Archive of SID

محبله علمی بژو، شی «رادار» سال چهارم، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۵؛ ص ۱۸–۱۱

# مدلسازی الکترومغناطیسی کره رسانا برای شبیهسازی سیگنال دریافتی در رادار مشاهدهگر از پشت دیوار

حمیدرضا دهقان منشادی'، مهرزاد بیغش<sup>۲\*</sup>، محمدعلی مسندی شیرازی<sup>۳</sup>

۱ کارشناس ارشد، ۲ - دانشیار، ۳ - استاد، دانشگاه شیراز
 (دریافت: ۹۵/۰۱/۲۱؛ پذیرش: ۹۵/۰۵/۲۱)

### چکیدہ

رادار مشاهده گر از پشت دیوار، راداری نسبتا جدید با برد کوتاه است که از امواج الکترومغناطیسی برای کشف اهداف پشت دیـوار اسـتفاده میکند. در شبیهسازی و همچنین در عمل، کره رسانا به خاطر تقارنی کـه دارد اغلـب بـه عنـوان یـک بازتابنـده مرجع بـرای کالیبراسـیون سیستمهای راداری و همچنین اندازه گیری ویژگیهای بازتابی سایر اهداف راداری مورد استفاده قرار می گیرد. در این مقاله برای شـبیهسازی 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 مدلسازی دیوار به صورت صفحه دی الکتریک و با استفاده از تئوری ماتریس موج، مدلی از کره رسانا در پشت دیوار ارائه شده است. برای تصویرسازی کره رسانا در پشت دیوار بتنی با استفاده از سیگنالهای بـهدست آمـده از مـدل پیشـنهادی، از الگـوریتم 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 مـدل

### واژگان کلیدی

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

### ۱. مقدمه

تصویرسازی راداری اهداف از پشت دیوار از زمینههای تحقیقاتی رو به رشد میباشد [۱]. در چنین سیستمهایی، از امواج الکترومغناطیس برای آشکارسازی، دستهبندی و دنبال کردن اهداف متحرک یا ثابت در پشت دیوار استفاده میشود. رادار مشاهده گر از پشت دیوار<sup>۱</sup> در ماموریتهای جستجو و امداد رسانی، آشکارسازی اهداف پشت دیوار و جنگهای شهری کاربرد متفاوت برای آشکارسازی اهداف از پشت مانع ارائه شده است. به متفاوت برای آشکارسازی اهداف از پشت مانع ارائه شده است. به منوان 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 معمولا 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

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 نحوى انتخاب شود كه مصالحه مهندسي بين 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 می شود. همچنین شیب نمودار برای دیوارهای با ساختار فشردهتر مانند دیوار بتنی بیشتر است. این تلفات را میتوان ناشی از دو عامل دانست. اولین عامل تلفات، بازتاب امواج از مرز دیالکتریک و هوا و عامل دوم، تلفات انتشار امواج در دىالكتريك مىباشد. ميزان بازتاب انرژی از مرز دیالکتریک 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 می کند که این تلفات به رسانایی ماده سازنده دیوار وابسته است.

biguesh@shirazu.ac.ir  $^{*}$ رايانامه نويسنده مسئول:  $^{1}$  Through-Wall Radar

0 10 20 (qB) nuation 30 Atter Drywa 40 Brick Block 50 - - Adobe --- Concret 60 0 2 Frequency (GHz) شکل ۱. تضعیف انواع دیوار با ضخامت ۳۰ سانتی متر در برابر فرکانس سيگنال[۴].

در جدول ۱ ضرایب مدل پیشنهادی در [۵] برای محاسبه ثابت دیالکتریک 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 دیالکتریک برای مواد مختلف در مراجع مختلف دارای تفاوتهایی میباشد. نمونههای دیگری از گزارشهای ارائه شده برای مقادیر ثابت دیالکتریک و رسانایی مواد مختلف شامل [۸-۶] میباشد. برای نمونه ثابت دیالکتریک 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 الکتریک و رسانایی اجسام در بازههای فرکانسی مختلف [۵].

	رسانايى		ثابت دی	
بازہ فرکانسی	$\sigma = c \times f^d (S / m)$		الكتريك	جنس دی
GHz	d	0	نسبى	الكتريك
	a	С	ε <sub>r</sub>	
1 • • - 1	۰/۸۰۹۵	•/•٣٢۶	۵/۳۱	بتن
1 • - 1	•	•/•٣٨	٣/٧۵	آجر
1••-1	•/٧•٧۶	۰/۰۱۱۶	۲/۹۴	گچ
۱··-/··۱	١/•٧١٨	•/••۴٧	١/٩٩	چوب
۱۰۰-۰/۱	1/1980	•/••۴٣	۶/۲۷	شيشه

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

مجله علمی – پژوهشی " *رادار* " ، سال چهارم، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۵

الکتریک و رسانایی، بخش بیشتر امواج تابشی توسط فرستنده به سمت دیوار، از مرز هوا و دی الکتریک بازتاب شده و منجر به کاهش شدید توان موجود برای بررسی محدودهی پشت دیوار میشود. بنابراین در گیرنده سیگنالهای بازتابی ناشبی از دیوار بسیار قوی تر از بازتابهای اهداف اصلی پشت دیوار که معمولا سطح مقطع راداری کمی دارند ظاهر می شود. 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 ( ۱۲–۹]، فیلتـر کـردن فضـایی ٔ [١٣]، تفاضل گیری همدوس پس زمینه<sup>۳</sup> [۱۶–۱۴] و فیلتر کردن سخت افزاری<sup>†</sup> [۱۸ و ۱۷] اشاره کرد. در ادامهی این مقاله روش تفاضل گیری 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 مشاهده گر از پشت دیوار مدل استوانه ی رسانا در پشت دیوار در [۱۹] مطرح شده است اما تاکنون مدل میدان الکتریکی بازتابی از کره رسانا در پشت دیوار با کاربرد شبیهسازی سیگنال دریافتی از اهداف پشت دیوار و تصویرسازی آن ها در مقالات ارائه نشده است. در این مقاله پس از ارائهی مدل میدان الکتریکی بازتابی از کره رسانا در پشت دیوار، پروفایلهای برد کره رسانا در پشت ديوار بتنبى را به دست مىآوريم و با استفاده از الگوريتم تصویرسازی RMA<sup>6</sup> به تصویرسازی کره رسانا زمانی که در پشت ديوار قرار گرفته است، مي پردازيم.

روند ادامه یاین مقاله به این صورت است که در بخش دوم و سوم مدل میدان الکتریکی بازتابی از کره رسانا به ترتیب در فضای آزاد و پشت دیوار مورد بررسی قرار می گیرد. در بخش چهارم به شبیهسازی مدل ارائه شده می پردازیم و با استفاده از مدل پیشنهادی تصویر کره رسانا در پشت دیوار را به دست می آوریم و در نهایت در بخش پنجم به جمع بندی نتایج ارائه شده در این مقاله می پردازیم.

### ۲. میدان الکتریکی بازتابی از کره رسانا در فضای آزاد

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

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Subspace Projection

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Spatial Filtering

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Coherent Background Subtraction

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Hardware Filtering

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Range Migration Algorithm

ارتباط دارد. 
$$H_n^{(2)}(.)$$

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

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

$$a_n = j^{-n} \frac{2n+1}{n(n+1)}$$
(17)

$$b_n = -a_n \frac{\hat{J}'_n(\beta a)}{\hat{H}^{(2)'}_n(\beta a)} \tag{17}$$

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

مولفههای میدان الکتریکی بازتابی از کره یعنی روابط (۵) تـا (۷) برای میدان دور یعنی زمانی کـه 1 << *βr* بـه صـورت زیـر تخمین زده میشوند.

$$E_r^s \cong 0 \tag{10}$$

$$E_{\theta}^s \cong$$

$$jE_0 \frac{e^{-j\beta r}}{\beta r} \cos\varphi \times \sum_{n=1}^{\infty} j^n \left( b \sin \theta P'^1(\cos \theta) - c \frac{P^1(\cos \theta)}{n \sin \theta} \right)$$
(19)

 $E_{\varphi}^{s} \cong$ 

$${}_{jE_0} \frac{e^{-j\beta r}}{\beta r} \sin \varphi \times \sum_{n=1}^{\infty} {}_{jn} \left[ b \frac{P^{-1}(\cos\theta)}{\sin\theta} - c \sin\theta \frac{P^{\prime 1}(\cos\theta)}{n} \right]$$
(1Y)

برای بررسی این نتایج در حالت تک پایه  $^{\delta}$ میدان الکتریکی مورد نیاز ما، مولفهی  $E_{X}^{\delta}$  میباشد که به صورت زیر به دست میآید.

$$E_{x}^{s} = E_{\theta}^{s} \cos\theta \cos\phi \bigg|_{\theta=\pi, \phi=\pi}$$
(1A)

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

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

$$\sin\theta P_n^{\prime 1}(\cos\theta)\Big|_{\theta=\pi} = (-1)^n \,\frac{n(n+1)}{2} \tag{(7.1)}$$

<sup>5</sup> Monostatic

$$E^{i} = \hat{a}_{r}E^{i}_{r} + \hat{a}_{\theta}E^{i}_{\theta} + \hat{a}_{\phi}E^{i}_{\phi}$$
(۱)  
که مولفه های  $E^{i}_{\theta}$  و  $E^{i}_{\theta}$  و  $E^{i}_{\theta}$  به صورت زیر میباشد  
[۲۰]

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

$$E_{\theta}^{i} = E_{0} \frac{\cos\theta\cos\phi}{\beta r} \times \sum_{n=0}^{\infty} j^{-n} (2n+1)\hat{j}_{n}(\beta r)P_{n}^{0}(\cos\theta) \quad (\tilde{r})$$

$$E_{\phi}^{i} = -E_{0} \frac{\sin\phi}{\beta r} \times \sum_{n=0}^{\infty} j^{-n} (2n+1)\hat{j}_{n}(\beta r)P_{n}^{0}(\cos\theta) \quad (\mathfrak{f})$$

که 
$$E_0$$
 دامنه میدان الکتریکی تابشی، (.)  $P_n^m$  بیانگر تابع  
لژندر وابسته ٔ نـوع  $m$  و از مرتبـه  $n$  و  $(.)$   $\hat{j}_n^m$  بیانگر تـابع بسـل  
ریکاتی ٔ نوع  $m$  و مرتبه  $n$  و  $eta$  عدد موج میباشد. میدان الکتریکی  
بازتابی از کره رسانا به صورت زیر است [۲۱]

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

$$E_{\theta}^s = \frac{E_0}{\beta r} \cos\varphi \times \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{2\gamma}{\beta r} \exp\left( \frac{1}{\beta r}$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \left[ jb \ \hat{H}^{(2)'}(\beta r) \sin \theta P^{(1)'}(\cos \theta) - c \ \hat{H}^{(2)}(\beta r) \frac{n}{\sin \theta} \right]^{(\mathcal{F})}$$

$$E_{\varphi}^{s} = \frac{E_{\Omega}}{\beta r} \sin \varphi \times \sum_{n=1}^{\infty} \left[ jb \cdot \hat{H}^{(2)'}(\beta r) \cdot \frac{n}{\sin \theta} - c \cdot \hat{H}^{(2)}(\beta r) \sin \theta P^{(1)'}(\cos \theta) \right]$$
(Y)

$$\hat{H}_{n}^{(2)'}(\beta r) = \frac{\partial}{\partial(\beta r)} \hat{H}_{n}^{(2)}(\beta r)$$
<sup>(A)</sup>

$$\hat{H}_{n}^{(2)''}(\beta r) = \frac{\partial^{2}}{\partial(\beta r)^{2}} \hat{H}_{n}^{(2)}(\beta r)$$
<sup>(9)</sup>

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

در روابط فوق 
$$(.) \stackrel{(2)}{n}$$
 بیانگر تابع هانکل ریکاتی  $^{7}$ نـوع دوم  $^{1}$ و از مرتبه n میباشد، که به صورت زیـر بـا تـابع هانکـل کـروی

<sup>1</sup>Associated Legendre Function

<sup>2</sup> Riccati Bessel Function

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Riccati Hankel Function

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Spherical Hankel Function

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

$$E_{\theta}^{s} \Big|_{\theta=\pi, \ \varphi=\pi}$$

$$= E_{0} \frac{e^{-j\beta r}}{2\beta r} \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n} (2n+1)}{\hat{H}_{n}^{(2)'}(\beta a) + \hat{H}_{n}^{(2)}(\beta a)}$$
(71)

۳. میدان الکتریکی بازتابی از کره رسانا در پشت مانع
 دی الکتریک

هندسه مساله مدل سازی میدان الکتریکی بازت ابی 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 (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  $(n_1 n)$  میباشد و هـدف در فاصله (n)(r) از پشت مانع قرار گرفته است. در شبیه سازی پروفایل های 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 از [70]



امپدانس نرمالیزه دی الکتریک در حضور موج صفحهای در زاویـه (۲۲)  $\phi_i(n)$ نسبت به خط عمود بر صفحه دی الکتریک در رابطـه (۲۲) بیان شده است.  $\varepsilon_r$  ثابت دی الکتریک و  $\sigma$  رسانایی می باشد. برای دیـوار بتنـی  $\varepsilon_r = 3/71$  و  $\sigma$  در فرکـانس ۲GHz تـا ۴GHz از دیـوار بتنـی ۱۵/۱۵۲۰ متغیر است [۵].

$$Z(n) = \frac{\cos(\phi_i(n))}{\sqrt{\left(\varepsilon_r + \frac{\sigma}{j\omega\varepsilon_0}\right) - \sin^2(\phi_i(n))}}$$
(Y7)

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

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

مسافت الکتریکی پیموده شده توسط موج در مانع دیالکتریک با ضخامت *d* برای زاویه تابش مورب (*n*) *پهصور*ت زیر است.

$$\theta(n) = k_0 d \sqrt{\left(\varepsilon_r + \frac{\sigma}{j\omega\varepsilon_0}\right) - \sin^2(\phi_i(n))}$$
(74)

که 
$$eta$$
 عدد موج در فضای ازاد به صورت  $eta$ 

$$\beta = \omega \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} \tag{7Δ}$$

میباشد. ضریب دامنه موج،  $c_l(n)$  در مرز دیالکتریک بهصورت

$$c_1(n) = E_0 e^{-j\beta r_1(n)} \tag{(79)}$$

است، کـه (r<sub>l</sub>(n فاصـله سنسـور رادار از سـطح دىالکتريـک مىباشد و به صورت زير محاسبه مىشود.

$$r_1(n) = \frac{d_1}{\cos(\phi_i(n))} \tag{YY}$$

پروفایلهای برد شبیه سازی شده، با حل معادلات ماتریسی موج برای دامنه (*n*) و ۲۹) موج برای دامنه (*b*<sub>1</sub>(*n*) با استفاده از رابطه های (۲۸ و ۲۹) به دست می آید [۲۰]:

$$c_{3}(n) = \frac{c_{1}(n) \times \left(1 + \frac{Z(n) - 1}{Z(n) + 1}\right) \left(1 + \frac{1 - Z(n)}{Z(n) + 1}\right)}{e^{j\theta(n)} + \frac{(Z(n) - 1)(1 - Z(n))}{(Z(n) + 1)^{2}} e^{-j\theta(n)} + \Gamma \times \left(\frac{1 - Z(n)}{Z(n) + 1} e^{j\theta(n)} + \frac{Z(n) - 1}{Z(n) + 1} e^{-j\theta(n)}\right)}$$
(YA)

<sup>1</sup> Wave Matrix Theory

$$b_{1}(n) = \frac{c_{3}(n)}{\left(1 + \frac{Z(n) - 1}{Z(n) + 1}\right)\left(1 + \frac{1 - Z(n)}{Z(n) + 1}\right)} \times \left[\frac{Z(n) - 1}{Z(n) + 1}e^{j\theta(n)} + \frac{1 - Z(n)}{Z(n) + 1}e^{-j\theta(n)} + \Gamma \times \left(\frac{Z(n) - 1}{Z(n) + 1}\cdot\frac{1 - Z(n)}{Z(n) + 1}e^{j\theta(n)} + \frac{Z(n) - 1}{Z(n) + 1}e^{-j\theta(n)}\right)\right]$$
(79)

که در رابطه فوق ۲ 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 دیالکتریک یعنی (*r*<sub>3</sub>(*n*) جایگذاری شود که *r*<sub>3</sub>(*n*) به صورت زیر محاسبه میشود.

$$r_{3}(n) = \frac{d_{3} - d_{1} - d}{\cos(\phi_{i}(n))}$$
(\mathcal{V}\cdot)

با داشتن (*h*<sub>l</sub>(*n*) از رابطـه (۲۸)، میـدان دریـافتی، کـه مـوج صفحه ای بازتابی از سطح دیالکتریک میباشد، بـه صـورت زیـر است.

$$E_s(n) = b_1(n)e^{-j\beta r_1(n)} \tag{71}$$

#### ۴. شبیهسازی

در این بخش با استفاده از نرم افزار Matlab به شبیهسازی 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، پروفایلهای برد مربوط به حرکت آنتن رادار روی یک خط به موازات دیوار را شبیهسازی می کنیم و با استفاده از الگوریتم تصویرسازی RMA تصویر کره رسانا در پشت دیوار بتنی را به دست خواهیم آورد. در تمام شبیهسازی های انجام شده سیگنال ارسالی توسط فرستنده رادار یک پالس گوسی می باشد که جزئیات آن در ادامه بیان خواهد شد.

## ۴-۲. شبیهسازی پروفایل برد کره رسانا در فضای آزاد بر اساس مدل پیشنهادی

سیگنال ارسالی توسط فرستنده رادار، یک پالس گوسی است که میتوان آنرا با رابطه زیر نمایش داد.

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

که f بیانگر فرکانس مرکزی، b شیفت زمانی شروع پالس و c پارامتری برای تعیین پهنای باند پالس میباشد. شـکل ۳ بیـانگر

پـالس گوسـی ارسـالی مـیباشـد. فرکـانس مرکـزی ایـن پـالس b=2.5ns ،f=3GHz و c=1ns انتخاب شده است. اندازه طیف ایـن پالس در شکل ۴ نمایش داده شده است.



**شکل ۳**. پالس گوسی ارسالی با فرکانس f=3GHz و مقادیر b=2.5ns و در c=1ns



رابطه (۲۱) بیانگر میدان الکتریکی بازتابی از کره رسانا بر حسب فرکانس میباشد. با توجه به طیف پالس گوسی ارسالی که نشان دهنده صفر بودن اندازه طیف ارسالی در بازه فرکانسی خارج از ۲GHz تا ۴GHz میباشد، ابتدا با فرض ارسال سیگنال پهن باند به نحوی که طیف آن در فرکانسهای ۲GHz تا ۴GHz مقدار ثابت و حقیقی ۱ را داشته باشد، با استفاده از رابطه (۲۱) مجله علمی - پژوهشی " *راوار* " ، سال چهارم، شماره ۲ ، تابستان ۱۳۹۵



**شکل ۶**. سیگنال بازتابی از یک کره رسانا با شعاع a=30cm در فاصله از رادار.

## ۴-۱. شبیهسازی پروفایل بـرد کـره رسـانا در پشـت دیوار بر اساس مدل پیشنهادی

سناریوی شبیه سازی سیگنال بازتابی از کرهی رسانا در پشت دیوار بتنی در شکل ۷ نشان داده شده است. کره رسانا به شعاع a=0.5m در فاصله 10m لز آنستن در پشت دیوار بتنی با ضخامت d=0.2m قرار گرفته است. فاصله دیوار از آنستن نیز d<sub>1</sub>=5m 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.



در پشت ديوار.

پاسخ فرکانسی فضا در بازه فرکانسی ۲GHz تا ۴GHz را به دست می آوریم. 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 می آید. سپس با محاسبه عکس تبدیل فوریه این طیف، سیگنال بازتابی از کره رسانا در حوزه زمان بهدست می آید که البته با بازتابی از کره رسانا در موزه زمان بهدست می آید که البته با توجه به تقارن هرمیتی این طیف، سیگنال بازتابی، سیگنالی حقیقی می باشد. در شکل ۶ سیگنال بازتابی از کره رسانا به شعاع مقیقی می باشد. در فات استفاده از ایسن روش شبیه سازی شده است.



**شکل ۵.** طیف سیگنال بازتابی از کره رسانا به شعاع a=30cm در فضای آزاد در فاصله r=10m از رادار در اثر تابش پالس گوسی، شبیهسازی شده با رابطه (۲۱)، (الف) اندازه ، (ب) فاز.



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

#### ۴–۳. 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 نقطـه با فاصله ۱۰ سانتی متری از هم روی خطی به طول L=3m به موازات دیوار، تعداد ۳۱ پروفایل برد از سناریوی نشان داده شده در شکل ۹ بهدست می آید. آنتن به سمت مانع دی الکتریک و در فاصله L=2m از آن قرار دارد و کره رسانا در پشت دیوار و در فاصله a=0.3m از آنـتن واقـع شـده است. شـعاع کـره a=0.3m و ضخامت دیوار m1.0 می باشد.



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

طیف مختلط بهدستآمده از مدل ارائهشده در سناریوی فوق را که تابعی از فرکانس و مکان سنسور میباشد به صورت ماتریس طیف میدان بازتابی  $\mathcal{X}$  نمایش میدهیم. سطر i ام از این ماتریس بیانگر طیف سیگنال بازتابی از سناریوی مورد مطالعه در i امین موقعیت قرارگیری آنتن میباشد. برای تصویرسازی کره در پشت دیوار، از عملیات تفاضل گیری همدوس پسزمینه <sup>(</sup> استفاده شده محموعه داده <sup>۲</sup> بدون حضور کره رسانا بهدست میآید و آن را مربوط به کره که در رابطه (۲۱) بیان شد، بهدست میآید که آن را  $\mathcal{X}$  مینامیم. عملیات تفاضل گیری همدوس پسرزمینه استفاده شده مربوع به کره که در رابطه (۲۱) بیان شد، بهدست میآید که

$$S_T(f) = S(f) - S_B(f) \tag{77}$$

برای پـردازش نتـایج بـهدسـتآمـده از مـدل ارائـه شـده، از الگوریتم RMA از [۲۲]، استفاده شده است. تصویر حاصـل را در شکل ۱۰ مشاهده میکنیم.



شکل ۱۰. تصویر حاصل از کره رسانا با شعاع a=30cm در فاصله ۸ متری در پشت دیوار بتنی با ضخامت d=10cm در فاصله ۲ متری از رادار. الف) قبل از عملیات تفاضل گیری همدوس پس زمینه، در این تصویر شکل دیوار به روشنی دیده میشود 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 قسمتهای (الف) و (ب)، با ترکیب تصاویر (الف) و (ب) در این تصویر هم کره و هم دیوار به روشنی دیده میشوند.

<sup>1</sup> Coherent Background Subtraction

<sup>2</sup> 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. نتیجهگیری

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 IGHz حول فرکانس ۳GHz سیگنال بازتابی از کره رسانا در فضای آزاد و در پشت دیوار بهدست 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 بهدست آمد و تصویرسازی با استفاده از الگوریتم RMA و تفاضل گیری 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 می توان به مطالعه و بهبود الگوریتمهای تصویرسازی از پشت دیوار مانند الگوریتمهای بهبود الگوریتمهای تصویرسازی از پشت دیوار مانند الگوریتمهای حذف کلاتر دیوار و الگوریتمهای کاهش مات شدگی تصاویر

#### 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. Cuiňas 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

*Journal of "Radar"* Vol. 4, No. 2, 2016 (Serial No. 12)

# **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