

اندازه‌گیری حد تفکیک مکانی تصاویر سنجنده‌ی Ultra Cam با استفاده از ستاره سایمنز

سعید عظیمی^{۱*}، مهدی مختارزاده^۲، محمد جواد ولدان زوج^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد فتوگرامتری - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
s.azimi.kntu@gmail.com

^۲ استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
m_mokhtarzade@alborz.kntu.ac.ir

^۳ دانشیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
valadanzouj@kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت شهریور ۱۳۹۱، تاریخ تصویب آبان ۱۳۹۲)

چکیده

حد تفکیک مکانی به عنوان یکی از مهمترین پارامترهای هندسی تصاویر هوایی و ماهواره‌ای مورد اندازه‌گیری قرار می‌گیرد. این پارامتر به عنوان معیاری جهت تشخیص کوچکترین فاصله بین دو شی مجاور قابل تفکیک در تصاویر شناخته شده است. برای اندازه‌گیری دقیق حد تفکیک مکانی، تارگت‌هایی با شکل هندسی مشخص در تصاویر بکار گرفته می‌شوند. این تارگت‌ها می‌توانند تارگت‌های مصنوعی استاندارد باشند که جهت اندازه‌گیری حد تفکیک مکانی طراحی شده‌اند و یا می‌توانند عوارض طبیعی موجود در تصویر باشند که قابلیت اندازه‌گیری این پارامتر را داشته باشند. در این تحقیق، نحوه‌ی اندازه‌گیری پارامتر حد تفکیک مکانی تصاویر سنجنده‌ی هوایی Ultra Cam، با استفاده از تارگت‌های دایره‌ای ستاره سایمنز، به عنوان یکی از پرکاربردترین تارگت‌های مصنوعی مورد استفاده در اندازه‌گیری این پارامتر، مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که مقادیر حد تفکیک اندازه‌گیری شده، اندکی از مقدار اسمی آن کمتر می‌باشد.

واژگان کلیدی: حد تفکیک مکانی، تابع پخش نقطه‌ای، ستاره سایمنز، کالیبراسیون هندسی

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

یکی از مهمترین پارامترهای هندسی تصاویر هوایی و ماهواره‌ای حد تفکیک مکانی آنها است. در مورد تصاویر اخذ شده توسط سنجنده‌های دیجیتال، اندازه‌ی پیکسل سنسور تصویربرداری این پارامتر را تحت‌الشعاع قرار می‌دهد. بطور رایج، اندازه‌ی پیکسل نمونه‌برداری بر روی زمین^۱، که در واقع تصویر اندازه‌ی پیکسل از صفحه‌ی کانونی سنجنده بر روی زمین می‌باشد، به عنوان معیاری از حد تفکیک مکانی تصاویر در نظر گرفته می‌شود. این فرض در اکثر مواقع بدلیل پردازش‌هایی که قبل و بعد از تصویربرداری بر روی اطلاعات خام تصویری انجام می‌شود و از نقطه نظر هندسی اندازه‌ی واقعی نمونه‌برداری زمینی را تغییر می‌دهد، فرض درستی نیست. از طرفی در مورد برخی از تصاویر هوایی که از موزاییک چند زیر تصویر حاصل می‌شود، مانند تصاویر سنجنده‌ی UltraCam، بدلیل تبدیلات هندسی متفاوتی که بر روی زیر تصاویر اخذ شده از لنزهای متفاوت، جهت تشکیل تصویر یکپارچه انجام می‌شود، نمی‌توان از فرض مذکور تبعیت کرد. از این جهت است که برای اندازه‌گیری پارامتر حد تفکیک مکانی نیاز به معیاری قابل اعتماد و استاندارد احساس می‌شود. یکی از معیارهای قابل اعتماد که در این زمینه بکارگرفته می‌شود، تابع پخش نقطه‌ای^۲ می‌باشد [۱].

تابع PSF در واقع تصویر اخذ شده توسط سنجنده از یک منبع نقطه‌ایست که کاملاً با مفاهیم حدتفکیک مکانی هم‌خوانی داشته و از طرفی کلیه عواملی که موجب تغییر این پارامتر می‌شوند را در بر دارد. از طرف دیگر، هر یک از سنجنده‌های تصویربرداری دیجیتال با توجه به اندازه‌ی پیکسل سنسور خود، از یک حد تفکیک مکانی اسمی برخوردار می‌باشد. حد تفکیک مکانی اسمی، پارامتری تئوریک بوده که در عمل بدلیل محدودیت‌های مختلفی که از جمله مهمترین آنها می‌توان به پارامترهای نویز و تاری تصویر اشاره کرد، قابل دستیابی نمی‌باشد. از این جهت، اندازه‌گیری مقدار واقعی حد تفکیک مکانی جهت

شناسایی پتانسیل هندسی تصاویر، از اهمیت بالایی برخوردار است [۱].

روش‌های اندازه‌گیری پارامتر حدتفکیک مکانی به دو دسته‌ی کلی روش‌های آزمایشگاهی و روش‌های میدانی تقسیم بندی می‌شوند [۲]. روش‌های آزمایشگاهی جهت کالیبراسیون سنجنده مورد استفاده قرار گرفته و امکان استفاده از این روش در هر شرایط و زمانی وجود نخواهد داشت. از طرفی روش‌های میدانی به عنوان پرکاربردترین روش جهت اندازه‌گیری این پارامتر بوده که امکان استفاده در شرایط و زمان‌های مختلف تصویربرداری، اعمال شرایط پرواز در محاسبات و امکان مقایسه با روشهای اندازه‌گیری زمینی و آزمایشگاهی را میتوان به عنوان برخی از محاسن این روش در نظر گرفت.

تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی اندازه‌گیری میدانی پارامتر حد تفکیک مکانی به دو دسته‌ی کلی تقسیم می‌شوند. دسته اول به روش‌هایی اختصاص دارد که برای اندازه‌گیری، از تصویر تارگت‌هایی با شکل هندسی مشخص، مانند تارگت‌های مستطیلی یا تارگت‌های دایره‌ای، استفاده می‌کنند [۳]. دسته‌ی دوم روش‌هایی هستند که از عوارض طبیعی موجود در تصاویر که متداولترین آنها لبه‌های تصویری می‌باشند، جهت اندازه‌گیری پارامتر حد تفکیک مکانی بهره می‌گیرند [۴ و ۵].

در این مقاله هدف پیاده سازی روشی است که در آن حد تفکیک مکانی تصاویر سنجنده‌ی UltraCam با استفاده از پارامترهای قابل اعتماد و پایه، مانند تابع PSF، و با بکارگیری تارگت مصنوعی ستاره سایمنز، اندازه‌گیری شده و حتی الامکان کالیبراسیون نسبی این پارامتر جهت استفاده‌ی آن در تصاویری که در شرایط مشابه اخذ می‌شوند، انجام پذیرد.

در بخش دوم این مقاله ضمن تشریح مفاهیم اصلی مربوط به حد تفکیک مکانی روش‌های اندازه‌گیری میدانی آن مورد بررسی قرار می‌گیرند. بخش سوم مربوط به روش تحقیق بکار گرفته شده برای اندازه‌گیری پارامتر حدتفکیک مکانی با استفاده از تارگت ستاره سایمنز بوده، بخش چهارم به پیاده‌سازی روش مذکور و نتایج بدست آمده اختصاص دارد و در بخش آخر نیز به نتیجه‌گیری و پیشنهادات جهت تکمیل مطالعات پرداخته شده است.

^۱ Ground distance sampling

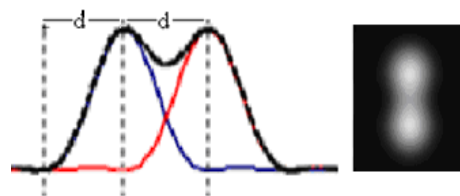
^۲ Point spread function

۲- روشهای اندازه‌گیری میدانی حد تفکیک مکانی

در این بخش هدف معرفی روش‌های رایج مورد استفاده در اندازه‌گیری میدانی پارامتر حد تفکیک مکانی می‌باشد. ابتدا مفاهیم اولیه پارامتر حد تفکیک مکانی مورد بررسی قرار گرفته و سپس روش‌های اندازه‌گیری معیارهای قابل اعتماد جهت معرفی اندازه‌ی واقعی این پارامتر از جمله توابع PSF و MTF تشریح خواهد شد.

۲-۱- تئوری نمونه برداری و مفاهیم حد تفکیک مکانی

با توجه به محدودیت‌های اندازه‌ی نمونه‌برداری زمینی، از معیار قابل اعتماد تابع پخش نقطه‌ای (PSF) برای اندازه‌گیری حدتفکیک مکانی تصاویر استفاده می‌شود. تصویر اخذ شده توسط یک سیستم اپتیکی از یک منبع نقطه‌ای، تابع پخش نقطه‌ای نامیده می‌شود [۶]. تابع PSF برای یک سیستم اپتیکی ایده‌آل با یک دهانه‌ی نسبی دایره‌ای، معادل با دیسک ایری^۱ می‌باشد [۲]. تابع PSF، اطلاعات کامل مربوط به حد تفکیک مکانی را دربر دارد. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، فاصله‌ی بین دو منبع نقطه‌ای مجاور قابل تفکیک، که همان فاصله‌ی بین مراکز تابع PSF این منابع نقطه‌ای می‌باشد، بیانگر قدرت سیستم در تفکیک عوارض مجاور هم خواهد بود که می‌توان آن را به عنوان معیاری قابل اطمینان از حد تفکیک مکانی سیستم سنجنده در نظر گرفت [۲].



شکل ۱- معیار ریلی- مقدار حداقل فاصله جهت تفکیک نقاط نورانی مجاور [۲].

جهت بیان مقدار حد تفکیک مکانی با یک عدد می‌توان شکل تابع را نادیده گرفته و تنها معیار عرض تابع

را که طبق رابطه‌ی ۱ معادل با نصف قطر دیسک ایری می‌باشد، به عنوان معیار حد تفکیک مکانی بیان کرد.

$$d = 1.22 * \lambda * f \# \quad (1)$$

که در این رابطه، λ طول موج و $f\#$ دهانه نسبی دوربین را نشان می‌دهد. بر اساس معیار ریلی دو تابع PSF زمانی قابل تفکیک از یکدیگرند که مقدار ماکزیمم آنها در فاصله‌ی d از یکدیگر باشند [۲].

از نقطه نظر ریاضی، تصویر اخذ شده توسط سنسور سنجنده، معادل با نتیجه اعمال اپراتور کانولوشن بین تابع PSF سنجنده با تصویر حقیقی شی مورد تصویربرداری خواهد بود، که منظور از تصویر حقیقی تصویری ایده‌آل است که از هرگونه اختلال اپتیکی از جمله تاری تصویر و نویز، مبرا می‌باشد. لذا با بدست آوردن تابع PSF سنجنده و اعمال عملیات معکوس کانولوشن بر روی تصویر اخذ شده می‌توان تصویر مورد نظر را جهت بهبود حد تفکیک مکانی، بازیابی کرد. جهت بازیابی یک تصویر اخذ شده توسط یک سیستم دیجیتال به عنوان یک تابع نمونه‌برداری شده از یک سیگنال پیوسته، با توجه به تعریف تئوری نمونه‌برداری نایکوئیست، لازم است که نرخ نمونه‌برداری سنسور سنجنده، از دو برابر بزرگترین فرکانس موجود در تصویر بزرگتر باشد [۶].

حدتفکیک اپتیکی، توان سیستم در تشخیص جزئیات فیزیکی می‌باشد. در واقع، تصویر اخذ شده توسط سنجنده کانولوشن تابع PSF سنجنده با تصویر حقیقی شی مورد تصویربرداری می‌باشد. با توجه به پیچیدگی‌های محاسبه‌ی کانولوشن در فضای مکان و تبدیل این اپراتور به اپراتور ضرب در فضای فرکانس، جهت ساده سازی محاسبات، از تبدیل فوری تابع PSF که همان تابع انتقال اپتیکی^۲ است، استفاده می‌شود. در رابطه‌ی ۲ ارتباط بین توابع PSF و MTF نشان داده شده است [۷].

$$OTF = \mathcal{F}(PSF), |OTF| = MTF \quad (2)$$

که در این رابطه علامت \mathcal{F} معرف تبدیل فوری می‌باشد. تابع انتقال اپتیکی در فضای فرکانس از دو مولفه‌ی تابع مدولاسیون و تابع فاز تشکیل شده است. با توجه به اینکه جهت اندازه‌گیری معیاری از حد تفکیک مکانی تنها اطلاعات اندازه‌ی تابع انتقال اپتیکی کافی می‌باشد، در این فضا تنها از

^۲ Optical transfer function

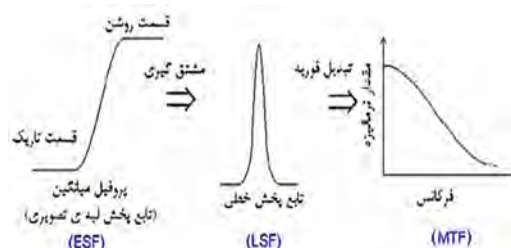
^۱ Airy disk

تابع انتقال مدولاسیون (MTF) به عنوان اندازه‌ی تابع انتقال اپتیکی استفاده خواهد شد [۷].

۲-۲- روش‌های اندازه‌گیری حد تفکیک مکانی

روش‌های اندازه‌گیری حدتفکیک مکانی تصاویر به دو دسته‌ی کلی تقسیم بندی می شوند. دسته‌ی اول روش‌هایی هستند که از تصویر تارگت‌هایی با شکل هندسی مشخص برای اندازه‌گیری این پارامتر استفاده می‌کنند. در این روش ابتدا با استفاده از اندازه‌گیری‌های محلی شدت روشنایی در نقاط مختلف تارگت، تابع کنتراست برای تصویر اخذ شده محاسبه می‌گردد. سپس تصویر حقیقی تارگت تصویربرداری شده و تابع کنتراست آن تخمین زده می‌شود. در نهایت تابع MTF به عنوان نسبت تابع کنتراست تصویر اخذ شده به تصویر حقیقی قابل دستیابی می‌باشد. جهت ارزیابی اندازه‌گیری‌ها و تعیین یک مقدار به عنوان حدتفکیک مکانی سیستم، یک تابع گوسین به اطلاعات گسسته اندازه‌گیری شده برازش داده می‌شود. در نهایت انحراف معیار تابع برازش شده به عنوان معیاری برای حد تفکیک مکانی سیستم معرفی می‌گردد [۸].

دسته‌ی دوم از روش‌های اندازه‌گیری حدتفکیک مکانی روش‌هایی هستند که از عوارض طبیعی موجود در تصویر به عنوان تارگت جهت اندازه‌گیری توابع PSF و MTF استفاده می‌کنند. از جمله مهمترین این عوارض لبه‌ها و پالس‌های بارز موجود در تصاویر می‌باشد. در شکل ۲ روند تعیین تابع MTF تصویر اخذ شده با استفاده از لبه‌های موجود در تصویر نشان داده شده است.



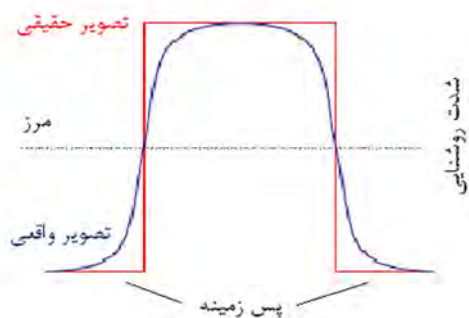
شکل ۲- مراحل تعیین تابع MTF با استفاده از لبه‌های تصویری [۲].

در این روش ابتدا با استفاده از تعیین موقعیت دقیق لبه‌ی تصویر با دقت زیر پیکسل توسط یکی از روش‌های استخراج لبه، تابع پخش لبه‌ی تصویری ESF بدست می‌آید. در مرحله‌ی بعد با مشتق‌گیری از تابع ESF، تابع پخش خطی لبه‌ی تصویری حاصل می‌گردد و در نهایت با

استفاده از تبدیل فوریه‌ی تابع LSF تابع MTF معادل با آن در فضای فوریه حاصل می‌گردد. انحراف معیار تابع MTF حاصل که در واقع یک تابع گوسی می‌باشد، معیار مناسبی جهت معرفی پارامتر حد تفکیک مکانی سیستم خواهد بود.

۳-۲- اندازه‌گیری تابع MTF

جهت تعیین تابع انتقال مدولاسیون سنجنده که مبنای اندازه‌گیری تابع PSF سنجنده می‌باشد، لازم است اطلاعات مربوط به تصویر حقیقی شی تصویر شده، در اختیار باشد. پروسه‌ی تعیین تصویر حقیقی تارگت مورد استفاده تحت عنوان بازسازی تارگت شناخته می‌شود. تصویر حقیقی تصویری است که با استفاده از یک لنز ایده‌آل اخذ شده است. بعنوان مثالی از مفهوم تصویر حقیقی و تصویر واقعی اخذ شده توسط یک سنجنده، می‌توان تصویر یک مستطیل سفید در یک پس‌زمینه با رنگ سیاه را در نظر گرفت. شکل شماره ۳ تابع شدت روشنایی مربوط به یک پروفیل از این مستطیل را نشان می‌دهد [۷].



شکل ۳- نمودار شدت روشنایی تصویر حقیقی و تصویر واقعی یک پالس [۷].

همانطور که در شکل دیده می‌شود، اعمال تابع PSF سنجنده به تصویر اخذ شده باعث می‌شود تا در محل مرز لبه تغییر ناگهانی تصویر حقیقی با یک تغییر نرم که مربوط به تصویر واقعی است، جایگزین شود [۷]. به دلیل پیچیدگی تصاویر اخذ شده و عدم امکان تعیین تصویر حقیقی، امکان اندازه‌گیری تابع MTF بصورت مستقیم وجود نخواهد داشت و لازم است از تارگت‌هایی با شکل ساده که تصویر حقیقی آنها قابل دستیابی می‌باشد، استفاده کرد.

یکی از مهمترین مزایای این تارگت نسبت به تارگت‌های خطی طراحی هندسی ویژه این تارگت می‌باشد که قابلیت اندازه‌گیری فرکانس بحرانی در جهات مختلف را در اختیار قرار می‌دهد. نهایتاً می‌توان یک مقدار میانگین از نتایج بدست آمده از اندازه‌گیری در جهات مختلف را به عنوان حد تفکیک سیستم معرفی کرد [۷].

۳- روش تحقیق

در این تحقیق، هدف پیاده سازی روشی است که با استفاده از اندازه‌گیری تابع کنتراست تصویر و تبدیل آن به تابع MTF اقدام به اندازه‌گیری تابع MTF تصویر اخذ شده در فرکانس‌های مکانی متفاوت می‌کند. سپس با توجه به رابطه‌ی بین تابع PSF و تابع MTF، انحراف معیار تابع PSF به عنوان معیاری از حد تفکیک مکانی تعیین می‌گردد.

در شکل ۵ فلوجارت روش پیشنهادی جهت اندازه‌گیری معیار حد تفکیک مکانی با استفاده از تارگت ستاره سایمنز نشان داده شده است. مطابق با فلوجارت شکل فوق مراحل اصلی تحقیق را میتوان به شرح ذیل تقسیم‌بندی نمود:

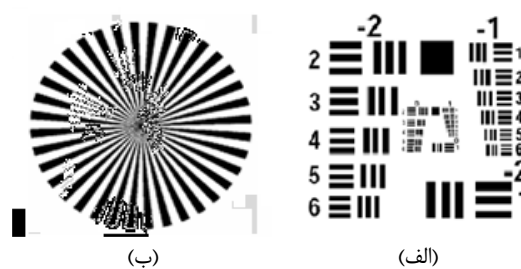
- تشکیل پروفیل‌های دایره‌ای به مرکز ستاره سایمنز
- برآورد تابع گسسته کنتراست
- تخمین حد تفکیک مکانی دوربین

در این مقاله، از نمونه تصاویر اخذ شده توسط دوربین UltraCam از تست فیلد Sjukulla استفاده شده است [۱]. تست فیلد Sjukulla یک تست فیلد کامل از تارگت‌های مربعی و دایره‌ای جهت کالیبراسیون هندسی و رادیومتریکی می‌باشد. ستاره سایمنز مورد استفاده در این تست فیلد یک نیم‌دایره به شعاع ۶٫۸ متر می‌باشد. اندازه‌ی قطاع‌های سیاه و سفید موجود در تارگت ۱۰ درجه بوده که در یک نیم‌دایره از ستاره که برای اندازه‌گیری معیار حد تفکیک در جهات مختلف کافی می‌باشد، ۱۸ قطاع سیاه و سفید وجود خواهد داشت. در ادامه به تشریح مراحل اصلی روش تحقیق پرداخته شده است.

تارگت مورد استفاده باید از یک طرف جهت تعیین تصویر حقیقی ساده بوده و از طرف دیگر شامل اطلاعات کافی در فرکانس‌های مکانی متفاوت باشد، تا بتوان از آن برای تخمینی درست از حد تفکیک مکانی سیستم استفاده کرد.

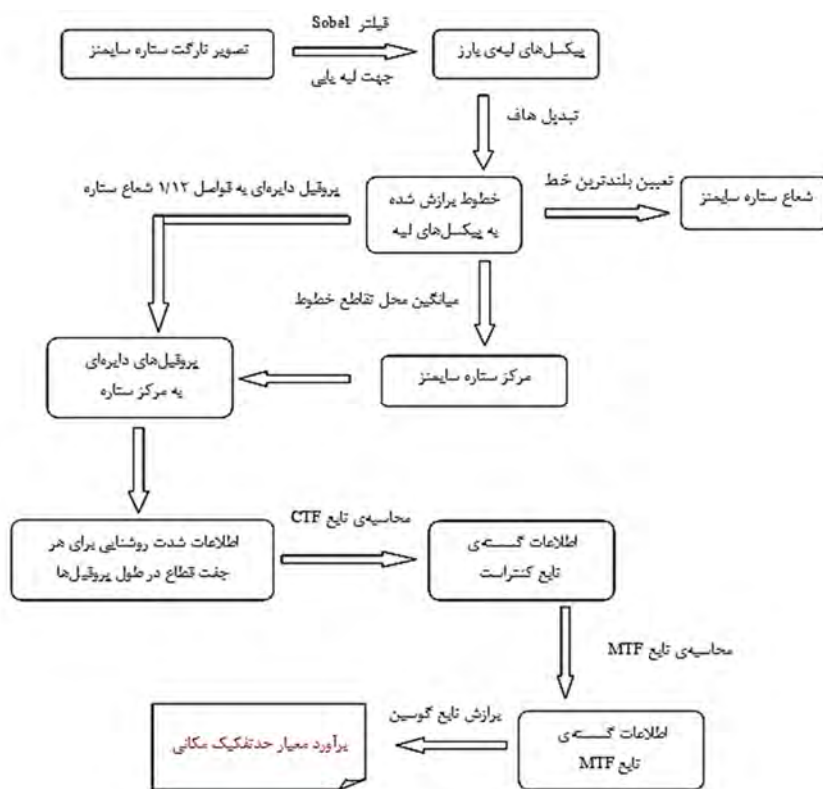
زمانی که MTF برای فرکانس‌های مکانی پایین، نزدیک و یا مساوی یک است، رزولوشن ماکزیمم بوده و با کاهش رزولوشن مقادیر MTF نیز کاهش می‌یابد. فرکانس مکانی که در آن نقطه مقدار MTF نزدیک به صفر است، فرکانس بحرانی سیستم نامیده می‌شود. در این نقطه جزئیات فیزیکی دیگر قابل شناسایی و تفکیک از یکدیگر نخواهند بود. روش استاندارد محاسبه‌ی حد تفکیک بحرانی سیستم، استفاده از تارگت‌هایی است که امکان اندازه‌گیری تابع MTF در فرکانس‌های مکانی متفاوت را فراهم کند [۷].

متداولترین تارگت‌هایی که جهت اندازه‌گیری معیاری قابل اعتماد از حد تفکیک مکانی مورد استفاده قرار می‌گیرند، تارگت‌های مستطیلی و دایره‌ای می‌باشند. چارت رزولوشن هوایی که به عنوان یکی از پرکاربردترین تارگت‌ها برای اندازه‌گیری رزولوشن بشمار می‌رود از خطوط سیاه و سفید که در فرکانس‌های متفاوت وجود دارند، تشکیل شده است. یکی از معایب استفاده از این تارگت بدست آوردن یک مقدار منحصر بفرد برای رزولوشن بحرانی سیستم می‌باشد [۳]. یک روش بهتر برای اندازه‌گیری حد تفکیک مکانی، استفاده از تارگتی دایره‌ای بنام ستاره سایمنز است که در شکل ۴ نمایش داده شده است.



شکل ۴- الف- چارت رزولوشن هوایی، ب- ستاره سایمنز [۷].

ستاره سایمنز همانطور که در شکل دیده می‌شود تارگتی است به شکل یک ستاره با شعاع مشخص که از قطاع‌های سیاه و سفید با اندازه‌ی کمان مشخص تشکیل شده است. در این نوع تارگت فرکانس مکانی تمامی قطاع‌های سیاه و سفید در جهت مرکز ستاره افزایش می‌یابد. به شکلی که بیشترین تعداد جفت خطوط قابل تفکیک در واحد میلی‌متر در مرکز ستاره قابل دستیابی خواهد بود. با استفاده از این افزایش فرکانس می‌توان حد تفکیک بحرانی سیستم را تعیین کرد.



شکل ۵- فلوچارت روش پیشنهادی اندازه‌گیری حد تفکیک مکانی.

۳-۱- تشکیل پروفیل‌های دایره‌ای به مرکز ستاره سایمنز

در این قسمت برای اندازه‌گیری مقادیر محلی تابع MTF، با توجه لزوم وجود اطلاعات در فرکانس‌های مکانی متفاوت، نیاز به ترسیم پروفیل‌های دایره‌ای به مرکز ستاره سایمنز بر روی این تارگت می‌باشد. برای این منظور مراحل زیر بترتیب انجام شده است. سپس توسط فیلتر sobel عملیات تشخیص لبه‌های تصویری انجام شده است، که نتیجه‌ی آن ایجاد پیکسل‌های لبه در مرز بین قطاع‌های سیاه و سفید می‌باشد.

در مرحله‌ی بعد، با استفاده از تبدیل هاف، خطوطی بر پیکسل‌های بدست آمده از مرحله‌ی اول برازش داده شده است. برای بدست آوردن تخمینی از مرکز ستاره، از میانگین محل برخورد خطوط بدست آمده استفاده شده است. از طرفی طول بلندترین خط برازش شده به پیکسل‌های لبه نیز به عنوان شعاع ستاره سایمنز در نظر گرفته شده است.

جهت حصول فرکانس‌های مکانی متفاوت در تصویر، پروفیل‌های دایره‌ای به شکلی که مرکز آنها منطبق بر

مرکز تخمینی بدست آمده برای ستاره‌ی سایمنز در مراحل قبلی می‌باشد، ترسیم شده است. میزان افزایش شعاع دو پروفیل متوالی ۱/۱۲ شعاع برآورد شده برای ستاره سایمنز در نظر گرفته شده است.

۳-۲- برآورد تابع گسسته کنتراست

در این بخش با استخراج اطلاعات شدت روشنایی از تصویر و در جهت پروفیل‌های دایره‌ای ترسیم شده در مرحله‌ی قبل اقدام به اندازه‌گیری تابع کنتراست محلی شده است. روش مورد استفاده در این تحقیق بر اساس روش اشتوتگارت Becker et al 2005 می‌باشد، بطوریکه ابتدا مدولاسیون تصویر واقعی و حقیقی تارگت مورد استفاده توسط رابطه‌ی ۳ برآورد می‌شود [۱].

$$M = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (3)$$

برای تصویر واقعی I_{\max} و I_{\min} بترتیب مقادیر ماکزیمم و می‌نیمم حاصل از پروفیل درجات خاکستری بدست آمده برای هر یک از جفت قطاع‌های انتخابی در جهات مختلف می‌باشد [۱]. به منظور برآورد مدولاسیون تصویر

به اندازه‌گیری تابع کنتراست برای فرکانس‌های مکانی مختلف و موجود در رابطه به عنوان ضریبی از فرکانس مذکور می‌باشد. با توجه به نامحدود بودن فرکانس‌های مکانی موجود در رابطه و از طرف دیگر، محدودیت موجود در فرکانس‌های مکانی در تصویر، آخرین فرکانس مکانی مورد استفاده در رابطه‌ی ۵ جهت تعیین تابع MTF در یک فرکانس دلخواه، توسط رابطه‌ی ۶ تعیین می‌گردد [۷].

$$n=1, 3, 5 \quad n * f \leq C_f \quad (6)$$

که در آن، n ضریب فرکانسی بوده و C_f نیز مقدار اسمی فرکانس بحرانی سیستم می‌باشد. در واقع رابطه‌ی ۶ بیانگر این مطلب است که آخرین فرکانس مورد استفاده در رابطه‌ی ۵ نمی‌تواند از فرکانس بحرانی سیستم که در آن مقدار تابع MTF بسمت صفر میل می‌کند، بزرگتر باشد. یادآور می‌شود در فرکانس بحرانی C_f مدولاسیون تصویر واقعی و به تبع آن مقدار CTF به صفر میل می‌کند و لذا استفاده از فرکانس‌های بالاتر از C_f تاثیری در برآورد $M(f)$ نخواهد داشت. در واقع اندازه‌گیری تابع کنتراست بصورت افزایشی و تا فرکانس بحرانی سیستم انجام می‌پذیرد و دلیل آن نیز، طبق تعریف فرکانس بحرانی سیستم، میرایی تابع کنتراست تصویر در این فرکانس می‌باشد.

با استفاده از رابطه‌ی ۵ و اندازه‌گیری تابع کنتراست، می‌توان مقادیر گسسته‌ی تابع MTF یک سیستم اپتیکی را برای فرکانس‌های متفاوت تا فرکانس بحرانی سیستم که در آن MTF به سمت صفر میل می‌کند اندازه‌گیری کرد. در ادامه یک تابع گوسین به مقادیر MTF گسسته‌ی بدست آمده در فرکانس‌های متفاوت برای یک جفت قطاع از تصویر ستاره، برازش داده می‌شود که شکل کلی آن در رابطه‌ی ۷ آمده است [۱].

$$MTF(f) \cong e^{-2\pi^2 \sigma_{mf}^2 f^2} \quad (7)$$

که در آن f مقادیر فرکانس مکانی در واحد cycle/pixel (cy/pi) بوده و σ_{MTF} نیز انحراف معیار تابع گوسی برازش داده شده به مقادیر گسسته‌ی تابع MTF اندازه‌گیری شده می‌باشد.

حقیقی از روش حد آستانه گذاری باینری استفاده شده است. در این روش پیکسلی که در پس‌زمینه‌ی تصویر قرار می‌گیرد مقدار صفر (I_{min}) و پیکسل‌های زمینه‌ی تصویر مقدار یک (I_{max}) اخذ خواهند کرد. سپس تابع انتقال کنتراست به عنوان نسبت مدولاسیون تصویر اخذ شده به مدولاسیون تصویر حقیقی، توسط رابطه‌ی ۴ تعیین می‌شود.

$$CTF = \frac{M_{image}}{M_{object}} \quad (4)$$

که در آن M_{object} و M_{image} بترتیب مدولاسیون تصویر اخذ شده و تصویر حقیقی بوده و توسط رابطه‌ی ۲ تعیین می‌گردند.

در واقع رابطه‌ی ۴ اهمیت ساده بودن تارگت مورد استفاده را نشان می‌دهد. منظور از M_{object} در مخرج رابطه، مدولاسیون تصویر حقیقی است که عاری از هرگونه کاهش کیفیت تصویر و عوامل بوجود آورنده‌ی آن می‌باشد. در واقع تصویر حقیقی تصویری است که توسط لنز ایده‌آل و در شرایط ایده‌آل اخذ شده است. لذا جهت دستیابی به تخمینی درست از این تصویر لازم است که تارگت مورد استفاده، علاوه بر در اختیار داشتن اطلاعات لازم برای اندازه‌گیری رزولوشن در فرکانس‌های متفاوت، تا حد امکان ساده باشد.

۳-۳- برآورد حد تفکیک مکانی دوربین

در این مرحله جهت دستیابی به مقادیر محلی تابع MTF از مقادیر گسسته‌ی بدست آمده برای تابع کنتراست تصویر استفاده شده است. با توجه به آنکه تارگت ستاره سایمنز تارگتی از نوع امواج مربعی است، و از طرفی تصویر حاصل از آن فرکانس‌های مکانی مختلف را در بر دارد، برای تبدیل مقادیر تابع انتقال کنتراست به مقادیر تابع MTF از سری‌های تبدیلی Coltman (رابطه‌ی ۵) استفاده شده است [۹].

$$M(f) = \frac{\pi}{4} [C(f) + \frac{C(3f)}{3} - \frac{C(5f)}{5} + \frac{C(7f)}{7} + \frac{C(11f)}{11}] \quad (5)$$

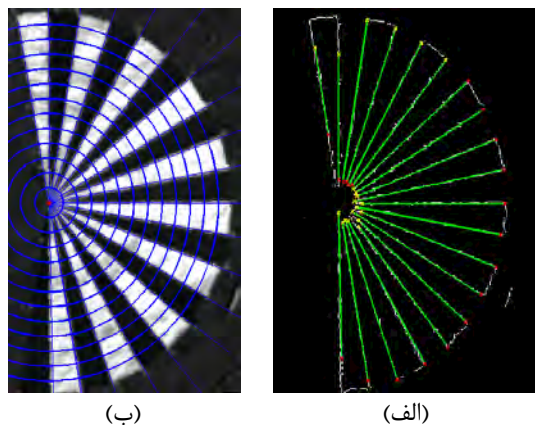
که در آن $M(f)$ و $C(f)$ بترتیب مقدار تابع MTF و CTF در فرکانس مکانی f می‌باشد. در این رابطه برای اندازه‌گیری تابع MTF در یک فرکانس دلخواه (f)، نیاز

با تعیین σ_{MTF} می‌توان انحراف معیار تابع پخش نقطه‌ای (σ_{PSF}) را به عنوان معیاری از حد تفکیک مکانی مطابق با رابطه‌ی ۸ برآورد نمود [۱].

$$\sigma_{psf} = \frac{1}{2\pi\sigma_{mtf}} \quad (۸)$$

۴- پیاده سازی و نتایج حاصل

در این تحقیق روند اندازه‌گیری حد تفکیک مکانی با استفاده از اندازه‌گیری مقادیر تابع MTF در فرکانس‌های مکانی متفاوت در محیط نرم‌افزار MATLAB پیاده‌سازی شده است. نتایج اعمال فیلتر لبه‌یابی جهت بارزسازی و استخراج لبه‌های تصویری در شکل ۶- (الف) نشان داده شده است.

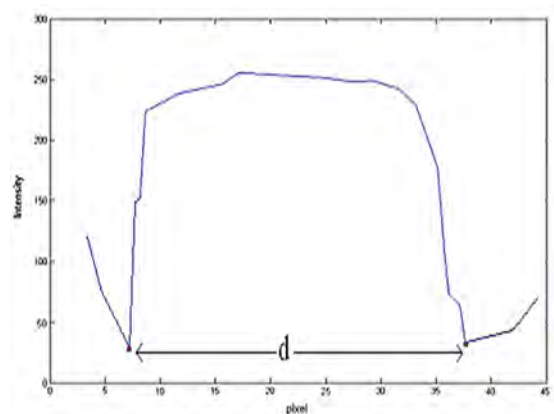


شکل ۶- الف- خطوط برازش شده به پیکسل‌های لبه توسط تبدیل هاف. ب- پروفیل‌های دایره‌ای به مرکز ستاره سایمنز

جهت برازش خطوطی به منظور جدا سازی قطعات‌های مختلف ستاره سایمنز، با استفاده از تبدیل هاف خطوطی بر پیکسل‌های لبه‌ی بدست آمده برازش داده شده است. سپس طبق شکل ۶- (ب) جهت حصول فرکانس‌های مکانی متفاوت در تصویر، پروفیل‌های دایره‌ای با فواصل $1/12$ شعاع برآورد شده برای ستاره سایمنز بر روی ستاره ترسیم شده است که دلیل استفاده از این فواصل ایجاد پروفیل‌ها در فرکانس‌های مکانی مختلف به شکلی است که قابل استفاده در رابطه‌ی ۵ باشد. پس از ترسیم دایره‌های متحدالمرکز، جهت اندازه‌گیری تابع MTF در جهات متفاوت می‌توان از جفت قطعات‌های موجود در همان جهت تصویری استفاده نمود. برای این منظور ابتدا جفت قطعات موجود در جهت مورد نظر انتخاب شده و اطلاعات

شدت روشنایی در جهت پروفیل‌های ترسیم شده استخراج می‌گردند. هر یک از نمودارهای مربوط به اطلاعات شدت روشنایی در هر پروفیل خاص حاوی فرکانس مکانی متفاوتی خواهد بود.

جهت تعیین فرکانس مکانی هر یک از پروفیل‌ها، اطلاعات شدت روشنایی آن پروفیل برای یک جفت قطاع مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل شماره ۷ اطلاعات شدت روشنایی برای یک پروفیل نمونه را نشان می‌دهد.



شکل ۷- نمودار اطلاعات شدت روشنایی در جهت پروفیل‌های دایره‌ای

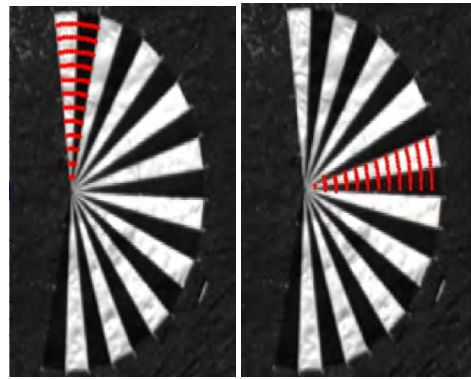
مطابق با شکل فوق طول هر قطاع روشن را می‌توان فاصله بین دو می‌نیم محلی در نمودار روشنایی دانست. بر این اساس فرکانس مکانی پروفیل مربوطه $1/d$ و در واحد LP/π می‌باشد.

جهت تعیین فرکانس مکانی هر یک از پروفیل‌ها، اطلاعات شدت روشنایی آن پروفیل برای یک جفت قطاع، در قالب یک نمودار ترسیم می‌شود. ماکزیمم و می‌نیمم مقادیر شدت روشنایی جهت تعیین تابع انتقال کنتراست در فرکانس مربوطه و با استفاده از روابط ۲ و ۳ بکار گرفته می‌شود.

پس از تعیین تابع انتقال کنتراست (CTF) در فرکانس‌های مکانی مختلف، این مقادیر جهت تعیین مقدار تابع MTF در فرکانس‌های مختلف تا آخرین فرکانس موجود در تصویر و با استفاده از سری تبدیلی Coltman (رابطه‌ی ۴)، مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در این تحقیق با استفاده از جفت قطعات‌های متوالی در جهات مختلف از جمله جهت پرواز و جهت عمود بر آن و جهات مختلف دیگر که بین این دو امتداد قرار دارند، اقدام به اندازه‌گیری تابع گسسته‌ی MTF و فرکانس

بحرانی سیستم شده است. در شکل ۸ تصویری از جفت قطعاتهای انتخابی نمایش داده شده است.



(الف) (ب)

شکل ۸- تصویر جفت قطعاتهای انتخابی الف-در جهت امتداد پرواز، ب- امتداد عمود بر آن

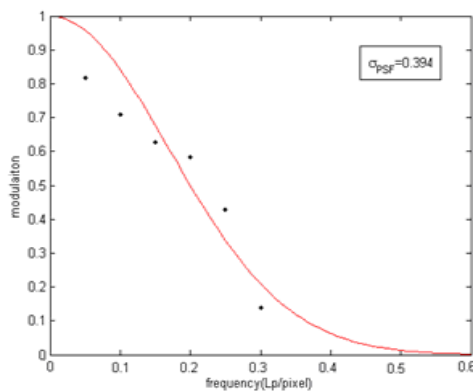
از آنجایی که ماهیت تابع MTF همانند تابع PSF از یک فرم گوسی تبعیت می‌کند، جهت دستیابی به تابع

MTF پیوسته، اقدام به برازش یک تابع گوسی به اطلاعات گسسته‌ی بدست آمده شده است. پس از این برازش انحراف معیار تابع گوسی (σ_{MTF}) برآورده شده و از روی آن σ_{PSF} بدست می‌آید.

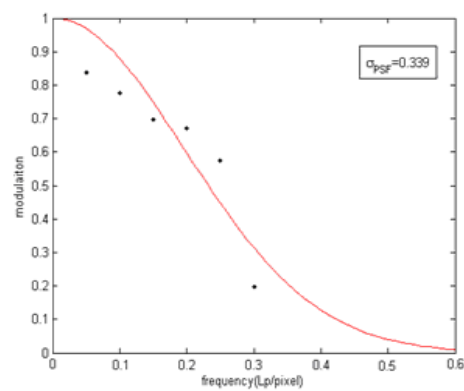
شکل ۹ تابع برازش شده به اطلاعات گسسته در دو امتداد، جهت پرواز و جهت عمود بر آن را نشان می‌دهد.

در نمودارهای شکل ۹ محور عمودی نشان‌دهنده‌ی اندازه‌ی تابع MTF و محور افقی اندازه‌ی فرکانس را در واحد Lp/pixel نشان می‌دهد.

جدول شماره ۱ نتایج حاصل از برآورد σ_{PSF} و σ_{MTF} در جهات مختلف را نشان می‌دهد



(ب)



(الف)

شکل ۹- نتایج برازش تابع گوسی بر اطلاعات اندازه‌گیری شده الف- در جهت امتداد پرواز، ب- جهت عمود بر پرواز

جدول ۱- نتایج اندازه‌گیری انحراف معیار تابع انتقال کنتراست و تابع پخش خطی در جهتهای مختلف

امتداد	σ_{MTF} (Lp/pi)	σ_{PSF} (pi)	حداقل فاصله لازم جهت تفکیک قاط نورانی مجاور ($d= 2.95*\sigma_{PSF}$)	فرکانس بحرانی سیستم	
				(Lp/pi)	(Lp/mm)
0° (جهت پرواز)	۰/۴۰۴	۰/۳۹۳	۱/۱۵	۰/۴۵	۵۰
20°	۰/۴۱۴	۰/۳۸۳	۱/۱۳	۰/۴۴	۴۹
40°	۰/۴۵۶	۰/۳۴۸	۱/۰۳	۰/۴۴	۴۹
60°	۰/۴۶۷	۰/۳۳۹	۱	۰/۴۶	۵۱
80°	۰/۴۷۸	۰/۳۳۲	۰/۹۸	۰/۵۱	۵۶
90° (جهت عمود بر پرواز)	۰/۴۷۹	۰/۳۳۲	۰/۹۸	۰/۵۲	۵۷

می‌توان به اثرات مربوط به حرکت هواپیما و عملکرد ناقص جبران حرکت رو به جلو (FMC) در لحظه‌ی تصویربرداری نسبت داد.

لازم بذکر است که حد تفکیک مکانی اسمی سنجنده (Lp/pi) ۰,۵ معرفی شده است [۱]. این مقدار بیانگر آن است که تشخیص یک جفت خط سیاه و سفید به فضایی معادل با ۲ پیکسل تصویربرداری نیاز دارد. به عبارت دیگر دو خط سفید متوالی با فاصله یک پیکسل (مربوط به خط سیاه) از یکدیگر جدا می‌شوند. با توجه به اینکه اندازه پیکسل سنجنده ۹ میکرومتر می‌باشد، در هر میلی‌متر از تصویر ۵۵ جفت خط قابل شمارش خواهد بود که در واقع فرکانس بحرانی سیستم سنجنده را معادل با (Lp/mm) ۵۵ معرفی می‌کند. مقایسه این مقدار اسمی با نتایج حاصل از جدول ۱، این حد تفکیک را برای جهت عمود بر پرواز تقریباً صحیح و لی در جهت پرواز اندکی خوشبینانه نشان می‌دهد، چرا که در ارزیابی صورت گرفته حد تفکیک در جهت پرواز (Lp/mm) ۵۰ برآورد شده است.

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این تحقیق از تارگت ستاره سایمنز به عنوان یکی از پرکاربردترین تارگت‌ها در اندازه‌گیری حد تفکیک مکانی، استفاده شده است. نتایج نشان داد که حد تفکیک مکانی بدست آمده از تصویر در بدترین حالت (جهت پرواز) حدود (lp/mm) ۵۰ است که مقداری نزدیک به مقدار اسمی آن برای سنجنده ((lp/mm) ۵۵) داشته و عوامل محیطی و شرایط پرواز حداقل تأثیر را بر کاهش کیفیت و متعاقباً کاهش حد تفکیک مکانی تصویر اخذ شده دارد. از طرفی نتایج دیگر تحقیقات نیز نشان دهنده‌ی این مطلب است که مقدار اندازه‌گیری شده برای حد تفکیک مکانی با استفاده از تارگت‌های مصنوعی از مقدار اسمی آن برای سنجنده کوچکتر می‌باشد (E. N. R. Nelson, 2000 & Honkavaara, 2006). یکی دیگر از نتایج بدست آمده تغییر پارامتر حد تفکیک مکانی نسبت به جهت پرواز می‌باشد، به شکلی که در جهت عمود بر پرواز بیشترین مقدار خود را داشته و در جهت امتداد پرواز کمترین مقدار خود را خواهد داشت.

مقدار حاصل برای σ_{PSF} معیاری از دامنه‌ی این تابع در فضای تصویر می‌باشد. با توجه به شکل ۱ حداقل فاصله لازم جهت تفکیک دو نقطه نورانی مجاور (d) برابر با نصف دامنه تابع PSF خواهد بود. با توجه به اینکه تابع گوسی در فاصله σ ۲,۹۵ از مرکز خود، میرا می‌شود، می‌توان مقدار d را برابر با σ_{PSF} ۲,۹۵ در نظر گرفت. ستون چهارم جدول ۱ مقادیر حاصل برای پارامتر d در جهات مختلف را نشان می‌دهد. بر طبق این نتایج کمترین میزان حد تفکیک سنجنده در جهت پرواز یا مقدار (pixel) $d=1/15$ و بهترین حد تفکیک در جهت عمود بر پرواز با مقدار (pixel) $d=0/98$ حاصل شده است. میانگین مقدار d بعنوان حداقل فاصله لازم جهت تفکیک دو نقطه نورانی مجاور برابر با ۱,۰۵ پیکسل قابل برآورد می‌باشد.

با توجه به مفهوم فرکانس نایکوئیست، در این فرکانس مقدار تابع MTF به سمت صفر میل می‌کند لذا جهت دستیابی به این فرکانس (به عنوان حد نهایت فرکانس مکانی قابل تشخیص توسط هر سنسور) با استفاده از نمودار تابع MTF در نظر گرفتن یک مقدار عددی کوچک و نزدیک به صفر الزامی می‌باشد. این مقدار معمولاً مقداری عددی بین ۰/۰۲ تا ۰/۰۵ در نظر گرفته می‌شود که در این تحقیق با توجه به تأثیر کم تغییر این مقدار در نتایج حاصل، مقدار ۰/۰۳ به عنوان حد آستانه جهت تعیین این فرکانس در نظر گرفته شده است [۴] در واقع با بسط تابع گوسی برازش شده به مقادیر MTF هر جفت قطاع در یک رنج وسیعتر، و با استفاده از عملیات برونیابی، فرکانسی که در آن مقدار تابع MTF مساوی با حد آستانه‌ی موردنظر می‌باشد، بدست خواهد آمد که فرکانس بحرانی سیستم و یا همان فرکانس نایکوئیست می‌باشد. جهت تعیین فرکانس بحرانی در هر جهت خاص، فرکانسی که در آن، نمودار تابع MTF مربوط به آن جهت، مقدار ۰,۰۳ را اختیار کند، برآورد شده است. نتایج بدست آمده از پروسه‌ی اندازه‌گیری تابع MTF سیستم در امتدادهای مختلف در ستون آخر جدول ۱ آمده است بررسی نتایج حاصل از فرکانس بحرانی سیستم نیز موید حد تفکیک مکانی بالاتر در جهت عمود بر پرواز و کمترین مقدار حد تفکیک مکانی در جهت پرواز می‌باشد. به عبارت دیگر حد تفکیک مکانی تصویر در جهت عمود بر پرواز بهترین مقدار خود را داشته و بتدریج تا رسیدن به امتداد پرواز روند کاهشی طی می‌کند. یکی از دلایل منطقی این امر را

از طرف دیگر همانطور که نشان داده شد، تصویر اخذ شده توسط دوربین حاوی یک اختلال اپتیکی است که در واقع در اثر کانولوشن محلی تابع پخش نقطه‌ای سنجنده با تصویر حقیقی که عاری از هرگونه اختلال اپتیکی می‌باشد، رخ می‌دهد. جهت دستیابی به تخمینی از تصویر حقیقی که حد تفکیک مکانی آن بالاتر از حد تفکیک تصویر اخذ شده می‌باشد، می‌توان با استفاده از مقادیر بدست آمده برای تابع PSF، اقدام به پیاده سازی عملیات بازیابی تصاویر کرد، که در آن هدف دستیابی به تصویری عاری از عوامل کاهش کیفیت از جمله تاری و نویز موجود در تصاویر می‌باشد. در این پروسه با استفاده از اطلاعات بدست آمده از تابع پخش نقطه‌ای برای تصویر اخذ شده و انجام عملیات معکوس کانولوشن بر روی تصویر مورد نظر، تصویر بازیابی شده که در واقع تخمینی از تصویر حقیقی خواهد بود، بدست می‌آید. با توجه به پیچیدگی عملیات بازسازی تصویر حقیقی تصاویر اخذ شده و اهمیت افزایش حد تفکیک مکانی تصاویر، بنظر می‌رسد نیاز به تحقیقات بیشتر در این زمینه الزامی خواهد بود.

به هر حال با توجه به مشکلات تهیه و استفاده از اینگونه تارگت‌ها در تصاویر، پیشنهاد می‌شود تحقیقات بیشتری در زمینه ی اندازه گیری حد تفکیک مکانی با استفاده از عوارض طبیعی موجود در تصاویر انجام شود، تا بتوان روشی قابل اعتماد جهت دستیابی به حد تفکیک مکانی سیستم های تصویربرداری با استفاده از این عوارض ارائه داد. از طرفی با توجه به تغییر پارامتر حد تفکیک مکانی تصاویر نسبت به شرایط پرواز و عدم امکان دسترسی به تارگت‌هایی از قبیل ستاره سایمنز در تصاویر، دستیابی به روشی استاندارد که قادر به اندازه‌گیری حد تفکیک تصاویر با استفاده از عوارض موجود در تصاویر باشد، بسیار کارآمد خواهد بود. از طرفی تارگت مورد استفاده در تصاویر تنها قسمتی از تصویر را پوشش داده و با توجه به تغییر میزان حد تفکیک مکانی در مناطق مختلف تصویر پیشنهاد می‌شود از تارگت‌های متعدد در مناطق مختلف تصاویر جهت حصول میانگینی قابل اعتماد از این پارامتر استفاده شود. البته در این مورد ضرورت استفاده از عوارض طبیعی موجود در تصویر در اندازه‌گیری حد تفکیک مناطق مختلف تصویر بیش از پیش وجود خواهد داشت.

مراجع

- [1] Becker S, Haala N, Honkavaara E, Markelin L, (2006), "Image Restoration For Resolution Improvement Of Digital Aerial Image: A Comparison Of Large Format Digital Cameras", ISPRS, Commission I , WG I/4.
- [2] Gustavo K. Rohde, (May 7th, 2010), " Digital image Processing, Lane Center for Computational Biology", Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, USA.
- [3] Dennis Helder, Jason Choi, (Nov, 2004), "On-orbit Modulation Transfer Function (MTF) measurement of QuickBird", Image Processing Laboratory Electrical Engineering and Computer Science Department, South Dakota State University
- [4] Nelson N. R, Barry P. S, (2000), Measurement of Hyperion MTF from on-orbit scenes, TRW, Redondo Beach, CA 90278.
- [5] Jacobsen K, (2008), "Effective Resolution Of Large Size Digital Frame Cameras", ASPRS Annual Conference.
- [6] National Semiconductor Application, (1995), "An Introduction to the Sampling Theorem", Note 236.
- [7] Tamburic B, (June 2006), Measurement of the Modulation Transfer Function through the Use of regional circular Targets, Imperial College London Institute for Environmental Physics, pp 9-25.

- [8] Honkavaara E., Jaakkola J., Markelin L., Becker S., (2006), "Evaluation Of Resolving Power and MTF Of DMC", International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Commission I, WG I/4.
- [9] Norman B. Nill, (2001), "Conversion between Sine Wave and Square Wave Spatial Frequency Response of an Imaging System", Mitre Technical Report, Center for Integrated Intelligence Systems Bedford, Massachusetts, pp 27-28.