



Available in:
Journal.isrc.ac.ir

Journal of
Space Science, Technology
& Applications (Persian)

Vol. 5, No. 1, pp.:148-162
2025

DOI:
10.22034/jssta.2025.492703.1221

Article Info

Received: 1403-09-20
Accepted: 1404-02-16

Keywords

Spaceborne synthetic
aperture radar, pulse
repetition frequency
selection, SAR system
parameters design

How to Cite this article

M. Hatam, and Maj. Hatam,
“Improved Method of PRF
Selection in Spaceborne SAR
Robust to Altitude Changes and
with the Ability to Stabilize the
Transmission Power”, *Journal of
Space Science, Technology
and Applications*, vol. 5, no. 1,
pp. 148–162, 2025.

Original Article

Improved Method of PRF Selection in Spaceborne SAR Robust to Altitude Changes and with the Ability to Stabilize the Transmission Power

Mahdi Hatam^{1*}, Majid Hatam²

¹ *Institute of Mechanics, Shiraz, Iran
E-mail address: ma.hatam@isrc.ac.ir

² Shiraz University, Shiraz, Iran
hatammajid@gmail.com

* Corresponding author

Abstract

In this paper, an improved pulse repetition frequency selection method for the spaceborne synthetic aperture radar is proposed, where the design considerations of the other system parameters including antenna dimensions, azimuth and range resolution, pulse width, swath width, incidence angle / look angle, orbital altitude and local radius of the earth are taken into account. In the proposed method, in addition to the ability to change the incidence angle, the effects of changes in the orbital altitude and the local radius of the earth are also considered in the design. Also, in this method, in order to stabilize the transmitted power, the design for constant duty cycle mode can be done accurately, which can be very important in a practical system. Also, by using fixed duty cycle in the proposed method, the range of available pulse repetition frequency values and incidence/look angles will significantly be increased. Finally, for a typical system, the results of computer simulation and design using the proposed method for the both constant duty cycle and constant pulse width modes are given, which confirms the above capabilities.

روش بهبود یافته انتخاب PRF در SAR فضاپایه مقاوم به تغییرات ارتفاع و با قابلیت تثبیت توان ارسالی

نام و نام خانوادگی مهدی حاتم*^۱، مجید حاتم^۲

۱- پژوهشکده مکانیک، پژوهشگاه فضایی ایران، شیراز، ایران - ma.hatam@isrc.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران - hatammajid@gmail.com

* نویسنده مسئول

چکیده

در این مقاله، یک روش بهبود یافته برای انتخاب فرکانس تکرار پالس بهینه برای رادار دهانه مصنوعی فضاپایه پیشنهاد شده است که در آن ملاحظات طراحی سایر پارامترهای سیستم از جمله ابعاد آنتن، رزولوشن سمت و برد، عرض پالس، برد، زاویه برخورد / زاویه نگاه، ارتفاع مداری و شعاع محلی زمین در نظر گرفته شده‌اند. در روش پیشنهادی، علاوه بر توانایی تغییر زاویه برخورد، تأثیر تغییرات در ارتفاع مداری و شعاع محلی زمین نیز در طراحی در نظر گرفته می‌شود. همچنین در این روش، به منظور ثابت نگه داشتن توان ارسالی، طراحی برای حالت سیکل کاری ثابت نیز می‌تواند با دقت انجام شود که این موضوع می‌تواند در یک سیستم عملی بسیار مهم باشد. همچنین با استفاده از سیکل کاری ثابت در روش پیشنهادی محدوده مقادیر مجاز فرکانس تکرار پالس و زاویه برخورد/ نگاه به میزان قابل توجهی افزایش خواهد یافت. در پایان برای یک سیستم نمونه نتایج شبیه‌سازی کامپیوتری و طراحی با استفاده از روش پیشنهادی برای هر دو حالت سیکل کاری ثابت و عرض پالس ثابت ارائه شده است، که تأییدکننده قابلیت‌های فوق است.



دسترسی پذیر در نشانی:
Journal.isrc.ac.ir

دو فصلنامه

علوم، فناوری و کاربردهای
فضایی

سال پنجم، شماره ۱، صفحه ۱۴۸-۱۶۲
بهار و تابستان ۱۴۰۴

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۰

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۱۶

واژه‌های کلیدی

رادار دهانه مصنوعی فضاپایه،
انتخاب فرکانس تکرار پالس،
طراحی پارامترهای SAR فضاپایه

نحوه استناد به مقاله

مهدی حاتم و مجید حاتم، "روش
بهبود یافته انتخاب PRF در SAR
فضاپایه مقاوم به تغییرات ارتفاع و با
قابلیت تثبیت توان ارسالی"، دو فصلنامه
علوم، فناوری و کاربردهای فضایی، جلد
پنجم، شماره اول، صفحات ۱۶۲-۱۴۸،
۱۴۰۴.

۱- مقدمه

رادارهای دهانه مصنوعی (SAR^۱) سیستم‌های تصویربرداری راداری با حدتفکیک بالا هستند که قادر به تصویربرداری در کلیه ساعات شبانه روز و در شرایط آب و هوایی مختلف (صاف، ابری، بارانی و ...) هستند. این سیستم‌ها قابل نصب بر روی پلتفرم‌های مختلفی نظیر هواپیما (سیستم SAR هواپایه^۲) و ماهواره (سیستم SAR فضاپایه^۳) بوده و در کاربردهای مختلفی از جمله کشاورزی، جنگلداری، حوادث غیر مترقبه، نقشه برداری و اکتشاف معادن مورد استفاده قرار می‌گیرند [۷]-[۱].

در سیستم‌های SAR هواپایه، زمان بین دو پالس راداری متوالی بیشتر از زمان بازگشت یک پالس از حداکثر برد راداری است، بنابراین مشخص است که هر پالس راداری مربوط به چه بردی است و به عبارت دیگر هیچ ابهامی در برد وجود ندارد. در سیستم‌های SAR فضاپایه به دلیل فاصله زیاد فرستنده SAR از اهداف، زمان بین دو پالس راداری متوالی بسیار کمتر از زمان بازگشت یک پالس از حداکثر برد راداری است و ابهام در برد وجود خواهد داشت. این یکی از مهم‌ترین محدودیت‌ها در طراحی پارامترهای سیستم SAR فضاپایه است و فرکانس تکرار پالس (PRF) و پارامترهای مرتبط باید به گونه‌ای طراحی شوند که ابهام در برد برطرف شود و برد مربوط به هر پالس راداری دریافتی به درستی محاسبه شود [۱۳]-[۱]. پارامترهایی که بر تعیین PRF تأثیر می‌گذارند، پارامترهای پایه ای نامیده می‌شوند [۸]. مراجع [۱۳]-[۹] روش‌های مختلفی برای انتخاب PRF سیستم‌های SAR فضاپایه معرفی می‌کنند. در سند منتشر شده توسط مرکز تحقیقات SANDIA [۸]، یک روش نسبتاً جامع با استفاده از [۱۲]-[۱۰] ارائه شده است. در این روش، نمودارهای مقادیر مجاز PRF بر اساس پارامترهای پایه‌ای دیگر ترسیم می‌شوند و سپس، مقادیری که در تمام نمودارها مشترک هستند انتخاب می‌شوند. در این روش، همه پارامترهای پایه‌ای به جز یک پارامتر (معمولاً زاویه برخورد یا زاویه نگاه) باید ثابت باشند. در منابع نسبتاً جدیدتر [۲۱]-[۱۸] روشهای مشابهی برای انتخاب PRF و پارامترهای مرتبط با آن ارائه شده است که تغییر قابل توجهی نسبت به روش ارائه شده در [۸] ندارند.

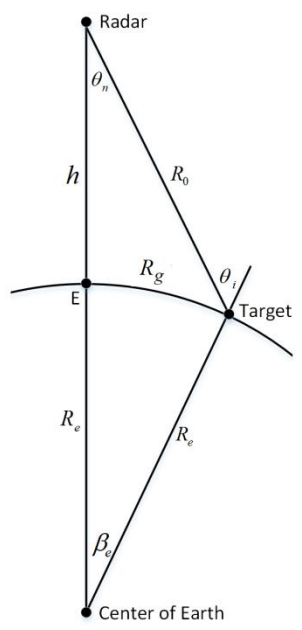
در این مقاله، یک روش اصلاح‌شده برای انتخاب PRF ارائه شده است که در آن علاوه بر زاویه برخورد/نگاه، ارتفاع، شعاع محلی زمین و عرض پالس نیز می‌توانند متغیر باشند. در این روش نمودار PRF بر اساس زاویه برخورد که تغییرات سایر پارامترها در آن در نظر

گرفته شده است محاسبه می‌شود. بنابراین، در روش پیشنهادی طراحی‌ها می‌توانند تنها با استفاده از یک نمودار انجام شوند و بیش از یک پارامتر پایه‌ای می‌تواند متغیر باشد.

پس از معرفی روش پیشنهادی، شبیه‌سازی و انتخاب PRF برای یک سیستم نمونه در هر دو حالت دارای سیکل کاری ثابت و عرض پالس ثابت انجام می‌شود و نتایج ارائه شده تأییدکننده قابلیت‌های فوق هستند.

۲- هندسه مسئله

پارامترهای هندسی موثر در تعیین برد سیستم و PRF در شکل (۱) نشان داده شده و در ادامه توضیح داده شده اند.



شکل (۱): هندسه ماهواره از دید عمود بر مسیر حرکت رادار [۲].

در شکل (۱) کمان برد زمینی با R_g نشان داده شده است، β_e زاویه‌ی مقابل کمان R_g از مرکز زمین است، شعاع محلی زمین با R_e مشخص شده است و h ارتفاع سکوی SAR تا نقطه حضیض (E) است. زاویه‌ی θ_i زاویه پرتوی رادار با خط عمود بر زمین در محل هدف است که زاویه برخورد نامیده می‌شود و به زاویه‌ی θ_n زاویه‌ی نگاه گفته می‌شود. با توجه به شکل (۱) متغیرهای فوق طبق روابط زیر با هم در ارتباط هستند [۲]:

$$\frac{R_e}{\sin \theta_n} = \frac{R_e + h}{\sin \theta_i} = \frac{R_0}{\sin \beta_e} \quad (1)$$

$$R_g = R_e \beta_e$$

^۳ Spaceborne SAR

^۱ Synthetic Aperture Radar

^۲ Airborne SAR

باشند و در نتیجه پس از ارسال یک پالس نمی‌توان منتظر دریافت سیگنال اکوی بازگشتی آن پالس ماند و پیش از بازگشت اکوی پالس اول چند پالس دیگر نیز ارسال شده اند. بنابراین بایستی مقادیر PRF و پارامترهای پایه‌ای به گونه‌ای انتخاب شوند که ابهام در برد نداشته باشیم. مقادیر PRF و پارامترهای پایه‌ای مجاز مقادیری هستند که شرایط زیر را داشته باشند [۱۳]-[۱۸]:

(۱) کلیه سیگنال‌های اکوی بازگشتی مربوط به یک پالس در فاصله زمانی بین دو پالس ارسالی دیگر دریافت شوند تا ابهام در تخمین برد به وجود نیاید. بدین منظور باید توجه داشت بایستی اکوی بازگشتی از کل محدوده برد از برد حداقل R_{min} تا برد حداکثر R_{max} بایستی در نظر گرفته شود که:

$$R_{min} = \sin \left((\theta_i - \theta_{el} / 2) - \sin^{-1} \left(\sin(\theta_i - \theta_{el} / 2) \frac{R_e}{R_e + h} \right) \right) \quad (۷)$$

$$\times \frac{R_e + h}{\sin(\theta_i - \theta_{el} / 2)} = R_0(\theta_i - \theta_{el} / 2, h, R_e)$$

$$R_{max} = \sin \left((\theta_i + \theta_{el} / 2) - \sin^{-1} \left(\sin(\theta_i + \theta_{el} / 2) \frac{R_e}{R_e + h} \right) \right) \quad (۸)$$

$$\times \frac{R_e + h}{\sin(\theta_i + \theta_{el} / 2)} = R_0(\theta_i + \theta_{el} / 2, h, R_e)$$

که در روابط فوق θ_{el} پهنای پرتو آنتن در راستای ارتفاع بوده و به طور تقریبی بر حسب رادیان برابر است با $\theta_{el} = \lambda / L_{el}$ و ابعاد آنتن در راستای ارتفاع می‌باشد. بنابراین با توجه به آنکه زمان رفت و برگشت یک پالس از برد R برابر $2R/c$ است، برای آنکه کل اکوهای بازگشتی یک پالس بین پالسهای ارسالی i ام و $i+1$ ام دریافت شوند بایستی:

$$\frac{2R_{max}}{c} < \frac{i+1}{PRF} - \tau \quad \text{و} \quad \frac{2R_{min}}{c} > \frac{i}{PRF} + \tau$$

یا به طور معادل:

$$\frac{i}{t_{min} - \tau} < PRF < \frac{i+1}{t_{max} + \tau} \quad (۹)$$

که $t_{min} = \frac{2R_{min}}{c}$ و $t_{max} = \frac{2R_{max}}{c}$. برای مجاز بودن مقدار

PRF رابطه (۹) به ازای یک i صحیح و نامنفی باید برقرار باشد.

(۲) نرخ نمونه برداری نایکویست رعایت گردد (رابطه (۵)).

اغلب در $\theta_{sq} = 0$ در نظر گرفته شده (سختگیرانه ترین حالت

برای مجاز بودن PRF) و با توجه به ایده آل نبودن فیلترها

بنابراین عرض نوار تصویر برابر خواهد بود با

$$SW = R_e(\beta_{e2} - \beta_{e1}) \quad (۲)$$

که β_{e1} و β_{e2} مقدار β_e در زوایای نگاه $\theta_n + \theta_{az} / 2$ و $\theta_n - \theta_{az} / 2$ هستند و θ_{az} پهنای پرتو آنتن در راستای ارتفاع است. همچنین با توجه به شکل (۱) مشخص است که $\theta_i = \theta_n + \beta_e$ و در نتیجه با توجه به رابطه (۱) داریم:

$$\beta_e = \theta_i - \sin^{-1} \left(\sin(\theta_i) \frac{R_e}{R_e + h} \right) \quad (۳)$$

در سیستم‌های SAR هواپایه زاویه β_e بسیار کوچک و قابل صرف‌نظر می‌باشد اما در SAR فضاپایه این زاویه می‌تواند تا چند درجه برسد. با استفاده از روابط (۱) و (۳)، برد سیستم برحسب زاویه برخورد، ارتفاع و شعاع محلی زمین از رابطه زیر بدست می‌آید

$$R_0(\theta_i, h, R_e) = \sin \left(\theta_i - \sin^{-1} \left(\sin(\theta_i) \frac{R_e}{R_e + h} \right) \right) \frac{R_e + h}{\sin \theta_i} \quad (۴)$$

۳- روش تعیین مقادیر PRF مجاز

برای جلوگیری از ایجاد ابهام در سیگنال دریافتی و به تبع آن در تصویر در راستای سمت، مقدار PRF نباید از حد مشخصی کمتر شود. با لحاظ نرخ نایکویست این حد پایین توسط رابطه‌ی زیر بیان می‌شود [۲].

$$PRF \geq \frac{2V_s \cos(\theta_{sq})}{L_{az}} \quad (۵)$$

که θ_{sq} زاویه کجی^۴، L_{az} طول آنتن در راستای سمت و V_s سرعت ماهواره است و برابر است با:

$$V_s = \sqrt{GM_e / R_s}$$

که $G = 6.6743 \times 10^{-11}$ ثابت گرانش، $M_e = 5.972 \times 10^{24}$ kg جرم کره زمین، $R_s = R_e + h$ فاصله ماهواره تا مرکز کره زمین و $R_e = 6371$ km شعاع میانگین کره زمین است. در سیستمهای SAR هواپایه برای آنکه هیچگونه ابهامی در محاسبه برد براساس زمان دریافت پالس برگشتی از برد R_0 نداشته باشیم، باید:

$$PRF < \frac{c}{2R_0} \quad (۶)$$

که c سرعت انتشار امواج الکترومغناطیس است. در سیستمهای SAR فضاپایه با توجه به فاصله زیاد ماهواره تا زمین (بیش از ۲۰۰ کیلومتر برای تمامی ماهواره‌های عملیاتی و در اغلب ماهواره‌ها بیش از ۴۰۰ کیلومتر) روابط (۵) و (۶) به طور همزمان نمی‌توانند برقرار

^۴ squint angle

PRF بیشتر می‌شود. بنابراین در انتخاب عرض پالس یک مصالحه بین توان و محدوده مقادیر مجاز PRF به وجود می‌آید.

مقدار $\tau \times PRF$ برابر با نسبت زمان روشن بودن فرستنده به کل زمان تصویربرداری است و سیکل کاری (duty cycle) فرستنده نامیده می‌شود. در صورتی که عرض پالس همواره ثابت در نظر گرفته شود، با تغییر PRF سیکل کاری نیز تغییر خواهد کرد. در عمل بسیاری از اوقات مطلوبست سیکل کاری فرستنده ثابت باشد چون با ثابت بودن سیکل کاری، طبق رابطه (۱۲) توان قله و توان متوسط فرستنده نیز برای مقادیر مختلف PRF ثابت خواهند بود. این ویژگی (ثابت بودن توان متوسط و قله فرستنده) از پیچیدگی‌های طراحی و ساخت فرستنده خواهد کاست و از افزایش توان قله در مواقعی که نیاز است PRF تغییر کند جلوگیری می‌کند.

زاویه برخورد و زاویه نگاه

زاویه برخورد/زاویه نگاه یکی از پارامترهای مهم در تعیین PRF است و اصلی‌ترین نموداری که در روش طراحی معرفی شده در این مقاله مدنظر قرار گرفته نمودار محدوده مقادیر مجاز PRF بر حسب زاویه برخورد/زاویه نگاه است.

در شکل (۱) پارامترهای زاویه نگاه و زاویه برخورد به ترتیب با θ_n و θ_i نشان داده شده‌اند. در واقع زاویه نگاه زاویه بین پرتو آنتن و خط واصل ماهواره و مرکز زمین است در حالی که زاویه برخورد زاویه بین پرتو آنتن و خط واصل نقطه محل برخورد پرتو با زمین و مرکز زمین است. در سیستم‌های هواپایه زاویه برخورد تقریباً با زاویه نگاه برابر است اما در سیستم‌های فضاپایه به علت عدم صرفنظر از گرد بودن کره زمین، زاویه برخورد با زاویه نگاه برابر نیست و با توجه به روابط هندسی که در بخش ۱ آمده است قابل محاسبه است. در شکل (۲) ارتباط بین زاویه برخورد با زاویه نگاه برای ماهواره در ارتفاع ۵۰۰ کیلومتر نشان داده شده و با حالت هواپایه مقایسه شده است.

یک ضریب بزرگتر از 1.1 برای حداقل PRF در نظر گرفته می‌شود یعنی [۲]:

$$PRF \geq \frac{2.2V_s}{L_{ac}} \quad (10)$$

(۳) اکوی بازگشتی از حضيض (Nadir) نباید در زمان دریافت اکوی ناحیه تصویربرداری مورد نظر دریافت شود یعنی [۱۴]:

$$\frac{j-1}{t_{\min} - \tau - t_n} < PRF < \frac{j}{t_{\max} + \tau - t_n} \quad (11)$$

که $t_n = \frac{2h}{c}$ زمان رفت و برگشت پالس از حضيض است. برای مجاز بودن مقدار PRF رابطه (۱۱) باید به ازای حداقل یک j صحیح و نامنفی برقرار باشد.

در روش مورد استفاده برای تعیین مقادیر PRF مجاز، به ازای تمامی زوایای برخورد مورد نظر، محدوده برد سیستم (R_{\min} تا R_{\max}) به کمک روابط (۷) و (۸) تعیین شده و سپس با بررسی شرایط چهارگانه فوق مشخص می‌شود که در هر زاویه برخورد/نگاه چه مقادیری از PRF مجاز هستند.

۴- ملاحظات طراحی پارامترهای پایه‌ای

پارامترهای پایه‌ای بخشی از پارامترهای سیستمی SAR هستند که در تعیین PRF موثر هستند. در ادامه به معرفی پارامترهای پایه‌ای و عوامل موثر در انتخاب آنها می‌پردازیم.

عرض پالس

به پهنای زمانی پالس‌های ارسالی توسط رادار عرض پالس گفته می‌شود که معمولاً در سیستم‌های SAR فضاپایه مقدار آن کمتر از ۵۰ میکروثانیه می‌باشد. هرچه عرض پالس بیشتر باشد، بدون افزایش توان قله فرستنده رادار، توان متوسط فرستنده بیشتر می‌شود:

$$P_{av} = \tau \times PRF \times P_m \quad (12)$$

که در رابطه فوق P_{av} توان متوسط فرستنده، τ عرض پالس و P_m توان قله فرستنده می‌باشد. بنابراین از دیدگاه توان فرستنده معمولاً مطلوب است عرض پالس تا حد امکان بیشتر باشد تا با توان قله کمتر بتوان به توان متوسط مورد نیاز دست یافت. از طرفی هرچه عرض پالس کوچکتر باشد احتمال تداخل اکوهای بازگشتی با پالسهای ارسالی بعدی فرستنده کمتر شده و محدوده مقادیر مجاز

که θ_{el} و θ_{az} به ترتیب پهناهای پرتو آنتن در راستاهای سمت و ارتفاع بر حسب درجه هستند. با جایگذاری $\theta_{el} \approx 60\lambda / L_{el}$ و $\theta_{az} \approx 60\lambda / L_{az}$ (برحسب درجه) داریم

$$G = \frac{10\alpha L_{az} L_{el}}{\lambda^2}$$

که L_{el} و L_{az} به ترتیب ابعاد آنتن در راستاهای سمت و ارتفاع هستند. برای بدست آوردن تخمین بهتر از بهره آنتن باید از نرم افزارهای مربوط به آنتن و میدان استفاده کرد.

با توجه به تاثیر بسیار زیاد بهره آنتن بر توان مورد نیاز سیستم و همچنین محدوده PRF های مجاز، سعی می شود تا حد امکان ابعاد آنتن بزرگ باشد (با در نظر گرفتن سایر ملاحظات سیستم و حداکثر ابعاد قابل قبول برای سیستم).

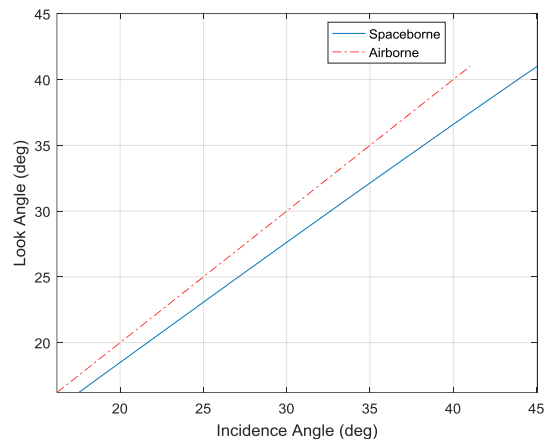
ارتفاع مداری

یکی از مهمترین عوامل در تعیین ارتفاع مداری، طول عمر ماهواره می باشد. با کاهش ارتفاع مداری، طول عمر ماهواره شدیداً کاهش می یابد و برعکس برای افزایش طول عمر ماهواره بایستی ارتفاع مداری افزایش یابد. از طرفی هرچه ارتفاع مداری بیشتر باشد برد حداکثر سیستم بیشتر بوده و در نتیجه محدوده مقادیر PRF مجاز کوچکتر خواهد بود و توان مصرفی نیز افزایش می یابد [۱۶]–[۱۵]. اغلب مطلوبست ارتفاع ماهواره از سطح زمین ثابت باشد، اما در عمل به علت عواملی مانند خطاهای کنترل موقعیت ماهواره، پستی و بلندی های سطح زمین و بیضی بودن کره زمین، ارتفاع ماهواره از سطح زمین دارای تغییرات قابل توجهی خواهد بود. در روش ارائه شده، اثرات تغییرات ارتفاع بر مقادیر PRF مجاز به صورت دقیق در نظر گرفته شده است.

عرض نوار تصویر

عرض نوار تصویر با توجه به کاربرد مورد نظر تعیین می گردد و هرچه حداکثر مدت زمان قابل قبول برای تصویربرداری از یک منطقه کمتر باشد عرض نوار تصویر مورد نیاز افزایش می یابد. از طرفی ابعاد آنتن در راستای ارتفاع مستقیماً با توجه به عرض نوار تصویر و زاویه برخورد/زاویه نگاه تعیین می گردد [۲]، [۸].

حد تفکیک سمت و برد



شکل (۲): ارتباط بین زاویه برخورد با زاویه نگاه برای ماهواره در ارتفاع ۵۰۰ کیلومتر نشان داده شده در مقایسه با حالت هواپایه

مقدار زاویه برخورد بر اساس کاربرد مورد نظر و محدوده پوشش تعیین می شود. زوایای برخورد و نگاه در سیستم های فضاپایه شدیداً با فرکانس تکرار پالس مرتبط هستند و به ازای هر زاویه نگاه/برخورد تنها مقادیر خاصی از فرکانس تکرار پالس قابل قبول است و بالعکس.

ابعاد آنتن

با توجه به اثر ابعاد آنتن بر پهناهای پرتو در راستاهای سمت و ارتفاع، حداکثر برد سیستم و در نتیجه مقادیر PRF مجاز نیز با تغییر ابعاد آنتن تغییر می کنند و هرچه ابعاد آنتن بزرگتر باشد محدوده مقادیر PRF مجاز بزرگتر خواهد بود. در انتخاب ابعاد آنتن علاوه بر PRF، حد تفکیک و بهره آنتن نیز مهم هستند که این مسئله باید در طراحی لحاظ گردد. حداقل ابعاد آنتن در راستاهای سمت و ارتفاع با توجه به ملاحظات انتخاب PRF و زاویه نگاه تعیین می شود. حداکثر ابعاد آنتن در راستای سمت محدود به دو برابر حد تفکیک در راستای سمت و در حالت تک نگاه می باشد. حداکثر ابعاد آنتن در راستای ارتفاع با توجه به عرض نوار تصویر مورد نظر تعیین می شود و باید به گونه ای انتخاب شود که حداقل عرض نوار مورد نظر پوشش داده شود. برای این منظور می توان از جایگذاری رابطه $\theta_{el} \approx \lambda / L_{el}$ (برحسب رادیان) در (۲) تا عرض نوار تصویر به دست آید.

بهره آنتن رابطه مستقیم با مساحت آنتن و بازده تشعشعی آنتن (α) دارد و به طور تقریبی بر از رابطه زیر بدست می آید [۲۲]:

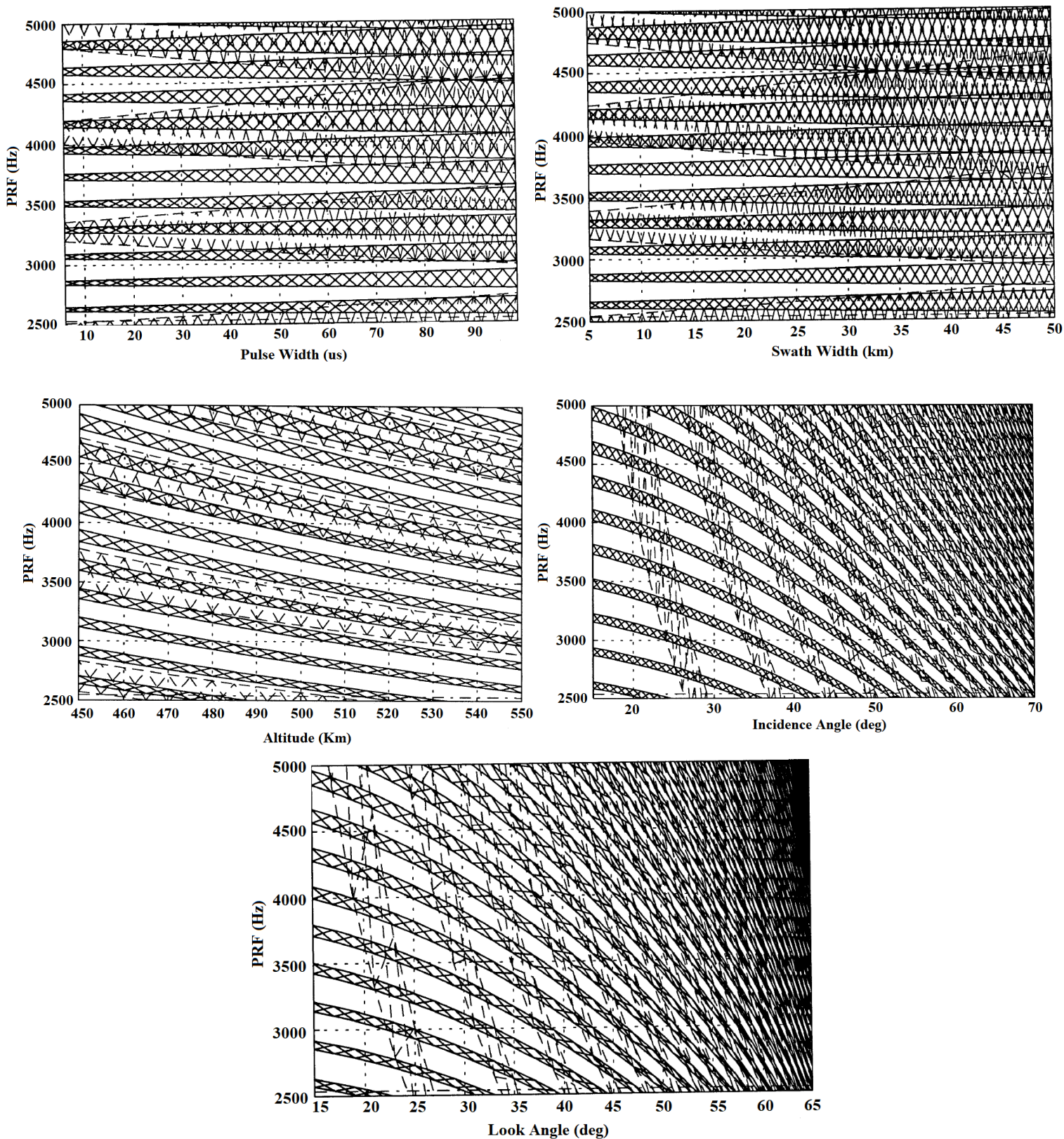
$$G = \alpha \frac{36000}{\theta_{az} \theta_{el}}$$

حد تفکیک سمت و برد نیز با توجه به کاربرد مورد نظر به صورت یک پارامتر اولیه تعیین می‌گردد. حد تفکیک سمت نمی‌تواند بهتر از نصف طول آنتن باشد. مقدار حد تفکیک سمت و برد با توان مصرفی مورد نیاز، پهنای باند و ابعاد آنتن رابطه مستقیم دارد [۲]، [۸].

علاوه بر موارد فوق فرکانس مرکزی نیز در تعیین PRF موثر است اما در طراحی اغلب ثابت در نظر گرفته می‌شوند و بنابراین معمولاً جزو پارامترهای پایه‌ای در نظر گرفته نمی‌شود.

۵- روش موجود انتخاب PRF

در ادامه به بررسی روش انتخاب PRF در منابع منتشر شده موجود [۱۳]-[۸] از جمله سند منتشر شده توسط SANDIA [۸] که جزو اسناد معتبر فضایی است می‌پردازیم. در روش موجود، نمودارهای PRF بر اساس زاویه برخورد، ابعاد آنتن، عرض پالس، عرض برد و ارتفاع محاسبه می‌شوند و سپس PRF که در منطقه موجود همه نمودارها قرار دارد، انتخاب می‌شود.



شکل (۳): نمودارهای مقادیر PRF های (بدون هاشور) و غیرمجاز (هاشور خورده) بر حسب عرض پالس، ارتفاع، عرض نوار تصویر، زاویه برخورد و زاویه نگاه [۸].

در بخش بعد روش اصلاح شده پیشنهادی با در نظر گرفتن موارد مذکور ارائه می‌گردد.

۶- روش پیشنهادی

در صورتی که ارتفاع ماهواره دارای تغییراتی باشد (که در عمل معمولاً اینچنین است)، R_{\min} و R_{\max} در روابط (۷) و (۸) متغیر می‌باشند. بنابراین نمودار PRF برحسب زاویه برخورد و نیز نمودارهای PRF برحسب سایر پارامترهای پایه‌ای که وابسته به R_{\min} و R_{\max} هستند تغییر خواهند کرد؛ بنابراین اگر بخواهیم از روش ارائه شده در [۸] برای انتخاب PRF استفاده کنیم، بایستی برای هر ارتفاع یک نمودار جداگانه برای PRF برحسب سایر متغیرهای پایه‌ای رسم کرد که علاوه بر آنکه بار محاسباتی و میزان حافظه مورد نیاز به طرز چشمگیری افزایش پیدا می‌کند، نیازمند استفاده از نمودارهای متعدد می‌باشیم که روش انتخاب PRF را بسیار پیچیده خواهد کرد. از طرفی با تغییر ارتفاع در بسیاری از مواقع نیاز به تغییر PRF وجود خواهد داشت و با توجه به آنکه در الگوریتمهای تشکیل تصاویر SAR نیاز به PRF ثابت داریم تغییرات PRF می‌تواند موجب تقطیع و ایجاد بریدگی در تصاویر گردد. در اینجا ما به یک ناحیه تصویربرداری که باید بدون هیچ برشی تشکیل شود، "کاشی تصویر" اطلاق خواهیم کرد.

تغییرات ارتفاع پستی و بلندی‌های زمین و اثر بیضی بودن زمین را می‌توان به عنوان تغییرات شعاع محلی زمین R_e (و نه ارتفاع ماهواره h) در نظر گرفت. به طور مشابه تغییرات شعاع محلی زمین نیز باعث تغییرات R_{\min} و R_{\max} می‌گردد که بایستی در انتخاب PRF در نظر گرفته شوند.

در روش پیشنهادی یک بازه برای تغییرات ارتفاع و شعاع محلی زمین در نظر می‌گیریم که در آن بازه می‌خواهیم PRF به ازای یک زاویه برخورد مشخص ثابت باشد و R_{\min} و R_{\max} را برای کل بازه تغییرات ارتفاع و شعاع محلی زمین به دست می‌آوریم:

$$R_{\min} = \min_{\substack{h \in H \\ R_e \in RE}} \{R_0(\theta_i - \theta_{el} / 2, h, R_e)\}$$

$$R_{\max} = \max_{\substack{h \in H \\ R_e \in RE}} \{R_0(\theta_i + \theta_{el} / 2, h, R_e)\}$$

که H مجموعه شامل تمام مقادیر ممکن ارتفاع و RE مجموعه شامل تمام مقادیر ممکن شعاع محلی زمین است و $R_0(\theta_i, h, R_e)$ در (۴) تعریف شده است.

به دلیل صعودی بودن توابع $\sin(\cdot)$ و $\sin^{-1}(\cdot)$ در بازه 90° تا 90° درجه، تابع $R_0(\theta_i, h, R_e)$ برای یک زاویه برخورد مشخص

در ادامه این روش به کمک یک مثال توضیح داده شده است. در یک سیستم نمونه پارامترهایی که در طراحی ثابت در نظر گرفته شده اند عبارتند از:

- ارتفاع مداری برابر ۵۰۰ کیلومتر متناظر با سرعت ۷۶۱۳ متر بر ثانیه
- عرض پالس ۳۰ میکروثانیه
- عرض نوار تصویر ۱۰ کیلومتر
- حد تفکیک ۳ متر (تک نگاه)
- زاویه برخورد ۴۵ درجه (زاویه نگاه ۴۰,۹۷ درجه)

با توجه به آنکه حداکثر طول آنتن جهت رسیدن به حد تفکیک ۳ متر برابر ۶ متر است، طول آنتن ۶ متر انتخاب شده است.

در ادامه وابستگی PRF به پارامترهای فوق بررسی شده است و نمودارهای متناظر رسم شده است. در نمودارهای شکل (۳) که برگرفته از مرجع [۸] هستند قسمت‌های سفیدرنگ بدون هاشور نشان دهنده مقادیر PRF مجاز و قسمت‌های هاشور خورده مربوط به مقادیر PRF غیرمجاز هستند. در نهایت مقادیری از PRF مجاز هستند که در همه نمودارها در ناحیه مجاز سفیدرنگ قرار بگیرند. در نهایت با توجه به نمودارهای فوق و پارامترهای ثابت مقدار $PRF=3625$ Hz به عنوان PRF مناسب در زاویه برخورد ۴۵ درجه که متناظر با زاویه نگاه ۴۰,۹۷ درجه است انتخاب شده است (با توجه به اینکه در کلیه نمودارها این مقدار PRF با در نظر گرفتن سایر پارامترهای ثابت مجاز است).

روند طراحی فوق در حالتی که تنها یکی از پارامترهای پایه‌ای متغیر باشد (که معمولاً پارامتر متغیر زاویه برخورد یا زاویه نگاه است) و سایر پارامترهای پایه‌ای ثابت باشند روند نسبتاً کامل و عملی است. در صورتی که بیش از یک پارامتر پایه‌ای متغیر باشند نیاز داریم که تغییراتی در روش فوق اعمال کنیم. با توجه به آنکه ثابت نگه داشتن سیکل کاری مستلزم متغیر بودن عرض پالس در مقادیر PRF مختلف می‌باشد، در حالتی که زاویه برخورد و به تبع آن PRF متغیر باشد (که در سیستمهای SAR متداول است) و بخواهیم سیکل کاری نیز ثابت باشد نیازمند اصلاح روش طراحی فوق خواهیم بود. همچنین اگر علاوه بر زاویه برخورد پارامتر پایه‌ای دیگری مانند ارتفاع یا شعاع محلی زمین متغیر باشد (که در عمل اینگونه است) روش قبل با محدودیت مواجه است و تنها می‌تواند یک بازه تقریبی برای تغییرات ارتفاع ارائه دهد و به منظور طراحی دقیقتر بایستی روش اصلاح گردد.

کیلومتر.

مشاهده می‌شود که در کلیه زوایا و برای هر دو ارتفاع ۵۰۰ و ۷۰۰ کیلومتر مقدار $\partial R_0(\theta_i, h, R_e) / \partial R_e$ مثبت می‌باشد. به طور مشابه برای سایر ارتفاعها نیز بر اساس شبیه سازی مقدار $\partial R_0(\theta_i, h, R_e) / \partial R_e$ همواره مثبت می‌باشد. بنابراین تابعی صعودی می‌باشد. در نتیجه داریم:

$$R_{\min} = R_0(\theta_i - \theta_{el} / 2, h_{\min}, R_{e, \min}) \quad (13)$$

$$R_{\max} = R_0(\theta_i - \theta_{el} / 2, h_{\max}, R_{e, \max}) \quad (14)$$

که h_{\min} و h_{\max} به ترتیب مقادیر حداقل و حداکثر ارتفاع ماهواره و $R_{e, \min}$ و $R_{e, \max}$ مقادیر حداقل و حداکثر شعاع محلی زمین در محدوده تصویر برداری می‌باشند.

بنابراین R_{\min} و R_{\max} بدون نیاز به اجرای الگوریتم جستجو با استفاده از روابط (۱۳) و (۱۴) قابل محاسبه هستند. با استفاده از روابط (۱۳) و (۱۴) به جای روابط (۷) و (۸)، برای کل بازه تغییرات ارتفاع و شعاع محلی زمین یک نمودار واحد برای PRF بر حسب زاویه برخورد (یا سایر متغیرهای پایه‌ای در صورت نیاز) به دست می‌آید که مشکلات روش قبل (رسم نمودارهای جداگانه PRF بر حسب زاویه برخورد برای تمامی ارتفاعها و شعاعهای محلی ممکن) را ندارد و ضمن داشتن بار محاسباتی و حافظه مورد نیاز کمتر، انتخاب PRF در زمانهای مختلف تنها با استفاده از یک نمودار امکان پذیر است. همچنین در کل بازه تغییرات ارتفاع مشخص شده، PRF به ازای یک زاویه برخورد مشخص ثابت بوده و بریدگی در تصاویر به وجود نخواهد آمد.

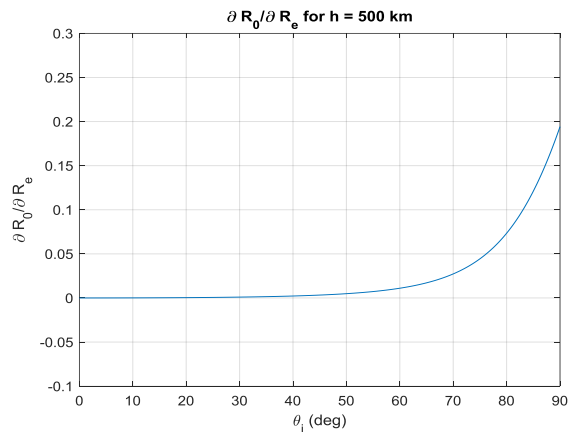
تذکر: یک کاشی تصویر قسمتی از نوار تصویر است که طول آن اغلب بخش کوچکی از کل مدار است. بنابراین، برای دستیابی به نتیجه بهتر، h_{\min} ، $R_{e, \min}$ ، h_{\max} و $R_{e, \max}$ و به تبع آن R_{\min} و R_{\max} باید برای هر کاشی تصویر و نه کل مدار محاسبه شوند. مقدار PRF انتخابی نیز برای هر کاشی متفاوت از سایر کاشی‌ها خواهد بود.

از سوی دیگر اگر بخواهیم جهت تثبیت توان ارسالی سیکل کاری مقداری ثابت و برابر d باشد آنگاه عرض پالس متغیر بوده و وابسته به مقدار PRF و برابر خواهد بود با $\tau = d / PRF$ بنابراین حدود بالا و پایین PRF در روابط (۹) و (۱۱) متغیر و وابسته به PRF بوده و در شکل فعلی قابل استفاده در روشهای موجود برای

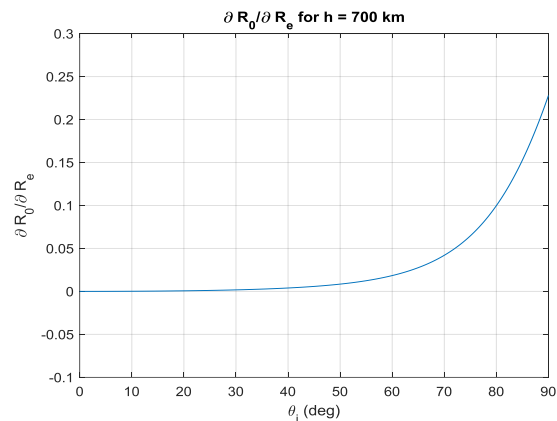
همواره بر حسب h صعودی می‌باشد (در عمل با تغییرات ارتفاع اگر زاویه نگاه ثابت باشد زاویه برخورد با توجه به انحنای زمین تغییر خواهد کرد و بنابراین برای ثابت نگه داشتن زاویه برخورد با تغییر ارتفاع بایستی زاویه نگاه تغییر کند). همچنین داریم:

$$\frac{\partial R_0(\theta_i, h, R_e)}{\partial R_e} = \frac{\sin(\theta_i - \sin^{-1}(R_e \sin(\theta_i) / (R_e + h))) / \sin(\theta_i) - \cos(\theta_i - \sin^{-1}(R_e \sin(\theta_i) / (R_e + h))) \times (\sin(\theta_i) - R_e \sin(\theta_i) / (R_e + h))}{(\sin(\theta_i)(1 - (R_e^2 \sin^2(\theta_i)) / (h + R_e)^2)^{1/2}}$$

به کمک شبیه‌سازی می‌توان نشان داد مقدار $\partial R_0(\theta_i, h, R_e) / \partial R_e$ در عبارت فوق به ازای $h > 0$ همواره مثبت است. به عنوان مثال نمودار $\partial R_0(\theta_i, h, R_e) / \partial R_e$ بر حسب θ_i در دو ارتفاع ۵۰۰ و ۷۰۰ کیلومتر در شکل‌های ۴ و ۵ رسم گردیده است.



شکل (۴): نمودار $\partial R_0(\theta_i, h, R_e) / \partial R_e$ بر حسب θ_i در ارتفاع ۵۰۰ کیلومتر.



شکل (۵): نمودار $\partial R_0(\theta_i, h, R_e) / \partial R_e$ بر حسب θ_i در ارتفاع ۷۰۰ کیلومتر.

در نهایت یک نمودار PRF بر حسب زاویه برخورد به دست می‌آید که اثر تغییرات ارتفاع و عرض پالس نیز در آن لحاظ شده است.

۵- در صورتی که زوایای برخورد مورد نظر در محدوده مجاز قرار گیرند طراحی خاتمه می‌یابد و در غیر اینصورت بازه تغییرات پارامترهای مرحله ۲ با در نظر گرفتن ملاحظات عملی محدودتر شوند و یا ابعاد آنتن بزرگتر گردد و به مرحله ۳ بازگردید.

در روش ارائه شده با توجه به آنکه اثر کلیه پارامترهای طراحی در نمودار PRF بر حسب زاویه برخورد اعمال شده است می‌توان طراحی را به کمک این نمودار انجام داد و نیازی به رسم سایر نمودارها نیست.

با توجه به آنکه اکثر پارامترهای سار فضاپایه با PRF مربوط هستند، روش ارائه شده می‌تواند در طراحی مفهومی اغلب پارامترهای سار فضاپایه راهگشا باشد.

در ادامه فلوجارت کلی الگوریتم طراحی مفهومی پارامترهای مرتبط با PRF در سار فضاپایه به منظور بهینه سازی PRF ارائه شده است. پارامترهای ثابت مربوط به ماموریت تعریف شده برای ماهواره شامل فرکانس، ارتفاع مداری، رزولوشن، عرض نوار تصویر و محدوده زوایای برخورد/نگاه از پیش تعیین شده اند و به عنوان ورودی الگوریتم گرفته می‌شوند.

تعیین PRF نیستند و بایستی اصلاح گردند. با جایگذاری $\tau = d / PRF$ در روابط (۹) و (۱۱) خواهیم داشت:

$$\frac{i}{t_{\min} - d / PRF} < PRF < \frac{i+1}{t_{\max} + d / PRF}$$

$$\frac{j-1}{t_{\min} - d / PRF - t_n} < PRF < \frac{j}{t_{\max} + d / PRF - t_n}$$

با انتقال PRF به یک سمت نامساوی‌های فوق خواهیم داشت:

$$\frac{i+d}{t_{\min}} < PRF < \frac{i+1-d}{t_{\max}} \quad (15)$$

$$\frac{j-1+d}{t_{\min} - t_n} < PRF < \frac{j-d}{t_{\max} - t_n} \quad (16)$$

در روابط (۱۵) و (۱۶) حدود بالا و پایین PRF ثابت بوده و بنابراین در حالت سیکل کاری ثابت بایستی از این دو رابطه استفاده کرد.

روش پیشنهادی برای انتخاب فرکانس تکرار پالس به صورت

زیر خواهد بود:

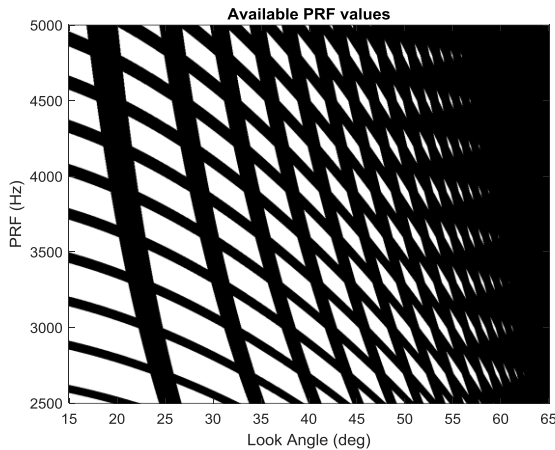
۱- با توجه به کاربرد مورد نظر برای سامانه، پارامترهای ثابت

طراحی شامل فرکانس، ارتفاع مداری، حدتفکیک، حداقل عرض نوار تصویر و بازه مورد نیاز برای زاویه برخورد/نگاه به عنوان ورودی گرفته شوند.

۲- با توجه به مکانیزم کنترل ماهواره و مشخصات ناحیه مورد نظر برای تصویربرداری، بازه تغییرات ارتفاع و شعاع محلی زمین نیز به عنوان ورودی گرفته شوند.

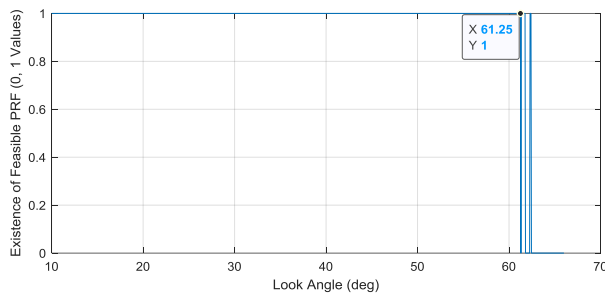
۳- ضمن در نظر گرفتن محدودیتهای عملی ابعاد سامانه، برای ابعاد آنتن در راستای سمت مقداری کوچکتر یا مساوی دو برابر حد تفکیک در راستای سمت انتخاب شود. ابعاد آنتن در راستای ارتفاع را به گونه ای انتخاب کنید که با استفاده از رابطه (۲) عرض نوار تصویر مورد نظر حاصل گردد. برای عرض پالس با توجه به محدودیت توان متوسط و قله سیستم و بر اساس رابطه (۱۲) یک مقدار اولیه در نظر بگیرید.

۴- با استفاده از روش پیشنهادی محاسبه محدوده مجاز PRF که با اعمال روابط (۱۳) و (۱۴) به جای روابط (۷) و (۸) در روش معرفی شده در بخش ۳ حاصل می‌گردد، محدوده مجاز PRF بر حسب زوایای برخورد مختلف محاسبه گردد. در صورتی که بخواهیم جهت تشبیت توان ارسالی سیکل کاری ثابت و برابر d باشد آنگاه به جای روابط (۹) و (۱۱) از روابط (۱۵) و (۱۶) استفاده شود.



شکل (۷): مقادیر مجاز PRF (نواحی سفید) بر حسب زاویه نگاه در حالت عرض پالس ثابت

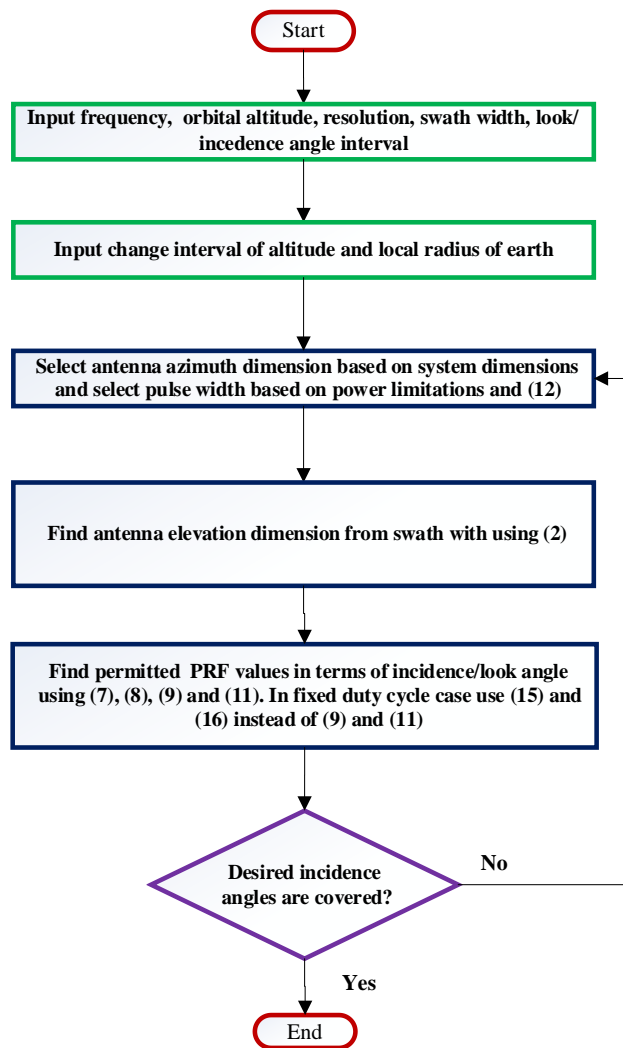
بر اساس نمودار شکل (۷)، اگر همه زاویه‌های نگاه که حداقل یک مقدار PRF مجاز دارند را ترسیم کنیم، نمودار زیر به دست می‌آید. (از زوایای برخورد کمتر از ۱۰ درجه به دلیل رزلوشن برد زمینی بسیار کم در این زوایا صرف‌نظر می‌گردد).



شکل (۸): زاویه‌های نگاه که حداقل یک مقدار PRF مجاز در حالت سیکل کاری ثابت دارند (مقدار یک نشان‌دهنده وجود PRF مجاز در زاویه نگاه مربوطه و مقدار صفر نشان‌دهنده عدم وجود PRF مجاز در زاویه برخورد مربوطه است).

با توجه به نمودار فوق، زاویه نگاه در محدوده ۱۰ تا ۶۱٫۲۵ درجه درجه به‌طور پیوسته و ۶۱٫۲۵ تا ۶۲٫۳ درجه به‌طور گسسته دارای مقدار مجاز می‌باشد.

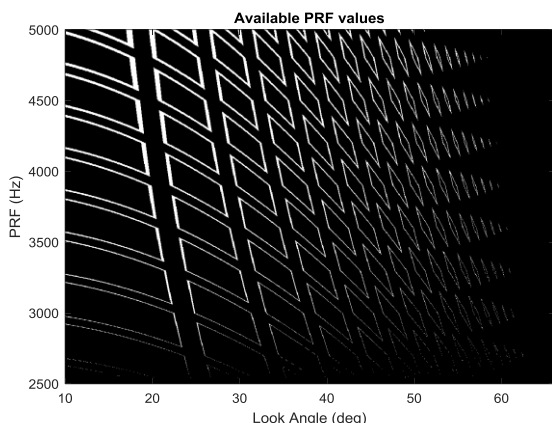
با استفاده از روش پیشنهادی، می‌توان مقادیر مجاز PRF را در حالت سیکل کاری ثابت (عرض پالس متغیر) به دست آورد، در حالی که روش موجود این قابلیت را ندارد. نمودار PRF بر حسب زاویه نگاه که از روش پیشنهادی در حالت سیکل کاری ثابت به دست آمده است، در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل (۶): فلوچارت کلی الگوریتم طراحی مفهومی پارامترهای مرتبط با PRF در سار فضاپایه به منظور بهینه سازی PRF.

۷- نتایج و بحث

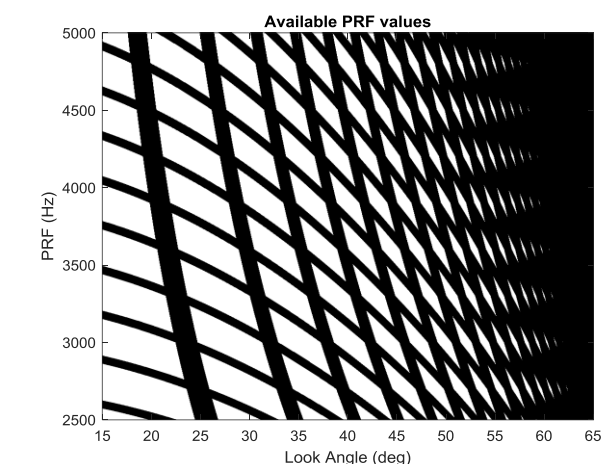
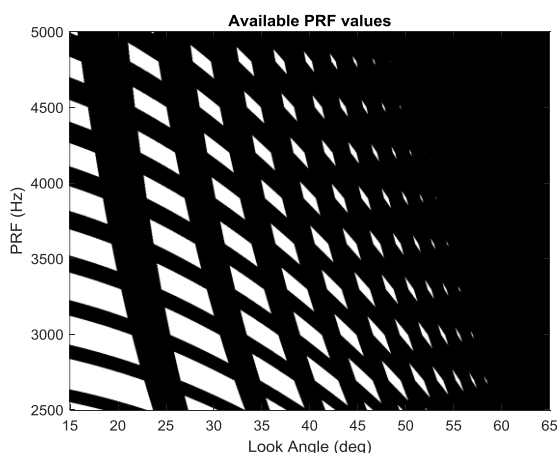
در مثال بخش ۵ اگر طراحی را توسط روش پیشنهادی انجام دهیم با ثابت در نظر گرفتن عرض پالس و ارتفاع ثابت نتایج مشابهی با روش ارائه شده در [۸] به دست می‌آید. نمودار PRF بر حسب زاویه نگاه که از روش پیشنهادی به دست آمده است، در شکل (۷) نشان داده شده است که با روش ارائه شده در [۸] که نتایج آن در شکل (۳) آورده شده است مشابه است.



شکل (۱۱): مقادیر PRF مجاز (نواحی سفید) در نمودار شکل (۹) که در نمودار شکل (۷) وجود ندارند.

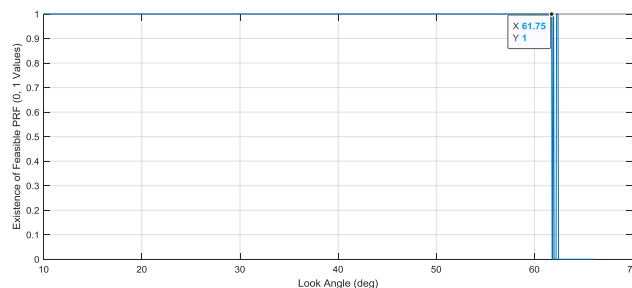
در عمل، به دلیل تغییرات ارتفاع / شعاع محلی زمین، مقادیر مجاز PRF محدودتر هستند و لازم است این اثر در نظر گرفته شود تا نمودارهای به دست آمده بتوانند در کاربردهای واقعی استفاده شوند. در روش ارائه شده در [۸]، از آنجا که فقط یک پارامتر می‌تواند متغیر باشد، این اثر نمی‌تواند به دقت اعمال شود، در حالی که روش پیشنهادی قادر به اعمال دقیق این اثر همانطور که در بخش ۶ توضیح داده شده است، می‌باشد. برای بررسی اثر تغییرات ارتفاع / شعاع محلی زمین سناریویی را در نظر می‌گیریم که در آن فرض می‌شود که در یک کاشی تصویر تغییرات ارتفاع ماهواره می‌تواند ± 2 کیلومتر و تغییرات شعاع محلی زمین ± 2 کیلومتر باشد. پارامترهای سیستم، مشابه با مثال قبل در نظر گرفته شده‌اند. در این حالت نتایج شبیه‌سازی کامپیوتری و انتخاب PRF با استفاده از روش پیشنهادی در دو حالت عرض پالس ثابت و سیکل کاری ثابت در ادامه ارائه شده است.

نتایج در حالت عرض پالس ثابت:



شکل (۹): مقادیر مجاز PRF (نواحی سفید) بر حسب زاویه نگاه در حالت سیکل کاری ثابت.

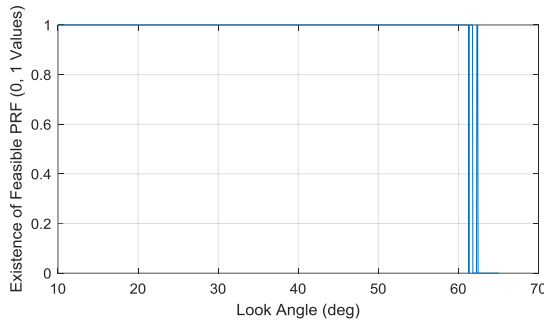
بر اساس نمودار شکل (۹)، اگر همه زاویه‌های نگاه که حداقل یک مقدار PRF مجاز دارند را ترسیم کنیم، نمودار زیر به دست می‌آید.



شکل (۱۰): زاویه‌های نگاه که حداقل یک مقدار PRF مجاز در حالت سیکل کاری ثابت دارند.

با توجه به نمودار فوق، زاویه نگاه در محدوده ۱۰ تا ۶۱٫۷۵ درجه درجه به‌طور پیوسته و ۶۱٫۲۵ تا ۶۲٫۳۵ درجه به‌طور گسسته دارای مقدار مجاز می‌باشد.

با مقایسه شکل‌های (۸) و (۱۰) مشاهده می‌شود، مقادیر PRF مجاز در حالت سیکل کاری ثابت نسبت به حالت عرض پالس ثابت افزایش یافته‌اند. همچنین برای مقایسه دقیقتر نمودارهای شکل‌های (۷) و (۹)، تفاضل این دو نمودار در شکل (۱۱) نشان داده شده است. در واقع نواحی سفید در شکل (۱۱) شامل مقادیر PRF مجاز (نواحی سفید) در نمودار شکل (۹) هستند که در نمودار شکل (۷) وجود ندارند و مجدداً نشان می‌دهند مقادیر PRF مجاز در حالت سیکل کاری ثابت نسبت به حالت عرض پالس ثابت افزایش یافته‌اند.



شکل (۱۵): زاویه‌های نگاه که حداقل یک مقدار PRF مجاز در حالت سیکل کاری ثابت دارند.

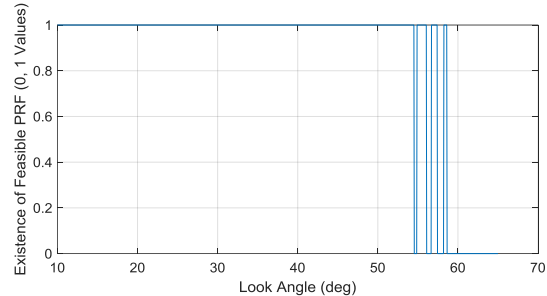
با توجه به نمودار فوق، زاویه نگاه در محدوده ۱۰ تا ۶۲٫۴ درجه (۱۰ تا ۶۱٫۵ درجه به‌طور پیوسته و ۶۱٫۵ تا ۶۲٫۴ درجه به‌طور گسسته) دارای مقدار مجاز می‌باشد. بنابراین در حالت سیکل کاری ثابت در حالی که توان ارسالی ثابت است، محدوده پیوسته مجاز برای زاویه نگاه افزایش می‌یابد. در این حالت، با فرض انتخاب حداکثر PRF برابر با 5KHz، عرض پالس برای مقادیر مختلف PRF در محدوده ۱۵ تا ۳۰ میکروثانیه تغییر می‌کند و سایر پارامترها مشابه با حالت قبلی هستند. بنابراین، مشاهده می‌شود که در روش پیشنهادی، در حالی که مقادیر مجاز PRF می‌توانند تنها با محاسبه و ترسیم یک نمودار در یک محدوده وسیع از زاویه‌های برخورد به دست آیند، امکان تثبیت سیکل کاری (و به تبع آن توان قله و میانگین) نیز وجود دارد و همچنین محدوده مقادیر PRF و زاویه نگاه / برخورد مجاز افزایش یافته و اثر تغییرات ارتفاع نیز به صورت دقیق اعمال می‌شود.

۸- نتیجه گیری

در این مقاله روش بهبودیافته انتخاب PRF برای سیستم‌های SAR فضاپایه با قابلیت اعمال دقیق اثر تغییرات ارتفاع و شعاع محلی زمین و همچنین قابلیت تثبیت سیکل کاری و توان ارائه گردید. در انتها برای یک سیستم نوعی، نتایج شبیه سازی و طراحی به کمک روش ارائه شده آورده شد. در حالت بدون تغییرات ارتفاع و شعاع محلی زمین نتایج به دست آمده مشابه نتایج روش ارائه شده در [۸] است و صحت روش ارائه شده را تایید می‌کند. همچنین در حالتی که در آن زاویه برخورد، ارتفاع مدار و شعاع محلی زمین در محدوده معینی قابل تغییر است، مقادیر PRF مجاز در هر زاویه برخورد و برای هر دو حالت سیکل کاری ثابت و عرض پالس ثابت محاسبه گردید. نتایج شبیه سازی ضمن تایید قابلیت‌های روش ارائه

شکل (۱۲): مقادیر مجاز PRF (نواحی سفید) بر اساس زاویه برخورد در حالت عرض پالس ثابت با در نظر گرفتن اثر تغییرات سایر پارامترها.

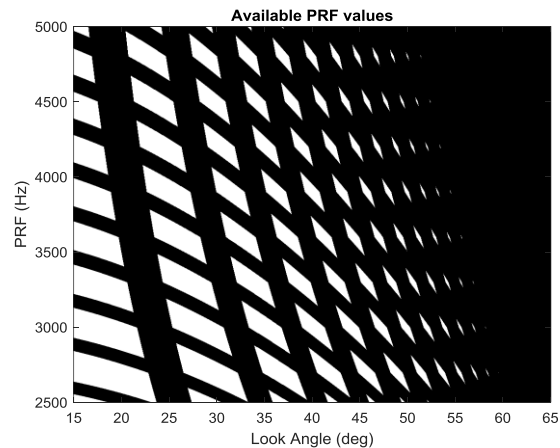
بر اساس نمودار شکل (۱۲)، اگر همه زاویه‌های نگاه که حداقل یک مقدار PRF مجاز دارند را ترسیم کنیم، نمودار زیر به دست می‌آید.



شکل (۱۳): زاویه‌های نگاه مجاز که حداقل یک مقدار PRF مجاز در حالت عرض پالس ثابت دارند.

با توجه به نمودار فوق، زاویه نگاه در محدوده ۱۰ تا ۵۸٫۶ درجه (۱۰ تا ۵۴٫۵ درجه به‌طور پیوسته و ۵۴٫۵ تا ۵۸٫۶ درجه به‌طور گسسته) دارای مقدار مجاز می‌باشد. به دلیل اینکه اثر همه پارامترها در نمودار فوق لحاظ شده است، نیازی به ترسیم نمودارهای دیگر نیست و انتخاب PRF در هر زاویه برخورد با استفاده از نمودار فوق ممکن است.

نتایج در حالت سیکل کاری ثابت:



شکل (۱۴): مقادیر مجاز PRF (نواحی سفید) بر اساس زاویه برخورد در حالت سیکل کاری ثابت با در نظر گرفتن اثر تغییرات سایر پارامترها.

در نمودار شکل (۱۴)، اگر همه زاویه‌های نگاه که حداقل یک مقدار PRF مجاز دارند را ترسیم کنیم، نمودار زیر به دست می‌آید.

- [14] S. Wollstadt, and J. Mittermayer, "Nadir Margins in TerraSAR-X Timing Commanding," CEOS SAR Calibration and Validation Workshop, 2008.
- [15] N. V. Petersen, "Lifetimes of satellites in near-circular and elliptic orbits," *Journal of Jet Propulsion* 26.5 (1956): 341-351.
- [16] J. Kork, "Satellite lifetimes in elliptic orbits," *Journal of the Aerospace Sciences* 29.11 (1962): 1273-1290.
- [17] W. Torge, and J. Müller, *Geodesy*, Walter de Gruyter, 2012.
- [18] A. Freeman, "Design Principles for Smallsat SARs," in Proc. Small Satellite Conf., Logan, UT, USA, Aug. 2018.
- [19] C. Reising, L. Prunte, F.S.T. Flohrer, and S. Lemmens, "Noise Figure Calculation for Space Surveillance Radar Systems," in Proc. 8th Eur. Conf. Space Debris, Darmstadt, Germany, Apr. 2021, vol. 8.
- [20] S. Kim, C. M. Song, S. H. Lee, S. C. Song, and H. U. Oh, "Design and Performance of X-Band SAR Payload for 80 kg Class Flat-Panel-Type Microsatellite Based on Active Phased Array Antenna," *Aerospace*, vol. 9, no. 213, 2022.
- [21] E. Makas, and A. R. Aslan, "Spaceborne SAR System Design Considerations: Minimizing Satellite Size and Mass, System Parameter Trade-Offs, and Optimization," *Applied Sciences*, vol. 14 no. 21, p. 9661, 2024.
- [22] C. A. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*, John Wiley & sons, 2015.

شده، نشان می‌دهند اعمال سیکل کاری ثابت می‌تواند محدوده مقادیر PRF و زاویه برخورد مجاز را افزایش دهد که یک مزیت قابل توجه را در طراحی ایجاد می‌کند.

تعارض منافع

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است."

مراجع

- [1] M. Skolnik, "Synthetic Aperture Radar," in *RADAR Handbook*, 3rd edition, McGraw-Hill, 2008.
- [2] I. G. Cumming, and F. H. Wong, *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data Algorithms and Implementation*, Artech House, 2005.
- [3] J. C. Curlander, and R. N. McDonough, *Synthetic Aperture Radar - Systems and Signal Processing*, John Wiley & Sons, 1991.
- [4] C. Elachi, *Spaceborne Radar Remote Sensing: Applications and Techniques*, IEEE Press, 1988.
- [5] A. Hein, *Processing of SAR Data: Fundamentals, Signal Processing, Interferometry*, Springer, 2004.
- [6] L. J. Cantafio, *Space-based radar handbook*, Norwood, MA, Artech House Inc., 1989.
- [7] B.C. Barber. (1985). "Theory of Digital Imaging from Orbital Synthetic-Aperture Radar", *Int. J. Remotesensing*, Vol. 6, No.7, 1985.
- [8] D. L. Bickel, B. C. Brock, and C. T. Allen, "Spaceborne SAR Study:LDRD 92' Final Report," Sandia National Laboratories, 1993.
- [9] S. Gharibi, and J. Amini, "Detection and Analysis of Appropriate PRF for Spaceborne SAR Sensors," *Proceedings of the International Conference on Electrical and Computer Systems*, Ottawa, Ontario, Canada, Aug. 2012.
- [10] R. Bamler, and H. Runge, "A Novel PRF-Ambiguity Resolver", *Proc. of IGARRS '91*, pp. 1035-1038.
- [11] R. Bamler and H. Runge, "PRF-Ambiguity Resolving by Wavelength Diversity", *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 29, No. 6, Nov. 1991, pp. 997-1003.
- [12] R. Bamler, "Wavelength diversity PRF-ambiguity resolver: calibration and test for ERS-1 SAR," *Proceedings of IGARSS '93 - IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Tokyo, Japan, 1993, pp. 1447-1449 vol.3.
- [13] R. Wang, and R. Yang, "PRF selection for synthetic aperture radar in ellipse orbit," in *Third International Asia-Pacific Environmental Remote Sensing Remote Sensing of the Atmosphere, Ocean, Environment, and Space*, pp. 531-538, 2003.



COPYRIGHTS

© 2025 by the authors. Licensee Iranian Space Research Center of Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)