

پایش و تحلیل سیگنال ماهواره SAR با استفاده از یک گیرنده هشدار سریع زمینی

مسعود اردینی^۱، محمد روئین فر^{۲*}، روح الله رضانی^۳، احمدرضا امین^۴

۱-۲-۳- کارشناس ارشد، دانشگاه دانش، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

۴- استادیار، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(دریافت: ۹۴/۰۳/۲۶؛ پذیرش: ۹۴/۱۲/۲۲)

چکیده

در این مقاله، یک گیرنده هشدار سریع زمینی جهت دریافت و پایش سیگنال از رادار دهانه ترکیبی فضاپایه معرفی و تشریح شده که می‌تواند جهت کاربردهای متنوع جنگ الکترونیک مورد استفاده قرار گیرد. این گیرنده از دو بخش آشکارساز پارامترهای زمانی و آشکارساز پارامترهای فرکانسی تشکیل شده و قادر است تا توان سیگنال، پهنای باند، فرکانس مرکزی، عرض پالس، نرخ تکرار پالس، شکل پرتو آنتن و مدت زمان تصویربرداری رادار SAR فضاپایه را از روی سیگنال دریافتی اندازه‌گیری کند. در بخش آشکارسازی فرکانسی از تحلیل‌گر طیف استفاده شده و براساس همین روش، پیشنهاد جدیدی برای تشخیص سیگنال LFM از سایر مدولاسیون‌ها ارائه شده است. همچنین در این مقاله روش‌هایی برای شناسایی سیگنال SAR از سایر منابع سیگنالی و تخمین پارامترهای تصویربرداری بیان شده است. در ادامه برخی از دریافت‌های موفق این گیرنده از ماهواره‌های تصویربرداری COSMO-SkyMed و FIA-Radar درج شده و برخی از پارامترهای به‌دست‌آمده با پارامترهای موجود در منابع آشکار مقایسه شده است. همچنین ضمن توصیف مناسب از ویژگی‌های سیگنال SAR فضاپایه محدوده تغییرات پارامترهایی نظیر پهنای باند، نرخ تکرار پالس، زمان دوام سیگنال و چگالی توان دریافتی از ماهواره با استفاده از روابط تحلیلی به‌دست می‌آید.

واژگان کلیدی

گیرنده پایش، آشکارساز زمانی، آشکارساز فرکانسی، رادار دهانه ترکیبی، ماهواره

۱. مقدمه

مناطق مورد علاقه رادارهای SAR هستند. بنابراین اولین گام محافظت از این مناطق، ساخت گیرنده زمینی و پایش^۱ سیگنال ماهواره‌های SAR است. باید توجه داشت که ماهواره نمی‌تواند رادار خود را همواره روشن نگاه دارد، چراکه تصویربرداری به روش SAR توان بالایی را مصرف می‌نماید از سوی دیگر منابع انرژی برای ماهواره‌ها محدود است. در نتیجه این ماهواره‌ها تنها در نقاط ماموریتی تصویربرداری می‌کنند و طول زمان تصویربرداری یا روشن بودن رادار چند ثانیه است. از طرفی رادارهای این ماهواره‌ها دارای آنتنی با پهنای پرتو^۲ باریک هستند، بنابراین احتمال بالایی وجود دارد که در زمان تصویربرداری ماهواره، به‌جای این‌که گلبیگ اصلی آنتن ماهواره روی گیرنده زمینی هشدار سریع باشد، تنها یکی از گلبیگ‌های فرعی آنتن ماهواره روی گیرنده زمینی قرار گیرد. در این صورت یا سیگنالی پایش نخواهد شد و یا پایش سیگنال دارای سطح توان پایینی خواهد بود. بنابراین تنها در حالتی که ماهواره از منطقه‌ای که گیرنده زمینی در آن واقع است، تصویربرداری نماید، امکان

رادارهای SAR گونه‌ای از رادارها هستند که قادرند در طول موج‌های متنوع رادیویی از یک منطقه تصویربرداری کنند. برتری این روش تصویربرداری نسبت به تصویربرداری با طول موج مرئی، در این است که تصویربرداری به‌وسیله رادار SAR، تقریباً در همه شرایط محیطی و آب و هوایی نظیر شب، هوای ابری، مه آلود و ... ممکن است. از طرفی از آنجا که در تصاویر SAR سطح زمین و عوارض آن از درجه طول موج دیگری دیده می‌شود، شاخصه‌ها و مشاهداتی حاصل خواهد شد که در تصاویر مرئی یا به خوبی دیده نشده و یا اصلاً دیده نمی‌شوند.

هم اکنون ساخت ماهواره‌های SAR رشد روزافزونی داشته و موسسات نظامی و امنیتی متعدد، بودجه‌های عظیمی را صرف ساخت ماهواره SAR نموده‌اند، در حال حاضر دهها ماهواره در طول موج‌های مختلف در فضا در حال تصویربرداری هستند. تمامی مراکز حساس و استراتژیک، گزینه‌های مورد علاقه‌ای برای تصویربرداری توسط این ماهواره‌ها هستند. مراکز هسته‌ای، موشکی، مناطق تحت درگیری نظامی، فرودگاه‌ها، پایگاه‌های هوایی، سدها، بنادر مهم و بسیاری از مکان‌های دیگر از جمله

¹ Monitoring

² Beam Width

نمی‌توانند نیازهای عملیاتی یک سامانه جنگ الکترونیک را برآورده کنند.

یک سامانه پایش ماهواره‌های SAR جهت دو کاربرد عمده به کار می‌رود. اول، ایجاد یک بانک اطلاعاتی مناسب از سیگنال ماهواره SAR است که این بانک شامل اطلاعاتی نظیر دفعات تصویربرداری، فواصل زمانی بین این دفعات و وضوح تصویربرداری از یک منطقه استراتژیک خواهد بود. در کاربرد دوم می‌بایست، بتواند با سرعت زیاد سیگنال SAR را از سایر سیگنال‌ها تشخیص دهد و سپس اطلاعات مورد نیاز یک سامانه مقابله کننده با ماهواره SAR را تولید کند. در حالت اول تنوع پارامتری و دقت اندازه‌گیری مهم است و در حالت دوم سرعت عمل اهمیت دارد.

در بین سامانه‌های مقابله کننده با ماهواره SAR، آن دسته از سامانه‌هایی که قصد فریب دارند، نیازمند روش‌های پیچیده‌تری هستند. به طور مثال تخمین دقیق پارامترهای سیگنال SAR و نحوه حرکت سکوی SAR از ملزومات روش‌های فریب است. بنابراین لازم طراحی اخلاص گر فریب، دریافت سیگنال SAR و استخراج دقیق مشخصات آن است، مقاله‌های متنوعی در زمینه ایجاد فریب وجود دارد. در این تحقیقات دیده می‌شود که اهداف غیر واقعی به تصاویر اضافه شده [۱۵-۱۳] و یا عوارض زمین تغییر داده شده است [۱۶]. هیچ یک از مقالات ذکر شده سامانه مشخصی را برای دریافت سیگنال SAR معرفی نکرده‌اند، بنابراین این مقاله می‌تواند مکمل تحقیقات از این دست باشد.

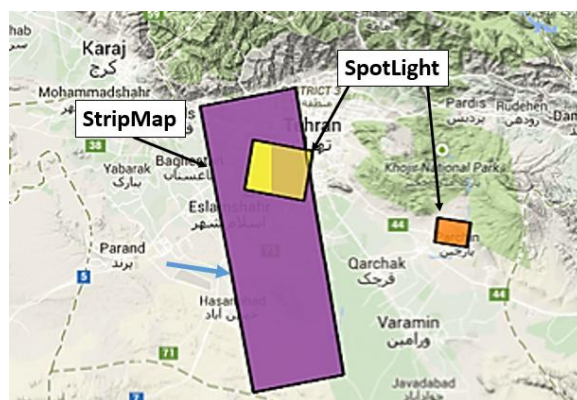
در بخش ۲ این مقاله، به توصیف مشخصات سیگنال SAR فضاپایه پرداخته خواهد شد. اطلاعات مربوط به طراحی گیرنده در بخش ۳ درج شده است. نتایج عملی حاصل از این گیرنده و تحلیل نیز در بخش ۴ این مقاله آمده است.

۲. ویژگی‌ها و ماهیت سیگنال SAR فضاپایه

برای طراحی گیرنده مناسب جهت پایش سیگنال SAR، لازم است توصیفی از شکل سیگنال SAR فضاپایه ارائه شود. این شناخت از سیگنال، امکان تفکیک سیگنال SAR را از سایر منابع سیگنالی فراهم می‌نماید. در این بخش محدوده تغییرات پارامترهایی نظیر پهنای باند، نرخ تکرار پالس، زمان دوام سیگنال و چگالی توان دریافتی از ماهواره با استفاده از روابط تحلیلی به دست آمده و همینطور اثبات می‌شود که سیگنال رادار SAR فضاپایه می‌بایست به صورت پالسی باشد. تمامی این موارد با توجه به معادلات رادار SAR و هندسه تصویربرداری این رادارها که در شکل ۲ نشان داده شده به دست می‌آید. در این هندسه S عرض نوار تصویربرداری و پارامترهای R_1 و R_2 به ترتیب کمترین و بیشترین فاصله سکو تا منطقه تصویربرداری است. فاصله ماهواره تا مرکز منطقه تصویربرداری نیز با R نشان داده شده است.

پایش سیگنال SAR توسط گیرنده زمینی وجود دارد.

برخی از مالکان ماهواره‌های SAR، آرشویی از مناطق تصویربرداری شده توسط ماهواره را در اختیار کاربران قرار می‌دهند. این آرشوها می‌توانند شاخص مناسبی از احتمال دریافت و زمان دوام سیگنال ماهواره ارائه دهند. به طور مثال شکل ۱ پوشش ماهواره TerraSAR-X را بر روی استان تهران در محدوده زمانی (از ابتدا تا انتهای سال ۲۰۱۴) نشان می‌دهد [۱]. این ماهواره ۱۸ مرتبه در حالت^۱ تابش نقطه‌ای^۲ از دو نقطه مشخص تصویربرداری کرده است. همچنین ۷ مرتبه تصویربرداری نیز از یک نقطه مشخص در حالت نواری^۳ انجام داده است. بنابراین اگر متوسط حضور سیگنال در هر تصویربرداری را برابر ۵ ثانیه فرض کنیم آنگاه نرخ تصویربرداری از استان تهران درصد بسیار ناچیزی خواهد شد. بنابراین پایش سیگنال ماهواره‌های SAR نیازمند تحمل زمان‌های طولانی خواهد بود.



شکل ۱. تصویربرداری انجام شده توسط ماهواره TerraSAR-X از استان تهران در محدوده ابتدا تا انتهای سال ۲۰۱۴

مراجعی که به نوعی گیرنده‌های زمینی پایشگر سیگنال SAR فضاپایه را معرفی کرده‌اند، به سه دسته قابل تقسیم هستند. دسته اول گیرنده‌هایی هستند که به تشخیص الگوی آنتن ماهواره SAR جهت کالیبراسیون آنتن‌های SAR می‌پردازند [۶-۲]. دسته دوم گیرنده‌هایی هستند که به منظور تولید سطح مقطع راداری مشخص طراحی شده و جهت ایجاد یک مرجع در تصاویر SAR با هدف کالیبراسیون به کار می‌روند [۹-۷]. دسته سوم مربوط به پروژه‌های تصویربرداری SAR دوپایه^۴ است که در آن ماهواره به عنوان فرستنده و گیرنده زمینی به عنوان دریافت کننده اکوی بازتابی از منطقه در نظر گرفته می‌شود [۱۲-۱۰]. اما مراجع مشخصی برای دریافت از ماهواره SAR فضاپایه جهت کاربردهای جنگ الکترونیک وجود ندارد و هیچ یک از سه دسته اشاره شده

¹ Mode

² Spot Light (SL)

³ Stripmap

⁴ Bistatic

است. در این رابطه λ طول موج، σ سطح مقطع راداری هدف، G_t بهره آنتن فرستنده رادار SAR و G_r بهره آنتن گیرنده رادار SAR است [۱۷].

$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{G_t G_r \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \quad (۳)$$

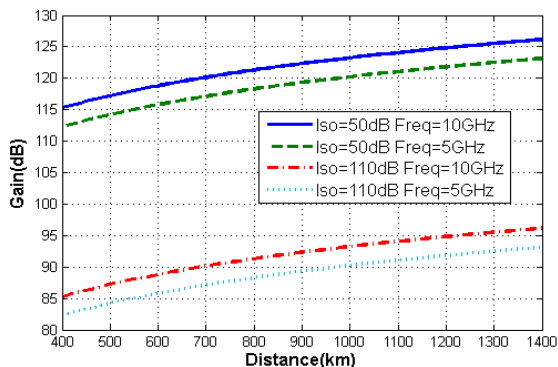
رابطه زیر نشان می‌دهد که برای داشتن ایزولاسیون مناسب برای دریافت و ارسال همزمان در رادار SAR، ماهواره به چه آنتنی نیاز دارد. (در این رابطه فرض شده که $G_t = G_r = G$ برقرار است.)

$$\frac{P_t}{P_r} = 10^{\left(\frac{Iso-15}{10}\right)} = \frac{(4\pi)^3 R^4}{G^2 \sigma \lambda^2}$$

$$G = \sqrt{\frac{(4\pi)^3 R^4}{10^{\left(\frac{Iso-15}{10}\right)} \sigma \lambda^2}} \quad (۴)$$

در شکل ۳ میزان بهره آنتن به ازای فاصله ترسیم شده است. در این شکل میزان $\sigma = 1$ فرض شده است. اگر رادار SAR مستقر در ماهواره از ساختار سیرکولاتور و یک آنتن برای ارسال و دریافت استفاده کند، ایزولاسیون بین ۲۰dB تا ۵۰dB خواهد بود اما اگر از ساختار آنتن‌های جداگانه برای ارسال و دریافت استفاده کند میزان ایزولاسیون تا ۱۱۰dB نیز قابل افزایش است [۷].

شبهه‌سازی شکل ۳ به ازای دو مقدار ایزولاسیون ۵۰dB و ۱۱۰dB در دو فرکانس مختلف انجام شده است. مشاهده می‌شود که اعداد بدست آمده برای بهره آنتن SAR غیرقابل پیاده‌سازی است. طبق رابطه تقریبی بهره آنتن با ابعاد آن $(G = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_e)$ ، می‌توان گفت که برای رسیدن به چنین بهره‌هایی به آنتن‌های بزرگی نیاز است که امکان پیاده‌سازی آن روی ماهواره غیرممکن می‌باشد. بنابراین وجود رادارهای موج پیوسته فضایی قابل تحقق نخواهد بود و می‌بایست از رادارهای پالسی بهره برد.



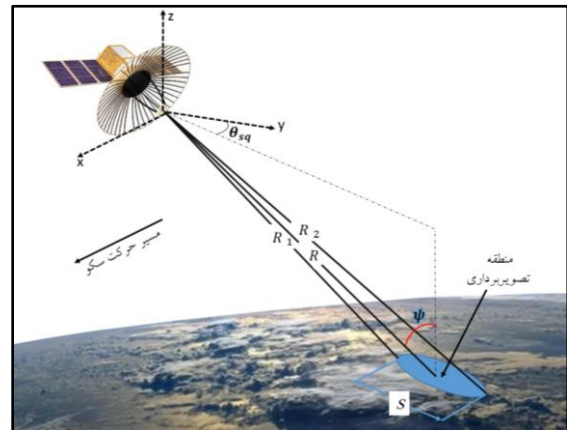
شکل ۳. نتیجه شبهه‌سازی برای رادار فضایی

۲-۲. زمان دوام سیگنال رادار SAR فضایی

رابطه حد تفکیک^۳ رادار SAR در راستای سمت براساس رابطه (۵) به‌دست می‌آید [۱۸]، از روی این رابطه می‌توان زمان

$$R_2 > R_1 \gg S \quad (۱)$$

با توجه به فاصله زیاد ماهواره نسبت به عرض نوار تصویربرداری، $R_1 \approx R_2 \approx R$ فرض شده است. همچنین در این هندسه ψ زاویه تابش^۱ و θ_{sq} زاویه لوجی^۲ نامگذاری شده است. در شکل ۲ دستگاه مختصات در دهانه آنتن قرار داده شده و زاویه تابش، متمم زاویه صفحه $Z=0$ با خط R است. در این دستگاه مختصات محور Y عمود بر راستای حرکت بوده و بنابراین زاویه لوجی، زاویه بین محور Y و تصویر خط R بر صفحه $Z=0$ است.



شکل ۲. هندسه تصویربرداری SAR

۲-۱. پالسی بودن رادار SAR فضایی

رادارهای SAR فضایی به علت فاصله زیادشان با هدف می‌بایست، توان ارسالی زیاد و حساسیت پایینی داشته باشند. برای آنکه رادارهای SAR فضایی به‌صورت موج پیوسته قابل پیاده‌سازی باشند، جهت رسیدن به ایزولاسیون مناسب، لازم است رادار دارای دو آنتن ارسال و دریافت مجزا با بهره بالا و فاصله مناسب از یکدیگر باشد. در ادامه، با محاسبات نشان خواهیم داد که ابعاد آنتن‌ها برای رادار SAR فضایی موج پیوسته آن‌قدر بزرگ می‌شود که تحقق آن را غیر ممکن می‌سازد.

تفاوت بین توان‌های ارسالی و دریافتی می‌بایست ۱۵ dB کوچکتر از ایزولاسیون باشد [۷]. فاصله ۱۵ dB به این دلیل لازم است که اثر نشت فرستنده در گیرنده نباید به حدی باشد که بر اکوی دریافتی از منطقه غلبه کند. در نتیجه این میزان را به صورت زیر می‌توان بیان کرد، در این رابطه Iso میزان ایزولاسیون، P_t توان ارسالی رادار SAR و P_r توان دریافتی رادار SAR است.

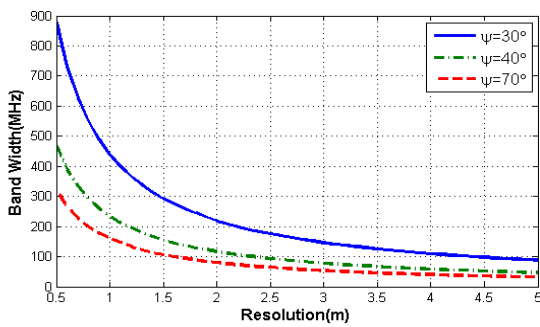
$$Iso = 10 \log \left(\frac{P_t}{P_r} \right) + 15 \text{dB} \quad (۲)$$

تفاوت توان دریافتی و ارسالی بر اساس معادله رادار به‌صورت زیر

³ Resolution

¹ Incident Angle

² Squint Angle

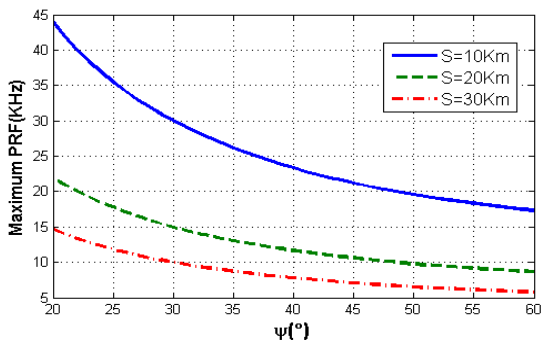


شکل ۵. میزان پهنای باند مورد انتظار

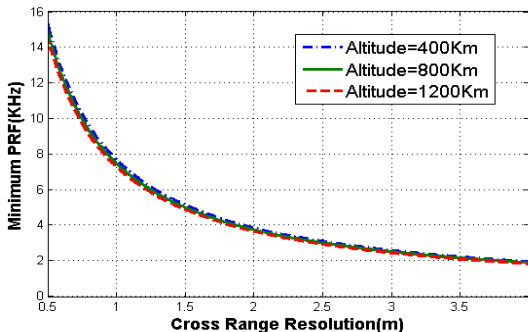
۴-۲. نرخ تکرار پالس رادار SAR فضاپایه

محدوده مجاز برای نرخ تکرار پالس ماهواره‌های SAR فضا پایه از رابطه (۷) به دست می‌آید [۱۸]. در این رابطه S عرض ناحیه تصویربرداری است. با مقدارگذاری این رابطه دو شکل ۶ و ۷ حاصل می‌شود که حد بالا و پایین f_R برای رادار SAR را به ترتیب برای مقادیر مختلف S و مقادیر مختلف حدتفکیک نشان می‌دهد.

$$\frac{v}{\delta_{cr}} \leq f_R \leq \frac{c}{2S \sin(\psi)} \quad (7)$$



شکل ۶. بیشینه PRF



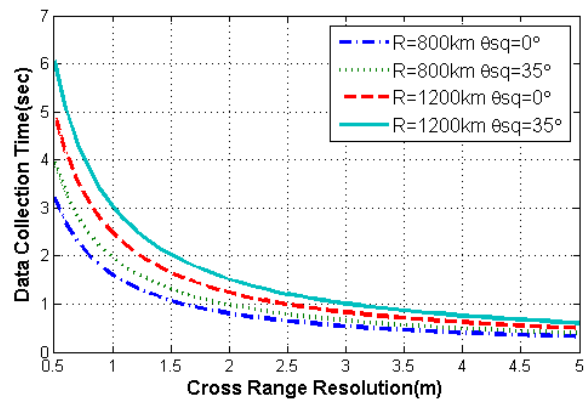
شکل ۷. کمینه PRF

برای برخی از ماهواره‌های SAR مقدار PRF در منابع آشکار مشخص است. به‌طور مثال محدوده PRF برای مجموعه ماهواره‌های COSMO-SkyMed برابر ۳/۱۴ KHz تا ۴/۱۱ KHz اعلام شده

قرارگیری پهنای پرتو ۳ dB رادار SAR روی یک هدف (t) را محاسبه نمود. با محاسبه رابطه (۵) حد پایینی برای زمان دوام سیگنال SAR ارائه خواهد شد. از این جهت واژه حد پایینی استفاده می‌شود که با احتساب احتمال دریافت از گلب‌رگ‌های فرعی رادار SAR، زمان اخذ سیگنال افزایش می‌یابد. در این رابطه v سرعت سکو و δ_{cr} حدتفکیک در راستای سمت است. پارامترهای R و θ_{sq} نیز در شکل ۲ معرفی شده است.

$$t = \frac{R\lambda}{2v\delta_{cr}\cos(\theta_{sq})} \quad (8)$$

زمان قرارگیری پهنای پرتو ۳dB رادار SAR به‌صورت شکل ۴ شبیه‌سازی شده است.



شکل ۴. زمان داده برداری برای SAR فضاپایه در طول موج ۳cm

همانطور که در شکل فوق مشاهده می‌شود، زمان دوام برای ماهواره‌ای با طول موج ۳cm، فاصله ۹۰۰Km، زاویه تابش ۴۵ درجه و زاویه لوجی صفر، ۱ تا ۵ ثانیه خواهد بود. قابل ذکر است با داشتن ارتفاع ماهواره سرعت آن قابل محاسبه است چراکه سرعت حرکت ماهواره تابعی از ارتفاع آن است [۱۹].

۳-۲. پهنای باند رادار SAR فضاپایه

رابطه حد تفکیک رادار SAR در راستای برد براساس رابطه (۶) به دست می‌آید [۱۴]. در این رابطه c سرعت نور، Bw پهنای باند سیگنال و δ_g حد تفکیک در راستای برد است. از آنجا که رادارهای SAR حد تفکیک بالایی دارند، بنابراین ماهواره SAR نمی‌تواند، پهنای باند کمی داشته باشد. شکل ۵ پهنای باند مورد نیاز برای رسیدن به حد تفکیک ۱ تا ۳ متر را به ازای زوایای تابش مختلف نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ملاحظه می‌شود به عنوان مثال برای رسیدن به حد تفکیک ۱ متر در زاویه تابش ۲۰ درجه به پهنای باند بزرگتر از ۴۰۰MHz نیاز است.

$$\delta_g \cong \frac{c}{2 \times Bw \times \sin(\psi)} \quad (9)$$

این میزان تفاوت با توجه به محدوده دینامیک^۱ گیرنده‌ها قابل اغماض است.

۳. مروری بر گیرنده ساخته شده

همان‌طور که در بخش ۲-۳ نشان داده شد با توجه به حد تفکیک‌های مورد نیاز در تصویربرداری SAR، پهنای باند سیگنال ارسالی از ماهواره زیاد خواهد بود و دریافت و پردازش بلادرنگ چنین سیگنالی که عمدتاً به منظور استخراج پارامترهای موثر در اعلام هشدار سریع حضور سیگنال SAR انجام می‌شود، نیازمند طراحی و ساخت گیرنده پیچیده‌ای خواهد بود. این پیچیدگی طبعاً به سبب وجود پردازش دیجیتال و نمونه‌برداری از سیگنال ارسالی با پهنای باند زیاد است.

گیرنده‌ای که در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است، بر مبنای سیگنال ویدئو SAR به‌جای سیگنال اصلی، طراحی و ساخته شده و به همین دلیل پیچیدگی نمونه‌برداری با نرخ‌های بالا را ندارد. هر چند مبنای این گیرنده سیگنال ویدئو است، اما این گیرنده قادر است علاوه بر استخراج پارامترهای مهم زمانی و فرکانسی مورد نیاز، مدولاسیون فرکانسی خطی^۲ را از سایر مدولاسیون‌ها تفکیک نماید.

۳-۱. بررسی ساختار گیرنده

بلوک دیاگرام گیرنده ساخته شده مطابق با شکل ۹ است. در شکل ۱۰ و ۱۱ نیز گیرنده ساخته شده، نمایش داده شده است. استخراج سیگنال ویدئو با استفاده از آشکارساز پوش و نمونه‌برداری از سیگنال پوش (به‌جای نمونه‌برداری از سیگنال اصلی) و تخمین پارامترهای زمانی از روی سیگنال پوش، در پروژه کالیبراسیون رادارهای TerraSAR-X [۲] و COSMO-SkyMed [۸]، همین‌طور رادار دوپایه Pamir [۱۲] به وضوح اشاره شده است. در نتیجه استخراج سیگنال ویدئو و نمونه‌برداری از آن، پرتکرارترین ساختاری بوده که در منابع آشکار برای دریافت سیگنال SAR فضاپایه مشاهده شده است. در اینجا نیز این نوع گیرنده با استفاده از تقویت‌کننده لگاریتمی آشکارساز ویدئو^۳ و نوسان‌نگار^۴ پیاده شده است. اما این گیرنده به تنهایی نمی‌تواند نیازهای کاربردی جنگ الکترونیک را به‌صورت کامل فراهم سازد، چراکه هیچ تفسیری از پارامترهای فرکانسی

[۲۰] و یا برای ماهواره TerraSAR-X برابر با ۳ KHz تا ۶/۵KHz بیان شده [۲۱] که مشاهده می‌شود اعداد به‌دست‌آمده در محدوده اعلام شده قرار می‌گیرد.

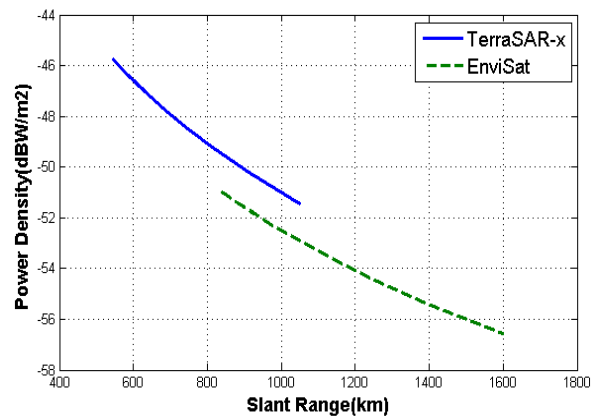
۲-۵. چگالی توان سیگنال دریافتی از ماهواره

اگر چگالی توان دریافتی در سطح زمین مشخص باشد، می‌توان بهره‌آنتن مناسب را به‌گونه‌ای انتخاب کرد که سیگنال به‌نویز مناسب برای آشکارسازی پارامترهای سیگنال SAR ایجاد شود و همین‌طور می‌توان حساسیت مورد نیاز گیرنده را نیز تعیین کرد [۳۲ - ۲۲].

چگالی توان دریافتی از رابطه (۸) محاسبه می‌شود. در این رابطه P_t توان ارسالی رادار SAR، G بهره‌آنتن رادار SAR و R فاصله گیرنده تا ماهواره است. همچنین P_d چگالی توان دریافتی در گیرنده زمینی می‌باشد.

$$P_d = \frac{P_t G}{4\pi R^2} \quad (8)$$

میزان چگالی توان برای دو ماهواره با مشخصات سنجنده‌ای متفاوت در شکل ۸ ترسیم شده است.



شکل ۸. چگالی توان دریافتی از ماهواره TerraSAR-X و EnviSat

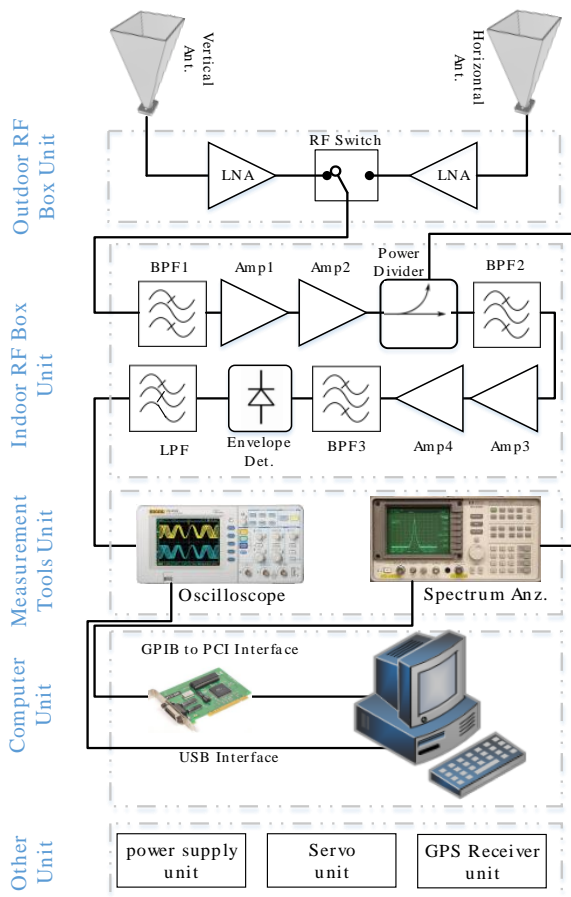
یکی از این دو ماهواره TerraSAR-X است که در ارتفاع ۵۱۴km و با محدوده زاویه تابش ۱۵ تا ۶۰ درجه می‌باشد. همچنین ماکزیمم توان ارسالی این سنجنده برابر ۲۲۶۰ watt، ابعاد آنتن برابر با $۹/۶۵\text{GHz}$ و فرکانس تصویربرداری $۰/۷۰۴\text{m} \times ۴/۷۸۴\text{m}$ می‌باشد [۲۱]. ماهواره دیگر EnviSat است که در ارتفاع ۸۰۰ km و با محدوده زاویه تابش ۱۵ تا ۴۵ درجه می‌باشد، از طرفی توان ارسالی برابر ۱۳۶۵ watt، ابعاد آنتن برابر با $۱/۳\text{m} \times ۱۰\text{m}$ و فرکانس تصویربرداری $۵/۳۳۱\text{GHz}$ است [۲۴]. مشاهده می‌شود که علی‌رغم تفاوت‌های بین سنجنده‌های این دو ماهواره تنها ۵dB تفاوت توان بین بیشینه چگالی توان آنها دیده می‌شود که

¹ Dynamic range

² Linear Frequency Modulation (LFM)

³ Detector Logarithmic Video Amplifiers (DLVA)

⁴ Oscilloscope



شکل ۹. بلوک دیاگرام گیرنده ساخته شده

همچنین در این گیرنده این امکان دیده شده که نتایج دستگاه اندازه‌گیری در رایانه ذخیره شود. انتقال نتایج نوسان‌نگار بوسیله واسط USB و انتقال نتایج تحلیل‌گر طیف به‌وسیله واسط GPIB^۶ به PCI ممکن شد.

بر خلاف ماهواره‌ها، هواپیماها امکان پرواز در ارتفاعات و سرعت‌های مختلف را دارند، همین‌طور می‌توانند در هر مسیر دلخواه مانور دهند. اما ماهواره‌ها در مدارات مشخصی حرکت می‌کنند، مداری که ماهواره در آن قرار دارد سرعت، ارتفاع و راستای حرکت را تحمیل می‌نماید. از طرفی ماهواره‌ها به ندرت مدار خود را تغییر می‌دهند. بنابراین با داشتن اطلاعات مداری، محل ماهواره‌ها کاملاً قابل پیش‌بینی بوده و با استفاده از اطلاعات پیش‌بینی مداری، سرومکانیزم امکان نشان‌دهی به سمت ماهواره را دارد. از طرفی دیگر یک پیش‌بینی صحیح از مسیر حرکت ماهواره تنها زمانی صورت می‌پذیرد که ساعت رایانه با ساعت هماهنگ جهانی^۷ با دقت مناسبی هم‌زمان شده باشد. برای این امر یک گیرنده GPS نیز به کمک این سیستم آمده است.

ایجاد نمی‌نماید. به همین دلیل، تحلیل‌گر طیف^۱ به ساختار گیرنده فوق افزوده شد تا بتواند اطلاعات فرکانسی نظیر پهنای باند و فرکانس مرکزی را نیز اندازه‌گیری نماید.

در شکل ۹ و ۱۱ مشاهده می‌شود که دو آنتن شیپوری^۲ برای قطبش^۳ سیگنالی ارسالی از ماهواره است. بنابراین یک آنتن جهت دریافت سیگنال با قطبش عمودی و آنتن دیگر جهت دریافت سیگنال با قطبش افقی است. در ادامه سیگنال دریافتی از هر دو آنتن با یک تقویت‌کننده نویز پایین^۴ مورد تقویت قرار می‌گیرد. یک سوئیچ فرکانس بالا در انتهای LNA قرار داده شده تا امکان انتخاب هر یک از آنتن‌ها به صورت مجزا فراهم شود.

در جعبه مدارات رادیویی داخلی^۵، سیگنال دریافتی پس از تقویت و فیلتر به دو شاخه تقسیم می‌شود. یک شاخه به سمت تحلیل‌گر طیف می‌رود. ولی شاخه دیگر مجدداً تقویت و فیلتر شده تا نهایتاً وارد DLVA شود. از آنجاکه تحلیل‌گر طیف به نسبت آشکارساز پوش مورد استفاده، دارای حساسیت بالاتری است، به همین دلیل یک بلوک تقویت‌کننده اضافی در مسیر DLVA قرار داده شده است.

گیرنده به‌گونه‌ای ساخته شده است که تحلیل‌گر طیف نسبت به تحلیل‌گر زمانی دارای محدوده فرکانسی وسیع‌تری باشد. بنابراین فیلتر BPF2 قرار داده شده تا از محدوده طیفی ورودی به DLVA از طرفی دیگر با توجه به این‌که DLVA مورد استفاده دارای محدوده طیفی وسیعی است، این احتمال وجود داشت تا سیگنال زائد خارج از باند تولیدشده توسط دو تقویت‌کننده AMP3 و AMP4 باعث کاهش حساسیت آشکارساز پوش شود، بنابراین فیلتر BPF3 برای حذف این دسته از سیگنال‌ها قرار داده شد. در انتهای این بخش نیز یک فیلتر پایین‌گذر برای کاهش نویز سیگنال ویدئو قرار داده شده است.

همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، گیرنده مورد استفاده در این مقاله، متشکل از دو دستگاه اندازه‌گیری است. بسیاری از دستگاه‌های اندازه‌گیری دارای قابلیت نمایش پارامترها هستند. در نتیجه برای مشاهده عرض پالس و نرخ تکرار پالس می‌بایست، گزینه مربوطه را در دستگاه نوسان‌نگار فعال کرد. همچنین برای مشاهده توان سیگنال، پهنای باند و فرکانس مرکزی می‌بایست گزینه مربوط به اندازه‌گیری در تحلیل‌گر طیف فعال شود.

¹ Spectrum Analyzer

² Horn Antenna

³ Polarization

⁴ Low Noise Amplifier (LNA)

⁵ Indoor RF Box

⁶ General Purpose Interface Bus (GPIB)

⁷ Coordinated Universal Time

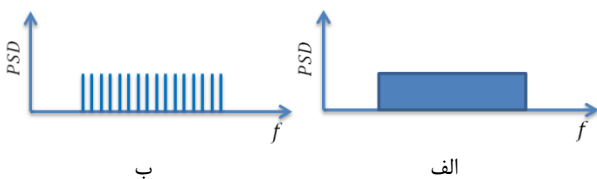
آن گیرنده هشدار سریع گفته شود. همچنین میزان زمان جاروب^۲ (SWP) در تحلیل گر طیف می‌بایست با توجه به زمان دوام سیگنال تعیین شود. در انتهای هر جاروب گیرنده هشدار سریع می‌تواند در رابطه با وجود سیگنال SAR اظهار نظر کند. در نتیجه هرچه SWP کوچکتر انتخاب شود، آن‌گاه عکس‌العمل سریع‌تری از تحلیل گر طیف شاهد خواهیم بود.

پهنای باند سیگنال که در بخش ۲-۳ به دست آمده، تعیین کننده میزان پهنای باند فیلتر و محدوده طیفی^۳ (SPAN) تحلیل گر طیف است. مقداری که برای SPAN تحلیل گر طیف انتخاب می‌شود، نباید کوچک‌تر از میزان پهنای باند سیگنال SAR باشد. مقدار پهنای باند فیلتر تفکیک‌پذیری^۴ (RBW) که در تحلیل گر طیف قرار دارد نیز تعیین کننده خطای تخمین پهنای باند و فرکانس مرکزی سیگنال SAR است.

با توجه به ماهیت پالسی سیگنال SAR فضاپایه می‌بایست سه پارامتر RBW، SPAN و SWP به گونه‌ای انتخاب شوند که در هر توقف فیلتر RBW در بازه SPAN یک پالس از سیگنال SAR دریافت شود. اگر این نامساوی برقرار نباشد، شکل طیف به صورت چند ضربه متوالی خواهد شد، هرچه از برقراری این نامساوی فاصله بگیریم، آن‌گاه فاصله ضربه‌ها نیز بیشتر خواهد شد.

$$\frac{1}{PRF} \leq \frac{RBW}{SPAN} \times SWP \quad (10)$$

شکل ۱۲- الف حالتی را نمایش می‌دهد که نامساوی فوق برقرار است و شکل ۱۲- ب حالتی را نشان می‌دهد که نامساوی برقرار نیست.



شکل ۱۲. الف) نامساوی برقرار است. ب) نامساوی برقرار نیست.

اگر بخواهیم بازه‌ی طیفی پایش سیگنال وسیع باشد (SPAN بزرگ باشد) آن‌گاه یا باید به مقدار RBW افزود و یا به مقدار SWP، که هیچ یک از این دو حالت مطلوب نخواهد بود. در مورد اول دقت اندازه‌گیری کاهش می‌یابد و در حالت دوم سرعت عمل گیرنده کاسته خواهد شد. از آنجا که باند کاری رادار SAR مستقر در ماهواره مشخص است پس می‌توان محدوده SPAN را متناسب با باند کاری ماهواره انتخاب کرد.



شکل ۱۰. رک مربوط به گیرنده ساخته شده

۲-۳. نحوه انتخاب مقادیر در دستگاه‌های اندازه‌گیری

این گیرنده شامل دو دستگاه اندازه‌گیری است که انتخاب مقادیر مناسب برای این دستگاه‌ها، احتمال یک پایش موفق سیگنال را افزایش می‌دهد. در این بخش به نحوه انتخاب این مقادیر خواهیم پرداخت.

در بخش ۲ اثبات شد که سیگنال SAR فضاپایه می‌بایست به صورت پالسی باشد، در نتیجه ساختار آشکارساز پوش و نوسان‌نگار می‌تواند جهت استخراج عرض پالس و نرخ تکرار پالس کارآمد باشد. در این ساختار خطای اندازه‌گیری نیز وابسته به زمان خیزش و فرود^۱ آشکارساز پوش و نرخ نمونه‌برداری نوسان‌نگار است.

محدوده تغییرات نرخ تکرار پالس در بخش ۲-۴ توصیف شد که از روی این مقادیر می‌توان مقدار مناسب برای تنظیمات زمانی Time/Div نوسان‌نگار را یافت. پیشنهاد می‌شود Time/Div براساس نامساوی زیر انتخاب شود.

$$5 \times \text{Time/Div} < \frac{1}{f_R} < 10 \times \text{Time/Div} \quad (9)$$

با استفاده از منحنی ولتاژ- توان آشکارساز پوش، می‌توان Volt/Div نوسان‌نگار را یافت. با تنظیم دو پارامتر Time/Div و Volt/Div، نوسان‌نگار قابل استفاده خواهد بود. اما تنظیمات تحلیل گر طیف کمی پیچیده‌تر و به شرح زیر است.

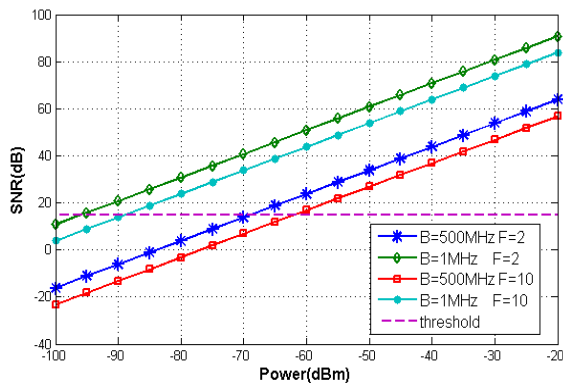
زمان دوام سیگنال در پهنای پرتو ۳dB در بخش ۲-۲ توصیف شده است. زمانی که گیرنده نیاز دارد تا حضور سیگنال را تعیین کند می‌بایست کوچکتر از زمان دوام سیگنال باشد تا به

² Sweep Time (SWP)

³ Span

⁴ Resolution Bandwidth (RBW)

¹ Rise/Fall Time



شکل ۱۴. مقدار سیگنال به نویز

در شکل ۱۴، میزان SNR از سیگنال دریافتی از ماهواره TerraSAR-x در خروجی آنتن گیرنده ترسیم شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که چه توان سیگنالی در خروجی آنتن منجر به ایجاد نسبت سیگنال به نویز مناسب برای آشکارسازی خواهد شد. حداقل SNR کافی برای آشکارسازی برابر ۱۵ dB فرض شده است که در شکل ۱۴ به صورت خط چین نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که برای بسیاری از توان‌ها SNR کافی وجود خواهد داشت. در شکل ۱۴، پهنای باند ۵۰۰ MHz (فیلتر میان‌گذر BPF2 در شکل ۹) به عنوان تنها فیلتر در ورودی آشکارساز زمانی فرض شده است. پهنای باند ۱ MHz نیز به‌ازای فیلتر RBW داخل دستگاه اندازه‌گیری تحلیل‌گر طیف در آشکارساز فرکانسی در نظر گرفته شده است.

۴. بررسی و تحلیل نتایج عملی

در این بخش ضمن ارائه نتایج عملی حاصل از دریافت سیگنال از برخی از ماهواره‌های SAR، تحلیلی بر نتایج به‌دست آمده از گیرنده ارائه می‌شود.

۱-۴. تشریح یک پایش انجام‌شده از ماهواره COSMO-SkyMed

دریافت‌های موفق از سومین ماهواره از مجموعه ماهواره COSMO-SkyMed در این بخش مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. شکل ۱۵ موقعیت نسبی ماهواره در زمان تصویربرداری را نشان می‌دهد. زمان دقیق روشن شدن رادار ۱۴:۲۰:۴۵ (UTC) و زمان خاموش شدن رادار ۱۴:۲۰:۵۲ (UTC) می‌باشد. این رادار مجموعاً ۷ ثانیه روشن بوده است.

۳.۳. نحوه انتخاب بهره آنتن و بهره مدارت الکترونیکی

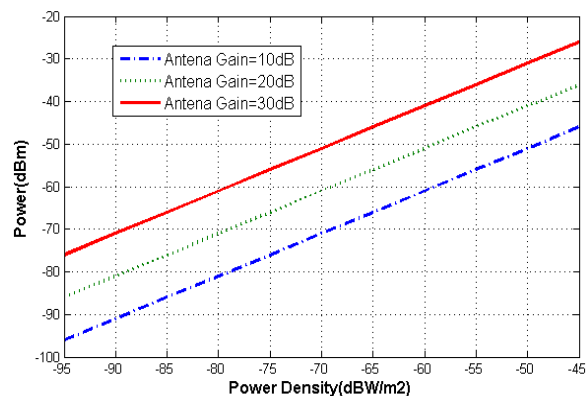
در بخش ۵.۲ مواردی در رابطه با چگالی توان دریافتی از ماهواره SAR بیان شد. توان دریافتی از ماهواره و میزان سیگنال به نویز با استفاده از چگالی توان، مطابق با رابطه (۱۱ و ۱۲) قابل محاسبه است. در این رابطه‌ها A_e مقدار سطح مقطع موثر آنتن و \bar{G}_r بهره آنتن گیرنده زمینی است. همچنین B و T به ترتیب پهنای باند موثر نویز و دمای معادل درگیرنده است.

$$P_r = P_d A_e = \frac{P_d \bar{G}_r \lambda^2}{4\pi} \quad (11)$$

$$SNR = \frac{P_r}{kTFB} \quad (12)$$

چگالی توان به‌دست‌آمده در شکل ۸ برای حالتی است که گلبرگ اصلی آنتن رادار SAR روی گیرنده باشد و اگر دریافت از گلبرگ فرعی باشد، آن‌گاه چگالی توان دریافتی کوچکتر از این مقادیر خواهد بود. بنابراین محدوده P_d دریافتی از رادار TerraSAR-x برابر -45 dBW/m^2 تا -95 dBW/m^2 در نظر گرفته شده تا گیرنده بتواند از برخی از گلبرگ‌های فرعی آنتن SAR نیز دریافت کند.

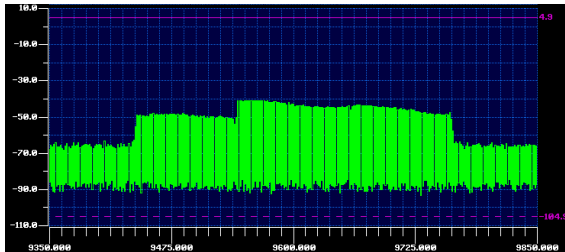
در شکل ۱۳، توان دریافتی در خروجی آنتن گیرنده ترسیم شده است. بهره تقویت‌کننده‌ها در شکل ۹، می‌بایست به‌گونه‌ای انتخاب شود تا بیشینه مقدار سیگنال در شکل ۱۳، در نقطه P1dB قطع DLVA و یا دستگاه تحلیل‌گر طیف باشد.



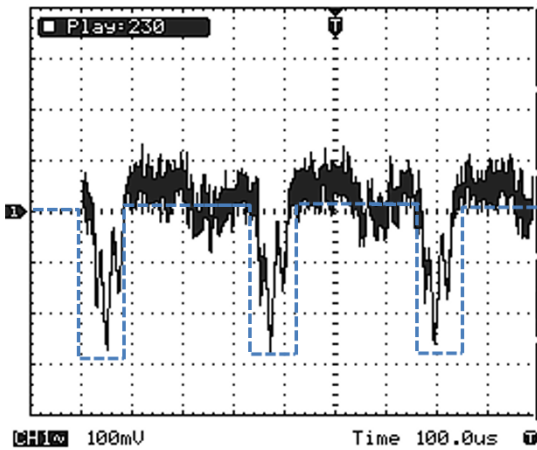
شکل ۱۳. توان سیگنال در خروجی آنتن گیرنده زمینی.

همان‌طور که در شکل ۱۳ دیده می‌شود، با افزایش بهره آنتن گیرنده زمینی، توان سیگنال دریافتی افزایش می‌یابد. از آنجا که با افزایش بهره آنتن، میزان پهنای پرتو آن کاهش می‌یابد. بنابراین تنها تا مادامی که مجاز به افزایش بهره آنتن گیرنده هستیم که پهنای پرتو ۳dB آنتن از دقت زاویه‌ای سامانه رهگیری کوچک‌تر نگردد.

ترتیب برابر ۳۲۳ MHz و ۹/۶ GHz می‌باشد. نمایش زمانی سیگنال دریافت شده روی نوسان‌نگار در شکل ۱۷ درج شده است. از آنجا که پالس‌های خروجی از آشکارساز پوش به صورت معکوس است، نمایشی که در نمایشگر نوسان‌نگار دیده می‌شود نیز به صورت معکوس است. طبق این شکل عرض پالس حدود ۷۰ میکرو ثانیه و PRF حدود ۳/۱ kHz است.

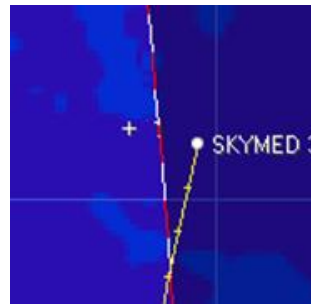


شکل ۱۶. نمایش طیفی



شکل ۱۷. نمایش زمانی

شناسایی قطعی بعد از اتمام دریافت انجام خواهد شد، با اتمام دریافت می‌توان شکل الگوی آنتن رادار SAR را ترسیم کرد و همچنین در رابطه با ثابت بودن یا تغییرات PRF و یا سایر پارامترها اظهار نظر کرد. با مشاهده الگوی آنتن، تعیین می‌شود که دریافت از گلبرگ اصلی آنتن ماهواره بوده یا از گلبرگ فرعی. در صورتی که دریافت از گلبرگ اصلی آنتن باشد، نتیجه می‌گیریم که محل استقرار گیرنده زمینی، بخشی از منطقه تصویربرداری شده توسط ماهواره بوده است. در صورتی که گیرنده از گلبرگ فرعی آنتن ماهواره سیگنال دریافت نماید، نتیجه می‌گیریم که ماهواره SAR از منطقه دیگری تصویربرداری کرده و گیرنده، سیگنال را از گلبرگ‌های فرعی آنتن ماهواره دریافت کرده است. اگر گیرنده در منطقه تصویربرداری شده توسط ماهواره SAR واقع شده باشد، آنگاه فاصله ماهواره تا محل تصویربرداری و زاویه تابش ماهواره با استفاده از نرم‌افزار پیش‌بینی قابل اندازه‌گیری است. اما اگر گیرنده در منطقه تصویربرداری شده توسط ماهواره نباشد، اطلاعاتی که نرم‌افزار پیش‌بینی به عنوان فاصله گیرنده تا



Lon	58.1928° E
Lat	34.5508° N
Alt (km)	626.833
Azm	100.6°
Elv	41.3°
RA	08h 21m 34s
Decl	15° 52' 23"
Range (km)	898.548
RRt (km/s)	0.148
Vel (km/s)	7.549
Direction	Descending

شکل ۱۵. مکان و پارامترهای ماهواره COSMO-SkyMed 3 در لحظه تصویربرداری

گیرنده بررسی شده در بخش ۳ با دو قابلیت الف- تشخیص سیگنال SAR از سایر سیگنال‌ها، ب- تخمین پارامترهای سیگنال دریافتی، طراحی شده است. در قابلیت اول هدف، ساخت یک گیرنده هشدار سریع به منظور اطلاع از زمان تصویربرداری ماهواره SAR است که از این قابلیت می‌توان به "شناسایی اولیه" رسید و در قابلیت دوم تجزیه و تحلیل دقیق‌تری از سیگنال دریافتی ارائه می‌شود که به آن "شناسایی قطعی" سیگنال دریافتی اطلاق می‌شود.

اهمیت گیرنده هشدار سریع در هنگام استفاده از اخلاک‌گراست. گیرنده هشدار سریع می‌تواند سیگنال SAR احتمالی را شناسایی کند و پارامترهای مورد نیاز یک اخلاک‌گر زمینی نظیر پهنای باند و فرکانس مرکزی سیگنال را به اخلاک‌گر اعلام نماید. شناسایی قطعی بعد از اتمام دریافت سیگنال از ماهواره انجام خواهد شد که SAR بودن سیگنال دریافتی را به صورت قطعی رد و یا تایید می‌کند. این گیرنده همچنین پارامترهای بیشتری از سیگنال SAR تخمین می‌زند که منجر به کشف حالت تصویربرداری و حد تفکیک تصویربرداری ماهواره نیز خواهد شد.

به‌عنوان مثال در انتهای هر جاروب، تحلیل‌گر طیف می‌بایست پهنای باند و فرکانس مرکزی را اندازه‌گیری کند. همین‌طور در زمان کوچک‌تری نسبت به زمان جاروب در بخش تحلیل‌گر فرکانسی، قادر به تعیین عرض پالس و PRF سیگنال دریافتی در بخش تحلیل‌گر زمانی خواهیم بود. همچنین به‌وسیله تحلیل‌گر طیف، قادر به تخمین توان دریافتی در هر فرکانس و با استفاده از نمایش سیگنال در نوسان‌نگار، قادر به تخمین توان هر پالس هستیم. اگر گیرنده در سناریوی هشدار سریع به کار گرفته شود، آن‌گاه از این اطلاعات می‌بایست برای تشخیص SAR بودن یا نبودن سیگنال استفاده کرد. از اطلاعاتی که در بخش قبل برای ویژگی‌های سیگنال SAR بیان شد، می‌توان به‌عنوان معیاری برای اعلام هشدار سریع بهره برد. نمایش طیفی برای این دریافت در شکل ۱۶ درج شده است. پهنای باند و فرکانس مرکزی به

(۲) این سیگنال تنها در زمان و زاویه‌ای وجود داشت که توسط نرم‌افزار پیش‌بینی شده بود و این سیگنال در سایر زمان‌ها و سایر زاویه‌ها مشاهده نشد.

جدول ۱. مقایسه مقادیر تخمین زده شده با منابع آشکار

مقدار تخمین زده شده	محدوده اعلام شده توسط سازندگان برای مد نقطه‌ای [۲۰]	
۳/۱	۴/۱۱ تا ۳/۱۴	نرخ تکرار پالس (KHz)
۷۰	۸۰ تا ۷۰	عرض پالس (μs)
۳۲۳	۴۰۰ تا ۱۸۵	پهنای باند پالس (MHz)

۲-۴. تشخیص سیگنال LFM از سایر سیگنال‌ها

این گیرنده به علت این که پوش سیگنال را استخراج می‌کند، قادر به استخراج اطلاعات درون پالسی سیگنال نظیر نوع مدولاسیون آن نیست. در این بخش روشی ارائه می‌شود که با گیرنده موجود، مدولاسیون LFM را از سایر مدولاسیون‌ها تشخیص داد و در رابطه با تغییر شیب LFM از هر پالس به پالس دیگر بتوان اظهار نظر کرد.

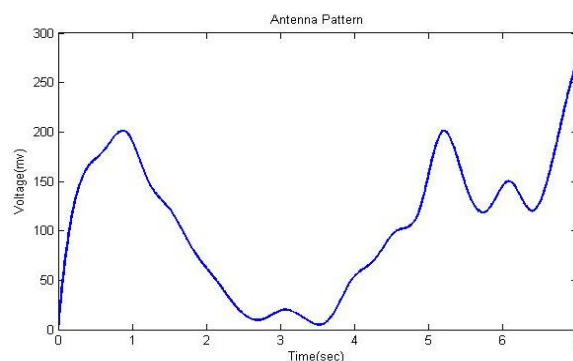
در پیوست ۱ بیان می‌شود که الگوی آنتن تابعی از فرکانس است. طراح آنتن SAR به گونه‌ای عمل می‌کند که شکل الگوی آنتن در گلبیگ اصلی در تمام طیف فرکانس کاری تغییر نکند اما ممکن است، تفاوت‌هایی در محل و شکل گلبیگ‌های فرعی در نقاط مختلف طیف ایجاد شود. در نتیجه روی پالس‌های مشاهده شده در نوسان‌نگار و طیف مشاهده شده در تحلیل‌گر طیف اعوجاج‌هایی دیده می‌شود که ناشی از تاثیر الگوی آنتن بر روی سیگنال است. بنابراین با مقایسه اعوجاج‌های موجود روی پالس و طیف سیگنال، می‌توان نتایج زیر را از سیگنال استخراج نمود:

- اگر شکل مدولاسیون آنتن مشاهده شده روی پالس و طیف دقیقاً یکسان باشد می‌توان نتیجه گرفت که سیگنال LFM با شیب مثبت است.
- اگر شکل مدولاسیون آنتن مشاهده شده روی پالس و طیف یکسان اما قرینه یکدیگر باشند آنگاه سیگنال LFM با شیب منفی است.
- اگر پالس به پالس شکل مدولاسیون آنتن روی پالس زمانی تغییر کند در حالی که هنوز هیچ تغییری در شکل مدولاسیون آنتن روی طیف ایجاد نشده است، در این حالت می‌توان حدس زد که مدولاسیون درون پالسی در هر پالس دچار تغییر می‌شود.

ماهواره و زاویه نشان‌ده‌روی می‌دهد به معنای زوایا و فاصله تصویربرداری نخواهد بود. از روی روابط ۵ و ۶ قادر به تخمین حد تفکیک در راستای سمت و برد خواهیم بود. زمان t مدت زمانی است که گیرنده در پهنای پرتو 3dB آنتن ماهواره قرار دارد. با توجه به پیش‌بینی مسیر حرکت ماهواره می‌توان فاصله هدف تا ماهواره و زوایای تصویربرداری مانند (ψ, θ_{sq}) را تعیین نمود. سرعت ماهواره براساس نرم‌افزار پیش‌بینی به‌دست خواهد آمد. همچنین گیرنده پیشنهادی قادر است تا پهنای باند و طول موج را تعیین کند.

با توجه به وجود پردازش چندمنظره^۱ در تصاویر SAR اگر حد تفکیک سمت از حد تفکیک برد کمی بیشتر شود می‌توان نتیجه گرفت که سیگنال دریافتی متعلق به رادار SAR است.

تغییرات توان پالس‌ها روی نمایشگر نوسان‌نگار به صورت شکل ۱۸ به‌دست آمده است. مشاهده می‌شود که گلبیگ اصلی آنتن در نمایش الگوی آنتن دیده نمی‌شود. در نتیجه گیرنده در این تصویربرداری خارج از ناحیه تصویربرداری بوده است. بنابراین نمی‌توان زاویه تابش و فاصله سکو تا منطقه تصویربرداری را تعیین کرد در نتیجه امکان تعیین حد تفکیک تصویربرداری وجود ندارد.

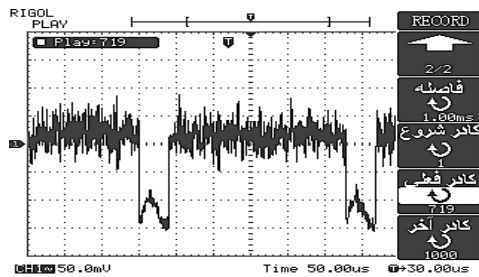


شکل ۱۸. الگوی آنتن استخراجی از سیگنال دریافتی.

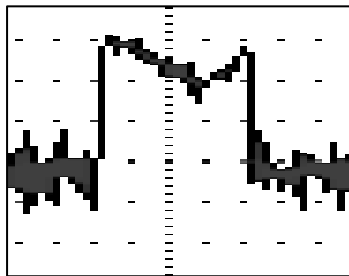
با توجه به دسترسی به مشخصات سنجنده این ماهواره در منابع آشکار، بنابراین یک راه دیگر جهت ارزیابی صحت دریافت انجام شده، مقایسه با منابع آشکار است. بنابراین این پایش قطعاً متعلق به رادار ماهواره COSMO-SkyMed است، چرا که:

(۱) پارامترهای تخمین زده شده از این تصویربرداری و اطلاعات درج شده از این ماهواره در مرجع [۲۰] نشان می‌دهد، این تصویربرداری با مد تابش نقطه‌ای منطبق است. مقایسه بین مقادیر تخمین زده شده و منابع آشکار در جدول ۱ درج شده است.

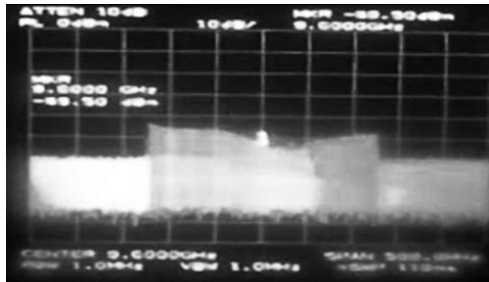
^۱ Multi-look



(الف)



(ب)



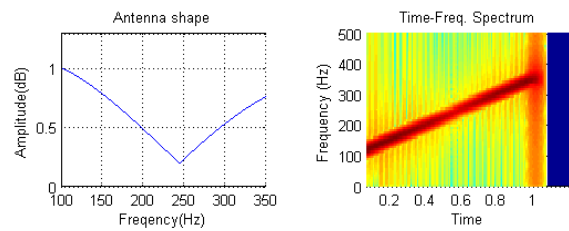
(ج)

شکل ۲۰. الف) تاثیر الگوی آنتن روی پوش پالس سیگنال دریافتی، ب) بزرگ‌نمایی روی شکل یکی از پالس‌ها، ج) تاثیر الگوی آنتن روی طیف سیگنال دریافتی.

۳-۴. پایش سیگنال SAR از سایر ماهواره‌ها

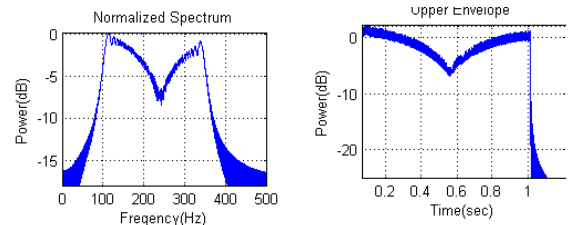
آنچه که در بخش‌های ۵.۱ و ۵.۲ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت، همگی متعلق به سیگنال دریافتی از ماهواره‌های ایتالیایی COSMO-SkyMed بود. در شکل ۲۱ سیگنال دریافتی از ماهواره آمریکایی FIA-Radar2 درج شده است. مشاهده می‌شود که پهنای باند سیگنال دریافتی برابر با ۱۵۰ MHz و فرکانس مرکزی برابر ۹/۶۵ GHz استخراج شده، ضمن آن‌که یک سیگنال رادار زمینی در فرکانس ۹/۳۷ GHz نیز در طیف مشاهده می‌شود که کاملاً قابل مقایسه و تفکیک با سیگنال دریافتی از ماهواره SAR است.

نتیجه یک شبیه‌سازی در شکل ۱۹ رسم شده است. در این شکل طیف فرکانسی، شکل پوش و نمایش زمان-فرکانس یک سیگنال LFM برحسب یک مدولاسیون آنتن فرضی نشان داده شده است. در این شبیه‌سازی یک سیگنال LFM ساخته شده و بعد از اعمال اثر آنتن روی آن شکل طیف و پوش سیگنال استخراج شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود شکل اعوجاج روی پوش پالس و طیف بسیار مشابه است که این موضوع LFM بودن سیگنال را نتیجه می‌دهد.



(ب)

(الف)



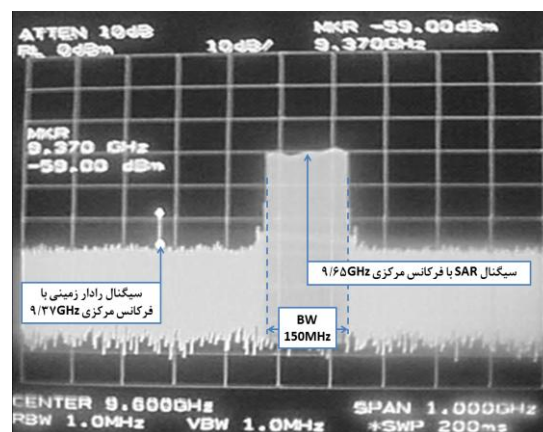
(د)

(ج)

شکل ۱۹. الف) نمایش زمان فرکانس یک پالس LFM، ب) پاسخ فرکانسی آنتن فرضی برحسب تغییرات فرکانس، ج) پوش پالس سیگنال LFM، د) طیف سیگنال LFM

در این بخش، دریافت‌هایی از اولین ماهواره از مجموعه ماهواره‌های COSMO-SkyMed بررسی شده است. نمایش سیگنال دریافت شده روی نوسان‌نگار در شکل ۲۰-الف درج شده است. همان‌طور که گفته شد، به علت ساختار آشکارساز پوش، نمایشی که در نمایشگر نوسان‌نگار نیز دیده می‌شود به صورت معکوس است، چراکه با افزایش میزان توان سیگنال ورودی، ولتاژ خروجی آشکارساز پوش کاهش می‌یابد. در شکل ۲۰-ب یک پالس از دو پالس موجود در شکل ۲۰-الف، با بزرگ‌نمایی و به‌طور معکوس درج شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، اعوجاج تقریباً یکسانی از آنتن، روی شکل پوش پالس ۲۰-ب و طیف سیگنال دریافتی ۲۰-ج وجود دارد. در نتیجه می‌توان گفت که این سیگنال LFM است.

- Model Verification," In Proc. of the int. Europ. Conf. on Synthetic Aperture Radar, pp. 1-4, 2008.
- [6] M. Schwerdt and J. H. Gonzalez, "Monostatic Calibration of both TanDEM-X Satellites," In Proc. of the Int. Conf. on Geoscience and Remote Sensing Symposium, pp. 2636-2639, 2010.
- [7] D. J. Park, S. I. Ahn, Y. S. Chun, J. M. Shin, J. C. Yoon, and J. H. Kim, "Development of Active Transponder for KOMPSAT-5 Mission," In Proc. of the Int. Asia-Pacific Conf. on Synthetic Aperture Radar, pp. 1-4, 2011.
- [8] S. Falzini, V. Speziale, and E. D. Viti, "COSMO-SkyMed Active Calibrator: A Sophisticated Tool for SAR Image Calibration," In Proc. of the Int. Conf. Geoscience and Remote Sensing Symposium, pp. 1577-1580, 2007.
- [9] H. J. Kramer, "SAR-Lupe Constellation," <https://directory.eoportal.org>, 2002.
- [10] M. A. Siddique, "Bistatic SAR Data acquisition and Processing Using SABRINA-X with TerraSAR-X as the opportunity transmitter," M. S. Thesis, UPC Univ, Barcelona, 2010.
- [11] S. Reuter, F. Behner, H. Nies, O. Loffeld, D. Matthes, and J. Schiller, "Development and Experiments of a Passive SAR Receiver System in a Bistatic Spaceborne/Stationary Configuration," In Proc. of the Int. Conf. Geoscience and Remote Sensing Symposium, pp. 118-121, 2010.
- [12] I. Walterscheid, T. Espeter, A. R. Brenner, J. Klare, J. H. G. Ender, H. Nies, R. Wang, and O. Loffeld, "Bistatic SAR Experiments With PAMIR and TerraSAR-X Setup, Processing, and Image Results," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 48, no. 8, 2010.
- [13] D. J. Fouts, P. E. Pace, C. Karow, and S. R. T. Ekestorm, "A Single-Chip False Target Radar Image Generator for Countering Wideband Imaging Radars," IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 37, no. 6, pp. 751-759, 2002.
- [14] R. S. Harness and M. C. Budge, "A study on SAR noise jamming and false target insertion," Proc. Int. Conf. on South Eastcon, Lexington, pp. 1-8, 2014.
- [15] B. Zhao, F. Zhou, and Z. Bao, "Deception Jamming for Squint SAR Based on Multiple Receivers," IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 8, no. 8, pp. 3988-3998, 2015.
- [16] F. Zhou, B. Zhao, M. Tao, X. Bai, B. Chen, and G. Sun, "A Large Scene Deceptive Jamming Method for Space-Borne SAR," IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, vol. 51, no. 8, pp. 4486-4495, 2013.
- [17] M. I. Skolnik, "Introduction to Radar Systems," McGraw Hill, pp. 3-4, 2003.
- [18] M. I. Skolnik, "Radar Handbook," McGraw-Hill, Third Edition, pp. 845-846, 2008.
- [19] A. K. Maini and V. Agrawal, "Satellite Technology Principles and Application," John Wiley & Sons, 2007.
- [20] "COSMO-SkyMed System Description & User Guide, Italian Space Agency Cosmo-SkyMed Mission," www.egeos.it,
- [21] W. Keydel and A. Moreira, "TerraSAR-X & TanDEM-X two Innovative Remote Sensing Stars for Space-borne Earth Observation," German Aerospace Research Center, 2006.
- [22] "Satellite and Airborne SAR Sensor Specifications," www.crcsi.com.au, 2012.
- [23] "InSAR Newsletter," www.ricercasit.it, 2007.
- [24] H. J. Kramer, "EnviSat (Environmental Satellite)," 2002, <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/e/envisat>.
- [25] M. Bachmann, M. Schwerdt, and B. Brautigam, "TerraSAR-X Antenna Calibration and Monitoring Based on Precise Antenna Model," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 48, no. 2, pp. 690-701, 2010.
- [26] M. Bachmann, M. Schwerdt, and B. Brautigam, "TerraSAR-X in Orbit Antenna Model Verification Results," In Proc. of the int. Europ. Radar Conf, pp. 9-12, 2007.



شکل ۲۱. سیگنال دریافتی از ماهواره آمریکایی FIA-Radar2

۵. نتیجه گیری

این مقاله، طراحی و ساخت یک گیرنده هشدار سریع زمینی جهت دریافت و پایش سیگنال‌های راداری دریافتی از ماهواره‌های SAR را ارائه می‌دهد. در اینجا علاوه بر معرفی ساختار گیرنده که از دو بخش آشکارساز فرکانسی و آشکارساز زمانی تشکیل شده، توصیفی مناسبی نیز از شکل و ویژگی‌های سیگنال رادار SAR، فضاپایه نظیر پالسی بودن رادار، زمان حضور سیگنال، محدوده نرخ تکرار پالس، پهنای باند و چگالی توان دریافتی از سیگنال ارائه می‌شود. همچنین در این مقاله روش‌هایی برای شناسایی سیگنال SAR از سایر منابع سیگنالی ارائه شده و روش جدیدی نیز برای تشخیص و شناسایی سیگنال LFM از سایر مدولاسیون‌ها پیشنهاد می‌شود. در این مقاله نتایج عملی حاصل از دریافت سیگنال از دو ماهواره SAR مقایسه و راستی آزمایی شده که در تمامی موارد نتایج عملی به دست آمده با نتایج مورد انتظار در تئوری مطابقت دارد. همچنین جهت اثبات انطباق نتایج به دست آمده از پایش سیگنال، مقایسه‌ای نیز با منابع آشکاری که توسط سازندگان ماهواره منتشر شده، انجام گرفته که در اینجا نیز مطابقت کامل مشاهده می‌شود.

۶. مراجع

- [1] "Airbus Defense and Space," <http://terrasar-x-archive.infoterra.de/>, 2014.
- [2] R. Lenz, J. Pontes, and W. Wiesbeck, "A High Accuracy Calibration and Receive Instrument for TerraSAR-X Ground Calibration," In Proc. of the int. Europ. Conf. Microwave, pp. 411-414, 2005.
- [3] B. J. Doring, M. Schwerdt, and R. Bauer, "TerraSAR-X Calibration Ground Equipment," Wave Propagation in Communication, In Proc. of the Int. Conf. on Microwaves Systems and Navigation, 2007.
- [4] M. Schwerdt, B. Brautigam, M. Bachmann, and B. Doring, "TerraSAR-X Calibration - First Results," In Proc. of the Int. Conf. on Geoscience and Remote Sensing Symposium, pp. 3932-3935, 2007.
- [5] M. Bachmann, M. Schwerdt, B. Bräutigam, and B. Döring, "Final Results of the TerraSAR-X In-Orbit Antenna

پیوست ۱:

آنتن‌های نصب شده روی ماهواره از ساختارهای آرایه فازی استفاده می‌کنند، مرجع [۲۵-۲۶] معادله الگوی آنتن را درج کرده است، در این رابطه ε و α زوایای ارتفاع و سمت هستند، تعداد آنتن‌ها در این آرایه N در M است، همچنین Δx و Δy طول و عرض آنتن را بیان می‌کنند. در این رابطه k عدد موج است، عدد موج به صورت $k=2\pi/\lambda$ قابل محاسبه است. همچنین C_{SA} مشخصات تشعشی هر یک از المان‌ها را بیان می‌کند، همچنین E_{SA} ماتریس خطا را بیان می‌کند.

$$\bar{F}_{Beam}(\varepsilon, \alpha) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} (\bar{C}_{SA, mn}(\varepsilon, \alpha) \cdot \alpha_{mn} \cdot E_{SA, mn} \cdot e^{jk \cdot \sin(\varepsilon) \cdot \cos(\alpha) \cdot \left(-\frac{N-1}{2} + n\right) \Delta y} \cdot e^{jk \cdot \cos(\varepsilon) \cdot \sin(\alpha) \cdot \left(-\frac{M-1}{2} + m\right) \Delta x}) \quad (13)$$

عدد موج برای فرکانس ابتدا و انتهای طیف متفاوت است در نتیجه الگوی تشعشی آنتن نیز تابعی از فرکانس خواهد شد.

Monitoring and Analysis of SAR Satellite Signals Using a Ground Early Warning Receiver

M. Ardini, M. Rooeinfar*, R. Ramezani, A. R. Amin

Imam Hossein University

(Received: 16/06/2015, Accepted: 13/03/2016)

Abstract

In this paper, a ground early warning receiver is introduced and explained for the reception and monitoring of signals from a space-borne synthetic aperture radar. This receiver can be used for various electronic warfare applications and implemented in two sectors of time parameter detector and frequency parameter detector. It can measure the signal power, bandwidth, central frequency, pulse width, pulse repetition frequency, antenna pattern shape, and imaging duration time from the received signal. In section of frequency parameter detector, the spectrum analyzer is used. Based on this receiver, a new method is invented for recognizing LFM signal from other pulse compression methods. Also, in this paper, a technique is demonstrated for identifying SAR signals from other signal sources and estimation imaging parameters. At the end of this report, several cases of success in receiving signals from COSMO-SkyMed and FIA-Radar are listed and some of the obtained parameters from signals are compared with the references. Also, features of space-borne SAR signals are described. in which bandwidth, pulse repetition frequency, imaging duration time, and power density are investigated using analytical relations.

Keywords: Monitoring Receiver, Time Detector, Frequency Detector, Synthetic Aperture Radar, Satellite.

* Corresponding author E-mail: mrooein@ihu.ac.ir