## قدرت تفکیک مکانی (*SPATIAL RESOLUTION*)

عبارت است از کوچکترین ابعادی که توسط سنجنده قابل ثبت و تشخیص می باشد (جدایی پذیری عوارض تصویر برداری شده).

برای اغلب سنجنده ها فاصله بین سنجنده و سطحی که مورد سنجش قرار می گیرد، نقش مهمی را در تعیین دقیق اطلاعات و مساحت نحدوده ای که این اطلاعات از آن استخراج می شود بازی می کند. سنجنده هایی که بر سکو هایی با فاصله زیاد از هدف قرار می گیرند، سطوح بزرگتری را در دید خود می گیرند ولی قادر به دید جزئیات کمتری در مقایسه با همین سنجنده ها زمانیکه در فاصله نزدیکتر از هدف قرار دارند هستند. جزئیات قابل مشاهده در یک تصویر به قدرت تفکیک مکانی سنجنده که همان کوچکترین بعد قابل تشخیص از یک پدیده می باشد، بستگی دارد.

تصاویری که در آنها تنها پدیده های بزرگ قابل شناسایی باشند دارای قدرت تفکیک پایین Coarse or Low Resolution و آن گروه از تصویر هایی را که بتوان پدیده های بسیار کوچک را در آنها آشکارسازی نمود دارای قدرت تفکیک بالا Fine or High Resolution می باشند. در سنجنده های نظامی هر چه قدرت تفکیک بالاتر باشد مطلوبتر می باشند.

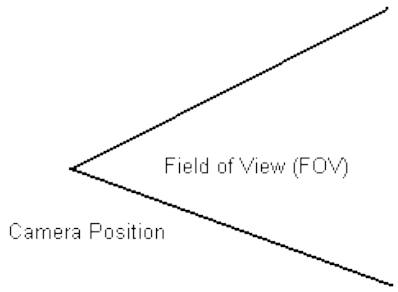
در شکل زیر تصویر سمت راست دارای قدرت تفکیک کم و تصویر سمت چپ دارای قدرت تفکیک بالا می باشد:

## میدان دید FOV و عرض باند Swath Width (GFOV) :

زاویه دید کل سنجنده را مشخص می کند.( زاویه ای که سنجنده می تواند سطح زمین را جاروب کند). که این زاویه از رابطه ی زیر قابل محاسبه می باشد :

FOV = 2 Arc tan( w/2H)

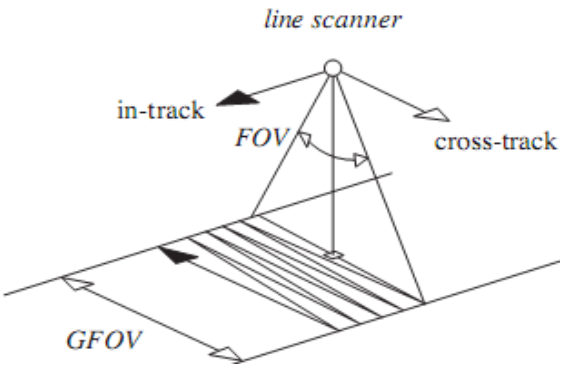
که در این رابطه w پهنای دید سنجنده و H ارتفاع ماهواره می باشد.



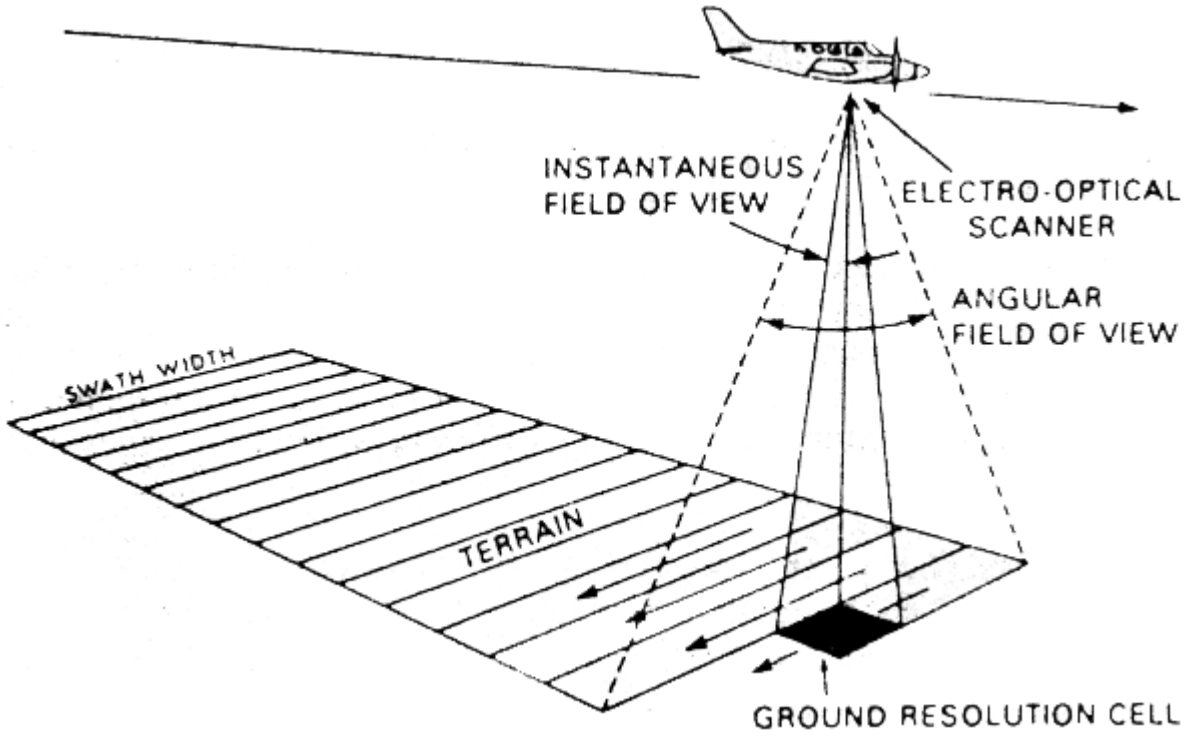

از آنجایی که راستای طولی توسط حرکت سنجنده کنترل می شود لذا معمولا FOV در راستای طولی (in-track) تعریف نمی شود و در تمام انواع اسکنرها ، پوشش زاویه ای عمود بر امتداد حرکت سنجنده (Cross Track) را FOV و پوشش زمینی مرتبط با آن زاویه را ، GFOV یا Ground-projected field of view می نامند.

البته باید در نظر داشت که مقدار FOV زاویه است و در واحدهای مانند درجه و رادیان بیان می شود اما GFOV فاصله می باشد و در واحد متر بیان می گردد. GFOV در واقع همان پهنای باند تصویر برداری شده Swath Width می باشد.

$$GFOV = 2H\tan\left(\frac{FOV}{2}\right)$$



از آنجایی که با افزایش فاصله، افزایش در انحنای زمین را خواهیم داشت لذا به منظور استفاده از رابطه ی فوق ابتدا باید این تصحیح را اعمال کرد.




**میدان دید لحظه ای IFOV :**

قدرت تفکیک یک سنجنده قبل از هر چیز به میدان دید لحظه ای سنجنده بستگی دارد. IFOV کوچکترین زاویه ایست که سنجنده در هر لحظه برداشت می کند و زاویه ایست فضایی که به واحد نمونه برداری زمینی محدود می باشد. اندازه مساحت سطحی که توسط سنجنده در IFOV قرار می گیرد ( D ) از حاصلضرب IFOV ( بر حسب استرادیان) در مجذور فاصله سنجنده تا سطح به دست می آید. این سطح بر روی زمین را Resolution cell نامیده و مشخص کننده بیشینه قدرت تفکیک سنجنده می باشد. IFOV تابعی از ارتفاع مداری ماهواره، فاصله کانونی سامانه اپتیکی و اندازه و ابعاد سنجنده می باشد.

$$D = B \cdot H^2$$

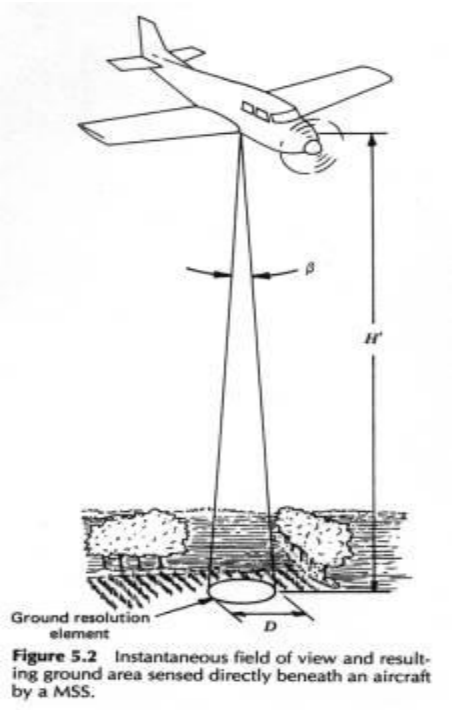
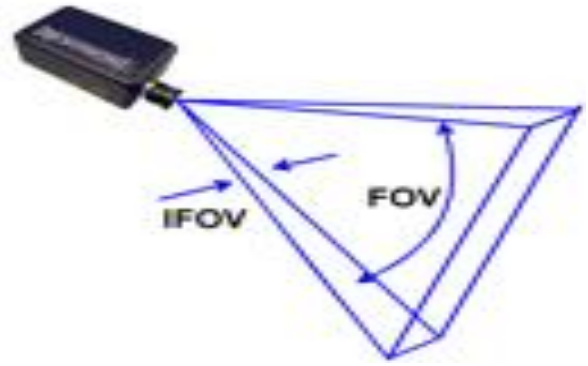
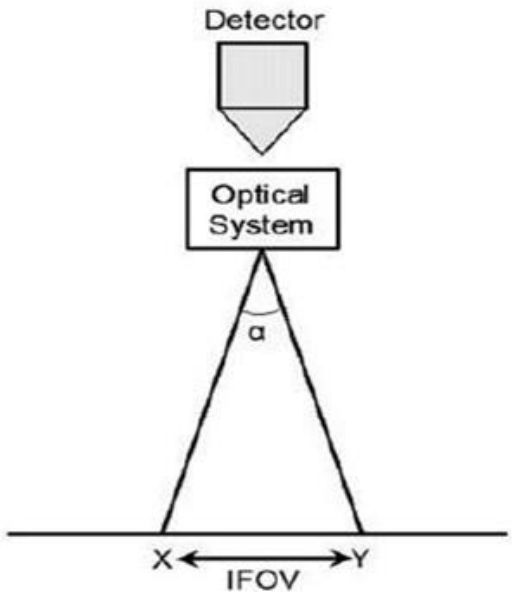



**Figure 5.2** Instantaneous field of view and resulting ground area sensed directly beneath an aircraft by a MSS.




با توجه به هدف کاربر می توان از روش های متفاوتی برای اندازه گیر ی قدرت تفکیک مکانی استفاده کرد. Townshend(1980) در یک بررسی جامع از ۴ معیار متفاوت برای تعریف قدرت تفکیک مکانی استفاده کرد که عبارتند از : توانایی یک سیستم در تشخیص و تمایز بین دو تارگت نقطه ای، توانایی در محاسبه دوره تناوب تارگتهای تکرار شونده ، توانایی اندازه گیری مشخصات طیفی تارگتهای کوچک و مشخصات هندسی سیستم تصویر برداری .

بر اساس خصوصیات هندسی سیستم تصویربرداری اغلب از زاویه دید لحظه ای IFOV یا Field of View Instantaneous برای اندازه گیری قدرت تفکیک مکانی استفاده می شود .و به ۲ روش می تواند اندازه گیری شود: بعنوان زاویه $\alpha$ یا بعنوان فاصله معادل زمینی X-Y بر روی زمین که در شکل زیر نشان داده شده است.




در شکل یک مقطع نشان داده شده و X_Y در حقیقت قطر دایره می باشد . IFOV مشخصه اسمی ای است که به تعدادی فاکتور بستگی دارد. هیچ ماهواره ای یک مدار کاملا ثابت و پایدار ندارد (ارتفاع بالای سطح زمین ماهواره ها متغیر و اغلب ده ها کیلومتر است). ماهواره های Landssat-1 تا Landsat-3 ارتفاع اسمی ۹۱۳ کیلومتر داشتند، ولی ارتفاع واقعی آنها بین ۸۸۰ تا ۹۴۰ کیلومتر متغیر بود. IFOV در ارتفاعات پائین، کوچکتر می شود و با افزایش ارتفاع افزایش می یابد، گرچه قدرت تفکیک مکانی اسکنر چند طیفی (MSS) Landsat-1 تا Landsat-3 عموما به صورت ۷۹ متر مشخص می شود و قدرت تفکیک واقعی (اندازه گیری شده بوسیله IFOV) بین ۷۶ تا ۸۱ متر متغیر است.

## قدرت تفکیک زمینی GIFOV :

معادل زمینی IFOV می باشد که در واقع تصویرشده مقدار اندازه ابعاد پیکسل در سطح زمین است. بنابراین در هر دو حالت along-track و Cross-track مقدار GIFOV در پیکسل های همسایه با هم همپوشانی خواهد داشت که برای حل این مشکل از مفهوم Ground-Projected Sample Interval (GSI) که تعیین کننده فاصله ی بین پیکسل ها می باشد استفاده می نماییم.

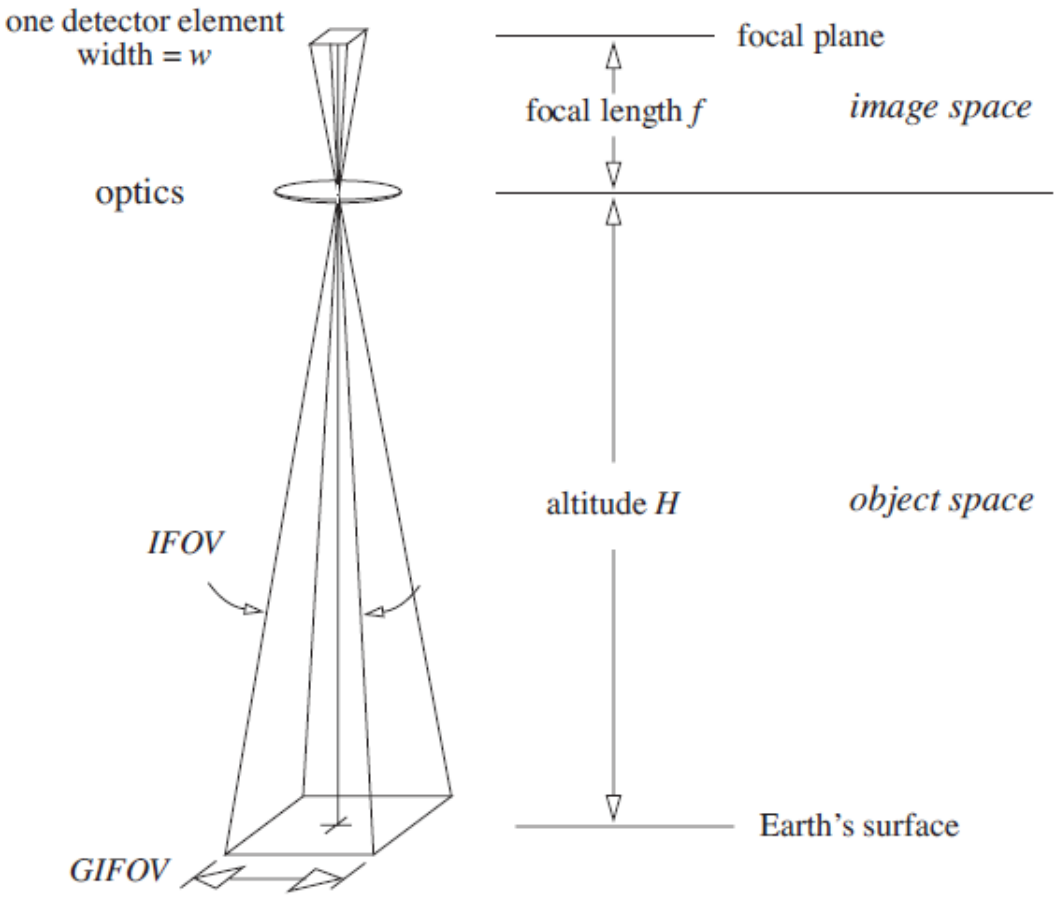
IFOV مستقل از ارتفاع عملیاتی سنجنده (H) است و در فضای تصویر و شیء یکسان است. IFOV یک پارامتر مناسب برای سیستم های Airborne است که ارتفاع عملیاتی می تواند متغیر باشد :

$$IFOV = 2\,arctan\left(\frac{w}{2f}\right) \cong \frac{w}{f}$$

GIFOV به H، f و w بستگی دارد :

$$GIFOV = 2\,\mathrm{H}\tan\left(\frac{IFOV}{2}\right) = \mathrm{w} * \frac{H}{f} = \frac{w}{m}$$

در شکل زیر ارتباط میان *IFOV* ، *GIFOV* و پارامتر های سنجنده نمایش داده شده است :

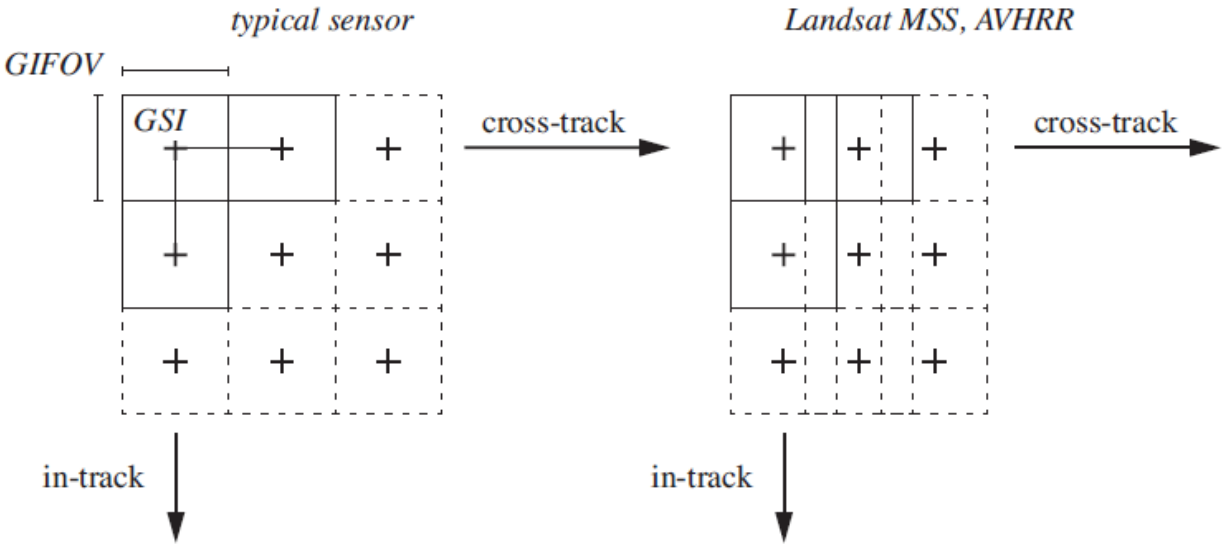



کاربران داد های سنجش از دور معمولا ترجیح می دهند در آنالیزهایشان از GIFOV استفاده کنند ولی در سوی دیگر، طراحان سنجنده اغلب ترجیح می دهند از پارمترهای زاویه ای FOV و IFOV استفاده کنند زیرا هر دو مقادیر مشابهی در فضای تصویر و فضای شیء دارند.

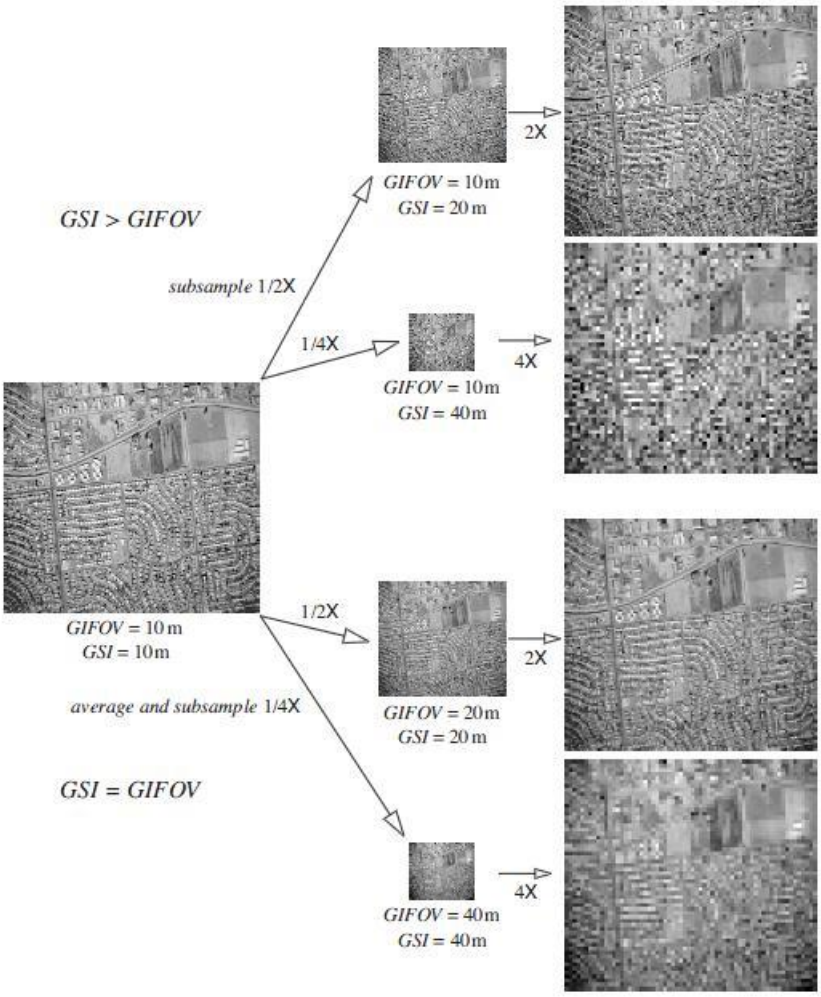
## فاصله نمونه برداری زمینی GSD :

فاصله میان پیکسل ها در مقیاس زمینی می باشد که بستگی به فواصل نمونه برداری و همچنین سرعت اسکن کردن سنجنده دارد.

در شکل زیر ارتباط میان GSD و GIFOV نمایش داده شده که هر بخش نمایانگر یک پیکسل می باشد :



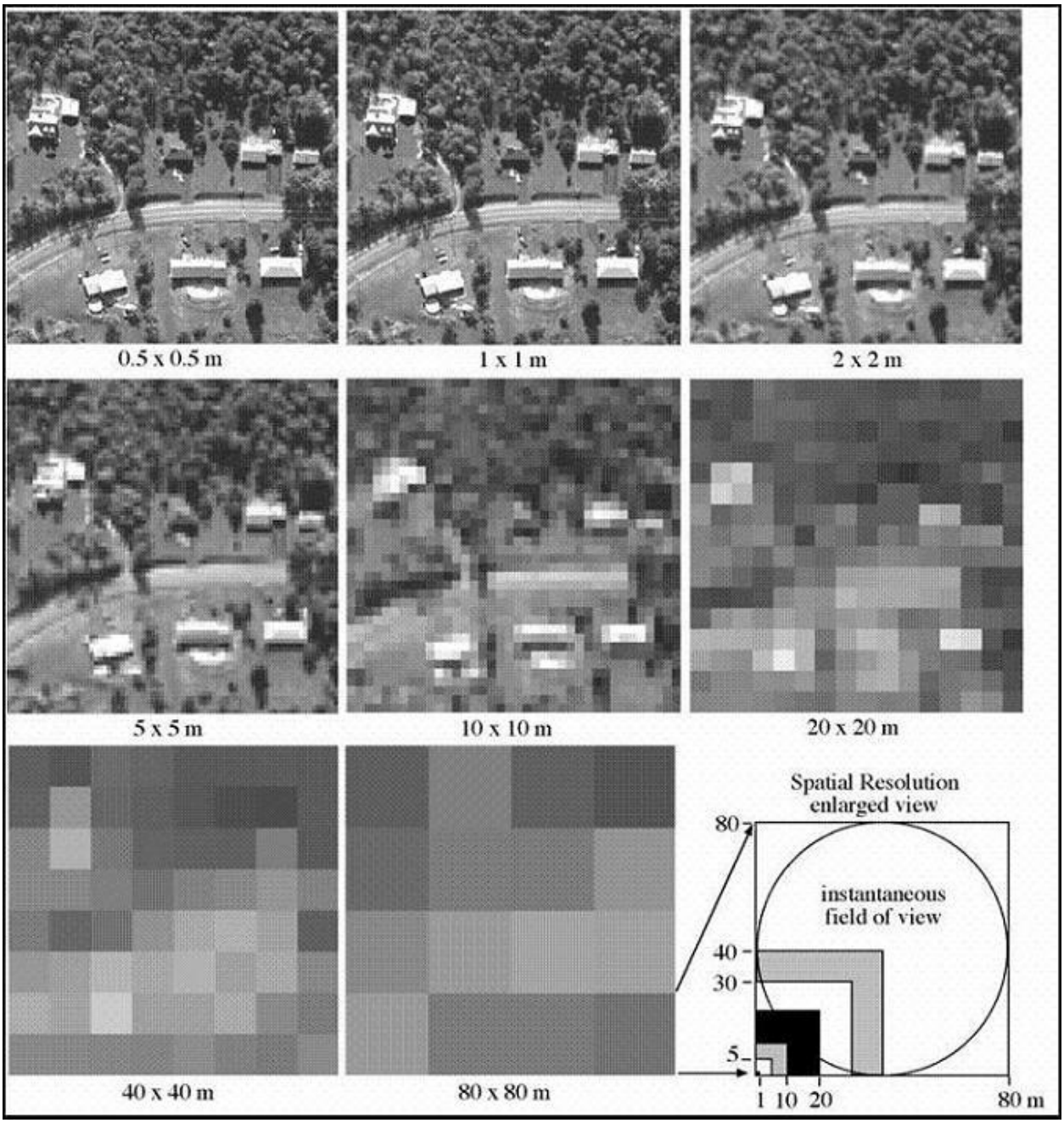

تاثیر اندازه ی GSI و GIFOV در کیفیت تصویر در شکل زیر نمایش داده شده که هر چه اندازه ی GIFOV بیشتر باشد کیفیت تصویر بهتر می شود :




**: PIXEL SIZE**

یک Resolution cell در تصویر ، عنصر تصویری یا پیکسل نام دارد که کوچکترین جز تصویر می باشد. معمولا یک پیکسل به صورت مربعی بوده و جزئی از سطح می باشد. هر فریم دارای یک سری پیکسل های است که در کنار هم چیده شده اند و آن فریم را تشکیل می دهند. که مقدار بزرگی و کوچکی آن پیکسل ها در کیفیت تصویر بسیار تاثیر گذار می باشد.

معیاری که برای تعیین اندازه هر پیکسل مورد استفاده قرار می گیرد برابر با تعداد پیکسل های موجود در هر اینچ می باشد، البته در بعضی موارد مانند شکل زیر این مورد با تعداد پیکسل های موجود در هر سطر و ستون بیان می شود.

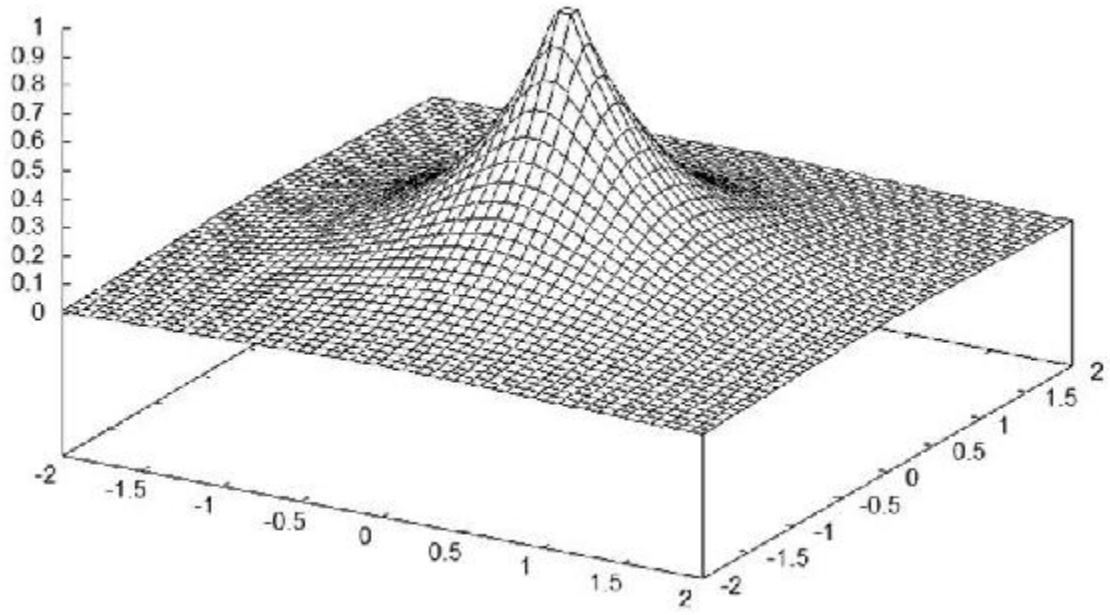


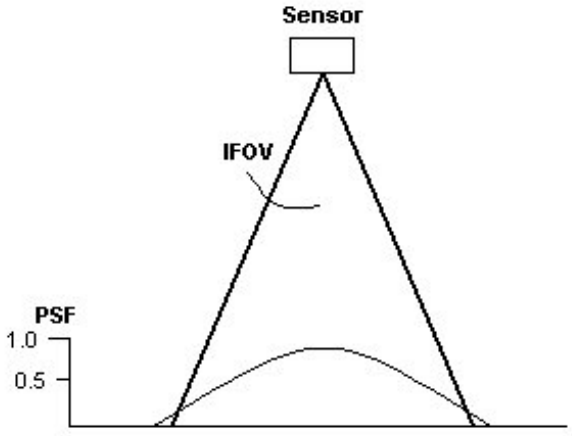

درک تفاوت میان قدرت تفکیک و پیکسل بسیار مهم می باشد زیرا نمی توان آنها را به جای یکدیگر به کار گرفت.اگر قدرت تفکیک یک سنجنده زاویه ای فضایی مقابل به سطحی به ابعاد ۲۰در۲۰ متر باشد و تصویر با ظرفیت تفکیک کامل نشان داده شود، آنگاه هر پیکسل نشان دهنده سطحی ۲۰ در ۲۰ متر بر روی زمین است. در این صورت اندازه پیکسل و قدرت تفکیک با هم برابر می باشند. ولی ممکن است تصویری با ابعاد پیکسلی متفاوت  با قدرت تفکیک اصلی به نمایش

گداشته شود. مثلا از بسیاری از تصاویر ماهواره ای پوسترهایی تهیه می شود که در آن برای نشان دادن سطوح بزرگتر از هر چند پیکسل میانگین گرفته می شود که در این صورت قدرت تفکیک با اندازه پیکسل متفاوت خواهد بود.

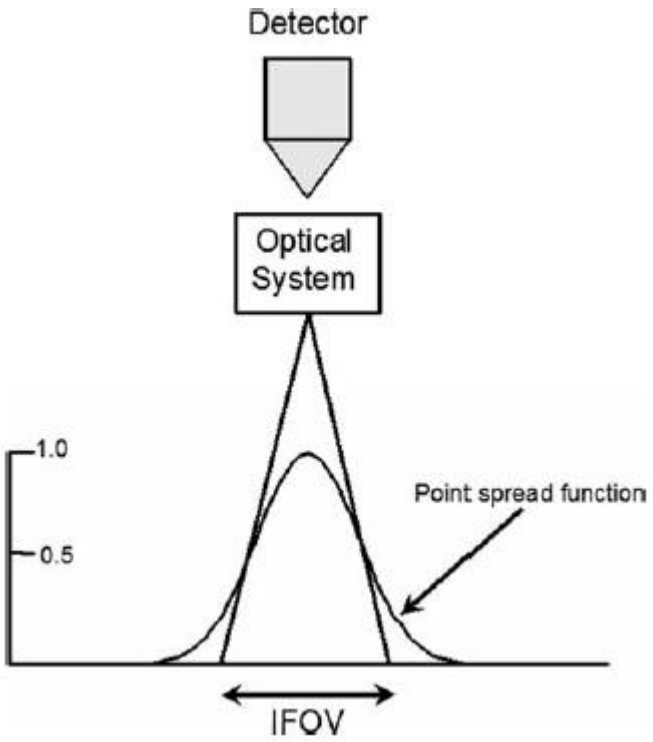
## Point Spread Function ( PSF) :

هر چند که IFOV اغلب در اندازه گیری رزولوشن ذکر می شود اما زیاد هم دارای اهمیت نمی باشد. برای توضیح این مطلب باید در نظر بگیریم که چگونه نور بازتابیده شده از یک منبع نقطه ای تصویر را روشن می کند. یک منبع تابش نور بر روی زمین یک نقطه ی روشن بر روی تصویر ایجاد نمی کند بلکه به خاطر خصوصیات اپتیکی تصویر به صورت یک منطقه ی دایروی روشن روی تصویر دیده می شود. یک مقطع عرضی از شدت توزیع یک منبع نقطه ای ثبت شده بر روی تصویر در شکل زیر نمایش داده شده، از روی آن می توان دید که منحنی شدت منبع نقطه ای شبیه منحنی گوسین می باشد. تابع توزیع نشان داده شده در شکل PSF نامیده می شود.





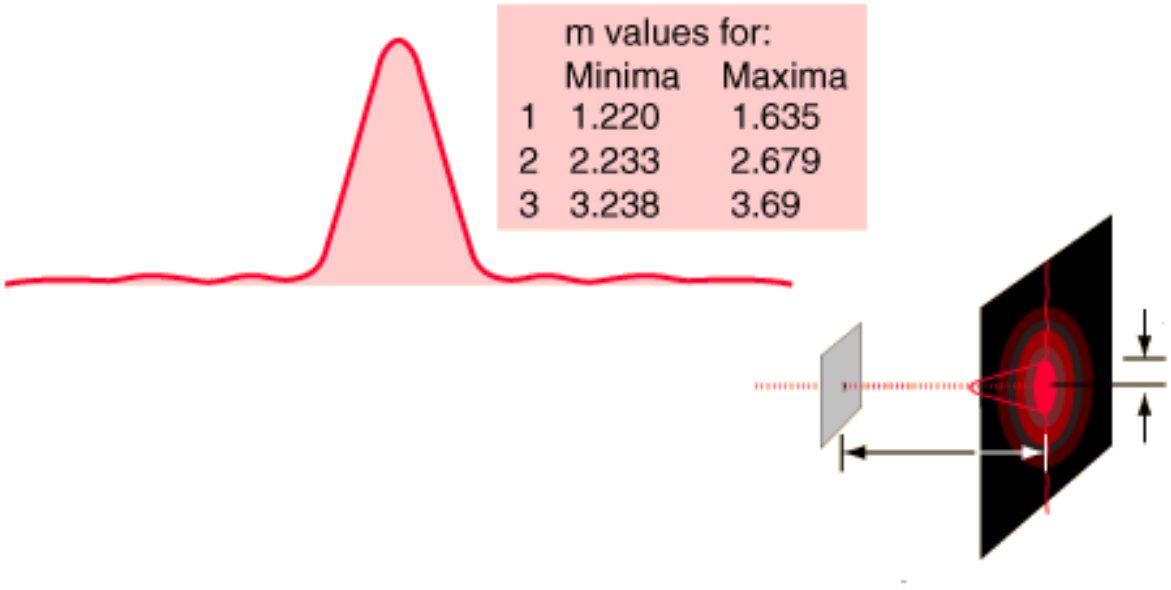

در حقیقت اندازه گیری جایگزین IFOV بر اساس PSF می باشد و قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر در Land Sat (TM) بر مبنای تعریف PSF در IFOV می باشد.



IFOV اسکنر چند طیفی Landsat (MSS) با استفاده از این سنجش اندازه گیری، ۹۰ متر است نه ۷۹ متر. وجود روشنایی یا تاریکی نسبی اشیاء مطابق با IFOV سنجنده، دامنه PSF را برای ایجاد رادیانس مشاهده شده کمتر یا بیشتر از محیط اطراف آن افزایش یا کاهش می دهد. همین موضوع است که باعث می شود عوارض با کنتراست بالا مانند رودخانه های باریک و کانال ها خیلی اوقات در تصاویر Landsat ETM+ قابل رؤیت هستند (حتی اگر عرض آنها کمتر از قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر سنجنده باشد). برعکس، تارگت هایی با ابعاد بزرگتر از IFOV ۳۰ متر Landsat ETM+ ممکن است غیر قابل تشخیص باشند، مگر اینکه با محیط اطرافشان کنتراست داشته باشند.

ستاره شناسی به نام Airy در سال ۱۸۳۴ به این نکته پی برد که تصویر یک منبع نقطه ای که به وسیله یک سیستم نوری ایده آل تهیه شده است به صورت ریاضی یک نقطه نمی باشد ولی در عوض شامل یک دیسک مرکزی که با حلقه های انکسار احاطه شده ، می باشد . این دیسک مرکزی با شدت بالا ، به دیسک جعلی یا اغلب به دیسک Airy معروف است .

اگر انرژی نورانی در دیسک Airy ،تواما از یک مقدار واحد گرفته شود ، انرژی توأم حلقه روشن اول ، ۸,۳٪ حلقه روشن و نورانی دوم ، ۳,۳٪ سومین حلقه و ۱,۸٪ بقیه خواهد بود ، یا اگر کل انرژی موجود در سرتاسر تصویر را یک مقدار واحد درنظر بگیریم ، دیسک Airy در حدود ۸۴ درصد انرژی و حلقه نورانی اول در حدود ۶ درصد آن را شامل میشوند .

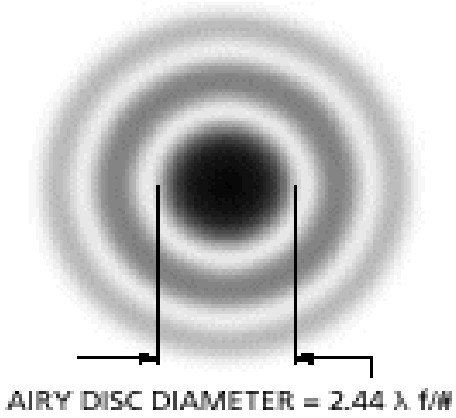


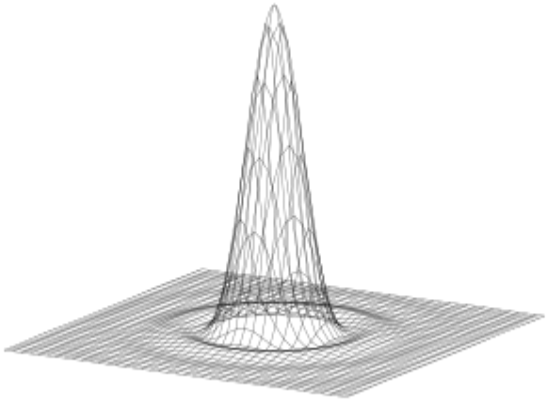
Airy همچنین دریافت که قطر دیسک ، که برای راحتی بعنوان قطر حلقه تاریک اول در نظر گرفته می شود ، به طول موج (λ) نور و f-number – که بیان کننده میزان گشودگی لنز میباشد – بستگی دارد .

دیسک Airy بوسیله حلقه های ضعیفتری احاطه شده است . هر یک از این حلقه ها با یک دایره که دارای Intensity صفر است ، تفکیک شده اند . قطر دیسک Airy از طریق معادله زیر بدست می آید:

$$\text{Airy disc diameter} = 2.44 \times \lambda \times \text{f -number}$$

دراین معادله λ بیانگر طول موج نور و **f -number** بیان کننده پارامتر مربوط به گشودگی میباشد.

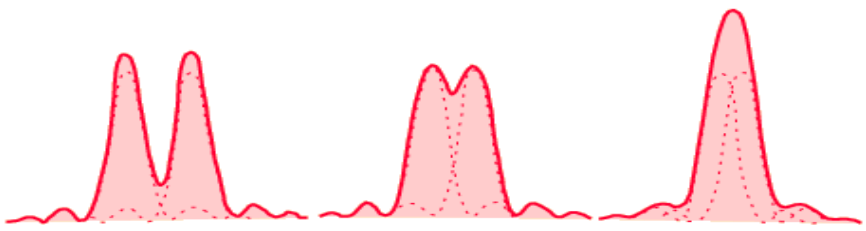


مهمترین کاربرد این مفهوم ، در دوربین ها و تلسکوپ ها می باشد . به علت وقوع پدیده Diffraction ، کوچکترن نقطه ای که یک لنز یا آینه ، از طریق Focus کردن روی یک دسته اشعه نور میتواند ثبت کند ، دارای اندازه ای برابر با اندازه دیسک ایری میباشد .

مطالعات مهم بعدی توسط Rayleigh انجام شد . در مطالعات ریلی ، فرض شد که دو منبع نورانی مجزا زمانـــــــی می توانند مشخص و آشکار شوند که مرکز دیسک Airy یکی از آنها ، با اولین حلقه تاریـک الگـویDiffraction دیگـری ، همپوشانی داشته باشد . در این مورد ، کوچکترین فاصله قابل تشخیص ، از رابطه زیر بدست خواهد آمد :

$$d = 1.22 \lambda (f/\#)$$



مشخص نشده معیار ریلی مشخص و تفکیک شده

معیار ریلی

قدرت تفکیک مکانی یک سیستم تصویری می تواند به وسلیه دو پارامتر Aberration و Diffraction محدود گردد . این پدیده ها دارای منابع مختلفند و به هم ارتباطی ندارند . Aberration میتواند بوسیله نورهای هندسی تعریف و در اصل با افزایش کیفیت Optical و بهبود سیستم تصویر برداری حل شود.

از سوی دیگر ، Diffraction ، ناشی از طبیعت موجی بودن نور است و با پارامترهای اپتیکال مربوط به گشودگی تعیین می شود . گشودگی دایره ای لنز ، مانند یک فضای دوبعدی در آزمایش Single-Slit در نظر گرفته میشود . نوری که از یک لنز عبور میکند ، به دلیل اختلالات ایجاد شده در مسیرش ، یک الگوی Diffraction به شکل حلقه را ایجاد میکند ، که همانطور که ذکر شد به الگوی Airy معروف است . فعل و انفعال و تأثیر متقابل Aberration و Diffraction، میتواند بوسیله PSF یا point spread function ، توصیف شود.

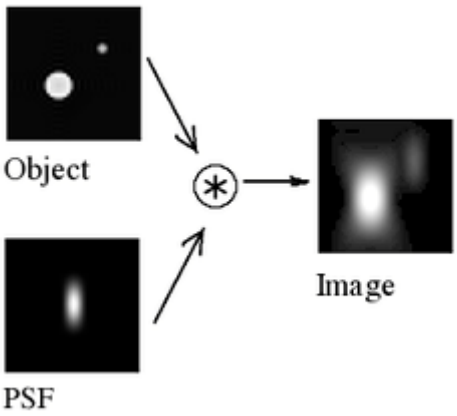
PSF ، واکنش یک سیستم تصویربرداری به منبع نور نقطه ای یا یک عارضه نقطه ای را توصیف میکند. یک ترم عمومی و کلی برای PSF ، Impulse Response یک سیستم خواهد بود که براین اساس ، PSF ، Impulse Response یک سیستم اپتیکال فوکس شده می باشد . در برخی مفاهیم ،PSF می تواند بعنوان یک لکه پخش شده در تصویری که نمایش گرعارضه ای غیر مشخص است ، مد نظر قرار گیرد ولی در مباحث توابع ، PSF قلمرو مکانی یک MTF محسوب میشود.

میزان و درجه گستردگی (Blurring) یک عارضه نقطه ای ، معیاری برای اندازه گیری کیفیت یک سیستم تصویربرداری است ؛ به بیان دیگر ، PSF تصویری است که یک سیستم اپتیکال از یک منبع نقطه ای تشکیل می دهد . منبع نقطه ای

، بنیادی ترین عارضه است که اساس و پایه هر عارضه پیچیده ای را تشکیل می دهد . بعنوان یک مثال ، PSF برای سیستمهای کامل اپتیکال با روزنه وگشودگی دایره ای ، همان دیسک Airy است .

PSF ، یک اندازه مناسب از تأثیر هرالمان سیستم های اپتیکال در گسترش تصویر یک نقطه و شامل تمامی اطلاعات درباره قدرت تفکیک مکانی می باشـــد. در واقع ، تخمین PSF ، یک روش معروف برای تست کردن کیفیت لنز یا سیستم تصویر برداری است.

در سیستم های تصویر برداری مانند میکروسکوپهای فلوئوروسنت و تلسکوپها و میکروسکوپهای اپتیکال ، پروسه تشکیل تصویر بوسیله تئوری سیستم خطی تعریف می شوند بدین معنا که اگر تصویر دو عارضه A و B بطور همزمان گرفته شود ، نتیجه با مجموع تصاویر عوارض ، در حالتی که بصورت مستقل اخذ شده اند ، برابر است؛ که این بدین معنی است که تصویر برداری از A ، بر روی تصویربرداری از B تأثیری نمی گذارد و برعکس . از این رو، تصویر یک عارضه پیچیده ، می تواند بصورت کانوولوشن عارضه واقعی و PSF دیده شود .




در واقع تصویر بدست آمده I(x,y) ، کانوولوشن PSF و تصویر عارضه با استفاده از رابطه زیر میباشد

$$I(x,y) = PSF(x,y) \otimes O(x,y) + n(x,y)$$

که در این رابطه n(x,y) ، نویز های اضافی ناشی از اطراف می باشد .

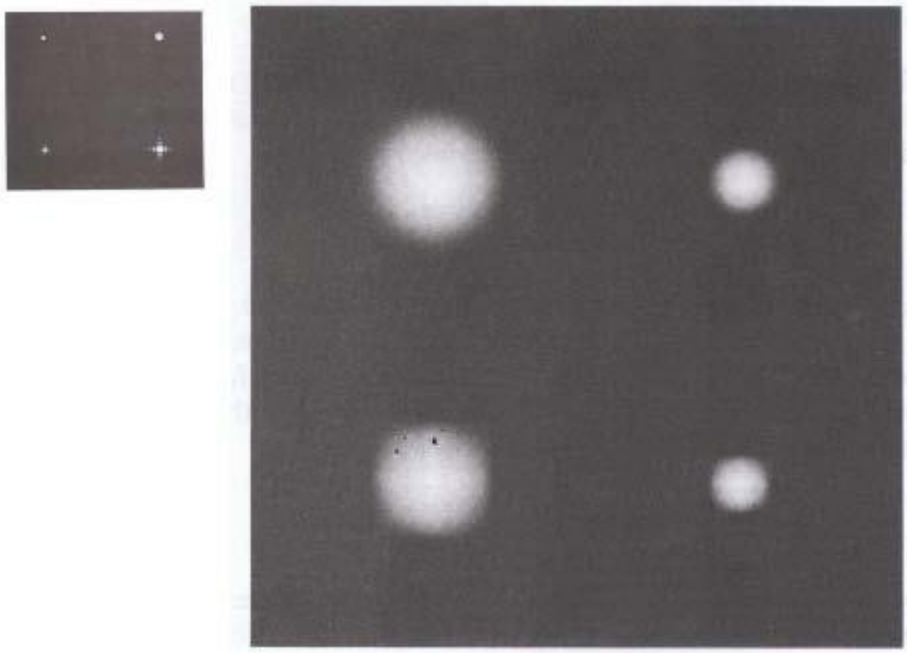
در قلمرو فرکانس ، که قوانین تبدیل فوریه در آن حاکم است ، کانوولوشن بصورت زیر می باشد:

$$F\{I(x,y)\} = F\{O(x,y)\}.F\{PSF(x,y)\}$$

تبدیل فوریه PSF به OTF(Optical Transfer Function) معروف است.

## Modulation Transfer Function (MTF) :

OTF تغییرات مکانی را به عنوان تابعی از فرکانس مکانی ، تشریح می کند که شامل دو قسمت می باشد یکی از آن ها اندازه تابع است پس MTF را به عنوان بزرگی یا اندازه تابع OTF و یا همان تبدیل فوریه PSF تعریف می کنند . که گاهی آن را Contrast Transfer Function (CTF) نیز می نامند، چون کنتراست عکس گرفته شده را بررسی می کند . پس MTF توانایی یک سیستم تصویربرداری را در دوباره تولید کردن سطوح مختلف جزئیات از شی به عکس نشان می دهد .



در شکل بالا عکس سمت راست تصویر یک PSF و شکل سمت چپ MTF آن را نشان می دهد.

## Line Pairs per Millimeter (LP/mm):

جفت خطوط قابل تشخیص در هر میلیمتر که در ارتباط مستقیم با رزولوشن قرار دارد، البته مفهوم دیگری نیز شبیه به آن وجود دارد به نام Lines per Millimeter (L/mm) که مقدار آن دو برابر LP/mm است، و تفاوت آنها را بدین صورت می توان بیان کرد:

در LP/mm تعداد جفت خطوط سیاه و سفید کنار هم را محاسبه می کنند، اما در L/mm تعداد کل خطوط سیاه و سفید را می شمارند.(در هر میلیمتر)

از نظر عددی ، L/mm دو برابر Lp/mm میباشد یعنی بعنوان مثال ، 50 L/mm برای یک مهندس به معنای ۵۰ جفت خط می باشد حال آنکه هر خط سیاه باید یک خط سفید مربوط به خود را نیز داشته باشد که این به معنای 25 Lp/mm است.

ارتباط میان این دو در صورتی که بیشترین تعداد جفت خطها را با $R_N$ و اندازه پیکسل های سنسور را با P نمایش دهیم:

$$R_N = \frac{1}{2.p} LP/mm$$

منابع :


1. **Remote Sensing:Models andMethods for Image Processing, Third Edition, Robert A. Schowengerdt, Professor Emeritus, University of Arizona, Tucson, Arizona**
2. **Computer Processing of Remotely-Sensed Images, Third Edition, Paul M. Mather,The University of Nottingham**
3. **SPATIAL RESOLUTION BY M. J. Valadan Zoej**
4. **http://en.wikipedia.org**
5. **http://medim.sth.kth.se/6l2872/F/F9.pdf**
6. **http://www.yorku.ca/eye/psf.htm**
7. **http://www.rpgroup.caltech.edu/courses/aph162/2010/files/handouts/2010/Point_Spread_Function_Workshop.pdf**
8. **http://www.astro.virginia.edu/class/oconnell/astr511/lec13-f03.pdf**
9. **http://dictionary.reference.com**