

قابلیت استفاده از مدل افاین در زمین مرجع کردن تصاویر سنجنده Cartosat-1

فرزانه دادرسی جوان¹ و علی عزیزی^{2*}

¹ دانش آموخته کارشناسی ارشد گرایش فتوگرامتری، گروه مهندسی نقشه برداری

پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

² دانشیار گروه مهندسی نقشه برداری پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت 87/12/25، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده 89/3/17، تاریخ تصویب 89/5/30)

چکیده

در دنیای امروز استفاده از تصاویر ماهواره ای با قدرت تفکیک بالا به عنوان یکی از مهمترین منابع تامین داده در بسیاری کاربردها مانند مدیریت و پیشگیری از بحران ناشی از سوانح طبیعی، مدیریت منابع معدنی، کاربردهای عمرانی و ... مطرح می‌باشد. از آنجا که اولین مرحله در استفاده از این تصاویر تصحیح هندسی و زمین مرجع نمودن آنها است، در طی سالیان پس از پیدایش و رواج استفاده از این تصاویر تلاشهای فراوانی توسط افراد مختلف در این زمینه انجام گرفته است. از جمله مدل هایی که برای تصحیح این تصاویر مطرح و مورد توجه بسیار قرار گرفته، تبدیل افاین سه بعدی است که از مزایایی همچون تعداد کم پارامترها، ساختار خطی و عدم وابستگی به پارامترهای مسیر و کالیبراسیون سنجنده برخوردار می‌باشد. در این تحقیق قابلیت استفاده از مدل افاین در تصحیح هندسی تصاویر سنجنده Cartosat-1، برای تصاویر اخذ شده از منطقه رودهن در ایران، در مقایسه با مدل رشنال مستقل از زمین مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین امکان افزایش دقت حاصل از این مدل و رفع اثر اعوجاجات ناشی از کرویت و ناهمواری های سطح زمین، بررسی شده است.

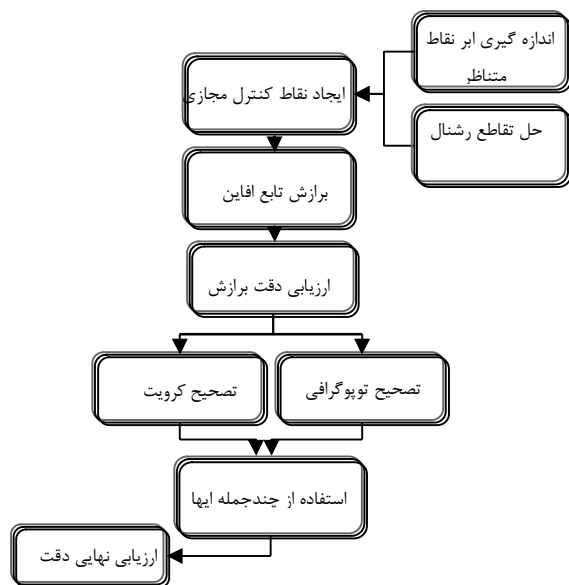
واژه های کلیدی: زمین مرجع نمودن، تصاویر ماهواره ای آرایه خطی، مدل افاین، تابع رشنال، تصاویر ماهواره

Cartosat-1، تبدیل سیستم تصویر مرکزی به موازی، تصحیح جابجایی کرویت

مقدمه

توابع رشنال³، تبدیل افاین سه بعدی⁴ و تبدیل خطی مستقیم⁵ را نام برد. با ظهور GPS/INS و امکان زمین مرجع نمودن مستقیم تصاویر⁶ استفاده از ضرائب رشنال مستقل از زمین در تصحیح هندسی تصاویر مطرح شد و مورد استفاده وسیع قرار گرفت [1]. در این روش ابتدا با استفاده از مدل ریگورس (که المان های آن به کمک GPS/INS هم زمان با تصویربرداری اندازه گیری شده است) و به کمک شبکه از نقاط تصویری اندازه گیری شده در تصاویر، نقاط زمینی ایجاد شده و سپس از برازش تابع رشنال به این نقاط برای هر یک از تصاویر 78 ضریب تابع رشنال تعیین می‌شوند [2]. ضرائب به دست آمده در این حالت، ضرائب رشنال مستقل از زمین نامیده می‌شوند. تا کنون تست های فراوانی توسط افراد مختلف بر روی این مدل انجام شده و دقت بالا و در حد مدل های ریگورس برای آن گزارش شده است [۳، ۴، ۵، ۶]. همین دقت بالا سبب شده است امروزه بسیاری از تصاویر ماهواره ای به جای

تعیین و بررسی مدل های تصحیح هندسی و زمین مرجع نمودن تصاویر ماهواره ای، با توجه به رونق استفاده از این تصاویر در بسیاری از زمینه ها، در دهه های اخیر به شدت مورد توجه قرار گرفته و به عنوان یکی از موضوعات مهم در فتوگرامتری و سنجش از دور مطرح شده است. مستحکم ترین و دقیق ترین این مدل ها، مدل های ریگورس¹ می‌باشند که بر اساس هندسه تصویربرداری تعریف شده و عمدتاً بر پایه معادلات شرط هم خطی قرار دارند. این مدل ها بر اساس پارامترهای مسیر و کالیبراسیون سنجنده تعریف می‌شوند که غالباً بنابه دلایل اقتصادی و یا امنیتی در دسترس نمی‌باشند. گروه دیگر مدل های تصحیح که به عنوان جایگزینی برای مدل های ریگورس مطرح می‌شوند، توابع ژنریک² یا کلی هستند که ارتباط میان فضای تصویر و زمین را به کمک توابع ریاضی برقرار می‌نمایند. این مدل ها مستقل از پارامترهای تصویربرداری بوده و با کمک نقاط کنترل قابل حل هستند. از جمله این مدل ها می توان توابع چندجمله‌ای،



شکل 1: دیاگرام روش ارزیابی دقت مدل افاین.

ایجاد نقاط کنترل مجازی

اولین مرحله از روش پیشنهادی ایجاد نقاط کنترل مجازی است. برای این منظور در اولین قدم ابری از نقاط متناظر با پراکندگی مناسب در فضای تصویر اندازه گیری شده و سپس به کمک ضرائب رشنال همراه تصاویر مختصات زمینی این نقاط محاسبه و از سیستم ژئودتیک به سیستم UTM منتقل می شود چرا که تحقیقات انجام شده نشان داده معادلات افاین در این سیستم نتایج بهتری خواهند داشت. سیستم مختصات UTM، با توجه به نحوه تعریف این سیستم که در آن استوانه‌های پیرامون زمین در نظر گرفته شده و نقاط زمینی از یک نقطه بر روی این استوانه تصویر شده و سپس استوانه باز می گردد، ساختار شبیه تری به شرایط تصویربرداری ماهواره‌ها دارد. با در نظر گرفتن مدار دایروی برای ماهواره، تصویر می تواند به صورت سطح استوانه‌ای فرض شود. از طرف دیگر با توجه به صفحه تصویر UTM، مسیر حرکت ماهواره می تواند مسیری مستقیم و با سرعت ثابت در نظر گرفته شود که در این صورت شرایط مورد نیاز برای استفاده از مدل افاین به خوبی تامین می شود [7].

این نقاط به عنوان نقاط کنترل مجازی در نظر گرفته می شوند. با توجه به آنکه نقاط به کمک ضرائب رشنال به دست آمده اند، دقت برازش تبدیل افاین به آنها می تواند بیانگر دقت برازش آن به تبدیل رشنال باشد. برای به دست آوردن مختصات زمینی معادله تقاطع رشنال به

پارامترهای ریگورس همراه ضرائب رشنال مستقل از زمین در اختیار مصرف کنندگان قرار داده شوند.

از طرف دیگر به موازات تبدیل رشنال مستقل از زمین، استفاده از تبدیل خطی افاین سه بعدی در چندین دهه اخیر برای تصحیح هندسی تصاویر ماهواره ای مطرح شد و مورد استقبال و توجه شدید قرار گرفت. ایده استفاده از مدل افاین نخستین بار توسط Okamoto در اواخر قرن بیستم مطرح شد و به دنبال آن افرادی نظیر Fraser، Morgan و Zhang نیز قابلیت این مدل برای تصاویر ماهواره‌های مختلف را بررسی نمودند [۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱]. مدل افاین ارتباط فضای تصویر و زمین را تنها به کمک هشت پارامتر برقرار کرده و بنابراین با در اختیار داشتن چهار نقطه کنترل قابل حل است. انگیزه اصلی استفاده از تبدیل افاین برای تصاویر ماهواره ای با قدرت تفکیک بالا مانند Cartosat-1، آن است که در این تصاویر با توجه به زاویه کوچک دید و ارتفاع زیاد تصویربرداری (به عنوان مثال در سنجنده Cartosat-1 زاویه دید در حدود 2/5 درجه و ارتفاع تصویربرداری حدود 618 کیلومتر می باشد) و با فرض اینکه سنجنده در مدت زمان اخذ یک تصویر با سرعت و وضعیت ثابتی حرکت کرده است، سیستم تصویر از حالت مرکزی به موازی نزدیک شده و بنابراین تصاویر به حالت افاین نزدیک می گردند [7، 11]. بررسی های فراوان توسط افراد مختلف بر روی قابلیت مدل افاین انجام گرفته است و در بسیاری از آنها بیان شده که دقت مختصات زمینی به دست آمده به کمک تبدیل افاین مشابه مقدار به دست آمده به کمک ضرائب رشنال مستقل از زمین می باشد [9، 11].

در این مقاله ابتدا نتایج حاصل از اعمال مدل افاین بر تصاویر سنجنده Cartosat-1 در مقایسه با تابع رشنال مستقل از زمین را مورد بررسی قرار داده و سپس تاثیر توپوگرافی و کرویت زمین را بر دقت مدل افاین بررسی کرده و به بیان راهکارهایی برای حذف آنها و افزایش دقت می پردازیم.

روش حل مسئله

روش پیشنهادی در این تحقیق برپایه برازش تابع افاین به رشنال و بررسی دقت این برازش قرار گرفته است [3]. در شکل (1) می توان مراحل روش پیشنهادی در آنالیز تبدیل افاین را مشاهده نمود.

$$\begin{pmatrix} x' - A'_4 \\ y' - A'_8 \\ x'' - A''_4 \\ y'' - A''_8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A'_1 & A'_2 & A'_3 \\ A'_5 & A'_6 & A'_7 \\ A''_1 & A''_2 & A''_3 \\ A''_5 & A''_6 & A''_7 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E \\ N \\ h \end{pmatrix} \quad (3)$$

پس از محاسبه مختصات زمینی نقاط به کمک تابع رشنال و تبدیل افاین می توان دقت برازش تبدیل افاین به تابع رشنال را محاسبه کرد. برای این منظور کافیت اختلاف مختصات محاسبه شده از تبدیل افاین با مقدار متناظر بدست آمده از تابع رشنال محاسبه شود (رابطه 4).

$$\begin{pmatrix} dE \\ dN \\ dH \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E - E' \\ N - N' \\ H - H' \end{pmatrix} \quad (4)$$

در رابطه فوق E, \dots, H' بیانگر مختصات زمینی نقاط کنترل مجازی به دست آمده از تقاطع رشنال و افاین می باشند. بردار (dE, dN, dH) حاصل در حقیقت نشان دهنده انحراف تبدیل افاین از رشنال مستقل از زمین خواهد بود.

تبدیل سیستم تصویر مرکزی به موازی

همان طور که می دانیم، در تبدیل افاین فرض بر آن است که هندسه تصویربرداری موازی بوده و تصاویر به کمک پرتوهای موازی ایجاد شده اند. این در حالیست که در سیستم های ماهواره ای آرایه خطی هندسه تصویربرداری در جهت حرکت سنجنده موازی و در جهت عمود بر آن مرکزی بوده اما، همان طور که پیشتر نیز اشاره شد، به دلیل زاویه دید کوچک سنجنده و ارتفاع زیاد تصویربرداری پرتوهای تصویر کننده از حالت مرکزی به موازی نزدیک می شوند [8]. این ویژگی موجب می شود سیستم تصویر به حالت موازی نزدیک شود. اما با توجه به مرکزی بودن هندسه در راستای نمونه برداری، لازم است در این جهت برای نزدیک تر کردن تصاویر به افاین، تبدیل سیستم تصویر مرکزی به موازی مطابق رابطه معروف " تبدیل پرسپکتیو به موازی " اعمال گردد [10] (رابطه 5).

$$x_a^0 = \frac{I}{I - \frac{x \cdot \tan(\omega)}{f}} \cdot x \quad (5)$$

$$x_a = \left(1 - \frac{\Delta Z}{\cos(\omega)} \right) x_a^0$$

کمک مدل بیان شده توسط Grodecki، رابطه (1) حل می شود [5].

در رابطه (1)، K و J بیانگر معادلات اول و دوم در تابع رشنال، S و L مختصات تصویری در جهت نمونه برداری⁷ (در راستای هر آرایه تصویر) و خط⁸ (راستای حرکت سنجنده) بوده و اندیس های o و s به ترتیب بیان گر انتقال و مقیاس هستند. (X, Y, Z) مختصات زمینی نرمالایز شده و (φ, λ, h) مختصات نقطه در سیستم تصویر ژئودتیک می باشد که بردار مجهولات را تشکیل می دهد.

$$s = S_o + S_s \begin{pmatrix} \frac{\partial K}{\partial X} & \frac{\partial K}{\partial Y} & \frac{\partial K}{\partial Z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{\varphi_s} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\lambda_s} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{h_s} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d\varphi \\ d\lambda \\ dh \end{pmatrix}$$

$$l = l_o + l_s \begin{pmatrix} \frac{\partial J}{\partial X} & \frac{\partial J}{\partial Y} & \frac{\partial J}{\partial Z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{\varphi_s} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\lambda_s} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{h_s} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d\varphi \\ d\lambda \\ dh \end{pmatrix}$$

(1)

حل معادله افاین

گام دوم پس از ایجاد نقاط کنترل مجازی حل معادله افاین است که شامل دو مرحله ترفیع، یا محاسبه پارامترهای مدل به کمک نقاط کنترل و تقاطع، یا به دست آوردن مختصات زمینی نقاط گرهی می باشد.

ترفیع فضایی: پس از ایجاد نقاط کنترل مجازی، در اولین قدم، ترفیع فضایی معادلات افاین برای تعیین هشت پارامتر تابع افاین سه بعدی به کمک رابطه (2) انجام می شود:

$$\begin{aligned} x &= A_1 N + A_2 E + A_3 h + A_4 \\ y &= A_5 N + A_6 E + A_7 h + A_8 \end{aligned} \quad (2)$$

که در این رابطه (E, N, H) مختصات زمینی نقاط و (x, y) مختصات تصویری آنها بوده و A_i ها پارامترهای تابع افاین هستند.

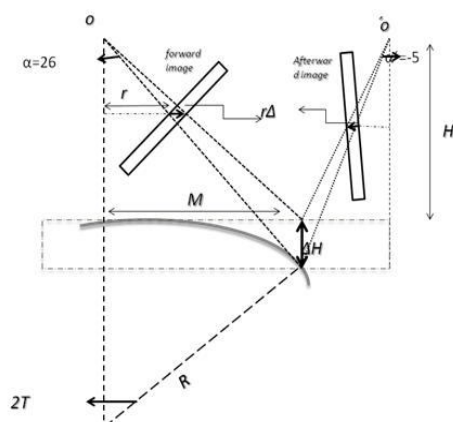
تقاطع فضایی: در این مرحله می توان برای تمامی نقاط متناظر تصویری، به کمک پارامترهای افاین به دست آمده برای تصاویر راست و چپ در مرحله ترفیع، و حل معادلات تقاطع، مختصات زمینی محاسبه نمود (رابطه 3).

تصویربرداری ارتباط فضای زمین و تصویر را برقرار می‌نماید، می‌توانند جابجایی کرویت را تصحیح نمایند اما استفاده از تبدیل افاین در تصحیح هندسی تصاویر قادر نخواهد بود این جابجایی را تصحیح کند چرا که تبدیل افاین برای فضای زمین به جای سطح کره صفحه‌ای موازی صفحه تصویر در نظر می‌گیرد. آشکار است که این خطا مولفه ارتفاعی نقاط را متاثر می‌کند.

در این تحقیق برای تصحیح جابجایی کرویت دو روند کلی پیشنهاد و بررسی شده‌است. در اولین حالت جابجایی ایجاد شده ناشی از کرویت زمین در فضای تصویر محاسبه و مختصات تصویری نقاط تصحیح می‌شود و در حالت دوم جابجایی ایجاد شده در مختصات ارتفاعی محاسبه و تصحیح می‌گردد.

تصحیح خطای کرویت در فضای تصویر: تصحیح خطای کرویت در فضای تصویر بر اساس رابطه (7) می‌باشد [12].

$$\Delta r = \frac{Hr^3}{2Rf^2} \quad (7)$$



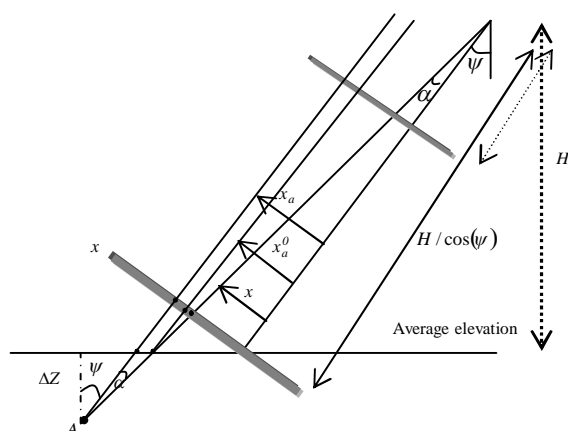
شکل 3: دیاگرام خطای کرویت.

در این رابطه H فاصله تصویربرداری، R شعاع زمین، f فاصله کانونی و r فاصله نقطه از مرکز تصویر است. در شکل (3) دیاگرام خطای کرویت نشان داده شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که این خطا دارای دو مولفه در جهت نمونه‌برداری و لاین هر نقطه است. البته قابل ذکر است که با توجه به وابستگی مقدار این خطا به زاویه میل سنجنده و کوچک بودن مقدار این زاویه در تصویر عقب نگر⁹ (5-درجه) در مقایسه با تصویر جلونگر¹⁰ (26 درجه) بدیهی است که مقدار خطای کرویت در تصویر

در رابطه اخیر، x مختصات تصویری در جهت عمود بر مسیر پرواز یا همان جهت نمونه‌برداری، x_a و x_a^0 مختصات تصویری در جهت نمونه‌برداری قبل و بعد از اعمال اثر توپوگرافی، α زاویه پرتو نوری عبوری از هر پیکسل و محور نوری سنجنده، ω زاویه رول سنجنده و ΔZ تغییر ارتفاعات در مقیاس تصویر می‌باشد (شکل (2)). با توجه به صفر بودن زاویه رول (دوران حول محور در امتداد تصویربرداری) در سنجنده های جلونگر، برای رابطه (5) خواهیم داشت [10]:

$$\Delta x = \Delta Z \tan(\alpha) \quad (6)$$

که در آن Δx تصحیح مختصات تصویری هر نقطه در جهت نمونه‌برداری برای تبدیل سیستم مرکزی به موازی می‌باشد. مشاهده می‌شود که در این حالت تصحیح وابسته اختلاف ارتفاعات بوده و تصحیح توپوگرافی نامیده می‌شود که اثر توپوگرافی زمین را بهبود می‌دهد [8].



شکل 2: تبدیل سیستم تصویر مرکزی به موازی.

اختلاف ارتفاع هر نقطه را می‌توان از حل افاین سه بعدی و یا مقادیر حاصل از تقاطع رشنال به دست آورد. با در نظر گرفتن این نکته که اختلاف ارتفاع استفاده شده در آن مقیاس تصویر می‌باشد، اثر تغییرات در حد چند متر در آن قابل چشم پوشی بوده و بنابراین استفاده از هر دو روش مجاز می‌باشد.

تصحیح کرویت

از دیگر مشکلات موجود در زمینه استفاده از تبدیل افاین برای تصحیح هندسی تصاویر، بحث کرویت زمین است. جابجایی کرویت ناشی از تصویر کردن صفحه تصویر به سطح کره زمین در زمان تصویربرداری ایجاد می‌شود. مدل های فیزیکی سه بعدی که با در نظر گرفتن هندسه

مقدار تصحیح کرویت در فضای زمین با توجه به دیاگرام شکل (3) از رابطه (8) قابل محاسبه می باشد.

$$\Delta H = R - R \cos(2T) \quad (8)$$

R در این رابطه شعاع زمین و T زاویه صفحه مماسی و صفحه تعریف شده به کمک تبدیل افاین است. برای به دست آوردن مقدار خطای ارتفاعات بر اساس رابطه (8) کافیست مقدار زاویه T محاسبه شود. زاویه T به کمک بردار M به دست می آید. برای محاسبه M بردار مسیر حرکت سنجنده بر روی زمین تعیین و سپس فاصله قائم هر یک از نقاط تا این بردار یا همان مقدار M محاسبه می شود. در نهایت مقدار به دست آمده برای تصحیح کرویت هر یک از نقاط در فضای زمین محاسبه و به مولفه ارتفاع آنها اعمال می گردد.

اعمال تصحیحات به کمک چند جمله ای ها

امکان حذف اثر توپوگرافی و کرویت زمین به کمک ترم های اضافه در کنار تبدیل افاین، موضوع دیگری که در این تحقیق بررسی شده است.

با در نظر گرفته رابطه (6) و با توجه به آنکه $\tan(\alpha) = \frac{x}{f}$ و در این رابطه x مولفه در جهت عمود بر مسیر حرکت یا همان جهت شرقی بوده، می توان انتظار داشت که افزودن ترم XZ به تبدیل افاین بتواند موجب کاهش اثر توپوگرافی زمین گردد.

از طرف دیگر با توجه به منحنی های به دست آمده در مدل سازی جابجایی کرویت (شکل 4) می توان انتظار داشت که افزودن ترم X^2 به تبدیل افاین بتواند این جابجایی را نیز مدل نماید.

بر اساس آنچه گفته شد، در این مرحله استفاده از تبدیل افاین 12 پارامتری مطابق رابطه (9) به جای افاین استاندارد هشت پارامتری و نقش ترم های اضافه در حذف اثر توپوگرافی و کرویت زمین مورد بررسی قرار داده شده است.

$$x = A_1N + A_2E + A_3h + A_4 + A_5N^2 + A_6Nh \quad (9)$$

$$y = A_7E + A_8N + A_9h + A_{10} + A_{11}N^2 + A_{12}Nh$$

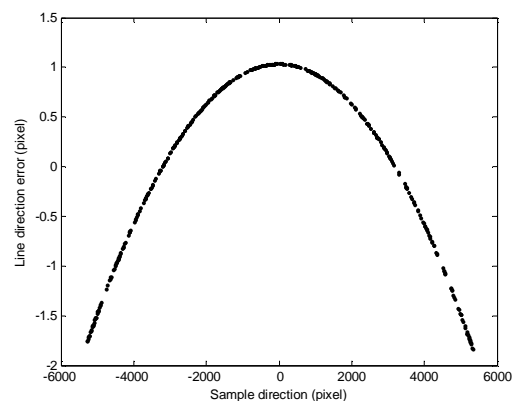
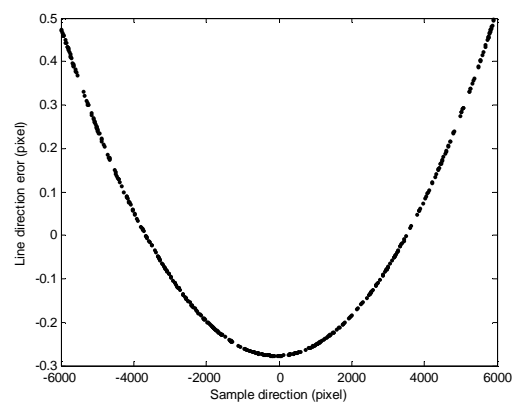
مجموعه داده

تصاویری که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته اند مربوط به سنجنده Cartosat-1 متعلق به کشور هندوستان هستند که دارای فرمت orthokit بوده و به

عقب نگر کوچک تر از تصویر جلونگر و در جهت معکوس می باشد.

در شکل (4) می توان مقدار تئوری خطای به دست آمده در راستای مولفه خط نقاط بر اساس رابطه (7) را به صورت تابعی از مولفه راستای نمونه برداری، برای نقاط مختلف تصویر عقب نگر و جلونگر مشاهده نمود. شکل سهمی گون حاصل نشان دهنده اثر کرویت زمین بر مقدار جابجایی ایجاد شده برای هر نقطه می باشد.

پس از محاسبه مقدار تصحیحات برای هر یک از نقاط و اعمال آن به مختصات تصویری اندازه گیری شده، می توان مجدداً تبدیل افاین را بر اساس مختصات تصویری جدید حل و مختصات زمینی تصحیح شده را محاسبه نمود.

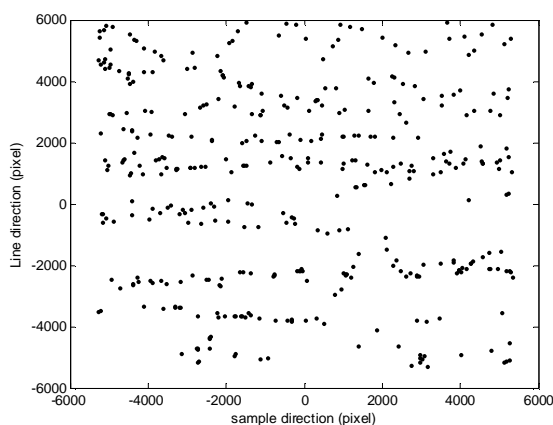


شکل 4: مقدار تصحیحات مولفه لاین به صورت تابعی از این مولفه برای تصویر عقب نگر (چپ) و جلونگر (راست).

تصحیح خطای کرویت در فضای زمین: روش

دیگری که در جهت بهبود خطای ارتفاعات نقاط و حذف اثر کرویت بررسی شده است، حذف این خطا مستقیماً در فضای زمین و اعمال تصحیح کرویت به ارتفاعات به دست آمده برای نقاط می باشد.

زمینی برای نقاط، مشاهده شد اگرچه الگوریتم به دقت مطلوبی همگرا می‌شود ولی مقدار باقی مانده‌ها در فضای تصویر و در راستای مؤلفه سمپل بزرگ بوده و به بیش از 30 پیکسل می‌رسد. این باقی مانده در حقیقت خطای بست بوده و می‌تواند ناشی از وجود ترند سیستماتیک در ضرائب رشنال مستقل از زمین باشد و به کمک اعمال پارامتر شیفت قابل تصحیح خواهد بود [۱۳، ۱۴].



شکل 6: پراکندگی نقاط اندازه گیری شده در تصویر جلونگر.

حل معادلات افاین

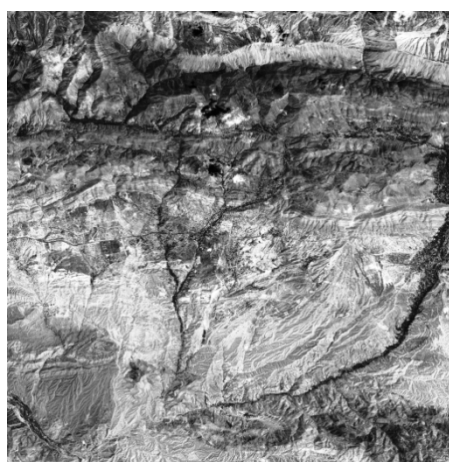
برای این منظور ابتدا به کمک نقاط کنترل، پارامترهای تبدیل افاین محاسبه شده و در گام بعدی به کمک پارامترهای به دست آمده مختصات زمینی نقاط تعیین می‌شوند. اختلاف مختصات به دست آمده از تبدیل افاین با مقدار محاسبه شده به کمک رشنال بر اساس رابطه (4)، دقت تبدیل افاین را نشان خواهد داد. در جدول (1) مقدار RMSE خطای به دست آمده برای نقاط به کمک تبدیل افاین در راستای سه مولفه شرقی، شمالی و ارتفاعی نشان داده شده است.

جدول 1: خطای مختصات زمینی نقاط به دست آمده از حل مدل افاین.

| Easting (m) | Northing (m) | Height (m) |
|-------------|--------------|------------|
| 4.66 | 1.76 | 4.47 |

مشاهده می‌شود که دقت به دست آمده بسیار بزرگتر از پیکسل سائز زمینی¹¹ بوده و چندان مطلوب نمی‌باشد.

همراه ضرائب رشنال در اختیار مصرف کنندگان قرار داده می‌شوند. این سنجنده دارای دو دوربین پانکروماتیک بوده، که از آرایه ای از 12000 پیکسل تشکیل شده‌اند، یکی با زاویه +26 درجه (به صورت جلونگر) و دیگری با زاویه -5 درجه (به صورت عقب نگر) و به صورت along track تصویربرداری می‌نماید. در این بررسی زوج تصویری مربوط به منطقه رودهن مورد استفاده قرار گرفته است که در 13 آگوست سال 2007 تصویربرداری شده و دارای اختلاف ارتفاعاتی در حدود 1300-3200 متر بوده در نتیجه منطقه ای نسبتاً کوهستانی است. در شکل (5) می‌توان تصویر جلونگر اخذ شده از این منطقه را مشاهده نمود.



شکل 5- تصویر جلونگر سنجنده Cartosat-1، رودهن، ایران.

پیاده سازی و ارزیابی نتایج

در این قسمت تک تک مراحل بیان شده در الگوریتم ارزیابی مدل افاین را اجرا و نتایج حاصل را بررسی می‌نماییم.

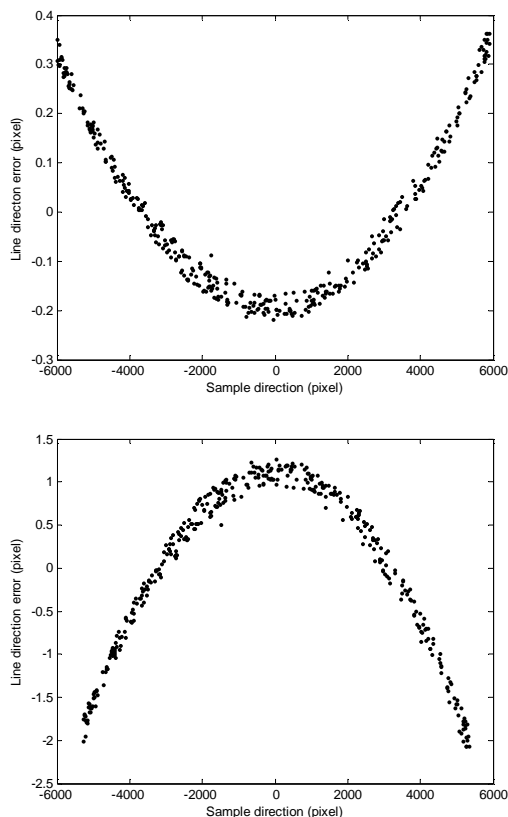
ایجاد ابر نقاط کنترل مجازی

برای این منظور ابتدا ابری از نقاط متناظر با پراکندگی مناسب در سراسر تصویر به صورت دستی اندازه گیری شده است. در شکل (6) می‌توان پراکندگی نقاط ایجاد شده در تصویر جلونگر را ملاحظه نمود.

نقاط تصویری اندازه گیری شده در معادلات تقاطع رشنال قرار گرفته و مختصات تصویری آنها محاسبه و از سیستم ژئودتیک به UTM منتقل می‌شوند و به این ترتیب نقاط کنترل مجازی در سیستم تصویر UTM ایجاد می‌گردند. پس حل تقاطع رشنال و محاسبه مختصات

مشاهده بهتر تاثیر اعمال این تبدیل بر روی نقاط، در شکل (7) نمودار گرافیکی مقادیر خطای مؤلفه شرقی قبل و بعد از اعمال تبدیل مرکزی به موازی نمایش داده شده است. مشاهده می شود که اعمال این تبدیل به مختصات دامنه خطای باقی مانده را کاهش و همچنین رفتار سیستماتیک خطا را بهبود داده است.

تصحیح کرویت: برای بررسی اثر کرویت زمین، دو روش پیشنهاد شده در فصل قبل را اجرا کرده و نتایج حاصل را بررسی می نمایم.



شکل 8: خطای کرویت ایجاد شده در مختصات لاین نقاط، بالا: تصویر عقب نگر، پایین: تصویر جلو نگر.

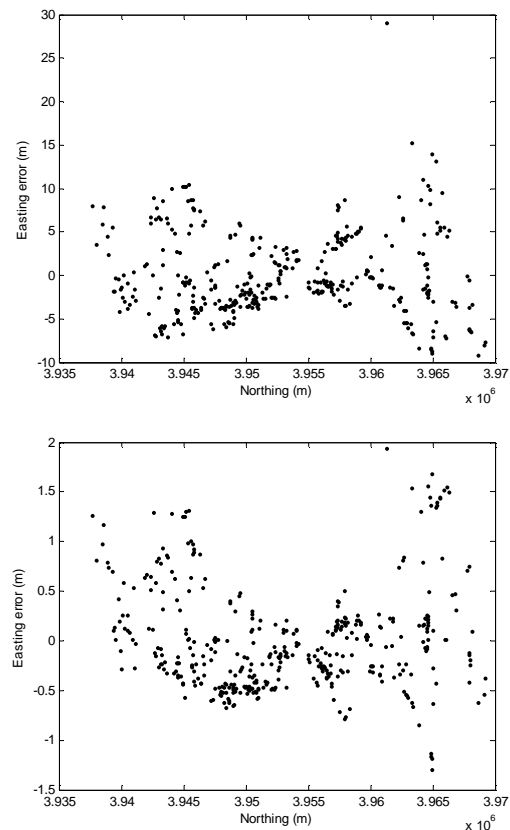
تصحیح خطای کرویت در فضای تصویر: برای مشاهده اثر خطای کرویت در فضای تصویر کافیسست معادلات معکوس تبدیل افاین (تبدیل از فضای زمین به تصویر) را به کمک مختصات مسطحاتی به دست آمده از تبدیل افاین و ارتفاعی محاسبه شده به کمک تابع رشنال حل کرده و برای نقاط مختصات تصویری به دست آوریم. اختلاف مختصات تصویری محاسبه شده از مقدار حقیقی آن بیانی از خطای کرویت در فضای تصویر است. در

تبدیل سیستم تصویر مرکزی به موازی

برای اعمال این تبدیل مقدار تصحیحات در راستای مولفه راستای نمونه برداری بر اساس رابطه (6) محاسبه و بر این اساس مختصات تصویری نقاط تصحیح و سپس ترفیع و تقاطع افاین به کمک مختصات تصویری جدید به دست آمده مجددا حل شده است. جدول (2) مقدار RMSE خطای باقی مانده را پس از اعمال تصحیح توپوگرافی نشان می دهد.

جدول 2: دقت زمینی به دست آمده از مدل افاین پس از اعمال تبدیل پرسپکتیو به پارالل.

| Easting (m) | Northing (m) | Height (m) |
|-------------|--------------|------------|
| 0.52 | 0.43 | 4.14 |



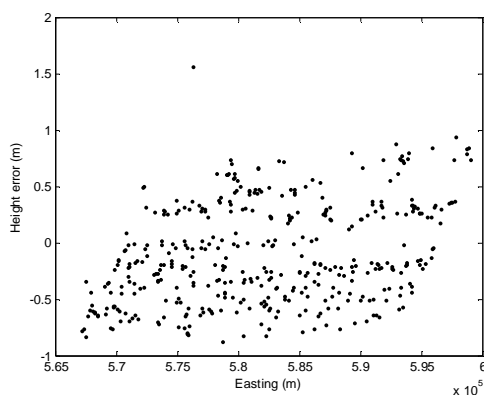
شکل 7: منحنی خطای مؤلفه شرقی در راستای شمالی قبل (بالا) و بعد (پایین) از اعمال تبدیل پرسپکتیو به پارالل.

مشاهده می شود که با اعمال این تبدیل دقت مولفه های مسطحاتی نقاط بهبود چشم گیری داشته و دامنه خطا و رفتار سیستماتیک آن کاهش یافته است. برای

بین رفته و دقت این مؤلفه به کمتر از نیم متر کاهش یافته است.

تصحیح خطای کرویت در فضای زمین: بر اساس رابطه توسعه داده شده برای تصحیح کرویت در فضای زمین (رابطه 8)، مقدار خطای کرویت برای تک تک نقاط محاسبه شده و سپس به مؤلفه ارتفاعاتی نقاط اعمال شده است. در نهایت مشاهده شد که مقدار خطای نهایی ارتفاعات از 4/5 متر به 0/4 متر کاهش یافته است. در شکل (10) منحنی خطای نهایی ارتفاعات نقاط پس از اعمال تصحیح کرویت در فضای زمین مشاهده می شود.

بر اساس نتایج به دست آمده در این مرحله می توان گفت که اعمال تصحیح کرویت به هر دو روش دقت ارتفاعی نقاط را به کمتر از پیکسل کاهش می دهد.



شکل 10: منحنی خطای ارتفاعی نقاط در راستای شرقی پس از اعمال تصحیح کرویت در فضای زمین.

تصحیح هم زمان کرویت و توپوگرافی

تا اینجا مشاهده شد که توپوگرافی بر مولفه مسطحاتی و جابجایی کرویت بر مولفه ارتفاعی نقاط تاثیر گذار است. بنابراین می توان انتظار داشت که با اعمال هم زمان هر دوی این تصحیحات بتوان در هر دو جهت مسطحاتی و ارتفاعی به دقت مطلوبی دست یافت.

در جدول (4) خطای نقاط پس از اعمال تصحیح توپوگرافی و کرویت، در هر سه راستای شمالی، شرقی و ارتفاعی نشان داده شده است.

بر اساس نتایج جدول (4)، مشاهده می شود با اعمال دو تصحیح توپوگرافی و کرویت، مدل افاین می تواند دقت مطلوب و در حد کمتر از یک پنجم پیکسل سائز زمینی را برای نقاط نتیجه دهد.

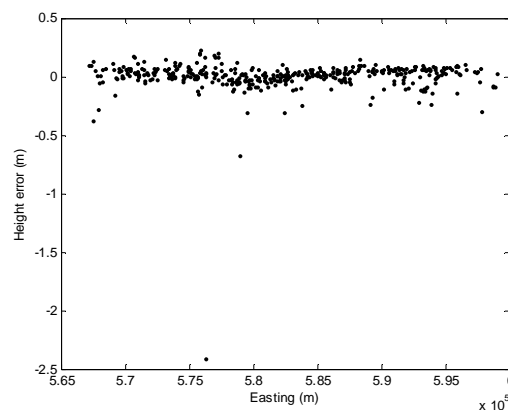
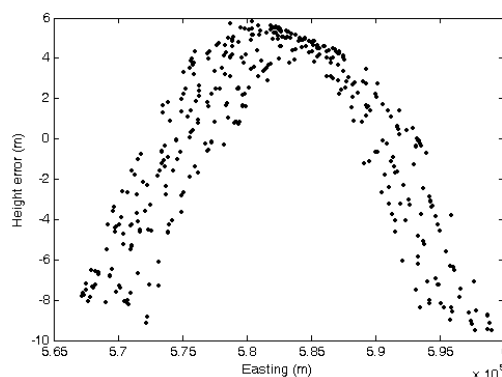
شکل (8) منحنی خطای به دست آمده در فضای تصویر با این روش نشان داده شده است.

می توان شباهت مقدار حقیقی خطای موجود در فضای تصویر ناشی از کرویت زمین و مقدار مدلسازی شده آن را به کمک دو شکل (4) و (8) مشاهده نمود.

جدول 3: خطای مختصات زمینی نقاط به دست آمده از مدل افاین پس از اعمال تصحیح کرویت در فضای تصویر.

| Easti ng (m) | Northi ng (m) | Hei ght (m) |
|--------------------|---------------------|-------------------|
| 4.67 | 1.71 | 0.14 |

با توجه به نتایج جدول (3)، مشاهده می شود که طبق آنچه پیش بینی می شد، اعمال تصحیح کرویت دقت ارتفاعی نقاط را تا حد مطلوبی بهبود داده است.



شکل 9: منحنی خطای ارتفاعی نقاط قبل (بالا) و بعد (پایین) از اعمال تصحیح کرویت در فضای تصویر.

در شکل (9) منحنی خطای ارتفاعاتی نقاط قبل و بعد از اعمال تصحیح کرویت در فضای تصویر نمایش داده شده است. مشاهده می گردد که ترند سیستماتیکی که در این منحنی قبل از اعمال تصحیح وجود داشت، کاملاً از

Cartosat-1 در منطقه‌ی نسبتاً کوهستانی رودهن در ایران با استفاده از مدل ریاضی افاین در مقایسه با تابع رشنال مورد بررسی قرار گرفت. از محاسن روش استفاده شده در این تحقیق می‌توان استفاده از ابر متراکم نقاط کنترل و همچنین منحنی‌های خطا به جای مقادیر RMSE یا کمینه و بیشینه مقدار خطا اشاره نمود که امکان بررسی رفتار خطا و مشاهده ترندهای سیستماتیک را فراهم می‌کند. نتایج به دست آمده نشان داد که با توجه به ساختار و هندسه تصویربرداری در سنجنده‌های ماهواره‌ای و میل پرتوهای تصویر به حالت موازی در آنها، مدل افاین می‌تواند بیان مناسبی برای این تصاویر باشد. همچنین مشخص شد که با اعمال تبدیل سیستم تصویر مرکزی به موازی و تصحیحات مربوط به کرویت این مدل می‌تواند دقتی در حد توابع رشنال، که تقریبی از مدل ریگورس می‌باشند، را نتیجه دهد. البته مشاهده شد که بدون اعمال این تصحیحات دقت به دست آمده چندان مطلوب نبوده و این ادعا که تبدیل افاین به تنهایی می‌تواند دقت تابع رشنال را داشته باشد صحیح نیست. در واقع می‌توان گفت که دقت افاین برای تصاویر ماهواره‌ای وابسته به زاویه دید سنجنده، ناهموازی منطقه و وسعت منطقه تحت پوشش تصویر (به دلیل جابجایی کرویت) خواهد بود. همچنین مشاهده شد که استفاده از ترم‌های اضافه در کنار تبدیل افاین نیز می‌تواند جابجایی ناشی از کرویت و توپوگرافی زمین را بهبود دهد ولی در قیاس با مدل‌سازی خطا این بهبود دقت کمتر بوده و همچنین محاسن تبدیل افاین نظیر حالت خطی و تعداد کم پارامترها را مخدوش می‌کند. در نهایت می‌توان گفت با توجه به مزایای مدل افاین از جمله سادگی و سرعت حل، نیاز به تعداد کم نقاط کنترل و عدم وابستگی به پارامترهای سنجنده، می‌توان آن را به عنوان یکی از بهترین‌های مدل‌های ژنریک در تصحیح هندسی تصاویر ماهواره‌ای دانست.

تقدیر و تشکر

این پروژه در ارتباط با طرح تحقیقاتی مصوب شورای پژوهشی دانشگاه تهران به شماره 8102032/1/02 با کمک مالی دانشگاه تهران صورت گرفته است. نگارندگان بدینوسیله مراتب قدردانی خود را از مساعدت مالی دانشگاه اعلام می‌نمایند.

جدول 4: خطای مختصات زمینی به دست آمده برای نقاط پس از اعمال تبدیل پرسپکتیو به پارالل و تصحیح کرویت.

| Easting (m) | Northing (m) | Height (m) |
|-------------|--------------|------------|
| 0.53 | 0.49 | 0.19 |

اعمال تصحیحات به کمک چندجمله‌ای‌ها جهت حذف اثر کرویت و توپوگرافی زمین به کمک ترم‌های اضافه در کنار تبدیل افاین رابطه (9) را ارائه دادیم. در جدول (5) نتایج حاصل از اعمال این تبدیل به نقاط کنترل مجازی نمایش داده شده است.

جدول 5: خطای مختصات زمینی به دست آمده برای نقاط پس از اعمال تبدیل افاین در کنار ترم‌های اضافه.

| Easting (m) | Northing (m) | Height (m) |
|-------------|--------------|------------|
| 0.8 | 0.33 | 0.9 |

مشاهده می‌گردد که دقت در راستای هر سه مولفه مختصاتی به کمتر از متر کاهش یافته است. البته در مقایسه نتایج به دست آمده در این قسمت با نتایج حاصل از مدل‌سازی خطا، می‌توان گفت که هر دو روش موجب بهبود دقت شده ولی در روش مدل‌سازی خطا دقت ارتفاعی به دست آمده بهتر می‌باشد.

برای مقایسه دقت نهایی به دست آمده برای نقاط، در جدول (6) نتیجه اعمال کلیه تصحیحات بر اساس روش‌های ارائه داده شده، نمایش داده شده است.

جدول 6: خطای مختصات زمینی به دست آمده برای نقاط قبل و پس از اعمال تصحیحات به کمک مدل‌سازی خطا و استفاده از ترم‌های اضافه.

| Model | Easting (m) | Northing (m) | Height (m) |
|--|-------------|--------------|------------|
| Simple Affine | 4.65 | 1.76 | 4.47 |
| After correction using mathematical models | 0.53 | 0.49 | 0.22 |
| After correction using mathematical models | 0.8 | 0.33 | 0.9 |

نتیجه گیری

در این تحقیق تصحیح هندسی تصاویر سنجنده

مراجع

- 1- Grodecki and Dial (2003). Block adjustment of high resolution satellite images described by rational polynomials. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 69, No. 1, PP. 59-68.
- 2- Tao, C.V. and Hu, Y. (2001). "A comprehensive Study of the Rational Function Model for Photogrammetric Processing." *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 67, No. 12, PP. 1347-1357.
- 3- Hanley, H. B. and Fraser, C. S. (2004). "Sensor Orientation for High-Resolution Satellite Imagery: Further Insights into Bias-Compensated RPCs." *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 35, No. B1, PP. 24-29
- 4- Dial, Gene and Jacek Grodecki (2002). "Block Adjustment with Rational Polynomial Camera Models." *Proceedings of ASPRS 2002 Conference*, Washington, DC, April 22-26, 2002.
- 5- Grodecki J., Dial. G. and Lutes, J. (2004). "Mathematical Models For 3D Feature Extraction From Multiple Satellite Images Described By RPCs." *ASPRS Annual Conference Proceeding*, May 2004.
- 6- Fraser, C.S. and Hanley H. B. (2003). "Bias compensation in Rational Functions for Ikonos satellite imagery." *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 69, No. 1, PP. 53-57.
- 7- Okamoto, A., Fraser, C., Hattori, S., Hasegawa, H. and Ono, T. (1998). "An alternative approach to the triangulation of SPOT imagery." *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 32 No. B4, PP. 457- 462.
- 8- Fraser, C. S. and. Yamakawa, T. (2004). "Insights into the affine model for satellite sensor orientation." *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. PP. 275-288.
- 9- Zhang, J. and Zhang, X. (2002.) "Strict geometric model based on affine transformation for remote sensing image with high resolution." *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 34, No. B, PP. 309- 312.
- 10- Morgan, M. (2004). *Epipolar Resampling of Linear Array Scanner Scenes*, PhD Dissertation, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Canada
- 11- Willneff, J., Weser, T., Rottensteiner, F. and Fraser, C. S. (2008). "Precies Georeferencing Of CARTOSAT Imagery Via Different Orientation Models." *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. 37, No. B1, PP. 1287-1294.
- 12- Moffitt, F. and Mikhail, E. (1980). *PHOTOGRAMMETRY*.
- 13- Dadrasjavan. F. (2008). *Affine projection model as a tool for rapid geo-coding of IRS-P5 stereo imgery*. MsC thesis, University Colledge of ENG, University of Tehran.
- 14- Dadrass, F. and Azizi, A. (2008). "The Affine Projection Model as a Tool for Rapid Geo-coding of IRS-P5 Satellite imagery." *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 37, No. B4, PP. 1317-1322.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- | | |
|----------------------------------|-----------------------------|
| 1 - Rigorous | 8 - Line coordinate (pixel) |
| 2 - Generic Function | 9 - Afterward looking |
| 3 - Rational Function | 10 - Forward Looking |
| 4 - Affine Transformation | 11 - Ground Resolution |
| 5 - Direct Linear Transformation | |
| 6 - Direct Geo Referencing | |
| 7 - Sample coordinate (pixel) | |