

بازسازی پارامترهای آلفا و انترویی حالت پلاریمتری کامل از روی داده حالت پلاریمتری فشرده

برای سنجنده RADARSAT-2 در باند C

سارا قدس^{۱*}، سید وهاب شجاع‌الدینی^۲، یاسر مقصودی^۳

۱- دانشجوی دکتری ۲- استادیار، پژوهشکده برق و فناوری اطلاعات، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران ۳- استادیار، دانشکده مهندسی ژئودزی

و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

(دریافت: ۹۴/۰۲/۲۲، پذیرش: ۹۴/۰۹/۲۸)

چکیده

پارامترهای آلفا و انترویی دو پارامتر اساسی و پرکاربرد برای تفسیر اطلاعات پلاریمتری حالت کامل می‌باشند که به ترتیب نشان‌دهنده نوع مکانیسم بازپراکنش و درجه تصادفی بودن پلاریزاسیون موج دریافتی هستند. در سال‌های اخیر پلاریمتری فشرده به دلیل مزیت‌هایی که بر پلاریمتری کامل دارد بسیار مورد توجه قرار گرفته است و به دلیل این که اطلاعات داده حالت فشرده کمتر از اطلاعات حالت کامل می‌باشد، سعی بر این است که تا حد ممکن بتوان اطلاعات حالت کامل را از روی آن بازسازی نمود. در این مقاله با بهره‌گیری از روابط همبستگی آلفا و انترویی در دو حالت پلاریمتری فشرده و کامل، روشی نوین جهت بازسازی این پارامترها ارائه شده است که نسبت به روش پیشین سرعت بازسازی را بالا برده و حجم محاسباتی را کاهش داده است و همچنین ضریب تطبیق برای انترویی و آلفا به ترتیب ۷۴٪ و ۶٪ افزایش و خطای تخمین به ترتیب ۴٪ و ۵٪/۰ کاهش یافته است.

واژگان کلیدی

رادار با روزنه ترکیبی، پلاریمتری، حالت فشرده، آلفا، انترویی.

۱. مقدمه

مشخصات مربوط به هندسه و جنس هدف بسیار حساس می‌باشند، این گونه سیستم‌ها اطلاعات سنجنش از دور بسیار خوبی به دست می‌دهند و از آن‌ها در بسیاری از کاربردها مانند کاربردهای نظامی، زمین‌شناسی، اقیانوس‌شناسی، کشاورزی، جنگل‌داری، شناسایی آب و هوا، نقشه‌برداری و غیره استفاده می‌شود [۱]. سنجنده‌های ماهواره‌ای مختلفی مانند ALOS، RADARSAT2، TerraSAR-X و همچنین سنجنده‌های هوایی نظیر AirSAR، PSAR ESAR و Convair این تصاویر پلاریمتری را فراهم می‌کنند.

یکی از پرکاربردترین روش‌هایی که برای تجزیه و تحلیل داده‌های پلاریمتریک حالت کامل استفاده می‌شود روش تجزیه آلفا-انترویی می‌باشد [۲]. پارامتر آلفا یا زاویه پراکندگی مشخص‌کننده مکانیسم پراکندگی پس از برخورد موج به اهداف مورد بررسی می‌باشد و پارامتر انترویی مشابه مفهومی که در ترمودینامیک و تئوری اطلاعات دارد نشان‌دهنده درجه بی‌نظمی و تصادفی بودن می‌باشد که هر چه پلاریزاسیون موج دریافتی مشخص‌تر باشد پارامتر انترویی کمتر و هر چه پلاریزاسیون به هم‌ریخته‌تر باشد انترویی بیشتر می‌گردد. با ترکیب خواص هریک از این دو پارامتر مکانیسم‌های مختلف پراکندگی از هم

پلاریمتری دانش اندازه‌گیری پلاریزاسیون موج الکترومغناطیسی جهت به دست آوردن اطلاعات مورد نیاز در مورد اهداف تحت تاثیر تابش موج می‌باشد. یکی از کاربردهای مهم پلاریمتری سنجنش از دور راداری می‌باشد که موج الکترومغناطیسی با پلاریزاسیون خاص توسط رادار با روزنه ترکیبی^۱ که بر روی سکوها هوایی یا ماهواره‌ای نصب شده است به ناحیه مورد مطالعه تابیده شده و اطلاعات پلاریزاسیون امواج بازتابیده شده در رادار ثبت می‌گردند. عملکرد سیستم تصویر برداری رادار با روزنه ترکیبی در حالت پلاریمتری کامل^۲ به این صورت می‌باشد که دو موج الکترومغناطیسی با پلاریزاسیون‌های متعامد در دو پالس متوالی ارسال می‌گردند و بازپراکنش هر یک از آنها توسط دو آنتن گیرنده با دو نوع پلاریزاسیون عمود بر هم دریافت می‌گردد. از آنجایی که اطلاعات پلاریمتریک امواج پراکنده شده به شکل هدف مورد تابش، جهت قرارگیری آن، ضریب دی‌الکتریک، رطوبت، زبری و سایر

* رایانامه نویسنده پاسخگو: s.ghods@irost.ir

¹ Synthetic Aperture Radar (SAR)

² Full Polarimetry (FP)

هم اکنون ماهواره RISAT-1 مربوط به کشور هند که در سال ۲۰۱۲ پرتاب گردید و همچنین ماهواره ALOS-2 مربوط به کشور ژاپن که در سال ۲۰۱۴ به فضا پرتاب شد مجهز به سیستم پلاریمتری فشرده راداری هستند و در سال‌های اخیر با ظهور پروژه‌های ماهواره ای نظیر SAO-COM مربوط به کشور آرژانتین، RADARSAT-2 مربوط به کشور کانادا و NISAR مربوط به کشور هند که قرار است در آن‌ها از سیستم‌های پلاریمتری فشرده استفاده گردد، تجزیه تحلیل و ارائه روش‌هایی جهت به‌دست آوردن اطلاعاتی نزدیک به اطلاعات حالت پلاریمتری کامل از داده‌های پلاریمتری فشرده بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۱۵-۶].

روش‌های گوناگونی برای بررسی عملکرد داده حالت فشرده برای کاربردهای گوناگون نظیر تشخیص پوشش زمینی، جنگل شناسی، نشت نفت در دریاها و اقیانوس‌ها، شناسایی مکانیزم پراکنش هدف‌ها، تشخیص صخره‌های یخی در دریاها و نظایر آن انجام گرفته [۱۲-۹] که هر کدام به نوبه خود نشان‌دهنده پتانسیل بالای این حالت پلاریمتری برای هریک از کاربردها می‌باشند. همان‌گونه که اشاره گردید با توجه به این که در حالت پلاریمتری فشرده برای هر هدف تنها یک موج ارسال می‌گردد ولی در حالت پلاریمتری کامل برای هر هدف دو موج با پلاریزاسیون‌های متعام ارسال می‌شود و پاسخ مربوط به هر دو دریافت می‌گردد اطلاعات به‌دست‌آمده از حالت پلاریمتری کامل بیشتر از حالت پلاریمتری فشرده می‌باشد بنابراین با استفاده از حالت پلاریمتری فشرده مزایایی که اشاره شد به بهای از دست دادن مقداری از اطلاعات حاصل می‌گردد. هدف پژوهشگران این حوزه به‌دست آوردن حداکثر اطلاعات از حالت پلاریمتری فشرده و نزدیک کردن اطلاعات حالت پلاریمتری فشرده به اطلاعات حاصل از پلاریمتری حالت کامل و در واقع بازسازی اطلاعات حالت کامل از روی داده حالت فشرده می‌باشد. با توجه به اهمیت پارامترهای آلفا و انتروپی در حالت پلاریمتری کامل، استخراج آن‌ها از داده حالت پلاریمتری فشرده مورد نیاز می‌باشد.

در [۶ و ۹] با در نظر گرفتن ۲ فرضیه تقریبی، یکی بر مبنای تقارن نسبت به صفحه گذرنده از خط دید رادار و دیگری برون‌یابی رابطه بین کوهرنس خطی و نسبت پلاریزاسیون متقابل روشی جهت بازسازی داده حالت کامل از داده حالت فشرده ارائه گردیده است. در [۷] یکی از این فرضیات اصلاح شد و نتایج دقیق تری حاصل گشت. با استفاده از این داده بازسازی‌شده که به آن داده شبه‌حالت کامل^۵ گفته می‌شود، می‌توان پارامترهای آلفا و انتروپی حالت کامل را استخراج نموده [۷] و از آن‌ها در کاربردهای مختلفی که برای این پارامترها ارائه شده استفاده کرد.

تفکیک و طبقه‌بندی می‌گردند و در نتیجه با استفاده از این دو پارامتر برای اهداف زمینی خاص مانند کشتی‌ها و صخره‌ها، جاده‌ها و ساخته‌های دست بشر و انواع مختلف پدیده‌های زمینی می‌توان الگوهای جهت شناسایی و یافتن آنها به‌دست آورد و همچنین می‌توان نواحی مختلف زمینی مورد نظر را طبقه‌بندی نمود. پارامترهای آلفا و انتروپی علاوه‌بر این که در تشخیص مکانیسم‌های مختلف پراکندگی مورد استفاده قرار می‌گیرند در به‌دست آوردن اطلاعات دیگری نظیر رطوبت خاک و زبری سطح نیز به‌کار می‌روند [۵-۲]. روش طبقه‌بندی به‌وسیله پارامترهای آلفا و انتروپی به‌دلیل مستقل بودن از اطلاعات زمینی یا به‌عبارتی غیرمبتنی بر نظارت بودن بسیار پر کاربرد می‌باشد و در کاربردهایی که جمع‌آوری دیتای مرجع از روی زمین ممکن نمی‌باشد می‌توان از این روش کمک گرفت. همچنین به‌دلیل این که مقادیر آلفا و انتروپی نسبی هستند، از کالیبراسیون نیز بی‌نیاز می‌باشند. بنابر این پارامترهای آلفا و انتروپی دو پارامتر بسیار مهم و کاربردی در تجزیه و تحلیل و تفسیر اطلاعات پلاریمتری حالت کامل به شمار می‌روند.

در سیستم‌های پلاریمتری حالت کامل به‌دلیل ارسال دو موج برای هر هدف، توان ارسالی زیادی مصرف می‌گردد و فرکانس تکرار پالس باید دو برابر حالتی باشد که تنها یک موج ارسال می‌شود، بنابر این عرض ناحیه پوشش‌دهی رادار نصف می‌گردد و پیچیدگی سیستم افزایش می‌یابد؛ بنابراین در سال‌های اخیر توجه زیادی به حالت پلاریمتری فشرده^۱ شده است [۹-۶]. در حالت پلاریمتری فشرده به‌جای ارسال دو موج یک موج با پلاریزاسیون خاص فرستاده می‌شود و در گیرنده نیز دو آنتن با پلاریزاسیون‌های خاص عمود برهم آن پاسخ آن را دریافت می‌کنند. سه کاندیدا برای حالت پلاریمتری فشرده مطرح می‌باشد که در یک ارسال به‌صورت خطی ۴۵ درجه و دریافت به‌صورت عمودی و افقی می‌باشد. در دومی ارسال دایروی راستگرد و دریافت دایروی راستگرد و چپگرد می‌باشد و سومی ارسال دایروی و دریافت عمودی و افقی می‌باشد. این سه حالت به‌ترتیب ۴۵ درجه^۲، دودایروی^۳، و ارسال دایروی دریافت خطی^۴ نامیده می‌شوند. حالت پلاریمتری فشرده با تلاش برای حفظ بسیاری از توانایی‌هایی که در حالت پلاریمتری کامل وجود دارد هزینه و پیچیدگی سیستم کاهش می‌یابد و پهنای پوشش‌دهی رادار که عامل مهمی برای کاربردهای نظارتی می‌باشد افزایش می‌یابد. همچنین حجم اطلاعات ذخیره‌شده که بخصوص برای سنجنده‌های ماهواره‌ای عاملی اساسی می‌باشند کاهش می‌یابد.

¹ Compact Polarimetry (CP)

² $\pi/4$

³ Dual Circular Polarisation (DCP)

⁴ Circular Transmit Linear Receive (CTLR)

⁵ Pseudo Full Polarimetry

در بخش ۸ نتیجه‌گیری ارائه خواهد شد.

۲. مبانی نظری

۲-۱. روش تجزیه آلفا انتروپی برای داده حالت پلاریمتری

کامل

در سامانه رادارهای سنجش از دور در حالت پلاریمتری کامل، دو پالس الکترومغناطیسی با پلاریزاسیون متعامد یکی پس از دیگری به اهداف زمینی تابیده شده و اطلاعات پلاریمتری سیگنال‌های پراکنده شده از اهداف به صورت ماتریس پراکندگی در گیرنده ثبت می‌شوند. بنابراین برای هر نقطه از تصویر مقادیر فاز نسبی و دامنه در چهار کانال که دو تا مربوط به کانال‌های هم پلاریزه و دو تا مربوط به کانال‌های غیر هم پلاریزه است در دسترس می‌باشد. (مرجع معادلات این بخش [۱] می باشد).

$$S = \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} \\ S_{yx} & S_{yy} \end{bmatrix} \quad (1)$$

که اگر فرستنده و گیرنده بر روی یک سنجنده نصب باشند و با فرض محیط با خاصیت متقابل^۱ خواهیم داشت:

$$S_{xy} = S_{yx} \quad (2)$$

به منظور به دست آوردن اطلاعات مربوط به همبستگی بین نقاط مختلف همجوار در تصاویر و به دست آوردن مشخصه‌های آماری مرتبه دوم ماتریس پراکندگی را به صورت برداری تبدیل کرده و با میانگین‌گیری بر روی نقاط مجاور ماتریس کوهرنسی T تشکیل می‌گردد.

$$k = \frac{1}{\sqrt{2}} [S_{xx} + S_{yy} \quad S_{xx} - S_{yy} \quad 2S_{xy}]^T \quad (3)$$

$$T = \langle k, k^* \rangle \quad (4)$$

برای به دست آوردن پارامترهای آلفا و انتروپی، ماتریس کوهرنسی داده حالت پلاریمتری کامل به صورت ضرب ماتریس بردارهای ویژه و ماتریس قطری مقادیر ویژه تجزیه می‌شود:

$$T = V \cdot \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} \cdot V^H \quad (5)$$

که در آن λ_i ها مقادیر ویژه ماتریس کوهرنسی می‌باشند و ماتریس بردارهای ویژه V به صورت زیر می‌باشد:

$$V = [v_1 \ v_2 \ v_3], \quad v_i = e^{i\varphi} [\cos\alpha_i \quad \sin\alpha_i \cos\beta_i e^{i\delta_i} \quad \sin\alpha_i \sin\beta_i e^{i\gamma_i}]^T \quad (6)$$

که v_i ها بردارهای ویژه هستند. مقادیر آلفا (α) و انتروپی (H) به صورت زیر تعریف می‌گردند:

$$\alpha_i = \cos^{-1}(|v_{1i}|). \quad (7)$$

$$\alpha = \sum_{i=1}^3 p_i \alpha_i \quad (8)$$

$$H = - \sum_{i=1}^3 p_i \log_2(p_i) \quad (9)$$

همان گونه که اشاره شد، به دلیل این که این روش بر مبنای فرضیاتی تقریبی برای حل مساله استوار است که همواره برقرار نیستند این داده شبه حالت کامل نسبت به داده حالت کامل دارای خطا می‌باشد؛ بنابراین پارامترهای آلفا و انتروپی استخراج شده نیز دارای خطا می‌باشند. همچنین روش ارائه شده برای بازسازی، به دلیل این که از یک فرایند تکرارشونده استفاده می‌کند و عملیات تجزیه بر روی ماتریس‌های سه در سه انجام می‌پذیرد وقت گیر می‌باشد.

برای داده‌های حالت فشرده نیز می‌توان مطابق تعاریفی که از پارامترهای آلفا و انتروپی حالت کامل داشتیم پارامترهای آلفا و انتروپی حالت فشرده را تعریف کرد [۱۴-۱۵]. به طور کلی برای این پارامترها در حالت فشرده تفسیر فیزیکی ارائه نشده است. در [۱۵] نشان داده شده است که در میان کاندیداهای مختلف برای حالت پلاریمتری فشرده تنها در حالت دو دایروی فشرده می‌توان با استفاده از فضای آلفا-انتروپی حالت فشرده، مکانیسم‌های مختلف پراکندگی را از یکدیگر تفکیک و طبقه‌بندی نمود. بنابر این پارامترهای آلفا و انتروپی حالت دو دایروی فشرده، مشابه مفهومی که در حالت پلاریمتری کامل دارند به نحوی بیان کننده مکانیسم پراکندگی و تصادفی بودن پلاریزاسیون موج دریافتی می‌باشند. این امر که پارامترهای آلفا و انتروپی در حالت پلاریمتری کامل و حالت دو دایروی فشرده متأثر از یک فیزیک مشخص برای اهداف هستند، نشان می‌دهد که بین این پارامترها در دو حالت همبستگی وجود دارد. بنابر این با استفاده از این همبستگی می‌توان پارامترهای حالت کامل را از روی پارامترهای حالت فشرده استخراج نمود. با استفاده از این نتیجه‌گیری در این مقاله روشی جدید جهت تخمین پارامترهای آلفا و انتروپی حالت کامل از روی مقادیر آلفا و انتروپی داده حالت دو دایروی فشرده ارائه می‌شود که به دلیل همبستگی بالایی که بین این پارامترها در دو حالت موجود می‌باشد دقت بازسازی را بالا می‌برد. مدل چند جمله‌ای درجه دو و درجه یک به ترتیب برای رگرسیون انتروپی و آلفا مناسب شناخته شده است که بسیار سریع قابل پیاده‌سازی هستند و عملیات تجزیه بر روی ماتریس‌های دو در دو انجام می‌گیرد. بنابر این روش پیشنهادی نسبت به روش‌های پیشین سرعت پیاده‌سازی بیشتر و پیچیدگی کمتری خواهد داشت.

در بخش ۲ مبانی نظری مربوط به تجزیه آلفا و انتروپی شرح داده خواهد شد. بخش ۳ مربوط به معرفی روش پیشین جهت بازسازی پارامترهای حالت کامل از روی داده حالت فشرده می‌باشد. روش پیشنهادی در بخش ۴ ارائه شده و با استفاده از داده‌های مورد نظر در پژوهش در بخش ۵ پیاده‌سازی می‌شود. در بخش ۶ روش پیشنهادی با روش پیشین از سه دیدگاه تطابق پارامترها، خطای بازسازی و سرعت اجرا مقایسه می‌گردند و نتایج مربوطه در بخش ۷ مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند و بالاخره

¹ Reciprocity

خطی افقی و عمودی را نشان می‌دهند و به طور مثال S_{RL} نمایشگر ضریب پراکندگی مربوط به ارسال موج با پلاریزاسیون دایروی راستگرد و دریافت دایروی چپگرد می‌باشد. ماتریس کواریانس برای داده دو دایروی فشرده به صورت زیر بدست می‌آید [۱]:

$$C_{DCP} = \langle k_{DCP} \cdot k_{DCP}^{*T} \rangle \quad (12)$$

که $\langle \rangle$ نشان دهنده میانگین گیری مکانی می‌باشد. روش تجزیه آلفا و انتروپی برای داده حالت دو دایروی فشرده مشابه روش تجزیه آلفا انتروپی برای حالت پلاریزاسیون کامل می‌باشد با این تفاوت که ماتریسها ۲ در ۲ و بردارها ۲ در ۱ می‌باشند [۱۵-۱۴].

$$C_{DCP} = V \cdot \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} \cdot V^H, \quad V = [v_1 \ v_2] \quad (13)$$

$$v_i = e^{i\varphi} [\cos \alpha_i \ e^{i\delta_i} \sin \alpha_i]^T \quad (14)$$

$$\alpha_i = \cos^{-1}(|v_{1i}|) \quad (15)$$

$$p_i = \lambda_i / \sum_{i=1}^2 \lambda_i \quad (16)$$

$$\alpha = \sum_{i=1}^2 p_i \alpha_i \quad (17)$$

$$H = - \sum_{i=1}^2 p_i \log_2(p_i) \quad (18)$$

۳. روش های پیشین جهت بازسازی پارامترهای آلفا و انتروپی حالت کامل از روی داده حالت فشرده

در ابتدای مطرح شدن حالت پلاریزاسیون فشرده، در [۶] روشی جهت بازسازی داده پلاریزاسیون حالت کامل از داده فشرده در حالت $\pi/4$ ارائه گردید که در آن از دو فرضیه تقارن نسبت به صفحه گذرنده از خط دید رادار و برون یابی رابطه بین کوهرنس خطی و نسبت پلاریزاسیون متقابل استفاده شده است. در [۹] همین فرضیات برای بدست آوردن داده شبه حالت کامل از روی داده DCP استفاده شده اند. در [۷] نشان داده شده است که فرضیه مربوط به برون یابی رابطه بین کوهرنس خطی و نسبت پلاریزاسیون متقابل از دقت مناسبی برخوردار نبوده و در نتیجه دقت بازسازی را پایین می‌آورد. بنابراین فرضیه جدیدی مطرح شد که در روابط (۲۴-۲۶) به آن خواهیم پرداخت. در [۷] برتری دقت روش جدید نسبت به روش پیشین نشان داده شده است. بنابراین در این بخش فقط روش بهبود یافته مطرح می‌شود و معادلات مربوطه نیز مربوط به همین مرجع می‌باشند.

ماتریس کواریانس برای داده دو دایروی فشرده به صورت زیر می‌باشد:

$$C_{DCP} = \langle k_{DCP} \cdot k_{DCP}^{*T} \rangle \quad (19)$$

$$= (1/4) \langle [(S_{HH} + 2jS_{HV} - S_{VV}) \quad i(S_{HH} + S_{VV})] \cdot [(S_{HH} + 2jS_{HV} - S_{VV}) \quad i(S_{HH} + S_{VV})]^*T \rangle$$

که در آنها مقادیر p_i به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$p_i = \lambda_i / \sum_{i=1}^3 \lambda_i, \quad (10)$$

پارامتر انتروپی همان گونه که در تئوری اطلاعات و ترمودینامیک میزان تصادفی بودن بودن پدیده را تعریف می‌نماید در پلاریزاسیون نیز درهم ریختگی و تصادفی بودن پلاریزاسیون موج دریافتی را نشان می‌دهد؛ در صورتی که انتروپی کمتر از $\pi/3$ باشد، می‌توان گفت که هدف مورد تابش در آن نقطه موج را غیر پلاریزه نکرده است و سیستم را به صورت یک هدف نقطه‌ای^۱ تفسیر می‌نماییم و مکانیسم پراکندگی غالب قابل تشخیص می‌باشد. هر چه انتروپی به سمت ۱ میل می‌کند پلاریزاسیون موج دریافتی تصادفی تر می‌شود و مکانیسم پراکندگی غالب وجود نخواهد داشت بلکه سیستم مخلوطی از مکانیسم‌های پراکندگی مختلف می‌باشد که با نزدیک شدن به سمت ۱ تعداد مکانیسم‌های مختلف قابل تشخیص به صفر می‌رسد و نویز کامل خواهیم داشت [۱]. پارامتر آلفا نیز مشخص کننده نوع مکانیسم پراکندگی می‌باشد بدین گونه که $\alpha=0$ مربوط به پراکنش سطحی در اپتیک هندسی^۲ بوده با افزایش آن پراکنش سطحی مربوط به اپتیک فیزیکی^۳ و پراکنش سطحی موجی^۴ را خواهیم داشت، $\alpha=\pi/4$ مربوط به مدل پراکندگی دیپل و یا ابری از ذرات جهت‌دار می‌باشد و با افزایش آن پراکنش‌های دوبازخورد را خواهیم داشت که از پراکنش بین دو سطح عایق تا پراکنش مربوط به دو وجهی فلزی برای $\alpha=\pi/2$ خواهیم رسید [۲-۱]. بنابراین با استفاده از این دو پارامتر کلیدی می‌توان مکانیسم‌های مختلف پراکندگی را از هم تفکیک نمود، مناطق مختلف را طبقه‌بندی کرد و شاخص‌هایی جهت شناسایی اهداف تعیین نمود و همچنین این دو پارامتر برای به دست آوردن ویژگی‌های سطح از جمله رطوبت و زبری استفاده می‌شوند [۵-۲].

۲-۲. روش تجزیه آلفا انتروپی برای داده دو دایروی فشرده:

برای داده دو دایروی فشرده که موج الکترومغناطیسی با پلاریزاسیون دایروی راستگرد ارسال و با دو آنتن با پلاریزاسیون‌های دایروی راستگرد و چپگرد دریافت می‌شود، بردار هدف به صورت زیر می‌باشد [۷]:

$$k_{DCP} = [S_{RR} \ S_{RL}]^T = [(S_{HH} + 2jS_{HV} - S_{VV}) \quad i(S_{HH} + S_{VV})]/2 \quad (11)$$

که در آن S نشان دهنده ضریب پراکندگی می‌باشد که از تصاویر پلاریزاسیون استخراج می‌شود و R و L و H و V به ترتیب پلاریزاسیون‌های دایروی راستگرد و چپگرد و پلاریزاسیون‌های

¹ Point Scatterer

² Geometrical Optics

³ Physical Optics

⁴ Bragg Scattering

که می توان آن را به فرم زیر نوشت:

$$C_{DCP} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} |S_{HH} - S_{VV}|^2 & -i(S_{HH} - S_{VV})(S_{HH} + S_{VV})^* \\ i(S_{HH} + S_{VV})(S_{HH} - S_{VV})^* & |S_{HH} + S_{VV}|^2 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$+ 1/4 \begin{bmatrix} 4|S_{HV}|^2 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + 1/4 \begin{bmatrix} 4\text{Im}((S_{HH} - S_{VV}) \cdot S_{HV}^*) & 2(S_{HH} + S_{VV}) \cdot S_{HV}^* \\ 2(S_{HH} + S_{VV}) \cdot S_{HV}^* & 0 \end{bmatrix}$$

همانگونه که مشاهده می شود ماتریس کوواریانس به صورت جمع سه ماتریس نوشته شده است؛ ماتریس اول فقط دارای عناصر SHH و SVV می باشد، ماتریس دوم فقط دارای $|S_{HV}|^2$ می باشد و ماتریس سوم دارای عناصریست که از همبستگی مولفه های هم پلاریزه و مولفه های دارای پلاریزه مخالف تشکیل شده اند.

همان گونه که مشخص است بدست آوردن عناصر ماتریس 3×3 از روی عناصر ماتریس 2×2 مستلزم حل مساله ایست که تعداد مجهولات از تعداد معادلات بیشتر می باشد، بنابراین فرضیاتی جهت ساده سازی مساله بدست آوردن داده های حالت پلاریمتری کامل از روی داده های حالت فشرده ارائه شده است؛ فرضیه اولی که برای بازسازی داده شبه پلاریمتریک در نظر گرفته شده است فرضیه تقارن نسبت به صفحه گذرنده از خط دید رادار می باشد که در این حالت سومین ماتریس در رابطه (۲۰) برابر صفر می شود زیرا با در نظر گرفتن این فرضیه خواهیم داشت:

$$\langle S_{HH} \cdot S_{HV}^* \rangle = \langle S_{VV} \cdot S_{HV}^* \rangle = 0 \quad (21)$$

ماتریس کوواریانس حالت پلاریمتری کامل به فرم زیر می باشد:

$$C_{FP} = \begin{bmatrix} |S_{HH}|^2 & \sqrt{2}(S_{HH} \cdot S_{HV}^*) & S_{HH} \cdot S_{VV}^* \\ \sqrt{2}(S_{HV}^* \cdot S_{HH}) & 2|S_{HV}|^2 & \sqrt{2}(S_{HV} \cdot S_{VV}^*) \\ S_{VV} \cdot S_{HH}^* & \sqrt{2}(S_{VV} \cdot S_{HV}^*) & |S_{VV}|^2 \end{bmatrix} \quad (22)$$

با اعمال فرضیه تقارن خواهیم داشت:

$$C_{pseud} = \begin{bmatrix} C_{DCP11} - |S_{HV}|^2 & 0 & C_{DCP12} + |S_{HV}|^2 \\ 0 & 2|S_{HV}|^2 & 0 \\ C_{DCP12}^* + |S_{HV}|^2 & 0 & C_{DCP22} - |S_{HV}|^2 \end{bmatrix} \quad (23)$$

همان گونه که مشاهده می گردد در رابطه بالا با مشخص شدن مقدار $|S_{HV}|^2$ ماتریس شبه حالت کامل به دست خواهد آمد. برای به دست آوردن $|S_{HV}|^2$ نیاز به یک فرضیه دیگر داریم؛ رابطه زیر در حالت کلی برقرار است:

$$(1 - |\rho|)(|S_{VV}^2| + |S_{HH}^2|) \leq |S_{HH} - S_{VV}|^2 \quad (24)$$

که در رابطه فوق ρ کوهرنس خطی می باشد و به صورت زیر تعریف می شود:

$$\rho = \frac{\langle S_{HH} \cdot S_{VV}^* \rangle}{\sqrt{\langle |S_{HH}|^2 \rangle \langle |S_{VV}|^2 \rangle}} \quad (25)$$

فرضیه دوم بر تساوی رابطه ۲۴ قرار داده شده است که در بسیاری از نقاط برقرار می باشد [۷].

$$(1 - |\rho|)(|S_{VV}^2| + |S_{HH}^2|) = |S_{HH} - S_{VV}|^2 \quad (26)$$

برای به دست آوردن جواب $|S_{HV}|^2$ از روش بازگشت و تکرار بدینصورت استفاده می شود که برای پارامترهای $N = \frac{|S_{HH} - S_{VV}|^2}{|S_{HV}|^2}$ و $|S_{HV}|^2$ به ترتیب مقادیر اولیه ۴ و ۰ را در نظر گرفته و برای کوهرنس خطی نیز مقدار اولیه زیر را قرار می دهیم:

$$\rho(0) = \frac{C_{DCP12}}{\sqrt{C_{DCP11} \cdot C_{DCP22}}} \quad (27)$$

روابط (۲۸) و (۲۹) در هر مرحله محاسبه می گردند و از رابطه (۲۳) ماتریس شبه حالت کامل تشکیل شده و مقدار رابطه (۳۰) بدست می آید. این روابط تکرار می شوند تا زمانی که $|S_{HV}|^2$ به یک مقدار ثابت همگرا گردد و ماتریس شبه حالت کامل نهایی تشکیل شود.

$$|S_{HV}|^2(0) = \frac{C_{DCP11} + C_{DCP22}}{2} \cdot \left(\frac{1 - |\rho(0)|}{3 - |\rho(0)|} \right) \quad (28)$$

$$\rho(i+1) = \frac{C_{DCP12} + |S_{HV}|^2(i)}{\sqrt{(C_{DCP11} - |S_{HV}|^2(i)) \cdot (C_{DCP22} - |S_{HV}|^2(i))}} \quad (29)$$

$$|S_{HV}|^2(i+1) = \frac{C_{DCP11} + C_{DCP22}}{2} \cdot \left(\frac{1 - |\rho(i+1)|}{3 - |\rho(i+1)|} \right) \quad (30)$$

برای به دست آوردن پارامترهای آلفا و انتروپی حالت پلاریمتری کامل مطابق بخش ۲-۱ روش تجزیه آلفا انتروپی روی داده شبه حالت کامل اعمال می گردد.

۴. روش پیشنهادی برای بازسازی پارامترهای آلفا و انتروپی حالت کامل از روی داده دو دایروی فشرده

در [۱۵] و [۱۶] نشان داده شده است که در میان کاندیداهای مختلف برای حالت پلاریمتری فشرده یعنی ۴۵ درجه و دو دایروی و ارسال دایروی دریافت خطی فقط در حالت دو دایروی می توان با استفاده از پارامترهای آلفا و انتروپی مکانیسم های مختلف پراکندگی را از هم تفکیک نمود ولی در حالات ۴۵ درجه و ارسال دایروی دریافت خطی، ممکن است مکانیسم های پراکندگی مختلف پارامترهای آلفا و انتروپی مشابه داشته باشند. بنابراین این در [۱۵] با استفاده از تجزیه آلفا و انتروپی برای داده دو دایروی فشرده محدوده هایی جهت طبقه بندی مکانیسم های پراکندگی مختلف ارائه شده است. در این روش برای نقاطی که مربوط به یک مکانیسم پراکندگی خاص در تصویر حالت کامل هستند پارامترهای آلفا و انتروپی حالت دو دایروی محاسبه شده و در فضای آلفا انتروپی حالت فشرده نگاشت شده اند و بدین ترتیب محدوده تقریبی هر مکانیسم در فضای آلفا و انتروپی حالت دو دایروی به دست آمده است.

برای رگرسیون خطی نیز روش همین گونه می باشد با این تفاوت که ضریب c برابر صفر است. در بخش بعد مدل های به دست آمده برای تخمین آلفا و انتروپی حالت پلاریمتری کامل از روی آلفا و انتروپی حالت فشرده به ترتیب در معادلات (۴۲) و (۴۴) ارائه شده است.

۵. نتایج بازسازی پارامترهای آلفا و انتروپی حالت کامل از روی داده دو دایروی فشرده به روش پیشنهادی

برای به دست آوردن مدلی جهت تخمین پارامترهای آلفا و انتروپی حالت پلاریمتری کامل از روی داده دو دایروی فشرده، تصویر مربوط به شهر سان فرانسیسکو که در حالت fine quad polarization از سنجنده RADARSAT2 بانده C با ابعاد 1151×1776 پیکسل به دست آمده استفاده شده است. این تصویر به دلیل این که شامل مکانیسم های مختلف پراکندگی از جمله شهر، اقیانوس و جنگل می باشد و تعداد نقاط تصویر 2×10^6 تا حد مورد نیاز زیاد می باشند، برای به دست آوردن مدلی عمومی مناسب است و در بسیاری از مقالات مرجع از این داده برای گرفتن نتیجه گیری کلی استفاده شده است؛ با این حال برای بررسی درستی تخمین از تصویر حالت پلاریمتری کامل مربوط به شهر ونکور نیز از همین سنجنده با ابعاد 1766×1568 و در بانده C استفاده شده است و نتایج مشابه به دست آمده است. تصویر گوگل ارث^۱ مربوط به این دو داده در شکل ۱ نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱. تصویر گوگل ارث مربوط به: (الف) داده شهر ونکور، (ب) داده شهر سانفرانسیسکو

با توجه به محدوده های مربوط به طبقه بندی داده حالت دو دایروی فشرده در فضای مطرح شده، پارامتر آلفای حالت فشرده نشان دهنده مکانیسم پراکندگی اجسام و پارامتر انتروپی مشخص کننده تصادفی بودن پلاریزاسیون موج دریافتی است. همان گونه که می دانیم در حالت پلاریمتری کامل نیز پارامترهای آلفا و انتروپی به ترتیب توصیف گر همین ویژگی ها می باشند. بنابر این برای یک صحنه مشخص وقتی پارامترهای آلفا و انتروپی در دو حالت فشرده و کامل نشان دهنده ویژگی های فیزیکی یکسانی هستند نشان می دهد که همبستگی بالایی بین آن ها وجود دارد.

برای به دست آوردن روابط بین این پارامترها در دو حالت پلاریمتری کامل و فشرده، از روش رگرسیون با استفاده از کمینه کردن مجموع مربعات خطا استفاده شده است. با توجه به این که ضریب همبستگی خطی بالایی بین پارامترها در دو حالت پلاریمتری کامل و فشرده وجود دارد که در روابط ۴۰ و ۴۱ خواهیم دید، مدل خطی یا چند جمله ای با درجات پایین به نظر مناسب می باشد. روش کمینه کردن مجموع مربعات خطا برای برازش چند جمله ای درجه ۲ به صورت زیر انجام می گیرد.

اگر مجموعه n عضوی y به صورت چند جمله ای درجه ۲ از مجموعه x تقریب زده شود، هر عضوی از آن در معادله زیر صدق می کند:

$$y_i = a + bx_i + cx_i^2 + e_i \quad \text{و} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (31)$$

که در آن e_i خطای تقریب برای عنصر i ام می باشد. اگر مجموع مربعات خطا S نام گذاری شود خواهیم داشت:

$$S = \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i - cx_i^2)^2 \quad (32)$$

برای به دست آوردن مقادیر a و b و c که S را کمینه می کنند باید مشتق نسبی عبارت فوق، نسبت به آن ها برابر صفر شود:

$$\frac{\partial S}{\partial a} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i - cx_i^2) = 0 \quad (33)$$

$$\frac{\partial S}{\partial b} = -2 \sum_{i=1}^n x_i (y_i - a - bx_i - cx_i^2) = 0 \quad (34)$$

$$\frac{\partial S}{\partial c} = -2 \sum_{i=1}^n x_i^2 (y_i - a - bx_i - cx_i^2) = 0 \quad (35)$$

در نتیجه به ترتیب معادلات زیر را خواهیم داشت:

$$na + \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) b + \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right) c = \sum_{i=1}^n y_i \quad (36)$$

$$\left(\sum_{i=1}^n x_i \right) a + \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right) b + \left(\sum_{i=1}^n x_i^3 \right) c = \sum_{i=1}^n x_i y_i \quad (37)$$

$$\left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right) a + \left(\sum_{i=1}^n x_i^3 \right) b + \left(\sum_{i=1}^n x_i^4 \right) c = \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i \quad (38)$$

با حل دستگاه فوق ضرایب مجهول a و b و c به دست می آید.

¹ Google Earth

$$\rho(HFP, HDPC) = 0.9772 \quad (40)$$

$$\rho(\alpha FP, \alpha DCP) = -0.9553 \quad (41)$$

همان گونه که مشخص است بین مقادیر آلفا نسبت خطی معکوس و بین مقادیر انتروپی نسبت خطی مستقیم وجود دارد. با استفاده از روش حداقل مربعات خطا برای متغیرها، پارامترهای مدل خطی بین آنها به دست آمد:

$$\alpha_{FP} = -\alpha_{DCP} + 90 \quad (42)$$

$$H_{FP} = 0.8896 H_{DCP} - 0.51 \quad (43)$$

به منظور مقایسه مدل خطی در نظر گرفته شده نسبت به سایر مدل های چند جمله ای، مدل چند جمله ای درجات بالاتر هم توسط روش حداقل مربعات به دست آمد و مقادیر اندازه مجذور خطاها^۲ برای آنها محاسبه شد که برای مدل خطی برابر ۸۲/۷۳ و برابر مدل های چند جمله ای با درجات بالاتر حوالی ۷۹/۵۳ به دست آمد. بنابراین مدل چند جمله ای درجه ۲ را به عنوان مدل ساده تر در میان مدل های چند جمله ای انتخاب کردیم. به منظور بررسی مناسب بودن مدل انتخابی مدل های دیگری از جمله مدل گوسی، مدل سینوسی، مدل توانی و مدل کسری نیز امتحان شدند و مدل انتخابی از عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل ها برخوردار بود. مدل چند جمله ای درجه ۲ به صورت زیر می باشد:

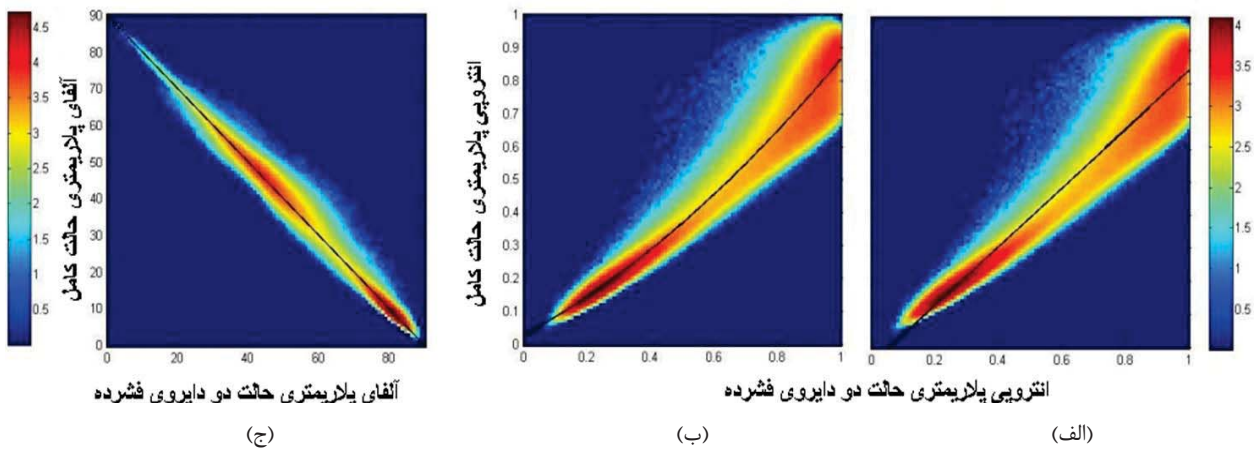
$$H_{FP} = 0.312 H_{DCP}^2 + 0.526 H_{DCP} + 0.026 \quad (44)$$

برای داده مربوط به شهر سانفرانسیسکو ابتدا ماتریس کوهرنسی با استفاده از نرم افزار POLSARpro_v4.2.0 استخراج گردید و سپس توسط نرم افزار MATLAB_2009 داده حالت دو دایروی فشرده شبیه سازی شد، برای شبیه سازی از میانگین مکانی با طول و عرض ۷ استفاده شد. برای داده حالت پلاریمتری کامل و داده دو دایروی فشرده شبیه سازی شده، مقادیر آلفا و انتروپی توسط عملیات تجزیه ماتریس کوهرنسی به ماتریس مقادیر و بردارهای ویژه استخراج شدند.

برای به دست آوردن رابطه ای که بین پارامترهای حالت پلاریمتری کامل و پارامترهای حالت فشرده برقرار است، ابتدا ضریب همبستگی خطی بین این پارامترها به دست آمد. ضریب همبستگی خطی بین دو متغیر X و Y با میانگین μ_X و μ_Y و انحراف معیار σ_X و σ_Y برابر است با [۱۶]:

$$\rho(X, Y) = \frac{cov(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{E[(X - \mu_X)(Y - \mu_Y)]}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (39)$$

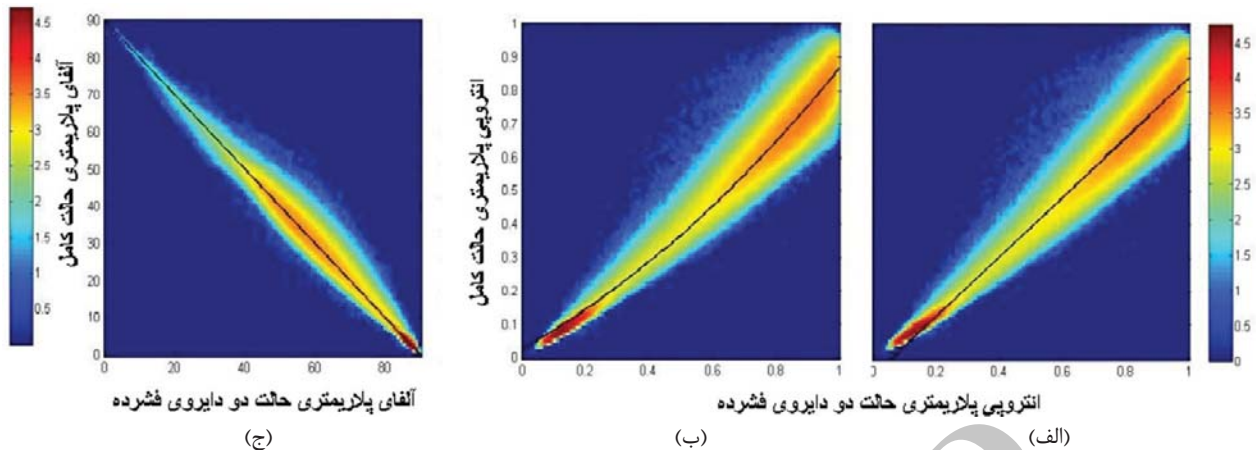
که در آن، E نشان دهنده امید ریاضی و cov(X, Y) بیانگر کواریانس بین دو متغیر می باشد. مقدار این ضریب بین -۱ تا ۱ است و نشان دهنده رابطه خطی بین دو متغیر می باشد. اگر این ضریب ۱ باشد رابطه خطی کاملاً مستقیم و اگر -۱ باشد رابطه خطی کاملاً معکوس می باشد و اگر صفر باشد رابطه خطی بین دو متغیر وجود ندارد. ضریب همبستگی خطی بین مقادیر آلفا و انتروپی به صورت رابطه (۴۰ و ۴۱) به دست آمد:



شکل ۲. نمودار تجمع نقاط برای داده سانفرانسیسکو: الف) خط مشکی نشان دهنده مدل خطی بین انتروپی ها، ب) منحنی مشکی نشان دهنده مدل چند جمله ای درجه دوم بین انتروپی ها، ج) خط مشکی نشان دهنده مدل خطی بین آلفاها

² norm of residuals

¹ correlation coefficient



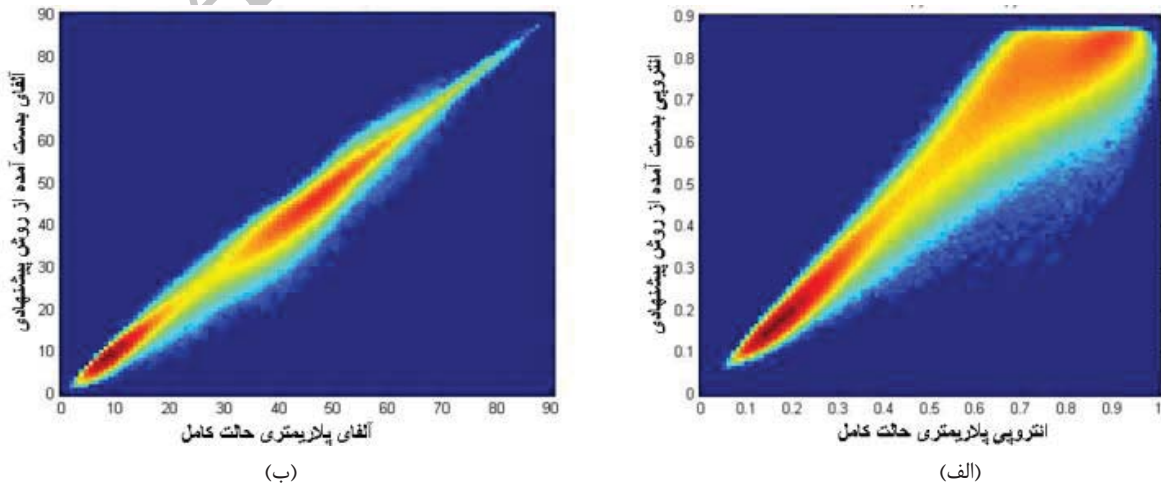
شکل ۳. نمودار تجمع نقاط برای داده ونکور: الف) خط مشکی نشان دهنده مدل خطی بین انتروپی ها ، ب) منحنی مشکی نشان دهنده مدل چند جمله‌ای درجه دوم بین انتروپی ها، ج) خط مشکی نشان دهنده مدل خطی بین آلفاها

۶- مقایسه روش پیشنهادی با روش های پیشین

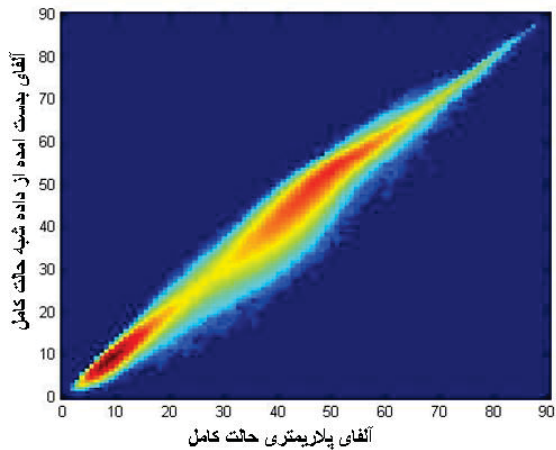
در این بخش مقادیر آلفا و انتروپی حالت پلاریمتری کامل به دست آمده از دو روش زیر مورد بررسی و مقایسه قرار می گیرند:
 روش ۱: به دست آوردن داده شبه حالت کامل تشریح شده در بخش ۳ و محاسبه پارامترهای آلفا و انتروپی با استفاده آن.
 روش ۲: تخمین پارامترهای آلفا و انتروپی از روی پارامترهای متناظر در حالت دو دایروی فشرده توسط مدل های ارائه شده در بخش قبل.
 ماتریس شبه حالت کامل از داده دو دایروی فشرده که قبلا شبیه سازی شده بود به دست آمد و مقادیر پارامترهای آلفا و انتروپی مربوط به هر نقطه از تصویر محاسبه شد و با استفاده از مدل های ارائه شده در بخش قبل مقادیر آلفا و انتروپی از روی مقادیر متناظر این پارامترها در حالت دو دایروی فشرده به دست آمدند.

۶-۱- مقایسه تطابق و خطای پارامترهای بازسازی شده

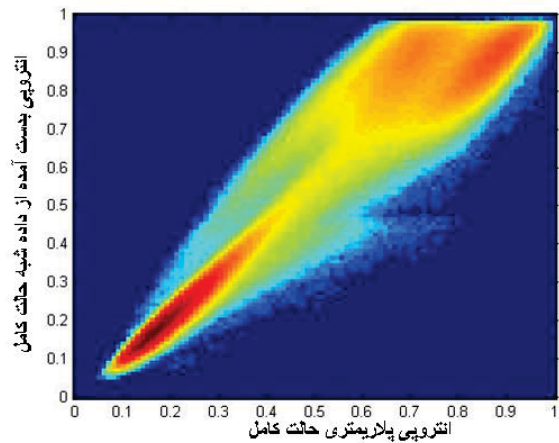
شکل های ۴ و ۵ تجمع نقاط را برای هر یک از این دو روش نشان می دهند.



شکل ۴. نمودار تجمع نقاط برای روش پیشنهادی: الف) انتروپی حالت پلاریمتری کامل در محور افقی و انتروپی تخمین زده شده به روش پیشنهادی در محور عمودی، ب) آلفای حالت پلاریمتری کامل در محور افقی و آلفای تخمین زده شده به روش پیشنهادی در محور عمودی



(ب)



(الف)

شکل ۵. نمودار تجمع نقاط برای روش پیشین: (الف) انتروپی حالت پلاریمتری کامل در محور افقی و تخمین زده شده به روش تشکیل داده شبه- حالت کامل در محور عمودی، (ب) آلفای حالت پلاریمتری کامل در محور افقی و آلفای تخمین زده شده به روش تشکیل داده شبه-حالت کامل در محور عمودی

و به صورت زیر تعریف می گردد:

$$r^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{ip})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (46)$$

در جدول ۱ مقادیر آماری داده پلاریمتریک و در جدول ۲ مقادیر حاصل از برآوردهای کمی دو روش ارائه شده است.

جدول ۱. مقادیر آماری داده پلاریمتریک مورد بررسی

| انحراف معیار | میانگین | تعداد نقاط : ۲۰۴۴۱۷۶ |
|--------------|---------|----------------------|
| ۱۸/۷۴۰۰ | ۲۷/۳۹۰۰ | آلفا |
| ۰/۲۷۲۳ | ۰/۴۵۵۶ | انتروپی |

به منظور بررسی کارایی هر یک از روش ها برای بازیابی پارامترهای حالت پلاریمتری کامل از روی داده دو دایروی فشرده، از دو معیار ریشه میانگین مربعات خطا^۱ و ضریب تعیین^۲ استفاده شده است. ریشه میانگین مربعات خطا به صورت زیر تعریف می شود:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{ip})^2}{n}} \quad (45)$$

که در آن y_i داده اصلی و y_{ip} داده تخمین زده شده می باشند. ضریب تعیین یا r^2 در علم آمار نشان دهنده این است که چه مقدار یک مدل تخمین زده شده با مقدار واقعی داده ها تطابق دارد

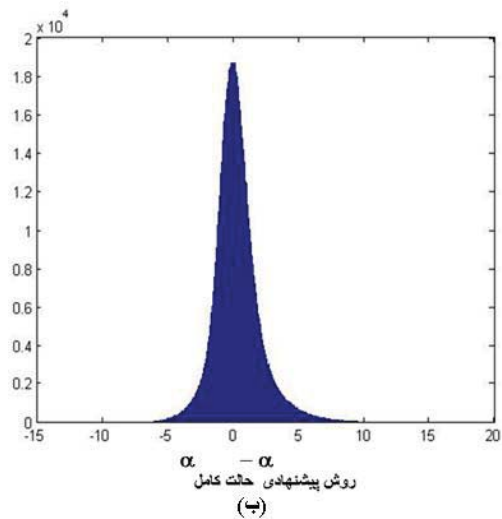
جدول ۲. مقایسه عملکرد دو روش تشکیل داده شبه پلاریمتریک و روش پیشنهادی

| پارامترها | آلفا | | انتروپی | |
|-------------------------|------------|--------------------------|------------|--------------------------|
| | ضریب تطبیق | خطای ریشه میانگین مربعات | ضریب تطبیق | خطای ریشه میانگین مربعات |
| روش داده شبه پلاریمتریک | ٪۹۸/۴۲ | ۲/۳۵ ٪۲/۶۱ | ٪۸۸/۰۸ | ۰/۰۹۴ ٪۹/۴ |
| روش پیشنهادی | ٪۹۹/۰۲ | ۱/۸۵ ٪۲/۰۵ | ٪۹۵/۸۲ | ۰/۰۵۵ ٪۵/۵ |

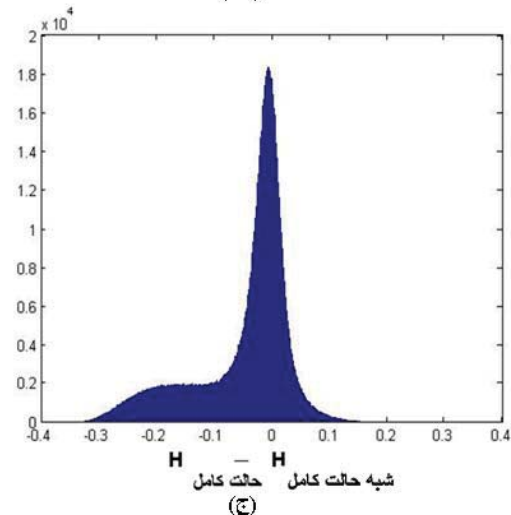
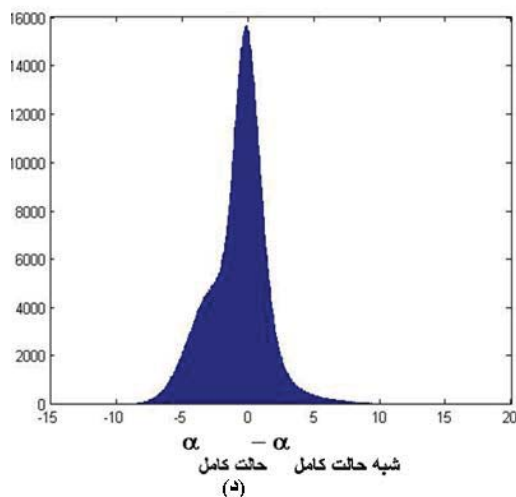
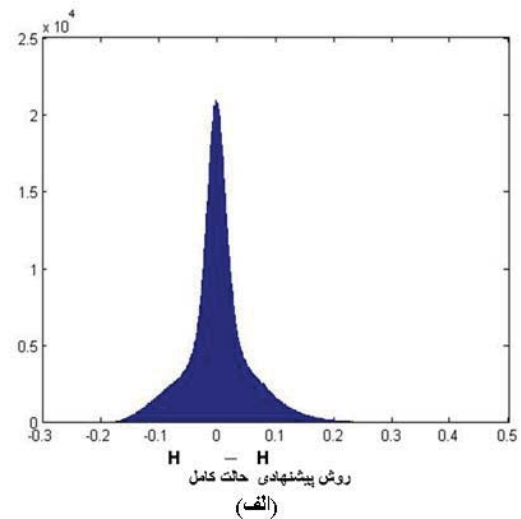
¹ Root mean square error

² coefficient of determination

اختلاف نتایج هر روش با مقدار مرجع که همان پارامترهای مربوط به حالت پلاریمتری کامل می باشد در شکل ۶ نشان داده شده است.



برای بررسی بیشتر نتایج حاصل از بازسازی پارامترهای آلفا و انتروپی مطابق روشی که در [۷] استفاده شده است، هیستوگرام



شکل ۶. هیستوگرام مربوط به اختلاف پارامترهای بازسازی شده با مقادیر اصلی حالت پلاریمتری کامل: (الف) برای انتروپی به روش پیشنهادی، (ب) برای آلفا به روش پیشنهادی، (ج) برای انتروپی به روش بازسازی داده شبه حالت پلاریمتری کامل، (د) برای آلفا به روش بازسازی داده شبه حالت پلاریمتری کامل

۲-۶. مقایسه زمان مورد نیاز برای اجرای هر روش

برای به دست آوردن زمان مورد نیاز جهت بازسازی پارامترهای آلفا و انتروپی حالت کامل از لپ تاپ با پردازنده intel Core i5 با سرعت ۲/۶۷ گیگاهرتز استفاده شده و نرم افزار مورد استفاده جهت شبیه سازی MATLAB_2009 بوده است. برای پردازش داده مربوط به شهر سان فرانسیسکو با ابعاد ۱۱۵۱×۱۷۷۶ پیکسل به روش بازسازی داده شبه پلاریمتری کامل ۹۴/۶۴۷۷ ثانیه و به روش پیشنهادی ۵۱/۲۴۶۳ ثانیه زمان طول کشید و هر چه ابعاد تصویر بیشتر شود این اختلاف زمانی بیشتر می شود. به عنوان مثال برای داده با ابعاد ۱۳۲۹۹×۲۱۲۰ به روش پیشین ۵۹۷/۵۰۲۹ ثانیه و به روش پیشنهادی ۲۱۸/۶۹۳۱ ثانیه برای بازسازی پارامترها زمان سپری شد.

در جدول ۳ مقادیر متوسط و انحراف معیار اختلاف نتایج هر روش با مقدار مربوط به حالت پلاریمتری کامل ارائه شده است.

جدول ۳. مقادیر میانگین و انحراف معیار برای اختلاف بین پارامترهای بازسازی شده و پارامترهای حالت پلاریمتری کامل

| پارامترها | آلفا | | انتروپی | |
|-------------------------------|--------------|---------|--------------|---------|
| | انحراف معیار | میانگین | انحراف معیار | میانگین |
| روش تشکیل داده شبه پلاریمتریک | ۲/۲۵۰۲ | -۰/۷۱۴۳ | ۰/۰۸۱۷ | -۰/۰۴۷۲ |
| روش پیشنهادی | ۱/۸۱۳۶ | ۰/۳۱۶۱ | ۰/۰۵۵۱ | ۰/۰۰۱۵ |

چند جمله‌ای برای به دست آوردن آلفا، انتروپی حالت پلاریمتری کامل بسیار سریع صورت می‌گیرد؛ بنابراین در روش پیشنهادی حجم و پیچیدگی محاسبات و زمان آن کاهش می‌یابد. با توجه به این که در حالت تصویربرداری پلاریمتری حالت کامل نیز ماتریس‌ها 3×3 بوده و عملیات تجزیه بردارها و مقادیر ویژه بر روی تک تک نقاط تصویر بر روی این ماتریس‌ها باید انجام گیرد، برای به دست آوردن پارامترهای آلفا و انتروپی زمان زیادی صرف می‌شود. به خصوص در کاربردهایی که زمان اهمیت زیادی دارد و در مورد داده‌های با رزولوشن بالا که تعداد نقاط بسیار زیاد می‌باشد به جای به کارگیری رادار پلاریمتری در حالت کامل، می‌توان با استفاده از روش پیشنهادی از حالت دو دایروی فشرده استفاده کرد. بدین ترتیب با انجام عملیات تجزیه بر روی ماتریس‌های 2×2 و اعمال رابطه چند جمله‌ای که بسیار سریع صورت می‌گیرد پارامترهای آلفا و انتروپی حالت کامل را بازسازی نموده سرعت، پیچیدگی محاسبات و همچنین حجم حافظه اشغالی را کاهش داد.

به طور خلاصه استفاده از پلاریمتری حالت فشرده مزایایی همچون کم کردن توان ارسالی، کاستن از پیچیدگی سیستم، کم کردن حافظه اشغالی و افزایش پهنای پوشش‌دهی رادار در مقایسه با حالت پلاریمتری کامل در پی خواهد داشت. با به کارگیری روش پیشنهادی سرعت محاسبه پارامترهای آلفا و انتروپی نسبت به حالت پلاریمتری کامل افزایش یافته و دقت و سرعت بازیابی این پارامترها نسبت به روش پیشین بیشتر می‌گردد.

۹. مراجع

- [1] J.S. Lee, E. Pottier, "Polarimetric radar imaging: from basics to applications," CRC Press, Taylor and Francis, 2009.
- [2] S. R. Cloude and E. Pottier, "An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric SAR," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 35, no. 1, pp. 68-78, Jan. 1997.
- [3] R. Touzi, "Calibrated polarimetric SAR data for ship detection," in Proc. IEEE Geosci. Remote Sens. Symp., 2000, vol. 1, pp. 144-146, 2000.
- [4] J.-S. Lee, M. R. Grunes, T. L. Ainsworth, L.-J. Du, D. L. Schuler, S. R. Cloude, "Unsupervised classification using polarimetric decomposition and the complex Wishart classifier," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 37, no. 5, pp. 2249-2258, Sep. 1999.
- [5] Hajnsek, I., E. Pottier, and S. R. Cloude, "Inversion of surface parameters from polarimetric SAR, IEEE Trans. Geosci Remote Sensing, " vol. 41, pp. 727-744, Apr. 2003.
- [6] J. C. Souyris, P. Imbo, R. Fjortoft, S. Mingot, and J. S. Lee, "Compact polarimetry based on symmetry properties of geophysical media: The $\pi/4$ mode," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 43, no. 3, pp. 634-646, Mar. 2005.

۷. بحث و بررسی نتایج

با بررسی شکل‌های (۴ و ۵) مشاهده می‌شود که با استفاده از روش بازیابی داده شبه‌حالت پلاریمتری کامل، مقادیر انتروپی نسبت به خط $y=x$ انحراف بیشتری پیدا کرده‌اند. نمودارهای آلفا نمایشگر نزدیکی دقت عملکرد دو روش به یکدیگر می‌باشد. جدول ۲ نیز موید همین مطلب می‌باشد؛ ضریب تطبیق برای پارامترهای آلفا و انتروپی در روش پیشنهادی به ترتیب ۰/۶ درصد و ۷/۷۴ درصد بهتر از روش اول می‌باشد و ریشه میانگین مربعات خطا در روش پیشنهادی برای آلفا ۰/۵ درصد و برای انتروپی ۴ درصد کمتر از روش اول می‌باشد. جدول ۳ نیز نشان می‌دهد که اندازه میانگین و انحراف معیار خطا برای انتروپی در روش پیشنهادی نسبت به روش پیشین به ترتیب به میزان ۰/۴۶ و ۰/۱۶ کاهش یافته است و برای آلفا نیز به میزان ۰/۴۴ و ۰/۱۶ کاهش مشاهده می‌گردد. بنابراین روش تخمین پیشنهادی دارای خطای کمتر و تطابق بیشتری نسبت به داده حالت پلاریمتری کامل می‌باشد. نتایج مربوط به سرعت بازسازی از دو روش نیز بیانگر افزایش قابل توجه سرعت در روش پیشنهادی نسبت به روش پیشین می‌باشد.

۸. نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی نوین جهت تخمین پارامترهای آلفا و انتروپی حالت کامل از روی داده حالت فشرده ارائه شد. با استفاده از ضریب همبستگی خطی بالای بین پارامترهای حالت دو دایروی فشرده و حالت کامل مشخص شد که مدل خطی و مدل چند جمله‌ای درجه دوم مدل‌هایی مناسب جهت بازیابی پارامترهای حالت پلاریمتری کامل از روی پارامترهای حالت دو دایروی فشرده می‌باشند.

مدل‌های ارائه شده با روش پیشین که برای بازسازی داده حالت پلاریمتری کامل از روی حالت فشرده ارائه شده بود مقایسه شد و مقادیر ضریب تطبیق و اندازه خطا برای هر دو روش به دست آمدند و نتایج حاصل موید این امر بود که پارامترهای بازسازی شده به روش پیشنهادی تطابق بیشتری با پارامترهای اصلی دارند و خطای حاصل از دو فرضیه مورد استفاده در روش بازسازی داده شبه پلاریمتری کامل، تاثیر بیشتری نسبت به خطای ایجاد شده در عملیات تخمین روش پیشنهادی داشته است.

در روش پیشین پروسه تکرار شونده‌ای که در عملیات بازسازی داده شبه‌حالت کامل انجام می‌گیرد وقت‌گیر بوده و همچنین مراحل تجزیه و به دست آوردن پارامترهای آلفا و انتروپی بر روی ماتریس‌های 3×3 انجام می‌گیرد. حال آن‌که در روش پیشنهادی ماتریس کوهرنسی 2×2 بوده و رابطه

- [12] P. Imbo and J. C. Souyris, "Visualization of the polarimetric information: Comparison between partial versus full polarimetry architectures," in Proc. IGARSS, Honolulu, HI, Jul. 2000.
- [13] R. K. Raney, J. T. S. Cahill, G. W. Patterson, and D. B. J. Bussey, "The m-chi decomposition of hybrid dual-polarimetric radar data," Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2012 IEEE International, pp. 5093–5096, Jul. 2012.
- [14] R. Guo, Y. B. Liu, Y. H. Wu, S. X. Zhang, M. D. Xing, and W. He, "Applying H/a decomposition to compact polarimetric SAR," IET Radar Sonar Navig., vol. 6, no. 2, pp. 61–70, Feb. 2012.
- [15] H. Zhang, L. Xie, C. Wang, F. Wu, B. Zhang, "Investigation of the Capability of H- α Decomposition of Compact Polarimetric SAR," IEEE Geoscience And Remote Sensing Letters, vol. 11, no. 4, Apr 2014.
- [16] Karl Pearson, "Notes on regression and inheritance in the case of two parents," Proceedings of the Royal Society of London, 58: 240–242. June 1895.
- [7] M. E. Nord, T. L. Ainsworth, J. S. Lee, and N. J. S. Stacy, "Comparison of compact polarimetric synthetic aperture radar modes," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 47, no. 1, pp. 174–188, Jan. 2009.
- [8] R. K. Raney, "Hybrid-polarity SAR architecture," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 45, no. 11, pp. 3397–3404, 2007.
- [9] N. Stacy and M. Preiss, "Compact Polarimetric Analysis of X-Band SAR Data," Proc. EUSAR 2006, 2006.
- [10] F. J. Charbonneau, B. Brisco, R. K. Raney, H. McNairn, C. Liu, P.W. Vachon, J. Shang, R. DeAbreu, C. Champagne, A. Merzouki, and T. Geldsetzer, "Compact polarimetry overview and applications assessment," Can. J. Remote Sensing, vol. 36, no. 2, pp. S298–S315, 2010.
- [11] J. S. Lee et al., "Quantitative comparison of classification capability: Fully-polarimetric versus partially polarimetric SAR," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 39, no. 11, pp. 2343–2351, Nov. 2001.

Archive of SID

Reconstruction of Fully Polarimetric Entropy and α -Angle using RADARSAT2 Compact Polarimetric Data at C-Band

S. Ghods*, S. V. Shojadini, Y. Maghsoudi

Iranian Research Organization for Science and Technology

(Received: 12/05/2015, Accepted: 19/12/2015)

Abstract

The polarimetric entropy and the alpha angle are two important parameters for analyzing polarimetric synthetic aperture radar data. They demonstrate the degree of randomness in the polarization of the received signal and scattering mechanism of scatterers respectively. Recently, there has been an increasing interest in compact polarimetry due to its advantages in comparison with full polarimetry. Because the information of compact polarimetry mode is less than full polarimetry mode, it is important to reconstruct full polarimetric information from compact data as better as possible. In this article based on the correlations between alpha and entropy parameters in the compact and full polarimetry modes, a novel method is presented in order to reconstruct Cloude–Pottier entropy and α -angle from compact polarimetric data which has reduced computational time and volume in comparison with the previous approach, also the coefficient of determination for entropy and alpha has been increased 7.74% and 0.6% and RMS error has been decreased 4% and 0.5% respectively.

Keywords

Synthetic Aperture Radar, Polarimetry, Compact Mode, Alpha, Entropy.

* Corresponding author E-mail: s.ghods@irost.ir