

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

رساله برای دریافت درجه دکتری در رشته مهندسی برق

عنوان

سنجش طیف مشارکتی در شبکه‌های رادیوی شناختگر

استاد راهنما

دکتر محمود احمدیان

استاد مشاور

دکتر سهیل سالاری

نگارش

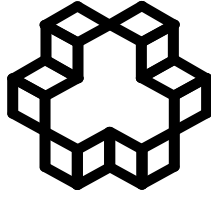
نیما رئیسی

تیر ماه ۱۳۹۲

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

پیشکش به

سارا و سامیار عزیزم که خوش آهنگ‌ترین ترانه‌ی زندگی من هستند.



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

تأییدیه هیات داوران

هیأت داوران پس از مطالعه‌ی پایان‌نامه و شرکت در جلسه‌ی دفاع از پایان‌نامه‌ی تهیه شده تحت عنوان: سنجش طیف مشارکتی در شبکه‌های رادیویی شناختگر توسط آقای نیما رئیسی صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه دکتری در رشته: مهندسی برق با رتبه‌ی: عالی مورد تأیید قرار می‌دهند.

اعضای هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضاء
استاد راهنما	دکتر محمود احمدیان	دانشیار	
استاد ممتحن داخلی	دکتر کمال محامدپور	استاد	
استاد ممتحن داخلی	دکتر مهرداد اردبیلی پور	استادیار	
استاد ممتحن خارجی	دکتر معصومه نصیری	استاد	
استاد ممتحن خارجی	دکتر بابک حسین خلیج	دانشیار	
نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر شکرالله شکری	استادیار	

اظهارنامه‌ی دانشجو

موضوع پایان‌نامه: سنجش طیف مشارکتی در شبکه‌های رادیوی شناختگر

استاد راهنما: دکتر محمود احمدیان

نام دانشجو: نیما رئیسی

شماره دانشجویی: ۸۷۰۱۰۱۶

اینجانب نیما رئیسی دانشجوی دوره‌ی دکتری مهندسی برق گرایش مخابرات سیستم دانشکده‌ی مهندسی برق دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در این پایان‌نامه توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده مورد تایید می‌باشد و در مورد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. به‌علاوه 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 به‌طور کامل رعایت کرده‌ام.

امضای دانشجو:

حق طبع و نشر و مالکیت نتایج

۱- حق چاپ و تکثیر این پایان نامه متعلق به نویسنده‌ی آن می‌باشد. هرگونه نسخه برداری از کل پایان نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه‌ی دانشکده‌ی برق دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می‌باشد.

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

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

همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

تقدیر و تشکر

ابتدا باید از راهنمایی‌های ارزنده‌ی استاد ارجمندم دکتر محمود احمدیان، که در تمامی مراحل این پژوهش با حوصله و دقت نظر خویش، مشوق و راهنمای من بودند تشکر نمایم. از آقای دکتر سهیل سالاری که به عنوان استاد مشاور در انجام این پژوهش به من کمک کردند تشکر می‌کنم. همچنین از آقای دکتر سعید گازر که در طول مدت فرصت تحقیقاتی در دانشگاه کوئینز راهنمایی‌های ارزنده‌ای جهت پیشرفت تحقیقات اینجانب نمودند کمال تشکر را دارم. از اساتید ممتحن نیز که با دقت این کار را مورد ارزیابی قرار دادند و مرا در بهبود کار راهنمایی کردند قدردانی می‌کنم. در پایان از آقای مهندس وحید جمالی که بخشی از این پژوهش با کمک و همفکری ایشان انجام شده است، تشکر می‌نمایم.

چکیده

در این رساله مساله‌ی سنجش طیف مشارکتی در شبکه‌های رادیوی شناختگر با استفاده از ترکیب انرژی‌ها و با تکیه بر تاثیر محوشدگی‌های مقیاس کوچک و بزرگ بر روی عملکرد سنجش طیف مورد بررسی قرار گرفته است و با توجه به چند چالش که از نظر نگارنده با وجود اهمیت کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند، الگوریتم‌هایی جهت ترکیب مشاهدات حسگرها پیشنهاد شده است. بخشی از این رساله به بررسی اثر وجود محوشدگی مقیاس بزرگ همبسته بر روی کانال‌های سنجش و گزارش و طراحی یک چارچوب سنجش طیف مشارکتی بر اساس ترکیب خطی مشاهدات و با استفاده از خوشه‌بندی حسگرها در حالت‌های ارسال نمونه‌ها، ارسال انرژی نمونه‌ها و ارسال تصمیم‌گیری‌های یک بیتی برای واحد مرکزی تصمیم‌گیری اختصاص یافته است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داده است که به دلیل وجود محوشدگی مقیاس بزرگ بر روی کانال گزارش، افزایش تعداد حسگرها از یک عدد مشخص کمک قابل ملاحظه‌ای به بهبود عملکرد سنجش طیف نمی‌کند. در مقابل با استفاده از خوشه‌بندی می‌توان با افزایش تعداد حسگرها عملکرد سنجش طیف را به میزان زیادی بهبود بخشید. به عنوان یک نمونه با فرض ارسال انرژی به عنوان مشاهدات، با افزایش تعداد حسگرها از ۱۲ به ۲۰ توانسته‌ایم بهبود در عملکرد آشکارسازی با استفاده از خوشه‌بندی را از حدود 5dB به حدود 11dB برسانیم. علاوه بر این با توجه به الگوریتم انتخاب سرخوشه‌ی پیشنهاد شده نیاز به انتخاب سرخوشه در هر بازه‌ی سنجش از بین می‌رود. همچنین نشان داده‌ایم که با ارسال نمونه‌ها به عنوان مشاهدات هر خوشه نسبت به حالتی که خوشه‌ها انرژی نمونه‌های دریافتی و تصمیم‌گیری‌های یک بیتی را به مرکز ترکیب ارسال می‌کنند می‌توان به ترتیب در حدود 7dB و 15dB بهبود در عملکرد آشکارسازی حاصل نمود. با این حال با توجه به نیاز به پهنای باند کانال گزارش خیلی زیاد، ارسال انرژی به عنوان مشاهدات هر خوشه منطقی‌تر به نظر می‌رسد. تعمیم الگوریتم مبتنی بر تابع مولد ممان جهت تقریب زدن یک بردار تصادفی که هریک از مولفه‌های آن از مجموع چندین متغیر تصادفی لگ-نرمال همبسته تشکیل شده است با یک بردار لگ-نرمال نیز یکی از نوآوری‌های انجام شده در این بخش است. بخش دوم این رساله به بررسی تاثیر وجود همزمان هر دو نوع محوشدگی مقیاس کوچک و بزرگ بر روی عملکرد سنجش طیف و طراحی یک ساختار سنجش طیف مشارکتی با مدل مبتنی بر خوشه‌بندی در این حالت اختصاص یافته است. در مرکز تصمیم‌گیری از ترکیب خطی انرژی‌ها با ضرایب یکسان (EGC) به منظور محاسبه‌ی روابط تحلیلی دقیق احتمال‌های هشدار غلط و آشکارسازی و پیشنهاد یک کران بالا برای احتمال آشکارسازی استفاده شده است. ترکیب انرژی‌ها با استفاده از تابع نسبت شباهت (LR) و تابع نسبت شباهت عمومی (GLR) به ترتیب درحالت‌هایی که ضرایب لحظه‌ای کانال دانسته فرض شده‌اند و از تخمین حداکثر شباهت این ضرایب استفاده شده است نیز مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین یک تابع ترکیب انرژی‌ها به نام تابع نسبت شباهت متوسط (ALR) جهت استفاده از پارامترهای توزیع محوشدگی‌ها پیشنهاد شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها بر عملکرد بهتر الگوریتم پیشنهادی نسبت به تابع ترکیب نسبت شباهت عمومی و عملکرد قابل مقایسه‌ی آن با تابع نسبت شباهت درمقابل پیچیدگی محاسباتی کم‌تر و فرض‌های عملی منطقی‌تر آن دلالت دارند. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داده است که هر چه تفاوت بین مقادیر SNR خوشه‌ها بیشتر باشد، استفاده از توابع تصمیم‌گیری مبتنی بر تابع نسبت شباهت عملکرد بهتری نسبت به حالت ترکیب خطی انرژی‌ها با ضرایب یکسان خواهند داشت. به عنوان مثال با فرض وجود چهار خوشه با SNRهای $[-13, -6, 6, 13]^T$ dB بهبود در عملکرد سنجش طیف برای الگوریتم‌های GLR، ALR و LR به ترتیب برابر با 1.25dB، 2.39dB و 3.39dB است. درحالی‌که این مقادیر برای $SNR = [-7, -3, 3, 7]^T$ dB به 0.46dB، 1.12dB و 2.81dB کاهش می‌یابد. در بخش پایانی این رساله تاثیر وجود همبستگی بین ضرایب مربوط به محوشدگی‌های مقیاس کوچک کانال‌های بین فرستنده‌ی اولیه و حسگرهای مشارکت کننده و عدم استفاده از آن در طراحی آشکارساز مورد بررسی قرار گرفته و الگوریتم پیشنهادی ALR به حالتی که محوشدگی مقیاس کوچک کانال‌ها همبسته هستند نیز تعمیم داده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داده‌اند هرچه تعداد حسگرها با مشاهدات همبسته بیشتر شود، اثر در نظر گرفتن این همبستگی در طراحی آشکارساز نمایان‌تر خواهد شد. به عنوان مثال با فرض وجود همبستگی یکسان $r = 0.3$ بین مشاهدات حسگرها، با افزایش تعداد حسگرها از ۵ به ۷، نسبت احتمال آشکارسازی با استفاده از ALR همبسته نسبت به احتمال آشکارسازی با استفاده از ALR بدون در نظر گرفتن همبستگی از 0.8dB به 2.8dB افزایش می‌یابد.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول: مقدمه.....	۱
۱-۱ ساختار پایان نامه.....	۱۰
فصل دوم: مروری بر ادبیات و کارهای انجام شده در زمینه‌ی سنجش طیف.....	۱۳
۱-۲ مقدمه.....	۱۳
۲-۲ سنجش طیف محلی.....	۱۴
۱-۲-۲ مدل سیستم.....	۱۴
۲-۲-۲ آشکارساز انرژی.....	۱۵
۳-۲-۲ عدم قطعیت نویز.....	۱۹
۳-۲ سنجش طیف مشارکتی.....	۲۲
۱-۳-۲ سنجش طیف متمرکز / غیر متمرکز.....	۲۴
۲-۳-۲ مشاهدات و تصمیم‌گیری‌های حسگرها.....	۲۵
۴-۲ مروری بر مهم‌ترین کارهای انجام شده.....	۲۶
۱-۴-۲ ترکیب مشاهدات.....	۲۶
۲-۴-۲ ترکیب تصمیم‌گیری‌ها.....	۳۱
۳-۴-۲ خوشه‌بندی.....	۳۳
۵-۲ بررسی چالش‌های موجود و پیشنهاد برای حل آن‌ها.....	۳۶
فصل سوم: سنجش طیف مشارکتی با استفاده از خوشه‌بندی در کانال‌های دارای سایه‌افکنی	
همبسته.....	۳۹
۱-۳ مقدمه.....	۳۹
۳-۲ چارچوب سنجش طیف.....	۴۳
۱-۲-۳ فرض‌ها.....	۴۳
۲-۲-۳ مدل سیستم و کانال.....	۴۴
۳-۲-۳ الگوریتم خوشه‌بندی.....	۴۶
۴-۲-۳ ارسال و ترکیب مشاهدات خوشه‌ها.....	۴۸

۳-۳	ارسال انرژی نمونه‌ها به‌عنوان مشاهدات خوشه‌ها.....	۴۹
۱-۳-۳	تصمیم‌گیری نهایی در مرکز ترکیب.....	۵۱
۲-۳-۳	بهینه‌سازی.....	۵۴
۴-۳	ارسال نمونه‌ها به‌عنوان مشاهدات خوشه‌ها.....	۵۵
۵-۳	ارسال تصمیم‌گیری‌های تک بیتی به‌عنوان مشاهدات خوشه‌ها.....	۵۷
۶-۳	نتایج شبیه‌سازی.....	۶۲
۱-۶-۳	بررسی دقت تقریب لگ-نرمال بردار انرژی‌ها.....	۶۲
۲-۶-۳	بررسی عملکرد الگوریتم خوشه‌بندی.....	۶۳
۳-۶-۳	مقایسه‌ی سه حالت ارسال تصمیم‌گیری تک بیتی، ارسال انرژی نمونه‌ها و ارسال نمونه‌ها.....	۶۹
۷-۳	نتیجه‌گیری.....	۷۰

فصل چهارم: سنجش طیف مشارکتی در کانال‌های دارای محوشدگی مقیاس کوچک و مقیاس

بزرگ	۷۵
۱-۴	مقدمه.....	۷۵
۴-۲	مدل سیستم.....	۷۹
۱-۲-۴	تابع چگالی احتمال بهره‌ی کانال شامل محوشدگی چندمسیری و سایه‌افکنی.....	۸۲
۳-۴	تصمیم‌گیری نهایی در مرکز ترکیب.....	۸۳
۱-۳-۴	ترکیب خطی با بهره‌های یکسان.....	۸۴
۲-۳-۴	ترکیب خطی شبه بهینه.....	۸۸
۳-۳-۴	آزمون نسبت شباهت.....	۹۰
۴-۳-۴	آزمون نسبت شباهت عمومی.....	۹۱
۵-۳-۴	آزمون نسبت شباهت متوسط.....	۹۳
۴-۴	محوشدگی چندمسیری همبسته.....	۹۵
۱-۴-۴	تابع چگالی احتمال توام متغیرهای تصادفی گامای همبسته.....	۹۶
۲-۴-۴	آشکارساز نسبت شباهت متوسط برای مشاهدات همبسته.....	۹۷
۵-۴	نتایج شبیه‌سازی.....	۹۹
۱-۵-۴	آشکارساز EGC.....	۱۰۰
۲-۵-۴	مقایسه‌ی توابع تصمیم‌گیری.....	۱۰۲

نتایج شبیه‌سازی برای محوشدگی چندمسیری همبسته.....	۳-۵-۴	۱۰۹
نتیجه‌گیری.....	۶-۴	۱۱۴
فصل پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهادهای.....		۱۱۹
راه‌کارهای پیشنهادی جهت سنجش طیف مشارکتی با استفاده از آشکارساز انرژی.....	۱-۵	۱۱۹
پیشنهادهایی برای ادامه‌ی کار.....	۲-۵	۱۲۲
لیست مقاله‌های چاپ شده.....		۱۲۵
منابع.....		۱۲۷
پیوست‌ها.....		۱۳۷

فهرست شکل ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱ میزان استفاده از طیف‌های فرکانسی مختلف.....	۲
شکل ۲-۱ مفهوم حفره‌ی طیفی.....	۳
شکل ۳-۱ ساختار شبکه‌ی شناختگر.....	۵
شکل ۱-۲ ساختار آشکارساز انرژی در حوزه‌ی فرکانس.....	۱۶
شکل ۲-۲ مشکل ترمینال‌های مخفی (الف) و افت مسیر (ب) در سنجش طیف.....	۲۳
شکل ۱-۳ چارچوب سنجش طیف مشارکتی در کانال‌های سنجش و گزارش لگ-نرمال همبسته و عدم قطعیت در تخمین توان نویز.....	۴۴
شکل ۲-۳ مقادیر همبستگی بین مولفه‌های مختلف یک بردار تصادفی که هر مولفه‌ی آن از حاصل جمع چندین متغیر تصادفی لگ-نرمال بدست آمده است. تعداد مولفه‌های بردار برابر با ۳ و تعداد متغیرهای تصادفی لگ-نرمال تشکیل دهنده‌ی هر مولفه‌ی برابر با $S = (3,3,2)$ است.....	۶۳
شکل ۳-۳ مقادیر همبستگی بین مولفه‌های مختلف یک بردار تصادفی که هر مولفه‌ی آن از حاصل جمع چندین متغیر تصادفی لگ-نرمال بدست آمده است. تعداد مولفه‌های بردار برابر با ۳ و تعداد متغیرهای تصادفی لگ-نرمال تشکیل دهنده‌ی هر مولفه‌ی برابر با $S = (4,2,2)$ است.....	۶۴
شکل ۴-۳ توپولوژی شبکه‌ی ثانویه.....	۶۵
شکل ۵-۳ مقایسه بین سنجش طیف مشارکتی مبتنی بر خوشه‌بندی و سنجش طیف مشارکتی عادی برای یک شبکه‌ی ثانویه با واریانس سایه‌افکنی کانال سنجش $\sigma_s = 4 (dB)/\zeta$ ، واریانس سایه‌افکنی کانال گزارش برابر با $\sigma_r; c = \text{linspace}(4,8, N) (dB)/\zeta$ و SNR متوسط برابر با $\rho c = 0 \text{ dB}$	۶۶
شکل ۶-۳ تاثیر مقدار واریانس سایه‌افکنی کانال گزارش در عملکرد آشکارسازی برای یک شبکه‌ی ثانویه متشکل از $N = 28$ حسگر، انحراف استاندارد سایه‌افکنی $\sigma_s = 4 (dB)/\zeta$ و $\sigma_r; c = \text{linspace}(4,8, N) (dB)/\zeta$ متوسط برابر با $\rho c = 0 \text{ dB}$	۶۷
شکل ۷-۳ مقایسه‌ی احتمال عدم آشکارسازی در سنجش طیف با استفاده و بدون استفاده از خوشه‌بندی به ازای مقدار ثابت احتمال هشدار غلط $Pfa = 0.1$ و SNR متوسط $\rho s = -5 \text{ dB}$ بر حسب پارامتر فاصله‌ی همبستگی (D) . انحراف استاندارد سایه‌افکنی کانال سنجش و کانال‌های گزارش به‌ترتیب برابر با $\sigma_s = 4 (dB)/\zeta$ و $\sigma_r; c = \text{linspace}(4,8, N) (dB)/\zeta$ انتخاب شده‌اند.....	۶۸
شکل ۸-۳ مقایسه‌ی عملکرد آشکارسازی در سنجش طیف مشارکتی مبتنی بر خوشه‌بندی در سه حالت ارسال متوسط نمونه‌ها، انرژی نمونه‌ها و تصمیم‌گیری‌های یک بیتی برای مرکز ترکیب برای یک شبکه‌ی شناختگر با $N = 20$	

حسگر، انحراف استاندارد سایه‌افکنی کانال سنجش $\sigma_s = 4 \text{ (dB)}/\zeta$ و انحراف استاندارد سایه‌افکنی کانال‌های گزارش برابر با $c = \text{linspace}(4,8,N) \text{ (dB)}/\zeta$ در SNR برابر با $\rho_s = 5 \text{ dB}$ ۷۰

شکل ۴-۱ مقایسه‌ی روابط تحلیلی آشکارساز EGC در (۴-۱۵) و (۴-۲۰) با نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای یک شبکه‌ی شناختگر متشکل از $N = 6$ حسگر که در $C = 3$ خوشه قرار گرفته‌اند (هر خوشه دو حسگر). بازه‌ی شبیه‌سازی شامل $M = 20$ نمونه است و همه‌ی خوشه‌ها دارای SNR یکسان هستند. ۱۰۱

شکل ۴-۲ کران پایین برای احتمال عدم آشکارسازی آشکارساز EGC در (۴-۲۴) برای یک شبکه‌ی شناختگر متشکل از $N = 4$ حسگر که در $C = 2$ خوشه (یعنی $I = 1$ حسگر در هر خوشه) قرار گرفته‌اند. پارامترهای محوشدگی کانال برابر با $(\sigma_\alpha = 1 \text{ dB}/\zeta, m = 0.5)$ و SNR متوسط خوشه‌ها برابر با $\rho_A = 10 \text{ dB}$ انتخاب شده‌اند. ۱۰۲

شکل ۴-۳ مقایسه‌ی عملکرد آشکارساز EGC و آشکارسازهای مبتنی بر لم نیمین-پیرسون برای یک شبکه‌ی شناختگر متشکل از $N = 8$ حسگر که در $C = 2$ خوشه قرار گرفته‌اند. تعداد نمونه‌های موجود در هر بازه‌ی سنجش برابر با $M = 10$ است و پارامترهای محوشدگی کانال نیز برابر با $(\sigma_\alpha = 4 \text{ (dB)}/\zeta, m = 1)$ انتخاب شده‌اند. نمودارها به‌ازای سه SNR متوسط رسم شده‌اند. ۱۰۴

شکل ۴-۴ عملکرد آشکارساز ترکیب خطی وزن‌دار انرژی‌ها در دو حالت اطلاع از مقادیر لحظه‌ای SNRها و در دسترس بودن توزیع آنها و مقایسه‌ی آنها با آشکارسازهای LR و ALR در یک شبکه‌ی شناختگر متشکل از $N = 6$ حسگر قرار گرفته در $C = 3$ خوشه، بازه‌ی سنجش شامل $M = 50$ نمونه، انحراف استاندارد سایه‌افکنی $\sigma_\alpha = 4 \text{ (dB)}/\zeta$ ، پارامتر $m = 1$ و بردار SNR خوشه‌ها برابر با $\rho = [-5,0,5] \text{ dB}$ ۱۰۵

شکل ۴-۵ اثر پارامتر محوشدگی مقیاس کوچک (m) بر روی عملکرد آشکارسازهای مختلف به‌ازای بازه‌ی سنجش شامل $M = 10$ نمونه، انحراف استاندارد سایه‌افکنی $\sigma_\alpha = 3 \text{ (dB)}/\zeta$ برای یک شبکه‌ی شناختگر متشکل از $N = 6$ حسگر که در $C = 3$ خوشه قرار گرفته‌اند و بردار SNR خوشه‌ها برابر با $\rho = [-10,0,10] \text{ dB}$ ۱۰۶

شکل ۴-۶ اثر محوشدگی مقیاس بزرگ روی عملکرد سنجش طیف آشکارسازهای مختلف برای یک شبکه‌ی شناختگر متشکل از $N = 6$ حسگر که در $C = 3$ خوشه قرار گرفته است ($I = 2$) به‌ازای بازه‌ی سنجش $m = 1$ ، $M = 10$ و بردار SNR خوشه‌ها برابر با $\rho = [-10,0,10] \text{ dB}$ ۱۰۷

شکل ۴-۷ تاثیر تعداد خوشه‌ها - با فرض ثابت بودن تعداد حسگرها- بر عملکرد آشکارسازهای مختلف برای یک شبکه‌ی ثانویه متشکل از $N = 12$ حسگر، پارامتر ناکاگامی $m = 1$ ، $\sigma_\alpha = 4 \text{ (dB)}/\zeta$ ، تعداد نمونه‌های $M = 50$ و $\rho_A = -5 \text{ dB}$ برای کلیه‌ی خوشه‌ها ۱۰۸

شکل ۴-۸ تاثیر تعداد حسگرها بر عملکرد آشکارسازهای مختلف به‌ازای پارامترهای $m = 1$ ، $\sigma_\alpha = 4 \text{ (dB)}/\zeta$ ، تعداد نمونه‌های $M = 50$ و SNR یکسان $\rho_A = -5 \text{ dB}$ برای کلیه‌ی خوشه‌ها ۱۰۹

شکل ۴-۹ احتمال عدم آشکارسازی آشکارساز ALR (رابطه‌ی (۴-۷۰)) به‌ازای مقادیر مختلف پارامترهای تعداد حسگرها (N)، SNR متوسط حسگرها (ρ)، میزان محوشدگی (m) و ضریب همبستگی (r) ۱۱۰

- شکل ۴-۱۰ تاثیر میزان همبستگی فضایی بر عملکرد آشکارساز ALR برای یک شبکه‌ی شناختگر متشکل از $C = 10$ حسگر در کانال ناکاگامی با پارامتر محوشدگی $m = 3$ ، بازه‌ی سنجش شامل $M = 15$ نمونه و متوسط SNR حسگرها برابر با $\rho = -2$ dB ۱۱۱
- شکل ۴-۱۱ احتمال عدم آشکارسازی تابع تصمیم‌گیری ALR با و بدون در نظر گرفتن همبستگی فضایی بر حسب مقدار ضریب همبستگی r و به‌ازای دو مقدار ثابت احتمال هشدار غلط برای یک شبکه‌ی شناختگر متشکل از $C = 10$ حسگر در یک کانال ناکاگامی با پارامتر محوشدگی $m = 3$ ، بازه‌ی سنجش شامل $M = 15$ نمونه و متوسط SNR حسگرها برابر با $\rho = -2$ dB ۱۱۲
- شکل ۴-۱۲ تاثیر پارامتر محوشدگی m بر روی عملکرد آشکارساز ALR با و بدون در نظر گرفتن همبستگی برای شبکه‌ی شناختگری شامل $C = 5$ حسگر، بازه‌ی سنجش $M = 15$ نمونه‌ای، ضریب همبستگی $r = 0.3$ و بردار SNR برابر با $\rho = 0$ dB ۱۱۳
- شکل ۴-۱۳ عملکرد آشکارساز ALR به‌ازای تعداد حسگرهای مختلف، پارامتر محوشدگی کانال ناکاگامی $m = 3$ ، بازه‌ی سنجش شامل $M = 15$ نمونه، ضریب همبستگی $r = 0.2$ و SNR متوسط حسگرها برابر با $\rho = -2$ dB ۱۱۴
- شکل ۴-۱۴ عملکرد آشکارساز ALR به‌ازای سطوح مختلف SNR متوسط حسگرها برای یک شبکه‌ی شناختگر شامل $C = 7$ حسگر در یک کانال ناکاگامی با پارامتر محوشدگی $m = 3$ ، بازه‌ی سنجش شامل $M = 15$ نمونه و ضریب همبستگی $r = 0.2$ ۱۱۵

فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول ۳-۱ توابع تصمیم‌گیری مرتبط با انواع مشاهدات خوشه‌ها.....	۷۳
جدول ۴-۱ توابع تصمیم‌گیری با استفاده از ترکیب خطی و غیر خطی انرژی‌ها.....	۱۱۸
جدول پ-۱ ضرائب وزن و صفرها برای فرمول گوس-هرمیت با $Np = 5$	۱۴۱
جدول پ-۲ ضرائب وزن و صفرها برای فرمول گوس-هرمیت با $Np = 10$	۱۴۱
جدول پ-۳ ضرائب وزن و صفرها برای فرمول گوس-هرمیت با $Np = 15$	۱۴۱

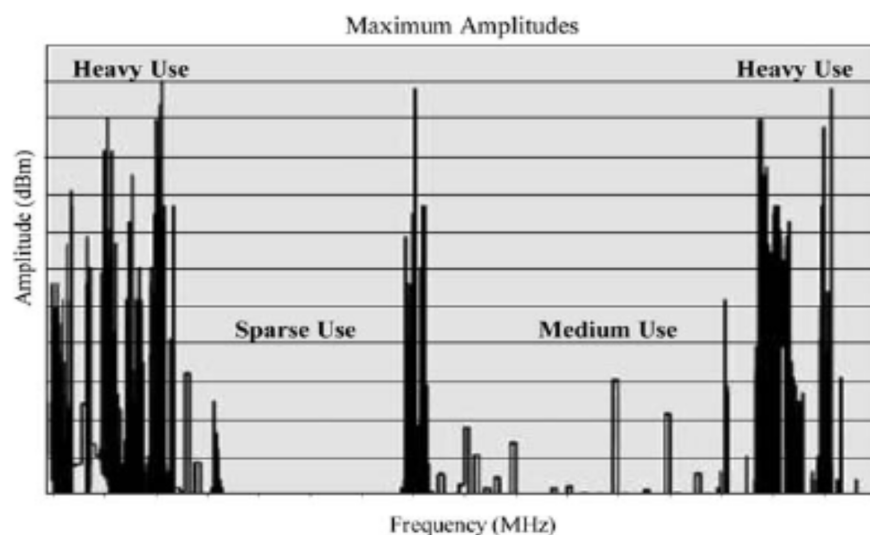
فصل اول: مقدمه

همزمان با رشد روزافزون تکنولوژی، نیاز به منابع طیفی افزایش یافته است. با این وجود، در چارچوب فعلی قوانین موسسه‌ی تنظیم مقررات رادیویی، کلیه‌ی باندهای فرکانسی به صورت انحصاری به سرویس‌های خاص اختصاص داده شده‌اند و هیچ سرویس یا کاربر دیگری حق استفاده از این طیف را ندارد. همان‌گونه که از شکل ۱-۱ نیز مشخص است، قسمت بیشتر طیف فرکانسی اختصاص یافته به سرویس‌های خاص در بسیاری از زمان‌ها و مکان‌های جغرافیایی به درستی استفاده نشده است. در گزارش سال ۲۰۰۲، تهیه شده توسط FCC^۱ بیان شده است که استفاده از طیف اختصاص داده شده بسته به زمان و مکان بین ۱۵٪ تا ۸۵٪ است [1]. اگرچه سیاست تخصیص طیف ثابت در گذشته به خوبی کار می‌کرد، اما افزایش تقاضا برای دسترسی به طیف این شیوه را با چالش‌های جدی مواجه کرده است.

با توجه به محدودیت طیف در دسترس و موثر نبودن سیاست‌های جاری تخصیص طیف، نیاز به یک تکنولوژی مخابراتی جدید که با استفاده از آن بتوان به صورت فرصت طلبانه به طیف دسترسی پیدا کرد ضروری به نظر می‌رسد. این کار می‌تواند با اجازه دادن به کاربران ثانویه برای بهره‌برداری از باندهای فرکانسی مختص سرویس‌های خاص و در نبود کاربران اولیه انجام شود. رادیوی شناختگر^۲ به عنوان یک تکنولوژی جدید، برای استفاده‌ی بهینه از طیف پیشنهاد شده است [3]. یک رادیوی شناختگر با بررسی محیط اطراف و وفق دادن خود با این محیط، توانایی استفاده از حفره‌های

¹ Federal Communications Commission

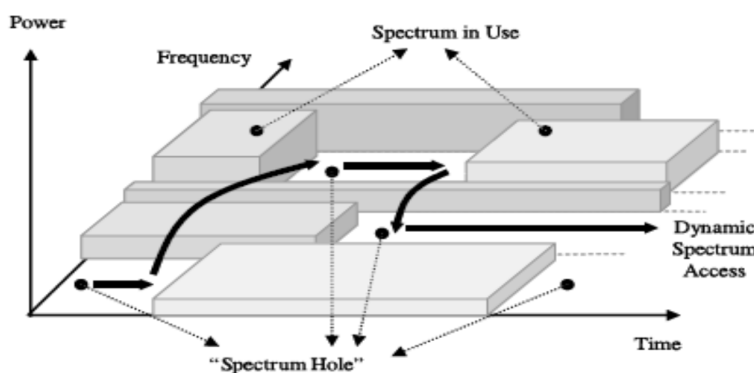
² Cognitive Radio(CR)



شکل ۱-۱ میزان استفاده از طیف‌های فرکانسی مختلف [2]

طیفی^۳ (باندهای فرکانسی که به طور موقت توسط کاربران اولیه استفاده نمی‌شوند) بدون ایجاد تداخل مضر بر روی کاربران اولیه را دارد. مفهوم حفره‌ی طیفی در شکل ۱-۲ مشخص شده است. به منظور جلوگیری از تداخل، رادیوی شناختگر باید به طور پیوسته طیف مورد استفاده‌ی خود را پایش نماید تا در صورت حضور کاربر اولیه سریعاً آن طیف را خالی نماید. به طور دقیق‌تر تکنولوژی رادیوی شناختگر، کاربران را قادر می‌سازد تا قسمت‌های خالی طیف را آشکار نموده، بهترین کانال از بین کانال‌های خالی را انتخاب نماید، دسترسی به این کانال را با سایر کاربران هماهنگ نماید و به محض ورود کاربران اولیه به طیفی که به صورت موقت توسط کاربران ثانویه اشغال است، آن طیف را خالی کنند.

³ Spectral holes



شکل ۲-۱ مفهوم حفره‌ی طیفی [4]

رادیوی شناختگر در واقع نسخه‌ی بهبود یافته‌ی رادیوی مبتنی بر نرم‌افزار^۴ [5] است که در آن علاوه بر توانائی‌های موجود در رادیوی مبتنی بر نرم‌افزار، توانائی سنجش محیط اطراف، دنبال نمودن تغییرات محیط و واکنش نسبت به این تغییرات نیز وجود دارد. رادیوی مبتنی بر نرم‌افزار، رادیوی چندباند است که توانائی پشتیبانی از چندین واسطه هوائی و پروتکل را از طریق استفاده از آنتن‌های باند پهن و مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال^۵ و دیجیتال به آنالوگ^۶ دارد. در یک رادیوی نرم‌افزاری ایده‌آل، کلیه‌ی قسمت‌های رادیو از جمله واسطه‌های هوائی فیزیکی به صورت نرم‌افزاری پیاده‌سازی شده‌اند. در این ساختار، سیگنال خروجی آنتن بعد از اعمال فیلتر مناسب نمونه‌برداری می‌شود. ویژگی اصلی رادیوی مبتنی بر نرم‌افزار، قابلیت پیکربندی مجدد آن است که به معنای توانائی انتخاب، پیاده‌سازی و تطبیق پویای هر یک از اجزاء و پارامترهای رادیو با توجه به محیط ارتباط و نیازهای کاربران بدون تغییر در سخت‌افزار است.

اگر چه بر سر تعریف دقیق رادیوی شناختگر توافق خاصی وجود ندارد، اما به طور ساده می‌توان آن را به صورت زیر تعریف نمود:

رادیویی که در آن سیستم‌های مخابراتی از محیط اطراف و پیکربندی داخلی خود مطلع هستند و براساس اطلاعات آن و قوانین از پیش تعیین شده می‌توانند در مورد رفتارهای عملیاتی خود تصمیم‌گیری کنند [6].

⁴Software Defined Radio (SDR)

⁵ Analogue to Digital Converter (ADC)

⁶ Digital to Analogue Converter (DAC)

به طور کلی، ویژگی‌های رادیوی شناختگر را می‌توان در دو مورد زیر خلاصه نمود [7]:

الف- شناختگر بودن: به کمک تراکنش بلادرنگ با محیط، رادیوی 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 حفره‌ی طیفی گفته می‌شود را شناسائی نموده و بهترین طیف فرکانسی موجود برای فعالیت خود را انتخاب نماید.

ب- قابلیت ساختاربندی مجدد^۷: رادیوی شناختگر را می‌توان به گونه‌ای برنامه‌ریزی کرد که بتواند بر روی باندهای فرکانسی مختلف 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 رادیوی شناختگر می‌توان به نوع مدولاسیون، فرکانس کار و توان ارسالی اشاره نمود. با توجه به قابلیت‌های ذکر شده، برای پیاده‌سازی سخت‌افزاری رادیوی شناختگر، با چالش‌های جدیدی از جمله نیاز به آنتن‌های باند پهن، فیلترهای و فقی قابل تنظیم روی هر فرکانس رادیویی و حساسیت بالا برای آشکارسازی سیگنال‌های ضعیف در یک محدوده‌ی دینامیکی وسیع روبرو خواهیم بود.

اجزاء اصلی تشکیل دهنده‌ی شبکه‌ی رادیوی شناختگر که ساختار آن در شکل ۱-۳ نمایش داده شده است، را می‌توان در دو گروه شبکه‌ی اولیه^۸ و شبکه‌ی ثانویه^۹ طبقه‌بندی نمود. شبکه‌ی اولیه یا شبکه‌ی دارای مجوز، همان شبکه‌ی موجود 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 در صورت عدم وجود کاربر اولیه در طیف، می‌توانند از باند فرکانسی آن به عنوان فرصت طیفی برای ارسال خود استفاده نمایند. با توجه به این‌که کاربران اولیه برای استفاده از طیف دارای اولویت 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

⁷ Reconfigurability

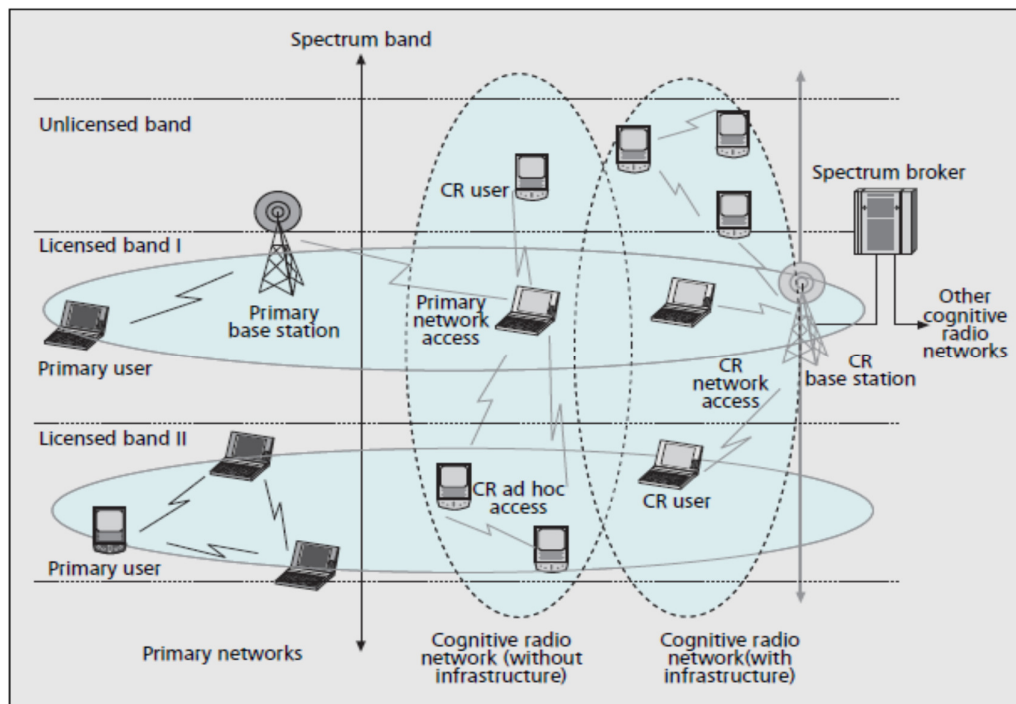
⁸ Primary System

⁹ Secondary System

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 رادیویی شناختگر به دلیل هم‌زیستی با شبکه‌های اولیه و نیاز به کیفیت سرویس‌های^{۱۰} متفاوت با چالش‌های جدیدی 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 در صورت حضور کاربر اولیه را داشته باشند. با توجه به این موارد، فرآیند مدیریت طیف در شبکه‌های رادیویی شناختگر شامل چهار قدم اصلی است:

قدم اول- سنجش طیف^{۱۱}: کاربر ثانویه تنها می‌تواند از قسمت‌های بدون استفاده‌ی طیف استفاده نماید. بنابراین طیف باید به‌طور مداوم پایش شود تا از اطلاعات به دست آمده بتوان حفره‌های طیفی را آشکار نمود.



شکل ۳-۱ ساختار شبکه‌ی شناختگر [4]

¹⁰Quality of Service (Qos)

¹¹Spectrum sensing

قدم دوم- تصمیم‌گیری طیفی^{۱۲}: بر اساس در دسترس بودن طیف، کاربران می‌توانند کانالی را برای فعالیت خود اختصاص دهند. نحوه‌ی تخصیص علاوه بر وجود طیف خالی، به سیاست‌های کلی و قوانین خاص نیز بستگی دارد.

قدم سوم- اشتراک طیف^{۱۳}: از آنجا که ممکن است چندین رادیوی شناختگر برای دسترسی به طیف تلاش کنند، دسترسی در شبکه‌ی باید به‌نحوی هماهنگ شود که از تداخل رادیوهای شناختگر مختلف جلوگیری شود.

قدم چهارم- تحرک طیف^{۱۴}: به این خاطر که کاربران رادیوی شناختگر کاربران ثانویه‌ی طیف هستند، به‌محض ورود یک کاربر اولیه به طیف مورد استفاده توسط رادیوی شناختگر، باید سریعاً طیف را ترک نموده و ارسال اطلاعات خود را در قسمت دیگری از طیف که خالی است ادامه دهد. با توجه به مطالب بیان شده، سنجش طیف اولین و مهم‌ترین قدم در پیاده‌سازی تکنولوژی رادیوی شناختگر می‌باشد و تمرکز این رساله نیز بر روی همین مساله می‌باشد.

پیاده‌سازی سنجش طیف در عمل دارای چالش‌های متفاوتی می‌باشد. یک دسته از این چالش‌ها، نیازمندی‌های سخت افزاری از جمله نرخ نمونه‌برداری بالا، مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال با دقت بالا و رنج دینامیکی زیاد، پردازش‌گرهای سیگنال با سرعت بالا و نیاز به آنتن‌های باند پهن می‌باشد. یکی دیگر از چالش‌های موجود این است که نسبت سیگنال به نویز (SNR^{15}) لازم برای آشکارسازی سیگنال‌های اولیه می‌تواند بسیار کم باشد. به‌عنوان مثال، حتی اگر فرستنده‌ی اولیه در نزدیکی گره‌ی رادیوی شناختگر باشد، سیگنال دریافتی رادیوی شناختگر از کاربر اولیه می‌تواند دچار محوشدگی عمیق^{۱۶} گردد، به‌نحوی که SNR سیگنال اولیه در محل گره‌ی رادیوی شناختگر زیر $-20dB$ باشد [8]. با این حال، رادیوی شناختگر باید توانایی تشخیص وجود چنین سیگنالی را نیز داشته باشد در غیر این صورت می‌تواند با ارسال خود، روی دریافت گیرنده‌ی اولیه تداخل ایجاد نماید. علاوه بر این، محوشدگی چند مسیره^{۱۷} و پراکندگی زمانی^{۱۸} کانال‌های بی‌سیم می‌توانند مساله‌ی سنجش طیف را

¹² Spectrum decision

¹³ Spectrum sharing

¹⁴ Spectrum mobility

¹⁵ Signal-to-Noise-Ratio

¹⁶ Deep fade

¹⁷ Multipath fading