

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی اصفهان  
دانشکده برق و کامپیوتر

## پردازش وقتی فضا-زمان در حوزه داده مستقیم برای رادار هواپایه

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق - مخابرات سیستم

مسعود جلالی

استاد راهنما  
دکتر سید محمود مدرس هاشمی



دانشگاه صنعتی اصفهان  
دانشکده برق و کامپیوتر

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق - مخابرات سیستم آقای مسعود جلالی  
با عنوان

**پردازش وقتی فضا-زمان در حوزه داده مستقیم برای رادار هواپایه**

در تاریخ ۱۳۹۳/۱۰/۲۷ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

دکتر سید محمود مدرس هاشمی

استاد راهنمای پایان نامه

دکتر مجتبی بهشتی

استاد مشاور پایان نامه

دکتر محمدعلی خسروی فرد

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده

## مشکر و قدردانی

سپاس بی‌کران پروردگاری که تا راکه، هستی مان، بخشد و به طریق علم و دانش، رهنمونان شود به، همشینی رهروان علم و دانش مفتخرمان نمود و خوشه‌چینی از علم و معرفت را روزمان ساخت.

بدون شک جایگاه و منزلت معلم، اجل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی‌شائبه او، بازبان قاصود دست

ناتوان، چیزی بخاریم.

اما از آنجایی که تجلیل از معلم، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تا این می‌کند و سلامت امانت‌هایی را که به دستش سپرده اند، تضمین؛ بر حسب وظیفه و از باب "من لم یشکر المنعم من المخلوقین لم یشکر الله عزوجل"

از استاد با کمال، شایسته و دل‌سوز؛ جناب آقای دکتر مدرس هاشمی که در کمال سه‌صدر، با حسن خلق و فروتنی، از بیچ‌لکی در این عرصه بر من دریغ نمودند و زحمت راه‌نمایی این پایان‌نامه را بر عهده گرفتند و علاوه بر علم، از ایشان درس‌های زیادی در زندگی آموختم؛

از استاد کرامت‌دار، جناب آقای دکتر بهشتی، که زحمت مشاوره این پایان‌نامه را متقبل شدند؛

و از اساتید محترم؛ جناب آقای دکتر دوست‌حسینی و جناب آقای دکتر صباحی که زحمت داوری این پایان‌نامه را متقبل شدند؛

از پدر و مادر عزیزم که همواره بر کوتاهی و درستی من، قلم‌عشو کشیده و کریمانه از کنار غفلت‌هایم گذشته‌اند و در تمام عرصه‌های زندگی

یار و یاور من بوده‌اند؛ کمال مشکر و قدردانی را دارم.

در اینجا لازم می‌دانم از اساتید محترم دانشکده و به‌ویژه جناب آقای دکتر نقش‌به‌خاطر آنچه از علم خود در اختیار من گذاشتند،

مشکر کنم.

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،  
ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع  
این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به

- محضر پدر و مادر عزیزم به خاطر همه تلاش‌های محبت‌آمیزی که در دوران مختلف زندگی ام انجام داده‌اند و با مهربانی چگونه زیستن را به من آموخته‌اند.  
- به معلمان و استادان فرزانه و فریخته‌ای که در راه کسب علم و معرفت مرایاری نمودند.  
- به آنان که دعای خیرشان بدرقه راهم بود.

پروردگار احسن عاقبت، سلامت و سعادت را برای آنان مقدر نما.

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
هشت	فهرست مطالب
یازده	فهرست شکل ها
چهارده	فهرست جدول ها
۱	چکیده

### فصل اول: مقدمه

۲	۱-۱- ضرورت پردازش وقتی فضا-زمان در رادار و تاریخچه موضوع
۴	۲-۱- پردازش وقتی فضا-زمان در SLAR
۹	۳-۱- هدف و ساختار پایان نامه

### فصل دوم: پردازش وقتی فضا-زمان در رادار هواپایه

۱۱	۱-۲- مقدمه
۱۲	۲-۲- شکل دهی پرتو فضایی (زاویه ای) بهینه
۱۶	۳-۲- پردازش زمانی بهینه
۱۷	۴-۲- پردازش وقتی فضا-زمان بهینه در رادار هواپایه
۱۹	۱-۴-۲- مدل هدف
۱۹	۲-۴-۲- مدل جمر
۲۰	۳-۴-۲- مدل نویز حرارتی گیرنده
۲۱	۴-۴-۲- مدل کلاتر زمین
۲۵	۵-۴-۲- توصیف توأم کلاتر، جمر و نویز
۲۷	۵-۲- شبیه سازی STAP بهینه
۳۳	۶-۲- نتیجه گیری

### فصل سوم: روش های آماری پردازش وقتی فضا-زمان

۳۴	۱-۳- مقدمه
۳۶	۲-۳- روش های STAP کاهش رتبه یافته مستقل از داده
۳۷	۱-۲-۳- STAP کاهش رتبه یافته پیش داپلری (مستقل از سیگنال): DPCA و ADPCA
۳۹	۲-۲-۳- STAP کاهش رتبه یافته پس داپلری (وابسته به سیگنال)
۴۰	۳-۲-۳- تبدیل های خطی دیگر کاهش رتبه
۴۲	۳-۳- روش های STAP کاهش رتبه یافته وابسته به داده

۴۲	..... روش های مستقل از سیگنال..... ۱-۳-۳
۴۴	..... روش های وابسته به سیگنال..... ۲-۳-۳
۴۶	..... مقایسه روش های کاهش رتبه وابسته به داده..... ۳-۳-۳
۴۶	..... روش های کواریانس ساخت یافته و مبتنی بر مدل..... ۴-۳-۳
۴۶	..... روش CMT..... ۱-۴-۳
۴۷	..... روش های دیگر کواریانس ساخت یافته..... ۲-۴-۳
۴۸	..... ترکیب روش های STAP کاهش رتبه یافته برای رسیدن به عملکرد SINR بهتر..... ۵-۳
۴۸	..... روش مستقل از سیگنال..... ۱-۵-۳
۴۹	..... روش وابسته به سیگنال..... ۲-۵-۳
۵۰	..... STAP مبتنی بر دانش..... ۶-۳
۵۱	..... نتیجه گیری..... ۷-۳

#### فصل چهارم: پردازش وقتی فضا-زمان در حوزه داده مستقیم ( $D^3$ STAP)

۵۲	..... مقدمه..... ۱-۴
۵۴	..... روش $D^3$ یک بعدی..... ۲-۴
۵۵	..... پردازشگر مقدار ویژه تعمیم یافته..... ۱-۲-۴
۵۷	..... پردازشگر رو به جلو..... ۲-۲-۴
۶۰	..... پردازشگر رو به عقب..... ۳-۲-۴
۶۰	..... پردازشگر رو به جلو-رو به عقب..... ۴-۲-۴
۶۰	..... پردازش وقتی فضا-زمان به روش حوزه داده مستقیم ( $D^3$ STAP)..... ۳-۴
۶۲	..... پردازشگر فضا-زمان مقدار ویژه تعمیم یافته..... ۱-۳-۴
۶۲	..... پردازشگر فضا-زمان رو به جلو..... ۲-۳-۴
۶۴	..... پردازشگر فضا-زمان رو به عقب..... ۳-۳-۴
۶۵	..... پردازشگر فضا-زمان رو به جلو-رو به عقب..... ۴-۳-۴
۶۵	..... شبیه سازی $D^3$ STAP..... ۴-۴
۶۵	..... فرض ها و پارامترهای شبیه سازی..... ۱-۴-۴
۶۷	..... نتایج شبیه سازی..... ۲-۴-۴
۶۹	..... استفاده از $D^3$ در حضور بیش از یک هدف..... ۵-۴
۶۹	..... شکل دهی پرتو به روش $D^3$ برای دو هدف..... ۱-۵-۴
۷۱	..... روش $D^3$ STAP برای دو هدف..... ۲-۵-۴



- ۶-۴ - جلوگیری از افت کارایی روش  $D^3$  در حضور خطا در اطلاعات هدف ..... ۷۴
- ۶-۴-۱ - روش اول: قرار دادن چند قید روی پرتو اصلی ..... ۷۴
- ۶-۴-۲ - روش دوم: اصلاح تخمین پارامترهای هدف با استفاده از ویژگی حداقل نرم بردار وزن ..... ۷۵
- ۶-۴-۳ - روش سوم: پیاده‌سازی مقاوم روش  $D^3$  به صورت یک مسأله بهینه‌سازی محدب ..... ۷۶
- ۶-۴-۷ - نتیجه‌گیری ..... ۸۲

#### فصل پنجم: پیشنهاد دو روش به منظور بهبود کارایی روش‌های $D^3$ مرسوم

- ۵-۱ - مقدمه ..... ۸۳
- ۵-۲ - پیشنهاد بکارگیری روش LSMR در پردازشگر رو به جلو ..... ۸۴
- ۵-۳ - پیشنهاد اضافه نمودن قید روی ISL ..... ۹۰
- ۵-۳-۱ - روش پیشنهادی برای کاهش گلبرگ‌های فرعی در شکل‌دهی پرتو به روش  $D^3$  ..... ۹۰
- ۵-۴ - نتیجه‌گیری ..... ۹۶

#### فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

- ۶-۱ - نتیجه‌گیری ..... ۹۸
- ۶-۲ - پیشنهادها ..... ۱۰۰

#### پیوست: روش‌های تکراری حل معادله ماتریسی خطی

- ۱- مقدمه ..... ۱۰۱
- ۲- فرآیند لنگزس ..... ۱۰۱
- ۲-۱ - روش گرادیان مزدوج ..... ۱۰۲
- ۲-۲ - روش حداقل باقیمانده ..... ۱۰۳
- ۳- فرآیند گلوب-کاهان ..... ۱۰۳
- ۳-۱ - روش LSQR ..... ۱۰۴
- ۳-۲ - روش LSMR ..... ۱۰۵
- ۶-۱۰ - مراجع ..... ۱۰۶

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: ارسال و دریافت پالس توسط رادار ..... ۵
- شکل ۲-۱: مکعب داده ..... ۵
- شکل ۳-۱: شکل دهنده پرتو فضا-زمان (زاویه-داپلر) ..... ۶
- شکل ۱-۲: شکل دهنده پرتو وقتی ULA [۹] ..... ۱۳
- شکل ۲-۲: پاسخ شکل دهنده پرتو ULA که به زاویه  $\theta_0 = 30^\circ$  نسبت به خط دید رادار هدایت شده است [۹] ..... ۱۴
- شکل ۳-۲: ترکیب کننده خطی یکنواخت بازتاب شیفتر داپلر یافته پالس‌های ارسالی یک آنتن [۹] ..... ۱۷
- شکل ۴-۲: بلوک دیاگرام پردازشگر فضا-زمان [۳] ..... ۱۹
- شکل ۵-۲: نمایش ماتریس کواریانس بلوکی-قطری جمر ..... ۲۱
- شکل ۶-۲: نمایش حلقه هم فاصله کلاتر در SLAR با آرایه یکنواخت خطی [۹] ..... ۲۲
- شکل ۷-۲: طیف زاویه-داپلر (فضا-زمان) کلاتر زمین در رادار هواپایه ..... ۲۳
- شکل ۸-۲: چگالی طیف توان (مبتنی بر فوریه) برای چهار مقدار متفاوت  $\beta$  ..... ۲۶
- شکل ۹-۲: طیف به دست آمده از تخمین گر طیف توان مبتنی بر فوریه برای تداخل (اعم از کلاتر و جمر) ..... ۲۸
- شکل ۱۰-۲: نمای بالای صفحه زاویه-داپلر در شکل ۹-۲ ..... ۲۸
- شکل ۱۱-۲: طیف به دست آمده از تخمین گر طیف توان با حداقل واریانس برای تداخل (اعم از کلاتر و جمر) ..... ۲۹
- شکل ۱۲-۲: نمای بالای صفحه زاویه-داپلر در شکل ۱۱-۲ ..... ۲۹
- شکل ۱۳-۲: الگوی پرتو زاویه-داپلر پس از پردازش STAP ..... ۳۰
- شکل ۱۴-۲: نمای بالای صفحه زاویه-داپلر در شکل ۱۳-۲ ..... ۳۰
- شکل ۱۵-۲: فاکتور بهبود (IF) در کل زاویه‌ها و فرکانس‌های داپلر ..... ۳۲
- شکل ۱۶-۲: فاکتور بهبود (IF) در زاویه 101 درجه و کل فرکانس‌های داپلر ..... ۳۲
- شکل ۱-۳: طبقه بندی الگوریتم‌های STAP وقتی کاهش بعد یافته [۹] ..... ۳۵
- شکل ۲-۳: مقایسه پردازش فضا زمان بهینه با یک روش یک بعدی غیر وقتی فاکتوری [۹] ..... ۳۷
- شکل ۳-۳: نمایش مفهوم DPCA برای ULA ایده آل [۹] ..... ۳۷
- شکل ۴-۳: حذف کننده MTI دوپالسی DPCA و بانک فیلتر داپلری [۹] ..... ۳۸
- شکل ۵-۳: مقایسه کارایی ADPCA در حالت وجود هر دو عدم تطابق  $\beta$  و کانال با DPCA ایده آل و STAP بهینه [۹] ..... ۳۹
- شکل ۶-۳: شکل دهنده پرتو STAP پس داپلری تک سلولی [۹] ..... ۳۹
- شکل ۷-۳: کارایی STAP پس داپلری تک سلول [۹] ..... ۴۰
- شکل ۸-۳: کارایی STAP پس داپلری چند سلولی (سه سلول) [۹] ..... ۴۱
- شکل ۹-۳: تحلیل KLT بانک فیلتر و تجزیه به کار رفته در روش PC [۹] ..... ۴۳
- شکل ۱۰-۳: ساختار حذف کننده گلبرگ فرعی فضا-زمان [۹] ..... ۴۵

شکل ۳-۱۱: اولین طبقه MWF [۹]	۴۵
شکل ۳-۱۲: فیلتر وینر دو طبقه [۹]	۴۶
شکل ۳-۱۳: عملکرد کاهش رتبه به صورت تابعی از مرتبه فیلتر [۹]	۴۷
شکل ۳-۱۴: مقایسه روش های ADPCA سه پالسی و پس داپلری سه سلولی با حالت بهینه [۹]	۴۹
شکل ۳-۱۵: نمایش مقاوم بودن CMT در برابر خطا [۹]	۴۹
شکل ۳-۱۶: افت SINR نسبت به روش پس داپلری سه سلولی ایده آل (کواریانس معلوم) بر حسب تعداد طبقات روش MWF و تعداد نمونه آموزشی [۹]	۵۰
شکل ۴-۱: چگونگی اعمال ضرایب فیلتر فضا-زمان STAP به آرایه	۵۴
شکل ۴-۲: آرایه ULA	۵۵
شکل ۴-۳: بردار داده دریافتی المان های آرایه در سلول برد تحت آزمون	۵۶
شکل ۴-۴: مقایسه الگوی پرتوی روش LSQR با روش CG [۴۴]	۵۹
شکل ۴-۵: ماتریس فضا-زمان داده (برشی از مکعب داده در سلول برد $l$ ام)	۶۱
شکل ۴-۶: طیف توان سیگنال ورودی [۵]	۶۶
شکل ۴-۷: الگوی پرتو خروجی در روش رو به جلو [۵]	۶۷
شکل ۴-۸: الگوی پرتو خروجی در روش رو به عقب [۵]	۶۸
شکل ۴-۹: الگوی پرتو خروجی در روش رو به جلو-رو به عقب [۵]	۶۸
شکل ۴-۱۰: بردار داده دریافتی المان های آرایه در سلول برد تحت آزمون	۷۰
شکل ۴-۱۱: الگوی پرتو روش $D^3$ رو به جلو برای دو هدف	۷۲
شکل ۴-۱۲: الگوی پرتو روش $D^3$ رو به جلو-رو به عقب در حالت دو هدفی [۵۰]	۷۳
شکل ۴-۱۳: مقدار نرم بردار وزن در زوایا و داپلرهای فرضی هدف در محدوده پرتو اصلی [۵۴]	۷۶
شکل ۴-۱۴: منحنی تغییرات نرم خطای بردار هدایت هدف [۵۵]	۷۸
شکل ۴-۱۵: مقایسه الگوی پرتو تطبیق یافته در بدترین حالت [۵۵]	۷۹
شکل ۴-۱۶: چگونگی سلول بندی صفحه زاویه داپلر در مد جستجو [۵۵]	۸۱
شکل ۴-۱۷: بلوک دیاگرام روش 2D-RFW در مد جستجو [۵۵]	۸۲
شکل ۵-۱: الگوی پرتو زاویه-داپلر روش مرسوم در چیدمان اول	۸۶
شکل ۵-۲: الگوی پرتو زاویه-داپلر روش پیشنهادی در چیدمان اول	۸۶
شکل ۵-۳: الگوی پرتو زاویه ای دو روش در زاویه هدف در چیدمان اول	۸۷
شکل ۵-۴: الگوی پرتو داپلری دو روش در داپلر هدف در چیدمان اول	۸۷
شکل ۵-۵: الگوی پرتو زاویه-داپلر روش مرسوم در چیدمان دوم	۸۸
شکل ۵-۶: الگوی پرتو زاویه-داپلر روش پیشنهادی در چیدمان دوم	۸۸
شکل ۵-۷: الگوی پرتو زاویه ای دو روش در زاویه هدف در چیدمان دوم	۸۹

- شکل ۵-۸: الگوی پرتو داپلری دو روش در داپلر هدف در چیدمان دوم..... ۸۹
- شکل ۵-۹: مقایسه الگوی پرتو تطبیق یافته دو روش در چیدمان اول..... ۹۳
- شکل ۵-۱۰: مقایسه الگوی پرتو تطبیق یافته دو روش در چیدمان دوم..... ۹۴
- شکل ۵-۱۱: مقایسه الگوی پرتو تطبیق یافته دو روش در چیدمان دوم..... ۹۶

## فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۴: پارامترهای شبیه‌سازی	۶۶
جدول ۲-۴: پارامترهای شبیه‌سازی	۶۶
جدول ۳-۴: فرکانس داپلر و زاویه ورود منابع تداخل گسسته	۶۶
جدول ۴-۴: پارامترهای شبیه‌سازی	۷۱
جدول ۵-۴: پارامترهای شبیه‌سازی	۷۸
جدول ۱-۵: پارامترهای شبیه‌سازی در چیدمان اول	۸۵
جدول ۲-۵: مشخصات منابع تداخل گسسته در چیدمان اول	۸۵
جدول ۳-۵: پارامترهای شبیه‌سازی در چیدمان اول	۹۲
جدول ۴-۵: پارامترهای الگوی پرتوی تطبیق یافته	۹۲
جدول ۵-۵: مقدار الگوی پرتو در زاویه ورود تداخل (بر حسب dB)	۹۳
جدول ۶-۵: پارامترهای شبیه‌سازی در چیدمان دوم	۹۴
جدول ۷-۵: پارامترهای الگوی پرتوی تطبیق یافته	۹۴
جدول ۸-۵: مقدار الگوی پرتو در زاویه ورود تداخل (بر حسب dB)	۹۵
جدول ۹-۵: پارامترهای شبیه‌سازی در چیدمان سوم	۹۵
جدول ۱۰-۵: پارامترهای الگوی پرتوی تطبیق یافته	۹۶
جدول ۱۱-۵: مقدار الگوی پرتو در زاویه ورود تداخل (بر حسب dB)	۹۶

## چکیده

در رادارهای هواپایه به دلیل حرکت سکو، سرعت نسبی زمین و رادار و در نتیجه شیفت داپلر کلاتر زمین صفر نیست. در رادارهای آرایه فازی هواپایه کنارانگر بین فرکانس داپلر و زاویه ورود نرمالیزه قطعات کلاتر زمین، رابطه خطی وجود دارد. از طرفی در صورت استفاده از این رادارها در مد GMTI، کلاتر زمین در محدوده وسیعی از زوایا از گلبرگ‌های فرعی الگوی پرتو وارد رادار می‌شود. بنابراین طیف کلاتر زمین دو بعدی شده و در راستای خطی در صفحه زاویه-داپلر قرار می‌گیرد. بنابراین روش‌های پردازش یک بعدی مرسوم مانند شکل دهی پرتو و پردازش داپلری به تنهایی قادر به حذف کلاتر نیستند و باید از روش‌های پردازش مشترک فضایی و زمانی مانند STAP استفاده شود. فیلتر STAP شکاف باریکی در راستای طیف دو بعدی کلاتر زمین ایجاد می‌کند. بنابراین کلاتر حذف شده و اهداف کند در باند عبور این فیلتر قرار می‌گیرند. روش‌های STAP به دو دسته آماری و غیر آماری تقسیم می‌شوند. در این پایان نامه پس از مروری بر روش‌های آماری، یکی از مهمترین روش‌های غیر آماری به نام روش حوزه داده مستقیم ( $D^3$ ) و انواع آن بررسی شده است. این روش، مزایای متعددی نسبت به روش‌های آماری دارد. از جمله می‌توان به عدم نیاز به داده ثانویه و تخمین آمارگان تداخل، عملکرد خوب در محیط‌های ناهمگن و توانایی حذف تداخل گسسته اشاره کرد. برخی از معایب روش  $D^3$  کاهش درجات آزادی، عملکرد بد در حذف تداخل همگن و گلبرگ‌های فرعی بالای الگوی پرتو است. برای حل معادله ماتریسی خطی روش  $D^3$  مرسوم تا کنون از روش تکراری گرادیان مزدوج (CG) استفاده شده است. در این روش در SNRهای پایین، الگوی پرتو جابجا شده و در راستای هدف بهره یک ایجاد نمی‌گردد. در این پایان نامه روشی تکراری برای حل مسئله  $D^3$  پیشنهاد شده است که مستقل از مقدار SNR، الگوی پرتو مناسبی با بهره یک در راستای هدف ایجاد می‌کند. همچنین برای کمینه کردن گلبرگ‌های فرعی روش  $D^3$ ، در این پایان نامه مسئله بهینه‌سازی محدبی طراحی شده و روشی تحلیلی برای حل آن ارائه شده است. هر چند این روش بر اساس معیار ISL گلبرگ‌های فرعی را کاهش می‌دهد ولی شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که گلبرگ‌های فرعی الگوی پرتو در آن با معیارهای پهنای پرتوی نیم توان و PSL نیز از روش  $D^3$  مرسوم بهتر است. مزیت دیگر این روش ایجاد نول عمیق‌تر در محل تداخل است.

**کلمات کلیدی:** رادار هواپایه، کلاتر زمین، پردازش وقتی-فضا-زمان، حوزه داده مستقیم

## فصل اول

### مقدمه

#### ۱-۱- ضرورت پردازش وقتی فضا-زمان در رادار و تاریخچه موضوع

مهمترین وظیفه یک سیستم راداری معمولاً آشکارسازی و تعیین مشخصات اهداف است. رادار امواج الکترومغناطیسی را در فضا منتشر می‌کند. سپس بازتاب سیگنال‌های ارسالی را دریافت کرده و با پردازش آن، فرآیند آشکارسازی اهداف را انجام می‌دهد. سپس پارامترهای مهم اهداف مانند برد، سرعت و موقعیت زاویه‌ای استخراج می‌شود. برای آشکارسازی و استخراج پارامترهای اهداف معمولاً عوامل مزاحمی وجود دارد که نویز حرارتی گیرنده رادار، جمر<sup>۱</sup> و کلاتر از مهمترین آن‌ها هستند. جمر، تداخلی عمدی است که از طرف دشمن برای جلوگیری از آشکارسازی یا تخمین درست پارامترهای اهداف ایجاد می‌شود. کلاتر، بازتاب‌های ناخواسته از محیط عملیاتی رادار هستند. به دلیل اینکه این بازتاب‌ها عموماً از بازتاب‌های اهداف قوی‌تر هستند، حذف کلاتر مهمترین دغدغه طراحان رادار است. نوع و ویژگی‌های کلاتر با توجه به مکان استفاده، ساختار فرستنده و گیرنده و مأموریت یک سیستم راداری متفاوت است. در این پایان نامه روش‌های پردازش وقتی فضا-زمان<sup>۲</sup> در رادارهای هواپایه کنارنگر<sup>۳</sup> آرایه فازی در کاربردهای جستجو<sup>۴</sup> و ردیابی<sup>۵</sup> مد نظر قرار گرفته است و مشخصات کلاتر متناسب با این کاربرد در نظر گرفته می‌شود.

---

<sup>۱</sup> Jammer

<sup>۲</sup> Space Time Adaptive Processing (STAP)

<sup>۳</sup> Side-Looking Airborne Radar (SLAR)

<sup>۴</sup> Search

<sup>۵</sup> Track

پردازش وقتی فضا-زمان یک روش فیلتر کردن در حوزه مشترک زاویه-داپلر است که در رادارهای جستجو پالس-داپلر دارای آنتن آرایه فازی به کار می‌رود [۱]. STAP تعمیم شکل دهی وقتی دیجیتال پرتو<sup>۱</sup> به دو بعد است و یک فناوری مهم در رادارهای جستجوگر هواپایه‌ای است که قصد آشکارسازی اهداف را در حضور بازتابهای کلاتر ایستان دارند. در ADBF و STAP، پردازشگر وزن‌ها را تغییر می‌دهد تا متناسب با تغییر تداخل محیط، نسبت سیگنال به تداخل و نویز<sup>۲</sup> را در خروجی پردازشگر بیشینه کند [۲]. در ابتدا STAP برای رادار هواپایه چندکاناله و به منظور تشخیص هدف متحرک اختراع شده است ولی در بسیاری از کاربردهای دیگر هم که پردازش وقتی مشترک زمانی و فضایی مفید است، به کار می‌رود [۳ و ۴]. در رادارهای فضاپایه، ماوراء افق<sup>۳</sup> و UWB<sup>۴</sup> و در کاربردهای صوت شناسی و لرزه نگاری و در سونار فعال نیز این روش به کار می‌رود [۵].

استفاده از STAP باعث حذف همزمان کلاتر و جمر می‌شود ولی مزیت اصلی آن نسبت به روش‌های MTI مرسوم، قابلیت آن در آشکارسازی اهداف زمینی متحرک با سرعت کم است. به دلیل سرعت پائین، شیفت داپلر این گونه اهداف به کلاتر گلبرگ اصلی نزدیک است و نمی‌توان بازتاب آن‌ها را فقط با استفاده از اطلاعات داپلر، از کلاتر زمین تشخیص داد. نیاز به پردازش مشترک زمان و فضا در رادارهای MTI هواپایه<sup>۵</sup> و فضاپایه از طبیعت دوبعدی کلاتر زمین ناشی می‌شود. اگر سکوی رادار ثابت باشد و از حرکت داخلی کلاتر<sup>۶</sup> نیز صرف نظر شود، کلاتر زمین شیفت داپلری نداشته و می‌توان آن را با یک فرآیند یک بعدی ساده توصیف کرد که در این صورت فیلتر کردن کلاتر زمین به سادگی با حذف سیگنال‌های موجود در فرکانس داپلر صفر میسر بوده [۶] و لذا با جستجوی حضور سیگنالها در فیلترهای داپلر باقیمانده، اهداف متحرک آشکار می‌شوند. اما در رادارهای هواپایه به دلیل حرکت سکوی، سرعت نسبی رادار و زمین صفر نبوده و شیفت داپلر کلاتر زمین صفر نیست و شیفت داپلر نرمالیزه شده هر قطعه کلاتر<sup>۷</sup> زمین در رادارهای هواپایه کنارنگر با زاویه ورود نرمالیزه شده آن رابطه خطی دارد. بنابراین مؤلفه داپلر کلاتر به زاویه ورود<sup>۸</sup> کلاتر به آنتن رادار وابسته می‌شود. با توجه به گستردگی زمین، بازتاب‌های آن از محدوده وسیعی از زوایا وارد آنتن می‌شوند. در نتیجه طیف کلاتر زمین در محور داپلر پهن شده و با بازتاب‌های اهداف زمینی تداخل می‌کند. بنابراین در رادارهای هواپایه نمی‌توان فقط با توجه به فرکانس داپلر، کلاتر زمین را فیلتر کرد. پردازشگر STAP سیگنال را در حوزه مشترک زاویه-داپلر (فضا-زمان) فیلتر می‌کند تا بتواند با حذف اثر کلاتر و جمر SINR را بیشینه کرده و اهداف

<sup>1</sup> Adaptive Digital Beamforming (ADBF)

<sup>2</sup> Signal to Interference plus Noise Ratio (SINR)

<sup>3</sup> Over The Horizon (OTH)

<sup>4</sup> Ultra wideband

<sup>5</sup> Airborne Moving Target Indication (AMTI)

<sup>6</sup> Inter Clutter Motion (ICM)

<sup>7</sup> Clutter Patch

<sup>8</sup> Angle Of Arrival (AOA)



زمینی با سرعت کم را آشکار کند [۷]. به عبارت دیگر، هدف پردازش فضا-زمان در SLAR قراردادن نول<sup>۱</sup> در مکان های مناسبی در الگوی پرتو<sup>۲</sup> زاویه-دایر است تا بتواند کلاتر و جمر را تضعیف کرده و حذف کند [۳و۴].

به دلیل وجود این رابطه خطی بین موقعیت زاویه‌ای و فرکانس دایر کلاتر در رادارهای هواپایه کنارنگر و برقرار نبودن چنین رابطه‌ای در رادارهای هواپایه جلونگر<sup>۳</sup>، در ابتدا کاربرد STAP صرفاً فیلتر کردن کلاتر در SLAR بود ولی بعدها در [۸] از این الگوریتم برای آشکارسازی اهداف با سرعت کم در FLAR نیز استفاده شد. البته در این پایان نامه فقط هندسه SLAR مد نظر قرار گرفته است.

رابطه خطی مذکور ضرورت پردازش دوبعدی را نشان می‌دهد ولی نیاز به وقتی بودن این پردازش را مشخص نمی‌کند. در ابتدا ممکن است به نظر برسد که چون می‌توان جهت گیری نسبی رادار و سطح زمین را از طریق سیستم های ناوبری اینرسی<sup>۴</sup> و سیستم موقعیت یابی جهانی<sup>۵</sup> و همچنین توپولوژی اولیه زمین و نقشه کلاتر به دست آورد، پس به راحتی می‌توان یک نول مشخص را در جهت پیش بینی شده کلاتر ایجاد کرد ولی متأسفانه در عمل بسیاری از عوامل مانند عدم تطابق کانال<sup>۶</sup>، غیر یکنواختی<sup>۷</sup> و نایستانی<sup>۸</sup> کلاتر، ICM و نشت زیرفضایی کلاتر<sup>۹</sup>، کارایی این روش را شدیداً کاهش می‌دهد. این مسائل نیاز به وقتی بودن پردازش‌ها در این حوزه را سبب شده، و استفاده از پردازش وقتی فضا-زمان را ضروری می‌نمایند [۹].

## ۲-۱- پردازش وقتی فضا-زمان در SLAR

طبق شکل ۱-۱ پس از ارسال یک پالس با عرض  $\tau$  توسط N المان آرایه، فرستنده رادار هواپایه تا ارسال پالس بعدی خاموش شده و رادار در مد گیرندگی در زمان T ثانیه به فواصل زمانی  $\tau$  از سیگنال دریافتی L نمونه برمی‌دارد. این کار برای همه M پالس ارسالی انجام می‌شود و در نهایت NML داده مطابق شکل ۲-۱ در آرایه سه بعدی به نام مکعب داده ذخیره می‌شود. در این شکل سلول‌های برد نزدیک‌تر به سلول تحت آزمون<sup>۱۰</sup>، سلول‌های محافظ<sup>۱۱</sup> نامیده شده و به داده بقیه سلول‌ها، داده ثانویه گفته می‌شود.

<sup>1</sup> Null

<sup>2</sup> Adaptive Weight Pattern

<sup>3</sup> Forward-Looking Airborne Radar (FLAR)

<sup>4</sup> Inertial Navigation Systems (INS)

<sup>5</sup> Global Positioning Systems (GPS)

<sup>6</sup> Channel Mismatch

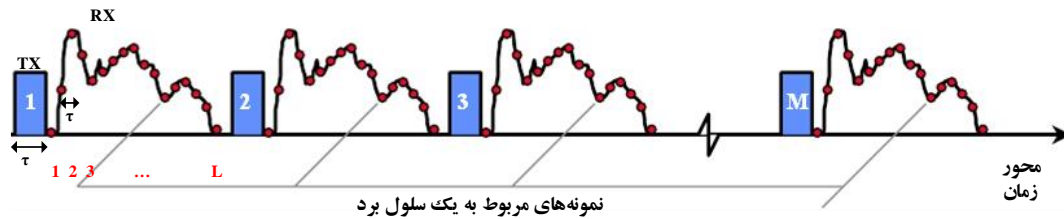
<sup>7</sup> Heterogeneity

<sup>8</sup> Nonstationarity

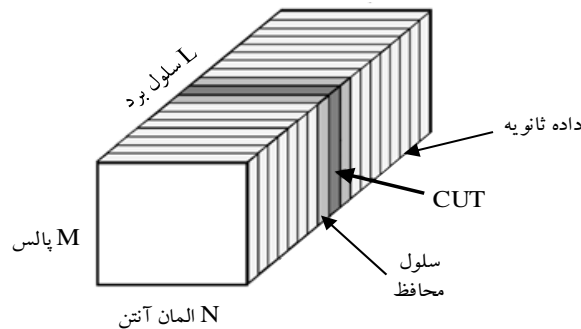
<sup>9</sup> Interference Subspace Leakage (ISL)

<sup>10</sup> Cell Under Test (CUT)

<sup>11</sup> Guard Cells



شکل ۱-۱: ارسال و دریافت پالس توسط رادار



شکل ۲-۱: مکعب داده

شکل ۳-۱ ساختار شماتیک یک شکل دهنده پرتو<sup>۱</sup> STAP را نشان می‌دهد که شامل  $N$  کانال (المان) مستقل و  $M$  پالس یک دوره پردازشی همدوس<sup>۲</sup> است. در این شکل سلول برد  $l$  ام، سلول تحت آزمون (CUT) فرض شده است. داده این سلول در ماتریسی به نام  $X$  ذخیره شود. به ترتیب از چپ به راست با زیر هم قرار دادن ستون‌های ماتریس داده CUT، بردار  $x$  ایجاد می‌شود. الگوی پرتو زاویه-داپلر مناسب با انتخاب صحیح وزن‌های مختلط ترکیب کننده خطی  $(w_1, \dots, w_{NM})$  به دست می‌آید [۳ و ۴]. ترکیب کننده خطی از این نوع  $NM$  درجه آزادی<sup>۳</sup> دارد. بنابراین علاوه بر ایجاد بهره در راستای زاویه-داپلر سیگنال دریافتی از هدف (یا سیگنال مطلوب<sup>۴</sup>)، می‌تواند تا  $NM-1$  عدد نول نیز در مکان‌های مختلف ایجاد کند. سیگنال هدف در گیرنده رادار هواپایه با  $s$  نشان داده شده و با برداری  $NM-1$  به نام بردار هدایت فضا-زمان<sup>۵</sup> (زاویه-داپلر) هدف مدل می‌شود.

با اینکه بسیاری از روش‌های مورد بحث در این پایان نامه به آسانی به حالت آرایه غیریکنواخت یا غیرخطی و فرکانس تکرار پالس<sup>۶</sup> متغیر قابل تعمیم‌اند ولی برای سهولت در تحلیل، راداری با آرایه یکنواخت خطی<sup>۷</sup> با  $N$  المان و

<sup>1</sup> Beamformer

<sup>2</sup> Coherent Processing Interval (CPI)

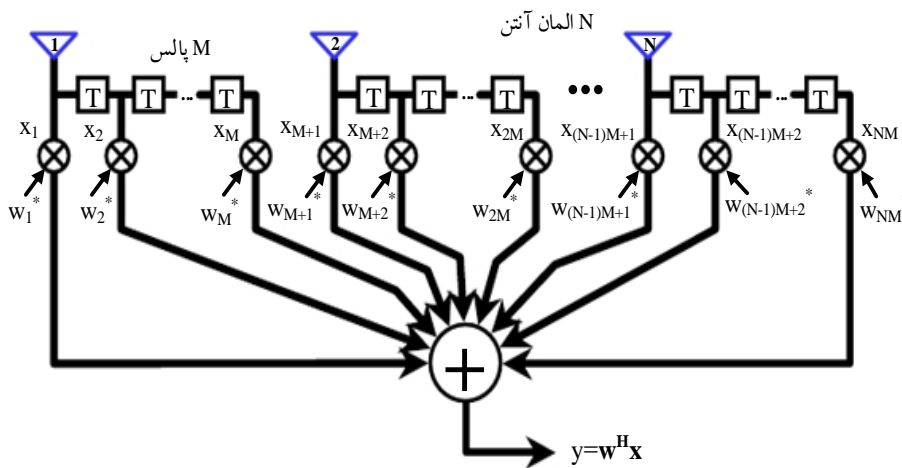
<sup>3</sup> Degree Of Freedom (DOF)

<sup>4</sup> Signal Of Interest (SOI)

<sup>5</sup> Space-Time Steering Vector

<sup>6</sup> Pulse Repetition Frequency (PRF)

<sup>7</sup> Uniform Linear Array (ULA)



شکل ۱-۳: شکل دهنده پرتو فضا-زمان (زاویه-دایر) (شکل ۱-۳)

یک CPI شامل  $M$  پالس با دوره تکرار پالس<sup>۱</sup> ثابت در نظر گرفته شده است.

با فرض حضور هدف و نویز برای بیشینه کردن پاسخ یک موج مسطح باند باریک یکنواخت در یک زاویه و فرکانس دایر معلوم (به عبارت دیگر بیشینه کردن نسبت سیگنال به نویز<sup>۲</sup>)، بردار وزن  $\mathbf{w}$  باید برابر با سیگنال مطلوب  $\mathbf{s}$  انتخاب شود؛ یعنی  $\mathbf{w} = \mathbf{s}$  [۹]. بردار هدایت فضا-زمان (زاویه-دایر) هدف بوده و برداری  $1 \times NM$  بعدی است.

اگر علاوه بر نویز عواملی مانند کلاتر و جمر هم وجود داشته باشد، شکل دهنده پرتو فضا-زمان بهینه به دلیل رفتاری تصادفی آن‌ها از یک روش بهینه‌سازی آماری نتیجه شده [۳ و ۴] و بردار وزن شکل دهنده پرتو بهینه برابر با  $\mathbf{w} = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{s}$  است. بردار وزن بهینه یا فیلتر فضا-زمان STAP است.  $\mathbf{R}$  ماتریس کواریانس تداخل می‌باشد که ماتریس مثبت معین  $NM \times NM$  بعدی متناظر با کل تداخل (کلاتر، جمر و نویزگیرنده) برای سلول برد تحت آزمون است [۳ و ۴]. در پردازشگر STAP بهینه این ماتریس معلوم فرض می‌شود ولی از آنجا که معمولاً از قبل اطلاعات دقیقی از ماتریس کواریانس فضا-زمان تداخل موجود نیست، برای ایجاد نول مناسب در الگوی پرتو زاویه-دایر در محل حضور تداخل باید  $\mathbf{R}$  را از داده آموزشی (داده ثانویه) رادار تخمین زد و دلیل به کارگیری کلمه "وقفی" در عبارت پردازش وقفی فضا-زمان نیز همین ضرورت تخمین  $\mathbf{R}$  در حین حرکت برای سلول‌های برد مختلف است [۳ و ۴].

به طور کلی روش‌های STAP به دو دسته کلی آماری و غیر آماری تقسیم می‌شوند. روش‌های STAP آماری با تخمین ماتریس کواریانس تداخل از روی سلول‌های برد نزدیک به سلول تحت آزمون (یا سلول اولیه<sup>۳</sup>) تداخل را حذف می‌کنند. به این سلول‌ها، داده ثانویه<sup>۴</sup> یا نمونه‌های آموزشی می‌گویند. در این روش‌ها فرض بر آن است که داده ثانویه مورد استفاده برای تخمین آمارگان تداخل همگن است؛ به این معنا که داده ثانویه، مستقل از تداخل موجود در

<sup>۱</sup> Pulse Repetition Interval (PRI)

<sup>۲</sup> Signal to Noise Ratio (SNR)

<sup>۳</sup> Primary Cell

<sup>۴</sup> Secondary Data

CUT بوده و توزیع آماری یکسانی (i.i.d) دارند. در عمل، بیشتر محیط‌ها ناهمگن هستند. به دلیل ناهمگنی کلاتر، ویژگی‌های طیفی آن در بسیاری از نمونه‌های آموزشی با CUT متفاوت بوده و باعث افت کارایی پردازشگر می‌شود. دو منشأ اصلی ناهمگنی، غیر یکنواختی و نایستانی کلاتر است.

غیر یکنواختی کلاتر ناشی از دو عامل تراکم زمینه<sup>۲</sup> و تنوع آن است. هنگامی که رادار هواپایه در حال جستجو در محیطی با عوارض مترکم است (مثلاً در نواحی شهری)، معمولاً در داده‌های آموزشی داده‌هایی وجود دارند که توزیع آماری متفاوتی نسبت به تداخل موجود در سلول تحت آزمون دارند. این داده‌ها، که به داده‌های ناهمخوان<sup>۳</sup> معروفند، در تخمین آمارگان تداخل سلول تحت آزمون خطا ایجاد کرده و باعث افت کارایی می‌شوند. همچنین هنگامی که در محیط پرواز سکوی حامل رادار عوارض متنوعی نظیر خشکی، دریا، کوه، جنگل و نواحی شهری وجود داشته باشد، توان کلاتر در CUT با توان قطعه‌های کلاتر در داده‌های آموزشی یکسان نیست. اگر توان کلاتر CUT بیشتر از سلول‌های مجاور باشد، کلاتر کاملاً حذف نشده و نرخ هشدار کاذب<sup>۴</sup> افزایش می‌یابد. به این پدیده فرو پوچ‌سازی<sup>۵</sup> گفته می‌شود. در حالت دیگر که توان کلاتر CUT کمتر است، هر چند که اثر ناچیزی روی کارایی حذف کلاتر می‌گذارد ولی ممکن است باعث کاهش بهره هدف شود. این حالت فرا پوچ‌سازی<sup>۶</sup> نام دارد.

عامل اصلی نایستانی کلاتر استفاده از هندسه‌های خاص است. مثلاً هنگامی که از هندسه FLAR استفاده می‌شود، یا وقتی که المان‌های آنتن به صورت آرایه هم‌نوا<sup>۷</sup> با آرایش فضایی غیر خطی باشند یا به صورت سه بعدی در فضا قرار گرفته باشند، همچنین هنگامی که به جای استفاده از سکوی تک پایه<sup>۸</sup> از آرایه توزیع شده<sup>۹</sup> دوپایه یا چندپایه استفاده شود، طیف زاویه-دایر کلاتر به برد وابسته شده و در سلول‌های برد مختلف تغییر می‌کند. این تغییرات باعث ناهمگنی داده ثانویه شده و با ایجاد خطا در تخمین ماتریس کواریانس باعث افت کارایی STAP می‌شوند [۱۰].

حداقل باید به میزان دو برابر درجه آزادی سیستم (حاصل ضرب تعداد المان‌های آنتن در تعداد پالس‌های CPI؛ یعنی 2NM) داده ثانویه در دسترس باشد تا بتوان به کارایی STAP بهینه (با فاصله 3dB) نزدیک شد [۱۱]. در عمل در محیط‌های ناهمگنی که آمارگان تداخل، بسرعت در سلول‌های برد مختلف تغییر می‌کند، داده ثانویه i.i.d به میزان کافی در دسترس نیست و تخمین دقیقی از ماتریس کواریانس تداخل به دست نمی‌آید [۱۲] و این در STAP، منجر به جابه‌جایی نول و قرار نگرفتن آن روی محل دقیق تداخل شده و افت میزان SINR در خروجی فیلتر STAP را به دنبال دارد. تاکنون روش‌های مختلفی برای حذف کلاتر در محیط‌های ناهمگن و به حداقل رساندن افت کارایی

<sup>1</sup> Independent and Identically Distributed

<sup>2</sup> Terrain

<sup>3</sup> Outlier Data

<sup>4</sup> False Alarm Rate

<sup>5</sup> Undernulling

<sup>6</sup> Overnulling

<sup>7</sup> Conformal Array

<sup>8</sup> Monostatic

<sup>9</sup> Distributed Array