

مدل سازی الکترومغناطیسی کره رسانا برای شبیه سازی سیگنال دریافتی در رادار مشاهده گر از پشت دیوار

حمیدرضا دهقان منشادی^۱، مهرزاد بیگش^{۲*}، محمدعلی مسندی شیرازی^۳

۱- کارشناس ارشد، ۲- دانشیار، ۳- استاد، دانشگاه شیراز

(دریافت: ۹۵/۰۱/۲۱؛ پذیرش: ۹۵/۰۵/۲۱)

چکیده

رادار مشاهده گر از پشت دیوار، راداری نسبتاً جدید با برد کوتاه است که از امواج الکترومغناطیسی برای کشف اهداف پشت دیوار استفاده می‌کند. در شبیه سازی و همچنین در عمل، کره رسانا به خاطر تقارنی که دارد اغلب به عنوان یک بازتابنده مرجع برای کالیبراسیون سیستم‌های راداری و همچنین اندازه گیری ویژگی‌های بازتابی سایر اهداف راداری مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مقاله برای شبیه سازی سیگنال دریافتی در رادار مشاهده گر از پشت دیوار، ابتدا مدل میدان الکتریکی بازتابی از کره رسانا در فضای آزاد مورد بررسی قرار گرفته است. سپس با مدل سازی دیوار به صورت صفحه دی الکتریک و با استفاده از تئوری ماتریس موج، مدلی از کره رسانا در پشت دیوار ارائه شده است. برای تصویر سازی کره رسانا در پشت دیوار بتنی با استفاده از سیگنال‌های به دست آمده از مدل پیشنهادی، از الگوریتم RMA و عملیات تفاضل گیری همدوس پس زمینه استفاده شده و تصویری از کره واقع در پشت دیوار به دست آمده است. نتایج شبیه سازی مناسب بودن مدل بکار رفته برای کره و همچنین دیوار را برای کاربرد مورد نظر نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی

رادار مشاهده گر پشت دیوار، پروفایل برد، کره رسانا، دیوار بتنی

۱. مقدمه

موجود برای کشف اهداف پشت دیوار، مانند سیستم‌های مبتنی بر امواج صوتی و سیستم‌های با اشعه ایکس، بهترین عملکرد را دارند. فرکانس یک سیستم راداری کشف اهداف پشت دیوار باید به نحوی انتخاب شود که مصالحه مهندسی بین نفوذ بهتر امواج به درون دیوار در فرکانس‌های پایین‌تر و وضوح بیشتر تصویر در فرکانس‌های بالاتر، صورت گیرد. در شکل ۱ افزایش میزان تضعیف امواج در عبور از انواع دیوار بر اساس نتایج ارائه شده در [۴] نشان داده شده است. در این شکل، ضخامت دیوارها ۳۰ سانتی‌متر می‌باشد. همانگونه که در شکل ۱ مشخص است با افزایش فرکانس، تضعیف امواج در عبور از دیوار بیشتر می‌شود. همچنین شیب نمودار برای دیوارهای با ساختار فشرده تر مانند دیوار بتنی بیشتر است. این تلفات را می‌توان ناشی از دو عامل دانست. اولین عامل تلفات، بازتاب امواج از مرز دی الکتریک و هوا و عامل دوم، تلفات انتشار امواج در دی الکتریک می‌باشد. میزان بازتاب انرژی از مرز دی الکتریک و هوا به تفاضل امپدانس هوا و دیوار در مرز و همچنین زاویه تابش موج وابسته است. از سوی دیگر دیوار بخشی از انرژی امواج را جذب می‌کند که این تلفات به رسانایی ماده سازنده دیوار وابسته است.

تصویر سازی راداری اهداف از پشت دیوار از زمینه‌های تحقیقاتی رو به رشد می‌باشد [۱]. در چنین سیستم‌هایی، از امواج الکترومغناطیس برای آشکارسازی، دسته بندی و دنبال کردن اهداف متحرک یا ثابت در پشت دیوار استفاده می‌شود. رادار مشاهده گر از پشت دیوار^۱ در ماموریت‌های جستجو و امداد رسانی، آشکارسازی اهداف پشت دیوار و جنگ‌های شهری کاربرد دارد [۳و۲]. در مقالات سیستم‌های متنوعی با ساختار راداری متفاوت برای آشکارسازی اهداف از پشت مانع ارائه شده است. به عنوان مثال می‌توان به رادارهای پالسی، رادارهای با شکل موج نویزی یا شبه نویز، رادارهای موج پیوسته‌ی مدوله شده‌ی فرکانس یا موج پیوسته‌ی فرکانس پله‌ای اشاره کرد. سیگنال‌های مورد استفاده در این سیستم‌ها معمولاً از نوع فوق پهن باند انتخاب می‌شود تا حدتفکیک برد مناسب برای متمایز کردن اهداف نزدیک به هم را داشته باشد. در [۴] بیان شده است که سیستم‌های راداری با امواج مایکروویو از بین تکنولوژی‌های

* رایانامه نویسنده مسئول: biguesh@shirazu.ac.ir

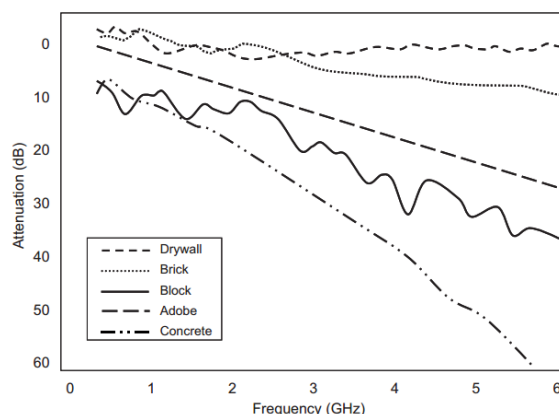
^۱ Through-Wall Radar

الکترونیک و رسانایی، بخش بیشتر امواج تابشی توسط فرستنده به سمت دیوار، از مرز هوا و دی الکترونیک بازتاب شده و منجر به کاهش شدید توان موجود برای بررسی محدوده‌ی پشت دیوار می‌شود. بنابراین در گیرنده سیگنال‌های بازتابی ناشی از دیوار بسیار قوی‌تر از بازتاب‌های اهداف اصلی پشت دیوار که معمولاً سطح مقطع راداری کمی دارند ظاهر می‌شود. برای بهبود نسبت سیگنال به کلاتر در مساله تصویرسازی راداری اهداف از پشت دیوار، روش‌های متعددی برای حذف سیگنال نامطلوب بازتابی از دیوار در مقالات مطرح شده است که برای مثال می‌توان به روش‌های تصویر کردن زیر فضا^۱ [۹-۱۲]، فیلتر کردن فضایی^۲ [۱۳]، تفاضل‌گیری همدوس پس زمینه^۳ [۱۴-۱۶] و فیلتر کردن سخت‌افزاری^۴ [۱۷ و ۱۸] اشاره کرد. در ادامه‌ی این مقاله روش تفاضل‌گیری همدوس پس زمینه را توضیح می‌دهیم و از این روش برای حذف کلاتر دیوار قبل از تصویرسازی، استفاده خواهیم کرد. برای شبیه‌سازی سیگنال دریافتی در رادار مشاهده‌گر از پشت دیوار مدل استوانه‌ی رسانا در پشت دیوار در [۱۹] مطرح شده است اما تاکنون مدل میدان الکترونیک بازتابی از کره رسانا در پشت دیوار با کاربرد شبیه‌سازی سیگنال دریافتی از اهداف پشت دیوار و تصویرسازی آن‌ها در مقالات ارائه نشده است. در این مقاله پس از ارائه‌ی مدل میدان الکترونیک بازتابی از کره رسانا در پشت دیوار، پروفایل‌های برد کره رسانا در پشت دیوار بتنی را به دست می‌آوریم و با استفاده از الگوریتم تصویرسازی RMA^۵ به تصویرسازی کره رسانا زمانی که در پشت دیوار قرار گرفته است، می‌پردازیم.

روند ادامه‌ی این مقاله به این صورت است که در بخش دوم و سوم مدل میدان الکترونیک بازتابی از کره رسانا به ترتیب در فضای آزاد و پشت دیوار مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش چهارم به شبیه‌سازی مدل ارائه شده می‌پردازیم و با استفاده از مدل پیشنهادی تصویر کره رسانا در پشت دیوار را به دست می‌آوریم و در نهایت در بخش پنجم به جمع بندی نتایج ارائه شده در این مقاله می‌پردازیم.

۲. میدان الکترونیک بازتابی از کره رسانا در فضای آزاد

فرض کنیم میدان الکترونیک صفحه‌ای یکنواخت در راستای محور x پلاریزه شده و در راستای محور z حرکت می‌کند. میدان الکترونیک موج تابشی روی یک کره رسانا در مختصات کروی با رابطه (۱) نمایش داده می‌شود.



شکل ۱. تضعیف انواع دیوار با ضخامت ۳۰ سانتی متر در برابر فرکانس سیگنال [۴].

در جدول ۱ ضرایب مدل پیشنهادی در [۵] برای محاسبه ثابت دی الکترونیک و رسانایی اجسام در بازه‌های فرکانسی مختلف ارائه شده است. برای محاسبه رسانایی از رابطه ارائه شده در جدول، فرکانس بر حسب گیگاهرتز می‌باشد.

لازم به ذکر است که اعداد ارائه شده برای رسانایی و ثابت دی الکترونیک برای مواد مختلف در مراجع مختلف دارای تفاوت‌هایی می‌باشد. نمونه‌های دیگری از گزارش‌های ارائه شده برای مقادیر ثابت دی الکترونیک و رسانایی مواد مختلف شامل [۶-۸] می‌باشد. برای نمونه ثابت دی الکترونیک برای چوب، بسته به جنس و فشردگی آن از ۱/۲ تا ۴/۵، برای آجر بسته به میزان رطوبت آن از ۳ تا ۱۰ و برای بتن بسته به میزان رطوبت آن از ۵ تا ۷ گزارش شده است.

جدول ۱. ضرایب مدل پیشنهادی برای ثابت دی الکترونیک و رسانایی اجسام در بازه‌های فرکانسی مختلف [۵].

بازه فرکانسی GHz	رسانایی		ثابت دی الکترونیک نسبی ϵ_r	جنس دی الکترونیک
	d	c		
۱۰۰-۱	۰/۸۰۹۵	۰/۰۳۲۶	۵/۳۱	بتن
۱۰-۱	.	۰/۰۳۸	۳/۷۵	آجر
۱۰۰-۱	۰/۷۰۷۶	۰/۰۱۱۶	۲/۹۴	گچ
۱۰۰-۰/۰۰۱	۱/۰۷۱۸	۰/۰۰۴۷	۱/۹۹	چوب
۱۰۰-۰/۱	۱/۱۹۲۵	۰/۰۰۴۳	۶/۲۷	شیشه

یک مشکل مشترک در آشکارسازی اهداف پشت دیوار در ساختارهای راداری متفاوت، سیگنال بازتابی قوی از سطح جلویی دیوار می‌باشد. سیگنال قوی بازتابی از دیوار آشکارسازی سیگنال‌های ضعیف بازتابی از اهداف احتمالی را با مشکل روبرو می‌کند. بسته به پارامترهای دیوار مانند ضخامت، ثابت دی

¹ Subspace Projection

² Spatial Filtering

³ Coherent Background Subtraction

⁴ Hardware Filtering

⁵ Range Migration Algorithm

$H_n^{(2)}(\cdot)$ ارتباط دارد.

$$\hat{H}_n^{(2)}(\beta r) = \sqrt{\frac{r\pi\beta}{2}} H_{n+0.5}^{(2)}(\beta r) \quad (11)$$

همچنین مقادیر a_n و b_n و c_n به صورت زیر محاسبه می شوند [۲۱].

$$a_n = j^{-n} \frac{2n+1}{n(n+1)} \quad (12)$$

$$b_n = -a_n \frac{\hat{J}_n'(\beta a)}{\hat{H}_n^{(2)'(\beta a)}} \quad (13)$$

$$c_n = -a_n \frac{\hat{J}_n(\beta a)}{\hat{H}_n^{(2)}(\beta a)} \quad (14)$$

مولفه های میدان الکتریکی بازتابی از کره یعنی روابط (۵) تا (۷) برای میدان دور یعنی زمانی که $\beta r \gg 1$ به صورت زیر تخمین زده می شوند.

$$E_r^S \cong 0 \quad (15)$$

$$E_\theta^S \cong jE_0 \frac{e^{-j\beta r}}{\beta r} \cos\phi \times \sum_{n=1}^{\infty} j^n \left(b_n \frac{\sin\theta P_n^{(1)}(\cos\theta) - c_n \frac{P_n^1(\cos\theta)}{\sin\theta}}{n} \right) \quad (16)$$

$$E_\phi^S \cong jE_0 \frac{e^{-j\beta r}}{\beta r} \sin\phi \times \sum_{n=1}^{\infty} j^n \left(b_n \frac{P_n^1(\cos\theta)}{\sin\theta} - c_n \frac{\sin\theta P_n^{(1)}(\cos\theta)}{n} \right) \quad (17)$$

برای بررسی این نتایج در حالت تک پایه^۵ میدان الکتریکی مورد نیاز ما، مولفه ی E_x^S می باشد که به صورت زیر به دست می آید.

$$E_x^S = E_\theta^S \cos\theta \cos\phi \Big|_{\theta=\pi, \phi=\pi} \quad (18)$$

برای محاسبه رابطه (۱۸) ابتدا باید تابع لژندر و مشتق آن را برای $\theta = \pi$ ساده کنیم. داریم:

$$\frac{P_n^1(\cos\theta)}{\sin\theta} \Big|_{\theta=\pi} = (-1)^n \frac{n(n+1)}{2} \quad (19)$$

$$\sin\theta \cdot P_n^{(1)}(\cos\theta) \Big|_{\theta=\pi} = (-1)^n \frac{n(n+1)}{2} \quad (20)$$

بنابراین میدان الکتریکی بازتابی از کره رسانا در فضای آزاد

$$E^i = \hat{a}_r E_r^i + \hat{a}_\theta E_\theta^i + \hat{a}_\phi E_\phi^i \quad (1)$$

که مولفه های E_r^i و E_θ^i و E_ϕ^i به صورت زیر می باشد [۲۰]

$$E_r^i = -jE_0 \frac{\cos\phi}{(\beta r)^2} \times \sum_{n=1}^{\infty} j^{-n} (2n+1) \hat{J}_n(\beta r) P_n^1(\cos\theta) \quad (2)$$

$$E_\theta^i = E_0 \frac{\cos\theta \cos\phi}{\beta r} \times \sum_{n=0}^{\infty} j^{-n} (2n+1) \hat{J}_n(\beta r) P_n^0(\cos\theta) \quad (3)$$

$$E_\phi^i = -E_0 \frac{\sin\phi}{\beta r} \times \sum_{n=0}^{\infty} j^{-n} (2n+1) \hat{J}_n(\beta r) P_n^0(\cos\theta) \quad (4)$$

که E_0 دامنه میدان الکتریکی تابشی، $P_n^m(\cdot)$ بیانگر تابع لژندر وابسته^۱ نوع m و از مرتبه n و $\hat{J}_n^m(\cdot)$ بیانگر تابع بسل ریکاتی^۲ نوع m و مرتبه n و β عدد موج می باشد. میدان الکتریکی بازتابی از کره رسانا به صورت زیر است [۲۱]

$$E_r^S = -jE_0 \cos\phi \times \sum_{n=1}^{\infty} b_n \left(\hat{H}_n^{(2)''}(\beta r) + \hat{H}_n^{(2)}(\beta r) \right) P_n^1(\cos\theta) \quad (5)$$

$$E_\theta^S = \frac{E_0}{\beta r} \cos\phi \times \sum_{n=1}^{\infty} \left(j b_n \frac{\hat{H}_n^{(2)'(\beta r)} \sin\theta P_n^{(1)'(\cos\theta)} - c_n \hat{H}_n^{(2)}(\beta r) \frac{P_n^1(\cos\theta)}{\sin\theta}}{n} \right) \quad (6)$$

$$E_\phi^S = \frac{E_0}{\beta r} \sin\phi \times \sum_{n=1}^{\infty} \left(j b_n \frac{\hat{H}_n^{(2)'(\beta r)} \frac{P_n^1(\cos\theta)}{\sin\theta} - c_n \hat{H}_n^{(2)}(\beta r) \sin\theta P_n^{(1)'(\cos\theta)} \right) \quad (7)$$

که مشتقات جزئی در روابط (۵) تا (۷) به صورت زیر است.

$$\hat{H}_n^{(2)'(\beta r)} = \frac{\partial}{\partial(\beta r)} \hat{H}_n^{(2)}(\beta r) \quad (8)$$

$$\hat{H}_n^{(2)''(\beta r)} = \frac{\partial^2}{\partial(\beta r)^2} \hat{H}_n^{(2)}(\beta r) \quad (9)$$

$$P_n^{(1)'(\cos\theta)} = \frac{\partial}{\partial \cos\theta} P_n^{(1)}(\cos\theta) \quad (10)$$

در روابط فوق $\hat{H}_n^{(2)}(\cdot)$ بیانگر تابع هانکل ریکاتی^۳ نوع دوم و از مرتبه n می باشد، که به صورت زیر با تابع هانکل^۴ کروی

¹ Associated Legendre Function

² Riccati Bessel Function

³ Riccati Hankel Function

⁴ Spherical Hankel Function

امپدانس نرمالیزه دی‌الکتریک در حضور موج صفحه‌ای در زاویه $\phi_i(n)$ نسبت به خط عمود بر صفحه دی‌الکتریک در رابطه (۲۲) بیان شده است. ϵ_r ثابت دی‌الکتریک و σ رسانایی می‌باشد. برای دیوار بتنی $\epsilon_r = 5/31$ و σ در فرکانس ۲GHz تا ۴GHz از ۰/۰۵VS/m تا ۰/۱S/m متغیر است [۵].

$$Z(n) = \frac{\cos(\phi_i(n))}{\sqrt{\left(\epsilon_r + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon_0}\right) - \sin^2(\phi_i(n))}} \quad (22)$$

که در این رابطه، زاویه $\phi_i(n)$ به صورت زیر به دست می‌آید.

$$\phi_i(n) = \cos^{-1}\left(\frac{d_3}{\sqrt{x(n)^2 + d_3^2}}\right) \quad (23)$$

مسافت الکتريکی پیموده شده توسط موج در مانع دی‌الکتریک با ضخامت d برای زاویه تابش مورب $\phi_i(n)$ به صورت زیر است.

$$\theta(n) = k_0 d \sqrt{\left(\epsilon_r + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon_0}\right) - \sin^2(\phi_i(n))} \quad (24)$$

که β عدد موج در فضای آزاد به صورت

$$\beta = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \quad (25)$$

می‌باشد. ضریب دامنه موج، $c_1(n)$ در مرز دی‌الکتریک به صورت

$$c_1(n) = E_0 e^{-j\beta r_1(n)} \quad (26)$$

است، که $r_1(n)$ فاصله سنسور رادار از سطح دی‌الکتریک می‌باشد و به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$r_1(n) = \frac{d_1}{\cos(\phi_i(n))} \quad (27)$$

پروفایل‌های برد شبیه‌سازی شده، با حل معادلات ماتریسی موج برای دامنه $b_1(n)$ ، با استفاده از رابطه‌های (۲۸ و ۲۹) به دست می‌آید [۲۰]:

$$c_3(n) = \frac{c_1(n) \times \left(1 + \frac{Z(n)-1}{Z(n)+1}\right) \left(1 + \frac{1-Z(n)}{Z(n)+1}\right)}{e^{j\theta(n)} + \frac{(Z(n)-1)(1-Z(n))}{(Z(n)+1)^2} e^{-j\theta(n)} + \Gamma \times \left(\frac{1-Z(n)}{Z(n)+1} e^{j\theta(n)} + \frac{Z(n)-1}{Z(n)+1} e^{-j\theta(n)}\right)} \quad (28)$$

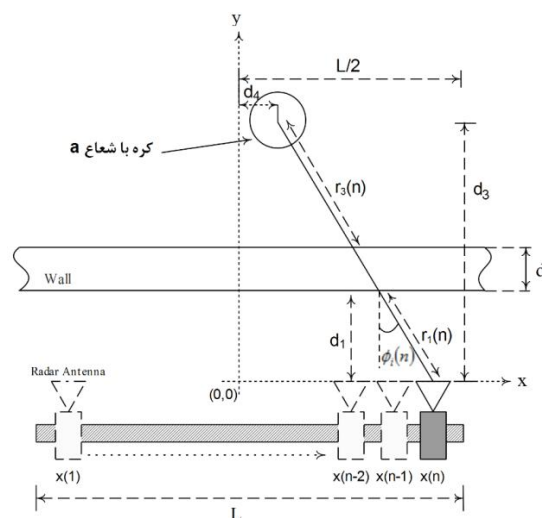
در رادار تک پایه به صورت رابطه (۲۱) می‌باشد.

$$E_\theta^S \Big|_{\theta=\pi, \phi=\pi} \quad (21)$$

$$= E_0 \frac{e^{-j\beta r}}{2\beta r} \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n (2n+1)}{\hat{H}_n^{(2)'(\beta a) + \hat{H}_n^{(2)}(\beta a)}$$

۳. میدان الکتريکی بازتابی از کره رسانا در پشت مانع دی‌الکتریک

هندسه مساله مدل‌سازی میدان الکتريکی بازتابی از کره رسانا در پشت دیوار بتنی در شکل ۲ نمایش داده شده است. در این شکل آنتنی که روی یک خط به طول L به موازات دیوار حرکت می‌کند، در مکان $x(n)$ قرار گرفته است. یک مانع دی‌الکتریک با ضخامت d بین یک کره رسانا به شعاع a و آنتن قرار دارد. فاصله آنتن از مقابل مانع دی‌الکتریک $r_1(n)$ می‌باشد و هدف در فاصله $r_3(n)$ از پشت مانع قرار گرفته است. در شبیه‌سازی پروفایل‌های برد فرض شده است که در زمان به دست آوردن پروفایل برد، مکان آنتن رادار روی خط، ثابت می‌باشد. مدل مانع دی‌الکتریک بر اساس نظریه ماتریس موج^۱ از [۲۰] ارائه شده است.

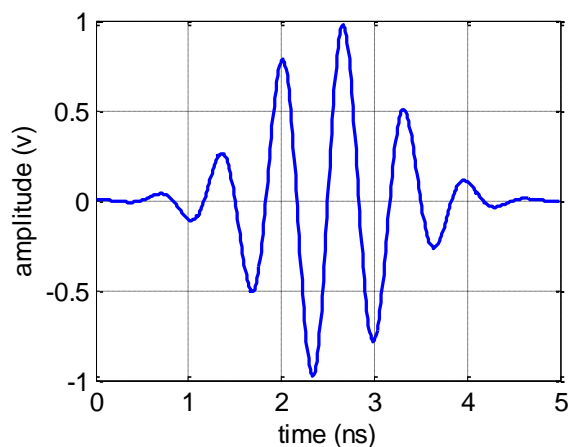


شکل ۲. هندسه مساله تصویرسازی راداری هدف از پشت مانع دی‌الکتریک. در این تصویر آنتن رادار در زمان گسسته ۱ تا n در موقعیت $x(1)$ تا $x(n)$ نشان داده شده است.

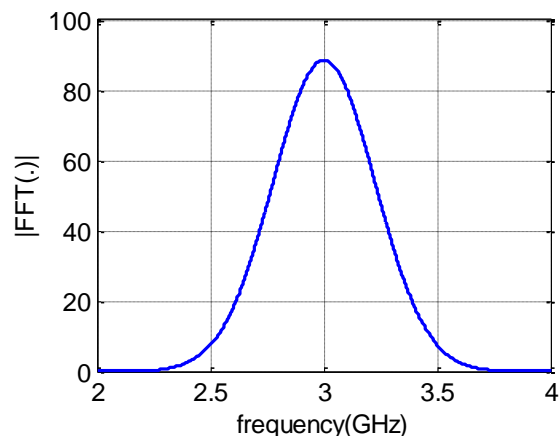
¹ Wave Matrix Theory

$$b_1(n) = \frac{c_3(n)}{\left(1 + \frac{Z(n)-1}{Z(n)+1}\right) \left(1 + \frac{1-Z(n)}{Z(n)+1}\right)} \times \left[\frac{Z(n)-1}{Z(n)+1} e^{j\theta(n)} + \frac{1-Z(n)}{Z(n)+1} e^{-j\theta(n)} + \Gamma \times \left(\frac{Z(n)-1}{Z(n)+1} \frac{1-Z(n)}{Z(n)+1} e^{j\theta(n)} + \frac{Z(n)-1}{Z(n)+1} e^{-j\theta(n)} \right) \right] \quad (29)$$

پالس گوسی ارسالی می باشد. فرکانس مرکزی این پالس $f=3\text{GHz}$ و $b=2.5\text{ns}$ و $c=1\text{ns}$ انتخاب شده است. اندازه طیف این پالس در شکل ۴ نمایش داده شده است.



شکل ۳. پالس گوسی ارسالی با فرکانس $f=3\text{GHz}$ و مقادیر $b=2.5\text{ns}$ و $c=1\text{ns}$.



شکل ۴. اندازه طیف پالس گوسی ارسالی.

رابطه (۲۱) بیانگر میدان الکتریکی بازتابی از کره رسانا بر حسب فرکانس می باشد. با توجه به طیف پالس گوسی ارسالی که نشان دهنده صفر بودن اندازه طیف ارسالی در بازه فرکانسی خارج از 2GHz تا 4GHz می باشد، ابتدا با فرض ارسال سیگنال پهن باند به نحوی که طیف آن در فرکانس های 2GHz تا 4GHz مقدار ثابت و حقیقی ۱ را داشته باشد، با استفاده از رابطه (۲۱)

که در رابطه فوق Γ میدان الکتریکی بازتابی از کره رسانا در فضای آزاد در رادار تک پایه است که با رابطه (۲۱) بیان شد. توجه داریم در رابطه (۲۱) فاصله کره از آنتن یعنی r باید با فاصله کره از پشت دی الکتریک یعنی $r_3(n)$ جایگذاری شود که $r_3(n)$ به صورت زیر محاسبه می شود.

$$r_3(n) = \frac{d_3 - d_1 - d}{\cos(\phi_1(n))} \quad (30)$$

با داشتن $b_1(n)$ از رابطه (۲۸)، میدان دریافتی، که موج صفحه ای بازتابی از سطح دی الکتریک می باشد، به صورت زیر است.

$$E_S(n) = b_1(n) e^{-j\beta r_1(n)} \quad (31)$$

۴. شبیه سازی

در این بخش با استفاده از نرم افزار Matlab به شبیه سازی مدل پیشنهادی می پردازیم و سیگنال بازتابی از یک کره رسانا را ابتدا در فضای آزاد و سپس در پشت دیوار بتنی به دست می آوریم. برای تصویرسازی از کره رسانا در پشت دیوار بتنی با استفاده از مدل ارائه شده، پروفایل های برد مربوط به حرکت آنتن رادار روی یک خط به موازات دیوار را شبیه سازی می کنیم و با استفاده از الگوریتم تصویرسازی RMA تصویر کره رسانا در پشت دیوار بتنی را به دست خواهیم آورد. در تمام شبیه سازی های انجام شده سیگنال ارسالی توسط فرستنده رادار یک پالس گوسی می باشد که جزئیات آن در ادامه بیان خواهد شد.

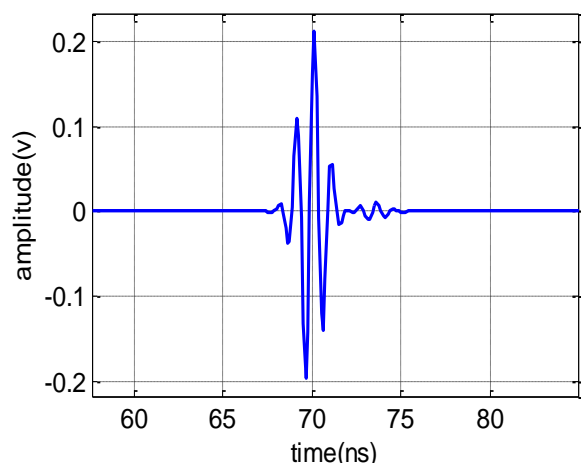
۴-۲. شبیه سازی پروفایل برد کره رسانا در فضای آزاد

بر اساس مدل پیشنهادی

سیگنال ارسالی توسط فرستنده رادار، یک پالس گوسی است که می توان آن را با رابطه زیر نمایش داد.

$$g(t) = \sin(2\pi f(t-b)) \times \exp\left(-\left(\frac{t-b}{c}\right)^2\right) \quad (32)$$

که f بیانگر فرکانس مرکزی، b شیفت زمانی شروع پالس و c پارامتری برای تعیین پهنای باند پالس می باشد. شکل ۳ بیانگر



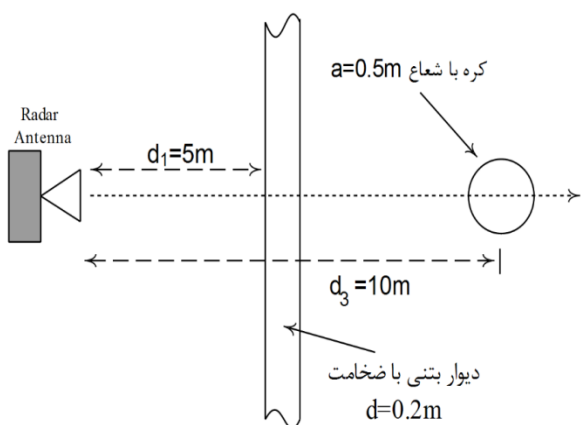
شکل ۶. سیگنال بازتابی از یک کره رسانا با شعاع $a=30\text{cm}$ در فاصله $r=10\text{m}$ از رادار.

۴-۱. شبیه‌سازی پروفایل برد کره رسانا در پشت

دیوار بر اساس مدل پیشنهادی

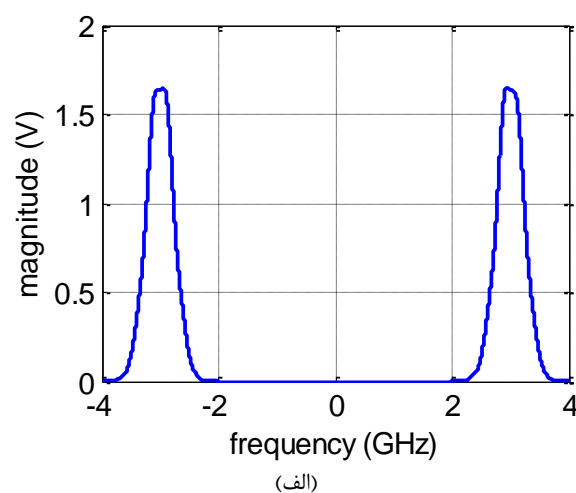
سناریوی شبیه‌سازی سیگنال بازتابی از کره‌ی رسانا در پشت دیوار بتنی در شکل ۷ نشان داده شده است. کره رسانا به شعاع $a=0.5\text{m}$ در فاصله $d_3=10\text{m}$ از آنتن در پشت دیوار بتنی با ضخامت $d=0.2\text{m}$ قرار گرفته است. فاصله دیوار از آنتن نیز $d_1=5\text{m}$ می‌باشد.

سیگنال بازتابی شبیه‌سازی شده در نرم افزار Matlab با استفاده از مدل پیشنهادی در شکل ۸ نشان داده شده است. برای شبیه‌سازی این سیگنال از روش بیان شده در زیر بخش قبل استفاده شده است.

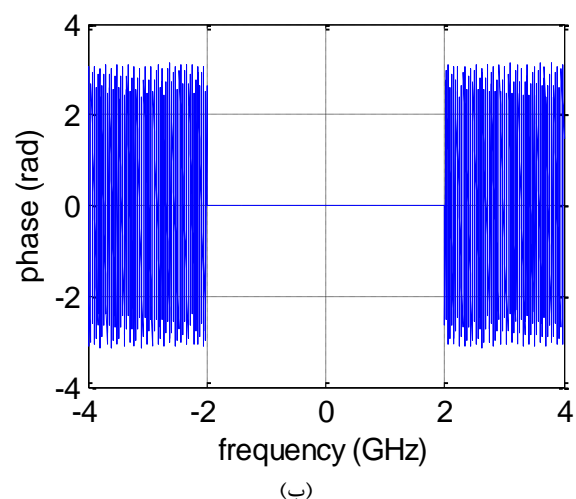


شکل ۷. سناریوی استفاده شده برای شبیه‌سازی پروفایل برد کره رسانا در پشت دیوار.

پاسخ فرکانسی فضا در بازه فرکانسی ۲GHz تا ۴GHz را به دست می‌آوریم. سپس با ضرب کردن طیف پالس گوسی ارسالی در این پاسخ فرکانسی، طیف میدان الکتریکی بازتابی از کره رسانا با فرض تابش پالس گوسی نشان داده شده در شکل ۳ به دست می‌آید. سپس با محاسبه عکس تبدیل فوریه این طیف، سیگنال بازتابی از کره رسانا در حوزه زمان به دست می‌آید که البته با توجه به تقارن هرمیتی این طیف، سیگنال بازتابی، سیگنالی حقیقی می‌باشد. در شکل ۶ سیگنال بازتابی از کره رسانا به شعاع $a=30\text{cm}$ در فاصله $r=10\text{m}$ از رادار با استفاده از این روش شبیه‌سازی شده است.



(الف)



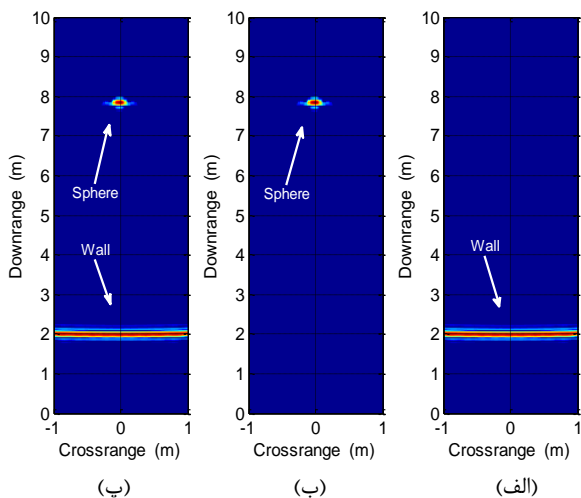
(ب)

شکل ۸. طیف سیگنال بازتابی از کره رسانا به شعاع $a=30\text{cm}$ در فضای آزاد در فاصله $r=10\text{m}$ از رادار در اثر تابش پالس گوسی، شبیه‌سازی شده با رابطه (۲۱)، (الف) اندازه، (ب) فاز.

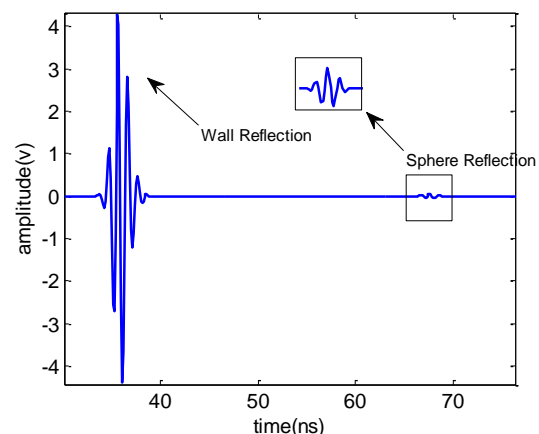
طیف مختلط به دست آمده از مدل ارائه شده در سناریوی فوق را که تابعی از فرکانس و مکان سنسور می باشد به صورت ماتریس طیف میدان بازتابی S نمایش می دهیم. سطر i ام از این ماتریس بیانگر طیف سیگنال بازتابی از سناریوی مورد مطالعه در i امین موقعیت قرارگیری آنتن می باشد. برای تصویرسازی کره در پشت دیوار، از عملیات تفاضل گیری همدوس پس زمینه^۱ استفاده شده است. برای این منظور با قرار دادن $\Gamma = 0$ در رابطه (۲۹)، یک مجموعه داده^۲ بدون حضور کره رسانا به دست می آید و آن را S_B می نامیم. مجموعه داده ی بعدی با حضور کره، با قرار دادن Γ مربوط به کره که در رابطه (۲۱) بیان شد، به دست می آید که آن را S می نامیم. عملیات تفاضل گیری همدوس پس زمینه به صورت زیر انجام می شود [۱۶].

$$S_T(f) = S(f) - S_B(f) \quad (32)$$

برای پردازش نتایج به دست آمده از مدل ارائه شده، از الگوریتم RMA از [۲۲]، استفاده شده است. تصویر حاصل را در شکل ۱۰ مشاهده می کنیم.



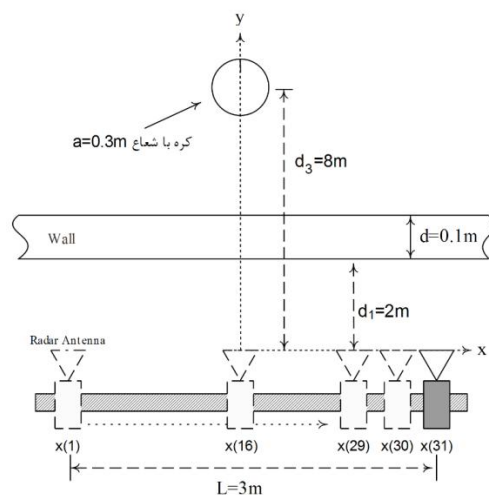
شکل ۱۰. تصویر حاصل از کره رسانا با شعاع $a=30\text{cm}$ در فاصله ۸ متری در پشت دیوار بتنی با ضخامت $d=10\text{cm}$ در فاصله ۲ متری از رادار. الف) قبل از عملیات تفاضل گیری همدوس پس زمینه، در این تصویر شکل دیوار به روشنی دیده می شود اما با توجه به دامنه ضعیف سیگنال بازتابی از کره نسبت به بازتاب شدید دیوار، اثری از کره رسانا قابل مشاهده نیست. ب) پس از عملیات تفاضل گیری همدوس پس زمینه، در این تصویر با حذف دیوار، کره رسانا به وضوح مشخص شده است. پ) ترکیب تصویر به دست آمده از قسمت های الف) و ب)، با ترکیب تصاویر الف) و ب) در این تصویر هم کره و هم دیوار به روشنی دیده می شوند.



شکل ۸. سیگنال بازتابی از کره رسانا به شعاع $a=0.5\text{m}$ در فاصله ۱۰ متری از رادار در پشت دیوار بتنی به ضخامت $d=0.2\text{m}$ در فاصله ۵ متری از رادار.

۳-۴. تصویرسازی

در این بخش با استفاده از مدل پیشنهادی به تصویرسازی از کره رسانا در پشت دیوار بتنی می پردازیم. سناریوی تصویرسازی در شکل ۹ نمایش داده شده است. با قرار گرفتن آنتن در ۳۱ نقطه با فاصله ۱۰ سانتی متری از هم روی خطی به طول $L=3\text{m}$ به موازات دیوار، تعداد ۳۱ پروفایل برد از سناریوی نشان داده شده در شکل ۹ به دست می آید. آنتن به سمت مانع دی الکتریک و در فاصله $d_1=2\text{m}$ از آن قرار دارد و کره رسانا در پشت دیوار و در فاصله $d_3=8\text{m}$ از آنتن واقع شده است. شعاع کره $a=0.3\text{m}$ و ضخامت دیوار $d=0.1\text{m}$ می باشد.



شکل ۹. سناریوی تصویرسازی از کره رسانا در پشت دیوار بتنی. در این شکل آنتن با حرکت روی خطی به طول $L=3\text{m}$ در ۳۱ نقطه نشان داده شده با $x(1)$ تا $x(31)$ که فاصله هر نقطه با نقطه کناری ۱۰ سانتی متر است، توقف کرده و پروفایل برد متناظر با آن نقطه را به دست می آورد. کره در فاصله $d_3=8\text{m}$ از وسط خط سیر آنتن و همچنین دیوار در فاصله $d=0.1\text{m}$ از آنتن قرار دارد. شعاع کره $a=0.3\text{m}$ و ضخامت دیوار $d=0.1\text{m}$ می باشد.

¹ Coherent Background Subtraction

² Data Set

And Low Dielectric Target Behind The Brick Wall By Stepped Frequency Continuous Wave Radar In Ultra-Wideband Range." IET radar, sonar & navigation, vol. 5, no. 4, pp. 416-425, Apr. 2011.

- [11] F. H. C. Tivive, A. Bouzerdoum, and M. G. Amin, "An SVD-Based Approach For Mitigating Wall Reflections In Through-the-Wall Radar Imaging," IEEE Proc. in Radar Conference (RADAR), pp. 519-524, 2011.
- [12] F. Ahmad and M. G. Amin, "Wall Clutter Mitigation For MIMO Radar Configurations In Urban Sensing," in Proc. of the 11th International Conference on Signal Processing and their Applications (ISSPA), pp. 1165-1170, 2012.
- [13] Y.-S. Yoon and M. G. Amin, "Spatial Filtering For Wall-Clutter Mitigation In Through-the-Wall Radar Imaging," IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, vol. 47, no. 9, pp. 3192-3208, Sep. 2009.
- [14] K. E. Browne, R. J. Burkholder, and J. L. Volakis, "Fast Optimization Of Through-Wall Radar Images Via The Method Of Lagrange Multipliers," IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. 61, no. 1, pp. 320-328, Jan. 2013.
- [15] M. Dehmollaian and K. Sarabandi, "Refocusing Through Building Walls Using Synthetic Aperture Radar," IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, vol. 46, no. 6, pp. 1589-1599, Jun. 2008.
- [16] P. H. Chen, M. C. Shastry, C.-P. Lai, and R. M. Narayanan, "A Portable Real-Time Digital Noise Radar System For Through-The-Wall Imaging," IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, vol. 50, no. 10, pp. 4123-4134, Oct. 2012.
- [17] Y. Wang and A. E. Fathy, "Advanced System Level Simulation Platform For Three-Dimensional UWB Through-Wall Imaging SAR Using Time-Domain Approach," IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, vol. 50, no. 5, pp. 1986-2000, May. 2012.
- [18] M. J. Øyan, S.-E. Hamran, L. Hanssen, T. Berger, and D. Plettemeier, "Ultrawideband Gated Step Frequency Ground-Penetrating Radar," IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, vol. 50, no. 1, pp. 212-220, Jan. 2012.
- [19] G. L. Charvat, L. C. Kempel, E. J. Rothwell, C. M. Coleman, and E. L. Mokole, "A Through-Dielectric Radar Imaging System," IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. 58, no. 8, pp. 2594-2603, Aug. 2010.
- [20] R. E. Collin, "Field Theory Of Guided Waves"; Wiley-IEEE Press, 1991.
- [21] C. A. Balanis, "Advanced Engineering Electromagnetics"; vol. 111, Wiley, 2012.
- [22] W. G. Carrara, R. S. Goodman, and R. M. Majewski, "Spotlight Synthetic Aperture Radar Signal Processing Algorithms"; Boston, MA: Artech House, 1995.

۵. نتیجه گیری

در این مقاله مدل میدان بازتابی از کره رسانا در فضای آزاد و در پشت دیوار برای شبیه‌سازی سیگنال دریافتی در رادار مشاهده گر از پشت دیوار ارائه گردید. سپس با فرض ارسال یک پالس گوسی با پهنای باند ۱GHz حول فرکانس ۳GHz سیگنال بازتابی از کره رسانا در فضای آزاد و در پشت دیوار به دست آمد. برای تصویرسازی راداری کره رسانا در پشت دیوار بتنی، با استفاده از مدل پیشنهادی، داده‌های مربوط به حرکت آنتن رادار روی یک خط به طول ۳ متر به موازات دیوار به دست آمد و تصویرسازی با استفاده از الگوریتم RMA و تفاضل‌گیری همدوس پس زمینه انجام شد. نتایج شبیه‌سازی مناسب بودن مدل به کار رفته برای کره و همچنین دیوار را برای کاربرد مورد نظر نشان می‌دهد. با استفاده از مدل پیشنهادی در این مقاله می‌توان به مطالعه و بهبود الگوریتم‌های تصویرسازی از پشت دیوار مانند الگوریتم‌های حذف کلاتر دیوار و الگوریتم‌های کاهش مات شدگی تصاویر پرداخت.

۶. مراجع

- [1] F. Tivive, A. Bouzerdoum, and M. Amin, "A Subspace Projection Approach For Wall Clutter Mitigation In Through-The-Wall Radar Imaging" IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, vol. 53, no. 4, pp. 2108-2122, Apr. 2015.
- [2] M. Amin, K. Sarabandi, "Special Issue On Remote Sensing Of Building Interior" IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, vol. 47, no. 5, pp. 1267-1268, May. 2009.
- [3] E. J. Baranoski, "Through-Wall Imaging: Historical Perspective And Future Directions" J. Franklin Inst, vol. 345, no. 6, pp. 556-569, Sep. 2008.
- [4] M. Farwell, J. Ross, R. Luttrell, D. Cohen, W. Chin, and T. Dogaru, "Sense Through The Wall System Development And Design Considerations" Journal of the Franklin Institute, vol. 345, no. 6, pp. 570-591, Sep. 2008.
- [5] S. Salous, "Radio Propagation Measurement And Channel Modelling"; John Wiley & Sons, 2013.
- [6] A. Muqaibel, A. Safaai-Jazi, A. Bayram, A. Attiya, and S. Riad, "Ultrawideband Through-the-Wall Propagation," IEE Proceedings-Microwaves, Antennas and Propagation, vol. 152, no. 6, pp. 581-588, Dec. 2005.
- [7] D. Pena, R. Feick, H. D. Hristov, and W. Grote, "Measurement And Modeling Of Propagation Losses In Brick And Concrete Walls For The 900-Mhz Band," IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. 51, no. 1, pp. 31-39, Jan. 2003.
- [8] I. Cuiñas and M. G. Sánchez., "Measuring, Modeling, And Characterizing Of Indoor Radio Channel At 5.8 GHz," IEEE Trans. on Vehicular Technology, vol. 50, no. 2, pp. 526-535, Mar. 2001.
- [9] K. Chetty, G. E. Smith, and K. Woodbridge, "Through-The-Wall Sensing Of Personnel Using Passive Bistatic Wi-Fi Radar At Standoff Distances," IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, vol. 50, no. 4, pp. 1218-1226, Apr. 2012.
- [10] A. N. Gaikwad, D. Singh, and M. Nigam, "Application Of Clutter Reduction Techniques For Detection Of Metallic

Electromagnetic Modeling of Conducting Sphere for the Received Signal Simulation of See-Through-the-Wall Radar

H. R. Dehghan Manshadi, M. Biguesh*, M. A. Masnadi Shirazi

Shiraz University

(Received: 09/04/2016, Accepted: 11/08/2016)

Abstract

See Through the Wall Radar, is a relatively new small range radar that uses electromagnetic waves to detect targets behind the wall. Because of its symmetry, a conducting sphere is often used as a reference scatterer to calibrate radars and measure the scattering properties of other radar targets. In this paper, in order to simulate the received signal for See- Through- the- Wall radar, the scattering model of a conducting sphere in free space is presented. Then using a dielectric sheet to represent the wall between the radar system and the sphere behind it, the scattering model of a sphere behind the wall is developed. To create the image of the conducting sphere behind the concrete wall using the signals acquired with the proposed model, the Range Migration Algorithm (RMA) and the coherent background subtraction are used and, as a result, an image of the sphere behind the wall has been achieved. Simulation results reveal the suitability of the proposed model for See-Through-the-Wall Radar received signal simulation.

Keywords: Through-Wall Radar, Range Profile, Conducting Sphere, Concrete Wall.

* Corresponding author E-mail: biguesh@shirazu.ac.ir