

Azimuth Resolution Enhancement of Real Aperture Radar Using the Accelerated Sparse-TSVD algorithm and Calibrated Radiation Pattern for Discrete and Distributed Targets

M.Zoofaghari^{1*}, A.Rahimi Fard², T.Gholipour³, S.Sadat Shams⁴, H.Safdarkhani⁵

¹: Assistant Professor, Yazd University, Yazd, Iran

(Received:2023 /04/10, Revised: 2023/07/11, Accepted: 2023/07/30, Published: 2023/08/24)

DOR:<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1402.11.1.9.5>

Abstract

Real aperture radar (RAR) is appealing for land surveying due to its environmental resilience, wide coverage, simplicity, and portability. However, the relatively wide antenna beam results in limited azimuth resolution, constraining image clarity. While super-resolution algorithms can enhance resolution, they face significant challenges when the antenna phase center shifts during scanning. This paper proposes a novel approach that employs a complex antenna pattern based on point target reflections. The proposed method demonstrates an approximate six-fold improvement in azimuth resolution for X-band RAR data, effectively overcoming the limitations of conventional methods in scanning RAR systems.

Keywords: : Real aperture radar (RAR), Azimuth resolution, Radar imaging, Calibrated radiation pattern, Azimuth scanning

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: zoofaghari@yazd.ac.ir

افزایش وضوح تصاویر رادار دهانه حقیقی در راستای سمت با استفاده از الگوریتم sparse-TSVD تسریع شده و الگوی تشعشی کالیبره شده برای اهداف گسسته و پیوسته

محمد ذوالفقاری^{۱*}، علی اکبر رحیمی فرد^۲، طیبه قلی پور^۳، سپیده السادات شمس^۴، هادی صفدر خانی^۵

۱- استادیار، ۲- دانشجوی دکتری، ۳- دکترای ۴- کارشناسی ارشد، ۵- استادیار، دانشگاه یزد، یزد، ایران

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۲۱، بازنگری: ۱۴۰۲/۰۴/۲۰، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۰۸، انتشار: ۱۴۰۲/۰۶/۰۲)

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1402.11.1.9.5>



* 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

تصویربرداری راداری عوارض زمین به دلیل سازگاری بالا با ملاحظات زیست محیطی و شرایط آب و هوایی همواره برای کاربردهای نقشه برداری و آمایش سرزمین مورد توجه قرار گرفته است. رادارهای دهانه حقیقی با پوشش چرخشی به دلیل ناحیه پوشش زیاد، سادگی تجهیزات و قابلیت حمل مناسب می توانند گزینه مطلوبی برای تصویربرداری راداری محسوب شوند. با این وجود، پهنای بیم نسبتاً وسیع آنتن به کاررفته در این رادارها برای رسیدن به قدرت تفکیک بالا مناسب نیست. گسترش الگوریتم های پردازشی برای رسیدن به تصاویر با قدرت تفکیک بالا بر پایه حل معادله ماتریسی وابسته به الگوی آنتن موضوع اصلی تحقیقات در این حوزه را در سال های اخیر به خود اختصاص داده است. جابه جاشدن مرکز فاز آنتن در زمان چرخش می تواند عملکرد این روش ها را با چالش مواجه کند. برای رفع این چالش، استفاده از الگوی مختلط به جای الگوی استاندارد دامنه که بر اساس موج برگشتی از یک هدف نقطه ای در ناحیه تست به دست می آید در این مقاله پیشنهاد شده است. نتایج به دست آمده از داده های برداشتی از یک رادار پیاده سازی شده در باند X نشان می دهد که روش پیشنهادی می تواند به صورت سرانگشتی تا میزان شش برابر قدرت تفکیک رادار دهانه حقیقی در راستای سمت را افزایش دهد.

کلیدواژه ها: رادار دهانه حقیقی، قدرت تفکیک سمت، تصویربرداری راداری، الگوی تشعشی کالیبره شده، پوشش چرخشی سمت

۱- مقدمه

راداری به دلیل وابستگی کم به شرایط محیطی (از جمله شفافیت محیط، شرایط آب و هوایی)، می تواند جایگزین مناسبی برای روش های مرئی باشند.

برای رسیدن به تصاویر راداری دو بُعدی با وضوح بالا لازم است که به طور هم زمان وضوح برد و سمت ارتقا یابد. برای سیگنال های پالسی، وضوح برد توسط پهنای زمانی پالس مشخص می شود و بنابراین وضوح برد بالا با ارسال سیگنال های باریک - پالس و یا با مدولاسیون فرکانس خطی^۲ و فشرده سازی پالس حاصل می شود [۸، ۹]. در رابطه با افزایش وضوح تصویر در راستای سمت به صورت عمده دودسته روش تحت عنوان رادار دهانه مجازی^۳ و رادار

تصویربرداری و سنجش عوارض زمین از جمله پوشش های گیاهی، نواحی بیابانی و کوهستانی و مناطق مسکونی همواره در حوزه نقشه برداری و آمایش محیطی مورد توجه بوده است [۱]. در این رابطه تصویربرداری مرئی و راداری بیشتر از سایر روش های سنجش از دور مدنظر پژوهشگران قرار گرفته است [۷-۲]. تصاویر مرئی می توانند جزئیات اهداف مورد نظر را با وضوح بالا آشکارسازی کنند. با این همه، با توجه به محدودیت این نوع تصویربرداری در محیط کدر و در هنگام شب و در شرایط پر گردوغبار، فراهم کردن تصاویر مرئی ۲۴ ساعته و در فواصل دور بسیار سخت و بعضاً غیرممکن است. روش های تصویربرداری

² Linear frequency modulation (LFM)

³ Synthetic aperture RADAR (SAR)

الگوی آنتن را برای ما فراهم کند. برای به دست آوردن تابع پراکندگی از هدف، روش‌های بی‌زین^۳ [۱۱، ۱۲] و روش‌های تخمین طیف [۱۳-۱۵] نیز پیشنهاد شده‌اند که مبتنی بر بهینه‌سازی یک تابع هدف هستند. این روش‌ها ماهیت تصادفی دارند و به داده‌های تجربی زیادی نیاز دارند و مدنظر این مقاله قرار نگرفته‌اند.



(الف)



(ب)

شکل (۱). انواع رادار تصویربرداری: (الف) رادار دهانه حقیقی [۱۶] و (ب) رادار دهانه مجازی [۱۷]

با فرض اینکه جریان‌های معادل روی دهانه آنتن به صورت یکنواخت باشند، الگوی تشعشعی آنتن را می‌توان به صورت تابع سینک در نظر گرفت. براین اساس، مؤلفه‌های فرکانس بالا در حوزه فرکانس مکانی در فرآیند کانولوشن الگوی و بردار پراکندگی از هدف از دست می‌رود؛ لذا مسئله دی کانولوشن به طور معمول بدو وضع است و روش حداقل مربعات^۴ سنتی برای حل آن مناسب نیست. به دلیل بدو وضع بودن ماتریس اندازه‌گیری شده الگوی آنتن (با تعریف هادامارد^۵)، توان نویز در طول فرآیند دی کانولوشن تقویت می‌شود و وضوح سمت به سختی بهبود می‌یابد. به طور کلی توان سیگنال به توان نویز^۶ سیگنال برگشتی

دهانه حقیقی^۱ در ادبیات موضوع مورد بحث قرار گرفته‌اند (شکل (۱)). در رادار دهانه مجازی از دو آنتن با پهنا بی‌م وسیع (به طوری که بتواند کل ناحیه تصویربرداری را پوشش دهد) یکی به عنوان فرستنده و یکی به عنوان گیرنده که بر روی یک ریل با طول مشخص حرکت می‌کنند استفاده می‌شود. سیگنال‌های برگشتی از محیط در هر نقطه قرارگیری آنتن روی ریل و به صورت پشت‌سرهم برداشت و در مرحله بعد با استفاده از الگوریتم برد - داپلر، $\omega - K$ و یا روش معکوس زمانی، پردازش و تصاویر با قدرت تفکیک سمت که به طول ریل پوشش بستگی دارد حاصل می‌شوند. این در حالیست که در یک رادار دهانه حقیقی، آنتن حرکت انتقالی ندارد و پوشش زاویه‌ای محیط با استفاده از یک آنتن فرستنده-گیرنده (با دو آنتن یکی به عنوان فرستنده و دیگری به عنوان گیرنده) با حرکت چرخشی آنتن در یک مکان ثابت انجام می‌شود. در این رادارها، قدرت تفکیک زاویه‌ای به پهنا بی‌م آنتن بستگی دارد. قدرت تفکیک بالا مستلزم پهنا بی‌م باریک و ابعاد بزرگ آنتن است که در برخی کاربردها می‌تواند نصب، راه‌اندازی و جابه‌جایی آنتن را با چالش مواجه کند. به همین دلیل، الگوریتم‌های افزایش قدرت تفکیک در راستای سمت، برای پردازش داده‌های زاویه‌ای این رادارها پیشنهاد شده‌اند.

در رادار دهانه حقیقی، می‌توان سیگنال برگشتی در راستای سمت را به صورت کانولوشن^۲ بین تابع پراکندگی اهداف و الگوی تشعشعی آنتن مدل کرد. واضح است که فرآیند کانولوشن باعث ظاهر شدن اثر پراکندگی اهداف کنار هم و کاهش قدرت تفکیک در تصاویر به دست آمده شود. براین اساس می‌توان یک معادله ماتریسی تشکیل داد که در آن ضرایب پراکندگی از هدف در زوایای مختلف به عنوان مجهول معادله طی یک فرآیند بهینه‌سازی و یا محاسبه ماتریس معکوس محاسبه شود [۱۰]. برای این منظور لازم است در ابتدا الگوی تشعشعی آنتن در زاویه‌های مختلف استخراج شود. یک هدف نقطه‌ای دارای پراکندگی به فرم تابع ضربه در راستای مکان است و لذا میدان پراکنده شده از آن با توجه به تئوری کانولوشن، می‌تواند تابع

³ Bayesian⁴ Least square⁵ Hadamard⁶ Signal to Noise Ratio (SNR)¹ Real aperture RADAR (RAR)² Convolution

ماتریس بریده شده‌ی الگوی آنتن برای بازسازی مدل کانولوشنی و تشکیل تابع هدف استفاده شده است. به دلیل مشتق‌ناپذیر بودن نرم l_1 ، روش نرم باز وزن‌دهی شده‌ی تکرارشونده^۴، برای حل تابع هدف به کار رفته است [۲۷]. روش IRN، بر اساس تقریب مقدار کمینه‌ی نرم l_1 با یک سری از کمینه‌های نرم l_2 پیاده‌سازی می‌شود و در آن حجم زیاد محاسبات در فرآیندهای معکوس‌گیری و ضرب‌های ماتریسی مخصوصاً زمانی که ناحیه‌ی پوشش وسیع، تعداد نقاط سمت زیاد و PRF بزرگ باشد وجود دارد. در واقع با زیاد شدن تعداد نقاط سمت، پیچیدگی محاسبات به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد. این موضوع لزوم به‌کارگیری الگوریتم‌های مناسب جهت سرعت بخشیدن به فرآیند حل معادلات را تبیین می‌کند. در این رابطه، روش sparse-TSVD تسریع شده پیشنهاد شده است [۲۸]. در این روش به‌جای استفاده از ماتریس اندازه‌گیری آنتن بریده شده از ماتریس‌های قطری و واحد^۵ بریده شده برای بازسازی مدل کانولوشنی سیگنال استفاده شده است. بر این اساس، ابعاد ماتریس سیگنال برگشتی و ماتریس اندازه‌گیری آنتن بازسازی شده و در نتیجه پیچیدگی محاسبات ضرب ماتریسی به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش یافته و سرعت الگوریتم افزایش می‌یابد.

۱-۱- کارهای انجام شده در این مقاله

در تمام مقالاتی که به بحث بهبود قدرت تفکیک سمت در رادار دهانه حقیقی می‌پردازند الگوی آنتن نقش اساسی بازی می‌کند؛ چراکه مدل پراکندگی از هدف بر اساس الگوی آنتن معرفی و حل شده است. در این مقالات، عمدتاً دامنه الگوی آنتن موردتوجه قرار گرفته است. با چرخش آنتن، مرکز فاز آن جابه‌جا شده و براین‌اساس رفتار فازی سیگنال دریافتی در زاویه‌های مختلف متفاوت خواهد بود. عدم توجه به این موضوع می‌تواند موجب تخریب قدرت تفکیک در نتایج به‌دست‌آمده از الگوریتم‌های مختلف شود. در این مقاله استفاده از الگوی مختلط آنتن از یک هدف ناحیه جستگی به‌جای الگوی دامنه اندازه‌گیری شده در اتاق تست برای پیاده‌سازی الگوریتم‌های وضوح‌بالا پیشنهاد شده است. الگوی مختلط با استفاده از داده‌های برگشتی از یک هدف مشخص در فضای جستگی استخراج می‌شود. در این الگوی، اثر تمامی تا خیرهای سیستمی ناشی از کابل‌ها و مدارات فرستنده - گیرنده و همچنین تغییر مرکز فاز آنتن در اثر چرخش وجود دارد و لذا در فرآیند اعمال الگوریتم‌های وضوح‌بالا و بازسازی تصویر، این اثرات جبران‌سازی می‌شوند و قدرت تفکیک تصویر افزایش می‌یابد. باتوجه‌به اینکه نقطه کالیبراسیون از فضای جستگی انتخاب می‌شود روش پیشنهادی وابستگی کمی به شرایط

یکی از پارامترهای اساسی است که روی عملکرد روش‌های دی کانولوشن تأثیر می‌گذارد. در شرایطی که SNR پایین باشد، عملکرد اکثر روش‌های دی کانولوشن افت شدیدی خواهد داشت. در این رابطه، روش‌های تنظیم‌سازی^۱ برای خوش‌وضع کردن ماتریس الگوی آنتن پیشنهاد شده است. ثابت می‌شود ناپایداری جواب معادله عمدتاً به علت مقادیر منفرد کوچک ماتریس الگوی آنتن هستند که بردارهای منفرد متناظر آنها فضای نوین ماتریس را گسترش می‌دهند. خوش‌وضع کردن ماتریس می‌تواند با حذف مقادیر منفرد کوچک انجام شود و براین‌اساس یکی از روش‌های تنظیم‌سازی، روش تجزیه مقادیر منفرد بریده شده^۲ است [۱۸-۲۱]. باوجود سادگی، انتخاب صحیح تعداد مقادیر منفرد فضای نوین در روش تنظیم‌سازی TSVD اهمیت زیادی دارد؛ چراکه حذف بیش از حد مقادیر منفرد باعث ازبین‌رفتن بخشی از اطلاعات و کاهش وضوح تصویر خواهد شد. از طرف دیگر حفظ تعداد بیش از حد مقادیر منفرد منجر به نوسانات زیاد در تصویر به‌دست‌آمده خواهد شد. از دیگر روش‌های تنظیم‌سازی روش تیخانوف است [۲۲]. در این روش به‌جای اینکه حذف مقادیر منفرد کوچک به‌صورت دفعی با در نظر گرفتن یک سطح آستانه انجام شود، با تعریف یک تابع مشخص، اثر مقادیر منفرد کوچک فقط تقلیل داده می‌شود. این روش نیز مانند TSVD بهبود وضوح را محدود می‌کند؛ چراکه از نرم l_1 استفاده می‌کند و عملکرد وضوح‌بالا توسط نرم l_1 محدود خواهد شد. با وجود قدرت تفکیک محدود، دو روش مذکور قابلیت حذف نویز بالایی دارند و می‌توانند در شرایط سیگنال به نویز پایین نیز عملکرد مناسبی داشته باشند.

روش‌های تنظیم‌سازی تُنک^۳ بر پایه نرم l_1 هم‌اکنون به‌طور گسترده در تصویربرداری راداری استفاده شده‌اند [۲۳-۲۵]. در این روش‌ها در یک مرحله ابعاد ماتریس الگو که یک ماتریس تُنک است با استفاده از یک روش تنظیم‌سازی مثل روش TSVD کاهش می‌یابد و در مرحله بعد یک معادله هدف با قید نرم l_1 برای تنظیم‌سازی، با استفاده از ماتریس جدید تشکیل می‌شود. اینکار به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای هزینه‌ی محاسباتی را کاهش و سرعت همگرایی حل معادله هدف را افزایش می‌دهد. اگرچه وضوح روش‌های تنظیم‌سازی مبتنی بر نرم l_1 خیلی بالا است اما این روش‌ها به نویز حساس هستند و در محیط‌هایی که SNR پایین باشد به درستی کار نمی‌کنند. در این رابطه Wu و همکاران [۲۶] برای کاهش ابعاد ماتریس الگو روش sparse-TSVD را پیشنهاد داده‌اند. در این روش از

⁴ Iterative Reweighted Norm (IRN)

⁵ Unitary

¹ Regularization

² Truncated Singular Value Decomposition (TSVD)

³ Sparse

[۲۸]:

$$H = \begin{bmatrix} h(\theta_0) & \dots & h(\theta_{-l}) & 0 & \dots \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \\ h(\theta_l) & & \ddots & & h(\theta_{-l}) \\ 0 & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \dots & 0 & h(\theta_l) & \dots & h(\theta_0) \end{bmatrix} \quad (2)$$

که در آن بردار $[h(\theta_{-l}), \dots, h(\theta_0), \dots, h(\theta_l)]$ نمونه‌های الگوی تشعشی آنتن را در زوایای $[\theta_{-l}, \dots, \theta_0, \dots, \theta_l]$ مشخص می‌کند. تعداد نمونه‌ها در راستای سمت $PRF = \frac{\Omega}{\omega}$ است که در آن Ω بازه‌ی زاویه‌ای تصویربرداری و ω سرعت زاویه ای پویا را نشان می‌دهد. بنابراین ابعاد ماتریس H برابر با $N \times N$ خواهد بود. در مواردی که بازه‌ی زاویه‌ای تصویربرداری وسیع، سرعت پویا پایین و نرخ تکرار پالس بالا باشد، ابعاد بردار سیگنال برگشتی s و ماتریس کانولوشن H بزرگ خواهد شد و پیچیدگی محاسباتی افزایش خواهد یافت. به دلیل ماهیت کانولوشن الگوی تشعشی آنتن با تابع پراکندگی از اهداف، وضوح تصویر در راستای سمت پایین است و لذا روش دی کانولوشن بر پایه‌ی حل معادله‌ی ماتریسی (۱) برای افزایش وضوح سمت پیشنهاد شده است. در ادامه حل این معادله با روش sparse-TSVD تسریع شده بررسی می‌شود.

۲-۱- مروری بر روش sparse-TSVD تسریع شده

این روش بر پایه‌ی تجزیه‌ی مقادیر منفرد (SVD) ماتریس H پیاده‌سازی می‌شود [۲۸]:

$$H = U \Sigma V^T. \quad (3)$$

در این رابطه U و V ماتریس‌های واحد با ابعاد $N \times N$ هستند و T مزدوج ترانپوز ماتریس را نشان می‌دهد. Σ نیز یک ماتریس قطری است و σ_i ها، مقادیر منفرد H را مشخص می‌کنند که به صورت نزولی روی قطر Σ ($\sigma_1 > \sigma_2 > \dots > \sigma_N$) قرار می‌گیرند. بردار ضریب پراکندگی توسط ماتریس معکوس به صورت زیر تخمین زده می‌شود [۲۸]:

$$\hat{x} = H^{-1} s = x + V \Sigma U^T n. \quad (4)$$

همان‌طور که در رابطه (۴) مشخص است، مقادیر منفرد کوچک ماتریس H که مربوط به فضای نویز این ماتریس هستند باعث تقویت نویز موجود در داده‌های اندازه‌گیری و ناپایداری جواب خواهند شد. برای بهبود بدوضعی ماتریس H ، می‌توان از روش TSVD استفاده کرد [۲۵، ۲۶]. در این حالت، ماتریس کانولوشن با مقادیر منفرد بریده شده، H_k به صورت زیر بیان می‌شود [۲۸]:

$$H_k = U_k \Sigma_k V_k^T. \quad (5)$$

محیطی خواهد داشت. براین اساس در این مقاله، الگوی مختلط به‌دست‌آمده از هدف نقطه‌ای در ناحیه‌ی جستجو، الگوی کالیبره شده و الگوی دامنه آنتن که در اتاق تست به دست می‌آید الگوی کالیبره‌نشده نامیده می‌شود. دامنه و فاز دریافتی از آنتن در زوایای مختلف، با در نظر گرفتن یک هدف تقریباً نقطه‌ای با برگشتی بالا، اندازه‌گیری می‌شود. در این پژوهش برای استخراج الگوی کالیبره شده آنتن از یک سه‌وجهی که در محل مناسب نسبت به آنتن رادار قرار گرفته است استفاده می‌شود. برای ارزیابی روش پیشنهادی از یک رادار FMCW باند X با دو آنتن مجزای بوقی برای ارسال و دریافت سیگنال به همراه سامانه موقعیت‌دهی و پویا در راستای سمت استفاده شده است. سایت مورد نظر تصویربرداری در این مقاله، قسمتی از ناحیه‌ی بایر روبروی آزمایشگاه عایق و فشارقوی دانشگاه یزد است که در آن از ستون‌های سیمانی برای ایجاد اهداف گسسته استفاده شده است. در بخش نتایج، تصاویر حاصل از به‌کارگیری الگوی کالیبره شده و الگوی کالیبره‌نشده در الگوریتم sparse-TSVD تسریع شده مقایسه خواهند شد. تصویربرداری از یک ناحیه که شامل اهداف گسسته و پیوسته می‌شود انجام گرفته است. در انتها یک معیار سرانگشتی عملی برای مقدار کمی وضوح سمت برحسب پهنای بیم آنتن ارائه خواهد شد که در مقاله‌های قبلی به آن پرداخته نشده است. از طرف دیگر، بهبود قدرت تفکیک در راستای سمت با استفاده از روش پیشنهادی در مقایسه با روش‌های قبلی به‌صورت کمی بررسی خواهد شد.

در بخش بعد مدل کانولوشنی پراکندگی از هدف ارائه می‌شود و در ادامه آن روش sparse-TSVD تسریع شده مرور می‌شود. در نهایت مشخصات سیستم راداری تحت تست تشریح خواهد شد. در بخش نتایج عددی، تصاویر به‌دست‌آمده از سایت تصویربرداری ارائه و عملکرد روش پیشنهادی به‌صورت کمی ارزیابی خواهد شد. در نهایت این مقاله با جمع‌بندی دستاوردها و کارهای پیشنهادی برای آینده به پایان می‌رسد.

۲- پردازش تفکیک بالا در راستای سمت

همان‌طور که اشاره شد در پردازش RAR، سیگنال برگشتی در زوایای مختلف سمت را می‌توان به‌صورت کانولوشن الگوی تشعشی آنتن در ضریب پراکندگی اهداف در نظر گرفت. با در نظر گرفتن نویز جمع‌شونده گوسی سفید، مدل کانولوشنی سمت به‌صورت زیر نوشته می‌شود [۲۸]:

$$s = Hx + n. \quad (1)$$

که در آن s بردار سیگنال دریافتی، x بردار ضرایب پراکندگی و n بردار نویز با توزیع گوسی است. در اینجا، H ماتریس کانولوشن ساخته شده با الگوی تشعشی آنتن را به‌صورت زیر نشان می‌دهد

جواب‌های ناپایداری که نرم اختلاف طرف چپ و راست معادله اصلی را کمینه می‌کنند جزو جواب‌های معادله محاسبه نشوند. اگر ترم محدودیت را با نرم l_1 و با ضریب λ برای ساختن تابع هدف به کار بریم، جواب معادله به صورت زیر تخمین زده می‌شود [۲۸]:

$$\mathbf{x}^\dagger = \operatorname{argmin} \|\tilde{\mathbf{H}}\mathbf{x} - \tilde{\mathbf{s}}\|_2 + \lambda \|\mathbf{x}\|_1. \quad (10)$$

جواب معادله (۱۰) تحت عنوان جواب تنظیم‌سازی شده به روش تیخانوف شناخته می‌شود. برای حل معادله هدف داده شده در (۱۰)، تحلیل‌کننده‌ی IRN پیشنهاد شده است. ابتدا مقدار اولیه‌ی جواب بر اساس جواب تنظیم‌ساز تیخانوف به صورت زیر به دست می‌آید [۲۸]:

$$\mathbf{x}_0 = (\tilde{\mathbf{H}}^T \tilde{\mathbf{H}} + \lambda \mathbf{I})^{-1} \tilde{\mathbf{H}}^T \tilde{\mathbf{s}}. \quad (11)$$

در این مرحله تابع وزن به صورت یک ماتریس قطری به جای ماتریس همانی به کار می‌رود و در هر تکرار این ماتریس بر اساس جواب به دست آمده به روزرسانی می‌شود. برای تکرار j ام، ماتریس وزن \mathbf{W}_j و جواب معادله \mathbf{x}_{j+1} به ترتیب از روابط زیر به دست می‌آیند [۲۸]:

$$\mathbf{W}_j = \operatorname{diag}(|\mathbf{x}_j|^{-1}). \quad (11)$$

$$\mathbf{x}_{j+1} = (\tilde{\mathbf{H}}^T \tilde{\mathbf{H}} + \lambda \mathbf{W}_j)^{-1} \tilde{\mathbf{H}}^T \tilde{\mathbf{s}}. \quad (12)$$

پیچیدگی اصلی محاسبات این روش مربوط به محاسبه ماتریس معکوس $(\tilde{\mathbf{H}}^T \tilde{\mathbf{H}} + \lambda \mathbf{I})^{-1}$ و $(\tilde{\mathbf{H}}^T \tilde{\mathbf{H}} + \lambda \mathbf{W}_j)^{-1}$ (که در آن \mathbf{I} و \mathbf{W}_j ماتریس‌های قطری هستند) و از مرتبه $O(N^3)$ است. در اینجا برای کاهش بار محاسباتی از رابطه شرم-موریسون^۱ استفاده می‌شود. بر اساس این رابطه داریم [۲۸]:

$$\begin{aligned} (\tilde{\mathbf{H}}^T \tilde{\mathbf{H}} + \lambda \mathbf{W}_j)^{-1} &= \\ \frac{1}{\lambda} & \left[\mathbf{W}_j^{-1} - \mathbf{W}_j^{-1} \tilde{\mathbf{H}}^T (\mathbf{I} \right. \\ & \left. + \tilde{\mathbf{H}} \mathbf{W}_j^{-1} \tilde{\mathbf{H}}^T)^{-1} \tilde{\mathbf{H}} \mathbf{W}_j^{-1} \right], \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} (\tilde{\mathbf{H}}^T \tilde{\mathbf{H}} + \lambda \mathbf{I})^{-1} &= \frac{1}{\lambda} \left[\mathbf{I} \right. \\ & \left. - \tilde{\mathbf{H}}^T (\mathbf{I} + \tilde{\mathbf{H}} \tilde{\mathbf{H}}^T)^{-1} \tilde{\mathbf{H}} \right]. \end{aligned} \quad (14)$$

در این حالت همان‌طور که ملاحظه می‌شود پیچیدگی محاسبات از مرتبه $O(kN^2)$ خواهد بود و لذا روش sparse-TSVD

که در آن Σ_k یک ماتریس مربعی قطری با ابعاد $k \times k$ است که عناصر روی قطر آن تعداد k از بزرگترین مقادیر منفرد ماتریس \mathbf{H} خواهد بود. \mathbf{U}_k و \mathbf{V}_k^T ماتریس‌های واحد با ابعاد $N \times k$ هستند. در نهایت بردار ضریب پراکندگی تخمین زده شده با استفاده از تکنیک TSVD، \mathbf{x}^\dagger ، از رابطه زیر به دست می‌آید [۲۸]:

$$\mathbf{x}^\dagger = \mathbf{H}_k^{-1} \mathbf{s} = \mathbf{H}_k^{-1} \mathbf{H} \mathbf{x} + \mathbf{H}_k^{-1} \mathbf{n}. \quad (6)$$

در اینجا \mathbf{H}_k یک ماتریس $N \times N$ است که تنها تفاوت آن با ماتریس \mathbf{H} صفر شدن $N - k$ مقدار منفرد مربوط به فضای نویز خواهد بود. در روش $l_1 - svd$ سنتی، فرم جدید بردار سیگنال، ماتریس کانولوشن الگو و بردار نویز به ترتیب به صورت $\tilde{\mathbf{s}} = \mathbf{H}_k^{-1} \mathbf{s}$ ، $\tilde{\mathbf{H}} = \mathbf{H}_k^{-1} \mathbf{H}$ و $\tilde{\mathbf{n}} = \mathbf{H}_k^{-1} \mathbf{n}$ بازسازی می‌شود که ابعاد $\tilde{\mathbf{s}}$ ، $\tilde{\mathbf{H}}$ و $\tilde{\mathbf{n}}$ با ابعاد \mathbf{n} ، \mathbf{H} ، \mathbf{s} برابر خواهد بود. بنابراین فرم بازسازی شده‌ی معادله کانولوشن از لحاظ پیچیدگی محاسباتی نسبت به فرم اصلی تغییر نمی‌کند و تنها با توجه به حذف مقادیر منفرد کوچک، پایداری جواب بهتری خواهد داشت. با جاگذاری رابطه (۵) در (۶) داریم [۲۸]:

$$\mathbf{V}_k \Sigma_k^{-1} \mathbf{U}_k^T \mathbf{s} = \mathbf{V}_k \Sigma_k^{-1} \mathbf{U}_k^T \mathbf{H} \mathbf{x} + \mathbf{V}_k \Sigma_k^{-1} \mathbf{U}_k^T \mathbf{n}. \quad (7)$$

با ضرب ماتریسی $\Sigma_k \mathbf{V}_k^{-1}$ از سمت چپ در دو طرف معادله (۷) فرم جدید معادله به صورت زیر به دست می‌آید [۲۸]:

$$\mathbf{U}_k^T \mathbf{s} = \mathbf{U}_k^T \mathbf{H} \mathbf{x} + \mathbf{U}_k^T \mathbf{n}. \quad (8)$$

در روش $l_1 - svd$ تسریع شده از ماتریس واحد بریده شده‌ی \mathbf{U}_k^T با ابعاد $k \times N$ برای بازسازی مدل کانولوشنی سمت استفاده می‌شود که در آن $\tilde{\mathbf{s}} = \mathbf{U}_k^T \mathbf{s}$ ، $\tilde{\mathbf{H}} = \mathbf{U}_k^T \mathbf{H}$ و $\tilde{\mathbf{n}} = \mathbf{U}_k^T \mathbf{n}$ مدل کانولوشنی زیر را بر آورده می‌کنند [۲۸]:

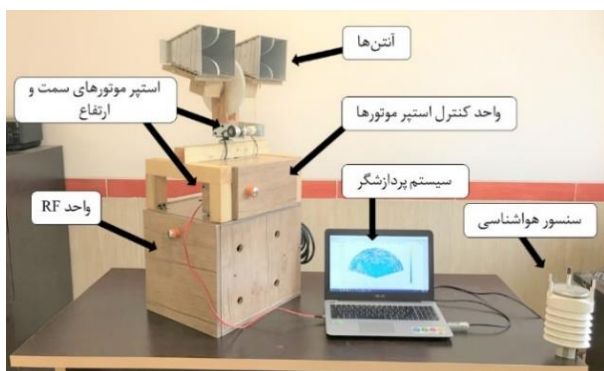
$$\tilde{\mathbf{s}} = \tilde{\mathbf{H}} \mathbf{x} + \tilde{\mathbf{n}}, \quad (9)$$

که در آن $\tilde{\mathbf{s}}$ بردار سیگنال برگشتی بازسازی شده با ابعاد $k \times 1$ ، $\tilde{\mathbf{H}}$ ماتریس کانولوشن الگوی آنتن بازسازی شده با ابعاد $k \times N$ و $\tilde{\mathbf{n}}$ بردار نویز بازسازی شده با ابعاد $k \times 1$ هستند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، انتخاب ماتریس واحد بریده شده \mathbf{U}_k^T باعث کاهش ابعاد مدل کانولوشنی اصلی و افزایش سرعت حل معادله خواهد شد. در ادامه به حل معادله (۹) با استفاده از روش تنظیم‌سازی تیخانوف پرداخته می‌شود.

در روش‌های تنظیم‌سازی، ترم محدودیت به صورت ضریبی از نرم جواب مسئله به تابع هدف اضافه می‌شود. این کار باعث می‌شود

^۱ Sherman-Morrison

نشان داده شده است. مشخصات سیگنال ارسالی و دریافتی و همچنین ویژگی‌های فرستنده و گیرنده این سیستم نیز در جدول (۲) گزارش شده است. همان‌طور که در شکل (۲) مشخص است، دو آنتن بوقی باند X به‌عنوان آنتن ارسال و دریافت در این سیستم به کار رفته‌اند و قابلیت چرخش در دو راستای سمت و ارتفاع با استفاده از سروو موتورهای تعبیه شده فراهم شده است. پهنای باند سیستم برای رسیدن به قدرت تفکیک کمتر از ۰٫۵m در راستای رنج انتخاب شده است. از طرف دیگر نرخ نمونه‌برداری گزارش شده در این جدول ملاحظات مربوط به حداکثر فاصله اهداف در پردازش‌های FMCW را برآورده می‌کند. از آن گذشته، با توجه به بررسی‌های انجام شده و با در نظر گرفتن پهنای باند آنتن، گام پویا پیشنهادی در این تحقیق می‌تواند قدرت تفکیک بهینه را در راستای سمت فراهم کند.



شکل (۲). قسمت‌های سیستم راداری استفاده شده در این مقاله

جدول (۲). مشخصات سیگنال ارسالی و دریافتی و مشخصات پویا

مقدار	عال
۹٫۶GHz	فراکانس مرکزی
۴۵۰ MHz	پهنای باند
۲۶۰ μs	طول زمانی چرخش
۱۲۵ MHz	رنج نمونه‌برداری
۱۰ dBm	توان ارسال
۱۵۰ degree	پهنای پوشش سمت
۰٫۸degree	گام پوشش سمت

ماژول‌های مختلف فرستنده و گیرنده شامل مولد سیگنال چرخش، تقسیم‌کننده توان، تقویت‌کننده با نویز پایین، میکسر و

تسریع شده توانسته است پیچیدگی محاسبات کل را از $O(N^3)$ به $O(kN^2)$ کاهش داده و به طور چشم‌گیری سرعت روش $l_1 - svd$ را مخصوصاً زمانی که N بزرگ باشد، بهبود دهد. محاسبات مربوط به روابط ۱۱ تا ۱۵ برای تمام سلول‌های برد در فضای جستجو انجام می‌شود.

در این مقاله یک معیار سرانگشتی برای انتخاب λ به صورت حاصل ضرب بزرگ‌ترین مقدار منفرد ماتریس \tilde{H} در یک ضریب ثابت در نظر گرفته می‌شود که نتایج حاصل از آن ارزیابی خواهد شد. اما انتخاب پارامتر k نیز می‌تواند در فرآیند آشکارسازی تاثیر به‌سزایی داشته باشد. مقدار پارامتر k در کارهای قبلی غالباً به صورت تجربی تعیین شده است. در این مقاله معیاری برای انتخاب این پارامتر بر اساس الگوی مقادیر منفرد ماتریس H ارائه شده است. در واقع شاخصی که در آن بیشترین تغییرات مقدار منفرد اتفاق می‌افتد به عنوان پارامتر k در نظر گرفته می‌شود. روند کامل الگوریتم sparse-TSVD تسریع شده در جدول (۱) نمایش داده شده است. در جدول (۱) مقدار M برابر با تعداد تکرار حلقه است که با افزایش آن، دقت جواب بیشتر و البته زمان محاسبه‌ی الگوریتم افزایش می‌یابد.

جدول (۱). الگوریتم sparse-TSVD تسریع شده

محاسبه SVD از ماتریس H با استفاده از رابطه (۳)
انتخاب پارامتر k بر اساس الگوی مقادیر منفرد ماتریس H
محاسبه ماتریس‌های بریده شده Σ_k ، U_k و V_k
ضرب ماتریسی $\Sigma_k V_k^{-1}$ در طرفین رابطه (۷) و به دست آوردن رابطه (۹)
انتخاب پارامتر λ بر اساس بزرگ‌ترین مقدار منفرد ماتریس \tilde{H}
محاسبه نقطه شروع از رابطه
$x_0 = \frac{1}{\lambda} [I - \tilde{H}^T (I + \tilde{H} \tilde{H}^T)^{-1} \tilde{H}] \tilde{H}^T \tilde{s}$
for $j = 0, 1, 2, \dots, M$
$W_j = \text{diag}(x_j ^{-1})$
$x_{j+1} = \frac{1}{\lambda} [W_j^{-1} - W_j^{-1} \tilde{H}^T (I + \tilde{H} W_j^{-1} \tilde{H}^T)^{-1} \tilde{H} W_j^{-1}] \tilde{H}^T \tilde{s}$
end

۳- پیاده‌سازی، نتایج و بحث

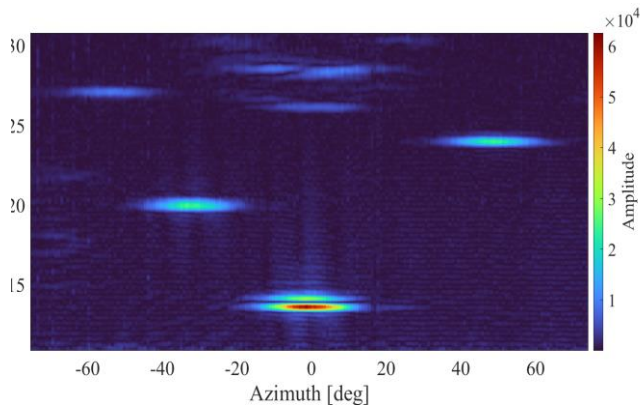
تصویربرداری اهداف توسط یک سیستم راداری FMCW باند X که در دانشگاه یزد طراحی و پیاده‌سازی شده است، انجام می‌شود. بخش‌های مختلف این سیستم راداری در شکل (۲)

سیمانی بر روی آن‌ها سه‌وجهی گذاشته شده است.



شکل (۵). تصویری از محل تست در دانشگاه یزد

تصویر به‌دست‌آمده برای ناحیه تست قبل از اعمال الگوریتم تفکیک‌پذیری با وضوح بالا در شکل (۶) نشان‌داده شده است. در این شکل داده برگشتی اهداف در زاویه‌های مختلف ذخیره شده و پس از اعمال پردازش‌های مربوط به فشرده‌سازی در راستای برد، پروفایل برد اهداف برای هر زاویه گزارش و تصویر دوبعدی از سایت حاصل می‌شود. همان‌طور که در این شکل مشخص است اهداف گسسته با تفکیک زاویه‌ای بسیار پایینی بازسازی شده‌اند.



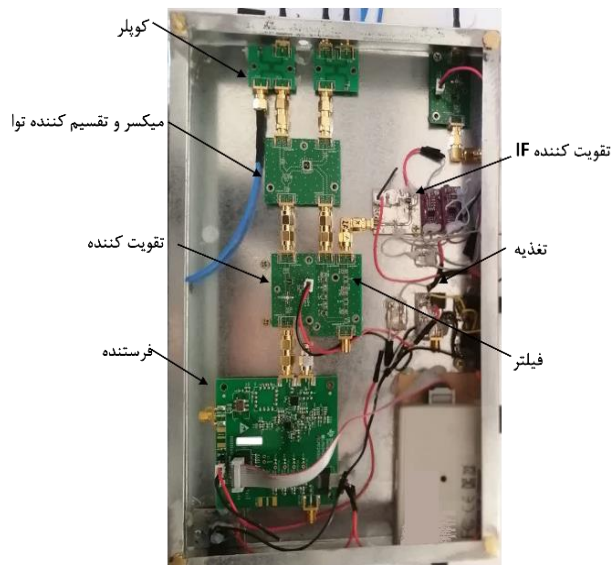
شکل (۶). تصویر دوبعدی بدون الگوریتم تفکیک‌پذیری در راستای سمت

به منظور ارزیابی قدرت تفکیک در راستای سمت از معیار 3 dB تابع پراکندگی از هدف استفاده می‌شود. بر اساس این معیار، اگر فاصله زاویه‌ای در راستای سمت که در آن دامنه تابع پراکندگی از هدف حداکثر به اندازه 3 dB از مقدار بیشینه افت می‌کند با σ_a نشان داده شود، قدرت تفکیک به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$AR = \frac{1}{\sigma_a}. \quad (16)$$

برای اعمال روش sparse-TSVD تسریع شده برای افزایش قدرت تفکیک در راستای سمت، مراحل جدول (۱) پیاده‌سازی شده است. به منظور انتخاب پارامتر k الگو مفادیر منفرد ماتریس H با استفاده از رابطه (۳) برای الگوی کالیبره شده و الگوی کالیبره‌نشده در شکل (۷) نشان‌داده شده است.

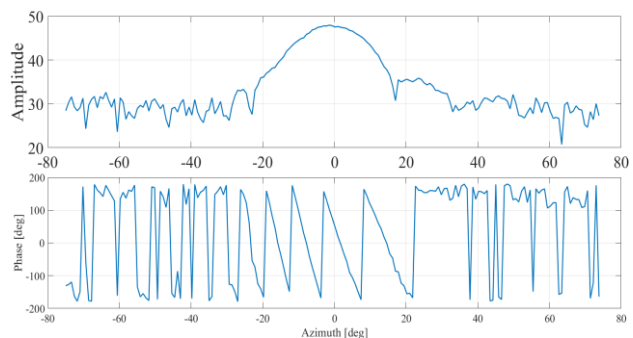
فیلتر میان‌گذر خروجی گیرنده در شکل (۳) نشان داده شده‌اند.



شکل (۳). ماژول‌های فرستنده و گیرنده

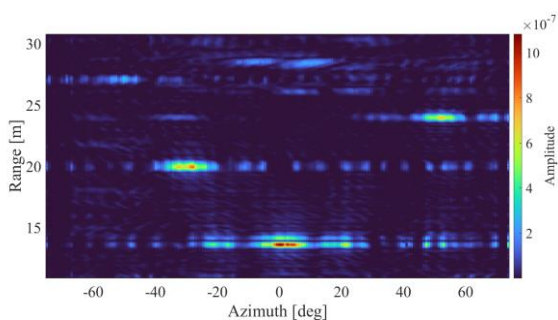
۱-۳- نتایج عددی

پارامترهای مربوط به پویای رادار و هم چنین مشخصات سیگنال FMCW ارسالی در جدول (۲) آورده شده است. برای استخراج الگوی آنتن از سه‌وجهی با ابعاد هر وجه 35 cm در فاصله تقریباً 14 m از آنتن رادار استفاده شده است. دامنه و فاز به‌دست‌آمده برای الگوی آنتن در زاویه‌های مختلف در شکل (۴) نشان‌داده شده است. باتوجه به شکل الگو، آنتن بوقی مورد استفاده در این پروژه دارای پهنای بیم 17.6 درجه و تراز گلبرگ فرعی تقریباً 12 dB است.

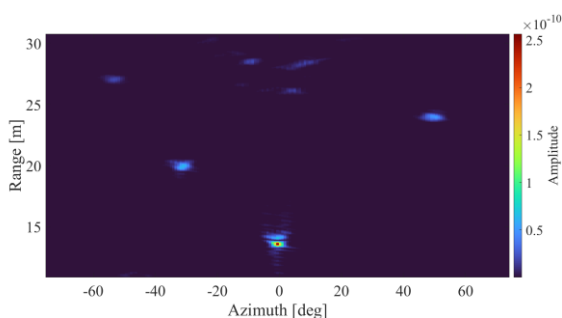


شکل (۴). دامنه و فاز الگوی آنتن هورن اندازه‌گیری شده

تصویر محل تست در دانشگاه یزد در شکل (۵) مشاهده می‌شود. در اینجا ستون‌های سیمانی و سه‌وجهی با پایه چوبی به‌عنوان اهداف گسسته و درختان به‌عنوان اهداف پیوسته در نظر گرفته می‌شود. برای افزایش برگشتی میدان از ستون‌های



(الف)



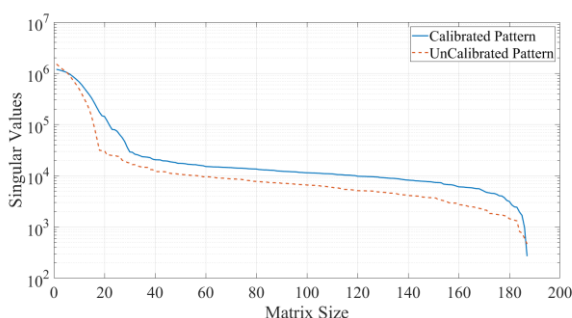
(ب)

شکل (۸). تصویر دوبعدی با استفاده از روش sparse-TSVD تسریع شده: (الف) با الگوی کالیبره نشده و (ب) با الگوی کالیبره شده

جدول (۳). مقایسه‌ی وضوح سمت برای اهداف متفاوت با استفاده از الگوریتم sparse-TSVD تسریع شده و الگوی کالیبره شده در شکل (۸) ب

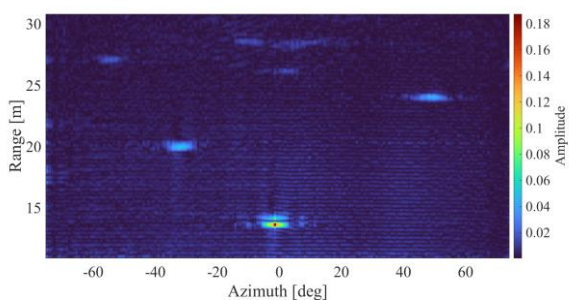
اهداف	σ_a (دب)	AR
هدف ۱۴ ستری	۲	۰٫۵
هدف ۲۰ ستری	۲٫۲	۰٫۲
هدف ۲۴ ستری	۴٫۸	۰٫۲
هدف ۲۶ ستری	۳٫۲	۰٫۳۱
هدف ۲۷ ستری	۴٫۸	۰٫۲

در ادامه برای مقایسه نتایج روش sparse-TSVD تسریع شده با سایر روش‌های تنظیم‌سازی و میزان بهبود وضوح سمت با استفاده از الگوی کالیبره شده، تصاویر به‌دست‌آمده از روش‌های TSVD، تیخانوف و sparse-TSVD در شکل‌های (۹) الف، (۹) ب و (۹) ج نشان‌داده شده است. جدول (۴) نیز نتایج AR به‌دست‌آمده برای روش‌های مختلف را با استفاده از الگوی کالیبره شده و الگوی کالیبره نشده نشان می‌دهد. باتوجه‌به نتایج به‌دست‌آمده، روش sparse-TSVD تسریع شده برای الگوی کالیبره شده بین ۲۵ درصد تا ۱۷۰ درصد مقدار AR بالاتری را

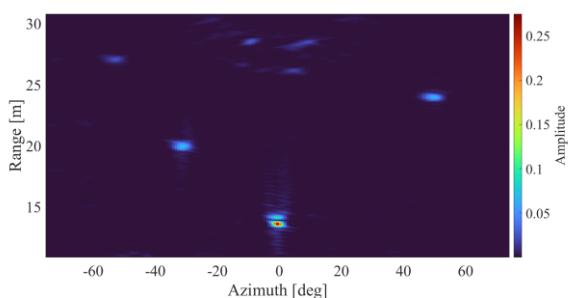


شکل (۷). مقایسه مقادیر منفرد برای الگوی کالیبره شده و کالیبره‌نشده

همان‌طور که مشخص است بیشترین تغییرات مقدار منفرد برای الگوی کالیبره شده در شاخص ۳۰ و برای الگوی کالیبره‌نشده در شاخص ۱۸ اتفاق می‌افتد که این مقادیر به‌عنوان پارامتر k برای تولید نتایج روش sparse-TSVD تسریع شده در نظر گرفته می‌شود. همین شکل نشان می‌دهد که باتوجه‌به تعداد مقادیر منفرد کمتر فضای نویز برای ماتریس الگوی کالیبره شده، این ماتریس می‌تواند بار اطلاعاتی بیشتری از ناحیه‌ی تصویربرداری برای ما فراهم کند. مقدار λ نیز برای الگوی کالیبره شده و کالیبره‌نشده به ترتیب ۱۰۰۰ و ۱ لحاظ شده است. شکل (۸) الف، تصویر به‌دست‌آمده از ناحیه‌ی تحت تست را بعد از اعمال الگوریتم تفکیک‌پذیری با وضوح بالا نشان می‌دهد. در این تصویر از الگوی کالیبره‌نشده در الگوریتم sparse-TSVD تسریع شده استفاده شده و دامنه‌ی پراکندگی از اهداف در هر زاویه و برای بردهای مختلف به‌دست‌آمده است. از شکل (۸) الف مشخص است که باتوجه‌به اعمال الگوی کالیبره‌نشده آنتن، تفکیک‌پذیری بالایی در راستای سمت ایجاد نشده است. شکل (۸) ب نتایج به‌کارگیری الگوی کالیبره شده در الگوریتم sparse-TSVD تسریع شده را نمایش می‌دهد. برای ۵ هدف گسسته استفاده شده در سناریوی مورد نظر، مقدار AR استخراج شده در جدول (۳) برای شکل (۸) ب گزارش شده است. باتوجه‌به داده‌های جدول (۳) قدرت تفکیک برای اهدافی که حوالی زاویه سمت صفر قرار دارند ماکزیمم است و با حرکت به سمت زاویه‌های کناری، قدرت تفکیک کاهش می‌یابد. در واقع پراکندگی از اهداف کناری، توسط آنتن کمتر دیده شده و اطلاعات کمتری از تابع پراکندگی این اهداف جمع‌آوری شده است. براین‌اساس این اهداف پس از اعمال الگوریتم‌های تفکیک با وضوح بالا با کیفیت پایین‌تری بازسازی شده‌اند. از طرف دیگر همان‌طور که در جدول (۳) مشخص است برای هدف ۱۴m که در وسط بازه‌ی پویا سمت قرار دارد $\sigma_a = ۲^\circ$ به‌دست‌آمده که تقریباً مقداری برابر یک هشتم پهنا‌ی بیم تشعشعی اصلی آنتن را نشان می‌دهد (شکل (۴)). این مسئله می‌تواند به‌عنوان یک قاعده‌ی سرانگشتی برای تعیین قدرت تفکیک روش sparse-TSVD تسریع شده براساس داده‌های تجربی بیان شود که در مقاله‌های قبلی به آن پرداخته نشده است.



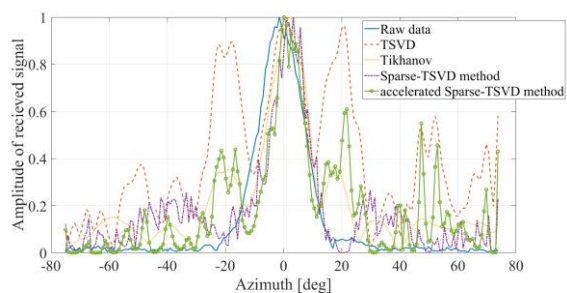
(ب)



(ج)

شکل (۹). تصویر دوبعدی اهداف گسسته با استفاده از روش: (الف) TSVD، (ب) Tikhonov و (ج) sparse-TSVD با الگوی کالیبره شده

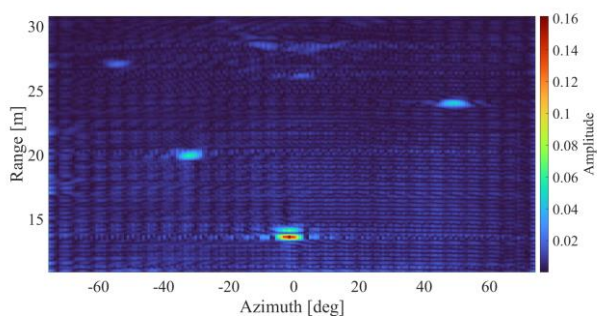
در ادامه نتایج این تحقیق تصاویر به دست آمده برای اهداف پیوسته برای داده‌های خام و با اعمال الگوریتم sparse-TSVD تسریع شده یکبار با در نظر گرفتن الگوی کالیبره نشده و یکبار برای الگوی کالیبره شده در شکل (۱۱) نشان داده شده است. باتوجه به پیوستگی قابل قبول پوشش گیاهی انتهای سایت تصویربرداری (شکل (۵))، این ناحیه در فاصله ۳۰ تا ۹۰ متری رادار به عنوان ناحیه اهداف پیوسته راداری انتخاب شده است. همان طور که در نتایج به دست آمده مشاهده می شود الگوی کالیبره شده توانسته است وضوح بسیار بالاتری را نسبت به الگوی کالیبره نشده در تصاویر فراهم کند. باتوجه به اینکه کالیبراسیون الگوی با استفاده از یک هدف شاخص در ناحیه تصویربرداری انجام می شود (این هدف شاخص می تواند سه وجهی نصب شده و یا هدف نقطه‌ای با برگشتی بالا در محل تست باشد)؛ روش پیشنهادی می تواند برای سایت تصویربرداری دلخواه استفاده شود.



(الف)

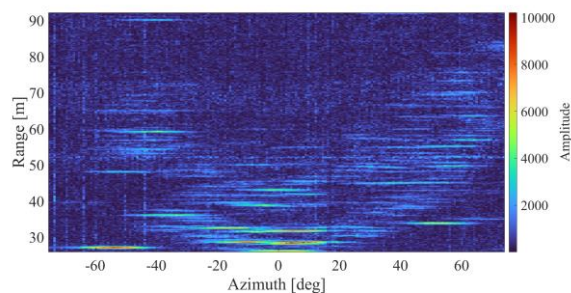
نسبت به سایر روش‌ها نشان می‌دهد. از طرف دیگر، همان طور که در این جدول مشخص است، با اعمال الگوی کالیبره شده مقادیر AR بین ۲ تا ۶ برابر نسبت به الگوی کالیبره نشده افزایش یافته است. این در حالی است که بیشترین میزان بهبود AR مربوط به روش sparse-TSVD تسریع شده است.

در ادامه برای بررسی تأثیر به کارگیری الگوی کالیبره شده در کاهش گلبرگ‌های فرعی در تابع هدف آشکارسازی شده و همچنین افزایش AR ، نتایج تصاویر یک بعدی در راستای سمت برای الگوی کالیبره شده و الگوی کالیبره نشده برای روش‌های مختلف در شکل (۱۰) نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشخص است، الگوی کالیبره شده می‌تواند تا ۷۵ درصد تراز گلبرگ فرعی را در تابع پراکندگی از هدف و در راستای سمت کاهش دهد. از طرف دیگر باتوجه به نتایج گزارش شده در این شکل، سطح گلبرگ فرعی برای روش sparse-TSVD تسریع شده به طور قابل ملاحظه‌ای از سایر روش‌ها پایین تر است و این مسئله نشان می‌دهد که این روش توانسته است تا حدود زیادی اثر اهداف کاذب آشکارسازی شده در راستای سمت را حذف کند. این موضوع به خصوص در بازسازی تصویر اهداف پیوسته می‌تواند اهمیت زیادی داشته باشد. با این همه استفاده از الگوی تشعشعی کالیبره شده (مختلط) به جای الگوی تشعشعی کالیبره نشده (دامنه) باعث افزایش پیچیدگی محاسبات تا دو برابر خواهد شد؛ زیرا محاسبات باید برای دو بخش حقیقی و موهومی در ماتریس‌ها تکرار گردد. از این رو پیچیدگی محاسبات از $O(kN^2)$ به $O(2kN^2)$ افزایش خواهد یافت.

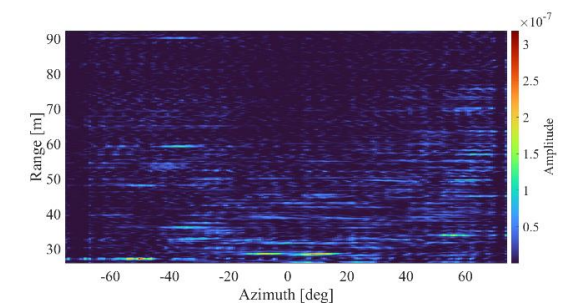


(الف)

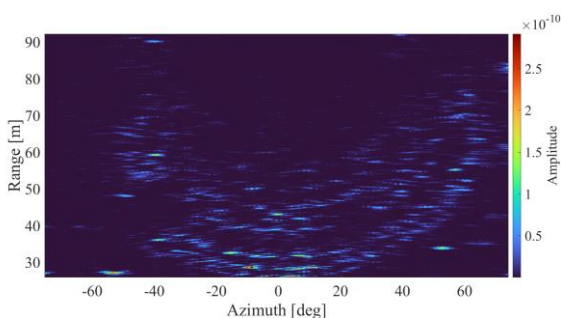
است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد به‌کارگیری الگوی کالیبره شده می‌تواند تا ۶ برابر قدرت تفکیک را در راستای سمت نسبت به اعمال الگوی کالیبره‌نشده افزایش دهد و تا ۷۵ درصد اثر گلبرگ‌های فرعی ظاهر شده در تابع هدف در راستای سمت (که نشان‌دهنده اهداف کاذب آشکارسازی شده است) را کاهش دهد. در ادامه این تحقیق می‌توان تأثیر روش پیشنهادی را برای رادارهای با برد متوسط بررسی کرد. از طرف دیگر لازم است قابلیت روش پیشنهادی برای یک کاربرد صنعتی مانند پوشش دیواره‌های معدن روباز در سایت معدن سنجیده شود که در آینده در دستور کار مؤلفین قرار گرفته است. در یک کاربرد وسیع‌تر بررسی روش پیشنهادی برای تصویربرداری اهداف متحرک می‌تواند در دستور کار قرار گیرد.



(الف)

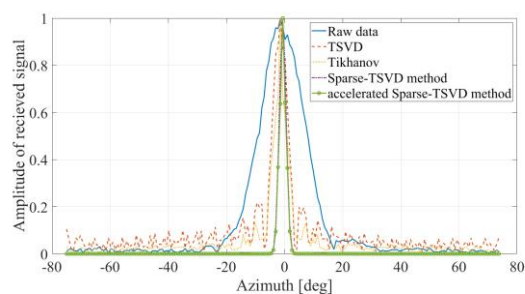


(ب)



(ج)

شکل (۱۱). تصویر دوبعدی با استفاده از روش sparse-TSVD تسریع شده برای ناحیه‌ی درختان (اهداف پیوسته): (الف) داده‌ی خام، (ب) با الگوی کالیبره‌نشده و (ج) با الگوی کالیبره شده



(ب)

شکل (۱۰). دامنه تابع پراکنده‌گی از نزدیک‌ترین هدف به رادار (هدف ۱۴m) در راستای سمت: (الف) با الگوی کالیبره‌نشده و (ب) با الگوی کالیبره شده

جدول (۴). مقایسه‌ی قدرت تفکیک سمت برای نزدیک‌ترین هدف به رادار (هدف ۱۴ m) برای الگوریتم‌های مختلف با استفاده از الگوهای کالیبره شده و کالیبره‌نشده

الگوریتم	σ_a (درج) کالیبره‌نشده	σ_a (درج) کالیبره‌نشده	AR کالیبره شده	AR کالیبره نشده
داود خام	۱۷/۶	۱۷/۶	۰/۰۵۶۸	۰/۰۵۶۸
TSVD	۶/۴	۱۶	۰/۰۶۲۵	۰/۱۵۶۲
تجانوف	۴/۸	۱۵/۲	۰/۰۶۵۸	۰/۲۰۸۳
Sparse-TSVD	۳	۱۳/۵	۰/۰۷۴۰	۰/۲۳۳۳
Sparse-TSVD تسریع شده	۲/۴	۱۳/۲	۰/۰۷۵۸	۰/۴۶۶۷

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق روشی برای بهبود نتایج الگوریتم sparse-TSVD تسریع شده که برای افزایش قدرت تفکیک در راستای سمت در رادارهای دهانه حقیقی به کار می‌رود ارائه شده است. در این روش، الگوی آنتن با استفاده از یک هدف نقطه‌ای در ناحیه تصویربرداری استخراج و تحت عنوان الگوی کالیبره شده نام‌گذاری می‌شود. الگوی کالیبره شده، جایگزین الگوی دامنه آنتن به‌دست‌آمده در اتاق آنتن می‌شود. با توجه به اینکه در این روش اثر جابه‌جایی مرکز فاز آنتن در طول چرخش آنتن لحاظ می‌شود، تغییرات فاز ایجاد شده در زوایای سمت مختلف جبران‌سازی و پردازش داده‌های سمت با استفاده از الگوریتم‌های وضوح بالا بادقت بالاتری انجام می‌شود. تصاویر به‌دست‌آمده بعد از اعمال روش پیشنهادی برای اهداف گسسته و پیوسته ارائه شده

۵- مراجع

- [15] Y. Zhang, D. Mao, Q. Zhang, Y. Zhang, Y. Huang, and J. Yang, "Airborne forward looking radar super-resolution imaging using iterative adaptive approach," *IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens.*, vol. 12, no. 7, pp. 2044–2054, Jul. 2019. doi: 10.1109/jstars.2019.2920859
- [16] <https://images.app.goo.gl/byLpec21RS2yPq9m6>
- [17] <https://images.app.goo.gl/XSnbpLCRatxX1A167>
- [18] F. Lenti, F. Nunziata, M. Migliaccio, and G. Rodriguez, "Two dimensional TSVD to enhance the spatial resolution of radiometer data," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 52, no. 5, pp. 2450–2458, May 2014. doi: 10.1109/tgrs.2013.2261303
- [19] J. D. Shea, B. D. Van Veen, and S. C. Hagness, "A TSVD analysis of microwave inverse scattering for breast imaging," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 59, no. 4, pp. 936–945, Apr. 2012. doi: 10.1109/tbme.2011.2176727
- [20] X. Tuo, Y. Zhang, D. Mao, Y. Kang, and Y. Huang, "A radar forward looking super resolution method based on singular value weighted truncation," in Proc. *IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp. (IGARSS)*, Jul. 2019, pp. 9180–9183. doi: 10.1109/IGARSS.2019.8898704
- [21] P.-A. Barriere, J. Idier, Y. Goussard, and J.-J. Laurin, "Fast solutions of the 2D inverse scattering problem based on a TSVD approximation of the internal field for the forward model," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 58, no. 12, pp. 4015–4024, Dec. 2010. doi: 10.1109/tap.2010.2078440
- [22] A. Gambardella and M. Migliaccio, "On the super-resolution of microwave scanning radiometer measurements," *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 5, no. 4, pp. 796–800, Oct. 2008. doi: 10.1109/lgrs.2008.2006285
- [23] M. T. Alonso, P. López-Dekker, and J. J. Mallorquí, "A novel strategy for radar imaging based on compressive sensing," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 48, no. 12, pp. 4285–4295, Dec. 2010. doi: 10.1109/tgrs.2010.2051231
- [24] R. Baraniuk and P. Steeghs, "Compressive radar imaging," *IEEE Radar Conf.*, Apr. 2007, pp. 128–133.
- [25] Q. Zhang, Y. Zhang, Y. Huang, Y. Zhang, W. Li, and J. Yang, "Sparse with fast MM super-resolution algorithm for radar forward-looking imaging," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 105247–105257, 2019. doi: 10.1109/access.2019.2932612
- [26] Y. Wu, Y. Zhang, D. Mao, Y. Huang, and J. Yang, "Sparse super-resolution method based on truncated singular value decomposition strategy for radar forward-looking imaging," *J. Appl. Remote Sens.*, vol. 12, no. 3, 2018, Art. no. 03502. doi: 10.1117/1.jrs.12.035021
- [27] Y. Zhang, X. Tuo, Y. Huang, and J. Yang, "A tv forward looking super-resolution imaging method based on TSVD strategy for scanning radar," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 58, no. 7, pp. 4517–4528, 2020. doi: 10.1109/tgrs.2019.2958085
- [28] X. Tuo, Y. Zhang, Y. Zhang, Y. Huang and J. Yang, "Accelerated 11-svd Deconvolution Approach for Real Aperture Radar Super-resolution Imaging," *2022 IEEE Radar Conference (RadarConf22)*, New York City, NY, USA, 2022, pp. 1-6. doi: 10.1109/RadarConf2248738.2022.9764344
- [1] M. Darvishnezhad, M. A. Sebt, "Feature Selection Method Based on Mutual Information for Polarimetric Synthetic Aperture Radar (PolSAR) Image Classification," *Scientific Journal of RADAR*, vol. 10, February 2022. (In Persian) <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23454024.1401.10.1.4.3>
- [2] P. Eshghy, M. Kazerooni, "Extracting the amount of subsidence of subway tunnels from InSAR", *Journal of RADAR*, vol. 10, no. 1 Jul. 2022. (In Persian) <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23454024.1401.10.1.12.1>
- [3] M. bayat, M. moradi, M. Mazloum, "The Presentation of an Algorithm for Interference Detection in the Synthetic Aperture Radar," *Journal of RADAR*, vol. 9, no. 1, pp.107-117, Sep. 2021. (In Persian) <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23454024.1400.9.1.11.3>
- [4] N. Karimi, M. R. Taban, "SAR Image Denoising Using Adaptive Smoothing and Sparse Representation," *Journal of RADAR*, vol. 7, no. 1, pp.1-14, Dec. 2019. (In Persian) <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23454024.1398.7.1.1.9>
- [5] S.R. Samare Hashemi, "Optimal Beamforming for Maximization of the Image SNR in Ground-Based Circular Synthetic Aperture Radar," *Journal of RADAR*, vol. 6, no. 2, pp.45-47, Oct. 2019. (In Persian) <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23454024.1397.6.2.5.8>
- [6] R. Bordbari, Y. Maghsoudi, "Detection of Targets in Polarimetric Radar Images Using Orthogonal Subspace Projection," *Journal of RADAR*, vol. 5, no. 2, pp.15-26, Jan. 2020. (In Persian) <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23454024.1396.5.2.2.8>
- [7] S.M Zabihi Maddah, S. A. Seyedin, "Parameters Estimation and Imaging of Ground Moving Target in a One-stationary Bi-static SAR," *Journal of RADAR*, vol. 5, no. 4, pp.11-24, Sep. 2018. (In Persian) <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23454024.1396.5.4.2.2>
- [8] J. Luo et al., "Two-Dimensional Angular Super-Resolution for Airborne Real Aperture Radar by Fast Conjugate Gradient Iterative Adaptive Approach," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 59, no. 6, pp. 9480–9500, Dec. 2023, doi: 10.1109/TAES.2023.3321261.
- [9] Li, Wenchao, et al. "LRSD-ADMM-NET: Simultaneous Super-resolution Imaging and Target Detection for Forward-looking Scanning Radar." *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* (2024), doi:10.1109/jstars.2023.10283151.
- [10] M. Migliaccio and A. Gambardella, "Microwave radiometer spatial resolution enhancement", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 43, no. 5, pp. 1159–1169, May 2005. doi:10.1109/TGRS.2005.844099
- [11] Y. Zha, Y. Zhang, Y. Huang, and J. Yang, "Bayesian angular super-resolution algorithm for real-aperture imaging in forward-looking radar", *Information*, vol. 6, no. 4, pp. 650–668, Oct. 2015. doi:10.3390/info6040650
- [12] Y. Zhang, Y. Huang, Y. Zha, and J. Yang, "Super-resolution imaging for forward-looking scanning radar with generalized Gaussian constraint," *Prog. Electromagn. Res.*, vol. 46, pp. 1–10, Jan. 2016. doi:10.2528/PIERM15120805
- [13] Y. Zhang, A. Jakobsson, D. Mao, Y. Zhang, Y. Huang, and J. Yang, "Generalized time-updating sparse covariance-based spectral estimation," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 143876–143887, 2019. doi: 10.1109/access.2019.2944788
- [14] Y. Zhang, A. Jakobsson, Y. Zhang, Y. Huang, and J. Yang, "Wideband sparse reconstruction for scanning radar," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 56, no. 10, pp. 6055–6068, Oct. 2018. doi: 10.1109/tgrs.2018.2830100