

Presenting a New Approach in Simulation and Analysis of Shoulder Error on Radar Antenna Beam of Space-Based Artificial Aperture**Mehdi Shamekh, M.Sc., Roozbeh Hamzehyan, Assistant Professor, Najmeh Cheraghi-Shirazi, Assistant Professor, Abdolrasool Ghasemi, Assistant Professor**Department of Electrical Engineering- Bushehr Branch, Islamic Azad University, Bushehr, Iran
mehdiazizi2791@gmail.com, r.hamzehyan@srbiau.ac.ir, na.cheraghi@iau.ac.ir, ar.ghasemi@iau.ac.ir**Abstract**

Since most space-based synthetic aperture radar systems have an accuracy of less than one meter in the resolution of images, very accurate processing of synthetic aperture radar data to produce images with high-resolution accuracy is of particular importance. In this article, methods for actual modeling and simulation of the space-based synthetic aperture radar system are presented and the raw data were obtained. For simulation and modeling, the main characteristics of the real satellite synthetic aperture radar system related to sensor mode/dynamics, target observation, antenna beam patterns, pointing errors on the antenna beam, and raw data generation are reflected. Analyzes based on simulations show the effectiveness of the presented methods. In the simulation, the presented method compensates for the phase errors induced by the aiming errors of the antenna beam. The results of the centralization of raw data, the calculated value of the resolution accuracy of the slant range is equal to 1.89 meters. Also, the average values of the measured slant range resolution accuracy, peak side-lobe ratio (PSLR), and integrated side-lobe ratio (ISLR) for the Interrogation Rate Frequency (IRF). An unweighted point in the focused image was obtained around 1.94 m, 13.57 dB and -10.26 dB respectively. The calculated value of azimuth resolution accuracy is 2.24 meters and the average values of measured azimuth resolution accuracy, PSLR, and ISLR for unweighted point target IRFs are 2.29 meters, -12.57 dB and -9.68 dB, respectively. These results show the effectiveness of the proposed method. In other words, the performance of space-based synthetic aperture radar image formation using the proposed method for raw data is very good, so the various effects induced by the real synthetic aperture radar sensor are reflected. Therefore, these results confirm the proposed methods for forming the space-based synthetic aperture radar image.

Keywords: artificial aperture radar image, modeling and simulation, space station artificial aperture radar system**Received:** 16 June 2022**Revised:** 27 August 2022**Accepted:** 13 October 2022**Corresponding Author:** Dr. Roozbeh Hamzehyan**Citation:** M. Shamekh, R. Hamzehyan, N. Cheraghi-Shirazi, A. Ghasemi, "Presenting a new approach in simulation and analysis of shoulder error on radar antenna beam of space-based artificial aperture", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 16, no. 61, pp. 49-62, June 2025 (in Persian).

<https://dorl.net/dor/20.1001>.....

مقاله پژوهشی

ارائه یک رویکردی نوین در شبیه‌سازی و تحلیل خطای نشانه‌روی پرتو آنتن رادار دهانه مصنوعی فضاپایه

مهدی شامخ، دانش آموخته کارشناسی ارشد، روزبه حمزه‌ئیان، استادیار، نجمه چراغی شیرازی، استادیار،
عبدالرسول قاسمی، استادیار

دانشکده مهندسی برق - واحد بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران
mehdiazizi2791@gmail.com, r.hamzehyan@srbiau.ac.ir, na.cheraghi@iau.ac.ir, ar.ghasemi@iau.ac.ir

چکیده: از آنجایی که اکثر سیستم‌های رادار دهانه مصنوعی فضاپایه در تفکیک تصاویر، دقتی کمتر از یک متر دارند، پردازش بسیار دقیقی داده‌های رادار دهانه مصنوعی جهت تولید تصاویری با دقت تفکیک بالا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مقاله، روش‌هایی برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی واقعی سیستم رادار دهانه مصنوعی فضاپایه ارائه شده و همچنین داده‌های خام به‌دست آمده است. برای شبیه‌سازی و مدل‌سازی، مشخصات اصلی سیستم رادار دهانه مصنوعی ماهواره واقعی منعکس شده که مربوط به حالت/دینامیک سنسور، مشاهده هدف، الگوهای پرتو آنتن، خطاهای نشانه‌روی پرتو آنتن و تولید داده‌های خام است. آنالیزها بر اساس شبیه‌سازی انجام شده اثر بخشی روش‌های ارائه شده را نشان داده است. در شبیه‌سازی، روش ارائه شده خطاهای فازی القا شده توسط خطاهای نشانه‌روی پرتو آنتن را جبران‌سازی می‌کند. نتایج متمرکزسازی داده‌های خام، مقدار محاسبه شده دقت تفکیک بُرد مایل برابر ۱/۸۹ متر و مقادیر میانگین دقت تفکیک بُرد مایل اندازه‌گیری شده، نسبت لوب بیشینه به لوب کناری (PSLR) و نسبت لوب اصلی به تجمیع لوب‌های کناری (ISLR) برای فرکانس نرخ بازجویی (IRF) نقطه‌ای وزن‌دار نشده در تصویر متمرکز شده به‌ترتیب، در حدود ۱/۹۴ متر، ۱۳/۵۷ دسیبل و ۱۰/۲۶- دسیبل بود. مقدار محاسبه شده دقت تفکیک آزیموت برابر ۲/۲۴ متر و مقادیر میانگین دقت تفکیک آزیموت اندازه‌گیری شده، PSLR و ISLR برای IRF‌های هدف نقطه‌ای وزن‌دار نشده به‌ترتیب در حدود ۲/۲۹ متر، ۱۲/۵۷- دسیبل و ۹/۶۸- دسیبل بود. این نتایج اثر بخشی روش‌های ارائه شده را نشان می‌دهند. به عبارت دیگر عملکرد تشکیل تصویر رادار دهانه مصنوعی فضاپایه با استفاده از روش ارائه شده برای داده‌های خام بسیار خوب است، به‌طوری که تأثیرات مختلف القا شده از سنسور رادار دهانه مصنوعی واقعی منعکس می‌شود. بنابراین این نتایج، روش‌های پیشنهادی برای تشکیل تصویر رادار دهانه مصنوعی فضاپایه را تأیید می‌کند.

کلمات کلیدی: تصویر رادار دهانه مصنوعی، سیستم رادار دهانه مصنوعی فضاپایه، مدل‌سازی و شبیه‌سازی

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۳/۲۶

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۶/۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۷/۲۱

نام نویسنده‌ی مسئول: روزبه حمزه‌ئیان

نشانی نویسنده‌ی مسئول: بوشهر - دانشکده مهندسی برق - واحد بوشهر - دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر

۱- مقدمه

سیستم رادار دهانه مصنوعی فضاپایه یک سنسور فعال تصویربرداری در تمام شرایط جوی است که در آن پالس‌های ماکروویو بازگشتی توسط ماهواره جمع‌آوری می‌شوند و برای تشکیل تصاویری از سطح زمین در روز و شب ارائه می‌شود. امروزه، بیشتر سیستم‌های رادار دهانه مصنوعی فضاپایه نیاز به تصاویری با دقت تفکیک بالا، با دقتی کمتر از یک متر را دارند. بنابراین، پردازش بسیار دقیق داده‌های رادار دهانه مصنوعی به منظور ایجاد تصاویری با کیفیت بالا و بدون خطا مورد نیاز است [۱].

مخصوصاً، پارامترهای بسیار مهمی که ممکن است خطاهایی را در تصویر رادار دهانه مصنوعی فضاپایه ایجاد کنند باید در تمرکز داده‌های این رادار به درستی آنالیز و به‌طور مناسب پردازش شوند [۲]. این پارامترها مربوط به نشانه‌روی پرتو آنتن، سرعت مؤثر حسگر رادار دهانه مصنوعی، فرکانس داپلر و سخت‌افزار سنسور هستند، که در این مقاله به پارامتر نشانه‌روی پرتو آنتن پرداخته می‌شود. آنالیزهای نادرست این پارامترها موجب کاهش کیفیت تصویر متمرکز رادار دهانه مصنوعی فضاپایه شده و باعث عدم دقت، اعوجاج هندسی و ایجاد اهداف ساختگی می‌شود. به منظور پردازش دقیق رادار دهانه مصنوعی فضاپایه، شبیه‌ساز رادار دهانه مصنوعی فضاپایه‌ای پیاده‌سازی می‌شود که مشخصات اصلی سیستم رادار دهانه مصنوعی فضاپایه واقعی را می‌توان بر روی آن نشان داد که قادر به تحلیل اثرات خطای پارامترهای اصلی مربوط به سیستم رادار دهانه مصنوعی فضاپایه است [۳]. برخلاف شبیه‌سازی‌های قدیمی که تا حدی اکتساب داده‌های سیستم رادار دهانه مصنوعی را برای هدف خاصی مدل‌سازی می‌کرد، در این شبیه‌ساز، سیستم رادار دهانه مصنوعی فضاپایه مربوط به دینامیک‌های سنسور [۴]، مشاهده‌ی هدف، پترن‌های پرتو آنتن، خطاهای نشانه‌روی پرتو آنتن و تولید داده‌های خام پیاده‌سازی می‌شود [۵]. شبیه‌ساز داده‌های خام را برای اهداف نقطه‌ای با در نظر گرفتن عملیات رادار دهانه مصنوعی فضاپایه واقعی تولید می‌کند و ویژگی‌های رادار دهانه مصنوعی فضاپایه اصلی را بدون در نظر گرفتن گزینه‌های سخت‌افزاری سیستم بازتولید می‌کند. علاوه بر این، می‌توان از آن برای طراحی سیستم رادار دهانه مصنوعی فضاپایه واقعی استفاده کرد.

دست‌آورد اصلی این تحقیق نیز توسعه روش‌های تمرکز داده‌ای رادار دهانه مصنوعی فضاپایه دقیق است که می‌تواند اثرات خطای ناشی از مشخصات ذاتی سیستم رادار دهانه مصنوعی فضاپایه را که به منظور دستیابی به داده‌های خام استفاده می‌شود کاهش دهد، به طوری که کیفیت تصویر مناسب در همان زمان حفظ شود. در فرایند تشکیل تصویر رادار دهانه مصنوعی فضاپایه پیشنهاد شده تا به منظور جبران‌سازی خطای فاز ناشی از نشانه‌روی پرتو آنتن، که این خطا کیفیت تصاویر را به شدت کاهش داده، موجب اعوجاج هندسی تصویر شده، باعث پدیدار شدن اهداف جعلی و کاهش تمایز و کاهش نسبت سیگنال به نویز می‌شود، از الگوریتم گرادیان فاز ترکیب شده با الگوریتم بُرد داپلر استفاده شود، تا اعوجاج فاز ناشی از خطاهای نشانه‌روی پرتو آنتن را تصحیح و جبران کند.

بخش‌های این مقاله به این شرح ارائه می‌شود. در بخش اول، مدل‌سازی رادار دهانه مصنوعی فضاپایه واقعی خود ارائه می‌شود. در بخش دوم، روش‌های ارائه شده برای تشکیل تصویر رادار دهانه مصنوعی فضاپایه ارائه می‌شوند. در بخش سوم، نتایج حاصل از شبیه‌سازی بر مبنای روش‌های ارائه شده از طریق شبیه‌سازی‌های کامپیوتر نشان داده شده است. عملکرد آن در بخش چهارم اعتبارسنجی و ارزیابی می‌شود. در نهایت نتیجه‌گیری در بخش پنجم بیان شده است.

۲- مدل‌سازی و شبیه‌سازی رادار دهانه مصنوعی فضاپایه واقعی

۲-۱- مفاهیم کلی مدل‌سازی و شبیه‌سازی

برای متمرکزسازی دقیق داده‌های رادار دهانه مصنوعی فضاپایه، پارامترهای اصلی سیستم رادار دهانه مصنوعی فضاپایه واقعی در نظر گرفته می‌شود که پارامتر اصلی خطا مربوط به نشانه‌روی پرتو آنتن است [۶]. برای تحلیل اثرات خطا که متمرکزسازی رادار دهانه مصنوعی و تصاویر متمرکز را تحت تأثیر قرار می‌دهند و برای به‌دست آوردن الگوریتم دقیق متمرکزسازی رادار دهانه مصنوعی فضاپایه، شبیه‌ساز سیستم رادار دهانه مصنوعی فضاپایه با در نظر گرفتن عملکردهای سیستم رادار دهانه مصنوعی فضاپایه واقعی، پیاده‌سازی شده است [۷]. این روش شامل مدل‌های ریاضی بر مبنای محیط عملکرد و پارامترهای سیستم حسگر واقعی رادار دهانه مصنوعی فضاپایه است. به دلیل این‌که عوامل خطای اصلی سیستم رادار دهانه مصنوعی

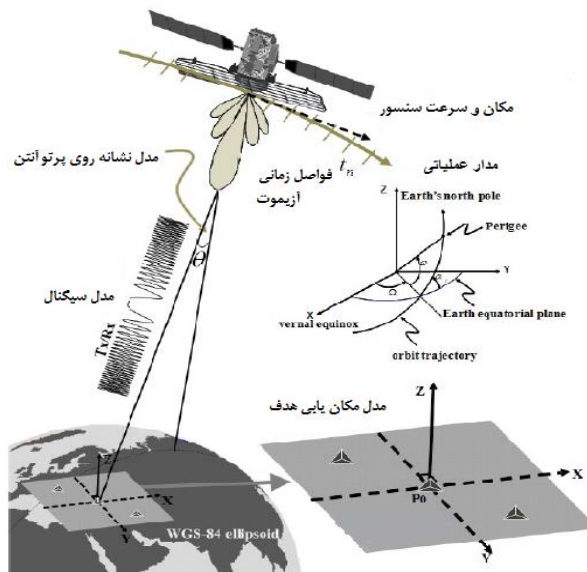
فضاپایه به صورت ریاضی در شبیه‌سازی مدل‌سازی می‌شوند، عملکرد روش‌های تشکیل تصویر رادار دهانه مصنوعی با استفاده از داده‌های خام تولید شده را می‌توان به طور مؤثر مورد تحلیل و ارزیابی قرار داد [۸]. در شکل (۱) مفهوم مدل‌سازی کلی شبیه‌ساز رادار دهانه مصنوعی ارائه شده که شامل مشخصات اصلی سیستم رادار دهانه مصنوعی فضاپایه واقعی است [۹]. همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، شبیه‌ساز پیاده‌سازی شده شامل چندین مدل، مانند مدل حالت (دینامیک-های سنسور)، مدل مشاهده هدف، مدل پترن پرتو آنتن، مدل خطای نشانه‌روی پرتو آنتن و مدل تولید داده‌های خام است. هرگاه رادار دهانه مصنوعی به منظور به دست آوردن داده‌های خام، پرتویی را بر روی اهداف ساطع کند، اثرات مختلفی مانند خطاهای نشانه‌روی پرتو آنتن بر روی داده‌های خام تولید شده ایجاد می‌شوند [۱۰، ۱۱]. همچنین، این فرایند قادر است تا عملکرد دینامیک‌ها را بر روی مداری شبیه به سنسور رادار دهانه مصنوعی فضاپایه واقعی شبیه‌سازی کند. عملکرد شبیه‌سازهای رادار دهانه مصنوعی فضاپایه ارائه شده ارزیابی و تأیید می‌شود [۱۲].

۲-۲- مدل‌سازی رادار دهانه مصنوعی فضاپایه واقعی

در شبیه‌سازی واقعی رادار دهانه مصنوعی فضاپایه، برای به دست آوردن داده‌های خام لازم است که در آن مشخصات اصلی و سازوکار عملکرد سیستم رادار دهانه مصنوعی فضاپایه واقعی قرار داده شود. در این بخش، مدل‌های اصلی شبیه‌ساز که بر عملکرد الگوریتم متمرکزسازی رادار دهانه مصنوعی فضاپایه تأثیر گذارند، تشریح می‌شود.

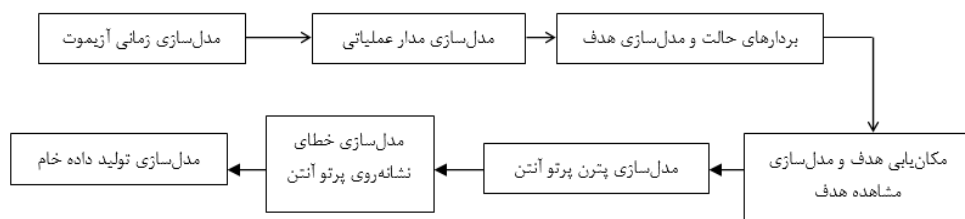
۲-۲-۱- مدل‌سازی حالت / دینامیک‌های سنسور

الف- مدل‌سازی زمانی آزیموت (t_n): در این مدل‌سازی ابتدا فواصل زمانی آزیموت تعریف می‌شود، این تعریف برای زمان‌بندی انتقال پالس رادار دهانه مصنوعی با توجه به حالت کسب داده‌های خام است که باید محاسبه شود [۱۳].



شکل (۱): مفهوم کلی شبیه‌ساز رادار دهانه مصنوعی فضاپایه [۹]

Figure (1): The general concept of the artificial aperture radar simulator of the space station [9]



شکل (۲): جریان کلی مدل‌سازی رادار دهانه مصنوعی فضاپایه [۱۰]

Figure (2): The general flow of radar modeling of the artificial crater of the space station [10]

Table (1): Kepler operational circuit elements

جدول (۱): عناصر مدار عملیاتی کیپلر

ردیف	مقدار	سمبل
۱	۶۹۳۸/۱۳۷ کیلومتر	a
۲	۹۷ درجه	i
۳	صفر درجه	Ω
۴	صفر درجه	ω
۵	صفر درجه	v_0
۶	۰/۰۰۱۵	e

ب- مدل‌سازی مدار عملیاتی: ابتدا مدار عملیاتی که همان منحنی مسیر سنسور است را با استفاده از عناصر مداری کیپلر مدل‌سازی می‌شوند. عناصر مدار عملیاتی کیپلر مطابق جدول (۱) تعریف می‌شود که شامل نیم-محور اصلی مدار یا نیم-قطر بزرگ a، گریز از مرکز مدار یا شاخص کشیدگی e، آنومالی حقیقی v ، شیب مداری یا زاویه میل i ، زاویه گرهِ صعودی یا زاویه بُعد Ω و آرگومان نزدیک‌ترین نقطه یا همان آرگومان حضیض ω است که همه این مقادیر برای مدل‌سازی مدار عملیاتی یا همان مسیر حسگر در نظر گرفته می‌شود، با توجه به مقدار e مشخص می‌شود که مدار عملیاتی کیپلر یک مدار بیضوی است [۱۴]. برای شبیه‌سازی بردارهای مکان و سرعت سنسور رادار دهانه مصنوعی فضاپایه، بردار مکان \bar{P}_{S-ECEF} و بردار سرعت \bar{V}_{S-ECEF} مربوط به سنسور رادار دهانه مصنوعی در دستگاه مختصات کارتزین زمین-مرکز، زمین-ثابت^۱ (ECEF)، همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده، به‌عنوان کمیت‌های مداری تعیین شده‌اند [۱۵].

۲-۲-۲- موقعیت‌یابی هدف و مدل‌سازی مشاهده

ابتدا هدف نقطه‌ای بر روی بیضی WGS-84 موقعیت‌یابی می‌شود، که می‌توان انعکاس بردار نشانه‌روی، آن را به‌صورت عدد مختلط تنظیم کرد. برای هر لحظه‌ی زمانی آزیموت، بردار موقعیت هدف \bar{P}_{T-ECEF} در دستگاه مختصات کارتزین ECEF محاسبه می‌شود، همچنین بردار موقعیت هدف در چارچوب نشانه‌روی سنسور \bar{P}_{T-SP} با استفاده از \bar{P}_{S-ECEF} و \bar{P}_{T-ECEF} محاسبه می‌شود و مقادیر دینامیک سنسور توسط مدل‌سازی حالت سنسور که در قسمت قبل به آن اشاره شده، ارزیابی می‌شود. از این مدل‌سازی به‌منظور ارزیابی زوایای مشاهده سنسور همچون زاویه مشاهده ارتفاع θ و زاویه مشاهده آزیموت ϕ در هدف استفاده می‌شود [۱۶].

۲-۲-۳- مدل‌سازی پترن پرتو آنتن

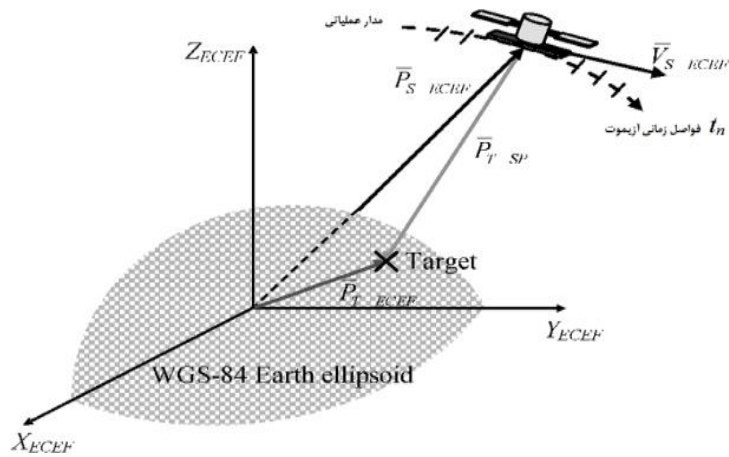
برای هر هدف در لحظه‌ی زمانی آزیموت، پترن تابش آنتن G همانند معادله (۱) با استفاده از ضرایب تحریک آنتن برای ارسال و دریافت مدل‌سازی می‌شود، که به‌صورت حاصل‌ضرب ضریب آرایه E_a و پترن المان E_e تعریف می‌شود [۱۷].

$$G(\theta, \phi) = E_a(\theta, \phi) \cdot E_e(\theta, \phi) \quad (1)$$

همچنین با محاسبه زاویه مشاهده ارتفاع θ و زاویه مشاهده آزیموت ϕ در هدف، زوایای هدایت آزیموت برای کل زمان کسب داده‌ها و پترن‌های پرتو آنتن برای ارسال و دریافت، در هدف منعکس می‌شوند. از این‌رو، اثرات مربوط به پترن پرتو آنتن در رادار دهانه مصنوعی فضاپایه واقعی در داده‌های خام شبیه‌سازی شده ذاتی هستند. برای آنتن مسطح، ضریب آرایه E_a به‌صورت حاصل‌ضرب دو ضریب مستقل برای ارسال و دریافت، همان‌طور که در معادله (۲) نشان داده شده است، تعریف می‌شود [۱۸].

$$E_a(\theta, \phi) = \left[\sum_m |a_m| e^{j\phi_m} e^{\frac{j2\pi}{\lambda} d_y \sin\theta} \right] \left[\sum_l e^{j\phi_l} e^{\frac{j2\pi}{\lambda} d_x \cos\theta \sin\phi} \right] \quad (2)$$

که در آن m و l به ترتیب m امین ردیف و l امین ستون آنتن آرایه مسطح را نشان می‌دهند، d_x و d_y فواصل خطی از تابنده‌های مجاور در آزیموت و جهات ارتفاع هستند و λ طول‌موج رادار است. در این مدل‌سازی، پترن المان E_e ، پترن تابش سینوسی برای دهانه استوانه‌ای با تابش یکنواخت است، همان‌طور که در معادله (۳) نشان داده شده، استفاده می‌شود [۱۹].



شکل (۳): هندسه مشاهده هدف و دینامیک سنسور [۱۶]

Figure (3): Target observation geometry and sensor dynamics [16]

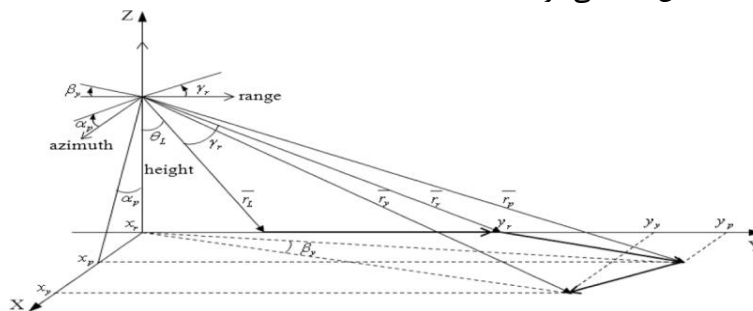
$$E_e(\theta, \phi) = \text{sinc}\left(\frac{d_x}{\lambda} \cdot \cos\theta \sin\phi\right) \cdot \text{sinc}\left(\frac{d_y}{\lambda} \cdot \sin\theta\right) \quad (۳)$$

۴-۲-۲- مدل سازی خطای نشانه‌روی پرتو آنتن

نشانه‌روی ناپایدار پرتو آنتن خطاهایی مانند بایاس، رانش^۲ (خطای خطی) و لرزش^۳ (خطای تصادفی) را تولید می‌کنند. نتیجه این امر، خطاهای فاز بین پالس‌های دریافتی روی داده‌های خام و کاهش زیاد کیفیت تصویر رادار دهانه مصنوعی است. خصوصاً، تغییرات نشانه‌روی پرتو آنتن موجب تغییرات مکانی مرکز داپلر می‌شود. مقدار ناصحیح مرکز داپلر باعث ایجاد تلفات در دقت تفکیک آزیموت، تلفات نسبت نویز به سیگنال، تلفات نسبت ابهام داپلر به سیگنال و خطای متمرکزسازی نوار می‌شود. در شبیه‌سازی، خطای نشانه‌روی پرتو آنتن (خطای تصادفی) و خطاهای فاز تولید شده به وسیله تلفات مذکور به صورت ریاضی قابل تعریف بوده و اثرات آن‌ها قابل تجزیه و تحلیل است. خطای نشانه‌روی پرتو آنتن برحسب مختصات زاویه‌ای (درجه α_p ، چرخش γ_r ، انحراف β_y) در طول زمان کسب داده خام مدل سازی می‌شود، همچنین خطای نشانه‌روی تصادفی برای هر سه محور چرخش، درجه و انحراف، در این مدل سازی در نظر گرفته می‌شود، مدل ریاضی خطای تصادفی e_z ناشی از نشانه روی پرتو آنتن شکل (۴) به صورت معادله (۴) تعریف می‌شود:

$$e_j = \sum_{m=1}^M A_{j,pp} \cdot \sin(2\pi f_m t_n + \phi_m) \quad t_{\text{start}} \leq t_n \leq t_{\text{end}} \quad (۴)$$

حال، خطای فازی Φ_{e-Pt} القا شده ناشی از خطاهای نشانه‌روی به صورت ریاضی مدل سازی می‌شود. شکل (۴) هندسه ترسیمی جابجایی‌های زوایای نشانه‌روی پرتو آنتن در رادار دهانه مصنوعی فضاپایه را نشان می‌دهد. در این تصویر، بردار نشانه‌روی پرتو آنتن ایده‌آل است. بردار نشانه‌روی پرتو \bar{r}_0 به وسیله زاویه γ_r تبدیل به \bar{r}_1 شده و به وسیله زاویه α_p به بردار \bar{r}_2 جابجا می‌شود. در انتها، \bar{r}_2 به وسیله زاویه β_y به بردار \bar{r}_3 جابجا می‌شود. فرکانس داپلر f_D که مربوط به زوایای نشانه‌روی پرتو آنتن است، به صورت ریاضی با معادله (۵) نشان داده می‌شود.



شکل (۴): جابجایی‌های نشانه‌روی پرتو آنتن ناشی از خطاهای نشانه‌روی [۲۰]

Figure (4): Point shifts on the antenna beam caused by pointing errors [20]

$$f_D = \frac{2v}{\lambda} \bar{v} \cdot \bar{\Gamma} = \frac{2v}{\lambda} \sqrt{\frac{\tan^2(\alpha_p) + \frac{\tan^2(\theta_L + \gamma_r)}{\cos^2(\alpha_p)}}{1 + \tan^2(\alpha_p) + \frac{\tan^2(\theta_L + \gamma_r)}{\cos^2(\alpha_p)}}} \cdot \sin \left\{ \beta_y + \tan^{-1} \left(\frac{\sin \alpha_p}{\tan(\theta_L + \gamma_r)} \right) \right\} \quad (5)$$

که در آن \bar{v} بردار سرعت ماهواره، v اندازه بردار \bar{v} است و $\bar{\Gamma}$ بردار نشانه‌روی پرتو آنتن است، نماد (\cdot) حاصل ضرب عددی بردارها است و θ_L زاویه دید آنتن است. همچنین خطای فازی ناشی از خطاهای نشانه‌روی را می‌توان همانند معادله (۶) نشان داد، این خطا بر مبنای این تئوری است که فرکانس f مشتق فاز Φ محسوب می‌شود [۲۱].

$$\begin{cases} \frac{d\Phi}{dt} = 2\pi f \\ \Phi_{e-Pt}(t_n) = \Phi_{e-Pt}(t_{n-1}) + f_D(t_n) \cdot \frac{2\pi}{PRF} \end{cases} \quad (6)$$

که $\Phi_{e-Pt}(t_n)$ خطای فازی پالس، $f_D(t_n)$ فرکانس داپلر پالس است. می‌توان آن را از طریق معادله‌های (۴) و (۵) محاسبه کرد. بر مبنای این معادله‌ها، داده‌های خام که خطاهای نشانه‌روی پرتو آنتن بر روی آن منعکس می‌شود در شبیه‌سازی ایجاد می‌شوند.

۵-۲-۲- مدل‌سازی تولید داده‌های خام رادار دهانه مصنوعی

برای تولید داده‌های خام رادار دهانه مصنوعی فضایی مدلسازی شده توسط کاربر، سیگنال دریافتی به صورت تابع بُرد و لحظه‌های زمانی آزمون شبیه‌سازی می‌شود، که این لحظات نمایش‌دهنده تمامی لحظات ارسال و دریافت طی اکتساب داده‌های خام است. مدل ریاضی سیگنال دریافتی S_{RX} به صورت معادله (۷) با استفاده از پارامترهای رادار و سنسور، پترن‌های تابش آنتن، مکان‌یابی هدف و سنسور و خطاهای نشانه‌روی پرتو آنتن تعریف می‌شود [۲۲].

$$S_{RX}(\tau_h, t_n) = e^{j\Phi_{e-Pt}(t_n)} \cdot \sum_{i=1}^{N_T} r_{T,i} \cdot G_{TX} \cdot G_{RX} \cdot \text{rect}_{T_p} \left[\tau_h + n_a T - \frac{T_p}{2} - t_{d,i}(t_n) \right] \cdot e^{j\pi\gamma \left[\tau_h + n_a T - \frac{T_p}{2} - t_{d,i}(t_n) \right]^2} \cdot e^{-j2\pi f_c \left[\frac{T_p}{2} + t_{d,i}(t_n) \right]} \quad (7)$$

که در آن N_T تعداد اهداف، $\Phi_{e-Pt}(t_n)$ خطای فاز، بازتابش‌پذیری اهداف، G_{TX} پترن تشعشع آنتن ارسال، G_{RX} پترن تشعشع آنتن دریافتی برای هر هدف هستند، γ نسبت چیرپ، f_c فرکانس انتقال، τ_h لحظه زمانی h امین بُرد در پنجره نمونه‌برداری سیگنال دریافتی است و این با توجه به معادله (۸) تعریف می‌شود.

$$\tau_h = t_{sws} + \frac{(h-1)}{f_s} \quad h=1 \dots n_s \quad (8)$$

که در آن n_s تعداد نمونه‌های زمانی بُرد، t_{sws} زمان شروع پنجره نمونه‌برداری و f_s فرکانس نمونه‌برداری است. در معادله (۷)، $t_{d,i}$ تأخیر دوطرفه تولیدی توسط انتشار سیگنال بین ارسال و دریافت را همان‌طور که در معادله (۹) ارائه شده است نشان می‌دهد، که در آن c سرعت نور است.

$$t_{d,i}(t_n) = \frac{|\bar{P}_{S-ECEF}(t_n) - \bar{P}_{T-ECEF,i}|}{c} + \frac{|\bar{P}_{S-ECEF}(t_n + n_a T) - \bar{P}_{T-ECEF,i}|}{c} \quad (9)$$

۳-۲- تولید داده خام رادار دهانه مصنوعی فضایی

در این قسمت الگوریتم متمرکزسازی داده رادار دهانه مصنوعی توضیح داده شده و تحلیل عملکرد آن بر مبنای کیفیت IRF-های هدف نقطه‌ای بر روی تصویر متمرکز است. عملکرد شبیه‌ساز سیستم رادار دهانه مصنوعی فضایی طی ارزیابی‌های فراوان مورد بررسی قرار گرفته است [۲۳].

آنالیزها به منظور ارزیابی روش‌های تشکیل تصویر رادار دهانه مصنوعی فضایی انجام می‌شود. ابتدا سیگنال ارسال شده را تولید کرده سپس داده‌های خام برای حالت نقشه نواری تولید می‌شود، که مشخصات اصلی سیستم رادار دهانه مصنوعی فضایی

واقعی بر روی آن با استفاده از مدل ریاضی سیگنال دریافت شده رادار دهانه مصنوعی (S_{Rx}) که در معادله (۷) نشان داده شد، مشخص می‌شود [۲۴].

جدول (۲) مقادیر پارامترهای سیستم رادار دهانه مصنوعی فضاپایه و پارامتر خطای نشانه‌روی پرتو آنتن در شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. در این جدول، L_{sw} طول پنجره نمونه‌برداری، B_c پهنای باند چیرپ و T_{az} زمان دهانه‌ی مصنوعی آزمایش است. همچنین طول آنتن استفاده شده در این شبیه‌سازی ۴/۲ متر و عرض آن ۰/۷ متر است و عدد ابهام π_a برابر با ۱۷ است. در شبیه‌سازی، نشانه‌روی پرتو آنتن روی داده‌های خام تولید شده منعکس شده و خطای تصادفی اعمال می‌شود. اندازه خطای آن، همان‌طور که در جدول (۲) نشان داده شده، تنظیم می‌شود. خطای تصادفی در هر سه محور α_p ، γ_f و β_y تولید می‌شود [۲۵].

۳- تشکیل تصویر رادار دهانه مصنوعی فضاپایه واقعی

از الگوریتم شناخته شده بُرد داپلر به‌عنوان روش تمرکز داده‌های رادار دهانه مصنوعی اساسی استفاده می‌شود، جریان کلی پردازش روش تشکیل تصویر رادار دهانه مصنوعی فضاپایه پیشنهادی در شکل (۵) نشان داده شده که قسمت نقطه چین نشان دهنده الگوریتم بُرد داپلر است [۲۶].

از داده خام محاسبه شده از معادله (۷) به‌عنوان ورودی برای تولید تصویر نهایی رادار دهانه مصنوعی استفاده می‌شود. به‌منظور جبران‌سازی تخریب فاز ایجاد شده توسط خطاهای نشانه‌روی پرتو آنتن، از الگوریتم گرادیان فاز که از پرکاربردترین و مؤثرترین روش‌های تصحیح خطای فاز است، استفاده می‌شود. خصوصاً، ترکیب آن با الگوریتم بُرد داپلر را برای متمرکزسازی داده‌های رادار دهانه مصنوعی ارائه می‌گردد. در این فرآیند، الگوریتم گرادیان فاز را می‌توان روی سیگنال نزولی آزمایش اعمال کرد. بنابراین، خطاهای فاز سیگنال‌های آزمایش که توسط خطاهای نشانه‌روی پرتو آنتن ایجاد شده‌اند، برآورد و جبران‌سازی می‌شوند [۲۷].

۴- نتایج شبیه‌سازی‌ها

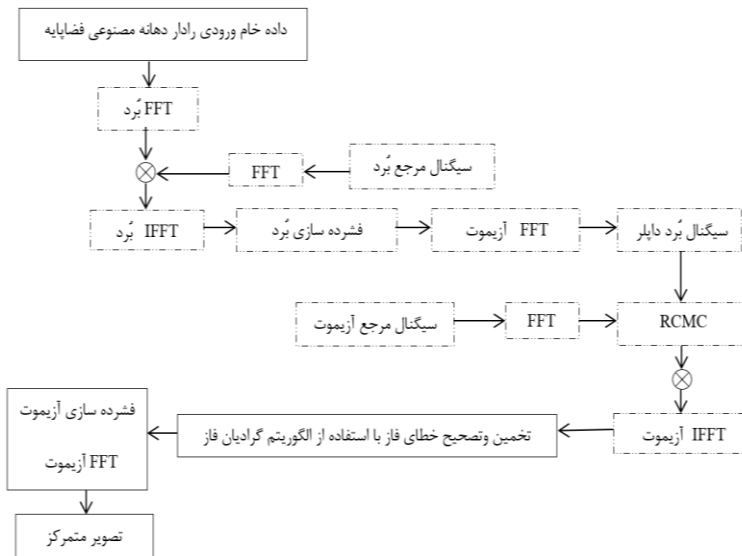
۴-۱- تولید داده‌های رادار دهانه مصنوعی فضاپایه

آنالیزها به‌منظور ارزیابی روش‌های تشکیل تصویر رادار دهانه مصنوعی فضاپایه که در این مقاله ارائه شد، با استفاده از نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی می‌شود. ابتدا مدار عملیاتی کپلر را که مسیر حسگر رادار دهانه مصنوعی است، مطابق با جدول (۱) پیاده‌سازی می‌شود، سپس داده‌های خام را برای حالت نقشه‌نواری تولید می‌گردد، که مشخصات اصلی سیستم رادار دهانه مصنوعی فضاپایه واقعی بر روی آن با استفاده از مدل ریاضی سیگنال دریافت شده رادار دهانه مصنوعی که در معادله (۷) نشان داده شد، مشخص می‌شود. مطابق با جدول (۲) که در قسمت (۳-۲) به آن اشاره شد، مقادیر پارامترهای سیستم رادار دهانه مصنوعی فضاپایه در شبیه‌سازی استفاده می‌شود.

Table (2): The parameters of the artificial aperture radar system of the spacecraft and the pointing error parameter on the antenna beam

جدول (۲): پارامترهای سیستم رادار دهانه مصنوعی فضاپایه و پارامتر خطای نشانه‌روی پرتو آنتن

ردیف	اندازه	پارامتر	واحد
۱	۳۶۰۰	PRF	هرتز
۲	۹/۶	f_c	گیگاهرتز
۳	۵۰	T_p	میکروثانیه
۴	۲۱۴/۸۷	T_{sws}	میکروثانیه
۵	۱۴۹/۲۴	L_{sw}	میکروثانیه
۶	۷۵	B_c	مگاهرتز
۷	۱۰۷/۲	f_s	مگاهرتز
۸	۵/۵	T_{az}	ثانیه
۹	0 ± 0.01	Jitter (e_j)	درجه



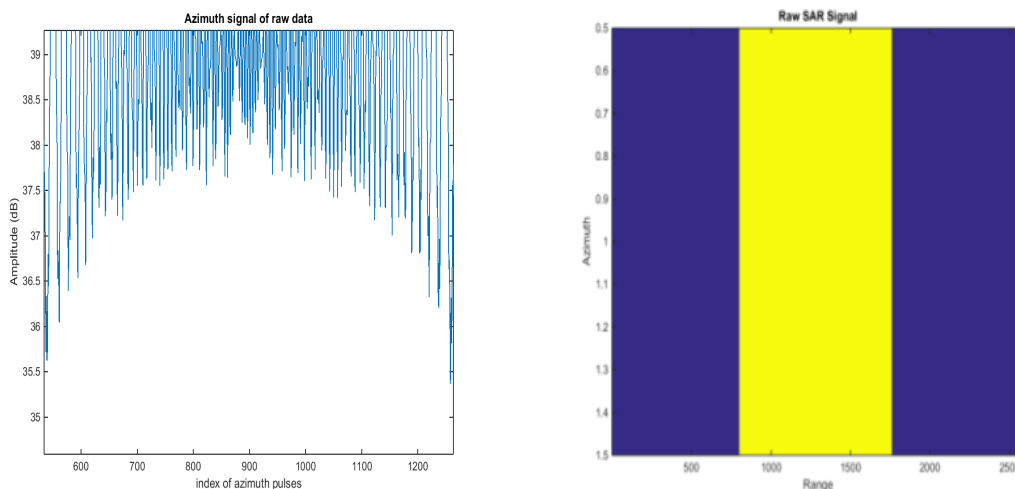
شکل (۵): فلوجارت تشکیل تصویر رادار دهانه مصنوعی

Figure (5): Flowchart of artificial aperture radar image formation

در شبیه‌سازی، نشانه‌روی پرتو آنتن روی داده‌های خام تولید شده منعکس می‌شود و مقادیر خطای آن‌هم همان‌طور که در جدول (۳) نشان داده شده است تنظیم می‌شود، همچنین برای تنظیم مقادیر بُرد، از مقادیر تراسار-ایکس^۴ استفاده می‌شود. داده‌های خام که تأثیرات واقعی سیستم رادار دهانه مصنوعی فضایی روی آن‌ها منعکس شده است. در شکل (۶) داده خام تولید شده نشان داده شده است. یعنی، این داده خام شبیه‌سازی شده دارای اثرات واقعی همچون الگوی پرتو آنتن و خطای فازی ناشی از خطاهای نشانه‌روی پرتو آنتن در رادار دهانه مصنوعی را دارند. اثرات خطاهای نشانه‌روی پرتو آنتن در اینجا نشان داده شده است. این داده‌های خام برای استفاده در ارزیابی عملکرد روش‌های متمرکزسازی پیشنهادی کافی هستند.

۴-۲- تحلیل نتایج شبیه‌سازی

ابتدا شبیه‌سازی بر روی داده خام تولید شده بدون وارد کردن خطاها انجام می‌گیرد، سپس خطای تصادفی و خطای زوایای نشانه‌روی پرتو آنتن اضافه می‌شود، که نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی برای مرحله اول اجرای الگوریتم بُرد داپلر (فشرده-سازی بُرد) در شکل (۷) ارائه شده و نتایج شبیه‌سازی و به‌دست آمدن هدف نقطه‌ای در شکل (۸) ارائه شده است.

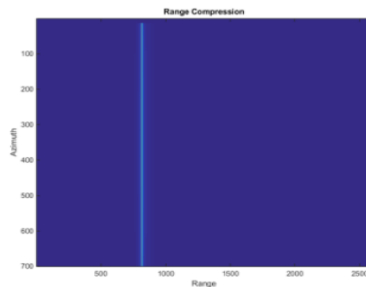


(ب) سیگنال آزیموت داده خام

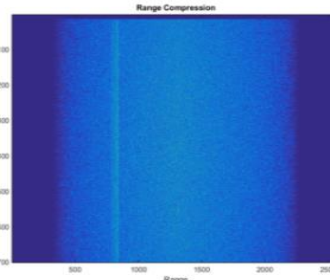
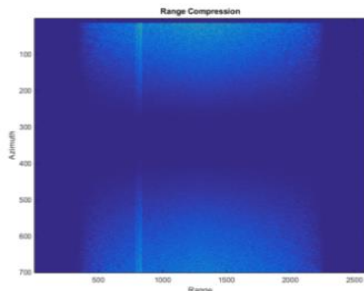
(الف) سیگنال رادار دهانه مصنوعی داده خام

شکل (۶): نتایج شبیه‌سازی داده خام تولید شده.

Figure (6): Simulation results of generated raw data, a) Synthetic radar aperture signal of raw data, b) Azimuth signal of raw data



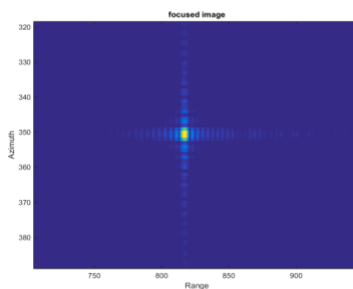
(الف) بدون خطا



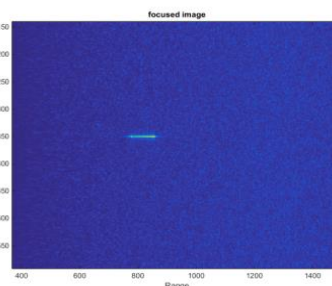
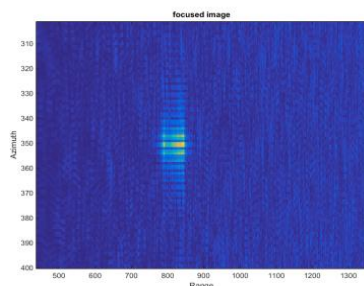
(ب) وارد کردن خطای تصادفی (ج) وارد کردن هر دو خطای تصادفی و زوایای نشان‌رویی پرتو آنتن

شکل (۷): نتایج شبیه‌سازی اجرای مرحله اول الگوریتم بُرد داپلر (فشرده‌سازی بُرد)

Figure (7): The simulation results obtained from the first stage of the Doppler board algorithm (board compression), a) NO error, b) Introducing random error, c) Introducing both random error and pointing angle error on the antenna beam



(الف) بدون خطا



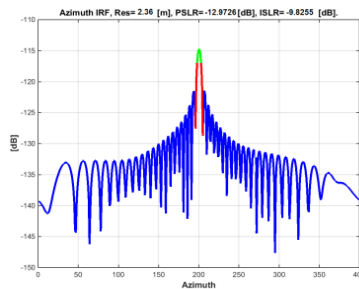
(ب) وارد کردن خطای تصادفی (ج) وارد کردن هر دو خطای تصادفی و زوایای نشان‌رویی پرتو آنتن

شکل (۸): نتایج شبیه‌سازی به دست آمدن هدف نقطه‌ای

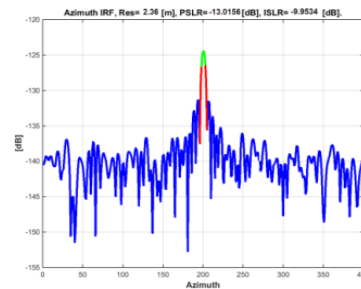
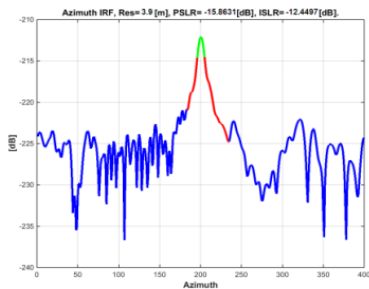
Figure (8): The results of simulation and obtaining the point target, a) Without error, b) Introducing random error, c) Introducing both random error and pointing angle error on the antenna beam

با بررسی نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی اثرات خطاهای بحرانی برای تشکیل تصویر رادار دهانه مصنوعی فضایی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند. نتایج آنالیزها نشان می‌دهند که این خطاها موجب اعوجاج فاز داده خام شده و تصویر رادار دهانه مصنوعی را نامتمرکز می‌کنند. همچنین خطای فاز کیفیت تصاویر را به شدت کاهش داده، موجب اعوجاج هندسی تصویر شده، باعث پدیدار شدن اهداف جعلی و کاهش تمایز و کاهش نسبت سیگنال به نویز می‌شود. برای به حداقل رساندن خطاهای ناشی

از آن‌ها در تشکیل تصویر متمرکز رادار دهانه مصنوعی فضاپایه، پیشنهاد کردیم تا از الگوریتم گرادیان فاز ترکیب شده با الگوریتم بُرد داپلر استفاده شود، تا اوجاج فاز ناشی از خطاهای نشانه‌روی پرتو آنتن را تصحیح و جبران کند [۲۸].



(الف) بدون خطا



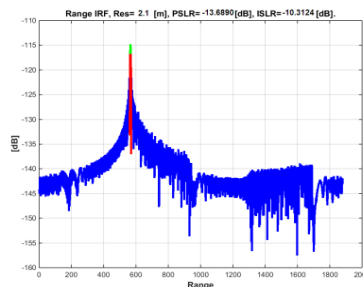
(ج) وارد کردن هر دو خطای تصادفی و زوایای نشانه‌روی پرتو آنتن

(ب) وارد کردن خطای تصادفی

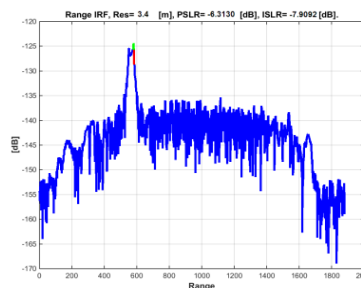
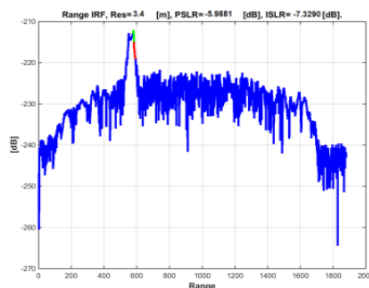
شکل (۹): نتایج شبیه‌سازی به‌دست آمده از فرکانس نرخ بازجویی آزیموت درون‌یابی شده هدف نقطه‌ای برای بررسی عملکرد روش

تمرکز رادار دهانه مصنوعی

Figure (9): The simulation results obtained from the interpolated azimuth interrogation rate frequency of the point target to investigate the performance of the artificial radar aperture focusing method, a) Without error, b) Introducing random error, c) Introducing both random error and pointing angle error on the antenna beam



(الف) بدون خطا



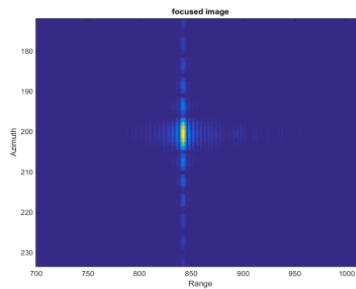
(ج) وارد کردن هر دو خطای تصادفی و زوایای نشانه‌روی پرتو آنتن

(ب) وارد کردن خطای تصادفی

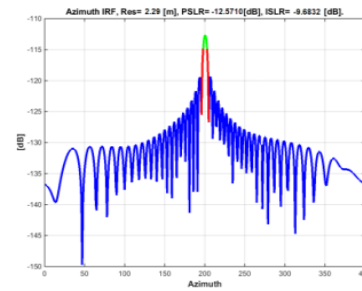
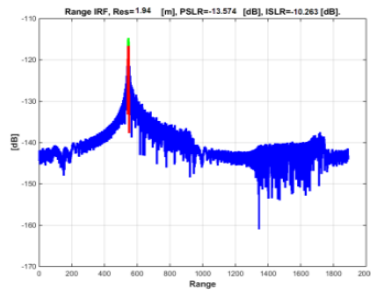
شکل (۱۰): نتایج شبیه‌سازی به‌دست آمده از فرکانس نرخ بازجویی بُرد درون‌یابی شده هدف نقطه‌ای برای بررسی عملکرد روش تمرکز

رادار دهانه مصنوعی

Figure (10): The simulation results obtained from the interrogation rate frequency of the interpolated range of the point target to investigate the performance of the artificial radar aperture focusing method, a) Without error, b) Introducing random error, c) Introducing both random error and angular error. Mark on the antenna beam



(الف) هدف نقطه‌ای متمرکز



(ب) فرکانس نرخ بازجویی آزیموت درون‌یابی شده هدف نقطه‌ای (ج) فرکانس نرخ بازجویی بُرد درون‌یابی شده هدف نقطه‌ای

شکل (۱۱): نتایج شبیه‌سازی به‌دست‌آمده از اعمال الگوریتم گرادیان فاز ترکیب شده با الگوریتم بُرد داپلر

Figure (11): The simulation results obtained by applying the phase gradient algorithm combined with the Doppler range algorithm, a) Focused point target, b) Interpolated azimuth interrogation rate frequency of point target, c) Interpolated board interpolation rate frequency of the point target

کیفیت IRF برای بررسی عملکرد روش تمرکز رادار دهانه مصنوعی ارائه شده ارزیابی می‌شود، در شبیه‌سازی، دقت تفکیک آزیموت محاسبه شده برابر با $2/24$ متر است و دقت تفکیک آزیموت اندازه‌گیری شده تقریباً برابر با $2/29$ متر است، همچنین مقادیر نسبت لوب بیشینه به لوب کناری (PSLR) در حدود $12/57$ - دسیبل اندازه‌گیری شده است و نسبت لوب اصلی به تجمیع لوب‌های کناری (ISLR) آن تقریباً برابر با $9/68$ - دسیبل اندازه‌گیری شده است. دقت تفکیک بُرد محاسبه شده برابر با $1/89$ متر است و دقت تفکیک بُرد مایل اندازه‌گیری تقریباً برابر با $1/94$ متر است، همچنین مقادیر PSLR حدود $13/57$ - دسیبل اندازه‌گیری شده است و ISLR آن تقریباً برابر با $10/26$ - دسیبل اندازه‌گیری شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج بدون خطا کسب می‌شود و عملکرد روش ارائه شده پیشنهادی تأیید می‌شود. به عبارت دیگر، بر اساس روش‌های پردازش ارائه شده، تشکیل تصویر رادار دهانه مصنوعی فضاپایه به‌درستی در شبیه‌سازی‌های اجرا می‌شود. برای تأیید اثربخشی روش‌های ارائه شده، تشکیل تصویر را با استفاده از روش‌های متمرکزسازی برای داده‌های خام استفاده شده انجام گرفته تا سیستم رادار دهانه مصنوعی فضاپایه مربوط به شرکت هوافضای فرانسوی-ایتالیایی^۵ ایجاد شود. این داده‌های خام رادار دهانه مصنوعی توسط ابزار توسعه داده شده در چارچوب ماهواره گُسمو-اسکای مد^۶ به‌منظور درک بهتر مأموریت و جنبه‌های پردازش داده‌ها تولید می‌شود، که به‌صورت تصویری با دید مستقیم که در حالت نقشه نواری ماهواره رادار دهانه مصنوعی باند X برای مسیر باریک تولید می‌شود که در بُرد زمین 27 کیلومتر و در آزیموت 48 کیلومتر است.

نتایج متمرکزسازی داده‌های خام برای ماهواره گُسمو-اسکای مد^۶ به این صورت است که مقادیر میانگین دقت تفکیک بُرد مایل اندازه‌گیری شده، نسبت لوب بیشینه به لوب کناری و نسبت لوب اصلی به تجمیع لوب‌های کناری برای IRF‌های نقطه‌ای وزن-دار نشده در تصویر متمرکز شده به ترتیب، در حدود $1/83$ متر، $13/23$ - دسیبل و $10/30$ - دسیبل است. مقادیر میانگین دقت تفکیک آزیموت اندازه‌گیری شده، نسبت لوب بیشینه به لوب کناری و نسبت لوب اصلی به تجمیع لوب‌های کناری برای IRF‌های هدف نقطه‌ای وزن‌دار نشده به ترتیب در حدود $2/06$ متر، $12/74$ - دسیبل و $9/54$ - دسیبل است. این نتایج اثر بخشی روش‌های ارائه شده را نشان می‌دهند. یعنی، عملکرد تشکیل تصویر رادار دهانه مصنوعی فضاپایه با استفاده از روش ارائه

شده برای داده‌های خام بسیار خوب است، به طوری که تأثیرات مختلف القا شده از سنسور رادار دهانه مصنوعی واقعی منعکس می‌شود.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روش‌هایی را برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی واقعی سیستم رادار دهانه مصنوعی فضاپایه ارائه کردیم و همچنین داده‌های خام را به دست آوردیم. برای شبیه‌سازی و مدل‌سازی ما، مشخصات اصلی سیستم رادار دهانه مصنوعی ماهواره واقعی منعکس شد که مربوط به حالت/دینامیک سنسور، مشاهده‌ی هدف، الگوهای پرتو آنتن، خطاهای نشانه‌روی پرتو آنتن و تولید داده‌های خام است.

آنالیزها بر اساس شبیه‌سازی انجام شده اثربخشی روش‌های ارائه شده را نشان داده است. در شبیه‌سازی، روش ارائه شده خطاهای فازی القا شده توسط خطاهای نشانه‌روی پرتو آنتن را جبران سازی می‌کند. نتایج متمرکزسازی داده‌های خام، مقدار محاسبه شده دقت تفکیک بُرد مایل برابر ۱/۸۹ متر و مقادیر میانگین دقت تفکیک بُرد مایل اندازه‌گیری شده، نسبت لوب بیشینه به لوب کناری (PSLR) و نسبت لوب اصلی به تجمیع لوب‌های کناری (ISLR) برای IRFهای نقطه‌ای وزن‌دار نشده در تصویر متمرکز شده به ترتیب، در حدود ۱/۹۴ متر، ۱۳/۵۷- دسیبل و ۱۰/۲۶- دسیبل بود.

مقدار محاسبه شده دقت تفکیک آزمون برابر ۲/۲۴ متر و مقادیر میانگین دقت تفکیک آزمون اندازه‌گیری شده، PSLR و ISLR برای IRFهای هدف نقطه‌ای وزن‌دار نشده به ترتیب در حدود ۲/۲۹ متر، ۱۲/۵۷- دسیبل و ۹/۶۸- دسیبل بود. این نتایج اثر بخشی روش‌های ارائه شده را نشان می‌دهند. یعنی، عملکرد تشکیل تصویر رادار دهانه مصنوعی فضاپایه با استفاده از روش ارائه شده برای داده‌های خام بسیار خوب است، به طوری که تأثیرات مختلف القا شده از سنسور رادار دهانه مصنوعی واقعی منعکس می‌شود. بنابراین این نتایج، روش‌های ما را برای تشکیل تصویر رادار دهانه مصنوعی فضاپایه تأیید می‌کند. بررسی دقیق‌تر خطاهایی که باعث تخریب شدید تصویر می‌شود، پرداخته شده است. این خطاها شامل سرعت مؤثر حسگر، فرکانس داپلر و سخت‌افزار سنسور رادار دهانه مصنوعی فضاپایه است و همچنین اثربخشی روش ارائه شده از طریق متمرکزسازی داده‌های خام رادار دهانه مصنوعی فضاپایه واقعی برای حالت متمرکز^۷، ارزیابی شده است.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از پایان‌نامه دوره کارشناسی‌ارشد در دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از همکاران حوزه پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی و داوران محترم که ما را در انجام و ارتقای کیفی این مقاله یاری نموده‌اند، اعلام نمایند.

References

مراجع

- [1] Y. Zhang, D. Zhu, Y. Mao, X. Yu, J. Zhang, Y. Li, "Multitrotors video synthetic aperture radar: System development and signal processing", IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, vol. 35, no. 12, pp. 32-43, Dec. 2020 (doi: 10.1109/MAES.2020.3000318).
- [2] R. Feger, A. Haderer, A. Stelzer, "Experimental verification of a 77-GHz synthetic aperture radar system for automotive applications", Proceeding of the IEEE/ICMIM, pp. 111-114, Mar. 2017 (doi: 10.1109/ICMIM.2017.7918869).
- [3] F. Fembacher, F.B. Khalid, G. Balazs, D.T. Nugraha, A. Roger, "Real-time synthetic aperture radar for automotive embedded systems", Proceeding of the IEEE/EuRAD, pp. 517-520, Madrid, Spain Sept. 2018 (doi: 10.23919/EuRAD.2018.8546620).
- [4] I. Cumming, F.H. Wong, "Digital processing of synthetic aperture radar data, algorithms and implementation", Ed. Norwood, Massachusetts: Artech House, 2005.
- [5] S.H. Shim, Y.M. Ro, "Practical synthetic aperture radar image formation based on realistic spaceborne synthetic aperture radar modeling and simulation", Journal of Applied Remote Sensing, vol. 7, no. 1, Jan. 2013 (doi: 10.1117/1.jrs.7.073494).

- [6] M.A. Fouad, A. Azouz, A.A. Mashaly, A.E. Abdalla, "SAR image formation enhancement using effective velocity estimation method", *Proceeding of the ASAT*, vol. 19, no. 19, pp. 1-9, Cairo, Egypt, April 2021 (doi: 10.1088/1757-899X/1172/1/012012).
- [7] F. Nunziata, A. Buono, M. Migliaccio, G. Benassai, D.D. Luccio, "Shoreline erosion of microtidal beaches examined with UAV and remote sensing techniques", *Proceeding of the IEEE/IWMSLMSHPMS*, pp. 162-166, Bari, Italy, Oct. 2018 (doi: 10.1109/MetroSea.2018.8657843).
- [8] Z. Li, D. Su, H. Zhu, W. Li, F. Zhang, R. Li, "A fast synthetic aperture radar raw data simulation using cloud computing", *Sensors*, vol. 17, no. 1, Article Number: 113, 2017 (doi: 10.3390/s17010113).
- [9] C. S. Ku, K. S. Chen, P. C. Chang, Y. L. Chang, "Imaging simulation for synthetic aperture radar: A full-wave approach", *Remote Sensing*, vol. 10, no. 9, Article Number: 1404, 2018 (doi: 10.3390/rs10091404).
- [10] L. Yang, "Efficient High-Speed Strip-Mode SAR Raw Signal Simulator of Extended Scene Included Static and Moving Targets", *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 86, pp. 125-134, 2019 (doi: 10.2528/PIERM19080901).
- [11] Z. Guo, Z. Fu, J. Chang, L. Wu, N. Li, "A Novel High-Squint Spotlight SAR Raw Data Simulation Scheme in 2-D Frequency Domain", *Remote Sensing*, vol. 14, no. 3, Article Number: 651, 2022 (doi: 10.3390/rs14030651).
- [12] R. Li, J. Li, "Precise simulation of spaceborne synthetic aperture radar and its evaluation", In *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pp. IV - 1304-IV - 1307, 2008 (doi: 10.1109/IGARSS.2008.4779970).
- [13] L. Feng, C. S. Li, H. P. Xu, "Data simulation system of distributed spaceborne SAR", In *IEEE Asian-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar*, pp. 373-377, 2009 (doi: 10.1109/APSAR.2009.5374336).
- [14] C. Zhu, Z. Xiang, K. Wang, X. Liu, "A two-level simulator for spaceborne SAR", In *IEEE Asian-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar*, pp. 369-372, 2009 (doi: 10.1109/APSAR.2009.5374339).
- [15] O. Dogan, M. Kartal, "Efficient stripmap-mode SAR raw data simulation including platform angular deviations", *IEEE Geoscience Remote Sensing Letters*, vol. 8, no. 4, pp. 784-788, 2011 (doi: 10.1109/LGRS.2011.2112633).
- [16] M. Schlutz, "Synthetic Aperture Radar Imaging Simulated in MATLAB", San Luis Obispo, CA: California Polytechnic State University San Luis Obispo California, Master's Thesis, 2007 (doi: 10.15368/theses.20-09.106).
- [17] P. R. Mason, "MATLAB Simulation of Two-Dimensional SAR Imaging By Range Doppler Algorithm", San Luis Obispo, CA: California Polytechnic State University San Luis Obispo California, Master's Thesis, 2007.
- [18] D. Feng, D. An, X. Huang, Y. Li, "A phase calibration method based on phase gradient autofocus for airborne holographic SAR imaging", *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 16, no. 12, pp. 1864-1868, 2019 (doi: 10.1109/LGRS.2019.2911932).
- [19] D.E. Wahl, P.H. Eichel, D.C. Ghiglia, C.V. Jakowatz, "Phase gradient autofocus—a robust tool for high resolution SAR phase correction", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 30, no. 3, pp. 827-835, 1994 (doi: 10.1109/7.303752).
- [20] S.Y. Kim, N.H. Myung, M.J. Kang, "Antenna mask design for sar performance optimization", *IEEE Geoscience Remote Sensing Letters*, vol. 6, no. 3, pp. 443-447, July 2009 (doi: 10.1109/LGRS.2009.20163-56).
- [21] M. Stangl, R. Werninghaus, B. Schweizer, C. Fischer, M. Brandfass, J. Mittermayer, H. Breit, "TerraSAR-X technologies and first results", *Proceeding of Institution of Engineering and Technology-Radar, Sonar Navig.*, vol. 153, no. 2, pp. 86-95, Apr. 2006 (doi: 10.1049/ip-rsn:20045119).
- [22] J. Chen, B. Liang, J. Zhang, D.G. Yang, Y. Deng, M. Xing, "Efficiency and robustness improvement of airborne SAR motion compensation with high resolution and wide swath", *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 19, pp. 1-5, Oct. 2020 (doi: 10.1109/LGRS.2020.3031304).
- [23] Y. Miao, J. Wu, J. Yang, "Azimuth migration-corrected phase gradient autofocus for bistatic SAR polar format imaging", *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 18, no. 4, pp. 697-701, May 2020 (doi: 10.1109/LGRS.2020.2984909).
- [24] Y. Ji, Z. Dong, Y. Zhang, Q. Zhang, B. Yao, "Extended scintillation phase gradient autofocus in future spaceborne P-band SAR mission", *Science China Information Sciences*, vol. 64, no. 11, pp. 1-17, Oct. 2021 (doi: 10.1007/s11432-019-2797-4).
- [25] Y. Ren, S. Tang, Q. Dong, G. Sun, P. Guo, C. Jiang, J. Han, L. Zhang, "An improved spatially variant MOCO approach based on an MDA for high-resolution UAV SAR imaging with large measurement errors", *Remote Sensing*, vol. 14, no. 11, Article Number: 2670, June 2022 (doi: 10.3390/rs14112670).
- [26] V.A. Chobotov, "Orbital considerations for space-based radar, Chapter 2 in space-based radar handbook", Artech House, pp. 47-82, 1989.

- [27] T.C. Cheston, J. Frank, "Phased array radar antennas, Chapter 7 in radar handbook", 2th Edition, McGraw-Hill, pp. 7.1–7.36, 1990.
- [28] G.D. Martino, A. Iodice, D. Poreh, D. Riccio, "Pol-SARAS: A fully polarimetric SAR raw signal simulator for extended soil surfaces", IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, vol. 56, no. 4, pp. 2233-2247, April 2018 (doi: 10.1109/TGRS.2017.2777606).

زیر نویس‌ها

1. Earth center earth fix
2. Drift
3. Jitter
4. TerraSAR-X
5. Thales alenia space
6. COSMO-SkyMed
7. Spotlight