دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق–مخابرات

سنجش طیف به صورت باند پهن در شبکه‌های رادیو شناختگر با استفاده از آشکارساز انرژی

توسط:

یعثوب اقبالی

استاد راهنما:

دکتر محمود احمدیان

زمستان ۱۳۹۰

بسم الله الرحمن الرحیم

تأییدیّه هیات داوران

(برای پایان نامه)

اعضای هیئت داوران، نسخه نهائی پایان نامه آقای: یعثوب اقبالی

را با عنوان: **سنجش طیف به صورت باندپهن در شبکه های رادیوشناختگر با استفاده از آشکارساز انرژی**

از نظر فرم و محتوی بررسی نموده و پذیرش آن را برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد تأیید می‌کند.

اعضای هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضاء
۱-استاد راهنما	دکتر محمود احمدیان	دانشیار	
۲-استاد مشاور	نیما رئیسی		
۳-استاد مشاور			
٤-استاد ممتحن(داخلی)	دکتر مهرداد اردبیلی پور	استادیار	
٥-استاد ممتحن(خارجی)	دکتر عباس محمدی	استاد	
٦-نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر مهرداد اردبیلی پور	استادیار	

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

و برادر مهربانم

که با فداکاری‌ها و محبت‌های بی‌دریغشان همواره در زندگی یار من بودند.

تشکر و قدردانی

بر خود لازم می‌دانم از زحمات استاد گرامی

جناب آقای دکتر محمود احمدیان

بابت راهنمایی‌های ارزنده در به ثمر رسیدن

این پایان نامه تشکر ویژه نمایم.

همچنین از اساتید ارجمند، آقایان دکتر اردبیلی‌پور و دکتر محمدی که زحمت داوری این پایان نامه را بر عهده داشتند و با راهنمایی‌های خود از معایب این نوشته کاستند، صمیمانه قدردانی می‌شود.

از اعضای آزمایشگاه شناسه و رمز به ویژه آقای مهندس حمید حسنی که در انجام این پایان نامه با اینجانب همکاری داشته‌اند تشکر می‌نمایم.

و با سپاس فراوان از موسسه تحقیقات ارتباطات و فناوری اطلاعات ایران که با قرارداد پژوهشی شماره **۶۸۹۴/۵۰۰/ت** تاریخ **۹۰/۵/۳** این پروژه را پشتیبانی نمودند.

اظهار نامه دانشجو

موضوع پایان نامه: سنجش طیف به صورت باندپهن در شبکه های رادیوشناختگر با استفاده از آشکارساز انرژی

استاد راهنما: آقای دکتر محمود احمدیان

نام دانشجو: یعثوب اقبالی

شماره دانشجوئی: ۸۸۰۵۱۵۴

اینجانب **یعثوب اقبالی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد مهندسی **برق** گرایش **مخابرات سیستم** دانشکده **مهندسی برق و کامپیوتر** دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در این پایان نامه توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده مورد تائید است، و در موارد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. به علاوه گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان‌نامه چارچوب (فرمت) مصوب دانشگاه را به طور کامل رعایت کرده‌ام.

امضاء دانشجو:

تاریخ:

فرم حق طبع و نشر و مالکیت نتایج

۱- حق چاپ و تکثیر این پایان‌نامه متعلق به نویسنده آن است. هرگونه کپی برداری به صورت کل پایان-نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز است.

ضمنا متن این صفحه نیز باید در نسخه تکثیر شده وجود داشته باشد.

۲- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی است و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.

همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نیست.

چکیده

یکی از چالش‌های پیش روی شبکه‌های رادیو شناختگر، مساله‌ی سنجش طیف و چگونگی تشخیص وجود سیگنال کاربر اولیه می‌باشد. در این پایان‌نامه، سنجش طیف باندپهن در شبکه‌های رادیو شناختگر مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ابتدا، به‌منظور بالا بردن دقت سنجش طیف، آشکارساز انرژی بهبودیافته شرح داده می‌شود. به‌منظور کاهش تداخل و جلوگیری از دست رفتن فرصت‌های طیفی، سطح آستانه‌ی بهینه برای آشکارساز بهبودیافته بدست می‌آید. مشارکت کاربران ثانویه به‌عنوان راه‌حلی برای رفع مشکل محوشدگی چند مسیره و اثر سایه در محیط بی‌سیم پیشنهاد شده است، به‌همین منظور، مهم‌ترین قانون‌های موجود در سنجش طیف مشارکتی با استفاده از آشکارساز انرژی بهبودیافته مورد بررسی قرار می‌گیرند. در شبیه‌سازی‌ها با مقایسه‌ی منحنی مشخصه‌ی عملیاتی گیرنده نشان داده می‌شود که کارایی آشکارساز انرژی بهبودیافته نسبت به آشکارساز انرژی رایج، بالاتر می‌باشد. در ادامه، پیشنهاد می‌شود که از آشکارساز انرژی بهبودیافته برای آشکارسازی هم‌زمان زیرباندها که یکی از روش‌های مورد توجه در سنجش طیف باندپهن می‌باشد، استفاده گردد. با توجه به توزیع کاربران در محیط‌های مختلف جغرافیایی، اطلاعات دریافتی کاربران ثانویه با یک‌دیگر متفاوت می‌باشد، به‌همین منظور به اطلاعات دریافتی از هر یک از کاربران در مرکز ترکیب با توجه به اهمیت آن‌ها وزن خاصی اختصاص می‌یابد. در شبیه‌سازی‌ها نشان داده می‌شود که کارایی این روش سنجش، نسبت به روش آشکارساز انرژی، بهتر بوده و اختصاص بردار وزن در آن کارایی را بهبود می‌بخشد.

کلید واژه: رادیو شناختگر، آشکارساز انرژی بهبودیافته، سنجش مشارکتی، سنجش طیف باندپهن.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست شکل‌ها ..... د

فهرست علایم و نشانه‌ها ..... و

فصل ۱- مقدمه ۱

۱-۱- معرفی رادیو شناختگر ۱

۱-۲- ساختار شبکه‌ی رادیوی شناختگر ۳

۱-۳- روش‌های سنجش طیف ۴

۱-۳-۱- آشکارسازی گیرنده‌ی اولیه ۴

۱-۳-۲- آشکارسازی فرستنده‌ی اولیه ۵

۱-۳-۳- آشکارسازی بر اساس دمای تداخل ۶

۱-۴- سنجش طیف باند پهن ۶

۱-۴-۱- بهینه‌سازی توام ۶

۱-۴-۲- روش‌های نمونه‌برداری فشرده ۷

۱-۴-۳- روش‌های مبتنی بر تخمین واریانس نویز و سیگنال ۷

۱-۵- اهداف پایان نامه ۸

۱-۶- ساختار پایان‌نامه ۸

فصل ۲- آشکارسازی توام بهینه برای سنجش طیف در شبکه‌های رادیو شناختگر ۱۰

۲-۱- مقدمه ۱۰

۲-۲- مدل سیستم ۱۱

۲-۲-۱- سنجش طیف باندپهن ۱۱

۲-۲-۲- سیگنال دریافتی ۱۲

۲-۲-۳- آشکارسازی سیگنال در زیرباندها ۱۲

۲-۳- آشکارسازی توام زیرباندها ۱۴

۲-۴- آشکارسازی توام طیفی- فضایی ۱۸

۲-۴-۱- بهینه‌سازی توام ۲۰

۲-۴-۲- بهینه‌سازی ترتیبی ۲۲

۲-۴-۲-۱- بهینه‌سازی فضایی ۲۳

۲-۴-۲-۲- بهینه‌سازی طیفی ۲۴
۲-۵- نتایج شبیه‌سازی‌ها ۲۴
۲-۶- نتیجه‌گیری ۲۹
فصل ۳- آشکارساز انرژی بهبود یافته برای سیگنال‌های تصادفی در حضور نویز گوسی ۳۰
۳-۱- مقدمه ۳۰
۳-۲- مدل سیستم ۳۰
۳-۳- نتایج شبیه‌سازی ۳۴
۳-۴- نتیجه‌گیری ۳۸
فصل ۴- سنجش طیف مشارکتی با استفاده از آشکارساز انرژی بهبود یافته برای محیط‌های غیر همگن ۳۹
۴-۱- مقدمه ۳۹
۴-۲- مدل سیستم ۴۰
۴-۳- تعیین سطح آستانه‌ی بهینه ۴۱
۴-۴- محاسبه‌ی گذردهی ۴۲
۴-۵- سنجش طیف مشارکتی مبتنی بر آشکارساز بهبودیافته ۴۲
۴-۶- نتایج شبیه‌سازی ۴۳
۴-۷- نتیجه‌گیری ۵۱
فصل ۵- سنجش طیف باند پهن با استفاده از آشکارساز انرژی بهبود یافته ۵۲
۵-۱- مقدمه ۵۲
۵-۲- مدل سیستم ۵۳
۵-۲-۱- آشکارسازی طیف باند پهن با استفاده از آشکاساز انرژی بهبودیافته ۵۳
۵-۳- آشکارسازی طیف باند پهن به کمک مشارکت ۵۵
۵-۳-۱- محاسبه‌ی مجموع گذردهی ۵۶
۵-۴- نتایج شبیه‌سازی ۵۸
۵-۵- نتیجه‌گیری ۶۲
فصل ۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۶۳
۶-۱- مروری بر نتایج به‌دست آمده در این پایان‌نامه ۶۳
۶-۲- پیشنهادهایی برای تحقیقات آینده ۶۴
فهرست مراجع ۶۵

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۱-۱ میزان استفاده از باندهای فرکانسی ۱
جدول ۲-۱ پارامترهای مورد استفاده برای شبیه‌سازی در حالت تک کاربره ۲۵
جدول ۲-۲ پارامترهای مورد استفاده برای شبیه‌سازی در حالت مشارکتی ۲۵
جدول ۵-۱ پارامترهای مورد نیاز برای شبیه‌سازی ۵۸

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱ میزان استفاده از طیف‌های فرکانسی ۲
شکل ۲-۱ نمایش وضعیت پر یا خالی بودن زیرباندها ۱۱
شکل ۲-۲ شماتیک آشکارسازی هم‌زمان چند باندی به منظور سنجش طیف در شبکه‌های رادیو شناختگر ۱۴
شکل ۲-۳ ضریب مشارکت برای سنجش طیف در زیر باند kام ۱۸
شکل ۲-۴ مجموع گذردهی قابل حصول بر حسب محدودیت مجموع تداخل با سیستم اولیه [۱۲]..... ۲۶
شکل ۲-۵ مجموع تداخل با سیستم اولیه بر حسب محدودیت مجموع گذردهی قابل حصول [۱۸]..... ۲۷
شکل ۲-۶ آستانه‌ی بهینه‌ی هر زیرباند و احتمال آشکارسازی غلط و احتمال هشدار غلط متناظر هر زیرباند به‌ازای: $P1: \varepsilon = 1.474$ و $P3: \delta = 2.354Mbps$ [۱۲] ۲۷
شکل ۲-۷ مجموع گذردهی قابل حصول بر حسب محدودیت مجموع تداخل با سیستم اولیه [۱۸]..... ۲۸
شکل ۲-۸ مجموع تداخل با سیستم اولیه بر حسب محدودیت مجموع گذردهی فرصت‌طلبانه [۱۸]..... ۲۹
شکل ۳-۱ مقایسه تابع توزیع تجمعی با تقریب گاما برای Y تحت فرض $H0$ زمانی‌که $\gamma = 0\ dB$ ۳۴
شکل ۳-۲ مقایسه‌ی تابع توزیع تجمعی با تقریب گاما برای Y تحت فرض $H1$ به‌ازای $M = 10$ ۳۵
شکل ۳-۳ مقدار p بهینه ناشی از بیشینه نمودن احتمال آشکارسازی بر حسب احتمال هشدار غلط ۳۶
شکل ۳-۴ مقدار p بهینه بر حسب γ به‌ازای مقادیر مختلف احتمال آشکارسازی، احتمال هشدار غلط، γ و M ۳۷
شکل ۳-۵ مقایسه منحنی مشخصه‌ی عملیاتی به‌ازای $M = 10$ و مقادیر مختلف γ ۳۷
شکل ۴-۱ زمان‌بندی ارسال و سنجش ۴۲
شکل ۴-۲ مقدار p بهینه هر کاربر به‌ازای احتمال هشدار غلط ۴۴
شکل ۴-۳ منحنی ROC به‌ازای قانون‌های تصمیم‌گیری $AND, OR, k\ out\ of\ N$ ۴۵
شکل ۴-۴ احتمال آشکارسازی بر حسب تعداد نمونه به‌ازای SNR های متفاوت ۴۵
شکل ۴-۵ احتمال هشدار غلط بر حسب تعداد نمونه به‌ازای SNR های متفاوت ۴۶
شکل ۴-۶ احتمال آشکارسازی بر حسب SNR ۴۶
شکل ۴-۷ احتمال هشدار غلط بر حسب SNR ۴۷
شکل ۴-۸ میزان بهبود احتمال آشکارسازی نسبت به آشکارساز رایج ۴۷

شکل ۴-۹ میزان بهبود احتمال هشدار غلط نسبت به آشکارساز رایج ۴۸
شکل ۴-۱۰ احتمال خطای کل با انتخاب سطح آستانه‌ی بهینه ۴۸
شکل ۴-۱۱ گذردهی قابل حصول نرمالیزه شده بر حسب تعداد نمونه ۴۹
شکل ۴-۱۲ میزان بهبود گذردهی قابل حصول نرمالیزه شده برحسب تعداد نمونه ۵۰
شکل ۴-۱۳ منحنی بهبود گذردهی قابل حصول ۵۰
شکل ۵-۱ شماتیک آشکارسازی همزمان زیرباندها با استفاده از آشکارساز انرژی بهبودیافته ۵۴
شکل ۵-۲ آشکارسازی زیرباندها به کمک مشارکت ۵۵
شکل ۵-۳ مجموع گذردهی فرصت‌طلبانه بر حسب محدودیت مجموع تداخل به‌ازای $M = 70$ ۵۹
شکل ۵-۴ مجموع گذردهی فرصت‌طلبانه بر حسب تعداد نمونه به‌ازای $\varepsilon = 1$ ۵۹
شکل ۵-۵ میزان بهبود گذردهی با استفاده از آشکارساز انرژی بهبودیافته ۶۰
شکل ۵-۶ مجموع گذردهی برحسب محدودیت مجموع تداخل به‌ازای $M = 70$ ۶۱
شکل ۵-۷ مجموع گذردهی برحسب محدودیت مجموع تداخل به‌ازای $\varepsilon = 0.2$ ۶۱

فهرست علایم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
سیگنال کاربر اولیه	s
نویز جمع شونده	v
بهره‌ی کانال بین فرستنده‌ی اولیه و گیرنده‌ی ثانویه	H
سیگنال دریافت شده در گیرنده‌ی ثانویه	r
نسبت سیگنال به نویز	γ
سطح آستانه‌ی تصمیم‌گیری	λ
تعداد نمونه برای آشکارسازی	M
گذردهی ارسال	t
مجموع گذردهی ارسال	R
ضریب تداخل	c
بزرگترین مقدار ویژه یک ماتریس	λ_{max}
زمان سنجش	τ
زمان ارسال	T
تابع گاما	Γ
تابع گامای غیرکامل پایین	$\gamma(.,.)$

فصل ۱– مقدمه

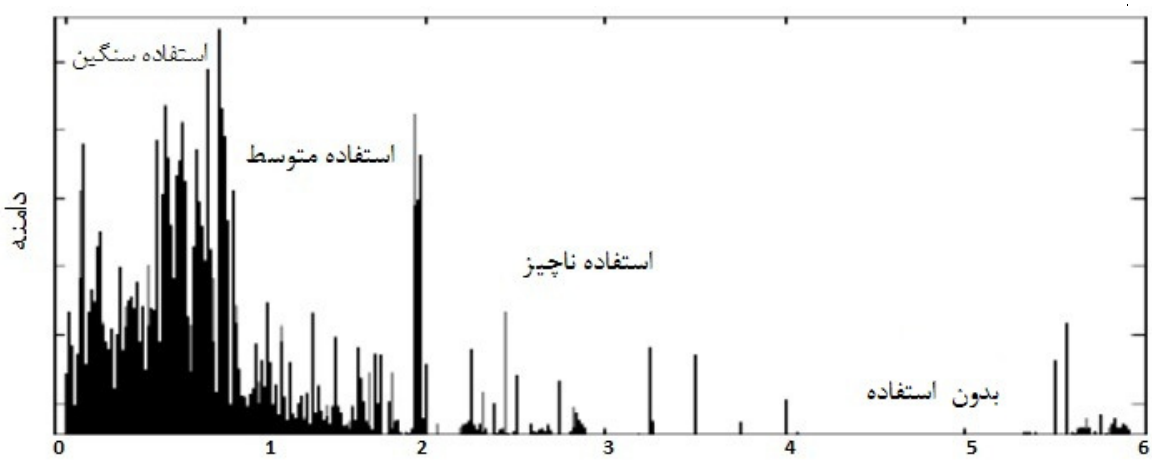
۱–۱– معرفی رادیو شناختگر[1]

با گسترش روزافزون تجهیزات و شبکه‌های مخابراتی، دسترسی به طیف فرکانسی مجوزدار برای پیاده-سازی سیستم‌های مخابرات رادیویی با محدودیت جدی مواجه شده است. با نگاه اجمالی به جدول تخصیص طیف رادیویی ملاحظه می‌شود که در حال حاضر تقریبا تمام باندهای فرکانسی تخصیص داده شده‌اند و تنها طیف فرکانسی محدودی برای سرویس‌ها و سیستم‌های مخابراتی جدید وجود دارد. محدودیت طیف فرکانسی قابل استفاده از یک سو و رشد تقاضا از سوی دیگر، ارائه الگوهای جدید برای استفاده‌ی بهینه از طیف فرکانسی را ضروری ساخته است [۱]. مراجع قانون‌گذار و سازمان‌های تنظیم مقررات رادیویی از بدو تولد خود در دهه‌های ابتدایی قرن بیستم میلادی، سیاست واگذاری بلوکی و ثابت طیف فرکانسی را در دستور کار خود داشته‌اند. مزیت اصلی این روش، کنترل ساده‌تر تداخل بین کاربران، مدیریت راحت‌تر شبکه و حصول آسان‌تر کیفیت سرویس[2] مورد نظر است. سیاست تخصیص طیف فرکانسی ثابت در گذشته بخوبی عمل می‌کرده است اما با رشد روز افزون تقاضا برای دسترسی به طیف فرکانسی در سال‌های اخیر، این نحوه تخصیص طیف، دیگر مناسب و جواب‌گو نمی‌باشد. نتایج تحقیقاتی که توسط FCC[3] در سال ۲۰۰۲ تحت عنوان $SPTF$[4] منتشر شد، در جدول ۱-۱ آمده است [۲]. همان-طور که گزارش FFC نیز نشان می‌دهد، میزان استفاده در برخی باندهای فرکانسی بسیار پایین می‌باشد که نشان دهنده‌ی نامناسب بودن سیستم تخصیص طیف است.

جدول ۱-۱ میزان استفاده از باندهای فرکانسی

$Frequency\ (GHz)$	۰-۱	۱-۲	۲-۳	۳-۴	۴-۵	۵-۶
$Utilization\ (\%)$	۵۴/۴	۳۵/۱	۷/۶	۰/۲۵	۰/۱۲۸	۴/۶

[1] Cognitive Radio
[2] Quality of Service (QoS)
[3] Federal Communications Commission
[4] Spectrum Policy Task Force



شکل ۱-۱ میزان استفاده از طیف‌های فرکانسی

محدودیت طیف در دسترس و موثر نبودن سیاست‌های فعلی تخصیص طیف، نیاز به تکنولوژی مخابراتی جدیدی که بتواند به‌صورت فرصت‌طلبانه از طیف استفاده کند را ضروری می‌سازد [۱, ۳-۴]. این کار می‌تواند با اجازه دادن به کاربران ثانویه برای بهره‌برداری از باندهای فرکانسی مختص سرویس‌های خاص و در نبود کاربران اولیه انجام شود. رادیو شناختگر به‌عنوان یک تکنولوژی جدید، برای استفاده‌ی بهینه از طیف، پیشنهاد شده است [۱]. یک رادیو شناختگر با بررسی محیط اطراف و وفق دادن خود با این محیط، توانایی استفاده از حفره‌های طیفی[1] (باندهای فرکانسی که به‌طور موقت توسط کاربران اولیه استفاده نمی‌شوند) را بدون ایجاد تداخل بر روی کاربران اولیه دارد [۱, ۳, ۵]. به‌منظور جلوگیری از تداخل، رادیو شناختگر باید به‌طور پیوسته طیف مورد استفاده‌ی خود را حس نماید تا درصورت حضور کاربر اولیه سریعا آن طیف را خالی کند. بر سر تعریف دقیق رادیو شناختگر توافق خاصی وجود ندارد، اما به‌طور ساده می‌توان آن‌را به‌صورت زیر تعریف نمود [۶]:

رادیویی که در آن سیستم‌های مخابراتی از محیط اطراف خود و پیکربندی داخلی مطلع هستند و براساس اطلاعات آن و قوانین از پیش تعیین شده می‌توانند در مورد رفتارهای عملیاتی خود تصمیم‌گیری کنند. به‌طور کلی، ویژگی‌های رادیوی شناختگر را می‌توان در دو مورد زیر خلاصه نمود [۱, ۳]:

الف- قابلیت شناخت[2]: به‌کمک تراکنش بلادرنگ با محیط، رادیو شناختگر می‌تواند قسمت‌هایی از طیف فرکانسی که در یک زمان خاص و یک منطقه‌ی جغرافیایی خاص بدون استفاده هستند و به آن‌ها فضای سفید یا حفره‌های طیفی گفته می‌شود را شناسایی نموده و بهترین طیف فرکانسی موجود را برای فعالیت خود انتخاب نماید.

[1] Spectral Holes
[2] Cognitive Capability

ب- قابلیت ساختاربندی مجدد[1]: رادیو شناختگر را می‌توان به‌گونه‌ای برنامه‌ریزی کرد که بتواند بر روی باندهای فرکانسی مختلف داده ارسال و دریافت نموده و از تکنولوژی‌های مختلف دسترسی (که توسط سخت‌افزار آن پشتیبانی می‌شود) بدون هیچگونه اصلاحی بر روی اجزاء سخت‌افزاری استفاده نماید. از جمله اجزاء قابل پیکربندی مجدد رادیو شناختگر می‌توان به نوع مدولاسیون، فرکانس کار و توان ارسالی اشاره نمود. با توجه به قابلیت‌های ذکر شده، برای پیاده‌سازی سخت‌افزاری رادیو شناختگر ، با چالش‌های جدیدی از جمله نیاز به آنتن‌های باندپهن، فیلترهای وفقی قابل تنظیم روی هر باند فرکانسی و حساسیت بالا برای آشکارسازی سیگنال‌های ضعیف در یک بازه فرکانسی وسیع روبرو خواهیم بود.

۱-۲- ساختار شبکه‌ی رادیوی شناختگر

اجزاء اصلی تشکیل دهنده‌ی شبکه‌ی رادیو شناختگر را می‌توان در دو گروه شبکه‌ی اولیه[2] و شبکه‌ی ثانویه[3] طبقه‌بندی نمود [۳]. شبکه‌ی اولیه یا شبکه‌ی دارای مجوز، همان شبکه‌ی موجودی است که در آن کاربران اولیه، دارای مجوز فعالیت در یک طیف فرکانسی خاص هستند و شبکه‌ی ثانویه که کاربران آن دارای مجوز فعالیت در یک باند فرکانسی خاص نیستند اما درصورت عدم وجود کاربر اولیه در طیف، می‌توانند از آن باند فرکانسی خالی به‌عنوان فرصت طیفی برای ارسال خود استفاده نمایند. با توجه به این‌که کاربران اولیه برای استفاده از طیف دارای تقدم هستند، فعالیت این کاربران به هیچ وجه نباید توسط کاربران ثانویه تحت تاثیر قرار گیرد و به محض ورود کاربر اولیه به طیف، کاربران ثانویه باید آن طیف را ترک نمایند. نکته‌ی مهم دیگر این است که برای اشتراک طیف بین شبکه‌های اولیه و ثانویه، این شبکه‌ی ثانویه است که باید در سخت‌افزار خود تغییرات لازم را اعمال نماید.

شبکه‌های رادیو شناختگر به دلیل هم‌زیستی با شبکه‌های اولیه و نیاز به کیفیت سرویس‌های متفاوت با چالش‌هایی از جمله پرهیز از تداخل با شبکه‌ی اولیه، نیاز به مخابرات یکپارچه و آگاهی از کیفیت سرویس مورد نیاز مواجه هستند. در واقع، این شبکه‌ها باید توانایی تعیین حفره‌های طیفی، انتخاب بهترین کانال در دسترس، هماهنگ نمودن دسترسی به کانال‌ها و ترک کانال مجوزدار در صورت حضور کاربر اولیه را داشته باشند. با توجه به این موارد، فرآیند مدیریت طیف، شامل چهار قدم اصلی است [۱]:

[1] Reconfigurability
[2] Primary Network
[3] Secondary Network

سنجش طیف[1]: کاربر رادیو شناختگر فقط می‌تواند از قسمت‌های خالی طیف استفاده نماید، بنابراین طیف باید به طور مداوم پایش شود تا از اطلاعات به‌دست آمده بتوان حفره‌های طیفی را آشکار نمود.

تصمیم‌گیری طیفی[2]: بر اساس در دسترس بودن طیف، کاربران می‌توانند کانالی برای فعالیت خود اختصاص دهند. نحوه‌ی تخصیص کانال علاوه بر وجود طیف خالی، به سیاست‌ها و قوانین خاصی بستگی دارد.

اشتراک طیف[3]: از آن‌جا که ممکن است چندین کاربر ثانویه برای دسترسی به طیف تلاش کنند، دسترسی در شبکه باید به‌نحوی هماهنگ شود که از تداخل کاربران مختلف جلوگیری شود.

تحرک طیف[4]: از آن‌جا که کاربران رادیو شناختگر، کاربران ثانویه‌ی طیف هستند، به محض ورود یک کاربر اولیه به طیف مورد استفاده، کاربران ثانویه باید سریعا طیف را ترک نموده و ارسال اطلاعات خود را در قسمت دیگری از طیف که خالی است ادامه دهند.

با توجه به مطالبی که بیان شد، سنجش طیف اولین و مهمترین قدم در پیاده‌سازی تکنولوژی رادیو شناختگر می‌باشد و تمرکز این پایان نامه نیز بر روی همین مساله است.

۱-۳- روش‌های سنجش طیف

۱-۳-۱- آشکارسازی گیرنده‌ی اولیه[5]

موثرترین روش برای آشکارسازی حفره‌های طیفی، آشکارسازی کاربران اولیه در محدوده‌ی مخابراتی کاربران رادیو شناختگر می‌باشد. به منظور آشکارسازی گیرنده‌ی اولیه باید از توان نشتی نوسان‌ساز محلی که توسط $front-end$ گیرنده‌ی اولیه منتشر می‌شود استفاده نمود [۷]. به دلیل ضعیف بودن سیگنال نشتی از گیرنده‌ی اولیه، پیاده‌سازی این روش کار ساده‌ای نیست.

[1] Spectrum Sensing
[2] Spectrum Decision
[3] Spectrum Sharing
[4] Spectrum Mobility
[5] Primary Reciever Detection

۱-۳-۲- آشکارسازی فرستنده‌ی اولیه[1]

آشکارسازی فرستنده‌ی اولیه براساس آشکارسازی سیگنال ارسالی توسط فرستنده‌ی اولیه از طریق مشاهدات محلی کاربران رادیو شناختگر انجام می‌شود. تاکنون روش‌های متفاوتی برای سنجش طیف از طریق آشکارسازی فرستنده‌ی اولیه پیشنهاد شده است که از مهمترین آن‌ها می‌توان به آشکارساز انرژی[2] [۸-۱۱]، فیلتر منطبق[3] [۱۲] و آشکارساز ایستای متناوب[4] [۱۳-۱۴] اشاره نمود.

روش فیلتر منطبق نیازمند اطلاعاتی در مورد سیگنال اولیه و توان نویز می‌باشد. این روش زمانی که اطلاعات سیگنال اولیه دقیق نباشد عملکرد ضعیفی خواهد داشت.

روش آشکارساز انرژی تنها نیازمند اطلاعاتی در مورد توان نویز است. اگر گیرنده‌ی ثانویه اطلاعات مهمی از سیگنال کاربر اولی را بدست نیاورد، در این حالت روش بهینه، آشکارساز انرژی می‌باشد. ضعف آشکارساز انرژی، عدم توانایی در جداسازی سیگنال‌های متفاوت می‌باشد و فقط حضور سیگنال را تعیین می‌کند.

آشکارساز ایستای متناوب از ویژگی‌های سیگنال‌های مدوله شده که با حامل‌های موج سینوسی، قطارهای پالس و ... ترکیب شده و منجر به تناوبی شدن آن‌ها می‌گردد، استفاده می‌کند. این آشکارساز زمانی‌که توان نویز نامعین می‌باشد، نسبت به آشکارساز انرژی عملکرد بهتری دارد اما از نظر محاسباتی پیچیده بوده و به زمان مشاهده به‌اندازه کافی بزرگ نیاز دارد.

با توجه به عدم وجود تراکنش بین کاربران اولیه و ثانویه، تکنیک‌های آشکارسازی فرستنده تنها به سیگنال‌های ضعیف دریافتی از فرستنده‌های اولیه اتکا می‌کنند. این تکنیک‌ها به‌تنهایی نمی‌توانند از تداخل با گیرنده‌های اولیه جلوگیری کنند. علاوه براین، به دلیل وجود محوشدگی چندمسیره[5] و محوشدگی سایه‌افکنی[6] در کانال بین فرستنده‌ی اولیه و گیرنده‌ی کاربر ثانویه، آشکارسازی فرستنده‌ی اولیه ممکن است با مشکل مواجه شود. برای غلبه بر این مشکلات، بایستی کاربران ثانویه‌ی مختلف با یک‌دیگر همکاری[7] کنند تا سنجش طیف با دقت بالاتری صورت گیرد. به این نوع سنجش طیف، سنجش

---

[1] Primary Transmitter Detection
[2] Energy Detection (ED)
[3] Matched Filter
[4] Cyclostationary Detection
[5] Multi-Path Fading
[6] Shadow Fading
[7] Cooperation

طیف مشارکتی[1] گفته می‌شود که در آن چندین کاربر ثانویه برای آشکارسازی فرستنده‌ی اولیه با یک-دیگر همکاری می‌کنند [۱۵-۱۶].

۱-۳-۳- آشکارسازی بر اساس دمای تداخل[2]

در عمل، مدل جدیدی برای اندازه‌گیری تداخل به‌نام دمای تداخل[3] توسط FCC پیشنهاد شده است [۶]. این مدل، تداخل در گیرنده را از طریق معیاری به‌نام حد دمای تداخل[4] محدود می‌کند. حد دمای تداخل، مقدار تداخل قابل تحمل در گیرنده است. تا زمانی‌که کاربران رادیو شناختگر با ارسال خود از این محدودیت تجاوز نکنند، می‌توانند از طیف فرکانسی مورد نظر استفاده نمایند. اگرچه این مدل، برای سنجش طیف بهترین مدل ممکن است اما عیب این مدل در چگونگی تعیین دقیق حد دمای تداخل می‌باشد.

۱-۴- سنجش طیف باند پهن

یکی از چالش‌های اساسی برای سیستم‌های مبتنی بر رادیو شناختگر، سنجش باندهای فرکانسی پهن به‌منظور یافتن حفره‌های طیفی موجود و استفاده از آن‌ها برای دسترسی فرصت‌طلبانه می‌باشد. این نیازمندی، چالش‌های منحصر بفردی را در زمینه‌ی طراحی سخت‌افزاری و طراحی الگوریتم‌های پردازش سیگنال قابل اطمینان فراهم می‌آورد. اولا، سنجش طیف نیاز به یک $RF\ front-end$ باندپهن به‌همراه مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال با دقت و سرعت بالا دارد که دارای هزینه‌ی پیاده‌سازی بالایی می‌باشد. علاوه براین، به‌منظور بهبود دسترسی فرصت‌طلبانه به طیف و جلوگیری از تداخل با سیستم‌های اولیه، بایستی باندهای فرکانسی پر و خالی با دقت بالا و در زمان اندکی مشخص گردند. بنابراین طراحی الگوریتم‌های سنجش طیف باندپهن، نیازی ضروری به‌نظر می‌رسد. در ادامه به بررسی برخی روش‌های موجود در سنجش طیف باندپهن برای شبکه‌های رادیو شناختگر می‌پردازیم.

۱-۴-۱- بهینه‌سازی توام

در این روش [۱۷-۲۳]، فرض می‌کنیم که سیستم اولیه‌ی مورد بررسی شامل چندین کاربر می‌باشد و هر یک از کاربران روی یک کانال باندپهن که به K زیرباند تقسیم شده فعالیت می‌کنند. در این روش

[1] Cooperative Spectrum Sensing (CSS)
[2] Interference-Based Detection
[3] Interference Temprature
[4] Interference Temprature Limit