بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

آقای **محسن جزایی** پایان نامه ۶ واحدی خود را با عنوان **بررسی ظرفیت سیستم ثانویه در شبکه های تشریک طیفی چند کاربرده** در تاریخ ۱۳۹۱/۶/۲۷ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده، پذیرش آنرا برای اخذ درجه کارشناسی ارشد مخابرات پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر احمدرضا شرافت	استاد	
استاد ناظر	دکتر پاییز عزمی	استاد	
استاد ناظر	دکتر حمید سعیدی	استادیار	
استاد ناظر	دکتر سیدمحمد رضوی زاده	استادیار	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر حمید سعیدی	استادیار	

آیین‌نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی و فناوری دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیأت علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد زیر را رعایت نمایند:

ماده ۱- حق نشر و تکثیر پایان نامه/ رساله و درآمدهای حاصل از آنها متعلق به دانشگاه می باشد ولی حقوق معنوی پدید آورندگان محفوظ خواهد بود.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و با تایید استاد راهنمای اصلی، یکی از اساتید راهنما، مشاور و یا دانشجو مسئول مکاتبات مقاله باشد. ولی مسئولیت علمی مقاله مستخرج از پایان نامه و رساله به عهده اساتید راهنما و دانشجو می باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش‌آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب، نرم افزار و یا آثار ویژه (اثری هنری مانند فیلم، عکس، نقاشی و نمایشنامه) حاصل از نتایج پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی کلیه واحدهای دانشگاه اعم از دانشکده ها، مراکز تحقیقاتی، پژوهشکده ها، پارک علم و فناوری و دیگر واحدها باید با مجوز کتبی صادره از معاونت پژوهشی دانشگاه و براساس آئین نامه های مصوب انجام شود.

ماده ٤- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه یافته ها در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق معاونت پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ٥- این آیین‌نامه در ٥ ماده و یک تبصره در تاریخ۸۷/٤/۱ در شورای پژوهشی و در تاریخ ۸۷/٤/۲۳ در هیأت رئیسه دانشگاه به تایید رسید و در جلسه مورخ ۸۷/۷/۱۵ شورای دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب در شورای دانشگاه لازم‌الاجرا است.

«اینجانب ..... دانشجوی رشته ..... ورودی سال تحصیلی ۱۳۸۸.....
مقطع ..... دانشکده ..... متعهد می شوم کلیه نکات مندرج در آئین نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش های علمی دانشگاه تربیت مدرس را در انتشار یافته های علمی مستخرج از پایان نامه / رساله تحصیلی خود رعایت نمایم. در صورت تخلف از مفاد آئین نامه فوق الاشعار به دانشگاه وکالت و نمایندگی می دهم که از طرف اینجانب نسبت به لغو امتیاز اختراع بنام بنده و یا هر گونه امتیاز دیگر و تغییر آن به نام دانشگاه اقدام نماید. ضمناً نسبت به جبران فوری ضرر و زیان حاصله بر اساس برآورد دانشگاه اقدام خواهم نمود و بدینوسیله حق هر گونه اعتراض را از خود سلب نمودم»

امضا: .....
تاریخ: .....

آیین نامه چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه،دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد/ رساله دکتری نگارنده در رشته **مهندسی برق** است که در سال **۱۳۹۱** در **دانشکده‌مهندسی برق و کامپیوتر** دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای دکتر **احمد رضا شرافت** از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت‌چاپ) را به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر درمعرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب **محسن جزائی** دانشجوی رشته **مهندسی برق** مقطع **کارشناسی ارشد** تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: محسن جزائی

تاریخ و امضا: ۹۲/۳/۱۱

دانشگاه تربیت مدرّس
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان‌نامه دوره‌ی کارشناسی ارشد مهندسی برق–مخابرات

بررسی ظرفیت سیستم ثانویه در شبکه‌های تشریک طیفی چند کاربره

محسن جزایی

استاد راهنما:
آقای دکتر احمد رضا شرافت

تابستان ۱۳۹۱

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

تشکر و قدردانی

این پایان نامه تحت قرارداد پژوهشی شماره ۶۱۵۶ / ۵۰۰ / ت مورخ ۸۹/۱۰/۱ از پشتیبانی مالی مرکز تحقیقات مخابرات برخوردار بوده است.

انجام این پایان نامه جز با یاری و حمایت بسیاری از بزرگواران امکان پذیر نبود:

استاد راهنمای عزیز و بزرگوارم، جناب آقای دکتر شرافت که حمایت های بی دریغ و راهنمایی های ارزنده ایشان، انجام این پژوهش را ممکن ساخت. امکان یادگیری و استفاده از تجارب ارزشمند این استاد برجسته و والامقام و آموختن درس های بسیاری در زندگی شخصی و حرفه ای، بدون شک، یکی از بزرگترین فرصت های زندگی اینجانب بوده است. بر خود لازم می دانم، کمال تشکر و قدردانی از زحمات و تلاش های بی پایان ایشان را ابراز دارم.

جناب آقای دکتر کیوان نوائی که راهنمایی اولیه اینجانب را بر عهده داشتند و سایر اساتید بزرگوار گروه مخابرات، آقایان دکتر حمید سعیدی، دکتر پاینیز عزمی و دکتر محمد حسن قاسمیان یزدی که شاگردی آن ها مایه مباهات و افتخار اینجانب است. از همه این بزرگواران سپاس گزارم.

دوستان عزیز آزمایشگاه سامانه های نوین ارتباطی سیار و آزمایشگاه سیستم های اطلاعاتی که از نظرات و بحث های سازنده آن ها بسیار متشکرم.

و پدر و مادر عزیزم که همواره صبر و حمایت های بی دریغ آنها، بزرگترین حامی و پشتیبان من بوده است. از زحمات ایشان کمال تشکر و قدردانی را می نمایم.

محسن جزایی

شهریور ماه ۱۳۹۱.

چکیده

در این پایان نامه به بررسی ظرفیت سیستم اشتراک طیفی چند کاربره پرداخته شده است. تمرکز اصلی این پژوهش، بر روی ظرفیت شبکه ثانویه در کانال فروسو است. مسائل مورد بررسی عبارتند از: ۱- ظرفیت سیستم ثانویه با راهکار توأم ارسال زمینه‌ای و میان گذاری[۱] ۲- ظرفیت سیستم ثانویه با اطلاعات جانبی قدیمی شده کانال[۲]. در مورد مسئله اول، ناحیه ظرفیت شبکه ثانویه با راهکار توأم ارسال زمینه‌ای و میان‌گذاری، در دو حالت تقسیم کد[۳] و تقسیم زمانی[۴] بررسی شده است. در هر دو حالت، فرض شده است که اطلاعات جانبی بدون نقص کانال[۵] در فرستنده و گیرنده‌ها موجود و حسگری طیف[۶] بدون خطا باشد. متوسط تداخل ناشی از کاربر اولیه نیز در محاسبات در نظر گرفته شده است. در هر دو حالت تقسیم کد و تقسیم زمانی، الگوریتم‌هایی برای تخصیص بهینه منابع و دستیابی به مرز ناحیه ظرفیت ارائه شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، راهکار توأم ارسال زمینه‌ای و میان‌گذاری، ظرفیت شبکه ثانویه را افزایش می‌دهد. مقدار این افزایش، تابعی از احتمال فعالیت فرستنده اولیه و تداخل ناشی از آن است. توان بهینه هر کاربر، تابعی از بهره کانال بین فرستنده و گیرنده‌های ثانویه، کانال تداخلی فرستنده ثانویه و گیرنده اولیه و نیز احتمال فعالیت سرویس اولیه است. در مسئله دوم، ناحیه ظرفیت شبکه ثانویه با اطلاعات جانبی قدیمی شده کانال تداخلی مورد بررسی قرار گرفته است. برای توصیف اطلاعات جانبی قدیمی شده کانال، از مدل همبستگی استفاده شده است. در این مسئله، محدودیت‌های احتمال برخورد[۷] و متوسط تداخل در نظر گرفته شده‌اند. در حالت کلی، تعیین مرز این ناحیه، یک مسئله غیر محدب است که برای اجتناب از آن، محدودیت احتمال برخورد با محدودیتی روی حداکثر توان ارسال جایگزین و الگوریتم بهینه تخصیص توان ارائه شده است. در این مسأله، توان بهینه هر کاربر، تابعی از بهره کانال بین فرستنده و گیرنده‌های ثانویه، اطلاعات جانبی قدیمی شده کانال، ضریب همبستگی و پارامترهای احتمال برخورد است. بر اساس نتایج به دست آمده، به دلیل قدیمی بودن اطلاعات جانبی کانال تداخلی، ظرفیت شبکه ثانویه کاهش می‌یابد که مقدار آن تابعی از ضریب همبستگی بین اطلاعات واقعی و قدیمی شده کانال و همچنین حداکثر احتمال برخورد قابل تحمل در گیرنده اولیه است.

کلید واژه: راهکار توأم ارسال زمینه‌ای و میان گذاری، تقسیم زمانی، تقسیم کد، اطلاعات جانبی قدیمی شده کانال، احتمال برخورد.

---

[1] Joint underlay-interweave paradigm
[2] Outdated channel side information (Outdated CSI)
[3] Code division (CD)
[4] Time division (TD)
[5] Perfect
[6] Spectrum sensing
[7] Colision probability

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست نمادها ..... ج
فهرست جدول‌ها ..... د
فهرست شکل‌ها ..... ه

فصل ۱- مقدمه ۱
۱-۱- پیشگفتار ۱
۱-۲- ظرفیت سرویس ثانویه ۳
۱-۳- نوآوری‌های پایان نامه ۷
۱-۴- ساختار پایان نامه ۹

فصل ۲- مدل سیستمی و مروری بر ادبیات موضوع ۱۰
۲-۱- مقدمه ۱۰
۲-۲- مدل سیستمی ۱۰
۲-۲-۱- شبکه‌ی اشتراک طیفی در حالت‌های تقسیم کد و تقسیم زمانی ۱۵
۲-۲-۱-۱- مدل کانال ۱۵
۲-۲-۱-۲- مدل تداخل ۱۶
۲-۲-۲- شبکه‌ی اشتراک طیفی با اطلاعات جانبی قدیمی ۱۷
۲-۲-۲-۱- مدل کانال ۱۷
۲-۲-۲-۲- مدل تداخل ۱۸
۲-۳- مروری بر تحقیقات انجام شده ۱۹
۲-۳-۱- راهکار توأم ارسال زمینه‌ای و میان گذاری ۱۹
۲-۳-۲- محدودیت توأم آستانه‌ی تداخل و احتمال برخورد ۲۲

فصل ۳- ظرفیت شبکه ثانویه در حالت تقسیم کد ۲۵
۳-۱- مقدمه ۲۵
۳-۲- بیان مسأله ۲۵
۳-۳- تحلیل مسأله ۲۷
۳-۴- نتایج شبیه سازی ۳۸
۳-۵- جمع بندی و نتیجه‌گیری ۴۶

فصل ۴- ظرفیت شبکه ثانویه در حالت تقسیم زمانی ۴۷
۴-۱- مقدمه ۴۷
۴-۲- بیان مسأله ۴۷

۴-۳- تحلیل مسأله ۵۰
۴-۴- نتایج شبیه سازی ۶۰
۴-۵- جمع بندی و نتیجه‌گیری ۶۴
فصل ۵- ظرفیت شبکه ثانویه با اطلاعات جانبی قدیمی شده کانال..... ۶۵
۵-۱- مقدمه ۶۵
۵-۲- بیان مسأله ۶۵
۵-۳- تحلیل مسأله ۶۸
۵-۴- نتایج شبیه سازی ۷۱
۵-۵- جمع بندی و نتیجه‌گیری ۷۸
فصل ۶- بحث و پیشنهاد کارهای آینده..... ۷۹
۶-۱- بحث ۷۹
۶-۲- پیشنهاد کارهای آینده ۸۰
فهرست مراجع..... ۸۲
واژه نامه‌ی فارسی به انگلیسی..... ۸۶
واژه نامه‌ی انگلیسی به فارسی..... ۸۷

فهرست نمادها

توضیح	نماد	توضیح	نماد
پهنای باند سیستم	B	نویز مؤثر در j–امین گیرنده‌ی ثانویه	n_j
فرستنده‌ی اولیه	$\mathrm{Tx_p}$	بردار نویز مؤثر کاربران ثانویه	$\mathbf{n}_s$
گیرنده‌ی اولیه	$\mathrm{Rx_p}$	نسبت زمان مختص به j–امین کاربر ثانویه	τ_j
ایستگاه پایه ثانویه	$\mathrm{Tx_s}$	توان j–امین کاربر ثانویه	p_j
تعداد کاربران ثانویه	M	حداکثر توان قابل ارسال توسط $\mathrm{Tx_s}$	$\hat{p}$
j–امین گیرنده‌ی ثانویه	$\mathrm{Rx}_{s,j}$	متوسط توان قابل ارسال توسط $\mathrm{Tx_s}$	$\overline{p}$
بهره‌ی کانال بین فرستنده‌ی ثانویه و $\mathrm{Rx}_{s,j}$	$g_{s,j}$	متوسط تداخل قابل قبول در $\mathrm{Tx_p}$	Γ
بهره‌ی کانال بین فرستنده‌ی ثانویه و گیرنده‌ی اولیه	h_{sp}	ضریب همبستگی	ρ
تابع توزیع احتمال $g_{s,j}$	$F_{s,j}(g_{s,j})$	بهره‌ی قدیمی شده‌ی کانال تداخلی	$\hat{h}_{\mathrm{sp}}$
تابع توزیع احتمال h_{sp}	$F_{\mathrm{sp}}(h_{\mathrm{sp}})$	آستانه حداکثر تداخل	γ
نرخ j–امین کاربر ثانویه	R_j	احتمال برخورد قابل قبول	η
توان نویز در هر یک از گیرنده‌ها	N_0B	فضای توان مجاز برای شبکه‌ی ثانویه	$\mathcal{P}$
احتمال فعال بودن فرستنده‌ی اولیه	P_{b}	اولویت متناظر با j–امین کاربر ثانویه	μ_j
احتمال غیر فعال بودن فرستنده‌ی اولیه	P_{i}	بردار اولویت کاربران ثانویه	$\boldsymbol{\mu}$
متوسط تداخل ناشی از اولیه در j–امین گیرنده‌ی ثانویه	I_j	ضرایب لاگرانژ	λ, ν
SINR در j–امین گیرنده‌ی ثانویه	γ_j	تابع نشان‌گر	$\mathbf{1}(\cdot)$

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۲-۱: خلاصه‌ی تحقیقات انجام شده و مسائل مطرح شده در مورد ظرفیت سرویس ثانویه ۲۲
جدول ۲-۲: خلاصه‌ی تحقیقات انجام شده و مسئله‌ی مطرح شده در مورد ظرفیت شبکه ثانویه با CSI ناقص ۲۴
جدول ۳-۱: الگوریتم تخصیص بهینه توان در حالت میان گذاری با در نظر گرفتن محوشدگی..... ۳۷
جدول ۳-۲: الگوریتم تخصیص بهینه توان در حالت ارسال زمینه‌ای با در نظر گرفتن محوشدگی ۳۸
جدول ۳-۳: پارامترهای مفروض برای انجام شبیه سازی ۳۹
جدول ۴-۱: الگوریتم تخصیص بهینه توان و زمان در حالت میان گذاری ۶۰
جدول ۵-۱: الگوریتم تخصیص بهینه توان با در نظر گرفتن محوشدگی و اطلاعات جانبی قدیمی شده کانال تداخلی ۷۱
جدول ۵-۲: پارامترهای مفروض برای شبیه سازی ظرفیت شبکه‌ی ثانویه با اطلاعات قدیمی کانال تداخلی ۷۲

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱: اشتراک طیفی شبکه‌ی ثانویه در کانال فروسو ۱۱
شکل ۲-۲: طرح سیستم اشتراک طیفی ۱۲
شکل ۲-۳: مدل مارکوف فعالیت سرویس اولیه [۲۱]. ۱۳
شکل ۳-۱: توضیح الگوریتم حریصانه برای حالت سه کاربره [۱۳]. ۳۵
شکل ۳-۲: اثر پارامتر فعالیت سرویس اولیه بر ناحیه‌ی ظرفیت تقسیم کد شبکه‌ی ثانویه برای $I_j = 0.1\ Watt$، $p = 10\ Watt$ و $\Gamma = 0.1\ Watt$. ۳۹
شکل ۳-۳: بررسی درستی رابطه‌ی (۳-۵۴) برای $P_{\mathrm{i}} = 0.5$ ، $I_j = 0.1\ Watt$، $p = 10\ Watt$ و $\Gamma = 0.1\ Watt$. ۴۰
شکل ۳-۴: اثر تداخل ناشی از سرویس اولیه بر روی ناحیه ظرفیت تقسیم کد برای $P_{\mathrm{i}} = 0.5$، $p = 10\ Watt$ و $\Gamma = 0.1\ Watt$. ۴۱
شکل ۳-۵: تأثیر محدودیت توان متوسط بر روی ناحیه‌ی ظرفیت تقسیم کد برای $P_{\mathrm{i}} = 0.5$ ، $I_j = 0.1\ Watt$ و $\Gamma = 0.1\ Watt$. ۴۲
شکل ۳-۶: اثر آستانه تداخل بر روی ناحیه ظرفیت تقسیم کد برای $P_{\mathrm{i}} = 0.5$ ، $I_j = 0.1\ Watt$ و $p = 10\ Watt$. ۴۲
شکل ۳-۷: تغییر مجموع نرخ‌ها با تغییرات متوسط توان ارسال و پارامتر فعالیت سرویس اولیه برای $I_j = 0.1\ Watt$، $\Gamma = 0.1\ Watt$ و مقادیر مختلف p. ۴۳
شکل ۳-۸: تغییر مجموع نرخ‌ها با متوسط توان ارسال و تداخل ناشی از اولیه برای $P_{\mathrm{i}} = 0.5$، $\Gamma = 0.1\ Watt$ و مقادیر مختلف p. ۴۴
شکل ۳-۹: بررسی اثر آستانه تداخل و فعالیت سرویس اولیه بر مجموع نرخ‌ها برای $I_j = 0.1\ Watt$، $p = 10\ Watt$ و مقادیر مختلف Γ. ۴۵
شکل ۳-۱۰: تغییر مجموع نرخ‌ها با تغییرات آستانه‌ی تداخل و مقادیر مختلف تداخل ناشی از اولیه برای $P_{\mathrm{i}} = 0.5$، $p = 10\ Watt$ و مقادیر مختلف Γ. ۴۶
شکل ۴-۱: توابع نرخ f_1 و f_2 و کانتور آن‌ها [۱۶]. ۵۳
شکل ۴-۲: اثر پارامتر فعالیت سرویس اولیه بر روی ناحیه‌ی نرخ بیت تقسیم زمانی برای $I_j = 0.1\ Watt$، $p = 10\ Watt$ و $\Gamma = 0.1\ Watt$. ۶۱
شکل ۴-۳: تاثیر تداخل سرویس اولیه بر روی ناحیه نرخ تقسیم زمانی برای $P_{\mathrm{i}} = 0.5$، $p = 10\ Watt$ و $\Gamma = 0.1\ Watt$. ۶۲
شکل ۴-۴: اثر متوسط توان ارسال بر ناحیه نرخ تقسیم زمانی برای $P_{\mathrm{i}} = 0.5$ ، $I_j = 0.1\ Watt$ و $\Gamma = 0.1\ Watt$. ۶۳

شکل ۴-۵: تأثیر آستانه تداخل بر ناحیه نرخ تقسیم زمانی برای $P_{\mathrm{i}} = 0.5$ ، $I_j = 0.1\,Watt$ و $p = 10\,Watt$ ۶۴
شکل ۵-۱: تأثیر ضریب همبستگی بر ناحیه‌ی ظرفیت شبکه‌ی ثانویه با اطلاعات جانبی قدیمی شده کانال تداخلی برای $\eta = 0.1$، $p = 4\,Watt$ و $\Gamma = 2\,Watt$ ۷۲
شکل ۵-۲: تأثیر احتمال برخورد بر ناحیه‌ی ظرفیت شبکه‌ی ثانویه برای $\rho = 0.9$، $p = 4\,Watt$ و $\Gamma = 2\,Watt$ ۷۳
شکل ۵-۳: اثر محدودیت متوسط توان ارسال بر ناحیه‌ی ظرفیت برای $\rho = 0.9$، $\eta = 0.1$ و $\Gamma = 2\,Watt$ ۷۴
شکل ۵-۴: تأثیر آستانه‌ی تداخل بر ناحیه‌ی ظرفیت برای $\rho = 0.9$، $\eta = 0.1$ و $p = 4\,Watt$ ۷۵
شکل ۵-۵: تأثیر ضریب همبستگی و متوسط توان ارسال بر مجموع نرخ‌ها برای $\eta = 0.1$ و $\Gamma = 2\,Watt$ ۷۵
شکل ۵-۶: اثر احتمال برخورد و متوسط توان ارسال بر مجموع نرخ‌ها برای $\rho = 0.9$ و $\Gamma = 2\,Watt$ ۷۶
شکل ۵-۷: تأثیر ضریب همبستگی و آستانه‌ی تداخل بر مجموع نرخ‌ها برای $\eta = 0.1$ و $p = 4\,Watt$ ۷۷
شکل ۵-۸: اثر احتمال برخورد و آستانه‌ی تداخل بر مجموع نرخ‌ها برای $\rho = 0.9$ و $p = 4\,Watt$ ۷۷

فصل اول

مقدمه

۱–۱– پیشگفتار

روش سنتی دسترسی به منابع طیفی، مستلزم دریافت مجوز از سازمان‌های تنظیم مقررات رادیویی است. در این روش، ابتدا طیف فرکانسی به باندهای مجزایی تقسیم و برای هر باند، کاربرد مشخصی تعیین می‌شود و مجوز استفاده‌ی انحصاری از آن باند، به صاحب امتیاز آن باند اعطا می‌گردد. مزیت این روش در آن است که استفاده از باند، شامل انجام راهکارهای مورد نیاز برای تضمین کیفیت سرویس کاربران، به طور کامل توسط صاحب امتیاز آن باند انجام می‌شود.

بر اساس اندازه‌گیری‌های طیفی انجام شده، بر خلاف بهای سنگینی که برای دسترسی انحصاری به منابع طیفی پرداخته شده است، در بسیاری از موارد استفاده‌ی مناسبی از این منابع محدود به عمل نمی‌آید. به عبارت دیگر، روش سنتی تخصیص فرکانس کارایی چندانی نداشته و منابع طیفی در بسیاری از زمان‌ها و موقعیت‌های جغرافیایی تقریباً بدون استفاده باقی می‌مانند [۱, ۲]. از سوی دیگر، گسترش روز افزون شبکه‌های مخابراتی بی‌سیم، تقاضای فزاینده برای ایجاد سرویس‌های جدید، و لزوم بهبود

کیفیت سرویس‌های موجود، مسئله‌ی کمبود منابع طیفی را حادتر کرده است. بنابراین، کمبود منابع طیفی نتیجه‌ی مستقیم استفاده‌ی ناکارآمد از منابع موجود است. برای حل این مشکل، مفاهیم جدید دسترسی طیفی دینامیک[۱] یا مجوز دهی طیف ثانویه[۲] و رادیو شناختی مطرح شده‌اند [۲-۴].

رادیوی شناختی سیستمی است که می‌تواند محیط کاری الکترومغناطیسی خود را حس کرده و به صورت هوشمند و پویا، پارامترهای رادیویی نظیر توان ارسال، پهنای باند، نرخ ارسال و موارد مشابه دیگر را برای بهبود عملکرد سیستم تنظیم کند. در شبکه‌های اشتراک طیفی مبتنی بر این فناوری، کاربران اولیه[۳] کاربرانی هستند که مجوز دسترسی انحصاری به منابع طیفی را در اختیار دارند و کاربران ثانویه[۴]، کاربرانی هستند که چنین مجوزی ندارند ولی، با حفظ کارآیی کاربران اولیه، می‌توانند از منابع استفاده نشده‌ی آن‌ها استفاده کنند. در ساختار لایه‌ای شبکه‌های رادیو شناختی، روش‌های اندازه‌گیری طیفی و جمع‌آوری داده‌ها، از جمله مسائلی هستند که در لایه‌ی فیزیکی قابل بررسی است و تعیین چگونگی دسترسی به منابع طیفی، تخصیص توان بر اساس نتایج قطعی و یا همراه با خطای به دست آمده از اندازه‌گیری‌های طیفی، از جمله مسائل مطرح در زیر لایه‌ی دسترسی به محیط انتقال (MAC[۵]) است. مدیریت توأم حسگری و دسترسی طیفی به صورت بین لایه‌ای نیز، از جمله مسائل دیگری است که در این شبکه‌ها مطرح می‌شود.

در شبکه‌های اشتراک طیفی، کاربران ثانویه که اولویت پایین‌تری برای دسترسی به منابع طیفی دارند، می‌توانند از هر گونه اطلاعات جانبی در مورد فعالیت، شرایط کانال، کتاب کد و پیام‌های کاربرانی که طیف را به اشتراک گذاشته‌اند، استفاده کرده و به این ترتیب، ظرفیت و کارآیی طیفی سیستم را بهبود بخشند. بنابراین، دسترسی کاربر ثانویه به منابع طیفی به روش‌های مختلفی امکان‌پذیر است. با توجه به نوع اطلاعات جانبی موجود و محدودیت‌های تعیین شده توسط تنظیم‌کننده، راهکار اشتراک طیفی کاربران اولیه و ثانویه، به سه دسته‌ی اساسی تقسیم می‌شود: ۱- روی هم گذاری[۶] ۲- ارسال زمینه‌ای[۷] ۳- میان گذاری[۸] [۵].

در راهکار روی هم گذاری، فرض بر آن است که کاربر ثانویه اطلاعاتی نظیر کتاب کد و پیام‌های کاربران اولیه را در اختیار دارد. به این ترتیب، کاربر ثانویه می‌تواند با استفاده از روش‌های پیچیده‌ی کدگذاری کاغذ کثیف[۹]، از این اطلاعات برای کاهش تداخل در گیرنده‌ی اولیه و یا حذف تداخل ناشی از

[1] Dynamic spectrum access (DSA)
[2] Secondary Spectrum Licensing
[3] Primary Users (PU)
[4] Secondary Users (SU)
[5] Medium access control
[6] Overlay
[7] Underlay
[8] Interweave
[9] Dirty Paper Coding (DPC)

کاربر اولیه در گیرنده‌ی ثانویه استفاده کند [۶]؛ یا با تخصیص بخشی از توان خود برای رله[1] کردن پیام کاربر اولیه، کیفیت سرویس این کاربران را حفظ کند [۵, ۷].

در راهکار میان گذاری، کاربران ثانویه تنها در صورتی که کاربر اولیه غیر فعال باشد، می‌توانند از طیف اولیه استفاده کنند. در این روش، ابتدا حسگری طیفی [۸, ۹] انجام می‌شود و پس از جمع آوری اطلاعات مربوط به فعالیت سرویس اولیه و پردازش آن‌ها، کاربران ثانویه در حفره‌های طیفی[2] [۱۰] شناسایی شده در مکان، زمان و یا فرکانس، اقدام به ارسال اطلاعات می‌کنند. به این ترتیب با استفاده‌ی مجدد از فرکانس[3] در حفره‌های طیفی، کارآیی طیفی افزایش می‌یابد.

در راهکار ارسال زمینه‌ای، کاربر ثانویه می‌تواند به طور همزمان از منابع طیفی کاربر اولیه استفاده کند؛ به شرط آن که کیفیت سرویس اولیه در سطح قابل قبولی باقی بماند [۱]. در این روش، فرض بر آن است که فرستنده‌ی ثانویه از مقدار تداخل ایجاد شده بر روی تمام کاربران اولیه مطلع است. از نظر عملی، کاربر ثانویه ممکن است برای برآوردن محدودیت تداخل از روش‌های طیف گسترده و یا ارسال چند آنتنی استفاده کند. به دلیل محدودیت تداخل، این روش تنها به ارتباط‌های کوتاه برد[4] محدود می‌شود.

در سیستم‌های اشتراک طیفی، عملکرد سرویس ثانویه نباید کیفیت سرویس اولیه را تحت تأثیر قرار دهد. به دلیل بر هم نهی[5] تداخل ایجاد شده توسط کاربران ثانویه در گیرنده‌ی اولیه، ارائه‌ی روش‌های کارآمد برای شبکه‌های تشریک طیفی چند کاربره از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند.

چالش اساسی شبکه‌های اشتراک طیفی، بهبود کارآیی سیستم ثانویه با حفظ کیفیت سرویس اولیه است. ملاک‌های متفاوتی برای تعریف کارآیی سرویس ثانویه وجود دارد که هر یک برای کاربرد خاصی مناسب است. یکی از پارامترهای اصلی برآورد کارآیی شبکه‌ی ثانویه، ظرفیت آن است. مسئله‌ی ظرفیت در این شبکه‌ها، به دلیل ضرورت حفظ کارایی سرویس اولیه، نوعاً با محاسبه‌ی ظرفیت در دیگر شبکه‌ها متفاوت است.

۱–۲– ظرفیت سرویس ثانویه

یکی از پارامترهای اصلی یک شبکه‌ی مخابراتی، ظرفیت آن شبکه است. با گسترش شبکه‌های مخابراتی بی‌سیم، تعیین حدّ ظرفیّت این شبکه‌ها اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده است. ظرفیت یک کانال مخابراتی، حدّاکثر نرخ قابل انتقال توسط کانال است که به ازای آن بتوان، احتمال خطای دریافت را به اندازه‌ی دلخواه کوچک کرد. برای محاسبه‌ی ظرفیت، هیچ محدودیّتی روی پیچیدگی و تأخیر کدگذار و

[1] Relay
[2] Spectrum holes
[3] Frequency reuse
[4] Short range
[5] Superposition

کدبردار در نظر گرفته نمی‌شود و از نظر ریاضی، برای محاسبه‌ی آن کافیست حدّاکثر اطّلاعات متقابل بین ورودی و خروجی، روی تمام توزیع‌های ممکن احتمال برای ورودی محاسبه شود. معمولاً برای اثبات ظرفیت یک کانال، ابتدا قابل دستیابی بودن آن توسط یک دنباله‌ی نوعی اثبات می‌شود و در مرحله‌ی بعد، با اثبات عکس، نشان داده می‌شود که اگر نرخ ارسال بزرگتر از ظرفیّت کانال باشد، خطا در ارتباط بین فرستنده و گیرنده اجتناب ناپذیر است.

در شبکه‌های چند کاربره، منابع موجود باید بین کاربران تقسیم شود. در این شبکه‌ها، تخصیص منابع بین کاربران که یکی از مسائل عمده‌ی طراحی این شبکه‌هاست، توسط پروتکل‌های زیر لایه‌ی MAC انجام می‌شود. تخصیص منابع بین کاربران، به صورت‌های مختلفی امکان‌پذیر است. بنابراین، کارآیی شبکه‌های چندکاربره با ناحیه‌ی ظرفیت کاربران توصیف می‌شود. هر نقطه از ناحیه‌ی ظرفیت، متناظر با بردار نرخی است که با احتمال خطای به اندازه‌ی دلخواه کوچک و به طور همزمان توسط کاربران شبکه قابل دستیابی است. اجتماع این بردارها روی تمام روش‌های مختلف ارسال کاربران، ناحیه‌ی ظرفیت شبکه نامیده می‌شود [۱۱]. اگر ناحیه‌ی ظرفیت، یک مجموعه‌ی محدب [۱۲] باشد، این ناحیه به طور کامل با مرزهایش تعیین می‌گردد. مسأله‌ی تعیین مرزهای ناحیه‌ی ظرفیت، با بیشینه‌سازی میانگین وزنی نرخ[۱] کاربران معادل است [۱۳]. وزن متناظر با نرخ هر کاربر، نشان دهنده‌ی اولویت آن کاربر است. در حالت خاصی که ضرایب وزنی برابر باشند، جواب مسأله‌ی بیشینه سازی میانگین وزنی نرخ‌ها، مجموع نرخ‌ها[۲]ی کاربران را نتیجه می‌دهد که یکی دیگر از معیارهای معمول در برآورد کارآیی سیستم‌های چند کاربره است.

بر اساس این که سرویس ارائه شده نسبت به تأخیر حساس باشد یا نباشد و این که قطع سرویس چگونه تعریف شود، تعاریف متفاوتی برای ظرفیت یک سیستم مخابراتی وجود دارد که هر یک برای کاربرد خاصی مناسب است. یکی از این تعریف‌ها، ظرفیت ارگادیک[۳] یا شانونی[۴] است. این ظرفیت، حد بالای نرخ داده‌ی قابل حصول در یک سیستم مخابراتی است که حساسیت چندانی نسبت به تأخیر ندارد. ظرفیت قطع[۵] یا حداقل نرخ[۶]، برای کاربردهایی که رخداد قطع هم مجاز است مورد استفاده قرار می‌گیرد. به عبارت دیگر، این تعریف، برای کاربردهایی که سرویس ارائه شده از هر دو نوع حساس به تأخیر و غیر حساس به تأخیر باشد، مناسب است. ظرفیت تأخیر محدود[۷] هم برای کاربردهایی نظر صوت و ویدئو که نسبت به تأخیر حساسند مناسب است.

[1] Weighted sum rate
[2] Sum rate
[3] Ergodic capacity
[4] Shannon capacity
[5] Outage
[6] Minimum-rate
[7] Delay-limited

در کانال‌های مخابرات بی‌سیم، اندازه‌ی سیگنال دریافتی به دلیل تحرک کاربران به صورت تصادفی با زمان تغییر می‌کند. به عبارت دیگر، ماهیت تصادفی و متغیر با زمان کانال‌های بی‌سیم، یکی از مشخصات اصلی این کانال‌هاست. در این کانال‌ها، به دلیل برهم نهی مطلوب و یا نامطلوب سیگنال‌هایی که از مسیرهای مختلف به گیرنده رسیده‌اند، پدیده‌ی محوشدگی[۱] رخ می‌دهد. در کانال‌های محوشدگی بر خلاف کانال‌های گاوسی، بر اساس این که چه اطّلاعاتی در مورد کانال در فرستنده یا گیرنده در اختیار باشد، ظرفیت کانال متفاوت است.

در کانال محوشدگی مسطح با یک زوج فرستنده و گیرنده، اگر اطلاعات جانبی کانال (CSI[۲]) در فرستنده و گیرنده موجود باشد، ظرفیت کانال با تطبیق توان فرستنده، نرخ داده و کدگذاری مورد استفاده با تغییرات کانال، قابل دستیابی است. در این حالت، ظرفیت کانال با انتخاب کتاب کد مناسب از بین کتاب کدهای مختلفی که با در نظر گرفتن محوشدگی انتخاب می‌شوند، قابل دستیابی است [۱۴]. علاوه بر این روش، استفاده از یک کتاب کد با سمبل‌های مستقل و با توزیع $N(0,1)$، که هر بلوک آن متناسب با بهره‌ی کانال مقیاس می‌شود نیز از نظر ظرفیت بهینه است [۱۵]. به هر حال، با تخصیص بهینه‌ی توان که بر اساس الگوریتم تخصیص هم سطح توان ارسال WF[۳] در حوزه‌ی زمان انجام می‌شود، ظرفیت کانال قابل دستیابی است [۱۴]. در حالت چندکاربره و در کانال‌های محوشدگی فراسو[۴] و فروسو[۵] هم، تخصیص بهینه‌ی توان، دستیابی به مرز ناحیه‌ی ظرفیت ارگادیک را به دنبال خواهد داشت [۱۳, ۱۶]. به عبارت دیگر، مسأله‌ی تعیین ناحیه‌ی ظرفیت در این حالت‌ها، به حل مسأله‌ی دوگان آن، یعنی مسأله‌ی تخصیص منابع منجر می‌شود.

با توجه به تعاریف متفاوت ظرفیت و راهکارهای مختلف اشتراک طیفی، مسائل متنوعی در زمینه‌ی ظرفیت سرویس ثانویه مورد بررسی قرار گرفته است. سه راهکار عمده در شبکه‌های اشتراک طیفی، راهکارهای ارسال زمینه‌ای، روی هم گذاری و میان گذاری است. یک تقسیم بندی ممکن برای مسائل ظرفیت سرویس ثانویه، تقسیم بر اساس راهکار اشتراک طیفی استفاده شده در شبکه‌ی ثانویه است. علاوه بر این، بر این اساس هم که شبکه‌ی ثانویه از یک زوج فرستنده گیرنده تشکیل شده باشد و یا چند کاربره باشد می‌توان مسائل ظرفیت این شبکه‌ها را دسته بندی کرد.

راهکار ارسال زمینه‌ای، یک روش محافظه کارانه در دسترسی طیفی است. در این راهکار، فرض بر آن است که سرویس اولیه همواره فعال است و شبکه‌ی ثانویه برای اشتراک طیفی، همواره باید از محدودیت‌های سخت‌گیرانه‌ای پیروی کند. مراجع بسیاری به بررسی ظرفیت سرویس ثانویه در این راهکار اشتراک طیفی پرداخته‌اند. در این میان، برای شبکه‌ی متشکل از یک زوج فرستنده و گیرنده می‌توان به

[1] Fading
[2] Channel side information
[3] Water filling
[4] Uplink
[5] Downlink

[۱۷-۲۱] اشاره کرد. مراجع [۲۲-۲۶] هم نمونه‌های دیگری از تحقیقات انجام شده در خصوص ظرفیت شبکه‌های ثانویه‌ی چند کاربره با راهکار ارسال زمینه‌ای هستند. در این راهکار، به دلیل شناسایی نشدن وضعیت فعالیت کاربر اولیه، ظرفیت سرویس ثانویه محدود می‌شود.

بر خلاف راهکار ارسال زمینه‌ای، راهکار میان گذاری یک روش فرصت طلبانه است. در این راهکار، شبکه‌ی ثانویه از فرصت‌های طیفی شناسایی شده برای ارسال داده استفاده می‌کند. مسأله‌ی اساسی راهکار میان گذاری، آشکارسازی کاربر اولیه و فرصت‌های طیفی است. مراجع [۲۷-۳۰] نمونه‌ای از بررسی‌های انجام شده در خصوص ظرفیت سرویس ثانویه در راهکار میان گذاری هستند. در این راهکار، در صورت فعال بودن کاربر اولیه، سرویس ثانویه قطع می‌شود. علاوه بر این، از قابلیت‌های روش ارسال زمینه‌ای برای افزایش ظرفیت و کاهش احتمال قطع استفاده نمی‌شود.

بنابر آن چه گفته شد، با ترکیب راهکارهای ارسال زمینه‌ای و میان گذاری می‌توان، بدون هیچ هزینه‌ای ظرفیت سرویس ثانویه را بهبود بخشید. مراجع [۳۱-۳۳] نمونه‌هایی از بررسی‌های موجود در مورد ظرفیت راهکار ترکیبی برای یک زوج فرستنده گیرنده‌ی ثانویه هستند.

فعالیت سیستم ثانویه نباید عملکرد کاربر اولیه را تحت تأثیر قرار دهد. برای محافظت از کیفیت سرویس اولیه در برابر اثر بلند مدت[1] تداخل ناشی از فعالیت فرستنده‌ی ثانویه، محدودیت متوسط یا آستانه‌ی تداخل، به صورت گسترده‌ای در ادبیات موضوع استفاده شده است. در مواردی که تنها اثر محوشدگی سریع بر کارآیی سرویس اولیه مورد نظر باشد، محدودیت حداکثر تداخل[2] مناسب‌تر است. محدودیت توأمان حداکثر و متوسط تداخل ایجاد شده، محافظت از کاربر اولیه در برابر اثرات بلند مدت و کوتاه مدت تداخل را امکان‌پذیر می‌کند.

مسأله‌ی ظرفیت سرویس ثانویه تحت محدودیت‌های حداکثر و یا متوسط توان تداخلی و با فرض وجود اطلاعات جانبی کانال بین فرستنده‌ی ثانویه و گیرنده‌ی اولیه، به صورت گسترده‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. مراجع [۱۷, ۱۹-۲۶, ۳۱, ۳۲, ۳۴-۳۶] نمونه‌هایی از مطلعات انجام شده در این زمینه هستند.

در بسیاری از موارد، به دلیل خطای تخمین کانال، تحرک[3]، تأخیر، و فیدبک محدود[4] اطلاعات جانبی کانال به دست آمده ناقص[5] و یا قدیمی[6] است [۳۷-۴۱]. برای مثال، تحرک فرستنده‌ی ثانویه یا گیرنده‌ی اولیه، اثر داپلر[7] و تغییرپذیری کانال با زمان را سبب می‌شود [۴۰]. به این ترتیب، اطلاعات جانبی کانال

[1] Long term
[2] Peak interference
[3] Mobility
[4] Limited feedback
[5] Imperfect
[6] Outdated
[7] Doppler effect