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

# بررسی پدیده Defocusing در اندازه‌گیری توابع انتقال مدولاسیون (MTF) دوربین CCD مبتنی بر اندازه‌گیری تابع پخشیدگی نقطه‌ای (PSF)

امیر حسین شهبازی[۱]، خسرو معدنی پور[۲و۳] ، عطا ا... کوهیان محمدآبادی[۱] و احسان پازوکی[۴]

[۱]دانشکده فیزیک، دانشگاه تهران
[۲]آزمایشگاه اندازه گیری اپتیکی، دانشگاه صنعتی امیر کبیر
[۳]پژوهشکده اپتیک، لیزر و فوتونیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
[۴] دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

**چکیده – در این مقاله به بررسی کیفیت دوربین *CCD* و نقش تاری تصویر (*Defocusing*) در آن به کمک محاسبه تابع انتقال مدولاسیون پرداختیم. برای محاسبه تابع انتقال، تابع پخشیدگی نقطه‌ای اندازه‌گیری شده است. در آزمایش تجربی از پرتوی گســـترده*LED* سفید گرم به عنوان منبع ناهمدوس مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت تاثیر جابجایی لنز دوربین*CCD* بر تحول تابع انتقال مدولاسیون و فرکانس قطع آن بررسی گشت.**

کلید واژه- تاری تصویر، تابع انتقال مدولاسیون، دوربین CCD، تابع پخشیدگی نقطه‌ای، فرکانس قطع.

# Investigating the Defocusing Phenomenon in CCD MTF Measurement Based On PSF Technique

Amir Hossein Shahbazi[1], KhosrowMadani Pour[2, 3], Ataollah Koohian Mohammad Abadi[1] and Ehsan Pazouki[4]

[1] Faculty of Physics, University of Tehran
[2]Optical Measurement Laboratory, Amirkabir University of Technology
3Optics, Laser & Photonic Research Group, Amirkabir University of Technology
[4]Faculty of Computer Engineering, Amirkabir University of Technology

Abstract- In this paper we tried to investigate the Defocusing role in CCD modulation transfer function measurement. To calculating the MTF, point spread function was measured. In experiment, we used a 3W LED with warm white spectra as the broadband source. Finally the effect of the lens relocation on CCD MTF and its cut-off frequencies studied.

Keywords: Defocusing, Modulation Transfer Function, CCD, Point Spread Function, Cut-off Frequency.

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06 ]

## ۱- مقدمه

امروزه کاربرد CCD ها در علم، صنعت و به طور خلاصه در زندگی روزمره غیر قابل انکار است. این ابزار ارزشمند معمولا به همراه یک سیستم اپتیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. سیستم‌های اپتیکی و الکترونیکی مورد استفاده در تصویربرداری آرمانی نیستند، به همین دلیل میزان کیفیت تصاویر ثبت شده و همچنین عوامل موثر در بهبود آن اهمیتی بالا دارد. یکی از روش‌های بیان کیفیت سیستم‌های الکترو-اپتیک، بررسی شکل انتقال اپتیکی و تحولات میان جسم و تصویر ثبت شده از آن است. در این بین کیفیت و سهولت در اندازه‌گیری تحولات اپتیکی جایگاه ویژه‌ای دارد. در این مقاله سعی شده روشی کارآمد و همچنین ساده برای بررسی کیفیت سامانه CCD و سیستم اپتیکی آن ارائه و Defocusing به عنوان یک پدیده رایج در تصویربرداری مورد بررسی قرار گیرد.

## ۲- مبانی نظری

تابع انتقال اپتیکی[1] نماینده تحولات در یک سیستم اپتیکی مبتنی بر جسم و تصویر است. این تابعیت نحوه تغییر در تصویر را به ازای فرکانس‌های فضایی مختلف بیان می‌کند. رابطه بین جسم و تصویر آن در قالب معادله(۱) بیان می‌شود[۱]:

$$I(\nu,\mu) = OTF(\nu,\mu) * O(\nu,\mu) \qquad (۱)$$

در این معادله $I(\nu,\mu)$ و $O(\nu,\mu)$ به ترتیب تبدیل فوریه تصویر و جسم هستند (که $i(x,y)$ و $o(x,y)$ تابعیت مکانی دارند). تابع انتقال اپتیکی را می‌توان به دو بخش انتقال مدولاسیون[2] و انتقال فاز[3] تقسیم کرد:

$$OTF(\nu,\mu) = MTF(\nu,\mu) * e^{i*PTF(\nu,\mu)} \qquad (۲)$$

تابع انتقال مدولاسیون معمولا به شکل یک نمودار با محور عمودی *MTF* نرمالیزه شده (با بیشینه واحد) و محور افقی فرکانس (عکس فاصله یا تعداد پیکسل در واحد طول) بیان می‌شود. هرچه این تابع در فرکانس‌های مختلف مقادیر بیشتری داشته باشد، کیفیت مجموعه تصویربرداری بیشتر است.

یکی از روش‌های اندازه‌گیری تابع انتقال مدولاسیون، محاسبه تابع پخشیدگی نقطه[4] یا پاسخ ضربه[5] می‌باشد که این روش به خاطر سادگی در نحوه اندازه‌گیری، محاسبات و تحلیل نتایج نسبت به دیگر روش‌ها مانند اندازه‌گیری به کمک پدیده تالبوت[۲]، ماره موازی[۳] و پخشیدگی لبه[۴] برتری دارد. تابع پخشیدگی نقطه پاسخ سامانه تصویربرداری به یک منبع (جسم) نقطه‌ای است. اندازه تبدیل فوریه پاسخ ضربه، تابع انتقال مدولاسیون را نتیجه می‌دهد. هرچه بخش اپتیکی سامانه تصویربرداری دقیق‌تر تنظیم گردد، تصویر به نقطه نزدیکتر و سطح زیر تابع انتقال بزرگتر خواهد شد[۵].

با جابجایی عدسی از فاصله کانونی، شکل تصویر از حالت نقطه‌ای به یک لکه دایره‌ای تغییر می‌یابد و هرچه عدسی از فاصله کانونی فاصله بگیرد (حال چه به جسم نزدیک شود و فاصله تا جسم کمتر از $f$ باشد و چه از جسم دور شود و فاصله تا جسم بیشتر از $f$ گردد)، ابعاد بزرگتر و به این ترتیب تبدیل فوریه آن متمرکز و سطح زیر نمودار *MTF* (چه افقی و چه عمودی) کاهش می‌یابد. به این ترتیب با بررسی مساحت زیر نمودار *MTF* و فرکانس قطع آن می‌توان محل نقطه کانونی را به دقت بدست آورد.

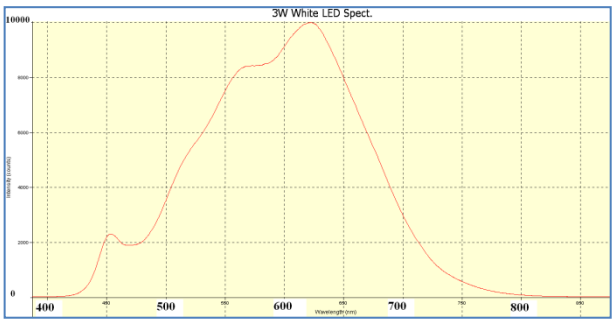
## ۳- اندازه‌گیری تجربی

سامانه تصویربرداری مورد آزمایش یک CCD ساخت شرکت IMPERX مدل IPX-VGA120LMCN با ابعاد 5.87mm x 4.71mm به همراه یک لنز سه‌گانه با مجموع فاصله کانونی 40mm و گشودگی[6] (قطر) 12.7mm انتخاب شد. مشخصات دوربین در جدول(۱) آمده است. سیستم نوردهی مورد استفاده در اندازه‌گیری‌ها نیز از یک دیود نورانی3W با نور سفید گرم، سه عدسی به همراه یک Pin Hole با قطر حفره 100µm و یک دیافراگم برای تغییر قطر باریکه تشکیل شده است. طیف منبع نوری سفید به کمک طیف‌سنج فیبری مدل HR4000 ساخت شرکت Ocean Opticsگرفته شد که در شکل (۱) آمده است.

[1] Optical Transfer Function (OTF)
[2] Modulation Transfer Function (MTF)
[3] Phase Transfer Function (PTF)
[4] Point Spread Function (PSF)
[5] Impulse Response
[6] Aperture



[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06 ]




شکل ۱: طیف شدتی LEDاستفاده شده به عنوان منبع نور درمحدوده مرئی.

| ویژگی | مقدار |
|---|---|
| سایز پیکسل | 7.4µm |
| تعداد پیکسل در هر سطر | 640 pixel |
| تعداد پیکسل در هر ستون | 480 pixel |
| حداکثر نرخ فریم بر ثانیه | 120 frame/sec. |
| کیفیت هر پیکسل | 12 bit |
| سرعت شاتر | 1/100000 to 1/100 sec. |

جدول ۱: مشخصات دوربین IPX-VGA120LMCN.

### ۳-۱- چینش آزمایش

چینش موازی ساز بر پایه تکنیک 4f انتخاب و میزان واگرایی آن زیر یک ثانیه (یک میلی متر افزایش قطر در پنج متر) اندازه گیری شده است[۶].همانطور که در شکل(۴) مشاهده می‌شود، در این روش از دو لنز دوگانه همگرا استفاده شده که فاصله عدسی اول از منبع نور $f_1$، فاصله عدسی دوم از Pin Hole، $f_2$ و فاصله بین دو عدسی $f_1+f_2$ قرار داده شده است. عدسی دیگری با فاصله کانونی $f_3$ در همین فاصله از Pin Hole قرار داده شده تا نور نهایی، موازی شود. بین دو عنصر اخیر از یک گشودگی متغییر برای تعیین اندازه لکه‌ی نور قرار گرفته که به همراه فیلترشدتی در شدت لکه کانونی CCD موثر است.

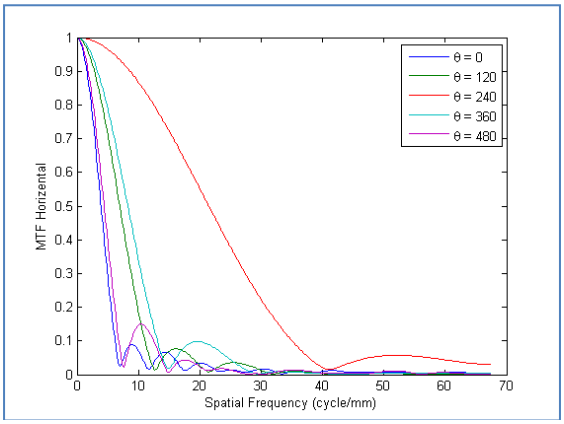
### ۳-۲- جمع‌آوری داده‌ها

بعد از موازی سازی پرتوی نور سفید، پدیده Defocusing در پنج وضعیت بررسی شد. نورLED سفید بوسیله منبع تغذیه‌ی دارای کنترل ولتاژ طوری تنظیم شد که در هیچ کدام از مراحل شاهد اشباع پیکسل ها نباشیم. با جابجایی $120^o$جابجاکننده لنز که هر گام پیـــچ آن یک میلیمتر است، فواصـــل 0.33mm جاروب شد(شکل ۴-ح). از بین پنج وضعیت مورد بررسی، حالت سوم بهترین فوکوس و حالات اول و پنجم بدترین فوکوس را داشتـــــند.

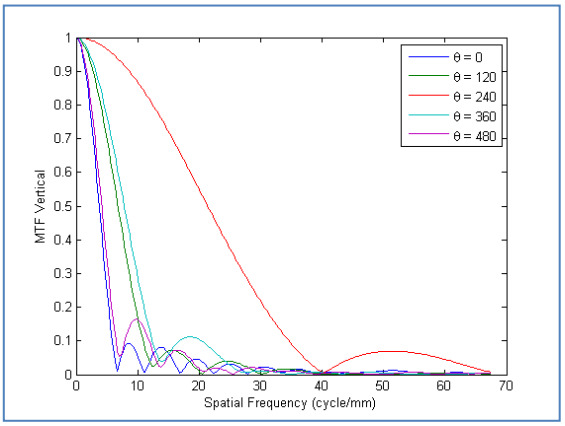
برای جلوگیری از تاثیر لنگی بین چرخش‌ها، جابجا کننده در یک جهت پیچانده شد. هر وضعیت با یک زاویه نمایش داده شده که از حـــالت اولیـــه ($\theta = 0^o$) تا حالت نهایی ($\theta = 480^o$)اندازه‌گیری صورت گرفته و در هر مرحله ده تصویر ثبت و در کد Matlab پردازش شده است.

### ۳-۳- پردازش تصاویر

به کمک پردازش تصویر با نرم‌افزار Matlabابتدا بین ده تصویر ثبت شده در هر وضعیت، میانگین محاسبه، سپس از هر تصویر تبدیل فوریه گسسته گرفته و مقدار مطلق آن به عنوان MTF گزارش شد. در شکل(۵) MTF کل سیستم در هر وضعیت و به شکل دو بعدی (افقی و عمودی) دیده می‌شود.بعد از محاسبه MTF سیستم، مقادیر افقی و عمودی از بیشینه (مرکز نمودار) تا کمینه آن رسم شد. شکل‌های(۲)و(۳) تمامی نمودارهای MTF افقی و عمودی را یکجا نشان می‌دهند.



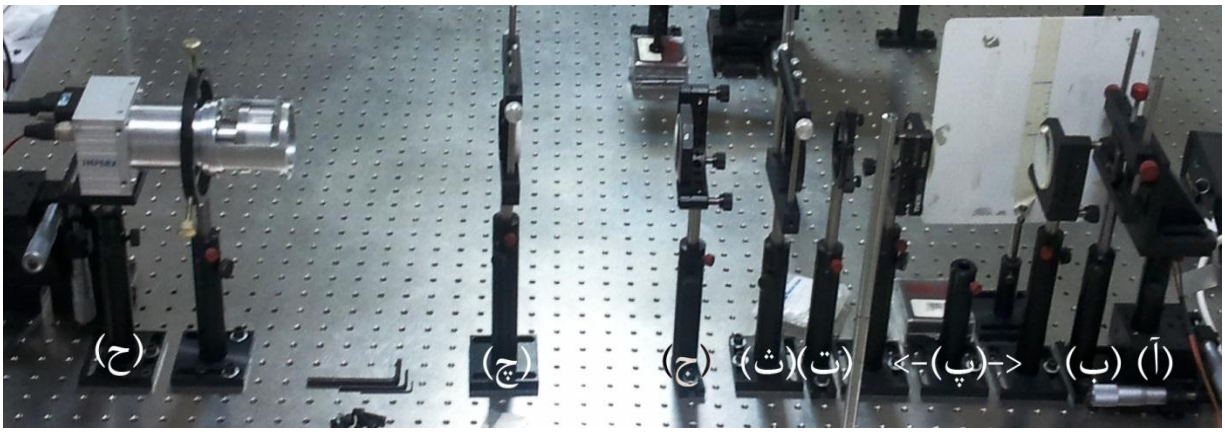

شکل ۲: نمودار MTF افقی برای پنج وضعیت اندازه گیری به ازای فرکانس‌های فضایی مختلف.



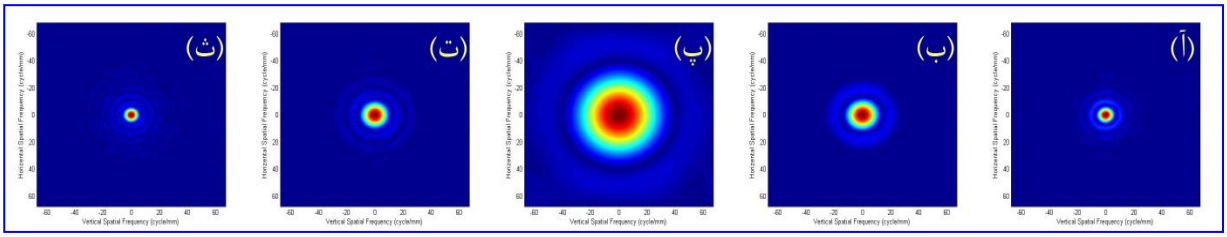

شکل ۳: نمودار MTF عمودی برای پنج وضعیت اندازه گیری به ازای فرکانس‌های فضایی مختلف



[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06 ]




شکل ۵: چینش موازی ساز به همراه دوربین (لنز و CCD)- (آ) LED، (ب) گشودگی اولیه، (پ) لنزهای 4f، (ت) Pin Hole، (ث) گشودگی پرتوی خروجی، (ج) عدسی موازی کننده خروجی، (چ) فیلتر شدتی ND Filter، (د) CCD و لنز قابل جابجایی.




شکل ۴: MTF دو بـــــعدی در - (آ)وضعیت اول $\theta = 0^o$، (ب)وضعیت دوم $\theta = 120^o$،(پ)وضعیت سوم $\theta = 240^o$،(ت)وضعیت چهارم $\theta = 360^o$، (ث)وضعیت پنجم $\theta = 480^o$ (قرمز بیشینه، آبی کمینه).

## ۴- نتیجه‌گیری

همانطور که در شکل‌های(۲)و(۳) مشخص است، فرکانس قطع در حالت$\theta = 240^o$که با رنگ قرمز مشخص شده، بیشترین مقدار خود را دارد (حدود 41 cycle/mm) و بقیه حالات به صورت دو به دو فرکانس قطع مشابهی دارند (برای وضعیت دوم و چهارم حدود 12 cycle/mm و برای وضعیت اول و پنجم حدود 7 cycle/mm). به این ترتیب انتظار می‌رود که با فوکوس بهتر در یک سیستم اپتیکی بتوان فرکانس قطع MTF را بیشینه نمود. تکنیک محاسبه MTF منحصر به منبع نور موازی نیست بلکه می‌تواند در مورد دو تصویر تقریبا همزمان و با فوکوس متفاوت، مورد استفاده قرار گیرد. به این ترتیب مساحت زیر منحنی MTF (که با فرکانس قطع رابطه مستقیم دارد) نشان دهنده معیاری از کیفیت ثبت تصاویر می‌باشد. این نکته نیز قابل توجه است که فرکانس قطع با ضریب ابیراهی حاصل از Defocusing رابطه مستقیم دارد و می‌توان معیاری از آن را ارائه داد. این ضریب در مراجع مختلفی به طور تئوریک بررسی و شبیه سازی شده است.

## سپاسگزاری

در پایان از زحمت‌کشان پژوهشکده اپتیک، لیزر و فوتونیک و آزمایشگاه مرکزی دانشگاه صنعتی امیرکبیر که این گروه تحقیقاتی را یاری نمودند، کمال تشکر را داریم.

## مراجع

[1] Boreman, Glenn D., *Modulation Transfer Function in Optical & Electro-Optical Systems*, p. 9, SPIE Press, 2001.

[۲] نجفی، معدنی پور، غلام زاده، ***اندازه‌گیری MTF آرایه CCD با استفاده از پدیده تالبوت***، هجدهمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ، تبریز- ایران، ۱۳۹۰.

[۳] غلام زاده، معدنی پور، نجفی، ***اندازه‌گیری تابع انتقال اپتیکی (OTF) دوربین CCD با استفاده از تکنیک ماره موازی***، هجدهمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ، تبریز- ایران، ۱۳۹۰.

[۴] نجفی، معدنی پور، بابایی، کاوش‌تهرانی، ***اندازه‌گیری تابع انتقال مدولاسیون آرایه CCD با استفاده از لبه کج و تکنیک فرا تفکیک***، هفدهمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک، کرمان- ایران،۱۳۸۹.

[5] Lipson, A., *Optical Physics*,4thEd.,P.103, Cambridge University Press,2010.

[6] Pedrotti, Frank L., *Introduction to Optics*, 2nd Ed., P. 530, Prentice-Hall International Inc., 1993.



[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06 ]