



Analysis and simulation of the effect of phase noise in the output image of the airborne ground penetrating radar system

S.Zolfaghari Moghadam¹, M.Kazeruni²

²Associate Professor, Malek Ashtar University of Technology

(Received:2023 /05/13, Revised: 2023/07/11, Accepted: 2023/08/03, Published: 2023/08/24)

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1402.11.1.11.7>

Abstract

Advancements in unmanned aerial vehicle technology have increased its use across a wide range of fields. One of the advantages of drones is their ability to perform inspections and remote measurements by placing various types of sensors on them. One of the key indicators ensuring target detection in radars and spectral integrity in communication systems is phase noise. Phase noise refers to the instability of frequency and phase of a signal source, oscillator, or clock, which is an undesirable and unavoidable factor that negatively impacts the performance of radar systems. The aim of this paper is to investigate the effect of phase noise in airborne ground-penetrating radar systems. To this end, a continuous wave radar system with frequency modulation is considered for probing a three-layered region of the ground. The three-layer ground model is simulated in the gprMax software, and ultimately, a two-dimensional image is extracted. The operating frequency range of the radar system is considered from 100 MHz to 3 GHz. In order to examine the effect of phase noise on this two-dimensional image, phase noise is added to the local oscillator signal at the receiver. The results indicate that in the presence of phase noise, the targets and the connection points of the layers in the output image become ambiguous and blurred, making them difficult to distinguish accurately.

Keywords: Ground penetrating radar, Airborne radar, Phase noise.

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Publisher: Imam Hussein University

Authors



*Corresponding Author Email: kazerooni@mut.ac.ir

تحلیل و شبیه‌سازی اثر نویز فاز در تصویر خروجی از سامانه رادار زمین نفوذ هوا پایه

سودابه ذوالفقاری مقدم^{۱*}، مرتضی کازرونی^۲

۱- کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران ۲- دانشیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۳، بازنگری: ۱۴۰۲/۰۴/۲۰، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۱۲، انتشار: ۱۴۰۲/۰۶/۰۲

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1402.11.1.11.7>

* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution (CC BY) توزیع شده است.

نویسندگان



ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

چکیده

پیشرفت در فناوری وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین، استفاده از آن را در طیف گسترده‌ای از زمینه‌ها افزایش داده است. یکی از مزایای پهپادها توانایی آن‌ها در انجام بازرسی و سنجش از راه دور با قراردادن انواع مختلف حسگرها روی آن‌هاست. یکی از شاخص‌های کلیدی تضمین‌کننده آشکارسازی اهداف در رادارها و یکپارچگی طیفی در سامانه‌های ارتباطی، نویز فاز است. نویز فاز، ناپایداری فرکانس و فاز یک منبع سیگنال، نوسانگر یا ساعت است که یک عامل نامطلوب و اجتناب‌ناپذیر بوده و بر عملکرد سامانه‌های راداری اثرات نامطلوبی دارد. هدف از این مقاله، بررسی اثر نویز فاز در سامانه راداری زمین نفوذ هوا پایه است. به این منظور یک سامانه راداری موج پیوسته با مدولاسیون فرکانس برای کاوش منطقه‌ای از زمین سه‌لایه در نظر گرفته شده است. مدل سه‌لایه زمین در نرم‌افزار gprMax شبیه‌سازی شده و در نهایت تصویر دوبعدی استخراج گردید. بازه فرکانس کاری سامانه راداری از 100MHz تا 3GHz در نظر گرفته شد. باهدف بررسی اثر نویز فاز در این تصویر دوبعدی، به سیگنال نوسانگر محلی در گیرنده نویز فاز اضافه شده است. با بررسی نتایج مشخص است که در حضور نویز فاز، اهداف و محل اتصال لایه‌ها در تصویر خروجی مبهم و تار شده و به‌درستی قابل تشخیص نیستند.

کلیدواژه‌ها: رادار زمین نفوذ، رادار هوا پایه، نویز فاز.

۱- مقدمه

رنج می‌برند. نویز فاز نشستی، کف نویز کلی را افزایش داده و حساسیت رادار را محدود می‌کند. در [۲] برای غلبه بر نویز فاز نشستی در رادارهای موج پیوسته مدوله‌شده فرکانس، روش تمرکز نقطه ایستا پیشنهاد شده است. در [۳] روش‌های مدل‌سازی نویز فاز، با تمرکز بر رادارهای موج پیوسته مدوله‌شده فرکانس هموداین، ارائه شده است. نویز فاز در فرستنده‌های راداری باعث افزایش کف نویز در اطراف اهداف بزرگ‌شده و آشکارسازی و ردیابی اهداف کوچک در نزدیکی رادار را غیرممکن می‌کند. در این مقاله، مدل‌های نویز فاز بخش‌های مختلف یک رادار معمولی ارائه شده است. همچنین در مورد حذف نویز فاز در سامانه‌های راداری همدوس برای بردهای کوتاه بحث شده و وضعیت برای بردهای بیشتر مورد بررسی قرار گرفته است.

در [۴] در رابطه با نویز فاز نوسانگر محلی و اثرات آن در عملکرد گیرنده مطالبی ارائه شده است. نوسانگر با نویز فاز کم برای بسیاری از سامانه‌های گیرنده ضروری است. نویز فاز نوسانگر محلی، نسبت سیگنال به نویز نهایی را محدود می‌کند. همچنین در [۵] در مورد نویز فاز در نوسانگرهای ریزموج بحث شده است.

در سامانه‌های راداری موج پیوسته همدوس، مانند سامانه راداری موج پیوسته مدوله‌شده فرکانس، دقت اندازه‌گیری توسط نویز فاز و خطاهای فاز سامانه‌ای در هنگام تولید سیگنال راداری، تخریب می‌شود. این اعوجاج‌های فاز به طور معمول بر اساس بسپاری از ساده‌سازی‌ها مدل‌سازی می‌شوند که در بیشتر موارد منجر به پیش‌بینی‌های بیش از حد خوش‌بینانه از عملکرد رادار می‌شود. در [۱] نحوه اندازه‌گیری خطاهای فاز سامانه‌ای و همچنین پیش‌بینی دقیق تأثیر اعوجاج فاز بر اندازه‌گیری‌های راداری مورد بررسی قرار گرفته است.

معماری هتروداین برای رادارهای موج پیوسته مدوله‌شده فرکانس ترجیح داده می‌شود تا خطای انحراف dc را کاهش دهند. بااین حال، این نوع رادارها از نشت دائمی از فرستنده به گیرنده

شرایط مختلف، امکان‌سنجی انجام‌شده است.

به‌طور کلی، عوامل زیادی در پهن‌شدگی طیفی پاسخ هدف در سامانه‌های راداری دخیل هستند که می‌تواند شامل عوامل داخلی مانند نویز فاز سامانه و یا عوامل خارجی مانند اهداف توزیع‌شده باشد؛ بنابراین به‌منظور افزایش قدرت رادار در آشکارسازی اهداف کوچک، در حضور اهداف بزرگ و کلاتر، نویز فاز سیگنال راداری باید تا حد امکان کاهش یابد.

هدف از این مقاله، بررسی اثر نویز فاز در سامانه راداری زمین نفوذ هوا پایه است. تاکنون مقالات و پژوهش‌های مختلفی به موضوع نویز فاز پرداخته‌اند. در میان آن‌ها مواردی وجود دارد که به اثر نویز فاز در رادارها اشاره کرده‌اند، اما این موضوع در رابطه با رادار زمین نفوذ و به‌خصوص نوع هوا پایه آن، به‌سختی یافت می‌شود. بررسی نویز فاز به‌عنوان یکی از شاخص‌های مهم و تأثیرگذار در عملکرد سامانه راداری و همچنین در کیفیت تصویربرداری آن، باید در طراحی لحاظ شود، این مقاله از دیدگاه متفاوتی به این موضوع پرداخته است. به این منظور در این مقاله، یک سامانه راداری موج پیوسته با مدولاسیون فرکانس برای کاوش منطقه‌ای از زمین سه‌لایه در نظر گرفته‌شده است. مدل سه‌لایه زمین در نرم‌افزار gprMax شبیه‌سازی شده و پاسخ ضربه این مدل، پس از اجرای شبیه‌سازی استخراج و ذخیره‌شده است. این فایل خروجی به‌منظور اعمال پردازش‌های سامانه راداری موج پیوسته مدوله‌شده فرکانس در نرم‌افزار متلب تحلیل‌شده و در نهایت تصویر دوبعدی استخراج گردید. بازه فرکانس کاری سامانه راداری از ۱۰۰ MHz تا ۳ GHz در نظر گرفته شد. باهدف بررسی اثر نویز فاز در این تصویر دوبعدی، به سیگنال نوسانگر محلی در گیرنده نویز فاز اضافه‌شده است. با بررسی نتایج مشخص است که در حضور نویز فاز، اهداف و محل اتصال لایه‌ها در تصویر خروجی مبهم و تار شده و به‌درستی قابل تشخیص نیستند. به‌عبارت‌دیگر نویز فاز اضافه‌شده، سبب می‌شود سیگنال برگشتی از زمین که حاوی اطلاعات هدف است، دامنه‌ای کمتر از دامنه نویز در گیرنده راداری داشته باشد و به دلیل محدودیت در حساسیت گیرنده آشکار نشود. این مقاله به‌صورت ویژه بر گسترش طیفی باند جانبی پاسخ هدف رادار، به دلیل نویز فاز، متمرکز شده است. برای شبیه‌سازی سامانه راداری موج پیوسته مدوله‌شده فرکانس، باید به‌ازای هر فرکانس یک‌بار شبیه‌سازی را اجرا کرد. از آنجاکه اجرای شبیه‌سازی در این نرم‌افزار زمان‌بر است و امکان اجرای آن برای هر فرکانس مجزا وجود ندارد، پاسخ ضربه مدل، در قالب یک فایل ذخیره‌شده و پس از آن در نرم‌افزار متلب و با استفاده از روش پردازشی مربوط به سامانه راداری فرکانس پله‌ای، تحلیل می‌شود. در نهایت تصویر دوبعدی از سامانه راداری استخراج‌شده است. این پردازش برای حالتی که به

نویز فاز در سامانه‌های ارتباطی دیجیتال، نرخ خطای بیت سامانه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در سامانه‌های ارتباطی آنالوگ، نویز فاز نزدیک می‌تواند پهنای باند کانال را محدود کند و در نتیجه نسبت سیگنال به نویز و حساسیت سامانه را کاهش دهد. در کاربردهای راداری، نویز فاز نوسانگر می‌تواند حداقل سطح سیگنالی را که باید برای آشکارسازی توسط هدف بازگردانده شود، تنظیم کند.

در مقاله دیگری، پارامترها و مؤلفه‌های تأثیرگذار در آشکارسازی یک هدف مدفون توسط سکوی راداری هوا پایه مورد بررسی قرار گرفته است. استفاده از رادار زمین نفوذ هوا پایه‌یکی از پرکاربردترین و کارآمدترین روش‌های آشکارسازی اهداف مدفون در زمین در حوزه‌های نظامی و غیرنظامی است. از چالش‌های مهم در این فرآیند، ناشناخته و پیچیده بودن وضعیت سکوی راداری و محیط قرارگیری هدف در زیرزمین است. برای داشتن درک مناسب از رفتار فیزیکی امواج در سطح و زیر سطح زمین و دریافت پاسخ کمی متناظر با هر یک از محیط‌ها، از مدل‌سازی انتشاری سیستم در آن محیط‌ها استفاده‌شده است [۶].

در مقاله [۷] در مورد نویز فاز در سامانه‌های راداری FMCW بحث شده است. نویز فاز یکی از پارامترهای عملکردی اساسی در سامانه‌های رادار و ارتباطات مدرن است. در این مقاله یک تئوری نویز فاز برای سامانه‌های راداری FMCW توسعه داده شده است. یک طراحی جدید برای تعیین حداکثر مقدار سطح نویز فاز مجاز در سامانه‌های راداری به‌دست‌آمده است. اثرات زیرسیستم‌ها در زنجیره فرستنده گیرنده ارائه‌شده و مدل جدیدی از نویز فاز در میدل‌های آنالوگ به دیجیتال مورد بحث قرار می‌گیرد. روش‌های مدل‌سازی نویز فاز ارائه‌شده‌اند و به دنبال آن یک سینتی‌سایزر حلقه قفل فاز با یک سینتی‌سایزر فرکانس کم نویز مقایسه می‌شود تا کاهش باندهای جانبی نویز فاز را برای تشخیص و عملکرد ردیابی بهتر نشان دهد.

در [۸] اثر نویز فاز بر اساس یک رویکرد مدولاسیون فرکانسی ارزیابی می‌شود. در کاربرد موج پیوسته فرکانس پله‌ای برای یک رادار زمین نفوذ، تفکیک‌پذیری موردنیاز برای برد، بسیار بالا و در محدوده چند سانتی‌متر است. از آنجاکه بازتاب‌های ضعیف مین‌های مدفون در زمین باید باوجود پس‌زمینه قوی ناشی از بازتاب سطح زمین شناسایی شود، باید توجه ویژه‌ای به نویز فاز فرکانس‌های تولیدشده معطوف شود.

در مقاله [۹] امکان آشکارسازی عوارض زیرسطحی از طریق رادار زمین نفوذ بر اساس شبیه‌سازی امواج الکترومغناطیسی بررسی و تحلیل شده است. در این مقاله، به‌منظور استفاده از رادار زمین نفوذ برای آشکارسازی و تعیین موقعیت عوارض زیرسطحی در

$$v(t) = f_0 + 1/2\pi \cdot (d\phi(t))/dt \quad (۶)$$

اختلاف بین فرکانس لحظه‌ای $V(t)$ و فرکانس اسمی f_0 تقسیم بر فرکانس اسمی به عنوان فرکانس کسری، یا فرکانس نرمال شده، تعریف می‌شود. از این رو:

$$y(t) = \Delta f/f = (v(t) - f_0)/f_0 \quad (۷)$$

طبق تعریف، تقسیم نوسانات فاز بر فرکانس نتیجه می‌دهد:

$$x(t) = (\phi(t))/(2\pi f_0) \quad (۸)$$

که در آن $x(t)$ نوسانات لحظه‌ای زمان نامیده شده و نویز فاز تبدیل شده به نوسانات زمانی با بعد زمان، ثانیه، است.

این نوسانات $(\phi(t), y(t), x(t))$ فرآیندهای تصادفی با چگالی طیف منحصر به فرد خود هستند که در جدول (۱) فهرست شده‌اند.

روابط بین این چگالی‌ها به صورت زیر است:

$$S_{\phi}(f) = (2\pi f_0)^2 S_x(f) \quad (۹)$$

و:

$$S_x(f) = (S_y(f))/((2\pi f)^2) \quad (۱۰)$$

جدول (۱). چگالی طیف توان نوسانات.

نوسان	نماد PSD ^۱	واحد	توصیف
$\phi(t)$	$S_{\phi}(f)$	rad^2/Hz	چگالی طیف توان نوسان فاز
$y(t)$	$S_y(f)$	$1/Hz$	چگالی طیف توان نوسان فرکانس کسری
$x(t)$	$S_x(f)$	sec^2/Hz	چگالی طیف توان نوسان زمان

۳- شبیه‌سازی اثر نویز فاز در تصویر خروجی رادار زمین نفوذ

در این بخش، یک مدل از زمین سه‌لایه با استفاده از نرم‌افزار gprMax طراحی و شبیه‌سازی شده است. هدف از این شبیه‌سازی، پیاده‌سازی یک سامانه راداری موج پیوسته مدوله شده فرکانس است، اما همان‌طور که اشاره شد، به دلیل این که برای هر فرکانس مجزا در طراحی SFCW، باید شبیه‌سازی را دوباره اجرا کرد، در کنار gprMax از نرم‌افزار متلب نیز استفاده شده است. به این صورت که پاسخ ضربه مدل را با استفاده از نرم‌افزار gprMax استخراج کرده و پردازش‌های رادار موج پیوسته مدوله شده فرکانس در نرم‌افزار متلب، روی داده خام

سیگنال نوسانگر محلی در گیرنده نویز فاز اضافه شده است، تکرار می‌شود و در نهایت اثر آن در تصویر خروجی از سامانه مشاهده خواهد شد.

در این مقاله ابتدا روابط نویز فاز یک نوسانگر ارائه شده و تحلیل ریاضی صورت گرفته است. پس از آن به بررسی مراحل شبیه‌سازی پرداخته شده، مدل طراحی شده در نرم‌افزار gprMax مورد بررسی قرار گرفته و مشخصات مدل نیز ارائه شده است. در بخش بعدی، پردازش داده در نرم‌افزار متلب انجام شده و تصویر خروجی از رادار زمین نفوذ هوا پایه مشاهده گردیده است. در نهایت چگونگی انجام مقیاس‌بندی در هنگام مدل‌سازی زمین سه‌لایه و اهداف تشریح شده است.

۲- نویز فاز

یک سیگنال ایده‌آل را می‌توان به صورت زیر مشخص کرد [۱۰]:

$$V(t) = V_0 \sin(2\pi f_0 t) \quad (۱)$$

که در آن V_0 پیک ولتاژ اسمی و f_0 فرکانس اسمی سیگنال است. سیگنال خروجی یک نوسانگر با نویز را می‌توان در حوزه زمان توسط رابطه زیر مدل کرد:

$$V(t) = [V_0 + \varepsilon(t)] \sin[2\pi f_0 t + \phi(t)] \quad (۲)$$

که در آن $\varepsilon(t)$ نوسانات لحظه‌ای دامنه و $\phi(t)$ نوسانات لحظه‌ای فاز، یعنی نویز فاز، است. فرکانس یک نوسانگر را می‌توان به عنوان یک نقطه در حال چرخش روی یک دایره تجسم کرد. نویز فاز باعث می‌شود این نقطه با سرعت زاویه‌ای غیریکنواخت، یعنی با فرکانس متغیر، بچرخد. فرکانس و فاز رادیان به صورت زیر با فرکانس نوسان مرتبط هستند:

$$\omega(t) = d\phi/dt \quad (۳)$$

که در نتیجه:

$$\phi(t) = \int \omega(t) dt \quad (۴)$$

$\phi(t)$ یک فرآیند تصادفی ثابت است، به این معنی که مشخصات آماری آن به زمان بستگی ندارد. از این رو، چگالی طیف توان مشخصی دارد که $S_{\phi}(f)$ به آن اختصاص می‌یابد.

وجود $\varepsilon(t)$ تأثیری بر پایداری فرکانس سیگنال ندارد اما $\phi(t)$ به صورت مستقیم فرکانس را تخریب می‌کند. پایداری فرکانس را می‌توان با گرفتن مشتق زمانی از آرگومان سینوس در رابطه (۲) به صورت زیر استخراج کرد:

$$v(t) = d/dt [1/2\pi [2\pi f_0 t + \phi(t)]] \quad (۵)$$

که فرکانس لحظه‌ای را به صورت زیر نتیجه می‌دهد:

^۱ Power Spectral Density

نفوذپذیری مغناطیسی نسبی است.

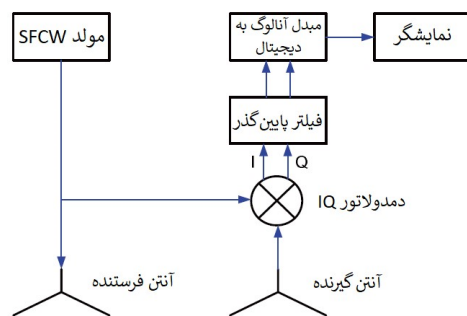
جدول (۲). مشخصات لایه‌های زمین در مدل طراحی شده در نرم‌افزار gprMax

شماره لایه	ϵ_r	σ	μ_r
لایه اول	7	1e-3	1
لایه دوم	5	0.5e-3	1
لایه سوم	10	2e-3	1

آنتن‌های فرستنده و گیرنده راداری در مدل طراحی شده در فاصله نزدیک به هم قرار داده شده‌اند و از آنجا که خروجی B-scan از رادار زمین نفوذ برای تشکیل تصویر دوبعدی مورد نیاز است، آنتن‌ها باید به صورت افقی با فواصل مشخص جابه‌جا شوند. به این ترتیب، شبیه‌سازی به تعداد موقعیت‌های مختلف آنتن تکرار شده و نتایج A-scan حاصل برای تشکیل B-scan با هم ادغام می‌شوند. در نهایت داده خام پاسخ ضربه مدل، به عنوان خروجی از نرم‌افزار gprMax استخراج شده و برای تشکیل تصویر در نرم‌افزار متلب مورد استفاده قرار می‌گیرد

۳-۲ تشکیل تصویر دوبعدی از مدل در نرم‌افزار متلب

در این بخش از شبیه‌سازی، فایل استخراج شده از نرم‌افزار gprMax را در نرم‌افزار متلب فراخوانی کرده و با انجام پردازش‌های مربوط به رادار SFCW، تصویر دوبعدی استخراج شده است. روال انجام پردازش‌ها مطابق با آنچه در شکل (۲) نشان داده شده، قابل انجام است.



شکل (۲). نمودار بلوکی پردازش سیگنال در رادار SFCW.

سیگنال ارسالی و دریافتی در رادار SFCW، یک سیگنال موج پیوسته تک فرکانس است و تغییر فرکانس آن می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$f_n = f_0 + (n - 1)\Delta f \quad (11)$$

که در آن f_n فرکانس کنونی، f_0 فرکانس شروع و Δf اندازه پله فرکانسی است. سیگنال ارسالی را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت:

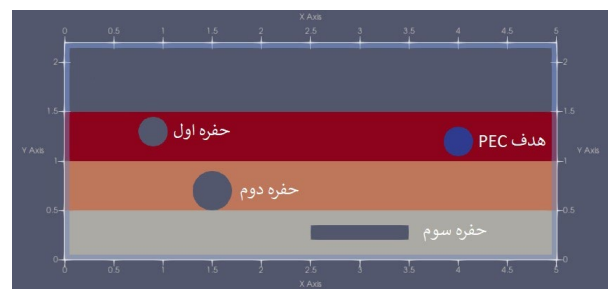
خروجی از gprMax اعمال می‌شود. بازه فرکانس کاری سامانه راداری فرکانس پله‌ای از ۱۰۰ MHz تا ۳ GHz در نظر گرفته شده است.

۳-۱ طراحی مدل در نرم‌افزار gprMax

باتوجه به این که در نهایت رادار زمین نفوذ طراحی شده فرضی برای کاوش سه‌لایه از زمین مورد استفاده قرار خواهد گرفت، یک مدل سه‌لایه از زمین با مشخصات مختلف تعریف شده است. از آنجا که اهداف مورد نظر بیشتر به صورت حفره هستند، سه حفره هوا در مدل قرار گرفته است. همچنین به منظور تحقق رادار زمین نفوذ به صورت هوا پایه، آنتن‌های فرستنده و گیرنده در فاصله‌ای از سطح زمین قرار گرفته‌اند. این فاصله در ابعاد مقیاس‌بندی شده یک‌بار برابر با ۰٫۳ cm و بار دیگر برابر با ۰٫۵ cm در نظر گرفته شد که پس از تبدیل به ابعاد واقعی به ترتیب برابر با ارتفاع ۳ m و ۵ m از سطح زمین خواهد بود.

مدل طراحی شده در نرم‌افزار gprMax در شکل (۱) نشان داده شده است. از آنجا که این نرم‌افزار قابلیت نمایش تصاویر خروجی را ندارد، برای مشاهده تصویر و هندسه مدل طراحی شده، از نرم‌افزار ParaView استفاده شده است.

همان‌طور که در تصویر مشخص است، سه هدف حفره هوا و یک هدف PEC، در لایه‌های مختلف مدل قرار داده شده است. به منظور کاهش زمان شبیه‌سازی، ابعاد مدل مقیاس‌بندی شده و ضخامت هر لایه از زمین برابر با ۰٫۵ cm در نظر گرفته شده است. در ادامه، چگونگی تعمیم نتایج به مقیاس واقعی تشریح شده است.



شکل (۱). مدل زمین سه‌لایه طراحی شده در نرم‌افزار gprMax.

دو شبیه‌سازی انجام شده است؛ ابتدا موقعیت آنتن‌های فرستنده و گیرنده در ارتفاع ۰٫۳ cm از زمین و سپس در ارتفاع ۰٫۵ cm قرار گرفته است که پس از تبدیل به مقیاس واقعی، معادل با ارتفاع سکوی پرند از سطح زمین خواهد بود.

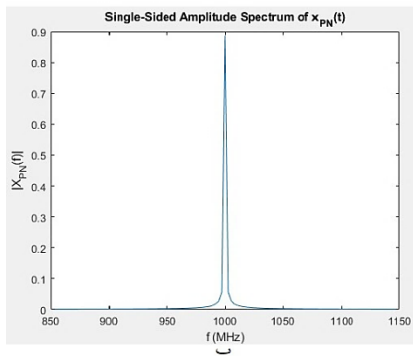
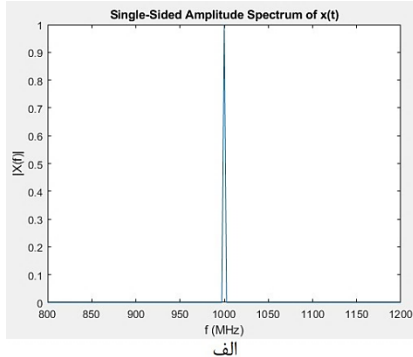
مشخصات سه‌لایه زمین در مدل طراحی شده در جدول (۲) آمده است. ϵ_r گذردهی الکتریکی نسبی، σ هدایت الکتریکی و μ_r

فایل خروجی از نرم‌افزار gprMax معادل با سیگنال دریافتی از آنتن گیرنده در نظر گرفته شده است و سیگنال نوسانگر محلی وارد شده به ترکیب‌کننده، به صورت فرکانس پلکانی و IQ تولید شده است. در خروجی ترکیب‌کننده، سیگنال‌های I و Q استخراج شده و وارد فیلتر پایین گذر می‌شوند. سیگنال‌های I و Q تشکیل یک آرایه مختلط داده و با استفاده از تبدیل فوریه معکوس به حوزه زمان منتقل می‌شوند تا در نهایت تصویر B-scan خروجی رادار زمین نفوذ را تشکیل دهد.

تصاویر خروجی از متلب برای دو ارتفاع مختلف آنتن که در مدل gprMax مطرح شد، در شکل (۴) نشان داده شده است. همان‌گونه که انتظار می‌رفت، زمانی که آنتن در ارتفاع کمتری قرار دارد و به سطح زمین نزدیک‌تر است، تصویر دقیق‌تر بوده و جزئیات بیشتری قابل مشاهده است.

۴- بررسی نتایج در حضور نویز فاز

در این بخش، به منظور بررسی اثر نویز فاز در تصویر خروجی از رادار زمین نفوذ، در نرم‌افزار متلب به سیگنال نوسانگر محلی، نویز فاز اضافه شده است. این موضوع در شکل (۳) برای سیگنال نوسانگر محلی در فرکانس 1GHz نشان داده شده است.



شکل (۳). سیگنال نوسانگر محلی؛ الف، بدون نویز فاز؛ ب، در حضور نویز فاز.

مطابق با تعریف، نویز فاز نویز ناشی از نوسانات فاز سریع، کوتاه‌مدت و تصادفی است که در یک سیگنال رخ می‌دهد. این

$$T_x(n) = \sin(2\pi f_n t) \quad (12)$$

که همان n امین نقطه فرکانسی است. با فرض این که سرعت انتشار سیگنال در یک محیط همگن برابر با v باشد، سیگنال برگشتی منعکس شده توسط یک جسم با فاصله R از هدف، می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$R_x(n) = A_n \sin \left[2\pi f_n \left(t - \frac{2R}{v} \right) \right] \quad (13)$$

که در آن دامنه سیگنال برگشتی و $\frac{2R}{v}$ زمان رفت و برگشت سیگنال است. تغییر فاز n امین فرکانس به صورت زیر است:

$$\Phi_n = 2\pi f_n \frac{2R}{v} \quad (14)$$

بنابراین، سیگنال برگشتی را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$R_x(n) = A_n \sin(2\pi f_n t - \Phi_n) \quad (15)$$

مؤلفه‌های I و Q در شکل ۲، با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شوند:

$$I_n = A_n \sin(2\pi f_n t - \Phi_n) * \sin(2\pi f_n t) \quad (16)$$

$$= \frac{A_n}{2} \cos(4\pi f_n t - \Phi_n) - \frac{A_n}{2} \cos(\Phi_n)$$

$$Q_n = A_n \sin(2\pi f_n t - \Phi_n) * \cos(2\pi f_n t) \quad (17)$$

$$= \frac{A_n}{2} \sin(4\pi f_n t - \Phi_n) - \frac{A_n}{2} \sin(\Phi_n)$$

پس از عبور سیگنال از فیلتر پایین گذر، مؤلفه‌های فرکانسی متناظر با I و Q، به صورت زیر استخراج می‌شوند:

$$I_n = -\frac{A_n}{2} \cos(\Phi_n) \quad (18)$$

$$Q_n = -\frac{A_n}{2} \sin(\Phi_n) \quad (19)$$

این دو مؤلفه فرکانسی، برای اعمال به مبدل آنالوگ به دیجیتال، باید به صورت زیر ترکیب شده و تشکیل یک سیگنال دهند:

$$ADC_{in}(n) = I_n + jQ_n \quad (20)$$

در مورد سیگنال حوزه زمان به دست آمده پس از پردازش IFFT، طول محور افقی توسط نقاط نمونه‌برداری مبدل آنالوگ به دیجیتال و دقت آن با پهنای باند سیگنال SFCW مشخص می‌شود. اگر پهنای باند سیگنال SFCW برابر با B در نظر گرفته شود، محور افقی آن به صورت زیر مشخص خواهد شد:

$$t = 0; \frac{1}{B}; \frac{N_t - 1}{B} \quad (21)$$

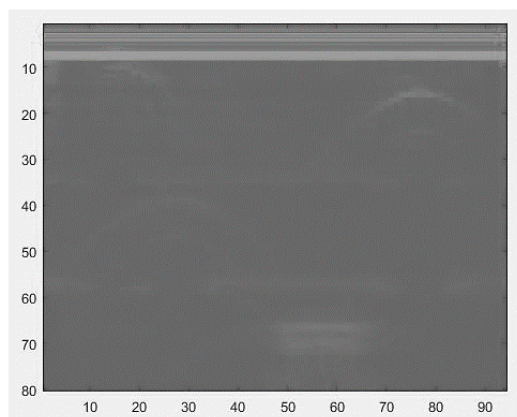
که N_t تعداد نقاط نمونه‌برداری مبدل آنالوگ به دیجیتال است.

زمین.

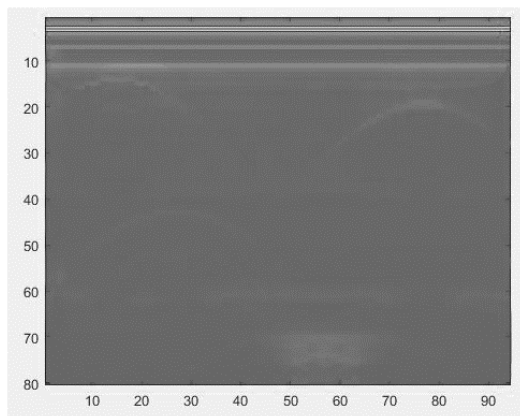
پیش‌ازاین نیز مطرح شد که حضور نویز فاز در سیگنال نوسانگر محلی، سبب پهن‌شدگی طیفی آن شده و باعث می‌شود سیگنال خروجی از ترکیب‌کننده در گیرنده نیز پهن شود.

به همین دلیل برخی از اهداف و ناهمواری‌های موجود در زیرزمین، هنگامی که در نزدیکی اهداف بزرگ‌تری مانند محل اتصال بین لایه‌ها قرار می‌گیرند، ممکن است قابل آشکارسازی

نباشند و اثری از آن‌ها در تصویر خروجی از رادار قابل مشاهده نباشد. زیرا اهداف بزرگ‌تر در گیرنده به دلیل حضور نویز فاز، دچار پهن‌شدگی طیفی شده و سبب می‌شود سیگنال دریافتی از هدف کوچک‌تر دیگری که در نزدیکی آن قرار دارد، کمتر از سطح نویز گیرنده یا به عبارت دیگر کمتر از حداقل سیگنال قابل آشکارسازی در گیرنده شود و دیگر آشکار نشود.



الف

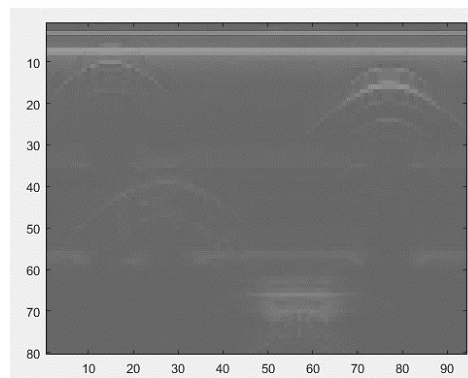


ب

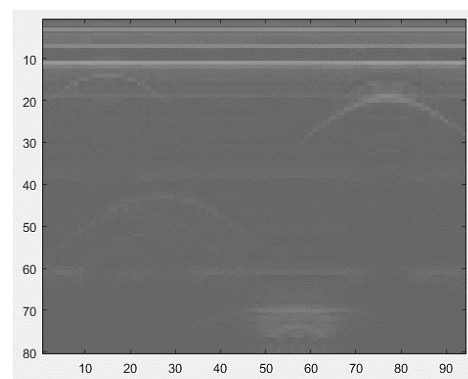
شکل (۵). تصاویر B-scan خروجی از متلب در حضور نویز فاز نوسانگر محلی؛ الف، آنتن در ارتفاع 0.3cm از سطح زمین؛ ب، آنتن در ارتفاع 0.5cm از سطح زمین.

نوسانات تصادفی ناشی از ناپایداری‌های حوزه زمان است که به آن لرزش فاز می‌گویند. از طرفی نویز فاز طیف نویزی است که در دو طرف سیگنال در نتیجه لرزش فاز گسترده می‌شود.

در این مقاله روش پیاده‌سازی الگوریتم پردازشی در متلب، به‌گونه‌ای است که نویز فاز به‌صورت نوسانات فاز در حوزه زمان به سیگنال اعمال شده است. در نتیجه طیف سیگنال در حوزه فرکانس گسترده می‌شود. بدین ترتیب در کد متلب برای اضافه‌کردن نویز فاز به سیگنال نوسانگر محلی، نوسانات فاز در حوزه زمان به سیگنال اضافه شده که در نتیجه آن گسترش طیفی ایجاد می‌شود. در صورتی که بیان کمی نویز فاز مدنظر باشد، ۲۰ انحراف فاز با گام ۰.۵ درجه به سیگنال اصلی اضافه شده است. همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود در حضور نویز فاز، سیگنال نوسانگر محلی دچار پهن‌شدگی طیف شده است. شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در دو ارتفاع آنتن، دوباره با نویز فاز اجرا شدند و نتایج B-scan خروجی استخراج‌شده‌اند. تصاویر خروجی در حضور نویز فاز به‌صورت نشان‌داده‌شده در شکل (۵) است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تصویر خروجی در حضور نویز فاز نوسانگر مرجع، در بخش‌هایی تاریک و محوشده است و همچنین برخی از جزئیات آشکار نشده‌اند.



الف



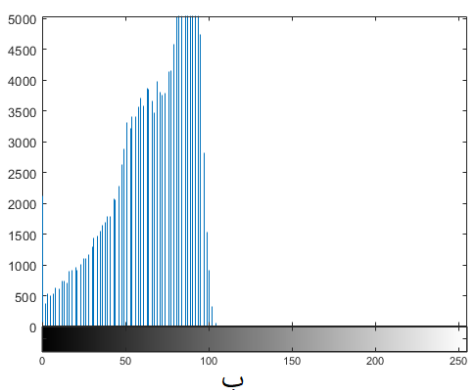
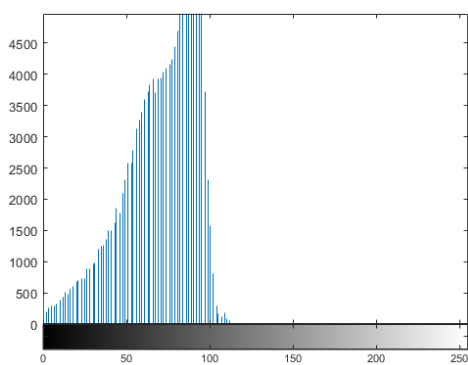
ب

شکل (۴). تصاویر B-scan خروجی از متلب بدون نویز فاز؛ الف، آنتن در ارتفاع 0.3cm از سطح زمین؛ ب، آنتن در ارتفاع 0.5cm از سطح

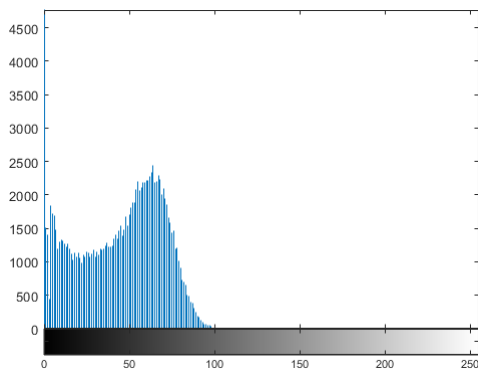
حالت آنتن در ارتفاع 0.5cm از زمین، افزایش یافته تا اثر نویز فاز بیشتر در هیستوگرام نشان داده شود.

۴-۱- مقیاس‌بندی در gprMax

از آنجاکه تحلیل و پردازش مدل در نرم‌افزار gprMax بسیار زمان‌بر است، بهتر است برای مدل‌سازی یک محیط واقعی، از مقیاس‌بندی استفاده کرد. در ادامه چند مدل مختلف در نرم‌افزار gprMax پیاده‌سازی و اجرا شده است و در نهایت راهکاری برای مقیاس‌بندی ارائه شده است.

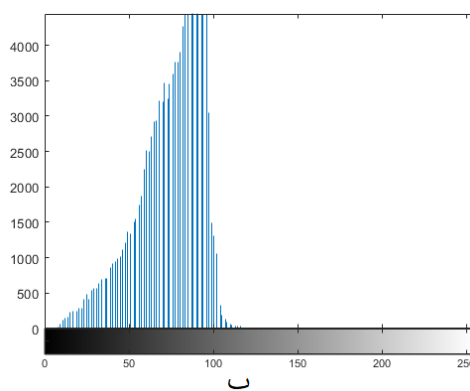
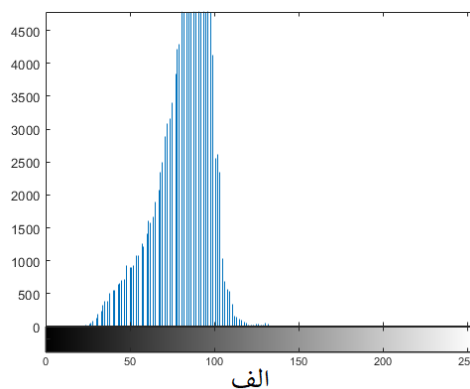


شکل (۷). هیستوگرام تصاویر شکل (۵)، الف، آنتن در ارتفاع 0.3cm از سطح زمین؛ ب، آنتن در ارتفاع 0.5cm از سطح زمین.



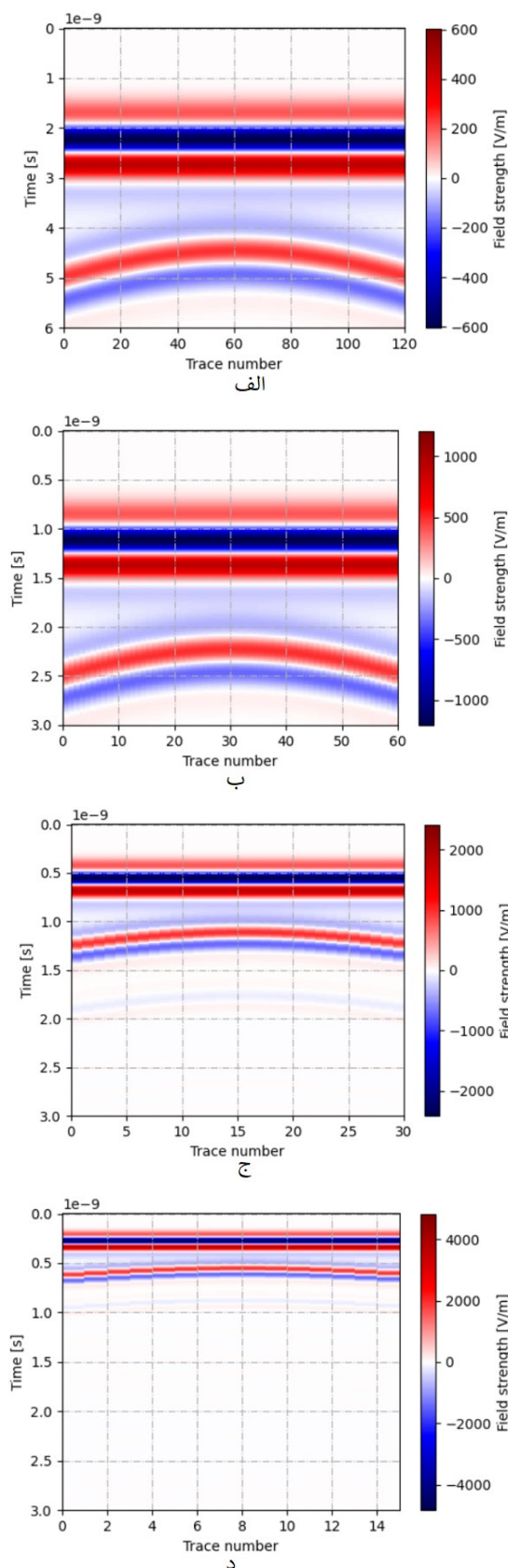
شکل (۸). هیستوگرام تصویر با نویز فاز افزایش یافته برای حالت آنتن در ارتفاع 0.5cm از سطح زمین.

به‌منظور کمی‌سازی و صحت‌سنجی تغییرات ایجاد شده در تصویر خروجی در حضور نویز فاز می‌توان از روش‌های استفاده شده در تحلیل تصاویر رادار دهانه مصنوعی استفاده کرد. در [۱۱] اثرات و تحلیل نویز لکه‌ای در تصاویر رادار دهانه مصنوعی مورد بررسی قرار گرفته است. این مقاله برای تحلیل تصاویری که درگیر نویز لکه‌ای هستند، هیستوگرام توزیع شدت پیکسل‌ها را در تصویر نویزی با تصویر اصلی مقایسه کرده است. در اینجا از روش مشابهی برای تحلیل تصاویر نویزی استفاده می‌شود. در شکل (۶)، هیستوگرام تصاویر مربوط به شکل (۴) و در شکل (۷)، هیستوگرام تصاویر مربوط به شکل (۵) ارائه شده است.



شکل (۶). هیستوگرام تصاویر شکل (۴)، الف، آنتن در ارتفاع 0.3cm از سطح زمین؛ ب، آنتن در ارتفاع 0.5cm از سطح زمین.

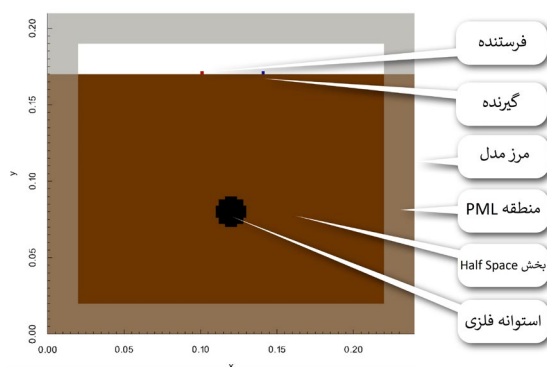
همان‌طور که در هیستوگرام تصاویر اصلی مشخص است، بیشترین تعداد پیکسل‌های تصویر در محدوده شدت ۵۰ تا ۱۰۰ قرار دارند. با اعمال نویز فاز، هیستوگرام به‌آرامی گسترده شده، به این معنی که با افزایش بیشتر نویز، مطابق شکل (۸)، تعداد پیکسل‌های برابری در محدوده شدت ۰ تا حدود ۱۰۰ وجود خواهد داشت. در این حالت تنها وضوح بوم تصویر باقی‌مانده و بقیه تصویر شامل پیش‌زمینه و پس‌زمینه تحریف شده و از بین رفته است. در شکل (۸) نویز فاز سیگنال نوسانگر محلی برای



شکل (۱۰). نمودار شدت میدان الکتریکی متناظر با مدل‌های مربوط به مقیاس‌بندی؛ الف، مدل اول؛ ب، مدل دوم؛ ج، مدل سوم؛ د، مدل چهارم.

لازم به ذکر است که مقیاس‌بندی به صورت شهودی انجام شده و به دلیل وابسته بودن آن به پارامترهای مختلف، از روش سعی و خطا استفاده شده است. بدین ترتیب به صورت ریاضی از رابطه خاصی پیروی نمی‌کند و صرفاً با تغییر پارامترهای موردنظر نتیجه آن مشاهده شده است.

مدل ساده‌ای از یک لایه زمین به همراه یک هدف استوانه‌ای به این منظور استفاده شده است که در شکل (۹) مشاهده می‌شود.



شکل (۹). مدل زمین تک لایه به همراه یک هدف استوانه‌ای برای شبیه‌سازی مقیاس‌بندی.

این مدل با تغییرات مشخصی در چهار حالت مختلف اجرا و شبیه‌سازی شده است که مشخصات آن‌ها در جدول (۳) نشان داده شده است. مطابق با جدول (۳) در هر مدل، نسبت به مدل قبل، ابعاد لایه زمین و هدف استوانه‌ای مدفون در زمین نصف شده و فرکانس کاری دو برابر شده است. نتایج B-scan خروجی از gprMax در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

جدول (۳). مشخصات مدل‌های شبیه‌سازی شده برای تعیین مقیاس‌بندی.

شماره مدل	مدل ۱	مدل ۲	مدل ۳	مدل ۴
ابعاد لایه زمین (cm)	0.48*	0.24*	0.12*	0.06*
	0.340*	0.170*	0.085*	0.0425*
	0.0040	0.0020	0.0010	0.0005
گذردهی الکتریکی لایه زمین	6	6	6	6
فرکانس کاری (GHz)	0.75	1.5	3	6
موقعیت هدف استوانه‌ای (cm)	0.24*	0.12*	0.06*	0.03*
	0.16	0.08	0.04	0.02
ضخامت و شعاع استوانه (cm)	0.004*	0.002*	0.001*	0.0005*
	0.0200	0.0100	0.0050	0.0025

on Microwave Theory and Techniques, Vol. 67, No. 3, pp. 1221-1232, 2019, doi: 10.1109/TMTT.2018.2889045.

[3] K. Siddiq, R. J. Watson, S. R. Pennock, P. Avery, R. Poulton, and B. Dakin-Norris, "Phase noise analysis in FMCW radar systems," European Microwave Conference (EuMC), pp. 1523-1526, 2015, doi: 10.1109/EuRAD.2015.7346347.

[4] C. J. Grebenkemper, "Local oscillator phase noise and its effect on receiver performance," Watkins-Johnson Company Tech-notes, vol. 8, no. 6, 1981.

[5] M. Jankovic, "Phase noise in microwave oscillators and amplifiers," University of Colorado at Boulder, 2010.

[6] E. Shahroosvand, M. Kazerooni, "Loop propagation modeling of a Static ground penetrating radar and extraction of effective parameters in detecting a buried target," J. Radar, vol. 10, no. 27, pp. , 2023. (in Persian)
https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1401.10.1.5.4

[7] K. Siddiq, M. K. Hobden, S. R. Pennock, and R. J. Watson, "Phase noise in FMCW radar systems," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 55, no. 1, pp. 70-81, 2018, doi: 10.1109/TAES.2018.2847999.

[8] P. van Genderen, "The effect of phase noise in a stepped frequency continuous wave ground penetrating radar," in CIE International Conference on Radar Proceedings, pp. 581-584, 2001, doi: 10.1109/ICR.2001.984784.

[9] V. maleki, S. Khazaei, and K. Alimohammadi, "Analysis of Ground Penetrating Radar Method in Detecting Subsurface Targets Based on Simulating Electromagnetic Waves" J. Adv. Def. Sci. Technol, vol. 10, no. 2, pp. 159-168, 2019. (in Persian)
https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26762935.1398.10.2.5.9

[10] R. M. Cerda, "Understanding quartz crystals and oscillators," Artech House, 2014.

[11] P. Singh and R. Shree, "Analysis and effects of speckle noise in SAR images," 2016 2nd International Conference on Advances in Computing, Communication, & Automation (ICACCA) (Fall), pp. 1-5, 2016, doi: 10.1109/ICACCAF.2016.7748978.

همان‌طور که از نمودارهای خروجی مشخص است، زمان آشکارسازی هدف استوانه‌ای در محور عمودی که معادل با عمق است، در هر مدل نسبت به مدل قبلی نصف شده است. از این شبیه‌سازی می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که با افزایش فرکانس شبیه‌سازی با یک نسبت مشخص و کاهش ابعاد مدل به همان نسبت، اجرای شبیه‌سازی در زمان کمتر ممکن خواهد شد. بدین ترتیب در شبیه‌سازی، برای مقیاس‌بندی مدل زمین سه‌لایه از نسبت ۱۰۰۰ استفاده شده است. به این صورت که ضخامت لایه‌ها که برابر با 0.5cm در نظر گرفته شده، معادل با 5m خواهد بود. فرکانس کاری نیز در شبیه‌سازی برابر با 150GHz قرار داده شده است که معادل با 150MHz در مقیاس واقعی است. همچنین ارتفاع آنتن‌های فرستنده و گیرنده تا سطح زمین برابر با 0.3cm و 0.5cm در نظر گرفته شده بود که در مقیاس واقعی برابر با 3m و 5m خواهند بود. بدین ترتیب رادار زمین نفوذ به‌صورت هوا پایه پیاده‌سازی شده است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک رادار زمین نفوذ هوا پایه فرکانس پله‌ای در بازه فرکانسی 100MHz تا 3GHz شبیه‌سازی شده و تصویر خروجی از آن استخراج شد. پس از آن اثر نویز فاز در تصویر خروجی از رادار مورد بررسی قرار گرفت. مشاهده شد که حضور نویز فاز در سیگنال نوسانگر محلی در گیرنده، سبب تار شدن اهداف در تصویر خروجی شده و حساسیت گیرنده راداری را در تشخیص سیگنال‌های بازتاب ضعیف، محدود می‌کند.

در مقایسه با رادار زمین نفوذ زمین پایه، در رادار هوا پایه، به دلیل اینکه سیگنال راداری، مسیر رفت و برگشتی را در فضای آزاد نیز طی می‌کند، تضعیف سیگنال بیشتر بوده و حتی هنگامی که نویز فاز وجود ندارد، آشکارسازی اهداف، به‌خصوص در اعماق زیاد کار دشواری خواهد بود؛ بنابراین در موارد استفاده از رادار هوا پایه، باید دقت نظر بیشتری در طراحی به کار گرفته شود تا مقدار نویز فاز به کمترین میزان ممکن برسد و در نتیجه آشکارسازی اهداف به‌درستی صورت گیرد.

۶- مراجع

[1] P. Tschapek, G. Körner, C. Carlowitz, and M. Vossiek, "Detailed analysis and modeling of phase noise and systematic phase distortions in FMCW radar systems," IEEE Journal of Microwaves, Vol. 2, No. 4, pp. 648-659, 2022, doi: 10.1109/JMW.2022.3195574.

[2] J. Park, S. Park, D.-H. Kim, and S.-O. Park, "Leakage mitigation in heterodyne FMCW radar for small drone detection with stationary point concentration technique," IEEE Transactions