



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



بازیابی تابع نقطه گستر (PSF) میکروسکوپ اپتیکی توسط تصویر برداری از اجسام بزرگ

مهدیه چرتاب جباری، امیر حسین برادران قاسمی، حمید لطیفی

دانشکده فیزیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده - در این مقاله تابع نقطه گستر PSF با استفاده از الگوریتم برآورد بیشینه امید ریاضی در دو چیدمان اپتیکی مختلف و با استفاده از ذرات کروی در دو اندازه متفاوت بازیابی می‌شود. هدف در این آزمایش بررسی امکان برآورد PSF یک سیستم تصویر برداری اپتیکی با استفاده از تصویر برداری از اجسامی است که اندازه آنها بسیار بزرگ‌تر از حد پراش ریلی در سیستم مورد نظر باشد. نشان خواهیم داد که حتی با وجود نویز در تصویر حاصل از جسمی با بزرگی بیش از دو برابر حد پراش اپتیکی، PSF سیستم قابل بازیابی است.

کلید واژه- تابع نقطه گستر، PSF، میکروسکوپ اپتیکی، الگوریتم برآورد بیشینه امید ریاضی، ذرات پلی استایرن

Point Spread Function reconstruction of an optical microscope using large object imaging

Mahdieh Chartab Jabbari, Amir H. Baradaran Ghasemi, Hamid Latifi

Department of Physics, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Abstract- In this paper, by using expectation-maximization for maximum likelihood estimation algorithm and by using spherical beads with two different sizes, the point spread function (PSF) is calculated in two different optical setups. The purpose of this experiment is to investigate the possibility of PSF reconstruction in an optical microscope through very large objects compared to that of the diffraction limit in the optical systems. We show that the PSF of an optical microscope can be estimated even through objects with size at least two times larger than the diffraction limit and with a noisy image.

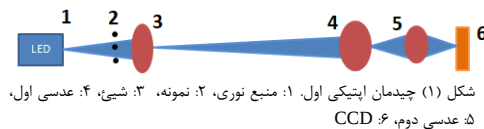
Keywords: Point spread function, PSF, optical microscope, maximum likelihood estimation algorithm, Polystyrene beads

مقدمه

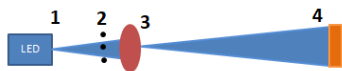
در یک میکروسکوپ نوری در دست داشتن یک شیء با کیفیت بالا تاثیر بسزایی در دریافت تصویری با کیفیت مطلوب خواهد داشت. با این وجود یک سیستم تصویربرداری متعارف حتی با داشتن اجزاء اپتیکی بی نقص، قادر به ایجاد تصویر ایده آل نخواهد بود. به دلیل وجود حد پراش اپتیکی، تصویر تولید شده توسط سیستم از یک جسم نقطه گونه هیچگاه نقطه نخواهد شد بلکه ابعاد آن پهن می گردد. لذا تصویر جسم همواره درجه ای از تاری و بهم ریختگی خواهد داشت. این فرایند تخریب در یک سیستم تصویربرداری توسط تابعی به نام تابع نقطه گستر PSF بیان می شود. در علم اپتیک، PSF تابعی است که پاسخ سیستم تصویربرداری به یک جسم نقطه ای (الگوی پراش نور از یک منبع نقطه ای) را توضیح می دهد و بعنوان معیاری از کیفیت سیستم در نظر گرفته می شود. در یک سیستم ایده آل، شکل PSF تابع ایری با پهنای بسیار کوچک است. در صورت معلوم بودن PSF سیستم تصویربرداری، تصویر حاصل از سیستم توسط عمل پیچش (Convolution) تابع نقطه گستر با تابع جسم بدست می آید. بنابراین با استخراج PSF سیستم و تصویر حاصل شده از جسم توسط سیستم، پروفایل شدت جسم با عمل واپیچش (Deconvolution) قابل محاسبه خواهد بود. لذا عمل واپیچش، فرایند تخریب در کیفیت تصویر را جبران می کند و تصویری با وضوح بیشتر بازیابی می گردد. بنابراین استخراج PSF یک سیستم تصویربرداری از اهمیت زیادی برخوردار است و روش های مختلفی برای اندازه گیری آن توسعه یافته اند [1]. چالش اصلی در استخراج PSF این است که جسم مورد استفاده باید نقطه ای باشد. لذا از آنجایی که جسم نقطه ای ابعادش از حد پراش بسیار کوچکتر می باشد لذا سیستم تصویربرداری توان تفکیک مناسب برای تشکیل تصویر واضح نخواهد داشت و مرزهای تصویر حاصل شده تار و غیر قابل تشخیص خواهد بود. از طرفی دیگر بدلیل کوچکی جسم

نقطه ای تصویر ایجاد شده روی CCD سیستم، تعداد پیکسل های کمی را در بر می گیرد و عملا خطای زیادی در استخراج ابعاد تصویر بوجود می آید. روش های سنجش PSF معمولا به دو دسته غیر آگاهانه (Blind) و آگاهانه (Non-Blind) طبقه بندی می شوند [۲ و ۳]. در روش آگاهانه جهت عمل واپیچش و بازیابی PSF از تصویر یک جسم از پیش طراحی شده استفاده می شود. به عنوان مثال جسم مفروض می تواند از یک صفحه شطرنجی با لبه های مشخص و تباین زیاد آماده شود. همچنین در این روش می تواند از یک روزنه بسیار کوچک روی منبع نوری بعنوان جسم نقطه ای جهت استخراج PSF استفاده شود. ولی در روش غیر-آگاهانه جسم مورد استفاده جهت بازیابی PSF سیستم کاملا اختیاری است و معمولا از ناحیه ای اختیاری از تصویر جسم برای عمل واپیچش استفاده می گردد. از مزیت های این روش می تواند به کوتاه بودن زمان اجرای الگوریتم محاسباتی توسط رایانه اشاره گردد. ولی این روش تنها برای تصاویری با سیگنال به نویز بالا مناسب است و تخمین PSF، حساسیت بالایی نسبت به خطای آزمایش خواهد داشت [۲]. یکی از روش های مطرح برای انجام عمل واپیچش روشی تکرار شونده به نام الگوریتم برآورد بیشینه درست نمایی با بیشینه سازی امید ریاضی می باشد، بصورتی که در هر بار تکرار تصویر بازیابی شده بهبود می یابد [۳ و ۴]. هدف پژوهش حاضر محاسبه دقیق PSF در یک میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی زیاد توسط روش آگاهانه می باشد. محاسبه عمل واپیچش در آن توسط برآورد بیشینه امید ریاضی در پردازش تصویر انجام می گردد. در این مقاله تلاش شده است که از تصویر ذرات کروی نقطه گونه با قطر مشخص در الگوریتم برآورد بیشینه امید ریاضی برای محاسبه PSF استفاده شود. این امر باعث می گردد که حدس اولیه معتبرتری برای حل الگوریتم برآورد بیشینه امید ریاضی در نظر گرفته شود. در ادامه بعد از بیان الگوریتم محاسباتی عمل واپیچش، به دو چیدمان اپتیکی مناسب برای سیستم تصویربرداری

فاصله کانونی برابر با ۳,۵cm ذخیره می‌گردد. فاصله کاری عدسی مرکب برابر با ۲۰cm و F/# آن تا ۱,۴ قابل تغییر می‌باشد. بزرگنمایی حاصل از این چیدمان ۳۳۴۳ بدست‌آمد. در چیدمان اپتیکی شکل (۲) از یک عدد میکروسکوپ تجاری استفاده شده است. شیئی مورد استفاده در چیدمان شکل (۱) در این آزمایش نیز استفاده می‌شود. همچنین از یک CMOS با توانایی تصویربرداری ۱۸ مگاپیکسل برای ذخیره تصویر حاصل از این میکروسکوپ استفاده شد. بزرگنمایی حاصل ۱۹۳۷ بدست آمد.



شکل (۱) چیدمان اپتیکی اول. ۱: منبع نوری، ۲: نمونه، ۳: شیئی، ۴: عدسی اول، ۵: عدسی دوم، ۶: CCD



شکل (۲) چیدمان اپتیکی دوم. ۱: منبع نوری، ۲: نمونه، ۳: شیئی، ۴: گیرنده نوری

در این آزمایش از کره‌های پلی استایرن به عنوان جسم نقطه‌گونه در دو اندازه ۱۰۰۰ نانومتر و ۳۸۲ نانومتر استفاده شده است. با در نظر داشتن اندازه پیکسل‌ها برای هر کدام از عناصر معادله، یعنی p و $h_{0,k}$ ، پروفایل شدت مربوطه به دست می‌آیند. حل معادله فوق به روش تکرار انجام می‌گیرد. برای شروع محاسبات $h_{0,k}$ اولیه با استفاده تابع حد پراش رایلی محاسبه می‌گردد. بنابراین با استفاده از تصاویر تجربی حاصل از ذرات کروی و به کمک انتگرال حاصل از روش بیشینه سازی امید ریاضی، PSF چیدمان اپتیکی محاسبه می‌شود.

نتایج

پروفایل‌های شدت تابع نقطه گستر و تصاویر گرفته شده بترتیب برای چیدمان شکل‌های (۱) و (۲) با استفاده از دو نوع جسم کروی در شکل‌های (۳) و (۴) قابل مشاهده هستند. همچنین در شکل (۵) پروفایل شدت در امتداد خط گذرنده از وسط تصاویر شکل‌های (۳) و (۴) رسم شده‌اند. با مقایسه تصاویر شکل ۳ (ج و د) و همچنین شکل

پرداخته می‌شود. سپس نتایج حاصل در استخراج PSF آنها، بیان می‌گردند.

تئوری

الگوریتم برآورد بیشینه امید ریاضی یک روش تکرارشونده است که به دنبال یافتن برآوردی با بیشترین درست نمایی برای یک توزیع پارامتری است. با استفاده از این الگوریتم و عمل واپیچش، تابع نقطه گستر که سیستم تصویربرداری برای ایجاد تصویر بر روی جسم اعمال می‌کند، قابل بازبایی می‌شود [۴]. در یک سیستم میکروسکوپی، اگر جسمی که از آن تصویر برداری می‌شود، نقطه‌ای باشد، معادله زیر برای تصویر حاصل، مطرح می‌باشد،

$$h_m(r) = p(r) \otimes h_o(r) \quad (1)$$

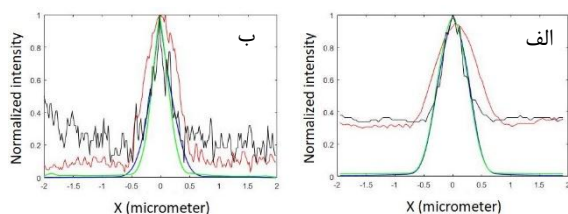
بدین صورت که p تابع جسم نقطه‌ای، h_o تابع نقطه گستر و h_m تصویر حاصل از جسم نقطه‌ای است. با پیاده سازی الگوریتم بیشینه سازی امید ریاضی برای $p(r)$ و همچنین معادله (۲) برآورد دقیقی از تابع نقطه گستر یک سیستم تصویربرداری بدست می‌آید،

$$h_{o,k+1}(x) = h_{o,k}(x) \int \left[\frac{p(x,y)}{\int (p(y-x)h_{o,k}(x) + b)dx} \right] h_m(y) dy \quad (2)$$

بطوریکه، $h_{o,k}$ تابع نقطه گستر تخمین زده شده k ام برای سیستم تصویربرداری است. همچنین X و Y بترتیب مختصات صفحه جسم و تصویر می‌باشند و b میانگین شدت پس‌زمینه است [۳].

روش انجام آزمایش

در چیدمان اپتیکی شکل (۱)، نور ناهمدوس با استفاده از یک منبع نور هالوژن به یک شیئی ۱۰۰x-oil با روزنه عددی (NA) برابر با ۱,۲۵ تابانده می‌شود. بعد از شیئی یک عدسی نازک با فاصله کنونی ۷,۵cm و با NA برابر با ۰,۵ و در فاصله ۷cm از آبجکتیو، قرار داده می‌شود. تصویر نمونه توسط یک CCD و یک عدسی مرکب با



شکل (۵) شدت پروفایل‌های PSF (الف) در امتداد خط گذرنده از میانه شکل (۳) و (ب) در امتداد خط گذرنده از میانه شکل (۴). در هر دو تصویر منحنی آبی، PSF حاصل از کره 1000nm و منحنی سبز، PSF حاصل از کره 382nm و منحنی قرمز، تصویر کره 1000nm و همچنین منحنی سیاه، تصویر کره 382nm می‌باشند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش بطور تجربی با تصویربرداری از کره‌های هم اندازه در دو اندازه 382nm (حدود حد پراش رایلی) و 1000nm نانومتر (بیش از دو برابر حد پراش) به بازیابی PSF یک میکروسکوپ آزمایشگاهی و یک میکروسکوپ تجاری توسط حل عددی معادله واپس‌باز بروس الگوریتم برآورد پیشینه امید ریاضی، پرداخته شد. نتیجه مهم اینکه با استفاده از این روش حتی با تصویربرداری از اجسام خیلی بزرگتر از حد پراش سیستم اپتیکی، PSF سیستم قابل بازیابی می‌باشد.

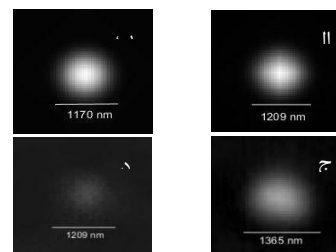
سپاس‌گزاری

این پژوهش بر اساس قرارداد شماره ۱۳ پ ۹۵ توسط ستاد توسعه علوم و فناوری‌های شناختی ایران مورد حمایت قرار گرفته است.

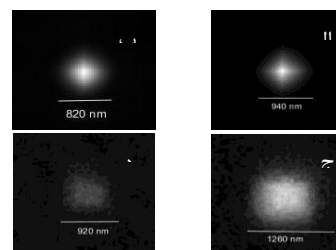
مرجع‌ها

- [1] Cole, Richard W., Tushare Jinadasa, and Claire M. Brown. "Measuring and interpreting point spread functions to determine confocal microscope resolution and ensure quality control." *Nature protocols* 6.12 (2011): 1929.
- [2] van Kempen, Geert MP, et al. "Comparing maximum likelihood estimation and constrained Tikhonov-Miller restoration." *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine* 15.1 (1996) 76-83.
- [3] Yoo, H., I. Song, and D-G. GWEON. "Measurement and restoration of the point spread function of fluorescence confocal microscopy." *Journal of microscopy* 221.3 (2006) 172-176.
- [4] Markham, Joanne, and José-Angel Conchello. "Fast maximum-likelihood image-restoration algorithms for three-dimensional fluorescence microscopy." *JOSA A* 18.5 (2001): 1062-1071.

۴(ج و د) مشخص است که با بزرگ شدن اجسام هر چند که همچنان اجسام نقطه‌گونه به حساب می‌آیند ولی اندازه تصاویر آنها نیز بزرگ می‌شوند.



شکل (۳) PSF اندازه‌گیری شده برای چیدمان شکل (۱) با ذرات پلی استایرن در اندازه‌های (الف) 1000nm و (ب) 382nm . تصاویر گرفته شده از ذرات پلی استایرن (ج) 1000nm و (د) 382nm توسط چیدمان شکل (۱)



شکل (۴) PSF اندازه‌گیری شده برای چیدمان شکل (۲) با ذرات در اندازه‌های (الف) 1000nm و (ب) 382nm . تصاویر گرفته شده از ذرات (ج) 1000nm و (د) 382nm توسط چیدمان شکل (۲)

لذا با اطمینان نمی‌توان گفت چه اندازه‌ای از جسم نقطه‌گونه برای تخمین مستقیم PSF برای یک میکروسکوپ مناسب است. ولی همانطور که در شکل ۳(الف و ب) و همچنین ۴(الف و ب) مشاهده می‌شود با پیاده‌سازی الگوریتم بازیابی تابع نقطه گستر روی دو اندازه ذکر شده از جسم نقطه‌گونه حتی در ابعاد بزرگتر (بیش از دو برابر حد پراش) مربوط به میکروسکوپ‌ها، به یک جواب مشخص برای PSF هر یک از میکروسکوپ‌ها می‌رسیم. نکته مهم اینکه حتی اگر نویز در تصاویر حاصل از سیستم میکروسکوپی موجود باشد (رنگ‌های سیاه و قرمز در شکل ۵)، با پیاده‌سازی این الگوریتم امکان بازیابی PSF سیستم همچنان امکان‌پذیر است، (رنگ‌های سبز و آبی در شکل ۵) که تقریباً با خطای قابل قبول روی هم افتاده‌اند). پهنای در نصف پیشینه تابع نقطه گستر در چیدمان‌های شکل (۱) و (۲) به ترتیب 833nm و 444nm محاسبه می‌شوند.