

دانشگاه تربیت مدرس  
دانشکده فنی و مهندسی

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد مهندسی برق  
(مخابرات)

موضوع

آشکارسازی سیگنال‌های مخابراتی طیف گسترده

نگارش

حمید رضا نیکوفر

استاد راهنما

دکتر حسین علوی

با حمایت پژوهشگاه علوم و تکنولوژی دفاعی

زمستان ۱۳۷۳

۲۰۷

## موضوع

کشف و آشکار سازی سیگنالهای طیف گسترده

## توسط

حمید رضا نیکوفز

## پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد  
رشته مهندسی برق - گرایش مخابرات

از این پایان نامه در تاریخ ۱۳۷۳/۱۲/۲۴ در مقابل هیئت داوران  
دفاع به عمل آمد و مورد تصویب قرار گرفت.

## اعضای محترم هیئت داوران

۱- خانم/آقای دکتر حسین علوی استاد راهنما

۲- خانم/آقای دکتر محمد حسن قاسمیان یزدی استاد مشاور

۳- خانم/آقای دکتر \_\_\_\_\_ استاد مشاور

۴- خانم/آقای دکتر مستغیثه کهریزی استاد ممتحن

۵- خانم/آقای دکتر محمد رضا عارف استاد ممتحن

۶- خانم/آقای دکتر کیوان فرورقی مدیر رابطتهای گرو

م ۷۳۰۹۷۰۴۰۳

تقدیم به:

احسان

سیمین

پارسا

مهسا

نیکتا

گل‌های زندگی خانواده‌ام.

### تقدیر و تشکر:

مؤلف این رساله بر خود لازم می‌داند که از تمام کسانی که در مدت انجام این پایان‌نامه از کمک و راهنمایی آنان بهره‌مند بوده است، تقدیر و تشکر نماید. لذا قبل از همه از استاد ارجمند جناب آقای دکتر سیدحسین علوی که زحمت راهنمایی این پایان‌نامه را تقبل نموده و در طی دو سال همکاری از هیچ تلاشی دریغ ننموده‌اند، کمال تشکر و سپاس را دارم. اینجانب در این پایان‌نامه از راهنمایی‌های ارزنده اساتید ارجمند آقایان دکتر محمدحسن قاسمیان، دکتر محمدرضا عارف، دکتر سعید نادر اصفهانی، دکتر محمد مهدی نائی و دکتر مسعود کهریزی نیز برخوردار بوده‌ام که بدینوسیله از تمامی آنان تشکر می‌نمایم. از دوستان عزیز و گرامی خود آقایان مهندس مسعود مکره‌چی، مهندس علی عبدی، مهندس رضا بیات و مهندس بابک سیف نیز که در مراحل مختلف انجام پایان‌نامه از همکاری و همفکری آنان برخوردار بوده‌ام، کمال تشکر را دارم. همچنین لازم است از جناب آقای دکتر عبدالرضا نبوی ریاست محترم پژوهشکده الکترونیک و مخابرات وابسته به پژوهشگاه علوم و تکنولوژی، جناب آقای مهندس بهرام برنجیان مدیر محترم گروه پژوهشی-ارتباطات و تمامی همکاران خود در این گروه پژوهشی به خاطر فراهم آوردن فضای مناسب و پشتیبانی از این تحقیق تشکر و قدردانی نمایم. همچنین از آقایان حسین اللهیاری و جعفر حلوائی که تایپ این پایان‌نامه را برعهده داشتند، بسیار سپاسگزارم.

با آرزوی سلامتی و سعادت برای همگی اساتید ارجمند، دوستان و همکاران گرامی.

حمیدرضا نیکوفر

اسفند ۷۳

## چکیده:

یکی از اقدامات مهم در شنود سیگنالهای مخابراتی، آشکارسازی حضور آنها است. امروزه در سیستمهای مخابرات نظامی برای ایجاد امنیت در مقابل شنود و پایین آوردن احتمال آشکارسازی حضور سیگنالها، از روشهای مختلف مدولاسیون طیف گسترده استفاده می شود. در این رساله مساله آشکارسازی بهینه حضور سیگنالهای مخابراتی و خصوصاً سیگنالهای با مدولاسیون طیف گسترده، مورد بررسی قرار گرفته است. برای این کار ابتدا وظائف یک گیرنده شنود مطالعه و برای درک بهتر مسائل حوزه امنیت مخابرات مدل پایه ای بنا می فرایند تهدید و امنیت ارائه شده است. سپس به مرور ساختار یافته نظریه آشکارسازی سیگنال پرداخته و مطالعه ای مقایسه ای بین دو معیار مهم حداکثر انحراف و نیمین پیرسون انجام شده است. خصوصاً در همین رابطه نشان داده شده است که اگر چه در رویکرد غیرساختاری هر دو معیار به ساختار بهینه نسبت درستمائی منجر می شوند، اما آمارگان لگاریتم نسبت درستمائی، که اغلب به عنوان آمارگان تشخیص تحقق می یابد، لزوماً دارای حداکثر مقدار انحراف نخواهد بود.

در ادامه با مطالعه ساختار سیگنالهای مخابراتی و با توجه به میزان اطلاعات گیرنده از پارامترها و ویژگیهای ساختاری سیگنال هدف، ابتدا مدلهای مختلفی را برای پارامترها و شکل موجهای نامعلوم سیگنال مطالعه و سپس برای هر کدام از مدلها آشکارساز بهینه در نویز AWGN بدست آورده شده اند. در همین رابطه می توان به ارائه آشکارسازهای جدیدی بر مبنای آزمون GLR برای سیگنالهای مخابرات دیجیتال اشاره کرد که در مقایسه با آشکارسازهای ALR پیشین، دارای ساختار بسیار ساده تری بوده و دارای کارائی مناسبی نیز می باشند. از نکات مهم دیگر این رساله می توان به ارائه تفسیر بهینگی GLR برای آشکارساز انرژی و آشکارسازهای تحلیل طیفی و ارائه آشکارسازهای کانالیزه CHGALR و CHGLR و همچنین درک جایگاه بهینگی آشکارساز معروف CHRAD برای سیگنالهای طیف گسترده جهش فرکانسی اشاره کرد. بحث مهم دیگر، مطالعه آشکارسازهای بر مبنای بازسازی خط طیفی از سیگنالهای مخابراتی، بررسی مبانی نظری و شبیه سازی آنها است.

در این رساله همچنین به مساله حساسیت کارایی آشکارسازها در مقابل تغییر شرایط محیطی از فرض AWGN و تغییر پارامترهای سیگنال هدف از مقادیر نامی مفروض، پرداخته شده است. در این رابطه می توان به تفسیر هندسی ارائه شده برای تخمین گرهای توان نویز NAR و استفاده از آن برای مساله آشکارسازی سیگنال و همچنین محاسبه حساسیت رادیومتر نسبت به مقدار پارامترهای نرخ سمبل و فرکانس حامل یک سیگنال BPSK اشاره کرد. در تمامی این رساله به همراه مبانی نظری و محاسبات تحلیلی، شبیه سازیهای متعددی نیز ارائه شده است.

## فهرست

صفحه	عنوان
۱	فصل اول - مقدمه
۱۰	فصل دوم - مروری بر نظریه آشکارسازی
۱۰	۲-۱ - مقدمه
۱۱	۲-۲ - مساله بهینه‌سازی آماری
۱۳	۲-۳ - آزمون فرض دوتایی
۱۵	۲-۴ - معیارهای بهینگی در آزمون فرض دوتایی
۱۷	۲-۴-۱ - معیار نیمین پیرسون
۲۰	۲-۴-۲ - معیار حداکثر انحراف
۲۱	۲-۵ - توصیف و مقایسه کارایی آشکارسازها
۲۶	۲-۶ - مدل کردن سیگنال و نویز

فصل سوم - سیگنالهای مخابراتی: مروری بر ساختار، ویژگیها

۲۹	و آشکارسازهای رایج
۲۹	۳-۱- مقدمه
۳۱	۳-۲- مدولاسیون داده در سیستمهای مخابرات آنالوگ و دیجیتال
۳۴	۳-۳- آشکارسازهای خطی
	۳-۴- سیگنالهای طیف گسترده: رویکردی برای ایجاد امنیت سیگنال
۳۵	در مقابل آشکارسازهای خطی
۴۰	۳-۵- آشکارسازهای غیرخطی

فصل چهارم - آشکارسازی بهینه حضور سیگنالهای مخابراتی در AWGN

۴۴	۴-۱- مقدمه
۴۴	۴-۲- سیگنال کاملاً معلوم
۴۶	۴-۳- سیگنال معلوم با پارامترهای نامعلوم
۴۶	۴-۳-۱- سیگنال میانگذر معلوم با فاز نامعلوم
۵۰	۴-۳-۲- سیگنالهای مخابراتی دیجیتال
۶۹	۴-۴- سیگنال تصادفی
۸۱	۴-۵- سیگنال نامعلوم یقینی
۹۶	۴-۶- آشکارسازی سیگنالهای مخابراتی با استفاده از بازسازی خط طیفی
۱۱۰	۴-۷- نتیجه گیری



فصل پنجم - حساسیت کارآیی آشکارسازها نسبت به تغییر

- ۱۱۱ شرایط محیطی و اطلاعات سیگنال هدف
- ۱۱۱ ۱-۵- مقدمه
- ۱۱۲ ۲-۵- تغییر مشخصات شرایط محیطی از فرض AWGN
- ۱۱۲ ۱-۲-۵- غیرگوسی بودن Pdf نمونه‌های نویز
- ۱۱۳ ۲-۲-۵- وجود همبستگی بین نمونه‌های نویز
- ۱۱۶ ۳-۲-۵- غیرایستانی فرآیند نویز
- ۱۲۷ ۳-۵- تغییر پارامترهای سیگنال هدف
- ۱۲۷ ۱-۳-۵- حساسیت کارآیی رادیومتر
- ۱۳۴ ۲-۳-۵- حساسیت کارآیی آشکارسازهای نرخ سمبل PFSR و PFDNR

فصل ششم - نتیجه‌گیری و پیشنهادات

- ۱۴۳
- ۱۴۶ مراجع

## فصل اول

### مقدمه

با افزایش چشمگیر مناسبات و وابستگی های اجتماعی در دنیای امروز، انتقال اطلاعات نیز هر روز از اهمیت بیشتری برخوردار شده است. لذا هر وسیله ای که بتواند ارتباطات بهتر، سریعتر و با قابلیت تحرک بیشتری را فراهم آورد، موفقیت بیشتری را در بازار جهانی کسب خواهد نمود. روند عمومی افزایش تقاضاهای انجام محاسبات و ارتباطات شخصی در هر لحظه و از هر مکان، موجب توسعه روزافزون شبکه های سلولی تلفن متحرک<sup>۱</sup>، پیدایش مراکز تلفن خصوصی بی سیم<sup>۲</sup>، بسیاری از تسهیلات ارتباطات شخصی<sup>۳</sup> و شبکه های محلی بی سیم<sup>۴</sup> شده است. در حال حاضر توسعه تکنولوژی بی سیم، برای حوزه وسیعتری از کاربردها، با مشکلات متعددی چون انباشتگی طیفی، ملاحظات امنیتی، فدینگ در کانالهای متحرک و پیچیدگی محیط انتشار در داخل ساختمانها روبرو می باشد.

اما چنین تسهیلات ارتباطی از نیازهای دیرین سیستمهای مخابرات نظامی بوده اند. در این سیستمها، از آنجا که راه حل های پیچیده و پرهزینه نیز به شرط فراهم آوردن کارائی مطلوب قابل قبول هستند، بسیاری از مشکلات فوق الذکر به گونه ای حل شده اند. ارتباطات طیف گسترده<sup>۵</sup>

---

1 - Cellular mobile telephone networks  
2 - Wireless PBX  
3 - Personal Communications Service (PCS)  
4 - Wireless Local - Area Networks  
5 - Spread Spectrum Communications

یکی از تکنولوژیهای مهم و قابل توجهی است که از ثمره این تلاشها پدید آمده است.

روشهای طیف گسترده را می توان بدین صورت تعریف کرد : روشی که در آن یک موج مدولاسیون کمکی، و مستقل از اطلاعات دیتا، برای گسترانیدن انرژی سیگنال روی پهنای باندی بسیار بزرگتر از پهنای باند اطلاعات بکار می رود. در گیرنده سیگنال توسط یک نمونه متناظر سنکرون شده از موج کمکی گسترده زدائی<sup>۱</sup> می شود. این روش سیگنالینگ دارای خواصی است که آنرا برای کاربردهای زیر قابل استفاده می سازد :

- پهنان سازی سیگنال ( خاصیت LPI)<sup>۲</sup> و عدم تداخل با سیستمهای معمولی.
- مقاومت در برابر اختلال (AJ)<sup>۳</sup> و حذف تداخل (AI)<sup>۴</sup>.
- محرمانه بودن پیام<sup>۵</sup>.
- فاصله یابی دقیق<sup>۶</sup>.
- دسترسی چندگانه<sup>۷</sup>.
- کاهش اثر فدینگ چند مسیره<sup>۸</sup>.

اما باید توجه داشت که روشهای طیف گسترده، نه تنها باعث بهبود کارائی در مقابل نویز گاوسی سفید نمی شوند بلکه سیگنال طیف گسترده نیاز به پهنای باند بیشتری نیز خواهد داشت [Sklar, 1988]. مقالات [Cook and Marsh, 1983 ; Pickholtz et al, 1982] مقدمه مختصری بر روشهای سیگنالینگ طیف گسترده را فراهم می آورند و [Simon et al, 1985] نیز یک کتاب سه جلدی بسیار ارزشمند در زمینه سیستمهای طیف گسترده است.

اگرچه پیدایش بعضی از مفاهیم اساسی روشهای طیف گسترده به قبل از جنگ جهانی دوم می رسد، اما این جنگ باعث تحریک محققین در جهت یافتن روشهای جدیدی از ارتباطات که از امنیت بالائی برخوردار بوده و بتوانند در حضور اختلال نیز فعالیت نمایند، شده است. با اینحال

1 - despread  
2 - Low Probability of Interception  
3 - Anti - Jam  
4 - Anti - Interference  
5 - Privacy  
6 - Accurate Ranging  
7 - Multiple Access  
8 - Mutipath Mitigation

کاربردهای عملی این روشها در سالهای قبل از جنگ، با توجه به تکنولوژی موجود آن زمان، بسیار محدود بوده است. بعد از جنگ جهانی دوم نیز بدلیل طبقه‌بندی امنیتی و بدلیل پیچیدگی ذاتی و محدودیت کاربری تجهیزات موجود، شناخت عمومی از سیستمهای طیف گسترده به کندی شکل گرفت. یک تاریخچه بسیار ارزشمند از توسعه روشهای طیف گسترده در [Simon et al, 1985] آورده شده است.

سالهای زیادی بود که سیستمهای طیف گسترده فقط برای کاربردهای نظامی مطرح می‌شدند. اما پیشرفت‌های سریع در زمینه تکنولوژی LSI، ساخت توابع پیچیده یک سیستم طیف گسترده را در ابعاد و قیمت محدود ممکن ساخته و نظر کمپانیهای تجاری را نیز به سوی خود جلب کرد. همچنین مشخص شد که ویژگیهای سیگنالینگ طیف گسترده برای برطرف کردن مشکلات سیستمهای ارتباط شخصی متحرک یا قابل حمل، بسیار مناسب هستند. استفاده از تکنولوژی و روشهای طیف گسترده در کاربردهای تجاری و شبکه‌های ارتباطات غیرنظامی یکی از مسائل مهم مخابرات امروز است [Schilling, 1991].

همانطور که قبلاً نیز اشاره شد یکی از ویژگی‌های مهم سیگنالهای طیف گسترده پنهان‌سازی سیگنال یا خاصیت LPI است. مطالعات این رساله به بررسی سیگنالهای مخابراتی از نقطه نظر امنیت سیگنال و چگونگی آشکارسازی حضور این سیگنالها می‌پردازد. بعبارت دیگر می‌خواهیم بدانیم که چگونه می‌توان حضور یک سیگنال مخابراتی را آشکار نمود؟ به چه دلیل آشکارسازی حضور سیگنالهای طیف گسترده مشکل‌تر از سیگنالهای مخابرات معمولی است؟ روشهای آشکارسازی بهینه این سیگنالها چگونه است؟

پرداختن به این مبحث، با توجه به توسعه روزافزون شبکه‌های فرماندهی و کنترل (C<sup>3</sup>I)<sup>۱</sup> در ارتشهای مدرن امروزی و وابستگی شدید آنها به سیستمهای مخابرات و خصوصاً سیستمهای مخابرات طیف گسترده، از اهمیت بالایی برخوردار بوده و یکی از فعالیتهای مهم حوزه مخابرات جنگ الکترونیک<sup>۳</sup> است. همچنین در سالهای اخیر، بدلیل افزایش چشمگیر

1 - Presence Detection

2 - Command, Control, Communications and Intelligence

3 - Communications Electronic Warfare

فعالیت‌های مخابراتی طیف گسترده در سیستم‌های مخابرات تجاری، سازمان‌های غیرنظامی استاندارد و نظارت بر فعالیت‌های مخابراتی نیز به مبحث آشکارسازی و این سیگنال‌ها علاقه‌مند شده‌اند.

باتوجه به آنچه ذکر شد می‌توان انتظار داشت که مبحث آشکارسازی سیگنال‌های مخابراتی و خصوصاً طیف گسترده یکی از مباحث فعال تحقیقاتی در مراکز پژوهشی مخابرات و خصوصاً مراکز نظامی باشد. وجود پروژه‌ها و مدارک مهم در مراکز تحقیقاتی و دانشگاه‌های مشهور و اختصاص جلسات ویژه این مبحث در کنفرانس‌های مهم مخابرات، که اکثر آنها از طبقه‌بندی محرمانه نیز برخوردارند، خود مؤید این حقیقت است.

در ادامه این فصل ابتدا با ارائه یک مدل فرآیند تهدید و امنیت، تهدیدات عمده علیه سیستم‌های مخابراتی و روند توسعه این سیستم‌ها مرور کرده و سپس جایگاه مبحث رساله را در این فرآیند مطالعه می‌کنیم. در فصل دوم با مرور نظریه آشکارسازی به مدلسازی مسئله آشکارسازی حضور سیگنال به صورت یک آزمون فرض دوتایی<sup>1</sup> اقدام نموده و برخوردی ساختار یافته با مباحث این نظریه را ارائه می‌دهیم. مهمترین مبحث این فصل، که اهمیت زیادی در روند مطالعات فصول بعدی دارد، مدلسازی سیگنال مخابراتی است. در فصل سوم ساختار سیگنال‌های مخابراتی را مطالعه نموده و از آن در جهت مدلسازی سیگنال سود خواهیم جست. همچنین در این فصل روش‌های معمول (و نه لزوماً بهینه) آشکارسازی سیگنال‌های مخابراتی معمولی و طیف گسترده را معرفی می‌کنیم.

فصل‌های چهارم و پنجم، فصول اساسی در مطالعات این رساله می‌باشند. در فصل چهارم، با توجه به مباحث فصل دوم و سوم، به مسئله آشکارسازی سیگنال مخابراتی در نویز گاوسی سفید با سطح توان معلوم  $N_0$  (یکطرفه) می‌پردازیم. در این فصل با توجه به ساختار ذاتی سیگنال و مقدار اطلاعات سیستم آشکارساز از آن، به ارائه مدلهای مختلف برای سیگنال دریافتی مبادرت ورزیده و آشکارساز بهینه را برای هر کدام از آنها بدست می‌آوریم. سپس مطالعه‌ای

1 - Binary Hypothesis Testing

مقایسه‌ای بین ساختار و کارآئی روشهای پیشنهادی در این رساله و روشهای ارائه شده قبلی انجام خواهیم داد. در فصل پنجم به بررسی آشکارسازی سیگنالهای مخابراتی در شرایط واقعی تری چون نامعلوم و متغیر بودن سطح توان نویز  $N_0$  و وجود اختلال پرداخته و تأثیر آنها بر کارآئی آشکارسازهای بدست آمده در فصل چهارم را مورد بررسی قرار می‌دهیم. در ادامه این فصل به مطالعه روشهایی جهت بهبود کارآئی آشکارسازها در شرایط مذکور خواهیم پرداخت.

### فرآیند تهدید و امنیت در مخابرات نظامی

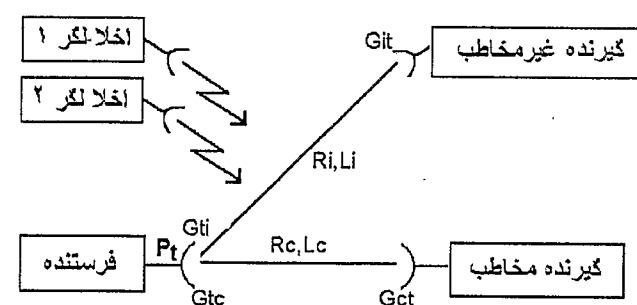
همانطور که اشاره شد، شنود و اختلال<sup>۱</sup> دو تهدید عمده علیه سیستمهای مخابرات نظامی هستند. شکل (۱-۱) موقعیت و نقش این تهدیدات را که سناریوی شنود (یا سناریوی LPI) نامیده می‌شود، [Glenn, 1983]. عوامل مؤثر در این سناریو عبارتند از: -

۱- فرستنده مخابراتی

۲- گیرنده مخاطب<sup>۲</sup> (گیرنده مخابراتی)

۳- گیرنده غیرمخاطب<sup>۳</sup> (گیرنده شنود)

۴- اختلال‌گر<sup>۴</sup>



شکل (۱-۱) سناریوی شنود

- 1 - Jamming
- 2 - Authorized receiver
- 3 - Unauthorized receiver
- 4 - Jammer

با توجه به این شکل می توان گفت که گیرنده غیرمخاطب، فرستنده و سیگنال آن و اختلالگر، گیرنده مخاطب و وضوح پیام دریافتی آنرا مورد تهدید قرار می دهند. تأکید ما در این بخش مطالعه نقش گیرنده غیرمخاطب یا گیرنده شنود است. منظور از شنود یک سیگنال مخابراتی بهره برداری کامل از پیام مدوله کننده موج حامل است. گیرنده غیرمخاطب برای رسیدن به این هدف بایستی رشته عملیات زیر را انجام دهد:

۱ - پوشش سیگنال (C): سیگنال مخابراتی بایستی از نظر مکانی، زمانی و فرکانسی در حوزه دید گیرنده قرار داشته باشد.

۲ - آشکارسازی حضور سیگنال (D): در این مرحله به این سؤال که: آیا شکل موج دریافتی در پنهان باند گیرنده، حاوی سیگنال است یا فقط نویز و تداخل در آن وجود دارد؟ پاسخ داده می شود.

۳ - شناسایی سیگنال (I): در این مرحله ویژگیهای مهم سیگنال دریافتی استخراج می شود. یکی از مهمترین این ویژگیها نوع مدولاسیون سیگنال دریافتی است.

۴ - بهره برداری از سیگنال (E): در این مرحله با توجه به ویژگیهای استخراج شده در مرحله سوم، سیگنال بصورت باند پایه دمدوله و اطلاعات پیام بدست می آید. بنابراین احتمال شنود و بهره برداری کامل از سیگنال دریافتی برابر است با:

$$\Pr(E) = \Pr(E | I) \Pr(I | D) \Pr(D | C) \Pr(C). \quad (1-1)$$

در مطالعات نظری این رساله فرض می کنیم که گیرنده غیرمخاطب در اجرای مرحله (۱) کاملاً موفق بوده و  $\Pr(C) = 1$  است (البته در فصل پنجم اشاره ای به اثرات عدم همزمانی و هم فرکانسی خواهیم داشت). اجرای مرحله (۳) نیز در حال حاضر از مسائل مهم و باز تحقیقاتی است. همچنین در شرایط واقعی محیطی، سیستم های مخابراتی بسیاری بطور همزمان و در یک باند فرکانسی فعالیت می کنند. در این موقعیت گیرنده شنود ممکن است تمایل به مراقبت و

1 - Coverage  
2 - Interception  
3 - Exploitation