

به کارگیری روش مقادیر ویژه برای استخراج سازوکار پراکندگی و بی‌نظمی سطوح ناصاف تصادفی بر اساس تئوری تجزیه هدف در رادارهای پلاریمتری تصویربرداری

بیژن زاگری^۱، ایاز قربانی^{۲*} و حمیدرضا امین داور^۳

۱- استادیار، دانشکده برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۲- استادیار، دانشکده برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳- استادیار دانشکده برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

*تهران، صندوق پستی: ۱۵۸۷۵-۴۴۱۳

ghorbani@aut.ac.ir

(دریافت مقاله: اسفند ۱۳۸۶، پذیرش مقاله: آذر ۱۳۸۷)

چکیده- در این مقاله، بررسی آماری پارامترهای هدف در رادارهای پلاریمتری سنجش از دور، از جمله سازوکار پراکندگی و بی‌نظمی، استخراج و شبیه‌سازی شده است. برای این منظور، روش آنالیز برداری با استفاده از روش تجزیه هدف برای محاسبه بردارها و مقادیر ویژه اهداف و همچنین میزان احتمال هر یک از آنها برای ماتریس هم‌دوسی^۱ و کوواریانس هدف مورد استفاده قرار گرفته است. علاوه بر این، پارامترهای سازوکار پراکندگی و بی‌نظمی برای اهداف شبه‌کروی و سطوح ناصاف شبیه‌سازی شده است. در این روش، توزیع آماری اندازه قطر قطره‌های باران، به‌عنوان اهداف شبه‌کروی، به‌کار رفته است. نتایج شبیه‌سازی برای توزیع‌های مختلف استخراج شده و با داده‌های راداری سازمان فضایی اروپا مقایسه شده است.

کلید واژگان: تئوری تجزیه هدف، رادارهای پلاریمتری، ماتریس هم‌دوسی

۱- مقدمه

روش تصویربرداری به‌روش پلاریمتری کاربردهای فراوانی در زمینه‌های مختلف، از جمله علم زمین‌شناسی، هواشناسی، کشاورزی و اکتشافات زیرسطحی دارد [۱-۵]. به‌تازگی رادارهای سنجش از دور با به‌کارگیری روش قطبش موج و تئوری تجزیه هدف، به شناسایی اهداف از

لحاظ کیفی و کمی می‌پردازند [۶].

در روشهای تصویربرداری، مایکروویو، پراکندگی ناشی از تابش موج الکترومغناطیس به‌طور مستقیم به فرکانس کاری رادار، قطبش^۲ موج، شکل هندسی، جهت‌گیری هدف و دیگر خصوصیات موج و پراکنده‌گر وابسته است. در این روش با استفاده از سیستم رادارهای دو قطبشی،

1. Coherence

2. polarization

$$\vec{E}(z) = \vec{E}_h(z) \vec{e}_h + \vec{E}_v(z) \vec{e}_v \quad (2)$$

در حوزه زمان با فرض ثابت‌های غیرصفر E_h و E_v داریم:

$$\vec{E}_v(z, t) = E_v \cos(\omega t - k z) \quad (3)$$

$$\vec{E}_h(z, t) = E_h \cos(\omega t - k z + \delta) \quad (4)$$

که δ اختلاف فاز دو مؤلفه افقی و عمودی میدان است. با ترکیب روابط فوق داریم:

$$\left(\frac{E_h(\vec{r}, t)}{E_h} \right)^2 + \left(\frac{E_v(\vec{r}, t)}{E_v} \right)^2 - 2 \left(\frac{E_h(\vec{r}, t) E_v(\vec{r}, t)}{E_h E_v} \right) \cos(\delta) = \sin^2(\delta) \quad (5)$$

این رابطه معادله یک بیضوی است که کلی‌ترین شکل قطبش موج را نشان می‌دهد.

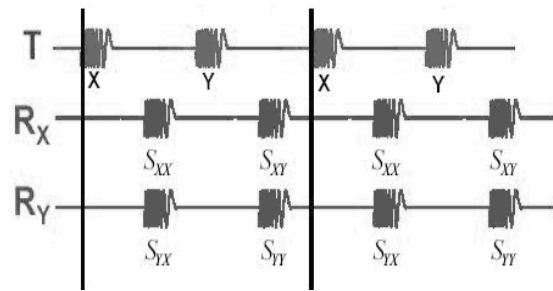
در نمایش برداری جونز از ترکیب خطی دو قطبش عمود برهم از موج صفحه‌ای تک فرکانس استفاده می‌شود. بردار دوبعدی E که به بردار جونز موسوم است، به صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$\vec{E} = [E_h \quad E_v]^T \quad (6)$$

بردار جونز اطلاعات کاملی درباره قطبش موج در اختیار ما می‌گذارد. اگر موج صفحه‌ای با معادله بردار جونز به پراکنده‌گری تابیده شود، موج برگشتی با رابطه E^{re} مشخص و رابطه بین بردار موج تابشی و پراکنده شده با ماتریس جونز به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\begin{bmatrix} \vec{E}_h^{re} \\ \vec{E}_v^{re} \end{bmatrix} = \frac{e^{-j \vec{k}_i \cdot \vec{r}}}{r} \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{E}_h^{tr} \\ \vec{E}_v^{tr} \end{bmatrix} \quad (7)$$

امواج الکترومغناطیس مطابق شکل ۱ در دو قطبش افقی^۱ و عمودی^۲ به سمت هدف ارسال می‌شوند. برای افزایش قدرت تفکیک، امواج به صورت پالسی ارسال و انعکاسهای موج برگشتی در گیرنده به صورت ماتریس پراکنده‌گی به عنوان توصیفگر اولیه هدف دریافت می‌شوند. توصیفگرهای ثانویه بر اساس ماتریس پراکنده‌گی استخراج و پس از پردازش توسط الگوریتم‌های تشخیص هدف به صورت کدهای رنگی نمایش داده می‌شوند [۳].



شکل ۱ ارسال پالس‌های فرستنده و گیرنده در سیستم رادار دو قطبشی برای استخراج ماتریس پراکنده‌گی هدف

۲- بردار و ماتریس جونز

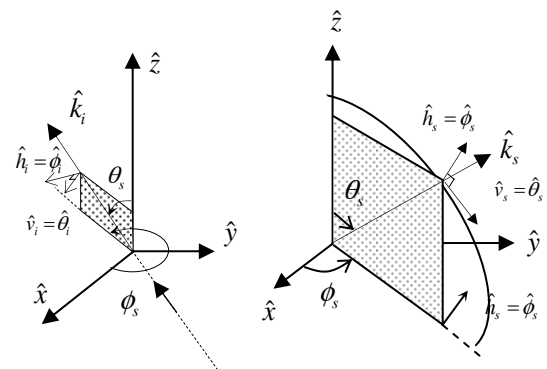
قطبش یکی از خواص موج است که در فرستنده ایجاد شده و در کلی‌ترین حالت، بیضوی است. برای استخراج معادلات قطبش موج مطابق شکل ۲ به دستگاه مختصاتی نیاز داریم که مبدأ آن، مرکز فرستنده باشد. بر این اساس، میدان $E(r)$ در فاصله r از فرستنده برابر است با [۱]:

$$\vec{E}(r) = \vec{E}(z) \frac{e^{-j \vec{k}_i \cdot \vec{r}}}{r} \quad (1)$$

با تجزیه میدان به مؤلفه‌های افقی و عمودی داریم:

1. Horizontal Polarization
2. Vertical Polarization

هدف به نام ماتریس کوواریانس C را به دست آوریم. اهمیت قضیه تجزیه هدف در این بحث از همین نقطه مشخص می‌شود. بدین معنا که برای اهداف پیچیده ماتریس توصیفگر مرتبه دوم را به‌طور تحلیلی نمی‌توان به دست آورد بلکه فقط با استفاده از توصیف آماری در حضور نویز لکه‌ای^۱ قابل بررسی‌اند [۶]. این ماتریس‌ها با سنسورهای پلاریمتری اندازه‌گیری شده و به ماتریس‌های متعارف تبدیل می‌شوند. قضیه تجزیه هدف کمک می‌کند تا در میانگین‌گیری داده‌های آماری بر مبنای تغییرات قطبش موج پراکنده شده، تصمیم‌گیری بهتری انجام شود. قضیه تجزیه هدف به سه نوع مختلف تقسیم می‌شود [۶]: نوع اول که در پراکندگی نور کاربرد دارد، از خاصیت دوگانگی نور استفاده می‌کند و هاین آن را پایه‌ریزی و بارنز در سال ۱۹۸۸ آن را تکمیل کرد. نوع دوم که به تجزیه همدوس معروف است فقط با ماتریس پراکندگی هدف سروکار دارد و آن را کروگیجر در سال ۱۹۹۰ معرفی و ویلیام کامرون در همان سال تکمیل کرد. دسته سوم و مهم‌ترین، به نام تجزیه ناهمدوس، از ماتریس کوواریانس برای اهداف غیرمتعارف استفاده می‌کند و اولین بار روبرت کلود در سال ۱۹۸۵ آن را ارائه کرد. تجزیه غیرمنسجم به سه دسته تجزیه‌های^۲، تجزیه بر مبنای مدل فریمن^۳ و تجزیه بر مبنای مقادیر ویژه^۴ تقسیم می‌شود. در شیوه اخیر - که در این مطالعه از آن استفاده شده - بردار هدف به صورت رابطه زیر از ماتریس پراکندگی استخراج و از روی آن ماتریس کوواریانس حساب می‌شود:



شکل ۲ نمایش دستگاه مختصات برای سازوکار تابش و پراکندگی موج در رادارهای پلاریمتری

بدین ترتیب ماتریس مختلط نرمالیزه جونز - که به ماتریس پراکندگی نیز معروف است - با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \quad (۸)$$

این ماتریس ابزار اصلی در تئوری تجزیه هدف در رادارهای پلاریمتری است. در این ماتریس S_{hh} و S_{vv} مؤلفه‌های قطبش همدوس و S_{vh} و S_{hv} مؤلفه‌های قطبش غیرهمدوس ماتریس پراکندگی است. به دلیل هم‌پاسخی در سیستم رادار مونواستاتیک، مؤلفه‌های غیرهمدوس برابرند. در نتیجه، برای به دست آوردن المان‌های ماتریس جونز باید شش پارامتر مستقل دامنه و فاز را به دست آوریم [۵].

۲-۱- تئوری تجزیه هدف

همان‌طور که در بخش قبل گفته شد، در سیستم رادارهای سنجش از دور به روش پلاریمتری، اطلاعات هدف از روی ماتریس پراکندگی استخراج می‌شود. برای این منظور لازم است ماتریس توصیفگر ثانویه

1. Speckle Noise
2. Huynen Decomposition
3. Model-Based Freeman Decomposition
4. Eigenvector Based Decomposition

دسته‌بندی اهداف راداری ارائه کردند [۶]. به منظور تحلیل فیزیکی مسأله پراکندگی، دو پارامتر α و H به ترتیب به نام‌های سازوکار پراکندگی و بی‌نظمی تعریف شده که به کمک آنها توصیف فیزیکی اهداف راداری به صورت کدهایی رنگی نشان داده می‌شوند. بی‌نظمی که میزان واقطبش^۱ موج پراکنده شده را نشان می‌دهد، براساس مقادیر ویژه ماتریس همدوسی بیان می‌شود و بین صفر و یک است. $H=0$ نشانگر پراکندگی از هدف متعارف و $H=1$ پراکندگی از هدف غیرمتعارف را نشان می‌دهد. α زاویه‌ای است که سازوکار پراکندگی را مشخص کرده و بین صفر و نود درجه است. پارامترهای بی‌نظمی و سازوکار پراکندگی بر طبق رابطه زیر تعریف می‌شوند:

$$H = -\sum_{i=1}^r p_i \log_r(p_i) \quad (13)$$

$$\alpha = \sum_{i=1}^r p_i \alpha_i \quad (14)$$

در این روابط، p_i احتمال مقادیر ویژه ماتریس کوواریانس است و از رابطه زیر به دست می‌آید [۶]:

$$p_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} \quad (15)$$

α زاویه پراکندگی متناظر با مقدار ویژه λ_i حاصل از درایهٔ اول بردارهای ویژه است. مطابق شکل ۳ برای داشتن توصیف فیزیکی در صفحه دوبعدی، سازوکار پراکندگی و بی‌نظمی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، هشت ناحیه مختلف برای دسته‌بندی اهداف^۲ مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

$$K_L = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} S_{hh} & \sqrt{2} S_{hv} & S_{vv} \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

و ماتریس کوواریانس به صورت زیر به دست می‌آید:

$$[C] = K_L \cdot K_L^{*T} \quad (10)$$

و برحسب پارامترهای ماتریس پراکندگی:

$$[C] = \begin{bmatrix} S_{hh} \cdot S_{hh}^* & \sqrt{2} S_{hh} \cdot S_{hv}^* & S_{hh} \cdot S_{vv}^* \\ \sqrt{2} S_{hv} \cdot S_{hh}^* & 2 S_{hv} \cdot S_{hv}^* & \sqrt{2} S_{hv} \cdot S_{vv}^* \\ S_{vv} \cdot S_{hh}^* & \sqrt{2} S_{vv} \cdot S_{hv}^* & S_{vv} \cdot S_{vv}^* \end{bmatrix} \quad (11)$$

این ماتریس تقارن هرمیتی دارد و برای اهداف غیر متعارف دارای توزیع تصادفی می‌شود که باید میانگین‌گیری آماری شود. هدف از تجزیه غیرمتعارف، جداسازی ماتریس فوق به صورت ترکیبی از ماتریس‌های توصیفگر اجسام متعارف و ماتریس نویز است که قابلیت توصیف فیزیکی داشته باشند. با استفاده از این تئوری ماتریس‌های توصیفگر مرتبه دوم به صورت زیر قابل تجزیه‌اند [۶]:

$$\langle [C] \rangle = \sum_{i=1}^k p_i [C]_i \quad (12)$$

C_i ها ماتریس‌های اهداف متعارف و p_i ها وزن‌های هر یک از آنها است. در این مقاله تجزیه بر مبنای مقادیر ویژه ماتریس همدوسی را مبنای کار قرار داده و پارامترهای پراکندگی را شبیه‌سازی کردیم.

۲-۲- دسته‌بندی اهداف راداری

در سال ۱۹۹۶ اریک پوتر و روبرت کلود روش ترکیبی و کاربردی از تجزیه هدف به نام H/α را برای

1. De-Polarization
2. Target Classification

نظر گرفته می‌شود. بر این اساس احتمال بردار هدف k با توزیع گوسی به صورت زیر داده می‌شود:

$$p_k(\vec{k}) = \frac{1}{\pi^m |C|} \exp(-\vec{k}^H C^{-1} \vec{k}) \quad (17)$$

در حضور پدیده تصادفی نویز لکه‌ای، ماتریس C حاصل از k به صورت ماتریس Z_n تخمین زده می‌شود.

$$Z_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \vec{k}_i \cdot \vec{k}_i^H \quad (18)$$

ماتریس Z_n تخمین حداکثر درست‌نمایی^۳ ماتریس C است که نمونه کوواریانس^۴ نیز خوانده می‌شود. در رابطه (۱۸) به ازای $i=0, 1, 2, \dots$ بردار هدف یکی از n نمونه دریافتی است. توصیف آماری Z_n با توزیع ویشارت^۵ به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$p_{z_n}(z_n) = \frac{n^{mn} |z_n|^{n-m}}{|C|^n \tilde{\Gamma}_m(n)} \text{etr}(-nC^{-1}z_n) \quad (19)$$

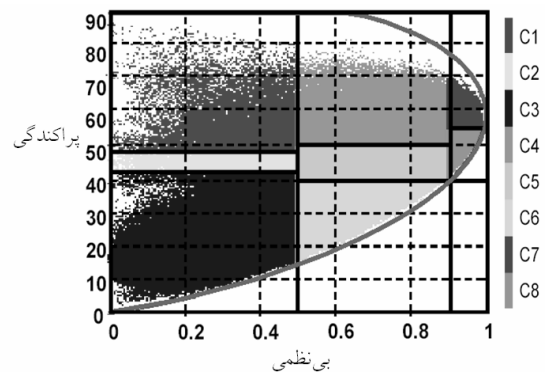
در این رابطه، $\text{etr}(x)$ تابع نمایی تریس^۶ ماتریس است. اگر $n > m$ ، تابع گاما $\tilde{\Gamma}_m(n)$ با استفاده از تابع گاما $\Gamma(x)$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\tilde{\Gamma}_m(n) = \pi^{m(m-1)/2} \prod_{i=1}^m \Gamma(n-i+1) \quad (20)$$

با فرض هرمیتین و $m \times m$ بودن ماتریس C و با استفاده از قضیه تجزیه هدف داریم:

$$\Sigma = U^H C U' \quad (21)$$

ماتریس مقادیر ویژه Σ و ماتریس بردارهای ویژه U'



شکل ۳ سازوکار پراکندگی و دسته‌بندی اهداف راداری در صفحه تشخیص

۳- سازوکار آماری

همان‌طور که گفته شد، اهداف متعارف یا نقطه‌ای^۱ مانند کره یا شبه‌کره دی‌الکتریک اهدافی هستند که ماتریس پراکندگی آنها از نظر تحلیلی قابل محاسبه است. اما پراکندگی اهداف غیر متعارف یا توزیع شده^۲ مانند پوشش‌های جنگلی و بوته‌ای، مزارع کشاورزی و پوشش‌های شهری رفتار آماری دارند [۸]. در میان این اهداف می‌توان به سطوح ناصاف دی‌الکتریک اشاره کرد [۹-۱۳].

در رادارهای پلاریمتری چندبعدی به m ماتریس پراکندگی S_i برای $i=0, 1, 2, \dots, m$ نیاز داریم که بردار هدف آنها به صورت زیر نوشته می‌شود [۸]:

$$\vec{k} = [S_0, S_1, S_2, \dots, S_m]^T \quad (16)$$

بردار هدف k برای اهداف نقطه‌ای کاملاً معین در حالت راداری سه‌بعدی خواهد بود. در رادارهای سنسجش از دور با اهدافی تصادفی سروکار داریم که داده‌های آماری آنها همگن با پراکندگی گوسی با میانگین صفر در

1. Point Targets
2. Distributed Target

3. Maximum Likelihood Estimator (MLE)
4. Sample Covariance
5. Wishart Distribution
6. Trace function

۴- نتایج شبیه‌سازی پارامترها

در این بخش با استفاده از تئوری تجزیه هدف و روش H- α به مسأله پراکندگی اجسام پرداخته و پارامترهای سازوکار پراکندگی و پارامتر بی‌نظمی را شبیه‌سازی می‌کنیم. ابتدا نتایج حاصل از یک هدف متعارف مانند شبه‌کره دی‌الکتریک و سپس سطح ناصاف را استخراج می‌کنیم.

۴-۱- شبه‌کره دی‌الکتریک

برای محاسبه بی‌نظمی (H) و بسازوکارم پراکندگی (α) یک جسم متعارف مانند ذره دی‌الکتریک شبه‌کره^۴ مطابق شکل ۴ ابتدا ماتریس پراکندگی آن را به دست می‌آوریم. برای این منظور با استفاده از تئوری پراکندگی موج و تقریب رایلی گانز^۵ موج انعکاسی میدان دور ذره دی‌الکتریک شبه‌کره با دی‌الکتریک ϵ_r و حجم V از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۴]:

$$\vec{E}^s = \frac{k \cdot \gamma}{4\pi} \left(\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \right) \gamma V [\vec{E}^i - \hat{r}(\hat{r} \cdot \vec{E}^i)] \quad (24)$$

این میدان بر حسب بردار قطبش برابر است با:

$$\vec{E}^s = \frac{k \cdot \gamma}{4\pi\epsilon} [\vec{P} - \vec{k}_s(\vec{k}_s \cdot \vec{P})] \quad (25)$$

که $\vec{P} = \overline{\alpha} \cdot \vec{E}^i(o)$ بردار قطبش دی‌الکتریک و $\vec{E}^i(o)$ میدان تابشی در مبدأ دستگاه مختصات است. اگر $\overline{\alpha} = V\epsilon_r(\epsilon_r - 1)\overline{\Lambda}$ را قابلیت قطبی شونده^۶ جسم دی‌الکتریک تعریف کنیم، داریم:

$$\vec{P} = V\epsilon_r(\epsilon_r - 1)\overline{\Lambda} \cdot \vec{E}^i \quad (26)$$

در نتیجه ماتریس پراکندگی به صورت زیر می‌شود [۱۰]:

از ماتریس C به دست می‌آیند. از آنجا که Z_n تخمین ماتریس C است می‌توان آن را نیز با استفاده از قضیه تجزیه هدف به صورت زیر نشان داد:

$$\Xi = U^H Z_n U \quad (22)$$

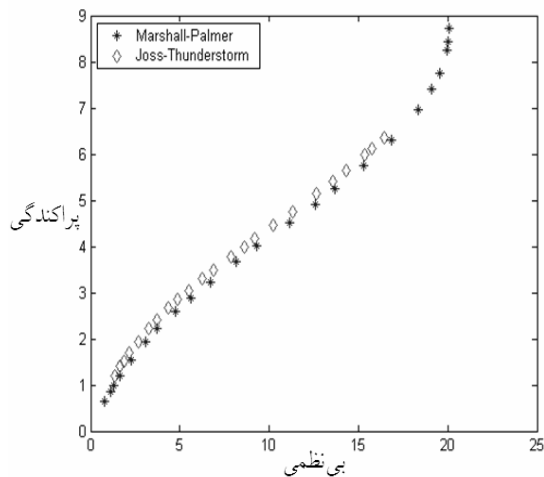
Ξ ماتریس مقادیر ویژه و U ماتریس بردارهای ویژه Z_n است. همان طور که در معادله (۲۲) مشاهده می‌شود، ماتریس Z_n را به صورت ماتریس Ξ با m مقدار ویژه و ماتریس U را با سه بردار ویژه، نشان دادیم. برای به دست آوردن تابع احتمال مقادیر ویژه، باید معادله فوق را با استفاده از دترمینان ژاکوبین حل کرده و لذا لازم است ضرب خارجی شکل دیفرانسیلی Z_n را حساب کنیم تا برای توزیع ویشارت آماده شود. دوم این که باید $m(m-1)$ پارامتر بردارهای ویژه ماتریس Z_n محاسبه شود. بدین ترتیب مقادیر ویژه ماتریس Z_n با استفاده از رابطه (۲۲) به صورت زیر تخمین زده می‌شود:

$$\lambda_i = l_i + \frac{l_i}{n} \sum_{i \neq j}^m \frac{l_j}{l_i - l_j}, i = 1, 2, \dots, m \quad (23)$$

در این رابطه، l_i مقدار ویژه i ام ماتریس کوواریانس و n تعداد مشاهده‌ها در نمونه‌گیری آماری است. در بخش بعدی با استفاده از این روش به مسأله پراکندگی اجسام می‌پردازیم و پارامترهای H و α را شبیه‌سازی می‌کنیم. برای این منظور، ذرات باران را برای سه نوع توزیع مختلف توزیع احتمال مارشال/پالمر^۱، جوس/تندرسون^۲ و توزیع گاما^۳ و همچنین برای سطوح ناصاف دی‌الکتریک در نظر گرفته و با استفاده از نتایج شبیه‌سازی، قابلیت‌های روش H- α در صفحه هدف نشان می‌دهیم.

1. Marshall and Palmer Distribution(MPD)
2. Joss-Thunderstorm Distribution(JTD)
3. Gamma Distribution

4. Spheroid
5. Rayleigh-Gans approximation



شکل ۵ مقایسه زاویه سازوکار پراکندگی و بی‌نظمی در تقریبهای مارشال / پالمر و جوس / تندرسون

در شکل ۵ سازوکار پراکندگی و بی‌نظمی برحسب نرخ ریزش باران برای قطره‌های شبه‌کروی و برای توزیع احتمال مارشال / پالمر و جوس / تندرسون نشان داده شده است. همان‌طور که می‌بینیم، زاویه پراکندگی حدود ۱۰ درجه و بی‌نظمی آن حدود صفر است. در این شکل، سازوکار پراکندگی در صفحه $H-\alpha$ نشان می‌دهد که هدف در ناحیه اول قرار گرفته است. این نتایج مؤید تئوری تجزیه هدف برای پراکندگی اجسام متعارف راداری و پراکندگی سطحی است.

۴-۲- شبه‌کره دی‌الکتریک با توزیع تصادفی گاما

برای قطره‌های شبه‌کروی با توزیع تصافی قطر، ابتدا مقادیر ویژه ماتریس همدوسی یا کوواریانس را به‌دست می‌آوریم و مشابه بخش قبل با استفاده از این روش مقادیر مربوط به زاویه سازوکار پراکندگی و مقدار بی‌نظمی را استخراج و با روش تجزیه $H-\alpha$ مشخصات هدف را به‌دست می‌آوریم. در شکل ۶ سازوکار پراکندگی برای

$$\vec{E}^s = \frac{k_i^\gamma}{\epsilon\pi\epsilon_i} \left[\overline{\alpha} \cdot \vec{E}^i(o) - \vec{k}_s (\vec{k}_s \cdot [\overline{\alpha} \cdot \vec{E}^i(o)]) \right] \quad (27)$$

اولین درایه ماتریس پراکندگی به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$S_{hh} = \hat{h}_s \cdot \vec{E}^s \quad \text{for } E_v^i = 0, E_h^i = 1$$

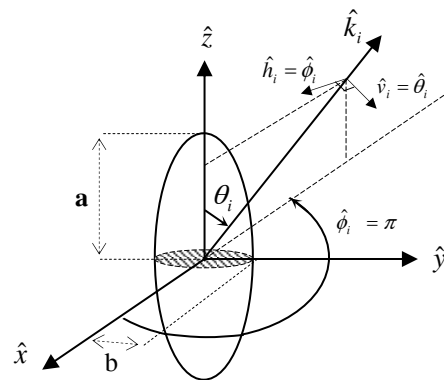
$$S_{hh} = \frac{k_i^\gamma}{\epsilon\pi\epsilon_i} \left[\alpha \hat{h}_s \cdot \hat{h}_i + (\alpha_z - \alpha) (\hat{h}_s \cdot \hat{z}) (\hat{h}_i \cdot \hat{z}) \right] \quad (28)$$

به‌همین روش، سه درایه دیگر ماتریس قابل استخراج است. در این صورت، ماتریس پراکندگی به‌صورت زیر حاصل می‌شود:

$$[S]_{BSA}(\theta_i = 90) = \frac{k_i^\gamma}{\epsilon\pi\epsilon_i} \begin{bmatrix} \alpha & 0 \\ 0 & \alpha_z \end{bmatrix} \quad (29)$$

مطابق روابط حاکم بر رادارهای پلاریمتری با داشتن ماتریس پراکندگی و با میانگین‌گیری روی مقادیر ماتریس کوواریانس داریم [۸]:

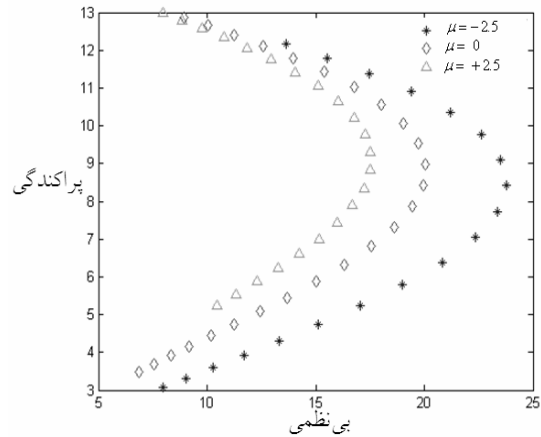
$$\langle C_{ij} \rangle = \int C_{ij} \cdot C_{ij}^* \cdot N(D) dD \quad (30)$$



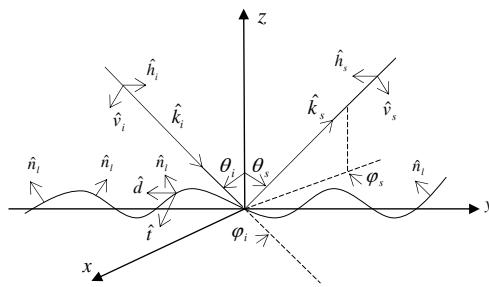
شکل ۴ قطره دی‌الکتریک شبه‌کروی برای مدل‌سازی هدف متعارف راداری برای محاسبه سازوکار پراکندگی و بی‌نظمی

در این رابطه $R_o, n_l, k_s, \eta, H_{tot}, E_{tot}$ به ترتیب مولفه مماسی میدان الکتریکی، میدان مغناطیسی، امپدانس ذاتی محیط، شیب نسبی سطح و فاصله مرکز سطح تا فرستنده است. براساس رابطه فوق و تئوری تجزیه هدف ماتریس پراکندگی استخراج شده و بر اساس آن، پارامترهای پراکندگی به دست می آیند. در شکل ۸ سازوکار پراکندگی بر حسب شیب سطح با پارامتر ضریب دی الکتریک سطح برای حالت های مختلف بررسی شده است. پراکندگی بر حسب شیب سطح با پارامتر ضریب دی الکتریک سطح برای حالت های مختلف شیب سطح کم، اثر افزایش شیب سطح، اثر تقارن شیب سطح و برای شیب های بزرگ بررسی شده است.

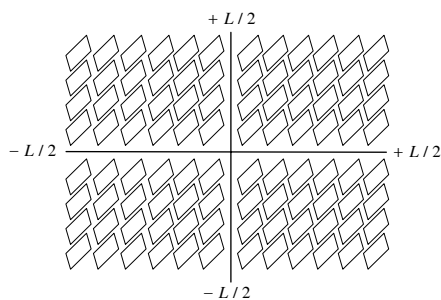
قطره های باران با توزیع گاما نشان داده شده است. برای مقایسه، نتایج شبیه سازی سازوکار پراکندگی و بی نظمی کاملاً با داده های شبیه سازی شده مارشال/ پالم و جوس/ تندرسون مطابقت دارد.



شکل ۶ نتایج حاصل از توضیح گاما به ازای پارامتر μ برای تعیین زاویه سازوکار پراکندگی و بی نظمی



(الف)



(ب)

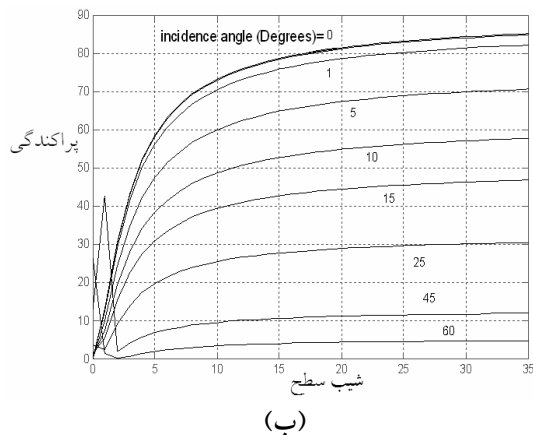
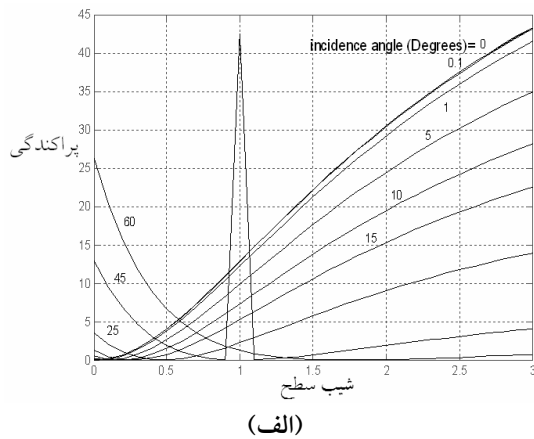
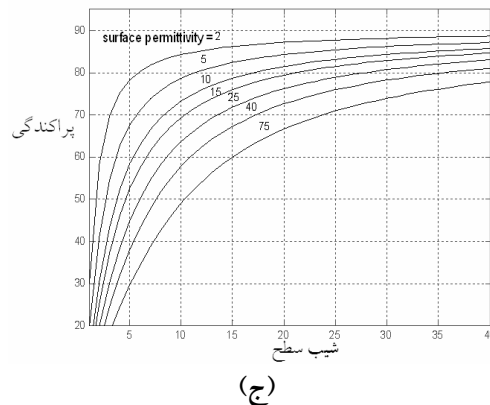
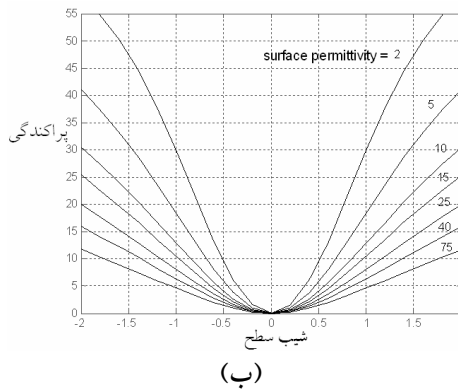
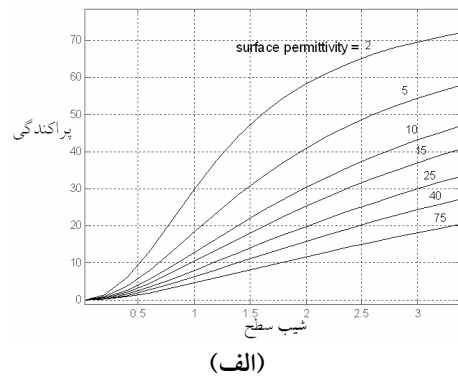
شکل ۷ مدل سطح ناصاف دی الکتریک (الف) ساختار مورد مطالعه (ب) تقسیم شده به بی شمار سطح صاف آینه ای

۴-۳- بررسی اثر پارامترهای سطح

برای بررسی اثر پارامترهای سطح مانند ضریب دی الکتریک و ناهمواری های سطح، ابتدا باید میدان پراکنده شده از سطح را به دست آوریم. برای این منظور ساختار ارائه شده در شکل ۷ را در نظر می گیریم و بر مبنای طول موج آن را به بی شمار سطح با شیب و ارتفاع متغیر تقسیم می کنیم. بر اساس تئوری پراکندگی، میدان پراکنده شده در حالت رادار مونواستاتیک از رابطه زیر به دست می آید:

$$E^s = \frac{-j \hat{K}_s e^{-j K_s R_o}}{\epsilon \pi R_s} \cdot \sum [E_{tot} - \eta \hat{k}_s \times H_{tot}] e^{j \hat{K}_s \cdot \vec{r}} \Delta s \quad (31)$$

است. پراکندگی برحسب شیب سطح در نقطه‌ای از زاویه تابش رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهد که مشابه انعکاس از دیپل است. در شکل ۱۰ سازوکار پراکندگی برحسب شیب سطح با پارامتر زاویه تابش از زاویه صفر تا ۶۰ درجه در حالتی که شیب سطح بسیار بزرگ است، نشان داده شده. این شکل نشان می‌دهد که برای مقادیر بزرگ شیب سطح، رفتار پراکندگی مستقل از زاویه تابش است. همچنین در این شکل اثر تقارن شیب سطح، نشان‌دهنده تقارن زاویه تابش است.

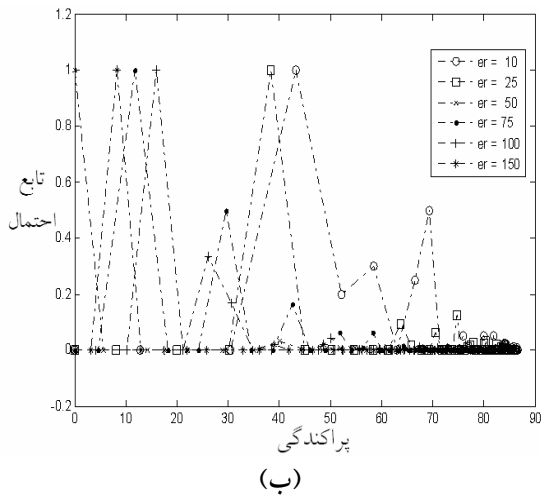
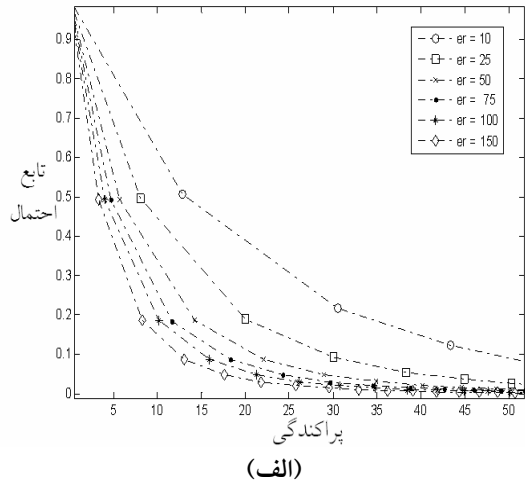


شکل ۸ سازوکار پراکندگی برحسب شیب سطح با پارامتر ضریب دی‌الکتریک سطح برای حالت‌های مختلف الف) زاویه α برحسب شیب سطح ب) اثر تقارن شیب سطح ج) مقدار زاویه α برای شیب‌های بزرگ

شکل ۹ سازوکار پراکندگی برحسب شیب سطح با پارامتر زاویه تابش سطح برای حالت‌های مختلف الف) زاویه α برحسب شیب سطح کم ب) اثر افزایش شیب سطح

در شکل ۹ سازوکار پراکندگی برحسب شیب سطح با پارامتر زاویه تابش از زاویه صفر تا ۶۰ درجه نشان داده شده است. برای حالت‌های مختلف بررسی انجام شده

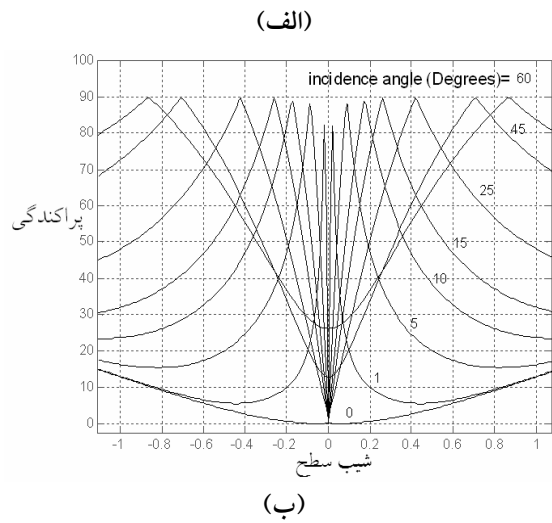
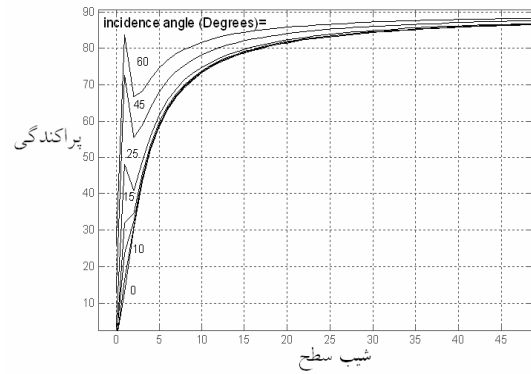
می‌دهد که پس از چند تکرار، مقادیر تخمینی به مقادیر واقعی همگرا می‌شوند.



شکل ۱۱ تابع چگالی احتمال مقادیر λ_1 ، λ_2 برحسب سازوکار پراکندگی

۴-۵- داده‌های اندازه‌گیری شده

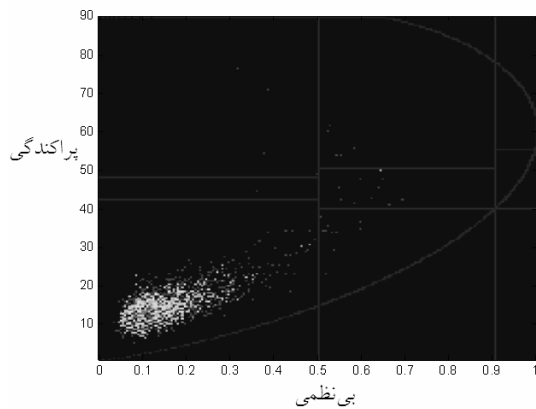
داده‌های خام برای به‌دست آوردن سازوکار پراکندگی با استفاده از سنسورهای ماهواره‌ای جمع‌آوری می‌شود. در این مقاله داده‌های خام از سازمان فضایی اروپا تهیه



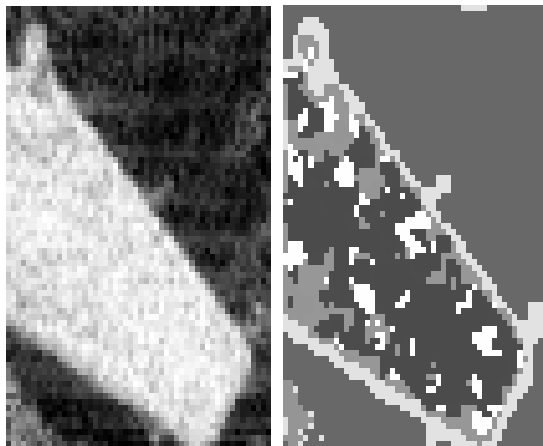
شکل ۱۰ سازوکار پراکندگی برحسب شیب سطح با پارامتر زاویه تابش سطح برای حالت‌های مختلف الف) زاویه α برحسب مقادیر بزرگ شیب سطح ب) اثر تقارن شیب سطح در پراکندگی

۴-۴- سطوح ناصاف دی‌الکتریک با توزیع گوسی

با فرض سطح ناصاف دی‌الکتریک با توزیع گوسی با واریانس σ_s مطابق شکل ۷، نتایج حاصل از تخمین مقادیر ویژه در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در این پژوهش برای آن که نتایج حدی مقادیر ویژه را برای تعداد مشاهدات بیشتری نشان دهیم، بازه تغییرات را برای n از صفر تا ۵۰ در نظر گرفته و نتایج شبیه‌سازی را برای مقادیر ویژه λ_1 ها تکرار می‌کنیم. این نتایج نشان



شکل ۱۳ نتایج حاصل از داده‌های اندازه‌گیری شده در صفحه زاویه سازوکار پراکندگی و بی‌نظمی.



(ب)

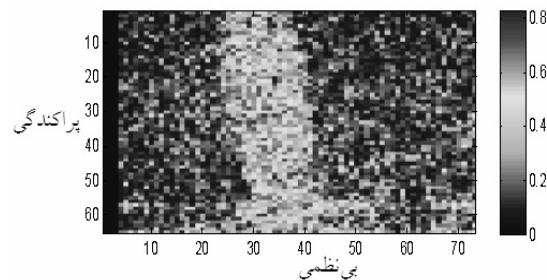
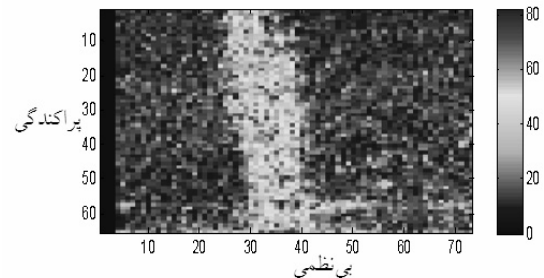
(الف)

شکل ۱۴ نتایج حاصل از داده‌های اندازه‌گیری شده برای تهیه تصویر راداری (الف) تصویر حاصل از دسته‌بندی توزیع ویشارت (ب) تصویر پردازش شده به‌روش تجزیه هدف پلی

۵- قدردانی و سپاس

در این مطالعه، داده‌های خام راداری از سازمان فضایی اروپا تهیه شده که در اینجا لازم است از توجه دکتر مارتین سوس، رئیس بخش پردازش اطلاعات آن سازمان، کمال سپاس را داشته باشیم.

شده و نتیجه به‌کار روش تجزیه هدف و پردازش اطلاعات در شکل ۱۲ نشان داده شده است. در این نتایج، به پراکندگی تقریبی ۱۰ درجه و بی‌نظمی حدود صفر رسیده‌ایم. لکه‌هایی که در شکل ۱۲ برای بی‌نظمی مشاهده می‌شود مربوط به اهداف هندسی شکلی است که روی پل خلیج سانفرانسیسکو نصب شده و مقادیر نزدیک به یک دارد. در شکل ۱۳ صفحه هدف نشان‌دهنده آن است که سازوکار واقع شده در ناحیه اول قرار دارد که این بیانگر انعکاس از سطح ناصاف است. در شکل ۱۴ با استفاده از روش دسته‌بندی اهداف، نتایج حاصل از داده‌های اندازه‌گیری شده برای تهیه تصویر راداری نشان داده شده است. تصویر حاصل از دسته‌بندی توزیع ویشارت و تصویر پردازش شده به‌روش تجزیه هدف پلی دو تصویری است که از این روش استخراج شده.



شکل ۱۲ نتایج حاصل از داده‌های اندازه‌گیری شده توسط سازمان فضایی اروپا برای تعیین زاویه سازوکار پراکندگی و بی‌نظمی

radar signatures,” *Advances in Radio Science*, Copernicus GmbH Vol. 3, pp. 413–420, Copernicus GmbH 2005.

- [4] Pottier, E. and J. S. Lee, “Unsupervised classification of Pol-SAR images based on the complex Wishart distribution and the $H/A/\alpha$ polarimetric decomposition theorem,” *Proc. EUSAR*, Munich, Germany, 2000
- [5] Storvold, R., E. Malnes, Y. Larsen, and K. A. Hgda, “SAR remote sensing of snow parameters in Norwegian areas current status and future perspective,” *Journal of Electromagnetic Waves and Appl.*, Vol. 20, No. 13, 1751–1759, 2006
- [6] Cloude, S. R., and E. Pottier, “A review of target decomposition theorems in radar polarimetry,” *IEEE Trans. Geosci. Remote sensing*, 34-2:498-518. 1996
- [7] Lee, J. S., M. R. Grunes, D. L. Schuler, E. Pottier, L. F. Famil, “Scattering-Model-Based Speckle Filtering of Polarimetric SAR Data,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 44- 1, 2006.
- [8] Martinez, C. L., and E. Pottier, “Statistical Assessment of Eigenvector-Based Target Decomposition Theorems in Radar Polarimetry,” *IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing*, 43-9. 2005
- [9] Hajnsek, E. Pottier and S. R. Cloude,

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله روش تجزیه هدف در رادارهای پلاریمتری بررسی و به‌طور خاص برای اهداف متعارف مانند قطره‌های شبه‌کروی با توزیع‌های مختلف و سطوح ناصاف دی‌الکتریک مطالعه شد. سازوکار پراکندگی (زاویه a) و بی‌نظمی (پارامتر بی‌نظمی) را که بیان‌کننده مقدار واقطبش موج انعکاسی است، به‌دست آوردیم و در پایان با داده‌های راداری (سار) که از سازمان فضایی اروپا دریافت کردیم، مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر حدی زاویه پارامتر پراکندگی و پارامتر بی‌نظمی برای اهداف متعارف و سطوح ناصاف به‌ترتیب نزدیک به ده و صفر درجه است. این نتایج مؤید موقعیت آنها در صفحه هدف بر مبنای تئوری تجزیه هدف است.

۷- مراجع

- [1] Vulpiani, G. and F. S. Marzano, “Polarimetric Weather Radar Retrieval of Raindrop Size Distribution by Means of a Regularized Artificial Neural Network: *IEEE Geosci. and Remote Sensing Letters*, 44-11. 2006
- [2] Chen, X., D. Liang, and K. Huang, “Microwave imaging 3-D buried objects using parallel genetic algorithm combined with FDTD technique,” *Journal of Electromagnetic Waves and Appl.*, Vol. 20, No. 13, 1761–1774, 2006
- [3] M. Galletti, M. Chandra, E. Pottier and A. Ghorbani, “Application of the Cloude/Pottier decomposition to weather

- [12] Rigling, B. D. and R. L. Moses, "Three-Dimensional Surface Reconstruction from Multistatic SAR Images," IEEE Trans. On Image Processing, vol. 14, No. 8. 2005.
- [13] Fung, A. K., and N. C. Kuo, "Backscattering from multi-scale and exponentially correlated surfaces," Journal of Electromagnetic Waves and Appl., Vol. 20, No. 1, 3-11, 2006.
- [14] Ulaby, F. T., R. K. Moore and A. K. Fung, Microwave Remote Sensing, Vol.2. Norwood, MA, Artech House, 1982.
- "Inversion of surface parameters from polarimetric SAR," IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 41-4-727-744. 2003
- [10] Wang, P., and Y. Xie, "Scattering and radiation problem of surface/subsurface junction structure with multilevel fast multiple algorithm," Journal of Electromagnetic Waves and Appl., Vol. 20, No. 15, 2189-2200, 2006.
- [11] Kuo, C. and M. Moghaddam, "Scattering from multilayer rough surfaces based on the extended boundary condition method and truncated singular value decomposition," IEEE Trans. on Antenna and Propagation, Vol. 54, No. 10, Oct. 2006.