مدل‌سازی و پیاده‌سازی نرم‌افزاری عملکرد سامانه‌های تصویر برداری SAR در حالت نورافکن

مجتبی بهزاد فلاح پور[1]، حمید دهقانی[2*]، علی جبار رشیدی[3] و عباس شیخی[4]

[1، 2 و 3] دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

[4] دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

چکیده

سامانه‌های تصویربرداری SAR به‌عنوان مکملی برای سنجنده‌های سنجش از دور غیر فعال مطرح هستند؛ اما پیچیدگی بالایی در مرحله تشکیل تصویر دارند. به‌طوری‌که تصویر نهایی در این سامانه‌ها پس از طی سه گام اساسی جمع‌آوری دادهٔ خام، تشکیل فضای سیگنالی و تشکیل فضای تصویری به‌وجود می‌آید. به‌علاوه در اطلاعات ثبت‌شده توسط سامانه‌های تصویربرداری SAR عوامل مختلف درون‌سیستمی و برون‌سامانه‌ای چون رادار، سکو حامل رادار، الگوریتم‌های پردازشی، ناحیه تصویربرداری و کانال نقش دارند که هرکدام از زیرپارامترهای فراوانی تشکیل شده‌اند و این موضوع نیز بر پیچیدگی نحوه رفتار SAR می‌افزاید؛ لذا با توجه به این پیچیدگی‌ها ارائه مدل‌هایی که نحوه عملکرد سامانه‌های تصویربرداری SAR را تشریح کند، بسیار مطلوب است. در این مقاله ابتدا نحوهٔ عملکرد SAR در مرحله تشکیل تصویر و در حالت عملکردی نورافکنی به‌صورت تحلیلی، مدل‌سازی می‌شود؛ سپس مدل ارائه‌شده به‌صورت نرم‌افزاری پیاده‌سازی می‌شود که این پیاده‌سازی در برگیرنده هر سه گام اساسی بخش تشکیل تصویر است؛ به‌گونه‌ای که جمع‌آوری دادهٔ خام در محیط نرم‌افزاری CST و تشکیل فضای سیگنالی و تصویری در محیط نرم‌افزاری MATLAB انجام می‌شود؛ و اهمیت این پیاده‌سازی از آن جهت است که قابلیت‌های زیادی چون امکان تحلیل اثر پارامترهای مختلف سامانه‌های تصویربرداری SAR، تفسیر بهتر این نوع از تصاویر، امکان بررسی صحت راه‌کارهای مطرح‌شده را در جنگ الکترونیک یا پدافند غیرعامل برای مقابله با سامانه‌های SAR و ... به‌وجود خواهد آورد.

واژگان کلیدی: SAR، فضای سیگنالی، فضای تصویری، میدان پراکندگی، مدل عملکردی، پیاده‌سازی نرم‌افزاری

Modeling and Software Implementation of SAR Imaging System Performance in Spotlight Mode

Mojtaba Behzad Fallahpour[1], Hamid Dehghani[*2], Ali Jabbar Rashidi[3] & Abbas Sheikhi[4]

[1, 2, 3] Malek e Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

[4.] Department of Electrical and Computer Engineering, University of Shiraz, Shiraz, Iran

Abstract

SAR imaging systems are considered as a complement to passive remote sensing, but the process of image formation in such systems are so complex that the final images are formed under three basic steps i.e. raw data acquisition, forming the signal space and image space. In addition, various factors within and outside the system are involved in the information that are recorded by SAR, such as radar, platform, processing algorithm, imaging region and channel. Each of these have many sub-parameters which intensifies the complexity of the behavior of SAR. Regarding such complexities, providing a model describing the functional performances of SAR imaging system is highly desirable. In this paper, primarily, the performance of the SAR image formation in spotlight mode, is modelled analytically, then the model is implemented in a software pattern. The implementation includes three basic steps of image formation, so

* نویسندهٔ عهده‌دار مکاتبات

[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.18869/acadpub.jsdp.13.4.3]

that the raw data acquisition is performed in CST software and the signal and image formation in MATLAB software. The importance of this implantation is in determining the performance of the SAR imaging system and the multi-capabilities. Such as the followings:

1. **The ability to analyze the effect of various parameters of SAR imaging system is provided; from this perspective, an important step towards will be taken the design and construction of this imaging system type.**
2. **On the other hand, there are various factors within and outside the system that are involved in the recorded information by SAR, such as radar, platform, processing algorithm, imaging region and channel. Therefore, modeling the system performance Help's us to have a better interpretation of SAR images.**
3. **This type of implementation allows for the simulation surfaces and targets from the perspective of the SAR images.**
4. **Due to the important role of SARs in today's war for collecting information from a battlefield, the performance modeling of SAR creates an ability of designing strategies them. In other words, studying the validity of solutions proposed in the electronic warfare sector will come into existence by this implementation.**
5. **Ability to produce images of distributed targets.**

Keywords: SAR, Signal Space, Image space, field of scattering, Functional model, Software Implementation

۱- مقدمه

سامانه‌های تصویربرداری SAR[1] از نظر نوع اطلاعات، زمان اخذ داده و نحوهٔ تشکیل تصویر، به‌عنوان مکملی برای سامانه‌های الکترواپتیکی محسوب می‌شوند. هدف سامانه‌های SAR، تصویربرداری راداری از یک سطح یا حجم است. منظور از تصویربرداری راداری استخراج میدان پراکندگی[2] مربوط به المان‌های سطح یا حجم مورد نظر و نمایش اطلاعات سطح مقطع راداری[3](RCS) آن به‌صورت سطوح خاکستری[4] در یک صفحه نمایش دوبعدی است. درواقع تصویری که از سامانه SAR به‌دست می‌آید نمای ضریب انعکاس[5] پیکسل‌های سطح در فرکانس مایکروویو است و ابعاد المان‌های سطحی یا حجمی را که RCS آنها اندازه‌گیری می‌شود، قدرت تفکیک[6] سامانه SAR می‌گویند[1].

سامانه‌های SAR برای تصویربرداری نیاز به یک سکوی[7] متحرک دارند تا از حرکت سکو استفاده کرده و در طول زمان با استفاده از یک آنتن کوچک، آنتن بزرگی را شبیه‌سازی کنند (دهانه مصنوعی) و بدین ترتیب به قدرت تفکیک بالایی در جهت سمت[8] دست یابند[2].

عمل تصویربرداری در سامانه SAR با جابه‌جا کردن سکو در یک مسیر مستقیم که مسیر پرواز[9] نامیده می‌شود و عمود بر خط ندیر(نقطه زیر سکو) است انجام می‌شود. ناحیه‌ای که آنتن رادار بر روی زمین پوشش می‌دهد، اثر یا رد زمینی آنتن[10] نامیده می‌شود. با حرکت سکو در امتداد مسیر پرواز، ناحیه‌ای بر روی زمین پویش می‌شود که به آن ناحیه تصویر (نوار پویش رادار[11])گفته می‌شود. همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است نحوه پویش سطح، به‌طورمعمول به یکی از صورت‌های عمده نواری[12] یا نورافکنی[13] است. محور طولی ناحیه تصویر را که با مسیر پرواز موازی است، سمت و محور عرضی که بر مسیر پرواز عمود است، برد زمینی[14] می‌نامند[3]،[4].

با این وجود، نحوه عملکرد در این نوع سامانه‌های تصویربرداری نسبت به سامانه‌های الکترواپتیکی بسیار پیچیده‌تر است. به‌طوری‌که تصویر نهایی در این سامانه‌ها پس از عبور از بخش تشکیل تصویر[15] که شامل سه گام اساسی جمع‌آوری دادهٔ خام[16]، تشکیل فضای سیگنالی[17] و تشکیل فضای تصویری[18] است، به‌وجود می‌آید. درحالی‌که در سامانه‌های الکترواپتیکی بخش تشکیل تصویر وجود

[1] Synthetic Aperture Radar(SAR)
[2] Scattering Field(E-Field or H-Field)
[3] Radar Cross Section(RCS)
[4] Gray Level
[5] Backscatter
[6] Resolution
[7] Platform
[8] Azimuth

[9] Flight Path
[10] Antenna Footprint
[11] Radar Swath
[12] Strip map
[13] Spotlight
[14] Ground Range
[15] Image Formation
[16] Data Acquisition
[17] Signal Space
[18] Image Space

[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-11-23]
[DOI: 10.18869/acadpub.jsdp.13.4.3]

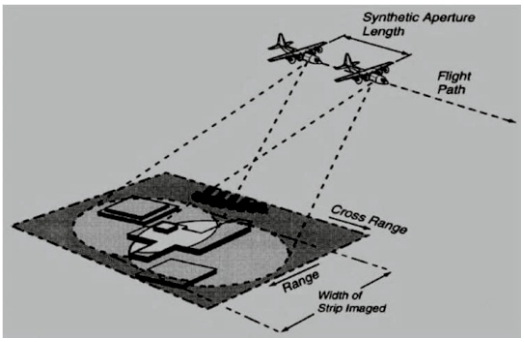
نداشته و فضای تصویری در آنها به‌طورمستقیم و بدون دخالت الگوریتم‌های تشکیل تصویر ایجاد می‌شود[1]. به‌علاوه در اطلاعات ثبت‌شده توسط سامانه‌های تصویربرداری SAR عوامل مختلف درون‌سامانه‌ای و برون‌سامانه‌ای چون رادار، سکو حامل رادار، الگوریتم‌های پردازشی، ناحیه تصویربرداری و کانال نقش دارند که هرکدام از زیرپارامترهای فراوانی تشکیل شده‌اند و این موضوع نیز بر پیچیدگی نحوه رفتار SAR می‌افزاید؛ لذا با توجه به این پیچیدگی‌ها، ارائه مدل‌هایی که نحوهٔ عملکرد سامانه‌های تصویربرداری SAR را تشریح کند، بسیار مطلوب است.

در این مقاله، ابتدا نحوهٔ عملکرد SARهای نورافکن در بخش تشکیل تصویر به‌صورت تحلیلی مدل می‌شود؛ سپس مدل ارائه‌شده به‌صورت نرم‌افزاری پیاده‌سازی می‌شود. این پیاده‌سازی دربرگیرندهٔ هر سه گام اساسی جمع‌آوری دادهٔ خام، تشکیل فضای سیگنالی و تشکیل فضای تصویری است و نوآوری اصلی موجود در آن، استفاده از نرم‌افزار CST در قالب رادار SAR برای استخراج میدان پراکندگی از اهداف مختلف است. البته استفاده از CST برای به‌دست‌آوردن میدان پراکندگی در رادارهای ثابت یک امر معمول است؛ ولی استفاده از آن در قالب رادار SAR با چالش‌هایی همراه است که از جمله آن می‌توان به حرکت رادار SAR و همچنین هم‌صفحه‌نبودن منبع تشعشع و هدف در رادار SAR اشاره کرد؛ لذا در این مقاله ضمن پیاده‌سازی نرم‌افزاریِ نحوهٔ عملکرد SAR در بخش تشکیل تصویر، دو چالش بالا نیز حل شده و بدین ترتیب امکان استفاده از نرم‌افزار CST به‌جای رادار SAR برای تولید داده‌های خام دقیق مبتنی بر واقعیت به‌وجود می‌آید.

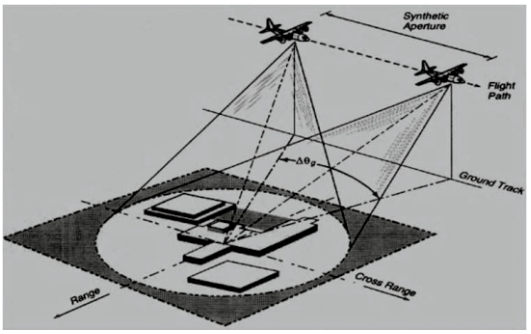
برای ارائهٔ مدل عملکردی برای سامانه‌های تصویربرداری SAR در این مقاله، ابتدا نحوهٔ عملکرد سامانه‌های تصویربرداری SAR در حالت نواری تشریح می‌شود. سپس به مدل‌سازی عملکرد آنها در حالت نورافکن پرداخته خواهد شد. در بخش چهارم مدل ارائه‌شده به‌صورت نرم‌افزاری پیاده‌سازی می‌شود و در انتها نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

در [6] نحوهٔ عملکرد SARهای نواری در بخش تشکیل تصویر به‌صورت تحلیلی مدل‌سازی شده است. در این قسمت ضمن بیان این مدل‌سازی، مهم‌ترین تفاوت‌های حالت‌های عملکردی نواری و نورافکن نیز بیان می‌شود تا با تلفیق آنها با یکدیگر، نحوهٔ عملکرد SARهای نورافکن در بخش تشکیل تصویر نیز مدل‌سازی شود.

در حالت نواری سامانه‌های SAR به‌صورت پیوسته و نواری از زمین تصویربرداری کرده و در هر موقعیت از سمت، پالسی را به سمت ناحیه تصویربرداری ارسال می‌کنند. بعد از گذشت زمان تأخیر ناشی از فاصله رادار تا هدف، بازگشت سیگنال ارسالی در گیرنده دریافت شده و پس از انتقال به باند پایه، نمونه‌برداری می‌شود؛ سپس این نمونه‌ها در یک آرایهٔ دوبعدی که به آن فضای سیگنالی یا دادهٔ خام می‌گویند، قرار داده خواهند شد[7].



(الف)
(a)



(ب)
(b)

(شکل-۱): حالت‌های عملکردی SAR. الف) حالت نواری، ب) حالت نورافکن [5].

(Figure-1): SAR operational modes. a) Stripmap. b) Spotlight [5]

۲-تشریح عملکرد SAR در حالت نواری

داده‌ها در فضای سیگنالی توان تفکیک پایینی دارند؛ به‌علاوه میزان سیگنال به نوفه در این فضا نیز یک مقدار منفی است؛ لذا تصویر فضای سیگنالی به‌صورت نوفه، تصادفی و غیر قابل فهم است که اطلاعات بصری خاصی برای کاربر ندارد. برای حل این مشکل، فضای دیگری در سامانه‌های تصویربرداری SAR تعریف می‌شود که به آن فضای تصویری می‌گویند که

[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-11-23]
[DOI: 10.18869/acadpub.jsdp.13.4.3]

تصویر آن از کیفیت و قدرت تفکیک بالایی برخوردار است. برای نگاشت فضای سیگنالی به فضای تصویری از الگوریتم-های مختلف تشکیل تصویر استفاده می‌شود که مهم‌ترین این الگوریتم‌ها در حالت نواری، RDA[1]، CSA[2] و Omega-k هستند[8].

در [6] رفتار سامانهٔ تصویربرداری SAR در حالت نواری به‌صورت یک پاسخ ضربهٔ دوبعدی مطابق رابطه ۱ مدل‌سازی شده است.

$$h_{imp}(t,\eta) = W_r(t - 2R(\eta)/c)W_a(\eta - \eta_c) \times \exp\{-j4\pi f_0 R(\eta)/c\} \times \exp\{j\pi K_r(t - 2R(\eta)/c)^2\} \quad (۱)$$

که در آن t زمان در جهت برد، η زمان در جهت سمت، f_0 فرکانس حامل، Kr نرخ چیرپ، $W_r(t)$ پوش سیگنال ارسالی در جهت برد که به‌طورمعمول به‌صورت مستطیلی است، $W_a(\eta - \eta_c)$ پوش در جهت سمت، C سرعت نور، $R(\eta)$ فاصله لحظه‌ای رادار تا هدف و تابع $h_{imp}(t,\eta)$ پاسخ ضربه مربوط به بخش تشکیل فضای سیگنالی در سامانهٔ تصویربرداری SAR است. درصورتی‌که این پاسخ ضربه از یکی از توابع نگاشت فضای سیگنال به فضای تصویر عبور داده شود، پاسخ ضربه کل سامانه تصویر برداری SAR ایجاد خواهد شد. این پاسخ ضربه کلی در[6]، مدل رفتاری یا مدل عملکردی سامانهٔ تصویربرداری SAR نامیده شده است.

شکل (۲) مدل عملکردی سامانهٔ SAR را در حالت نواری که در [6] آمده است، نشان می‌دهد که در آن برای شبیه‌سازی سیگنال راداری SAR دریافت‌شده از کل ناحیه تصویربرداری، کافی است کانولوشن دوبعدی $h_{imp}(t,\eta)$ و $g(t,\eta)$ مطابق رابطه ۲ محاسبه شود.

$$S_{bb}(t,\eta) = g(t,\eta) * h_{imp}(t,\eta) + n(t,\eta) \quad (۲)$$

که در آن $g(t,\eta)$ نشان‌دهندهٔ انعکاس‌های سطح از منظر طول موج استفاده‌شده در رادار سامانه SAR، $(*)$ عمل‌گر کانولوشن، $n(t,\eta)$ نوفهٔ کانال که به‌صورت جمع‌شونده مدل شده است و $S_{bb}(t,\eta)$ فضای سیگنالی متناسب با ناحیه تصویربرداری است و درنهایت برای تشکیل تصویر، مطابق شکل (۲) لازم است که از یکی از توابع نگاشت از فضای سیگنال به فضای تصویر استفاده شود. با ارائه این مدل، نحوه عملکرد SARهای نواری در بخش تشکیل تصویر به‌خوبی قابل توصیف است. در ادامه، با اطلاعات به‌دست‌آمده از این مدل می‌توان به مقایسه SARهای نواری و نورافکن پرداخت.

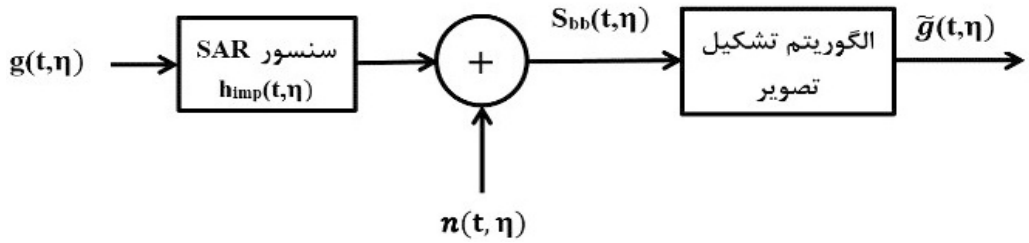
SARهای نواری و نورافکن از جنبه‌های مختلفی چون نحوه تصویربرداری، نوع مأموریت، میزان قدرت تفکیک مکانی، نحوهٔ تشکیل فضای سیگنالی و تصویری و ... قابل مقایسه هستند. از نظر نحوهٔ تصویربرداری، SARهای نورافکن برخلاف SARهای نواری که به‌صورت پیوسته و نواری از زمین تصویربرداری می‌کنند، تنها بر روی یک ناحیه خاص از زمین متمرکز شده و عمل تصویربرداری در آنها به‌صورت گسسته است. به عبارت دیگر SARهای نورافکن مدت زمان بیشتری را صرف مشاهده یک ناحیه خاص کرده، درنتیجه میزان قدرت تفکیک مکانی آنها در جهت سمت بیشتر از قدرت تفکیک مکانی SARهای نواری است؛ ولی از نظر قدرت تفکیک مکانی در جهت برد تفاوتی با یکدیگر ندارند. از نظر نوع ماموریت با توجه به بیشتربودن قدرت تفکیک مکانی SARهای نورافکن در جهت سمت، از آنها برای به‌دست‌آوردن تصاویر دقیق از نواحی حساس جهت مقاصد مختلف نظامی، تجاری و پژوهشی استفاده می‌شود. از نظر نحوهٔ تشکیل فضای سیگنالی، SARهای نواری همان‌طورکه در شکل (۲) و رابطه ۲ نشان داده شده است، به‌صورت کانولوشن دوبعدی در حوزهٔ مکان رفتار کرده، درنتیجه عملکرد الگوریتم‌های تشکیل تصویر در این حالت، برای به‌دست‌آوردن فضای تصویری نیز به‌صورت دی‌کانولوشن دوبعدی است. درحالی‌که در SARهای نورافکن، همان‌طورکه در بخش بعد نشان داده خواهد شد، فضای سیگنالی از تبدیل فوریه دوبعدی در یک شبکه قطبی به‌دست می‌آید. درنتیجه عملکرد الگوریتم‌های تشکیل تصویر نیز به‌صورت عکس تبدیل فوریه دو بعدی است.

۳-مدل‌سازی عملکرد SARهای نورافکن در بخش تشکیل تصویر

در این بخش تلاش می‌شود تا با دانش به‌دست‌آمده از نحوهٔ مدل‌سازی رفتار SARهای نواری و ترکیب آن با تفاوت‌های دو حالت نواری و نورافکن، یک مدل تحلیلی از نحوه عملکرد SARهای نورافکن در بخش تشکیل تصویر ارائه شود. در ادامه، گام‌هایی که برای رسیدن به این مدل طی خواهند شد، به شرح زیر هستند:

[1] Range Doppler Algorithm (RDA)
[2] Chirp Scaling Algorithm (CSA)

[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-11-23]
[DOI: 10.18869/acadpub.jsdp.13.4.3]



(شکل-۲): مدل‌سازی عملکرد SAR در حالت نواری [6]

(Figure-2): Modeling SAR performance in Strip map mode [6]

۱-ابتدا رابطه سیگنال بازگشتی به سمت رادار از یک هدف نقطه‌ای و در یک موقعیت مشخص از سمت به‌دست می‌آید.

۲- یک فرم بسته[1] بین سیگنال دریافتی و کل ناحیه تصویربرداری ایجاد خواهد شد.

۳-با اضافه‌کردن اثر کانال بر این فرم بسته، فضای سیگنالی SARهای نورافکن استخراج می‌شود.

۴-درنهایت با عبور فضای سیگنالی از الگوریتم‌های تشکیل تصویر فضای تصویری مربوط به ناحیه تصویربرداری تشکیل می‌شود.

همان‌طورکه بیان شد، در گام نخست به دنبال سیگنال بازگشتی یک هدف نقطه‌ای خواهیم بود. برای این منظور از سیگنالینگ SAR استفاده می‌شود. متداول‌ترین سیگنالی که در سامانه‌های SAR برای ارسال استفاده می‌شود، یک چیرپ LFM[2] است که فرم مختلط یا معادل باند پایه آن در رابطه ۳ آمده است[9].

$$s(t) = \begin{cases} e^{j(\omega_0 t + \alpha t^2)}, & |t| \le \frac{T_p}{2} \\ 0, & Otherwise \end{cases} \qquad (۳)$$

که در آن t زمان در جهت برد، ω_0 فرکانس حامل، 2α نرخ چیرپ و Tp عرض پالس ارسالی است.

بعد از ارسال قسمت حقیقی سیگنال بالا، $\Re(s(t))$ ، سیگنال برگشتی از یک هدف نقطه‌ای که در مختصات (x_0, y_0) و فاصله R0 از رادار قرار دارد، به‌صورت رابطه ۴ به‌دست می‌آید[5].

$$V_{(\theta, x_0, y_0)}(t) = \Re\left\{f(x_0, y_0)\, s\left(t - \frac{2R_0}{c}\right)\right\} dx\, dy = \qquad (۴)$$
$$|f(x_0, y_0)| \cos\left(\omega_0\left(t - \frac{2R_0}{c}\right) + \alpha\left(t - \frac{2R_0}{c}\right)^2 + \angle f(x_0, y_0)\right) dx\, dy$$

که در آن C سرعت نور، θ زاویه بین محور U و X در شکل (۳) و $f(x_0,y_0)$ میدان پراکندگی است که مختلط بوده و به‌صورت رابطه ۵ تعریف می‌شود[5]:

$$f(x_0, y_0) = |f(x_0, y_0)| \exp(j \angle f(x_0, y_0)) \qquad (۵)$$

که در آن $\angle f(x_0, y_0)$ اختلاف فازی است که در سیگنال منعکس‌شده به‌وجود می‌آید و مانند $|f(x_0, y_0)|$ ناشی از خصوصیات الکترومغناطیسی هدف است. درضمن $|f(x_0, y_0)|$ را در رابطهٔ ۵ می‌توان نمایندهٔ سطح مقطع راداری هدف در نظر گرفت و بدین ترتیب سطح مقطع راداری با مقدار $|f(x_0, y_0)|$ در فرآیند تصویربرداری SAR بیان می‌شود[1].

تا اینجا سیگنال بازگشتی به سمت رادار از یک هدف نقطه‌ای و در یک θ مشخص به‌دست آمد و بدین ترتیب گام نخست کامل شد؛ اما از آنجا که مدل تحلیلی باید دربرگیرندهٔ تمام اهداف نقطه‌ای موجود در ناحیه تصویربرداری باشد، به دنبال ایجاد سیگنال بازگشتی از کل ناحیه تصویربرداری خواهیم بود؛ لذا در گام دوم یک فرم بسته بین ناحیه تصویربرداری و سیگنال بازگشتی ایجاد خواهد شد. منظور از فرم بسته استخراج یک رابطه دقیق و جامع بین این دو ناحیه است که ایجاد چنین فرمی در SARهای نورافکن بر خلاف SARهای نواری امکان‌پذیر است؛ زیرا در SARهای نورافکن تنها یک ناحیه خاص از زمین در طول آنتن مصنوعی مشاهده می‌شود و این در حالی است که در SARهای نواری همواره چندین ناحیه تصویربرداری در طول آنتن مصنوعی وجود دارد.

در این مقاله برای ایجاد این فرم بسته از تعریف Projection اهداف که در [5]،[10] آمده، استفاده شده است.

[1] Close Form or Exact Form or Analytical Form
[2] Linear Frequency Modulation

[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-11-23]
[DOI: 10.18869/acadpub.jsdp.13.4.3]

Projection اهداف،$(q_\theta(u))$، طبق تعریف و مطابق شکل (۳) و (۴) به‌صورت جمع میدان پراکندگی همه اهدافی که در برد یکسان R+u از رادار و در زاویه مشاهده θ هستند، تعریف می‌شود. طبق این تعریف رابطه بین f(x,y) و $q_\theta(u)$ به‌صورت رابطه ۶ به‌دست می‌آید [10]:

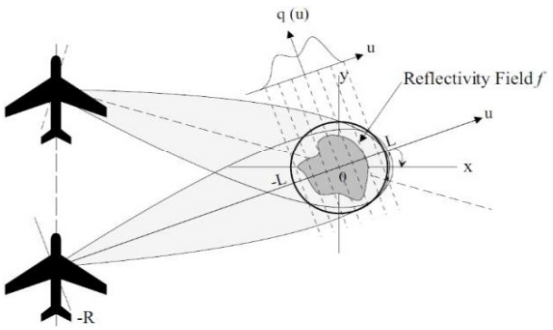
$$q_\theta(u) = \iint_{x^2+y^2\le L^2} \delta(u - x\cos\theta - y\sin\theta) f(x,y)\, dx\, dy \qquad (۶)$$

که در آن L شعاع ناحیه تصویربرداری می‌باشد. با استفاده از رابطه ۶، سیگنال بازگشتی به سمت رادار در خط دلخواه $u=u_0$ به‌صورت رابطه ۷ به‌دست می‌آید[9] :

$$V_{(\theta,u_0)}(t) = \Re\{q_\theta(u_0)\, s\left(t - \frac{2(R+u_0)}{c}\right)\}du \qquad (۷)$$

که درواقع بازگشتی از تمام اهدافی است که در فاصله $R+u_0$ از رادار قرار دارند. درنتیجه بازگشتی از کل ناحیه تصویربرداری در زاویه مشاهده θ به‌صورت رابطه ۸ خواهد بود[9] :

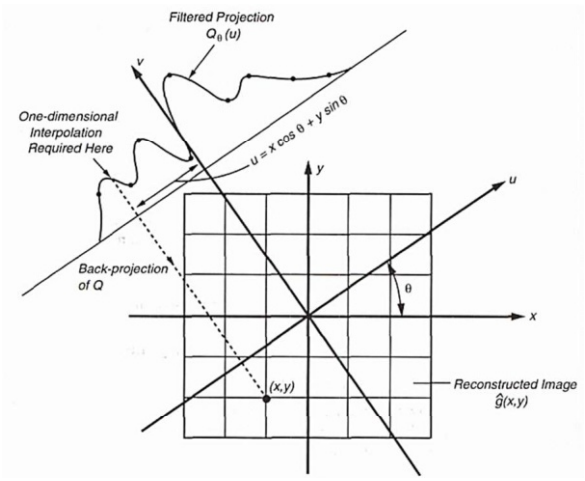
$$V_{(\theta)}(t) = \Re\{\int_{-L}^{L} q_\theta(u)\; s\left(t - \frac{2(R+u)}{c}\right)\}du \qquad (۸)$$



(شکل-۳): هندسه جمع‌آوری داده در SARهای نورافکن [5]
(Figure-3): Geometry of SAR data acquisition in spotligh mode [5].

بدین ترتیب گام دوم نیز کامل می‌شود. در گام سوم به دنبال تشکیل فضای سیگنالی خواهیم بود. برای این منظور ضمن دریافت سیگنال $V_{(\theta)}(t)$ در گیرنده، آن را به‌کمک دمدولاتور IQ به باند پایه منتقل کرده و در یک آرایه دوبعدی به‌نام فضای سیگنالی ذخیره خواهد شد. در این صورت $\bar{r}_\theta(t)$ که سیگنال بازگشتی دمدوله‌شده در موقعیت θ سکو است به‌صورت رابطهٔ ۹ به‌دست می‌آید[11].

$$\bar{r}_\theta(t) = \int_{-L}^{L} q_\theta(u)\, \exp\{j\tfrac{4\alpha u^2}{c^2}\}.\exp\left\{-j\tfrac{2}{c}\left(\omega_0 + 2\alpha(t-\tau_0)\right)u\right\}du \qquad (۹)$$



(شکل-۴): نحوهٔ به‌دست‌آوردن Projection اهداف[5]
(Figure-4): How to extract projection of targets [5]

که در آن $\tau_0 = \frac{2R}{c}$ نشان‌دهندهٔ تأخیر بین سیگنال ارسالی و دریافتی رادار است. حال با توجه به اینکه درعمل به‌طورمعمول $4\alpha u^2 \le c^2$ برقرار است، از دورهٔ مرتبهٔ دوم مرحله، $\exp\{j\frac{4\alpha u^2}{c^2}\}$، صرفه نظر کرده و با این تقریب سیگنال بازگشتی به صورت زیر نوشته می‌شود[11]:

$$r_\theta(t) = \int_{-L}^{L} q_\theta(u)\; \exp\left\{-j\tfrac{2}{c}\left(\omega_0 + 2\alpha(t-\tau_0)\right)u\right\}du = \int_{-L}^{L} q_\theta(u)\exp\{-j\Omega(t)u\}\,du \qquad (۱۰)$$

که این فرم از سیگنال بازگشتی درواقع بیان‌گر نمونه‌هایی از تبدیل فوریه $q_\theta(u)$ در یک شبکهٔ قطبی است که در آن فرکانس $\Omega(t)$ به‌صورت $\frac{2}{c}\left(\omega_0 + 2\alpha(t-\tau_0)\right)$ تعریف شده است(شکل (۵)).

تا اینجا یک فرم بسته بین سیگنال بازگشتی و Projection اهداف به‌دست آمد. برای به‌دست‌آوردن فرم بسته بین میدان پراکندگی و سیگنال بازگشتی از ترکیب دو رابطهٔ ۶ و ۱۰، رابطهٔ ۱۱ به‌دست خواهد آمد:

$$r_\theta(t) = \int_{|u|\le L}\iint_{x^2+y^2\le L^2} \delta(u - x\cos\theta - y\sin\theta) f(x,y)\exp\{-j\Omega(t)u\}dx\,dy\,du = \iint_{x^2+y^2\le L^2} f(x,y)\exp\{-j\Omega(t)(x\cos\theta + y\sin\theta)\}\,dx\,dy \qquad (۱۱)$$

رابطهٔ ۱۱ سیگنال راداری دریافتی از کل ناحیه تصویربرداری را در باند پایه نشان می‌دهد. با استفاده از این رابطه، فضای

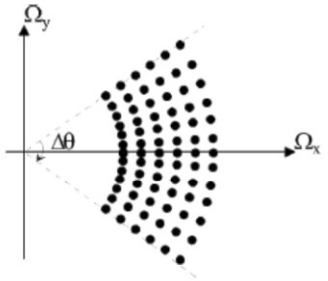
[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-11-23]
[DOI: 10.18869/acadpub.jsdp.13.4.3]

سیگنالی تشکیل‌شده در SAR های نورافکن به‌صورت رابطه ۱۲ خواهد بود.

$$Sbb_\theta(t) = r_\theta(t) + n_\theta(t) \qquad (۱۲)$$

که در آن $Sbb_\theta(t)$ فضای سیگنالی و $n_\theta(t)$ نوفهٔ کانال است که به‌صورت جمع‌شونده مدل شده است. لازم به ذکر است که اثرات دیگر کانال چون جمر و ... را نیز می‌توان به سیگنال دریافتی اضافه کرد.

با استخراج فضای سیگنالی، گام سوم نیز کامل شده و گام نهایی که گام تشکیل تصویر است، انجام می‌شود. در این گام، برای تولید تصویر SAR متناسب با صحنهٔ $f(x,y)$،



(شکل-۵): سیگنال بازگشتی در حالت نورافکن در مختصات قطبی که به‌صورت نمونه‌هایی از تبدیل فوریهٔ دوبعدی ناحیهٔ تصویر است. Ω_x و Ω_y به‌ترتیب فرکانس در جهت x و y می‌باشند[5].

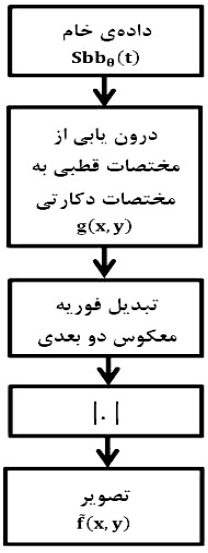
(Figure-5): Return signal in polar coordinates in spotlight mode, which are samples of two-dimensional Fourier transform of the image area. Ω_x and Ω_y are frequencies in x and y directions[5].

لازم است از الگوریتم‌های تشکیل تصویر استفاده شود که مهم‌ترین این الگوریتم‌ها در حالت نورافکن، PFA[1] و FBP[2] هستند. FBP[2] در این مقاله از الگوریتم پردازشی PFA استفاده شده است. این الگوریتم همان‌طورکه در روندنمای کلی آن در شکل (۶) نشان داده شده است، شامل سه مرحله است. در مرحلهٔ نخست درون‌یابی[3] از مختصات قطبی به دکارتی انجام می‌شود؛ زیرا همان‌طورکه در بالا بیان شد، نحوهٔ عملکرد SAR در حالت نورافکن در هر موقعیت از سمت(θ) به‌گونه‌ای است که نمونه‌هایی از تبدیل فوریه دوبعدی ناحیه تصویر را در یک شبکهٔ قطبی به‌دست می‌آورد؛ لذا پردازش لازم در حالت نورافکن به‌صورت عکس تبدیل فوریه است که پیاده‌سازی عکس تبدیل فوریه در مختصات دکارتی امکان‌پذیر است. درون‌یابی از مختصات قطبی به مختصات دکارتی در الگوریتم PFA بسته به میزان قدرت تفکیک و کیفیت تصاویر از منظر نوفه، به‌صورت‌های مختلفی انجام می‌شود که سه نمونهٔ آن در شکل (۷) نمایش داده شده است. به‌عنوان مثال همان‌طورکه در شکل (۷-الف) مشاهده می‌شود، برای درون‌یابی، کل ناحیه(تمامی نمونه‌ها) در نظر گرفته شده است و این مسأله باعث می‌شود، قدرت تفکیک در حد مناسبی باشد؛ اما در مقابل نوفهٔ زیادی نیز وارد سامانه می‌شود و کیفیت تصویر کاهش می‌یابد. در شکل (۷-ب) در مقایسه با شکل (۷-الف) تعداد نمونه‌های کمتری در نظر گرفته شده و مقدار نوفه کمتری نیز وارد سامانه می‌شود. درنتیجه قدرت تفکیک کاهش یافته، اما کیفیت تصویر بهتر می‌شود و درنهایت در شکل (۷-ج) نسبت به شکل (۷-الف و ب) تعداد نمونه‌ها خیلی کمتر شده، ولی هیچ نوفه‌ای وارد سامانه نمی‌شود؛ درنتیجه قدرت تفکیک به مراتب کمتر از دو مرحلهٔ قبل شده، ولی کیفیت تصویر بیش‌تر از دو مرحله قبلی است. درنتیجه نحوهٔ درون‌یابی در الگوریتم PFA بسته به میزان قدرت تفکیک و کیفیت تصاویر به یک مصالحه نیاز دارد.

بعد از درون‌یابی در مرحلهٔ نخست(رابطه ۱۳)، عکس تبدیل فوریه در مرحله دوم انجام می‌شود. درنهایت بعد از طی دو مرحلهٔ قبل اندازهٔ سیگنال برگشتی پردازش شده که درواقع نمای ضریب انعکاس پیکسل‌های سطح است به‌عنوان تصویر نهایی SAR نمایش داده خواهد شد[12] و بدین ترتیب مدل تحلیلی ارائه‌شده نیز کامل می‌شود (رابطه ۱۴).

$$g(x,y) = \text{Interpolation}\left(\left(Sbb_\theta(t)\right)\right) \qquad (۱۳)$$

$$\tilde{f}(x,y) = \left|\text{IFFT2D}(g(x,y))\right| \qquad (۱۴)$$

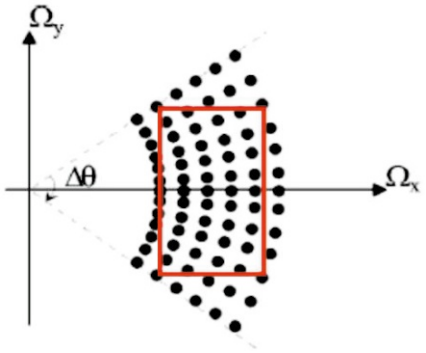


(شکل-۶): روندنمای الگوریتم تشکیل تصویر PFA در حالت نورافکن [12]

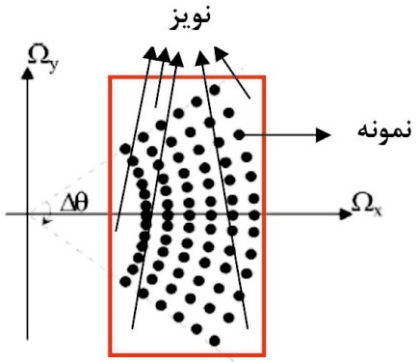
(Figure-6): Block diagram of PFA image formation algorithm in spotlight mode [12]

[1] Polar Format Algorithm
[2] Filter Back Projection
[3] Interpolation

[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-11-23]
[DOI: 10.18869/acadpub.jsdp.13.4.3]



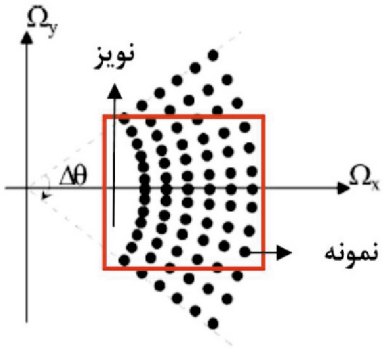
(ج)
(c)



(الف)
(a)

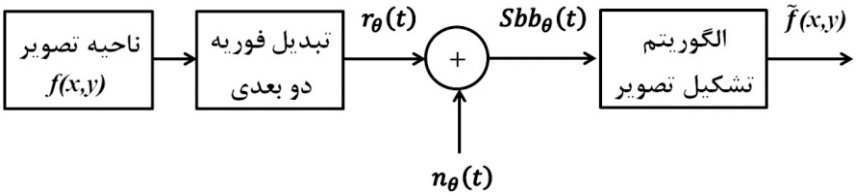
(شکل-۷): الف، ب و ج) صورت‌های مختلف درون‌یابی از مختصات قطبی به دکارتی در حالت نورافکن

(Figure-7): a, b and c) Different methods of interpolation from polar to Cartesian coordinates in spotlight mode



(ب)
(b)

با توجه به مطالب بالا مدل عملکردی پیشنهادی این مقاله برای SARهای نورافکن به‌صورت شکل (۸) است. لازم به ذکر است که به‌دلیل محدودبودن پهنای باند سیگنال ارسالی و همچنین محدودبودن ناحیه تصویربرداری، منظور از بلوک تبدیل فوریه دوبعدی در شکل (۸)، یک تبدیل فوریه کامل و ایده‌آل نبوده بلکه منظور به‌دست آوردن نمونه‌هایی از تبدیل فوریه سیگنال در هر موقعیت از سمت(زاویه مشاهده) است. در قسمت بعد، مدل ارائه‌شده در این بخش با استفاده از دو نرم‌افزار CST و MATLAB پیاده‌سازی نرم‌افزاری می‌گردد.



(شکل-۸): مدل‌سازی عملکرد SAR در حالت نورافکن

(Figure-8): Modeling SAR performance in the spotlight mode

۴- پیاده‌سازی نرم‌افزاری عملکرد SARهای نورافکن در بخش تشکیل تصویر

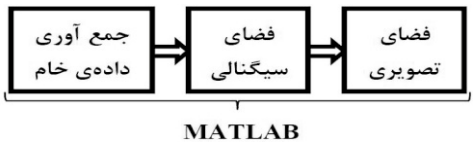
برای پیاده‌سازی مدل ارائه‌شده به‌صورت نرم‌افزاری نیازمند پیاده‌سازی سه گام اساسی جمع‌آوری دادهٔ خام، تشکیل فضای سیگنالی و تشکیل فضای تصویری به‌صورت نرم‌افزاری هستیم. درکارهای قبلی در حوزهٔ پیاده‌سازی نرم‌افزاری نحوهٔ عملکرد SAR، از روندنمای شکل(۹) استفاده شده است[13]-[16]. ضعف عمده این روش استفاده از نرم افزار MATLAB در گام جمع آوری داده‌ی خام است که باعث می‌شود، سطح مقطع راداری هر نقطه از یک جسم میزان ثابتی در نظر گرفته شود؛ زیرا MATLAB ابزار مناسبی برای استخراج سطح مقطع راداری نیست و با آن درعمل نمی‌توان سطح مقطع راداری یک جسم پیچیده را در هر موقعیت از سمت به‌دست آورد(حجم محاسبات بسیار زیاد می‌شود). این در حالی است که به‌دلیل حرکت SAR و تغییر زاویه مشاهده یک هدف، سطح مقطع راداری آن در هر موقعیت از سمت تغییر کرده و میزان ثابتی نیست.

[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.18869/acadpub.jsdp.13.4.3]

برای حل این مشکل، در این مقاله از ترکیب دو نرم‌افزار CST و MATLAB برای پیاده‌سازی نرم‌افزاری نحوه عملکرد SAR استفاده شده است. CST نرم‌افزاری قدرتمند برای استخراج میدان پراکندگی است و می‌تواند سطح مقطع راداری جسم را در هر موقعیت از سمت به‌درستی استخراج کند. برای این منظور ابتدا مدل سه‌بعدی هدف در نرم‌افزار CST تشکیل می‌شود. برای تشکیل این مدل هم می‌توان از اشکال موجود در این نرافزار استفاده کرد و هم با استفاده از نرم‌افزارهای دیگری چون Auto Cad مدل ایجادشده را به‌عنوان ورودی به CST وارد کرد؛ سپس با تشکیل موج ارسالی رادار SAR در CST، آن را به سمت هدف مورد نظر ارسال کرده و بازگشتی آن را در هر موقعیت از سمت، در گیرندهٔ موجود در CST دریافت کرد. بدین ترتیب میدان پراکندگی هدف مورد نظر در محیط نرم‌افزاری CST استخراج شده و با انتقال دامنه و مرحلهٔ آن به محیط MATLAB، ماتریس دوبعدی فضای سیگنالی ایجاد می‌شود و درنهایت با اعمال الگوریتم تشکیل تصویر، تصویر نهایی SAR تشکیل می‌شود. لازم به ذکر است که در این مقاله برای حذف نوفه لکه‌ای[1] که جزءِ جدایی‌ناپذیر تصاویر SAR است و باعث لکه‌ای‌شـــدن(ساختار برفکی) تصاویر SAR می‌شود از روش حذف نوفه چند نگاهی[2] که در[1] آمده، استفاده شده است.

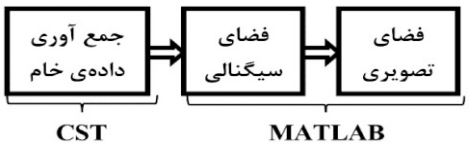
شکل (۱۰) روندنمای کلی از نحوه پیاده‌سازی نرم‌افزاری پیشنهادی در این مقاله را نشان می‌دهد که در آن، نرم افزار CST پوشش‌دهنده گام نخست بوده و برای استخراج میدان پراکندگی در هر موقعیت از سمت استفاده می‌شود. دو گام بعدی نیز در محیط نرم‌افزاری MATLAB پیاده‌سازی می‌شود. همچنین شکل (۱۱) نیز، زیر مراحل موجود در هر گام را نشان می دهد.



(شکل-۹): ساختار استفاده شده در کارهای قبلی برای پیاده‌سازی نرم‌افزاری مدل عملکرد SAR در بخش تشکیل تصویر

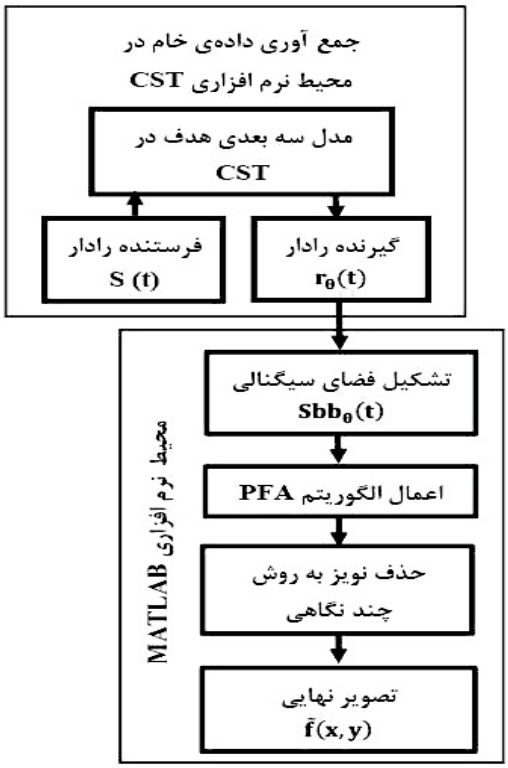
(Figure-9): The structure used in previous works for software implementation of SAR operation model in mage formation section

[1] Speckle Noise
[2] Multilook



(شکل-۱۰): ساختار پیشنهادی برای پیاده‌سازی نرم‌افزاری مدل عملکرد SAR در بخش تشکیل تصویر

(Figure-10): The proposed structure for software implementation of SAR operation in image formation section



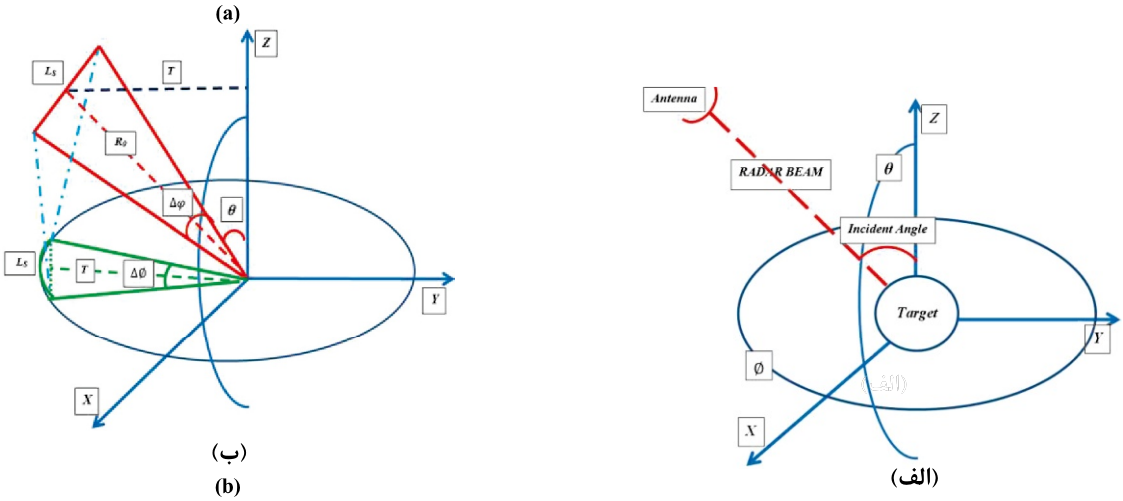
(شکل-۱۱): روندنمای پیشنهادی برای پیاده‌سازی نرم‌افزاری

(Figure-11): The proposed flowchart for software implementation

چالش اصلی در روش پیاده‌سازی پیشنهادی این مقاله، نبودن رادار SAR در محیط نرم‌افزاری CST است؛ لذا در ادامه به امکان‌سنجی استفاده از CST در قالب رادار SAR پرداخته می‌شود. همان‌طورکه می‌دانیم رادار SAR دارای حرکت بوده و مسافتی را به طول دهانه مصنوعی (Ls) طی می‌کند و در هر موقعیت از سمت، میدان پراکندگی از هدف مورد نظر را استخراج می‌کند. از طرف دیگر نرم‌افزار CST نیز در یک مختصات کروی از دو جهت به پویش هدف مورد نظر می‌پردازد. این دو جهت θ و Ø می‌باشند که به‌ترتیب پویش در جهت عمودی و اسکن در جهت افقی نامیده می‌شوند. در این مقاله با توجه به تعریف زاویه فرود در SAR که زاویه میان راستای موج و خط عمود بر سطح زمین تعریف می‌شود، پویش در جهت عمودی (θ) مطابق شکل (۱۲-الف) معادل با زاویه فرود SAR در نظرگرفته می‌شود.

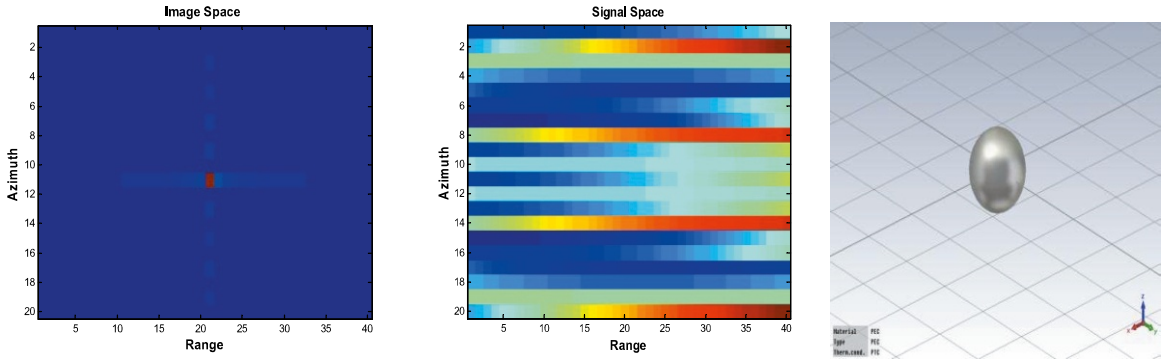
[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-11-23]
[DOI: 10.18869/acadpub.jsdp.13.4.3]

همچنین با توجه به شکل (۱۲-الف) می‌توان پویش در جهت افقی (Ø) را معادل با حرکت SAR در نظر گرفت؛ اما مقدار و یا میزان این اسکن (ΔØ) در مختصات کروی موجود در CST بسیار حائز اهمیت است. برای به‌دست‌آوردن این مقدار مطابق شکل (۱۲-ب) میزان حرکت SAR در فضا یعنی L_s، به مقدار پویش CST در مختصات کروی یعنی ΔØ، نگاشت داده می‌شود.



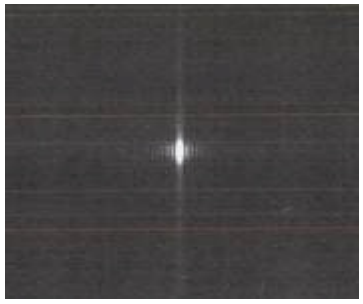
(شکل-۱۲): الف) نحوه پویش هدف توسط SAR و CST ب) چگونگی نگاشت SAR از فضا به درون مختصات کروی موجود در CST.

(Figure-12): a) How to scan a target by SAR and CST. b) SAR mapping of the space into spherical coordinates in CST.



(شکل-۱۳): الف) جمع‌آوری دادهٔ خام در محیط نرم‌افزاری CST. ب) انتقال داده‌های خام از CST به MATLAB و تشکیل فضای سیگنالی.
ج) اعمال الگوریتم تشکیل تصویر PFA بر روی فضای سیگنالی و استخراج فضای تصویری

(Figure-13): a) Raw data acquisition in CST software environment. b) Transferring of raw data from CST to MATLAB and signal space formation. c) Applying the PFA algorithm on the signal space and image space formation.



(شکل-۱۴): فضای تصویری کره‌ی منزوی موجود در [5]- محور افقی سمت و محور عمودی برد می‌باشد.

(Figure-14): Image space of isolated sphere in [5] - The horizontal axis is azimuth and vertical axis is range.

[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.18869/acadpub.jsdp.13.4.3]

بدین ترتیب امکان استفاده از نرم‌افزار CST در قالب رادار SAR به‌وجود می‌آید و با آن می‌توان به جمع‌آوری میدان پرکندگی از اهداف مختلف پرداخت. در ادامه با انجام شبیه‌سازی و مقایسه نتیجه حاصل از آن با مراجع معتبر، صحت پیاده‌سازی ارائه‌شده اثبات می‌شود. در این شبیه‌سازی فضای تصویری یک کرهٔ منزوی استخراج می‌شود.

منظور از کرهٔ منزوی یک هدف نقطه‌ای[1] کروی شکل است که در یک زمینه[2] خالی وجود دارد. برای انجام شبیه‌سازی‌ها از مشخصات سامانهٔ RADARSAT استفاده شده است.

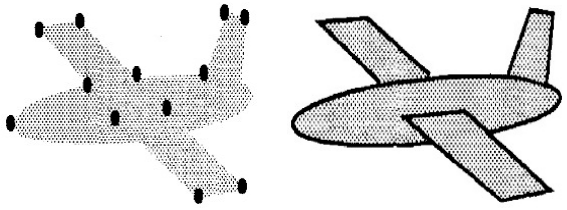
همان‌طورکه در شکل(۱۳-الف) مشاهده می‌شود، ابتدا کرهٔ منزوی در نرم‌افزار CST شبیه‌سازی شد و پس از استخراج میدان پراکندگی در هر موقعیت از سمت، فضای سیگنالی متناسب با آن در محیط MATLAB تشکیل شد(شکل۱۳-ب) و درنهایت با اعمال الگوریتم تشکیل تصویر PFA بر روی آن فضای تصویری مربوط به کرهٔ منزوی استخراج شد (شکل۱۳-ج). درنهایت با مقایسه فضای تصویری حاصل‌شده در این مقاله و فضای تصویری موجود در [5] (شکل ۱۴) صحت پیاده‌سازی انجام‌شده در این مقاله اثبات می‌شود.

با این پیاده‌سازی، مدل نرم‌افزاری SARهای نورافکن در بخش تشکیل تصویر نیز کامل شده و علاوه‌بر تشریح چگونگی رفتار این سامانه‌ها قابلیت‌های زیادی چون امکان تحلیل اثر پارامترهای مختلف سامانه‌های تصویربرداری SAR، تفسیر بهتر تصاویر SAR، امکان بررسی صحت راه‌کارهای مطرح‌شده در جنگ الکترونیک یا پدافند غیرعامل برای مقابله با سامانه‌های SAR، امکان تولید تصویر از اهداف گسترده[3] و ... به‌وجود خواهد آمد. در ادامه برای تشریح بیشتر قابلیت‌های به‌وجودآمده، در قالب دو مثال، به تولید تصویر از هدف گسترده و همچنین شبیه‌سازی و تحلیل تأثیر ابعاد بدنه هدف به‌عنوان یکی از پارامترهای مهم و تأثیرگذار در تصاویر SAR پرداخته می‌شود.

در مقالات موجود در زمینهٔ رادارهای SAR به‌طورمعمول از مدل نقطه‌ای اهداف گسترده برای تولید تصویر از آنها استفاده می‌شود. روندنمای استفاده‌شده برای این روش مطابق شکل (۹) است. به‌عنوان مثال همانطور که در شکل (۱۵) نشان داده شده است، می‌توان به جای هواپیما از مدل نقطه‌ای آن استفاده کرد. که این روش تقریبی بوده و به تعداد نقاط استفاده‌شده در آن بستگی دارد. به‌طوری‌که هرچقدر این تعداد بیشتر باشد، تصویر به‌دست‌آمده نیز واقعی‌تر خواهد بود. به‌عبارت دیگر در بهترین شرایط که تعداد نقاط به سمت بی‌نهایت میل می‌کند، الگوی نقطه‌ای هدف به شکلِ خود هدف تبدیل شده و آنگاه تصویر SAR تولیدی از آن به‌طورکامل با واقعیت تطبیق خواهد داشت. در این مقاله با توجه به نمودار موجود در شکل (۱۱) می‌توان الگوی سه‌بعدی هدف را به‌صورت کامل در CST ایجاد کرد یعنی به جای مدل نقطه‌ای از خود هواپیما(شکل۱۵) استفاده کرد و سیگنال SAR را به آن تاباند و سیگنال‌های دریافتی از آن را پردازش و تصویر آن را استخراج کرد. به‌عنوان نمونه در ادامه با توجه به دراختیارداشتن الگوی سه‌بعدی یک گلایدر تصویر آن با استفاده از روش پیشنهادی این مقاله به‌دست می‌آید و سپس تصویر یک هواپیما با استفاده از مدل نقطه‌ای آن استخراج می‌شود و درنهایت با هم مقایسه می‌شوند.

در شکل (۱۶) الگوی سه‌بعدی ایجادشده از یک گلایدر بزرگ به ابعاد ۱۴ متر طول(از دماغه تا انتها) و ۱۳,۷ متر عرض(طول بالها) در محیط نرم‌افزاری CST مشاهده می‌شود که یک SAR فرضی با مشخصات موجود در جدول(۱) به تصویربرداری از آن می‌پردازد. پس از انجام پردازش‌های لازم تصویر SAR از این گلایدر مطابق شکل(۱۷) به‌دست آمد. تا اینجا تصویر یک هدف گسترده با استفاده از روش پیشنهادی این مقاله استخراج شد. در ادامه به استخراج تصویر هواپیما با استفاده از مدل نقطه‌ای آن پرداخته می‌شود.

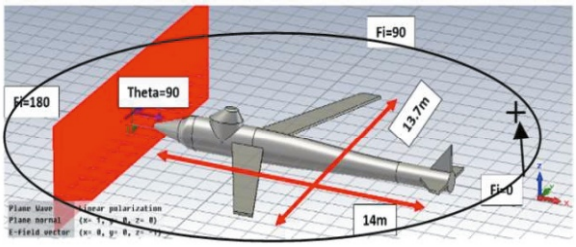
مدل نقطه‌ای یک هواپیما با توجه به مطالب موجود در [16]-[14] مطابق شکل(۱۸) در نظر گرفته شده است. با استفاده از روندنمای شکل(۹) فضای تصویری حاصل از این مدل نقطه‌ای مطابق شکل(۱۹) استخراج می‌شود. با مقایسه شکل‌های (۱۷) و (۱۹) از نظر بصری، مشخص می‌شود که روش پیشنهادی این مقاله برای پیاده‌سازی نرم‌افزاری تطبیق بیشتری با واقعیت دارد. درنتیجه مشاهده شد که بر خلاف شبیه‌سازی‌های گذشته می‌توان به جای مدل نقطه‌ای، از خود هدف استفاده و تصویر واقعی‌تری از آن استخراج کرد.



(شکل-۱۵): یک جسم گسترده به همراه مدل نقطه‌ای آن[13]
(Figure-15): A distributed target with its pointing model [13]

[1] Point Target
[2] Background
[3] Distributed Target

[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-11-23]
[DOI: 10.18869/acadpub.jsdp.13.4.3]



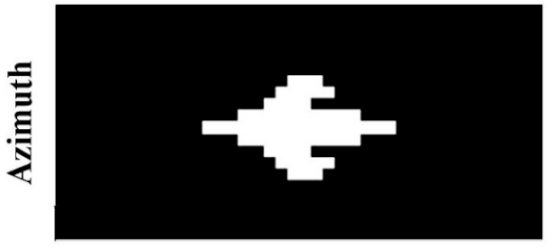
(شکل-۱۶): ایجاد یک هدف گسترده (گلایدر) در محیط نرم‌افزاری CST.

(Figure-16): Creating a distributed target (glider) in CST software environment.

(جدول-۱): مشخصات یک سامانه SAR فرضی

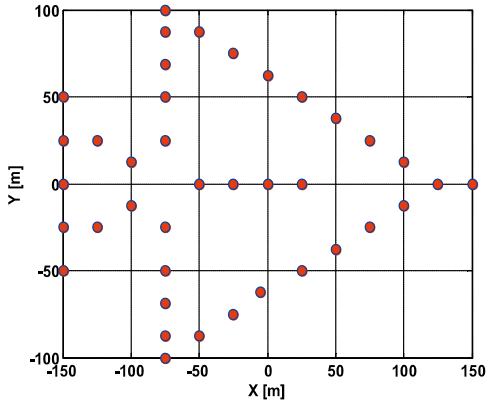
(Table-1): Hypothetical SAR characteristics

مشخصات	مقدار
قدرت تفکیک برد	2m
قدرت تفکیک سمت	2m
فرکانس کاری	10GHz
پلاریزاسیون	Horizontal
زاویه فرود(θ)	90 Deg
زاویه اسکن(Ø)	180 Deg
ΔØ	0.43 Deg



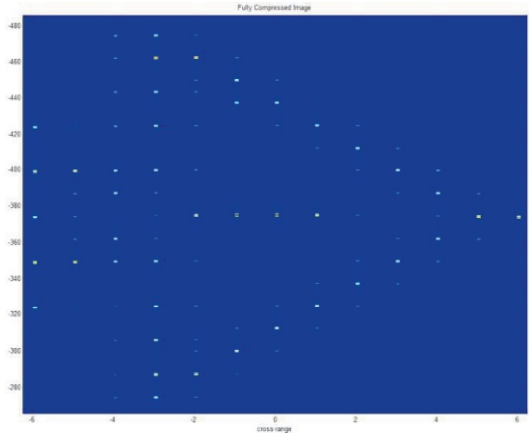
(شکل-۱۷): تصویر راداری به‌دست‌آمده از گلایدر

(Figure-17): Radar image obtained from the glider



(شکل-۱۸): مدل نقطه‌ای هواپیما

(Figure-18): Pointing model of plane



(شکل-۱۹): تصویر به‌دست آمده از مدل نقطه‌ای هواپیما

(Figure-19): The image obtained from the pointing model of plane

در مثال دوم برای بررسی تأثیر ابعاد بدنه هدف در تصاویر SAR، دو هدف مکعبی‌شکل با ابعاد $-0.25<x<0.25$، $-0.25<y<0.25$، $z=0.25$ و $-1<x<1$، $-1<y<1$، $z=1$ در محیط نرم‌افزاری CST تولید شدند و سپس با استفاده از مشخصات سامانهٔ SAR فرضی موجود در جدول(۱) تنها با این تفاوت که زاویهٔ فرود در اینجا سی درجه است، به استخراج فضای تصویری از آنها مطابق شکل (۲۰-الف و ب) پرداخته شد. با تحلیل نمایه[1] آنها درجهت برد یا سمت شکل (۲۰) مشخص می شود که دامنه پیک اصلی در موج بازگشتی از مکعبِ بزرگ‌تر(۰,۴۷)، نسبت به مکعبِ کوچک‌تر(۰,۱۶) بیشتر است. از این رو در تصاویر SAR شکل داده‌شده، الگوی تشکیل‌شده برای مکعبِ بزرگ‌تر بسیار روشن‌تر از الگوی تشکیل‌شده برای مکعبِ کوچک‌تر است. نتیجهٔ جانبی اینکه در یک دقت رادیومتریک محدود برای تصویر SAR، الگوی مکعبِ بزرگ‌تر کشیده‌تر از الگوی مکعبِ کوچک‌تر به‌نظر می‌رسد که این موضوع در فضای تصویری شکل (۲۰) به‌طورکامل مشهود است. درنتیجه با توجه به اینکه از دیدگاه سنجش از دور راداری، یک هدف مکعبی‌شکل در دنیای واقع می‌تواند بیان‌گر خانه‌ها و ساختمان‌ها باشد، می‌توان گفت که الگوی یک ساختمانِ بزرگ در تصویر SAR، نسبت به یک ساختمانِ کوچک، کشیده‌تر و روشن‌تر است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله ضمن مدل‌سازی عملکرد SARهای نورافکن در بخش تشکیل تصویر به‌صورت تحلیلی، به پیاده‌سازی نرم‌افزاری آن نیز پرداخته شد. اهمیت این پیاده‌سازی از آن

[1] Profile

[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.18869/acadpub.jsdp.13.4.3]

جهت است که علاوه‌بر تشریح چگونگی رفتار SAR، قابلیت‌های متعددی را به‌وجود می‌آورد. از جمله این قابلیت‌ها عبارتند از:

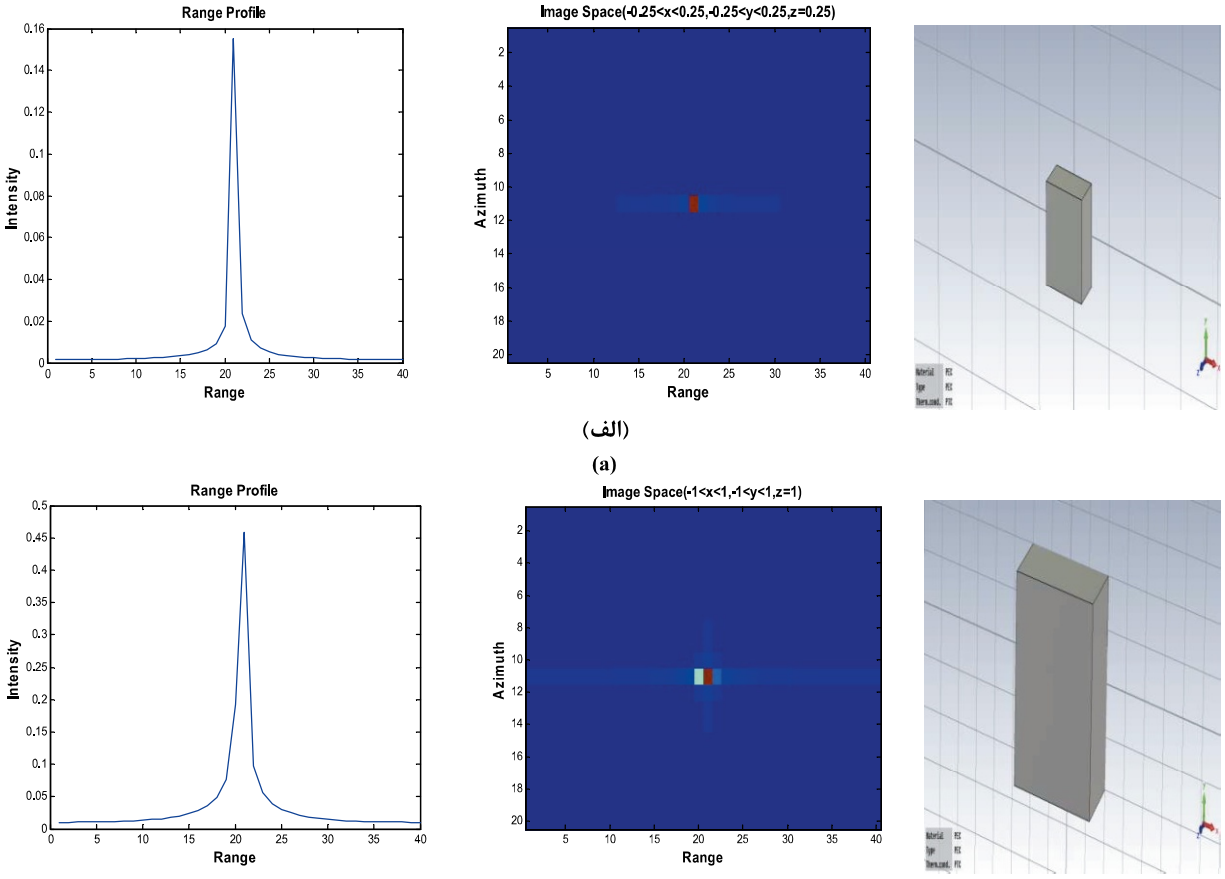
۱. امکان تحلیل اثر پارامترهای مختلف سامانه‌های تصویربرداری SAR فراهم می‌شود. از این منظر گام مهمی در جهت طراحی و ساخت این نوع سامانه‌های تصویربرداری برداشته خواهد شد.

۲. از طرف دیگر با توجه به آنکه عوامل مختلف درون‌سامانه‌ای و برون‌سامانه‌ای چون رادار، سکو حامل سنجنده، الگوریتم‌های پردازشی، ناحیهٔ تصویربرداری و کانال در اطلاعات ثبت‌شده توسط سامانه‌های تصویربرداری SAR نقش دارند، مدل‌سازی عملکرد این سامانه‌ها به تفسیر تصاویر SAR نیز کمک قابل توجهی خواهد کرد.

۳. این نوع مدل‌سازی‌ها امکان شبیه‌سازی سطوح و اهداف را از منظر سامانه‌های تصویربرداری SAR فراهم می‌آورد.

۴. نظر به کلیدی‌شدن فناوری SAR در کسب برتری اطلاعاتی در میدان نبرد، مدل‌سازی عملکرد این نوع سامانه‌های تصویربرداری امکان طراحی راه‌کارهای مقابله با آنها را امکان‌پذیر می‌کند؛ زیرا ناحیه تصویربرداری و کانال که دو عامل اصلی در پدافند غیرعامل و جنگ الکترونیک محسوب می‌شوند به‌راحتی قابل مدل‌سازی در نرم‌افزار ایجادشده هستند. به‌علاوه مدل ایجادشده بستری را برای اثبات صحت راه‌کارهای مطرح‌شده در جنگ الکترونیک و پدافند غیرعامل در برابر سامانه‌های SAR فراهم می‌کند.

۵. قابلیت تولید تصویر از اهداف گسترده به‌وجود می‌آید. به‌علاوه می‌توان مدل نقطه‌ای دقیق از اهداف گسترده را نیز استخراج کرد.



(الف)

(a)

(ب)

(b)

(شکل-۲۰): الف و ب) شبیه‌سازی تاثیر ابعاد بدنه هدف

(Figure-20): a,b) Simulate the effect of body size target

[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.18869/acadpub.jsdp.13.4.3]

6-Refrences ۶-مراجع

[1] I. G. Cumming and F.H. Wong, *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data*, 1st edition, Artech House, London, 2006.

[2] W. L. Melvin, J. A. Scheer, *Principles of Modern Radar*, SciTech, 2013.

[3] J. A. Richards, *Remote Sensing with Imaging Radar*, 1st edition, Springer, New York, 2009.

[4] X. Luo, Y. Deng, R. Wan, W. Luo, Y. Xu and L. Guo, "Full-Aperture SAR Data Focusing in the Spaceborne Squinted Sliding-Spotlight Mode," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 11, pp. 1692-1696, October 2014.

[5] C. V. Jakowatz, D. E. Whal, P. H. Eichel, D. C. Ghiglia, P. A. Thompson, *Spotlight-Mode Synthetic Aperture Radar a signal Processing Approach*, Kluwer Academic Publishers, 1996.

[۶] دهقانی، حمید، ریوندی، علی، بهزاد فلاح پور، مجتبی، موسی زاده، کیومرث، "مدل سازی عملکرد سامانه های تصویربرداریSAR"، فصلنامه علمی پژوهشی علوم و فناوری فضایی، جلد ۶، شماره ۱، ص. ص۴۷-۵۶، بهار۹۲.

[6]H. Dehghani, A. Reyvandi, M. Behzad Fallahpour, k. Mousazade, "SAR Imaging Systems Performance Modeling", Journal of Space Science and Technology, Vol. 6, No. 1, pp.47-56, 2013.

[7] S. Roedelsperger, C. Trampuz, A. Coccia, "Latest Meta Sensing ground, airborne and space borne SAR developments," *IEEE 13th International Symposium Radar(IRS)*, 2012.

[8] Y. Deng, W. Yu, R. Wang, "On Space Borne Synthetic Aperture Radar (SAR) Systems in China," *General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS),* 2014.

[9] W. G. Carrara, R. S. Goodman, R. M. Majewski, *Spotlight Synthetic Aperture Radar Signal Processing Algorithms*, Artech House , Boston, 1995.

[10] F. Banda, L. Ferro-Famil, S.Tebaldini , "Polarimetric Time-Frequency Analysis of Vessels in Spotlight SAR Images," *IEEE International Symposium of Geoscience and Remote Sensing (IGARSS),* 2014.

[11] S. Guangcai, J. Guobin, Y. Jun, C. Gushun, X. Mengdao, "Beam Steering SAR Data Processing By a Generalized PFA," *IEEE 10th European Conference on Proceedings of Synthetic Aperture Radar (EUSAR),* 2014.

[12] Bo. Fan, Q. Yuilang, P. You, H. Qiangwang, "An Improved PFA with Aperture Accommodation for Widefield Spotlight SAR Imaging," *Geoscience and Remote Sensing Letter*, vol. 12, pp. 3-7, 2015.

[13] R. Bhalla, H. Ling,"Three-Dimensional Scattering Center Extraction Using the Shooting and Bouncing FLay Technique," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 44, pp.1445-1453, November 1996.

[14] A. Kaya, M. Kartal, "Point Scatterer Model for RCS Prediction Using ISAR Measurements," *IEEE 4th International Conference on Recent Advances Technologies in Space (RAST '09)*, 2009, pp. 422-425.

[15] G. Cakir, L. Sevgi, "Radar Cross-Section (RCS) Analysis of High Frequency Surface Wave Radar Targets," *Turkish Journal of Electronic Engineering and Computer Science(TUBITAK)*, vol.18, pp. 457-467, 2010.

[16] J. Zhang, J. Hu, Y. Gao, R. Zhan, and Q. Zhai, "Three-Dimensional Scattering Centers Extraction of Radar Targets Using High Resolution Techniques," *Progress In Electromagnetics Research Journal*, vol. 37, pp. 127-137, 2014.



مجتبی بهـزاد فلـاح پـور مـدرک کارشناسـی ارشـد خـود را در رشـته مهندسی بـرق مخـابرات- سیسـتم از دانشگاه صنعتی ماک اشـتر تهـران در سال ۱۳۹۱ دریافـت کـرد. او در سـال ۱۳۹۲ وارد مقطع دکترا در رشته برق- مخابرات- سیستم در دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران شد و هم‌اکنون دانشـجوی این مقطع است. زمینـه‌هـای پژوهشـی مـورد علاقـه ایشـان پردازش سـیگنال راداری، بهینـه سـازی و نـاوبری رادیـویی است.

نشانی رایانامه ایشان عبارت است از:

m_behzad_fp@yahoo.com

[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.18869/acadpub.jsdp.13.4.3]

[Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-11-23]

[DOI: 10.18869/acadpub.jsdp.13.4.3]



حمید دهقانی مدرک کارشناسی ارشد و دکترای خود را در رشته مهندسی برق مخابرات گرایش سیستم در دانشگاه تربیت مدرس به‌ترتیب در سال‌های ۱۳۸۱و ۱۳۸۵ دریافت کرد. زمینهٔ پژوهشی مورد علاقه ایشان سنجش از دور و شناسایی الگو است.

نشانی رایانامه ایشان عبارت است از:
Hamid_deh@yahoo.com



علی جبار رشیدی متولد ۱۳۴۹ هجری شمسی، مدرک کارشناسی خود را در رشته مهندسی برق-الکترونیک از دانشگاه شهید باهنر کرمان و کارشناسی ارشد و دکترای تخصصی خود را در مهندسی برق-مخابرات به‌ترتیب در سال‌های ۱۳۷۷ و ۱۳۸۳ از دانشگاه تربیت مدرس دریافت نمود. او دانشیار و عضو هیئت علمی گروه مهندسی مخابرات دانشگاه صنعتی مالک اشتر است. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان پردازش و ادغام اطلاعات در سامانه‌ها و حس‌گرهای چندگانه، طراحی سامانه‌های رادار، ناوبری و هوشمندسازی گروهی است. نشانی رایانامه ایشان عبارت است از:
aiorashid@yahoo.com



عباس شیخی متولد ۱۳۵۰ هجری شمسی، مدرک کارشناسی خود را در رشته مهندسی برق-الکترونیک از دانشگاه شیراز درسال ۱۳۷۲ و کارشناسی ارشد و دکترای تخصصی خود را به‌ترتیب در رشته‌های مهندسی پزشکی- بیو الکتریک و مهندسی برق-مخابرات در سال‌های ۱۳۷۴ و ۱۳۷۸ از دانشگاه صنعتی شریف دریافت کرد. او از سال ۷۸ تاکنون عضو هیئت علمی دانشگاه شیراز و مرتبه علمی وی استاد است. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقهٔ ایشان پردازش سیگنال راداری، تئوری تخمین و تئوری آشکارسازی است.

نشانی رایانامه ایشان عبارت است از:
sheikhi@shirazu.ac.ir

[DOI: 10.18869/acadpub.jsdp.13.4.3] [Downloaded from jsdp.rcisp.ac.ir on 2026-11-23]