بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه شاهد

دانشکده فنی و مهندسی

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق رشته مخابرات-گرایش سیستم

عنوان:

بررسی و بهبود آستانه تصمیم در سنجش طیف مبتنی بر مقادیر ویژه برای شبکه‌های رادیوشناختی

استاد راهنما:

دکتر حمیدرضا بخشی

نگارش:

حسین بافقی یزدی

زمستان ۱۳۹۰

	اظهار نامه دانشجو	شماره: تاریخ:

اینجانب حسین بافقی یزدی دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مخابرات گرایش سیستم دانشکده فنی مهندسی دانشگاه شاهد، گواهی می دهم که پایان نامه تدوین شده حاضر با عنوان " بررسی و بهبود آستانه تصمیم در سنجش طیف مبتنی بر مقادیر ویژه برای شبکه‌های رادیوشناختی " به راهنمایی استاد محترم جناب آقای دکتر حمیدرضا بخشی، توسط شخص اینجانب انجام و صحت و اصالت مطالب تدوین شده در آن، مورد تأیید است و چنان چه هر زمان، دانشگاه کسب اطلاع کند که گزارش پایان نامه حاضر صحت و اصالت لازم را نداشته، دانشگاه حق دارد، مدرک تحصیلی اینجانب را مسترد و ابطال نماید هم چنین اعلام می دارد در صورت بهره گیری از منابع مختلف شامل؛ گزارش های تحقیقاتی، رساله، پایان نامه، کتاب، مقالات تخصصی و غیره، به منبع مورد استفاده و پدید آورنده آن به طور دقیق ارجاع داده شده و نیز مطالب مندرج در پایان نامه حاضر تاکنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب و یا سایر افراد به هیچ کجا ارایه نشده است. در تدوین متن پایان نامه حاضر، چارچوب (فرمت) مصوب تدوین گزارش های پژوهشی تحصیلات تکمیلی دانشگاه شاهد به طور کامل مراعات شده و نهایتاً این که، کلیه حقوق مادی ناشی از گزارش پایان نامه حاضر، متعلق به دانشگاه شاهد می باشد.

نام و نام خانوادگی دانشجو(دست نویس):.....

امضاء دانشجو:

تاریخ:

تقدیم به

شهدای گرانقدر دفاع مقدس

و

شهدای عرصه‌ی علم و فن‌آوری

به‌ویژه شهیدان:

دکتر علیمحمدی

دکتر شهریاری

مهندس احمدی روشن

مهندس رضایی نژاد

و

سردار سرلشگر حسن تهرانی مقدم

چکیده

با نگاهی به جداول تخصیص فرکانسی می‌توان فهمید که تقریبا تمام بخش‌های قابل استفاده طیف فرکانسی به کاربردهای خاص اختصاص یافته و در ظاهر با نوعی کمیابی پهنای باند مواجه هستیم، در حالی که اگر طیف فرکانسی مورد استفاده را مرورکنیم، متوجه می‌شویم که برخی از قسمت‌های طیف در اغلب اوقات تقریبا بدون استفاده هستند که در این شرایط استفاده فرصت طلبانه از باندهای فرکانسی خالی ضروری به‌نظر می‌رسد. برای استفاده‌ی بهینه از طیف فرکانسی، محققان مخابرات، رادیوهایی هوشمند که به رادیو شناختی معروف هستند را ارائه کرده‌اند. در شبکه‌های رادیو شناختی، سنجش‌طیف بخش مهمی برای استخراج حفره‌های طیفی برای سیستم ثانویه است. در این تحقیق رادیو هوشمند را معرفی کرده و چالش‌های موجود در آن را توضیح می‌دهیم و سپس به روش‌های مختلف حس‌گری و تحلیل عملکرد آنها می‌پردازیم. به روش‌هایی که نیاز به آگاهی در مورد مشخصات سیگنال دریافتی ندارند، روش‌های کور سنجش طیف می‌گوییم. روش‌هایی مانند SVD به‌صورت مشارکتی باعث بهبود عملکرد روش سنجش مبتنی برمقادیر ویژه می‌گردد که در این تحقیق به بررسی آن پرداخته‌ایم. در شبیه‌سازی‌ها با مقایسه‌ی روش‌های معمول و روش ارائه شده، کارآیی این روش نیز مورد بررسی قرار داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که این روش در مقایسه با سایر روش‌ها در حالتی که کانال دارای محوشدگی باشد و همچنین تداخل نیز وجود داشته باشد، از عملکرد بهتری برخوردار می‌باشد.

کلید واژه: رادیو شناختی، سنجش طیف، سنجش کور طیف

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل ۱- مقدمه ۱

۱-۱- پیشینه‌ی رادیوشناختی ۲

۱-۲- روش‌های تخصیص طیف ۳

۱-۲-۱- اشتراک‌گذاری طیفی به روش ارسال زمینه‌ای سیگنال‌ها ۴

۱-۲-۲- اشتراک‌گذاری طیفی به روش روی‌هم‌گذاری سیگنال‌ها ۵

فصل ۲- سنجش طیف ۵

۲-۱- چالش‌های پیش رو در سنجش طیف ۵

۲-۱-۱- نیازهای سخت افزاری ۵

۲-۱-۲- کاربر اصلی مخفی ۶

۲-۱-۳- آشکارسازی کاربران طیف گسترده ۶

۲-۱-۴- تشخیص دوره و فرکانس ۶

۲-۱-۵- ترکیب تصمیم در سنجش مشارکتی ۶

۲-۱-۶- امنیت ۶

فصل ۳- روش‌های سنجش طیف ۸

۳-۱- انواع روش‌های معمول در سنجش طیف ۹

۳-۱-۱- سنجش مبتنی بر شکل موج ۹

۳-۱-۲- سنجش مبتنی بر ایستای تناوبی ۹

۳-۱-۳- سنجش براساس شناسایی (تعیین هویت رادیو) ۹

۳-۱-۴- فیلتر منطبق ۱۰

۳-۱-۵- آشکارسازی مبتنی بر راهنما ۱۰

۳-۲- روش‌های کور در سنجش طیف ۱۰

۳-۲-۱- آشکارساز انرژی ۱۰

۳-۲-۲- آشکارساز مبتنی بر کواریانس ۱۱

۳-۲-۲-۱-نسبت مقدار ویژه‌ی حداکثر به مقدار ویژه‌ی حداقل ۱۲

۳-۲-۲-۲-نسبت میانگین مقادیر ویژه به مقدار ویژه‌ی حداقل ۱۴

۳-۲-۳- آشکارسازی به روش DAD ۱۴
۳-۲-۴- سنجش طیف به روش تخمین طیف ۱۴
۳-۲-۴-۱- تخمین واریانس نویز به روش ML ۱۶
۳-۲-۴-۲- تخمین واریانس نویز شبه بهینه ۱۸

فصل ۴- سنجش طیف با استفاده از روش‌های مشارکتی ۲۵
۴-۱- تشخیص متمرکز ۲۵
۴-۲- تشخیص توزیع شده ۲۶
۴-۳- تشخیص بیرونی ۲۶

فصل ۵- مقادیر ویژه و تئوری تصمیم‌گیری آماری ۲۷
۵-۱- بردارهای ویژه ۲۸
۵-۱-۱- مقادیر ویژه متمایز ۲۸
۵-۱-۲- مقادیر ویژه غیر متمایز ۲۹
۵-۲- تئوری تصمیم‌گیری آماری ۳۵
۵-۲-۱- معیار بیز ۳۸
۵-۲-۱-۱- آزمون فرض باینری ۳۸
۵-۲-۲- معیار MINIMAX ۴۶
۵-۲-۳- معیار نیمن- پیرسون ۴۹

فصل ۶- مسئله گوسی عمومی ۵۱
۶-۱- آشکارسازی دوتایی ۵۱
۶-۱-۱- کواریانس یکسان ۵۲
۶-۱-۲- ماتریس کواریانس قطری ۵۴
۶-۱-۲-۱- واریانس‌های برابر ۵۴
۶-۱-۲-۲- واریانس نابرابر ۵۵
۶-۱-۳- ماتریس کواریانس غیرقطری ۵۶
۶-۱-۴- میانگین یکسان ۶۰
۶-۱-۴-۱- عناصر سیگنال ناهمبسته با واریانس برابر ۶۱
۶-۱-۴-۲- عناصر سیگنال ناهمبسته با واریانس نا برابر ۶۳
۶-۱-۵- میانگین یکسان و فرضیات متقارن ۶۴
۶-۱-۵-۱- مولفه‌های سیگنال ناهمبسته و واریانس‌های برابر ۶۵
۶-۱-۵-۲- مولفه‌های سیگنال ناهمبسته و واریانس‌های نا برابر ۶۸

۶-۲- ماتریس تصادفی ۶۹
۶-۲-۱- ماتریس ویشارت ۶۹
فصل ۷- سنجش طیف مبتنی بر مقادیر ویژه ۷۰
۷-۱- مدل سیستم ۷۰
۷-۲- آشکارسازی مبتنی بر مقادیر ویژه ۷۲
۷-۳- احتمال هشدار غلط و آستانه تصمیم‌گیری ۷۴
۷-۳-۱- آستانه‌ی غیر مجانبی دقیق ۷۷
۷-۴- شبیه سازی ۸۰
فصل ۸- بهبود الگوریتم سنجش طیف مبتنی بر SVD مشارکتی ۸۱
۸-۱- مدل سیستم ۸۱
۸-۲- آشکارسازی سیگنال مبتنی بر SVD ۸۵
۸-۲-۱- الگوریتم آشکارسازی سیگنال با یک گیرنده ۸۷
۸-۲-۲- الگوریتم آشکارسازی سیگنال در حالت مشارکتی(چند گیرنده) ۸۷
۸-۳- آستانه‌ی تصمیم‌گیری ۸۸
۸-۴- شبیه سازی ۸۸
فصل ۹- نتیجه‌گیری وپیشنهادات ۹۱
واژه نامه فارسی به انگلیسی ۹۴
واژه نامه انگلیسی به فارسی ۹۶

فهرست جدول‌ها

عنوان صفحه

جدول ۷-۱ ..... ۷۶
جدول ۷-۲ ..... ۷۹

فهرست شکل‌ها

عنوان صفحه

شکل ۱-۱ : حفره طیفی ۴
شکل ۱-۲ : کاربر اصلی مخفی ۷
شکل ۱-۳ : آشکارساز انرژی ۱۱
شکل ۱-۵ : ناحیه‌ی تصمیم‌گیری ۴۰
شکل ۵-۲ : تابع چگالی هزینه ۴۲
شکل ۵-۳ : ناحیه‌ی تصمیم‌گیری. ۴۵
شکل ۵-۴ : ریسک تابع P1 ..... ۴۸
شکل ۶-۱ : سیستم مختصات جدید که بیانگر تبدیل بردار Y به Y' میباشد ۵۷
شکل ۶-۲ : ناحیه‌ی انتگرالگیری برای Pε ۶۷
شکل ۷-۱ : احتمال آشکارسازی. ۸۰
شکل ۸-۱ : احتمال آشکارسازی در برابر SNR(Pfa=0.1). ۸۹
شکل ۸-۲احتمال آشکارسازی در برابرSNR(Pfa=0.1). ۸۹
شکل ۸-۳:مشخصه عملکرد گیرنده. ۹۰

فصل ۱– مقدمه

با توجه به محدودیت طیف در دسترس و همچنین تقاضای بیش از حد کاربران جهت استفاده از پهنای باند بیشتر، ارائه‌ی روش‌های بهینه‌ی استفاده از طیف همواره مورد توجه می‌باشد. رادیو شناختی[۱] سیستمی است که با استفاده از روش‌های جستجو در طیف و یافتن فرکانس‌های خالی از این فرکانس‌ها جهت تبادل اطلاعات استفاده می‌کند[۱]. سنجش طیف یکی از اصلی‌ترین چالش‌ها در سیستم‌های رادیو شناختی می‌باشد. در این سیستم‌ها با توجه به اینکه کاربر غیر اصلی همواره خواهان استفاده از طیف کاربران اصلی هنگامی که آنها از طیف استفاده نمی‌کنند، می‌باشد، بنابراین برای اجتناب از تداخل با کاربران اصلی باید به طور مداوم حضور آنها را مورد بررسی قرار دهد. ارائه و بررسی روش‌های جستجو در طیف یکی از اصلی‌ترین مسائل در حوزه‌ی سنجش طیف می‌باشد. در یک شبکه رادیو شناختی، طیفی که به کاربران مجاز یا اصلی اختصاص داده شده است، می-تواند توسط کاربران غیر مجاز یا ثانویه مورد استفاده قرار بگیرد. البته این استفاده هنگامی مجاز خواهد بود که در آن زمان یا مکان کاربر اصلی غیرفعال باشد[۱]. هنگامی‌که کاربر اصلی بخواهد از طیف اختصاصی خود استفاده کند، کاربر غیر اصلی باید به سرعت از آن خارج شود. برای اجتناب از تداخل با کاربران اصلی، کاربر فرعی نیاز دارد تا به‌طور متناوب حضور کاربر اصلی را بررسی کند. روش‌های مختلفی برای جستجو در طیف فرکانسی وجود دارد که برخی از آنها نیاز به اطلاعاتی در مورد سیگنال و توان نویز دارند ولی دسته‌ی دیگری از آنها هیچ نیازی به این اطلاعات نخواهند داشت. به این روش‌ها، روش‌های کور[۲] می‌گویند[۲]. عواملی می‌تواند باعث تضعیف عملکرد تشخیص دهنده‌ی طیف گردد. یک عامل قدرت سیگنال کاربر اصلی می‌باشد، که می‌تواند وقتی به کاربر غیر اصلی می‌رسد، خیلی ضعیف باشد. آشکارساز انرژی یک روش معمول برای آشکارسازی سیگنال می‌باشد. در این روش برای آشکارسازی سیگنال نیازی به آگاهی پیشین یا ابتدایی در مورد ساختار همبستگی سیگنال اصلی وجود نخواهد داشت. ولی باید اطلاعات دقیقی در مورد واریانس نویز داشته باشیم. در عمل واریانس نویز ممکن است که با زمان تغییر کند، بنابراین به‌دست آوردن دقیق واریانس نویز بسیار مشکل می‌باشد و در نتیجه روش آشکارساز انرژی یک روش نامطمئن خواهد بود[۲]. دراین تحقیق به بررسی روش‌های مختلف سنجش طیف به‌وسیله مقادیر ویژه‌ی ماتریس کواریانس سیگنال دریافتی نیز خواهیم پرداخت که این روش‌ها نیازی به آگاهی در مورد سیگنال یا توان نویز و همچنین کانال نخواهد داشت و از نظر دسته‌بندی در

---

[۱] Cognitive Radio

[۲] Blind

گروه روش‌های کور قرار می‌گیرند[۲]. ایده‌ی اصلی در این روش آن است که سیگنال کاربر اصلی که در گیرنده-ی رادیوشناختی دریافت می‌شود، معمولا همبسته می‌باشد. این همبستگی می‌تواند ناشی از خاصیت طبیعی تفرق[۱] کانال باشد. به طور غیر طبیعی می‌توان با استفاده از چندین آنتن در گیرنده و یا بیش نمونه‌برداری[۲] و یا همکاری چندین گیرنده به این هدف نیز دست پیدا کرد. سیگنال دریافتی شامل مولفه‌های نویز و سیگنال اصلی می‌باشد. همبستگی بین مولفه‌های سیگنال اصلی در شاخه‌های مختلف، زیاد خواهد بود. از طرفی همبستگی بین مولفه‌های نویز در شاخه‌های مختلف، خیلی کم می‌باشد. با توجه به این موضوع که همبستگی بین مولفه-های سیگنال اصلی زیاد و همبستگی بین مولفه‌های نویز کم می‌باشد، می‌توان نویز را از سیگنال اصلی تشخیص داد. این ویژگی باعث می‌شود تا بتوانیم در $SNR^{۳}$ های خیلی کم سیگنال را از نویز تشخیص بدهیم. مشخصات آماری سیگنال دریافتی در زمانی‌که سیگنال کاربر اصلی در آن وجود دارد با زمانی‌که حضور ندارد، خیلی متفاوت خواهد بود[۳]. این خاصیت باعث بهبود فرآیند آشکارسازی خواهد شد. پس از به‌دست آوردن ماتریس کواریانس سیگنال دریافتی و محاسبه‌ی مقادیر ویژه از روی آن با استفاده از چندین روش که تمرکز این روش‌ها بر روی مقادیر ویژه می‌باشد، می‌توان وجود سیگنال اصلی را تشخیص داد.

۱-۱- پیشینه‌ی رادیوشناختی

استفاده بهینه از طیف فرکانسی یکی از اصلی‌ترین مباحث در حوزه‌ی مهندسی مخابرات می‌باشد. با توجه به محدودیت‌های فراوان برای دست‌یابی به طیف فرکانس، از پهنای باند به عنوان یک سرمایه‌ی بسیار ارزشمند یاد می‌شود. بنابر این پژوهشگران همواره به‌دنبال یافتن راه‌هایی برای استفاده بهینه از پهنای باند می‌باشند. یکی از مباحث به‌روز در این حوزه بحث رادیوهای شناختی می‌باشد. این بحث برای اولین بار در سال ۱۹۹۸ میلادی توسط میتولا[۴] در سمیناری در انستیتو تکنولوژی رویال[۴] مطرح شد و سپس آنرا بصورت مقاله‌ای در ۱۹۹۹ منتشر نمود. پس از آن افراد مختلفی در حوزه‌ی سنجش طیف برای رادیوهای شناختی روش‌هایی را ارائه کرده اند. با توجه به این‌که دسترسی به اطلاعاتی در مورد سیگنال، توان نویز و کانال همواره مقدور نمی‌باشد، بنابراین محققان به‌دنبال روش‌هایی هستند که بدون نیازبه این اطلاعات عمل تشخیص سیگنال را به‌خوبی انجام دهند، که این روش‌ها به‌عنوان روش‌های کور شناخته می‌شوند. یکی از روش‌های موثری که در حوزه‌ی سنجش طیف مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش تشخیص مبتنی بر مقادیر ویژه‌ی ماتریس کواریانس سیگنال دریافتی می-باشد[۵]. تا به‌حال روش‌های مختلفی با استفاده از مقادیر ویژه ارائه شده است. روش محاسبه‌ی نسبت مقدار ویژه‌ی حداکثر به مقدار ویژه‌ی حداقل[۲]، روش محاسبه‌ی نسبت متوسط مقادیر ویژه به مقدار ویژه‌ی

---

[۲] dispersive
[۴] Oversampling
[۱] Signal to Noise Ratio
[۲] Mitola

حداقل[۲]، روش بررسی توزیع مقادیر ویژه‌ی ماتریس ویشارت[۱] [۲] و ... از جمله‌ی این روش‌ها می‌باشند. رادیو شناختی شامل چهار قسمت اصلی می‌باشد[۲]. این قسمت‌ها عبارتند از:

۱) سنجش طیف : در سنجش طیف به دنبال یافتن حفره‌های طیفی هستیم.

۲) مدیریت طیف : در این قسمت در مورد این‌که چه مدت زمانی می‌توانیم از یک باند فرکانسی استفاده کنیم، پیش‌بینی خواهیم داشت.

۳) اشتراک‌گذاری طیف : در این قسمت به دنبال روشی برای به اشتراک گذاشتن طیف خالی بین سایر کاربران رادیوشناختی هستیم.

۴) پویایی طیف : به دنبال روشی برای یکپارچه ماندن ارتباط در حین انتقال از قسمتی ازطیف به قسمت دیگر هستیم.

۱-۲- روش‌های تخصیص طیف

در حوزه‌ی تخصیص طیف، به کاربرانی که از طریق سازمان‌های تخصیص فرکانسی، حق استفاده از قسمت‌های خاصی از طیف فرکانسی را دارند، اصطلاحا «کاربران اولیه»[۲] اطلاق می‌گردد[۱]. به عبارت دیگر کابران اولیه را می‌توان مالکان اصلی بخشی از طیف فرکانسی که مجاز به فعالیت در آن هستند، در نظر گرفت. در راستای تعریف بالا و با توجه به عدم بهره‌وری مناسب از منابع فرکانسی موجود، مفهوم جدیدی به نام «حفره‌های طیفی»[۳] مطرح شده است(شکل ۱-۱) که به صورت زیر تعریف می‌گردد:

یک حفره طیفی یک باند فرکانسی است که از ابتدا به یک کاربر اولیه تخصیص یافته است، اما در یک زمان خاص و یک منطقه جغرافیایی ویژه، کاربر اولیه از این باند استفاده نمی‌کند[۱].

مشکل عدم بهره وری بهینه از طیف فرکانسی را می‌توان به‌طور قابل توجهی از طریق معرفی «کاربران ثانویه»[۴] حل نمود. کاربران ثانویه، کاربرانی هستند که برای ارسال سیگنال خود از حفره‌های طیفی موجود در طیف فرکانسی بهره می‌گیرند[۱]. این کاربران از نظر استفاده از باند فرکانسی در اولویت بعدی، پس از کاربران اولیه، قرار دارند. در حقیقت این کاربران تبادل اطلاعات را از طریق روش‌های مختلف اشتراک گذاری طیفی در مواقعی که حفره‌های طیفی وجود دارند، انجام می‌دهند. اصولا دو روش عمده برای اشتراک‌گذاری طیفی مطرح شده است. در ادامه این دو روش عمده معرفی می‌گردد.

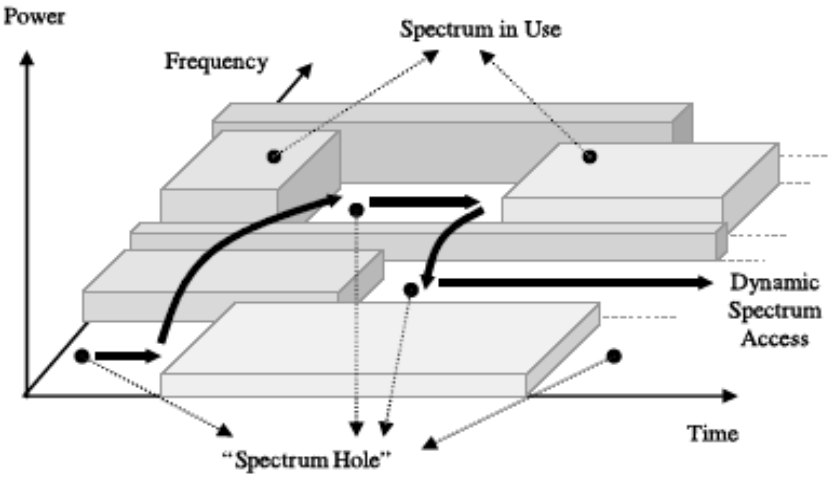
---

[۳] Wishart

[۱] Primary User (PU)

[۲] Spectrum holes

[۳] Secondary User (SU)



شکل ۱-۱:حفره طیفی[۷].

۱-۲-۱- اشتراک‌گذاری طیفی به روش ارسال زمینه‌ای سیگنال‌ها

در حالت کلی در روش اشتراک‌گذاری طیفی به‌روش ارسال زمینه‌ای[۱] سیگنال‌ها، فرض بر این است که کاربران اولیه در باندهای فرکانسی حضور دارند و کاربران ثانویه با توجه به این موضوع علاقه‌مند به استفاده از باند فرکانسی می‌باشند. کاربران ثانویه باید ارسال خود را به نحوی انجام دهند که موجب تداخل با سیگنال کاربر اولیه نگردد. به عبارت دیگر سیگنال کاربران ثانویه باید به صورت یک نویز برای کاربران اولیه عمل نماید. لذا مادامی‌که با ارسال سیگنال ثانویه مقدار سطح مجاز نویز در گیرنده کاربر اولیه از حد مجاز فراتر نرود، کاربران ثانویه می‌توانند به فعالیت خود در باند فرکانسی مورد نظر ادامه دهند. مقدار سطح مجاز نویز در گیرنده کاربر اولیه باید تا حدی کم باشد که کاربر اولیه برای عملکرد صحیح خود دچار مشکل نگردد. به عنوان مثال سیستم-های باند وسیع که امروزه برای کاربردهای با مسافت کم مورد توجه واقع شده‌اند، را می‌توان در زمره این دسته از روش‌های اشتراک طیفی در نظر گرفت. در این نوع از سیستم‌ها، بر اساس قوانین مشخص شده از طریق مراجع بین المللی مخابرات، حداکثر سطح توان ارسالی که کاربر مجاز است در باندهای مختلف فرکانسی ارسال خود را انجام دهد، مشخص شده است. در این نوع از سیستم‌های رادیویی اشتراک طیفی، برای این که سیگنال کاربر ثانویه به صورت نویز برای کاربر اولیه ظاهر شود، لازم است که از روش‌های گسترده سازی طیفی استفاده گردد. کاربران ثانویه با استفاده از روش‌های مختلف نظیر پرش فرکانس، پرش زمانی، مدولاسیون‌های چند

[۴] Underlay Spectrum Sharing

حاملی و غیره سیگنال خود را طوری ارسال می‌نمایند که این سیگنال در حوزه فرکانس گسترده شده و به صورت نویز برای کاربر اصلی عمل نماید[۲].

۱-۲-۲- اشتراک‌گذاری طیفی به روش روی‌هم‌گذاری سیگنال‌ها

همان‌طور که ذکرشد، طبق قوانین مخابراتی و تخصیص فرکانسی اصولا برای هر باند فرکانسی اختصاصی، یک یا چند کاربر اولیه یا اصلی درنظر گرفته شده است. در روش اشتراک گذاری طیفی به روش روی هم‌گذاری[۱] سیگنال‌ها ، کاربر ثانویه تنها پس از اطمینان از عدم فعالیت کاربر اولیه می‌تواند ارسال خود را در آن انجام دهد. در حقیقت ایده این روش مشابه روش‌های فعلی دسترسی طیفی است که در آن یک کاربر به قسمتی از طیف که توسط کاربر ثبت شده‌ای اشغال نشده باشد، می‌تواند دسترسی پیدا کند. در حقیقت در این سیستم‌ها، تداخل کاربران فرعی بر روی کاربران اصلی به حداقل می‌رسد. در این روش، هدف طراحی و توسعه یک سیستم مخابراتی هوشمند است که قادر به حس‌کردن محیط طیفی در خلال یک محدوده وسیع فرکانسی بوده و تنها هنگامی که موجب تداخل در سیگنال‌های کاربر اولیه نشود، ارسال خود را انجام می‌دهد. این کاربران ثانویه با الویت ارسال پایین، ارسال خود را از طریق رادیو هوشمند انجام می‌دهند[۲].

۱-۳- سنجش طیف

با توجه به این موضوع که یک سیستم رادیو شناختی باید از وضعیت طیف آگاهی دقیقی داشته باشد، مهم ترین بحث در حوزه‌ی سیستم‌های رادیو شناختی، بحث سنجش طیف می‌باشد. سنجش طیف می‌تواند در یکی از سه بعد فرکانس ، زمان و فضا صورت پذیرد. البته بنابر نیاز می‌توان در ابعادی مثل کد، زاویه و ... نیز جستجو را انجام داد. ترکیب ابعاد ذکر شده نیز می‌تواند به‌عنوان ابعاد جدید تعریف گردد.

۱-۳-۱- چالش‌های پیش رو در سنجش طیف

۱-۳-۱-۱- نیازهای سخت افزاری

سنجش طیف را می‌توان بر اساس دو معماری انجام داد :۱)رادیو تک ۲)رادیو دوتایی

در حالت اول فقط از یک رادیو هم برای سنجش طیف و هم برای تبادل اطلاعات استفاده می‌شود. در حالت دوم از زنجیره‌ای از رادیوها برای سنجش طیف و از زنجیره‌ای دیگر برای تبادل اطلاعات استفاده می‌شود[۱].

---

[۱] Overlay spectrum sharing

۱-۳-۱-۲- کاربر اصلی مخفی

در اثر عواملی از جمله محوشدگی[۱] و سایه[۲] کاربر اصلی از دید کاربران CR [۳] مخفی می‌مانند(شکل ۱-۲). برای مقابله با این پدیده پیشنهاد می‌شود که از سنجش مشارکتی استفاده گردد[۱].

۱-۳-۱-۳- آشکارسازی کاربران طیف گسترده

دو روش کلی در سیستم‌های مخابراتی برای تبادل اطلاعات وجود دارد : ۱) فرکانس ثابت ۲) طیف گسترده در طیف گسترده دو روش FHSS[۴] و DSSS[۵] وجود دارد که از سایر روش‌ها مهم‌تر می‌باشد. در FHSS فرکانس کاری سیستم به‌صورت پویا متناسب با مضرب باند باریک کانال تغییر می‌کند. در سیستم-های طیف گسترده از تمام طیف برای تبادل اطلاعات استفاده می‌شود.

۱-۳-۱-۴- تشخیص دوره و فرکانس

برای آن‌که یک کاربر CR بتواند به‌درستی از طیف در دسترس استفاده کند باید علاوه بر این‌که بتواند حضور کاربران اصلی را تشخیص دهد، از مشخصات سیگنال کاربران اصلی مثل فرکانس، نوع مدولاسیون و ... آگاهی پیدا کند.

۱-۳-۱-۵- ترکیب تصمیم در سنجش مشارکتی

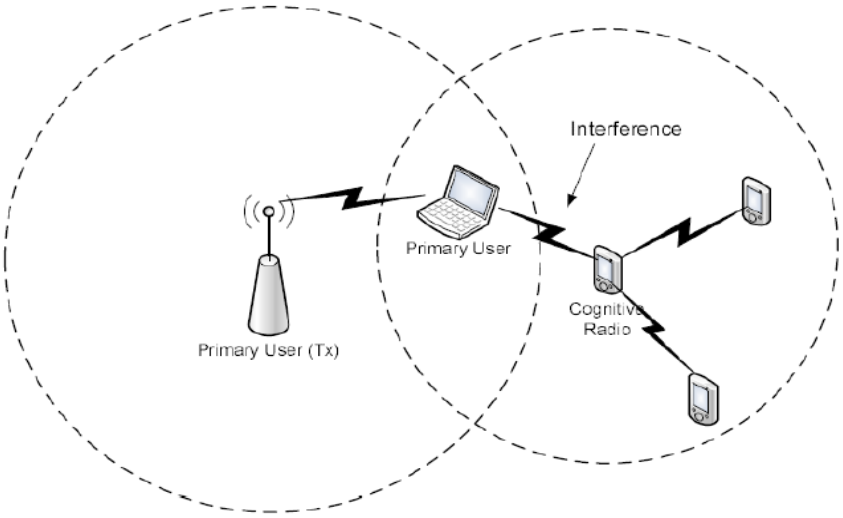
در سنجش مشارکتی اطلاعات دریافتی توسط کاربران CR بین تمام کاربران به اشتراک گذاشته می‌شود. نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های مختلف در موارد مورد چالش ترکیب می‌شوند. ترکیب این موارد منجر به تصمیم نهایی می‌گردد.

۱-۳-۱-۶- امنیت

در یک سیستم CR یک کاربر خودخواه می‌تواند فاصله‌ی هوایی خود را طوری تنظیم کند که عملکرد کاربر اصلی را تقلید نماید. بنابر این کاربر اصلی را به اشتباه می‌اندازد و همچنین باعث فریب سایر کاربران CR می‌شود. روش مقابله با این شیوه، کدنگاری می‌باشد[۱].

---

۱ Fading
۲ Shadowing
۳ Cognitive Radio
۱ Frequency Hopping Spread Spectrum
۲ Direct Sequence Spread Spectrum



شکل ۱-۲ : کاربر اصلی مخفی[۱].

فصل ۲– روش‌های سنجش طیف

برای جستجو در طیف و تشخیص حضور کاربران مختلف در طیف روش‌های متنوعی ارائه شده است. برخی از این روش‌ها برای تشخیص وجود سیگنال، به اطلاعاتی در مورد کانال یا توان نویز یا مشخصات سیگنال احتیاج دارند. ولی روش‌هایی نیز وجود دارند که برای تشخیص حضور سیگنال کاربران اصلی نیاز به هیچ اطلاعاتی ندارند. به این روش‌ها، روش‌های کورمی‌گویند[۶]. روش‌هایی نیز وجود دارد که برای تشخیص سیگنال به اطلاعات کم‌تری نیاز دارند، که به این روش‌ها، روش‌های نیمه کور[۱] می‌گویند[۲]. در ادامه به بررسی روش‌های معمول که به اطلاعاتی در مورد سیگنال و کانال برای سنجش طیف نیاز دارند، خواهیم پرداخت و پس از آن به معرفی روش‌های سنجش کور می‌پردازیم.

در آشکارسازی سیگنال با دو حالت مواجه می‌شویم :

H_0 : عدم حضور سیگنال کاربر اصلی

H_1 : حضور سیگنال کاربر اصلی

$$y(t) = \begin{cases} i(t) + w(t) \; ; \; H_0 \\ s(t) + i(t) + w(t) \; ; \; H_1 \end{cases} \qquad (۱-۲)$$

$y(t)$: سیگنال دریافتی

$s(t)$: سیگنال کاربر اصلی

$i(t)$: سیگنال تداخل

$w(t)$: نویز جمع شونده سفید گوسی(AWGN)[۲]

[۱] Semi Blind

[۲] Additive White Gaussian Noise

۲–۱– انواع روش‌های معمول در سنجش طیف

۲–۱–۱– سنجش مبتنی بر شکل موج

در سیستم‌های بی‌سیم جهت کمک به عمل همزمان‌سازی فرستنده و گیرنده و موارد دیگر از یک‌سری الگوهای شناخته شده استفاده می‌شود. این الگوها شامل مقدمه[۱]، میان‌رشته[۲]، راهنما[۳]، رشته‌های گسترش دهنده و ... می‌باشند[۲].

مقدمه : رشته‌ی معین و شناخته شده‌ای می‌باشد که قبل از ارسال هر رشته ارسال می‌گردد[۲].

میان‌رشته : رشته‌ای است که در میان یک رشته‌ی اطلاعات ارسال می‌گردد[۲].

اگر گیرنده از وجود این الگوها آگاه باشد، با مقایسه‌ی سیگنال دریافتی با این الگوها می‌تواند به راحتی سیگنال اصلی را آشکار نماید.

۲–۱–۲– سنجش مبتنی بر ایستای تناوبی

در این روش برای تشخیص سیگنال از خاصیت مانای تناوبی[۴] سیگنال دریافتی استفاده می‌گردد[۲].

مانای تناوبی به این دلیل است که خود سیگنال یا یکسری از مشخصات آماری آن از قبیل میانگین و ... متناوب می‌باشند. برای آشکارسازی سیگنال از تابع همبستگی تناوبی در یک طیف معین استفاده می‌شود. متناوب بودن برخی از مشخصه‌های سیگنال برای استفاده‌ی از آنها برای تخمین کانال و یا سنکرون‌سازی و ... می‌باشد. ویژگی این روش آن است که بین سیگنال کاربر اصلی با نویز و تداخل ناهمبسته تفاوت قائل می‌شود. دلیل آن WSS[۵] بودن نویز است که هیچ همبستگی بین مولفه‌های آن وجود ندارد. همچنین سیگنال مدوله شده به سبب اضافات تکرار سیگنال، ایستای تناوبی با همبستگی طیفی می‌باشد. همچنین ویژگی دیگر این روش تفاوت قائل شدن آن برای کاربران مختلف می‌باشد. در این روش گیرنده باید از تناوب سیگنال کاربر اصلی آگاهی کامل داشته باشد تا بتواند به‌صورت دقیق آشکارسازی را انجام دهد.

۲–۱–۳– سنجش براساس شناسایی (تعیین هویت رادیو)

در این روش با بررسی نوع سیگنال ارسالی برای تشخیص سیگنال کاربر اصلی استفاده می‌شود. به عنوان مثال سیگنال بلوتوث با سیگنال WiFi[۶] متفاوت می‌باشد. اگر CR بتواند این نوع سیگنال‌های استاندارد را

---

[۲] Preamble
[۴] Midamble
[3]Pilot
[۱]Cyclostationary
[۲]Wide Sense Stationary
[۳]Wireless Fidelity

شناسایی کند می‌تواند به‌راحتی به تبادل اطلاعات بپردازد. به عنوان مثال سیگنال بلوتوث در فرکانس ۲.۴ GHZ وبا برد موثر ۱۰ متر عمل می‌کند[۲].

۲-۱-۴- فیلتر منطبق

اگر برای CR سیگنال کاربر اصلی شناخته شده باشد، می‌تواند از روش فیلتر منطبق[۱] جهت تشخیص سیگنال استفاده کند. در روش فیلتر منطبق، CR باید اطلاعاتی از قبیل پهنای باند، فرکانس، نوع مدولاسیون، شکل پالس سیگنال ارسالی را بداند[۲].

۲-۱-۵- آشکارسازی مبتنی بر راهنما

در سیستم‌های مخابراتی معمولا از راهنما برای سنکرون‌سازی زمانی یا فرکانسی بین فرستنده و گیرنده استفاده می‌گردد. اگر این سیگنال‌های راهنما برای کاربران CR شناخته شده باشد، می‌تواند از آنها برای آشکار نمودن سیگنال کاربر اصلی استفاده نماید. این روش بین سیگنال کاربر اصلی با نویز و تداخل تفاوت قائل می‌شود و در SNR های پایین دارای عملکرد مناسبی می‌باشد[۲].

روش‌های دیگری از قبیل تبدیل موجک ضربه‌ای، تبدیل هاگ[۲]، آنالیز فرکانس- زمان نیز برای سنجش طیف پیشنهاد شده‌اند[۸].

۲-۲- روش‌های کور در سنجش طیف

روش‌های کور روش‌هایی هستند که برای آشکارسازی سیگنال کاربر اصلی به هیچ اطلاعاتی در مورد سیگنال کاربر اصلی نیازی ندارند[۲]. در ادامه به تعدادی از این روش‌ها اشاره می‌شود.

۲-۲-۱- آشکارساز انرژی

این روش مرسوم‌ترین روش برای تشخیص حضور سیگنال کاربر اصلی می‌باشد، ودلیل آن پیچیدگی کم این روش است. مکانیزم آشکارسازی در این روش به این صورت است که انرژی خروجی آشکارساز با یک آستانه که مبتنی بر کف نویز می‌باشد، مقایسه می‌شود. اگر انرژی خروجی آشکارساز از حداقل نویز بیشتر باشد به معنی حضور کاربر اصلی و در غیر اینصورت به معنی عدم حضور آن می‌باشد (شکل ۲-۱).

یکی از چالش‌های مهم در این روش انتخاب آستانه‌ی تصمیم گیری می‌باشد. همچنین اطلاع دقیق از توان نویز و تخمین دقیق آن برای عمل آشکار سازی اهمیت فراوان دارد. عیب عمده‌ی این روش ناتوانی آن

---

[۴] Matched Filter

[۱] Hough