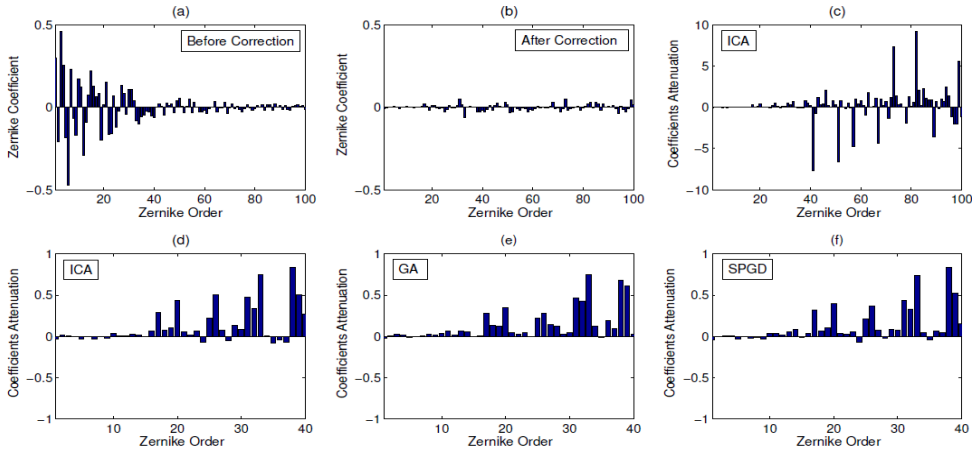
[1] Dong L., Yang P., and Xu B., **Appl. Physics B** 96 (2009) 527-533.

[2] W. Lubeigt, G. Valentine, and D. Burns, **Opt. Express** 16 (2008) 10943-10955.

[3] Yang P. and et al., **Proc. SPIE** 6018 (2005) 182-191.

[4] Atashpaz-Gargari E. and Lucas C., **IEEE Congress on Evolutionary Computation** 7 (2007) 4661-4667.

[5] Jiang W. H., Ling N., Rao X. J., and Shi F., **Proc. SPIE** 1542 (1991) 130-137.



شکل ۳: ضرایب زرنیک (a) قبل و (b) بعد از تصحیح ابیراهی‌ها. (c) نسبت ضرایب زرنیک باقیمانده بعد از تصحیح به ضرایب زرنیک اولیه قبل از تصحیح در ICA. نسبت ضرایب زرنیک باقیمانده به ضرایب زرنیک اولیه برای ۴۰ مد اول بعد از بهینه‌سازی با (d) ICA، (e) GA و (f) SPGD.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-16]