

تصویربرداری سه‌بعدی رادار دیوارگذر با استفاده از روش حسگری فشرده

علیرضا صالحی برزگر^۱، احمدچلداوی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری، ۲- استاد، دانشگاه علم و صنعت ایران

(دریافت: ۹۸/۱۰/۰۳؛ پذیرش: ۹۹/۰۳/۱۱)

چکیده

یکی از روش‌های اصلی استخراج تصویر سه‌بعدی از اطلاعات دریافتی در رادارهای دیوارگذر، روش توموگرافی پراشی (DT) است. در این روش به خاطر تعداد زیاد اندازه‌گیری میدان‌های دریافتی، زمان دریافت اطلاعات و استخراج تصویر قابل‌ملاحظه است. روش حسگری فشرده (CS) برای کاهش اندازه‌گیری‌ها و صرفه‌جویی زمانی دریافت اطلاعات در کاربردهای راداری مورد استفاده قرار می‌گیرد. شرط لازم برای اعمال این روش تنگ بودن بردار هدف است. در این مقاله نشان می‌دهیم با استفاده از روش CS و تبدیل فوریه غیریکنواخت (NUFFT) سرعت اندازه‌گیری و پردازش روش DT به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش خواهد یافت. شبیه‌سازی و نتایج اندازه‌گیری اعتبار روش تصویربرداری را تأیید می‌کند.

واژگان کلیدی

رادارهای دیوارگذر، توموگرافی پراشی، حسگری فشرده، تبدیل فوریه غیریکنواخت

۱. مقدمه

تحلیل سیگنال بازگشتی موقعیت و شکل هدف به‌دست می‌آید. الگوریتم‌های زیادی در حوزه فرکانسی پیاده‌سازی شده است. این الگوریتم‌ها در حالت کلی به دو دسته تقسیم می‌شوند. دسته اول روش‌های غیرهمدوس می‌باشند که بر پایه روش سه‌جانبه^۱ استوار هستند [۱]. روش‌های غیرهمدوس در حالت کلی نیاز به رادار چندمکانی^۲ دارند و از آن‌ها فقط برای تخمین محل هدف استفاده می‌شود. دسته دوم روش‌های همدوس هستند که در حالت کلی بر پردازش سیگنال دریافت شده استوار می‌باشند [۳-۶]. روش‌های همدوس گستره بالا و رزولوشن سمتی^۳ خوبی را فراهم می‌کنند که در سال‌های اخیر مطالعه بسیاری در این حوزه انجام شده است. روش پرتودهی تأخیر و جمع^۴ (DSBF) بر پایه روش مجانبی برای رادارهای TWRI در [۳-۲] آورده شده است. اثرات تشعشع موج الکترومغناطیسی در دیوارهای دی‌الکتریک مانند تأخیر شکست و انتشار نیز در این روش تأثیرگذار است. برای تولید مدل الکترومغناطیسی صحیح برای TWRI، روش CSI^۵ بر پایه روش غیرخطی معادلات انتگرالی در مرجع [۴] آورده شده است. در این روش از بهینه‌سازی غیرخطی استفاده شده و نیاز

رادارهای تصویربرداری دیوارگذر توجه زیادی را در سال‌های اخیر به خود جلب کرده‌اند. این رادارها در کاربردهای مراقبت پیرامونی، نجات گروگان‌ها و آشکارسازی مکان انسان‌ها در مواقع آتش‌سوزی کاربرد دارند. رادار دیوارگذر با ارسال امواج الکترومغناطیس در نقاط مختلف یک صفحه دوبعدی موازی با دیوار، تصویر سه‌بعدی پشت دیوار را استخراج می‌کند. تعیین فرکانس رادار دیوارگذر وابسته به جنس دیوار است. هرچه قدر تلفات دیوار بیشتر شود فرکانس کاری رادار کاهش یافته و ابعاد رادار نیز بزرگ‌تر می‌شود. در سالیان اخیر از روش‌های متعددی برای پردازش این رادارها استفاده شده است. روش حوزه زمان و روش حوزه فرکانس دو روش کلی مورد استفاده در این رادارها می‌باشند. مزیت روش حوزه زمان از بین بردن سیگنال‌های مزاحم چندمسیره و عیب آن، نیاز این روش به تبدیل‌کننده‌های آنالوگ به دیجیتال با پهنای باند زیاد و پیچیده‌تر بودن تجهیزات آن نسبت به روش فرکانسی است. در روش‌های فرکانسی که این مقاله نیز مبتنی بر یکی از آن‌هاست، فرکانس منبع به‌صورت پله‌ای یا پیوسته باند فرکانسی را جاروب می‌کند و از

² Trilateration Technique³ Multistatic Radar⁴ Azimuth resolution⁵ Delay-and-Sum Beamforming⁶ Contrast Source Inversion

[۱۱] مورد استفاده قرار گرفته است. روش حسگری فشرده تا به حال در رادارهای دیوارگذر سه بعدی مورد استفاده قرار نگرفته است. در گذشته از این روش برای تصویربرداری دیوارگذر در حالت دوبعدی بر پایه روش DSBF استفاده شده است و همان طور که ذکر شد، سرعت پردازش بسیار کمتری نسبت به روش DT دارد [۱۲].

در [۹] و [۱۳] الگوریتم DT برای کاربردهای رادار دیوارگذر و رادار نفوذ زمین استفاده شده است. عیب این روش تعداد بالای اندازه گیری میدان ها می باشد که فرایندی زمان بر است. در [۱۴] روش توموگرافی پراشی به همراه روش CS برای بازیابی تصویر رادار دهانه روزنه ای^۹ (SAR) استفاده شده است. این روش از درون یابی stolt استفاده می کند که نیاز به حجم پردازش بالا دارد و سبب کاهش کیفیت تصویربرداری خواهد شد. در سالیان اخیر روش تبدیل فوریه غیریکنواخت^{۱۰} (NUFFT) به عنوان روش جایگزین به جای تبدیل فوریه، در مواقعی که اطلاعات ورودی به صورت غیریکنواخت است مورد استفاده قرار گرفته است. بازدهی روش NUFFT از روش درون یابی stolt بیشتر بوده و با حجم پردازش کم، کیفیت مناسبی را ارائه می دهد. این روش برای اولین بار توسط Rokhlin و Dutt [۱۵] ارائه شد و در ادامه به وسیله توابع توزیع گوسی توسط Greengard [۱۶] بهبود زمانی یافته است. این روش نیز برای کاربردهای مختلفی مانند GPR [۱۷]، MRI [۱۸] و SAR [۱۹] مورد استفاده قرار گرفته است. استفاده روش NUFFT در حوزه رادارهای دیوارگذر محدود به استفاده از آن در حالت تصویربرداری دوبعدی است [۲۰]، که پیچیدگی بسیار کمتری نسبت به روش سه بعدی داشته و روابط آن با روابط روش سه بعدی متفاوت است.

ما در این مقاله روش سه بعدی جدیدی بر پایه روش DT، با استفاده از NUFFT و بهره گیری از CS ارائه کرده ایم. این روش، قابلیت بازیابی تصویر از اندازه گیری های ناقص را با سرعت خوب پردازش دارا است. نتایج شبیه سازی و عملی اثبات کننده قابلیت استخراج تصویر از تنها ۱۰٪ نقاط اندازه گیری کامل می باشد.

۲. بازیابی تصویر سه بعدی به روش توموگرافی پراشی

شکل (۱) نشان دهنده سناریوی تصویربرداری دیوارگذر از اهداف پشت دیوار است. در این روش، اهداف پشت یک دیوار مشخص و موازی با صفحه x-y قرار گرفته اند. همان طور که مشاهده می شود

به تکرار حل آن بسیار زمان بر خواهد بود. روش پراکندگی معکوس خطی^۱ بر پایه تقریب درجه اول بورن است که اثر دیوار را با ارزیابی دقیق یا تقریبی تابع گرین محیط لایه ای از بین می برد [۵]. برای دستگاه های رادار چندمکانی از روش (TR-^۲MUSIC) برای آشکارسازی و مکان یابی اهداف پشت دیوار استفاده می شود [۶]. الگوریتم های شکل دهی پترن پلاریمتریک^۳ از تقریب ناحیه دور تابع گرین محیط های لایه ای برای رادارهای 2-D و 3-D، جهت تصویربرداری اهداف پشت دیوارهای ساختمانی چندلایه استفاده می کنند [۷-۸].

روش های ذکر شده مبتنی بر بازسازی تصویر پیکسل به پیکسل می باشند. با افزایش تعداد پیکسل ها زمان محاسبه به صورت قابل توجهی افزایش می یابد که سبب می شود این روش ها برای پردازش لحظه ای کاربرد نداشته باشند. به خصوص هنگامی که با سناریو تصویربرداری با ابعاد بزرگ یا تصویربرداری سه بعدی سروکار داشته باشیم. الگوریتم های TWRI باید از لحاظ محاسبه ای پربازده باشند، به صورتی که تصویربرداری سه بعدی/دوبعدی اهداف توسط یک کامپیوتر قابل حمل در چند ثانیه/دقیقه قابل انجام باشد. الگوریتم توموگرافی پراشی^۴ (DT) سرعت بیشتری نسبت به روش های دیگر دارد زیرا در این روش از خواص تبدیل فوریه^۵ (FFT)، استفاده شده است [۹]. در این مقاله نیز از این روش برای بازیابی تصویر استفاده می شود.

در روش DT برای به دست آوردن رزولوشن بالا، از پهنای باند بالا و تعداد نمونه گیری های مکانی زیادی استفاده می شود. این اندازه گیری های زیاد منتج به افزایش زمان استخراج تصویر خواهد شد. در بسیاری از کاربردهای رادار دیوارگذر، صحنه پشت دیوار شامل اهداف محدودی بوده و بیشتر فضای پشت دیوار خالی است. به عبارت دیگر، صحنه تصویربرداری تنک است و می توان از مزایای حسگری فشرده استفاده کرد. کمترین تعداد نمونه برداری های لازم برای بازیابی تصویر از نظریه نایکوئیست به دست می آید. در سالیان اخیر، به علت توانایی روش حسگری فشرده^۶ (CS) در بازیابی سیگنال از تعداد نمونه های بسیار کمتر از نرخ نایکوئیست، این نظریه توجهات زیادی را به خود جلب کرده است. این روش در کاربردهای مختلفی مانند رادارهای نفوذ زمین^۷ (GPR) [۱۰] و تصویربرداری مغناطیسی رزونانسی^۸ (MRI)

¹ Linear Inverse Scattering Algorithms

² Time Reversal Multiple Signal Classification

³ Polarimetric

⁴ Diffraction Tomography

⁵ Fast Fourier Transform

⁶ Compressive Sensing

⁷ Ground Penetrating Radar

⁸ Magnetic Resonance Imaging

⁹ Synthetic Aperture Radar

¹⁰ Nonuniform Fast Fourier Transform

$\eta_0 = 120\pi$ امیدانس در فضای آزاد $\hat{\alpha}_R \cdot E_s(r_R, k)$ و \hat{F} تابع دیادیک گرین در حوزه فضایی است. برای جزئیات بیشتر می توان به مرجع [۹] مراجعه کرد. $\tilde{M}(k_x, k_y, k_z)$ تبدیل فوریه دوبعدی فضایی تابع $M(x, y, z)/z$ است که از رابطه (۳) به دست می آید.

$$\tilde{M}(k_x, k_y, k_z) = \int_V \frac{M(x, y, z)}{z} \exp(-ik_x x - ik_y y - ik_z z) dr \quad (3)$$

بازبایی سه بعدی می تواند به درستی از تبدیل فوریه معکوس^۲ (IFFT) دوبعدی به همراه رابطه (۴) به دست آید.

$$M(x, y, z) = j64z \int dk \int dk_x \int dk_y [\hat{\alpha}_R \cdot \tilde{E}_s(k_x, k_y, k)] \exp(jk_x x + jk_y y) \exp\left(j\sqrt{4k^2 - k_x^2 - k_y^2}(z - z_R)\right) / [(4k^2 - k_x^2 - k_y^2)^2 k^2 \pi^2 \eta_0 (4k^2 - k_x^2 - k_y^2)] \left[\hat{\alpha}_R \cdot \bar{F}\left(\frac{k_x}{2}, \frac{k_y}{2}, k\right) \right] \cdot \left[\hat{\alpha}_T \cdot \bar{F}\left(\frac{k_x}{2}, \frac{k_y}{2}, k\right) \right] \quad (4)$$

به دلیل وجود غلط تایپی در مرجع [۹] رابطه (۴) کمی متفاوت از رابطه مشابه در مرجع [۹] است. قابل توجه است که رابطه (۴) با رابطه مربوطه در مرجع [۱۳] مطابق است. با توجه به اینکه فرستنده و گیرنده در یک مکان قرار می گیرند، خواهیم داشت $\hat{\alpha}_T = \hat{\alpha}_R = \hat{\alpha}$ می تواند به صورت رابطه (۵) بازنویسی شود.

$$M(x, y, z) = \iiint [\hat{\alpha} \cdot \tilde{E}_s(k_x, k_y, k)] \tilde{Q}(k_x, k_y, k, z) \exp\left(jk_x x + jk_y y + j\sqrt{4k^2 - k_x^2 - k_y^2} z\right) dk dk_x dk_y \quad (5)$$

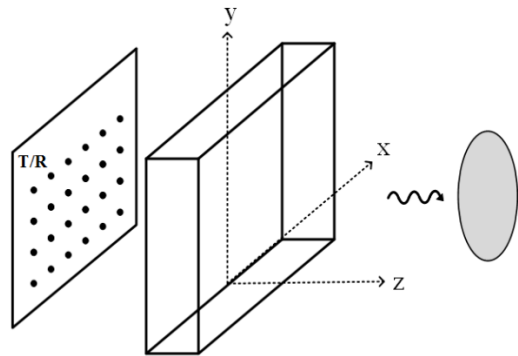
که $\tilde{Q}(k_x, k_y, k, z)$ تابع ضربی است که شامل تابع گرین دیادیک فضایی است.

$$\tilde{Q}(k_x, k_y, k, z) = j64z \exp(-j\sqrt{4k^2 - k_x^2 - k_y^2} z_R) / [\eta_0 \pi^2 k^2 (4k^2 - k_x^2 - k_y^2)] \left\| \hat{\alpha} \cdot \bar{F}\left(\frac{k_x}{2}, \frac{k_y}{2}, k\right) \right\|^2 \quad (6)$$

رادار تک مکانی^۱ روی یک آرایه دوبعدی تخت مستطیلی حرکت کرده و عملیات ارسال و دریافت میدان های الکتریکی را انجام می دهد. با فرض اینکه ناحیه پشت دیوار که اهداف در آن قرار دارند به شکل مکعب مستطیلی به نام V باشد، تابع تصویر را در ناحیه V به صورت $M(x, y, z) = \tilde{E}(x, y, z) - 1$ تعریف می کنیم، که $\tilde{E}(x, y, z)$ ثابت دی الکتریک نسبی است. تابع $M(x, y, z)$ در نقاطی که اهداف وجود دارند غیر صفر و در فضای غیر هدف صفر است. پس این تابع سه بعدی مشخص کننده مکان و شکل اهداف می باشد. فرض کنید آنتن های فرستنده و گیرنده در نقطه $r_T = r_R = x_i \hat{x} + y_i \hat{y} + z_i \hat{z}$ قرار دارند. میدان دریافتی در گیرنده به صورت رابطه (۱) خواهد بود.

$$E_t(r_R, k) = E_s(r_R, k) + E_0(r_R, k) \quad (1)$$

که در آن، $E_0(r_R, k)$ میدان بازگشتی از دیوار، $E_s(r_R, k)$ میدان بازگشتی از هدف و k عدد موج در فضای آزاد است $k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2$. رابطه (۲) بیانگر معادله بین تبدیل فوریه فضایی میدان های بازتابیده و تابع تصویر می باشد [۹]، [۱۳].



شکل (۱): سناریوی تصویربرداری دیوارگذر سه بعدی

$$\hat{\alpha}_R \cdot \tilde{E}_s(k_x, k_y, k) \cong \frac{-jk^2 \eta_0}{64\pi} \left[\hat{\alpha}_R \cdot \hat{F}\left(\frac{k_x}{2}, \frac{k_y}{2}, k\right) \right] \cdot \left[\hat{\alpha}_T \cdot \hat{F}\left(\frac{k_x}{2}, \frac{k_y}{2}, k\right) \right] \times \exp\left(jz_R \sqrt{4k^2 - k_x^2 - k_y^2}\right) (4k^2 - k_x^2 - k_y^2) \times \tilde{M}\left(k_x, k_y, \sqrt{4k^2 - k_x^2 - k_y^2}\right) \quad (2)$$

که در آن، $\hat{\alpha}_T$ و $\hat{\alpha}_R$ جهت پلاریزاسیون آنتن های فرستنده و گیرنده، $\tilde{E}_s(k_x, k_y, k)$ تبدیل فوریه فضایی

^۲ Inverse Fast Fourier transform

^۱ Monostatic

$$M(x, y, z) = \iiint \hat{\alpha} \cdot \tilde{E}_s(k_x, k_y, k) \tilde{Q}(k_x, k_y, k, z) \exp(jk_x x + jk_y y + jk_z z) dk_x dk_y dk_z \quad (9)$$

در این الگوریتم، جمع روی متغیر k در جهت k_z' توسط INUFFT و جمع روی k_x و k_y توسط تبدیل IFFT دوبعدی انجام خواهد شد. حاصل رابطه (۹) پس از گسسته سازی به صورت رابطه (۱۰) خواهد بود.

$$M(x, y, z) = C \cdot \text{IFFT}_{k_x, k_y} \left\{ \text{INUFFT}_{k_z'} \left(\text{FFT}_{x, y} \left\{ \hat{\alpha} \cdot E_s(r_R, k) \right\} \tilde{Q}(k_x, k_y, k, z) \right) \right\} \quad (10)$$

که، $C = \Delta k_x \Delta k_y \Delta k_z$ است. مطابق رابطه (۱۰) برای به دست آوردن $M(x, y, z)$ ، از این فرایند استفاده خواهیم کرد. ۱- ابتدا تبدیل فوریه دوبعدی تابع $\{\hat{\alpha} \cdot E_s(r_R, k)\}$ را در راستای x, y محاسبه می‌کنیم ۲- حاصل را در $\tilde{Q}(k_x, k_y, k, z)$ ضرب می‌کنیم. ۳- سپس INUFFT عبارت حاصل را در راستای k_z' به دست می‌آوریم ۴- در نهایت نیز از IFFT دوبعدی مقدار به دست آمده در راستای k_x و k_y و ضرب آن در مقدار C ، مقدار $M(x, y, z)$ به دست خواهد آمد. می‌توانیم رابطه (۱۰) را به صورت ماتریسی به صورت رابطه (۱۱) بنویسیم.

$$m = \Phi s \quad (11)$$

که، s و m به صورت برداری با ابعاد $N_s \times 1$ بوده و به ترتیب بیانگر $\hat{\alpha} \cdot E_s(r_R, k)$ و $M(x, y, z)$ هستند که N_s تعداد نقاط اندازه گیری میدان‌ها می‌باشد. ماتریس Φ با ابعاد $N_s \times N_s$ ماتریس عملگر مستقیم است و به صورت (۱۲) تعریف می‌شود.

$$\Phi = C \cdot \text{IFFT}_{k_x, k_y} \left\{ \text{INUFFT}_{k_z'} \left(\text{FFT}_{x, y} \left\{ \cdot \right\} \tilde{Q}(k_x, k_y, k, z) \right) \right\} \quad (12)$$

رابطه (۱۳) مربوط به عملگر معکوس^۳ الگوریتم به وسیله معکوس کردن رابطه (۱۰) به دست خواهد آمد.

$$s = \Phi^{-1} m = C^{-1} \cdot \text{IFFT}_{k_x, k_y} \left\{ \text{NUFFT}_{k_z'} \left(\text{FFT}_{x, y} \{m\} \right) \tilde{Q}(k_x, k_y, k, z)^{-1} \right\} \quad (13)$$

که، Φ^{-1} ماتریس عملگر معکوس با ابعاد $N_s \times N_s$ است و

۳. عملگر مستقیم و معکوس برای سیستم تصویربرداری به کمک روش NUFFT

برای توضیح مختصر روش NUFFT فرض کنیم بردار اطلاعات ورودی در حوزه فرکانسی به صورت $\tilde{F}_i = \tilde{F}(k_i)$ باشد. تبدیل یافته این بردار در حوزه فضایی به صورت رابطه (۷) است.

$$F(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \tilde{F}_i e^{-jxk_i}, \quad x = -\frac{M}{2}, \dots, \frac{M}{2} - 1 \quad (7)$$

که، $k_i \in [0, 2\pi]$ ، $(i = 0, \dots, N-1)$ نمونه‌های عدد موج گسسته هستند. در حالت عادی به خاطر غیریکنواخت بودن k_i نمی‌توان از تبدیل فوریه برای محاسبه رابطه (۷) استفاده کرد. همچنین عملیات جمع معمولی برای به دست آوردن $F(x)$ نیاز به محاسبات بالا دارد. برای حل این مشکل، الگوریتم NUFFT برای محاسبه عبارات مشابه، در حالتی که اطلاعات ورودی به صورت گسسته هستند معرفی شده است. این الگوریتم با استفاده از توابع گوسی و تقریب‌های محاسباتی امکان محاسبه مستقیم عبارت رابطه (۷) را با دقت و سرعت مناسبی فراهم می‌کند. برای دستیابی به جزئیات بیشتر به مرجع [۱۶] مراجعه کنید.

برای اعمال الگوریتم NUFFT در روش DT جهت بهبود سرعت پردازش این روش، به این صورت عمل خواهیم کرد. رابطه (۵) که در بخش قبلی ذکر شد متشکل از سه انتگرال روی k_x و k_y است. به دلیل یکنواخت بودن اطلاعات در دو بعد k_x و k_y وجود عبارت $\exp(jk_x x + jk_y y)$ می‌توان از IFFT دوبعدی برای محاسبه دو انتگرال استفاده کرد. ولی به دلیل عبارت غیرخطی $\exp\left(j\sqrt{4k^2 - k_x^2 - k_y^2}(z - z_R)\right)$ نمی‌توان از FFT در بعد k استفاده کرد.

عملگر مستقیم^۱ عملیات بازیابی تصویر سه‌بعدی $M(x, y, z)$ را از $\hat{\alpha} \cdot E_s(r_R, k)$ انجام می‌دهد. این کار با استفاده از الگوریتم DT و به کمک معکوس تبدیل فوریه غیر یکنواخت (INUFFT^۲) انجام می‌شود. بدین منظور، متغیر جدید k_z' به صورت رابطه (۸) تعریف می‌شود.

$$k_z' = \sqrt{4k^2 - k_x^2 - k_y^2} \quad (8)$$

با جایگذاری رابطه (۸) در رابطه (۵) خواهیم داشت.

³ Backward Operator

¹ Forward Operator

² Inverse NUFFT

معکوس ماتریس Φ می‌باشد.

$$\text{برای حل معادله (۱۶) تابع هزینه به صورت زیر تعریف می‌شود:} \\ \mathbf{K}(\mathbf{m}) = \lambda \|\mathbf{m}\|_1 + \|\mathbf{f} - \mathbf{X}\Phi^{-1}\mathbf{m}\|_2^2 \quad (۱۷)$$

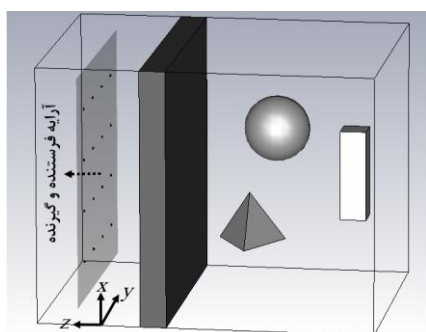
برای بازیابی تصویر، تابع هزینه باید کمترین مقدار خود را داشته باشد، که λ پارامتر تنظیم‌کننده کمینه‌سازی است. روش‌های مختلفی برای کمینه‌سازی تابع هزینه در مقالات ارائه شده است، مانند روش انقباض کمینه قدر مطلق و عملگر انتخاب (LASSO) [۲۱]، پیگیری تطبیقی متعامد (OMP) [۲۲] و الگوریتم گرادیان مزدوج (CG) [۱۲]. روش استفاده شده در این مقاله الگوریتم CG است که شیوه پیاده‌سازی آن در شکل (۲) آورده شده است. در این شکل، $\nabla \mathbf{K}(\mathbf{m})$ گرادیان تابع هزینه است و به صورت رابطه (۱۸) محاسبه می‌شود.

$$\nabla \mathbf{K}(\mathbf{m}) = \lambda \nabla \|\mathbf{m}\|_1 + 2\Phi \mathbf{X}^H (\mathbf{X}\Phi^{-1}\mathbf{m} - \mathbf{f}) \quad (۱۸)$$

نرم ℓ_1 تابعی نامسطح^۵ است و می‌توان از تقریب $|x| \approx \sqrt{x^2 + \delta}$ استفاده کرد. این تقریب برای مسطح‌سازی تابع جهت اعمال گرادیان استفاده می‌شود، که δ پارامتر هموارسازی کوچک است.

۵. شبیه‌سازی رادار دیوارگذر

در این قسمت نتایج شبیه‌سازی مربوط به بازیابی سه‌بعدی اهداف PEC ارائه شده است. مطابق شکل (۳) یک هرم سه‌بعدی با اضلاع 0.5m، کره PEC با قطر 0.5 m و یک مکعب مستطیل با قاعده مربعی با ضلع 0.2 m و ارتفاع 0.7 m مورد استفاده قرار گرفته و مراکز این اشکال به ترتیب در موقعیت‌های (-0.5 m, 0.55 m, -0.8 m)، (0.5 m, -0.6 m, -1.2 m) و (0 m, 0.1 m, -1.7 m) قرار گرفته‌اند.



شکل (۳): شبیه‌سازی تصویربرداری سه‌بعدی با سه هدف

اندازه‌گیری در فرکانس‌های گسسته در بازه ۶۰۰ MHz تا GHz ۲/۶ با فواصل فرکانسی ۲۹ MHz انجام می‌شود. فاصله بین آنتن

۴. حسگری فشرده در تصویربرداری دیوارگذر

در این بخش، تصویربرداری سه‌بعدی مبتنی بر الگوریتم CS انجام می‌شود. مطابق نظریه CS، می‌توانیم بردار تنک s را از تعداد اندازه‌گیری‌های بسیار کمتری نسبت به روش DT انجام دهیم و در عین حال بازیابی تصویر با کیفیتی داشته باشیم. با توجه به این نکته، اندازه‌گیری در تعداد نقاط بسیار کمتری از تعداد نقاط کل انجام خواهد گرفت. این نقاط به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند تا شرط تصادفی بودن در CS صدق کند. در نتیجه بردار اندازه‌گیری میدان‌ها (f) به صورت (۱۴) خواهد بود.

$$\mathbf{f} = \mathbf{X}s \quad (۱۴)$$

که \mathbf{X} ماتریس زیر نمونه‌برداری با ابعاد $N_f \times N_s$ است ($N_f < N_s$) و از انتخاب تصادفی N_f ردیف از ماتریس یک‌به‌یکه با ابعاد $N_s \times N_s$ به دست می‌آید. از جایگذاری (۱۳) در (۱۴) رابطه (۱۵) حاصل می‌شود.

$$\mathbf{f} = \mathbf{X}\Phi^{-1}\mathbf{m} \quad (۱۵)$$

در TWRI کاهش نقاط فرکانسی توسط CS باعث کاهش محسوس زمان اندازه‌گیری نخواهد شد، به این دلیل که تحلیلگر شبکه (VNA^۱) مورد استفاده در سیستم اندازه‌گیری، دامنه فرکانسی را با سرعت زیادی پیمایش می‌کند. عمل بازیابی تصویر توسط حل معادله بهینه‌سازی محدب انجام خواهد شد.

$$\min \|\Psi \mathbf{m}\|_1 \quad s.t. \quad \mathbf{f} = \mathbf{X}\Phi^{-1}\mathbf{m} \quad (۱۶)$$

که Ψ ماتریس تبدیل تنک‌سازی و $\|\Psi \mathbf{m}\|_1$ بیان‌کننده نرم ℓ_1 تابع $\Psi \mathbf{m}$ است. در این مقاله، با فرض تنک بودن فضای پشت دیوار، ماتریس تبدیل تنک‌سازی (Ψ) می‌تواند به صورت ماتریس یک‌به‌یکه انتخاب شود.

Parameters:

ρ - stopping criteria by gradient magnitude
 α, β - line search parameters

Iterative Algorithm:

```
i=0; m0 = ΦHf, Δm0 = -g0, g0 = ∇K(m0)
% Iterations
while ( ||gi||2 << ε)
    k = 1
    while (K(mi + kΔmi) > K(mi) + akRe{(giHΔmi)})
        [k = βk]
    mi+1 = mi + kΔmi
    gi+1 = ∇K(mi+1)
    Δmi+1 = -gi+1 + (||gi+1||2 / ||gi||2) Δmi
    i=i+1
```

شکل (۲): الگوریتم ارائه شده CG برای کمینه کردن تابع $\mathbf{K}(\mathbf{m})$

² Least Absolute Shrinkage and Selection Operator

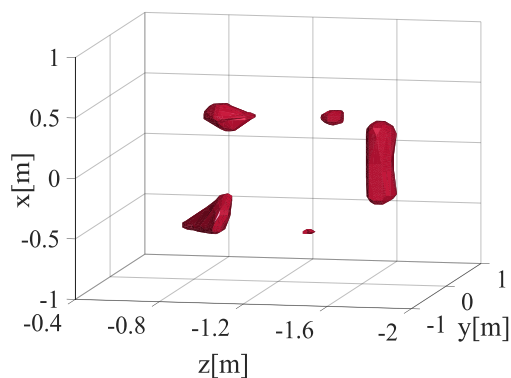
³ Orthogonal Matching Pursuit

⁴ Conjugate Gradient

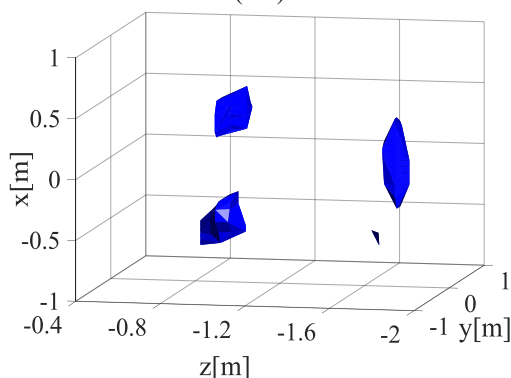
⁵ Non-Smooth

¹ Vector Network Analyzer

شکل (۵) بیان‌کننده تصاویر سه‌بعدی از فضای هدف به دو روش DT و روش بهینه‌شده با CS است که تصاویر استخراج‌شده بر اساس قدر مطلق تابع $M(x, y, z)$ می‌باشد. همان‌طور که در شکل مشخص است، اهداف به‌درستی و با تفکیک خوبی بازیابی شده‌اند.



(الف)



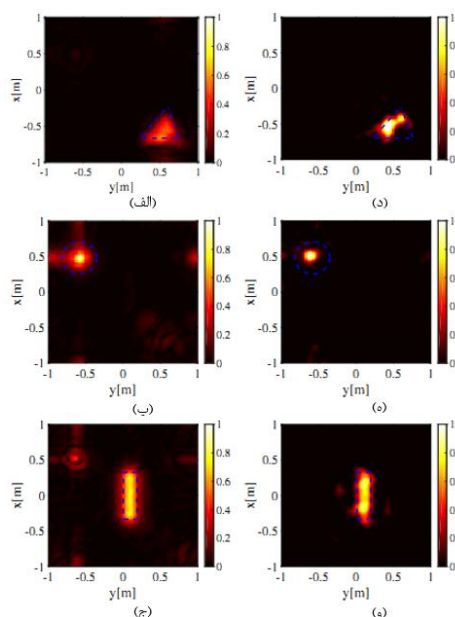
(ب)

شکل (۵): استخراج تصاویر سه‌بعدی اندازه‌گیری به روش (الف) DT (ب) روش بهینه‌شده با CS و استفاده از 10% اطلاعات

۶. پیاده‌سازی عملی رادار دیوارگذر

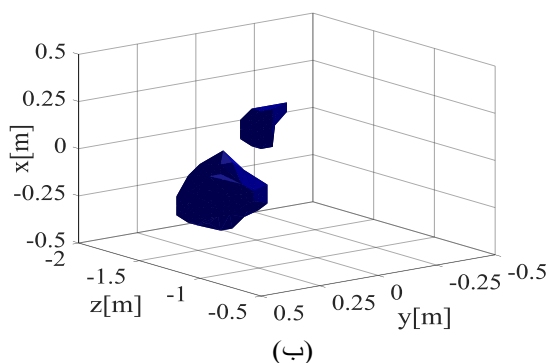
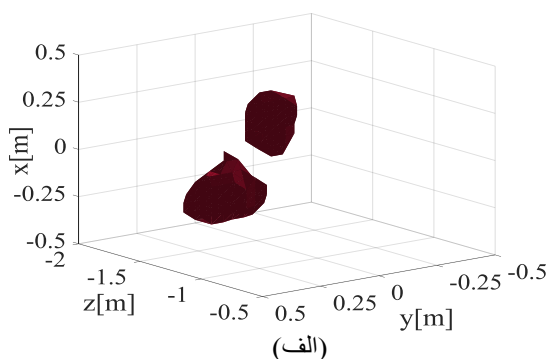
در این قسمت، روش ارائه‌شده توسط سیستم تصویربرداری TWRI ارزیابی خواهد شد. در این سیستم از یک دستگاه اندازه‌گیری تحلیلیگر شبکه HP، یک آنتن لوگ پریودیک، و یک دستگاه اسکن‌کننده صفحه‌ای استفاده شده است. مطابق شکل (۶) در حالت اندازه‌گیری کامل، آنتن روی نقاط یک صفحه مربعی با 20×20 نقطه، حرکت کرده و سیگنال‌های ارسال‌شده را دریافت خواهد کرد. ابعاد این صفحه $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ بوده و فاصله‌اش از دیوار برابر 0.8 m است. دیوار مورد‌استفاده از جنس چوب با ثابت دی‌الکتریک $2/5$ می‌باشد. اندازه‌گیری در فرکانس‌های گسسته در بازه 530 MHz تا $2/44 \text{ GHz}$ با فواصل فرکانسی $21/5 \text{ MHz}$ انجام می‌شود. یک سه‌وجهی با اضلاع 0.3 m و یک مکعب مستطیل با ابعاد 0.4 m ، 0.45 m و 0.2 m

از دیوار برابر 0.3 m است. ضخامت دیوار همگن مورد‌استفاده برابر 0.2 m و ثابت دی‌الکتریک و هدایت آن به ترتیب برابر $\epsilon_b = 6$ و $\sigma_b = 0.01 \text{ S/m}$ است. در حالت اندازه‌گیری کامل، یک آنتن روی نقاط یک صفحه مربعی با 40×40 نقطه، حرکت کرده و سیگنال‌های ارسال‌شده را دریافت خواهد کرد. ابعاد این صفحه $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ است. در روش بهینه‌شده با CS نقاط اندازه‌گیری به 10% نقاط اندازه‌گیری کامل کاهش پیدا می‌کند. شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار XFDTD انجام شده و میدان‌های بازگشتی از هدف در هر نقطه ذخیره می‌شود. برای نمایش بهتر تصویر شبیه‌سازی، عملیات حذف مرجع برای حذف کلاتر دیوار انجام می‌شود [۲۳]. در این قسمت نتایج حاصل از بازیابی تصویر به دو روش DT و روش بهینه‌شده با CS به نمایش درآمده است. نتایج روش بهینه‌شده با CS با استفاده از 10% نقاط اندازه‌گیری به‌دست می‌آید. در شکل (۴)، بخش‌های (الف)، (ب) و (ج) به ترتیب نمایش‌دهنده تصاویر دوبعدی بازیابی شده به روش DT در صفحات $z = -1.7 \text{ m}$ ، -1.2 m ، -0.8 m هستند. همچنین بخش‌های (د)، (ه) و (و) به ترتیب نمایش‌دهنده تصاویر دوبعدی بازیابی شده به روش بهینه‌شده با CS در صفحات $z = -1.7 \text{ m}$ ، -1.2 m ، -0.8 m هستند. همان‌طور که مشخص است باینکه تعداد نقاط اندازه‌گیری به 10% کاهش پیدا کرده است، در تصاویر استخراج‌شده از محیط، اهداف با کیفیت خوب و موقعیت درستی بازیابی شده‌اند.



شکل (۴): تصویر دوبعدی از بازیابی تصویر در شبیه‌سازی محیط به روش DT برای صفحات (الف) $z = -0.8 \text{ m}$ (ب) $z = -1.2 \text{ m}$ (ج) $z = -1.7 \text{ m}$ و بازیابی تصویر به روش CS با استفاده از 10% اطلاعات اندازه‌گیری برای صفحات (د) $z = -0.8 \text{ m}$ (ه) $z = -1.2 \text{ m}$ (و) $z = -1.7 \text{ m}$ تشکیل شده است. شکل واقعی اهداف با خط‌چین مشخص شده است.

شکل (۸) بیان‌کننده تصاویر سه‌بعدی از فضای هدف با استفاده از دو روش DT و روش بهینه‌شده با CS است که تصاویر استخراج‌شده بر اساس قدر مطلق تابع $M(x, y, z)$ هستند. همان‌طور که واضح است اهداف به‌خوبی آشکار و بازسازی می‌شوند و قابلیت تفکیک بین اهداف نیز مناسب است.



شکل (۸): استخراج تصاویر سه‌بعدی اندازه‌گیری به روش (الف) DT (ب) روش بهینه‌شده با CS و استفاده از 10% اطلاعات

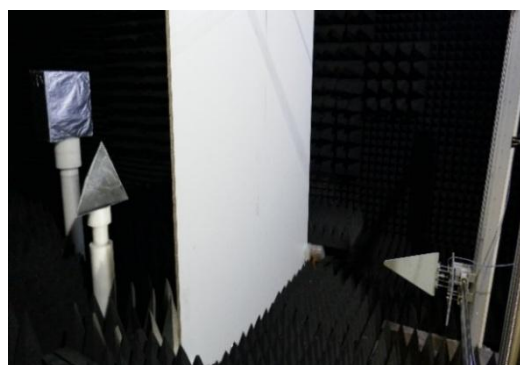
۷. نتیجه‌گیری

در این مقاله، روش بهبودیافته‌ای مبتنی بر CS ارائه کرده‌ایم. در این الگوریتم از قابلیت تنگ بودن محیط در تصویربرداری دیوارگذر استفاده شده تا تعداد اندازه‌گیری‌ها و زمان اسکن را به مقدار قابل‌ملاحظه‌ای کاهش دهیم. توابع تبدیل مستقیم و معکوس در یک فرایند تکراری به کمک الگوریتم CG می‌تواند تصاویر سه‌بعدی از اهداف را بازیابی کنند. نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری برای اثبات درستی روش ذکرشده ارائه شده است. همان‌طور که از نتایج مشخص است اهداف در محیط تنگ به‌خوبی بازیابی شده‌اند و زمان اندازه‌گیری نیز به مقدار قابل‌توجهی نسبت به روش DT کاهش پیدا کرده است.

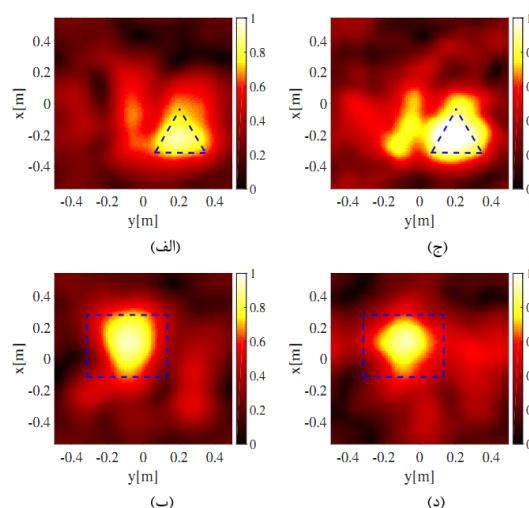
۸. مراجع

- [1] F. Ahmad and M. G. Amin, "Noncoherent approach to through-the-wall radar localization," IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 42, no. 4, pp. 1405–1419, Oct. 2006

به‌عنوان اهداف پشت دیوار در نظر گرفته شده‌اند که مراکز این اهداف به ترتیب در مکان‌های $(0.1 \text{ m}, -0.2 \text{ m}, 0.2 \text{ m}, 1.4 \text{ m})$ و $(-0.1 \text{ m}, 1.55 \text{ m})$ قرار گرفته‌اند. در این قسمت نتایج حاصل از بازیابی تصویر به دو روش DT و روش بهینه‌شده با CS به نمایش درآمده است. نتایج روش بهینه‌شده با CS با استفاده از 10% نقاط اندازه‌گیری به‌دست می‌آید. در شکل (۷)، تصاویر (الف) و (ب) به ترتیب نمایش‌دهنده تصاویر دوبعدی بازیابی شده به روش DT در صفحات $z = -1.55 \text{ m}$ و $z = -1.4 \text{ m}$ هستند. همچنین تصاویر (ج) و (د) به ترتیب نمایش‌دهنده تصاویر دوبعدی بازیابی شده به روش بهینه‌شده با CS در صفحات $z = -$ و $z = -1.4 \text{ m}$ هستند. همان‌طور که نمایان است روش بهینه‌شده با CS اهداف را به‌خوبی و در مکان درست بازیابی کرده است. زمان اندازه‌گیری برای اندازه‌گیری کامل ۶۷ دقیقه و زمان اندازه‌گیری برای روش ارائه‌شده ما ۱۵ دقیقه می‌باشد.



شکل (۶): پیاده‌سازی عملی سیستم تصویربرداری دیوارگذر



شکل (۷): تصویر دوبعدی از بازیابی تصویر در شبیه‌سازی محیط به روش DT برای صفحات (الف) $z = -1.4 \text{ m}$ (ب) $z = -1.55 \text{ m}$ و بازیابی تصویر به روش بهینه‌شده با CS با استفاده از 10% اطلاعات اندازه‌گیری برای صفحات (ج) $z = -1.4 \text{ m}$ (د) $z = -1.55 \text{ m}$ تشکیل شده است. شکل واقعی اهداف با خط‌چین مشخص شده است.

- [13] T. B. Hansen and P. M. Johansen, "Inversion scheme for monostatic ground penetrating radar that takes into account the planar air-soil interface," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 38, no. 1, pp. 496–506, Jan. 2000.
- [14] Z. Yang and Y. R. Zheng, "Near-field 3-D synthetic aperture radar imaging via compressed sensing," in *Proc. IEEE ICASSP*, Kyoto, 2012, pp. 2513–2516.
- [15] A. Dutt and V. Rokhlin, "Fast Fourier transforms for nonequispaced data," *SIAM J. Sci. Comput.*, vol. 14, no. 6, pp. 1368–1393, Nov. 1993.
- [16] L. Greengard and J.-Y. Lee, "Accelerating the nonuniform fast Fourier transform," *SIAM Rev.*, vol. 46, no. 3, pp. 443–454, 2004.
- [17] J. Song, Q. H. Liu, K. Kim, and W. Scott, "High-resolution 3-D radar imaging through nonuniform fast Fourier transform (NUFFT)," *Commun. Comput. Phys.*, vol. 1, no. 1, pp. 176–191, Feb. 2006.
- [18] D. S. Smith, S. Sengupta, S. A. Smith, and E. Brian Welch, "Trajectory optimized NUFFT: Faster non-cartesian MRI reconstruction through prior knowledge and parallel architectures," *Magn. Reson. Med.*, vol. 81, no. 3, pp. 2064–2071, Oct. 2019.
- [19] D. Sun, S. Xing, Y. Li, B. Pang, and X. Wang, "Sub-aperture partitioning method for three-dimensional wide-angle synthetic aperture radar imaging with non-uniform sampling," *Electronics*, vol. 8, no. 6, pp. 629, Jun. 2019.
- [20] P. Zhang, P. Fei, X. Wen, and F. Nian, "A novel through-the-wall imaging algorithm combined with phase shift migration and NUFFT," *Chinese Journal of Electronics*, vol. 26, no. 5, pp. 1096–1100, 2017.
- [21] L. Yuan, J. Liu, J. Ye, "Efficient methods for overlapping group Lasso," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 35, no. 9, pp. 2104–2116, Sept. 2013.
- [22] J. A. Tropp and A. C. Gilbert, "Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 53, no. 12, pp. 4655–4666, Dec. 2007.
- [23] M. Dehmollaian and K. Sarabandi, "Refocusing through building walls using synthetic aperture radar," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 46, no. 6, pp. 1589–1599, Jun. 2008.
- [2] F. Ahmad, M. G. Amin, and S. A. Kassam, "Synthetic aperture beam-former for imaging through a dielectric wall," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 41, no. 1, pp. 271–283, Jan. 2005.
- [3] F. Ahmad, Y. Zhang, and M. Amin, "Three-dimensional wideband beam-forming for imaging through a single wall," *IEEE Geosci. Remote Sensing Lett.*, vol. 5, no. 2, pp. 176–179, Apr. 2008.
- [4] L. P. Song, C. Yu, and Q. H. Liu, "Through-wall imaging (TWI) by radar: 2-D tomographic results and analyses," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 43, no. 12, pp. 2793–2798, Dec. 2005.
- [5] F. Soldovieri and R. Solimene, "Through-wall imaging via a linear inverse scattering algorithm," *IEEE Geosci. Remote Sensing Lett.*, vol. 4, no. 4, pp. 513–517, Oct. 2007.
- [6] W. Zhang, A. Hoorfar, and L. Li, "Through-the-wall target localization with time reversal MUSIC method," *Progr. Electromagn. Res.*, vol. 106, pp. 75–89, 2010.
- [7] W. Zhang, A. Hoorfar, C. Thajudeen, and F. Ahmad, "Full polarimetric beam-forming algorithm for through-the-wall radar imaging," *Radio Sci.*, vol. 46, pp. RS0E16-1–RS0E16-17, Oct. 2011.
- [8] W. Zhang, A. Hoorfar, and Q. H. Liu, "Three dimensional imaging of targets behind multilayered walls," in *Proc. IEEE Int. Symp. APSURSI*, Chicago, IL, 2012, pp. 1–2.
- [9] W. J. Zhang, and A. Hoorfar, "Three-dimensional real-time through-the-wall radar imaging with diffraction tomographic algorithm," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 51, no. 7, pp. 4155–4163, Jul. 2013.
- [10] J. Yang, T. Jin, X. Huang, J. Thompson, and Z. Zhou, "Sparse MIMO array forward-looking GPR imaging based on compressed sensing in clutter environment," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 52, no. 7, pp. 4480–4494, Jul. 2014.
- [11] M. Lustig, D. Donoho, and J. Pauly, "Sparse MRI: The application of compressed sensing for rapid MR imaging," *Magn. Reson. Med.*, vol. 58, no. 6, pp. 1182–1195, Dec. 2007.
- [12] W. Zhang, M. G. Amin, F. Ahmad, A. Hoorfar, and G. E. Smith, "Ultrawideband impulse radar through-the-wall imaging with compressive sensing," *Int. J. Antennas Propag.*, vol. 2012, Feb. 2012, Art. no. 251497, doi: 10.1155/2012/251497.

Three Dimensional Through the Wall Radar Imaging Using Compressed Sensing

A. R. Salehi Barzgar, A. Cheldavi^{*}

^{*} Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

(Received: 24/12/2019, Accepted: 31/05/2020)

Abstract

In this paper, the compressive sensing (CS) method is used in the through the wall radar imaging (TWRI) to reduce the measurement points and data acquisition time, consequently. In fact, the large required amount of measurement points is considered as one of the main challenges in TWRI which can be mitigated by this proposed method. The diffraction tomography (DT) method is the most efficient conventional method used in TWRI process. By exploiting the advantages of the CS and non-uniform fast Fourier transform (NUFFT), the effectiveness and speediness of the DT method is significantly increased. Simulations and the results of experiments have verified the validity of the proposed imaging method.

Keywords: Through-the-Wall Radar Imaging (TWRI), Diffraction Tomography (DT), Compressed Sensing (CS), Nonuniform fast Fourier Transform (NUFFT)

^{*} Corresponding author E-mail: cheldavi@iust.ac.ir