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

شبیه‌سازی و مقایسه‌ی متریک‌های کیفیت پرتو و تصویر در سیستم‌های اپتیک تطبیقی بدون حسگر

نفیسه محمدیان[۱]، سید ایوب موسوی[۲] و حسین ثقفی فر[۳]

شاهین شهر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، پژوهشکده‌ی اپتیک و لیزر

چکیده – در اپتیک تطبیقی بدون حسگر، متریک کیفیت پرتو و تصویر، جایگزین اندازه‌گیری دقیق جبهه موج با استفاده از حسگر می‌شود. در این مقاله ضمن معرفی تعدادی از متریک‌ها، اثر یک ابیراهی خاص مانند ابیراهی کوما با دامنه‌های مختلف بر متریک‌ها به دست آمد. همچنین اثر تغییر دامنه‌ی ابیراهی مشخص کروی بر روند کاهشی و افزایشی متریک‌ها بررسی شده است و متریک‌ها با یکدیگر مقایسه شده اند. در نهایت اثر ابیراهی‌های تصادفی مختلف بر پرتو و تصویر، با توجه به اندازه‌ی متریک مربع شدت نشان داده شده است.

کلید واژه- اپتیک تطبیقی بدون حسگر، متریک کیفیت، ابیراهی‌های زرنیک

Simulation and Comparison of different Beam and Image Quality Metrics in Sensor-less Adaptive Optics Systems

Nafiseh Mohammadian [1], Seyed Ayoob Moosavi [2], and Hossein Saghafifar [3]

Shahinshahr, Malek Ashtar University of Technology, Institute of Optics&Laser[1,2,3]

Abstract- In sensor-less adaptive optics systems, metrics of beam and image quality substitute instead of measuring of wavefronts precisely by using sensors. In this paper within introducing several metrics, has obtained effects of one especial aberration like coma with different amplitudes. Also, result of spherical aberrations changes on increasing or decreasing of metrics have found and compared them. Finally, effects of random aberrations on beam and image have shown and calculated magnitude of the square of intensity metric for them.

Keywords: sensor-less adaptive optics systems, metrics of beam and image quality, aberrations

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]

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

۱- مقدمه

در سیستم‌های مستقیم اندازه‌گیری فاز، کج‌شدگی یا انحنای جبهه‌موج توسط حسگر جبهه‌موج تعیین می‌شوند و تصحیح هم‌یوغ مناسب اعمال می‌شود. در سیستم‌های اپتیک تطبیقی غیر مستقیم این اندازه‌گیری توسط متریک تصویر جایگزین می‌شوند. این متریک اگرچه اندازه‌گیری مستقیم فاز جبهه‌موج نیست ولی به تغییر فاز حساس است. متریک سیستم وابسته به نوع کاربرد می‌تواند، توان پرتوی دریافتی، شدت تابش پرتو در کانون یا تیزی تصویر باشد. متریک کمیتی است که کیفیت پرتو یا تصویر دریافتی را بیان می‌کند. به طور کل هرچه اندازه عددی متریک بیشتر(برای بعضی از متریک‌ها با توجه به تعریف آنها کمتر) باشد کیفیت پرتو یا تصویر بهتر است. متریک باید طی فرآیند حلقه بسته‌ی سیستم، بهینه‌سازی شود. تصحیح فاز آزمایشی به تصحیح گر اعمال می شود و اثر آن بر متریک مورد توجه قرار می گیرد. اگر تصحیح منجر به مقادیر بالاتر متریک شود، دامنه تصحیح افزایش می یابد. در غیر اینصورت کاهش مقدار متریک به مفهوم صحیح نبودن فاز انتخاب شده است و فاز آزمایشی دیگری باید امتحان شود [1,2].

۲- تعریف تعدادی از متریک‌های پرتو و تصویر

متریک سیستم اپتیک تطبیقی باید دو ویژگی مهم داشته باشد:

۱- وقتی سیستم بدون ابیراهی است متریک به مقدار بیشینه (کمینه) خود برسد.

۲- توابع متریک باید در یک بازه زمانی کوتاه تر از زمان تغییر ابیراهی ها (از مرتبه‌ی ۲ms) قابل محاسبه باشند.

علاوه بر این دو ویژگی گستردگی جسم و آسانی به کارگیری آن نیز اهمیت دارد.

مولر و بوفینگتن در سال ۱۹۷۴، تصحیح ابیراهی‌ها بر مبنای متریک‌های تصویر را معرفی کرده و ثابت کردند که این متریک ها در غیاب ابیراهی‌ها بیشینه می‌شوند[3].

با استفاده از یک دوربین CCD، ماتریس شدت قابل دستیابی بوده و متریک‌های مختلف را بر اساس آن می‌توان محاسبه کرد.

کیفیت پرتو یا تیزی تصویر را می‌توان با تعریف متریک مناسب مشخص کرد. تعدادی از متریک‌های مورد استفاده برای تصحیح کیفیت پرتو و تصویر در زیر بیان شده است.

متریک S_1 برتابندگی تصویر در یک نقطه دلخواه است . این نقطه چنانچه کج شدگی تصحیح شده باشد، در مرکز قرار می‌گیرد در غیر اینصورت در هر جایی از صفحه تصویر می تواند باشد. مولر و بوفینگتن پیشنهاد کردند که نقطه‌ی مورد نظر در محل بیشترین شدت قرار گیرد:

$$S_1 = I_{\max}(x_0, y_0) \qquad (۱)$$

متریک S_2 با قرار دادن ماسکی بر روی برتابندگی تعریف می‌شود [4]. این ماسک می تواند مقدار PSF در غیاب ابیراهی ها باشد. برای یک چشمه نقطه ای این ماسک متناظر با یک روزنه‌ای با قطر برابر با اندازه حد پراش تصویر است. بنابر این متریک S_2 برای تصویربرداری جسم نقطه ای مناسب است.

$$S_2 = \int |I(x,y)M(x,y)|dxdy \qquad (۲)$$

x و y مختصات صفحه تصویر، $I(x,y)$ برتابندگی تصویر و $M(x,y)$ تابع ماسک است.

در متریک خطای S_3، $I_0(x,y)$ نمایه‌ی شدت بدون ابیراهی است. این متریک باید کمینه شود. این متریک نیز برای اجسام گسترده مناسب نیست، زیرا باید تصویر حد پراش $I_0(x,y)$ را بدانیم.

$$S_3 = \int |I(x,y) - I_0(x,y)|^n dxdy \qquad (۳)$$

متریک S_4 متریک های توانی است که برای اندازه گیری کیفیت تصویر به کار می روند و در آن n می‌تواند 2,3,4 باشد. اگر خطای جبهه موج صفر باشد این متریک بیشینه می شود و حتی در حضور اجسام با توزیع برتابندگی نامنظم نیز برقرار است. این متریک برای اجسام گسترده مناسب است.

$$S_4 = \int I^n(x,y)dxdy \qquad (۴)$$

S_5 اندازه آنتروپی تصویر است که توسط روگمن به عنوان معیار متریک انتخاب شد. آنتروپی کمیتی است که درجه بی نظمی یک سیگنال (در اینجا شدت) را بیان میکند. هر چه درجه‌ی بی نظمی بالاتر باشد آنتروپی بیشتر است.

$$S_5 = -\int I(x,y)\ln I(x,y)dxdy \qquad (۵)$$

متریک ساده دیگر S_6 جمع شدت های پیکسل های یک منطقه از فضای تصویراست که سطل یا ظرف (bucket) نامیده می شود.

$$S_6 = \int_{bucket} I(x,y)dxdy \qquad (۶)$$

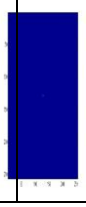
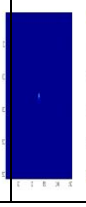
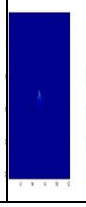
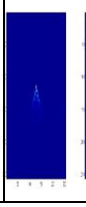
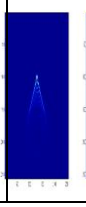
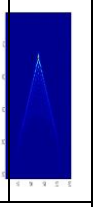
متریک مناسب بنابرکاربرد موردنظرسیستم انتخاب میشود [5].

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]

۳- شبیه سازی متریک‌های مختلف تصویر

برای مقایسه متریک‌ها و تغییراتشان با وارد کردن مقادیر مختلف ابیراهی کوما در سیستم با استفاده از نرم افزار Matlab شبیه سازی صورت گرفته است. ابیراهی کوما با استفاده از جمله هفتم مد زرنیک ایجاد شده است. این ابیراهی با دامنه‌ی معین بر فاز جبهه موج تخت اثر داده می‌شود. با تبدیل فوریه گرفتن از جبهه موج ناشی از ابیراهی کوما و ضرب در همیوغ آن، تابع گستردگی نقطه ای (PSF)[۱] ناشی از ابیراهی کومای اعمال شده به دست می‌آید. با استفاده از هم‌پیچش PSF و تصویر اولیه بدون ابیراهی، توزیع شدت تصویر نهایی پس از اعمال ابیراهی بر آن به دست می‌آید. در نهایت می‌توان متریک‌های مورد نظر را با استفاده از جمع شدت پیکسل‌های توزیع شدت نهایی به دست آورد. نتایج این شبیه‌سازی در جدول ۱ آمده است. همان‌طور که دیده می‌شود با افزایش دامنه‌ی ابیراهی کوما، نسبت اشترل از ۱ تا ۰/۳۷ کاهش می‌یابد و متریک‌های $I^2, I^3, I^4, I\ln I, \mathrm{Im}ax$ با افزایش دامنه‌ی ابیراهی‌ها کاهش می‌یابند و متریک $I - I_0$ افزایش می‌یابد. نسبت اشترل و مقادیر متریک‌ها همه با استفاده از شدت پرتو در جدول ۱ محاسبه شده‌اند. همچنین دیده می‌شود که با افزایش دامنه‌ی ابیراهی یک روند کاهشی یا افزایشی برای مقادیر متریک‌های مختلف وجود دارد پس همه‌ی این متریک‌ها کمیت‌های مناسبی برای بیان کیفیت پرتو یا تصویر را بیان می‌کنند. به عبارتی ویژگی اول متریک‌های تصویر را نشان می‌دهند.

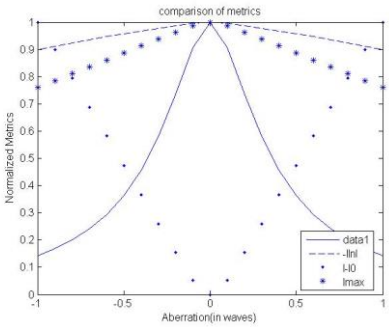
جدول ۱: محاسبه‌ی متریک‌ها با دامنه‌های متفاوت ابیراهی کوما

Amplitude	0λ	0/25λ	0/5λ	1 λ	2 λ	4λ
						
Metrics Evaluation						
SR	**1**	**0/68**	**0/54**	**0/45**	**0/40**	**0/37**
I^2	**$1/88e^{-5}$**	**$8/7e^{-6}$**	**$5/53e^{-6}$**	**$3/77e^{-6}$**	**$2/96e^{-6}$**	**$2/6e^{-6}$**
I^3	**$8/19e^{-8}$**	**$2/59e^{-8}$**	**$1/30e^{-8}$**	**$7/35e^{-9}$**	**$5/12e^{-9}$**	**$3/4e^{-9}$**
I^4	**$3/55e^{-10}$**	**$7/67e^{-11}$**	**$3/07e^{-11}$**	**$1/43e^{-11}$**	**$8/81e^{-12}$**	**$6/65e^{-12}$**
IlnI	**$2/36e^{-2}$**	**$1/72e^{-2}$**	**$1/42e^{-2}$**	**$1/21e^{-2}$**	**$1/10e^{-2}$**	**$1/03e^{-2}$**
I-I0	**0**	**$1/4e^{-3}$**	**$2/0e^{-3}$**	**$2/4e^{-3}$**	**$2/6e^{-3}$**	**$2/7e^{-3}$**
I_{max}	**$4/3e^{-3}$**	**$3/0e^{-3}$**	**$2/4e^{-3}$**	**$1/9e^{-3}$**	**$1/7e^{-3}$**	**$1/6e^{-3}$**

۴- مقایسه‌ی متریک‌های مختلف

برای مقایسه‌ی بهتر متریک‌های مختلف با یکدیگر شبیه سازی دیگری با استفاده از نرم افزار MATLAB انجام شده است. در شبیه‌سازی دیگر اثر اندازه‌های مختلف ابیراهی کروی بر متریک‌های مختلف شبیه‌سازی شده است. برای ایجاد صفحات فاز ابیراهی‌ها از نمایش زرنیک استفاده شده است. مقدار دامنه‌ی ابیراهی کروی از 1- تا ۱ با گام ۰/۱ طول موج افزایش داده شد، و نمودار کاهش یا افزایش این متریک‌ها بر حسب دامنه‌ی ابیراهی‌ها رسم شده است. متریک‌های مختلف با استفاده از جمع شدت پیکسل‌ها به دست می‌آید. برای مقایسه‌ی بهتر متریک‌ها با تقسیم بر بیشینه‌ی شدت به ۱ بهنجار می‌شوند. همان‌طور که در شکل های ۱و۲ دیده می‌شود همه‌ی متریک‌ها در ابیراهی صفر یک بیشینه یا کمینه دارند. هر چه شیب تغییرات متریک‌ها بیشتر باشد، متریک بهتری برای تشخیص کیفیت پرتو یا سیستم داریم و اثر نوفه بر آن کمتر می‌شود و متریک مناسب‌تری خواهد بود.

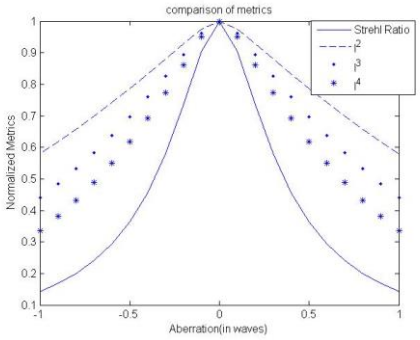
با مقایسه‌ی متریک‌ها برای چشمه‌های نقطه‌ای و گسترده نتیجه می‌شود که متریک‌های توانی، برای اجسام گسترده مناسب تر هستند. همچنین به دلیل شیب بیشتر تغییرات متریک‌های توانی با توان بالاتر، این متریک‌ها برای اجسام با پراکندگی زیاد مناسب تر هستند ولی برای کاربردهای آنی و سریع برای کم کردن حجم محاسبات از متریک I^2 استفاده می‌شود. متریک توان در ظرف نیز برای اجسام نقطه‌ای مناسب است. برای کاربرد انتشار پرتو لیزر این متریک‌ها با استفاده از آشکارساز نوری اندازه-گیری شده و با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی، تغییرات آینه‌ی تغییرشکل پذیر به گونه‌ای انجام می‌شود که متریک بیشینه شود.



شکل ۱: مقایسه‌ی متریک‌های $I\ln I, I - I_0, \mathrm{Im}ax$ و نسبت اشترل با تغییر دامنه‌ی ابیراهی کروی

[۱] Point Spread Function

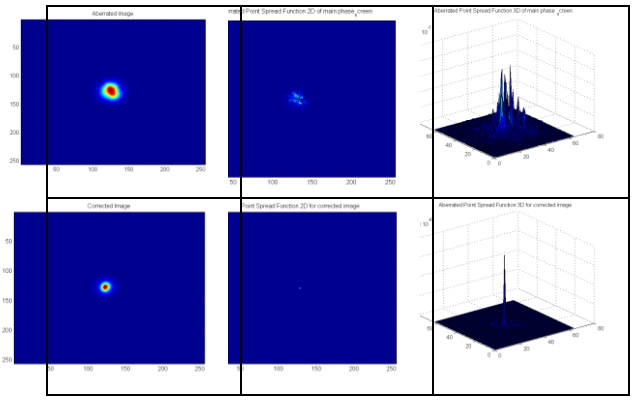
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]



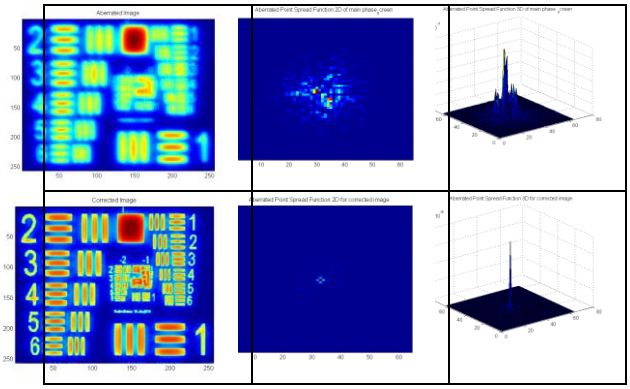
شکل۲: مقایسه‌ی متریک‌های توانی و نسبت اشترل با تغییر دامنه‌ی ابیراهی کروی

۵- متریک I^2 و کیفیت پرتو و تصویر

در قسمت سوم شبیه‌سازی، اثر ابیراهی‌های تصادفی بر یک پرتو لیزر و تصویر با استفاده از متریک I^2 انجام شده است. در این شبیه‌سازی ابتدا ابیراهی‌های تصادفی توسط ترکیب مدهای زرنیک ایجاد می‌شود(با استفاده از ایجاد صفحات فاز تصادفی با طیف کالموگروف[۶])، سپس اثر آن بر دهانه‌ی اپتیکی وارد می‌شود و با تبدیل فوریه‌ی تابع دهانه به توان ۲ نمودار تابع گستردگی نقطه‌ای آن را به دست آورده و در پرتو لیزر یا تصویر اولیه اثر دادیم و با استفاده از توزیع شدت به دست آمده برای پرتو و تصویر متریک I^2 محاسبه شد. پس از تصحیح شدت پرتو و تصویر، متریک I^2 مجددا محاسبه شد. نتایج تصحیح پرتو یا تصویر و هماهنگی با کیفیت بیان شده با متریک I^2 در تصاویر ۳و۴ به خوبی دیده می‌شود. همچنین تابع پهن شدگی نقطه ای ۲و۳ بعدی نشان داده شده است. متریک $J = I^2$ و نسبت اشترل Sr برای تصویر و پرتو دارای ابیراهی و تصحیح شده به دست آمده است.



شکل ۳: اثر ابیراهی‌های تصادفی بر پرتو و تابع گسترش نقطه‌ای و محاسبه‌ی متریک و نسبت اشترل $J_{ab} = 8.35*10^{-9}, Sr_{ab} = 0.22$
$J_{cor} = 2.95*10^{-8}, Sr_{cor} = 0.65$



شکل ۴: اثر ابیراهی‌های تصادفی بر تصویر و تابع گسترش نقطه‌ای و محاسبه‌ی متریک و نسبت اشترل $J_{ab} = 1.72*10^{7}, Sr_{ab} = 0.45$
$J_{cor} = 2.53*10^{7}, Sr_{cor} = 0.70$

۶- نتیجه‌گیری

در اپتیک تطبیقی بدون حسگر، برای بیان کیفیت پرتو یا تصویر، به جای اندازه‌گیری دقیق جبهه موج با استفاده از حسگر، متریک‌های مختلف محاسبه می‌شوند. بنابراین در این مقاله متریک‌های مختلف کیفیت پرتو و تصویر معرفی شدند. سپس اثر ابیراهی‌های مشخص زرنیک کوما با دامنه‌های متفاوت بر متریک‌های مختلف نشان داده شد. سپس متریک-های مختلف با یکدیگر مقایسه شده و می توان بهترین متریک را انتخاب کرد. در آخر برای ابیراهی‌های تصادفی مختلف و اثر آن بر پرتو یا تصویر، مقدار نسبت اشترل و متریک I^2 به دست آمد.

۷- مراجع

[1] Biru Wang, Martin J. Booth, ‘Optimum deformable mirror modes for sensorless adaptive optics’, Optics Communications 282 , 4467–4474, 2009.

[2] Martin J. Booth, “Adaptive Optics for Biological Imaging", J. Kubby (ed.), CRC Press, 2013.

[3] R. A. Muller and A. Bufington. Real-time correction of atmospherically degraded telescope images through image sharpening. J. Opt. Soc. Am., 64(9), 1974.
[4] T. R. O'Meara. The multi-dither principle in adaptive optics . J. Opt. Soc. Am., 67(3) :306, 1977.

[5] J. R. Fienup and J. J. Miller. Aberration correction by maximizing generalized sharpness metrics. J. Opt. Soc. Am. A, 20(4):609{20, 2003.

[۶] ن. محمدیان، ا.مبشری، ح. ثقفی فر، ح. فلاح، "شبیه سازی تغییرات فاز ناشی از تلاطم جو و محاسبه نوع و مقدار ابیراهی ها با استفاده از ضرایب زرنیک"، هفدهمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران، ۱۳۸۹ .

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]