

حذف خطای راه راه شدگی تصاویر ابرطیفی در حوزه فرکانس با ترکیب تبدیل موجک و فوریه

یوسف رضایی

استادیار گروه عمران - دانشکده مهندسی - دانشگاه بوعلی سینا
yrezaei@basu.ac.ir

(تاریخ دریافت تیر ۱۳۹۳، تاریخ تصویب اسفند ۱۳۹۳)

چکیده

یکی از مباحث مهم در پردازش تصاویر ابرطیفی، حذف و کاهش خطاهای رادیومتریکی این تصاویر می‌باشد. خطای راه راه شدگی تصاویر، یکی از این خطاها می‌باشد که در اغلب تصاویر سنجش از دوری مشاهده می‌شود. جهت حذف این خطاها، روش‌های مختلف آماری و فیلترینگ وجود دارد. در اغلب این روش‌ها، همراه با حذف خطای راه راه شدگی، بخش از اطلاعات مفید تصویر نیز حذف می‌شود. در تحقیق حاضر، جهت حذف خطای راه راه شدگی، از تلفیق الگوریتم موجک و فوریه استفاده می‌شود. ابتدا از تصویر تبدیل موجک گرفته شده و سپس فیلترینگ فوریه بر روی مؤلفه عمودی تبدیل موجک اعمال می‌گردد. تفسیر بصری و ارزیابی کمی نتایج بدست آمده نشان داد که روش پیشنهادی، خطای خطوط راه راه موجود بر تصویر را حذف نموده و در عین حال اطلاعات اصلی تصویر را ثابت نگه می‌دارد و علاوه بر آن برخلاف الگوریتم‌های آماری، به اطلاعات آماری پیکسل‌های همسایه نیاز ندارد.

واژگان کلیدی: تصویر ابرطیفی، خطای راه راه شدگی، تبدیل موجک، تبدیل فوریه

۱- مقدمه

تصاویر سنجش از دور اغلب دارای نویز راه راه^۱ و یا خطای پیکسل های ثبت نشده^۲ می باشند. این مشکلات باعث کاهش کیفیت تصویر و در نتیجه باعث ایجاد خطا در نتایج استخراج شده از داده های سنجش از دوری می گردد. بنابراین قبل از پردازش تصاویر ماهواره ای بایستی یک مرحله جهت تصحیح این خطاها صورت پذیرد. تصحیح خطای راه راه شدگی تصویر معمولاً به نام destriping شناخته می شود. روش های حذف خطای راه راه شدگی، به صورت کلی شامل الگوریتمهای حوزه مکان و الگوریتمهای حوزه فرکانس می باشند. ساده ترین الگوریتم مورد استفاده در حوزه فرکانس شامل فیلتر پایین گذر ساده با استفاده از تبدیل فوریه گسسته^۳ می باشد. این روش دارای این مزیت است که بصورت ساده بر روی تصویر قابل اعمال می باشد ولی عیب آن این است که اغلب همه خطوط راه راه را حذف ننموده و همچنین باعث مات شدن تصویر و عدم وضوح آن می شود [۱]. در سال ۲۰۰۳ آقای Chen و همکاران از تبدیل فوریه و طیف توانی آن استفاده نموده و با بکارگیری فیلتر پاسخ ضربه محدود توان^۴ یک روشی جهت حذف و کاهش خطای راه راه شدگی معرفی نمودند [۲]. برخی محققان نیز با استفاده از تبدیل موجک^۵، با توجه به ویژگی های جهت و مقیاس در الگوریتم موجک، خطای راه راه شدگی را در تصاویر کشف و حذف نمودند [۳، ۴].

در حوزه مکان، اغلب الگوریتمهای حذف خطای راه راه شدگی، تابع توزیع آماری اعداد موجود در تصویر را محاسبه نموده و با توجه به یک تابع توزیع مرجع، مقادیر تصویر را بهینه می نماید و در این بهینه سازی پیکسل های دارای خطا، تصحیح می شوند [۵]. این روشها شامل، یکنواخت سازی^۶، [۶]، تطبیق هیستوگرام^۷، [۷، ۸]، تطبیق ممان^۸، [۵] و ترکیب تطبیق هیستوگرام با فیلتر

شکل ۹، [۹] می باشد. از دیگر روشها می توان به میانگین متحرک [۱۰، ۱۱]، روش های درونپایی [۱۲] و تصحیحات زمینه^{۱۰} [۱۳] اشاره نمود.

تصاویر ابرطیفی با توجه ویژگیهای خاص این داده ها، دارای تفاوت های زیادی با داده های چندطیفی مانند Landsat و SPOT می باشند. در این نوع داده ها، نویز بوجود آمده با توجه به غیرخطی بودن سنجنده، غیرگوسی بوده و این داده ها دارای همبستگی بالای مکانی و طیفی می باشند [۱۴]. با توجه به اینکه اغلب روشهای تجزیه تحلیل نویز از فرض نویز گوسی سفید^{۱۱} استفاده می نماید، ممکن است این فرض در این داده ها صادق نباشد [۱۴]. پارامترهای نویز، به خصوص واریانس، ضرایب همبستگی و ضریب شکل گوسی و تابع توزیع آن با استفاده از روش های آماری از داده ها، با مشخص نمودن تابع توزیع داده ها، قابل استخراج می باشد. روش های آماری بر این فرض استوار هستند که همه خطوط تصویر دارای مشخصات آماری یکسان می باشند [۱۵]. یک مقایسه از روشهای مختلف حذف خطوط راه راه بر روی تصاویر ابرطیفی Hyperion انجام گردیده نشان داده که روش های بکار گرفته شده در حوزه فرکانس، شامل تبدیل موجک و فوریه، دارای قابلیت بهتری جهت حذف این خطاها را دارا می باشند [۱۶].

کاهش خطای خطوط راه راه افقی یا عمودی بر روی تصاویر یکی از مهمترین مراحل پیش پردازش و پردازش داده های ابرطیفی می باشد. در حذف خطاهای راه راه شدگی بایستی الگوریتم حذف بتواند خطاهای خطوط راه راه افقی و عمودی را حذف نماید و در عین حال عوارض افقی و عمودی تصویر را بدون تغییر در کیفیت آنها، ثابت نگه دارد. به عبارت دیگر، مسئله و مشکل اصلی در اغلب الگوریتمهای فیلتر نویز، این است که خطای نویز که بایستی حذف شود، بصورت کامل حذف نشده و در عوض اطلاعاتی از تصویر حذف می شود.

در این تحقیق به منظور حذف نویز راه راه شدگی، از ترکیب الگوریتم موجک و فوریه استفاده شده است. روش پیشنهادی در این تحقیق، خطای راه راه شدگی عمودی بر

^۱ Stripe noises

^۲ dead pixels

^۳ DWT

^۴ Power finite-impulse response filter

^۵ Wavelet

^۶ equalization

^۷ histogram matching

^۸ moment matching

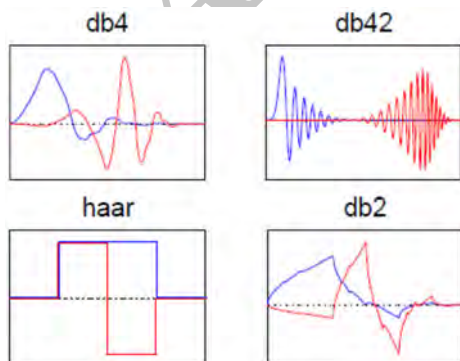
^۹ combined histogram matching with facet filter

^{۱۰} flat field correction

^{۱۱} Additive White Gaussian Noise

و کسینوسی در فرکانس‌های گسسته می‌باشد و با استفاده از تابع نمایی آن را می‌توان بصورت $\Gamma_n(t) = e^{-i\omega_n t}$ نشان داد. در حوزه فوری، همه اطلاعات ساختاری سیگنال به وسیله ضرایب نشان داده می‌شود و هر نوع اطلاعات مکانی بصورت کامل در تمام محدوده فرکانس‌ها توزیع شده است. در مقابل در تبدیل موجک، $\Gamma_n(t)$ شامل دسته باریکی از موجک‌ها در ابعاد و فرکانس‌های مختلف بوده و هر دو اطلاعات مکانی و فرکانسی را حفظ می‌نماید. در تبدیل موجک گسسته، انواع مختلفی از موجک‌ها موجود بوده و اجازه بازسازی کامل سیگنال را می‌دهد. به عنوان نمونه در شکل‌های زیر چند نمونه از موجک‌ها دوبیچی^{۱۳} نشان داده شده است.

در حالت یک بعدی، سیگنال $f(t)$ بعدی $f(t)$ به دو بخش فرکانس بالا و فرکانس پایین تفکیک می‌شود و این جدایی کاملاً برگشت پذیر می‌باشد. قسمت دارای فرکانس پایین، بصورت تکراری می‌تواند دوباره بهمان صورت تجزیه شود در حالی که بخش فرکانس بالا بدون تغییر نگه داشته شود. بعد از مرحله تجزیه، ابعاد $N(l)$ حاصل از قسمتهای فرکانس بالا و پایین، به منظور حفظ تعداد ثابت کل ضرایب، دو بخش شده است. مرحله بعدی تجزیه، بر روی نصف تعداد ضرایب، با همان ابعاد فیلتر قبلی، اعمال می‌شود. در تبدیل موجک چند مقیاسی در بالاترین مرتبه تبدیل L ، تابع $f(t)$ به بخش‌هایی با فرکانس پایین، که با یک تابع مقیاس $\phi_L(t)$ همراه با ضرایب آن، و چند بخش فرکانس بالا تجزیه می‌شود که به وسیله مجموعه‌ای از توابع موجک $\psi_l(t)$ و ضرایب آن در مقیاس‌های مختلف بصورت رابطه (۲) نمایش داده می‌شود [۱۷].



شکل ۱- توابع مقیاس گذاری (خطوط آبی) و موجک (خطوط قرمز) برای ۴ نوع مختلف موجک‌ها [۱۷]

روی تصاویر را حذف نموده ولی اطلاعات اصلی تصویر را بدون تغییر نگه می‌دارد. نتایج این الگوریتم نشان داد که این روش دارای این مزیت است که خطای راه راه شدگی موجود بر روی تصویر را بدون تغییر عوارض و کاهش کیفیت تصویر، تشخیص داده و آنها را حذف می‌نماید. در ادامه ابتدا مقدمه‌ای در خصوص تبدیل موجک و فوریه بیان شده و سپس الگوریتم پیشنهادی معرفی شده و پس از آن داده‌های مورد استفاده معرفی و نتایج اعمال الگوریتم بر روی آنها نشان داده می‌شود. در انتها نتیجه‌گیری از این تحقیق بیان خواهد گردید.

۲- مروری بر مفاهیم تبدیل موجک و فوریه

تبدیل‌های ریاضی فوریه و موجک، اطلاعات را در حوزه بسامد (فرکانس) نمایش داده و ویژگی‌های نهفته در اطلاعات را بصورت شفاف‌تری نمایش می‌دهند. با استفاده از تبدیل فوریه می‌توان یک تابع را بصورت یک مجموع نامتناهی از توابع پایه سینوسی و کسینوسی بیان نمود. در مقایسه با تبدیل فوریه، تبدیل موجک دارای خصوصیت محلی‌سازی بسیار خوبی است. بطور مثال تبدیل فوریه یک تابع دارای تعداد زیادی ضرایب سینوسی و کسینوسی هستند که دامنه آنها در کل بازه ثابت است، در حالی که توابع موجک توابعی هستند که بیشتر انرژی آنها در بازه کوچکی متمرکز شده است و به سرعت میرا می‌شوند. در هر دو تبدیل فوریه و موجک، یک سیگنال گسسته $f(t)$ می‌تواند به استفاده از یک مجموعه از توابع پایه $\Gamma_n(t)$ ، که بصورت ارتوگونال می‌باشند و در آن $n \in \{0, \dots, N\}$ بصورت رابطه (۱) تقریب زده شود [۱۷]:

$$f(t) \approx \sum_n a_n \Gamma_n(t) \quad (1)$$

در معادله فوق، $f(t)$ با استفاده از ضرایب a_n نمایش داده شده است.

از آنجایی تبدیل فوریه و موجک قابل جدا شدن هستند، بنابراین می‌توان بصورت پی در پی آنها را بر روی سیگنال‌های دوبعدی و یا با ابعاد بالاتر اعمال نمود. در حالت تبدیل فوریه گسسته^{۱۳}، $\Gamma_n(t)$ شامل توابع سینوسی

^۲ Daubechies

^۱ DFT

در حالت دوبعدی (که تصاویر نیز را شامل می‌شود)، سیگنال $f(x,y)$ به ۴ باند ضرایب cl, ch, cv, cd تجزیه می‌شود. که cl باند نتیجه فیلتر پایین گذر و ch, cv, cd به ترتیب، شامل باندهای جزئیات افقی، عمودی و قطری می‌باشند. تعداد ضرایب در هر باند برابر $1/4$ تعداد آن در باند اصلی می‌باشد، بنابراین تجزیه چندمقیاسی موجک دو بعدی در سطح L را می‌توان بصورت رابطه (۴) نشان داد [۱۷]:

$$\begin{aligned} f(x,y) &= \sum_m \sum_n c_{l,m,n} \phi_{l,m,n}(x,y) \\ &+ \sum_{l=1}^L \sum_m \sum_n c_{h,l,m,n} \psi_{h,l,m,n}(x,y) \\ &+ \sum_{l=1}^L \sum_m \sum_n c_{v,l,m,n} \psi_{v,l,m,n}(x,y) \\ &+ \sum_{l=1}^L \sum_m \sum_n c_{d,l,m,n} \psi_{d,l,m,n}(x,y) \end{aligned} \quad (4)$$

در معادله فوق، $\phi_{l,m,n}(x,y)$ تابع مقیاس و $\psi_{d,l,m,n}(x,y)$ و $\psi_{v,l,m,n}(x,y)$ و $\psi_{h,l,m,n}(x,y)$ توابع موجک دو بعدی هستند. بنابراین نتیجه اعمال تبدیل موجک به یک تصویر، شامل ۴ تصویر می‌باشد که یکی شامل فرکانس‌های پایین تصویر^{۱۶} و ۳ تصویر شامل جزئیات^{۱۷} افقی، عمودی و مورب تصویر می‌باشد.

۳- بیان مسئله خطای راه راه شدگی

سیستم‌های تصویربرداری ابرطیفی بر اساس نحوه تصویربرداری آنها بصورت کلی به دو نوع whiskbroom و pushbroom تقسیم بندی می‌شوند. در هر دو نوع این سیستم‌ها با توجه به تکنولوژی ساخت آنها و نحوه پویا زمین، در زمان تصویربرداری با مشکلاتی مواجه می‌شوند. در سنجنده‌های pushbroom، یکی از مشکلات مهم، راه شدگی تصاویر آنها می‌باشد. در این نوع تصاویر با توجه به نحوه تصویربرداری خطی آنها که عمود بر راستای پرواز است، در صورت بوجود آمدن مشکل در یکی از آشکارسازها، خطوط عمودی بر روی تصویر بوجود می‌آید. بنابراین خطوط راه راه عمودی منحصراً در مؤلفه عمودی

در حالت یک بعدی، سیگنال $f(t)$ به دو بخش فرکانس بالا و فرکانس پایین تفکیک می‌شود و این جدایی کاملاً برگشت پذیر می‌باشد. قسمت دارای فرکانس پایین، بصورت تکراری می‌تواند دوباره بهمان صورت تجزیه شود در حالی که بخش فرکانس بالا بدون تغییر نگه داشته شود. بعد از مرحله تجزیه، ابعاد $N(l)$ حاصل از قسمت‌های فرکانس بالا و پایین، به منظور حفظ تعداد ثابت کل ضرایب، دو بخش شده است. مرحله بعدی تجزیه، بر روی نصف تعداد ضرایب، با همان ابعاد فیلتر قبلی، اعمال می‌شود. در تبدیل موجک چند مقیاسی در بالاترین مرتبه تبدیل L ، تابع $f(t)$ به بخش‌هایی با فرکانس پایین، که با یک تابع مقیاس $\phi_L(t)$ همراه با ضرایب آن، و چند بخش فرکانس بالا تجزیه می‌شود که به وسیله مجموعه‌ای از توابع موجک $\psi_l(t)$ و ضرایب آن در مقیاس‌های مختلف بصورت رابطه (۲) نمایش داده می‌شود [۱۷].

$$f(t) = \sum_n C_{L,n} \cdot \phi_{L,n}(t) + \sum_{l=1}^L \sum_n d_{l,n} \psi_{l,n}(t) \quad (2)$$

برای یک مجموعه شامل یک تابع مقیاس $\phi_{L,n}(t)$ و چند تابع موجک $\psi_{l,n}(t)$ ، تابع $f(t)$ به وسیله ضرایب فرکانس پایین $C_{L,n}$ در مقیاس L و ضرایب فرکانس بالای $d_{l,n}$ در مقیاس‌های $l = 1, \dots, L$ نشان داده خواهد شد. هر یک از توابع موجک می‌توانند از یک تابع موجک مادر $\psi_{l,n}$ بصورت رابطه (۳) تولید شوند:

$$\psi_{l,n}(t) = 2^{-\frac{l}{2}} \psi_0 \left(\frac{t - 2^l \cdot n}{2^l} \right) \quad (3)$$

در حالتی که سیگنال بصورت دو بعدی می‌باشد، می‌توان سیگنال را بصورت پی در پی، به مؤلفه‌های فرکانس‌های پایین و جزئیات^{۱۴} با استفاده از فیلترهای پایین گذر و بالا گذر، تفکیک نمود [۱۸]. در این حالت، حاصل باند پایین گذر بصورت ضرایب تقریب^{۱۵} بیان می‌شود که در مرحله بعدی می‌توان دوباره آن را به همین صورت تجزیه و فیلتر نمود. مجموعه فیلترهای بالا و پایین گذر در مقیاس‌های مختلف را بانک فیلتر می‌نامند.

^۳ Approximation

^۴ Details

^۱ Details

^۲ Approximation

عنوان مثال حذف ضرایب $F(u, v)$ در محور u می‌تواند با ضرب نمودن ضرایب تبدیل فوریه با یک تابع گوسی $g(u, v)$ بصورت رابطه (۵)، انجام شود:

$$g(u, v) = 1 - e^{-\frac{v^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

مقدار σ مشخص کننده عرض فیلتر در جهت v می‌باشد و با توجه به عرض خطوط راه راه عمودی در تصویر حوزه مکان مشخص می‌گردد.

۳-۲- ترکیب فیلترینگ موجک و فوریه

با توجه به تحقیقات محققین مختلف [۳، ۴، ۱۶] و [۲۱]، روش موجک و فوریه هر کدام به تنهایی توانایی حذف خطای خطوط راه‌راه را دارند. اما ترکیب این روش‌ها، باعث استفاده از قابلیت هر دو روش می‌گردد. با ترکیب تبدیل فوریه با تبدیل موجک، می‌توان از سطح پایینتری از ترکیب موجک استفاده نمود و علاوه بر افزایش کارایی الگوریتم، باعث کاهش اثر نرم‌کنندگی تبدیل موجک و در نتیجه کاهش حذف اطلاعات ضروری تصویر گردید.

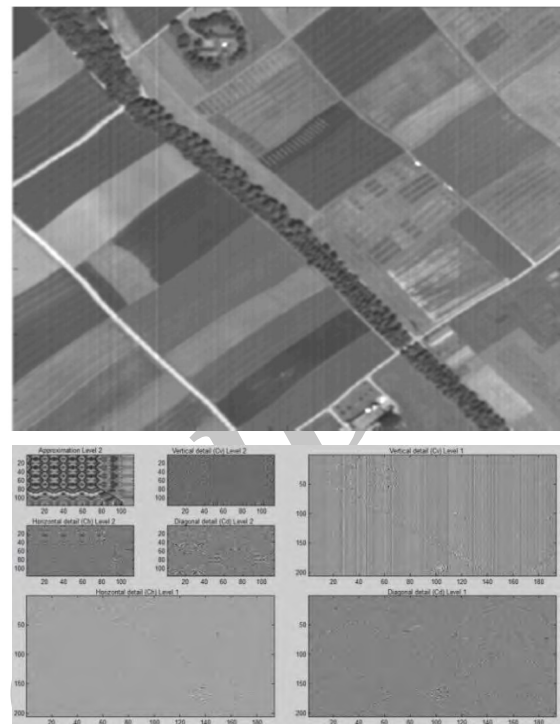
روش فیلتر نمودن پیشنهادی در این تحقیق، ترکیبی از تبدیل موجک و تبدیل فوریه سریع^۱ می‌باشد. در مرحله مرحله اول، از تصویر اصلی $f(x, y)$ تبدیل موجک گرفته شده و آن را به اجزای افقی، عمودی و قطری در مقیاس-مختلف های

$$W = \{C_{l, l, m, n}, C_{h, l, m, n}, C_{v, l, m, n}, C_{d, l, m, n}\}, l \in \{1, 2, 3, \dots, L\}$$

تجزیه می‌نماید.

سپس از بانندی که شامل اطلاعات خطوط راه راه می‌باشد (مؤلفه $C_{v, l, m, n}$)، تبدیل فوریه گرفته شده و فرکانس‌های مربوط به خطوط راه راه حذف می‌شود. در این حالت این خطاها شامل فرکانس‌های بالا و در جهت u می‌باشند. جهت کاهش و حذف این خطاها، نتیجه تبدیل فوریه مؤلفه عمودی تبدیل موجک را در تابع گوسی $g(u, v)$ تعریف شده در معادله (۵) ضرب می‌گردد. این تابع یک تابع کاهش‌ی بوده و ضرایب تبدیل فوریه را کاهش می‌دهد. با اعمال این تابع در نتیجه تبدیل فوریه مؤلفه عمودی تبدیل موجک، خطوط راه راه عمودی تصویر حذف می‌شوند. پس از فیلتر نمودن خطوط راه راه، از

جزئیات تبدیل موجک حضور خواهد داشت. در شکل ۲ یک تصویر دارای خطای راه راه شدگی و نتیجه تبدیل موجک آن تا سطح ۲ را نشان داده شده است.



شکل ۲- بالا، تصویر اصلی دارای خطای راه راه شدگی، پایین نتیجه تبدیل موجک این تصویر تا سطح ۲

همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، خطوط راه راه در مؤلفه عمودی جزئیات تصویر، قابل تشخیص می‌باشد.

۳-۱- تبدیل فوریه

تبدیل فوریه تابع $f(x, y)$ در حوزه فرکانس بصورت $F(u, v)$ نشان داده می‌شود و خطوط راه راه عمودی در این حوزه شامل قسمت‌های فرکانس بالا در جهت u می‌باشد در حالی که در جهت عمودی v بعد از تبدیل فوریه دو بعدی، خطوط راه راه بصورت تابع ضربه دیراک $\delta(v)$ بیان خواهد گردید. به عبارت دیگر، هیچ مؤلفه فرکانس ناشی از خطوط عمودی در $v \neq 0$ وجود ندارد. در نتیجه با حذف ضرایب تبدیل فوریه $F(u, v)$ در تمام u ها و $v=0$ ، خطوط راه راه عمودی تصویر حذف خواهد شد [۱۹، ۲۰].

جهت انجام این کار، ساده‌ترین روش، استفاده از فیلتر بانگذر در فضای فوریه در محدوده $v \approx 0$ می‌باشد. به

^۱FFT

خطای جذر میانگین مربعی (RMSE)، استفاده گردیده است. خطای نسبی و خطای جذر میانگین مربعی، از روابط ۶ و ۷ بصورت زیر محاسبه گردیده است:

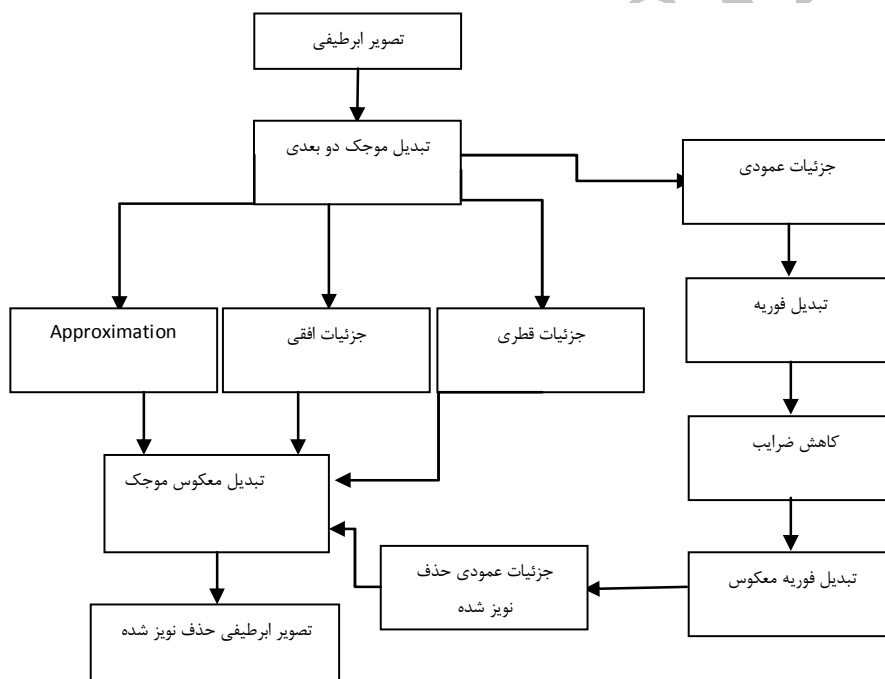
$$ER_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (dim_{ij} - im_{ij})^2}{\sum_{j=1}^N im_{ij}^2}} \quad (6)$$

$$RMSE_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (dim_{ij} - im_{ij})^2}{N}} \quad (7)$$

در رابطه فوق، ER_i بیانگر خطای نسبی در باند i ، $RMSE_i$ مقدار RMSE در باند i ، dim_{ij} مقادیر تصویر تصحیح شده در باند i و پیکسل j ، im_{ij} مقادیر تصویر اصلی در باند i و پیکسل j و N تعداد پیکسلها می باشد.

نتیجه حاصل ضرب، تبدیل فوریه معکوس گرفته و پس از آن تبدیل موجک معکوس گرفته می شود تا تصویر بدون خطا بازسازی شود. در نمودار شماره ۱، الگوریتم پیشنهادی مشاهده می شود.

با توجه به اینکه، الگوریتم های حذف خطوط راه راه، مقداری از اطلاعات تصویر را حذف می نمایند، الگوریتم مناسب و بهینه تصحیح خطوط راه راه، در عین حالیکه به خوبی خطوط راه راه بر روی تصویر را حذف می نماید، بایستی کمترین تغییر را بروی مقادیر پیکسلها ایجاد نماید. به عبارت دیگر مقادیر DN های تصویر قبل و بعد از اعمال الگوریتم نبایستی تغییر زیادی داشته باشند. جهت مقایسه و ارزیابی کمی مقادیر پیکسلها در تصویر اولیه و تصویر اصلاح شده از دو پارامتر خطای نسبی (ER) و



نمودار ۱- مراحل مختلف الگوریتم پیشنهادی

روی تصاویر ماهواره ای، الگوریتم پیشنهادی بر روی تصویر ماهواره لندست و سنجنده ابرطیفی هواپرد Apex، اعمال و نتایج مورد بررسی قرار گرفت.

تصویر ماهواره لندست مورد استفاده در این تحقیق، از داده های سنجنده ETM+ می باشد (۲۲) و داده های ابرطیفی، تصاویر سنجنده ابرطیفی هواپرد Apex است. سنجنده Apex یک سنجنده ابرطیفی است که توسط سازمان فضایی اروپا ساخته شده است. محدوده طیفی این سنجنده بین ۳۸۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر بوده و توانایی

۴- اعمال الگوریتم و نتایج

۴-۱- داده های مورد استفاده

جهت ارزیابی الگوریتم پیشنهادی در این تحقیق، از چند نوع تصویر مختلف استفاده گردیده است. ابتدا یک تصویر مربوط به تصاویر کره ماه که دارای خطای راه راه شدگی می باشد، از سایت USGS دانلود شده و الگوریتم بر روی آن اعمال گردید. جهت ارزیابی عملکرد الگوریتم بر

این تصویر، بصورت نامنظم بوده و در بعضی حالات چندین خط مجاور دارای این خطا می‌باشند.

۴-۲- اعمال الگوریتم پیشنهادی و نتایج

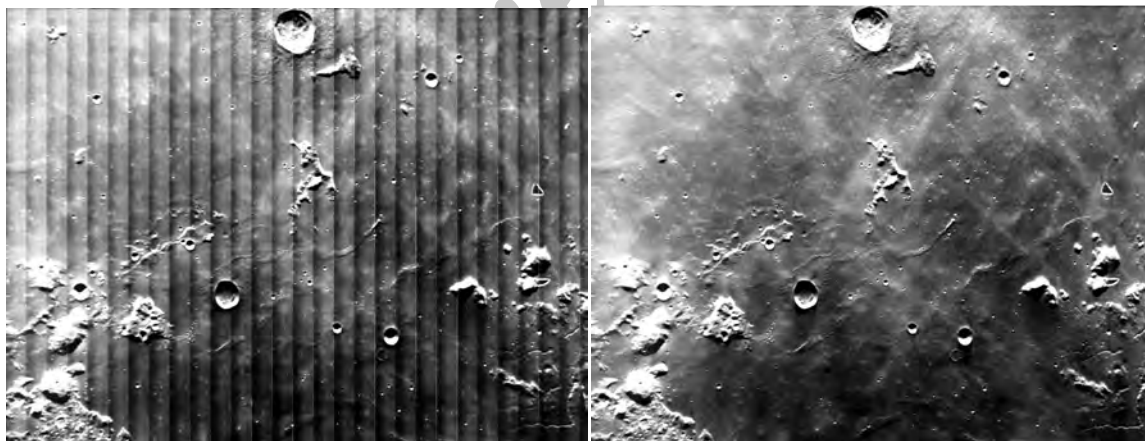
در شکل ۳ الف، تصویر مربوط به کره ماه و دارای خطای راه‌راه شدگی می‌باشد مشاهده می‌شود. خطوط راه-راه در تصویر اولیه بصورت افقی می‌باشد و به دلیل اینکه این الگوریتم به منظور حذف خطاهای راه‌راه عمودی توسعه داده شده است، تصویر اولیه چرخانده شده و خطوط راه راه بصورت عمودی مشاهده می‌شوند. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، با توجه به اینکه، این تصویر دارای خطای خطوط راه‌راه زیادی می‌باشد و این خطوط به وضوح بر روی تصویر قابل مشاهده است، تصویر مناسبی جهت آزمایش الگوریتم پیشنهادی می‌باشد. در شکل ۳ ب، همین تصویر پس از اعمال الگوریتم نشان داده شده است که با مقایسه دو تصویر به خوبی مشخص است که این الگوریتم به خوبی توانایی حذف خطای خطوط راه‌راه را از تصویر دارا می‌باشد.

تصویربرداری ۳۱۳ باند طیفی را دارد و در حالت تصویر برداری کامل طیفی (full spectral mode) تا ۵۳۴ باند طیفی را برداشت می‌نماید. مشخصات فنی این سنجنده در جدول شماره ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات سنجنده ابرطیفی Apex

Spectral Range	VNIR	380 – 970 nm
	SWIR	940 – 2500 nm
Spectral Bands	VNIR	Default 114 bands, unbinned bands: 334
	SWIR	199 bands
Spectral Resolution (FWHM)	VNIR	0.6 – 6.3 nm over spectral range (unbinned)
	SWIR	6.2 – 11 nm over spectral range
Pixel size	VNIR	22.5 μm x 22.5 μm
	SWIR	30 μm x 30 μm
FOV (across track)	28°	
تعداد پیکسل‌ها در هر خط	۱۰۰۰	

داده مورد استفاده، تصویر منطقه‌ای از سوئیس می‌باشد. مقادیر تصویر رادیانس می‌باشد و تصویر این سنجنده با توجه به مکانیزم تصویربرداری آن، دارای خطای خطوط راه راه بصورت غیر منظم می‌باشند. با بررسی تصویر مشخص گردید که خطوط راه راه موجود در



شکل ۳- (الف) تصویر سطح ماه دارای خطای راه راه شدگی - (ب) تصویر سطح ماه پس از اعمال الگوریتم

گوسی مورد استفاده، با توجه به اینکه مقدار σ مشخص کننده عرض فیلتر در جهت عمودی می‌باشد، بستگی به عرض خطوط راه راه عمودی در تصویر دارد. این پارامتر کنترل کننده شکل تابع گوسی مورد استفاده جهت حذف ضرائب فوریه و مشخص کننده عرض فیلتر می‌باشد. مقادیر بیشتر σ ، باعث حذف اطلاعات اصلی از تصویر و نرم شدن بیشتر تصویر می‌شود. همچنین با توجه به این

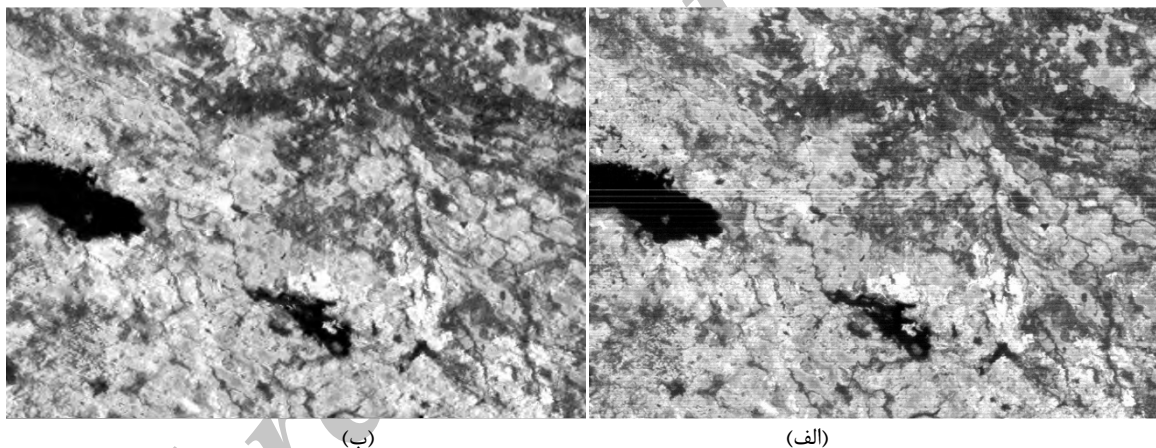
با انتخاب موجک دوباجی به عنوان موجک مورد استفاده، دو پارامتر قابل تغییر در الگوریتم شامل سطح تبدیل موجک و مقدار σ در تابع گوسی می‌باشد. با تغییر سطح و مرتبه تبدیل موجک می‌توان حجم اطلاعات حذف شده را کنترل نمود. در صورتی که خطوط راه‌راه زیاد بر روی تصاویر وجود داشته باشد می‌توان سطح تبدیل را بالاتر برده و آنها را حذف نمود. در تبدیل فوریه و در تابع

آمده پس از تصحیح تصویر کل ماه، $ER=0/48$ و $RMSE=9/63$ می‌باشد.

شکل ۴-الف، باند ۶ سنجنده ETM+ را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است، خطوط راه راه بر روی تصویر مشاهده می‌گردد. پس از اعمال الگوریتم پیشنهادی بر روی این داده‌ها، خطوط راه راه بر روی این باند حذف گردید. با توجه به اینکه خطوط راه راه در این سنجنده بصورت افقی می‌باشد، تصویر چرخانده شده و الگوریتم بر روی آن اعمال گردید. شکل ۴-ب، نتیجه اعمال الگوریتم را بر روی این داده‌ها نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌گردد، الگوریتم توانایی حذف خطوط راه راه را دارا می‌باشد. جهت حذف خطوط راه راه، سطوح مختلف تبدیل موجک بر روی داده‌ها اعمال و نتیجه الگوریتم بصورت بصری ارزیابی گردید. در این داده‌ها، سطح تبدیل موجک مورد استفاده تا سطح ۳ و مقدار σ در تابع گوسی برابر ۱۰ در نظر گرفته شد.

موضوع که بالا بردن سطح تبدیل موجک، باعث حذف بیشتر اطلاعات در تصویر می‌شود، در صورتی که از سطوح بالاتر تبدیل موجک استفاده شود، جهت کاهش حذف اطلاعات از تصویر، بایستی مقادیر کوچکتری برای σ در نظر گرفته شود.

به منظور حذف خطای راه راه شدگی تصویر ماه، با توجه به حجم و تعداد زیاد خطوط راه راه بر روی تصویر، سطوح مختلف تبدیل موجک بر روی داده‌ها اعمال و نتیجه الگوریتم بصورت بصری ارزیابی گردید. پس از تغییر مقادیر سطح موجک و پارامتر زیگمای گوسی، سطح تبدیل موجک مورد استفاده تا سطح ۵ و مقدار σ در تابع گوسی برابر ۵ در نظر گرفته شد. با استفاده از دو پارامتر ER و $RMSE$ جهت مقایسه میزان تغییرات مقادیر پیکسل‌ها، قبل و بعد از اعمال الگوریتم پیشنهادی و با مقایسه تصویر اولیه و تصویر تصحیح شده، مقادیر بدست



شکل ۴-الف) باند ۶ سنجنده ETM+ و (ب) نتیجه اعمال الگوریتم بر روی باند ۶ سنجنده ETM+

الگوریتم بر روی داده‌ها، نتایج مختلف بصورت بصری، مورد بررسی قرار گرفت و با بررسی نتایج، بهترین مقدار برای σ برابر ۱۵ در نظر گرفته شد. با توجه به حساسیت داده‌های ابرطیفی، جهت کاهش حذف اطلاعات ضروری و مفید از تصویر، بایستی مقادیر کوچکتری برای σ در نظر گرفته شود.

جهت مقایسه میزان تغییرات مقادیر پیکسل‌ها، قبل و بعد از اعمال الگوریتم پیشنهادی و با مقایسه تصویر اولیه و تصویر تصحیح شده، با استفاده از دو پارامتر ER و $RMSE$ مقادیر $ER=0/12$ و $RMSE=5/12$ محاسبه گردید.

در مرحله بعد الگوریتم پیشنهادی بر روی داده‌های ابرطیفی اعمال گردید. با تغییر سطح و مرتبه تبدیل موجک و بررسی نتایج، تا مرتبه ۲ از تصویر ابرطیفی، تبدیل موجک گرفته شد. در تبدیل فوریه و در تابع گوسی مورد استفاده، با توجه به اینکه مقدار σ ، بستگی به عرض خطوط راه راه عمودی در تصویر دارد، به منظور انتخاب مقدار مناسب برای پارامتر σ ، با تغییر این پارامتر و اعمال

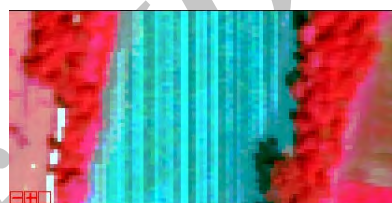
یکسان نیست، بنابراین نمی‌توان از اطلاعات خطوط همسایه استفاده نمود. در روش ترکیب موجک و فوریه، خطوط راه راه مربوط به هر پیکسل (خط) تصویربرداری بصورت مستقل استخراج و از روی تصویر حذف می‌گردد. در شکل ۶ مقایسه نتایج دو الگوریتم نشان داده شده است. همانطور که بصورت بصری مشخص است الگوریتم پیشنهادی توانسته است که خطوط راه راه بر روی تصویر را حذف نماید.

همچنین نتایج اعمال الگوریتم پیشنهادی بر روی این داده‌ها در شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شود. در این شکل‌ها، نتایج بر روی عوارض مختلف نشان داده شده است.

همانطور که در شکل‌های ۶، ۷ و ۸ مشاهده می‌شود، الگوریتم پیشنهادی به خوبی توانایی حذف خطوط راه راه از تصویر را دارد. به منظور ارزیابی و بررسی تأثیر الگوریتم در تغییر مقادیر DNهای تصویر، مقطع عرضی از مقادیر تصویر قبل و بعد از تصحیح خطوط راه راه ترسیم گردید. الگوریتم مناسب بایستی در عین حذف خطای خطوط راه راه، کمترین میزان تغییر در مقادیر پیکسل‌ها را ایجاد نماید. این امر در تصاویر ابرطیفی با توجه به دقت طیفی و حساسیت این داده‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا در صورت تغییر مقادیر پیکسل‌ها نمی‌توان این داده‌ها را در ارزیابی‌های دقیق از عوارض بکار گرفت. در شکل شماره ۹ مقادیر خطوط تصویربرداری در یک سطر از باند ۸۱ تصویر ابرطیفی قبل و بعد از اعمال الگوریتم پیشنهادی حذف خطای خطوط راه راه مشاهده می‌شود.

همانطور که در شکل ۹ مشخص است، مقادیر پیکسل‌ها در تصویر اولیه و قبل از اعمال الگوریتم حذف خطا و در تصویر اصلاح شده و بعد از اعمال الگوریتم تصحیح خطای خطوط راه راه، تغییر چندانی ننموده است و این مقادیر بهم نزدیک می‌باشند. جهت مقایسه کمی مقادیر پیکسل‌ها در تصویر اولیه و تصویر اصلاح شده از دو پارامتر خطای نسبی (er) و خطای جذر میانگین مربعی (RMSE)، استفاده گردیده است. در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مقادیر محاسبه شده فوق برای هر باند نشان داده شده است.

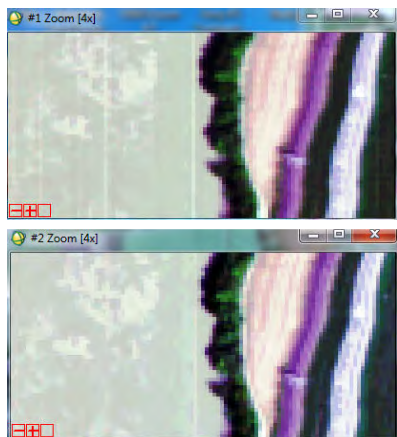
در شکل ۵، ترکیب رنگی کاذب بارز شده^۱ قسمتی از تصویر ابرطیفی مورد استفاده که دارای نویز خطوط راه راه است، مشاهده می‌شود.



شکل ۵- خطای خطوط راه راه بر روی تصویر ابرطیفی مربوط به سنجنده Apex (ترکیب رنگی کاذب بارز شده)

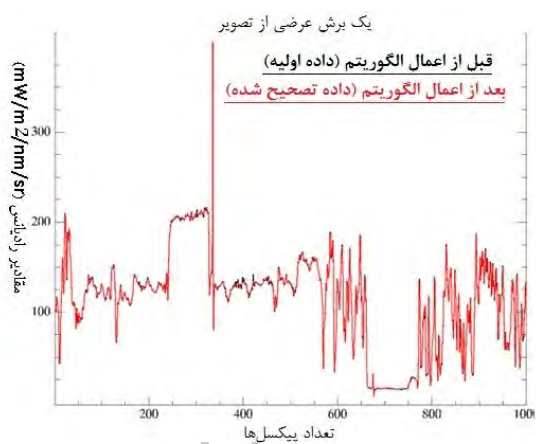
همانطور که در شکل ۵، مشاهده می‌شود، تصویر ابرطیفی فوق داری خطای راه راه می‌باشد، که به منظور بارزسازی و مشخص نمودن خطوط راه راه در تصویر، با استفاده از بارزسازی همبستگی تصویر، خطوط راه راه بر روی رودخانه بارز شده که در شکل مشخص شده است. به منظور مقایسه الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم‌های آماری جهت حذف خطای خطوط راه راه در این تصویر ابرطیفی، روش حذف نویز در نرم افزار ENVI مورد استفاده قرار گرفت. این روش از مقایسه پارامترهای آماری هر خط با خط همسایه استفاده می‌نماید [۱۶]. نتایج اعمال این الگوریتم بر روی داده‌های ابرطیفی در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشخص می‌باشد، الگوریتم آماری توانایی حذف همه خطوط راه راه از تصویر را دارا نمی‌باشد. اغلب الگوریتم‌های آماری با استفاده از اطلاعات همسایگی مربوط به پیکسل‌های اطراف پیکسل (خط) دارای خطا، خطای موجود را کاهش می‌دهند. اما در این تصویر با توجه به اینکه اغلب خطوط همسایه دارای این خطا می‌باشند و مقدار این خطا بر روی همه خطوط

^۱ Enhanced

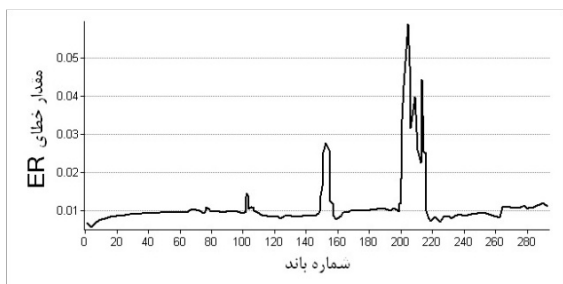


شکل ۸- ترکیب رنگی طبیعی، بالا تصویر دارای خطا، پایین تصویر حاصل از اعمال الگوریتم و حذف خطا

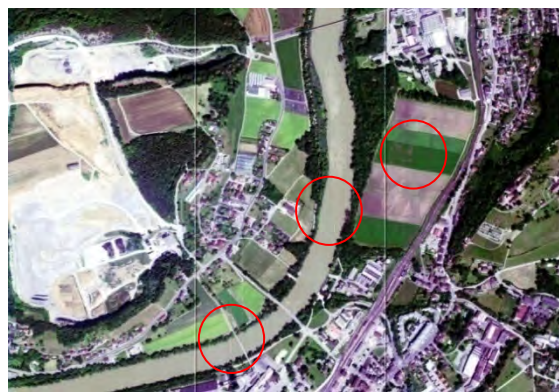
با بررسی مقادیر ER_i و $RMSE_i$ ، مشخص می‌گردد که خطای بوجود آمده در اثر اعمال الگوریتم پیشنهادی، در اغلب باندها دارای خطایی کمتر از واحد می‌باشد و این نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی، کمترین تغییر را بر روی نتایج ایجاد می‌نماید و در نتیجه در داده‌های تصحیح شده، عوارض اصلی تصویر بدون تغییر بوده و فقط خطاها حذف شده‌اند.



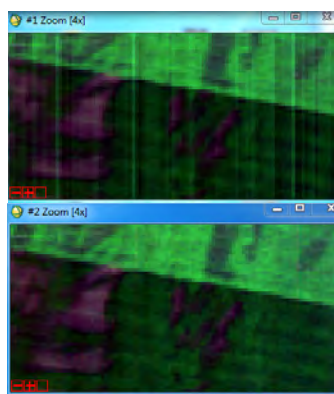
شکل ۹- مقادیر بیکسل‌های تصویر در باند ۸۱ (طول موج ۷۸۳/۷۹ نانومتر) در یک سطر از تصویر، قبل و بعد از اعمال الگوریتم. مقادیر رادیانس بر حسب $mW/m^2/nm/sr$.



شکل ۱۰- مقادیر خطای نسبی محاسبه شده برای هر باند



شکل ۶- ترکیب رنگی طبیعی بخشی از تصویر ابرطیفی مورد استفاده، تصویر اول از بالا تصویر دارای خطا، تصویر دوم از بالا تصویر پس از اعمال الگوریتم آماری حذف خطا و تصویر سوم از بالا تصویر حاصل از اعمال الگوریتم پیشنهادی و حذف خطا (در مناطقی که مشخص شده است، عملکرد الگوریتم قابل مشاهده است)



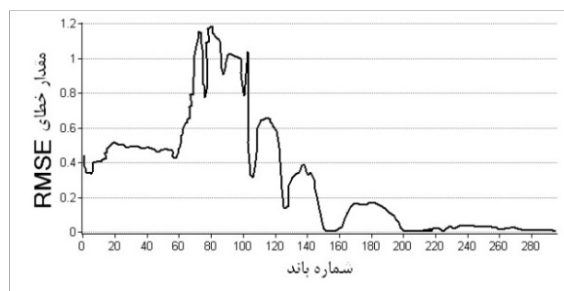
شکل ۷- ترکیب رنگی طبیعی، بالا تصویر دارای خطا، پایین تصویر حاصل از اعمال الگوریتم و حذف خطا

در تبدیل فوریه می‌باشد. با توجه داده مورد استفاده و نوع خطوط راه راه، موجک دوبیچای نتایج مناسبی را داشته و در این تحقیق از آن استفاده شده است. سطح تبدیل موجک تأثیر مستقیمی بر حجم اطلاعات حذف شده از تصویر را دارد و بستگی به اندازه و مقدار خطوط راه راه دارد، مقادیر کوچکتر اطلاعات کمتری از تصویر را حذف می‌نماید. انتخاب اندازه σ نیز بستگی به عرض خطوط راه راه دارد و اگر عرض خطوط زیاد شود، مقدار این پارامتر نیز بایستی بزرگتر در نظر گرفته شود.

بررسی نتایج اعمال الگوریتم پیشنهادی بر روی داده‌های مختلف چندطیفی و ابرطیفی، نشان داد این الگوریتم توانایی حذف خطاهای خطوط راه راه را دارد و علاوه بر آن اطلاعات اصلی تصویر را بدون تغییر نگه می‌دارد. مزیت استفاده از این الگوریتم این است که قابل انعطاف بوده و با تغییر نوع داده‌ها و نوع خطای خطوط راه راه، می‌توان با تغییر ۳ پارامتر یاد شده، این خطاها را حذف نمود.

سپاسگزاری

بر خود لازم می‌دانیم که از آقای دکتر مایکل شاپین و آزمایشگاه سنجش از دور دانشگاه زوریخ که داده‌های ابرطیفی را در اختیار ما قرار داده و از این تحقیق حمایت مالی نمودند، تشکر نماییم.



شکل ۱۱- مقادیر RMSE محاسبه شده برای هر باند

۵- نتیجه‌گیری

خطای خطوط راه راه در اغلب داده‌های ماهواره‌ای به علت وجود نقص در سیستم تصویربرداری و یا به علت بد عمل نمودن آشکارسازها وجود دارد. الگوریتم‌های مختلفی جهت حذف خطاهای راه راه شدگی وجود دارد. الگوریتم مناسب جهت حذف این خطاها، بایستی این توانایی را داشته باشد که بدون حذف عوارض و اطلاعات اصلی از تصویر، این خطاها را حذف نماید. در این تحقیق با استفاده از ترکیب تبدیل موجک و فوریه، خطای خطوط راه راه عمودی بر روی داده‌های ابرطیفی حذف گردید. در الگوریتم پیشنهادی، با استفاده از ۳ پارامتر و کنترل مقادیر آنها، خطای راه راه شدگی از عوارض و اطلاعات اصلی تصویر جدا و سپس حذف می‌گردد. این سه پارامتر، شامل انتخاب نوع موجک مورد استفاده، سطح استفاده از تبدیل موجک و سومین پارامتر انتخاب مقدار مناسب σ

مراجع

- [1] H. Shen, T. Ai, and P. Li., "DESTRIPING AND INPAINTING OF REMOTE SENSING IMAGES USING MAXIMUM A-POSTERIORI METHOD," in ISPRS Congress, Beijing, 2008.
- [2] C. Jinsong, S. Yun, H. Guo, W. Weiming, and Z. Boqin, "Destripping CMODIS data by power filtering," Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, vol. 41, pp. 2119-2124, 2003.
- [3] J. Chen, H. Lin, Y. Shao, and L. Yang, "Oblique striping removal in remote sensing imagery based on wavelet transform," International Journal of Remote Sensing, vol. 27, pp. 1717-1723, 2006.
- [4] J. Torres and S. O. Infante, "Wavelet analysis for the elimination of striping noise in satellite images," Optical Engineering, vol. 40, pp. 1309-1314, 2001.
- [5] F. L. Gadallah, F. Csillag, and E. J. M. Smith, "Destripping multisensor imagery with moment matching," International Journal of Remote Sensing, vol. 21, pp. 2505-2511, 2000/02/01 2000.
- [6] V. R. Algazi and G. E. Ford, "Radiometric equalization of nonperiodic striping in satellite data," Computer Graphics and Image Processing, vol. 16, pp. 287-295, 1981.
- [7] B. K. Horn and R. J. Woodham, "Destripping Landsat MSS images by histogram modification," Computer Graphics and Image Processing, vol. 10, pp. 69-83, 1979.

- [8] M. Wegener, "Destriping multiple sensor imagery by improved histogram matching," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 11, pp. 859-875, 1990.
- [9] P. Rakwatin, W. Takeuchi, and Y. Yasuoka, "Stripe noise reduction in MODIS data by combining histogram matching with facet filter," *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 45, pp. 1844-1856, 2007.
- [10] M. Boin and A. Haibel, "Compensation of ring artefacts in synchrotron tomographic images," *Optics express*, vol. 14, pp. 12071-12075, 2006.
- [11] Z. Q. Cai, "Ringing artefact reduction using adaptive averaging filtering," in *Consumer Electronics, 2004 IEEE International Symposium on*, 2004, pp. 156-159.
- [12] F. Tsai, S.-Q. Lin, J.-Y. Rau, L.-C. Chen, and G.-R. Liu, "Destriping hyperion imagery using spline interpolation," in *Proc. 26th Asian Conference on Remote Sensing*, 2005.
- [13] G. T. Herman, *Fundamentals of computerized tomography: image reconstruction from projections*: Springer, 2009.
- [14] B. Aiazzi, L. Alparone, A. Barducci, S. Baronti, P. Marcoionni, I. Pippi, et al., "Noise modelling and estimation of hyperspectral data from airborne imaging spectrometers," 2006.
- [15] H. Carfantan and J. Idier, "Statistical Linear Destriping of Satellite-Based Pushbroom-Type Images," *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 48, pp. 1860-1871, 2010.
- [16] D. Scheffler and P. Karrasch, "Destriping of hyperspectral image data: an evaluation of different algorithms using EO-1 Hyperion data," *Journal of Applied Remote Sensing*, vol. 8, pp. 083645-083645, 2014.
- [17] B. Munch, P. Trtik, F. Marone, and M. Stampanoni, "Stripe and ring artifact removal with combined wavelet-Fourier filtering," 2009.
- [18] S. p. Mallat, *A wavelet tour of signal processing*: Access Online via Elsevier, 1999.
- [19] Z. Wang and Y. Fu, "Frequency-domain regularized deconvolution for images with stripe noise," in *Image and Graphics, 2007. ICIIG 2007. Fourth International Conference on*, 2007, pp. 110-115.
- [20] Z. Zhang, Z. Shi, W. Guo, and S. Huang, "Adaptively image de-stripping through frequency filtering," in *ICO20: Optical Information Processing*, 2006, pp. 60273V-60273V-8.
- [21] L. Jian Guo and G. L. K. Morgan, "FFT Selective and Adaptive Filtering for Removal of Systematic Noise in ETM+ Imageodesy Images," *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 44, pp. 3716-3724, 2006.
- [22] http://landsat.usgs.gov/science_an_detectorfailure.php