



دانشگاه زنجان

دانشکده مهندسی

برق مخابرات

پایان نامه کارشناسی

تصویربرداری رادار

Radar Imaging

استاد راهنما: دکتر حبیب اله زلفخانی

دانشجو: اصغر رحیمی

تابستان ۱۳۹۱

فهرست مطالب

چکیده

فصل ۱: معرفی

۱

۲

۳

۳

۳

۳

۳

۳

۳

۳

۳

۳

۳

۳

۳

۳

۳

۳

۳

۳

۳

۳

۳

۳

۳

۳

فصل ۲: سیستم‌های رادار

۱,۲ سیستم‌های تشدید فرکانسی ۲۰

۲,۲ سیستم‌های پالسی ۲۲

۱,۲,۲ دم‌دولاسیون I/Q و سیگنال تحلیلی ۲۴

۲,۲,۲ فیلترها ۲۵

۳,۲,۲ مدل یک‌چهارم یا تربیع ۲۶

فصل ۳: مقدمه‌ای بر پراکندگی

۱,۳ پراکندگی یک‌بعدی از صفحه‌ی هادی کامل الکتریکی ثابت ۲۷

۲,۳ پراکندگی یک‌بعدی از صفحه‌ی هادی کامل الکتریکی متحرک ۲۹

فصل ۴: شناسایی سیگنال‌ها در نویز

۱,۴ شناسایی سیگنال‌های پراکنده شده از اهداف ثابت ۳۳

۱,۱,۴ فشرده‌سازی پالس ۳۵

۲,۱,۴ کدگذاری فاز ۳۵

چهره‌ها ۳۶

کدگذاری پالس دیجیتال ۴۰

۲,۴ تصویربرداری با قابلیت تفکیک بردی بالا ۴۱

۱,۲,۴ اهداف دونقطه‌ای مانند ۴۱

۲,۲,۴ توزیع اهداف ثابت ۴۱

۳,۴ تشخیص سیگنال‌های پراکنده شده از اهداف متحرک ۴۳

۱,۳,۴ هدف نقطه‌مانند تنه‌های متحرک ۴۳

۲,۳,۴ دو هدف نقطه‌مانند متحرک ۴۴

۳,۳,۴ توزیع اهداف متحرک ۴۵

فصل ۵: تابع ابهام رادار

۱,۵ خواص اولیه ۴۶

۲,۵ وضوح و کاهش از طریق تابع ابهام ۴۸

۱,۲,۵ طیف وضوح ۴۸

۲,۲,۵ وضوح داپلر ۴۹

۳,۵ موارد خاص ۴۹

۱,۳,۵ وضوح یک پالس CW ۵۰

وضوح یک چهره ۵۳

۲,۳,۵ وضوح قطارپالس منسجم ۵۴

۴,۵ کاربرد: تصویربرداری طیف داپلر ۵۸

۱,۴,۵ تصویربرداری طیف داپلر از اهداف دوار ۵۸

هدف کوچک (نقطه‌مانند) ۵۸

اهداف گسترده ۶۰

طرح تصویربرداری طیف داپلر ۶۲

۲,۴,۵ رادار دهانه‌مصنوعی طیف داپلر ۶۳

۵،۵ مسائل ریاضی مربوط به تابع ایهام ۶۵

فصل ۶: رادار دهانه مصنوعی معکوس

۱،۶ تقریب میدان دور ۶۶

۲،۶ بسط میدان دور در تقریب بورن موج اسکالر ۶۸

۳،۶ تصویربرداری دهانه مصنوعی معکوس ۶۸

۱،۳،۶ سیستم‌های ISAR ۶۹

۲،۳،۶ مدل‌سازی اهداف دوار ۶۹

۳،۳،۶ داده‌های رادار از اهداف دور ۷۰

۴،۳،۶ مانیفولد مجموعه‌ی داده‌ها ۷۰

۵،۳،۶ الگوریتم ساختار قطبی ۷۱

۶،۳،۶ وضوح ISAR ۷۳

۷،۳،۶ ISAR در حوزه‌ی زمان ۷۶

تبدیل رادون ۷۷

۸،۳،۶ تنظیم دامنه ۷۸

فصل ۷: رادار دهانه مصنوعی

۸۱

۱،۷ SAR نورافکن ۸۳

۲،۷ SAR نقشه‌نویاری ۸۴

ضمیمه‌ی قراردادی برای F ۸۵

اپراتور تصویربرداری ۸۶

۱،۲،۷ تابع نقطه گسترده SAR نقشه‌نواری ۸۷

قضیه‌ی فاز ثابت ۸۸

نقاط بحرانی SAR ۸۹

نقطه‌ی بحرانی $Z = X$ ۹۱

خلاصه‌ای برای نقطه‌ی بحرانی تنها در $Z = X$ ۹۲

۲،۲،۷ وضوح ۹۳

وضوح امتداد مسیر ۹۴

طیف وضوح ۹۶

۳،۷ درک تصاویر SAR ۹۶

۱،۳،۷ تجسم رادار ۹۶

۲،۳،۷ سایه‌ها ۹۷

۳،۳،۷ رنگ در تصویرسازی SAR ۹۷

۴،۳،۷ نقاط تکین و لبه‌ها ۹۸

مشخص کردن نقاط تکین ۹۹

عملگرهای شبه‌دیفرانسیل ۱۰۳

خاصیت شبه‌محلی ۱۰۴

مفاهیم SAR ۱۰۵

۴،۷ تأثیر زمان آهسته‌ی گسسته ۱۰۷

۱،۴،۷ سیگنال دریافتی ۱۰۷

۲،۴،۷ تولید تصویر ۱۰۸

آنالیز تصویر ۱۰۸

ابهامات ۱۰۸

۵,۷ سایر الگوریتم‌های تصویربرداری ۱۰۹

فصل ۸: تکنیک‌های مربوطه

۱۱۰

۱,۸ جبران حرکت ۱۱۰

۲,۸ تصاویر شاخص هدف متحرک ۱۱۱

۳,۸ SAR تداخل سنج ۱۱۴

۱,۳,۸ حجم پیمایی ۱۱۴

۲,۳,۸ تداخل سنجی ۱۱۷

نتیجه‌گیری و پیشنهاد

۱۱۹

فهرست منابع و مراجع

۱۲۰

چکیده:

تصویربرداری رادار موضوعی می‌باشد که از غنای ریاضی عظیمی برخوردار است، همراه با بسیاری از برنامه‌های کاربردی جالب و بسیاری از چالش‌ها که همگی آن‌ها دارای ماهیت ریاضی هستند. هنوز این موضوع تقریباً به‌طور کامل در جامعه‌ی ریاضی ناشناخته‌است و این به‌خاطر این است که این رشته در داخل جامعه‌ی مهندسی توسعه داده شده‌است، و ادبیات مهندسی برای نفوذ ریاضی‌دانان مشکل است. اگر بخواهیم به‌طور کامل خلاصه عملکرد یک سیستم تصویربرداری رادار را بنویسیم، شامل چهار مرحله‌ی: (۱) مخابره‌ی یک سیگنال الکترومغناطیس توسط آنتن فرستنده، (۲) بازتاب دادن مقداری انرژی به سمت منبع توسط هدف، (۳) دریافت سیگنال بازتابی توسط آنتن گیرنده، و (۴) پردازش سیگنال و تولید تصویر، خواهد بود.

در فصل اول، به معرفی این مبحث پرداخته‌ایم. این فصل مشتمل بر مباحثی چون موارد استفاده برای رادار، تاریخچه‌ی مختصری از رادار، روش‌های تصویربرداری ابتدایی و نمای کلی از سیستم رادار معمولی می‌باشد. در فصل دوم سیستم‌های راداری را که امروزه بیشتر در این زمینه استفاده می‌شوند را مطرح کرده‌ایم. فصل سوم به نحوه‌ی انتشار و پراکندگی امواج الکترومغناطیسی اختصاص یافته‌است. در فصل چهارم به تأثیر نویز و تأخیرهای زمانی و مشکلات آن‌ها پرداخته‌ایم. در فصل پنجم به مطالعه‌ی تابع ابهام رادار می‌پردازیم. در فصل ششم رادار دهانه‌ترکیبی معکوس و تقریب‌هایی که در آن استفاده می‌شود را شرح داده‌ایم. فصل هفتم به رادارهای دهانه‌ترکیبی اختصاص یافته‌است و نهایتاً در فصل هشتم، به‌طور مختصر نگاهی به برخی از تکنیک‌هایی که در زمینه‌ی تصویربرداری رادار گسترش یافته‌اند، داریم.

فصل ۱

معرفی

رادار^۱ مخفف شناسایی رادیویی و محدوده^۲ می‌باشد. رادار دراصل به عنوان یک تکنولوژی برای شناسایی اجسام و تعیین مواضع آنها، با استفاده از پژواک مکان‌یابی^۳، گسترش داده شد، و این به‌عنوان عملکرد اصلی سیستم‌های راداری مدرن باقی مانده است. به‌هرحال، سیستم‌های راداری درطول بیش از هفت دهه، به انجام انواع عملکردهای بسیارپیچیده، تکامل یافته است؛ که یکی از عملکردهای آن تصویربرداری است.

تصویربرداری رادار یک فن‌آوری می‌باشد که به‌طورعمده در درون جامعه‌ی مهندسی توسعه یافته است. دلایل خوبی برای این وجود دارد: برخی از موارد تشکیل‌دهنده‌ی مهم عبارتنداز: (۱) انتقال انرژی مایکروویو در قدرت بالا، (۲) تشخیص انرژی مایکروویو، و (۳) تفسیر و استخراج اطلاعات از سیگنال‌های دریافتی. دو مشکل اول باید با توسعه‌ی سخت‌افزار مناسب انجام پذیرد؛ اگرچه این مشکلات درحال حاضر تا حدزیادی حل شده است، هرچند کار مداوم برای ساخت سخت‌افزار کوچکتر و سبکتر وجود دارد. مشکل سوم اساساً مجموعه‌ای از چالش‌های ریاضی است، و این همان محدوده‌ای است که درآن بسیاری از تلاش‌های فعلی درحال وقوع است.

تصویربرداری رادار موضوعی با غنای ریاضی فوق‌العاده است. به‌ویژه شامل معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی، نظریه‌ی تفرق (پراکندگی)، تجزیه‌وتحلیل‌های ریزمحلی^۴، انتگرال هندسی، جبرخطی، نظریه‌ی الکترومغناطیس، تحلیل هارمونیک، نظریه‌ی تقریب، نظریه‌ی گروه‌ها، و آمار می‌باشد.

^۱ Radar
^۲ RAdio Detection And Ranging
^۳ echo-location
^۴ microlocal

۱,۱ موارد استفاده رادار

مزایای زیادی با استفاده از رادار برای سنجش از راه دور وجود دارد. برخلاف بسیاری از سیستم‌های نوری، سیستم‌های رادار می‌تواند در طول روز یا شب مورد استفاده قرار گیرد. زیرا طول موج‌های بلند رادار از ابرها، دود، شن و ماسه و غیره عبور می‌کند. سیستم‌های راداری را در هر آب‌وهوایی می‌توان استفاده کرد. علاوه بر این، برخی از سیستم‌های راداری می‌تواند در شاخ‌وبرگ، ساختمان، خاک و مواد دیگر نفوذ کند. رادار می‌تواند اندازه‌گیری‌های بسیار دقیقی از راه دور فراهم کند و همچنین می‌تواند نرخ تغییرات این محدوده را بسنجد.

امواج رادار به‌طور عمده از اجسام و ویژگی‌هایی که در یک نظم مشابه با طول موج است، پراکنده می‌شوند. این بدان معنی است که رادار حساس به اجسامی می‌باشد که طول طیف مقیاس آن‌ها از سانتی‌متر به متر است، و اجسام بسیاری علاقه دارند که در این طیف قرار گیرند. رادار برنامه‌های کاربردی زیادی، اعم از نظامی و غیرنظامی، دارد. این به‌طور گسترده‌ای در هواپیمایی و حمل‌ونقل، برای ناوبری، برای اجتناب از برخورد، و برای پرواز در ارتفاع کم، استفاده می‌شود. بسیاری از ما با رادار پلیس برای نظارت بر سرعت وسایل نقلیه آشنا هستیم. رادار همچنین برای نظارت بر آب‌وهوا، از جمله اندازه‌گیری‌های داپلر بارش و سرعت باد، استفاده می‌شود. رادار تصویربرداری برای نظارت بر زمین در دست استفاده، نظارت بر کشاورزی، و نظارت زیست‌محیطی استفاده می‌شود. سیستم‌های راداری برای نقشه‌برداری، توپوگرافی سطح و اندازه‌گیری تغییر پوسته استفاده می‌شود. در پزشکی نیز، برای سی‌تی اسکن مایکروویو در حال توسعه می‌باشد.

۲,۱ تاریخچه مختصری از رادار تا سال ۱۹۵۰

نام "رادار" در اواخر سال ۱۹۴۰ ابداع شد، اما اولین دستگاه‌های رادار مانند مربوط به تقریباً چهاردهه قبل از این وجه تسمیه می‌باشند. البته اصول اساسی رادار، همه‌ی آن پدیده‌های اساسی کلاسیک

الکترومغناطیس می‌باشد و می‌تواند به‌طور رسمی به جیمز کلارک ماکسول^۱ برگردد، اما به‌نظر این مفهوم را می‌رساند که توسعه‌ی ایده‌آل ترتیبی از تئوری به تجربه، واقعا به داستان رادار صدق نمی‌کند. در عوض، این احتمالا هنریک هرتز^۲ بود که ایده‌ی انعکاس رادیویی را در سه‌ماهه‌ی آخر قرن نوزدهم آغاز کرد و به‌طور تجربی نشان داد که امواج رادیویی می‌تواند از اجسام منعکس گردد.

هواداران نیکولا تسلا^۳ گاهی اوقات "اختراع" رادار را به سال افسانه‌ای او در سال ۱۸۹۹ در کلرادو اسپرینگز^۴ نسبت می‌دهند. واقع‌بینانه‌تر این است بگوییم که سهم واقعی تسلا به نظر می‌رسد که تنها یک توصیف مفهومی بود که احتمالا توسط دیگر محققان سنجش از راه دور، تا بعد از اولین مجموعه‌های رادار در حال تصحیح، ناشناخته است. به‌طور کلی امتیاز "اولین دستگاه محل-انعکاس الکترومغناطیسی" به یک کشتی سیستم ضدبرخورد اعطا گردید که توسط کریستین هولسمایر^۵ در سال ۱۹۰۴ توسعه یافته بود. اختراع هولسمایر در فرکانس حدود ۷۰۰ مگاهرتز کار می‌کرد و با موفقیت به نیروی دریایی آلمان و یک شرکت حمل‌ونقل هلندی اثبات شده بود. با این حال به‌خاطر دامنه‌ی محدود آن، هرگز به خدمت گرفته نشد.

توسعه‌ی رادار بعد از این که تیلور^۶ و یانگ^۷ (که برای نیروی دریایی ایالات متحده در سال ۱۹۲۲، در زمینه‌ی انتشار رادیویی مطالعه می‌کردند) پدیده‌های بازتاب از ساختمان‌ها، درختان، و اجسام دیگر را مشاهده کردند، به‌صورت جدی آغاز شد. این نتایج براساس اندازه‌گیری‌های موج پیوسته‌ی ۶۰ مگاهرتز بود، اما در حدود همان زمان، اندازه‌گیری‌های انعکاس پالس رادیویی از ارتفاع یونوسفر نیز (به‌طور مستقل) انجام شد. در سال ۱۹۳۰، یانگ و هایلند^۸، با استفاده از شبکه‌ای از فرستنده‌ها و گیرنده‌ها، تغییرات سیگنال را که به‌دلیل عبور هواپیما ایجاد می‌شد، مشاهده کردند. این رویداد آغاز اولین تلاش تحقیقاتی راداری مهم آمریکا بود که توسط آزمایشگاه تحقیقاتی نیروی دریایی نظارت می‌شد.

در سال ۱۹۳۰، بریتانیا و آلمان نیز برنامه‌های راداری خود را آغاز کردند. به‌نظر می‌رسد که برنامه‌ی بریتانیا، وقتی که ایده‌ی اصلی الکترومغناطیسی "اشعه‌ی مرگ" به‌عنوان روشی برای دفاع هوایی

^۱ James Clerk Maxwell

^۲ Heinrich Hertz

^۳ Nicola Tesla

^۴ Colorado Springs

^۵ Christian Hülsmeyer

^۶ Taylor

^۷ Young

^۸ Hyland

غیرقابل اجرا نشان داده شد، به‌عنوان تلاشی مجدد آغاز گردید. تلاش آلمان، که در ابتدا به آشکارسازی کشتی اعمال شد، به‌سرعت شامل آشکارساز هواپیما به‌عنوان هدفی مهم گردید. پیش از جنگ بریتانیا، تلاش رادار آشکارساز هواپیما منجر به سیستم خانه‌های زنجیره‌ای مشهور هشداردهنده‌ی زودهنگام شد، که مجموعه‌ای گسترده از رادارهای فرستنده و گیرنده بود که (معمولاً) در محدوده‌ی فرکانسی ۲۲-۵۰ مگاهرتز عمل می‌کردند. سیستم خانه‌های زنجیره‌ای با حفظ انگلستان از حمله‌ی نازی‌ها، معتبر گشت.

سیستم‌های راداری بریتانیا و آلمان، همچنین برای کنترل آتش (به‌عنوان مثال، سیستم‌هایی برای هدف‌گیری و انفجار مهمات) و ناوبری مورد استفاده قرار گرفت، و در اواخر دهه، بریتانیا موفق به توسعه‌ی رادار هوابرد شد. این سیستم‌های راداری در فرکانس‌هایی از ده‌ها تا صدها مگاهرتز عمل می‌کردند. فرکانس‌های بالاتر، که می‌توانست جهت آنتن را افزایش دهد و امکان اندازه‌های کوچکتر را برای آنتن می‌داد، مورد استفاده قرار نگرفت، زیرا روش‌های کارآمد برای تولید آن‌ها ناشناخته است - لوله‌ی کلیسترون^۱ که در اواخر سال ۱۹۳۰ به‌عنوان یک منبع میکروویو توسعه داده شد، فاقد قدرت لازم برای کاربردهای راداری بود. دستیابی به موفقیت بزرگ همراه با توسعه‌ی بریتانیا از ماگنترون با هم‌نوگرهای جعبه‌ای^۲ در پایان دهه آمد.

در سال ۱۹۴۰، بریتانیا یک تلاش تحقیقاتی مشترک را با ایالات متحده آغاز کرد، و در همین زمان محققان آمریکایی از وجود حفره‌های ماگنترون به‌عنوان ابزاری برای تولید امواج میکروویو با قدرت بالا مطلع شدند. یک مرکز تحقیقاتی جدید در آزمایشگاه اشعه‌ی دانشگاه ام‌آی‌تی^۳ ایجاد شد، و به‌دنبال آن در کمتر از شش ماه، یک رادار ردیابی میکروویو قابل استفاده، که قادر بود در یک هواپیما نصب شود، ساخته شد. سایر سیستم‌های رادار میکروویو برای کنترل آتش توپخانه، بهبود دقت بمباران و آشکارسازی زیردریایی توسعه داده شد. اجزای رادار میکروویو تسخیرشده از هواپیماهای سقوط کرده‌ی بریتانیا و آمریکا، آلمان را منجر به اتخاذ حفره‌های ماگنترون و شروع به ساخت رادارهای میکروویو خود کرد؛ هرچند این رادارها خیلی دیر به یک تأثیر قابل‌توجه در دوران جنگ آمد. در پایان جنگ، فرکانس‌های رادار ۱۰ گیگاهرتز رایج بود.

رادارهای توسعه‌یافته در طول جنگ، به برنامه‌های زمان صلح بعد از آن مبدل شدند. نتایج قابل‌توجه در این میان، دستگاه‌های کمک‌ناوبری برای کشتی‌های تجاری و هواپیماها و علاوه‌براین

^۱ Klystron

^۲ Cavity Magnetron
^۳ MIT

کشتی‌های دارای سیستم حمل بدون برخورد بود. بسیاری از تلاش‌های تحقیقاتی رادار که بعد از جنگ جهانی دوم در اندازه‌های پایین بود، تقویت شده بود. بهبود در حساسیت رادار و کاربرد اندازه‌گیری‌های شیفت فرکانسی (شیفت داپلر^۱) برای تعیین سرعت هدف-که هرگز به صورت واقعی در طول جنگ استفاده نشد-رادارها را قادر ساخت تا احتیاجات مبرم بیشتری را برای اعمال به هواپیماهای جت با سرعت بالا، ببینند. به علاوه، مجموعه‌های رادار به اندازه‌ی کافی کوچک شدند تا در درون موشک‌های هدایت‌شونده قرار داده‌شوند. پیشرفت در الگوریتم‌های پردازش سیگنال، اجازه‌ی توسعه‌ی افزایش برد موثر و بهبود تکنیک‌های عدم پذیرش پارازیت را داد. به صورت قابل توجهی گرایش به کنترل کامپیوتری رادارها و پردازش کامپیوتری داده‌های رادار، به یک "زمینه" در تحقیقات و توسعه‌ی رادار مدرن تبدیل شده است و منجر به یک نیاز برای تحقیقات ریاضی در رادار شده است.

۳,۱ روش‌های ابتدایی تصویربرداری

در پایان سال ۱۹۴۰، روش‌های تصویربرداری رادار در دسترس، به شرح زیر بودند:

۱,۳,۱ شناسایی و محدوده^۲

سیستم‌های راداری فعال، انعکاس مکانی را توسط مخابره‌ی یک موج الکترومغناطیسی و اندازه‌گیری محدوده‌ی منعکس‌شده به عنوان یک ولتاژ متغیربازمان در گیرنده‌ی رادار، به انجام می‌رسانند.

برای درک ایده‌ی اصلی این انعکاس مکانی، یک سیستم رادار ایده‌آل راه‌اندازی شده را در نظر

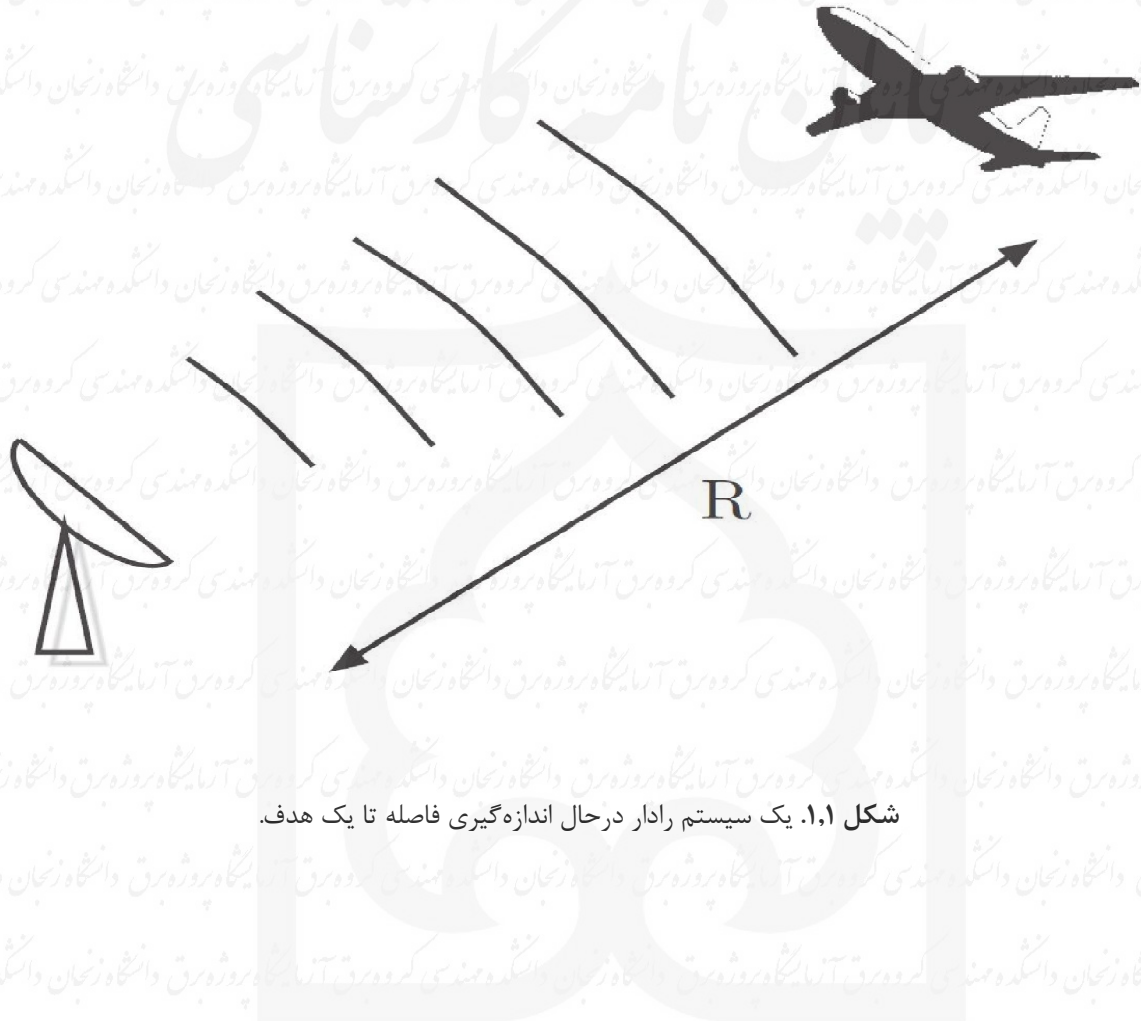
می‌گیریم. در زمان $t = 0$ ، یک پالس کوتاه که با سرعت C حرکت می‌کند، از یک جسم در محدوده‌ی R

منعکس می‌شود، و به رادار برمی‌گردد. اگر پالس بازگشتی را در زمان τ بتوان شناسایی کرد (شکل ۲,۱ را

ببینید)، پس چون $CT = 2R$ (سرعت \times زمان = مسافت رفت و برگشت)، می‌توانیم تعیین کنیم که

¹ Doppler shift
Detection and Ranging

محدوده‌ی R باید برابر با $R = c\tau/2$ باشد. این همان اصل اساسی است که بیشتر تئوری رادار براساس آن بنا نهاده شده است.



شکل ۱.۱. یک سیستم رادار در حال اندازه‌گیری فاصله تا یک هدف.

نتیجه گیری و پیشنهاد:

با در نظر گرفتن شرایط فعلی که در دنیای امروز وجود دارد، لزوم دستیابی به فن‌آوری‌هایی از قبیل ساخت رادار، و به‌طور گسترده‌تر، سنجش از راه دور، احساس می‌شود. لذا ابتدا بایستی به اطلاعات ترکیبی از رشته‌های مختلف، نظیر زمین‌شناسی، مخبرات، هواشناسی و...، دسترسی داشته باشیم، تا بتوانیم به یک تکنولوژی کوچک اما پیچیده دست پیدا کنیم. بنابراین با دسترسی به علوم جدید، علاوه بر بالابردن دید خود نسبت به مسائل علمی مختلف، می‌توانیم در جهت پیشرفت علمی کشور عزیزمان گام برداریم.

نظربه این‌که مباحث مربوط به تصویربرداری رادار بسیار گسترده می‌باشد، مجال پرداختن به همه‌ی

آن‌ها امکان‌پذیر نبود. همچنین در این زمینه، منابع محدود و اکثر آن‌ها در فضای اینترنت است و افراد متخصص در این زمینه در دسترس نبودند.

فهرست منابع و مراجع:

[۱] Margaret Cheney, Brett Borden, "Fundamentals of Radar Imaging", ۲۰۰۹

[۲] R. Baraniuk, P. Steeghs, "Compressive Radar Imaging" in *IEEE Radar Conference*, Waltham, MA, ۲۰۰۷

[۳] J. Bertrand, P. Bertrand, "Microwave Imaging of Time-Varying Targets", ۱۹۹۷

[۴] M. Cheney, R.J. Bonneau, "Imaging that Exploits Multipath Scattering from Point Scatterers", ۲۰۰۴

[۵] J.R. Fienup, "Detecting Moving Targets in SAR Imagery by Focusing", ۲۰۰۱

[۶] J. Garnier, K. Solna, "Coherent Interferometric Imaging for Synthetic Aperture Radar in the Presence of Noise", ۲۰۰۸

[۷] C.J. Nolan, M. Cheney, T. Dowling, R. Gaburro, "Enhanced Angular Resolution from Multiply Scattered Waves", ۲۰۰۶

[۸] R.P. Perry, R.C. DiPietro, R.L. Fante, "SAR Imaging of Moving Targets", *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, ۱۹۹۹

[۹] T. Tsao, M. Slamani, P. Varshney, D. Weiner, H. Schwarzlander, S. Borek, "Ambiguity Function for Radar", ۱۹۹۷