

مدل سازی و پیاده سازی نرم افزاری عملکرد سامانه های تصویر برداری SAR در حالت نورافکن

مجتبی بهزاد فلاح پور^۱، حمید دهقانی^{۲*}، علی جبار رشیدی^۳ و عباس شیخی^۴

^{۱،۲} و ^۳ دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

^۴ دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران



چکیده

سامانه های تصویربرداری SAR به عنوان مکملی برای سنجنده های سنجش از دور غیر فعال مطرح هستند؛ اما پیچیدگی بالایی در مرحله تشکیل تصویر دارند. به طوری که تصویر نهایی در این سامانه ها پس از طی سه گام اساسی جمع آوری داده خام، تشکیل فضای سیگنالی و تشکیل فضای تصویری به وجود می آید. به علاوه در اطلاعات ثبت شده توسط سامانه های تصویربرداری SAR عوامل مختلف درون سیستمی و برون سامانه ای چون رادار، سکو حامل رادار، الگوریتم های پردازشی، ناحیه تصویربرداری و کانال نقش دارند که هر کدام از زیر پارامترهای فراوانی تشکیل شده اند و این موضوع نیز بر پیچیدگی نحوه رفتار SAR می افزاید؛ لذا با توجه به این پیچیدگی ها ارائه مدل هایی که نحوه عملکرد سامانه های تصویربرداری SAR را تشریح کند، بسیار مطلوب است. در این مقاله ابتدا نحوه عملکرد SAR در مرحله تشکیل تصویر و در حالت عملکردی نورافکنی به صورت تحلیلی، مدل سازی می شود؛ سپس مدل ارائه شده به صورت نرم افزاری پیاده سازی می شود که این پیاده سازی در برگرفته هر سه گام اساسی بخش تشکیل تصویر است؛ به گونه ای که جمع آوری داده خام در محیط نرم افزاری CST و تشکیل فضای سیگنالی و تصویری در محیط نرم افزاری MATLAB انجام می شود؛ و اهمیت این پیاده سازی از آن جهت است که قابلیت های زیادی چون امکان تحلیل اثر پارامترهای مختلف سامانه های تصویربرداری SAR، تفسیر بهتر این نوع از تصاویر، امکان بررسی صحت راه کارهای مطرح شده را در جنگ الکترونیک یا پدافند غیرعامل برای مقابله با سامانه های SAR و ... به وجود خواهد آورد.

واژگان کلیدی: SAR، فضای سیگنالی، فضای تصویری، میدان پراکندگی، مدل عملکردی، پیاده سازی نرم افزاری

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

Mojtaba Behzad Fallahpour¹, Hamid Dehghani^{2*}, Ali Jabbar Rashidi³ & Abbas Sheikhi⁴

^{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

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

عمل تصویربرداری در سامانه SAR با جابه‌جا کردن سکو در یک مسیر مستقیم که مسیر پرواز⁹ 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 آنتن¹⁰ نامیده می‌شود. با حرکت سکو در امتداد مسیر پرواز، ناحیه‌ای بر روی زمین پوشش می‌شود که به آن ناحیه تصویر (نوار پوشش رادار¹¹) گفته می‌شود. همانطور که در شکل (1) نشان داده شده است نحوه پوشش سطح، به‌طور معمول به یکی از صورت‌های عمده نواری¹² یا نورافکنی¹³ است. محور طولی ناحیه تصویر را که با مسیر پرواز موازی است، سمت و محور عرضی که بر مسیر پرواز عمود است، برد زمینی¹⁴ 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 تصویر¹⁵ که شامل سه گام اساسی جمع‌آوری داده خام¹⁶، تشکیل فضای سیگنالی¹⁷ و تشکیل فضای تصویری¹⁸ است، به‌وجود می‌آید. درحالی‌که در سامانه‌های الکترواپتیکی بخش تشکیل تصویر وجود

۱- مقدمه

سامانه‌های تصویربرداری SAR¹ از نظر نوع اطلاعات، زمان اخذ داده و نحوه 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 پراکندگی² مربوط به المان‌های سطح یا حجم مورد نظر و نمایش اطلاعات سطح مقطع راداری³ (RCS) آن به‌صورت سطوح خاکستری⁴ در یک صفحه نمایش دوبعدی است. درواقع تصویری که از سامانه SAR به‌دست می‌آید نمای ضریب انعکاس⁵ پیکسل‌های سطح در فرکانس میکروویو است و ابعاد المان‌های سطحی یا حجمی را که RCS آنها اندازه‌گیری می‌شود، قدرت تفکیک⁶ سامانه SAR می‌گویند[1].

سامانه‌های SAR برای تصویربرداری نیاز به یک سکوی⁷ 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 سمت⁸ دست یابند[2].

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

¹ Synthetic Aperture Radar(SAR)

² Scattering Field(E-Field or H-Field)

³ Radar Cross Section(RCS)

⁴ Gray Level

⁵ Backscatter

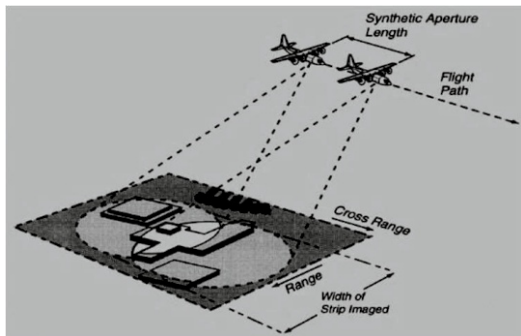
⁶ Resolution

⁷ Platform

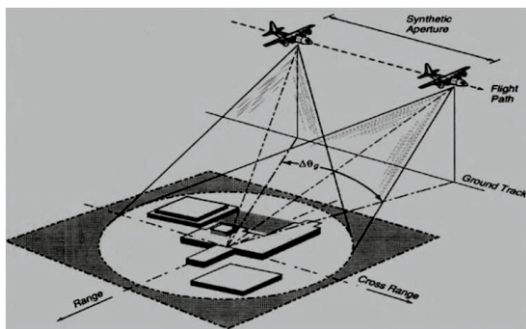
⁸ Azimuth

تصویر نیز مدل‌سازی شود.

در حالت نواری سامانه‌های SAR به صورت 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؛ به علاوه میزان سیگنال به نوفه در این فضا نیز یک مقدار منفی است؛ لذا تصویر فضای سیگنالی به صورت 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

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 درون سامانه‌ای و برون سامانه‌ای 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 نحوه عملکرد SARهای نورافکن در بخش تشکیل تصویر به صورت تحلیلی مدل می‌شود؛ سپس مدل ارائه‌شده به صورت نرم‌افزاری پیاده‌سازی می‌شود. این پیاده‌سازی دربرگیرنده 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 نرم‌افزاری نحوه عملکرد SAR در بخش تشکیل تصویر، دو چالش بالا نیز حل شده و بدین ترتیب امکان استفاده از نرم‌افزار CST به جای رادار SAR برای تولید داده‌های خام دقیق مبتنی بر واقعیت به وجود می‌آید.

برای ارائه مدل عملکردی برای سامانه‌های تصویربرداری SAR در این مقاله، ابتدا نحوه 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 به صورت نرم‌افزاری پیاده‌سازی می‌شود و در انتها نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

در [6] نحوه عملکرد SARهای نواری در بخش تشکیل تصویر به صورت 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، نحوه عملکرد SARهای نورافکن در بخش تشکیل

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، $^1 RDA$ ، $^2 CSA$ و $Omega-k$ هستند [8].

در [6] رفتار سامانه تصویربرداری SAR در حالت نواری به صورت یک پاسخ ضربه دویبعدی مطابق رابطه ۱ مدل‌سازی شده است.

$$h_{imp}(t, \eta) = W_r(t - 2R(\eta)/c) W_a(\eta - \eta_c) \times \exp\{-j4\pi f_0 R(\eta)/c\} \times \exp\{j\pi K_r(t - 2R(\eta)/c)^2\} \quad (1)$$

که در آن t زمان در جهت برد، η زمان در جهت سمت، f_0 فرکانس حامل، K_r نرخ چیرپ، $W_r(t)$ پوش سیگنال ارسالی در جهت برد که به طور معمول به صورت 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 سامانه تصویربرداری SAR است. در صورتی که 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 سامانه تصویربرداری SAR نامیده شده است.

شکل (۲) مدل عملکردی سامانه 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 دویبعدی $h_{imp}(t, \eta)$ و $g(t, \eta)$ مطابق رابطه ۲ محاسبه شود.

$$S_{bb}(t, \eta) = g(t, \eta) * h_{imp}(t, \eta) + n(t, \eta) \quad (2)$$

که در آن $g(t, \eta)$ نشان‌دهنده انعکاس‌های سطح از منظر طول موج استفاده‌شده در رادار سامانه SAR، $*$ عمل‌گر کانولوشن، $n(t, \eta)$ نوفه کانال که به صورت جمع‌شونده مدل شده است و $S_{bb}(t, \eta)$ فضای سیگنالی متناسب با ناحیه تصویربرداری است و در نهایت 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

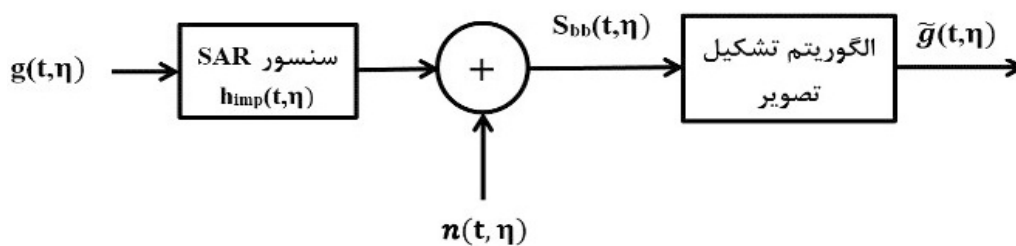
عملکرد SARهای نواری در بخش تشکیل تصویر به خوبی قابل توصیف است. در ادامه، با اطلاعات به دست‌آمده از این مدل می‌توان به مقایسه SARهای نواری و نورافکن پرداخت. SARهای نواری و نورافکن از جنبه‌های مختلفی چون نحوه تصویربرداری، نوع مأموریت، میزان قدرت تفکیک مکانی، نحوه تشکیل فضای سیگنالی و تصویری و ... قابل مقایسه هستند. از نظر نحوه تصویربرداری، SARهای نورافکن برخلاف SARهای نواری که به صورت پیوسته و نواری از زمین تصویربرداری می‌کنند، تنها بر روی یک ناحیه خاص از زمین متمرکز شده و عمل تصویربرداری در آنها به صورت گسسته است. به عبارت دیگر SARهای نورافکن مدت زمان بیشتری را صرف مشاهده یک ناحیه خاص کرده، در نتیجه 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 مأموریت با توجه به بیشتر بودن قدرت تفکیک مکانی SARهای نورافکن در جهت سمت، از آنها برای به دست‌آوردن تصاویر دقیق از نواحی حساس جهت مقاصد مختلف نظامی، تجاری و پژوهشی استفاده می‌شود. از نظر نحوه تشکیل فضای سیگنالی، SARهای نواری همان‌طور که در شکل (۲) و رابطه ۲ نشان داده شده است، به صورت کانولوشن دویبعدی در حوزه مکان رفتار کرده، در نتیجه عملکرد الگوریتم‌های تشکیل تصویر در این حالت، برای به دست‌آوردن فضای تصویری نیز به صورت دی‌کانولوشن دویبعدی است. در حالی که در SARهای نورافکن، همان‌طور که در بخش بعد نشان داده خواهد شد، فضای سیگنالی از تبدیل فوریه دویبعدی در یک شبکه قطبی به دست می‌آید. در نتیجه عملکرد الگوریتم‌های تشکیل تصویر نیز به صورت عکس تبدیل فوریه دویبعدی است.

۳- مدل‌سازی عملکرد SARهای نورافکن در بخش تشکیل تصویر

در این بخش تلاش می‌شود تا با دانش به دست‌آمده از نحوه 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:

¹Range Doppler Algorithm (RDA)

²ChirP Scaling Algorithm (CSA)



(شکل-۲): مدل‌سازی عملکرد SAR در حالت نواری [6]
(Figure-2): Modeling SAR performance in Strip map mode [6]

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

$$f(x_0, y_0) = |f(x_0, y_0)| \exp(j\angle f(x_0, y_0)) \quad (5)$$

که در آن $\angle f(x_0, y_0)$ اختلاف فازی است که در سیگنال منعکس شده به وجود می‌آید و مانند $|f(x_0, y_0)|$ ناشی از خصوصیات الکترومغناطیسی هدف است. در ضمن $|f(x_0, y_0)|$ را در رابطه ۵ می‌توان نماینده 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 به دست آمد و بدین ترتیب گام نخست کامل شد؛ اما از آنجا که مدل تحلیلی باید دربرگیرنده 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.

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

۲- یک فرم بسته^۱ بین سیگنال دریافتی و کل ناحیه تصویربرداری ایجاد خواهد شد.

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

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

همان‌طور که 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^۲ LFM است که فرم مختلط یا معادل باند پایه آن در رابطه ۳ آمده است [9].

$$s(t) = \begin{cases} e^{j(\omega_0 t + \alpha t^2)}, & |t| \leq \frac{T_p}{2} \\ 0, & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

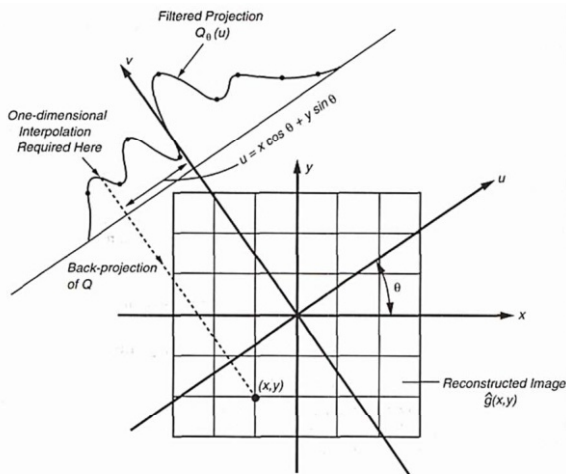
که در آن t زمان در جهت برد، ω_0 فرکانس حامل، 2α نرخ چیرپ و T_p عرض پالس ارسالی است. بعد از ارسال قسمت حقیقی سیگنال بالا، $\Re(s(t))$ ، سیگنال برگشتی از یک هدف نقطه‌ای که در مختصات (x_0, y_0) و فاصله R_0 از رادار قرار دارد، به صورت رابطه ۴ به دست می‌آید [5].

$$V_{(\theta, x_0, y_0)}(t) = \Re \left\{ f(x_0, y_0) s \left(t - \frac{2R_0}{c} \right) \right\} dx dy = |f(x_0, y_0)| \cos \left(\omega_0 \left(t - \frac{2R_0}{c} \right) + \alpha \left(t - \frac{2R_0}{c} \right)^2 + \angle f(x_0, y_0) \right) dx dy \quad (4)$$

¹ Close Form or Exact Form or Analytical Form

² Linear Frequency Modulation

$$\bar{r}_\theta(t) = \int_{-L}^L q_\theta(u) \exp\left\{j\frac{4\alpha u^2}{c^2}\right\} \cdot \exp\left\{-j\frac{2}{c}(\omega_0 + 2\alpha(t - \tau_0))u\right\} du \quad (9)$$



(شکل-۴): نحوه به دست آوردن Projection اهداف [5]
(Figure-4): How to extract projection of targets [5]

که در آن $\tau_0 = \frac{2R}{c}$ نشان دهنده تأخیر بین سیگنال ارسالی و دریافتی رادار است. حال با توجه به اینکه در عمل به طور معمول $4\alpha u^2 \leq c^2$ برقرار است، از دوره مرتبه دوم مرحله، $\exp\left\{j\frac{4\alpha u^2}{c^2}\right\}$ صرفه نظر کرده و با این تقریب سیگنال بازگشتی به صورت زیر نوشته می شود [11]:

$$r_\theta(t) = \int_{-L}^L q_\theta(u) \exp\left\{-j\frac{2}{c}(\omega_0 + 2\alpha(t - \tau_0))u\right\} du = \int_{-L}^L q_\theta(u) \exp\{-j\Omega(t)u\} du \quad (10)$$

که این فرم از سیگنال بازگشتی در واقع بیان گر نمونه هایی از تبدیل فوریه $q_\theta(u)$ در یک شبکه قطبی است که در آن فرکانس $\Omega(t)$ به صورت $\frac{2}{c}(\omega_0 + 2\alpha(t - \tau_0))$ تعریف شده است (شکل (۵)).

تا اینجا یک فرم بسته بین سیگنال بازگشتی و Projection اهداف به دست آمد. برای به دست آوردن فرم بسته بین میدان پراکندگی و سیگنال بازگشتی از ترکیب دو رابطه ۶ و ۱۰، رابطه ۱۱ خواهد آمد:

$$r_\theta(t) = \int_{|u| \leq L} \iint_{x^2 + y^2 \leq L^2} \delta(u - x \cos \theta - y \sin \theta) f(x, y) \exp\{-j\Omega(t)u\} dx dy du = \iint_{x^2 + y^2 \leq L^2} f(x, y) \exp\{-j\Omega(t)(x \cos \theta + y \sin \theta)\} dx dy \quad (11)$$

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

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

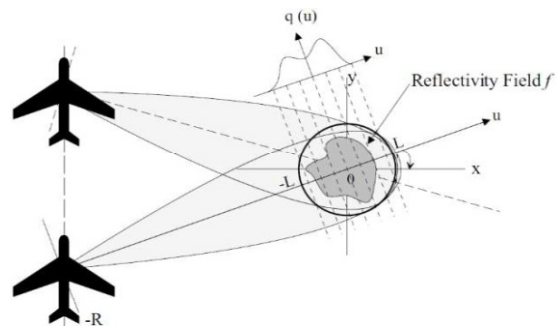
$$q_\theta(u) = \iint_{x^2 + y^2 \leq L^2} \delta(u - x \cos \theta - y \sin \theta) f(x, y) dx dy \quad (6)$$

که در آن L شعاع ناحیه تصویربرداری می باشد. با استفاده از رابطه ۶، سیگنال بازگشتی به سمت رادار در خط دلخواه $u=u_0$ به صورت رابطه ۷ به دست می آید [9]:

$$V_{(\theta, u_0)}(t) = \Re\{q_\theta(u_0) s\left(t - \frac{2(R+u_0)}{c}\right)\} du \quad (7)$$

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

$$V_{(\theta)}(t) = \Re\left\{\int_{-L}^L q_\theta(u) s\left(t - \frac{2(R+u)}{c}\right) du\right\} \quad (8)$$



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

بدین ترتیب گام دوم نیز کامل می شود. در گام سوم به دنبال تشکیل فضای سیگنالی خواهیم بود. برای این منظور ضمن دریافت سیگنال $V_{(\theta)}(t)$ در گیرنده، آن را به کمک دمدولاتور IQ به باند پایه منتقل کرده و در یک آرایه دوبعدی به نام فضای سیگنالی ذخیره خواهد شد. در این صورت $\bar{r}_\theta(t)$ که سیگنال بازگشتی دمدوله شده در موقعیت θ سکو است به صورت رابطه ۹ به دست می آید [11].

مختلفی انجام می شود که سه نمونه آن در شکل (۷) نمایش داده شده است. به عنوان مثال همان طور که در شکل (۷-الف) مشاهده می شود، برای درون یابی، کل ناحیه (تمامی نمونه ها) در نظر گرفته شده است و این مسأله باعث می شود، قدرت تفکیک در حد مناسبی باشد؛ اما در مقابل نوفه زیادی نیز وارد سامانه می شود و کیفیت تصویر کاهش می یابد. در شکل (۷-ب) در مقایسه با شکل (۷-الف) تعداد نمونه های کمتری در نظر گرفته شده و مقدار نوفه کمتری نیز وارد سامانه می شود. در نتیجه قدرت تفکیک کاهش یافته، اما کیفیت تصویر بهتر می شود و در نهایت در شکل (۷-ج) نسبت به شکل (۷-الف و ب) تعداد نمونه ها خیلی کمتر شده، ولی هیچ نوفه ای وارد سامانه نمی شود؛ در نتیجه قدرت تفکیک به مراتب کمتر از دو مرحله قبل شده، ولی کیفیت تصویر بیش تر از دو مرحله قبلی است. در نتیجه نحوه درون یابی در الگوریتم PFA بسته به میزان قدرت تفکیک و کیفیت تصاویر به یک مصالحه نیاز دارد.

بعد از درون یابی در مرحله نخست (رابطه ۱۳)، عکس تبدیل فوریه در مرحله دوم انجام می شود. در نهایت بعد از طی دو مرحله قبل اندازه سیگنال برگشتی پردازش شده که در واقع نمای ضریب انعکاس پیکسل های سطح است به عنوان تصویر نهایی SAR نمایش داده خواهد شد [12] و بدین ترتیب مدل تحلیلی ارائه شده نیز کامل می شود (رابطه ۱۴).

$$g(x, y) = \text{Interpolation}(\text{Sbb}_\theta(t)) \quad (13)$$

$$\tilde{f}(x, y) = |\text{IFFT2D}(g(x, y))| \quad (14)$$



(شکل-۶): روندنمای الگوریتم تشکیل تصویر PFA در حالت

نورافکن [12]

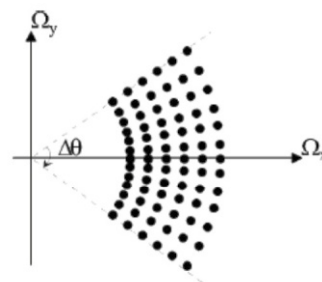
(Figure-6): Block diagram of PFA image formation algorithm in spotlight mode [12]

سیگنالی تشکیل شده در SAR های نورافکن به صورت رابطه ۱۲ خواهد بود.

$$\text{Sbb}_\theta(t) = r_\theta(t) + n_\theta(t) \quad (12)$$

که در آن $\text{Sbb}_\theta(t)$ فضای سیگنالی و $n_\theta(t)$ نوفه کانال است که به صورت جمع شونده مدل شده است. لازم به ذکر است که اثرات دیگر کانال چون جمر و ... را نیز می توان به سیگنال دریافتی اضافه کرد.

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



(شکل-۵): سیگنال بازگشتی در حالت نورافکن در مختصات قطبی

که به صورت نمونه هایی از تبدیل فوریه دوبعدی ناحیه تصویر

است. Ω_x و Ω_y به ترتیب فرکانس در جهت x و y می باشند [5].

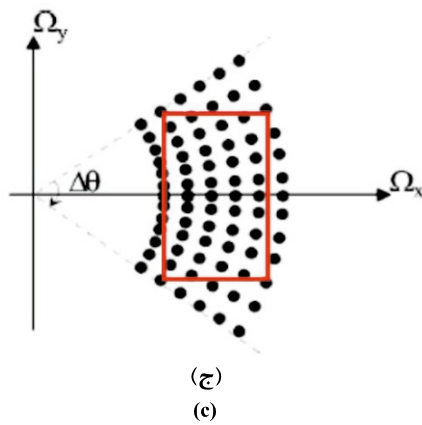
(Figure-5): Return signal in polar coordinates in spotlight mode, which are samples of two-dimensional Fourier transform of the image area. Ω_x and Ω_y are frequencies in x and y directions [5].

لازم است از الگوریتم های تشکیل تصویر استفاده شود که مهم ترین این الگوریتم ها در حالت نورافکن، PFA^1 و FBP^2 هستند. در این مقاله از الگوریتم پردازشی PFA^2 استفاده شده است. این الگوریتم همان طور که در روندنمای کلی آن در شکل (۶) نشان داده شده است، شامل سه مرحله است. در مرحله نخست درون یابی^۳ از مختصات قطبی به دکارتی انجام می شود؛ زیرا همان طور که در بالا بیان شد، نحوه عملکرد SAR در حالت نورافکن در هر موقعیت از سمت (θ) به گونه ای است که نمونه هایی از تبدیل فوریه دوبعدی ناحیه تصویر را در یک شبکه قطبی به دست می آورد؛ لذا پردازش لازم در حالت نورافکن به صورت عکس تبدیل فوریه است که پیاده سازی عکس تبدیل فوریه در مختصات دکارتی امکان پذیر است. درون یابی از مختصات قطبی به مختصات دکارتی در الگوریتم PFA بسته به میزان قدرت تفکیک و کیفیت تصاویر از منظر نوفه، به صورت های

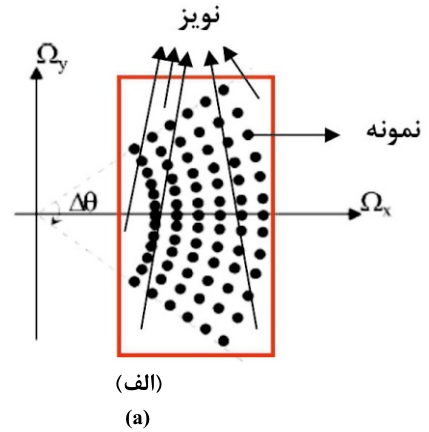
1 Polar Format Algorithm

2 Filter Back Projection

3 Interpolation



(ج)
(c)



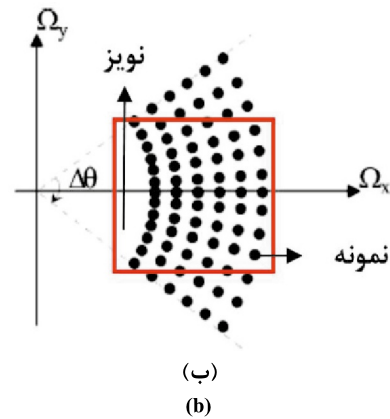
(الف)
(a)

(شکل-۷): الف، ب و ج) صورت‌های مختلف درون‌یابی از

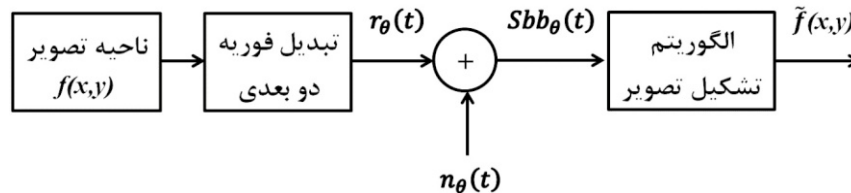
مختصات قطبی به دکارتی در حالت نورافکن

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

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



(ب)
(b)



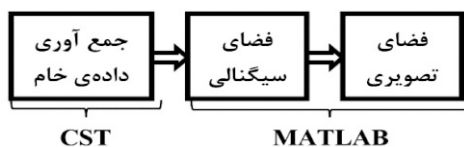
(شکل-۸): مدل‌سازی عملکرد SAR در حالت نورافکن

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

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 در عمل نمی‌توان سطح مقطع راداری یک جسم پیچیده را در هر موقعیت از سمت به دست آورد (حجم محاسبات بسیار زیاد می‌شود). این در حالی است که به دلیل حرکت SAR و تغییر زاویه مشاهده یک هدف، سطح مقطع راداری آن در هر موقعیت از سمت تغییر کرده و میزان ثابتی نیست.

۴- پیاده‌سازی نرم‌افزاری عملکرد SARهای نورافکن در بخش تشکیل تصویر

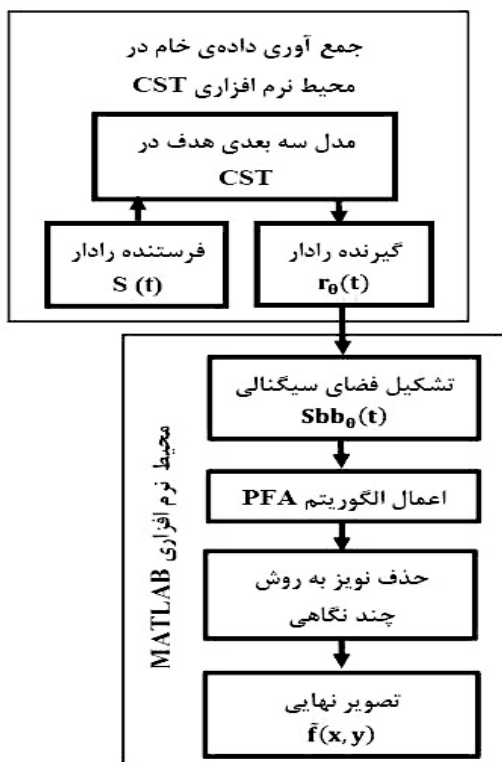
برای پیاده‌سازی مدل ارائه شده به صورت نرم‌افزاری نیازمند پیاده‌سازی سه گام اساسی جمع آوری داده خام، تشکیل فضای سیگنالی و تشکیل فضای تصویری به صورت نرم‌افزاری هستیم. در کارهای قبلی در حوزه پیاده‌سازی نرم‌افزاری نحوه عملکرد SAR، از روندنمای شکل (۹) استفاده شده



(شکل-۱۰): ساختار پیشنهادی برای پیاده سازی نرم افزار مدل

عملکرد SAR در بخش تشکیل تصویر

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



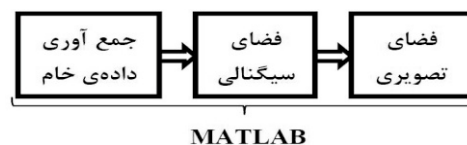
(شکل-۱۱): روندنمای پیشنهادی برای پیاده سازی نرم افزار

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

چالش اصلی در روش پیاده سازی پیشنهادی این مقاله، نبودن رادار SAR در محیط نرم افزار CST است؛ لذا در ادامه به امکان سنجی استفاده از CST در قالب رادار SAR پرداخته می شود. همان طور که می دانیم رادار SAR دارای حرکت بوده و مسافتی را به طول دهانه مصنوعی (LS) طی می کند و در هر موقعیت از سمت، میدان پراکندگی از هدف مورد نظر را استخراج می کند. از طرف دیگر نرم افزار CST نیز در یک مختصات کروی از دو جهت به پویا هدف مورد نظر می پردازد. این دو جهت θ و ϕ می باشند که به ترتیب پویا در جهت عمودی و اسکن در جهت افقی نامیده می شوند. در این مقاله با توجه به تعریف زاویه فرود در SAR که زاویه میان راستای موج و خط عمود بر سطح زمین تعریف می شود، پویا در جهت عمودی (θ) مطابق شکل (۱۲-الف) معادل با زاویه فرود SAR در نظر گرفته می شود.

برای حل این مشکل، در این مقاله از ترکیب دو نرم افزار MATLAB و CST برای پیاده سازی نرم افزاری نحوه عملکرد SAR استفاده شده است. CST نرم افزاری قدرتمند برای استخراج میدان پراکندگی است و می تواند سطح مقطع راداری جسم را در هر موقعیت از سمت به درستی استخراج کند. برای این منظور ابتدا مدل سه بعدی هدف در نرم افزار CST تشکیل می شود. برای تشکیل این مدل هم می توان از اشکال موجود در این نرم افزار استفاده کرد و هم با استفاده از نرم افزارهای دیگری چون Auto Cad مدل ایجاد شده را به عنوان ورودی به CST وارد کرد. سپس با تشکیل موج ارسال رادار SAR در CST، آن را به سمت هدف مورد نظر ارسال کرده و بازگشتی آن را در هر موقعیت از سمت، در گیرنده موجود در CST دریافت کرد. بدین ترتیب میدان پراکندگی هدف مورد نظر در محیط نرم افزار CST استخراج شده و با انتقال دامنه و مرحله آن به محیط MATLAB، ماتریس دوبعدی فضای سیگنالی ایجاد می شود و در نهایت با اعمال الگوریتم تشکیل تصویر، تصویر نهایی SAR تشکیل می شود. لازم به ذکر است که در این مقاله برای حذف نوفه لکه ای^۱ که جزء جدایی ناپذیر تصاویر SAR است و باعث لکه ای شدن (ساختار برفکی) تصاویر SAR می شود از روش حذف نوفه چند نگاهی^۲ که در [1] آمده، استفاده شده است.

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



(شکل-۹): ساختار استفاده شده در کارهای قبلی برای

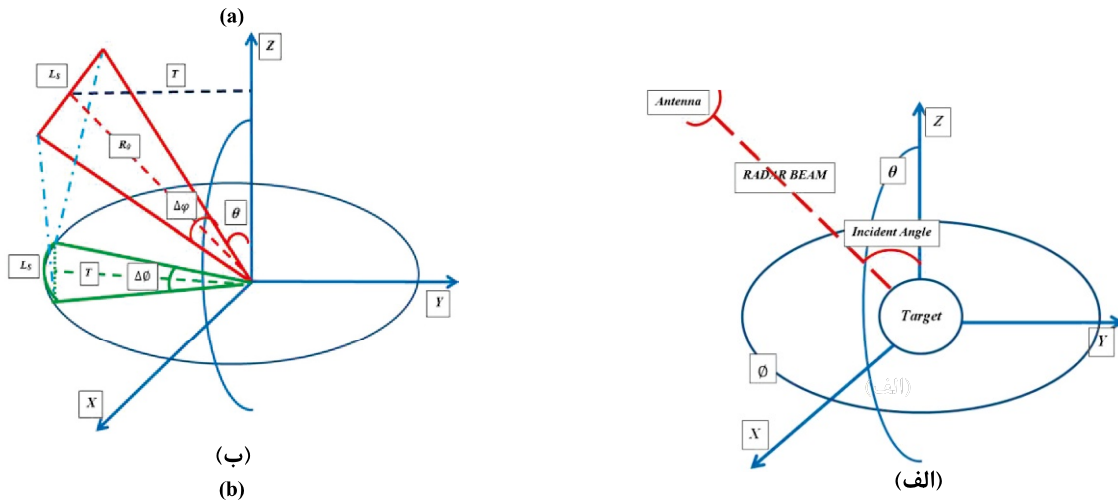
پیاده سازی نرم افزار مدل عملکرد SAR در بخش تشکیل تصویر (Figure-9): The structure used in previous works for software implementation of SAR operation model in image formation section

¹ Speckle Noise

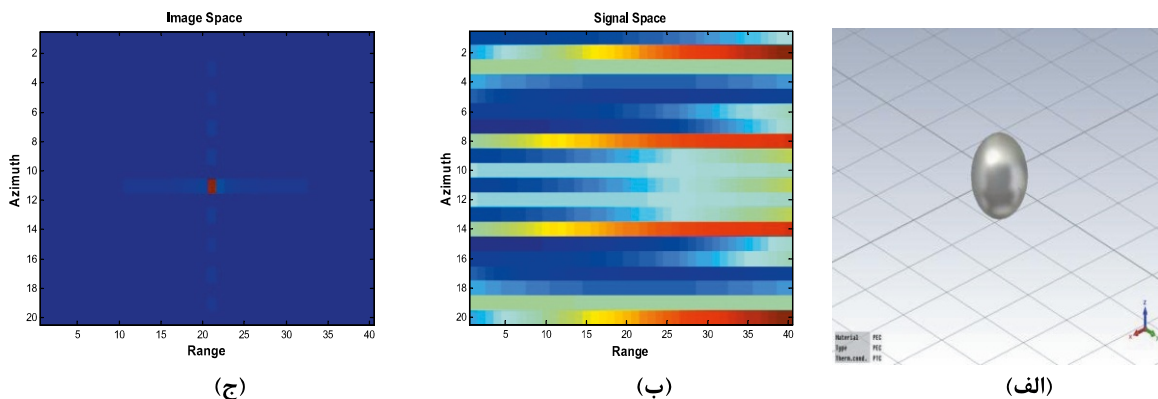
² Multilook

مطابق شکل (۱۲-ب) میزان حرکت SAR در فضا یعنی L_s به مقدار پویس CST در مختصات کروی یعنی $\Delta\theta$ ، نگاشت داده می‌شود.

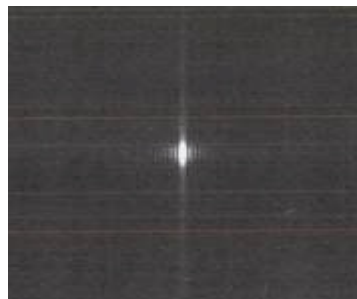
همچنین با توجه به شکل (۱۲-الف) می‌توان پویس در جهت افقی (θ) را معادل با حرکت SAR در نظر گرفت؛ اما مقدار و یا میزان این اسکن ($\Delta\theta$) در مختصات کروی موجود در CST بسیار حائز اهمیت است. برای به‌دست‌آوردن این مقدار



(شکل-۱۲): الف) نحوه پویس 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 داده‌های خام در محیط نرم‌افزاری CST. ب) انتقال داده‌های خام از CST به MATLAB و تشکیل فضای سیگنالی. (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.

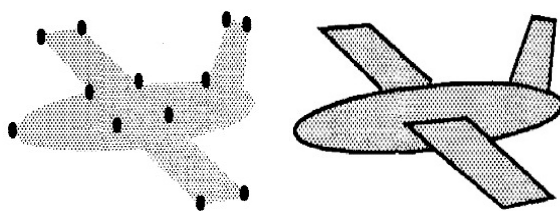


(شکل-۱۴): فضای تصویری کره‌ی منزوی موجود در [5] - محور افقی سمت و محور عمودی برد می‌باشد. (Figure-14): Image space of isolated sphere in [5] - The horizontal axis is azimuth and vertical axis is range.

به‌دست‌آمده نیز واقعی‌تر خواهد بود. به‌عبارت دیگر در بهترین شرایط که تعداد نقاط به سمت بی‌نهایت میل می‌کند، الگوی نقطه‌ای هدف به شکل خود هدف تبدیل شده و آنگاه تصویر SAR تولیدی از آن به‌طور کامل با واقعیت تطبیق خواهد داشت. در این مقاله به 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 (شکل ۱۵) 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. در نتیجه 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]

بدین ترتیب امکان استفاده از نرم‌افزار CST در قالب رادار SAR به‌وجود می‌آید و با آن می‌توان به جمع‌آوری میدان پراکندگی 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 کره منزوی استخراج می‌شود.

منظور از کره منزوی یک هدف نقطه‌ای^۱ کروی شکل است که در یک زمینه^۲ خالی وجود دارد. برای انجام شبیه‌سازی‌ها از مشخصات سامانه^۳ RADARSAT استفاده شده است.

همان‌طور که در شکل (۱۳-الف) مشاهده می‌شود، ابتدا کره 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 (شکل ۱۳-ب) و درنهایت با اعمال الگوریتم تشکیل تصویر PFA بر روی آن فضای تصویری مربوط به کره منزوی استخراج شد (شکل ۱۳-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.

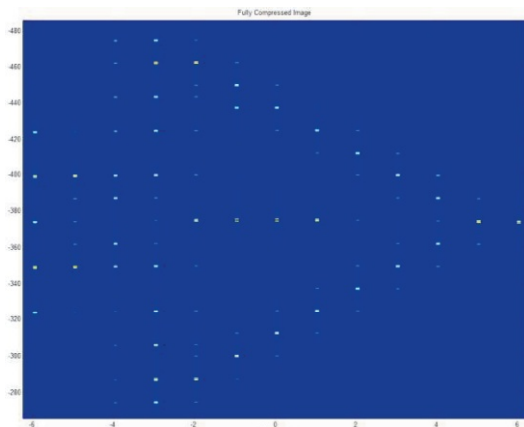
با این پیاده‌سازی، مدل نرم‌افزاری SARهای نورافکن در بخش تشکیل تصویر نیز کامل شده و علاوه‌بر تشریح چگونگی رفتار این سامانه‌ها قابلیت‌های زیادی چون امکان تحلیل اثر پارامترهای مختلف سامانه‌های تصویربرداری SAR، تفسیر بهتر تصاویر SAR، امکان بررسی صحت راه‌کارهای مطرح‌شده در جنگ الکترونیک یا پدافند غیرعامل برای مقابله با سامانه‌های SAR، امکان تولید تصویر از اهداف گسترده^۳ 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 زمینه رادارهای SAR به‌طور معمول 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

¹ Point Target

² Background

³ Distributed Target



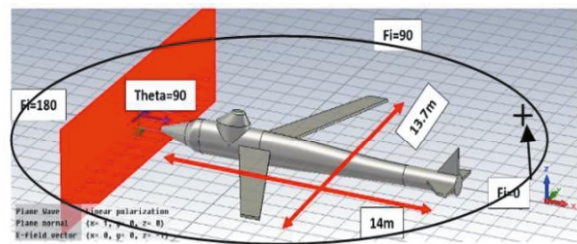
(شکل-۱۹): تصویر به دست آمده از مدل نقطه‌ای هواپیما
(Figure-19): The image obtained from the pointing model of plane

در مثال دوم برای بررسی تأثیر ابعاد بدنه هدف در تصاویر SAR، دو هدف مکعبی شکل با ابعاد $-0.25 < x < 0.25$ ، $-1 < y < 1$ و $z = 1$ در محیط نرم‌افزاری CST تولید شدند و سپس با استفاده از مشخصات سامانه SAR فرضی موجود در جدول (۱) تنها با این تفاوت که زاویه فرود در اینجا سی درجه است، به استخراج فضای تصویری از آنها مطابق شکل (۲۰-الف و ب) پرداخته شد. با تحلیل نمایه^۱ آنها در جهت برد یا سمت شکل (۲۰) مشخص می‌شود که دامنه پیک اصلی در موج بازگشتی از مکعب بزرگ‌تر (۰,۴۷)، نسبت به مکعب کوچک‌تر (۰,۱۶) بیشتر است. از این رو در تصاویر SAR شکل داده‌شده، الگوی تشکیل شده برای مکعب بزرگ‌تر بسیار روشن‌تر از الگوی تشکیل شده برای مکعب کوچک‌تر است. نتیجه جانبی اینکه در یک دقت رادیومتریک محدود برای تصویر SAR، الگوی مکعب بزرگ‌تر کشیده‌تر از الگوی مکعب کوچک‌تر به نظر می‌رسد که این موضوع در فضای تصویری شکل (۲۰) به‌طور کامل مشهود است. در نتیجه با توجه به اینکه از دیدگاه سنجش از دور راداری، یک هدف مکعبی شکل در دنیای واقع می‌تواند بیان‌گر خانه‌ها و ساختمان‌ها باشد، می‌توان گفت که الگوی یک ساختمان بزرگ در تصویر SAR، نسبت به یک ساختمان 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



(شکل-۱۶): ایجاد یک هدف گسترده (گلايدر) در محیط

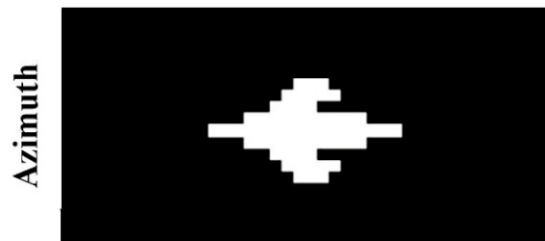
نرم‌افزاری CST.

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

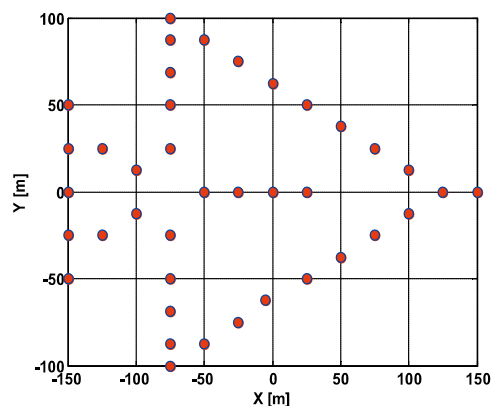
(جدول ۱-): مشخصات یک سامانه SAR فرضی

(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 (ϕ)	180 Deg
$\Delta\phi$	0.43 Deg



(شکل-۱۷): تصویر راداری به دست آمده از گلايدر
(Figure-17): Radar image obtained from the glider



(شکل-۱۸): مدل نقطه‌ای هواپیما
(Figure-18): Pointing model of plane

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 به راحتی قابل مدل‌سازی در نرم‌افزار ایجاد شده هستند. به علاوه مدل ایجاد شده بستری را برای اثبات صحت راه‌کارهای مطرح شده در جنگ الکترونیک و پدافند غیرعامل در برابر سامانه‌های SAR فراهم می‌کند.

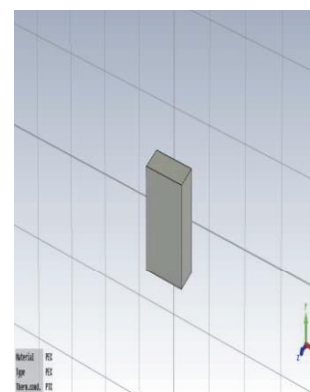
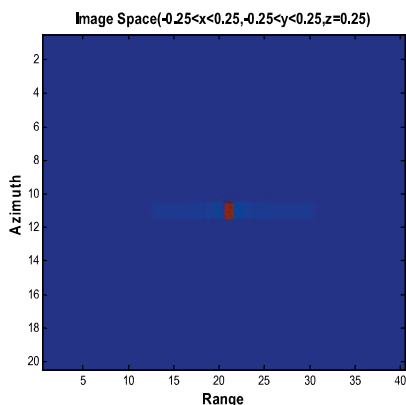
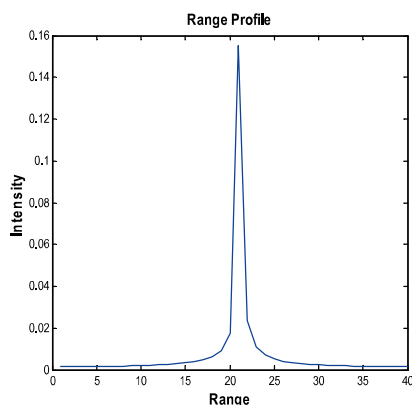
۵. قابلیت تولید تصویر از اهداف گسترده به وجود می‌آید. به علاوه می‌توان مدل نقطه‌ای دقیق از اهداف گسترده را نیز استخراج کرد.

جهت است که علاوه بر تشریح چگونگی رفتار SAR، قابلیت‌های متعددی را به وجود 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.

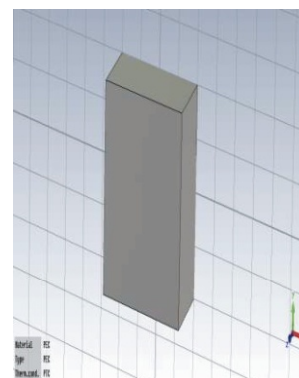
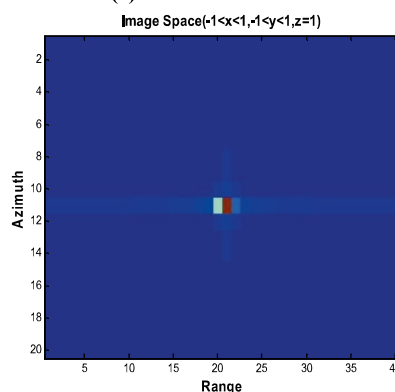
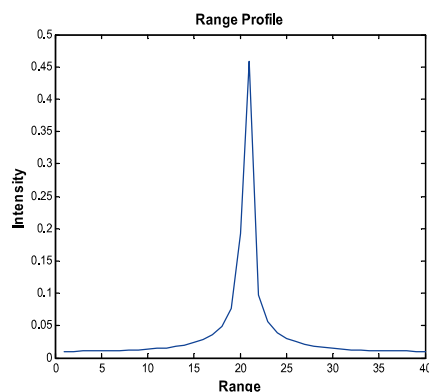
۲. از طرف دیگر با توجه به آنکه عوامل مختلف درون سامانه‌ای و برون سامانه‌ای چون رادار، سکو حامل سنجنده، الگوریتم‌های پردازشی، ناحیه تصویربرداری و کانال در اطلاعات ثبت شده توسط سامانه‌های تصویربرداری SAR نقش دارند، مدل‌سازی عملکرد این سامانه‌ها به تفسیر تصاویر SAR نیز کمک قابل توجهی خواهد کرد.

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



(الف)

(a)



(ب)

(b)

(شکل-۲۰): الف و ب) شبیه‌سازی تأثیر ابعاد بدنه هدف (Figure-20): a,b) Simulate the effect of body size target

- [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 FLayer 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 بهزاد فلاح پور مدرک

کارشناسی ارشد خود را در رشته مهندسی برق مخابرات- سیستم از دانشگاه صنعتی ماک اشتر تهران در سال ۱۳۹۱ دریافت کرد. او در سال

۱۳۹۲ وارد مقطع دکترا در رشته برق- مخابرات- سیستم در دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران شد و هم‌اکنون دانشجوی این مقطع است. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان پردازش سیگنال راداری، بهینه سازی و ناوبری رادیویی است.

نشانی رایانامه ایشان عبارت است از:

m_behzad_fp@yahoo.com

- [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 تصویربرداری SAR"، فصلنامه علمی پژوهشی علوم و فناوری فضایی، جلد ۶، شماره ۱، ص. ۴۷-۵۶، بهار ۹۲.

- [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*



حمید دهقانی مدرک کارشناسی ارشد و دکترای خود را در رشته مهندسی برق مخابرات گرایش سیستم در دانشگاه تربیت مدرس به ترتیب در سال های ۱۳۸۱ و ۱۳۸۵ دریافت کرد. زمینه 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 به ترتیب در سال های ۱۳۷۷ و ۱۳۸۳ از دانشگاه تربیت مدرس دریافت نمود. او دانشیار و عضو هیئت علمی گروه مهندسی مخابرات دانشگاه صنعتی مالک اشتر است. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان پردازش و ادغام اطلاعات در سامانه ها و حس گرهای چندگانه، طراحی سامانه های 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 در سال ۱۳۷۲ و کارشناسی ارشد و دکترای تخصصی خود را به ترتیب در رشته های مهندسی پزشکی-بیو الکترونیک و مهندسی برق-مخابرات در سال های ۱۳۷۴ و ۱۳۷۸ از دانشگاه صنعتی شریف دریافت کرد. او از سال ۷۸ تاکنون عضو هیئت علمی دانشکده شیراز و مرتبه علمی وی استاد است. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان پردازش سیگنال راداری، تئوری تخمین و تئوری آشکارسازی است. نشانی رایانامه ایشان عبارت است از:

sheikhi@shirazu.ac.ir

