دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

بهبود عملکرد تشکیل تصویر و جبران سازی خطای حرکت مبتنی بر روش برد-داپلر در رادارهای روزنه مصنوعی

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق – مخابرات سیستم

احسان راعی دهقی

استاد راهنما:

دکتر سید محمود مدرس هاشمی

بهمن ماه ۱۳۹۲

بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

بهبود عملکرد تشکیل تصویر و جبران سازی خطای حرکت مبتنی بر روش برد-داپلر در رادارهای روزنه مصنوعی

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق – مخابرات سیستم

احسان راعی دهقی

استاد راهنما:

دکتر سید محمود مدرس هاشمی

بهمن ماه ۱۳۹۲

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده برق و کامپیوتر

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق-مخابرات سیستم آقای احسان راعی دهقی تحت عنوان

بهبود عملکرد تشکیل تصویر و جبران سازی خطای حرکت مبتنی بر روش برد-داپلر در رادارهای روزنه مصنوعی

در تاریخ ۱۳۹۲/۱۱/۱ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر سید محمود مدرس هاشمی
۲- استاد داور	دکتر محمد صادق فاضل
۳- استاد داور	دکتر مجتبی بهشتی
۴- سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر محمد علی خسروی فرد

به مصداق «من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق» بسی شایسته است از استاد فرهیخته و فرزانه جناب آقای دکتر سید محمود مدرس هاشمی که با کرامتی چون خورشید، سرزمین دل را روشنی بخشیدند و گلشن سرای علم و دانش را با راهنمایی های کارساز و سازنده بارور ساختند؛ تقدیر و تشکر نمایم.

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نو آوری های ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به همسر عزیزم :

به پاس قدردانی از قلبی آکنده از عشق و معرفت که محیطی سرشار از سلامت و امنیت و آرامش و آسایش برای من فراهم آورده است.

تقدیم با بوسه بر دستان پدرم :

به او که نمی دانم از بزرگی اش بگویم یا مردانگی سخاوت، سکوت، مهربانی و .....

تقدیم به مادر عزیزتر از جانم :

مادرم هستی من ز هستی توست تا هستم و هستی دارمت دوست

فهرست مطالب

چکیده ۱

فصل اول: مقدمه ۲

۱-۱ مفهوم تصویر ۳

۱-۲ ویژگی تصاویر راداری ۳

۱-۳ تاریخچه SAR ۴

۱-۴ هدف و ساختار پایان نامه ۶

فصل دوم: اصول کلی رادارهای روزنه مصنوعی ۸

۲-۱ مقدمه ۸

۲-۲ مودهای تصویر برداری در SAR ۱۰

۲-۲-۱ مود نواری ۱۰

۲-۲-۲ مود اسکن ۱۰

۲-۲-۳ مود تابش نقطه ای ۱۱

۲-۳ سیگنال LFM و خواص آن ۱۱

۲-۳-۱ اصل فاز ایستان ۱۲

۲-۳-۲ طیف سیگنال چیرپ ۱۳

۲-۴ قدرت تفکیک در SAR ۱۴

۲-۵ قدرت تفکیک در راستای برد ۱۶

۲-۵-۱ فیلتر منطبق ۱۷

۲-۵-۲ پردازش انبساطی ۱۹

۲-۶ قدرت تفکیک در راستای سمت ۲۲

۲-۷ ویژگی های سیگنال SAR ۲۴

۲-۷-۱ جمع آوری و ذخیره سازی داده های SAR ۲۵

۲-۷-۲ پدیده مهاجرت سلول برد ۲۶

۲-۷-۳ معادله برد ۲۷

۲-۷-۴ ویژگی های سیگنال برد ۲۹

۲-۷-۵ ویژگی های سیگنال سمت ۳۰

۲-۸ پاسخ ضربه SAR ۳۳

۲-۹ معیارهای انتخاب PRF ۳۳
۲-۹-۱ عرض ناحیه پوشش ۳۴
۲-۹-۲ ابهام برد ۳۴
۲-۹-۳ ابهام سمت ۳۴
۲-۱۰ سایر روش های تصویربرداری راداری. ۳۵
۲-۱۰-۱ InSAR ۳۵
۲-۱۰-۲ Tomographic SAR ۳۵
۲-۱۰-۳ SAR پلاریمتری ۳۶
۲-۱۰-۴ ISAR ۳۷
۲-۱۱ نتیجه گیری ۳۷

فصل سوم: الگوریتم های تشکیل تصویر در رادارهای روزنه مصنوعی ۳۸

۳-۱ مقدمه ۳۸
۳-۲ الگوریتم های با تقریب ساده ۴۱
۳-۲-۱ الگوریتم DBS ۴۱
۳-۲-۲ الگوریتم مستطیلی ۴۱
۳-۲-۳ الگوریتم غیر متمرکز ۴۱
۳-۳ الگوریتم های حوزه زمان ۴۲
۳-۳-۱ الگوریتم TDC ۴۲
۳-۳-۲ الگوریتم BP ۴۲
۳-۴ الگوریتم های حوزه فرکانس ۴۳
۳-۴-۱ الگوریتم RDA ۴۳
۳-۴-۲ سایر الگوریتم های حوزه فرکانس ۵۰
۳-۴-۳ مقایسه الگوریتم های حوزه فرکانس ۵۶
۳-۵ نویز لکه ای و پردازش چند نگاهه.... ..... ۵۶
۳-۶ الگوریتم های حوزه کسری ۵۸
۳-۶-۱ مقدمه ای بر تبدیل فوریه کسری ۵۹
۳-۶-۲ محاسبه تبدیل فوریه کسری و برخی خواص آن ۶۰
۳-۶-۳ فشرده سازی چیرپ با استفاده از تبدیل فوریه کسری ۶۲
۳-۶-۴ الگوریتم FrRDA ۶۵

۳-۶-۵ الگوریتم FrCSA ۶۶
۳-۷ سیر تکامل الگوریتم های حوزه کسری ۶۷
۳-۸ نتیجه گیری ۶۸

فصل چهارم: الگوریتم پیشنهادی برای تشکیل تصویر ۶۹

۴-۱ مقدمه ۶۹
۴-۲ الگوریتم پیشنهادی اول ۷۰
۴-۲-۱ تبدیل فوریه کسری برد ۷۱
۴-۲-۲ تبدیل فوریه برد ۷۴
۴-۲-۳ تبدیل فوریه کسری سمت ۷۵
۴-۲-۴ عکس تبدیل فوریه برد ۷۷
۴-۲-۵ نگاشت زمانی سمت ۷۹
۴-۲-۶ نگاشت زمانی برد ۷۹
۴-۲-۷ ساده سازی بلوک دیاگرام ۷۹
۴-۳ الگوریتم پیشنهادی دوم ۸۰
۴-۳-۱ تبدیل فوریه برد ۸۰
۴-۳-۲ تبدیل فوریه کسری سمت ۸۲
۴-۳-۳ عکس تبدیل فوریه برد ۸۳
۴-۳-۴ تبدیل فوریه کسری برد ۸۴
۴-۳-۵ نگاشت زمانی سمت ۸۵
۴-۳-۶ نگاشت زمانی برد ۸۵
۴-۳-۷ ساده سازی بلوک دیاگرام ۸۶
۴-۴ نتایج شبیه سازی الگوریتم های پیشنهادی و مقایسه آن ها با الگوریتم های FrRDA و RDA ۸۶
۴-۴-۱ شبیه سازی با استفاده از داده ی خام شبیه سازی شده ۸۶
۴-۴-۲ شبیه سازی با استفاده از داده ی خام واقعی ۸۸
۴-۵ نتیجه گیری ۹۰

فصل پنجم: جبران سازی خطای حرکت ۹۱

۵-۱ مقدمه ۹۱
۵-۲ خطاهای فاز در SAR ۹۲
۵-۲-۱ خطاهای فاز فرکانس پایین ۹۴

۵-۲-۲ خطاهای فاز فرکانس بالا و پهن باند ۹۶
۵-۳ خطای حرکت ۹۷
۵-۴ هندسه خطای حرکت ۹۷
۵-۵ اثر تغییر سرعت سکو و خطای LOS در پردازش SAR ۹۹
۵-۶ بدست آوردن خطای حرکت ۱۰۰
۵-۶-۱ بدست آوردن خطای حرکت با استفاده از ادوات ناوبری ۱۰۰
۵-۶-۲ محاسبه خطای حرکت با استفاده از داده ی خام ۱۰۰
۵-۷ جبران سازی تغییر سرعت سکو ۱۰۲
۵-۸ جبران سازی خطای LOS ۱۰۳
۵-۸-۱ جبران سازی جابجایی ایده آل ۱۰۳
۵-۸-۲ جبران سازی دو مرحله ای ۱۰۳
۵-۹ تمرکز خودکار ۱۰۶
۵-۹-۱ روش کنتراست بیشینه ۱۰۷
۵-۹-۲ روش MD ۱۰۸
۵-۹-۳ روش MAM ۱۰۹
۵-۹-۴ روش PD ۱۱۰
۵-۹-۵ روش PGA ۱۱۰
۵-۱۰ مروری کوتاه بر روش های جبران سازی خطاهای فاز ۱۱۱
۵-۱۱ نتیجه گیری ۱۱۱

فصل ششم: الگوریتم پیشنهادی برای جبران سازی خطای حرکت ۱۱۳

۶-۱ مقدمه ۱۱۳
۶-۲ مهاجرت سلول برد غیر سیستماتیک ۱۱۴
۶-۳ الگوریتم پیشنهادی برای جبران سازی ۱۱۴
۶-۳-۱ جبران سازی عمده ۱۱۷
۶-۳-۲ فشرده سازی برد ۱۱۸
۶-۳-۳ اصلاح مهاجرت سلول برد غیر سیستماتیک عمده (Bulk NsRCMC) ۱۱۹
۶-۳-۴ عکس تبدیل فوریه برد ۱۲۰
۶-۳-۵ تبدیل فوریه سمت ۱۲۱
۶-۳-۶ اصلاح مهاجرت سلول برد ۱۲۱

۶-۳-۷ عکس تبدیل فوریه سمت ۱۲۳
۶-۳-۸ جبران سازی تفاضلی ۱۲۳
۶-۳-۹ فشرده سازی سمت ۱۲۵
۶-۳-۱۰ الگوریتم پیشنهادی برای جبران سازی در حوزه کسری ۱۲۶
۶-۴ محدودیت های الگوریتم پیشنهادی ۱۲۷
۶-۴-۱ محدودیت اول ۱۲۷
۶-۴-۲ محدودیت دوم ۱۲۹
۶-۴-۳ محدودیت سوم ۱۲۹
۶-۵ نتایج شبیه سازی الگوریتم پیشنهادی و مقایسه آن با جبران سازی دو مرحله ای. ۱۳۰
۶-۵-۱ مقایسه الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم متداول دو مرحله ای ۱۳۰
۶-۵-۲ بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی به ازای مقادیر مختلف دامنه خطای حرکتی ۱۳۵
۶-۶ نتیجه گیری ۱۴۱

فصل هفتم: نتیجه گیری و پیشنهادات ۱۴۲

۷-۱ خلاصه و نتیجه گیری ۱۴۲
۷-۲ پیشنهادات ۱۴۴

مراجع ۱۴۵

چکیده

سنجش از دور علمی است که در آن بدون تماس مستقیم با یک پدیده از آن اطلاعاتی را جمع آوری می کند و رادارهای روزنه مصنوعی (SAR) به دلیل کاربرد وسیع و کارایی بالا، جایگاه ویژه ای را در این زمینه به خود اختصاص داده است. رادارهای SAR که در دسته رادارهای هواپایه یا فضاپایه قرار می گیرد، عملکردی همانند رادارهای پالسی دارند. سیگنال ارسالی در آن ها عموماً چیرپ (Chirp) بوده و سیگنال دریافتی به صورت دو بعدی در دو جهت برد و سمت پخش می شود که به آن داده ی خام می گویند. به دلیل وجود یک حرکت نسبی بین سکوی رادار و هدف نقطه ای، فاصله سکوی رادار با هدف نقطه ای در طول روزنه مصنوعی یکسان نبوده و این امر باعث می شود داده های مربوط به هدف نقطه ای در جهت برد جابجا شود، که به این پدیده مهاجرت سلول برد (RCM) گفته می شود. بنابراین استفاده از داده ی خام به عنوان تصویر امکان پذیر نیست و برای استخراج تصویر باید پردازش هایی بر روی آن انجام شود که به آن الگوریتم های تشکیل تصویر گفته می شود. الگوریتم های متنوعی برای تشکیل تصویر وجود دارند که از الگوریتم های پر کاربرد می توان به الگوریتم برد-داپلر (RDA) اشاره نمود. یکی از پارامترهای مهم در الگوریتم های تشکیل تصویر، قدرت تفکیک تصویر در دو بعد سمت و برد می‌باشد که معمولاً برای رسیدن به قدرت تفکیک دلخواه از سیگنال چیرپ استفاده می شود. روش های مختلفی برای فشرده سازی چیرپ در گیرنده وجود دارد که در رادارهای SAR عموماً از فیلتر منطبق می شود. ولی اخیراً استفاده از تبدیل فوریه کسری (FrFT) در فشرده سازی سیگنال چیرپ مطرح شده که از لحاظ معیار ISLR نتایج بهتری نسبت به فیلتر منطبق از خود نشان می دهد. از آنجا که FrFT توانایی حذف عوامل درجه دوم بر روی فاز سیگنال را دارد و RCM نیز دارای یک معادله درجه دوم است، در این پایان نامه الگوریتمی بر پایه الگوریتم RDA ارائه شده که بر اساس آن با استفاده از FrFT علاوه بر فشرده سازی پالس، مهاجرت سلول برد نیز تصحیح می شود.

یکی از موارد مهم در الگوریتم های تشکیل تصویر، پردازش همدوس داده خام می باشد. این امر مستلزم حفظ توالی فاز سیگنال دریافتی در گیرنده بوده و از آنجایی که معادله برد در فاز سیگنال دریافتی اثر گذار است، برای پردازش همدوس باید سکوی رادار در یک مسیر از پیش تعیین شده حرکت کند. ولی به دلیل ایده آل نبودن سامانه های ناوبری و همچنین وجود اختلالات جوی، جابجایی از مسیر از پیش تعیین شده امری اجتناب ناپذیر است که به این پدیده خطای حرکت گفته می شود. در عمل بگونه ای مقدار جابجایی از مسیر ایده آل اندازه گیری شده و میزان فاز مورد نیاز برای پردازش همدوس به سیگنال اضافه می شود که به این فرایند جبران سازی خطای حرکت گفته می شود. معادله برد علاوه بر فاز سیگنال دریافتی، در تأخیر پوش سیگنال ارسالی اثر می گذارد که به آن پدیده مهاجرت سلول برد غیر سیستماتیک (NsRCM) گفته می شود. روش مرسوم برای جبران سازی خطای حرکت، روش های جبران سازی دو مرحله ای است که تنها اثر خطای حرکت بر روی فاز سیگنال در راستای سمت را جبران می کند. در این پایان نامه روش جدیدی برای جبران سازی حرکت پیشنهاد می شود که اثر پدیده NsRCM نیز در نظر گرفته و آن را جبران می کند. نتایج شبیه سازی بر روی یک هدف نقطه ای نشان می دهد که الگوریتم جبران سازی پیشنهادی بر اساس معیار هایIRW، PSLR و ISLR عملکرد بهتری از خود نشان می دهد.

کلمات کلیدی: رادار روزنه مصنوعی، سیگنال چیرپ، مهاجرت سلول برد، تبدیل فوریه کسری، تشکیل تصویر و جبران سازی خطای حرکت.

فصل اول

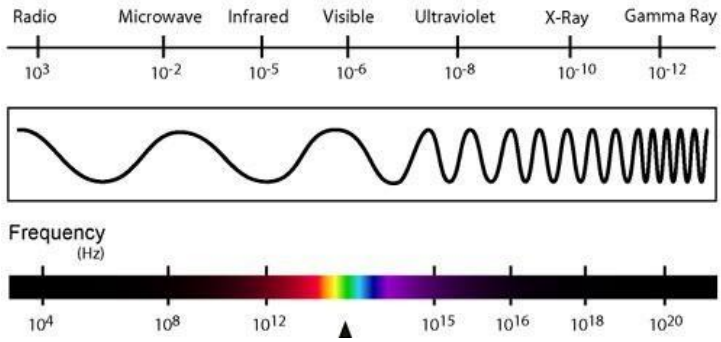
مقدمه

برای بررسی و مطالعه یک پدیده باید در مورد آن اطلاعاتی را کسب کنیم. در بسیاری از موارد برای کسب اطلاعات امکان دسترسی مستقیم به آن پدیده وجود ندارد. برای مثال، می توان به مطالعه و بررسی شرایط جوی و آب هوایی، عوارض زمین، نقشه برداری، اکتشاف معادن و غیره اشاره کرد. به همین منظور لزوم کسب اطلاعات بدون تماس مستقیم احساس می شود. سنجش از دور[۱] علمی است که به کمک آن می توان بدون تماس فیزیکی با پدیده مورد نظر اطلاعات مورد نیاز را از آن استخراج و تجزیه و تحلیل نمود. عموماً اصول سامانه های سنجش از دور بدین صورت است که یک گیرنده (یا حسگر) انعکاس های امواج الکترومغناطیسی از یک جسم را دریافت کرده و سپس با پردازش های مناسب اطلاعات مورد نظر را استخراج می کند.

بسته به نوع کاربرد می توان از قسمت های مختلف طیف الکترومغناطیس (شکل ۱-۱) در سنجش از دور استفاده کرد. ویژگی اطلاعات استخراج شده از یک جسم بستگی زیادی به طیف استفاده شده دارد. سنجش از دور را از یک دیدگاه می توان به دو دسته فعال[۲] و غیر فعال[۳] تقسیم کرد. در سنجش از دور فعال انرژی الکترومغناطیسی توسط خود سامانه تولید می شود ولی در دسته غیر فعال از انرژی الکترومغناطیسی محیط برای آشکارسازی استفاده می شود. از دیدگاه دیگر می توان سنجش از دور را به دو دسته حسگرهای تصویربردار[۴] و حسگرهای غیر تصویربردار[۵] تقسیم کرد. در حسگرهای تصویربردار، هدف استخراج شکل هندسی جسم و در حسگرهای غیر تصویربردار هدف استخراج اطلاعاتی دیگر مانند ارتفاع، موقعیت و سرعت می باشد.

---

[۱] Remote Sensing
[۲] Active
[۳] Passive
[۴] Imaging Sensor
[۵] Non-Imaging Sensor



شکل ۱-۱: طیف امواج الکترومغناطیسی

۱-۱ مفهوم تصویر

میزان شدت بازتاب موج الکترومغناطیسی از سطح جسم که بصورت پیکسل هایی ذخیره شده است را تصویر گویند. مجموع این پیکسل ها در کنار هم اطلاعاتی مانند شکل و هندسه جسم را در خود دارد. ویژگی تصویر بدست آمده بستگی زیادی به طول موج طیف مورد استفاده دارد.

دو نمونه از سامانه های سنجش از دور تصویربردار، تصویر برداری نوری و تصویر برداری راداری می باشد. در تصویربرداری نوری برای تشکیل تصویر از طیف نور مرئی استفاده می شود در حالیکه در تصویر برداری راداری از طیف امواج رادیویی استفاده می شود. شکل ۱-۲ تفاوت دو تصویر راداری و نوری را نشان می دهد.

شکل ۱-۲ سمت راست: تصویر نوری، سمت چپ: تصویر راداری

۱-۲ ویژگی تصاویر راداری

تصاویر راداری دارای ویژگی هایی است که آن را از تصاویر نوری متمایز می کند. برخی از ویژگی های تصاویر راداری عبارتند از [۱]:

- **توانایی تصویر برداری در شب:** در تصویر برداری نوری معمولاً از نور خورشید به عنوان منبع تشعشع استفاده می شود، در حالیکه در تصویر برداری راداری از یک فرستنده رادیویی به عنوان منبع تشعشع استفاده می شود. به دلیل عدم نیاز به نور خورشید یکی از مزیت های تصویر برداری راداری توانایی تصویر برداری در شب می باشد.

- **توانایی تصویر برداری در شرایط مختلف جوی:** در تصویر برداری راداری امواج رادیویی توانایی عبور از ابر، باران و حتی برف را دارد. بنابراین یکی از مزایای آن توانایی تصویر برداری در شرایط مختلف جوی می باشد.
- **توانایی تشخیص اهداف پنهان شده:** در برخی موارد اهداف با محیط همرنگ شده و اصطلاحاً مستتر یا پنهان شده اند. در این مواقع تشخیص اینگونه اهداف بوسیله تصاویر نوری مشکل و چه بسا غیر ممکن خواهد بود. ولی با توجه به اینکه امواج راداری توانایی عبور از برخی پوشش ها را دارند، می توان از آن ها برای آشکار کردن اهداف پنهان شده استفاده نمود.
- **توانایی تصویر برداری از عمق زمین:** به دلیل توانایی عبور امواج رادیویی از لایه های مختلف زمین، تصویر برداری راداری در کاربردهایی مانند اکتشاف و استخراج معادن کاربرد فراوانی دارد.

در این پژوهش بررسی رادار روزنه مصنوعی[۱] به عنوان یکی از سامانه های سنجش از دور مورد نظر است. در دسته بندی سنجش از دور، SAR در دسته حسگرهای تصویربردار قرار می گیرد. رادارهای SAR در دو نوع فعال و غیر فعال وجود دارد. در SAR، هدف استخراج سطح مقطع راداری[۲] المان های سطحی اجسام می باشد که پس از استخراج اطلاعات RCS به صورت سطوح خاکستری در یک صفحه نمایش داده می شود.

۱-۳ تاریخچه SAR

برای اولین بار هاینریش هرتز[۳]، فیزیکدان آلمانی طی آزمایشاتی تئوری کلارک ماکسول[۴] در زمینه میدان مغناطیسی را به اثبات رساند. هرتز نشان داد امواج الکترومغناطیسی رفتاری دقیقاً مشابه امواج نوری را از خود بروز می دهند، تنها با این تفاوت که فرکانس آنها با یکدیگر متفاوت است. او همچنین دریافت که امواج الکترومغناطیسی می توانند از سطح اشیاء منعکس شوند.

نتایج آزمایشات هرتز به طور عملی مورد استفاده قرار نگرفت تا اینکه در سال ۱۹۲۲، مارکونی[۵] و همزمان با او (ولی به صورت مجزا) تیلور[۶] و یونگ[۷] در آزمایشگاه تحقیقاتی نیروی دریایی آمریکا دریافتند که می توان از امواج الکترومغناطیسی برای آشکارسازی اهداف استفاده نمود.

با شروع جنگ جهانی اول و به دنبال آن جنگ جهانی دوم جنبه های نظامی رادار بسیار پر رنگ شد بگونه ای که در این دوران پیشرفت های عظیمی در حوزه رادار به وقوع پیوست. در آن زمان عمده وظایف رادار شناسایی اهداف و استخراج اطلاعاتی مانند سرعت، موقعیت، جهت حرکت و فاصله بود [۲].

در سال ۱۹۵۱ کارل ویلی[۱] از شرکت هوافضای گودیر[۲] دریافت که با استفاده از رادار می توان یک تصویر دو بعدی از زمین بدست آورد. او به تأثیر طولانی مدت تابش امواج الکترومغناطیسی بر روی وضوح تصویر، با استفاده از تجزیه و تحلیل سیگنال پی برد. او روش کار را رادار روزنه مصنوعی (SAR) نامید.

---

[۱] Synthetic Aperture Radar (SAR)
[۲] Radar Cross Section (RCS)
[۳] Heinrich Hertz
[۴] Clerk Maxwell
[۵] S. G. Marconi
[۶] A. Hoyt Taylor
[۷] Leo C. Young

در سال های ۱۹۵۰ تا ۱۹۶۰ ایده تشکیل علم سنجش از دور بوسیله کمیته ای غیر نظامی مطرح شد. در ابتدا این کمیته تهیه عکس های هوایی با استفاده از طیف های مختلف نوری در دستور کار خود قرار داد تا اینکه در سال ۱۹۷۰ فناوری SAR نظامی در سامانه های سنجش از دور بکار گرفته شد و دانشمندان علم سنجش از دور دریافتند تصاویر بدست آمده از SAR دارای ویژگی هایی است که در تصاویر نوری نیست و این دو روش تصویر برداری می توانند مکمل خوبی در کنار یکدیگر باشند [۱].

با وجود اینکه بیشتر تحقیقات اولیه در زمینه SAR بر روی رادارهای هواپایه انجام شد، ولی برای اولین بار SAR فضاپایه بود که توانست توجه کمیته سنجش از دور را به این حسگر جلب نماید. در سال ۱۹۷۸سازمان ملی هوانوردی و فضایی آمریکا (ناسا[۳]) با استفاده از ماهواره SEASAT اولین تصاویر SAR را بدست آورد. تشکیل تصویر در ماهواره SEASAT یک فرآیند بسیار طولانی بود بگونه ای که برای تشکیل یک تصویر به مساحت Km ۴۰×۴۰ به ۴۰ ساعت زمان نیاز داشت. ولی امروزه با پیشرفت فناوری، تشکیل همان تصویر در عرض چند ثانیه امکان پذیر شده است [۱].

امروزه با پیشرفت در زمینه پردازش دیجیتال، الگوریتم های متنوعی برای تشکیل تصویر، بر حسب نوع کاربرد ارائه شده است. بطور کلی الگوریتم های تشکیل تصویر به دو دسته الگوریتم های حوزه زمان (مانند الگوریتم های TDC[۴] و BP[۵]) و الگوریتم های حوزه فرکانس (مانند RDA[۶]، CSA[۷]، omega-k و...) تقسیم می شوند. الگوریتم های حوزه زمان علیرغم دقت خوب، پیچیدگی و بار محاسباتی زیادی دارند [۳]. الگوریتم های حوزه فرکانس با دستیابی به دقت قابل قبول، از لحاظ پیچیدگی و بار محاسباتی در مقایسه با الگوریتم های حوزه زمان مناسب تر هستند [۱].

با توجه به توانایی تبدیل فوریه کسری[۸] در فشرده سازی سیگنال های چیرپ[۹] [۹-۴]، در چند سال اخیر بحث استفاده از تبدیل فوریه کسری در رادارهای روزنه مصنوعی مطرح شده است. تبدیل فوریه کسری حوزه جدیدی را به نام حوزه کسری[۱۰] معرفی می کند که همزمان خواص حوزه زمان و فرکانس را در بر دارد. بر همین اساس دسته ای جدید از الگوریتم های تشکیل تصویر بوجود آمده است که آن را الگوریتم های حوزه کسری می نامیم. الگوریتم های این حوزه یا مبتنی بر CSA [۱۹-۱۰]، یا مبتنی بر RDA ارائه شده اند [۲۲-۱۸].

مبنای عملکرد الگوریتم های تشکیل تصویر پردازش همدوس[۱۱] داده های SAR می باشد، و این بدان معناست که باید توالی فازهای دریافتی حفظ شود. از آن جایی که فاز سیگنال دریافتی رابطه مستقیمی با فاصله سکو با هدف دارد، بنابراین اگر سکوی رادار به وسیله عواملی چون اغتشاشات جوی یا ایده آل نبودن حرکت سکوی رادار، از مسیر مستقیم خارج شود، فاصله بین سکوی رادار و هدف دستخوش تغییرات شده و توالی فازها از بین می رود و در نتیجه پردازش همدوس داده های SAR امکان پذیر نخواهد بود. به جابجایی حرکت سکوی رادار از مسیر مستقیم خطای حرکت

---

[۱] Carl Wiley
[۲] Goodyear Aerospace
[۳] National Aeronautics and Space Administration (NASA)
[۴] Time Domain Correlation
[۵] Back Projection
[۶] Range Doppler Algorithm
[۷] Chirp Scaling Algorithm
[8] Fractional Fourier Transform (FrFT)
[۹] Chirp
[۱۰] Fractional Domain
[۱۱] Coherent

گویند. برای رفع این مشکل معمولاً خطای حرکت سکو بگونه ای بدست می آید و سپس مقدار فاز اضافی مورد نیاز برای اینکه پردازش همدوس امکان پذیر شود محاسبه شده و به داده های خام اضافه می شود. به این فرایند، جبران سازی خطای حرکت[۱] گفته می شود. برای اولین بار در سال ۱۹۷۵ جان کرک[۲] به بررسی اثر خطای حرکت بر همدوسی داده های SAR پرداخت و برای جبران سازی پیشنهاد نمود که بایستی به دنبال همدوسی داده های SAR بود [۲۳]. در سال ۱۹۹۴ آلبرت موریرا[۳] بر اساس ایده جان کرک، روش تقریبی دو مرحله ای برای جبران سازی ارائه کرد [۲۴].

۱-۴ هدف و ساختار پایان نامه

هدف از این پایان نامه، ارائه پژوهش ها و نتایج بدست آمده بر روی دو زمینه در رادارهای SAR است. زمینه اول الگوریتم های تشکیل تصویر، و زمینه دوم جبران سازی خطای حرکت می باشد. بر همین اساس ساختار این پایان نامه به شرح زیر تنظیم شده است:

در فصل دوم به مرور و بررسی اصول حاکم بر رادارهای روزنه مصنوعی می پردازیم. در این فصل ابتدا با برخی از اصطلاحات و همچنین هندسه حاکم بر SAR آشنا می شویم و مودهای تصویر برداری در SAR را معرفی می کنیم. بعد از آن سیگنال چیرپ یا LFM[۴] را معرفی و برخی ویژگی های آن را بر می شماریم. یکی از راه حل ها برای دستیابی به قدرت تفکیک دلخواه، استفاده از فشرده سازی پالس است. به همین منظور فشرده سازی سیگنال چیرپ در گیرنده با استفاده از فیلتر منطبق و پردازش انبساطی را مورد بررسی قرار می دهیم و میزان قدرت تفکیک قابل دستیابی را به صورت کمی بدست می آوریم. در بخش بعدی چگونگی جمع آوری سیگنال برگشتی و مدل سازی آن به صورت دو بعدی را معرفی می کنیم و با خواص سیگنال برد و سمت و همچنین پدیده مهاجرت سلول برد[۵] آشنا می شویم. در پایان این فصل معیارهایی را برای انتخاب PRF به منظور جلوگیری از ابهام ارائه می نماییم.

به دلیل پخش شدگی انرژی هدف نقطه ای در دو راستای برد و سمت و همچنین پدیده RCM، باید پردازش هایی بر روی سیگنال خام انجام شود تا تصویر تشکیل شود که به این پردازش ها الگوریتم تشکیل تصویر[۶] گفته می شود. از آنجایی که پژوهش های انجام شده در این پایان نامه مبتنی بر روش RDA است، در فصل سوم به بررسی مراحل مختلف الگوریتم RDA می پردازیم. همچنین در این فصل تبدیل فوریه کسری را به عنوان یکی از ابزارهای قدرتمند برای فشرده سازی سیگنال چیرپ معرفی می کنیم و چگونگی بکارگیری آن در روش RDA و CSA را مورد بررسی قرار می دهیم.

در فصل چهارم دو الگوریتم جدید مبتنی بر RDA در حوزه کسری ارائه خواهیم کرد. در این فصل با بررسی خواص FrFT و RCM، ایده اصلاح مهاجرت سلول برد[۷] با استفاده از FrFT را شرح می دهیم. سپس الگوریتمی مبتنی بر RDA ارائه می کنیم که بر اساس آن با استفاده از FrFT علاوه بر فشرده سازی سمت، اصلاح مهاجرت سلول برد انجام می پذیرد. مراحل مختلف الگوریتم پیشنهادی را به همراه روابط ریاضی و شبیه سازی مورد بررسی و تحلیل قرار

---

[۱] Motion Compensation (MOCO)
[۲] John Kirk
[۳] Albert Moreira
[۴] Linear Frequency Modulated
[۵] Range Cell Migration (RCM)
[۶] Image Formation
[۷] Range Cell Migration Correction (RCMC)

می‌دهیم. در پایان این فصل، با استفاده از نتایج شبیه سازی عملکرد دو الگوریتم پیشنهادی، با FrRDA[۱] و RDA مقایسه می شوند.

در فصل پنجم با اهمیت مسئله پردازش همدوس داده SAR آشنا شده و به تأثیر خطای حرکت بر ناهمدوسی داده SAR می پردازیم. سپس هندسه خطای حرکت و مؤلفه های خطای سرعت و جابجایی را معرفی می کنیم. نخستین گام در جبران سازی، بدست آوردن خطای حرکت است که به همین منظور دو روش برای بدست آوردن خطای حرکت معرفی می کنیم. روش اول بر اساس استفاده از ادوات ناوبری مانند GPS[۲] و INS[۳] بوده و روش دوم با استفاده از پردازش داده SAR می باشد. در پایان این فصل چگونگی جبران سازی خطای حرکت با استفاده از الگوریتم دو مرحله‌ای را نشان می دهیم.

خطای حرکت علاوه بر فاز سیگنال دریافتی، بر تأخیر آن نیز تأثیر می گذارد که به این اثر مهاجرت سلول برد غیرسیستماتیک[۴] گفته می شود. اگر مقدار خطای حرکت بزرگ نباشد، می توان از اثر NsRCM چشم پوشی کرد در غیر این صورت می تواند اثر مخربی در تشکیل تصویر ایجاد کند. بر همین اساس در فصل ششم ابتدا پدیده NsRCM معرفی می شود و چگونگی تأثیر آن بر داده خام را بیان می کنیم. سپس الگوریتمی مبتنی بر RDA ارائه می شود که در آن پدیده NsRCM در نظر گرفته شده و اثر آن را جبران می کند. مراحل مختلف الگوریتم جبران سازی پیشنهادی به همراه روابط ریاضی و شبیه سازی مورد بررسی و تحلیل قرار می گیرد. در پایان این فصل با استفاده از نتایج شبیه سازی، عملکرد الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم دو مرحله ای متداول مقایسه شده است.

در پایان، فصل هفتم به جمع بندی و نتیجه گیری از پژوهش های انجام شده می پردازد و پیشنهاداتی برای پژوهش های آتی ارائه می کند.

---

[۱] Fractional Range Doppler Algorithm (FrRDA)

[۲] Global Position System

[۳] Inertial Navigation System

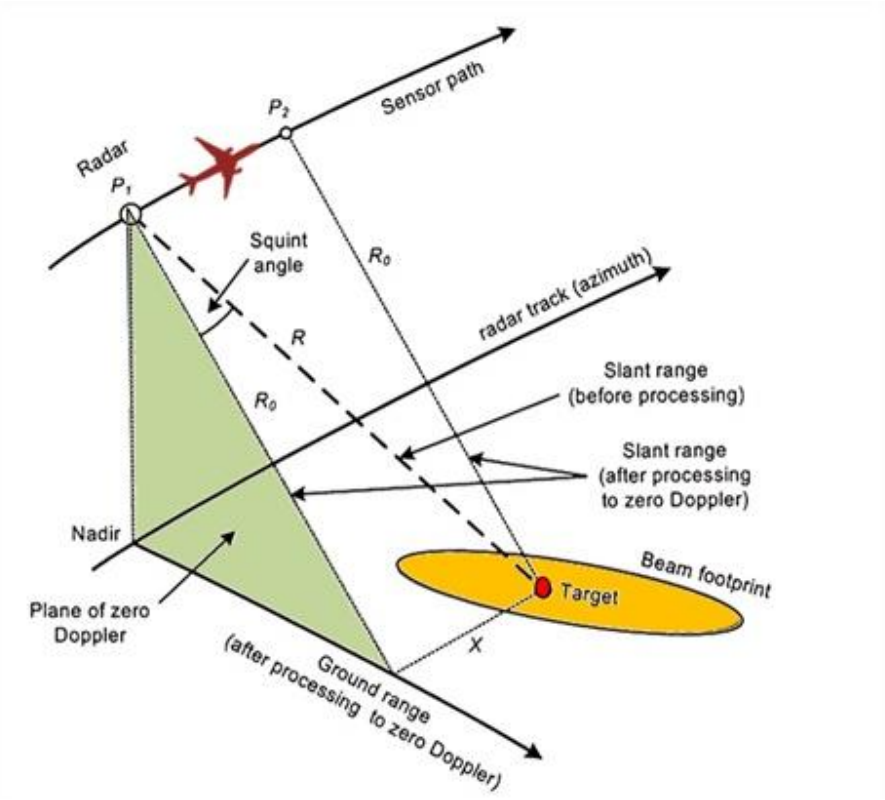
[۴] Non Systematic Range Cell Migration (NsRCM)

فصل دوم

اصول کلی رادارهای روزنه مصنوعی

۲-۱ مقدمه

مطالعه و بررسی SAR، مستلزم شناخت روابط هندسی و سیگنالی حاکم بر آن است. در این فصل با اصول، تعاریف، هندسه و سیگنالینگ سامانه های SAR آشنا می شویم. شکل ۲-۱ و ۲-۲ یک مدل هندسی ساده از رادار SAR به همراه پارامترهای مربوطه را نشان می دهد.



شکل ۲-۱ هندسه ساده SAR هواپایه [۱]