بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده برق و کامپیوتر

آشکارسازی سیگنال‌های طیف‌گسترده با نرخ هشدار کاذب ثابت

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق- مخابرات

محسن نادرطهرانی

استاد راهنما

دکتر محمود مدرس هاشمی

۱۳۸۷

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده برق و کامپیوتر

آشکارسازی سیگنال‌های طیف‌گسترده با نرخ هشدار کاذب ثابت

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق- مخابرات آقای محسن نادرطهرانی
تحت عنوان

آشکارسازی سیگنال‌های طیف‌گسترده با نرخ هشدار کاذب ثابت

در تاریخ ۸۷/۱۲/26 توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان نامه	دکتر سید محمود مدرس هاشمی
۲- استاد مشاور پایان نامه	دکتر علی‌محمد دوست‌حسینی
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر علی‌محمد دوست‌حسینی

تشکر و قدردانی

حمد وسپاس پروردگار هستی‌بخش را که از وجود خود در وجود من دمید و مرا از نعمت‌های خود بهره‌مند ساخت.
برخود لازم می‌دانم از استاد بزرگوارم جناب **دکتر محمود مدرس هاشمی** که با رهنمودها و توصیه‌های ارزشمند خود مرا در به انجام رساندن این پایان‌نامه راهنمایی کردند تشکر و قدردانی کنم. بدون نصایح، راهنمایی‌ها و دلسوزی‌های ایشان و صبر و حوصله و زمان فراوانی که این بزرگوار در به انجام رسیدن این پژوهش صرف نمودند اتمام این پایان‌نامه ممکن پذیر نبود. از زحمات **دکتر علیمحمد دوست‌حسینی** که با راهنمایی‌ها و نظرات خود مرا در هر چه بهتر به انجام رسیدن این تحقیق کمک کردند سپاسگزاری می‌کنم.
لازم می‌دانم از خانواده عزیزم که همواره یاریگر و پشتیبان من بوده‌اند تشکر کنم. همچنین از تمامی دوستانم که همیشه در کنار من بوده و در سختی‌های راه با هر گونه کمکی مرا یاری نمودند ممنونم.
از درگاه خداوند متعال برای تمامی این عزیزان سلامتی، موفقیت و توفیق روزافزون در همه عرصه‌های زندگی را مسئلت می‌نمایم.

محسن نادرطهرانی

اسفند ۱۳۸۷

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

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هشت
چکیده ۱

فصل اول: مقدمه ۲
۱-۱ تاریخچه و هدف پایان نامه..... ۲
۱-۲ ساختار پایان نامه..... ۶

فصل دوم: اصول آشکارسازی..... ۷
۲-۱ مقدمه..... ۷
۲-۲ بهینه‌سازی آماری..... ۸
۲-۳ مبانی آشکارسازی باینری..... ۹
۲-۳-۱ آزمون فرضیه ساده..... ۱۱
۲-۳-۲ آزمون فرضیه مرکب..... ۱۴
۲-۴ آشکارسازهای سیگنال‌های مخابراتی..... ۱۵
۲-۵ آشکارسازی راداری..... ۲۱
۲-۶ آشکارسازی با نرخ ثابت هشدار کاذب..... ۲۴
۲-۷ نتیجه گیری..... ۲۷

فصل سوم: مروری بر پردازشگرهای نرخ هشدار کاذب..... ۲۹
۳-۱ مقدمه..... ۲۹
۳-۲ آشکارسازهای میانگین گیر..... ۳۳
۳-۳ پردازشگرهای مبتنی بر آمارگان مرتب شده..... ۳۶
۳-۳-۱ پردازشگر OS-CFAR..... ۳۶
۳-۳-۲ پردازندهای TM و CML..... ۳۷
۳-۳-۳ روش‌های MOS و VTM..... ۳۸
۳-۴ روش ACML و نسخه‌های مختلف آن..... ۴۰
۳-۴-۱ الگوریتم ACML..... ۴۱
۳-۴-۲ الگوریتم FCME و BCME..... ۴۲
۳-۵ پردازشگرهای خانواده Ex-CFAR..... ۴۴
۳-۵-۱ پردازشگرهای ExCA و ExGO..... ۴۴

۳-۶ روش‌های نوین برای مقابله با ناهمگنی‌ها ۴۵
۳-۶-۱ روش VI-CFAR ۴۵
۳-۶-۲ پردازشگرهای ACCA-ODV و ODV ۴۷
۳-۶-۳ پردازشگر S-CFAR ۴۸
۳-۷ نتیجه‌گیری ۴۹
فصل چهارم: آشکارسازی سیگنال طیف‌گسترده LFM با نرخ هشدار کاذب ثابت ۵۰
۴-۱ مقدمه ۵۰
۴-۲ مدل سیگنال و نویز ۵۲
۴-۳ روش‌های پردازش زمان-فرکانس ۵۳
۴-۳-۱ تبدیل فوریه زمان کوتاه ۵۴
۴-۳-۲ تبدیل موجک ۵۴
۴-۳-۳ تبدیل‌های زمان-فرکانس دوخطی ۵۵
۴-۴ تبدیل فوریه کسری ۵۸
۴-۴-۱ رابطه بین تبدیل‌ها ۶۲
۴-۵ روش‌های آشکارسازی سیگنال LFM ۶۲
۴-۵-۱ مسئله آشکارسازی ۶۳
۴-۵-۲ روش تبدیل رادون ویگنر-ویل (RWT) ۶۴
۴-۵-۳ روش تبدیل رادون تابع ابهام (RAT) ۶۵
۴-۵-۴ روش تبدیل فوریه کسری (FRFT) ۶۶
۴-۶ حساسیت آشکارساز ۶۷
۴-۶-۱ نتایج شبیه سازی ۷۰
۴-۷ حساسیت نسبت به تداخل ۷۲
۴-۸ نتیجه‌گیری ۷۶
فصل پنجم: آشکارسازی رادیومتر کانالیزه با نرخ هشدار کاذب ثابت ۷۸
۵-۱ مقدمه ۷۸
۵-۲ سیگنال‌های جهش فرکانسی (FH) ۷۹
۵-۳ آشکارسازی سیگنال‌های FH ۸۱
۵-۴ کاربرد رادیومتر کانالیزه در حس‌کردن طیف ۸۷
۵-۴-۱ اصول رادیوهای هوشمند ۸۷
۵-۴-۲ تکنیک‌های حس‌کردن طیف ۹۰
۵-۵ آشکارسازی نرخ هشدار کاذب ثابت با استفاده از رادیومتر کانالیزه ۹۵
۵-۶ بهبود پیشنهادی ۱۰۰
۵-۷ نتایج شبیه سازی ۱۰۲
۵-۸ نتیجه‌گیری ۱۰۴

فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادها..... ۱۰۵
۶-۱ نتیجه گیری..... ۱۰۵
۶-۲ پیشنهادها..... ۱۰۷
مراجع ۱۰۸

چکیده

آشکارسازی حضور سیگنال‌های مخابراتی در سالهای اخیر به خاطر کاربردهای فراوان آن توجه زیادی را به خود جلب کرده است. برای مثال می توان به آشکارسازی حضور سیگنال‌ها در رادار، جنگ الکترونیک، سونار، رادیوهای هوشمند، شبکه های بی سیم و ... اشاره کرد. در این کاربردها منظور از آشکارساز سیگنال،گیرنده غیرمخاطب می باشدکه قصد آشکارسازی سیگنال های مخابراتی را دارد. به همین دلیل و نیز پارامترهای تصادفی موجود، ممکن است این گیرنده از همه اطلاعات مورد نیاز سیگنال مورد نظر آگاهی نداشته باشد و تعدادی از پارامترهای سیگنال برای آن نامعلوم باشد. در این حالت گیرنده غیرمخاطب تلاش می کند تا با استفاده از اطلاعات محدود در دسترس، بهترین تصمیم گیری را در مورد حضور سیگنال مذکور داشته باشد. در این میان سیگنال های باند گسترده به دلیل ماهیت ذاتی و پیچیدگی آشکارسازی حضور آنها ، بیشتر از سیگنال های مخابراتی دیگر مورد توجه قرار گرفته اند.

از جمله معیارهایی که در طراحی گیرنده های مخابراتی و راداری مورد توجه است، معیار نیمن- پیرسون است. این معیار با در نظرگرفتن مقدار ثابتی برای احتمال هشدار کاذب، احتمال آشکارسازی را ماکزیمم می‌کند. البته در بسیاری از موارد، تحقق کامل این معیار بهینه در عمل امکان‌پذیر نیست، چرا که برای این منظور لازم است اطلاعات کاملی از آمارگان سیگنال هدف و تداخل در دست باشد که معمولاً چنین اطلاعاتی در دست نمی‌باشد. مسئلهٔ مهم دیگری که در گیرنده‌ها با آن مواجهیم، تغییر پارامترها و به‌ویژه توان تداخل است که منجر به تغییر احتمال هشدار کاذب در گیرنده می‌گردد. روشهایی که به منظور تثبیت نرخ هشدار کاذب در این نوع گیرنده ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش‌های CFAR نامیده می‌شود. دارا بودن این خصلت برای آشکارساز باعث می شود که علیرغم تغییرات آماری تداخل و نویز و به طور کلی شرایط محیطی، کیفیت آشکارسازی ثابت باشد. برای دستیابی به چنین آشکارسازهایی در شرایط محیطی مختلف، نیاز به آستانهٔ وفقی برای آشکارسازی می‌باشد. تاکنون الگوریتمهای متعددی برای طراحی پردازشگرهای CFAR در کاربردهای راداری ارائه شده است ولی روشهای CFAR در زمینه‌ی آشکارسازی سیگنال‌های مخابراتی به خصوص سیگنال‌های باند گسترده کمتر مورد استفاده واقع شده‌اند. لذا لازم است تا مفاهیم و مصادیق موجود در رادار به طور مناسبی برای آشکارسازی سیگنال های مخابراتی تفسیر و برگردان شود.

در این تحقیق با مفاهیمی مانند سلول های فرکانسی و زمانی آشنا شده و شرایط لازم برای تعمیم مباحث مربوط در آشکارسازی CFAR راداری به فضای سیگنال‌های مخابراتی بررسی می‌شود. پس از آشنایی با اصول آشکارسازی در رادار و مخابرات، به معرفی مبسوط روشهای مختلف تثبیت هشدار کاذب پرداخته و مزایا و معایب هر کدام از آنها به طور جداگانه بررسی شده است. سپس به آشکارسازی سیگنال مدوله‌شده فرکانس به صورت خطی (LFM) پرداخته و انواع آشکارسازهای موجود برای آن را بررسی می کنیم. از بین آشکارسازهای مورد بررسی آشکارساز شبه بهینه این سیگنال یعنی آشکارساز مبتنی بر تبدیل فوریه کسری را انتخاب کرده و از آنجایی که این آشکارساز نسبت به توان نویز حساس بوده و نرخ هشدار کاذب آن با تغییر توان نویز تغییر می‌کند روش‌هایی برای تثبیت نرخ هشدار کاذب در آن پیشنهاد می‌گردد. روش‌های پیشنهادی آشکارساز مورد نظر را CFAR کرده و دارای عملکرد مناسب و نزدیک به حالت بهینه می‌باشد. بعد از آن آشکارسازی سیگنال‌های جهش فرکانسی(FH) مدنظر قرار گرفته و به بررسی تعدادی از آشکارسازهای موجود برای آن می‌پردازیم. از بین آشکارسازهای مذکور مهمترین آنها یعنی آشکارساز رادیومتر کانالیزه را انتخاب کرده و به بررسی تاثیر بکارگیری روش‌های مختلف CFAR و بهبود روش‌های موجود بر روی آنها توسط روش پیشنهادی خواهیم پرداخت. از آن جایی که آشکارساز رادیومتر کانالیزه برای سیگنال‌های FH بسیار شبیه به آشکارسازی سیگنال در روش‌های حس کردن طیف در رادیوهای هوشمند می‌باشد، روش‌های پیشنهادی را بر روی مدل‌های موجود برای حس‌کردن طیف نیز اعمال کرده و نتایج آن را بررسی می‌کنیم.

کلمات کلیدی: ۱-آشکارسازی سیگنال ۲-نرخ هشدار کاذب ثابت ۳-سیگنال LFM ۴-سیگنال FH ۵-رادیومتر کانالیزه

فصل اول
مقدمه

۱ ـ تاریخچه و هدف پایان نامه

بی شک جهان امروز را می‌توان جهان ارتباطات نامید و در این میان سیستم‌های مخابراتی با توجه به وظیفه انتقال پیام، نقش بسزایی را ایفا می‌کنند. امروزه سیستم‌های مخابراتی جزئی لاینفک از زندگی روزمره مردم شده‌اند به طوری که تصور جدایی از آن‌ها امری دشوار و ناممکن به نظر می رسد و با توجه به روند رشد تکنولوژی و پیشرفت علم، روز به روز بر فراگیری این سیستم‌ها افزوده شده و عملکرد آنها بهبود می‌یابد. از بین تکنولوژی‌های مختلف سیستم‌های مخابراتی، تکنولوژی بی‌سیم و وسایلی که مبتنی بر این تکنولوژی ساخته شده‌اند با اقبال بیشتری روبرو هستند و طیف وسیعی از استفاده‌کنندگان را به خود اختصاص داده‌اند. بنابراین تلاش‌های زیادی برای ارتقای سیستم-های مبتنی بر این تکنولوژی در دنیا صورت گرفته است. از ثمره‌های این تلاش‌ها سیستم‌های مخابراتی طیف گسترده می‌باشد که بسیاری از مشکلات موجود بر سر راه ارتباط بی‌سیم مانند ملاحظات امنیتی، قابلیت چند کاربره بودن، محوشدگی در کانال‌های متحرک و پیچیدگی محیط انتشار، با استفاده از این نوع سیستم‌ها برطرف شده‌اند.

در سیستم‌های طیف گسترده از یک سیگنال کمکی برای گسترده‌کردن[1] انرژی سیگنال اطلاعات در پهنای باند فرکانسی استفاده می‌کنند ودر گیرنده هم توسط مکانیزم‌های مختلفی سیگنال دریافتی را گسترده‌زدایی[2] کرده وسیگنال اطلاعات را از سیگنال دریافتی استخراج می‌کنند. این نوع سیگنالینگ دارای خصوصیاتی مانند مقاوم بودن در برابر اختلال ، تداخل، محوشدگی، استراق سمع و قابلیت دسترسی چندگانه و کوچکی احتمال دستبرد(ربایش)

---

[1] Spreading
[2] Despreading

می‌باشد. با توجه به خصوصیات این نوع سیستم‌ها می توان دریافت که آنها جهت مصارف نظامی از قابلیت بالایی برخوردار هستند[۱]. تاریخچه این سیستم ها به جنگ جهانی دوم باز می گردد. در آن زمان محققین در صدد یافتن روشهایی جدید از ارتباطات بودند که از امنیت بالایی برخوردار بوده و بتوانند در حضور اختلال نیز فعالیت نمایند. بعد از جنگ جهانی دوم نیز به دلیل پیچیدگی ذاتی و محدودیت کاربری موجود، شناخت عمومی از سیستم‌های طیف گسترده به کندی شکل گرفت. سالهای زیادی بود که این نوع سیستم‌ها فقط برای کاربردهای نظامی استفاده می‌شد ولی بتدریج با پیشرفت تکنولوژی و قابلیت ساخت یک سیستم طیف گسترده در ابعاد کوچک و قیمت قابل قبول، شرکت‌های تجاری دنیا به سمت این تکنولوژی روی‌آوردند و اولین محصولات مخابراتی مبتنی بر این تکنولوژی از دهه ۸۰ وارد بازار جهانی شدند و با سرعت زیادی به رشد خود ادامه داده و بازار را در دست گرفتند.

یک مرحله حیاتی در پیاده‌سازی سیستم‌های مخابراتی و به خصوص سیستم‌های طیف‌گسترده آشکارسازی حضور سیگنال‌ها می‌باشد که این امر در سال‌های اخیر به خاطر کاربردهای فراوان آن توجه زیادی را به خود جلب کرده است. برای مثال می‌توان به آشکارسازی حضور سیگنال‌ها در رادار، جنگ الکترونیک، سونار، رادیوهای هوشمند[1]، شبکه‌های بی‌سیم و ... اشاره کرد[۱]. در این کاربردها منظور از آشکارساز سیگنال، گیرنده غیرمخاطب می‌باشدکه قصد آشکارسازی سیگنال‌های مخابراتی را دارد. به همین دلیل و نیز پارامترهای تصادفی موجود، ممکن است این گیرنده از همه اطلاعات مورد نیاز سیگنال مورد نظر آگاهی نداشته باشد و تعدادی از پارامترهای سیگنال برای آن نامعلوم باشد. در این حالت گیرنده غیرمخاطب تلاش می‌کند تا با استفاده از اطلاعات محدود در دسترس، بهترین تصمیم‌گیری را در مورد حضور سیگنال مذکور داشته باشد[۲]. در این میان سیگنال‌های باندگسترده به دلیل ماهیت ذاتی و پیچیدگی آشکارسازی حضور آنها ، بیشتر از سیگنال‌های مخابراتی دیگر مورد توجه قرارگرفته‌اند. در سال های اخیر هم، به دلیل افزایش تعداد کاربران، استفاده غیربهینه از پهنای باند فرکانسی و کمبود آن، بحث رادیوهای هوشمند و استفاده دینامیک از پهنای باندهای مجوز دار توسط استفاده‌کننده های بدون مجوز مطرح شده و لزوم تدوین سناریویی کارآمد برای مانیتورکردن باندهای فرکانسی و آشکارسازی سیگنال‌های موجود در این باندها بیشتر شده است[۳]. این امر علاوه بر کاربردهای بیان شده باعث شد تا دریچه‌ای جدید در زمینه آشکارسازی سیگنال‌های مخابراتی به خصوص سیگنال‌های باند گسترده گشوده شود و هم اکنون محققان زیادی بر روی این زمینه تمرکز کرده اند.

مسئله آشکارسازی حضور یک سیگنال را می‌توان به صورت یک مسئله تست آزمون فرضیه[2] معمولی مدل کرد که در آن، هدف تصمیم‌گیری بین فرضیه پوچ[3] و فرضیه وقوع می‌باشد. این مسئله اولین بار توسط بیز مطرح شد[۵]. بعد از آن هم تلاش‌های زیادی در این زمینه صورت گرفت که از آن جمله می‌توان به کارهای نیمن- پیرسون[4] اشاره کرد[۴]. در صورتی که آزمون فرضیه دارای دو فرضیه ممکن باشد، مسئله آزمون فرضیه را باینری می‌نامند.

این مسئله در رابطه (۱-۱) نشان داده شده است :

---

[1]Cognitive Radio
[2] Hypothesis Test
[3] Null
[4]Newman-Pearson(NP)

$$H_0 \ : \ r_k = s_{1,k} + n_k \qquad k = 0,1,\ldots\ldots,N-1$$
$$H_1 \ : \ r_k = s_{2,k} + n_k \qquad k = 0,1,\ldots\ldots,N-1 \qquad (۱-۱)$$

که r_k، نمونه سیگنال دریافتی در لحظه k ، n_k نمونه فرآیند نویز، $s_{1,k}$ یک نمونه از سیگنال حاضر در حالت H_0، $s_{2,k}$ یک نمونه از سیگنال حاضر دیگر در حالت H_1 و در نهایت N تعداد کل نمونه‌های مورد نیاز برای یک تصمیم‌گیری می‌باشد. نمونه‌ها می‌توانند متغیرهای حقیقی یا موهومی باشند. در حالت کلی در مسائل آزمون فرضیه ممکن است که تعداد فرضیه‌های ممکن بیشتر از دو باشد. تئوری آشکارسازی به صورت وسیعی در چند دهه اخیر مورد بررسی قرار گرفته است[۲،۴،۵]. برای مثال در مخابرات، سیگنالینگ آنتی پودال از $s_{1,k} = -s_k$ و $s_{2,k} = s_k$ استفاده می‌کند که در آن s_k یک شکل موج سیگنال شناخته شده می‌باشد. نوع دیگر مسئله آزمون فرضیه بحث راجع به حضور یا عدم حضور سیگنال می‌باشد که موضوع اصلی این پایان‌نامه می‌باشد و از کاربردهای زیادی برخوردار می‌باشد .

$$H_0 \ : \ r_k = n_k \qquad k = 0,1,\ldots\ldots,N-1$$
$$H_1 \ : \ r_k = s_k + n_k \qquad k = 0,1,\ldots\ldots,N-1 \qquad (۲-۱)$$

که در آن n_k نویز یا تداخل می‌باشد و سیگنال هم می‌تواند به طور مثال سیگنال قطعی با پارامترهای نامعلوم مانند زاویه، فاز، دامنه دریافتی نامعلوم و یا سیگنال قطعی ولی کاملا مجهول در نظر گرفته شود[۴]. این نوع آشکارسازی سیگنال کاربردهای فراوانی در علوم مهندسی دارد. در زیر به چند نمونه از این کاربردها می توان اشاره کرد.

- گیرنده‌های پشتیبانی الکترونیک[1] (ESM) که برای جستجو، مکان‌یابی و مشخص‌کردن حضور منابع امواج الکترومغناطیس استفاده می‌شود[1]. آشکارسازی حضور یا عدم حضور سیگنال(ها) هدف اصلی در اینگونه از گیرنده‌ها می‌باشد. کاربرد دیگر آنها برای مانیتورکردن طیف، جهت آشکارسازی فرستنده‌های بدون مجوز می‌باشد. در هر دو کاربرد سیگنالی که باید آشکارسازی شود می‌تواند آنالوگ یا دیجیتال، باندباریک یا باندگسترده باشد.
- رادارهای پالسی، پالس‌های الکترومغناطیس را ارسال و دریافت می‌کنند. در صورتی که هدفی موجود باشد، سیگنال دریافتی علاوه بر نویز حاوی اکویی مخدوش از سیگنال ارسالی خواهد بود. بنابراین آشکارسازی در حوزه رادار معطوف به تصمیم‌گیری درباره اینکه سیگنال دریافتی فقط حاوی نویز و یا اینکه حاوی سیگنال و نویز می‌باشد، خواهد بود.
- روش‌هایی شبیه آنچه در بالا برای پالس‌های الکترومغناطیس بیان شد برای پالس‌های آکوستیک زیر آب نیز استفاده می‌شود. وسایلی که سیگنال‌های آکوستیک را به سیگنال‌های الکتریکی تبدیل می‌کند هیدروفن نامیده می شود. در یک سونار پسیو بر روی سیگنال الکتریکی دریافتی پردازش انجام شده و تصمیم می‌گیرد که آیا سیگنال

[1] Electronic Support Receivers

فقط شامل نویز بوده یا علاوه بر نویز شامل سیگنال تولیدی از یک کشتی یا یک زیر دریایی می‌باشد. عملکرد سونارهای اکتیو هم مانند رادارهایی هستند که در بالا به آن اشاره شد[6].

- یک رادیوی هوشمند رادیویی است که می‌تواند پارامترهای خود مانند فرکانس خود را به صورت دینامیک برای تطبیق با شرایط محیطی یا براساس خواسته استفاده کننده تغییر دهد. بدیهی است لازمه این کار اطلاع از حضور یا عدم حضور سیگنال در باندهای فرکانسی مختلف می‌باشد که به آن حس‌کردن طیف[1] گفته می‌شود. حس کردن طیف در رادیوهای هوشمند امری است که بر اساس آن پهنای باند فرکانسی مشاهده و بررسی می‌شود و براساس اطلاعات بدست آمده از پهنای باند و با استفاده از روشهای مختلف آشکارسازی سیگنال، باندهای فرکانسی خالی از استفاده کننده مشخص می‌شود[7].

همانطور که بیان شد، از جمله معیارهایی که در طراحی گیرنده‌های مخابراتی و راداری مورد توجه است، معیار نیمن-پیرسون است. این معیار با در نظرگرفتن مقدار ثابتی برای احتمال هشدار کاذب (اعلام وجود هدف در صورتیکه واقعاً هدف موجود نیست)، احتمال آشکارسازی را ماکزیمم می‌کند و بر این اساس نهایتاً منجر به محاسبهٔ نسبت درستنمایی[2] و سپس مقایسهٔ آن با یک سطح آستانه می‌گردد. البته در بسیاری از موارد، تحقق کامل این معیار بهینه در عمل امکان‌پذیر نیست، چرا که برای این منظور لازم است اطلاعات کاملی از آمارگان سیگنال هدف و تداخل در دست باشد که معمولاً چنین اطلاعاتی در دست نمی‌باشد. مسئلهٔ مهم دیگری که در گیرنده‌ها با آن مواجهیم، تغییر پارامترها و به‌ویژه توان تداخل است. حتی اگر شکل کلی آمارگان تداخل معلوم بوده وگیرندهٔ بهینهٔ مربوطه نیز قابل پیاده‌سازی باشد، به‌دلیل تغییر توان تداخل، احتمال هشدار کاذب درنظر گرفته شده، ثابت نمی‌ماند. روشهایی که به منظور تثبیت نرخ هشدار کاذب در این نوع گیرنده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش‌های CFAR[3] نامیده می‌شود. دارا بودن این خصلت برای آشکارساز باعث می‌شود که با تغییرات آماری تداخل و نویز و به طور کلی شرایط محیطی کیفیت آشکارسازی، ثابت باشد. برای دستیابی به چنین آشکارسازهایی در شرایط محیطی مختلف، نیاز به آستانهٔ وفقی برای آشکارسازی می‌باشد. تاکنون الگوریتمهای متعددی برای طراحی پردازشگرهای CFAR در کاربردهای راداری [8]، ارائه شده است ولی روش‌های CFAR در زمینه‌ی آشکارسازی سیگنال‌های مخابراتی به خصوص سیگنال‌های باندگسترده کمتر مورد استفاده واقع شده‌اند[10،9،1]. لذا در این پایان‌نامه قصد داریم تا به معرفی مبسوط روش‌های مختلف تثبیت هشدار کاذب پرداخته و مزایا و معایب هر کدام از آنها را به طور جداگانه بررسی کنیم. همچنین سعی داریم تا روشهای مذکور را در امر آشکارسازی سیگنال‌های مخابراتی طیف گسترده بررسی کرده و در نهایت ، با ارائه روشی کارا، سعی در بهبود وضعیت آشکار سازی تعدادی از سیگنال‌های مخابراتی داشته باشیم. همچنین قصد داریم در این پایان‌نامه از میان سیگنال‌های طیف‌گسترده، آشکارسازی با نرخ ثابت هشدار کاذب سیگنال‌های مدوله‌شده فرکانس به صورت خطی[4](LFM) و سیگنال جهش فرکانس آهسته[5](SFH) را مورد بررسی قرار دهیم. سیگنال LFM از سیگنال‌های پرکاربرد بوده و آشکارسازی آن از سال‌ها

---

[1] Spectrum Sensing
[2] Likelihood Ratio
[3] Constant False Alarm Rate
[4] Linear Frequency Modulation
[5] Slow Frequency Hopping(SFH)

پیش مورد توجه محققین بوده است. روش‌های متعددی برای آشکار سازی این نوع سیگنال پیشنهاد شده است که در فصل‌های آینده به شرح مبسوط این روش‌ها خواهیم پرداخت. تکنیک پرش فرکانس هم به عنوان یکی از تکنیک-های گسترده‌نمودن پهنای‌باند سیگنال از سال‌ها پیش تا کنون در سیستم‌های مخابراتی مورد استفاده قرار گرفته است. آشکارسازهای پیشنهاد شده برای سیگنال‌های LFM و SFH اغلب به صورت ذاتی CFAR نبوده و احتمال هشدار کاذب در آنها وابسته به توان نویز می‌باشد. لذا پس از بررسی کلی روش‌های مختلف تثبیت نرخ هشدار کاذب، مسئله آشکارسازی این نوع سیگنال‌های طیف گسترده و CFAR نمودن آنها را مورد بررسی قرار خواهیم داد.

۱ ۴ ساختار پایان نامه

در فصل دوم به اختصار با مبانی آشکارسازی سیگنال در رادار و مخابرات آشنا خواهیم شد و نقاط مشترک در آن‌ها را بیان خواهیم کرد. در این فصل مبانی آزمون فرضیه و معیارهای مختلف برای آشکارسازی ذکر خواهد شد. در فصل سوم به معرفی روش‌های تثبیت نرخ هشدار کاذب و انواع پردازشگرهای CFAR می‌پردازیم. از آن جایی که مفاهیم CFAR بیشتر تاکنون در رادار مطرح بوده و در مسائل آشکارسازی سیگنال‌های مخابراتی کمتر مطرح بوده اند لذا لازم است تا مفاهیم و مصادیق موجود در رادار به طور مناسبی برای آشکارسازی سیگنال‌های مخابراتی تفسیر و برگردان شود. در این فصل با مفاهیمی مانند سلول‌های فرکانسی و زمانی آشنا می‌شویم و به این ترتیب می‌توانیم مباحث مربوط در آشکارسازی CFAR راداری را به فضای سیگنال‌های مخابراتی وارد کنیم. در فصل چهارم به آشکارسازی سیگنال LFM پرداخته و انواع آشکارسازهای موجود برای آن را بررسی می‌کنیم. از بین آشکارسازهای مورد بررسی آشکارساز شبه بهینه این سیگنال یعنی آشکارساز مبتنی بر تبدیل فوریه کسری[1] را انتخاب کرده و از آنجایی که این آشکارساز نسبت به توان نویز حساس بوده و نرخ هشدار کاذب آن با تغییر توان نویز تغییر می‌کند روش‌هایی را برای تثبیت نرخ هشدار کاذب در آن پیشنهاد می‌نماییم. روش‌های پیشنهادی علاوه بر CFAR کردن آشکارساز سیگنال LFM دارای عملکردی مطلوب و نزدیک به حالت بهینه می‌باشند. در فصل پنجم به آشکارسازی سیگنال های FH پرداخته و به بررسی تعدادی از آشکار سازهای موجود برای آن می‌پردازیم. از بین آشکارسازهای مذکور مهمترین آنها یعنی آشکارساز رادیومتر کانالیزه را انتخاب کرده و به بررسی تاثیر بکارگیری روش‌های مختلف CFAR خواهیم پرداخت. در این فصل روش‌هایی را برای بهبود پردازنده‌های CFAR موجود پیشنهاد خواهیم کرد. از آن جایی که آشکارساز رادیومتر کانالیزه برای سیگنال‌های FH بسیار شبیه به آشکارسازی سیگنال در روش‌های حس کردن طیف در رادیوهای هوشمند می‌باشد، روش‌های پیشنهادی را بر روی مدل‌های موجود برای حس‌کردن طیف نیز اعمال کرده و نتایج آن را بررسی می‌کنیم. در نهایت در فصل ششم به نتیجه‌گیری از کارهای انجام شده و بیان کارهای آینده خواهیم پرداخت.

---

[1] Fractional Fourier Transform

فصل دوم
اصول آشکارسازی

۲ ـ مقدمه

تصمیم‌گیری همواره یکی از ارکان زندگی آدمی بوده است. هر فردی در هنگام تصمیم‌گیری، با توجه به معیارهای شخصی، از بین گزینه‌های ممکن یکی را انتخاب می‌کند. در بسیاری از مسائل تصمیم‌گیری، به دلیل حضور عوامل تصادفی انتخاب یک گزینه از میان فرضیات ممکن با مشکل روبرو می‌شود. در این میان تئوری احتمالات نقش مهمی را ایفا خواهدکرد. به طوری که تئوری تصمیم‌گیری را یکی از زیر شاخه‌های نظریه احتمالات به حساب می‌آورند. در علوم مهندسی و کاربردهای مخابراتی از آن به نام نظریه آشکارسازی[1] یاد می‌کنند.

استخراج اطلاعات از سیگنال‌های دریافتی در سیستم‌های مخابراتی یکی از کاربردهای مهم نظریه آشکارسازی می‌باشد. یک مسئله آشکارسازی را می‌توان به دلیل وجود پارامترها و فرآیندهای تصادفی به صورت یک مسئله بهینه سازی آماری[2] مدل کرد. در بخش بعدی به معرفی بهینه‌سازی آماری خواهیم پرداخت. استفاده از نظریه آشکارسازی برای طراحی گیرنده بهینه جهت استخراج اطلاعات ارسالی از طرف فرستنده از سیگنال دریافتی، موضوعی قدیمی و معمول در علم مخابرات می‌باشد. در این پایان‌نامه قصد داریم بر روی موضوع آشکارسازی حضور سیگنال‌ها تمرکز کنیم. از میان کاربردهای فراوان نظریه آشکارسازی می‌توان به سیستم‌های راداری و رادیوهای هوشمند اشاره کرد.

در هر دو این موارد گیرنده وظیفه دارد تا با توجه به سیگنال دریافتی نسبت به وجود یا عدم وجود هدف یا کاربر اولیه[3] تصمیم‌گیری کند. با توجه به کاربردهای بیان شده می‌توان دریافت که نظریه آشکارسازی یکی از مباحث مهم جهت طراحی سیستم‌های مخابراتی می‌باشد. در این فصل ابتدا با نظریه آشکارسازی و تئوری تصمیم‌گیری آشنا

---

[1] Detection Theory
[2] Statistical Optimization
[3] Primary User

خواهیم شد. سپس به دلیل استفاده از مفاهیم راداری در فصل‌های بعدی به معرفی یک سیستم راداری ساده و اصول آشکارسازی آن می‌پردازیم و در نهایت به صورت اجمال آشکارسازی با نرخ هشدار کاذب ثابت[1] (CFAR) را مرور خواهیم کرد.

۲ ۴ بهینه سازی آماری

معمولا در مسائل بهینه‌سازی آماری، یک تابع یقینی یا تصادفی $S(.|\theta)$ وجود داشته و ما می‌خواهیم با تخمین پارامتر θ آنرا برآورد نماییم. کیفیت برآورد با یک معیار مانند میانگین مربعات خطا[2]، احتمال خطا[3] یا مقدار انحراف[4] سنجیده می‌شود. از طرف دیگر θ پارامتر شاخص تابع توزیع $F_x(x|\theta)$ که مبین توزیع احتمال مشاهدات x است، می‌باشد. از روی داده‌های مشاهده شده x و دانش $F_x(x|\theta)$ ، θ را بگونه‌ای تخمین می‌زنیم که برآورد P_1 معیارهای کیفیت (کارایی) مربوطه را بهینه (کمینه یا بیشینه) نماید. با توجه به مطالب بیان شده عناوین کلیدی در حل مسائل در بهینه‌سازی آماری را می‌توان چنین در نظر گرفت:

- انتخاب معیار بهینگی
- فراهم‌آوردن اطلاعات مورد نیاز
- یافتن ساختار بهینه
- محاسبه کارایی ساختار بهینه

یک مثال از چگونگی کاربرد بهینه‌سازی آماری در مسائل آشکارسازی را می‌توان اینگونه بیان کرد.

اگر تابع $S(.|\theta)$ بصورت زیر تعریف شود:

$$\theta \in \Theta_m \quad : \text{هرگاه} \qquad S(.|\theta) = m \qquad m = 0, 1, \dots, M-1 \qquad (۱-۲)$$

مسئله بهینه‌سازی بصورت دسته‌بندی θ در یکی از M دسته Θ_0 تا Θ_{M-1} در می‌آید. این مسئله نمونه‌ای از مسائل آشکارسازی در گیرنده(مخاطب) مخابرات دیجیتال است. دسته‌های Θ_m نشان‌دهنده سمبل‌ها بوده و معیار بهینگی کمینه کردن احتمال دسته‌بندی نادرست آن‌ها است.

در دسته‌ای دیگر از گیرنده‌های سیستم‌های مخابراتی، که نقش گیرنده غیرمخاطب را دارند، فرستنده اطلاعاتی را برای آن ارسال نمی‌کند بلکه در این حالت گیرنده غیرمخاطب سعی می‌کند تا بوسیله‌ی روش‌های مختلف، اطلاعاتی از فرستنده مورد نظر بدست آورد. یکی از مصادیق گیرنده غیرمخاطب در سیستم‌های مخابراتی، رادیوهای هوشمند می‌باشند که به طور مفصل در فصول آینده راجع به مکانیزم کار آنها صحبت خواهیم کرد. این سیستم‌ها جهت استفاده بهینه از پهنای باندهای فرکانسی پیشنهاد شدند و اجازه دارند تا در زمان‌هایی که پهنای‌باندهای فرکانسی، خالی از استفاده‌کنندگان اولیه (مجوزدار) هستند از آن‌ها استفاده کنند. رادیوهای هوشمند وظیفه دارند به دلیل حق-

---

[1] Constant False Alarm Rate
[2] Mean Square Error
[3] Probability of Error
[4] Deflection

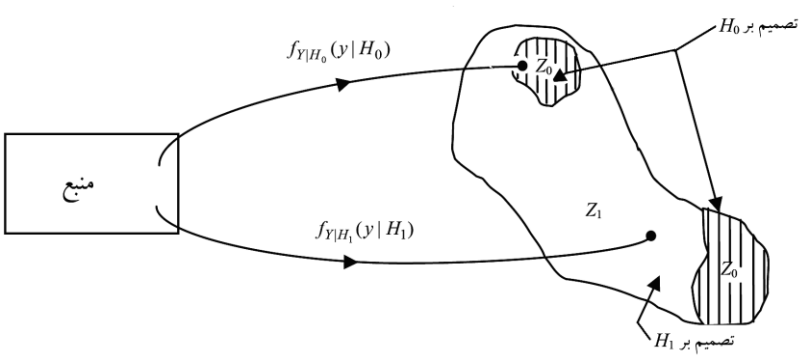
تقدم استفاده‌کننده‌های اولیه از ایجاد تداخل با آنها جلوگیری کنند. به همین دلیل آن‌ها به محیط گوش داده و نسبت به حضور سیگنال استفاده‌کننده اولیه تصمیم‌گیری می‌کنند در حالیکه آنها گیرنده مخاطب نیستند و برای استفاده-کننده اولیه نقش گیرنده غیرمخاطب را خواهند داشت. در این حالت سیستم رادیویی هوشمند باید با استفاده از اطلاعات محدودی که از نوع سیگنال ارسالی یا مشخصات دیگر آن دارد به آشکارسازی حضور کاربران اولیه بپردازد.

یکی دیگر از مصادیق گیرنده غیر مخاطب آشکارسازی در سیستم‌های راداری می‌باشد. در این نوع سیستم‌ها هدف اطلاع‌یافتن نسبت به حضور و یا عدم حضور هدف در محیط می‌باشد که این کار با استفاده از سیگنال‌های بازگشتی از هدف انجام می‌شود. در بخش‌های بعدی بیشتر با آشکارسازی در سیستم‌های راداری آشنا خواهیم شد.

با توجه به کاربردهای بیان شده جایگاه گیرنده مخاطب و غیرمخاطب تاحدودی روشن شد. استفاده از نظریه آشکارسازی در طراحی گیرنده بهینه سیستم‌های مخابراتی(گیرنده مخاطب) موضوعی کلاسیک و آشنا برای مهندسین مخابرات است. با توجه به مطالب بیان شده در این پایان‌نامه می‌خواهیم آشکارساز بهینه حضور سیگنال از دیدگاه یک گیرنده غیرمخاطب را مورد بررسی قرار دهیم. همانطور که انتظار می‌رود مبانی آشکارسازی در هر دو این موارد یکسان بوده و تغییر جایگاه در اتخاذ معیار بهینگی و مدلسازی تاثیر می‌گذارد.

۲ ۳ مبانی آشکارسازی باینری

در آزمون فرض دوتایی می‌خواهیم با توجه به رخداد مشاهده شده y و اطلاعات قبلی از مسئله، وقوع آنرا به یکی از دو حالت H_0 و H_1 نسبت دهیم. بر این اساس فضای بردارهای دریافتی(فضای مشاهدات) به دو ناحیهٔ Z_0 و Z_1 افراز می‌شود. فضای مشاهدات $Z = Z_0 \cup Z_1$ در شکل۲-۱ نشان داده شده است. در صورتی که بردار y در فضای Z_0 قرار بگیرد گیرنده تصمیم به H_0 و در صورتی که بردار y در فضای Z_1 قرار بگیرد گیرنده تصمیم به H_1 خواهد گرفت. تابع چگالی احتمال بردار دریافتی y به شرط دو فرضیهٔ مذکور عبارتند از $f_{Y|H_0}(y|H_0)$ و $f_{Y|H_1}(y|H_1)$.



شکل۲-۱ : نگاشت از فضای پارامتر به فضای آزمون فرض دوتایی

در مسئله آشکارسازی سیگنال باینری، H_0 فرض دریافت نویز در مشاهدات y_k و H_1 فرض حضور سیگنال هدف در مشاهدات نویزی y_k است. اولین قدم در رابطه با مدلسازی مسئله آشکارسازی سیگنال، نحوه ترکیب سیگنال و نویز در فرض H_1 است. در اغلب موارد نویز به صورت جمع‌پذیر با سیگنال مدلسازی شده و بنابراین مسئله آشکارسازی بصورت آزمون فرض زیر خواهد بود:

$$H_0 : y_k = n_k, \qquad k = 0,1,...,N-1$$
$$H_1 : y_k = s_k + n_k, \qquad k = 0,1,...,N-1 \qquad (۲-۲)$$

در اثر وجود اغتشاش، دو نوع خطا در تصمیم‌گیری قابل بروز می‌باشد:

خطای نوع اول: اعلام وجود هدف در صورتیکه واقعاً هدف موجود نیست (هشدار کاذب[1]).

خطای نوع دوم: از دست دادن [2]هدف یا اعلام عدم وجود هدف وقتی که واقعاً هدف موجود باشد.

احتمال خطای نوع اول را با P_{fa} و احتمال خطای نوع دوم را با P_m نمایش می‌دهند و از روابط زیر بدست می‌آید [۴]:

$$P_{fa} = P(D_1 | H_0) = \int_{Z_1} f_{\underline{Y}}(\underline{y} | H_0)\, d\underline{y} \qquad (۲-۳-\text{الف})$$

$$P_m = P(D_0 | H_1) = \int_{Z_0} f_{\underline{Y}}(\underline{y} | H_1)\, d\underline{y} \qquad (۲-۳-\text{ب})$$

احتمال اعلام وجود هدف وقتی که واقعاً هدف موجود است را احتمال آشکارسازی می‌نامند و آن را با P_d نمایش می‌دهند:

$$P_d = 1- P_m = P(D_1 | H_1) = \int_{Z_1} f_{\underline{Y}}(\underline{y} | H_1)\, d\underline{y} \qquad (۲-۴)$$

احتمال بروز خطا در واقع احتمال بروز هر کدام از دو خطای مذکور است که به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$P_{Error} = P(error | H_0) P(H_0) + P(error | H_1) P(H_1) = P_{fa} P_0 + P_m P_1 \qquad (۲-۵)$$

P_0 و P_1 به ترتیب، احتمال پیشین برآیند H_0 و H_1 می‌باشند. P_{fa} و P_d به‌ترتیب، احتمال هشدار کاذب و احتمال آشکارسازی، دو پارامتر اساسی برای سنجش کارایی آشکارسازهاست که معمولاً بدست آوردن رابطهٔ بستهٔ ریاضی برای این مقادیر برای چیدمان‌های متنوع در آشکارسازی، دشوار و بعضاً غیر ممکن است و بر این اساس برای بررسی کارایی هر آشکارساز، دو منحنی، تحت عناوین مشخصهٔ عملیاتی گیرنده و منحنی تابع توان[3] قابل ترسیم است، که این منحنی‌ها به ترتیب P_d برحسب P_{fa} برای یک SNR[4] ثابت و P_d بر حسب SNR به‌ازای یک P_{fa} ثابت برای هرآشکارساز را نشان می‌دهند. اگر منحنی‌های مذکور برای چند آشکارساز مختلف در شرایط یکسان بر روی یک نمودار ترسیم شود، آن آشکارسازی که منحنی آن بالاتر از بقیه قرار بگیرد، در مقایسه با دیگر آشکارسازها کارآمدتر است. روش معمول مورد استفاده برای ترسیم این منحنی‌ها، شبیه‌سازی بر اساس روش مونت-کارلو

---

[1] False Alarm
[2] Miss
[3] Power Function
[4] Signal to Noise Ratio

می‌باشد[1] که داده‌های تولید شده به‌وسیلهٔ این روش، به آشکارساز مورد نظر داده شده و برای مقادیر مختلف پارامترهای موردنظر، منحنی‌های مذکور ترسیم می‌گردند.
هدف اصلی طراحی آشکارساز بهینه، دستیابی به قاعدهٔ تصمیم‌گیری بهینه بر اساس یک معیار بهینگی مشخص است. معیارهای بهینگی آشکارسازی باید تحت شرایط موجود به بهترین نحو، خواسته‌های مورد نیاز آشکارسازی را برآورده کند. بر همین اساس، معیارهای بهینگی مختلفی ارائه شده است که هر کدام به یک قاعدهٔ تصمیم‌گیری منجر می‌شوند. در ادامه قواعد مختلف تصمیم‌گیری را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

۲ ۳ ۱ آزمون فرضیهٔ ساده

اگر سیگنالی که قرار است آشکار شود یا همان S، کاملاً معلوم و فاقد پارامتر مجهول باشد، در آن صورت آزمون فرضیه را آزمون فرضیهٔ ساده گویند که در آن تابع چگالی احتمال مشاهدات، معلوم است[۱۲]. در این آزمون، معیارهای بهینگی مختلفی وجود دارد که به آشکارسازهای متعددی منجر می‌شود و در همهٔ آنها با تابع مهمی، تحت عنوان تابع نسبت درستنمایی[1] مواجهیم که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathrm{L}(\underline{y}) = \frac{f_{\underline{Y}}(\underline{y} \mid H_1)}{f_{\underline{Y}}(\underline{y} \mid H_0)} \qquad (۶-۲)$$

با استفاده از این تابع، معیارهای بهینهٔ آزمون فرضیهٔ ساده به صورت زیر قابل بیان است:

۱ -معیار بیشینهٔ احتمال پسین[2]: در این معیار pdfهای فرضیه‌های H_0 و H_1 به فرض بردار دریافتی معلوم، با یکدیگر مقایسه می‌شوند و در مورد وجود یا عدم وجود هدف، تصمیم‌گیری می‌شود؛ پس داریم:

$$f_{\underline{Y}}(H_1 \mid \underline{y}) \underset{H_0}{\overset{H_1}{\gtrless}} f_{\underline{Y}}(H_0 \mid \underline{y}) \qquad (۷-۲)$$

طبق قاعدهٔ زنجیره‌ای پس از ساده‌سازی، رابطهٔ فوق را می‌توان بر حسب نسبت درستنمایی، به صورت زیر نوشت:

$$\mathrm{L}(\underline{y}) \underset{H_0}{\overset{H_1}{\gtrless}} \frac{P(H_0)}{P(H_1)} = Th \qquad (۸-۲)$$

در این معیار، ارزش دو خطای P_{fa} و P_m یکسان، و ضریب هر دو احتمال برابر یک، در نظر گرفته شده است. در این صورت، با دانستن احتمالات $P(H_1)$ و $P(H_0)$، معیار MAP منجر به مقایسهٔ نسبت درستنمایی با یک سطح آستانهٔ[3] ثابت می‌شود. این معیار با توجه به توضیحات داده شده به نحوی عمل می‌کند که احتمال خطای کل بیان شده در رابطهٔ (۲-۳-الف) کمینه شود [۴].از آنجایی‌که معمولا در کاربردهای مورد نظر، $P(H_0)$ و $P(H_1)$ نامعلوم می-

[1] Likelihood Ratio
[2] Maximum a posteriori probability (MAP)
[3] Threshold