

آشکارسازی اهداف در تصاویر پلاریمتریک راداری با استفاده از تصویرسازی به زیر فضای متعامد

رضا بردباری^{۱*}، یاسر مقصودی^۲

۱- کارشناس ارشد، ۲- دانشیار، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

(دریافت: ۹۵/۰۳/۲۵؛ پذیرش: ۹۶/۰۲/۱۳)

چکیده

تفکیک و آشکارسازی پراکنش‌کننده‌های موجود در پیکسل‌های تصویری، از اهداف اصلی کاربردهای سنجنش از دور راداری است. تصاویر پلاریمتریک راداری در مقایسه با تصاویر راداری تک‌کاناله، اطلاعات بیشتری را در مورد جزئیات پراکنش‌کنندگی اهداف و پس‌زمینه در خود جای داده‌اند. بنابراین، از قابلیت بیشتری در تشخیص و آشکارسازی اهداف برخوردارند. در این مقاله، از منظر جدیدی به مسئله آشکارسازی اهداف در تصاویر پلاریمتریک راداری نگریسته و روشی را ارائه خواهیم داد که به‌طور هم‌زمان، تداخل‌های مربوط به پراکنش‌کننده‌های موجود در پس‌زمینه را حذف و هدف موردنظر را آشکارسازی کند. در این روش، فرض بر این است که چند پراکنش‌کننده استاندارد در پوشش زمینی پیکسل تصویری قرار دارند که ترکیب خطی آن‌ها تشکیل‌دهنده بردار پراکنش ثبت‌شده در تصویر است. استفاده از این روش، موجب آشکارسازی دقیق مناطق مسکونی می‌شود.

واژگان کلیدی

سنجنش از دور، پلاریمتری راداری، آشکارسازی هدف، تصویرسازی، زیرفضای متعامد.

۱- مقدمه

درک و تفکیک مشخصات یک پراکنش‌کننده از طریق پردازش این دو ماتریس حاصل می‌شود. درک مکانیزم‌های پراکنش پلاری میان داده‌های اخذشده و کاربردهای مورد انتظار است. به‌طور کلی، مکانیزم‌های پراکنش با استفاده از یک سری فاکتورها از قبیل فرکانس رادار، جهت تصویربرداری، ثابت دی‌الکتریک مربوط به هدف و مشخصات هندسی آن به‌دست می‌آیند [۴]. اگرچه تئوری پلاریمتری راداری به‌خوبی تعریف شده است، اما مدل‌سازی و تفسیر مکانیزم‌های پراکنش هنوز مورد بررسی است و چگونگی استخراج صحیح اطلاعات مفید از داده‌های اخذشده، هنوز چالش‌برانگیز می‌باشد [۴].

با پیشرفت و توسعه سریع روش‌های تفسیر داده‌های پلاریمتری راداری، روش‌های زیادی به‌منظور استخراج مکانیزم‌های پراکنش پیشنهاد شده‌اند که در میان آن‌ها، روش‌های تجزیه^۱ و آشکارسازی اهداف، جزء محبوب‌ترین روش‌ها هستند. روش‌های تجزیه ماهیت پراکنشی هدف را یا با استفاده از شناسایی مکانیزم پراکنش میانگین (تجزیه ماتریس همدوسی به مقادیر و بردارهای ویژه) یا غالب (تجزیه‌های مبتنی بر روش Huynen) تفسیر می‌کنند و یا ماتریس همدوسی ثبت‌شده در

در طول چند دهه گذشته، سنجنش از دور ماکروبو، پیشرفت‌های قابل توجهی در حوزه‌های سخت‌افزاری، روش‌های پردازش سیگنال و تئوری‌های تفسیر تصاویر راداری داشته است. سنجنده‌های ماکروبو که قابلیت انجام مأموریت در شرایط آب و هوایی مختلف و در تمام مدت شبانه‌روز را دارا هستند، نقش بسیار مهمی در پایش و مدیریت منطقه‌ای و جهانی کره زمین و سایر کرات ایفاء می‌کنند. رادار با روزه مصنوعی پلاریمتریک (PolSAR)، یکی مهم‌ترین سامانه‌های سنجنش از دور ماکروبو است که به‌وسیله ارسال و دریافت امواج ماکروبو با حالات پلاریزاسیون خاص، توانایی اخذ اطلاعات کاملاً پلاریمتریک از صحنه تصویربرداری را دارد [۱-۳]. اطلاعات کاملاً پلاریمتریک، به مکانیزم‌های پراکنش مربوط به اهداف در طول فرآیند بازپراکنش حساس است و اخذ تصاویر به‌صورت کاملاً پلاریزه توانایی رادار را در تشخیص و تفکیک پارامترهای مربوط به اهداف (مانند جنس، شکل و نحوه استقرار) افزایش می‌دهد [۴]. سامانه راداری پلاریمتریک می‌تواند مشخصات هندسی و فیزیکی پراکنش‌کننده‌ها را اخذ و در قالب یک ماتریس پراکنش (برای پراکنش‌کننده نقطه‌ای) و یا یک ماتریس همدوسی (برای پراکنش‌کننده غیرنقطه‌ای) ذخیره کند.

1- Decomposition

است که محاسبات سنگینی به دنبال دارد. مشکل دوم، به عدم استفاده از همه اطلاعات پلاریمتریکی (فقط از کانال‌های co-pol استفاده می‌شود) برمی‌گردد که قابلیت الگوریتم را در استخراج پارامترهای اهداف محدود می‌کند. و در نهایت، مشکل سوم مربوط به آشکارسازی اهداف پلاریمتری است که الگوریتم فقط قادر به آشکارسازی دوسطحی و سه‌وجهی است.

از آنجایی که تعداد زیادی پراکنش‌کننده در پوشش مکانی پیکسل‌های تصویر رادار وجود دارد، استفاده از این روش در این داده چالش‌برانگیز به نظر می‌رسد. زیرا این روش برای آشکارسازی اهداف زیرپیکسلی^۴ در تصویر فراطیفی مورد استفاده قرار گرفته است و همیشه سطحی از مساحت پیکسل که توسط هدف اشغال شده است، مورد نظر می‌باشد. اما در آشکارسازی اهداف در تصویر پلاریمتریک راداری به هیچ عنوان سطح پیکسل اشغال شده توسط هدف مورد انتظار نیست و با توجه به ماهیت داده، بیان چنین فرضی صحیح نمی‌باشد. در تصویر پلاریمتریک راداری، سیگنال بازگشتی متشکل از موج‌های بازپراکنده^۵ شده از تعداد زیادی پراکنش‌کننده اولیه است [۱] که حاصل جمع همدوس آن‌ها اطلاعات پراکنشی پیکسل‌های تصویری را می‌سازند. در نتیجه، هر پیکسل ترکیبی است از چندین مکانیزم پراکنشی که در قالب ماتریس پراکنش ثبت شده است. بنابراین، مقصود از آشکارسازی هدف در تصویر رادار، آشکارسازی مکانیزم (رفتار) پراکنش خاص است که به عوارض و سطوح خاصی نسبت داده می‌شود و این‌که چه مقدار از سطح پیکسل دارای این عارضه یا شیء خاص است اهمیتی ندارد.

هدف این مقاله، آشکارسازی اهداف با استفاده از بردارهای ویژگی جدیدی است که از ماتریس همدوسی به دست آمده‌اند. این بردارها بیان‌کننده مکانیزم‌های پراکنش می‌باشند و روش آشکارسازی بر مبنای تصویرسازی به زیرفضای متعامد است که در دو مرحله قابل پیاده‌سازی است: (۱) حذف مکانیزم‌های پراکنش ناخواسته و (۲) استخراج مکانیزم پراکنش مورد نظر (هدف). با این‌که مکانیزم پراکنش مورد نظر را می‌توان با استفاده از یک فیلتر انطباقی یا با استفاده از روش کم‌ترین مربعات استخراج کرد، این حذف مکانیزم‌های ناخواسته است که نقش اصلی را در موفقیت روش پیشنهادی بر عهده دارد. اگرچه این روش از برخی جهات عملکردی شبیه به تئوری تجزیه دارد، اما تمرکز الگوریتم روی استخراج مکانیزم پراکنش مورد نظر است. برای این‌که الگوریتم بهترین عملکرد را داشته باشد، تعریف مجموعه مناسبی از مکانیزم‌های پراکنش ناخواسته در مرحله اول پیاده‌سازی الگوریتم، بسیار مهم است. در این مقاله، چندین بردار ویژگی

تصویر را به صورت حاصل جمع وزن‌دار مکانیزم‌های پراکنش استاندارد (روش‌های تجزیه مبتنی بر مدل) تجزیه می‌کنند. روش‌های تجزیه فوق را، Cloude و Pottier به تفصیل و به طور دقیق در مرجع [۵] مورد بررسی قرار داده‌اند.

پژوهش‌های انجام گرفته در حوزه آشکارسازی اهداف در تصاویر پلاریمتری عمدتاً از اطلاعات پراکنشی یا آماری استفاده کرده‌اند، که کارهایی از قبیل آشکارساز فیلتر انطباقی پلاریمتری [۶]، آشکارسازی کشتی بر اساس آنتروپی پلاریزیشن متعامد [۷] و آشکارساز اهداف پلاریمتریک با استفاده از سه‌شاخه Huynen [۸]، جزء شاخص‌ترین‌ها هستند. روش دیگری نیز برای پردازش ماتریس پراکنش ارائه شده است که هم‌بستگی میان دو ماتریس پراکنش را بررسی می‌کند. این روش که تشابه پراکنشی نام دارد، توسط Yang و همکاران ارائه گردیده است [۹] و تشابه میان یک پراکنش مجهول و تعدادی مکانیزم پراکنش استاندارد را بررسی می‌کند. Novak و همکاران الگوریتمی را برای آشکارسازی بهینه اهداف پلاریمتری توسعه دادند که هم‌زمان قادر بود اسپکل را نیز کاهش دهد [۱۰]. این روش آشکارساز فیلتر سفید پلاریمتری نام داشت و با استفاده از حاصل جمع کانال‌های پلاریمتری در یک پایه پلاریزاسیون جدید و حد آستانه‌گذاری اقدام به آشکارسازی اهداف می‌کرد. اما این روش از فرضیه انعکاس متقارن^۲ استفاده کرده و قادر به طبقه‌بندی اهداف آشکارسازی شده نیست.

علاوه بر الگوریتم‌هایی که به آن‌ها اشاره شد، روش تصویرسازی به زیرفضا در پردازش و تفسیر داده‌های راداری (روش‌های آشکارسازی اهداف، تجزیه و غیره) قابلیت بسیار بالایی را از خود نشان داده است. موفقیت و صحت عملکرد روش تصویرسازی به زیرفضا به تعریف و حذف صحیح سیگنال‌های ناخواسته برمی‌گردد. در [۱۱-۱۲]، Brigui و همکاران روشی را برای تشخیص اهداف زیرجنگل توسعه داده‌اند. با استفاده از مشخصات سنجنده (هم‌چون فرکانس، موقعیت مداری، زاویه فرودی و پلاریزاسیون) و جهت‌گیری هدف، چندین تصویر به نام‌های زیرفضا تولید شد. بازپراکنش تنه درختان به عنوان تداخل‌کننده‌ها و بازپراکنش شاخه‌ها و تاج درختان به عنوان نویز در نظر گرفته شدند. دوسطحی‌ها و سه‌وجهی‌ها با این الگوریتم آشکارسازی شدند. روش تجزیه به مقادیر منفرد (SVD) برای تعریف زیرفضاهای هدف و تداخل‌کننده مورد استفاده قرار گرفت. اما استفاده از این روش برای آشکارسازی اهداف در تصاویر پلاریمتریک راداری محدودیت‌هایی داشته و موجب به وجود آمدن سه تا مشکل می‌شود. مشکل اول، مربوط به ابعاد بالای زیرفضاها

- 1- Speckle
- 2- Reflection-symmetry
- 3- Singular Value Decomposition

- 4- Sub-pixel targets
- 5- Backscattered waves

پایه مختلط 2×2 می‌باشند:

$$\psi = \left\{ \sqrt{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \sqrt{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \sqrt{2} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \sqrt{2} \begin{bmatrix} 0 & -j \\ j & 0 \end{bmatrix} \right\} \quad (4)$$

که تشکیل‌دهنده یک مجموعه متعامد تحت یک ضرب داخلی هرمیتی^۱ بوده و مبتنی بر بخش‌های خطی خاصی هستند که از ماتریس‌های پائولی نشأت گرفته است. ماتریس همدوسی پلاریمتریک میانگین $\langle [T] \rangle$ ، بر مبنای بردارهای پراکنش پائولی، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\langle [T] \rangle = \frac{1}{n} \sum_{p=1}^n k_p k_p^\dagger = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{bmatrix} \quad (5)$$

یک ماتریس مثبت معین هرمیتی است که علامت \dagger به معنی ترانپوز مزدوج است. واضح است که ماتریس همدوسی هر پیکسل تصویری معادل مجموع ماتریس‌های پراکنش تمامی پراکنش‌کننده‌های منفرد موجود در صحنه است. در سال ۱۹۹۷ Cloude و Pottier روشی را برای استخراج ویژگی‌های متوسط از داده‌های آزمایشی، با استفاده از الگوریتم نرم‌سازی^۲ و براساس آماره‌های مرتبه دوم ارائه کردند. روش آن‌ها براساس فرض توزیع آماری خاصی برای داده عمل نمی‌کند و بنابراین مستقل از قیدهای فیزیکی است. این روش که مبتنی بر تجزیه ماتریس همدوسی به مقادیر و بردارهای ویژه است، فرض می‌کند که همیشه یک مکانیزم متوسط غالب در هر پیکسل وجود دارد و تلاش می‌کند پارامترهای این مکانیزم متوسط را استخراج کند. مقادیر و بردارهای ویژه ماتریس همدوسی پلاریمتریک میانگین با استفاده از قطری‌سازی ماتریس به دست می‌آیند [۵]:

$$T_3 = U_3 \sum U_3^{-1} \quad (6)$$

که در آن، \sum یک ماتریس 3×3 قطری است که عناصر آن، مقادیری حقیقی بوده و نامنفی هستند. $U_3 = [u_1, u_2, u_3]$ نیز یک ماتریس 3×3 واحدی است که مقادیر u_1 ، u_2 و u_3 بردارهای ویژه متعامد هستند و داریم [۵]:

$$T_3 = [u_1, u_2, u_3] \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} [u_1, u_2, u_3]^\dagger \quad (7)$$

$$= \sum_{i=1}^3 \lambda_i u_i u_i^\dagger,$$

$$u_i = \begin{bmatrix} \cos \alpha_i \\ \sin \alpha_i \cos \beta_i e^{i\delta_i} \\ \sin \alpha_i \sin \beta_i e^{i\gamma_i} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$(i = 1, 2, 3)$

پراکنش تعریف شده‌اند که هرکدام بیان‌کننده یک مکانیزه پراکنش استاندارد است. سپس، آن‌ها به دو گروه مکانیزم‌های پراکنش ناخواسته و مکانیزم پراکنش هدف تقسیم‌بندی شده‌اند. فرض بر این است که مکانیزم‌های پراکنش ناخواسته مکانیزم‌هایی هستند که با مکانیزم پراکنش هدف ترکیب شده‌اند و الگوریتم باید تأثیر آن‌ها را قبل از آشکارسازی مکانیزم مورد نظر حذف کند. با حذف اثرات مربوط به مکانیزم‌های پراکنش ناخواسته، آشکارسازی و تفکیک مکانیزم پراکنش مورد نظر بهبود خواهد یافت.

۲- مفاهیم پلاریمتری

۱-۲- ویژگی‌های پراکنش امواج راداری

یک هدف حقیقی، همیشه یک پراکنشی مختلط را به‌عنوان پاسخ در مقابل موج فرودی در بردارد که این پاسخ متأثر از ساختار پیچیده هندسی و مشخصات انعکاس‌پذیری آن هدف است [۱]. زمانی که یک موج الکترومغناطیس به یک پراکنش‌کننده تابانده می‌شود، وضعیت پلاریزاسیون موج پراکنده‌شده نسبت به موج فرودی تغییر می‌کند. برای یک پراکنش‌کننده نقطه‌ای، این تغییر وضعیت پلاریزاسیون به شکل یک ماتریس پراکنشی 2×2 نمایش داده می‌شود:

$$\vec{J}_s = [S] \vec{J}_{tr} \quad (1)$$

که در آن، \vec{J}_s و \vec{J}_{tr} به ترتیب بردارهای Jones موج پراکنده‌شده و فرودی هستند. در سیستم، پایه آنتن متعامد $\{HV\}$ اطلاعات پلاریمتریک اخذشده را می‌توان به شکل ماتریس پراکنش نمایش داد:

$$S = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \quad (2)$$

که در آن، عناصر قطر اصلی این ماتریس باهم برابرند. پیشرفت مهمی که اخیراً در نحوه درک و استخراج بهینه اطلاعات فیزیکی از ماتریس پراکنش $[S]$ رخ داده است، تشکیل بردارهای سیستمی است [۵ و ۱۳]. به‌منظور تجزیه و تحلیل درست اطلاعات فیزیکی، معمولاً بردار ویژگی معروف پائولی (بردار هدف پائولی) از روی ماتریس پراکنش ساخته می‌شود [۲]:

$$\begin{aligned} \vec{k} &= \frac{1}{2} \text{Trace}([S] \psi_P) \\ &= 1 / \sqrt{2} [S_{HH} + S_{VV} S_{HH} - S_{VV} 2S_{HV}]^T \\ &= [k_1, k_2, k_3]^T, \end{aligned} \quad (3)$$

که در آن، $\text{Trace}([A])$ بیان‌کننده مجموع عناصر قرارگرفته در قطر اصلی ماتریس $[A]$ است و ψ_P مجموعه‌ای از ماتریس‌های

می‌باشند، اما سایر عناصر ماتریس دارای ترکیبی از نویز ضربی و نویز جمع‌شونده هستند [۱۷].

فرض کنید z_i مقدار دامنه یک پیکسل دلخواه در تصویر باشد، x_i و v_i به ترتیب مشخص‌کننده سیگنال و نویز ضربی می‌باشند. مقدار دامنه پیکسل مورد نظر به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۸]:

$$z_i = x_i v_i \quad (13)$$

که در آن، v_i دارای میانگین واحد و انحراف معیار σ_i است. فرض شده است که v_i از لحاظ آماری از x_i و $v_j (i \neq j)$ مستقل است. مقدار v_i میزان شدت اسپیکل را نشان می‌دهد. Lee و همکارانش نشان داده‌اند که این نویز ضربی معادل یک نویز جمع‌شونده وابسته به سیگنال است [۱۸]. بنابراین، رابطه (۱۳) به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$z_i = x_i + n_i \quad (14)$$

که در آن، $n_i = x(v_i - 1)$ یک نویز جمع‌شونده وابسته به سیگنال است و انحراف معیار آن به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} \sigma_i^* &= E\{|x_i|^2 | v_i - 1|^2\} \\ &= E\{|x_i|^2\} E\{|v_i - 1|^2\} \\ &= E\{|z_i|^2\} \frac{E\{|v_i - 1|^2\}}{E\{|v_i|^2\}} \\ &= E\{|z_i|^2\} \frac{\sigma_i^2}{\sigma_i^2 + 1}. \end{aligned} \quad (15)$$

بنابراین، انحراف معیار نویز n_i با مقدار میانگین شدت پیکسل متناسب است و نویز جمع‌شونده وابسته به سیگنال برای یک پیکسل، مستقل از پیکسل‌های دیگر تصویر است.

۳- آشکارسازی با استفاده از تصویرسازی به زیرفضای متعامد

در تصاویر پلاریمتریک راداری، در پوشش زمینی هر پیکسل تصویری ممکن است چندین نوع پراکنش‌کننده متفاوت حضور داشته باشند که هرکدام مکانیزم پراکنش مختص خود را داشته باشند.

در این حالت ماتریس پراکنش پیکسل، از این مکانیزم‌های پراکنش مختلف تأثیر می‌پذیرد و می‌توان چنین پیکسلی را پیکسل مخلوط نامید. در آشکارسازی اهداف، ما به دنبال پاسخ به این سؤال هستیم که آیا ماتریس پراکنش پیکسل مورد بررسی ترکیبی چندین ماتریس پراکنش مختلف است یا فقط بیان‌کننده یک مکانیزم پراکنش است؟

هر بخش از (۳) معرف حضور یک مکانیزم پراکنش است که میزان حضور آن را مقادیر ویژه‌ای که در آن ضرب شده‌اند مشخص می‌کنند. احتمال هر مکانیزم پراکنش به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$p_i = \frac{\lambda_i}{\sum \lambda} \quad (9)$$

پارامترهای متوسطی که از این عملیات به دست می‌آیند، به ترتیب عبارتند از: آنتروپی، زاویه آلفا و ناهمسان‌گردی که به شکل زیر محاسبه می‌شوند [۵]:

$$H = -\sum_{i=1}^3 p_i \log_3 p_i \quad (10)$$

$$\alpha = p_1 \alpha_1 + p_2 \alpha_2 + p_3 \alpha_3 \quad (11)$$

$$A = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_2 + \lambda_3} \quad (12)$$

از این پارامترها برای بررسی ویژگی‌های پلاریمتری اهداف آشکارسازی شده و ارزیابی آشکارساز استفاده خواهد شد.

۲-۲- اسپیکل

در تصاویر روزنه مصنوعی راداری، نویز اسپیکل به علت تداخل هم‌دوس امواج منعکس‌شده از تعداد زیادی پراکنش‌کننده اصلی یک سطح ایجاد می‌شود [۱۵]. این اثر موجب یک تغییر پیکسل به پیکسل در مقادیر شدت و ظهور یک الگوی دانه‌ای شکل در تصاویر روزنه مصنوعی راداری می‌شود [۱]. اسپیکل در تصاویر راداری، تجزیه و تحلیل را مشکل و تفسیر تصویر را پیچیده می‌کند. یکی از روش‌های کارآمد در کاهش نویز اسپیکل، روش میانگین‌گیری است. تصاویر پلاریمتریک میانگین‌گیری نشده را می‌توان با استفاده از ماتریس پراکنش نمایش داد. اما به منظور کاهش میزان نویز اسپیکل و تهیه تصاویر میانگین‌گیری شده، مناسب‌ترین راه، تبدیل ماتریس پراکنش به ماتریس هم‌دوسی یا ماتریس کوواریانس است؛ چراکه میانگین‌گیری از مقادیر مختلط بنابر علیی که در مرجع [۱] بیان شده است، میزان نویز اسپیکل را تغییر نمی‌دهد.

از دیدگاه پردازش تصویری و آماری، اسپیکل را می‌توان به صورت یک نویز ضرب‌شونده تعریف کرد که در این حالت میزان اسپیکل با میزان سیگنال صحنه تصویربرداری متناسب است. این مدل برای تصاویر روزنه مصنوعی راداری استاندارد یا میانگین‌گیری شده استخراج شده و مورد تأیید قرار گرفته است [۱۶]. برای تصاویر پلاریمتریک که به شکل ماتریس هم‌دوسی هستند، عناصر روی قطر اصلی ماتریس دارای ویژگی نویز ضربی

جدول (۱): بردارهای ویژگی پراکنش پیشنهادی و مشخصات پلاریمتریکی مکانیزم‌های پراکنش استفاده‌شده

مکانیزم پراکنش استاندارد	بردار پراکنش پائولی	ماتریس همدوسی T	بردار ویژگی پراکنش $[T_{11} \ T_{22} \ T_{33}]^T$
Trihedral سه‌وجهی	$[\sqrt{2} \ 0 \ 0]^T$	$\begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$[2 \ 0 \ 0]^T$
Dihedral دوسطحی	$[0 \ \sqrt{2} \ 0]^T$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$[0 \ 2 \ 0]^T$
Dihedral oriented at 45 degree دوسطحی 45°	$[0 \ 0 \ \sqrt{2}]^T$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}$	$[0 \ 0 \ 2]^T$
Helix مارپیچ	$\left[0 \ \frac{\sqrt{2}}{2} \ -\frac{\sqrt{2}}{2}i\right]^T$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & \pm 1/2i \\ 0 & \mp 1/2i & 1/2 \end{bmatrix}$	$\left[0 \ \frac{1}{2} \ \frac{1}{2}\right]^T$

مکانیزم پراکنش مورد نظر (هدف) است. یک پیکسل مخلوط را که حاوی بازپراکنش پلاریمتریک حاصل از m پراکنش‌کننده منحصر به فرد است، می‌توان با استفاده از بردار l -بعدی $r(x, y)$ ، به شکل زیر توصیف کرد:

$$r(x, y) = Sw(x, y) + \delta(x, y) \quad (16)$$

که در آن، l ابعاد فضای ویژگی، (x, y) موقعیت مکانی پیکسل مورد نظر، $S = (x_1, \dots, x_{m-1}, x_m)$ یک ماتریس سیگنال $l \times m$ بعدی است که بردار $l \times 1$ بعدی x_i ، بردار ویژگی پراکنش مربوط به i -امین مکانیزم پراکنش استاندارد است، w یک بردار $m \times 1$ است که i -امین مؤلفه آن بیان‌کننده وزن مربوط به i -امین مکانیزم پراکنش حاضر در پیکسل است و δ یک بردار خطای $l \times 1$ است که نشان‌دهنده نویزهای جمع‌شونده وابسته به سیگنال هستند. اگر محیط دارای عملکرد متقابل باشد، عناصر روی قطر اصلی ماتریس همدوسی مربوط به پیکسل مورد نظر را می‌توان به صورت رابطه زیر نمایش داد:

$$r = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{bmatrix} \quad (17)$$

همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، هر کدام از مؤلفه‌های بردار r به صورت رابطه زیر توصیف می‌شود:

$$r_i(x, y) = x_i \omega_i(x, y) + n_i(x, y) \quad (18)$$

که در آن، x_i بردار سیگنال و $n_i = x(v_i - 1)$ نویز جمع‌شونده وابسته به سیگنال است و بنابراین داریم:

۳-۱- استراتژی محاسباتی

یک پیکسل مخلوط در مشاهدات پلاریمتریک راداری ممکن است ترکیبی از چند مکانیزم پراکنش استاندارد باشد. مکانیزم‌هایی از قبیل: پراکنش زوج یا دوسطحی که حاصل از برخورد موج پلاریزه به یک جفت صفحه متعامد با ضرایب دی الکتریک متفاوت است؛ پراکنش فرد یا سه‌وجهی که حاصل از برخورد موج پلاریزه به سطوح زبر است؛ مکانیزم دوسطحی 45° یا پراکنش حجمی که حاصل برخورد موج پلاریزه به دوسطحی‌های دارای زاویه نسبت به خط دید رادار یا مربوط به حجمی از دوقطبی‌های دارای جهت‌گیری تصادفی است و مکانیزم مارپیچ که در این مقاله به‌عنوان مکانیزم‌های استاندارد در نظر گرفته شده‌اند. بلوک‌های شهری، ساختمان‌ها و اهداف سخت دارای پراکنشی شبیه به دوسطحی هستند؛ سطوح اقیانوس و زمین مسطح دارای پراکنش فرد است؛ ساختمان‌هایی که در راستای عمود بر خط دید رادار قرار ندارند و پوشش‌های جنگلی و یا هر عارضه‌ای که درجه پلاریزاسیون موج را کاهش می‌دهد دارای پراکنش حجمی است؛ مناطق دست‌ساز بشر اعم از پل و ساختمان نیز دارای پراکنشی شبیه به مارپیچ هستند. جدول (۱) مشخصات و بردارهای ویژگی پراکنش متعلق به مکانیزم‌های پراکنش استاندارد را نشان می‌دهد.

در الگوریتم پیشنهادی، یک پیکسل مخلوط داریم که به صورت ترکیبی خطی از مکانیزم‌های پراکنش استاندارد با وزن‌های متفاوت است. وزن هر مکانیزم پراکنش متناسب است با مساحت کسری از پیکسل که با پراکنش‌کننده متناظر با آن مکانیزم اشغال شده است. ایده اصلی کار، یافتن مقدار وزن بهینه

$$\hat{r} = U\gamma + \varepsilon \quad (22)$$

که در آن، \hat{r} تشکیل شده از ترم یک بخش ناخواسته و یک بخش خطایی که به صورت $\varepsilon = d\omega + \delta$ محاسبه می‌شود. طبق تئوری کمترین مربعات، برآورد کمترین مربعات $\hat{\gamma}$ که مربعات خطای $\varepsilon^T \varepsilon$ را کمینه می‌کند، به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۹]:

$$\hat{\gamma} = (U^T U)^{-1} U^T \hat{r} \quad (23)$$

که عبارت $U^\# = (U^T U)^{-1} U^T$ شبه معکوس ماتریس U است. با استفاده از برآورد $\hat{\gamma}$ و ضرب آن در U و کم کردن آن از پیکسل مخلوط در رابطه (۲۱) موجب حذف اثر U خواهد شد. پس داریم:

$$\hat{r} - U U^\# = d\omega_d + \delta - U U^\# (d\omega_d + \delta) \quad (24)$$

عبارت فوق به صورت زیر بازنویسی می‌شود [۱۹]:

$$(I - U U^\#) \hat{r} = (I - U U^\#) (d\omega_d + \delta) \quad (25)$$

بنابراین، از یک ماتریس تصویر که به صورت $P_U^\perp = I - U U^\#$ (مکمل عمود U) تعریف می‌شود برای حذف اثرات U استفاده می‌کنیم. اپراتور P_U^\perp یک ماتریس متقارن ($P^T = P$) و هم‌چنین تکرارشونده $P^2 = P$ است. بردار حاصل از ضرب P_U^\perp و \hat{r} ، فقط شامل انرژی متعلق به مکانیزم پراکنش مورد نظر ما و نویز خواهد بود. پس داریم:

$$P_U^\perp \hat{r} = \frac{1}{Span} (P_U^\perp d\omega_d + P_U^\perp \delta) \quad (26)$$

در این روش عمود مکمل U اثرات مربوط به U را به صفر کاهش می‌دهد.

۳-۳- آشکارسازی مکانیزم مورد نظر

وقتی مکانیزم‌های ناخواسته حذف شدند، می‌توان با استفاده از روش کمترین مربعات، مقدار وزن مکانیزم مورد نظر را در هر پیکسل محاسبه کرد. روش کمترین مربعات به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\hat{\omega}_d(\hat{r}) = \left((P_U^\perp \frac{d}{Span})^T (P_U^\perp \frac{d}{Span}) \right)^{-1} (P_U^\perp \frac{d}{Span})^T P_U^\perp \hat{r} \quad (26)$$

که در آن، $\hat{\omega}_d$ مقدار وزن یا فراوانی مربوط به مکانیزم پراکنش مورد نظر است که از روی بردار پراکنش پیکسل مورد نظر برآورد می‌شود. در این عبارت، بردار پراکنش پیکسل مورد مشاهده آورده شده تا تأکید شود که مقدار وزن با استفاده از پیکسل تصویری برآورد می‌شود.

$$r(x, y) = S\omega(x, y) + n(x, y) \quad (19)$$

در این حالت چون سه معادله داریم و حداکثر باید سه مجهول داشته باشیم، مجهولات همان مقادیر وزن‌هاست که در بردار ω جای گرفته‌اند، بنابراین مجاز به استفاده از سه مکانیزم پراکنش برای مدل‌سازی بازپراکنش ثبت‌شده در پیکسل‌ها بوده و ماتریس $S = (x_1, x_2, x_3)$ یک ماتریس 3×3 است. با توجه به رابطه (۱۵)، در مناطق دارای بازپراکنش قوی (مانند مناطق شهری) واریانس نویز جمع‌شونده در مقایسه با مناطق دارای بازپراکنش ضعیف (هم‌چون پهنه‌های آبی) بسیار زیاد است. برای نرم‌تر کردن این تغییرات و هم‌چنین به منظور افزایش قابلیت بردارهای ویژگی در توصیف رفتار اهداف راداری دارای پراکنش ضعیف، عناصر بردار ویژگی را به SPAN (مجموع عناصر قطری ماتریس کوهرنسی پیکسلی) تقسیم می‌کنیم. رابطه (۱۶) به شکل زیر بازنویسی می‌شود:

$$\hat{r}_i(x, y) = \frac{1}{Span} (x_i \omega_i(x, y) + n_i(x, y)) \quad (20)$$

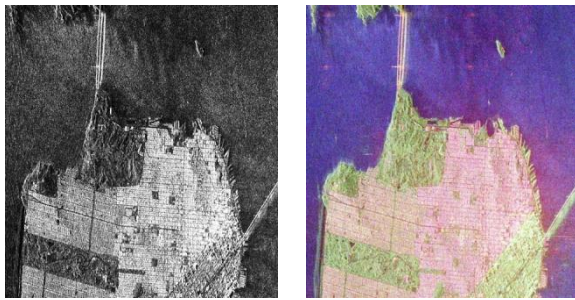
که در آن، $\hat{r}_i = r_i / Span$ است. بدون این‌که از کلیت مسئله فاصله بگیریم، فرض کنید ستون آخر ماتریس S مکانیزم پراکنش (هدف) مورد نظر ماست که آن را با d نمایش داده و بقیه ستون‌ها ماتریس مکانیزم‌های ناخواسته هستند که آن‌ها را در ماتریس $U = (x_1, x_2)$ جمع می‌کنیم. رابطه (۲۰) را که در آن مکانیزم‌های پراکنش را تفکیک کرده‌ایم، به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\hat{r} = \frac{1}{Span} (d\omega_d + U\gamma + n) \quad (21)$$

که در آن، ω_d وزن مربوط به مکانیزم پراکنش مورد نظر و بردار γ دربردارنده وزن‌های مربوط به مکانیزم‌های ناخواسته است. حال از تصویرسازی متعامد برای حذف اثرات ناخواسته U و پیشینه کردن انرژی مکانیزم مورد نظر نسبت به نویز استفاده خواهیم کرد.

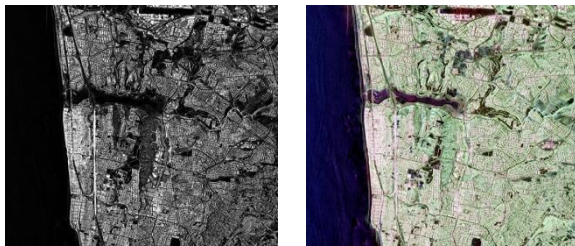
۳-۲- حذف مکانیزم ناخواسته

همان‌طور که در بخش قبل نیز اشاره شد، در پوشش زمینی پیکسل تصویری، مکانیزم پراکنش مورد نظر (هدف) با بازپراکنش‌های حاصل از چند پراکنش‌کننده ترکیب شده است. بنابراین، برای استخراج هدف مورد نظر d ، نیازمند حذف اثرات مربوط به مکانیزم‌های پراکنش ناخواسته هستیم که همان ستون‌های ماتریس U می‌باشند. برای رسیدن به این هدف، اپراتوری باید طراحی شود که پیکسل تصویر \hat{r} را به زیرفضای عمود بر ستون‌های U تصویر کند. رابطه (۲۱) را به صورت زیر بازنویسی می‌شود:



(ب)

(الف)



(د)

(ج)

شکل (۲): تصاویر ترکیب رنگی پائولی (الف) و Span (ب) منطقه سان فرانسیسکو و تصاویر ترکیب رنگی پائولی (ج) و Span (د) منطقه سان دیگو

۴- نتایج

در این قسمت به بررسی عملکرد آشکارساز پیشنهادی و مقایسه آن با الگوریتم های مرجع خواهیم پرداخت.

۴-۱- داده ها و مناطق مورد مطالعه

به منظور ارزیابی عملکرد آشکارساز، از دو داده پلاریمتریک شامل تصویر باند C سنجنده فضایی Radarsat-2، اخذ شده از منطقه سان فرانسیسکو و تصویر باند L سنجنده هوایی UAVSAR اخذ شده از منطقه سان دیگو استفاده شده است. در روش پیشنهادی، فرکانس موج بازگشتی مورد استفاده قرار نگرفته است و فرآیند آشکارسازی به طور مستقیم به فرکانس وابسته نیست. انتخاب فرکانس و تصویر راداری فقط به نوع هدف بستگی دارد.

تصاویر Radarsat-2 و UAVSAR به ترتیب دارای ابعاد 1400×1500 و 1700×1500 پیکسل می باشند. مناطق مورد مطالعه دارای مناطق مسکونی، پوشش گیاهی و مناطق دریایی می باشند. تصاویر Span و ترکیب رنگی پائولی داده های استفاده شده در شکل (۲) آورده شده است.

قدرت تفکیک داده Radarsat-2 در محدوده نزدیک برابر $11/1$ متر و در محدوده دور برابر $10/5$ متر است. قدرت تفکیک داده UAVSAR نیز برابر ۱ متر است. داده Radarsat-2 یک داده

۳-۴- تفسیر آشکارساز

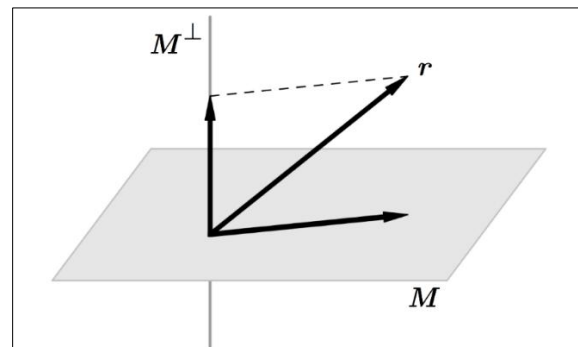
بردارهای پراکنش متعلق به پراکنش کننده هایی که در پوشش زمینی پیکسل های تصویری حضور دارند، مستقل خطی هستند و دارای مقادیر دامنه حقیقی در $\mathbb{R}^{1 \times 1}$ می باشند. یک زیرمجموعه غیر تهی از $\mathbb{R}^{1 \times 1}$ یک زیرفضا نامیده می شود. یک مجموعه از تمامی ترکیبات خطی ستون های ماتریس K ، زیرفضای مورد علاقه ما در مسئله آشکارسازی هدف است و این زیرفضا گستردگی ستون های ماتریس S را در فضا بیان می کند.

فرض کنید M زیرفضایی باشد که دربرگیرنده تمامی ترکیبات خطی بردارهای پراکنش ناخواسته باشد. بنابراین، این زیرفضا توصیف کننده اثرات تمامی بردارهای پراکنش ناخواسته در شکل گیری پیکسل تصویری است. زیر فضای M ، محدوده ماتریس U را نشان می دهد. فرض کنید تصویر تمامی پیکسل تصویر پلاریمتریک رادار را در زیرفضای عمود بر محدوده U به دست آوریم، این فرایند در شکل شماره (۱) نمایش داده شده است.

بردار پراکنش هر کدام از پیکسل ها که دارای مکانیزم پراکنش مورد نظر (هدف) ما است، به طور کامل توسط محدوده U قابل نمایش نیست و بنابراین یک تصویر غیر صفر در زیرفضای عمود بر M دارد. اجرای اپراتور P به عنوان تصویر کننده به فضای عمود بر M ، روی پیکسل های تصویری توسط رابطه (۲۶) نمایش داده شده است و ما داریم:

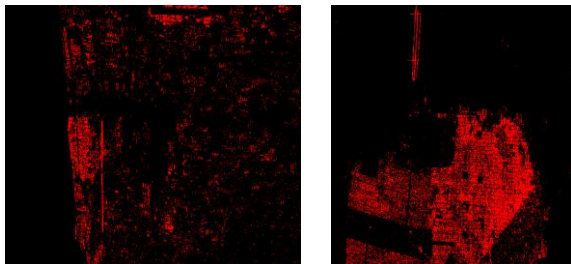
$$P\hat{r} = \frac{1}{Span} (Pd\omega_a + PU\gamma + P\delta) \quad (27)$$

ترم $PU\gamma$ به طور حتم صفر خواهد شد چرا که $U\gamma$ به ازای تمامی مقادیر γ در M قرار دارد و ترم $Pd\omega_a$ یک بردار غیر صفر خواهد شد و در بردارنده انرژی مربوط به مکانیزم پراکنش مورد نظر خواهد بود.



شکل (۱): مفهوم تصویرسازی به زیرفضای متعامد

۴-۲-۱- ویژگی‌های پلاریمتریکی اهداف آشکارسازی شده به منظور بررسی مشخصات پلاریمتریکی اهداف آشکارسازی شده، نقشه هدف دوسطحی‌های آشکارسازی شده مورد استفاده قرار گرفت. به منظور کاستن تعداد آشکارسازی‌های نادرست و همچنین مشخص کردن اهداف با قطعیت بالا، حد آستانه‌ای به اندازه شش برابر بزرگ‌تر از میانگین مقادیر شدت موجود در نقشه هدف، مورد استفاده قرار گرفت. نقشه هدف باینری به دست آمده پس از حد آستانه‌گذاری در شکل (۴) نشان داده شده است.



(ب)

(الف)

شکل (۴): (الف) نقشه هدف باینری (حد آستانه‌گذاری شده) برای دوسطحی‌های منطقه سان‌فرانسیسکو، (ب) نقشه هدف باینری (حد آستانه‌گذاری شده) برای دوسطحی‌های منطقه سان‌دیگو

جدول (۲): میانگین مقادیر آنتروپی و زاویه آلفا برای نقشه‌های هدف باینری

	میانگین آنتروپی	میانگین زاویه آلفا
نقشه هدف سان‌فرانسیسکو	۰/۳۳۲۸	۶۰/۳۱۸۹
نقشه هدف سان‌دیگو	۰/۳۴۶۷	۵۶/۱۵۴۵

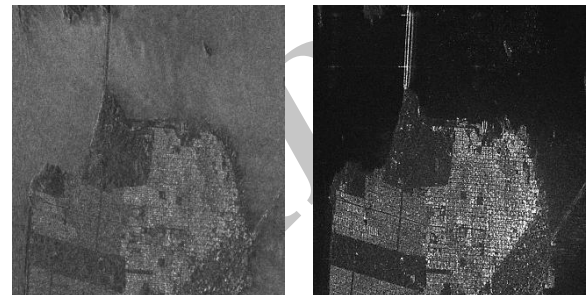
یکی از روش‌های بررسی اهداف آشکارسازی شده از جهت دوسطحی بودن، محاسبه مقادیر آنتروپی و زاویه آلفا برای موقعیت‌های اهداف شناسایی شده در تصویر اصلی است. برای این منظور، مقادیر آنتروپی و زوایای آلفا از ماتریس‌های همدوسی واقع در محل قرارگیری اهداف دوسطحی در نقشه هدف باینری محاسبه و پراکندگی آن‌ها در صفحه آنتروپی-آلفا در شکل (۵) نشان داده شده است. میانگین مقادیر آنتروپی و زاویه آلفای محاسبه شده برای تمامی اهداف دوسطحی آشکارسازی شده، در جدول (۲) آورده شده است. مقادیر آنتروپی کوچک‌تر از ۰/۵ و مقادیر آلفای بزرگ‌تر از ۵۰ درجه نشان‌دهنده رفتار مربوط به دوسطحی‌ها می‌باشد. همان‌طور که از مقادیر ثبت شده در جدول مشخص است، اهداف آشکارسازی شده از نوع دوسطحی می‌باشند.

اغلب دوسطحی‌های آشکارسازی شده در مناطق مورد مطالعه، ساختمان‌ها هستند و از لحاظ رفتار پلاریمتریکی، این دوسطحی‌ها به علت دارا بودن ساختار پیچیده، حتماً با دوسطحی استاندارد (دووجهی دارای صفحات دی-الکتریک متعامد)،

مختلط بدون میانگین‌گیری (SLC) است و داده UAVSAR با استفاده از یک پنجره با ابعاد 12×7 میانگین‌گیری شده است. به منظور محاسبه ماتریس‌های همدوسی بردارهای پراکنش محلی، برای هر دو داده با پنجره‌ای به ابعاد 3×3 میانگین‌گیری انجام گرفت.

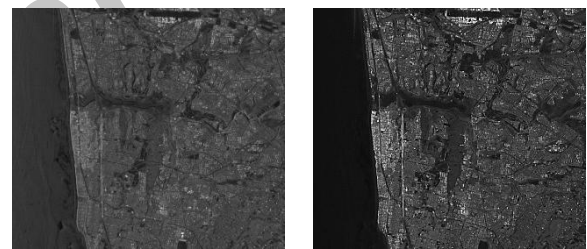
۴-۲- نتایج آشکارسازی دوسطحی و سه‌وجهی

نتایج آشکارسازی (نقشه هدف) برای هدف‌های دوسطحی، سه‌وجهی در شکل (۳) نمایش داده شده است.



(ب)

(الف)



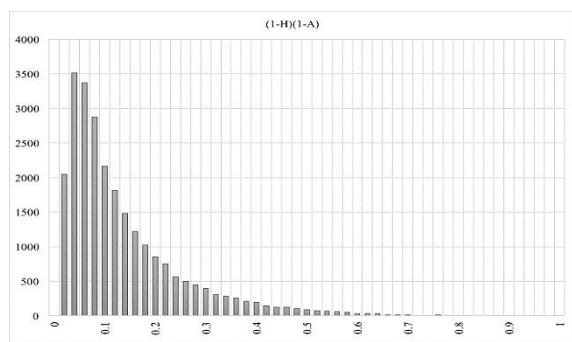
(د)

(ج)

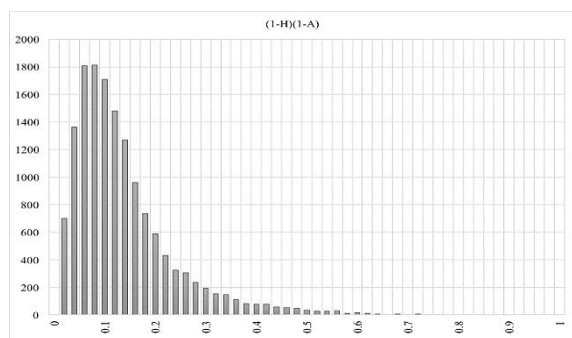
شکل (۳): نقشه‌های هدف برای دوسطحی (الف) و سه‌وجهی

(ب) منطقه سان‌فرانسیسکو و نقشه‌های هدف برای دووجهی (ج) و سه‌وجهی (د) منطقه سان‌دیگو

نقشه‌های هدف، نشان‌دهنده محل قرارگیری اهداف می‌باشند و مقادیر شدت هر پیکسل، مقدار خروجی آشکارسازی برای آن پیکسل هستند که خروجی آشکارسازی نیز میزان حضور مکانیزم پراکنش مورد نظر را در هر پیکسل بیان می‌کند. آشکارسازی عوارضی را که دارای پراکنش زوج هستند به‌عنوان اهداف دوسطحی، عوارض دارای پراکنش فرد را به‌عنوان سه‌وجهی شناسایی می‌کند. اهداف دوسطحی شناسایی شده در مناطق دارای پوشش گیاهی نیز می‌توانند ساختمان و یا تنه درختان باشند. احتمال این‌که دوسطحی آشکارسازی شده در منطقه دارای پوشش گیاهی تنه درخت باشد در تصاویر اخذ شده در باند L، به‌واسطه طول موج بلندتر، بیش‌تر است. عوارضی مانند پل‌ها و اجسام سخت و بزرگ که در راستای عمود برجهت ارسال موج سنجنده قرار دارند نیز به علت داشتن رفتار پراکنشی زوج نیز توسط الگوریتم به‌عنوان دوسطحی شناسایی می‌شوند.



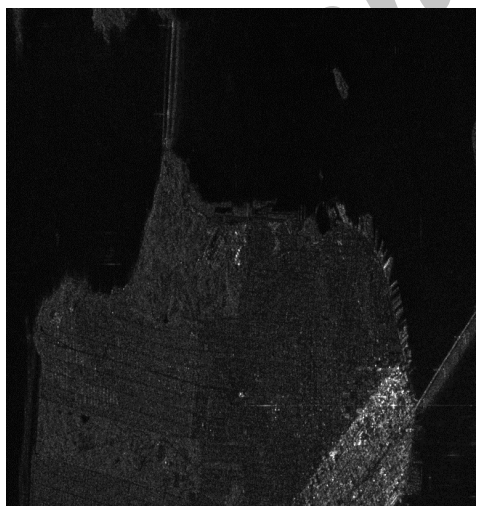
(الف)



(ب)

شکل (۶): (الف) هیستوگرام مربوط به مشخصه $(1-H)(1-A)$ برای دوسطحی‌های آشکارسازی شده در منطقه سان‌فرانسیسکو و (ب) دوسطحی‌های آشکارسازی شده در منطقه سان‌دیگو

الگوریتم با هدف آشکارسازی این ساختارها مورد آزمایش قرار گرفته و نتایج در شکل (۷) نمایش داده شده است.



شکل (۷): نقشه هدف برای دووجهی‌های دارای دوران 45° نسبت به خط دید رادار

۴-۴- آشکارسازی مناطق مسکونی

در حیطه کاربردهای تصاویر پلاریمتریک راداری، استخراج و آشکارسازی عوارض شهری یکی از موضوعات بسیار مهم و

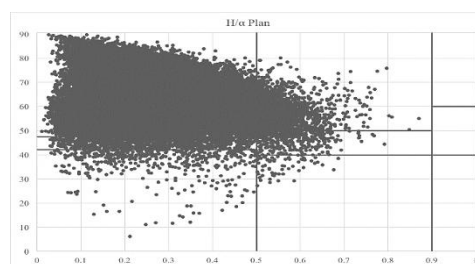
متفاوتند. مقصود از رفتار پلاریمتریکی، بازپراکنش همدوس (نقطه‌ای) یا غیرهمدوس (بخشی) می‌باشد. به منظور بررسی رفتار پلاریمتریکی دوسطحی‌های آشکارسازی شده از مشخصه $(1-H)(1-A)$ استفاده می‌کنیم.

اگر مقدار این مشخصه برای یک هدف، نزدیک به ۱ باشد نشان‌دهنده رفتار بازپراکنشی همدوس و نقطه‌ای بودن آن هدف است و اگر نزدیک به صفر باشد، نشان از بخشی بودن آن هدف است. هیستوگرام مربوط به مشخصه $(1-H)(1-A)$ برای اهداف آشکارسازی شده در شکل (۶) نمایش داده شده است. همان‌طور که از روی هیستوگرام مشخص است، بیش‌تر مقادیر نزدیک به صفر هستند و این یعنی ساختمان‌ها اهدافی بخشی می‌باشند و فرض الگوریتم مبنی بر غیرخالص بودن ماتریس‌های همدوسی ثبت شده در تصویر فرضی کاملاً صحیح بوده و نیز استخراج اهداف از چنین فضایی با توجه به محل قرارگیری ساختمان‌ها به درستی صورت گرفته است.

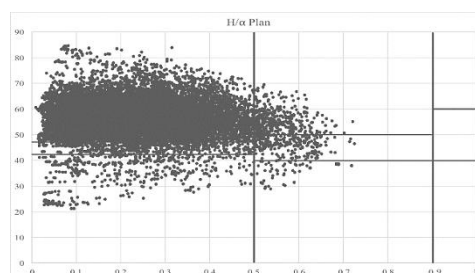
۴-۳- آشکارسازی اهداف دارای دوران نسبت به خط

دید رادار

در بخش کاری منطقه سان‌فرانسیسکو که در قسمت راست تصویر پائولی در شکل (۲-الف) نشان داده شده، ساختمان‌ها و عوارضی (پل) وجود دارند که با جهت‌گیری بیش از 40° نسبت به خط دید رادار قرار گرفته‌اند. این عوارض دیگر با استفاده از مدل پراکنشی مربوط به دوسطحی قابل آشکارسازی نیستند و بایستی با دخالت دادن این زاویه دوران اقدام به آشکارسازی آن‌ها کرد.



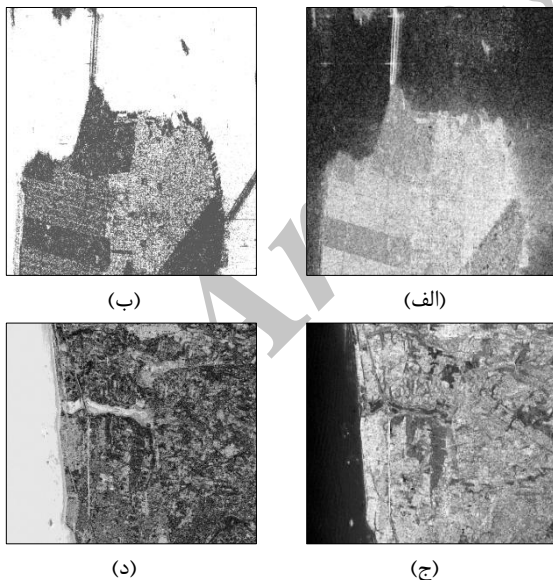
(الف)



(ب)

شکل (۵): (الف) پراکنندگی مقادیر آنتروپی و زاویه آلفا برای دووجهی‌های آشکارسازی شده در منطقه سان‌فرانسیسکو و (ب) دووجهی‌های آشکارسازی شده در منطقه سان‌دیگو

سه وجهی تحت الگوریتم آشکارساز Marino [۸] و روش تجزیه Yamaguchi [۲۰] آورده شده است. الگوریتم آشکارسازی Marino مبتنی بر چنگال Huynen است و از بردار پراکنش نرمال شده هدف و بردار آشفته هدف به منظور آشکارسازی هدف استفاده می‌کند. این الگوریتم مبتنی بر همدوسی پلاریمتری است به نحوی که اگر همدوسی میان هدف و بردار پراکنش پیکسل تصویری بالا باشد، آن پیکسل به عنوان هدف شناسایی می‌شود. نتایج آشکارسازی اهداف دوسطحی و سه‌وجهی در مناطق مورد مطالعه، در شکل (۹) نمایش داده شده است. برای جزئیات بیشتر، به مرجع [۸] مراجعه شود. روش تجزیه Yamaguchi، مبتنی بر روش تجزیه Freeman-Durden است، با این تفاوت که Yamaguchi شرط تقارن انعکاسی را در نظر نگرفته است و علاوه بر سه مکانیزم پراکنش دوسطحی، سه‌وجهی و حجمی، مکانیزم پراکنش ماریپج را نیز در نظر گرفته است. در این روش، ماتریس همدوسی به چهار مکانیزم مذکور تجزیه شده و بازپراکنش پلاریمتری توسط این چهار مکانیزم توصیف می‌شود. نتایج تجزیه اهداف دوسطحی و سه‌وجهی در مناطق مورد مطالعه، در شکل (۹) نمایش داده شده است. جهت توضیحات بیشتر در مورد روش تجزیه مورد بحث، به مرجع [۲۰] مراجعه شود.

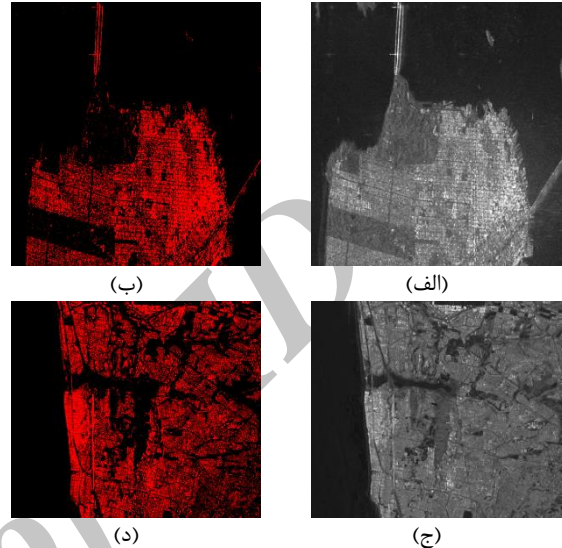


شکل (۹): نقشه‌های هدف آشکارسازی شده توسط الگوریتم

Marino برای دوسطحی (الف) و سه‌وجهی (ب) منطقه سان فرانسیسکو و نقشه‌های هدف برای دووجهی (ج) و سه‌وجهی (د) منطقه سان دیگو

همان‌طور که در اشکال (۳-الف و ج) و (۹-الف و ج) مشاهده می‌شود، دوسطحی‌های آشکارسازی شده تحت آشکارساز پیشنهادی و آشکارساز Marino، همگی در مناطق مسکونی قرار دارند و هم‌چنین پل Golden Gate توسط هر دو آشکارساز به

ضروری است. بیش‌تر عوارض موجود در شهرها مانند ساختمان‌ها، پل‌ها و ... دارای قدرت بازپراکنش زیادی در مقابل امواج راداری هستند. اما چون این عوارض اغلب دارای اشکال پیچیده‌ای هستند، اصطلاحاً به آن‌ها اهداف دارای انعکاس نامتقارن گفته می‌شود [۳].



شکل (۸): مکانیزم‌های ماریپج آشکارسازی شده در (الف) منطقه سان فرانسیسکو و (ج) منطقه سان دیگو. مناطق مسکونی استخراج شده در (ب) منطقه سان فرانسیسکو و (د) منطقه سان دیگو.

مکانیزم پراکنش ماریپج دقیقاً منطبق بر حالت انعکاس نامتقارن است و در محیط‌های پیچیده‌ای مثل مناطق شهری ظاهر می‌شود. مکانیزم پراکنش ماریپج یک پراکنش کلی است که در مناطق شهری دارای ساختمان ظاهر می‌شود و در مناطق دارای پوشش گیاهی و طبیعی دیده نمی‌شود. بنابراین، برای تشخیص و تفکیک اهداف ساخته شده به دست بشر و اهداف طبیعی، مکانیزم ماریپج یک ویژگی بسیار کارآمد است. اما این مکانیزم توانایی تفکیک گونه‌های مختلف ساختمان‌ها را از هم‌دیگر ندارد. با در نظر گرفتن مکانیزم‌های پراکنش سه‌وجهی، حجمی و ماریپج به عنوان مکانیزم‌های شکل‌دهنده ماتریس‌های همدوسی تصویری و آشکارسازی مکانیزم ماریپج، مناطق مسکونی و عوارض شهری موجود در تصاویر پلاریمتریک آشکارسازی شده‌اند. عوارض آشکارسازی شده مستقل از جهت قرارگیری نسبت به خط دید رادار هستند. نتایج آشکارسازی شده و نتایج حد آستانه‌گذاری شده (باینری) در شکل (۸) آورده شده است.

۵- مقایسه عملکرد روش پیشنهادی با روش‌های تجزیه و آشکارسازی هدف

در این قسمت با هدف بررسی صحت اهداف شناسایی شده تحت روش پیشنهادی، نتایج آشکارسازی و تجزیه اهداف دوسطحی و

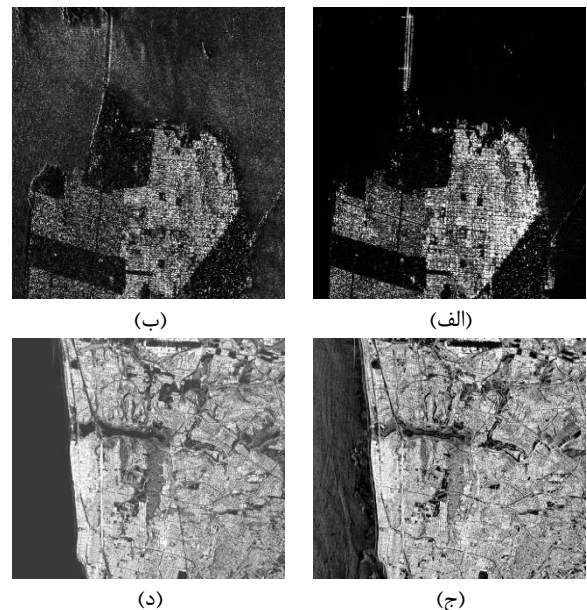
۶- نتیجه گیری

در این مقاله از روش تصویرسازی به زیرفضای متعامد برای آشکارسازی اهداف در تصاویر پلاریمتری راداری استفاده شد. در این روش تعریف مکانیزم‌های ناخواسته، نقش بسیار مهمی در موفقیت روش ایفا می‌کند. زیرفضایی که توسط مکانیزم‌های دوسطحی و حجمی ایجاد می‌شود دقیقاً منطبق بر زیرفضایی است که توسط مکانیزم‌های ماریپج و دوسطحی ایجاد می‌شود. بنابراین اگر مکانیزم‌های دوسطحی و حجمی را به عنوان مکانیزم‌های ناخواسته معرفی و حذف کنیم، عملاً زیرفضای مربوط به مکانیزم ماریپج را نیز از بین برده‌ایم و دیگر امکان آشکارسازی آن وجود نخواهد داشت. برای مکانیزم‌های دیگری نیز این مسئله ممکن است به وجود آید، به‌عنوان مثال، زیرفضای تشکیل شده با مکانیزم‌های دوسطحی و سه‌وجهی با زیرفضای به‌وجود آمده توسط مکانیزم‌های دوقطبی و دوسطحی هم‌پوشانی دارند. قبل از مرحله حذف مکانیزم‌های ناخواسته، می‌توان هر سه مکانیزم مربوط به مکانیزم هدف و مکانیزم‌های ناخواسته را در یک ماتریس قرار داد و رتبه آن را محاسبه کرد. در صورت عدم کمبود رتبه، می‌توان آشکارسازی را طبق روش پیشنهادی انجام داد. نتایج ارزیابی الگوریتم پیشنهادی روی دو مجموعه داده پلاریمتری باند-C و باند-L نشان می‌دهد که آشکارسازی به‌صورت دقیق صورت گرفته است. عملکرد الگوریتم پیشنهادی در شناسایی پهنه‌های آبی، به‌عنوان اهداف سه‌وجهی، عملکرد بهتری نسبت به روش تجزیه Yamaguchi و عملکرد مشابهی نسبت به آشکارساز Marino داشت. با در نظر گرفتن ساختمان‌ها به‌عنوان دوسطحی‌های بخشی (دارای پراکنش غیرهمدوس)، نتایج نشان دادند که فرض الگوریتم مبنی بر غیرخالص بودن ماتریس‌های همدوسی ثبت شده در تصویر فرض کاملاً صحیحی بوده و هم‌چنین استخراج اهداف نیز از چنین فضایی با توجه به محل قرارگیری ساختمان‌ها در مناطق مورد مطالعه به‌درستی صورت گرفته است. در این مقاله، روش پیشنهادی برای آشکارسازی مناطق مسکونی (ساختمان‌ها با زوایای دوران متفاوت) مورد ارزیابی قرار گرفت و از مکانیزم پراکنش ماریپج برای این منظور استفاده شد. نتایج آشکارسازی نشان داد که مناطق مسکونی آشکارسازی شده مستقل از جهت قرارگیری نسبت به خط دید رادار هستند.

استفاده از مکانیزم‌های پراکنش دیگر که در مقالات تجزیه هدف در تصاویر پلاریمتری و سایر مقالات راداری معرفی گردیده‌اند نیز می‌تواند منجر به تعریف زیرفضاهای متعدد و آشکارسازی اهداف دیگر شود که این پیشنهاد می‌تواند موضوع تحقیقات بعدی باشد.

عنوان پراکنش‌کننده دوسطحی شناسایی شده است. هر دو الگوریتم عملکرد مشابهی در آشکارسازی هدف داشته‌اند، اما اهداف شناسایی شده تحت روش پیشنهادی مشخص‌کننده محل دقیق ساختمان‌هاست و مرز بین اهداف کاملاً مشخص است. هم‌چنین مشاهده می‌شود که الگوریتم Marino دوسطحی‌های زیادی را در مناطق دارای پوشش گیاهی (شکل ۹-الف)) شناسایی کرده است که با توجه به قدرت تفکیک و باند اخذ تصویر، آشکارسازی اشتباه محسوب می‌شوند چرا که آشکارسازی تنه درختان به عنوان پراکنش‌کننده دوسطحی در این تصویر امکان‌پذیر نیست. آشکارساز پیشنهادی و آشکارساز Marino عملکرد تقریباً یکسانی در آشکارسازی اهداف سه‌سطحی داشته‌اند (تصاویر (ب) و (د) در اشکال ۳ و ۹) و هر دو آشکارساز پهنه‌های آبی را به درستی به‌عنوان پراکنش‌کننده سه‌سطحی (سطحی) شناسایی کرده‌اند. عملکرد آشکارسازها در شناسایی اهداف سه‌سطحی در سایر نواحی مناطق مورد مطالعه مشابه است.

عملکرد روش تجزیه Yamaguchi تأییدکننده عملکرد آشکارساز پیشنهادی است و همان‌طور که در شکل (۱۰-الف و ب) مشاهده می‌شود، دوسطحی‌های شناسایی شده در تحت هر دو الگوریتم از نظر محل قرارگیری، مرز بین اهداف و مقادیر شدت کاملاً مشابه هستند. عملکرد الگوریتم پیشنهادی در شناسایی پهنه‌های آبی نسبت به روش تجزیه Yamaguchi قدری بهتر است و دلیل آن وابستگی کم الگوریتم پیشنهادی به مقادیر Span می‌باشد.



شکل (۱۰): نقشه‌های تجزیه هدف تحت روش Yamaguchi برای دوسطحی (الف) و سه‌وجهی (ب) منطقه سان فرانسیسکو و نقشه‌های هدف برای دووجهی (ج) و سه‌وجهی (د) منطقه سان دیگو

- [20] Y. Yamaguchi, T. Moriyama, M. Ishido, and H. Yamada, "Four- component scattering model for polarimetric SAR image decomposition," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 43, no. 8, pp. 1699-1706, Aug. 2005.

۷. مراجع

- [1] J. S. Lee and E. Pottier, "Polarimetric radar imaging: from basics to applications," CRC press, 2009.
- [2] J. J. van Zyl, "Synthetic aperture radar polarimetry," vol. 2, John Wiley & Sons, 2011.
- [3] S. Cloude, "Polarization: applications in remote sensing, Oxford University Press, 2009.
- [4] S. W. Chen, Y.-Z. Li, X.-s.Wang, S.-P. Xiao, and M. Sato, "Modeling and Interpretation of Scattering Mechanisms in Polarimetric Synthetic Aperture Radar: Advances and Perspectives," *Signal Processing Magazine, IEEE*, vol. 31, pp. 79- 89, 2014.
- [5] S. R. Cloude and E. Pottier, "A review of target decomposition theorems in radar polarimetry," *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 34, pp. 498-518, 1996.
- [6] L. M. Novak, M. B. Sechtin, and M. J. Cardullo, "Studies of target detection algorithms that use polarimetric radar data," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 25, pp. 150-165, 1989.
- [7] J. Chen, Y. Chen, and J. Yang, "Ship detection using polarization cross-entropy," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 6, pp. 723-727, 2009.
- [8] A. Marino, S. R. Cloude, and I. H. Woodhouse, "A polarimetric target detector using the huynen fork," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 48, pp. 2357-2366, 2010.
- [9] J. Yang, Y.-N. Peng, and S.-M. Lin, "Similarity between two scattering matrices," *Electronics Letters*, vol. 37, p. 1, 2001.
- [10] L. M. Novak, M. C. Burl, and W. Irving, "Optimal polarimetric processing for enhanced target detection," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 29, pp. 234-244, 1993.
- [11] F. Brigui, et al., "New SAR algorithm based on orthogonal projections for MMT detection and interference reduction," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 52, no. 7, 2014.
- [12] F. Brigui, et al., "New SAR target imaging algorithm based on oblique projection for clutter reduction," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 50, no. 2, 2014.
- [13] S. R. Cloude, "Uniqueness of target decomposition theorems in radar polarimetry," in *Direct and inverse methods in radar polarimetry*, Ed: Springer, 1992.
- [14] S. R. Cloude and E. Pottier, "A review of target decomposition theorems in radar polarimetry," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 34, no. 2, pp. 498-518, 1996.
- [15] J. W. Goodman, "Some fundamental properties of speckle," *Journal of the Optical Society of America*, vol. 66, no. 11, pp. 1145-1150, 1976.
- [16] H. H. Lim, et al., "Classification of earth terrain using polarimetric synthetic aperture radar images," *Journal of Geophysical Research*, vol. 94, (B6), pp. 7049-7057, 1989.
- [17] C. Lopez-Martinez and X. Fabregas, "Polarimetric SAR speckle noise model," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 41, no. 10, pp. 2232-2242, 2003.
- [18] J. S. Lee and K. Hoppel, "Principal components transformation of multifrequency polarimetric SAR imagery," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 30, pp. 686-696, 1992.
- [19] J. C. Harsanyi and C.-I. Chang, "Hyperspectral image classification and dimensionality reduction: An orthogonal subspace projection approach," *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 32, no. 4, 1994.

Detection of Targets in Polarimetric Radar Images Using Orthogonal Subspace Projection

R. Bordbari*, Y. Maghsoudi

K.N.Toosi University of Technology

(Received: 14/06/2016, Accepted: 03/05/2017)

Abstract

Detection and characterization of the constituent scatterers for each pixel in the scene is one of the fundamental goals of microwave remote sensing. Compared with synthetic aperture radar (SAR) sensing, polarimetric SAR (PolSAR) sensing has finer details of the scattering properties of targets and natural background; therefore, it can increase the detectability of single and partial targets. In this paper, a new and fresh look at the target detection issue is taken and an effective technique which simultaneously annihilates interfering background is developed that detects the presence of a scattering mechanism of interest. Several canonical scattering mechanisms are assumed as our signal sources whose combination forms scattering vector of each pixel with appropriate weight fractions. Using this technique leads to the exact detection of partial targets and build-up areas.

Keywords: Remote Sensing, Polarimetric Radar, Target Detection, Projection, Orthogonal Subspace

* Corresponding author E-mail: rbordbari@mail.kntu.ac.ir