# فشردهسازی تصاویر ابرطیفی با استفاده از



# برازش خم، بازهبندی و هموا*ر*سازی

مرسده بیتاللهی و سید ابوالفضل حسینی \* گروه مخابرات، مرکز تحقیقات توسعه فناوری های پیشرفتهٔ صنعت برق و الکترونیک، واحد یادگار امام خمینی(ره) شهرری دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

# چکیدہ

تصاویر ابرطیفی بهدلیل اکتساب همزمان دادهها در بیش از صدها باند طیفی باریک و نزدیک به هم، همبستگی بین باندی و حجم بسیار بالایی دارند؛ بنابراین، نیاز به فشردهسازی دارند. یکی از روشهای با اتلاف، روش مبتنی بر برازش خم است که از امضای طیفی تصویر برای کاهش ویژگی استفاده می کند و نتایج بسیار خوبی را در مقایسه با روشهای پیشین مانند PCA به همراه داشته است، اما در فشردهسازی با استفاده از این روش، منحنی امضای طیفی تقریبزده شده در برخی نقاط دارای اعوجاج است، که در این مقاله سعی شده با استفاده از یافتن نقاط دارای اعوجاج و بازه بندی امضای طیفی و برازش خم روی هر بازه، یا استفاده از یک فیلتر هموارساز Savitsky–Golay یا با ترکیب هر دو پیشنهاد، اعوجاج را از بین برده، و نیز میزان PSNR را افزایش داد تا کیفیت تصویر بازیابی شده به تصویر اصلی خیلی نزدیک شود.

واژگان كليدى: تصاوير ابرطيفى، فشردەسازى، برازش خم، حداقل مربّعات خطا، فيلتر هموارساز Savitsky – Golay

# Hyperspectral Data Compression by Using Subintervals Curve Fitting, and Smoothing Filter

#### S. Abolfazl Hosseini\*and Mersedeh Beitollahi

Department of Communication, Research Center for Developing Advanced Technologies of Electrical and Electronics Industry, Yadegar-e-Imam Khomeini (RAH) Shahre Rey Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

#### Abstract

Hyperspectral images due to simultaneous acquisition of data in more than hundreds narrow, close spectral bands, have a very high correlation bandwidth. So, in order to store in less storage space, higher transmission speed and less bandwidth, the compression is needed. Various lossless and lossy methods for compression are existed, that can be in the spatial domain or in the spectrum domain. But, in regard to the importance of spectral information of hyperspectral images in remote sensing, this compression should be done by this condition that the spectral information of this kind of images is well preserved. The methods of Compression can be based on the predictive function or using of a codebook to compress information. one of the most effective ways is the method of using curve fitting, which is applied to compress hyperspectral images due to its effect on the image spectrum. This method uses the spectral signature of each pixel to reduce the feature by finding the closest approximation function to express the curve and storing its coefficients as a new feature for reconstruction data. By replacing these coefficients in the equation of approximation, spectrum reflection curve for each pixel can be reconstructed. This method has very good results in comparison with previous methods such as PCA, but in compression using this method, the SRC curve has been approximated in some points with distortion. In this paper,

\* نویسندهٔ عهدهدار مکاتبات

Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2025-07-31

we tried to eliminate these distortions, by finding points which have distortion and Breakdown the SCR. On the other hand, by using the Savitsky-Golay smoothing filter we can also reduce distortion and increase the PSNR. Another way to eliminate or reduce this distortion described in this article is as follow: At first, the spectral signature of each pixel of the intended data is smoothed by a Savitsky-Golay smoothing filter, and then by using a particular method, it is divided into adjoining adjacent spaces, and then a curve is plotted for each slice of data. By choosing the best degree and window length for smoothing and selecting the best degree of numerator and denominator of function, the coefficients of the selected rational function are considered as new features of the image. By using the proposed method, in addition to eliminating the distortion, the PSNR level will be higher and the reconstructed image quality is very close to the original image.

Keywords: Compression, Curve Fitting, Hyperspectral, Least Square, Savitsky-Golay Filter

۱- مقدمه

آنهاست. روشهای زیادی برای فشردهسازی تصاویر ابرطیفی معرفی شده است که در هیچکدام از آنها، ویژگیهای جبری- هندسی خمهای بازتاب طیفی در نظر گرفته نشده است و دربارهٔ منبع غنی اطّلاعاتی که در ترتیب و توالی مقادیر شدّت روشنایی هر پیکسل در طیفهای مختلف وجود دارد، غفلت شده است.

حسینی و قاسمیان [9, 10] روشی را معرفی کردند که از طبيعت هندسي- جبري خمهاي امضاي طيفي پيكسلها و اطِّلاعات مربوط، به ترتيب نقاط روى اين خمها استفاده می کند. در حقیقت، امضای طیفی پیکسل ها به صورت اعضای یک دنباله در نظر گرفته می شوند، و تلاش بر این است که با برازش یک خم کسری گویا (تابع کسری با یک چندجملهای در صورت و یک چندجملهای در مخرج) به هر SRC و ذخیره کردن ضرایب چندجملهایهای مذکور، عمل فشردهسازی انجام شود. یک برتری عمده این روش، امکان اعمال آن به صورت پیکسل به پیکسل است که باعث می-شود پیادهسازی الگوریتم به صورت موازی امکان پذیر باشد. دلیل استفاده از تابع کسری گویا برای برازش خم بازتاب طيفي قابليّت انطباق آن بر گروه وسيعتري از اشكال نسبت به الگوهای مرسوم چندجملهای و نتایج برازش قابلقبولتر است. اگرچه توابع چندجملهای شکل بهنسبت سادهتر و حجم محاسبات کمتری دارد و تابع چندجملهای حالت ویژهای از تابع کسری گویاست. آنها دریافتند که استفاده از برازش خم در فشردهسازی میتواند نتایج بسیار خوبی در مقایسه با روشهای پیشین مانند PCA به همراه داشته باشد. با وجود برتریهایی که روش فشردهسازی با استفاده از برازش خم به کمک تابع کسری گویا دارد، خم بازتاب طیفی بازیابی شده با استفاده از این روش ممکن است در برخی از نقاط دارای اعوجاج شدید باشد [10, 10].

در مقالهٔ حاضر پیشنهادهایی ارائه شده تا علاوهبر از بین رفتن اعوجاجهای ایجادشده در فرایند فشردهسازی و بازیابی، میزان PSNR تصویر بازیابیشده بهبود قابلتوجه دادههای ابرطیفی مجموعهای از تصاویر ثبتشده در بازه-های طیفی بسیار باریک مجاور هم هستند که همزمان از یک منظرهٔ زمینی جمع آوری شدهاند و از کنار هم قرار دادن این تصاویر، اصطلاحاً یک مکعّب تصویر ابرطیفی تولید می-شود. طيّ بازتابي ويژه، هر مادّه مانند يک امضا بهعنوان يک ویژگی خاص برای آن محسوب می شود. به همین دلیل است که نمودار میزان روشنایی ثبتشده در یک بازهٔ طیفی مربوط به هر ماده، امضای طیفی و یا منحنی بازتاب طیفی ا آن ماده نامیده می شود. دادههای ابر طیفی در صدها باند طيفي باريک و نزديک به هم جمع آوري مي شوند و همبستگی زیادی بین باندهای این تصاویر وجود دارد؛ بنابراین، حجم این تصاویر بالاست، و جهت ذخیرهسازی در فضای کمتر نیاز به فشردهسازی دارند. ازآنجاکه در سنجش از دور اطِّلاعات طيفي اين نوع تصاوير اهميت بسيار زيادي دارند، و باید اطِّلاعات طیفی تصاویر ابرطیفی بهخوبی حفظ شوند، حذف افزونگیها باید به گونهای انجام شود که اطِّلاعات طيفي آنها بهخوبي حفظ شود[1, 2]. روشهاي فشردهسازی می توانند با اتلاف و یا بدون اتلاف باشند. در فشردهسازی بدون اتلاف برخلاف گونهٔ با اتلاف آن، داده-های اصلی از روی دادهٔ فشردهشده بهطور دقیق قابل بازیابی هستند[3, 4, 5]. روشهای فشردهسازی میتوانند مبتنی بر تابع پیشگو باشند[4, 6]، یا از یک کتابچهٔ رمز برای فشرده كردن اطِّلاعات استفاده كنند [3,7]. همچنين، فشردهسازي اطّلاعات می تواند بر اساس رمزگذاری تبدیلات نظیر توابع كسينوسى (DCT<sup>۲</sup>), توابع موجك (DWT<sup>۳</sup>) و يا تحلیل مؤلّفههای اصلی (PCA<sup>۴</sup>) [7] انجام شود. روش فشردهسازی مبتنی بر PCA یکی از کارآمدترین و مؤثّرترین راهها برای از بین بردن همبستگی در تصاویر و فشرده کردن

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Spectral reflectance curve (SRC)

 $<sup>^{2}</sup>$  Descret cosine transform

 <sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Discrete wavelet transform
 <sup>4</sup> Principal component analysis

جملهای از درجه معین است. چنانچه تعداد ضرایب مجهول چندجملهای با تعداد نقاط اندازه گیری برابر باشد میتوان با جای گذاری نقاط ضرایب را محاسبه کرد و بدینسان به خمی دست یافت که درست از تمام نقاط داده می گذرد. درغیراینصورت، از راه بهینه کردن معیاری که اغلب مجموع مربّعات خطاست، ضرایب را محاسبه می کنند. به دلایل گوناگون ترجیح بر این است که بهجای انتخاب درجهٔ چندجملهای به تعداد نقاط داده، از تقریب تابع با درجهٔ کمتر بهره ببریم. زیرا نخست، حتی در صورت امکان تطبیق دقیق، دستیابی به آن چندان ساده نیست و موانعی نظیر 0020زمان لازم برای محاسبات و یا امکان واگرایی الگوریتم محاسباتی در پیش روست؛ دوم، گاه ترجیح در این است که بعضی دادهها را از طریقی نظیر میانگین گیری در یک نقطه تجمیع کرد. وقوع پدیدهٔ رانژ<sup>۳</sup> [12] که بیانگر بهشدّت نوسانی شدن چندجملهایهایی با درجه بالا است نیز، مزید بر علت است. اگر یک خم از دو نقطه A و B بگذرد، قابل پیشبینی است که از جایی نزدیک نقاط میانی آن دو بگذرد. اما بهطور لزوم، در چندجملهایهای درجهٔ بالا این گونه نیست و نوسان شدیدی را تحمیل می کند. به علاوه، چندجملهای های با درجهٔ پایین در مقایسه با چندجملهای-های با درجهٔ بالاتر، احتمالاً نقاط عطف کمتری دارند و هموارتر هستند. با تعداد نقاط عطف بیشتر، خم حالتی نا-صاف و نوفهای خواهد گرفت[13].

در به کارگیری الگوهای غیرخطی، یکی از مشکل عمده یافتن تعدادی کافی از نقاط شروع برای محاسبهٔ ضرایب به صورت آزمون و خطا برای کمینه ساختن مربعات خطاست. برای توابع کسری روشهای سرراستی برای یافتن نقاط آغازین وجود دارد. در میان تمام تقریبهای به شکل کسر گویا و از مرتبهای خاص از یک تابع معلوم ( $\Lambda$ ) تابع تقریبزن معرفی شده توسط هنری پده<sup>۴</sup>، بهترین تقریب را ارائه می دهد؛ به گونهای که سری توانی تابع تقریبزن و تابع تقریبزده شده بر هم منطبق می شوند[14]. این تابع تقریب-زن، در بسیاری موارد حتی بهتر از سری تیلور عمل می کند زن، در بسیاری موارد حتی بهتر از سری تیلور عمل می کند و در زمانهایی که سری تیلور واگرا می شود، می تواند همچنان تقریب خوبی ارائه دهد. تابع آو شاخصهای درست 0 $\leq 20$  را در نظر بگیرید. تابع تقریبزن کسری گویا از مرتبهٔ (L,M) به صورت زیر تعریف می شود:

 <sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Runge phenomenon
 <sup>4</sup> Henri pade

سال ۱۴۰۲ شمارهٔ ۱ پیاپی ۵۵

یابد و کیفیت تصویر بازیابی شده خیلی نزدیک به تصویر اصلی باشد. در نخستین پیشنهاد، با معرفی یک روش بازه-بندی روی هر امضای طیفی این اعوجاج کاهش داده می-شود و برازش خم دقیق تر انجام خواهد شد. در روی کردی دیگر، استفاده از فیلتر هموارساز Savitsky-Golay سبب کاهش اعوجاج و افزایش PSNR می شود و کیفیت تصویر بازسازی شده نیز بهبود می یابد. در نهایت با ترکیب دو پیشنهاد پیشین، نخست امضای طیفی هر پیکسل از داده با استفاده از فیلتر هموارساز Savitsky-Golay هموار شده، سپس با استفاده از بازهبندی به بازههای مجاور ناهمپوشان تقسیم می شود و به هر بازهٔ هموار شده یک خم برازان می-شود. به طور قطع، این رویکردها نیاز به انتخاب بهترین درجه برای تابع هموارساز و بهترین طول پنجره هموارسازی و نیز بهترین درجه صورت و مخرج خمهای برازانشده را دارد. در نهایت، ضرایب توابع کسری برازانشده بهعنوان دادههای جدید ذخیره می شوند. بهترین تعداد بازه را می-توان با مقایسهٔ PSNRهای بهدستآمده برای تصویر بازیابی شده به دست آورد. اجرای پیشنهادهای مذکور علاوهبر از بین بردن اعوجاج، میزان PSNR را به نحو چشم گیری بهبود داده، و کیفیت تصویر بازیابی شده نزدیک به تصویر اصلی میشود.

# ۱– بـــرازش خـــم و فيلتـــر هموارســاز Savitsky-Golay

# ۱-۱- برازش خم

برازش خم فرایند انتخاب مناسبترین خم یا تابع ریاضی است که از یک مجموعه نقاط داده شده یا نزدیکی آنها و احتمالا بنا به قیدهای مشخصی میگذرد. برازش خم یک روش سنتی برای پیدا کردن رابطهای ریاضی بین مقادیر مشاهده شده و متغیرهای مستقل است. و هدف از آن پیدا کردن تابع ( $\Lambda$ ) از یک خانواده از توابع خاص برای مجموعۀ کردن تابع ( $\Lambda$ ) از یک خانواده از توابع خاص برای مجموعۀ داده {( $\Lambda$ )ا. $\Lambda$ } است به نحوی که <sup>2</sup>(( $\Lambda$ )ا. $\Lambda$ )ا. $\eta$ <sup>I</sup> $\Sigma$  $\frac{1}{N}$  $\frac{1}{N}$ حداقل شود که در آن N,...,21= $\Lambda$  بیانگر نقاط مورد نظر و  $\kappa$  وزن نقاط است[11]. معیارهایی نظیر حداقل مربّعات (LS) و حداقل باقی مانده مطلق ( $\Lambda$ ) ایرای برازندگی و انطباق به کار می رود. تابع( $\Lambda$ ) میتواند خطی یا غیرخطی (نظیر چندجملهای، نمایی و...) باشد. در برازش خطی یا چندجملهای، نوع تابع انتخابی برای برازاندن به نقاط، چند-

Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2025-07-31



<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Least square

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Least absolute residuals

این تقریب بر (f(λ با نهایت دقّت منطبق می شود، اگر: (٢)  $f^{(i)}(.)=\hat{f}^{(i)}(.)$  i=0, 1, ..., M+Lکه در آن (.) f<sup>(i)</sup> عبارت است از مشتق i ام تابع f اگر تابع تقریبزن را به صورت سری مکلورن گسترش دهیم، نخستین M+L جملهٔ آن با جملات متناظر در بسط مک-لورن( $f(\lambda)$  منطبق است. در حالتی که M صفر باشد، تقریب-زن پده به بسط مکلورن کاهش می یابد. مهمترین ضعف این روش حساسیّت آن به نقاط یرت<sup>۱</sup> است. اگر دادهای بهطور بارز خارج از بازهٔ غالب دادهها باشد، به شدّت در نتایج تأثیر می گذارد. در روش LAR از فرایندی بر پایهٔ تکرار برای یافتن (f(λ بهره برده می شود که مقاومتر و در عوض، ییچیدهتر است. در این مقاله از الگوی خاصی از برازش خم غیرخطی با استفاده از تابع کسری گویا استفاده شده است. هدف از استفاده از این برازش خم فشردهسازی داده است؛ پس  $f(\lambda)$  باید دارای شاخصهای کمتری نسبت به تعداد نمونههای داده، داشته باشد.

### ۲-۱- فیلتر هموارساز Savitsky - Golay

روش فیلترینگ ارائهشده از سوی ساویتسکی و گولی که فیلترینگ چندجملهای هموارساز دیجیتال (**'DISPO**) نیز نامیده می شود، در طیف سنجی جذبی به طور وسیع استفاده می شود. این روش هم به منظور هموارسازی طیف و هم تفكيك افتراقي مواد قابل استفاده است. مي توان گفت فيلتر DISPO یا SG تأثیر نوفه را کاهش میدهد؛ درحالیکه همزمان، گشتاورهای مرتبهٔ بالای طیف اصلی را حفظ می-کند، در نتیجه، در مقایسه با فیلتر میان رو<sup>۳</sup> از همان درجه، اعوجاج چندانی در طیف ایجاد نمی شود و بهویژه، پهنا و ارتفاع باندهای جذب دچار تغییر قابل ملاحظه نخواهند شد. نقطهٔ قوت دیگر این روش سادگی و کارآمد بودن آن است؛ بهطوری که بهطور صرف، شامل یک کانولوشن خطی با مجموعهای از ضرایب فیلتر است. در واقع، به کار گیری فیلتر SG مبتنی بر این فلسفه است که حفظ خواص طیفی بر حذف نوفه برتری دارد. فیلترینگ مورد اشاره شامل یک برازش كمينة مربّعات به طيف آلوده به نوفه است، ولى وابسته به طول پنجرهٔ فیلترینگ، درجهٔ چندجملهای درونیابی و مرتبهٔ مشتق است. در واقع ساویتسکی و گولی جداول بی شماری از ضرایب را در مقالهٔ خود آوردهاند که بهطور مستقیم بهمنظور هموارسازی و مشتق گیری از طیف

قابل اعمال هستند. فرایند این فیلترینگ بهطور دقیق معادل است با مجموعهای از عملیّات هموارسازی، برازش حداقل مربّعات چندجملهای و مشتق گیری؛ اما نحوهٔ اجرای آن در یک فرایند یکمرحلهای خلاصه شده تا بهلحاظ محاسباتی کارآمدتر باشد. در [15, 16, 17] یک توسیع ریاضی کامل از این فیلترینگ آورده شده است. مبنای این فیلترینگ در هموارسازی به کمک حداقل مربّعات چندجملهای است و برای هر نقطه مقدار جدید هموار شدهاش را بر اساس برازش یک چندجملهای با معیار حداقل فیلترینگ قرار گرفتهاند، پیدا میکند. مرکز این پنجره بر فیلترینگ قرار است هموارسازی شود قرار دارد. با حرکت نقطهای که قرار است هموارسازی شود قرار دارد. با حرکت ینجره روی نقاط متوالی تکتک نقاط دادهها هموارسازی میشوند (شکل ۱).

بهطور عموم، از یک چندجملهای درجه پایین برای تقریب استفاده می شود تا ویژگی های ارتعاشات پایین طیف، بهتر تقریب زده شود و در عوض نوفه های ارتعاش بالا در خطای تقریب محو شوند[18, 19].



(شکل-۱) نمودار امضای طیفی SRC نمونه و هموارشدهٔ آن بهوسیلهٔ فیلتر هموارساز Savitsky Golay (Figure 1) The SRC of a typical pixel and smoothed pixel by Savitsky-Golay filter

در واقع با بیانی ساده تر، عملکرد این فیلتر هموارساز به این صورت است که نخست، روی منحنی، پنجرهای به طول W و به مرکز نقطه  $(x_0,y_0)$  انتخاب می شود؛ سپس یک خم با درجهٔ مشخص  $D_{SG}$  بر منحنی داخل پنجره برازان شده و پسازاین که خم برازان شده پیدا شد، نقطهٔ  $(x_0,y_0)$  دور ریخته شده و نقطه  $(x_0,y_0)$  از خم برازان شده جایگزین آن می شود. این پنجره روی منحنی حرکت می کند تا تک تک نقاط با نقاط جدید جایگزین شود [20].

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> outlier

 <sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Digital Smoothing Polynomial
 <sup>3</sup> Intermediate filter

# ۲-۱- تصویر ایندیانا<sup>۱</sup>

مجموعه دادهٔ ابرطیفی موسوم به ایندیانا تصاویر منطقهای کشاورزی-جنگلی است که با سنجندهٔ AVIRIS در ژوئن ۱۹۹۲ میلادی از یک سایت آزمایشی در شمال شرقی ایالت ایندیانا گرفته شده است[22, 21]. این تصویر ۲۲۰ باند در محدودهٔ طیفی ۴۰۰ تا ۲۵۰۰۲ نانومتر دارد و ابعاد آن ۲۵۵×۱۴۵ پیکسل است. دقت مکانی این تصویر ۲۰ متر است. در زمان تصویربرداری گیاهان در اوایل دورهٔ رشد بودند. تصویر ناحیهٔ ذکرشده توسط باند ۳۴، در شکل ۲ (الف) نشان داده شده است.

## ۲-۲- تصویر دانشگاه پاویا<sup>۲</sup>

این تصویر شهری مربوط به ناحیهٔ محوّطهٔ دانشگاه پاویا در ایتالیا است[21] و با سنجندهٔ ROSIS (طرّاحی و پشتیبانی شده توسط اتحادیّهٔ اروپا) گرفته شده است. ابعاد آن ۲۴۰×۳۴۰ پیکسل و دارای ۱۱۵ باند طیفی در بازهٔ ارتعاشی ۴۳۰ تا ۸۶۰ نانومتر است. بعد از حذف کانالهای نوفهای، آزمایشها بر روی ۱۰۳ باند باقیمانده انجام شده است. دقّت مکانی این تصویر ۲/۱ متر است. تصویر این داده با استفاده از رنگهای کاذب در شکل۲ (ب) نشان داده شده است.[21,23].

#### DC-Mall تصوير DC-Mall

دیگر تصویر استفادهشده در این پژوهش مربوطبه منطقهای در شهر واشنگتن است که با سنجندهٔ HYDICE و با ابعاد ۲۷۶×۲۷۶ پیکسل در ۲۱۰ باند گرفته شده است[21,24]. ۱۹ باند بهدلیل نوفهای بودن و جذب شدن اطّلاعات آنها توسط اتمسفر حذف شدند؛ بنابراین، ۱۹۱ باند باقی میماند. دقت مکانی این تصویر یک متر است. در شکل ۲ (ج) تصویر رنگ کاذب از این تصویر نمایش داده شده است.

یک مجموعه دادهٔ ابرطیفی را در نظر بگیرید، همانطورکه در بخش دوم توضیح داده شد، ما رابطهٔ <sub>(۲)</sub> مشخصی بهصورت (f(λ بهعنوان تابعی بر حسب شمارهٔ باند

<sup>1</sup> Indian pine site

<sup>2</sup> Pavia university

۸٫۰۰۰٫۸ برای منحنیSRC نداریم و میخواهیم آن را تقریب بزنیم. تقریب موردنظر ما، (f(λ) بیان (f(λ) بهصورت یک تابع کسری گویا با درجه L در صورت و درجه M در مخرج است (RFCF).



(شکل-۲) (الف) تصویر با رنگ کاذب ایندیانا (ب) تصویر با رنگ کاذب دانشگاه پاویا (ج) تصویر با رنگ کاذب DC-Mall (Figure 2) The Original Data of (a) IPS, (b) UP, (c) DC-Mall

$$\hat{\mathbf{f}}(\boldsymbol{\lambda}) = \frac{\sum_{j=0}^{L} \mathbf{C}_{j+M+1} \boldsymbol{\lambda}^{j}}{1 + \sum_{j=1}^{M} \mathbf{C}_{j} \boldsymbol{\lambda}^{j}}$$
(٣)

برای طبیعی سازی شـمارهٔ بانـدهـا آرگومـان تـابع را  
به صورت 
$$\frac{\lambda}{N}$$
 در نظر میگیریم.  
 $\hat{f}_{(x,y)}\left(\frac{\lambda}{N}\right) = \frac{\sum_{j=0}^{L} C_{j+M+1}(\frac{\lambda}{N})^{j}}{1+\sum_{j=1}^{M} C_{j}(\frac{\lambda}{N})^{j}}$  (۴)

تعیین ضرایب C<sub>j</sub> برای J=1,...,L+M+1 به گونهای است که مجموع خطای تقریب در نقاطی که مقدار واقعی منحنی را در اختیار داریم حداقل شود یعنی:

$$\min\left\{E = \frac{1}{N} \sum_{\lambda=1}^{N} \left(\hat{f}(\lambda/N) - f(\lambda/N)\right)^{2}\right\}$$
 ( $\Delta$ )

$$\sum_{\lambda=1}^{N} \frac{-2\left(\frac{\lambda}{N}\right)^{i}}{\left(1+\sum_{j=1}^{M} c_{j}\left(\frac{\lambda}{N}\right)^{j}\right)^{2}} \left(\sum_{j=0}^{L} c_{j+M+1}\left(\frac{\lambda}{N}\right)^{j}\right) \left(\hat{f}\left(\frac{\lambda}{N}\right) - f\left(\frac{\lambda}{N}\right)\right) = 0$$
(8)

$$\frac{\partial E}{\partial c_i} = 0 \qquad i = M + 1, \dots, M + L + 1$$
$$\sum_{\lambda=1}^{N} \frac{2\left(\frac{\lambda}{N}\right)^{i - M - 1}}{1 + \sum_{j=1}^{M} c_j\left(\frac{\lambda}{N}\right)^j} (\hat{f}\left(\frac{\lambda}{N}\right) - f\left(\frac{\lambda}{N}\right)) = 0$$

یک شرط کافی، اما نه لازم برای حلّ دستگاه معادلات غیرخطی بالا آن است که:

$$\sum_{j=0}^{L} c_{j+M+1}\left(\frac{\lambda}{N}\right)^{j} = f\left(\frac{\lambda}{N}\right) \qquad \lambda=1,...,N \qquad (\Lambda)$$
 $1+\sum_{j=1}^{M} c_{j}\left(\frac{\lambda}{N}\right)^{j} = f\left(\frac{\lambda}{N}\right) \qquad \lambda=1,...,N$ 

$$\sum_{j=0}^{L} c_{j+M+1}\left(\frac{\lambda}{N}\right)^{j} - f\left(\frac{\lambda}{N}\right) \sum_{j=1}^{M} c_{j}\left(\frac{\lambda}{N}\right)^{j} = f\left(\frac{\lambda}{N}\right) \quad \lambda = 1, \dots, N \quad (9)$$

$$A_{N^{*}(M+L+1)}C_{(M+L+1)*1} = B_{N^{*}1}$$
 (1.)

$$\mathbf{a}_{\lambda j} = \begin{cases} -\mathbf{f} \left(\frac{\lambda}{N}\right) \left(\frac{\lambda}{N}\right)^{j} \quad j=1,\dots,\mathbf{M} \\ \left(\frac{\lambda}{N}\right)^{j} \quad j=\mathbf{M}+1,\dots,\mathbf{M}+\mathbf{L}+1 \end{cases}$$
(17)

$$\mathbf{B} = \left[ f\left(\frac{1}{N}\right), f\left(\frac{2}{N}\right), \dots, f\left(\frac{N}{N}\right) \right]^{t}$$
(17)

باتوجهبهاین که تعداد معادلات از تعداد ضرایب بیشتر است، با استفاده از روش شبه وارون مور-پنروز ضرایب C موردنظر به دست خواهند آمد و برای بازیابی تصویر کافیست ضرایب در معادلهٔ اصلی قرار داده شود[25,9].

#### • روند فشردهسازی

برای هر پیکسل از یک تصویر ابرطیفی خم برازانده شده به امضای طیفی پیکسل را بهازای درجات مختلفی از چندجمله ای های صورت و مخرج تابع تقریب معرفی شده در رابطه چهار به دست می آوریم. با بازیابی امضای طیفی و مقایسه آن با امضای طیفی اصلی پیکسل و محاسبهٔ مجموع مربّعات خطا میتوان بهترین درجات صورت و مجموع مربّعات خطا میتوان بهترین درجات صورت و های جدید در ماتریس جدید داده ها ذخیره کرد. به این های جدید در ماتریس جدید داده ها ذخیره کرد. به این ترتیب به جای ذخیره سازی مقادیر شدّت روشنایی باندهای مختلف ضرایب خم تولید کنندهٔ این مقادیر روشنایی را که تعداد آنها بسیار کمتر از تعداد باندهای اولیّه است، ذخیره می کنیم. البته باید به این نکته توجه داشت که به دلیل استفاده از تابع کسری گویا باید برای داشت که به دلیل استفاده از تابع کسری گویا باید برای داشت که به دلیل استفاده از تابع کسری گویا باید درای داشت که به دلیل استفاده از تابع کسری گویا باید درای

سال ۱۴۰۲ شمارهٔ ۱ پیاپی ۵۵

معادلهٔ D=M+L+1 همواره برقرار باشد. در شکل۳ روند اجرای این روش فشردهسازی بهطور کامل نشان داده شده است[9, 10].الگوریتم فشردهسازی مذکور بر روی دادههای IPS و UP و DC-Mall پیادهسازی و نتیجه با روش PCA و DCT بهعنوان یک روش قوی و مطرح در فشردهسازی این دادهها مقایسه شد. بهازای مقدار معلوم و بهازای مقادیر مختلف M و L با شرط M و M+L+1 = D و بهازای مقادیر مختلف M15≥D≥15 عملیات بازسازی باندهای تصویر به کمک رابطهٔ چهار و بهازای λ=1,...,N انجام و برای هر مقدار D بهترین نتيجه استخراج شد. شكل۴ تصوير اصليIPS و بازیابی شدهٔ آن با روشهای IPCA ، RFCF و DCT در باند هفدهم را نشان میدهد. این تصویر گواهی بر توانایی روش RFCF در حفظ اطّلاعات مکانی در کنار اطّلاعات طیفی و حفظ ویژگیهای بصری تصویر هستند. نسبت فشردهسازی برابر با D/N خواهد بود. در شکل۵ امضای طیفی اصلی و بازیابی شده برای پیکسل واقع در سطر ۳۲ و ستون یک از مجموعه داده IPS بهعنوان پیکسلهای نمونهٔ رسم شده است. درجهٔ چندجملهای صورت و مخرج خم گویای برازانشده در این شکل L=12 و M=2 است. همان طور که این منحنی ها نشان می دهند، روش RFCF یک عملیّات هموارسازی در دامنهٔ طیفی است، با این حال، ممکن است این تقریب در بعضی از باندها دارای اعوجاج شديد باشد.

جدول ۱ دربر گیرندهٔ مقادیر PSNR برای تصاویر بازیابی شده از روش های RFCF و PCA برای تصاویر اصلی IPS و UP وDCMall وقتى كه D از ۳ تا ١۵ تغيير مى كند، است (تعداد ویژگیD در روش RFCF تعداد ضرایب ذخیرهشده و در روش PCA تعداد مؤلّفهٔ اصلی حفظ شده است). مقدار PSNR برای روش RFCF به درجات M و L وابسته است و برای هر مقدار M ،D و L بهترین PSNR انتخاب و در جدول قرار داده شده است. روش فشردهسازی RFCF در اکثر نرخهای فشردهسازی عملکرد بسیار بهتری نسبت به روش استفاده کننده از تبدیل مؤلّفههای اصلی داشته است[9,10]. علاوهبر نكات بالا روش فشردهسازى RFCF مزايايي نظير حجم محاسبات قابل قبول، فشرده-سازی بر روی طیف (مخصوص تصاویر ابرطیفی)، فرم بەنسبت سادە، شباھت تصوير بازيابىشدە بە تصوير اصلى هم از لحاظ حفظ اطَّلاعات مكاني و هم از لحاظ حفظ اطِّلاعات طيفي، امكان اعمال همزمان براي تمام پيكسلها را هم دارد اما بهدلیل استفاده از LS حساسیّت به نقاط پرت دارد. روش RFCF یک عملیّات هموارسازی در دامنهٔ طیف است. با این حال، ممکن است در برخی نقاط اعوجاج داشته

کاهش PSNR و شباهت تصویر بازسازی شده به تصویر اولیه  
می شود. به عنوان روشی برای بهبود عملکرد برازش خم می-  
خواهیم از بازهبندی امضای طیفی و انجام برازش خم،  
جداگانه روی هر بازه در جهت کاهش اعوجاج عمل کنیم.  
• مکعّب تصویر با ابعاد تصویر و ما تعداد باندهای  
بگیرید که در آن 
$$N_x \times N_y \times h_b$$
 بعاد تصویر و ما تعداد باندهای  
طیفی تصویر است. میخواهیم با انجام فشردهسازی،  
مکعّب تصویر را به ابعاد  $X \times N_y \times N_y \times n_z$  برسانیم که در آن  
مکعّب تصویر را به ابعاد  $X \times N_y \times n_z$  برسانیم که در آن  
at sack خرایب به دست آمده از برازش خم گویا است و  
 $S_i i = 1, 2, \dots, N_k$  خواهد شد. هر SRC را  
نسبت فشردهسازی برابر با  $N_b/M$  خواهد شد. هر SRC را  
نسبت فشردهسازی برابر با  $N_b/M$  خواهد شد. هر  $N_c$  را  
 $N_i + 1$   
فرض می شود. الگوریتم بازهبندی به شروع بازه i ام، باند  
فرض می شود. الگوریتم بازهبندی به شرح زیر است:  
 $Q_i = \sum_{k=N_i}^{k=N_b} |I(\lambda+1)-I(\lambda)| - |(\lambda)| |I(\lambda+1)| |(\lambda+1)| |($ 

اکنون برای هرکدام از بازههای بالا، یک خم گویا به صورت زیر برازان می کنیم.

$$\hat{\mathbf{f}}_{i}\left(\frac{\lambda}{N}\right) = \frac{\sum_{j=0}^{L_{i}} c_{i,j+M_{i}+1}\left(\frac{\lambda}{NS_{i}}\right)^{i}}{1 + \sum_{j=1}^{M_{i}} c_{i,j}\left(\frac{\lambda}{NS_{i}}\right)^{j}}$$
(19)

تعداد ضرایب  $d_i = L_i + M_i + 1$  و در هر بازه  $D = \sum_{i=1}^{i=s} d_i$  است. La باید با رعایت ایـن شـرط از 0 تـا  $d_i - 1$  تغییـر یابـد تـا بهترین

ضرایب با بهترین درجات از توابع کسری گویا بهعنوان مقادیر جدید مکعّب داده تصویر در نظر گرفته شوند. برای بازیابی تصویر نیز کافیست ضرایب در معادلهٔ اصلی قرار داده شود.

مقادیر روشنایی **SR**C محاسبه شود.

۳) تعداد قطعات انتخاب شود.

- ۴) بر روی SRC با شروع از نقطهٔ اول نقطهای انتخاب شود که مجموع قدر مطلق تفاضلات SRC از مجموع کل قدر مطلق تفاضلات تقسیم بر تعداد قطعات ناکمتر شود. این نقطهٔ پایان قطعهٔ اول است.
- ۵) با ادامهٔ حرکت بر روی SRC، مکان نقاط انتهایی سایر قطعات نیز مشخص شود.

سال ۱۴۰۲ شمارهٔ ۱ پیاپی ۵۵

باشد. برای رفع این معایب و بهبود عملکرد این روش، پیشنهادهایی در ادامه مطرح می شود.



(شکل-۴) تصویر اصلیIPS و بازیابیشدهٔ آن به سه روش RFCF و IPCA و DCT در باند ۱۷ و با تعداد ویژگی۱۴

(Figure 4) (a) The Original data of IPS and Reconstructed by (b) RFCF, (c) IPCA Methods.



(شکل-۵) نمودار باز تاب طیفی پیکسل نمونه در تصویر اصلی IPS و تصویر بازیابیشدهٔ آن به روش برازش خم (Figure 5) The SRC of a typical pixel and its approximated data by RFCF method.

# F-4- استفاده از بازهبندی بر روی SRC (IRFCF)

روش فشردهسازی ارائهشده در بخش پیشین، یک روش فشردهسازی با اتلاف است که بر ایدهٔ برازش خم بر نقاط نمودار بازتاب طیفی هر پیکسل از تصویر ابرطیفی استوار است. چنانکه در شکل۵ مشهود است خم برازان شده در برخی از نقاط دارای اعوجاج (گاهی شدید) است که سبب

- ۶) برای قطعه موردنظر یک برازشخم با تابع کسری گویا با درجه L<sub>i</sub> در صورت و درجه M<sub>i</sub> در مخرج انجام شود.
- ۷) قدم های۲ تا ۶ برای تمام پیکسلها در قطعه مورد نظر با طول متفاوت تکرار شود.
  - ۸) مقدار PSNR محاسبه میشود.
- از 0 تا 4،<sup>1</sup> تغییر یابند و M<sub>i</sub> ها با رعایت L<sub>i</sub> (۹ ها از 0 تا 4) شرط 4:hM<sub>i</sub> انتخاب شوند.
  - . انتخاب شوند.  $M_i$  و  $M_i$  انتخاب شوند.  $L_i$  (۱۰
- ۱۱) قطعهٔ بعدی انتخاب شود و قدم شش برای آن اجرا شود.
- ۱۲) ضرایب حاصل بهعنوان مقادیر جدید مکعّب دادهٔ تصویر در نظر گرفته شوند.
- آزمایش نخست: بازهبندی و برازش خم چندجملهای

نخست، بهعنوان حالت خاصی از برازش خم تابع کسری گویا در هر بازه از یک تابع چندجملهای استفاده میکنیم.

$$\hat{\mathbf{f}}_{i}\left(\frac{\lambda}{N}\right) = \sum_{j=0}^{L_{i}} \mathbf{c}_{i,j+1}\left(\frac{\lambda}{N}\right)^{j} \tag{14}$$

استفاده از این تابع در فشردهسازی این امکان را میدهد تا هم تابع تقریب ساختار و فرم سادهتری داشته باشد، و هم موجب بالاتر رفتن سرعت در عملکرد آن شود و با بازهبندی از توابع با درجات کوچکتر در هر قسمت استفاده میشود[26]. در شکل۶ روند اجرای این حالت بهطور کامل نشان داده شده است.

برای بررسی عملکرد این روش و مقایسهٔ آن با روش برازش خم کسری گویا بدون بازهبندی (RFCF) از تصاویر UP·IPS و DC-Mall استفاده شده است. تعداد بازههای هر SRC از یک تا پنج تغییر داده شد و با انتخاب مقادیر D به فرم35...,L (D = 15,20,...35 از شرط N به فرم35...,L (D = 15,20,...35 از شرط N به ازای از شرط از شرط های تصویر به کمک رابطهٔ ۱۷ بهازای N,...,I= مای تصویر به کمک رابطهٔ ۱۷ بهازای RFCF انجام MCT JPCA و IPCA در آزمایش نخست در باند هفدهم را نشان میدهد.

سال ۱۴۰۲ شمارهٔ ۱ پیاپی ۵۵



RFCF (شکل–۷) تصویر بازیابیشده IPS اب روشهای) DCT ،IPCA و IRFCF(Ex.1) در باند ۱۷ و با تعداد ویژگی ۱۴ (Figure 7) (a) The Reconstructed data of IPS by RFCF, (b) IPCA, (c) DCT, (d) IRFCF(Ex.1) Methods

در شکل $\Lambda$  (الف و ب و ج) امضاهای طیفی پیکسل (۱و ۷۰) بهعنوان پیکسل نمونه از دادهٔ اصلی و دادهٔ باز یابی شده به روش بیان شده در این بخش بهازای S=5 زیر بازه نشان داده شده است. منحنی امضای طیفی در داده-های IPS و UP با استفاده از تابع چندجملهای با تعداد ضرایب 25=D و چندجملهای درجه L=4 تقریب زده شده اند. اما برای دادهٔ DC-Mall درجه L=4 انتخاب شدهاند. همان طور که مشاهده می شود، زمانی که نمودار بازتاب طیفی به بازههای مجاور و ناهم پوشان تقسیم می شود، هم اعوجاج کاهش می ابد و هم تقریب بهتری در فشرده-سازی به دست می آید.

جدول ۲ نشان دهندهٔ مقادیر PSNR برای تصاویر بازیابی-شده از روشهای RFCF و IRFCF، در حالت استفاده از تابع چند جمله ای با شرایط ذکر شده است. برای هر مقدار نتایج مربوط به مناسب ترین تعداد بازه (متناظر با مقدار PSNR بالاتر) انتخاب و در جدول قرار داده شده است.

بهطور خلاصه روش پیشنهادی (IRFCF) در حالت برازش چندجملهای مزایای زیر را دارد: برازش دقیق تر منحنی امضای طیفی کاهش اعوجاجهای بهوجودآمده در بعضی از نقاط ساختار و شکل ساده تر معادلات و محاسبات ساده تر در هر بازه به دلیل استفاده از توابع با درجات پایین تر



(شکل–۸) نمودار بازتاب طیفی پیکسل نمونه در تصویر اصلی (الف) IPS (ب) UP و (ج)DC-Mall و تصویر بازیابی شدهٔ آنها به روش بازهبندی و برازش خم با استفاده

از تابع چندجملهای (Figure 8) The SRC of a typical pixel and its approximated data by IRFCF Method in first experiment.

آزمایش دوم: بازهبندی و برازش خم کسری گویا
 و انتخاب بهینهٔ درجات با توجه به عملکرد در
 هر بازه از امضای طیفی تمام پیکسلها

در آزمایش دوم از این روش برازش خم در هر بازه با استفاده از یک تابع کسری گویا استفاده میشود. بهترین درجهٔ صورت و مخرج پس از اعمال برازش خم در هر تکه از همهٔ پیکسلها یعنی هر بازه از کل تصویر انتخاب میشود (البته بهطور مثال، بازهٔ اول در تمامی پیکسلها برابر نیست و طول هر بازه در هر پیکسل با توجه به نقطهٔ انتهایی بازهٔ آن انتخاب میشود). در شکل۹ روند اجرای آزمایش دوم بهطور کامل نشان داده شده است.

به منظور بررسی عملکرد این روش و مقایسهٔ آن با روش برازش خم کسری گویا بدون بازه بندی (RFCF) تعداد بازههای5,...,5 = 8 و به ازای مقدار معلوم D به فرم5,...,5 = 10، بهترین  $L_i$  و مقدار معلوم J به شرط  $L_i = 15,20,...35$  و عملیّات فشرده سازی شرط  $L_i = 15,20,...35$  و عملیّات فشرده سازی شرط  $L_i = 15,20,...35$  و به ازای فشرده سازی و بازسازی باندهای تصویر به کمک رابطهٔ ۱۶ به ازای و بازسازی باندهای تصویر به کمک رابطهٔ ۱۶ به ازای نتیجه به ازای بهترین تعداد بازه استخراج شد. شکل ۱۰ تصویر بازیابی شدهٔ IRFCF با روش های باند ۳۴ است.

شکل ۱۱ (الف و ب و ج ) امضاهای طیفی پیکسل (۱و۷۰) بهعنوان پیکسل نمونه از دادهٔ اصلی و دادهٔ بازیابی شده به روش ارائه شده از این تصاویر که به یک تا پنج بازه تقسیم شده را نشان می دهد. منحنی امضای طیفی در داده IPS و DC-Mall با استفاده از تابع کسری گویا با تعداد ضرایب (D=35) تقریب زده شده اند و منحنی امضای طیفی داده UP با استفاده از تابع کسری گویا با تعداد ضرایب (D=25) تقریب زده شده اند.

جدول ۳ نشاندهنده مقادیر PSNR برای تصاویر بازیابی شده از روشهای RFCF و RFCF در آزمایش دوم با شرایط ذکر شده است. برای هر مقدار D نتایج مربوط به مناسب ترین درجات و تعداد بازه (متناظر با مقدار به مناسب ترین درجات و تعداد بازه (متناظر با مقدار PSNR بالاتر) انتخاب و در جدول قرار داده شده است. در جدول ۴ بهعنوان نمونه و بهازای مقدار معلوم D به فرم35,...,35 = D برای سه تصویر مورد نظر همچنین بهازای بهترین تعداد بازه S مقادیر درجات L و M تمام بازه ها نشان داده شده است.

بهطور خلاصه روش پیشنهادی (IRFCF) در حالت برازش خم کسری گویا و انتخاب بهینهٔ درجات با توجه به عملکرد در هر بازه از کل پیکسلها مزایای زیر را دارد:

- برازش دقیق ر منحنی امضای طیفی (پیدا کردن تابع تقریب بهتر و دقیق تر)
  - کاهش اعوجاجهای بهوجودآمده در بعضی از نقاط
- محاسبات سادهتر در هر بازه به دلیل استفاده از توابع با







(شکل-۱۰) تصویر بازیابی شده DC-Mall با روشهای DCT (IPCA ،RFCF و IRFCF(Ex.2) در باند ۳۴ و

با تعداد ویژگی ۱۵ (Figure 10) (a) The Reconstructed data of DC-Mall by RFCF(b) IPCA, (c) DCT, (d) IRFCF Method in second experiment





(شکل – ۱۱) نمودار باز تاب طیفی پیکسل نمونه در تصویر اصلی الف) IPS و ب) UP و ج) DC-Mall و تصاویر بازیابی شده آنها به روش بازه بندی و برازش خم در آزمایش دوم (Figure 11) The SRC of a typical pixel and its approximation by IRFCF Method in second experiment.



#### برای دادههای IPS وUP وUP برای دادههای

(Table 2) Comparing PSNR of RFCF, IRFCF Method in first Experiment for IPS, UP, DC-Mall Data Set

	Indian Pines Site			Comp Rate (N/D)		Pavia University		Comp Rate (N/D)		DC-Mall				
Comp Rate (N/D)	The Best Ns	L	IRFCF PSNR (Ex.1)	RFCF PSNR		The Best Ns	L	IRFCF PSNR (Ex.1)	RFCF PSNR		The Best Ns	L	IRFCF PSNR (Ex.1)	RFCF PSNR
200/15	1	14	47.12	48.55	103/15	5	2	58.57	34.54	191/15	1	14	49.86	49.86
200/20	5	3	51.15	44.38	103/20	4	4	59.67	43.89	191/20	1	19	38.43	38.43
200/25	2	11	73.49	45.71	103/25	3	7	64.55	39.12	191/25	3	7	43.69	42.80
200/30	4	5	44.88	45.94	103/30	4	6	53.00	40.51	191/30	4	6	47.20	39.57
200/35	5	6	42.26	51.44	103/35	3	10	46.43	49.77	191/35	4	7	64.40	39.47

(جدول-۳) مقایسه عملکرد IRFCF در آزمایش دوم در مقابل RFCF بر حسب معیار

در داده های IPS وUP وDC-Mall در داده های

(Table 3) Comparing PSNR of RFCF, IRFCF Method in second experiment for IPS, UP, DC-Mall Data Set

C	In	dian Pines	Site	G	Pa	via Univer	sity	G	DC-Mall					
Comp Rate (N/D)	The Best Ns	IRFCF PSNR (Ex.2)	RFCF PSNR	Comp Rate (N/D)	The Best Ns	IRFCF PSNR (Ex.2)	RFCF PSNR	Comp Rate (N/D)	The Best Ns	IRFCF PSNR (Ex.2)	RFCF PSNR			
200/15	4	52.00	48.55	103/15	3	35.05	34.54	191/15	1	49.86	49.86			
200/20	1	44.38	44.38	103/20	1	43.89	43.89	191/20	1	38.43	38.43			
200/25	2	73.49	45.71	103/25	2	43.79	39.12	191/25	1	42.80	42.80			
200/30	1	45.94	45.94	103/30	1	40.51	40.51	191/30	4	54.63	39.57			
200/35	1	51.44	51.44	103/35	1	49.77	49.77	191/35	3	39.50	39.47			

(جدول-۴) مقادیر درجات L و M در تمام بازههای امضای طیفی دادههای IPS و UP و DC-Mall در آزمایش دوم (Table 4) The best value of L, M for all intervals in IRFCF Method in second experiment for IPS, UP, DC-Mall Data Set

Compagian	Indian Pines Site											
Rate (N/D)	The Best Ns	The Best (L, M) in Section1	The Best (L, M) in Section2	The Best (L, M) in Section3	The Best (L, M) in Section4	The Best (L, M) in Section5	IRFCF PSNR (Ex.2)					
200/15	4	(2,0)	(2,0)	(2,0)	(0,2)	-	52.00					
200/20	1	(18,1)	-	-	-	-	44.38					
200/25	2	(11,0)	(11,0)	-	-	-	73.49					
200/30	1	(27,2)	-	-	-	-	45.94					
200/35	1	(29,5)	-	-	-	-	51.44					
Compression	Pavia University											
Rate (N/D)	The Best Ns	The Best (L, M) in Section1	The Best (L, M) in Section2	The Best (L, M) in Section3	The Best (L, M) in Section4	The Best (L, M) in Section5	IRFCF PSNR (Ex.2)					
103/15	3	(4,0)	(4,0)	(4,0)	-	-	35.05					



103/20	1	(17,2)	-	-	-	-	43.89
103/25	2	(3,8)	(11,0)	-	-	-	43.79
103/30	1	(29,0)	-	-	-	-	40.51
103/35	1	(16,18)	-	-	-	-	49.77
				DC-Mall			
Compression		The Best	The Best	The Best	The Best	The Best	IDECE
Rate	The	of	of	of	of	of	DSND
(N/D)	Best Ns	(L, M) in	(L, M) in	(L, M) in	(L, M) in	(L, M) in	FSINK
		Section1	Section2	Section3	Section4	Section5	(EX.2)
191/15	1	(14.0)	-	-	-	-	49.86
101/20	1	(10,0)					20 12
191/20	1	(19,0)	-	-	-	-	36.45
191/20 191/25	1	(19,0) (10,13)	-	-	-	-	42.80
191/20 191/25 191/30	1 1 4	(19,0) (10,13) (6,0)	- - (6,0)	- - (6,0)	- - (6,0)	-	42.80 54.63

 آزمایش سوم: بازهبندی و برازش خم با استفاده از تابع کسری گویا در هر بازه و انتخاب بهینهٔ درجات با توجه به عملکرد در تمام طول امضای طیفی در کل پیکسلهای تصویر

در آزمایش سوم از این روش، برازش خم در هر تکّه با استفاده از یک تابع کسری گویا انجام میشود. بهترین درجهٔ صورت و مخرج پس از اعمال برازش خم برای مجموعهٔ تمام بازهها در کل پیکسلهای تصویر انتخاب میشود. در شکل۱۲ روند اجرای آزمایش سوم بهطور کامل نشان داده شده است.

تعداد بازهها 5,...,5 = و بهازای مقدار معلوم D به فرم 5  $M_i$  و  $L_i$  بهترین D = 15,20,...35 و م عملکرد در تمام طول امضای طیفی کل پیکسلها و با شرط  $L_i+M_i+1=D/S$  انتخاب و عملیات فشرده-سازی و بازسازی باندهای تصویر به کمک رابطهٔ ۱۶ سازی و بازسازی باندهای تصویر به کمک رابطهٔ ۱۶ بهازای  $N_i$ ...,ا= انجام شد. برای هر مقدار D بهترین نتیجه بهازای بهترین تعداد بازهها استخراج شد.

جدول۵ نشاندهندهٔ مقادیر PSNR برای تصاویر باز-یابی شده از روش های RFCF و IRFCF در آزمایش سوم با شرایط ذکرشده است. برای هر مقدار D نتایج مربوط به مناسب ترین درجات و تعداد بازهٔ (متناظر با مقدار PSNR بالاتر) انتخاب و در جدول قرار داده شده است.

شکل۱۳ تصویر بازیابیشدهٔ باند هفده IPS با روش-های IRFCF ، IPCA ، RFCF را نشان می-دهد. این روش توانسته بهخوبی تقریبی از تصویر

امضاهای طیفی پیکسل (۱و ۷۰) به عنوان پیکسل نمونه از دادهٔ اصلی و دادهٔ بازیابی شده به روش بیان شده در این بخش به ازای E=S زیر بازه نشان داده شده است. منحنی امضای طیفی در داده IPS با استفاده از تابع کسری گویا با تعداد ضرایب (D=20) و با چندجملهای درجه (0=4, E=J) و در دادهٔ UP (E=3, M=0) و (D=15) UP و در دادهٔ -DC دادهٔ ID (E=3, M=0) و (D=35) Mall تصویر E=3 تقریب زده شده است. همان طور که مشاهده می شود، زمانی که نمودار بازتاب طیفی به بازه های مجاور و ناهم پوشان تقسیم می شود، اعوجاج کاهش می یابد و تقریب بهتری در فشرده-سازی به دست می آید.

اصلي را به دست آورد. در شكل۱۴ (الف و ب و ج)

با توجّه به بررسیهای انجامشده بر روی سه دادهٔ ابرطیفی، روش پیشنهادی (IRFCF) در حالت برازش خم با استفاده از تابع کسری گویا در هر بازه و پیدا کردن بهترین درجهٔ صورت و مخرج در کل تصویر برازش دقیقتری از منحنی امضای طیفی (پیدا کردن تابع تقریب بهتر و دقیقتر) و اعوجاج کمتری هم نسبت به روش دوم دارد.

در هر بازه بهدلیل استفاده از توابع با درجات پایین محاسبات ساده تر شده است. روش پیشنهادی (IRFCF) در آزمایش اول بهدلیل استفاده از تابع چندجملهای محاسبات ساده تری نسبت به حالتهای دیگر دارد؛ اما از نظر تقریب خوب امضای طیفی و برازش دقیق تر منحنی عملکرد ضعیف تر و همچنین مقدار PSNR کمتری هم نسبت به حالتهای دیگر دارد.



سال ۱۴۰۲ شمارهٔ ۱ پیاپی ۵۵

[ Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2025-07-31



(شکل–۱۵) روند فشردهسازی در روش پیشنهادی دوم (Figure 15) The process of implementing the SGRFCF method



(د) SGRFCF

۱۶ (شکل–۱۶) تصویر بازیابیشدهٔ UP با روشهای RFCF، DCT JPCA و SGRFCF در باند ۲۰ و با تعداد ویژگی ۱۵ (Figure 16) (a) The Reconstructed data of UP by RFCF (b) IPCA, (c) DCT, (d) SGRFCF Method.

ج) DCT



ضرایب متناظر بهعنوان ویژگیهای جدید در ماتریس جدید دادهها ذخیره می شوند. با بازیابی امضای طیفی و مقایسهٔ آن با امضای طیفی اصلی پیکسل و محاسبهٔ مجموع مربّعات خطا می توان بهترین درجات صورت و مخرج تابع تقریب و همچنین بهترین درجات و طول پنجرهٔ هموارساز را انتخاب کرد. بیان الگوریتم به صورت شبه کد در زیر می آید: منحنى بازتاب طيفى تمام ييكسل هاى داده موردنظر با درجهD<sub>SG</sub> و طول پنجرهٔW هموrthttار شود. انتخاب پیکسل اول از دادهٔ هموارشده. بر روی خم امضای طیفی برازش خم با تابع کسری گویا با درجه L در صورت و درجه M در مخرج انجام شود. ۴) بهترین ضرایب با بهترین درجات از توابع کسری گویا بهعنوان دادههای جدید ذخیره شود. ۵) قدم های۲ تا ۴ برای تمام پیکسلها تکرار شود. ۶) مقدار PSNR محاسبه می شود.  $M{+}L{+}1$  = הית היו לא או היא היא שו היא היא שו היא היא שו היא ש<br/>  $D{-}1$  ד ו לL (VD انتخاب شود. کا درجه هموارساز  $D_{SG}$  از 2 تا 4 تغییر یابد و طول پنجرهٔ ( $\Lambda$ 

هموارساز به فرم W = 5,7,9,...,21 انتخاب شود.

و M و  $D_{SG}$  و B متناظر با بهترین PSNR انتخاب L (۹ شوند.

 ۱) ضرایب حاصل بهعنوان مقادیر جدید مکعّب دادهٔ تصویر درنظر گرفته شوند.

در شکل۱۵ روند اجرای روش SGRFCF بهطور کامل نشان داده شده است.

شکل ۱۶ تصویر بازیابی شدهٔ UP با روش های RFCF، RFCF، DCT و SGRFCF در در باند بیستم را نشان می دهد. همچنین در شکل ۱۷ (الف و ب و ج) به ترتیب، امضای طیفی اصلی و بازیابی شده برای پیکسل واقع در سطر ۷۶ و ستون یک از مجموعه دادهٔ IPS و پیکسل واقع در سطر و ستون یک از مجموعه دادهٔ UP و پیکسل واقع در سطر ۲۳ و ستون یک از مجموعه دادهٔ IPS بعنوان پیکسل های نمونه رسم شده است.



IPCA ،RFCF (شکل –۱۳) تصویر بازیابی شدهٔ IPS با روشهای IPCA) و IRFCF(Ex.3 در باند ۱۷ و با تعداد ویژگی ۱۵ (Figure 13) (a) The Reconstructed data of IPS by RFCF (b) IPCA, (c) DCT, (d) IRFCF Method in third experiment.



ج) DCT (د) IRFCF(Ex.3) (د) (د) شکل-۱۴) نمودار بازتاب طیفی پیکسل نمونه در تصویر اصلی

(الف) IPS و (ب) UP و (ج) DC-Mall و تصاویر بازیابیشدهٔ آنها به روش بازهبندی و برازش خم در آزمایش سوم (Figure 14) The SRC of a typical pixel and its approximation by

IRFCF Method in the third experiment

# ۲-۴- بهبود فشردهسازی RFCF با استفاده از فیلتر هموارساز (SGRFCF) Savitsky Golay

در روش ارائهشده روش فشردهسازی با استفاده از برازش خم پس از اعمال پیش پردازشی به فرم فیلترینگ Savitsky-Golay انجام خواهد شد؛ که در این صورت، نخست، خم امضای طیفی هر یک از پیکسلهای دادهٔ اصلی با استفاده از فیلتر Savitsky-Golay هموار شده و سپس با استفاده از تابع کسری گویا تقریب زده می شوند. سپس

IPCA بر حسب معيار PSNR برای داده (Table 6) Comparing PSNR of IPCA, RFCF, SGRFCF Method for IPS Data Set

Comm	Indian Pine Site									
Rate N/D	D	w	Best (L, M)	PSNR SG RFCF	PSNR RFCF	PSNR IPCA				
200/3	3	21	(0,2)	30.40	30.31	29.33				
200/4	3	15	(2,1)	58.36	25.00	26.78				
200/5	3	5	(3,1)	38.59	26.83	31.46				
200/6	3	21	(0,5)	74.50	34.28	48.80				
200/7	3	19	(6,0)	73.07	27.78	56.69				
200/8	3	17	(3,4)	55.43	34.90	40.37				
200/9	4	7	(2,6)	60.37	45.59	55.83				
200/10	4	13	(2,7)	59.30	47.53	39.62				
200/11	2	15	(7,3)	71.45	34.98	43.15				
200/12	3	21	(0,11)	75.64	30.04	36.62				
200/13	3	9	(2,10)	72.18	31.33	35.55				
200/14	2	13	(12,1)	71.45	60.17	35.02				
200/15	2	21	(8,6)	64.44	48.55	37.73				
200/20	3	13	(12,7)	60.16	44.38	31.19				
200/25	3	15	(1,23)	63.79	45.71	29.66				
200/30	3	11	(20,9)	95.65	45.94	32.25				
200/35	4	7	(24,10)	73.31	51.44	30.62				

(جدول-۷) مقایسه عملکرد SGRFCF در مقابل RFCF و

UP بر حسب معيار PSNR براى داده (Table 7) Comparing PSNR of IPCA, RFCF, SGRFCF Method for UP Data Set

Comp	Pavia University										
Rate N/D	D	w	Best (L, M)	PSNR SG RFCF	PSNR RFCF	PSNR IPCA					
103/3	4	13	(0,2)	41.28	23.57	36.67					
103/4	4	17	(2,1)	44.97	26.90	36.64					
103/5	4	19	(1,3)	62.83	25.93	39.04					
103/6	3	21	(1,4)	48.34	35.03	27.95					
103/7	2	5	(1,5)	47.66	28.02	37.75					
103/8	4	5	(2,5)	46.94	46.93	29.51					
103/9	3	11	(3,5)	60.20	30.14	37.88					
103/10	4	17	(3,6)	48.16	31.55	41.06					
103/11	2	17	(4,6)	47.85	31.71	34.22					
103/12	3	11	(0,11)	61.64	31.16	36.13					
103/13	4	13	(7,5)	59.57	32.73	39.20					
103/14	3	17	(8,5)	56.47	42.74	40.42					
103/15	3	11	(13.1)	74.87	34.54	44.56					
103/20	2	15	(13,6)	66.61	43.89	53.05					
103/25	3	17	(17,7)	63.42	39.12	48.19					
103/30	4	15	(12,17)	51.83	40.51	53.51					
103/35	2	11	(16,18)	64.43	49.77	52.56					

(جدول۸) مقایسهٔ عملکرد SGRFCF در مقابل RFCF و IPCA بر

DC-Mall برای داده PSNR حسب معیار (Table 8) Comparing PSNR of IPCA, RFCF, SGRFCF Method for DC-Mall Data Set

Comm	DCMall											
Rate N/D	D	w	Best (L, M)	PSNR SG RFCF	PSNR RFCF	PSNR IPCA						
191/3	3	13	(1,1)	49.09	31.91	34.57						
191/4	3	21	(1,2)	39.20	37.09	33.06						
191/5	2	21	(4,0)	49.13	48.43	34.55						
191/6	4	11	(0,5)	44.34	31.14	40.21						
191/7	3	11	(3,3)	63.80	51.79	35.88						
191/8	4	11	(4,3)	50.77	30.85	34.42						
191/9	2	17	(7,1)	43.53	30.59	36.24						
191/10	4	5	(4,5)	76.04	76.04	36.02						
191/11	2	7	(8,2)	59.05	43.72	33.93						
191/12	4	17	(8,3)	69.44	57.11	34.04						
191/13	2	13	(12,0)	57.47	51.00	34.65						
191/14	2	7	(13,0)	73.40	66.71	34.46						
191/15	4	21	(7,7)	65.18	49.86	34.18						
191/20	3	17	(11,8)	102.30	38.43	33.98						
191/25	4	13	(14, 10)	60.86	42.80	48.10						
191/30	4	17	(4,25)	64.59	39.57	53.90						
191/35	2	17	(23.11)	70.52	39.47	63.90						

درجه و طول پنجرهٔ هموارساز و همچنین درجات چندجملهایهای صورت و مخرج خمهای گویای برازان شده در این شکل به ترتیب عبارتند از  $E = D_{SG}$  و P = 0(M=11, L=0) و W=11 و (M=10, L=24) (M=10, L=24) (M=10, L=24) (DC-Mall) (M=8, L=11 و ( M=8, L=11) (M=10, L=24) (DC-Mall) (M=8, L=11 و ( M=10, L=24) ( M=10, L=24) او T = 0 ( M=10, L=24) ( M=10, L

مقدار PSNR برای روش SGRFCF به D<sub>SG</sub> و W و همچنین، به M و Lهای متفاوت وابسته است و برای هر مقدار D M و L و D<sub>SG</sub> و W بهترین PSNR انتخاب و در جدول قرار داده شده است.

در روش پیشنهادی (SGRFCF) به دلیل استفاده از فیلتر هموارساز، اعوجاجها به خوبی کاهش پیدا کرده است و امضای طیفی به دست آمده هموارتر شده است، اما از لحاظ دقت به دلیل این که بازه بندی نشده است، به خوبی روش پیشنهادی نخست نیست. از طرفی به دلیل این که امضای طیفی در بیشتر باندها به طور دقیق از امضای طیفی اصلی عبور کرده است، مقدار PSNR خوبی دارد.





# (شکل–۱۷) نمودار بازتاب طیفی پیکسل نمونه در تصویر اصلی (الف) IPS و (ب) UP و (ج) DC-Mall و تصویر بازیابیشدهٔ آن به

روش هموارسازی با SVG و برازش خم (Figure 17) The SRC of a typical pixel and its approximation

by SGRFCF Method.





۳-۴- ترکیب بازهبندی و پیشپردازش هموارسازی Savitsky Golay

روش پیشنهادشده در این بخش از ترکیب دو روش ارائه شدهٔ پیشین تشکیل شده است. در این روش، نخست، خم امضای طیفی از هر پیکسل از دادهٔ ابرطیفی توسط فيلتر هموارساز Savitsky-Golay با درجه هموارساز D<sub>SG</sub> و طول پنجره هموارسازی W هموار شده؛ سپس هر SRC را  $i = 1, 2, ..., S S_i, det is a det is$ تقسیم میکنیم که نقطه آغازین بازه i ام، باند N<sub>i-1</sub>+1 ام و نقطه پایانی آن باند  $N_i$  ام است و  $N_0$  فرض می شود. مقدار L<sub>i</sub> باید با رعایت این شرط از 0 تا L<sub>i</sub> و همچنین D<sub>SG</sub> از 2 تا 4 و W به فرم 5,7,...,21 W تغییر یابد تا بهترین ضرایب با بهترین درجات از توابع کسری گویا و بهترین طول پنجره و درجه هموارسازی بهعنوان ویژگی-های جدید در ماتریس جدید دادهها ذخیره شوند. با بازیابی امضای طیفی و مقایسهٔ آن با امضای طیفی اصلی پیکسل و محاسبة مجموع مربّعات خطا مىتوان بهترين درجات صورت و مخرج تابع تقریب و همچنین، بهترین درجات و طول پنجرهٔ هموارساز را انتخاب کرد.

بیان الگوریتم به صورت شبه رمز در زیر می آید:

- ۱) منحنی بازتاب طیفی تمام پیکسلهای دادهٔ موردنظر با درجهٔ D<sub>SG</sub> و طول پنجرهٔ W هموار شود.
  - ۲) انتخاب پیکسل اول از دادهٔ هموارشده.
- ۳) برای این پیکسل مجموع قدر مطلق تفاضلات متوالی مقادیر روشنایی SRC محاسبه شود.

۴) تعداد قطعات انتخاب شود.

- ۵) بر روی SRC با شروع از نقطهٔ اول نقطهای انتخاب شود که مجموع قدر مطلق تفاضلات SRC از مجموع کل قدر مطلق تفاضلات تقسیم بر تعداد قطعات ناکمتر شود. این نقطهٔ پایان قطعهٔ اول است.
- ۶) با ادامه حرکت بر روی SRC مکان نقاط انتهایی سایر قطعات نیز مشخص شود.
- ۲) برای قطعه مورد نظر یک برازشخم با تابع کسری گویا با درجه L<sub>i</sub> در صورت و درجه M<sub>i</sub> در مخرج انجام شود.
- ۸) قدم های۲ تا ۷ برای تمام پیکسلها در قطعه مورد نظر با طول متفاوت تکرار شود.
  - ۹) مقدار PSNR محاسبه می شود.
- ل i (۱۰ تا di-1 تغییـر یابـد و M<sub>i</sub>بـا رعایـت شـرط Li (۱۰ di=Mi+Li + 1 انتخاب میشود.
- (۱۱) درجه هموارساز D<sub>SG</sub> از 2 تــا 4 تغییـر یابـد و طـول پنجره هموارساز به فرم W = 5,7,9,...,21 انتخـاب میشود.

- PSNR و M و  $D_{SG}$  و W و L (۱۲ L انتخاب شوند.
- ۱۳) ضرایب حاصل بهعنوان مقادیر جدید مکعّب داده تصویر درنظر گرفته شوند.
- در شــکل ۱۸ رونــد اجـرای روش پیشــنهادی سـوم (SGIRFCF) بهطور کامل نشان داده شده است.

جهت بررسی عملکرد این روش(SGIRFCF) و مقایسه بهتر آن با روش اصلی (RFCF) از تصاویر SGIRFCF) و مقایسه بهتر استفاده شده است. طول پنجره و درجه هموارسازی با شرط  $10^{-1} \leq 0 \leq 2 \leq 2$  جهت هموارسازی انتخاب شد. تعداد بازهها 5,...,1 =3و بهازای مقدار معلوم D به فرم بازهها 5,...,2 استرین L<sub>i</sub> و معارت فشردهسازی و بازسازی  $10^{-1} = 10^{-1}$  بهترین ا باندهای تصویر به کمک رابطه ۱۶ بهازای Nو...و1 با روشهای شد. شکل ۱۹ تصویر بازیابی شده SGIRFCF با روشهای شد. شکل ۱۹ تصویر بازیابی شده SGIRFCF با روش مای میدهد.

در شکل ۲۰ (الف و ب و ج) به ترتیب امضای طیفی اصلی و بازیابی شده به روش بیان شده در این بخش بهازای S=S زیر بازه برای پیکسل واقع در سطر ۷۰ و ستون ۱ از مجموعه داده IPS و UP و DC-Mall بهعنوان پیکسل های نمونه رسم شده است. درجه و طول پنجره هموارساز و همچنین درجات چندجملهایهای صورت و مخرج خمهای گویای برازان شده در این شکل به ترتیب عبارتند از 2=  $_{9}$  W=11  $_{9}$  D<sub>SG</sub> =3 (IPS) (M=0 , L=7)  $_{9}$  W=13  $_{9}$  D<sub>SG</sub> (M=0 , L=4) , W=21 , D\_{SG} =3 (UP) (M=1 , L=13) (DC-Mall). همان طور که مشاهده می شود منحنی رسم شده با استفاده از تابع تقریب بدون اعوجاج است و بسیار نزدیک به منحنی امضای طیفی داده اصلی است جدول ۱۰ دربر گیرنده مقادیر PSNR برای تصاویر بازیابی شده از روش های RFCF و SGIRFCF برای تصاویر IPS و UP W = 0وقتى كه با  $2 < D_{SG} < 4$  و طول پنجره به فرم DC-Mall 5,7,...,21 هموار شده است و D از ۳ تا ۱۵ تغییر می کند میباشد. برای هر مقدار M ،D و L و D<sub>SG</sub> و W و تعداد بازه (متناظر با مقدار PSNR بالاتر) انتخاب و در جدول قرار داده شده است.

از این رو در روش پیشنهادی (SGIRFCF) به جهت از بین بردن این اعوجاجها و نزدیک کردن خم امضای طیفی تصویر بازیابی شده به مقادیر اصلی از فیلتر هموارساز Savitsky Golay استفاده شده و به جهت بالاتر بردن دقت و همچنین مقادیر PSNR و بهبود کیفیت تصویر بدست آمده از تقسیم بازه طیفی به بازههای کوچکتر مجاور و ناهمپوشان استفاده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده

از بخشهای گذشته روش فشردهسازی (SGIRFCF) بسیار کارآمد بوده و کیفیت تصاویر بازیابی شده و همچنین امضای طیفی آن بسیار نزدیک به تصویر اصلی میباشد.

## مقایسه روش های پیشنهادی

جدول ۱۱ نشاندهنده مقادیر PSNR برای تصاویر بازیابی شده از همه روشهای پیشنهادی و روش اصلی RFCF و همچنین روش PCA و DC-Mall تصاویر IPS و UP و IDC-Mall میباشد. با توجه به مقادیر PSNR تمامی روشها بر روی هر چهار تصویر میتوان به این نتیجه دست یافت که روش پیشنهادی سومSGIRFCF از تمام روشهای مورد مقایسه بهتر عمل کرده و نتایج بهتری دارد.

# پیچیدگی محاسباتی

جدول ۱۲ پیچیدگی محاسباتی (تعداد ضرب) روش های پیشنهادی و رقیب را نشان می دهد. در این جدول M تعداد پیکسل های تصویر، N بعد طیفی، D بعد بردار فشرده و S تعداد بازه ها است.. از آنجایی که درجه هموارسازی چند جمله ای (n) در فیلتر SG بین ۲ تا ۴ است و پیچیدگی فیلتر SG مطابق با مرتبه 2n و لگاریتم SG ناچیز است. جدول ۲۲ حاوی مقادیر تقریبی پیچیدگی برای مجموعه داده های IPS است.



ج) DCT

(شکل–۱۹) تصویر بازیابی شده DC-Mall به دو روش RFCF و

(د) SGIRFCF

SGIRFCF در باند ۳۴ و با تعداد ویژگی ۱۵ (Figure 19) (a) The Reconstructed data of DC-Mall by RFCF (b) IPCA, (c) DCT, (d) SGIRFCF Method.



(شکل-۲۰) نمودار بازتاب طیفی پیکسل نمونه در تصویر اصلی (الف) IPS و (ب) UP و (ج) DC-Mall و تصاویر بازیابی شده آنها

به روش SGIRFCF (Figure 20) The SRC of a typical pixel and its approximation by SGIRFCF Method.

# ۵- جمع بندی

در ابتدای این مقاله روش (RFCF) معرفی شد که بر مبنای طبيعت هندسي- جبري خمهاي امضاي طيفي پيكسلها و اطِّلاعات مربوط به ترتیب نقاط روی این خمها است در واقع امضای طیفی پیکسلها بهصورت اعضای یک دنباله در نظر گرفته می شوند. در این روش تلاش بر این است که با برازش خم کسری گویا (کسری با یک چندجملهای در صورت و یک چندجملهای در مخرج) به هر SRC از ضرایب چندجمله ای های صورت و مخرج به عنوان اعضای بردار ویژگی جدید استفاده شود. یکی از مزیت های این روش در این است که بر خلاف روشهای دیگر، نحوه تولید ویژگیهای جدید آن پیکسل به پیکسل است و این ویژگی باعث می شود تا پیاده سازی الگوریتم به صورت موازی امکان پذیر باشد. در این روش بهمنظور پیدا کردن یک تقریب خوب برای منحنی بازتاب طیفی از یک تابع کسری گویا استفاده شد، به این دلیل که اولا قابلیت منطبق شدن بر گروه وسیعتری از اشکال نسبت به الگو چندجملهای دارد و ثانیا با درست است که توابع چندجملهای فرم نسبتا سادهتری دارد و همچنین حجم محاسبات کمتری دارد اما بهره گیری از توابع گویا نتایج برازش قابل قبول تری را خواهد داشت.

با توجه به مزیتهایی که روش فشردهسازی (RFCF) دارد اما منحنی بازتاب طیفی بازیابی شده با استفاده از این روش ممکن است در برخی از نقاط دارای اعوجاج باشد.



از فیلتر هموارساز داده بازیابی شده بسیار هموارتر بوده و از اعوجاجهای موجود در آن کاسته شده البته دقت روش اول را بهدلیل این برازش خم بر روی کل منحنی اعمال میشود ندارد. روش سوم پیشنهادی ترکیبی از هر دو روش قبل است به این معنی که ابتدا با استفاده از فیلتر هموارساز Savitsky-Golay منحنیهای بازتاب طیفی تکتک پیکسل-های تصویر هموار شده و سپس منحنی را به بازههای مجاور و ناهمپوشان تقسیم میشوند و در هر بازه مشخص شده عمل برازش خم را انجام میگیرد. سپس ضرایب بدست آمده از آن بهعنوان ویژگیهای جدید تصویر درنظر گرفته میشود. با این کار هم اعوجاجهای موجود از بین میرود و هم برازش خم بهطور دقیق تر انجام میشود. در این مقاله، سعی در از بین بردن و یا کاهش این اعوجاج-ها با استفاده از چند روش پیشنهادی شد. در روش اول پیشنهادی، با پیدا کردن نقاط اعوجاج و تقسیم منحنی SRC به چند قسمت تعیین شده از همان نقاط و اعمال برازش خم در بازههای مجاور و ناهمپوشان ایجاد شده، هم برازش دقیق تری انجام شد و تابع تقریب بهتری پیدا شد و هم اعوجاج موجود در آن نقطه از بین رفت. در روش دوم پیشنهادی ابتدا منحنی بازتاب طیفی تک تک پیکسلهای پیشنهادی ابتدا منحنی بازتاب طیفی تک تک پیکسلهای شد و سپس با استفاده از برازش خم بهترین تابع تقریب را شد و سپس با استفاده از برازش خم بهترین تابع تقریب را برای منحنی پیدا و ضرایب بدست آمده بهعنوان ویژگیهای جدید داده درنظر گرفته شد. در این روش بهدلیل استفاده

DC-Mall و UP برای داده PSNR بر حسب معیار RFCF (جدول-۱۰) مقایسه عملکرد SGIRFCF در مقابل SGIRFCF بر حسب معیار (Table 10) Comparing PSNR of RFCF, SGIRFCF Method for IPS, UP, DC-MALL Data Set

Com			Indian Pi	ines Site		Com			Pavia Uı	niversity		Com			DC-I	Mall	
p Rate N/D	D	w	Best (L,M )	PSN R RFC F	PSN R SG IRFC F	p Rate N/D	D	w	Best (L, M)	PSN R RFC F	PSN R SG IRFC F	p Rate N/D	D	w	Best (L,M )	PSN R RFC F	PSN R SG IRFC F
200/1 5	3	5	(0,2)	48.5 5	88.79	103/1 5	3	1 1	(13,1	34.5 4	74.87	191/1 5	3	2 1	(4,0)	49.8 6	77.20
200/2 0	3	7	(5,0)	44.3 8	65.00	103/2 0	2	1 5	(13,6 )	43.8 9	66.61	191/2 0	3	1 7	(11,8)	38.4 3	102.3 0
200/2 5	2	1 3	(7,0)	45.7 1	79.26	103/2 5	4	1 7	(2,5)	39.1 2	75.07	191/2 5	2	5	(7,0)	42.8 0	79.52
200/3 0	3	1 1	(20,9)	45.9 4	95.65	103/3 0	2	1 7	(3,4)	40.5 1	69.51	191/3 0	4	1 7	(4,25)	39.5 7	64.59
200/3 5	4	7	(24,1 0)	51.4 4	73.31	103/3 5	3	9	(4,1)	49.7 7	72.23	191/3 5	2	1 7	(23,1 1)	39.4 7	70.52

DC-Mall و UP مقایسه عملکرد روشهای معرفی شده بر حسب معیار PSNR برای داده های IPS و UP و IPS (-۱۱) (Table 11) Comparing PSNR of all Methods for IPS, UP, DC-MALL Data Set

	Indian Pine Site									
Compression	ompression PCA DCT RECE IRFCF						SG-	SG-		
Rate	ICA	DCI	кгсг	Ex1	Ex2	Ex3	RFCF	IRFCF		
N/D	PSNR	PSNR	PSNR	PSNR	PSNR	PSNR	PSNR	PSNR		
200/15	37.73	24.27	48.55	47.12	52.00	48.55	64.44	88.79		
200/20	31.19	26.64	44.38	51.15	44.38	51.15	60.16	65.00		
200/25	29.66	33.14	45.71	73.49	73.49	73.49	63.79	79.26		
200/30	32.25	33.78	45.94	44.88	45.94	54.49	95.65	95.65		
200/35	30.62	31.76	51.44	42.26	51.44	51.44	73.31	73.31		
Pavia University										
Compression	РСА	рст	RECE		IRFCF		SG-RECE	SG-		
Rate	ich	201	KFCF	Ex1	Ex2	Ex3	-pg-kfCf	IRFCF		

N/D	PSNR	PSNR	PSNR	PSNR	PSNR	PSNR	PSNR	PSNR						
103/15	44.56	28.40	34.54	58.57	35.05	58.57	74.87	74.87						
103/20	53.05	31.27	43.89	59.67	43.89	59.67	66.61	66.61						
103/25	48.19	52.02	39.12	64.55	43.79	64.55	63.42	75.07						
103/30	53.51	35.51	40.51	53.00	40.51	53.00	51.83	69.51						
103/35	52.56	36.16	49.77	46.43	49.77	49.77	64.43	72.23						
		DC-Mall												
Compression			DECE		IRFCF	SC DECE	SG-							
Rate	rca	DCI	KFCF	Ex1	Ex2	Ex3	_5 <b>G-</b> AFCF	IRFCF						
N/D	PSNR	PSNR	PSNR	PSNR	PSNR	PSNR	PSNR	PSNR						
191/15	34.18	42.08	49.86	49.86	49.86	49.86	65.18	77.20						
191/20	33.98	40.71	38.43	38.43	38.43	38.43	102.30	102.30						
191/25	48.10	39.30	42.80	43.69	42.80	43.69	60.86	79.52						
							1							
191/30	53.90	42.71	39.57	47.20	54.63	47.20	64.59	64.70						

(جدول-١٢) مقایسه هزینه محاسباتی روشهای معرفی شده و دیگر روشها (Table 12) Comparing computational cost of all Methods

(Table 12) comparing computational cost of an Methous										
Method	Complexity	Method	Complexity							
PCA	$\mathbf{O}(\mathbf{MN}^2) + \mathbf{O}(\mathbf{N}^3) + \mathbf{O}(\mathbf{MDN})$	DCT	MO(NlogN)							
IRFCF Ex1	$SMO(D/S)^3$	RFCF	$MO(D^4)$							
IRFCF (EX. 2)	$SDMO(D/S)^3$	IRFCF (EX. 3)	$SDMO(D/S)^3$							

جدول-۱۳) مقایسه پیچیدگی روشهای معرفی شده و دیگر روشها (Table 13) Approximated amounts of Complexity for ips data set

 $MO(D^4)$ 

	Indian Pine Site							
Compression				IRFCF				SG-
Rate	PCA	DCT	RFCF	Ex1	Ex2	Ex3	SG-RFCF	IRFCF
N/D								
200/15	109	107	109	106	15*106	15*106	109	15*106
200/20	109	107	3*109	6*106	12*107	12*107	3*109	12*107
200/25	109	107	8*109	13*106	32*107	32*107	8*109	32*107
200/30	109	107	17*109	23*106	70*107	70*107	17*109	70*107
200/35	109	107	31*109	36*106	12*108	12*108	31* 109	12*108

imaging systems. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2(3), 8-26.

[5] Li, F., Lukin, V., Ieremeiev, O., & Okarma, K. (2022). Quality Control for the BPG Lossy Compression of Three-Channel Remote Sensing Images. Remote Sensing, 14(8), 1824.

SG-RFCF

- [6] Miguel, A. C., Ladner, R. E., Riskin, E. A., Hauck, S., Barney, D. K., Askew, A. R., & Chang, A. (2006). Predictive coding of hyperspectral images. In Hyperspectral Data Compression (pp. 197-231). Springer, Boston, MA.
- [7] Christophe, E. (2011). Hyperspectral data compression tradeoff. In Optical remote sensing. Springer, Berlin, Heidelberg. p. 9-29.

سال ۱۴۰۱ شمارهٔ ۴ پیاپی ۵۴

## **6- Refrence**

SG-IRFCF

8- مراجع

SDMO(D/S)3

- [1] Keshavarz, A. (2008), Classification of Hyperspectral Images Using Spatial Information, PhD. Desertation, Faculty of electrical and computer engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
- [2] Chang, C. I. (2013). Hyperspectral data processing: algorithm design and analysis. John Wiley & Sons.
- [3] Dhawan, S. (2011). A review of image compression and comparison of its algorithms. International Journal of electronics & Communication technology, 2(1), 22-26.
- [4] Blanes, I., Magli, E., & Serra-Sagrista, J. (2014). A tutorial on image compression for optical space



- [25] Beitollahi, M., & Hosseini, S. A. (2018, May). Using savitsky-golay smoothing filter in hyperspectral data compression by curve fitting. In Electrical Engineering (ICEE), Iranian Conference on (pp. 452-457). IEEE.
- [26] Beitollahi, M., & Hosseini, S. A. (2018, July). Hyperspectral Data Compression by Using Rational Function Curve Fitting in Spectral Signature Subintervals. In 2018 11th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP) (pp. 1-6). IEEE.
- [27] Kamandar, M., & Ghassemian, H. (2012). Linear feature extraction for hyperspectral images based on information theoretic learning. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 10(4), 702-706.
- [28] Beitollahi, M., & Hosseini, S. A. (2016, July). Using curve fitting for spectral reflectance curves intervals in order to hyperspectral data compression. In 2016 10th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP) (pp. 1-5). IEEE.



مرسده بیت اللهی دانش آموخته کاردانی و کارشناسی ناپیوسته مهندسی برق الکترونیک و کارشناسی ارشد مهندسی برق مخابرات از دانشگاه آزاد اسلامی واحد

یادگار امام تهران است. وی هم اکنون نامزد دکترای برق مخابرات در واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی می باشد. زمینه های پژوهشی فعلی ایشان یادگیری ماشین، پردازش سیگنال های مخابراتی و پردازش تصویر می باشد. نشانی رایانامه ایشان عبارت است از:

#### $Mersedeh\_beitollahi@yahoo.com$



**سید ابوالفضل حسینی** تحصیلات کارشناسی مهندسی برق کنترل را در دانشگاه صنعتی شریف و کارشناسی ارشد مهندسی برق مخابرات را در دانشگاه صنعتی خواجه نصیر به پایان

رساند. همچنین ایشان دارای مدرک دکتری برق مخابرات از دانشگاه تربیت مدرس است. ایشان عضو هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) است. زمینه های پژوهشی ایشان مباحثی نظیر یادگیری ماشین، پردازش تصویر، مهندسی سنجش از دور، رمزنگاری و فیلترهای وفقی را در بر می گیرد. نشانی رایانامه ایشان عبارت است از:

#### abolfazl.hosseini@modares.ac.ir

- [8] Sujithra, D. S., Manickam, T., & Sudheer, D. S. (2013). Compression of hyperspectral image using discrete wavelet transform and Walsh Hadamard transform. Int. J. Adv. Res. Electron. Commun. Eng.(IJARECE), 2, 314-319.
- [9] Hosseini, S. A., & Ghassemian, H. (2016). Rational function approximation for feature reduction in hyperspectral data. Remote Sensing Letters, 7(2), 101-110.
- [10] Hosseini, S. A., & Ghassemian, H. (2016). Hyperspectral data feature extraction using rational function curve fitting. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 30(01), 1650001.
- [11] Fang, L., & Gossard, D. C. (1995). Multidimensional curve fitting to unorganized data points by nonlinear minimization. Computer-Aided Design, 27(1), 48-58.
- [12] Boyd, J. P. (1992). Defeating the Runge phenomenon for equispaced polynomial interpolation via Tikhonov regularization. Applied Mathematics Letters, 5(6), 57-59.
- [13] Epperson, J. F. (1987). On the Runge example. The American Mathematical Monthly, 94(4), 329-341.
- [14] Amindavar, H., & Ritcey, J. A. (1994). Padé approximations of probability density functions. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 30(2), 416-424.
- [15] Savitzky, A., & Golay, M. J. (1964). Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. Analytical chemistry, 36(8), 1627-1639.
- [16] Steinier, J., Termonia, Y., & Deltour, J. (1972). Smoothing and differentiation of data by simplified least square procedure. Analytical chemistry, 44(11), 1906-1909.
- [17] Madden, H. (1978). Comments on smoothing and differentiation of data by simplified least square procedure. Analytical Chemistry, 50(9), 1383-86.
- [18] Ruffin, C., & King, R. L. (1999, June). The analysis of hyperspectral data using Savitzky-Golay filtering-theoretical basis. 1. In IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS'99 (Cat. No. 99CH36293) (Vol. 2, pp. 756-758). IEEE.
- [19] King, R. L., Ruffin, C., LaMastus, F. E., & Shaw, D. R. (1999, June). The analysis of hyperspectral data using Savitzky-Golay filtering-practical issues. 2. In IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS'99 (Cat. No. 99CH36293) (Vol. 1, pp. 398-400). IEEE.
- [20]] Beitollahi, M., & Hosseini, S. A. (2017, May). Using Savitsky-Golay filter and interval curve fitting in order to hyperspectral data compression. In 2017 Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE) (pp. 1967-1972). IEEE.
- [21] Universidad-del-Pais-Vasco. Hyperspectral Remote Sensing Scenes [Online].
- [23] Available: http://www.ehu.es/ccwintco/index.php?title=Hyp erspectral\_Remote\_Sensing\_Scenes.
- [24] ] Landgrebe, D. A. (2003). Signal theory methods in multispectral remote sensing (Vol. 24). John Wiley & Sons.