





دانشکده مهندسی برق و رباتیک

رشته مهندسی برق گرایش مخابرات

پایان نامه کارشناسی ارشد

مخابرات سبز با ترکیب تکنیک‌های برداشت انرژی و درخواست تکرار خودکار

نگارنده: هانا اصغری

استاد راهنما

دکتر محمدرضا جوان

دی ۱۳۹۵

تقدیر و تشکر

از جناب آقای دکتر محمد رضا جوان که صبورانه و دلسوزانه پیگیر و مشوق من بودند و راهنمایی‌ها و حمایت‌های ایشان، همواره کارگشای این جانب بوده، کمال سپاس‌گذاری و تشکر را دارم.

تقدیم بہ

مادم و پدرم کہ عالمانہ بہ من آموختہ چگونه در عرصہ زندگی، ایستادگی را تجربہ نمایم. لازم می‌دارم از ہمراہی
خواہر عزیزم نیز کمال شکر و قدردانی را داشته باشم. بہمچنین از مساعدت ہای بی دریغ مهندس افرا و رستی
پاسکذاری می‌نمایم.

تعهدنامه

اینجانب هانا اصغری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق گرایش مخابرات دانشکده مهندسی برق و ریاضیات دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مخابرات سبز با ترکیب تکنیک های برداشت انرژی و درخواست تکرار خودکار تحت راهنمایی آقای دکتر محمدرضا جوان متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آن ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ : ۱۳۹۵/۱۰/۳۰

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

افزودن شناخت به تجهیزات کاربران شبکه و به‌کارگیری روش برداشت انرژی از سیگنال‌های رادیویی از جمله راهکارهای مقابله با محدودیت منابع طیف فرکانسی و توان در شبکه‌های بی‌سیم است. در این پایان‌نامه ابتدا با طرح یک مخابره مشارکتی در سیستم رادیوشناختی مجهز به تکنیک برداشت انرژی با مدولاسیون دسترسی چندگانه تقسیم فرکانسی متعامد، مسأله‌ی تخصیص منابع توان و پهنای باند مورد بررسی قرار گرفته است. در سیستم پیشنهادی ایستگاه پایه اولیه قصد ارسال اطلاعات به مقصدی دور در حضور کاربران ثانویه را دارد. ایستگاه پایه اولیه با در اختیار قرار دادن طیف فرکانسی خود به کاربران ثانویه، از همکاری آن‌ها در راستای ارتقای کیفیت سرویس شبکه اولیه استفاده می‌کند. کاربران ثانویه فاقد منبع توان ثابت بوده و از سیگنال‌های ارسالی شبکه اولیه، انرژی برداشت می‌کنند و با ایفای نقش رله به انتقال اطلاعات ایستگاه پایه به مقصد آن مبادرت می‌ورزند سپس با بهره‌گیری از منابع در دسترس به ارسال اطلاعات خود در شبکه ثانویه می‌پردازند. منابع را به قسمی مدیریت می‌کنیم که ابتدا شبکه اولیه به نرخ ارسال مورد نظر دست یابد سپس کاربران ثانویه با بیشترین نرخ مخابره کنند. این طرح را به‌صورت یک مسأله بهینه‌سازی فرمول‌بندی و به روش دوگان لاگرانژ حل کرده‌ایم و تأثیر پارامترهای مختلف شبکه از جمله تعداد کاربران ثانویه، نرخ ارسال مورد نیاز و توان ارسالی شبکه اولیه را بر روی نرخ ارسال شبکه ثانویه بررسی کرده‌ایم.

در ادامه به منظور کنترل خطا در شبکه رادیوشناختی مجهز به تکنیک برداشت انرژی، سیستم‌مدل دیگری ارائه شده و با به‌کارگیری روش درخواست تکرار خودکار در گیرنده‌های شبکه، ارتباطات قابل اعتمادی را از طریق مخابره‌ی مجدد فراهم کرده‌ایم. روابطی برای احتمال قطع شبکه اولیه و میانگین نرخ ارسال برای دریافت صحیح بسته‌ی اطلاعاتی در شبکه ثانویه به‌دست آورده‌ایم. در نهایت با استفاده از نتایج عددی به‌دست آمده، مقایسه‌ای بین عملکرد شبکه در حالت‌های مختلف صورت گرفته است.

کلمه‌های کلیدی : تخصیص منابع، شبکه رادیوشناختی، شبکه‌های مشارکتی، برداشت انرژی،

درخواست تکرار خودکار، احتمال قطع، میانگین نرخ ارسال

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل ۱: مقدمه	۱
۱-۱ پیشگفتار	۲
۲-۱ اهداف و فرضیات پایان نامه	۵
۳-۱ ساختار پایان نامه	۷
فصل ۲: مفاهیم پایه و مرور پژوهش های پیشین	۹
۱-۲ مقدمه	۱۰
۲-۲ مخابرات مشارکتی	۱۰
۳-۲ فناوری های به اشتراک گذاری طیف در شبکه های رادیوشناختی	۱۱
۱-۳-۲ رهیافت زمینه ای	۱۲
۲-۳-۲ رهیافت روی هم گذاری	۱۳
۴-۲ مشارکت در شبکه های رادیوشناختی	۱۴
۵-۲ منابع و مدل سازی برداشت انرژی در سیستم های مخابراتی	۱۷
۶-۲ برداشت انرژی در کانال رله و محدودیت های آن	۲۰
۱-۶-۲ برداشت انرژی در کانال رله با استفاده از منابع تجدیدپذیر	۲۰
۲-۶-۲ برداشت انرژی از سیگنال RF در کانال رله	۲۲
۷-۲ تحلیل احتمال عدم کدگشایی پیام در روش های مختلف کنترل خطا	۲۵
۸-۲ مروری بر پژوهش های پیشین	۲۸

۹-۲ ارتباط موضوع تحقیق با پژوهش‌های پیشین..... ۳۶

فصل ۳: تخصیص توان و زیر حامل در شبکه رادیوشناختی مشارکتی مجهز به تکنیک برداشت

انرژی..... ۳۷

۱-۳ مقدمه..... ۳۸

۲-۳ سیستم مدل پیشنهادی..... ۳۸

۳-۳ فرمول بندی مسأله..... ۴۰

۱-۳-۳ نرخ ارسال شبکه اولیه..... ۴۰

۲-۳-۳ انرژی برداشت شده توسط کاربران ثانویه از سیگنال‌های شبکه اولیه..... ۴۳

۳-۳-۳ نرخ ارسال شبکه ثانویه..... ۴۴

۴-۳ ساختار حل مسأله..... ۴۶

۱-۴-۳ تابع لاگرانژ مسأله..... ۴۸

۲-۴-۳ تابع دوگان لاگرانژ..... ۴۹

۱-۲-۴-۳ تخصیص توان ارسالی..... ۵۰

۲-۲-۴-۳ تخصیص زیر حامل‌ها..... ۵۱

۳-۴-۳ مسأله دوگان..... ۵۴

۱-۳-۴-۳ به‌روزرسانی متغیرهای لاگرانژ..... ۵۵

۲-۳-۴-۳ معیار توقف به‌روزرسانی..... ۵۶

۵-۳ نتایج..... ۵۷

فصل ۴: بررسی عملکرد شبکه رادیوشناختی با استفاده از تکنیک‌های برداشت انرژی و درخواست

تکرار ارسال خودکار..... ۶۳

۶۴	۱-۴ مقدمه.....
۶۴	۲-۴ سیستم مدل پیشنهادی.....
۶۶	۳-۴ احتمال قطع شبکه اولیه.....
۶۸	۱-۳-۴ محاسبه احتمال قطع شبکه اولیه بعد از یک بار ارسال.....
۶۸	۱-۱-۳-۴ احتمال قطع D_1 در ارسال S_1
۶۹	۲-۱-۳-۴ احتمال قطع D_1 در ارسال همزمان S_1 و S_2
۷۱	۲-۳-۴ احتمال قطع شبکه اولیه بعد از M بار ارسال مجدد.....
۷۳	۴-۴ میانگین نرخ ارسال شبکه ثانویه.....
۷۵	۱-۴-۴ احتمال کدگشایی شدن پیام توسط D_1 در مرحله m_2
۷۵	۲-۴-۴ احتمال کدگشایی شدن پیام بعد از $M - m_2$ مرحله ارسال در D_2
۷۹	۵-۴ نتایج عددی.....
۸۹	فصل ۵: جمع بندی و پیشنهادهایی برای پژوهش های آینده.....
۹۰	۱-۵ جمع بندی.....
۹۱	۲-۵ پیشنهادهایی برای پژوهش های آینده.....
۹۲	فهرست مراجع.....

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل (۱-۱) نمودار بلوکی سلسله مراتب پژوهش.....	۸
شکل (۱-۲) فناوری‌های به اشتراک‌گذاری طیف در شبکه‌های رادیوشناختی.....	۱۳
شکل (۲-۲) شبکه رادیوشناختی با وجود مشارکت در شبکه ثانویه.....	۱۵
شکل (۳-۲) مخابرات مشارکتی در شبکه‌های رادیوشناختی.....	۱۶
شکل (۴-۲) منابع برداشت انرژی.....	۱۸
شکل (۵-۲) معماری کلی شبکه برداشت انرژی RF.....	۱۹
شکل (۶-۲) برداشت انرژی از منابع تجدیدپذیر در کانال مشارکتی.....	۲۰
شکل (۷-۲) بلوک دیاگرام گیرنده رله در روش پرش زمانی.....	۲۳
شکل (۸-۲) بلوک دیاگرام گیرنده رله در روش تقسیم توان.....	۲۴
شکل (۹-۲) طرح IR-HARQ.....	۲۶
شکل (۱-۳) سیستم‌مدل شبکه رادیوشناختی با کاربران برداشت‌کننده انرژی.....	۳۹
شکل (۲-۳) نرخ ارسال شبکه ثانویه بر حسب بیشینه توان ارسال ایستگاه پایه اولیه.....	۵۸
شکل (۳-۳) نرخ ارسال شبکه ثانویه بر حسب نرخ ارسال مورد نیاز شبکه اولیه.....	۵۹
شکل (۴-۳) نرخ ارسال شبکه ثانویه بر حسب تعداد کاربران ثانویه.....	۶۰
شکل (۵-۳) نرخ ارسال شبکه ثانویه بر حسب تعداد زیرحامل‌های موجود در طیف.....	۶۱
شکل (۱-۴) سیستم‌مدل یک شبکه رادیوشناختی با رویکرد اجاره طیف در رهیافت روی هم-گذاری.....	۶۵

- شکل (۲-۴) بلوک دیاگرام نحوه تصمیم‌گیری S_1 و S_2 برای ارسال در هر مرحله با توجه به کدگشایی شدن پیام در D_1 و S_2 ۶۷
- شکل (۳-۴) احتمال قطع کانال اولیه به ازای مقادیر مختلف α در گره برداشت‌کننده توان S_2 ۸۰
- شکل (۴-۴) احتمال قطع کانال اولیه به ازای مقادیر مختلف SNR فرستنده اولیه و α در گره برداشت-کننده توان S_2 ۸۱
- شکل (۵-۴) احتمال قطع کانال اولیه در صورت عدم به‌کارگیری ARQ و به‌کارگیری ARQ به ازای مقادیر مختلف M ۸۲
- شکل (۶-۴) لگاریتم احتمال قطع کانال اولیه در صورت عدم به‌کارگیری ARQ و به‌کارگیری ARQ به ازای مقادیر مختلف M ۸۳
- شکل (۷-۴) احتمال قطع کانال اولیه با دو رویکرد دسترسی طیفی روی هم‌گذاری مشارکتی و ارسال زمینه‌ای برای کاربر ثانویه به ازای دو مقدار M ۸۴
- شکل (۸-۴) احتمال قطع کانال اولیه به ازای نرخ‌های ارسال متفاوت R_1 و $M = 2$ ۸۵
- شکل (۹-۴) احتمال دریافت صحیح پیام در گیرنده ثانویه به ازای $M = 2$ و $M = 4$ ۸۶
- شکل (۱۰-۴) میانگین نرخ دریافت پیام در گیرنده ثانویه به ازای نسبت تقسیم توان‌های مختلف ۸۷
- شکل (۱۱-۴) میانگین نرخ دریافت پیام در گیرنده ثانویه به ازای $M = 2$ و $M = 4$ ۸۸

فهرست جدول‌ها

صفحه

عنوان

- جدول (۱-۴) مقادیر پارامترهای شبکه در شبیه‌سازی ۷۹

لیست اختصارات

ACK	Acknowledgment
ARQ	Automatic Repeat Request
AWGN	Additive White Gaussian Noise
CC-HARQ	Code Combining Hybrid Automatic Repeat Request
CDF	Cumulative Density Function
CSI	Channel State Information
ESI	Energy State Information
IR-HARQ	Incremental Redundancy Hybrid Automatic Repeat Request
MRC	Maximum Ratio Combining
NACK	Negative Acknowledgment
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
QoS	Quality of Service
PBS	Primary Base station
PDF	Probability Density Function
PU	Primary User
RF	Radio Frequency
SBS	Secondary Base station
SL	Spectrum Leasing
SNR	Signal to Noise Ratio
SU	Secondary User
SWIP	Simultaneous Wireless Information and Power Transfer

فصل ۱:

مقدمه

۱-۱ پیشگفتار

با افزایش سرویس‌های مخابراتی تقاضا برای در اختیار گرفتن طیف فرکانسی افزایش یافته است. محدود بودن طیف فرکانسی در طبیعت باعث شده که طیف فرکانسی یکی از منابع مهم و نایاب به‌شمار آید. تحقیقات نشان داده است که بخش قابل توجهی از باند فرکانسی تخصیص داده‌شده به سرویس‌های مختلف در ۱۵ تا ۸۵ درصد مواقع استفاده نمی‌شود [۱]. افزایش تقاضا برای در اختیار گرفتن طیف فرکانسی از طرفی و محدود بودن و عدم بهره‌وری بالای این منبع از طرف دیگر محرک مهمی برای یافتن راهکارهای مؤثری است که بتوانند از پهنای باند موجود، جهت سرویس‌های مخابراتی جدید استفاده کنند و بهره‌وری فرکانسی را در شبکه‌های مخابراتی نسل آینده افزایش دهند. اشتراک طیفی در شبکه‌های رادیوشناختی، یکی از مهم‌ترین این راهکارهاست که اخیراً به‌صورت گسترده‌ای مورد توجه قرار گرفته است [۱-۸].

در شبکه‌های رادیوشناختی، کاربران به دو گروه تقسیم می‌شوند. گروه اول شامل کاربران فعلی شبکه یا کاربران اولیه^۱ (PU) و گروه دوم شامل کاربران ثانویه^۲ (SU) است. کاربران اولیه از طریق سازمان‌های تخصیص فرکانسی^۳، حق استفاده از قسمت خاصی از طیف فرکانسی را دارند [۲] و [۳]. بخش‌هایی از طیف اختصاص داده‌شده به این کاربران در زمان و یا فرکانس‌های مختلف مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. به این باندهای فرکانسی خالی، حفره طیفی گفته می‌شود. تعداد و پهنای باند حفره‌های طیفی در طول زمان در حال تغییر است [۱] و [۴].

کاربران ثانویه یا کاربران شناختی^۴ که در مجاورت کاربران اولیه قرار دارند، قابلیت ارزیابی، حس کردن و استخراج اطلاعات محیط رادیویی اطراف خود را دارند. از جمله اطلاعات مهمی که این کاربران حس

¹ Primary Users

² Secondary Users

³ Frequency Allocation organizations

⁴ Cognitive Users

می‌کنند مکان حفره‌های فرکانسی و سطح تداخل است. در صورت وجود حفره‌های طیفی، کاربران ثانویه آن باند فرکانسی را بر اساس راهکارهای اشتراک طیفی، استفاده کرده و پارامترهای ارسالی خود مانند سطح توان، فرکانس حامل و نوع مدولاسیون را به گونه‌ای تنظیم می‌کنند که میزان تداخل ایجاد شده بر روی کاربران اولیه منجر به کاهش کیفیت آن نشود [۲]، [۵] و [۶]. راهکارهای اشتراک طیفی با توجه به نیاز و شرایط شبکه انواع مختلفی دارد که در فصل بعدی به توضیح هر یک می‌پردازیم.

کاربران ثانویه در صورتی که متضمن افزایش کیفیت ارسال و نرخ شبکه اولیه باشند، می‌توانند هم‌زمان از طیف فرکانسی اختصاص داده شده به کاربران اولیه استفاده کنند. به این مفهوم اجاره طیف^۱ گفته می‌شود [۷] و [۸]. یکی از اهداف این پایان‌نامه تخصیص بهینه توان و طیف فرکانسی به کاربران شبکه رادیوشناختی با مکانیزم اجاره طیف برای بهبود کیفیت سرویس شبکه اولیه است.

برداشت انرژی در سیستم‌های مخابراتی به مفهوم به‌کارگیری انرژی محیط به‌عنوان منبعی برای تولید توان الکتریکی مورد نیاز برای انجام فعالیت‌های شبکه است. از آنجاکه شبکه‌های بی‌سیم دارای انرژی محدود هستند، پس از تمام شدن انرژی شبکه، فرایند ارسال متوقف می‌شود. به همین منظور برای افزایش طول عمر شبکه‌ها به‌جای جایگذاری یا شارژ مجدد باتری‌های شبکه، که هزینه‌ی بالایی را می‌طلبند و آلوده‌کننده‌ی محیط می‌باشند، استفاده از روش‌های برداشت انرژی توجه زیادی را به خود جلب کرده است [۹-۱۳]. به‌طور کلی در سیستم‌های مخابراتی، انرژی به دو روش برداشت می‌شود. در روش اول با به‌کارگیری انرژی منابع تجدیدپذیر محیط و در روش دوم با استفاده از انرژی سیگنال رادیویی^۲ (RF)، برداشت انرژی صورت می‌گیرد. در حالی که برداشت انرژی از منابع تجدیدپذیر در سیستم‌های مخابراتی به‌عنوان یکی از راهکارهای مخابرات سبز^۳ اتلاق می‌شود، مهم‌ترین مشکل آن امکان عدم تضمین کیفیت سرویس^۴ (QoS)

¹ Spectrum Leasing

² Radio Frequency

³ Green Communication

⁴ Quality of Service

کاربردهای مخابراتی، به علت عدم قطعیت در شرایط زمان، مکان و آبوهوا است. در واقع برخلاف انرژی باثبات سیستم‌های مرسوم، طبیعت تصادفی و متناوب انرژی تجدیدشدنی، منجر به ایجاد چالش‌هایی در طرح‌ها و میزان انرژی برداشتی، شده است [۹]. از این رو پس از برداشت انرژی به شیوه‌های مختلف بیان شده، برای جلوگیری از غیرفعال شدن گره‌های شبکه، بایستی به گونه‌ای برای مصرف انرژی برنامه‌ریزی کرد که همیشه توان در اختیار شبکه باشد. در سیستم‌های مطرح‌شده در این پایان‌نامه، برداشت انرژی توسط کاربران ثانویه به روش برداشت از سیگنال RF، صورت پذیرفته است و مصرف توان را به گونه‌ای به این کاربران اختصاص داده‌ایم که همواره برای فعالیت در شبکه توان در اختیار داشته باشند.

وجود عوارض فیزیکی متعدد در کانال‌های انتشار متنوع نظیر نویز، محوشدگی^۱، تداخل و دریافت چندمسیره منجر به تولید خطا در گیرنده‌های مخابراتی می‌شود. به‌طور کلی روش‌های جلوگیری از خطا در شبکه‌های مخابراتی دو نوع دارد. نوع اول روش درخواست تکرار خودکار^۲ (ARQ) و نوع دوم، درخواست تکرار خودکار ترکیبی^۳ (HARQ) نام دارد [۱۴-۲۰]. در کنترل خطای مبتنی بر ARQ، فرستنده پس از ارسال هر پیام منتظر حصول اطمینان از دریافت صحیح بسته می‌ماند. اگر گیرنده تشخیص دهد که خطا رخ داده، پیام مجدداً مخابره می‌شود. این طرح، از خبر وصول مثبت^۴ (ACK) یا خبر وصول منفی^۵ (NACK) برای ارسال بازخورد به فرستنده که مخابره موفقیت‌آمیز بوده یا خیر، استفاده می‌کند. اگر خبر وصول مثبت در یک بازه‌ی زمانی از پیش تعیین‌شده دریافت نشود، فرستنده مجدداً مخابره خواهد کرد. مخابره‌ی مجدد پیام‌ها تا زمانی ادامه دارد که پیام صحیح دریافت شود و یا مدت‌زمان ارسال بسته‌ی پیام تمام شود [۱۴]، [۱۵] و [۱۶]. این روش ارتباطات قابل اعتمادی را از طریق مخابره‌ی مجدد، فراهم می‌کند اما در کانال‌های

¹ Fading

² Automatic Repeat Request

³ Hybrid Automatic Repeat Request

⁴ Acknowledgment

⁵ Negative Acknowledgment

ضعیف که مخابره‌ی مجدد به کرات اتفاق می‌افتد، پرهزینه خواهد بود. در سیستم مدل رادیوشناختی ارائه‌شده در فصل چهار، به‌منظور داشتن مخابره‌ی قابل اعتماد، روش ARQ را در شبکه به‌کار گرفته‌ایم. بدین ترتیب گیرنده‌های شبکه پس از عدم دریافت صحیح پیام، با ارسال پیام بازخورد NACK، فرستنده متناظر را ملزم به ارسال مجدد پیام می‌کنند. به‌این ترتیب شاهد مخابره با احتمال خطای بسیار کم خواهیم بود اما این نکته را هم نباید فراموش کرد که ارسال مجدد یک پیام در چندین مرحله کاهش نرخ ارسال را به همراه خواهد داشت.

۲-۱ اهداف و فرضیات پایان‌نامه

هدف این پایان‌نامه تخصیص منابع در شبکه‌ی رادیوشناختی مشارکتی مجهز به تکنیک برداشت انرژی، به منظور افزایش نرخ ارسال و استفاده‌ی بهتر از منابع در دسترس شبکه است. کاهش احتمال قطع شبکه با به‌کارگیری درخواست تکرار خودکار در گیرنده‌های شبکه نیز هدف دیگر مورد مطالعه است. اهداف بیان‌شده، در دو سیستم به‌طور جداگانه بررسی شده است.

در ابتدا یک شبکه رادیوشناختی با رویکرد دسترسی طیفی روی‌هم‌گذاری و نوع مدولاسیون OFDMA مطرح شده است. در سیستم پیشنهادشده، کاربران ثانویه دارای منبع توان نیستند و برای فعالیت در شبکه از توان سیگنال‌های RF ارسال‌شده توسط شبکه‌ی اولیه، انرژی برداشت می‌کنند. با فرض وجود فاصله نسبتاً زیاد بین کاربر و گیرنده اولیه و عدم ارسال مستقیم پیام در این مسیر، کاربران ثانویه با رله کردن اطلاعات کاربر اولیه موجب افزایش نرخ و بهبود کارایی شبکه اولیه می‌شوند. به‌این صورت کاربر اولیه در مدت کمتری به منابع در اختیارش نیاز خواهد داشت و برای شبکه‌ی ثانویه فرصت‌های بیشتری برای استفاده از منابع شبکه‌ی اولیه فراهم می‌شود. منابعی که در این پایان‌نامه مدیریت می‌شوند شامل توان شبکه‌ی اولیه، توان شبکه‌ی ثانویه که ناشی از برداشت انرژی است، طیف فرکانسی و کاربران شبکه‌ی ثانویه است. در واقع

برخلاف سیستم‌های پیشین که توان شبکه ثانویه ثابت در نظر گرفته می‌شد، تأمین توان شبکه ثانویه با به‌کارگیری روش برداشت انرژی، محدودیت پیچیده‌تری به مسأله اعمال کرده است. سپس محدودیت‌های این منابع و شروط منتج شده از آن‌ها را تحلیل کرده و با هدف بیشینه کردن نرخ ارسال شبکه ثانویه به حل مسأله بهینه‌سازی در راستای چگونگی تخصیص منابع با توجه به شروط مسأله پرداخته‌ایم.

در ادامه سیستم‌مدل جدیدی برای شبکه رادیوشناختی، معرفی و با افزودن تکنیک درخواست تکرار خودکار در گیرنده‌های شبکه، ارتباطات قابل اعتمادی را از طریق مخابره مجدد فراهم کرده‌ایم. نوآوری این سیستم در به‌کار بردن درخواست تکرار خودکار در هر دو گیرنده اولیه و ثانویه در شبکه رادیوشناختی مجهز به تکنیک برداشت انرژی است. در این سیستم همانند سیستم قبل، کاربر ثانویه فاقد توان بوده و با به‌کارگیری روش برداشت انرژی از سیگنال اولیه، توان مورد نیاز برای فعالیت در شبکه را تأمین می‌کند. در سیستم مطرح‌شده دریافت صحیح پیام در گیرنده اولیه در اولویت قرار دارد. از این‌رو کاربر اولیه به ارسال مجدد یک بسته اطلاعاتی تا زمان دریافت پیام بازخورد ACK از گیرنده اولیه، ادامه می‌دهد. در این‌بین، از مرحله‌ای که کاربر ثانویه قادر به کدگشایی پیام باشد، به همکاری با کاربر اولیه می‌پردازد و با مصرف تمامی انرژی برداشتی در هر مرحله هم‌زمان با کاربر اولیه پیام را به گیرنده اولیه ارسال می‌کند. بعد از دریافت صحیح پیام در کانال اولیه، کاربر ثانویه طی مراحل باقی‌مانده درخواست تکرار خودکار در شبکه، شروع به ارسال پیام خودش با مصرف انرژی برداشتی در کانال ثانویه می‌کند و در صورت دریافت پیام بازخورد ACK ارسال را متوقف می‌کند. در انتها کارایی این سیستم را با معیار احتمال قطع و میانگین نرخ ارسال برای دریافت صحیح بسته اطلاعاتی مورد بررسی قرار داده‌ایم.

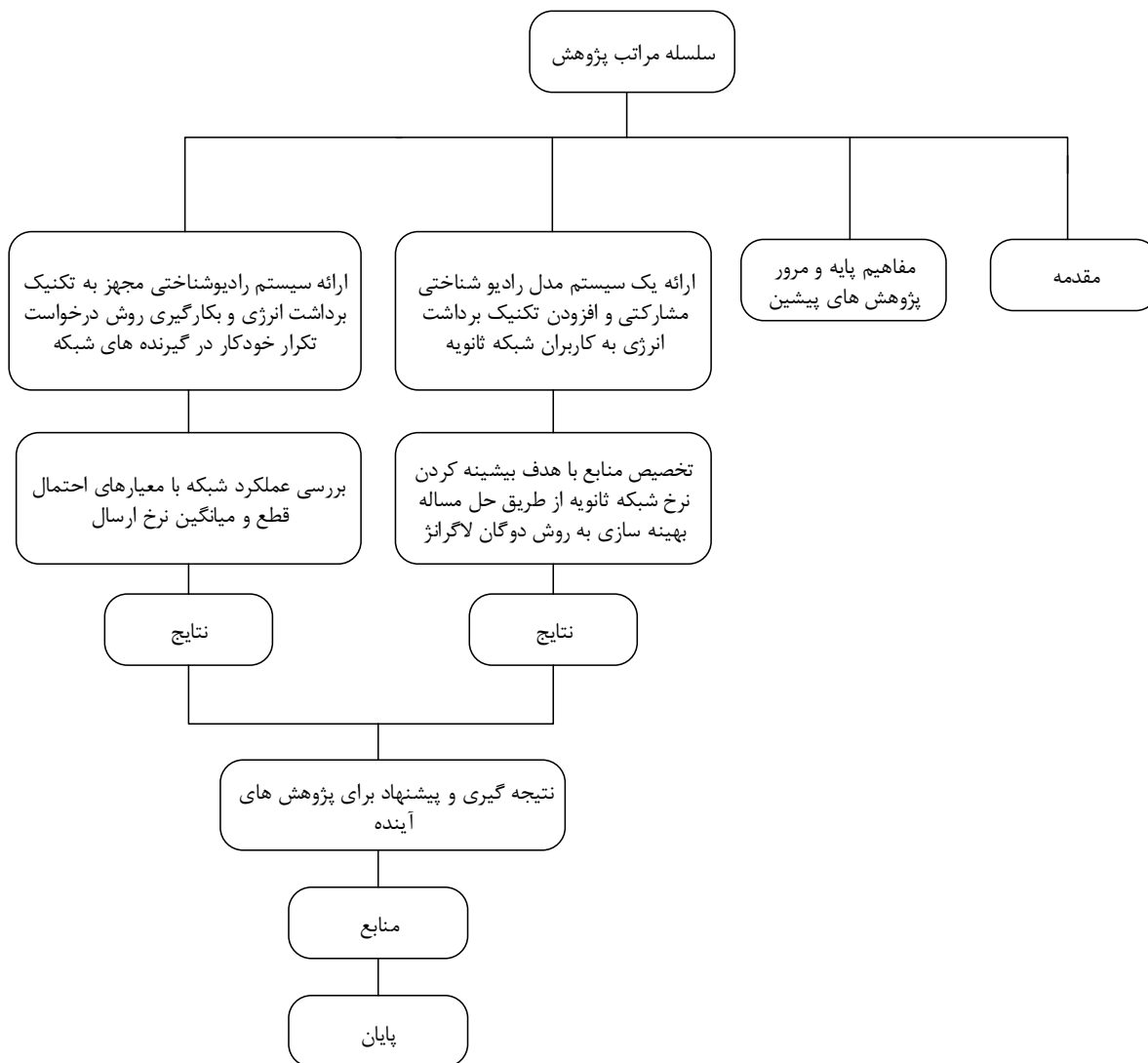
۳-۱ ساختار پایان نامه

فعالیت‌های انجام‌شده در این پایان‌نامه در پنج فصل تنظیم می‌شود. در فصل دوم پیش‌زمینه‌های مورد نیاز در مورد مفاهیم به‌کاررفته در این تحقیق بیان می‌شوند و در ادامه مروری بر پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه‌های مورد بحث و مسأله‌ی اصلی مورد مطالعه در این پایان‌نامه ارائه می‌شود. سپس ارتباط موضوع تحقیق با پژوهش‌های پیشین بیان می‌شود.

در فصل سوم به تخصیص منابع توان و طیف فرکانسی در شبکه رادیوشناختی می‌پردازیم. در این فصل ابتدا ساختار شبکه رادیوشناختی پیشنهادشده، مورد مطالعه قرار می‌گیرد و چگونگی برداشت انرژی توسط کاربران ثانویه از سیگنال‌های شبکه اولیه شرح داده می‌شود. سپس نرخ ارسال شبکه اولیه با همکاری کاربران ثانویه مشارکت‌کننده، انرژی برداشت‌شده توسط هر کاربر و نرخ ارسال شبکه ثانویه با توجه به زیرحامل‌هایی که انتقال پیام بر روی آن‌ها صورت می‌گیرد را محاسبه کرده‌ایم. سپس مسأله بهینه‌سازی را با هدف بیشینه کردن نرخ شبکه ثانویه، به شرط برآورده کردن نرخ شبکه اولیه و تمامی محدودیت‌های حاکم بر شبکه، فرمول‌بندی و به روش دوگان لاگرانژ حل کرده‌ایم. در نهایت عملکرد سیستم مطرح‌شده را با توجه به نتایج شبیه‌سازی ارزیابی می‌کنیم.

در فصل چهارم سیستم‌مدل رادیوشناختی جدیدی مطرح می‌شود که در آن علاوه بر برداشت انرژی توسط کاربر ثانویه، هر دو گیرنده اولیه و ثانویه به تکنیک درخواست تکرار خودکار تجهیز شده‌اند. پس از توضیح رویکرد شبکه، با فرض حداکثر تعداد مشخص M مرحله درخواست تکرار به ازای هر بسته اطلاعاتی، روابطی برای احتمال قطع شبکه اولیه و میانگین نرخ ارسال شبکه ثانویه به‌دست می‌آوریم. سپس بر اساس نتایج عددی که در انتهای این فصل آورده‌شده به مقایسه عملکرد شبکه در حالت‌های مختلف می‌پردازیم. در نهایت مسائل بررسی شده در این پایان‌نامه در فصل پنج جمع‌بندی شده و پیشنهادهایی برای ادامه

پژوهش‌های آینده ارائه می‌گردد. این سلسله مراتب به صورت نمودار بلوکی در شکل (۱-۱) به تصویر درآورده شده است.



شکل (۱-۱) نمودار بلوکی سلسله مراتب پژوهش

فصل ۲:

مغایم یاده و مرور پژوهش های پیشین

۲-۱ مقدمه

در این فصل ابتدا به مفهوم مخابرات مشارکتی^۱ به عنوان یکی از روش‌های چندگانگی^۲ ارسال برای مقابله با اثرات مخرب ناشی از محوشدگی^۳ در کانال‌های بی‌سیم، می‌پردازیم. در ادامه انواع فناوری‌های به اشتراک‌گذاری طیف^۴ در شبکه‌های رادیوشناختی را بیان می‌کنیم و مفاهیم به‌کارگیری مشارکت به شیوه‌های مختلف را در این شبکه‌ها مورد بررسی قرار می‌دهیم. سپس روش‌های برداشت انرژی و مدل‌های آن و محدودیت‌هایی که بر مسأله اعمال می‌کند را مورد مطالعه قرار می‌دهیم. در ادامه احتمال قطع در روش‌های مختلف درخواست تکرار خودکار را تحلیل می‌کنیم. در انتهای این فصل مروری بر پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه‌ی شبکه‌های رادیوشناختی، مخابرات مشارکتی، برداشت انرژی، درخواست تکرار خودکار در شبکه‌های مختلف و ترکیب آن‌ها با یکدیگر خواهیم داشت.

۲-۲ مخابرات مشارکتی

کانال‌های رادیویی به شدت در معرض محوشدگی قرار دارند و در طول ارسال یک بسته اطلاعاتی، قدرت سیگنال دریافتی کاربر دچار تغییرات زیادی می‌شود. از این‌رو برای ارسال با نرخ بالاتر و خطای کمتر می‌توان از روش چندگانگی ارسال استفاده شود تا با داشتن ارسال‌های مستقل از یکدیگر، خطاهای آن‌ها مستقل از یکدیگر گردد و گیرنده بتواند از این استقلال در جهت کدگشایی با خطای حداقل استفاده کند. از جمله روش‌های چندگانگی ارسال، استفاده از گره‌های دیگر در یک سیستم مخابراتی بی‌سیم برای کمک در ارسال داده‌ها است. این شیوه چندگانگی مشارکتی نامیده شده است. اساس چندگانگی مشارکتی بر

¹ Cooperative communication

² Diversity

³ Fading

⁴ Spectrum Sharing

پایه‌ی نظریه‌ی کانال رله^۱ بنا شده است. از طرح‌های معروف رله می‌توان رله تقویت-ارسال^۲ (AF) و رله کدگشایی-ارسال^۳ (DF) را نام برد. در طرح رله AF سیگنال پس از دریافت، تقویت می‌شود و سپس به سمت گیرنده ارسال خواهد شد. از این‌رو سیگنال دریافتی در مقصد را می‌توان به صورت زیر نوشت [۲۱]:

$$y_{rd} = G h_{rd} y_{sr} + n_{rd} \quad (۱-۲)$$

در این رابطه، y_{rd} و y_{sr} نشان‌دهنده سیگنال دریافتی در مقصد و رله است. h_{rd} و n_{rd} نیز ضریب کانال^۴ و نویز کانال بین رله و مقصد است. G بهره تقویت رله نامیده می‌شود و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$G = \sqrt{\frac{E_s}{E_s |h_{sr}|^2 + N_0}} \quad (۲-۲)$$

E_s متوسط انرژی هر سمبل و N_0 واریانس نویز اضافه‌شده به سیگنال در رله است.

در طرح رله DF، زمانی که رله بتواند سیگنال دریافتی از مقصد را به درستی کدگشایی کند، سیگنال را مجدداً کدگذاری کرده و به مقصد ارسال می‌کند و در غیر این صورت ارسالی انجام نمی‌دهد. کدگشایی در صورتی رخ می‌دهد که نسبت سیگنال به نویز دریافتی در رله، از یک مقدار آستانه که با توجه به نیاز شبکه مشخص می‌شود، بزرگ‌تر باشد.

۲-۳ فناوری‌های به اشتراک‌گذاری طیف در شبکه‌های رادیوشناختی

کاربران ثانویه در شبکه‌های رادیوشناختی با حفظ اولویت استفاده‌ی کاربران اولیه، مجاز به استفاده از باند فرکانسی هستند. چگونگی حفظ اولویت کاربران اولیه، راهکارهای دسترسی به طیف را در این باندها،

^۱ Relay Channel

^۲ Amplify and Forward

^۳ Decode and Forward

^۴ Channel Coefficient

مشخص می‌کند. این راهکارها به دو دسته‌ی کلی رهیافت زمینه‌ای^۱ و رهیافت روی هم‌گذاری^۲ تقسیم می‌شوند [۱] و [۵].

۲-۳-۱ رهیافت زمینه‌ای

در این روش، کاربران ثانویه نیاز به شناخت حفره‌های طیفی ندارند و به شرط آن که کیفیت سرویس شبکه اولیه مختل نشود، می‌توانند هم‌زمان با کاربران اولیه از طیف فرکانسی استفاده کنند. جهت حفظ ارسال کاربران اولیه، میزان کلی تداخل کاربران ثانویه در گیرنده‌های اولیه، محدود می‌شود. به عبارت دیگر کاربران ثانویه در صورتی قادر به استفاده از طیف هستند که چگالی توان سیگنال‌های ارسالی آن‌ها از بیشترین مقدار نویز قابل تحمل برای شبکه اولیه کمتر باشد [۱]، [۲]، [۵] و [۲۲]. به آستانه نویز قابل تحمل در گیرنده اولیه دمای تداخل^۳ گفته می‌شود [۱] و [۴]. این رهیافت در شکل (۲-۱). (آ) نشان داده شده است. در این نوع از سیستم‌ها از روش‌های گسترده‌سازی طیفی استفاده می‌گردد تا سیگنال ثانویه در حوزه فرکانس گسترده شود و برای کاربر اولیه به صورت نویز عمل نماید.

نکته قابل توجه در این روش آن است که به دلیل محدودیت‌های تداخلی، سیستم‌های با ارسال زمینه‌ای فقط مجاز به ارتباط با برد کوتاه می‌باشند. در واقع کاربران ثانویه اجازه ندارند با توان بالا ارسال کنند حتی اگر کل باند توسط اولیه استفاده نشود [۵]. برای رفع این مشکل عموماً در شبکه ثانویه از راهبردهای مشارکتی استفاده می‌شود تا از طریق ایستگاه‌های رله بتوان از تضعیف شدن توان و متعاقباً عدم دریافت صحیح پیام در گیرنده ثانویه جلوگیری کرد.

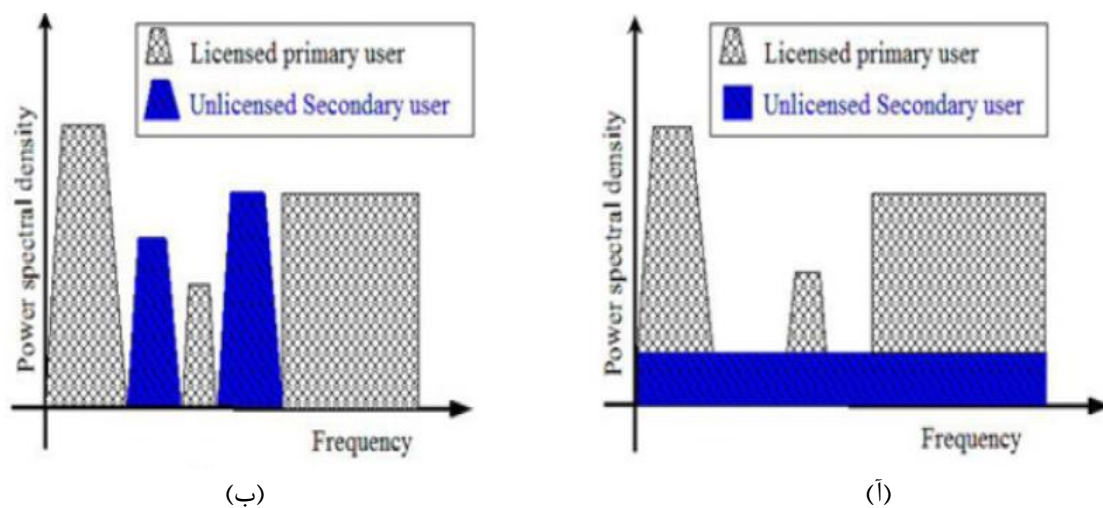
¹ Underlay

² Overlay

³ Interference Temperature

۲-۳-۲ رهیافت روی هم گذاری

در این روش، کاربر ثانویه زمانی مجاز به استفاده از باند فرکانسی است که کاربر اولیه از این باند استفاده نکند. در این حالت، کاربران ثانویه به صورت متناوب طیف را در باند فرکانسی مورد نظر بررسی کرده و اگر کاربران اولیه از آن طیف استفاده نکنند، به ارسال و دریافت اطلاعات ادامه می دهند. با تشخیص ورود یک کاربر اولیه به باند مورد نظر، کاربران ثانویه ارسال خود را متوقف می کنند [۱]، [۵] و [۲۳]. برخلاف رهیافت زمینه‌ای، کاربران ثانویه قادرند با استفاده از فرصت طیفی به دست آمده، اطلاعات را با توان بالا ارسال کنند تا نرخ ارسال شبکه ثانویه افزایش یابد. مزیت دیگر رهیافت روی هم گذاری این است که کاربران ثانویه می توانند علاوه بر مخابره اطلاعات در شبکه ثانویه به انتقال اطلاعات شبکه اولیه نیز کمک کنند. این رهیافت در شکل (۱-۲). (ب) نشان داده شده است [۵].



شکل (۱-۲) فناوری‌های به اشتراک گذاری طیف در شبکه‌های رادیوشناختی. (آ) رهیافت ارسال زمینه‌ای (ب) رهیافت روی هم گذاری [۵]

۲-۴ مشارکت در شبکه‌های رادیوشناختی

از مهم‌ترین چالش‌ها در شبکه‌های رادیوشناختی، شناخت یا تشخیص فعالیت کاربران اولیه و پس از آن چگونگی استفاده از فرصت ایجادشده برای ارسال بسته‌های اطلاعاتی کاربران ثانویه با استفاده از منابع کاربران اولیه می‌باشد. برای ارسال با نرخ بالاتر و مقابله با اثرات مخرب ناشی از محوشدگی، روش‌های مختلف مشارکت در شبکه‌های رادیوشناختی به کار گرفته می‌شوند [۲۴]. در ادامه سه راهبرد مشارکتی در این شبکه‌ها توضیح داده شده است.

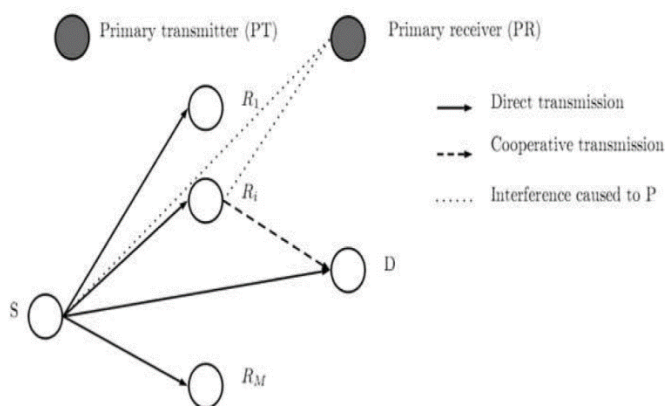
• شناخت مشارکتی توسط کاربران ثانویه

با استفاده از چندگانگی دریافت در شبکه ثانویه به صورت مؤثرتری می‌توان فعالیت یا عدم فعالیت کاربران اولیه را تشخیص داد. با توجه به این که کاربران ثانویه و اولیه در محیط پراکنده‌اند، برای سنجش کانال توسط یک کاربر ثانویه که از کاربر اولیه در فاصله دورتری قرار دارد زمان بیشتری لازم است. ایده‌ی سنجش مشارکتی کانال با هدف تبادل مشاهدات کاربران ثانویه، تشخیص قابل اعتمادتری از چگونگی فعالیت کاربران اولیه را فراهم می‌کند [۱] و [۲۵].

• ارسال مشارکتی بین کاربران ثانویه

کاربران ثانویه برای استفاده‌ی بهتر از فرصت به دست آمده می‌توانند با یکدیگر همکاری کنند؛ به عبارت دیگر نقش رله را برای دیگر کاربران ثانویه بازی کنند. برخی از این کاربران به تمام طیف موجود به دلیل نیاز ترافیکی کم خود، احتیاج ندارند. اگر از این گره‌ها به عنوان کمک‌کننده برای دیگر کاربران استفاده شود، از این طیف، مؤثرتر استفاده خواهد شد [۱] و [۲۶]. همان‌طور که در بخش ۲-۳-۱ بیان شد، در سیستم‌های با رهیافت زمینه‌ای معمولاً از این نوع مشارکت استفاده می‌شود. در شکل (۲-۲) یک شبکه

رادیوشناختی مشارکتی که شبکه اولیه آن شامل یک فرستنده و گیرنده و شبکه ثانویه نیز از یک فرستنده و گیرنده و M رله تشکیل شده است، نشان داده شده است [۲۶].



شکل (۲-۲) شبکه رادیوشناختی با وجود مشارکت در شبکه ثانویه [۲۶]

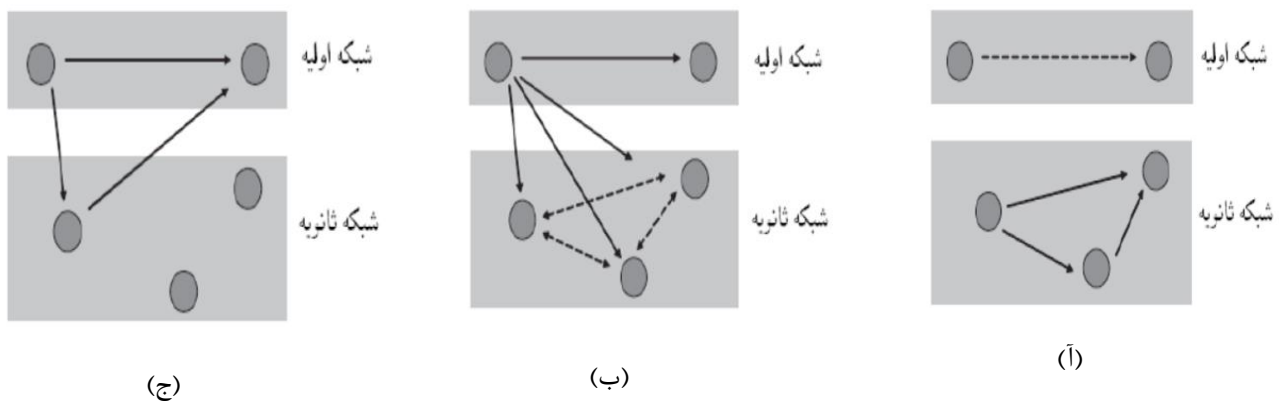
با فرض به کارگیری رهیافت زمینه‌ای در این سیستم، فقط به رله‌هایی اجازه مشارکت در شبکه ثانویه داده می‌شود که تداخل ایجادشده توسط آن‌ها بر روی گیرنده شبکه اولیه از آستانه T کمتر باشد. اگر فرض کنیم Ω زیرمجموعه‌ای از رله‌ها است که قادر به مشارکت برای ارسال سیگنال فرستنده به مقصد در شبکه ثانویه هستند، آنگاه باید رابطه (۳-۲) به ازای هر کدام از رله‌های مجموعه Ω ، صادق باشد.

$$I_{R_i P_R} = E_{R_i P_R} |h_{R_i P_R}|^2 < T \quad \forall i \in \Omega \quad (۳-۲)$$

در این رابطه $I_{R_i P_R}$ تداخل ایجادشده توسط رله R_i بر روی گیرنده شبکه اولیه، $E_{R_i P_R}$ میزان انرژی ارسالی توسط رله R_i به ازای هر سمبل و $h_{R_i P_R}$ ضریب کانال بین رله i ام و گیرنده شبکه اولیه است.

• رله شناختی^۱

کاربران ثانویه با رله کردن اطلاعات کاربران اولیه، کیفیت و نرخ ارسال آن‌ها را افزایش می‌دهند. به این صورت کاربران اولیه در مدت کمتری به طیف در اختیارشان نیاز خواهند داشت و برای شبکه ثانویه فرصت بیشتری برای استفاده از منابع شبکه اولیه فراهم می‌شود [۲۷]، [۲۸] و [۲۹]. در شکل (۲-۳) هر سه نوع مشارکت بیان شده در شبکه‌های رادیوشناختی به صورت شماتیک رسم شده است.



شکل (۲-۳) مخابرات مشارکتی در شبکه‌های رادیوشناختی. (آ) سنجش مشارکتی کانال (ب) ارسال مشارکتی در شبکه ثانویه (ج) رله شناختی

در سیستم‌های مطرح‌شده در فصل‌های بعدی، کاربران ثانویه ابتدا با اجازه طیف شبکه اولیه و در نقش رله شناختی، به رله کردن اطلاعات اولیه می‌پردازند و بعد از برآورده کردن نیاز شبکه اولیه با به‌کارگیری رهیافت روی‌هم‌گذاری به فعالیت در شبکه ثانویه اقدام می‌کنند.

¹ Cognitive Relay

۲-۵ منابع و مدل سازی برداشت انرژی در سیستم‌های مخابراتی

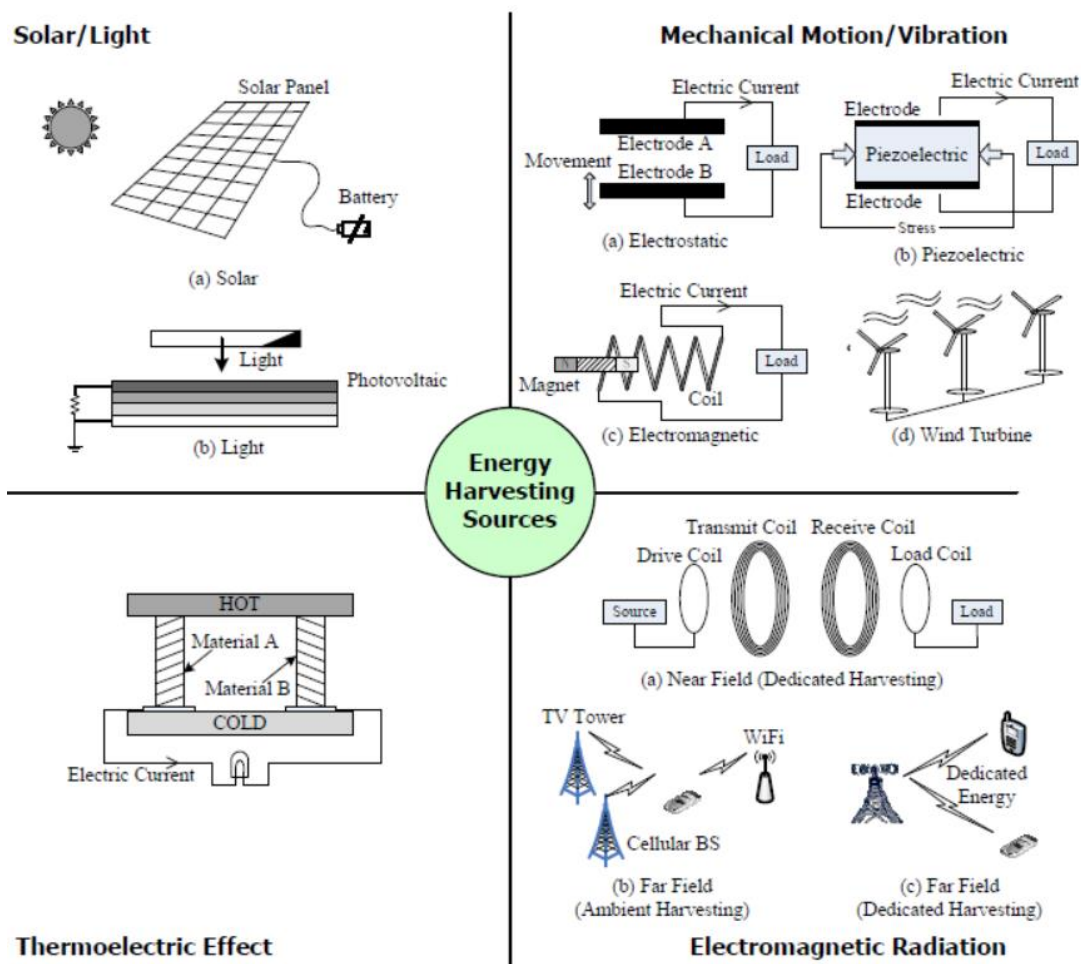
همان‌طور که در شکل (۲-۴) نشان داده شده است، منابع برداشت انرژی در سیستم‌های مخابراتی عموماً به چهار دسته‌ی خورشیدی یا نور، گرما، حرکت مکانیکی و امواج الکترومغناطیسی تقسیم می‌شوند [۹]. در راستای طراحی زمان‌بندی انرژی و محاسبه عملکرد مخابرات بی‌سیم برای انرژی‌ای که وارد سیستم می‌شود، مدل‌هایی در نظر گرفته می‌شود. از مهم‌ترین مدل‌های انرژی برداشت‌شده می‌توان سه گروه مدل-های تعینی^۱، مدل‌های تصادفی^۲ و مدل انتشار سیگنال RF را نام برد. در مدل تعینی، اطلاعات آنی دریافت انرژی به‌طور کامل در فرستنده معلوم است. اگر فرض کنیم اطلاعات حالت انرژی^۳ (ESI) غیر علی^۴، به‌طور صحیح قابل به‌دست آوردن است، آنگاه مدل‌های تعینی برای توصیف روش‌های بهینه برنامه‌ریزی انرژی مفید خواهند بود. در مدل‌های برداشت انرژی تصادفی، فرایندهای تکراری به‌صورت فرایندهای تصادفی در نظر گرفته می‌شود. یکی از فواید اصلی این روش عدم نیاز به اطلاعات غیر علی انرژی است. بنابراین برای کاربردهایی که در آن‌ها اطلاعات حالت انرژی غیر قابل پیش‌بینی است، مناسب است. اشکال این مدل این است که همواره عدم تطابق مدل‌سازی رخ می‌دهد چون درک رفتار تصادفی منابع انرژی به‌صورت کاملاً صحیح، ممکن نیست. این مدل خود به دو دسته تقسیم می‌شود. (۱) فرایندهای تصادفی که وابستگی به زمان ندارند. از روش‌های مدل‌سازی این دسته می‌توان به مدل کردن انرژی برداشتی با توزیع برنولی، یکنواخت، پواسن و نمایی اشاره کرد. (۲) فرایندهای تصادفی که وابستگی به زمان دارند. در این دسته می‌توان به مدل‌سازی به روش زنجیره‌ی مارکوف مرتبه‌ی اول و زنجیره‌ی مارکوف دو حالتی اشاره کرد [۹]. در ادامه مدل برداشت انرژی از سیگنال RF را توضیح می‌دهیم.

¹ Deterministic Models

² Stochastic Models

³ Energy State Information

⁴ Non Causal



شکل (۲-۴) منابع برداشت انرژی [۹]

برداشت انرژی از طریق سیگنال RF

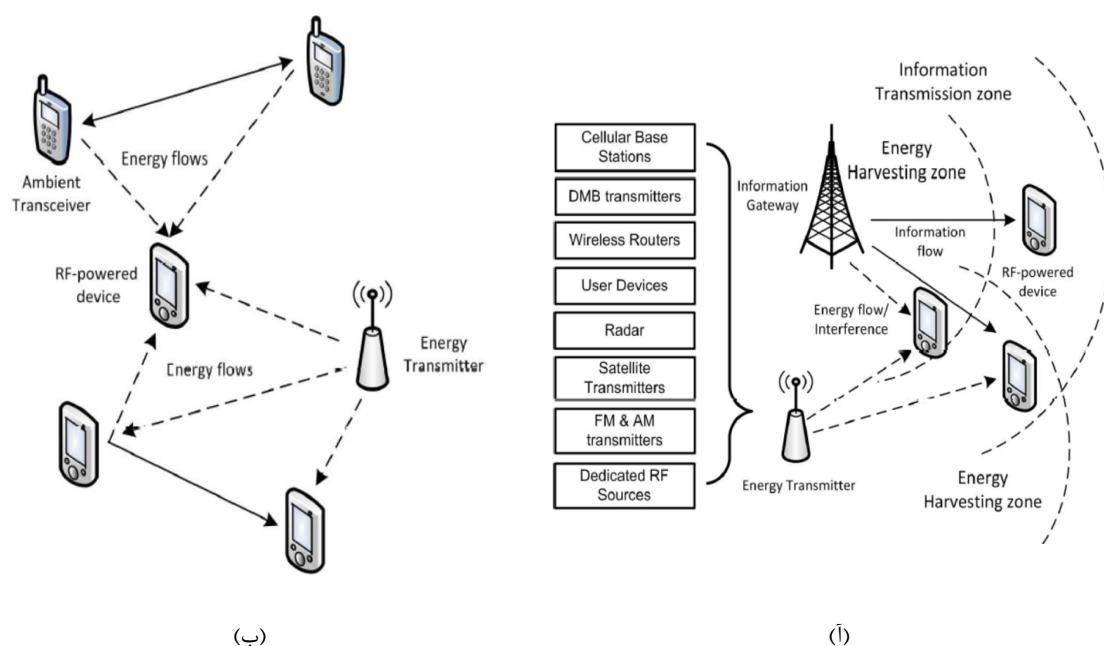
معماری شبکه متمرکز برداشت انرژی RF، همان‌طور که در شکل (۲-۵). (آ) نشان داده شده است، دارای سه جزء اصلی دروازه اطلاعات^۱، منابع انرژی RF و دستگاه‌ها یا گره‌های شبکه^۲ است [۱۰]. دروازه اطلاعات به‌طور کلی به‌عنوان ایستگاه‌های پایه، روترهای بی‌سیم^۳ و رله‌ها شناخته شده است و دارای یک منطقه برداشت انرژی و یک منطقه ارسال اطلاعات است که در شکل با کمان‌های نقطه‌چین نشان داده

¹ Information Gateway

² Network Nodes

³ Wireless Routers

شده است. خطوط پرننگ نمایانگر جریان اطلاعات و خطوط نقطه‌چین جریان انرژی را نشان می‌دهند. دستگاه‌ها در منطقه برداشت انرژی قادر به برداشت انرژی از دروازه اطلاعات هستند و دستگاه‌هایی که در منطقه ارسال اطلاعات هستند، می‌توانند اطلاعات ارسالی دروازه اطلاعات را به‌درستی کدگشایی کنند. منابع انرژی RF می‌توانند به‌صورت فرستنده اختصاصی انرژی RF و یا منابع RF محیط باشند. گره‌های شبکه نیز تجهیزات کاربران هستند که با دروازه اطلاعات ارتباط برقرار می‌کنند.



شکل (۵-۲) معماری کلی شبکه برداشت انرژی RF (آ) شبکه متمرکز برداشت انرژی (ب) شبکه غیرمتمرکز برداشت انرژی [۱۰]

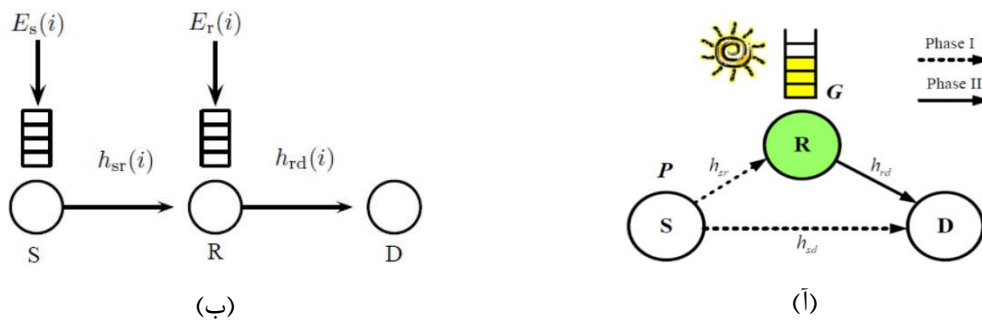
عموماً دروازه اطلاعات و منابع انرژی RF دارای منابع پیوسته و ثابت برق هستند در حالی که گره‌های شبکه از منابع RF انرژی برداشت می‌کنند تا قادر به انجام فعالیت در شبکه باشند. در بعضی مواقع دروازه اطلاعات و منابع انرژی RF می‌توانند یکی باشند و برداشت انرژی در فرکانس مشابه فرکانس انتقال اطلاعات

صورت بگیرد. به این روش برداشت انرژی RF درون محدوده‌ای^۱ گفته می‌شود. از آنجایی که سیگنال‌های RF می‌توانند انرژی و اطلاعات را همزمان حمل کنند، از لحاظ نظری برداشت انرژی و دریافت اطلاعات می‌تواند از همان سیگنال ورودی RF باشد. این مفهوم به انتقال همزمان اطلاعات و توان^۲ (SWIP) اشاره دارد و به گیرنده اطلاعات و برداشت‌کننده انرژی این اجازه را می‌دهد که برای دریافت سیگنال به جای استفاده از دو آنتن مجزا، از یک آنتن به صورت مشترک استفاده کنند. معماری شبکه غیرمتمرکز برداشت انرژی RF نیز، که در شکل (۲-۵). (ب) نشان داده شده، مشابه شبکه متمرکز است با این تفاوت که گره‌های شبکه به طور مستقیم با یکدیگر ارتباط برقرار می‌کنند [۱۰].

۲-۶ برداشت انرژی در کانال رله و محدودیت‌های آن

۲-۶-۱ برداشت انرژی در کانال رله با استفاده از منابع تجدیدپذیر

در سیستم‌های مشارکتی، منبع یا رله و یا هر دو می‌توانند از محیط انرژی برداشت کنند. این مفهوم در شکل (۲-۶) به تصویر کشیده شده است. در قسمت (آ) برداشت انرژی توسط رله و در (ب) برداشت انرژی به طور همزمان توسط منبع و رله نشان داده شده است.



شکل (۲-۶) برداشت انرژی از منابع تجدیدپذیر در کانال مشارکتی. (آ) برداشت انرژی توسط رله در کانال مشارکتی [۱۱] (ب) برداشت انرژی توسط منبع و رله در کانال مشارکتی [۱۲]

¹ In-band RF Energy Harvesting

² Simultaneous Wireless Information and Power Transfer

در شکل (۶-۲). (آ)، ارسال سیگنال شامل دو فاز است. در فاز اول که با خطوط نقطه‌چین نشان داده شده است، منبع اطلاعات را به مقصد ارسال می‌کند. در این فاز، اطلاعات توسط رله هم دریافت می‌شود. اگر رله قادر به کدگشایی پیام دریافتی باشد، در فاز دوم پیام را کدگذاری می‌کند و با مصرف انرژی برداشتی از محیط، پیام را به مقصد ارسال می‌کند. سیگنال دریافتی در مقصد شامل ترکیب سیگنال‌های دریافتی از دو فاز است [۱۱].

در شکل (۶-۲). (ب)، زمان ارسال پیام از دو بخش تشکیل شده؛ در بخش اول منبع با مصرف انرژی برداشت‌شده از محیط، سیگنال پیام را به رله می‌فرستد و در بخش دوم، رله AF با مصرف انرژی برداشتی از محیط، پیام دریافتی را تقویت و به مقصد ارسال می‌کند. اگر فرض کنیم تعداد بلوک‌های ارسال N باشد و انرژی برداشت‌شده در منبع و رله در ابتدای ارسال بسته i ام به ترتیب برابر $E_s(i)$ و $E_r(i)$ باشد و زمان ارسال پیام از فرستنده به رله و از رله به مقصد باهم برابر و معادل T باشد، آنگاه برای مصرف توان در فرستنده و رله که با $p_s(i)$ و $p_r(i)$ نشان داده شده‌اند، محدودیت‌های زیر وجود دارد [۱۲]:

$$\sum_{i=1}^k p_s(i) \leq \frac{1}{T} \sum_{i=1}^k E_s(i) \quad \text{for } k=1, \dots, N \quad (۴-۲)$$

$$\sum_{i=1}^k p_r(i) \leq \frac{1}{T} \sum_{i=1}^k E_r(i) \quad \text{for } k=1, \dots, N \quad (۵-۲)$$

دو رابطه بالا محدودیت علی بودن مصرف انرژی^۱ را بیان می‌کنند. به عبارتی این روابط بیان می‌کنند که مجموع توان‌های مصرف‌شده در انتهای هر مرحله باید از کل توان برداشت‌شده تا آن مرحله، کمتر باشد. از آنجا که منبع و رله دارای ظرفیت محدودی برای ذخیره انرژی برداشتی از محیط هستند، میزان انرژی ذخیره‌شده در منبع و رله در ابتدای ارسال i ام از روابط زیر پیروی می‌کند.

^۱ Energy Consumption Causality

$$B_s(i) = \min \{ B_s(i-1) - T p_s(i-1) + E_s(i), B_s^{\max} \} \quad (6-2)$$

$$B_r(i) = \min \{ B_r(i-1) - T p_r(i-1) + E_r(i), B_r^{\max} \} \quad (7-2)$$

به ترتیب بیشترین ظرفیت برای ذخیره انرژی در منبع و رله را نشان می‌دهند. بنابراین اگر در ابتدای هر مرحله از برداشت انرژی، فضای کافی برای ذخیره انرژی جدید نباشد، انرژی برداشت شده، تلف می‌شود. برای جلوگیری از سرریز شدن انرژی در منبع و رله، دو شرط زیر باید برقرار باشد:

$$\sum_{i=1}^{k+1} E_s(i) - T \sum_{i=1}^k p_s(i) \leq B_s^{\max} \quad \text{for } k = 1, \dots, N-1 \quad (8-2)$$

$$\sum_{i=1}^{k+1} E_r(i) - T \sum_{i=1}^k p_r(i) \leq B_r^{\max} \quad \text{for } k = 1, \dots, N-1 \quad (9-2)$$

۲-۶-۲ برداشت انرژی از سیگنال RF در کانال رله

در کانال‌های رله بر اساس ساختار گیرنده رله، دو راهبرد پرش زمانی^۱ و تقسیم توان^۲ برای برداشت انرژی از سیگنال RF وجود دارد که رله را قادر به برداشت انرژی و پردازش اطلاعات می‌کند [۱۳]. در روش پرش زمانی، رله در یک بازه زمانی از سیگنال دریافتی فقط انرژی برداشت می‌کند و در بازه زمانی دیگر از سیگنال برای پردازش اطلاعات استفاده می‌کند. سپس رله با مصرف انرژی برداشت شده اطلاعات را به گیرنده ارسال می‌کند. اگر زمان ارسال یک بسته اطلاعات از منبع به مقصد برابر T در نظر گرفته شود، α ضریبی از زمان ارسال بسته است که در آن رله از سیگنال دریافتی از منبع، انرژی برداشت می‌کند و $0 < \alpha < 1$ است. باقی زمان ارسال بسته یعنی $(1-\alpha)T$ ، به ارسال سیگنال اختصاص داده می‌شود که نیمی از آن برای ارسال از منبع به رله و نیم دیگر آن برای ارسال از رله به مقصد استفاده می‌شود.

¹ Time Switching

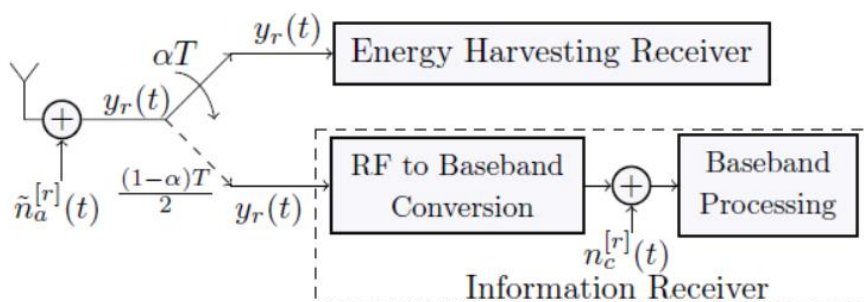
² Power Splitting

در شکل (۷-۲) بلوک دیاگرام گیرنده رله در این روش نشان داده شده است. سیگنالی که وارد گیرنده

رله می‌شود برابر است با:

$$y_r(t) = \frac{1}{\sqrt{d_1^m}} \sqrt{p_s} h s(t) + n_a^{[r]}(t) \quad (۱۰-۲)$$

در این رابطه h ضریب کانال بین منبع و رله، d_1 فاصله منبع تا رله، p_s توان ارسالی منبع، m نمای اتلاف مسیر^۱ و $n_a^{[r]}(t)$ نویز گوسی اضافه شده به پیام در آنتن رله است.



شکل (۷-۲) بلوک دیاگرام گیرنده رله در روش پرش زمانی [۱۳]

این سیگنال ابتدا برای مدت‌زمان αT وارد بخش برداشت‌کننده انرژی در گیرنده رله می‌شود. سپس

برای مدت‌زمان $\frac{(1-\alpha)T}{2}$ وارد بخش پردازش اطلاعات می‌شود. با استفاده از رابطه (۱۰-۲)، انرژی

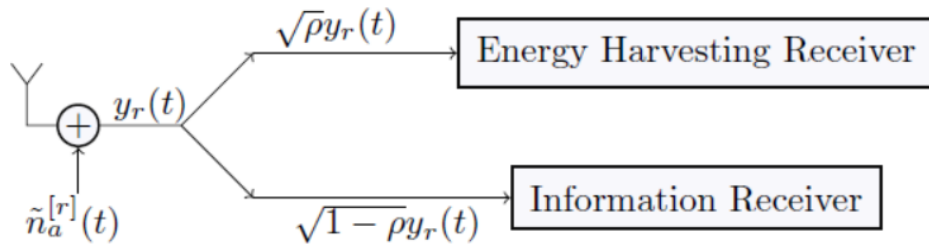
برداشت‌شده در طول زمان αT از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۳]:

$$E_h = \frac{\eta p_s h^2}{d_1^m} \alpha T \quad (۱۱-۲)$$

در این رابطه $0 < \eta < 1$ راندمان برداشت انرژی است که به مدار برداشت‌کننده انرژی در رله بستگی دارد.

¹ Path Loss Exponent

در روش تقسیم توان، اگر P توان سیگنال دریافتی در رله و T زمان کل ارسال بسته در نظر گرفته شده باشد، در طول نیمه اول زمان ارسال، نسبتی از توان سیگنال ρP برای برداشت انرژی استفاده می‌شود و باقی توان $(1-\rho)P$ برای ارسال اطلاعات از منبع به رله مصرف می‌شود.



شکل (۸-۲) بلوک دیاگرام گیرنده رله در روش تقسیم توان [۱۳]

در شکل (۸-۲) بلوک دیاگرام گیرنده رله در روش تقسیم توان نشان داده شده است. تقسیم‌کننده توان، توان سیگنال دریافتی را با نسبت ρ تقسیم می‌کند. اگر فرض کنیم سیگنال دریافتی در رله $y_r(t)$ باشد، این تقسیم منجر به ورود $\sqrt{\rho} y_r(t)$ به بخش برداشت انرژی و $\sqrt{1-\rho} y_r(t)$ به بخش گیرنده اطلاعات می‌شود. سیگنال دریافتی در بخش برداشت‌کننده انرژی از رابطه زیر پیروی می‌کند [۱۳].

$$\sqrt{\rho} y_r(t) = \frac{1}{\sqrt{d_1^m}} \sqrt{\rho p_s} h s(t) + \sqrt{\rho} n_a^{[r]}(t) \quad (۱۲-۲)$$

با توجه به سیگنال دریافتی، انرژی برداشت‌شده در رله از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$E_h = \frac{\eta \rho p_s h^2}{d_1^m} \left(\frac{T}{2} \right) \quad (۱۳-۲)$$

در سیستم‌های رادیوشناختی مطرح‌شده در دو فصل بعدی، کاربران ثانویه به روش برداشت انرژی از سیگنال RF شبکه اولیه، توان مورد نیاز برای فعالیت در شبکه را تأمین می‌کنند. در سیستم مدل فصل چهار کاربر ثانویه به روش تقسیم توان، بخشی از توان پیام را برداشت و باقی را صرف کدگذاری پیام می‌کند.

۷-۲ تحلیل احتمال عدم کدگشایی پیام در روش‌های مختلف کنترل خطا

در روش درخواست تکرار خودکار در هر بار ارسال، فرستنده خود پیام را مجدد ارسال می‌کند. در انتهای هر مرحله، گیرنده بر اساس اطلاعات متقابل دریافتی، پیام را کدگشایی می‌کند. اگر فرستنده در هر بار ارسال با نسبت سیگنال به نویز ρ_i و با نرخ ثابت R به ارسال پیام مبادرت ورزد، اطلاعات متقابل در هر بار ارسال در روش درخواست تکرار خودکار برابر است با:

$$I_{SD,i} = \log_2(1 + \rho_i g_i) \quad (۱۴-۲)$$

g_i گین کانال بین فرستنده و گیرنده در ارسال i ام است. احتمال عدم کدگشایی پیام در هر مرحله ارسال به روش درخواست تکرار خودکار به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۴]:

$$P_{out}(i) = P_r(I_{SD,i} < R) \quad (۱۵-۲)$$

چندگانگی زمانی^۱ (TD) ایجادشده از طریق ارسال مجدد، منجر به کاهش احتمال خطا خواهد شد. با فرض مستقل بودن گین کانال در هر مرحله، احتمال خطا در هر مرحله مستقل از مرحله دیگر می‌شود. بنابراین احتمال عدم کدگشایی پیام بعد از m بار ارسال برابر است با:

$$P_{out}(m) = P_r(I_{SD,1} < R) \times P_r(I_{SD,2} < R) \times \dots \times P_r(I_{SD,m} < R) \quad (۱۶-۲)$$

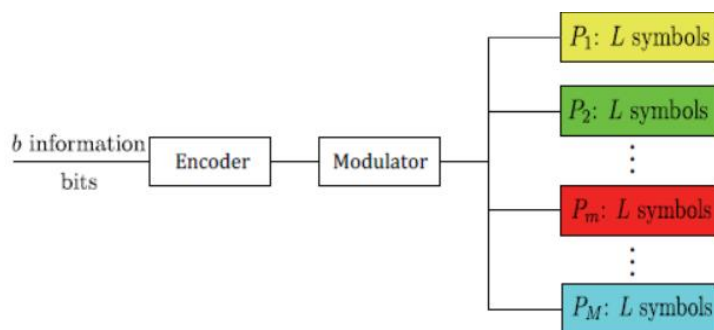
درخواست تکرار خودکار ترکیبی خود به دو گروه درخواست تکرار خودکار ترکیبی با افزونگی افزایشی^۲ (IR-HARQ) و درخواست تکرار خودکار ترکیبی با ترکیب کد^۳ (CC-HARQ) تقسیم می‌شود [۱۷-۱۹]. در روش درخواست تکرار خودکار ترکیبی با افزونگی افزایشی همان‌طور که در شکل (۹-۲) نشان داده شده است، b بیت اطلاعات به $M \times L$ سمبل با استفاده از یک کدکننده با نرخ $\frac{b}{M \times L}$ کدگذاری می‌شود. $M \times L$ سمبل به M دنباله‌ی L

¹ Time Diversity

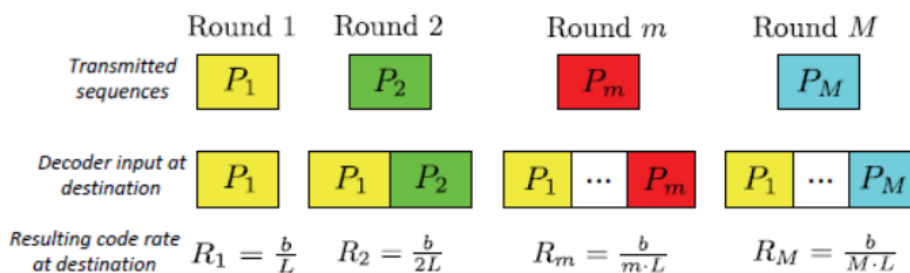
² Incremental Redundancy Hybrid Automatic Repeat Request

³ Code Combining Hybrid Automatic Repeat Request

سمبلی تقسیم می‌شوند. m امین دنباله اطلاعات را با P_m نشان می‌دهیم. در مرحله اول P_1 توسط فرستنده ارسال می‌شود و در گیرنده کدگشایی بر اساس P_1 انجام می‌شود. در صورت عدم کدگشایی صحیح، یک پیام بازخورد NACK به منزله ارسال دنباله P_2 به فرستنده ارسال می‌شود. در مرحله دوم گیرنده دنباله‌های P_1 و P_2 را با هم ترکیب کرده و تلاش می‌کند پیام را کدگشایی کند. همان‌طور که در شکل نشان داده شده در این مرحله نرخ کد در مقصد $\frac{b}{2 \times L}$ خواهد شد. به همین ترتیب نرخ کد در مرحله m ام معادل $\frac{b}{m \times L}$ می‌شود. با افزایش m احتمال کدگشایی موفق در گیرنده زیاد و نرخ ارسال کم خواهد شد [۱۹].



(آ)



(ب)

شکل (۲-۹) طرح IR-HARQ. (آ) کد کردن b بیت اطلاعات به $M \times L$ سمبل. (ب) ارسال افزایشی در M مرحله [۱۹]

از آنجا که پس از m مرحله ارسال مجدد، m دنباله متفاوت ارسال می‌شود، اطلاعات متقابل دریافتی در مقصد معادل جمع اطلاعات متقابل در هر مرحله است. در نتیجه می‌توان نوشت:

$$I_{\text{Tot},m}^{\text{IR}} = \sum_{i=1}^m I_{\text{SD},i} = \sum_{i=1}^m \log_2(1 + \rho_i g_i) \quad (17-2)$$

در روش درخواست تکرار خودکار ترکیبی با ترکیب کد، فرستنده b بیت اطلاعات را فقط در یک دنباله L سمبلی کدگذاری می‌کند و در هر بار ارسال همان دنباله را ارسال می‌کند [۱۹]. در واقع این روش حالت خاصی از روش قبلی است زمانی که داشته باشیم: $P_1 = P_2 = \dots = P_m$. اطلاعات متقابل در این روش پس از m مرحله ارسال به صورت زیر است:

$$I_{\text{Tot},m}^{\text{CC}} = \log_2\left(1 + \sum_{i=1}^m \rho_i g_i\right) \quad (18-2)$$

احتمال عدم کدگشایی پیام بعد از m بار ارسال در روش درخواست تکرار خودکار ترکیبی نیز برابر است با احتمال اینکه اطلاعات متقابل دریافتی در گیرنده از نرخ ارسال R کمتر باشد [۱۹] و [۲۰]. به طور کلی روش درخواست تکرار خودکار ترکیبی در کانال‌های ضعیف، بهتر عمل می‌کند در حالی که بیت‌های اضافی هنگامی که شرایط کانال خوب است، یک هزینه‌ی اضافی محسوب می‌شود.

۲-۸ مروری بر پژوهش‌های پیشین

در این بخش به مرور پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه‌ی شبکه‌های رادیوشناختی، برداشت انرژی و روش‌های کنترل خطا و تلفیق این موضوعات با یکدیگر پرداخته می‌شود و مسیر حرکت کارهای پژوهشی و اهداف آن‌ها بررسی می‌شود تا بتوان به‌وسیله‌ی آن‌ها، اهداف مورد نظر در این پایان‌نامه را تعریف نمود.

▪ پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه‌ی شبکه‌های رادیوشناختی

در [۵-۱۱] مروری بر شبکه‌های رادیوشناختی و ویژگی‌های جدید و چالش‌های پژوهش در این شبکه‌ها ارائه شده است. همچنین شیوه‌های مدیریت طیف، جابه‌جایی و اشتراک طیف به‌طور جامع توضیح داده شده است. در [۷] یک کاربر اولیه در حضور یک مداخله‌گر^۱ در حال ارسال اطلاعات است. یک کاربر ثانویه نیز در همان باند فرکانسی از طریق به‌کارگیری مکانیزم اجاره طیف فعال است. کاربر ثانویه ابتدا تداخل را کدگشایی کرده و آن را به گیرنده اولیه می‌فرستد تا از این طریق تداخل دریافتی در گیرنده را کاهش دهد. این فرم از اجاره طیف با مدل‌های قبلی که در آن کاربر ثانویه خود پیام را به گیرنده اولیه ارسال می‌کرد نه اطلاعات تداخلی را، متفاوت است. سپس احتمال مخابره اطلاعات شبکه ثانویه توسط کاربر ثانویه پس از کاهش تداخل شبکه اولیه را بررسی می‌کند. از جمله پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه‌ی مدیریت منابع در شبکه‌های رادیوشناختی می‌توان به [۳۰] اشاره کرد. در این مقاله یک شبکه رادیوشناختی دارای فرستنده و گیرنده‌های ثانویه مجهز به چندین آنتن، با همزیستی^۲ شبکه اولیه مطرح شده است و کاربران از اشتراک طیفی به‌صورت ارسال زمینه‌ای بهره می‌گیرند. کل تداخل ناشی از شبکه‌ی ثانویه بر روی گیرنده‌ی اولیه در حدی در نظر گرفته می‌شود که مخابره‌ی قابل اعتمادی برای کاربر اولیه فراهم شود. سپس منابع در جهت بیشینه کردن مجموع نرخ کاربران ثانویه با توجه به شرط تداخل اختصاص شده است.

¹ Interfierer

² Co-existence

در شبکه رادیوشناختی با رویکرد دسترسی طیفی روی هم‌گذاری مطرح شده در [۳۱]، کاربر ثانویه با کمک گرفتن از مجموعه‌ی رله‌های درون شبکه ثانویه، پیام را به گیرنده‌اش ارسال می‌کند. انتخاب رله برای مشارکت با کاربر ثانویه به دو روش انتخاب بهترین رله^۱ (BRS) و انتخاب رله بیشترین-بیشترین^۲ (MMRS) صورت گرفته است. در روش انتخاب بهترین رله، رله‌ای که بهترین شرایط ابتدا انتها را دارد برای همکاری با کاربر ثانویه انتخاب می‌شود. در این روش ممکن است رله انتخابی بهترین شرایط کانال از کاربر به رله و از رله به گیرنده را به‌طور هم‌زمان نداشته باشد. برای رفع این مشکل با استفاده از روش انتخاب رله بیشترین-بیشترین، در هر مسیر بهترین رله برای مشارکت انتخاب می‌شود. احتمال قطع شبکه برای دو روش محاسبه شده و برتری روش دوم انتخاب رله اثبات شده است. در [۳۲] تخصیص منابع در شبکه رادیوشناختی با ارسال زمینه‌ای به کمک یک رله در شبکه ثانویه بررسی شده است. هر دو شبکه اولیه و ثانویه با طرح مدولاسیون تقسیم فرکانس عمود بر هم، ارسال اطلاعات می‌کنند. برخلاف روش‌های قبلی، در این حالت رله قادر است زیرحامل‌های متفاوتی در هر مسیر انتخاب کند. هدف پیشینه کردن بهره عملیاتی با توجه به محدودیت‌های توان کاربر ثانویه و رله و تداخل ناشی از این دو گره بر گیرنده اولیه است. در [۳۳] یک مخابره‌ی امن مشارکتی در شبکه رادیوشناختی پیشنهاد شده است. فرض شده مجموعه‌ای از کاربران شنودگر^۳، مشغول شنود اطلاعات ارسالی شبکه اولیه و ثانویه هستند. کاربران ثانویه با اجاره طیف شبکه اولیه به مشارکت با آن پرداخته و نرخ امن شبکه‌ی اولیه را افزایش می‌دهند. پس از تأمین کیفیت سرویس شبکه اولیه، کاربران ثانویه از طیف در دسترس برای ارسال امن در شبکه ثانویه استفاده می‌کنند. طرح پیشنهادی برای پیشینه کردن نرخ امن شبکه ثانویه به‌صورت مسأله‌ی بهینه‌سازی فرمول‌بندی شده و با استفاده از روش دوگان لاگرانژ حل شده است.

¹ Best Relay Selection

² Max-Max Relay Selection

³ Eavesdrop

▪ پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه‌ی برداشت انرژی

در سال‌های اخیر افزایش طول عمر شبکه‌های بی‌سیم از طریق برداشت انرژی، توجه قابل ملاحظه‌ای را به خود جلب کرده است. از جمله پژوهش‌های انجام‌شده، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

در [۹] مرور جامعی بر مخابره متکی بر برداشت انرژی در شبکه‌های مختلف ارائه شده است. منابع مختلف برداشت انرژی، روش‌های مدل‌سازی آن‌ها و مفاهیم پایه در رابطه با روش‌های برنامه‌ریزی استفاده مؤثرتر از انرژی با توجه به اهداف مسأله به‌طور مفصل توضیح داده شده است. در [۱۰] شبکه‌های برداشت انرژی به روش RF با تمرکز بر معماری شبکه و گره برداشت‌کننده انرژی، تکنیک‌های پیاده‌سازی و کاربردهای موجود، مطالعه گردیده است. سپس با مروری بر پیش‌زمینه طراحی مدارات و پیاده‌سازی آن‌ها، مسائل طراحی در زمینه‌ی تخصیص منابع در این شبکه‌ها و روش‌های جدید حل آن‌ها بحث شده است. در [۳۴] و [۳۵]، تخصیص منابع برای مخابرات امن^۱ و بازدهی بالا با ارسال هم‌زمان انرژی و پیام در یک سیستم چندکاربره مورد بررسی قرار گرفته است. کاربران این شبکه دارای گیرنده‌های تقسیم توان هستند که قادرند نسبتی از توان سیگنال دریافتی را به برداشت انرژی و بخش دیگر را به پردازش اطلاعات دریافتی اختصاص بدهند. برای تضمین ارسال امن در شبکه مطرح‌شده در [۳۴]، نویز مصنوعی همراه با سیگنال پیام ارسال می‌شود. هدف کمینه کردن توان ارسالی کل با بهینه کردن هم‌زمان توان ارسالی و نسبت تقسیم توان در گیرنده‌ها و کوواریانس^۲ نویز مصنوعی است.

بهره‌ی عملیاتی شبکه‌ی مشارکتی معرفی شده در [۱۲] با فرستنده و رله مجهز به تکنیک برداشت انرژی، بیشینه شده است. ابتدا تخصیص توان در فرستنده و رله با فرض تعینی بودن انرژی برداشتی در هر مرحله

¹ Secure Communication

² Covariance

از ارسال و آگاهی از حالت کانال محو شونده^۱، صورت گرفته است و روش جدیدی برای حل مسأله بهینه-سازی غیر محدب پیشنهاد شده است. سپس فرض شده اطلاعات حالت انرژی و کانال فقط به صورت علی معلوم است و از میزان انرژی و حالت کانال در مراحل بعدی ارسال آگاهی نداریم. در این حالت با تبدیل مسأله بهینه‌سازی به فرایند تصمیم‌گیری مارکوف^۲ (MDP)، توان‌ها در فرستنده و رله تخصیص داده شده است. در [۳۶] یک شبکه‌ی مشارکتی با رله AF و دارای انرژی محدود، با دو روش پرش زمانی و تقسیم توان، از سیگنال RF دریافتی انرژی برداشت می‌کند. با تحلیل احتمال قطع و ظرفیت، بهره‌ی عملیاتی این سیستم بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد پارامترهای متنوع سیستم از قبیل زمان برداشت انرژی، نسبت تقسیم توان برداشتی، نرخ ارسال فرستنده و فاصله‌ی فرستنده تا رله در عملکرد سیستم تأثیرگذار است. برداشت انرژی و به اشتراک گذاشتن آن با گره‌های دیگر شبکه در [۳۷] مورد مطالعه قرار گرفته است. در مدل پیشنهادی، یک شبکه رله گوسی دومسیره^۳ با چند منبع ارسال اطلاعات در نظر گرفته شده است. رله و تمامی منابع ارسال از منابع تجدیدپذیر محیط انرژی برداشت می‌کنند و در صورت نیاز، انرژی از منابع به رله و یا بالعکس به اشتراک گذاشته می‌شود. هدف از این پژوهش این است که نرخ ارسال با در نظر گرفتن محدودیت‌های توان برداشتی و انرژی به اشتراک گذاشته‌شده، بیشینه شود. در [۳۸] ارسال هم‌زمان انرژی و اطلاعات با مدولاسیون تقسیم فرکانسی متعامد^۴ در یک کانال رله مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا فرض شده مسیر مستقیم از فرستنده به گیرنده وجود ندارد. در این حالت اطلاعات و بخشی از توان هم‌زمان از منبع به رله ارسال می‌شود و رله به روش تقسیم توان از سیگنال دریافتی، انرژی برداشت می‌کند و از آن برای ارسال اطلاعات به مقصد استفاده می‌کند. سپس فرض می‌شود مسیر مستقیم بین منبع و مقصد وجود دارد و ارسال از مسیر مستقیم و مسیر مشارکتی هم‌زمان بر روی زیرحامل‌های مختلف صورت

¹ Fading Channel State

² Markov Decision Process

³ Two-hop Gaussian Relay Network

⁴ Orthogonal Frequency Division Multiplexing

می‌گیرد. در هنگام ارسال سیگنال از منبع به مقصد در مسیر مستقیم، گیرنده سیگنال را به‌عنوان پیام دریافت می‌کند و هم‌زمان رله سیگنال را برای برداشت انرژی دریافت می‌کند. رله پس از برداشت انرژی به مشارکت با منبع برای ارسال سیگنال به سمت مقصد می‌پردازد. مسأله تخصیص توان ارسالی منبع و رله و همچنین تخصیص زیرحامل‌ها به نحوی صورت گرفته که بهره‌ی عملیاتی سیستم بیشینه شود.

در [۳۹] مروری بر شبکه‌های رادیوشناختی با کاربران مجهز به تکنیک برداشت انرژی و چالش‌های ناشی از دسترسی طیفی گوناگون در این شبکه‌ها ارائه شده است. حس کردن طیف، ارسال اطلاعات و برداشت انرژی از سیگنال RF در این شبکه‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. سپس مشکل انتخاب کانال پویا در یک شبکه رادیوشناختی مجهز به تکنیک برداشت چندکاناله بحث شده است. در سیستم پیشنهادشده، کاربر ثانویه می‌تواند از کانالی که توسط شبکه اولیه استفاده نشده است، به‌طور تطبیقی برای ارسال اطلاعات استفاده کند و در صورتی که آن کانال توسط شبکه اولیه اشغال شده باشد، می‌تواند از سیگنال شبکه اولیه برای ارسال در فرصت‌های دیگر، انرژی برداشت کند. در نهایت با استفاده از فرایند تصمیم‌گیری مارکوف راهکار انتخاب کانال بهینه برای کاربر ثانویه به‌دست آمده است. در [۴۰] یک شبکه رادیوشناختی با کاربر ثانویه مجهز به برداشت انرژی از منابع تجدیدپذیر با مدل برنولی در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب کاربر ثانویه در هر بازه زمانی میزان مشخصی انرژی e_h را با احتمال p_h برداشت می‌کند و ظرفیت محدودی برای ذخیره انرژی دارد. این کاربر به روش فرصت‌طلبانه در مواقعی که شبکه اولیه از طیف فرکانسی استفاده نمی‌کند، به فعالیت می‌پردازد. هدف بیشینه کردن بهره عملیاتی کاربر ثانویه با توجه به محدودیت‌های توان و شرایط کانال در یک سیستم چندکاناله تک‌کاربره است. در [۴۱] برای بهبود بازدهی طیفی و بازدهی انرژی، یک سیستم رادیوشناختی با شبکه ثانویه مجهز به تکنیک برداشت انرژی معرفی شده است. کاربر ثانویه انرژی را از محیط برداشت کرده و با رهیافت دسترسی طیفی زمینه‌ای، به ارسال اطلاعات می‌پردازد. هدف تعیین راهکار تشخیص طیف بهینه است که بهره عملیاتی سیستم را با توجه به محدودیت‌های علی

بودن مصرف انرژی و شرط تداخل بیشینه کند. در [۴۲] یک مدل دسترسی طیفی بر اساس برداشت انرژی در شبکه‌های رادیوشناختی با رهیافت روی‌هم‌گذاری پیشنهاد شده است. در طرح پیشنهادی، یکی از فرستنده‌های بالقوه ثانویه برای کمک به فرستنده‌ی شبکه‌ی اولیه انتخاب شده و از سیگنال‌های فرستنده اولیه انرژی برداشت می‌کند تا در صورت تشخیص یک حفره طیفی، از طریق مشارکت کیفیت ارسال شبکه اولیه را بهبود ببخشد. زمانی که ارسال بین فرستنده و گیرنده اولیه موفق نباشد، شبکه‌ی اولیه از تعداد فرستنده‌های ثانویه بیشتری برای همکاری استفاده خواهد کرد. برای ارزیابی عملکرد این طرح، احتمال قطع برای شبکه‌های اولیه و ثانویه در یک کانال با محوشدگی رایلی بررسی شده است.

▪ پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه‌ی روش‌های درخواست تکرار خودکار

عملکرد و تأخیر روش‌های درخواست تکرار ترکیبی بر روی کانال‌های رایلی در [۱۹] و کانال‌های رایلی دوگانه در [۱۷] و [۱۸] بررسی شده است. روابط بسته‌ای برای ظرفیت قطع، تعداد ارسال بسته‌های اطلاعات، میانگین نرخ ارسال با فرض بیشترین تعداد ارسال خودکار M برای این روش، محاسبه شده است. نرخ ارسال در هر مرحله بر اساس میانگین نسبت توان سیگنال به نویز در کانال مربوطه تطبیق داده شده است که به موجب آن احتمال قطع از یک حدی فراتر نمی‌شود. در [۴۳] اثر کنترل‌کننده‌های توان بهینه بر عملکرد سیستم‌های مخابراتی حساس به تأخیری که از روش درخواست تکرار خودکار ترکیبی استفاده می‌کنند، مورد مطالعه قرار گرفته است. تخصیص بهینه توان در سیستم مورد نظر منجر به کاهش میانگین توان مصرفی برای یک احتمال قطع مورد نظر می‌شود. کمینه کردن احتمال قطع از طریق تطبیق و تخصیص توان با به‌کارگیری روش درخواست تکرار خودکار ترکیبی در کانال با محوشدگی بلوکی m ناکاگامی^۱ در [۲۰] هدف مسأله بوده است. در این پژوهش بر اساس پیامی که گیرنده به‌منزله بازخورد به فرستنده ارسال می‌کند دو سناریوی تک‌بیتی و چندبیتی در نظر گرفته شده است. در بازخورد تک‌بیتی فرستنده فقط از

^۱ Nakagami-m Block Fading channel

دریافت یا عدم دریافت صحیح پیام مطلع می‌شود اما در چندبیتی فرستنده علاوه بر دریافت خبر حصول مثبت یا منفی، از اطلاعات حالت گیرنده نیز آگاه می‌شود. مزایای استفاده از سناریوی دوم و تخصیص توان بهینه با توجه به نتایج نشان داده شده است.

برای بهبود عملکرد یک شبکه رله بی‌سیم دومسیره که در آن دو گره بافاصله، با کمک گرفتن از رله اطلاعاتشان را تبادل می‌کنند، کدگذاری کانال انجام شده است [۴۴]. روش درخواست تکرار ترکیبی در این سیستم به کار گرفته شده و بازدهی انرژی مورد بررسی قرار گرفته است. دو رویکرد برای کد کردن شبکه شامل کدگذاری آنالوگ^۱ و کدگذاری لایه فیزیکی^۲ استفاده شده است. نتایج برتری استفاده از رله با کدگذاری لایه فیزیکی را از منظر بازدهی انرژی نشان می‌دهد. در مقاله [۴۵] فرستنده در یک شبکه رله، پیام را به روش درخواست تکرار خودکار ترکیبی به گیرنده ارسال می‌کند. رله در طول مراحل مختلف ارسال به پیام گوش می‌دهد. در صورتی که رله بتواند پیام را کدگشایی کند، رله و فرستنده از مرحله‌ی بعدی ارسال خودکار، با همکاری همدیگر پیام را به مقصد ارسال می‌کنند. عملکرد هر دو روش درخواست تکرار ترکیبی از منظر تئوری اطلاعات با پارامترهای احتمال قطع، میانگین تعداد ارسال و نرخ ارسال میانگین بررسی و مقایسه شده است. در [۴۶] یک شبکه رله با درخواست تکرار خودکار ترکیبی در کانال با محوشدگی رایلی در نظر گرفته شده است. شبکه شامل چندین رله با طرح کدگشایی-ارسال است. در صورتی که پیام در گیرنده به درستی دریافت نشود، در هر بار ارسال مجدد با به کارگیری روش انتخاب رله فرصت طلبانه^۳، رله انتخاب شده دنباله جدید پیامی که فرستنده تولید کرده را به گیرنده ارسال می‌کند. میانگین بهره عملیاتی و حد بالای احتمال قطع در سیستم با تأخیر محدود محاسبه شده است.

¹ Analog Network Coding

² Physical-Layer Network Coding

³ Opportunistic Relay Selection

انتخاب رله و تخصیص توان به منظور مصرف هرچه کمتر توان برای شبکه‌ی رادیوشناختی مشارکتی چندمسیره با به‌کارگیری تکنیک درخواست تکرار خودکار در شبکه‌ی ثانویه در [۲۲] مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به رهیافت ارسال زمینه‌ای هر کاربر ثانویه برای برقراری شرط تداخل دارای یک محدودیت توان ارسالی است. توان ارسالی به گره‌های رله طوری تخصیص داده می‌شود که کل توان مصرف‌شده برای رسیدن به یک احتمال قطع مشخص، بعد از N_0 بار ارسال مجدد خودکار کمترین مقدار بشود. در [۴۷] بهره‌ی عملیاتی روش درخواست تکرار خودکار در شبکه رادیوشناختی مشارکتی با رهیافت دسترسی طیفی زمینه‌ای بررسی شده است. سه روش انتخاب رله بر پایه تقویت-ارسال و کدگشایی-ارسال مطالعه شده است. در تمامی روش‌ها، رله انتخابی باید بیشترین نسبت توان سیگنال به توان نویز را در مسیر فرستنده رله گیرنده ارائه دهد و شرط عدم ایجاد تداخل بر روی گیرنده اولیه را برآورده کند

در [۴۸] برای داشتن ارتباطی مطمئن در شبکه‌های دارای گره‌های برداشت‌کننده انرژی، از روش درخواست تکرار خودکار استفاده کرده است. دو شیوه ارسال مشارکتی و غیر مشارکتی برای این سیستم مقایسه شده است. نشان داده می‌شود که استفاده از رویکرد مشارکتی در گره‌های برداشت‌کننده انرژی، این گره‌ها را قادر می‌سازد میزان مصرف انرژی‌شان را با نرخ برداشت انرژی متعادل کنند. تعادل بین میزان مصرف انرژی و نرخ برداشت انرژی نیز باعث بهبود عملکرد شبکه می‌گردد. در [۴۹] مسأله کنترل توان بهینه برای گره‌های برداشت‌کننده انرژی و بر اساس درخواست تکرار خودکار بسته‌ها بررسی شده است. تخصیص توان، انرژی ارسالی برای هر بسته اطلاعاتی را در هر مرحله ارسال مجدد با توجه به اطلاعات حالت کانال مشخص می‌کند. در واقع اطلاعات نسبی حالت کانال از طریق پیام بازخورد حصول مثبت یا منفی در اختیار این گره‌ها قرار می‌گیرد. مسأله مطرح‌شده از طریق فرایند تصمیم‌گیری مارکوف حل شده است.

۲-۹ ارتباط موضوع تحقیق با پژوهش‌های پیشین

در اغلب مسائل بررسی شده در زمینه‌ی تخصیص منابع در شبکه‌های رادیوشناختی، اشتراک طیفی به روش ارسال زمینه‌ای صورت گرفته و فقط شرط تداخل شبکه ثانویه بر روی گیرنده اولیه برآورده شده است. اما در مدل پیشنهادشده، از راهکار روی هم‌گذاری برای دسترسی طیفی استفاده شده و شبکه اولیه، طیف خود را به کاربران ثانویه اجاره داده تا با در اختیار قرار دادن طیف به کاربران ثانویه از مشارکت آن‌ها برای افزایش کیفیت سرویس خود استفاده کند. در این صورت تداخل شبکه ثانویه بر روی اولیه معنا ندارد بلکه شبکه ثانویه با دریافت اطلاعات شبکه اولیه، به‌عنوان رله در راستای تحقق اهداف شبکه اولیه، همکاری می‌کند و پس از برآورده کردن نیاز آن، با استفاده بهینه از منابع در دسترس، درصدد پاسخ‌گویی به نیاز کاربر ثانویه برمی‌آید. علاوه بر این، فرض شده در این سیستم کاربران ثانویه دارای منبع توان ثابت نبوده و قادرند از سیگنال‌های پیام شبکه اولیه انرژی برداشت کنند. در مواردی که از روش برداشت انرژی به روش سیگنال RF در سیستم‌های رادیوشناختی استفاده شده است، نسبتی از توان سیگنال پیام دریافتی به‌عنوان انرژی دریافت و باقی توان سیگنال صرف پردازش اطلاعات سیگنال می‌شود (روش تقسیم توان توضیح داده‌شده در بخش ۲-۶-۲). اما در سیستم‌مدل اول پیشنهادشده، برداشت انرژی در هر کاربر ثانویه از خود سیگنال پیام دریافتی، صورت نمی‌گیرد بلکه از کل سیگنال‌های پیامی که به کاربران دیگر اختصاص داده شده است، برداشت می‌شود. این امر باعث می‌شود انرژی سیگنال پیام دریافتی در هر کاربر، فقط به پردازش سیگنال همان کاربر برای کد برداری پیام اولیه اختصاص داده شود. همچنین کنترل خطا به روش درخواست تکرار خودکار در سیستم‌های رادیوشناختی مجهز به تکنیک برداشت انرژی، توأمأ در هر دو شبکه اولیه و ثانویه، بررسی نشده است. در این پایان‌نامه سیستم‌مدل جدیدی برای شبکه رادیوشناختی مجهز به برداشت انرژی با افزودن درخواست تکرار خودکار مطرح و عملکرد سیستم با پارامترهای احتمال قطع و میانگین نرخ ارسال بررسی شده است.

فصل ۳:

تخصیص توان وزیرحامل در شبکه رادیو شناختی مشارکتی مجزبه

تکنیک برداشت انرژی

۳-۱ مقدمه

در این فصل به طرح و حل یک مسأله بهینه‌سازی مبتنی بر تخصیص منابع در یک شبکه رادیوشناختی مجهز به برداشت انرژی می‌پردازیم. در ابتدا سیستم‌مدل و رویکرد آن را توضیح می‌دهیم. سپس به بررسی روابط نرخ شبکه اولیه و ثانویه و انرژی برداشت‌شده در شبکه ثانویه می‌پردازیم. با هدف بیشینه کردن نرخ شبکه ثانویه، محدودیت‌های حاکم بر مسأله شامل محدودیت نرخ ارسال شبکه اولیه، توان و تعامد زیرحامل‌ها را بررسی می‌کنیم و با توجه به غیر محدب بودن ساختار مسأله، برای حل آن از روش دوگان لاگرانژ بهره می‌گیریم. در نهایت با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی، عملکرد شبکه را ارزیابی می‌کنیم.

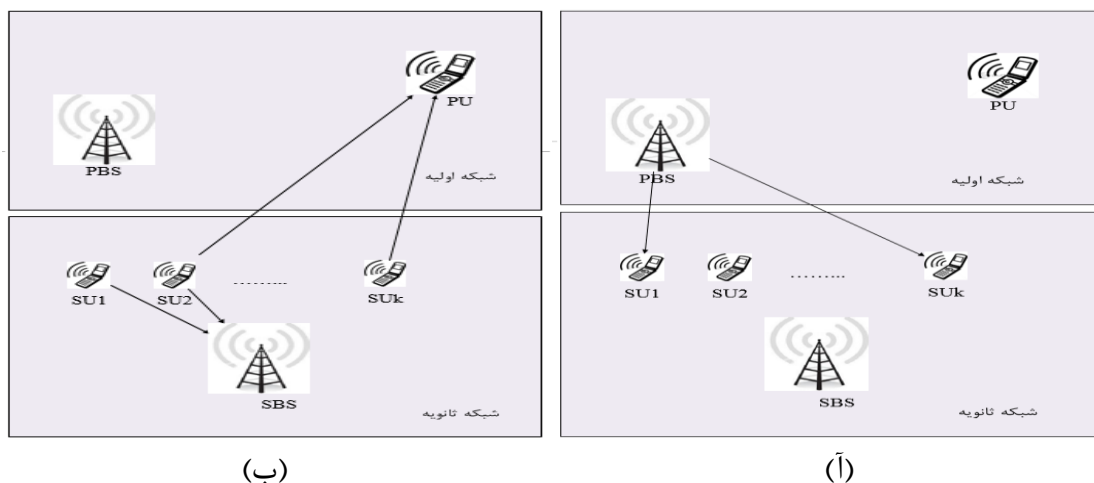
۳-۲ سیستم‌مدل پیشنهادی

یک شبکه رادیوشناختی که شبکه اولیه آن شامل یک ایستگاه پایه اولیه^۱ PBS و یک کاربر اولیه PU و شبکه ثانویه شامل یک ایستگاه پایه ثانویه^۲ SBS و K کاربر ثانویه SU بدون توان ثابت و مجهز به تکنیک برداشت انرژی، را در نظر می‌گیریم. سیستم‌مدل مطرح‌شده در شکل (۳-۱) رسم شده است. فرض می‌کنیم در شبکه اولیه فاصله بین PBS و PU زیاد است و پیام مستقیماً بین این دو ارسال نمی‌شود. از این‌رو شبکه اولیه با اجاره دادن طیف خود به کاربران ثانویه از مشارکت آن‌ها برای ارسال پیام استفاده می‌کند. کاربران ثانویه از سیگنال‌های اولیه انرژی برداشت می‌کنند و در نقش رله DF، به ارسال پیام شبکه اولیه می‌پردازند. این کاربران پس از برآورده کردن نیاز شبکه اولیه، اطلاعات شبکه ثانویه را به سمت SBS با استفاده از طیف در دسترس و انرژی برداشت‌شده مخابره می‌کنند.

¹ Primary Base Station

² Secondary Base Station

ارسال سیگنال در دو شبکه به روش OFDMA صورت می‌گیرد. OFDMA، یک تکنیک مدولاسیون است که بر اساس اصل انتقال هم‌زمان n فرکانس متعامد بر روی چندین کاربر است که در تبادل اطلاعات با حجم بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مدولاسیون یک بازه فرکانسی به چندین زیرحامل^۱ دوبه‌دو متعامد تقسیم می‌شود و بر روی هر کدام از این زیرحامل‌ها بخشی از اطلاعات ارسال می‌شود. مزیت این روش، ارسال اطلاعات به صورت موازی و غلبه بر محوشدگی فرکانس‌گزین^۲ است. چراکه در این حال هر قسمتی از اطلاعات روی بازه‌ی کوچکی از باند فرکانسی حمل می‌شود که این نوع محوشدگی روی این بازه‌ی کوچک، عملاً به صورت خطی ظاهر می‌شود و قابل جبران شدن و نهایتاً استخراج سیگنال است [۵۰].



شکل (۳-۱) سیستم مدل شبکه رادیوشناختی با کاربران ثانویه برداشت‌کننده انرژی. (آ) فاز اول ارسال (ب) فاز دوم ارسال

در این مسأله طیف فرکانسی را به N زیرحامل تقسیم می‌کنیم. هر قسمت از اطلاعات بر روی یک زیرحامل و توسط یک کاربر ارسال می‌شود. همچنین فرض می‌کنیم تمام گره‌های شبکه دارای یک آنتن هستند و امکان ارسال و دریافت هم‌زمان داده‌ها وجود ندارد. به این حالت، حالت کاری نیمه دوطرفه^۳ گفته

¹ Subcarrier

² Frequency Selective Fading

³ Half Duplex Mode

می‌شود. در نتیجه انتقال اطلاعات در دو فاز مجزا صورت می‌گیرد. در فاز اول ارسال نشان داده‌شده در شکل (۱-۳). (آ)، ایستگاه پایه اولیه پیام را بر روی زیرحامل‌های متعامد M ، به کاربران ثانویه ارسال می‌کند. در همین حین کاربران ثانویه از سیگنال‌های دریافتی انرژی برداشت می‌کنند.

در فاز دوم ارسال، بعد از کدبرداری سیگنال‌های دریافتی توسط کاربران ثانویه، این کاربران دو مسئولیت به عهده دارند. در وهله اول پیام‌های دریافتی را مجدد کدگذاری کرده و با استفاده از انرژی برداشت‌شده در فاز قبلی، طوری به کاربر اولیه ارسال کنند که نرخ ارسال شبکه اولیه از آستانه قابل قبول آن کمتر نباشد. وظیفه‌ی بعدی این کاربران، ارسال پیام‌های خودش به سمت SBS است. این فاز در شکل (۱-۳). (ب) رسم شده است. پیام در فاز دوم بر روی زیرحامل‌های N فرستاده می‌شود. M و N زیرمجموعه‌هایی از کل زیرحامل‌های موجود در طیف فرکانسی اختصاص داده‌شده به ایستگاه پایه اولیه است.

تخصیص توان و زیرحامل‌ها در شبکه اولیه و ثانویه را به نحوی انجام می‌دهیم که نرخ ارسال شبکه ثانویه، به شرط برآورده کردن نرخ ارسال شبکه اولیه و محدودیت‌های توان PBS و توان برداشت‌شده کاربران ثانویه و تعامد زیرحامل‌ها، بیشینه شود.

۳-۳ فرمول‌بندی مسأله

۳-۳-۱ نرخ ارسال شبکه اولیه

از آنجاکه ارسال مستقیم اطلاعات بین PBS و PU به علت وجود فاصله زیاد بین آن دو صورت نمی‌گیرد، نرخ ارسال این شبکه صرفاً ناشی از همکاری کاربران ثانویه است. از این‌رو برای محاسبه نرخ ارسال شبکه اولیه، ابتدا نرخ ارسال پیام توسط هر کاربر ثانویه را با توجه به زیرحامل‌های اختصاص داده‌شده به آن

به دست می آوریم. چون ارسال به صورت موازی توسط چندین کاربر صورت می گیرد، نرخ ارسال کلی در این مسیر معادل مجموع نرخ های کاربر های مورد استفاده قرار گرفته برای همکاری با شبکه اولیه است.

$$g_{SU_k, SBS}^n = \frac{|h_{SU_k, SBS}^n|^2}{(\sigma_{SBS}^n)^2} \quad \text{و} \quad g_{SU_k, PU}^n = \frac{|h_{SU_k, PU}^n|^2}{(\sigma_{PU}^n)^2}, \quad g_{PBS, SU_k}^m = \frac{|h_{PBS, SU_k}^m|^2}{(\sigma_k^m)^2}$$

تعریف می شوند که در آن ها $h_{SU_k, SBS}^n$ و $h_{SU_k, PU}^n$ ، h_{PBS, SU_k}^m به ترتیب بیان گر ضرایب کانال بین PBS و کاربر K ام (SU_k) بر روی زیر حامل m بین SU_k و PU بر روی زیر حامل n و بین SU_k و SBS بر روی زیر حامل n است. $(\sigma_{SBS}^n)^2$ و $(\sigma_k^m)^2$ ، $(\sigma_{PU}^n)^2$ نیز به ترتیب توان نویز سفید گوسی جمع شونده^۱ (AWGN) در SU_k ، PU و SBS است. کانال های زیر حامل ها دارای توزیع مستقل همانی^۲ (i.i.d) با محوشدگی رایلی در نظر گرفته شده است.

مقادیر $P_{SU_k, SBS}^n$ و $P_{SU_k, PU}^n$ ، P_{PBS, SU_k}^m به ترتیب سطح توان ارسالی تخصیص داده شده توسط PBS بر روی زیر حامل m به SU_k در فاز اول ارسال، سطح توان ارسالی تخصیص داده شده توسط SU_k بر روی زیر حامل n به PU در فاز دوم ارسال و سطح توان ارسالی تخصیص داده شده توسط SU_k بر روی زیر حامل n به SBS در فاز دوم ارسال را نشان می دهند.

فرض می کنیم کاربران ثانویه می توانند در هر فاز ارسال از زیر حامل های متفاوت برای دریافت و ارسال اطلاعات استفاده کنند. به این ترتیب می توان در هر دو فاز ارسال، از کانال با شرایط بهتر استفاده کرد. از نشانه گذاری زوج زیر حامل (m, n) برای ساده سازی توضیح مسأله استفاده می کنیم. این زوج نشان می دهد زیر حامل m در فاز اول ارسال توسط شبکه اولیه و زیر حامل n در فاز دوم ارسال توسط شبکه ثانویه برای همکاری با شبکه اولیه مورد استفاده قرار گرفته است.

¹ Additive White Gaussian Noise

² Independent Identically Distributed

فرض می‌کنیم PBS قصد ارسال بخشی از پیام را به PU با همکاری SU_k و بر روی زوج زیرحامل (m, n) دارد. آنگاه نرخ لحظه‌ای ارسال پیام بین PBS و SU_k بر روی زیرحامل m در فاز اول ارسال، با توجه به رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$r_{\text{PBS}, SU_k}^m = \frac{1}{2} \log_2 (1 + p_{\text{PBS}, SU_k}^m g_{\text{PBS}, SU_k}^m) \quad (1-3)$$

نرخ ارسال بین SU_k و PU بر روی زیرحامل n در فاز دوم ارسال نیز از رابطه زیر به دست خواهد آمد.

$$r_{SU_k, \text{PU}}^n = \frac{1}{2} \log_2 (1 + p_{SU_k, \text{PU}}^n g_{SU_k, \text{PU}}^n) \quad (2-3)$$

بنابراین نرخ ارسال پیامی که در فاز اول ارسال از PBS بر روی زیرحامل m به SU_k ، و در فاز دوم ارسال از SU_k بر روی زیرحامل n به PU ارسال می‌شود، به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$r_{\text{PBS}, SU_k, \text{PU}}^{m, n} = \min (r_{\text{PBS}, SU_k}^m, r_{SU_k, \text{PU}}^n) \quad (3-3)$$

آنگاه نرخ کلی شبکه اولیه که ناشی از ارسال بر روی تعدادی از زوج زیر حامل‌های (m, n) است که با همکاری SU_k مربوطه صورت می‌گیرد، از رابطه زیر پیروی می‌کند.

$$r_{\text{primary}} = \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \rho_{m, n}^k r_{\text{PBS}, SU_k, \text{PU}}^{m, n} \quad (4-3)$$

در این رابطه $\rho_{m, n}^k \in \{0, 1\}$ است. اگر ارسال بین PBS و PU با همکاری SU_k و بر روی زوج زیرحامل (m, n) صورت بگیرد، آنگاه $\rho_{m, n}^k$ دارای مقدار یک است و در غیر این صورت برابر صفر است.

۳-۲ انرژی برداشت شده توسط کاربران ثانویه از سیگنال‌های شبکه اولیه

همان‌طور که قبلاً گفته شد، کاربران ثانویه در فاز اول ارسال از سیگنال‌های RF ارسالی توسط PBS، انرژی برداشت می‌کنند. هر کاربر از توان سیگنال‌هایی که به کاربران ثانویه دیگر اختصاص داده شده، انرژی برداشت می‌کند. به‌عنوان مثال اگر در فاز اول ارسال، بخشی از اطلاعات PBS بر روی x زیرحامل از M زیرحامل اختصاص داده شده به کل کاربران ثانویه، به کاربر k ام، ارسال شود، این کاربر از سیگنال‌هایی که توسط $M-x$ زیرحاملی که به کاربرهای دیگر اختصاص داده می‌شود، انرژی برداشت می‌کند [۵۱].

برای محاسبه انرژی برداشت شده توسط کاربر k ، ابتدا فرض می‌کنیم زیرحامل m یکی از زیرحامل‌های تخصیص داده نشده به این کاربر در فاز اول ارسال باشد که تشکیل زوج زیرحامل (m, n) را با همکاری SU_j می‌دهد. انرژی‌ای که SU_k از این سیگنال دریافت می‌کند، معادل است با E_k^m که از رابطه (۵-۳) محاسبه می‌شود.

$$E_k^m = \eta P_{\text{PBS}, SU_j}^m g_{\text{PBS}, SU_k}^m \quad (۵-۳)$$

در این رابطه η راندمان برداشت انرژی است که به ساختار جزء برداشت‌کننده انرژی در کاربران ثانویه بستگی دارد. برای سیستم مطرح شده، مقدار η را یک در نظر گرفته‌ایم. با تعمیم این رابطه به کل سیگنال‌هایی که به SU_k ارسال نمی‌شود، می‌توان انرژی برداشت شده توسط این کاربر را از رابطه زیر به دست آورد.

$$E_k = \eta \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^K \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \rho_{m,n}^j P_{\text{PBS}, SU_j}^m g_{\text{PBS}, SU_k}^m \quad (۶-۳)$$

فرض می‌کنیم هر کاربر تمام انرژی دریافتی را برای ارسال مصرف می‌کند و انرژی در باتری ذخیره نمی‌شود. از این رو محدودیت جلوگیری از سرریز شدن توان که در بخش قبل توضیح داده شد، معنا ندارد. اما شرط علی بودن مصرف انرژی را باید برآورده کرد؛ یعنی توان مصرفی هر کاربر در زمان دوم ارسال همواره باید کمتر یا مساوی کل توان برداشتی آن کاربر باشد.

۳-۳-۳ نرخ ارسال شبکه ثانویه

در شبکه ثانویه نیز ارسال به صورت موازی توسط کاربران غیر همکاری کننده با شبکه اولیه، به سمت SBS و بر روی زیرحامل‌های متعامد صورت می‌گیرد. به همین دلیل نرخ ارسال در این شبکه با مجموع نرخ‌های این کاربران بر روی زیرحامل‌های اختصاص یافته به آن‌ها معادل است. نرخ ارسال بخشی از پیام که توسط SU_k به SBS و بر روی زیرحامل n ارسال می‌شود، از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$r_{SU_k, SB}^n = \frac{1}{2} \log_2 (1 + p_{SU_k, SBS}^n g_{SU_k, SBS}^n) \quad (۷-۳)$$

آنگاه رابطه زیر نرخ کلی شبکه ثانویه در ارسال کاربران مختلف و بر روی زیرحامل‌های متعامد اختصاص داده شده به هر یک را بیان می‌کند.

$$r_{\text{secondary}} = \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \mu_n^k r_{SU_k, SBS}^n \quad (۸-۳)$$

در این رابطه $\mu_n^k \in \{0, 1\}$ است. اگر در فاز دوم ارسال زیر حامل n برای ارسال از SU_k به SBS اختصاص داده شود، μ_n^k دارای مقدار یک است و در غیر این صورت برابر مقدار صفر است.

در این فصل می‌خواهیم توان و زیرحامل‌ها را به گونه‌ای به کاربران مختلف در هر دو فاز ارسال اختصاص بدهیم که نرخ شبکه ثانویه با توجه به محدودیت‌های برآورده کردن نرخ شبکه اولیه، محدودیت‌های توانی

در هر دو شبکه و برقراری تعامد بین زیرحامل‌ها بیشینه شود. این مسأله را به صورت زیر فرمول‌بندی می‌کنیم:

$$\max r_{\text{secondary}} = \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \mu_n^k r_{\text{SU}_k, \text{SBS}}^n \quad (9-3)$$

با توجه به شروط زیر:

$$r_{\text{primary}} \geq R_c \quad (10-3)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \rho_{m,n}^k P_{\text{PBS, SU}_k}^m \leq P_{\text{max}} \quad (11-3)$$

$$\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \rho_{m,n}^k P_{\text{SU}_k, \text{PU}}^n + \sum_{n=1}^N \mu_n^k P_{\text{SU}_k, \text{SBS}}^n \leq E_k \quad \forall k \quad (12-3)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \rho_{m,n}^k = 1 \quad \forall m \quad (13-3)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M (\rho_{m,n}^k + \mu_n^k) = 1 \quad \forall n \quad (14-3)$$

شرط (۱۰-۳) بیان می‌کند که در حل این مسأله حتماً باید در نظر داشته باشیم که نرخ ارسال برای کاربر اولیه از آستانه مورد نظر (R_c) کمتر نباشد. شرط (۱۱-۳)، محدودیت توانی در PBS را عنوان می‌کند و به این معنی است که مجموع توان‌هایی که بر روی زیرحامل‌هایی که در مرحله اول ارسال می‌شوند، نباید از بیشینه توان PBS بیشتر باشد. شرط (۱۲-۳)، در رابطه با محدودیت توانی کاربران ثانویه است. این شرط بیان می‌کند که مجموع توان‌هایی که هر کاربر ثانویه برای ارسال در مسیره‌های PU و SBS بر روی زیرحامل‌های n مربوطه در فاز

دوم ارسال مصرف می‌کند، باید از کل توانی که آن کاربر در فاز اول ارسال برداشت کرده، کمتر باشد. دو شرط (۳-۱۳) و (۳-۱۴)، متعامد بودن زیرحامل‌ها را در هر دو فاز ارسال نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، در هر فاز ارسال هر زیرحامل فقط توسط یک کاربر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۳-۴ ساختار حل مسأله

حل مسأله مطرح شده دشوار است چون یک مسأله ترکیبی غیرخطی عدد صحیح^۱ (MINLP) است و بهینه‌سازی از نوع غیر محدب ترکیبی^۲ است. غیر محدب بودن مسأله از شرط نرخ ارسال شبکه اولیه که در رابطه (۳-۱۰) آمده است، ناشی می‌شود و ماهیت ترکیبی بودن آن به خاطر انتخاب کاربران ثانویه است. برای ساده کردن ضابطه نرخ ارسال شبکه اولیه در رابطه (۳-۳)، فرض می‌کنیم مینیمم نرخ ارسال پیام از PBS به SU_k بر روی زیرحامل m در زمان اول ارسال و نرخ ارسال پیام از SU_k به PU بر روی زیرحامل n در فاز دوم ارسال، برابر $\beta_{m,n}^k$ است [۵۲].

$$r_{\text{PBS}, SU_k, \text{PU}}^{m,n} = \min(r_{\text{PBS}, SU_k}^m, r_{SU_k, \text{PU}}^n) = \beta_{m,n}^k \quad (۱۵-۳)$$

در نتیجه داریم:

$$\Rightarrow \begin{cases} r_{\text{PBS}, SU_k}^m \geq \beta_{m,n}^k \\ r_{SU_k, \text{PU}}^n \geq \beta_{m,n}^k \end{cases} \quad (۱۶-۳)$$

حال نرخ ارسال شبکه اولیه را می‌توانیم به صورت زیر بازنویسی می‌کنیم:

$$r_{\text{primary}} = \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \rho_{m,n}^k r_{\text{PBS}, SU_k, \text{PU}}^{m,n} = \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \rho_{m,n}^k \beta_{m,n}^k \quad (۱۷-۳)$$

¹ Mixed Integer and Nonlinear Problem

² Mixed Non-Convex And Combinatorial Optimization

این ساده‌سازی منجر به اضافه شدن دو شرط (۱۹-۳) و (۲۰-۳) به شروط مسأله می‌شود. همچنین با جایگذاری رابطه (۱۷-۳) در شرط (۱۰-۳)، به رابطه (۱۸-۳) می‌رسیم. با اعمال فرضیات و ساده‌سازی شروط، فرم کلی مسأله به صورت زیر بیان خواهد شد.

$$\max r_{\text{secondary}} = \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \mu_n^k r_{\text{SU}_k, \text{SBS}}^n \quad (۹-۳)$$

$$r_{\text{primary}} = \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \rho_{m,n}^k \beta_{m,n}^k \geq R_c \quad (۱۸-۳)$$

$$r_{\text{PBS, SU}_k}^m \geq \beta_{m,n}^k \quad \forall m, n, k \quad (۱۹-۳)$$

$$r_{\text{SU}_k, \text{PU}}^n \geq \beta_{m,n}^k \quad \forall m, n, k \quad (۲۰-۳)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \rho_{m,n}^k p_{\text{PBS, SU}_k}^m \leq P_{\text{max}} \quad (۱۱-۳)$$

$$\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \rho_{m,n}^k p_{\text{SU}_k, \text{PU}}^n + \sum_{n=1}^N \mu_n^k p_{\text{SU}_k, \text{SBS}}^n \leq E_k \quad \forall k \quad (۱۲-۳)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \rho_{m,n}^k = 1 \quad \forall m \quad (۱۳-۳)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M (\rho_{m,n}^k + \mu_n^k) = 1 \quad \forall n \quad (۱۴-۳)$$

برای حل مسأله بهینه‌سازی مطرح شده از روش دوگان لاگرانژ^۱ استفاده می‌کنیم. برای این منظور ابتدا تابع لاگرانژ^۲ مسأله را می‌نویسیم و سپس به حل مسأله دوگان منتج آن می‌پردازیم.

^۱ Dual Lagrange

^۲ Lagrange Function

۳-۴-۱ تابع لاگرانژ مسأله

برای محاسبه تابع لاگرانژ ابتدا تابع هدف را نوشته و تمام شرط‌های نامساوی را به یک سمت نامساوی منتقل و به ازای هر شرط مسأله یک متغیر تعریف می‌کنیم. هر شرط را در متغیر متناظرش ضرب کرده و حاصل را با هم جمع می‌کنیم. بنابراین تابع لاگرانژ مسأله مطرح‌شده به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\begin{aligned}
 L(P, \beta, \theta, \vartheta, \psi, \lambda) = & \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N r_{\text{SU}_k, \text{SBS}}^n & (۳-۲۱) \\
 & + \theta \left(\left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \beta_{m,n}^k \right\} - R_c \right) + \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \vartheta_{m,n}^k \left(r_{\text{PBS, SU}_k}^m - \beta_{m,n}^k \right) \\
 & + \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \psi_{m,n}^k \left(r_{\text{SU}_k, \text{PU}}^n - \beta_{m,n}^k \right) + \lambda_0 \left(P_{\max} - \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N P_{\text{PBS, SU}_k}^m \right) \\
 & + \sum_{k=1}^K \lambda_k \left(E_k - \left(\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M p_{\text{SU}_k, \text{PU}}^n + \sum_{n=1}^N p_{\text{SU}_k, \text{SBS}}^n \right) \right)
 \end{aligned}$$

در تابع لاگرانژ بالا θ ، λ_0 ، λ_k و ϑ و ψ متغیرهای لاگرانژ^۱ هستند. θ متغیر لاگرانژی است که مربوط به محدودیت برآورده کردن نرخ شبکه اولیه می‌باشد. در $\lambda_0, \lambda_k = [\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_K]$ متغیر لاگرانژ مربوط به محدودیت توان در PBS است و $\lambda_1, \dots, \lambda_K$ متغیرهای مربوط به محدودیت توان ارسالی کاربران ثانویه اول تا K ام است. ϑ و ψ نیز متغیرهای مربوط به شرط‌های ناشی از ساده‌سازی محدودیت برآورده کردن نرخ ارسال شبکه اولیه هستند.

^۱ Lagrange Variables

به دلیل این که نرخ ارسال شبکه اولیه به زوج زیرحامل (m, n) و کاربر ثانویه همکاری کننده k ام مورد استفاده بستگی دارد، به ازای هر m, n, k یک متغیر لاگرانژ ϑ در فاز اول ارسال و یک متغیر لاگرانژ ψ در فاز دوم ارسال تعریف می کنیم. به عبارت دیگر $M \times N \times K$ تا متغیر ϑ و ψ خواهیم داشت.

یک روش حل مسأله بهینه سازی، استفاده از تکنیکی است که ضرایب لاگرانژ را مستقیماً به دست می آورد سپس متغیرهای تصمیم مسأله تعیین می شوند. این روش به حل دوگان موسوم است که در آن متغیرهای دوگان همان ضرایب لاگرانژ می باشند.

۳-۴-۲ تابع دوگان لاگرانژ

تابع دوگان لاگرانژ یا تابع دوگان به صورت بیشینه مقدار لاگرانژ بر روی متغیرهای اولیه و بهینه سازی تعریف می شود. بنابراین تابع دوگان تابعی از ضرایب لاگرانژ خواهد بود. به همین علت ضرایب لاگرانژ، متغیرهای دوگان^۱ نیز نامیده می شوند. با توجه به تابع لاگرانژ در رابطه (۳-۲۱)، تابع دوگان آن به صورت زیر تعریف می شود:

$$g(\theta, \vartheta, \psi, \lambda) = \max_{p, \beta} L(P, \beta, \theta, \vartheta, \psi, \lambda) \quad (۲۲-۳)$$

از این تابع نسبت به β برای یک m و n و k خاص مشتق می گیریم.

$$\frac{\partial L(P, \beta, \theta, \vartheta, \psi, \lambda)}{\partial \beta_k^{m, n}} = \theta - g_{m, n}^k - \psi_{m, n}^k \quad (۲۳-۳)$$

می دانیم مشتق تابع نشان دهنده رفتار تابع است. اگر مشتق تابع نسبت به یک پارامتر مثبت باشد (تابع صعودی باشد)، برای اینکه بخواهیم تابع بیشینه مقدار خود شود، بیشترین مقدار قابل قبول پارامتر منتج

^۱ Dual Variables

به ماکزیمم شدن تابع می‌شود. اما اگر مشتق تابع نسبت به یک پارامتر منفی شود، تابع نسبت به آن پارامتر نزولی است و با افزایش آن مقدار تابع کاهش پیدا می‌کند. در نتیجه برای ماکزیمم شدن تابع باید کمترین مقدار پارامتر را انتخاب کنیم و در صورتی که مشتق تابع صفر باشد، تابع ثابت است و با تغییر پارامتر تغییر نمی‌کند. با توجه به این توضیحات مقدار متغیر $\beta_k^{m,n}$ را برای بیشینه کردن تابع لاگرانژ بر اساس مشتق تابع لاگرانژ نسبت به آن به صورت زیر تعریف می‌کنیم.

$$\Rightarrow \beta_k^{m,n} = \begin{cases} +\infty & \theta > g_{m,n}^k + \psi_{m,n}^k \\ \text{any} & \theta = g_{m,n}^k + \psi_{m,n}^k \\ 0 & \theta < g_{m,n}^k + \psi_{m,n}^k \end{cases} \quad (24-3)$$

۳-۴-۲-۱ تخصیص توان ارسالی

برای حل معادله تابع دوگان تعریف‌شده در رابطه (۳-۲۲) از تابع لاگرانژ نسبت به توان-های ارسالی در هر دو بازه ارسال شامل $P_{\text{PBS}, \text{SU}_k}^m$ و $P_{\text{SU}_k, \text{PU}}^n$ و $P_{\text{SU}_k, \text{SBS}}^n$ مشتق می‌گیریم و حاصل را مساوی صفر قرار می‌دهیم تا مقادیر توانی که به ازای آن‌ها تابع لاگرانژ نسبت به پارامتر توان بیشینه می‌شود را بیابیم.

$$\frac{\partial L(P, \theta, \vartheta, \psi, \lambda)}{\partial P_{\text{PBS}, \text{SU}_k}^m} = \frac{g_{m,n}^k}{2 \ln 2} \left(\frac{g_{\text{PBS}, \text{SU}_k}^m}{1 + P_{\text{PBS}, \text{SU}_k}^m g_{\text{PBS}, \text{SU}_k}^m} \right) - \lambda_0 + \sum_{j=1, j \neq k}^K \lambda_j g_{\text{PBS}, \text{SU}_j}^m = 0 \quad (25-3)$$

در نتیجه توان ارسالی در مسیر PBS به SU_k و بر روی زوج زیر حامل (m, n) به صورت زیر به دست می‌آید.

$$P_{\text{PBS}, \text{SU}_k}^m = \left[\frac{g_{m,n}^k}{2 \ln 2 (\lambda_0 - \sum_{j=1, j \neq k}^K \lambda_j g_{\text{PBS}, \text{SU}_j}^m)} - \frac{1}{g_{\text{PBS}, \text{SU}_k}^m} \right]^+ \quad (26-3)$$

در این رابطه $[x]^+ = \max(0, x)$ است.

همین‌طور از تابع لاگرانژ نسبت به $P_{SU_k, PU}^n$ مشتق می‌گیریم و حاصل را مساوی صفر قرار می‌دهیم.

$$\frac{\partial L(P, \theta, \vartheta, \psi, \lambda)}{\partial P_{SU_k, PU}^n} = \frac{\psi_{m, n}^k}{2 \ln 2} \left(\frac{g_{SU_k, PU}^n}{1 + P_{SU_k, PU}^n g_{SU_k, PU}^n} \right) - \lambda_k = 0 \quad (27-3)$$

از حل این معادله توان ارسال در مسیر SU_k به PU و بر روی زوج زیرحامل (m, n) از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$P_{SU_k, PU}^n = \left[\frac{\psi_{m, n}^k g_{SU_k, PU}^n - 2 \ln 2 \lambda_k}{2 \ln 2 \lambda_k g_{SU_k, PU}^n} \right]^+ \quad (28-3)$$

به‌طور مشابه از تابع لاگرانژ نسبت به $P_{SU_k, SBS}^n$ مشتق می‌گیریم و حاصل را مساوی صفر قرار می‌دهیم.

$$\frac{\partial L(P, \theta, \vartheta, \psi, \lambda)}{\partial P_{SU_k, SBS}^n} = \frac{1}{2 \ln 2} \left(\frac{g_{SU_k, SBS}^n}{1 + P_{SU_k, SBS}^n g_{SU_k, SBS}^n} \right) - \lambda_k = 0 \quad (29-3)$$

با حل این معادله توان ارسال در مسیر SU_k به SBS بر روی زیرحامل n از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$P_{SU_k, SBS}^n = \left[\frac{g_{SU_k, SBS}^n - 2 \ln 2 \lambda_k}{2 \ln 2 \lambda_k g_{SU_k, SBS}^n} \right]^+ \quad (30-3)$$

۳-۲-۴-۲ تخصیص زیرحامل‌ها

منظور از تخصیص زیرحامل یعنی مشخص کردن مقدار $\rho_{m, n}^k$ ، به ازای هر SU_k تحت زوج زیرحامل (m, n) و مقدار μ_n^k به ازای هر SU_k تحت زیرحامل n در واقع باید مشخص کنیم هر زیرحامل در کدام فاز به کدام مسیر و به کدام کاربر اختصاص داده شود تا با برقراری شروط بیان‌شده، نرخ شبکه ثانویه بیشینه شود. از این‌رو برای به دست آوردن مقادیر $\rho_{m, n}^k$ و μ_n^k ابتدا دو تابع $J_k^{m, n 1}$ و $J_k^{n 2}$ را تعریف می‌کنیم. قسمتی از تابع لاگرانژ که مربوط به ارسال

پیام شبکه اولیه است را $J_k^{m,n1}$ و آن قسمت که مربوط به ارسال پیام شبکه ثانویه است را J_k^{n2} می‌نامیم. به ازای هر m و n با تفکیک تابع لاگرانژ به دو بخش، این دو تابع به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\begin{aligned}
 J_k^{m,n1} &= \frac{g_{m,n}^k}{2} \log_2 \left(1 + p_{\text{PBS, SU}_k}^m g_{\text{PBS, SU}_k}^m \right) \\
 &+ \frac{\psi_{m,n}^k}{2} \log_2 \left(1 + P_{\text{SU}_k, \text{PU}}^n g_{\text{SU}_k, \text{PU}}^n \right) - \lambda_0 P_{\text{PBS, SU}_k}^m - \lambda_k P_{\text{SU}_k, \text{PU}}^n \\
 &+ \sum_{j=1, j \neq k}^K \lambda_j p_{\text{PBS, SU}_k}^m g_{\text{PBS, SU}_j}^m + \beta_k^{m,n} \left(\theta - g_{m,n}^k - \psi_{m,n}^k \right) \\
 J_k^{n2} &= \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + P_{\text{SU}_k, \text{SBS}}^n g_{\text{SU}_k, \text{SBS}}^n \right) - \lambda_k P_{\text{SU}_k, \text{SBS}}^n
 \end{aligned} \tag{۳۱-۳}$$

برای بیشینه کردن تابع لاگرانژ با توجه به نحوه تخصیص زیرحامل‌ها، کافی است هر دو تابع J_k^{n2} و $J_k^{m,n1}$ به طور مجزا بیشینه شوند. در ادامه راهکاری برای تخصیص زیرحامل‌ها توضیح می‌دهیم.

فرض می‌کنیم PBS قصد ارسال اطلاعات به PU با همکاری SU_k تحت زوج زیرحامل‌های (m, n) را دارد. برای زیرحامل m در فاز اول ارسال، بهترین کاربر ثانویه برای همکاری و بهترین زیرحامل برای ارسال در فاز دوم ارسال را پیدا می‌کنیم. منظور از بهترین کاربر ثانویه برای همکاری و بهترین زیرحامل، یعنی به دست آوردن k و n ای که به ازای آن‌ها تابع $J_k^{m,n1}$ ، بیشترین مقدار را می‌دهد [۳۳].

$$j^{m1}(k^*, n^*) = \max_{\{n \in S_N, k \in K\}} J_k^{m,n1} \tag{۳۳-۳}$$

در این رابطه S_N و K مجموعه زیرحامل‌ها و کاربران ثانویه در دسترس برای همکاری با شبکه اولیه در فاز دوم ارسال هستند. k^* و n^* بهترین k و بهترین n ، با توجه به زیرحامل m در فاز اول ارسال هستند. این کار

را برای تمامی زیرحامل‌ها در فاز اول ارسال انجام می‌دهیم. زیرحامل m^* در فاز اول ارسال با زیرحامل n^* در فاز دوم ارسال و با همکاری SU_k^* تشکیل یک زوج زیرحامل می‌دهند، اگر داشته باشیم:

$$m^* = \operatorname{argmax}_{\{m \in S_M\}} j^{m1}(k^*, n^*) \quad (34-3)$$

در این رابطه S_M مجموعه زیرحامل‌های در دسترس در فاز اول ارسال است. از طرف دیگر فرض می‌کنیم SU_k قصد ارسال سیگنال به SBS را دارد. برای هر زیرحامل n در فاز دوم ارسال، بهترین کاربر ثانویه برای ارسال در شبکه ثانویه را پیدا می‌کنیم. منظور از بهترین کاربر ثانویه، کاربری است که به ازای آن مقدار تابع J_k^{n2} ، نسبت به سایر کاربرها برای n مورد نظر، بیشترین مقدار را بدهد. یعنی داشته باشیم:

$$j^{n2}(k^*) = \max_{\{k \in K\}} J_k^{n2} \quad (35-3)$$

برای پیدا کردن بهترین زیرحامل در فاز دوم ارسال از رابطه زیر استفاده می‌کنیم.

$$n^* = \operatorname{argmax}_{\{n \in S_N\}} j^{n2}(k^*) \quad (36-3)$$

اکنون با توجه به مقادیر (m^*, k^*, n^*) برای شبکه اولیه و (n^*, k^*) برای شبکه ثانویه، مقادیر توابع $J_k^{m^*, n^*1}$ و $J_k^{n^*2}$ را با استفاده از روابط (31-3) و (32-3) محاسبه می‌کنیم. معیار تصمیم‌گیری برای صفر یا یک بودن ضرایب $\rho_{m,n}^k$ و μ_n^k به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\begin{cases} \rho_{m^*, n^*}^k = 1 \text{ and } \mu_{n^*}^k = 0 & \text{if } J_k^{m^*, n^*1} \geq J_k^{n^*2} \\ \rho_{m^*, n^*}^k = 0 \text{ and } \mu_{n^*}^k = 1 & \text{if } J_k^{m^*, n^*1} < J_k^{n^*2} \end{cases} \quad (37-3)$$

این رابطه بیان می‌کند پس از تشخیص بهترین کاربر و زیرحامل برای فاز اول و دوم در دو مسیر، مقایسه‌ای بین مقادیر توابع $J_k^{m^*, n^*1}$ و $J_k^{n^*2}$ صورت می‌گیرد. اگر با تخصیص بهترین زیرحامل در فاز دوم در مسیر گیرنده اولیه، مقدار تابع لاگرانژ بیشتر شود این زیرحامل به آن مسیر اختصاص داده می‌شود و بالعکس اگر

استفاده از بهترین زیرحامل برای ارسال در شبکه ثانویه منجر به تولید تابع لاگرانژ بزرگتر شود، این زیرحامل را برای ارسال در مسیر ثانویه استفاده می‌کنیم. با توجه به تعامد زیرحامل‌ها، زیرحامل تخصیص داده شده از مجموعه زیرحامل‌های در دسترس برای کاربران دیگر حذف خواهد شد.

۳-۴-۳ مسأله دوگان

تاکنون مقادیر توان‌های ارسالی و چگونگی تخصیص زیرحامل‌ها در هر دو شبکه را محاسبه کردیم که بر اساس آن مقدار تابع دوگان $g(\theta, \vartheta, \psi, \lambda)$ تعیین می‌شود. برای به دست آوردن مقادیر بهینه متغیرهای دوگان θ ، ϑ ، ψ و λ باید مسأله بهینه‌سازی دوگان متناظر آن که در رابطه زیر نشان داده شده است، حل شود.

$$(\theta^*, \vartheta^*, \psi^*, \lambda^*) = \arg \min_{\{\theta \geq 0, \vartheta \geq 0, \psi \geq 0, \lambda \geq 0\}} g(\theta, \vartheta, \psi, \lambda) \quad (38-3)$$

مسأله دوگان مطرح شده، با استفاده از روش ساب‌گرادیان^۱ قابل حل است. در این روش باید ساب‌گرادیان‌های متغیرهای تابع دوگان را به دست بیاوریم. در واقع ساب‌گرادیان هر متغیر، همان ضریبی است که متغیر مورد نظر در تابع لاگرانژ در آن ضرب شده است. ساب‌گرادیان متغیرهای دوگان θ ، ϑ ، ψ و λ را به ترتیب با نمادهای $\Delta\theta$ ، $\Delta\vartheta_{m,n}^k$ ، $\Delta\psi_{m,n}^k$ و $\Delta\lambda_k$ نشان می‌دهیم و با توجه به تعریف تابع لاگرانژ داریم:

$$\Delta\theta = \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \beta_k^{m,n} \right\} - R_c \quad (39-3)$$

$$\Delta\vartheta_{m,n}^k = r_{\text{PBS, SU}_k}^m - \beta_k^{m,n} \quad (40-3)$$

¹ Subgradient Method

$$\Delta \psi_{m,n}^k = r_{\text{SU}_k, \text{PU}}^n - \beta_k^{m,n} \quad (41-3)$$

$$\Delta \lambda_0 = P_{\max} - \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N P_{\text{PBS}, \text{SU}_k}^m \quad (42-3)$$

$$\Delta \lambda_k = E_k - \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (p_{\text{SU}_k, \text{PU}}^n + p_{\text{SU}_k, \text{SBS}}^n) \quad (43-3)$$

۳-۴-۱ بهروزرسانی^۱ متغیرهای لاگرانژ

برای یافتن مقادیر بهینه متغیرهای دوگان مسأله دوگان در رابطه (۳-۳۸)، متغیرهای لاگرانژ را بهروزرسانی می‌کنیم. در هر مرحله از بهروزرسانی از مقدار قبلی متغیر به اندازه ضریبی از ساب‌گرادیان آن متغیر، کم می‌کنیم. متغیرهای بهروزرسانی شده با استفاده از روابط زیر قابل محاسبه هستند:

$$\theta^{new} = [\theta^{old} - S \times \Delta \theta]^+ \quad (44-3)$$

$$(\vartheta_{m,n}^k)^{new} = [(\vartheta_{m,n}^k)^{old} - S \times \Delta \vartheta_{m,n}^k]^+ \quad (45-3)$$

$$(\psi_{m,n}^k)^{new} = [(\psi_{m,n}^k)^{old} - S \times \Delta \psi_{m,n}^k]^+ \quad (46-3)$$

$$\lambda_0^{new} = [\lambda_0^{old} - S \times \Delta \lambda_0]^+ \quad (47-3)$$

$$\lambda_k^{new} = [\lambda_k^{old} - S \times \Delta \lambda_k]^+ \quad (48-3)$$

ضریب S از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$S = \frac{1}{n} \quad (49-3)$$

¹ Update

n موجود در این رابطه، مرحله به روزرسانی را مشخص می‌کند. به این ترتیب در هر مرحله، $K(2MN+1)+1$ متغیر لاگرانژ به روزرسانی می‌شود و به ازای آن‌ها تخصیص توان و زیرحامل مجدد انجام می‌شود و مقدار جدیدی برای تابع لاگرانژ ارائه می‌شود. هدف پیدا کردن متغیرهای لاگرانژ در مرحله‌ای است که کمترین مقدار تابع لاگرانژ را تولید کرده است.

۳-۴-۳ معیار توقف^۱ به روزرسانی

به روزرسانی تا جایی پیش می‌رود که مجموع تفاضل مقدار جدید متغیر از مقدار قبلی آن برای تمامی متغیرهای دوگان، نرخ شبکه اولیه از مقدار موردنیاز و توان‌های مصرفی از توان‌های موجود برای هر دو شبکه از یک آستانه موردنظر (ep) کمتر باشد. در واقع اگر مجموع این تفاضل‌ها از حدی کمتر باشد می‌توان متغیرهای جدید را با تقریب زیادی با متغیرهای مرحله قبل برابر دانست که به موجب آن، مقادیر توابع لاگرانژ متناظرشان نیز تقریباً برابر است. همین‌طور شبکه اولیه به نرخ مورد نظر (R_c) دسترسی پیدا می‌کند و شروط توانی مسأله برآورده می‌شود. این معیار در رابطه زیر آورده شده است.

$$\begin{aligned}
 & |\theta^{new} - \theta^{old}| + \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |(g_{m,n}^k)^{new} - (g_{m,n}^k)^{old}| + \tag{۵۰-۳} \\
 & \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |(\psi_{m,n}^k)^{new} - (\psi_{m,n}^k)^{old}| + |\lambda_0^{new} - \lambda_0^{old}| + \sum_{k=1}^K |\lambda_k^{new} - \lambda_k^{old}| + \\
 & |R_c - (\sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \rho_{m,n}^k \Gamma_{\text{PBS, SU}_k, \text{PU}}^{m,n})| + |P_{\max} - \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \rho_{m,n}^k P_{\text{PBS, SU}_k}^m| + \\
 & \sum_{k=1}^K |E_k - (\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \rho_{m,n}^k P_{\text{SU}_k, \text{PU}}^n + \sum_{n=1}^N \mu_n^k P_{\text{SU}_k, \text{SBS}}^n)| < ep
 \end{aligned}$$

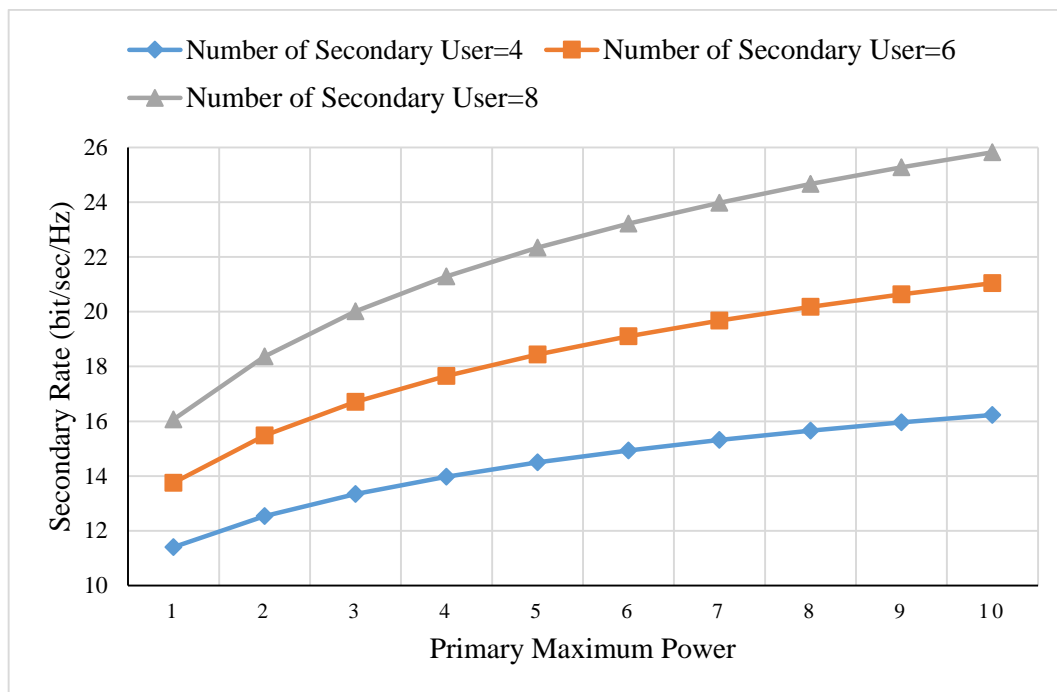
¹ Stop Criterion

۳-۵ نتایج

در این بخش عملکرد طرح پیشنهادی را با استفاده شبیه‌سازی بررسی می‌کنیم. در هر دو فاز ارسال به ازای هر کاربر N گین توان برای کانال زیرحامل‌ها، با توزیع نمایی و با میانگین 1 تولید کرده‌ایم. فرض می‌کنیم توان نویز در گیرنده اولیه، کاربران ثانویه و گیرنده ثانویه یکسان و مساوی یک است؛ یعنی داریم: $\sigma_k^m = \sigma_{PU}^n = \sigma_{SBS}^n = 1$. با جایگذاری مقادیر توان و زیرحامل‌های تخصیص داده‌شده در مرحله توقف در روابط (۳-۴) و (۳-۸) نرخ ارسال شبکه اولیه و ثانویه به‌دست خواهد آمد. در ادامه تأثیر پارامترهای بیشینه توان ارسالی ایستگاه پایه اولیه، نرخ مورد نیاز شبکه اولیه، تعداد کاربران ثانویه و تعداد زیرحامل‌های طیف فرکانسی را بر نرخ ارسال شبکه ثانویه بررسی می‌کنیم.

اثر بیشینه توان ارسالی ایستگاه پایه اولیه بر روی نرخ شبکه ثانویه

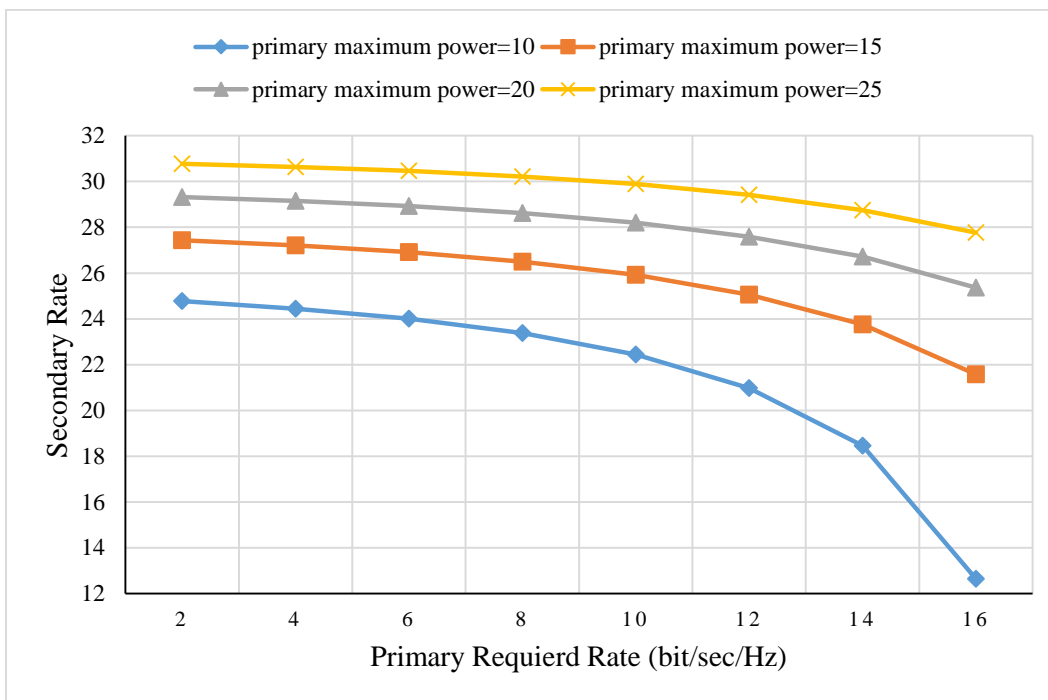
در شکل (۳-۲) نرخ ارسال شبکه ثانویه برحسب بیشینه توان ارسالی ایستگاه پایه اولیه رسم شده است. با افزایش توان ایستگاه پایه اولیه، می‌توان هر بخش از پیام را با توان بیشتری بر روی زیرحامل‌های متعامد به کاربران ثانویه ارسال کرد. این امر باعث می‌شود نرخ ارسال پیام در فاز اول ارسال افزایش یابد. از طرف دیگر در این مرحله، کاربران ثانویه با فرض ثابت بودن کانال می‌توانند انرژی بیشتری از سیگنال‌های ارسالی اولیه برداشت کنند و در فاز دوم پیام را با سطح توان بالاتری ارسال کنند. با رله کردن پیام‌های اولیه با توان بیشتر، سریع‌تر شرط نرخ اولیه برقرار می‌شود و به تبع برای ارسال در شبکه ثانویه منابع توان و طیف بیشتری باقی می‌ماند. در نتیجه شاهد افزایش نرخ ارسال شبکه ثانویه خواهیم بود. در این شبیه‌سازی نرخ مورد نیاز شبکه اولیه 0.5 bit/sec/Hz و تعداد کانال‌های ارسال 16 در نظر گرفته شده است. به ازای تعداد کاربران 4، 6 و 8 و افزایش بیشینه توان ارسالی شبکه اولیه از 1 تا 10، نرخ شبکه ثانویه برای هر یک محاسبه شده است.



شکل (۳-۲) نرخ ارسال شبکه ثانویه برحسب بیشینه توان ارسال ایستگاه پایه اولیه

اثر آستانه نرخ مورد نیاز شبکه اولیه بر روی نرخ شبکه ثانویه

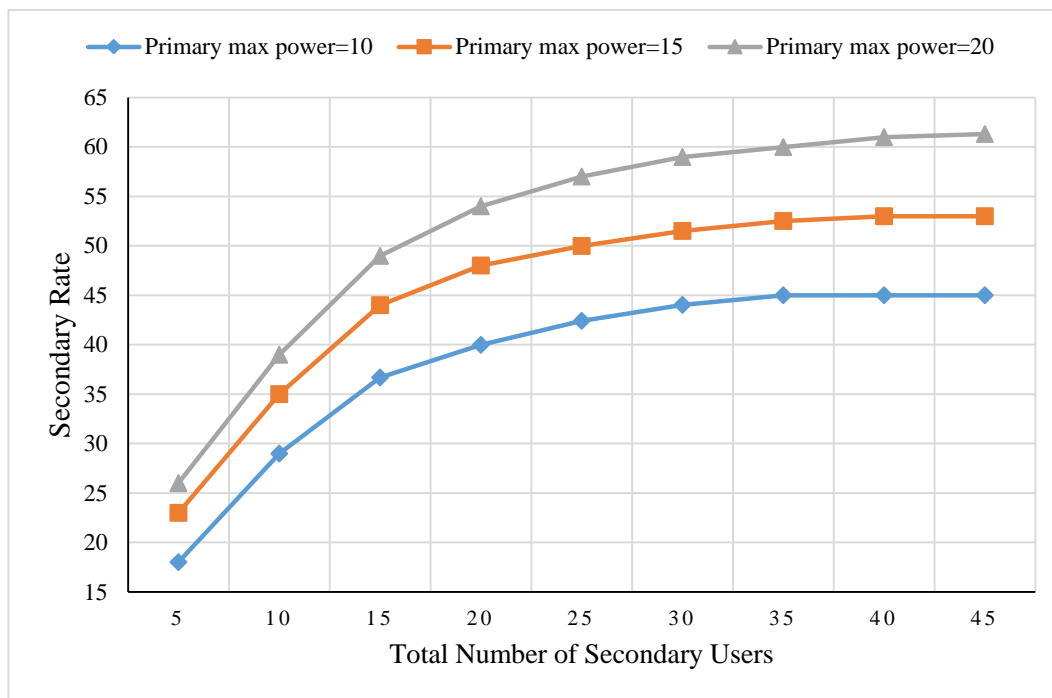
در شکل (۳-۳) نرخ ارسال شبکه ثانویه برحسب نرخ ارسال مورد نیاز شبکه اولیه رسم گردیده است. تعداد کاربران ثانویه در این شبیه‌سازی 8 در نظر گرفته شده و بیشینه توان اولیه از 10 تا 25 افزایش داده شده است. همان‌طور که در رابطه (۳-۳۹) مشاهده می‌شود، با افزایش نرخ ارسال مورد نیاز شبکه اولیه (R_c) ، مقدار ساب‌گرادیان متغیر لاگرانژ θ در تمامی مراحل به‌روزرسانی کمتر شده و در نتیجه مقدار به‌روزرسانی شده این متغیر بزرگ‌تر خواهد شد. افزایش θ باعث می‌شود در معیار تصمیم‌گیری تخصیص زیرحامل‌ها در رابطه (۳-۳۷)، تابع $J_k^{m, n 1}$ نسبت به $J_k^{n 2}$ دارای مقدار بیشتری شود و در نتیجه زیرحامل‌های بیشتر با شرایط بهتر در راستای ارسال پیام کانال اولیه اختصاص داده می‌شود تا شبکه اولیه به نرخ مورد نظر دسترسی پیدا کند. متعاقباً زیرحامل‌های کمتری در اختیار کاربران ثانویه برای ارسال پیام شبکه ثانویه باقی می‌ماند و این امر موجب کاهش نرخ ارسال شبکه ثانویه خواهد شد.



شکل (۳-۳) نرخ ارسال شبکه ثانویه برحسب نرخ ارسال موردنیاز شبکه اولیه

اثر تعداد کاربران ثانویه بر روی نرخ شبکه ثانویه

در شکل (۴-۳) نرخ شبکه ثانویه برحسب تعداد کاربران ثانویه و با بیشینه توان‌های متفاوت ایستگاه پایه اولیه نشان داده شده است. در این شکل نیز نرخ مورد نیاز شبکه اولیه 0.5 bit/sec/Hz در نظر گرفته شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود و در شکل نیز ملاحظه می‌شود، با افزایش تعداد کاربران شبکه ثانویه، نرخ ارسال آن افزایش می‌یابد. با توجه به رابطه (۳-۶)، میزان انرژی برداشتی از پیام‌های ارسالی شبکه اولیه با افزایش تعداد کاربران شبکه بیشتر خواهد شد در نتیجه این کاربران پس از تأمین نرخ شبکه اولیه، قادرند با نرخ بیشتری به ارسال در شبکه ثانویه بپردازند.

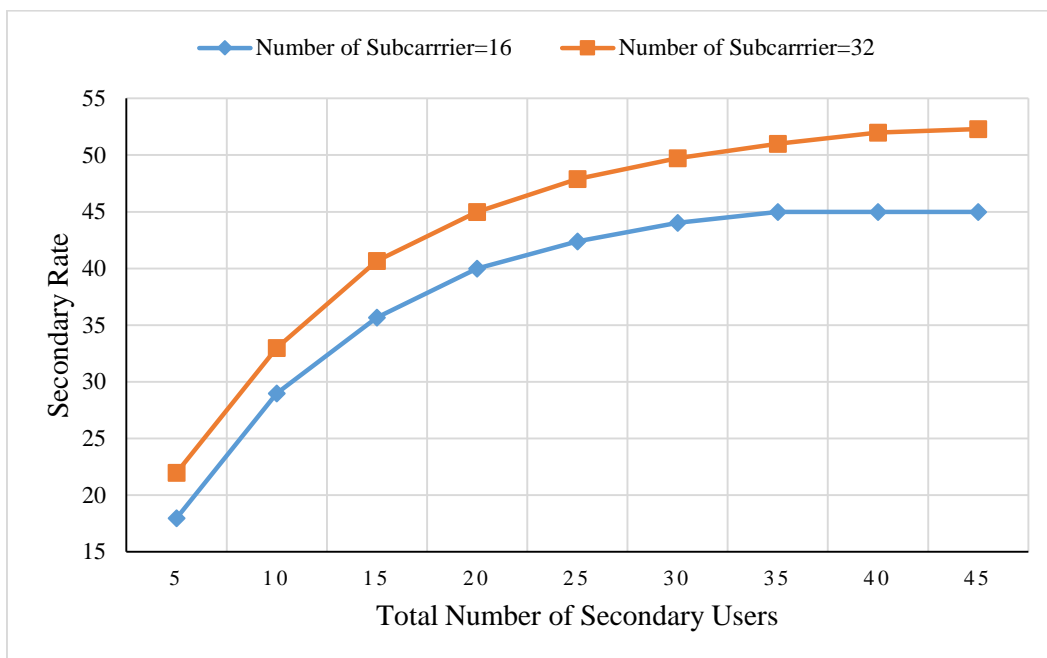


شکل (۳-۴) نرخ ارسال شبکه ثانویه برحسب تعداد کاربران ثانویه

اثر تعداد زیرحامل‌های موجود در طیف بر روی نرخ شبکه ثانویه

در انتها اثر تعداد زیرحامل‌ها را بر روی نرخ ارسال شبکه ثانویه بررسی می‌کنیم. شکل (۳-۵) نرخ ارسال شبکه ثانویه را برحسب تعداد کاربران ثانویه برای تعداد زیرحامل‌های متفاوت نشان می‌دهد. در این شبیه‌سازی بیشینه توان ارسالی اولیه 10 و تعداد زیرحامل‌ها از 16 به 32 افزایش داده شده است. مشاهده می‌شود که نرخ شبکه ثانویه با افزایش تعداد زیرحامل‌ها زیاد می‌شود. چراکه با افزایش تعداد زیرحامل‌ها فرصت‌های بیشتری برای مصرف توان ارسالی در دسترس فراهم می‌شود. این تأثیر زمانی که شرایط کانال بد است، بیشتر دیده می‌شود. دلیل این امر را می‌توان در توزیع گین کانال با محوشدگی رایلی که به صورت نمایی به فرم $\frac{1}{x} e^{-\frac{x}{\lambda}}$ است، جست. زمانی که شرایط کانال بد است به این معنی است که گین‌های بالا به بخش کوچکی از کانال اختصاص دارند. در نتیجه با افزایش تعداد زیرحامل‌ها احتمال دسترسی به شرایط

بهتر در کانال میسر خواهد شد. در حالی که شرایط کانال خوب است، افزایش تعداد زیرحامل‌ها اگر شرایط بهتری ایجاد نکند، تأثیر منفی بر روی نرخ ارسال شبکه ثانویه نخواهد داشت.



شکل (۳-۵) نرخ ارسال شبکه ثانویه برحسب تعداد زیرحامل‌های موجود در طیف

فصل ۴:

بررسی عملکرد شبکه رادیو شناختی با استفاده از تکنیک های

برداشت انرژی و درخواست تکرار خودکار

۴-۱ مقدمه

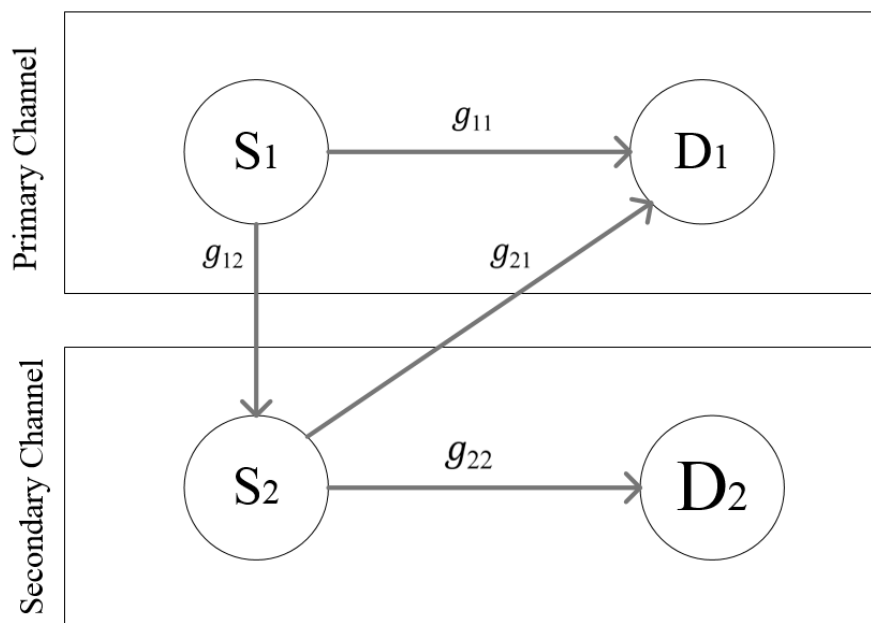
در این فصل یک سیستم مدل رادیوشناختی با به کارگیری رویکرد اجاره طیف در رهیافت روی هم-گذاری و بر مبنای روش درخواست تکرار خودکار ارائه کرده ایم. فرض شده کاربر ثانویه فاقد منبع توان است و از طریق برداشت انرژی از سیگنال RF ارسالی توسط فرستنده اولیه، توان مورد نیاز برای فعالیت در شبکه را تأمین می کند و با اجاره طیف شبکه اولیه، کیفیت ارسال آن را افزایش می دهد سپس به ارسال در شبکه ثانویه می پردازد. روش درخواست تکرار خودکار را در شبکه به کار گرفته ایم تا در مواقع عدم دریافت صحیح پیام در گیرنده، فرصت های دیگری برای ارسال همان پیام در اختیار شبکه قرار داده شود و شاهد ارتباط پایدارتری در شبکه باشیم. عملکرد سیستم را با پارامترهای احتمال قطع و میانگین نرخ ارسال بررسی می کنیم و روابطی برای حد بالای احتمال قطع و میانگین نرخ ارسال به دست می آوریم. در انتها با توجه به نتایج شبیه سازی به مقایسه عملکرد شبکه مذکور در حالت های مختلف می پردازیم.

۴-۲ سیستم مدل پیشنهادی

مدلی که برای شبکه رادیوشناختی در این فصل در نظر می گیریم، همان طور که در شکل (۴-۱) نشان داده شده است، شامل چهار گره می باشد. در کانال اولیه گره های فرستنده و گیرنده به ترتیب با نمادهای S_1 و D_1 و در کانال ثانویه گره های فرستنده و گیرنده با نمادهای S_2 و D_2 نشان داده شده است. S_1 قصد دارد اطلاعات به D_1 ارسال نماید. بدین منظور یک مسیر مستقیم بین S_1 و D_1 برقرار می باشد. علاوه بر این مسیر مستقیم، برای بهبود عملکرد شبکه، گره S_2 در صورت کدگشایی پیام با اجاره طیف شبکه اولیه، به انتقال داده ها از S_1 به D_1 کمک می کند. فرض دیگر موجود در این سیستم، اعمال تکنیک درخواست تکرار خودکار تا حداکثر M مرحله در شبکه است. بدین ترتیب در صورتی که کدگشایی در هر گیرنده با

شکست مواجهه شود، آن گیرنده پیام بازخورد NACK را به فرستنده متناظر ارسال می‌کند تا فرستنده با ارسال مجدد پیام، احتمال عدم دریافت صحیح پیام را کاهش دهد.

فرض می‌کنیم S_1 در هر مرحله با توان و نرخ ثابت P_1 و R_1 به ارسال بسته‌های اطلاعاتی می‌پردازد. این پیام به خاطر ماهیت همه‌پخشی کانال بی‌سیم، به‌طور هم‌زمان توسط گره‌های D_1 و S_2 دریافت می‌شود. همچنین در هر مرحله گره S_2 به روش تقسیم توان (PS) که در فصل ۲ به‌طور مفصل توضیح داده شد، با نسبت تقسیم توان α ، از سیگنال دریافتی انرژی برداشت می‌کند. یعنی با نسبت α از توان دریافت‌شده، انرژی برداشت می‌کند و با نسبت $1 - \alpha$ ، سعی در کدگذاری پیام ارسالی از S_1 دارد تا در صورت عدم کدگذاری صحیح پیام در D_1 ، با استفاده از انرژی برداشتی پیام را به D_1 ارسال کند. در واقع گره S_2 ابتدا در اختیار شبکه اولیه قرار می‌گیرد و پس از دریافت صحیح پیام در گیرنده اولیه، با استفاده از حفره طیفی ایجادشده، فعالیت در کانال ثانویه را آغاز می‌کند.



شکل (۴-۱) سیستم‌مدل یک شبکه رادیوشناختی با به‌کارگیری رویکرد اجاره طیف در رهیافت روی هم‌گذاری

ضرایب این کانال‌ها با محوشدگی رایلی و نوع محوشدگی کانال آهسته^۱ در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب ضرایب محوشدگی کانال در مدت‌زمان ارسال پیام ثابت می‌ماند ولی برای ارسال در مرحله بعدی به صورت تصادفی و مستقل با توزیع رایلی تغییر می‌کند [۵۰]. در نتیجه گین‌های کانال (گین‌های توان) دارای توزیع نمایی مستقل خواهند بود. گین توان کانال بین گره‌های S_1 و D_1 ، بین S_1 و S_2 ، بین S_2 و D_2 و بین S_2 و D_2 را به ترتیب با g_{11} و g_{12} و g_{21} و g_{22} نشان می‌دهیم.

در ادامه احتمال عدم کدگشایی پیام در گیرنده اولیه پس از M بار ارسال مجدد در شبکه را محاسبه می‌کنیم. سپس احتمال دسترسی کاربر ثانویه به طیف برای ارسال در کانال ثانویه و میانگین نرخ ارسال آن را بررسی و روابطی برای آن‌ها به دست می‌آوریم.

۳-۴ احتمال قطع شبکه اولیه

همان‌طور که در فصل دو بیان شد، کدگشایی پیام در گیرنده بر اساس اطلاعات متقابل در کانال ارسال انجام می‌شود. زمانی که اطلاعات متقابل در گیرنده کمتر از نرخ ارسال R_1 باشد، D_1 قادر به کدگشایی پیام نخواهد بود و اصطلاحاً گفته می‌شود شبکه در حالت قطع قرار گرفته است. احتمال کمتر بودن اطلاعات متقابل کانال از نرخ ارسال R_1 را احتمال قطع^۲ نامیده و با P_{out} نشان داده می‌شود. از این‌رو برای احتمال قطع در یک‌بار ارسال با توجه به این-که S_1 به تنهایی پیام را ارسال کرده و یا با همکاری S_2 ، می‌توان نوشت:

$$P_{out} = \begin{cases} P_r (I_{S_1, D_1} < R_1) & \text{if } S_1 \text{ sends} \\ P_r (I_{S_1, S_2, D_1} < R_1) & \text{if } S_1 \text{ and } S_2 \text{ cooperatively send} \end{cases} \quad (1-4)$$

¹ Slow fading

² Outage Probability

I_{S_1, D_1} ، اطلاعات متقابل کانال بین S_1 و D_1 و I_{S_1, S_2, D_1} اطلاعات متقابل ناشی از همکاری بین S_1 و S_2

در ارسال پیام به سمت D_1 است و از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$I_{S_1, D_1} = \log_2(1 + \rho_1 g_{11}) \quad (۲-۴)$$

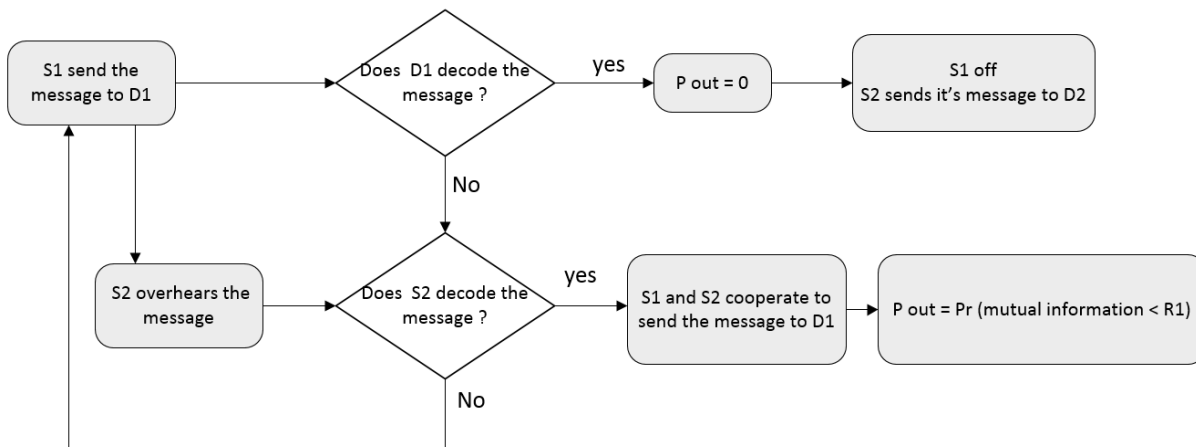
$$I_{S_1, S_2, D_1} = \log_2(1 + \rho_1 g_{11} + \rho_2 g_{21}) \quad (۳-۴)$$

$\rho_1 = \frac{P_1}{N_0}$ و $\rho_2 = \frac{P_2}{N_0}$ به ترتیب بیانگر نسبت توان سیگنال ارسالی به توان نویز در کانال اولیه و ثانویه است.

P_2 نیز توان برداشت‌شده توسط S_2 است که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$P_2 = P_1 \alpha g_{12} \quad (۴-۴)$$

در ادامه احتمال قطع شبکه اولیه را با توجه به تمام رخدادهای ممکن در ارسال تحلیل می‌کنیم.



شکل (۲-۴) بلوک دیاگرام نحوه تصمیم‌گیری S_1 و S_2 برای ارسال در هر مرحله با توجه به کدگشایی شدن پیام در D_1 و S_2

همان‌طور که در بلوک دیاگرام رسم‌شده در شکل (۲-۴) نشان داده شده است، در اولین مرحله پس

از ارسال S_1 اگر پیام در D_1 کدگشایی شده باشد، بدیهی است که احتمال قطع صفر است. در این حالت

S_1 با دریافت پیام بازخورد ACK، ارسال مجدد پیام را متوقف می‌کند و S_2 در $M-1$ زمان باقی‌مانده، شروع

به ارسال پیام در کانال ثانویه می‌کند و پس از آخرین ارسال S_2 ، گره S_1 می‌تواند به ارسال پیام جدید

بپردازد. اما اگر پیام در D_1 کدگشایی نشده باشد، پیام بازخورد NACK را به فرستنده ارسال می‌کند و کدگشایی شدن یا نشدن پیام در S_2 مهم می‌شود. اگر S_2 موفق به کدگشایی پیام شده باشد، آنگاه از مرحله بعد به همکاری با شبکه اولیه با مصرف انرژی برداشت‌شده، مبادرت می‌ورزد و پیام را پس از کدگذاری به همراه S_1 ارسال می‌کند. با توجه به روابط بیان‌شده در قسمت‌های بعدی ثابت می‌کنیم احتمال عدم کدگشایی پیام در صورت همکاری S_2 با S_1 برای ارسال پیام نسبت به ارسال S_1 به تنهایی، کمتر است. در نتیجه کمک گرفتن از شبکه ثانویه برای ارسال پیام باعث بهبود عملکرد شبکه اولیه از منظر احتمال قطع خواهد شد. در حالتی که S_2 نیز نتوانسته باشد پیام را در مرحله اول کدگشایی کند، در مرحله دوم مانند مرحله قبل، S_1 مجدداً به تنهایی پیام را ارسال می‌کند و S_2 همچنان سعی در کدگشایی پیام دارد تا بتواند با همکاری شبکه اولیه، آن را سریع‌تر به هدفش برساند و از طیف در کانال ثانویه استفاده کند. این فرایند ارسال مجدد تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که D_1 بتواند پیام را کدگشایی کند یا حداکثر تعداد دفعات ارسال انجام شده باشد. برای به دست آوردن احتمال قطع شبکه اولیه بعد از M بار ارسال، ابتدا احتمال قطع در یک بار ارسال را محاسبه می‌کنیم.

۴-۳-۱ محاسبه احتمال قطع شبکه اولیه بعد از یک بار ارسال

۴-۳-۱-۱ احتمال قطع D_1 در ارسال S_1

اگر S_1 به تنهایی پیام را ارسال کند، با جایگذاری رابطه (۲-۴) در (۱-۴) احتمال قطع برابر می‌شود

با:

$$P_r (I_{S_1, D_1} < R_1) = P_r (\log_2 (1 + \rho_1 g_{11}) < R_1) = \quad (۵-۴)$$

$$P_r (g_{11} < \frac{2^{R_1-1}}{\rho_1}) = \int_0^{\frac{2^{R_1-1}}{\rho_1}} p_{g_{11}} dg_{11} = 1 - e^{-\frac{2^{R_1-1}}{\rho_1 g_{11}}}$$

در این رابطه $p_{g_{11}}$ نشان دهنده تابع چگالی احتمال^۱ (pdf) متغیر g_{11} می باشد. همان طور که بیان شد، متغیر تصادفی g_{11} دارای توزیع احتمال نمایی با میانگین $\overline{g_{11}}$ است و تابع چگالی احتمال آن از رابطه $\frac{1}{\overline{g_{11}}} e^{-\frac{g_{11}}{\overline{g_{11}}}}$ تبعیت می کند. به طور مشابه گین توان در مسیرهای دیگر که در شکل (۴-۱) نشان داده شد، دارای توزیع احتمال نمایی با میانگین $\overline{g_{12}}$ و $\overline{g_{21}}$ و $\overline{g_{22}}$ است.

۴-۳-۱-۲ احتمال قطع D_1 در ارسال همزمان S_1 و S_2

اکنون احتمال این که D_1 با توجه به اطلاعات متقابل در ارسال همزمان S_1 و S_2 نتواند پیام را کدگشایی کند، با جایگذاری رابطه (۴-۳) در (۴-۱) محاسبه می کنیم:

$$\begin{aligned} P_r (I_{S_1, S_2, D_1} < R_1) &= P_r (\log_2 (1 + \rho_1 g_{11} + \rho_1 \alpha g_{12} g_{21}) < R_1) \quad (۴-۶) \\ &= P_r (g_{11} + \alpha g_{12} g_{21} < \frac{2^{R_1} - 1}{\rho_1}) \end{aligned}$$

محاسبه pdf فرایند تصادفی $g_{11} + \alpha g_{12} g_{21}$ دشوار است. از این رو حد بالایی برای تابع توزیع تجمعی^۲ (cdf) مورد نیاز در رابطه (۴-۶) با استفاده از لم زیر به دست می آوریم.

لم ۱: توزیع تجمعی جمع دو متغیر همواره کوچکتر مساوی حاصل ضرب توزیع تجمعی دو متغیر

است [۵۳]. اثبات این لم با فرض این که x و y دو متغیر تصادفی باشند، در رابطه زیر آورده شده است:

$$x+y \geq \max(x, y) \rightarrow P_r ((x+y) < \delta) \leq P_r (\max(x, y) < \delta) = P_r (x < \delta) \times P_r (y < \delta) \quad (۷-۴)$$

با استفاده از این لم، رابطه (۴-۶) را به صورت زیر بازنویسی می کنیم.

^۱ Probability Density Function (pdf)

^۲ Cumulative Density Function (cdf)

$$P_r(I_{S_1, S_2, D_1} < R_1) \leq P_r(g_{11} < \frac{2^{R_1} - 1}{\rho_1}) \times P_r(\alpha g_{12} g_{21} < \frac{2^{R_1} - 1}{\rho_1}) = I \times II \quad (8-4)$$

I قبلاً در رابطه (5-4) به دست آمده و برای محاسبه II داریم:

$$II = P_r(g_{12} < \frac{2^{R_1} - 1}{\alpha g_{21} \rho_1}) = \int_0^\infty \int_0^{\frac{2^{R_1} - 1}{\alpha g_{21} \rho_1}} \frac{1}{g_{12}} e^{-\frac{g_{12}}{g_{12}}} \times \frac{1}{g_{21}} e^{-\frac{g_{21}}{g_{21}}} dg_{12} dg_{21} \quad (9-4)$$

$$= 1 - \int_0^\infty \frac{1}{g_{21}} e^{-\frac{g_{21}}{g_{21}}} \times e^{-\frac{2^{R_1} - 1}{g_{12} \alpha g_{21} \rho_1}} dg_{21}$$

برای محاسبه این انتگرال از معادله بسل زیر استفاده می‌کنیم [54].

$$\int_0^\infty e^{-\frac{\beta}{4x}} \times e^{-\gamma x} dx = \sqrt{\frac{\beta}{\gamma}} K_1(\sqrt{\beta \gamma}) \quad (10-4)$$

در این رابطه $K_1(\cdot)$ تابع بسل اصلاح شده نوع دو¹ است. با توجه به این رابطه می‌توانیم فرم بسته‌ای

برای II به ترتیب زیر به دست آوریم.

$$II = 1 - \sqrt{\frac{4 g_{21} (2^{R_1} - 1)}{\alpha \rho_1 g_{12}}} K_1\left(\sqrt{\frac{4 (2^{R_1} - 1)}{\alpha \rho_1 g_{12} g_{21}}}\right) \quad (11-4)$$

در نتیجه کران بالای احتمال قطع در یکبار ارسال از طریق همکاری S_1 و S_2 مطابق رابطه زیر است:

$$P_r(I_{S_1, S_2, D_1} < R_1) \leq \left(1 - e^{-\frac{2^{R_1} - 1}{\rho_1 g_{11}}}\right) \times \left(1 - \sqrt{\frac{4 g_{21} (2^{R_1} - 1)}{\alpha \rho_1 g_{12}}} K_1\left(\sqrt{\frac{4 (2^{R_1} - 1)}{\alpha \rho_1 g_{12} g_{21}}}\right)\right) \quad (12-4)$$

با مقایسه روابط (5-4) و (12-4) درمی‌یابیم که احتمال قطع D_1 در صورتی که S_1 و S_2 با همکاری هم پیام

را ارسال کنند نسبت به حالتی که S_1 به تنهایی ارسال کند، کمتر است.

¹ Type Two Modified Bessel

۴-۳-۲ احتمال قطع شبکه اولیه بعد از M بار ارسال مجدد

همان طور که پیش تر توضیح داده شد، برای محاسبه احتمال قطع پس از M بار ارسال مجدد، بایستی تمام حالت‌های ممکن را بررسی کرد. این که آیا S_2 تا قبل از آخرین مرحله قادر به کدگشایی پیام S_1 می‌شود یا خیر و اگر موفق شد، مرحله رخداد این موفقیت مهم می‌شود زیرا با توجه به آن مرحله، احتمال قطع متفاوت خواهد شد. فرض می‌کنیم S_2 در m_1 امین مرحله از ارسال مجدد، موفق به کدگشایی پیام می‌شود. در نتیجه برای احتمال قطع D_1 بعد از M بار ارسال مجدد با توجه به توانایی یا عدم توانایی همکاری S_2 با S_1 ، رابطه دو ضابطه‌ای زیر را خواهیم داشت:

$$P_{\text{out}}(M) = \begin{cases} \left(P_r (I_{S_1, D_1} < R_1) \right)^M & \text{if } m_1 \geq M \\ \left(P_r (I_{S_1, D_1} < R_1) \right)^{m_1} \times \left(P_r (I_{S_1, S_2, D_1} < R_1) \right)^{M-m_1} & \text{if } m_1 < M \end{cases} \quad (13-4)$$

احتمال قطع زمانی برابر ضابطه اول است که S_2 تا مرحله ماقبل آخر موفق به کدگشایی پیام S_1 نشود که به موجب آن ارسال تا آخرین مرحله صرفاً توسط S_1 صورت می‌گیرد. احتمال قطع برابر ضابطه دوم خواهد بود اگر S_2 در مرحله m_1 با شرط $m_1 < M$ موفق به کدگشایی پیام شود. در نتیجه تا مرحله m_1 ارسال توسط S_1 و در $M - m_1$ مرحله باقی‌مانده ارسال با همکاری S_1 و S_2 صورت می‌گیرد. رابطه بالا را می‌توان با استفاده از قانون بیز به صورت زیر نوشت:

$$P_{\text{out}}(M) = (P_{\text{out}} | m_1 \geq M) \times P_r(m_1 \geq M) + (P_{\text{out}} | m_1 < M) \times P_r(m_1 < M) \quad (14-4)$$

برای محاسبه احتمال قطع پس از M بار ارسال با توجه به رابطه‌ی بالا، نیاز داریم روابطی برای احتمال عدم همکاری S_2 تا آخرین مرحله و احتمال کدگشایی S_2 در مرحله m_1 به دست آوریم. برای این منظور ابتدا بایستی احتمال عدم کدگشایی پیام توسط S_2 در یک بار ارسال را محاسبه می‌کنیم. این احتمال به ترتیب زیر محاسبه می‌شود:

$$P_r (I_{S_1, S_2} < R_1) = P_r (\log_2 (1 + (1 - \alpha) \rho_1 g_{12}) < R_1) = P_r (g_{12} < \frac{2^{R_1} - 1}{(1 - \alpha) \rho_1}) \quad (15-4)$$

$$= \int_0^{\frac{2^{R_1} - 1}{(1 - \alpha) \rho_1}} \frac{1}{g_{12}} e^{-\frac{g_{12}}{(1 - \alpha) \rho_1}} dg_{12} = 1 - e^{-\frac{2^{R_1} - 1}{(1 - \alpha) \rho_1}}$$

I_{S_1, S_2} بیان گر اطلاعات متقابل در S_2 ناشی از ارسال پیام S_1 است و ضریب $(1 - \alpha)$ نیز یادآور این نکته است که S_2 با این ضریب از توان دریافتی، پیام را کدگشایی می کند. به دلیل استقلال گین توان در هر مرحله از ارسال، برای محاسبه احتمال عدم موفقیت S_2 در کدگشایی پیام بعد از K مرحله ارسال، کافی است احتمال عدم موفقیت در یکبار ارسال را به توان K برسانیم. بنابراین احتمال عدم موفقیت S_2 در کدگشایی پیام S_1 تا مرحله $M - 1$ یا همان احتمال عدم همکاری S_2 با S_1 تا مرحله M معادل است با:

$$P_r (m_1 \geq M) = \left(P_r (I_{S_1, S_2} < R_1) \right)^{M-1} \quad (16-4)$$

مرحله ای که S_2 موفق به کدگشایی پیام شود را مرحله توقف¹ (SR) تلاش برای کدگشایی می نامیم و احتمال این که S_2 در مرحله m_1 موفق به کدگشایی پیام شود را با $P_r (S_2 (SR = m_1))$ نشان می دهیم. همچنین احتمال عدم کدگشایی S_2 در مرحله m_1 را با $P_r (S_2 (FR = m_1))$ نشان می دهیم و به آن مرحله ناصحیح² می گوئیم. احتمال توقف S_2 در مرحله m_1 ، به طور ضمنی این معنا را می رساند که در $m_1 - 1$ مرحله قبل، S_2 نتوانسته پیام را کدگشایی کند در نتیجه احتمال عدم کدگشایی برابر یک است. با توجه به این استدلال احتمال دریافت صحیح پیام در S_2 در m_1 امین مرحله از رابطه زیر به دست می آید:

$$P_r (S_2 (SR = m_1)) = 1 - P_r (S_2 (FR = m_1)) = \left(I_{S_1, S_2} < R_1 \right)^{m_1 - 1} - \left(I_{S_1, S_2} < R_1 \right)^{m_1} \quad (17-4)$$

¹ Stop Round

² False Round

بنابراین احتمال این که S_2 در مرحله m_1 موفق به کدگشایی پیام شود برابر است با:

$$P_r(S_2(SR = m_1)) = \left(1 - e^{-\frac{2^{R_1-1}}{(1-\alpha)\rho_1\theta_{12}}}\right)^{m_1-1} - \left(1 - e^{-\frac{2^{R_1-1}}{(1-\alpha)\rho_1\theta_{12}}}\right)^{m_1} \quad (18-4)$$

m_1 می تواند یکی از مراحل 1 تا $M-1$ باشد در نتیجه برای محاسبه احتمال عدم موفقیت D_1 در کدگشایی پیام، باید تمامی حالات ممکن را با هم جمع می کنیم. بنابراین رابطه (4-14) را می توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$P_{out}(M) = \left(P_r(I_{S_1, D_1} < R_1)\right)^M \times \left(P_r(I_{S_1, S_2} < R_1)\right)^{M-1} \quad (19-4)$$

$$+ \sum_{m_1=1}^{M-1} \left(P_r(I_{S_1, D_1} < R_1)\right)^{m_1} \times \left[\left(I_{S_1, S_2} < R_1\right)^{m_1-1} - \left(I_{S_1, S_2} < R_1\right)^{m_1}\right] \times \left(P_r(I_{S_1, S_2, D_1} < R_1)\right)^{M-m_1}$$

۴-۴ میانگین نرخ ارسال شبکه ثانویه

همان طور که بیان شد، S_2 در صورتی قادر به فعالیت در کانال ثانویه است که در وهله اول نیاز شبکه اولیه که همان کدگشایی پیام S_1 توسط D_1 است، برآورده شود آنگاه S_2 می تواند در زمان باقی مانده با استفاده از انرژی برداشت شده، به ارسال پیام خودش در کانال ثانویه پردازد. با توجه به این که D_1 در کدام مرحله قادر به کدگشایی پیام S_1 باشد، تعداد مراحل ARQ برای S_2 و میزان انرژی ای که S_2 برداشت می کند و از آن برای ارسال در مراحل بعدی استفاده می کند متفاوت خواهد شد. در نتیجه احتمال دریافت صحیح بسته اطلاعاتی در D_2 ، به مرحله توقف D_1 بستگی دارد. در بخش ۴-۳-۲ فرض کردیم گره S_2 در مرحله m_1 پیام S_1 را به طور صحیح دریافت می کند، اکنون فرض دیگری اضافه می کنیم مبنی بر این که گره D_1 در مرحله m_2 پیام S_1 را کدگشایی می کند. در نتیجه $M-m_2$ مرحله برای ارسال مجدد S_2 در کانال ثانویه

خواهیم داشت تا در صورت عدم دریافت صحیح پیام در D_2 ، پیام بازخورد NACK برای ارسال مجدد پیام به S_2 فرستاده شود.

فرض می‌کنیم گره S_2 در هر مرحله با نرخ ثابت R_2 و با توان ثابت معادل تقسیم توان برداشتی در مرحله m_2 بر تعداد مراحل باقی‌مانده برای ارسال مجدد، بسته‌های اطلاعاتی در کانال ثانویه را ارسال می‌کند. اگر گین توان کانال بین S_1 و S_2 ، در m_2 امین مرحله را با $g_{12}^{m_2}$ نشان دهیم، انرژی برداشتی گره S_2 در این مرحله برابر $\alpha P_1 g_{12}^{m_2}$ می‌شود و با توجه به این که $M - m_2$ مرحله برای ارسال پیش رو دارد، توان مصرفی در هر مرحله معادل مقدار ثابت $\frac{\alpha P_1 g_{12}^{m_2}}{M - m_2}$ خواهد بود. بدین ترتیب گره S_2 تا آخرین مرحله ARQ، توان برای ارسال اطلاعات خواهد داشت.

از آنجاکه گره D_1 می‌تواند در یکی از مراحل 1 تا M پیام کانال اولیه را کدگشایی کند، تعداد مراحل ARQ برای S_2 در کانال ثانویه از $M - 1$ تا 0 متغیر است. بنابراین به‌طور میانگین گیرنده ثانویه با احتمال زیر قادر به دریافت صحیح پیام خواهد بود:

$$P_r (D_2 (\text{success})) = \sum_{m_2=1}^M P_r (D_1 (SR = m_2)) \times P_r (D_2 (SR = M - m_2)) \quad (20-4)$$

$P_r (D_1 (SR = m_2))$ و $P_r (D_2 (SR = M - m_2))$ به ترتیب بیان‌گر احتمال موفقیت D_1 در کدگشایی پیام S_1 در مرحله m_2 و احتمال موفقیت D_2 در کدگشایی پیام کانال ثانویه پس از $M - m_2$ مرحله ارسال مجدد پیام توسط S_2 است. در نتیجه میانگین نرخ قابل دسترس در شبکه ثانویه که با $R_{secondary}$ نشان می‌دهیم، برابر خواهد شد با:

$$R_{secondary} = P_r (D_2 (\text{success})) \times R_2 \quad (21-4)$$

در ادامه احتمال‌های D_1 ($SR = m_2$) و D_2 ($SR = M - m_2$) را محاسبه می‌کنیم.

۴-۴-۱ احتمال کدگشایی شدن پیام توسط D_1 در مرحله m_2

برای محاسبه احتمال کدگشایی شدن پیام کانال اولیه در D_1 در مرحله m_2 ، به‌طور مشابه از استدلال به‌کاررفته در رابطه (۴-۱۷) کمک می‌گیریم. بنابراین داریم:

$$P_r(D_1(SR = m_2)) = P_{out}(m_2 - 1) - P_{out}(m_2) \quad (۴-۲۲)$$

$P_{out}(m_2 - 1)$ و $P_{out}(m_2)$ با استفاده از رابطه (۴-۱۹) قابل محاسبه است.

۴-۴-۲ احتمال کدگشایی شدن پیام بعد از $M - m_2$ مرحله ارسال در D_2

از نام‌گذاری $g_{22}^{m_2+1}$ و $g_{22}^{m_2+2}$ و ... g_{22}^M برای نشان دادن گین توان کانال بین گره‌های S_2 و D_2 در اولین مرحله ارسال، دومین مرحله ارسال، ... و M امین مرحله ارسال در کانال ثانویه، استفاده می‌کنیم. فرض می‌کنیم کدگشایی پیام در سمت گیرنده ثانویه به روش ترکیب حداکثر نرخ^۱ (MRC) صورت می‌گیرد. به‌عبارت دیگر D_2 در هر مرحله بر اساس تمام SNRهای دریافت‌شده تا آن مرحله عملیات کدگشایی را انجام می‌دهد. در این صورت برای احتمال موفقیت D_2 در کدگشایی پیام S_2 پس از $M - m_2$ مرحله ارسال خودکار خواهیم داشت:

$$P_r(D_2(SR = M - m_2)) = \quad (۴-۲۳)$$

$$P_r\left(\log_2\left(1 + \frac{\alpha \rho_1 g_{12}^{m_2}}{M - m_2} g_{22}^{m_2+1} + \frac{\alpha \rho_1 g_{12}^{m_2}}{M - m_2} g_{22}^{m_2+2} + \dots + \frac{\alpha \rho_1 g_{12}^{m_2}}{M - m_2} g_{22}^M\right)\right) > R_2$$

^۱ Maximum Ratio Combining

با فرض معلوم بودن $g_{12}^{m_2}$ ، می‌توانیم متغیرهای داخل عبارت لگاریتمی رابطه (۴-۲۳) را مستقل در نظر بگیریم و رابطه را به فرم ساده‌شده زیر بنویسیم:

$$P_r (D_2 (SR = M - m_2)) = P_r \left(g_{22}^{m_2+1} + g_{22}^{m_2+2} + \dots + g_{22}^M > \frac{(M - m_2)(2^{R_2} - 1)}{g_{12}^{m_2} \alpha \rho_1} \right) \quad (۴-۲۴)$$

برای محاسبه تابع چگالی احتمال متغیر $y = g_{22}^{m_2+1} + g_{22}^{m_2+2} + \dots + g_{22}^M$ ، یعنی p_y ، از تابع مولد ممان (MGF) استفاده می‌کنیم. تابع مولد ممان متغیر تصادفی X به صورت $M_X(s) = E\{e^{-sx}\}$ تعریف می‌شود که در آن E نشان‌دهنده امید ریاضی متغیر تصادفی است [۵۰]. از آنجاکه گین‌های کانال از لحاظ آماری در هر زمان ارسال مستقل از زمان ارسال دیگر در نظر گرفته می‌شود، تابع مولد ممان متغیر y را می‌توان به صورت زیر نوشت [۵۵]:

$$M_y(s) = M_{g_{22}^{m_2+1}}(s) \times M_{g_{22}^{m_2+2}}(s) \times \dots \times M_{g_{22}^M}(s) \quad (۴-۲۵)$$

تابع مولد ممان برای متغیر تصادفی با توزیع نمایی g_{22} برابر است با:

$$M_{g_{22}}(s) = \int_0^\infty e^{-s g_{22}} \frac{1}{g_{22}} e^{-\frac{g_{22}}{g_{22}}} dg_{22} = (1 + \overline{g_{22}} s)^{-1} \quad (۴-۲۶)$$

با توجه به این که متغیر g_{22} در تمامی لحظات ارسال دارای توزیع احتمال یکسان است داریم:

$$M_{g_{22}^{m_2+1}}(s) = M_{g_{22}^{m_2+2}}(s) = \dots = M_{g_{22}^M}(s) = (1 + \overline{g_{22}} s)^{-1} \quad (۴-۲۷)$$

بنابراین تابع مولد ممان متغیر y برابر است با:

$$M_y(s) = (1 + \overline{g_{22}} s)^{-(M - m_2)} \quad (۴-۲۸)$$

با استفاده از خواص عکس تبدیل لاپلاس، تابع چگالی احتمال متغیر y به صورت زیر به دست می‌آید:

$$p_y = L^{-1}(M_y(s)) = \frac{g_{22}^{-(M-m_2-1)} e^{-\frac{g_{22}}{g_{22}}}}{(M-m_2-1)! g_{22}^{(M-m_2)}} \quad (29-4)$$

اکنون با جایگذاری تابع چگالی احتمال به دست آمده برای y در رابطه (۴-۲۴)، می توان احتمال دریافت صحیح بسته اطلاعاتی S_2 در گیرنده ثانویه را بعد از $M-m_2$ مرتبه ارسال مجدد به صورت زیر محاسبه کرد:

$$P_r(D_2(SR=M-m_2)) = \int_{\frac{(M-m_2)(2^{R_2}-1)}{g_{12}^{m_2} \alpha \rho_1}}^{\infty} \frac{g_{22}^{(M-m_2-1)} e^{-\frac{g_{22}}{g_{22}}}}{(M-m_2-1)! g_{22}^{(M-m_2)}} dg_{22} \quad (30-4)$$

برای حل این انتگرال از روش جز به جز استفاده می کنیم:

$$P_r(D_2(SR=M-m_2)) = \frac{1}{(M-m_2-1)! g_{22}^{(M-m_2)}} \left[g_{22}^{(M-m_2-1)} \left(-\frac{g_{22}}{g_{22}} e^{-\frac{g_{22}}{g_{22}}} \right) - \right. \quad (31-4)$$

$$(M-m_2-1) g_{22}^{(M-m_2-2)} \left(\frac{g_{22}^2}{g_{22}^2} e^{-\frac{g_{22}}{g_{22}}} \right) +$$

$$(M-m_2-1)(M-m_2-2) g_{22}^{(M-m_2-3)} \left(\frac{g_{22}^3}{g_{22}^3} e^{-\frac{g_{22}}{g_{22}}} \right) - \dots] \frac{(M-m_2)(2^{R_2}-1)}{g_{12}^{m_2} \alpha \rho_1} =$$

$$\left[\frac{1}{(M-m_2-1)! g_{22}^{(M-m_2)}} \sum_{j=1}^{M-m_2} \frac{(M-m_2-1)! g_{22}^{(M-m_2-j)} g_{22}^j}{(M-m_2-j)!} e^{-\frac{g_{22}}{g_{22}}} \right] \frac{(M-m_2)(2^{R_2}-1)}{g_{12}^{m_2} \alpha \rho_1} =$$

$$\frac{1}{g_{22}^{(M-m_2)}} \sum_{j=1}^{M-m_2} \frac{1}{(M-m_2-j)!} \left[\frac{(M-m_2)(2^{R_2}-1)}{g_{12}^{m_2} \alpha \rho_1} \right]^{(M-m_2-j)} g_{22}^j e^{-\frac{(M-m_2)(2^{R_2}-1)}{g_{12}^{m_2} \alpha \rho_1 g_{22}}}$$

لازم به یادآوری است که برای حل رابطه (۴-۲۳) فرض کردیم که مقدار $g_{12}^{m_2}$ معلوم است، حال برای

از بین بردن اثر $g_{12}^{m_2}$ نسبت به آن میانگین می گیریم.

$$E_{g_{12}^{m_2}} \{ P_r (D_2 (SR = M - m_2)) \} = \int_0^\infty P_r (D_2 (SR = M - m_2)) \times \frac{1}{g_{12}} e^{-\frac{g_{12}^{m_2}}{g_{12}}} dg_{12}^{m_2} = \quad (32-4)$$

$$\frac{1}{g_{22}^{(M-m_2)} g_{12}} \int_0^\infty e^{-\frac{g_{12}^{m_2}}{g_{12}}} e^{-\frac{(M-m_2)(2^{R_2-1})}{g_{12}^{m_2} \alpha \rho_1 g_{22}}} \sum_{j=1}^{M-m_2} \frac{g_{22}^j}{(M-m_2-j)!} \left[\frac{(M-m_2)(2^{R_2-1})}{g_{12}^{m_2} \alpha \rho_1} \right]^{(M-m_2-j)}$$

بدین ترتیب توانستیم رابطه‌ای برای دریافت صحیح پیام در D_2 پس از $M - m_2$ مرحله ارسال خودکار

به‌دست آوریم. در نهایت با جایگذاری روابط (۲۰-۴)، (۲۲-۴) و (۳۲-۴) در (۲۱-۴)، رابطه‌ای برای میانگین

نرخ ارسال صحیح پیام در شبکه ثانویه به‌دست خواهد آمد.

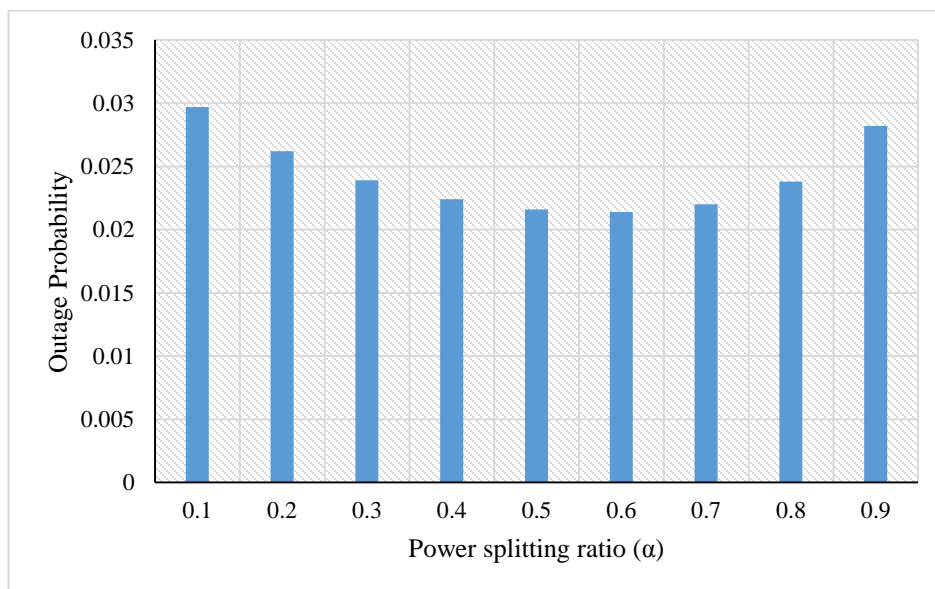
۴-۵ نتایج عددی

در این بخش از پایان‌نامه برای درک شهودی نتایج تئوری حاصل از بخش‌های قبل، به مطالعه عددی شبکه رادیوشناختی با محوشدگی رایلی در صورت به‌کارگیری راهکار توضیح داده‌شده و تعداد مراحل مختلف ARQ برای شبکه، می‌پردازیم. با توجه به نتایج، عملکرد شبکه رادیوشناختی را از منظر احتمال قطع و میانگین نرخ ارسال در حالات مختلف مقایسه می‌کنیم. مقادیر پارامترهای لازم برای شبیه‌سازی در جدول (۴-۱) آورده شده است. در قسمت‌هایی که اثر تغییر یک پارامتر خاص بر عملکرد سیستم بررسی می‌شود، بقیه پارامترها مطابق این جدول انتخاب می‌شوند.

جدول (۴-۱) مقادیر پارامترهای شبکه در شبیه‌سازی

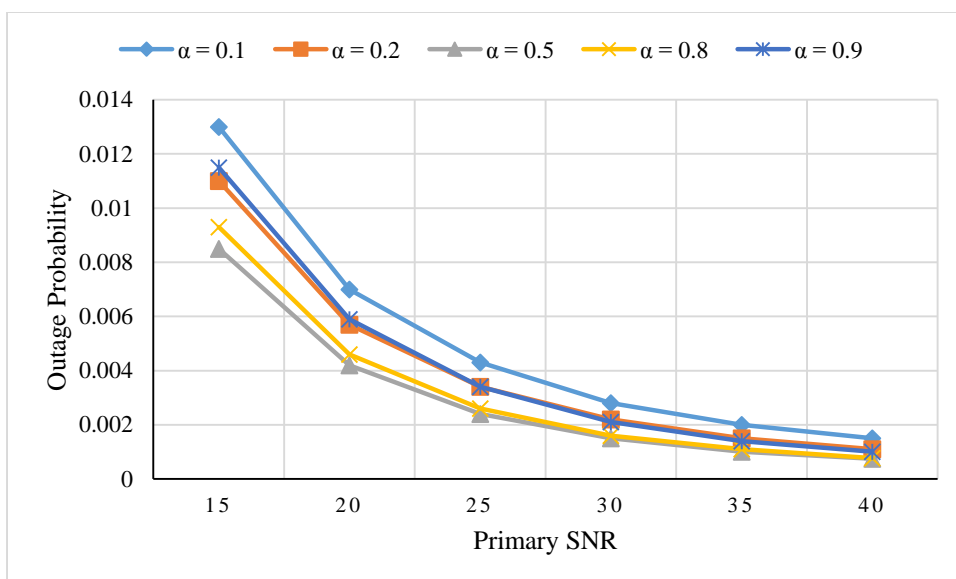
مقدار پارامتر	پارامتر
0.5	\bar{g}_{11} : میانگین گین توان کانال اولیه
0.7	\bar{g}_{12} : میانگین گین توان کانال بین فرستنده اولیه و ثانویه
0.6	\bar{g}_{21} : میانگین گین توان کانال بین فرستنده ثانویه و گیرنده اولیه
1	\bar{g}_{22} : میانگین گین توان کانال ثانویه
10	$\rho_1 = \frac{P_1}{N_0}$: نسبت سیگنال به نویز فرستنده اولیه در هر مرحله ARQ
0.5	α : نسبت تقسیم توان در گره فرستنده ثانویه

شکل (۳-۴) احتمال قطع کانال اولیه در یک شبکه رادیوشناختی با نسبت‌های مختلف تقسیم توان α در گره برداشت‌کننده توان S_2 و دو مرحله ارسال مجدد را نشان می‌دهد. نرخ ارسال و SNR شبکه اولیه نیز به ترتیب 1 و 10 bit/sec/Hz در نظر گرفته شده است. آن‌چنان که بیان شد، احتمال قطع کانال اولیه بعد از M مرحله ارسال خودکار از رابطه (۴-۱۹) حاصل می‌گردد. همان‌طور که در شکل مشخص است، با افزایش α از مقدار 0.1 تا 0.5، احتمال قطع کاهش می‌یابد و با افزایش از مقدار 0.5 تا 0.9، احتمال قطع افزایش می‌یابد. علت این پدیده این است که گره S_2 با نسبت $1-\alpha$ از توان دریافتی پیام فرستنده اولیه را کدگذاری می‌کند و در صورت موفقیت در دریافت صحیح پیام، با نسبت α از توان دریافتی پیام را ارسال می‌کند. بنابراین با کاهش α احتمال کدگذاری پیام افزایش می‌یابد و با افزایش آن، S_2 با توان بیشتری پیام را ارسال می‌کند (در صورت کدگذاری پیام). در واقع با توجه به شرایط کانال‌ها باید مصالحه‌ای بین میزان انرژی برداشتی و میزان انرژی مصرف‌شده برای کدگذاری پیام بشود تا احتمال قطع کمترین حالت ممکن شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این حالت نسبت تقسیم توان بهینه که منجر به ایجاد کمترین احتمال قطع کانال اولیه می‌شود، برابر 0.5 است.



شکل (۳-۴) احتمال قطع کانال اولیه به ازای مقادیر مختلف α در گره برداشت‌کننده توان S_2

در شکل (۴-۴) اثر نسبت تقسیم توان α بر روی احتمال قطع در SNR های متفاوت نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود در SNR های کم، احتمال قطع زیاد است و با افزایش تدریجی SNR، احتمال قطع کمتر می شود. علاوه بر این اختلاف احتمال قطع به ازای مقادیر مختلف α در SNR های کم قابل ملاحظه است و با افزایش SNR شاهد کمتر شدن این اختلاف هستیم.

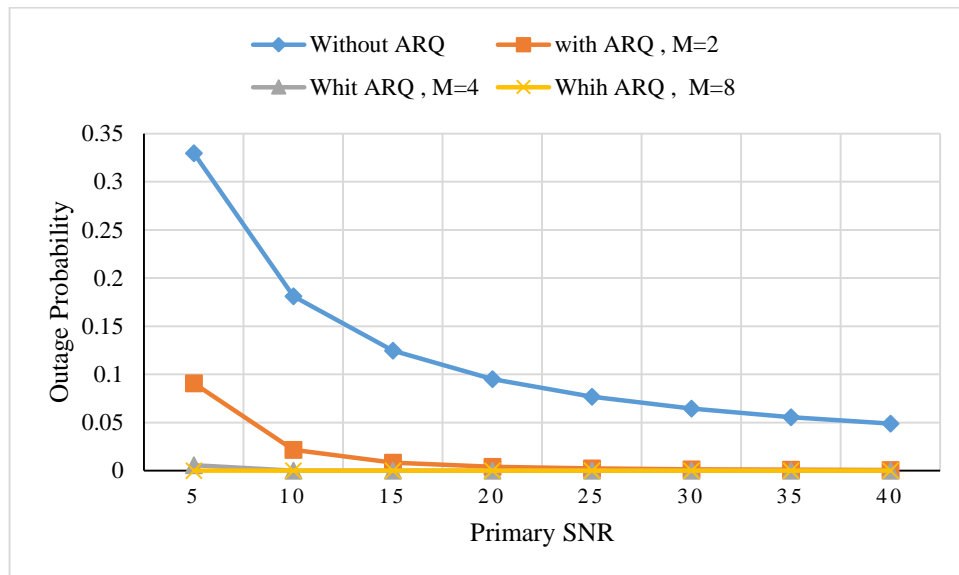


شکل (۴-۴) احتمال قطع کانال اولیه به ازای مقادیر مختلف فرستنده اولیه و α در گره برداشت کننده توان S_2

در شکل (۵-۴) احتمال قطع کانال اولیه در صورت عدم به کارگیری ARQ و در صورت به کارگیری ARQ به ازای مقادیر $M = 2, 4, 8$ ترسیم گردیده است. همان طور که در شکل مشاهده می شود هر چه تعداد مراحل تکرار ارسال خودکار بیشتر باشد، احتمال قطع شبکه اولیه کمتر خواهد بود. علاوه بر آن واضح است که حتی با اعمال یک مرحله ارسال بیشتر ($M = 2$) نسبت به عدم به کارگیری ARQ، احتمال قطع کاهش چشم گیری خواهد داشت. چراکه با توجه به توضیحات داده شده در بخش ۳-۴ ممکن است در مرحله اول گره S_2 قادر به کدگشایی پیام باشد بنابراین در مرحله دوم همکاری گره S_2 با شبکه اولیه، کاهش

احتمال قطع را در پی خواهد داشت و اگر هم قادر به کدگشایی پیام نباشد، ارسال مجدد پیام توسط S_1 به دلیل استقلال گین کانال، برابر می‌شود با احتمال قطع در حالت تک ارسال به توان دو. از آنجاکه احتمال قطع نیز عددی بین 0 و 1 است، توان صحیح آن عدد کوچک‌تری تولید خواهد کرد. لازم به ذکر است که با افزایش تعداد مراحل ارسال مجدد و کاهش احتمال قطع، نرخ ارسال نیز کاهش می‌یابد. به‌عنوان مثال در صورتی که فرستنده اولیه با نرخ ثابت 1 bit/sec/Hz اطلاعات ارسال کند و SNR ارسالی فرستنده اولیه 10 باشد، در صورتی که ارسال مجدد نداشته باشیم احتمال قطع 0.18 و در صورتی که دو، چهار و هشت مرحله ارسال مجدد داشته باشیم، به ترتیب احتمال قطع برابر خواهد شد با 0.02، 2.34×10^{-4} و 2.27×10^{-8} و

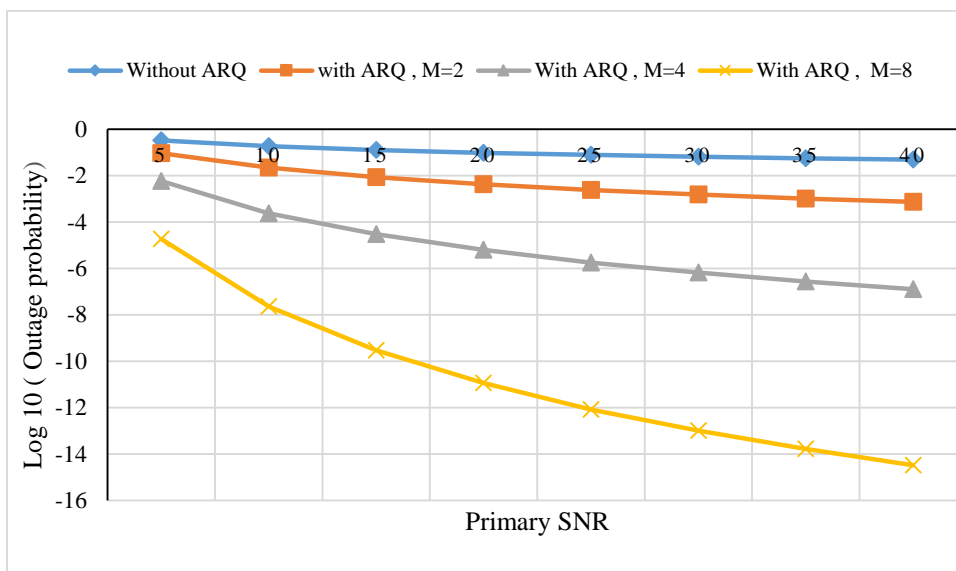
نرخ ارسال به ترتیب برابر خواهد شد با 1، $\frac{1}{2}$ ، $\frac{1}{4}$ و $\frac{1}{8}$.



شکل (۴-۵) احتمال قطع کانال اولیه در صورت عدم به‌کارگیری ARQ و به‌کارگیری ARQ به ازای مقادیر مختلف M

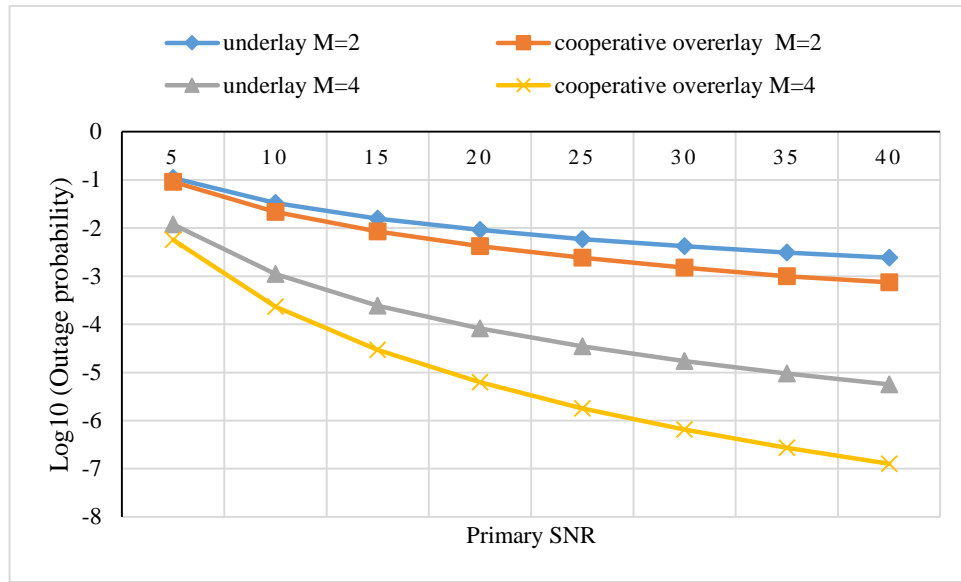
به علت وجود محدوده وسیع احتمال قطع از مقدار 0.34 (مربوط به سیستم بدون ARQ) تا 10^{-15} (مربوط به سیستم با ARQ و $M = 8$) در این شکل، احتمال قطع به ازای مقادیر متفاوت M در SNRهای

بیشتر از 20، مساوی صفر نشان داده شده است. از این رو برای مشاهده مقدار دقیق احتمال قطع، نمودار لگاریتم احتمال قطع در شکل (۴-۶) ترسیم گردیده است.



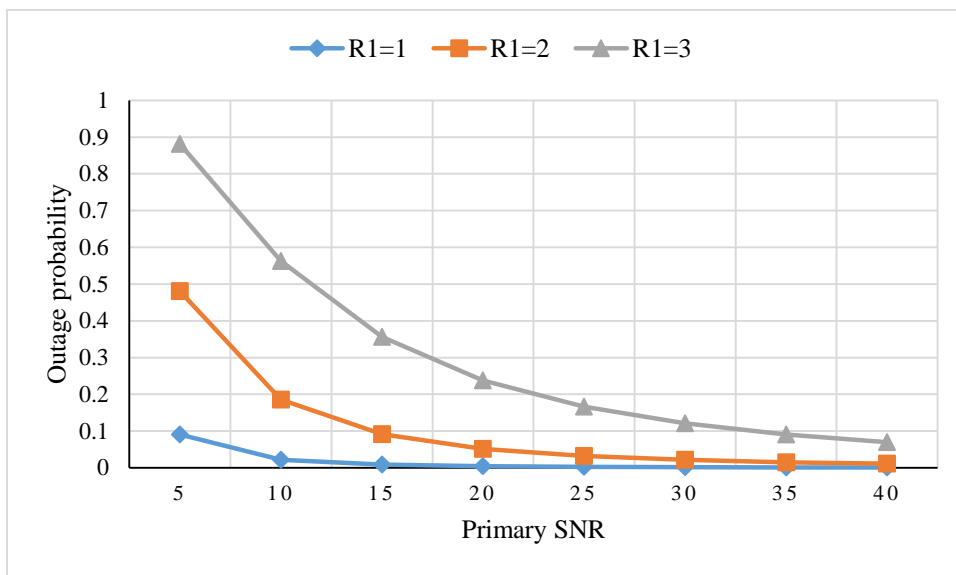
شکل (۴-۶) لگاریتم احتمال قطع کانال اولیه در صورت عدم به کارگیری ARQ و به کارگیری ARQ به ازای مقادیر مختلف M

در شکل (۴-۷) احتمال قطع کانال اولیه با دو رویکرد دسترسی طیفی روی هم گذاری مشارکتی و ارسال زمینه‌ای برای کاربر ثانویه به ازای دو مقدار M ترسیم گردیده است. مشاهده می‌شود در صورت همکاری کاربر ثانویه با اولیه با رویکرد اجاره طیف، با احتمال کمتری نسبت به رویکرد طیفی زمینه‌ای (غیر مشارکتی) شبکه دچار قطع می‌شود. به عبارت دیگر در حالتی که کاربر ثانویه درصد همکاری با کاربر اولیه برنیاید و با رعایت شرط تداخل، انرژی دریافتی را در راستای ارسال در کانال ثانویه مصرف کند، با احتمال قطع بیشتری در کانال اولیه مواجه خواهیم بود.



شکل (۷-۴) احتمال قطع کانال اولیه با دو رویکرد دسترسی طیفی روی هم‌گذاری مشارکتی و ارسال زمینه‌ای برای کاربر ثانویه به ازای دو مقدار M

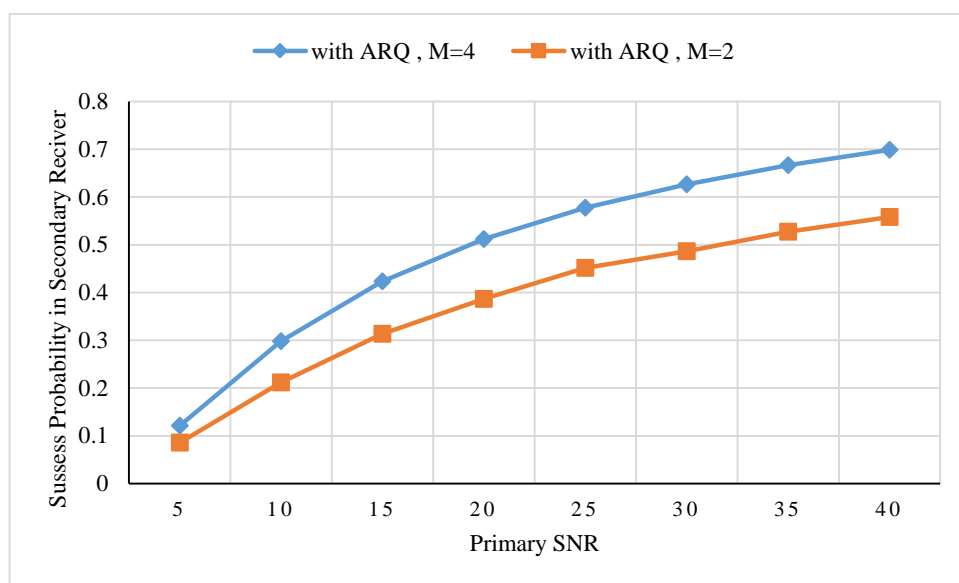
در شکل (۸-۴) تأثیر نرخ ارسال R_1 بر احتمال قطع کانال اولیه نشان داده شده است. در این شبیه‌سازی دو مرحله ارسال خودکار برای شبکه در نظر گرفته شده است. احتمال قطع به ازای سه نرخ 1، 2 و 3 bit/sec/Hz و در SNRهای متفاوت محاسبه شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود و در شکل نیز مشاهده می‌شود، با افزایش نرخ ارسال R_1 ، احتمال قطع افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به شکل، کاملاً واضح است که احتمال قطع به ازای SNRهای پایین بسیار زیاد است اما با افزایش SNR، احتمال قطع رفته‌رفته کاهش می‌یابد و منجر به بهبود عملکرد سیستم خواهد شد.



شکل (۴-۸) احتمال قطع کانال اولیه به ازای نرخ‌های ارسال متفاوت R_1 و $M=2$

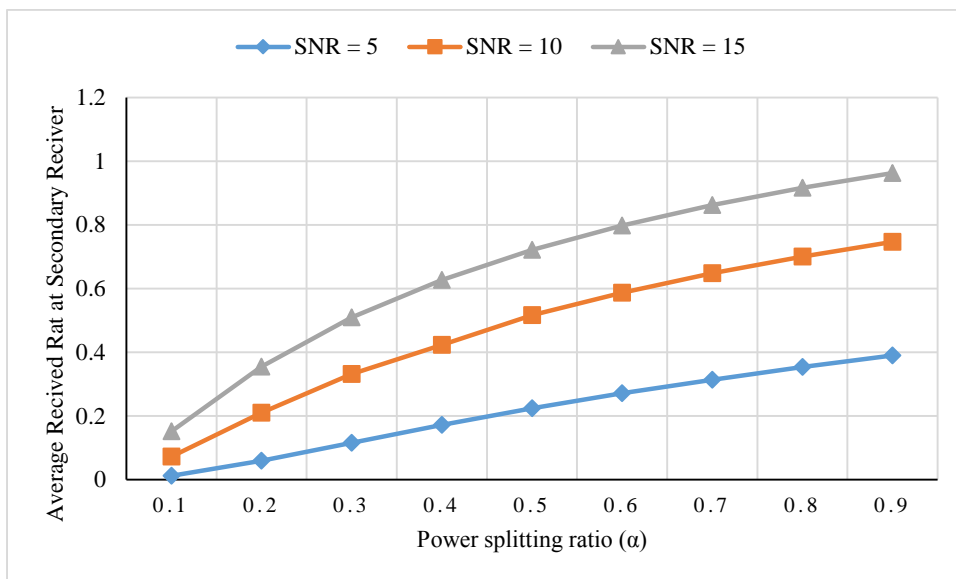
احتمال دریافت صحیح پیام در گیرنده ثانویه بعد از دو و چهار مرحله ارسال مجدد در شبکه و در بازه SNR ارسالی فرستنده اولیه از 5 تا 40 در شکل (۴-۹) رسم شده است. در این شبیه‌سازی فرض می‌کنیم کاربر ثانویه با نرخ ثابت 2 bit/sec/Hz اطلاعات ارسال می‌کند و نسبت تقسیم توان نیز 0.4 در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در بخش ۴-۴ در تحلیل میانگین نرخ ارسال برای کانال ثانویه بیان شد، یادآور می‌شویم در صورتی کاربر ثانویه می‌تواند به ارسال در کانال ثانویه بپردازد که در ابتدا پیام در کانال اولیه به‌طور صحیح دریافت شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش SNR ارسالی فرستنده اولیه، احتمال دریافت صحیح پیام در گیرنده اولیه زیاد می‌شود و متعاقباً فرصت بیشتری از لحاظ میزان انرژی برداشتی و تعداد مراحل باقی‌مانده برای ارسال مجدد کاربر ثانویه فراهم می‌شود تا بتواند به فعالیت در کانال ثانویه بپردازد. همان‌طور که در شکل نیز پیداست در SNRهای بالا شاهد دریافت صحیح پیام با احتمال بیشتری هستیم.

همچنین با افزایش تعداد مراحل تکرار خودکار در شبکه از دو به چهار مرحله، فرصت بیشتری در صورت عدم کدگشایی پیام در اختیار شبکه ثانویه قرار می‌گیرد و با توجه به رابطه (۴-۲۳)، احتمال دریافت صحیح پیام در گیرنده ثانویه افزایش می‌یابد.



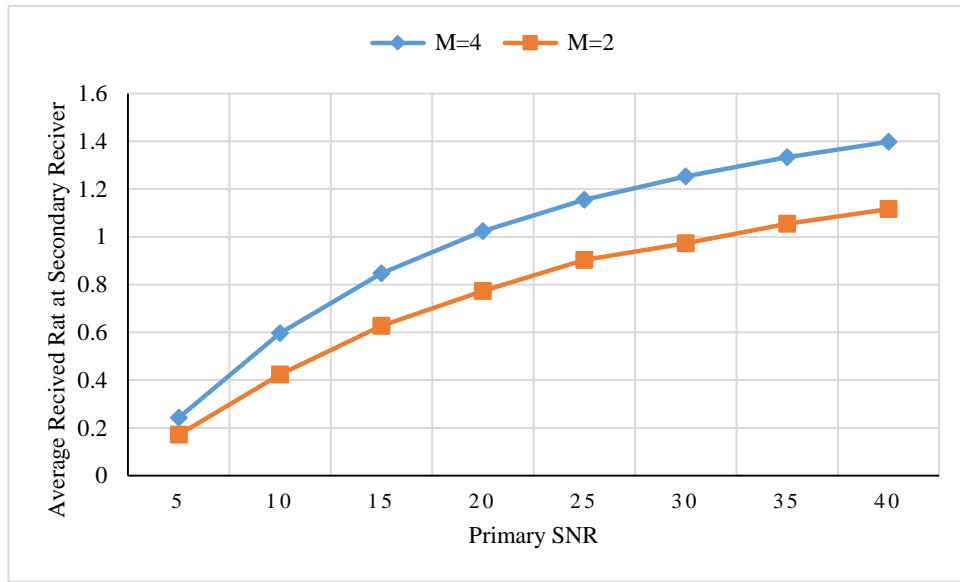
شکل (۴-۹) احتمال دریافت صحیح پیام در گیرنده ثانویه به ازای $M = 4$ و $M = 2$

علاوه بر SNR ارسالی فرستنده اولیه، نسبت تقسیم توان در گره برداشت‌کننده توان S_2 از پارامترهای تأثیرگذار بر میزان انرژی برداشت‌شده توسط S_2 و احتمال قطع کانال ثانویه است. با افزایش نسبت تقسیم توان در گره S_2 ، انرژی برداشت‌شده توسط این گره بیشتر می‌شود و با توان بالاتری پیام را در کانال ثانویه ارسال می‌کند. در نتیجه احتمال دریافت صحیح پیام در گیرنده ثانویه و نرخ ارسال این کانال بیشتر خواهد شد. در شکل (۴-۱۰) میانگین نرخ دریافت صحیح پیام در گیرنده ثانویه به ازای نسبت تقسیم توان‌های مختلف در گره S_2 و در سه SNR مختلف به تصویر کشیده شده است. در این شکل دو مرحله ARQ برای شبکه در نظر گرفته‌ایم.



شکل (۴-۱۰) میانگین نرخ دریافت پیام در گیرنده ثانویه به ازای نسبت تقسیم توان‌های مختلف

در شکل (۴-۱۱) میانگین نرخ دریافت پیام در گیرنده ثانویه بعد از دو و چهار مرحله درخواست تکرار خودکار در شبکه رسم شده است. همان‌طور که در نمودار رسم‌شده در شکل (۴-۹) توضیح داده شد، با افزایش تعداد مراحل تکرار خودکار در شبکه، احتمال دریافت صحیح پیام در گیرنده ثانویه بیشتر می‌شود. با توجه به رابطه میانگین نرخ دریافت صحیح پیام در گیرنده ثانویه که در رابطه (۴-۲۱) آورده شده است، با افزایش احتمال دریافت صحیح پیام، میانگین نرخ دریافت صحیح پیام در گیرنده ثانویه نیز افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال در صورتی که در شبکه $M = 2$ و $M = 4$ حداکثر تعداد مراحل تکرار خودکار باشند، $SNR = 20$ باشد و فرستنده ثانویه با نرخ ثابت 2 bit/sec/Hz اطلاعات ارسال کند، احتمال دریافت صحیح پیام در گیرنده ثانویه به ترتیب 0.38 و 0.51 است و میانگین نرخ دریافت 0.77 bit/sec/Hz و 1.024 خواهد شد.



شکل (۴-۱۱) میانگین نرخ دریافت پیام در گیرنده ثانویه به ازای $M = 4$ و $M = 2$

فصل ۵:

جمع‌بندی و پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آینده

۵-۱ جمع بندی

محدودیت‌های موجود در منبع طیف فرکانسی در دسترس از طرفی و عدم بهره‌وری مناسب این طیف از طرف دیگر نیازمند یک الگوی مخابراتی جدیدی است که به صورت فرصت طلبانه از طیف فرکانسی استفاده کند. با افزودن شناخت به دسته‌ای از کاربران که کاربران رادیوشناختی (ثانویه) نام دارند، به میزان قابل توجهی مشکل عدم بهره‌وری طیفی حل شده است. محدودیت دیگر موجود در شبکه‌های مخابراتی، محدودیت توان است. برداشت انرژی از سیگنال‌های رادیویی در گره‌های شبکه‌های مخابراتی شیوه‌ای نوین در تأمین توان شبکه و غلبه بر این محدودیت است.

مشارکت در شبکه‌های مخابراتی امکان برقراری ارتباطی پایدار را به ویژه زمانی که فاصله بین فرستنده و گیرنده زیاد است، میسر می‌کند و با ایجاد چندگانگی عملکرد سیستم را بهبود می‌بخشد. همچنین اعمال کنترل خطا به شیوه درخواست تکرار خودکار، از طریق ارسال خودکار پیام پس از دریافت بازخورد حصول منفی، با ایجاد چندگانگی زمانی متضمن ارتباط مطمئن خواهد بود.

هدف اصلی این پایان نامه تلفیق تکنیک‌های مطرح شده برای داشتن مخابره با نرخ بالا و بازدهی بیشتر طیف و توان و همچنین خطای کدبرداری به اندازه دلخواه کوچک در شبکه‌های رادیوشناختی بوده است. در ابتدا تخصیص بهینه توان و زیرحامل‌ها از طریق اجاره طیف شبکه اولیه و با هدف بیشینه کردن نرخ ارسال شبکه ثانویه در یک شبکه رادیوشناختی مجهز به برداشت انرژی مورد مطالعه قرار گرفته است. سپس با اعمال کنترل خطا به روش درخواست تکرار خودکار، عملکرد شبکه از منظر تئوری اطلاعات با محاسبه روابطی برای احتمال قطع و میانگین نرخ ارسال صحیح پیام بررسی شده است. نشان دادیم که با رویکرد اجاره طیف، کاربر ثانویه از طریق مشارکت با شبکه اولیه، موجب بهبود کیفیت ارسال آن در زمان کمتری می‌گردد و بدین ترتیب فرصت بیشتری در اختیار کاربران ثانویه برای استفاده از طیف باقی می‌ماند. همچنین

ملاحظه شد که اعمال روش درخواست تکرار خودکار در گیرنده‌های شبکه رادیوشناختی کاهش قابل توجه احتمال قطع را به همراه خواهد داشت.

۲-۵ پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آینده

شبکه‌های رادیوشناختی و برداشت انرژی اهمیت فراوانی در سیستم‌های مخابراتی برای افزایش بازدهی طیفی و بازدهی انرژی دارند. به علاوه کنترل خطا برای داشتن ارتباطی مطمئن در این سیستم‌ها ارزشمند است. اگرچه تحقیقات گسترده‌ای درباره چگونگی تخصیص منابع با رهیافت‌های گوناگون دسترسی طیفی و با روش‌های مختلف برداشت انرژی در این شبکه‌ها شده است، برای ادامه تحقیقات اعمال پیشنهادها زیر بر روی این شبکه‌ها ارائه می‌گردد:

- حضور چندین شنودگر در شبکه و حل مسأله بهینه‌سازی با هدف بیشینه کردن نرخ امن شبکه ثانویه
- افزودن مفهوم اشتراک انرژی بین کاربران ثانویه برای بالا بردن بازدهی انرژی برداشت‌شده
- به‌کارگیری مدولاسیون دسترسی چندگانه غیر متعامد (NOMA) به‌جای OFDMA در شبکه رادیوشناختی و بررسی بازدهی طیفی
- اعمال شیوه‌های دیگر کنترل خطا به شبکه شامل روش‌های درخواست تکرار خودکار ترکیبی با افزودن افزایشی و یا ترکیب کد
- استفاده از مجموعه‌ای از رله‌ها در شبکه ثانویه و بررسی طرح‌های مختلف انتخاب بهترین رله برای افزایش نرخ شبکه ثانویه

فهرست مراجع

- [1] I. F. Akyildiz, W. Y. Lee, M. C. Vuran, and Sh. Mohanty, "Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey," *Elsevier Computer Networks*, vol. 13, no. 50, pp. 2127-2159, Sep. 2006.
- [2] O. B. Akan, O. B. Karli, and O. Ergul, "Cognitive radio sensor networks," *IEEE Network*, vol. 23, no. 4, pp. 34-40, Aug. 2009.
- [3] T. Yucek and H. Arslan, "A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 11, no. 1, pp. 116-130, March 2009.
- [4] S. Haykin, "Cognitive radio: brain-empowered wireless communications," *IEEE journal on Selected Areas in Communications*, vol. 23, no. 2, pp. 201-220, Feb. 2005.
- [5] P. Yadav, S. Chatterjee, and P. P. Bhattacharya, "A survey on dynamic spectrum access techniques in cognitive radio," *International Journal of Next-Generation Networks*, vol. 4, no. 4, pp. 27-46, Dec. 2012.
- [6] Y. Li and A. Nosratinia, "Hybrid opportunistic scheduling in cognitive radio networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 11, no. 1, pp. 328-337, Jan. 2012.
- [7] T. Elkourdi and O. Simeone, "Spectrum leasing via cooperative interference forwarding," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 62, no. 3, pp. 1367-1372, March 2013.
- [8] O. Simeone et al. , "Spectrum leasing to cooperating secondary ad hoc networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 26, no. 1, pp. 203-213, Jan. 2008.
- [9] M. L. Ku, W. Li, Y. Chen, and K. J. R. Liu, "Advances in energy harvesting communications: past, present, and future challenges," *IEEE Communication Surveys and Tutorials*, vol. 18, no. 2, pp. 1384-1412, Nov. 2015.
- [10] X. Lu, P. Wang, D. Niyato, and D. In Kim, "Wireless networks with RF energy harvesting: a contemporary survey," *IEEE Transactions Communications Surveys and Tutorials*, vol. 17, no. 2, pp. 757-789, Nov. 2014.
- [11] M. LKu, W. Li, Y. Chen, and K. J. R. Liu, "On energy harvesting gain and diversity analysis in cooperative communications," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 33, no. 12, pp. 2641-2657, Dec. 2015.
- [12] A. Minasian, Sh. Shahbaz Panahi, and R. S. Adve, "Energy harvesting cooperative communication systems," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 13, no. 11, pp. 6118-6131, Nov. 2014.
- [13] A. A. Nasir, X. Zhou, S. Durrani, and R. A. Kennedy, "Relaying protocols for wireless energy harvesting and information processing," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, no. 7, pp. 3622-3636, July 2013.
- [14] B. Makki and A. Graell i Amat, "On noisy ARQ in block-fading channels," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 63, no. 2, pp. 731-746, Feb. 2014.

- [15] J. K. Sundararajan, D. Shah, and M. Medard, "ARQ for network coding," *IEEE International Symposium on Information Theory*, 6-11 July 2008, pp.1-10.
- [16] M. Zorzi, R. R. Rao, and L. B. Milstein, "ARQ error control for fading mobile radio channels," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 46, no. 2, pp. 445-455, May 1997.
- [17] A. Chelli, J. Barry, and M. Patzold, "On the performance of hybrid-ARQ with code combining over double Rayleigh fading channels," *IEEE 22nd International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications*, Toronto, Canada, 11-14 Sept. 2011, pp.2014-2019.
- [18] A. Chelli and M. Patzold, "Performance of hybrid-ARQ with incremental redundancy over double rayleigh fading channels," *Proceedings of the 73rd IEEE Vehicular Technology Conference*, Budapest, Hungary, 15-18 May 2011, pp. 1-6.
- [19] A. Chelli et al., "Performance and delay analysis of Hybrid ARQ with incremental redundancy over double Rayleigh fading channels," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 13, no. 11, pp. 6245-6258, Nov. 2014.
- [20] M. Jabi, L. Szczecinski, M. Benjillali, and F. Labeau, "Outage minimization via power adaptation and allocation in truncated Hybrid ARQ," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 63, no. 3, pp.711-723, March 2015.
- [21] J.N. Laneman, D.N.C. Tse, and G.W. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062-3080, Dec. 2004 .
- [22] P. Zhang et al., "Joint power allocation and relay selection for multi-hop cognitive network with ARQ," *IEEE 23rd International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications*, Sydney, NSW. 9-12 Sept. 2012, pp.16-20.
- [23] S. Srinivasa and S. A. Jafar, "The throughput potential of cognitive radio: a theoretical perspective," *IEEE Communications Magazine*, vol. 45, no. 5, pp. 73-79. May 2007.
- [24] M. G. Song, Y. J. Kim, E. Y. Park, and G. H. Im, "Rate adaptation and power allocation for cognitive radio networks with HARQ-based primary system," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 62, no. 4, pp. 1178-1187, April 2014.
- [25] Kh. Ben Letaief and W. Zhang, "Cooperative communication for cognitive radio networks," *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, no. 5, pp. 878-893, May 2009.
- [26] S. Touati, H. Boujemaa, and N. Abed, "Cooperative ARQ protocols for underlay cognitive radio networks," *Proceedings of the 21st European Signal Processing Conference*, Marrakech, France, 9-13 Sep. 2013, pp. 1-5.
- [27] W. D. Lu et al., "Cooperative OFDM relaying for opportunistic spectrum sharing: protocol design and resource allocation," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 11, no. 6, pp. 2126-2135, June 2012.
- [28] W. Liang, S. Xin Ng, and L. Hanzo, "Cooperative communication between cognitive and primary users," *IET Communications*, vol. 7, no. 17, pp. 1982-1992, Nov. 2013.

- [29] Q. Li, S. H. Ting, A. Pandharipande, and M. Motani, "Cooperate-and-access spectrum sharing with ARQ-based primary systems," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 60, no. 10, pp. 2861-2871, Oct. 2012.
- [30] S. J. Kim and G. B. Giannakis, "Optimal resource allocation for MIMO ad hoc cognitive radio networks," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 57, no. 5, pp. 3117-3133, May 2011.
- [31] L. Sibomana¹, H. J. Zepernick, Ch. Kabiri, and H. Tran, "Outage performance analysis of cognitive relay networks with BRS and MMRS," *7th International Conference on Signal Processing and Communication Systems*, 16-18 Dec. 2013, pp. 63-70.
- [32] G. A. Sardar Sidhu, F. Gao, W. Wang, and W. Chen, "Resource allocation in relay-aided OFDM cognitive radio networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 62, no. 8, pp. 3700-3710, Oct. 2013.
- [33] M. R. Abedi, N. Mokari Yamchi, M. R. Javan, and H. Yanikomeroglu, "Secure communication in OFDMA based cognitive radio networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, no. 99, pp. 1-15, April 2016.
- [34] Sh. Leng, D. Wing Kwan Ng, and R. Schober, "Power efficient and secure multiuser communication systems with wireless information and power transfer," *IEEE International Conference on Communications Workshops*, Sydney, NSW, 10-14 June 2014, pp. 30-36.
- [35] M. Zhand and Y. Liu, "Energy harvesting for physical-layer security in OFDMA networks," *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 11, no. 1, pp. 154-162, Jan. 2016.
- [36] A. A. Nasir, X. Zhou, S. Durrani, and R. A. Kennedy, "Relaying protocols for wireless energy harvesting and information processing," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, no. 7, pp. 3622-3636, July 2013.
- [37] K. Tutuncuoglu, "Cooperative energy harvesting communication with relaying and energy sharing," *Information Theory Workshop*, Seville, Spain, 9-13 Sep. 2013, pp. 330-334.
- [38] Y. Liu and X. Wang, "Information and energy cooperation in OFDM relaying: protocols and optimization," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 7, pp. 5088-5098, July 2016.
- [39] X. Lu, W. Ping, N. Dusit, and H. Ekram, "Dynamic spectrum access in cognitive radio networks with RF energy harvesting," *IEEE Wireless Communications*, vol. 21, no.3, pp. 102-110, June 2014.
- [40] J .Pradha J, S .S. Kalamkar, and A .Banerjee, "Energy harvesting cognitive radio with channel-aware sensing strategy," *IEEE Communications Letters*, vol. 18, no. 7, pp. 1771-1774, July 2014.
- [41] S. Park, H. Kim, and D. Hong, "Cognitive radio networks with energy harvesting," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, no. 3, pp. 1386-1397, March 2013.

- [42] Ph. M. Quang, T. T. Duy, and V. N. Q. Bao, "Energy harvesting-based spectrum access model in overlay cognitive radio," *International Conference on Advanced Technologies for Communications*, Ho Chi Minh, Vietnamese, 14-16 Oct. 2015, pp. 231-236.
- [43] B. Makki, A. Graell i Amat, and T. Eriksson, "Green communication via power-optimized HARQ protocols," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 63, no. 1, pp. 161-177. Jan. 2014.
- [44] J. Choi and D. To, "Energy efficiency of HARQ-IR for two-way relay systems with network coding," *European Wireless*, Poznan, Poland, 18-20 April 2012, pp. 58-64.
- [45] A. Chelli and M. S. Alouini, "On the performance of hybrid-ARQ with incremental redundancy and with code combining over relay channels," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, no. 8, pp. 3860-3871, Aug. 2013.
- [46] B. Maham, A. Behnad, and M. Debbah, "Analysis of outage probability and throughput for half-duplex hybrid-ARQ relay channels," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 61, no. 7, pp. 3061-3070, Sep. 2012.
- [47] M. Jabi, L. Szczecinski, M. Benjillali, and F. Labeau, "Outage minimization via power adaptation and allocation in truncated Hybrid ARQ," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 63, no. 3, pp.711-723, March 2015.
- [48] M. Tacca, P. Monti, and A. Fumagalli, "Cooperative and reliable ARQ protocols for energy harvesting wireless sensor nodes," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 6, no. 7, pp. 2519-2529, July 2007.
- [49] A. Aprem, Ch. R. Murthy, and N. B. Mehta, "Transmit power control policies for energy harvesting sensors with retransmissions," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 7, no. 5, pp. 895-906, Oct. 2013.
- [50] A. Goldsmith, *Wireless communications*, Cambridge university press, 2005.
- [51] Y. Liu and X. Wang, "Information and energy cooperation in OFDM relaying: protocols and optimization," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 7, pp. 5088-5098, July 2016.
- [52] M. R. Abedi, N. Mokari, and M. R. Javan, "Limited rate feedback scheme for resource allocation in secure relay-assisted OFDMA networks," *IEEE Transactions on wireless Communications*, vol. 15, no. 4, pp. 2604-2618, April 2016.
- [53] A. Bletsas, A. Khisti, D. P. Reed, and A. Lippman, "a simple cooperative diversity method based on network path selection," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 24, no. 3, pp. 659-672, March 2006.
- [54] A. S. Avestimehr and D. N. C. Tse, "Outage capacity of the fading relay channel in the low-SNR regime," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 53, no. 4, pp. 1401-1415, April 2007.
- [55] O. Knill, *Probability and Stochastic Processes with Applications*, Harvard-Web-based, 1994.

Abstract

Adding cognition to the network user equipment and RF energy harvesting technique are new methods to overcome the limitations in frequency bandwidth and power resources in wireless networks. In this thesis, at first we proposed a cooperative communication scheme for orthogonal frequency division multiple access energy harvested cognitive radio network and investigate resource allocation. In this case primary Base station wants to transmit information to some distanced destination in the present of secondary users. The station lease its spectrum to secondary users to benefit the cooperation of theme. Secondary users harvest energy from primary network signals and consume the energy to relay the primary Base station information to its destination. Meanwhile, they transmit their own information to the secondary base station using the remaining resources. We formulate the problem to an optimization one to meet the maximum rate in secondary network and solve it by dual Lagrange approach. Then we evaluate the effect of different network parameters such as total number of secondary users, primary rate and transmied power on secondary network rate.

In the following, another system model is presented in order to control an energy harvested cooperative cognitive radio network outage probability. We provide reliable communication via retransmission based on automatic repet request. Outage analysis for primary network as well as average transmission rate for secondary network are derived. Finally numerical results are presented and the comparison of the network performance in different modes are discussed.

Keywords: resource allocation, cognitive radio network, cooperative communication, RF energy harvesting, automatic repeat request, outage probability, average transmission rate.



Shahrood University of Technology
Faculty of electrical engineering and robotics

MSc Thesis in Communication

**Green Communication by Combining Energy Harvesting and
ARQ Techniques**

By: Haana Asghari

Supervisor:
Dr Mohammad Reza Javan

January 2017