

بهبود مجموع نرخ کاربران ثانویه و بهره انرژی شبکه رادیوشناختگر با استفاده از تخصیص توان و Successive Relaying

الهه مداح و محمد لاری

طیفی^۲ هستند [۱] و [۲].

اشتراک‌گذاری طیفی در شبکه‌های رادیوشناختگر، بر کمبود منابع طیفی غلبه می‌کند [۳] و [۴]. این شبکه‌ها شامل یک یا چند کاربر اولیه و یک یا چند کاربر ثانویه هستند. کاربران ثانویه مجازند تا از طیف کاربران اولیه برای ارسال اطلاعات خود استفاده کنند با این شرط که عملکرد کاربران اولیه با مشکلی مواجه نشود [۵]. معمولاً اشتراک‌گذاری طیفی به دو روش پوششی^۳ و تحت پوشش^۴ صورت می‌گیرد. در روش پوششی، کاربران ثانویه در صورت عدم استفاده کاربران اولیه از طیف، مجاز به استفاده از طیف آنها هستند. در روش تحت پوشش، کاربران ثانویه نیز هم‌زمان با کاربران اولیه، مجاز به استفاده از طیف هستند، ولی توان ارسالی کاربران ثانویه باید کنترل شده (کم) باشد تا تداخلی که در گیرنده‌های کاربران اولیه ایجاد می‌شود، عملکرد آنها را مختل نکند [۶] و [۷]. بنابراین بهبود نرخ کاربران ثانویه با در نظر گرفتن کیفیت سرویس کاربران اولیه یکی از چالش‌های اشتراک‌گذاری طیفی تحت پوشش هست [۸].

علاوه بر شبکه رادیوشناختگر، شبکه‌های مشارکتی (رله‌ای) نیز برای غلبه بر چالش‌هایی مانند کمبود منابع طیفی، تقاضای کیفیت سرویس‌دهی بیشتر به کاربران و صرفه‌جویی در توان مصرفی برای ارسال، ارائه شده است. استفاده از شبکه‌های مشارکتی در سیستم‌های مخابراتی باعث افزایش پوشش‌دهی شبکه و مقابله با اثر تضعیف مسیر می‌شود. شبکه‌های رله‌ای با استفاده از توان کمتر می‌توانند ظرفیتی برابر با حالت بدون رله داشته باشند [۹] و [۱۰] و به عبارتی با توان یکسان می‌توانند به ظرفیت بیشتری برسند. بنابراین استفاده از رله، صرفه‌جویی در توان را نیز به همراه دارد که این ویژگی در بهبود بهره انرژی مؤثر است. بنابراین در شبکه رادیوشناختگر به دلیل وجود کاربران ثانویه و احتیاج به توان بیشتر برای سرویس‌دهی به آنها، رله‌ها می‌توانند نقش مهمی داشته باشند [۱۱]. رله‌ها با توجه به نحوه ارسال به دو گروه رله‌های نیمه دوطرفه^۵ و تمام دوطرفه^۶ دسته‌بندی می‌شوند. رله‌های نیمه دوطرفه در یک بازه زمانی یک پیام را دریافت و در بازه زمانی بعدی آن را ارسال می‌کنند که موجب کاهش بهره طیفی می‌شود [۱۲]. به کارگیری رله‌های تمام دوطرفه این امکان را می‌دهد که ارسال و دریافت در یک بازه زمانی و در یک فرکانس صورت گیرد. بنابراین در استفاده از منابع زمانی و فرکانسی نسبت به رله‌های نیمه دوطرفه صرفه‌جویی به عمل آمده و بهره

چکیده: در این مقاله، یک شبکه رادیوشناختگر ارائه داده‌ایم که شامل چند کاربر ثانویه و یک کاربر اولیه است. کاربران ثانویه با روش تحت پوشش، از طیف کاربران اولیه استفاده می‌کنند. کاربر اولیه نیز دارای عملکرد Successive Relay است. در Successive Relay با استفاده از دو رله نیمه دوطرفه به عملکردی مشابه رله تمام دوطرفه ولی با شدت تداخل بین رله‌ای کمتر می‌رسیم که باعث بهبود بهره طیفی می‌شود. همچنین با وجود اضافه‌شدن کاربران ثانویه، برای حفظ عملکرد صحیح کاربر اولیه و افزایش مجموع نرخ کاربران ثانویه، استفاده از عملکرد Successive Relay در کاربر اولیه را مطرح کرده‌ایم. در شبکه رادیوشناختگر نیز کاربران دارای تداخل هستند که برای حذف تداخل از ایده هم‌ترازسازی تداخل بهره گرفته‌ایم. در ادامه با در نظر گرفتن یک نرخ آستانه برای کاربر اولیه، حداقل توان لازم را برای منبع و رله به منظور تضمین کیفیت سرویس‌دهی کاربر اولیه به دست آورده‌ایم. یک مسئله تخصیص توان بیشینه‌سازی نرخ مجموع کاربران ثانویه ارائه کرده‌ایم و جواب بهینه را به فرم بسته به دست آورده‌ایم. همچنین یک مسئله بیشینه‌سازی بهره انرژی شبکه را طرح کردیم که در دو مرحله و با روش حل مسایل کسری، جواب‌های بهینه را به فرم بسته به دست آورده‌ایم.

کلیدواژه: شبکه رادیوشناختگر، Successive Relay، حذف تداخل، هم‌ترازسازی تداخل‌ها، تخصیص توان، کیفیت سرویس‌دهی.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، استفاده از برنامه‌های کاربردی برای افزایش رفاه زندگی، کسب و کار و غیره، بخش مهمی از زندگی ما را تشکیل داده‌اند. همچنین با افزایش روزافزون تعداد کاربران و ایجاد مفاهیمی مانند اینترنت اشیا و ارتباطات دستگاه به دستگاه، تعداد دستگاه‌های متصل به شبکه مخابراتی افزایش یافته است. در این صورت، اپراتورها مجبور به مقابله با این حجم از تقاضا برای بهبود پوشش‌دهی، ظرفیت شبکه، قابلیت اطمینان، مدیریت منابع طیفی و همچنین کاهش هزینه‌های عملیاتی خود هستند و بنابراین به کارگیری فناوری‌های نوین و سیاست‌های جدید بسیار اهمیت پیدا می‌کند. اشتراک‌گذاری طیفی، رله‌های تمام دوطرفه و ترکیب آنها فناوری‌های مفیدی برای بهبود پوشش‌دهی، بهره انرژی^۱ و بهره

این مقاله در تاریخ ۲۸ آذر ماه ۱۳۹۷ دریافت و در تاریخ ۴ اردیبهشت ماه ۱۳۹۹ بازنگری شد.

الهه مداح، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، (email: e.maddah@semnan.ac.ir).

محمد لاری (نویسنده مسئول)، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، (email: m_lari@semnan.ac.ir).

1. Energy Efficiency

2. Spectral Efficiency

3. Overlay

4. Underlay

5. Half Duplex

6. Full Duplex

شبکه رادیوشناختگر و مدل SR، هر دو شبکه‌های تداخلی هستند و مدیریت تداخل در آنها ضرورت دارد. به منظور مدیریت تداخل بین رله‌ای در SR تحقیقاتی صورت گرفته و روش‌های مختلفی برای حذف کامل یا جزئی تداخل ارائه شده است [۲۹] و [۳۰]. یکی از روش‌هایی که اخیراً برای حذف تداخل در شبکه‌های مخابراتی بی‌سیم بسیار مورد توجه محققان قرار گرفته شده، هم‌ترازسازی تداخل^۵ (IA) است. مفهوم اصلی IA، هم‌تراز کردن همه تداخل‌ها در یک زیرفضا به جهت افزایش ابعاد بدون تداخل برای سیگنال اصلی است [۳۱] و [۳۲]. مدیریت و حذف تداخل در شبکه‌های رله‌ای توسط IA در مقالات محدودی مورد بررسی قرار گرفته که دو مورد از آنها شامل [۳۳] و [۳۴] هستند.

در شبکه‌های رادیوشناختگر به دلیل استفاده کاربران ثانویه از طیف کاربر اولیه، کیفیت سرویس‌دهی آن نسبت به حالتی که کاربران ثانویه وجود ندارند (شبکه معمولی) کاهش پیدا می‌کند حتی اگر تداخل کاربرهای ثانویه به طور کامل با IA حذف شوند [۳۸] و بنابراین بهبود کیفیت سرویس‌دهی کاربر اولیه نیز اهمیت پیدا می‌کند. استفاده از تخصیص توان یکی از راه حل‌های بالقوه برای رسیدن به این هدف است [۳۶]. همچنین استفاده از مدل SR در کاربر اولیه نیز می‌تواند در بهبود کیفیت سرویس آن مؤثر واقع شود. به این دلیل که با توان کمتری نسبت به حالت بدون رله، به کیفیت سرویس مورد نظر برای کاربر اولیه می‌توان دست پیدا کرد [۸]. بنابراین ما در این مقاله اشتراک‌گذاری طیفی تحت پوشش در شبکه رادیوشناختگر با شبکه اولیه رله‌ای ارائه داده‌ایم که شبکه اولیه از SR بهره گرفته است. همچنین با بهره‌گیری از IA، تداخل‌های موجود در این شبکه مدیریت شده‌اند.

بهره انرژی و بهره طیفی سیستم‌های مخابراتی دو پارامتر پراهمیت در مخابرات سبز هستند [۳۷] و بنابراین هدف اصلی این مقاله بررسی بهره انرژی کل شبکه و نرخ مجموع کاربران ثانویه با توجه به کیفیت سرویس‌دهی کاربر اولیه است. تحقیقات این مقاله به این صورت است:

- در شبکه‌های رادیوشناختگر کیفیت سرویس‌دهی شبکه اولیه بسیار اهمیت دارد و بنابراین در ابتدا حداقل توان لازم برای رسیدن به این هدف را به دست آورده‌ایم.
 - برای افزایش نرخ کاربران ثانویه، یک مسئله تخصیص توان برای بیشینه‌کردن نرخ مجموع کاربران ثانویه با توجه به کیفیت سرویس‌دهی شبکه اولیه ارائه کرده‌ایم و جواب بهینه را به فرم بسته به دست آورده‌ایم.
 - همچنین یک مسئله تخصیص توان برای بهره انرژی طرح کرده و جواب‌های بهینه را به فرم بسته به دست آورده‌ایم. با توجه به پیچیدگی مسئله، آن را در دو مرحله حل و در نهایت با معرفی یک الگوریتم، جواب کلی را بیان کرده‌ایم. در این مسئله نیز کیفیت سرویس‌دهی کاربر اولیه تضمین شده است.
- فهرست مطالبی که در ادامه مقاله به آن می‌پردازیم به این صورت است: در بخش ۲ به ارائه مدل سیستم پیشنهادی پرداخته و بعد از معرفی مدل SR و شبکه رادیوشناختگر بر اساس IA، نسبت سیگنال به نویز مربوط به هر کاربر را به دست می‌آوریم. در بخش ۳، شرایط تضمین کیفیت سرویس‌دهی کاربر اولیه را بررسی کرده و سپس دو الگوریتم تخصیص توان برای بهینه‌سازی نرخ مجموع کاربران و بهره انرژی شبکه ارائه و حل می‌کنیم و نهایتاً در بخش ۴، به شبیه‌سازی نتایج به دست آمده می‌پردازیم و بخش ۵ نیز نتیجه‌گیری مقاله هست.

طیفی بهبود پیدا می‌کند. چالش اصلی رله تمام دوطرفه تداخل شدید از سمت فرستنده رله برای گیرنده خود است که به تداخل خودی^۱ معروف است. تحقیقات زیادی برای حذف این تداخل صورت گرفته است ولی در عمل مقداری از تداخل باقی می‌ماند [۱۳] و [۱۴]. به دلیل وجود فرستنده و گیرنده رله در یک دستگاه، فاصله بین آنها کم است که این موضوع باعث افزایش توان تداخل خودی شده (کاهش اثر تضعیف مسیر) و مدیریت آن را سخت می‌کند.

علاوه بر رله‌های تمام دوطرفه، مدل دیگری، متشکل از دو رله نیمه دوطرفه در [۱۵] ارائه شده که عملکردی مشابه با آن دارد. در این مدل در هر بازه زمانی یک رله در حالت فرستندگی و دیگری در حالت گیرندگی قرار دارند. به عبارتی یکی از رله‌ها یک پیام را از منبع دریافت و رله دیگر پیام دریافتی در بازه زمانی قبلی را برای مقصد ارسال می‌کند. همه ارسال و دریافت‌ها در یک فرکانس انجام می‌شود و بنابراین تداخلی از رله فرستنده در رله گیرنده ایجاد شده که تداخل بین رله‌ای نام دارد. این دو رله نیمه دوطرفه با همکاری هم عملکردی مشابه رله تمام دوطرفه معروف به SR^۲ ایجاد می‌کنند [۱۶].

در عملکرد SR به دلیل وجود فاصله بین رله‌های فرستنده و گیرنده، تداخل بین رله‌ای^۳ نسبت به تداخل خودی شدت کمتری دارد. در فاصله زیاد بین رله‌ها شدت تداخل خیلی کمتر شده و بنابراین آن را در نظر نمی‌گیرند و در فاصله کم که تداخل قوی است تداخل به طور کامل در رله گیرنده کدگشایی و حذف می‌شود [۱۷] و [۱۸]. بنابراین با در نظر گرفتن پیچیدگی و هزینه پیاده‌سازی رله‌های تمام دوطرفه برای حذف تداخل خودی [۱۴] و همچنین به کارگیری تجهیزات موجود، استفاده از SR نیز کارآمد واقع می‌شود که برخی محققان را به خود جذب کرده است [۱۸] تا [۲۱].

با توجه به همه این توضیحات، به کارگیری رله در شبکه‌های رادیوشناختگر (شبکه رادیوشناختگر مشارکتی) برای رفع چالش‌های موجود که در ابتدا ذکر شد، بسیار مؤثر است [۲۲] تا [۲۴]. ترکیب شبکه رادیوشناختگر و SR نیز مدل‌های متنوعی را پدید می‌آورد که افزایش بهره طیفی را به دنبال دارد. همچنین در این شبکه‌ها، یک تخصیص توان بهینه مناسب می‌تواند عملکرد این سیستم‌ها را بهبود بخشد [۲۵] تا [۲۸]. در [۲۵] اشتراک‌گذاری طیف با استفاده از SR صورت می‌گیرد، به این صورت که فرستنده‌های دو کاربر ثانویه نقش رله‌ها را برای کاربر اولیه ایفا می‌کنند تا عملکرد SR شکل گیرد. سپس به بررسی احتمال قطع و بهینه‌سازی آن می‌پردازد. در [۲۶] نیز دو رله نیمه دوطرفه که عملکرد SR را پیاده‌سازی می‌کنند، به عنوان شبکه ثانویه هستند. در این مقاله، کمینه‌سازی احتمال خطای بیت و بیشینه‌سازی نرخ ارسال بررسی شده است. مرجع [۲۷] یک شبکه هایبرید ماهواره‌ای-زمینی با بهره‌گیری از SR ارائه کرده است سپس به منظور بیشینه‌سازی ظرفیت شبکه، با استفاده از روش KKT^۴ جواب‌های بهینه را به فرم بسته به دست می‌آورد. در [۲۸]، پایگاه‌های مرکزی داده در شبکه ثانویه (دو شبکه ثانویه) به عنوان رله برای شبکه اولیه ایفای نقش می‌کنند و SR را پیاده‌سازی می‌کنند. همچنین با بیشینه‌کردن نرخ کاربران ثانویه، به شکل‌دهی پرتو به صورت بهینه می‌پردازد.

1. Self Interference
2. Successive Relaying
3. Inter Relay Interference
4. Karush Kuhn Tucker

فرستنده است. در این بازه زمانی منبع دومین پیام را برای رله R_2 ارسال و رله R_1 پیام دریافتی در بازه زمانی قبلی (اولین پیام) را پس از تقویت برای مقصد ارسال می‌کند. همه ارسال و دریافت‌ها در یک پهنای فرکانسی انجام می‌شوند و بنابراین رله R_1 برای R_2 تداخل ایجاد می‌کند. به این تداخل، تداخل بین رله‌ای می‌گویند.

• بازه زمانی سوم (بازه زمانی فرد)

در این بازه زمانی رله R_1 در حالت گیرنده و رله R_2 در حالت فرستنده است. در این زمان منبع سومین پیام را برای رله R_1 ارسال و رله R_2 پیام دریافتی در بازه زمانی قبلی (دومین پیام) را پس از تقویت برای مقصد ارسال می‌کند. در اینجا هم رله R_2 برای R_1 تداخل ایجاد می‌کند.

• بازه زمانی $L+1$ (آخرین بازه زمانی)

در این بازه زمانی، رله R_2 که L امین پیام را در بازه زمانی قبلی دریافت کرده است، پس از تقویت، آن را برای مقصد ارسال می‌کند. منبع در این لحظه پیامی برای ارسال ندارد.

با توجه به توضیحات داده شده، L داده در $L+1$ بازه زمانی ارسال می‌شود. اگر مقدار L زیاد باشد، با تقریب بسیار خوبی این مدل مشابه رله تمام دوطرفه خواهد شد و بهره طیفی آن کاهش نخواهد داشت.

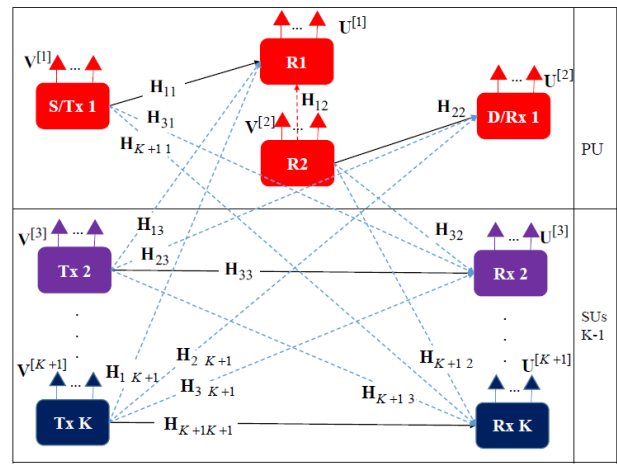
۲-۲ شبکه رادیوشناختگر بر اساس IA

همان طور که قبل تر هم اشاره شد، در این شبکه K کاربر (۱ کاربر اولیه و $K-1$ کاربر ثانویه) وجود دارد که همه گره‌ها چندآنتنی هستند. تمام گره‌های فرستنده دارای N آنتن و گیرنده‌ها دارای M آنتن هستند. رله‌ها زمانی که در حالت گیرنده هستند دارای M آنتن و زمانی که در حالت فرستنده هستند از N آنتن خود استفاده می‌کنند. چون کاربران ثانویه از طیف کاربر اولیه استفاده می‌کنند، بنابراین در همه گیرنده‌ها و همچنین رله گیرنده، تداخلی از کاربران دیگر نیز وجود دارد.

همان طور که خطوط پر در شکل ۱ مشخص است، $\mathbf{H}_{11} \in \mathbb{C}^{N \times M}$ ضریب کانال بین منبع و رله R_1 و مقصد، $\mathbf{H}_{k+1, k+1} \in \mathbb{C}^{N \times M}$ ضریب کانال بین فرستنده و گیرنده کاربر ثانویه $k+1$ ام $k \neq j \in \{2, \dots, K\}$ است. ضرایب کانال تداخلی در این شبکه به شرح زیر است که در شکل با خطوط نقطه‌چین نشان داده شده است:

$\mathbf{H}_{1, k+1} \in \mathbb{C}^{N \times M}$ ضریب کانال تداخلی بین دو رله، $\mathbf{H}_{k+1, k+2} \in \mathbb{C}^{N \times M}$ ضریب کانال بین فرستنده کاربر ثانویه k ام و رله R_1 ، $\mathbf{H}_{k+1, 2} \in \mathbb{C}^{N \times M}$ ضریب کانال بین رله R_2 و گیرنده کاربر ثانویه k ام، $\mathbf{H}_{j, k+1} \in \mathbb{C}^{N \times M}$ ضریب کانال بین فرستنده کاربر ثانویه k ام و مقصد کاربر اولیه و $\mathbf{H}_{k+1, j+1} \in \mathbb{C}^{N \times M}$ (که $k \neq j \in \{2, \dots, K\}$) ضریب کانال بین فرستنده کاربر $j+1$ و گیرنده کاربر $k+1$ است. همه این ضرایب کانال مستقل و دارای توزیع نرمال مختلط با میانگین صفر و واریانس یک هستند. فرض می‌کنیم همه کانال‌ها دارای محوشوندگی بلوکی هستند [۳۵]. به دلیل تشابه آماری کانال‌های بین منبع-رله R_1 و منبع-رله R_2 ، همچنین کانال‌های رله R_1 - مقصد و رله R_2 - مقصد در دو بازه زمانی فرد و زوج، ما در این مقاله محاسبات را فقط در یک بازه زمانی (فرد) انجام داده‌ایم.

در این مقاله فرض کرده‌ایم اطلاعات شرایط کانال در همه گره‌ها به طور کامل وجود دارد و تکنیک IA خطی را برای حذف تداخل‌های بین کاربران ثانویه و اولیه و همچنین تداخل بین رله‌ای به کار گرفته‌ایم. تعداد



شکل ۱: یک شبکه رادیوشناختگر بر اساس IA و ۱ کاربر اولیه SR و $K-1$ کاربر ثانویه در بازه زمانی فرد.

۲-۲ مدل سیستم

همان طور که در شکل ۱ مشخص است، مدل سیستم ارائه شده در این مقاله شامل یک شبکه رادیوشناختگر شامل K کاربر است. یکی از آنها کاربر اولیه (PU) و $K-1$ تا از آنها کاربر ثانویه (SU) هستند. کاربر اولیه شامل یک منبع، یک مقصد و دو رله نیمه دوطرفه با عملکرد تقویت و ارسال است که از عملکرد SR استفاده می‌کند. کاربرهای ثانویه نیز جفت فرستنده و گیرنده‌هایی هستند که از طیف کاربر اولیه برای ارسال و دریافت پیام‌هایشان استفاده می‌کنند. بنابراین یک شبکه تداخلی به وجود می‌آید که عملکرد IA، تداخل‌های این شبکه را حذف می‌کند. تمام تداخل‌ها در شکل ۱ به صورت نقطه‌چین نشان داده شده است.

برای درک بهتر در ابتدا عملکرد SR را شرح داده و سپس مدل سیستم شبکه رادیوشناختگر بر اساس IA و حداقل توان مورد نیاز برای تضمین کیفیت سرویس کاربران را بیان کرده‌ایم.

۲-۱ عملکرد Successive Relay

به این دلیل که ضمن افزایش کیفیت سرویس شبکه اولیه، توان بیشتری به کاربران ثانویه تعلق بگیرد شبکه اولیه از روش SR بهره برده است. در این روش دو رله نیمه دوطرفه با عملکرد تقویت و ارسال شرکت دارند به این صورت که در هر بازه زمانی یکی از رله‌ها در حالت فرستندگی و دیگری در حالت گیرندگی قرار دارد. در بازه زمانی بعدی، هر دو رله تغییر حالت می‌دهند. در این روش ارسال و دریافت در بخش رله‌ها هم‌زمان صورت می‌گیرد و باعث افزایش بهره طیفی نسبت به یک رله نیمه دوطرفه می‌شود. همچنین باعث افزایش پوشش دهی شبکه و کاهش اثر تضعیف می‌شود.

عملکرد SR در بازه‌های زمانی مختلف به شرح زیر است:

فرض می‌کنیم که منبع کاربر اولیه باید L (عدد زوج است) پیام را برای مقصد ارسال کند بنابراین:

• بازه زمانی اول

منبع، اولین پیام را برای رله R_1 که در حالت گیرنده قرار دارد، ارسال می‌کند. در این زمان رله R_2 پیامی برای ارسال ندارد و بنابراین خاموش است.

• بازه زمانی دوم (بازه زمانی زوج)

در این بازه زمانی، رله R_2 در حالت گیرنده و رله R_1 در حالت

بازنویسی کرد که در این روابط با توجه به یک‌بودن $\bar{\mathbf{z}}_a = \mathbf{U}^{[r]} \mathbf{z}_a$ ، $\mathbf{U}^{[r]}$ نویز گوسی جمع‌شونده با میانگین صفر و واریانس $\sigma^2 \mathbf{I}_d$ است. چون هدف ما در این مقاله اعمال تخصیص توان است و درجه آزادی مورد نظر ما نیست، فرض کرده‌ایم فقط یک رشته داده ($d=1$) از همه فرستنده‌ها ارسال می‌شود و بنابراین تعداد کاربرانی که می‌توانند در این شبکه حضور داشته باشند باید از شرط (۹) پیروی کنند [۳۹]

$$K < M + N - 2 \quad (9)$$

زمانی که شرایط (۴) و (۵) برقرار باشد و تمام تداخل‌ها با استفاده از IA به طور کامل حذف شوند، به علت $d=1$ سیگنال‌های دریافتی از بردار به یک عدد اسکالر تبدیل شده و به دست آوردن نسبت سیگنال به نویز به سادگی انجام می‌شود. در ابتدا ضریب تقویت یا نرمالیزاسیون β را از (۱۰) و سپس نسبت سیگنال به نویز کاربر اولیه و کاربر ثانویه k ام را به ترتیب به صورت (۱۱) و (۱۲) به دست آورده‌ایم

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{|y_R(n-1)|^2}} = \frac{1}{\sqrt{p_t^{[S]} |h_\nu|^2 + \sigma^2}} \quad (10)$$

$$SNR^{[1]} = \frac{p_t^{[R]} p_t^{[S]} |h_\nu|^2 |h_\nu|^2 d_{RD}^{-\alpha} d_{SR}^{-\alpha}}{p_t^{[R]} |h_\nu|^2 d_{RD}^{-\alpha} \sigma^2 + p_t^{[S]} |h_\nu|^2 d_{SR}^{-\alpha} \sigma^2 + \sigma^2} \quad (11)$$

$$SNR^{[k]} = \frac{|h_{k+1}|^2 d_k^{-\alpha} p_t^{[k]}}{\sigma^2}, \quad k = 2, \dots, K \quad (12)$$

که d_{RD} و d_{SR} به ترتیب فاصله بین منبع-رله و رله-مقصد، d_k فاصله بین فرستنده و گیرنده کاربر k ام و α ضریب تضعیف کانال است. با میانگین صفر و واریانس واحد است و \mathbf{u} بردارهای یک‌پیش‌کد کننده در فرستنده و کدگشا در گیرنده‌ها و مستقل از $\mathbf{H}_{r,r}$ هستند. بنابراین h_r نیز یک متغیر تصادفی دارای توزیع گوسی با میانگین صفر و واریانس واحد است (یک عدد است و بردار نیست) [Appendix E, ۳۸].

۲-۳ کیفیت سرویس‌دهی مورد نیاز کاربر اولیه

در شبکه‌های رادیوشناختگر تحت پوشش که اشتراک‌گذاری طیف برای کاربران ثانویه هم‌زمان با کاربر اولیه است، با این شرط ممکن می‌شود که عملکرد کاربر اولیه دچار مشکل نشود. در این روش توان نویز و تداخل در گیرنده کاربر اولیه باید کم باشد تا در عملکرد آن اختلالی ایجاد نشود. با وجود اعمال تکنیک IA به دلیل حذف تداخل، توان نویز و تداخل بسیار کم است و بنابراین با تکنیک IA، بدون در نظر گرفتن تداخل یک چارچوب مناسبی برای به اشتراک‌گذاری طیف فراهم می‌شود. در این شبکه‌ها به دلیل استفاده کاربران ثانویه از طیف کاربر اولیه (توان هم شامل آن می‌شود)، کیفیت سرویس آن کاهش پیدا می‌کند حتی اگر تداخل به طور کامل با استفاده از IA حذف شود. بنابراین علاوه بر حذف تداخل عامل دیگری که برای عملکرد صحیح کاربر اولیه مؤثر واقع می‌شود، تضمین کیفیت سرویس‌دهی مورد نیاز کاربر اولیه است. ما یک حد آستانه‌ای برای نرخ کاربر اولیه $R_{th}^{[1]}$ طبق کیفیت سرویس‌دهی مورد نیاز آن در نظر گرفته‌ایم. طبق توضیحاتی که داده شد (۱۳) باید برقرار باشد

$$R_{th}^{[1]} < \log_2(1 + SNR^{[1]}) \quad (13)$$

در این شبکه رادیوشناختگر، ابتدا کیفیت سرویس‌دهی کاربر اولیه را فراهم کرده و سپس در صورت امکان به کاربران ثانویه سرویس‌دهی می‌شود.

رشته بیت‌های ارسالی از فرستنده‌ها را d در نظر گرفته‌ایم. در نتیجه سیگنال دریافتی رله R_2 در بازه زمانی $n-1$ به فرم (۱) است

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_R(n-1) = & \sqrt{p_t^{[S]}} \mathbf{U}^{\dagger[1]}(n-1) \mathbf{H}_\nu(n-1) \mathbf{V}^{[1]}(n-1) \mathbf{x}_S(n-1) + \\ & \sqrt{p_t^{[R]}} \mathbf{U}^{\dagger[1]}(n-1) \mathbf{H}_{\nu_1}(n-1) \mathbf{V}^{[r]} \mathbf{x}_R(n-1) + \\ & \sum_{k=2}^K \sqrt{p_t^{[k]}} \mathbf{U}^{\dagger[1]}(n-1) \mathbf{H}_{k+1} \mathbf{V}^{[k+1]}(n-1) \mathbf{x}_k(n-1) + \\ & \mathbf{U}^{\dagger[1]}(n-1) \mathbf{z}_R(n-1) \end{aligned} \quad (1)$$

که $\mathbf{U}^{[r]}, \mathbf{V}^{[r]}$ به ترتیب ماتریس‌های یک $M \times d$ پیش‌کد کننده در فرستنده‌ها (رله در حالت فرستنده هم شامل می‌شود) و ماتریس‌های یک $N \times d$ حذف تداخل در گیرنده‌ها (رله در حالت گیرنده هم شامل می‌شود) هستند. $\mathbf{x}_a \in \{R, S, 2, \dots, K\}$ شامل d رشته داده ارسالی از فرستنده‌های کاربران ثانویه، منبع و رله کاربر اولیه با ویژگی $\mathbb{E}[\|\mathbf{x}_a\|^2] = p_t^{[a]}$ هستند. بردارهای نویز گوسی سفید جمع‌شونده با میانگین صفر و واریانس $\sigma^2 \mathbf{I}_N$ در گیرنده‌ها هستند که σ^2 توان نویز در هر آنتن است.

سیگنال دریافتی مقصد کاربر اولیه در بازه n ام به صورت (۲) است که $\mathbf{x}_R(n)$ ، تقویت‌شده سیگنال دریافتی رله R_2 در بازه زمانی قبلی ($\mathbf{x}_R(n) = \beta \mathbf{y}_R(n-1)$) است

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_D(n) = & \sqrt{p_t^{[R]}} \mathbf{U}^{\dagger[r]}(n) \mathbf{H}_{r,r}(n) \mathbf{V}^{[r]}(n) \mathbf{x}_R(n) + \\ & \sum_{k=2}^K \sqrt{p_t^{[k]}} \mathbf{U}^{\dagger[r]}(n) \mathbf{H}_{k+1,r}(n) \mathbf{V}^{[k+1]}(n) \mathbf{x}_k(n) + \\ & \mathbf{U}^{\dagger[r]}(n) \mathbf{z}_D(n) \end{aligned} \quad (2)$$

همچنین سیگنال دریافتی گیرنده کاربران ثانویه k ام در بازه n ام به فرم (۳) بیان می‌شود

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_k(n) = & \sqrt{p_t^{[k]}} \mathbf{U}^{\dagger[k+1]}(n) \mathbf{H}_{k+1,k+1} \mathbf{V}^{[k+1]}(n) \mathbf{x}_k(n) + \\ & \sqrt{p_t^{[R]}} \mathbf{U}^{\dagger[k+1]}(n) \mathbf{H}_{k+1,r} \mathbf{V}^{[r]}(n) \mathbf{x}_R + \\ & \sum_{\substack{j=2 \\ j \neq k}}^K \sqrt{p_t^{[j]}} \mathbf{U}^{\dagger[k+1]}(n) \mathbf{H}_{k+1,j+1} \mathbf{V}^{[j+1]}(n) \mathbf{x}_j + \\ & \mathbf{U}^{\dagger[k+1]}(n) \mathbf{z}_k(n); \quad k = 2, \dots, K \end{aligned} \quad (3)$$

زمانی که IA امکان‌پذیر باشد، اگر شرایط (۴) و (۵) برقرار باشد، همه تداخل در شبکه رادیوشناختگر و تداخل بین رله در کاربر اولیه به طور کامل حذف می‌شوند

$$\text{Rank}[\mathbf{U}^{\dagger[r]} \mathbf{H}_{r,r} \mathbf{V}^{[r]}] = d; \quad r = 1, \dots, K+1 \quad (4)$$

$$\mathbf{U}^{\dagger[r]} \mathbf{H}_{r,t} \mathbf{V}^{[t]} = \mathbf{0}; \quad \forall r \neq t; \quad t, r = 1, \dots, K+1 \quad (5)$$

بنابراین سیگنال‌های ارسالی، از بین ماتریس کانال Full Rank دریافت می‌شوند ($\mathbf{U}^{\dagger[r]} \mathbf{H}_{r,r} \mathbf{V}^{[r]} = \bar{\mathbf{H}}_r \in \mathbb{C}^{d \times d}$). با توجه به شرایط بیان‌شده روابط سیگنال‌های دریافتی را می‌توان به صورت

$$\mathbf{y}_R(n-1) = \sqrt{p_t^{[S]}} \bar{\mathbf{H}}_\nu \mathbf{x}_S + \bar{\mathbf{z}}_R \quad (6)$$

$$\mathbf{y}_D(n) = \sqrt{p_t^{[R]}} \bar{\mathbf{H}}_\nu \mathbf{x}_R + \bar{\mathbf{z}}_D \quad (7)$$

$$\mathbf{y}_k(n) = \sqrt{p_t^{[k]}} \bar{\mathbf{H}}_{k+1} \mathbf{x}_k + \bar{\mathbf{z}}_k(n); \quad k = 2, \dots, K \quad (8)$$

۳- الگوریتم‌های تخصیص توان در شبکه‌های رادیوشناختگر

بهره انرژی شبکه، توان بهینه را به کاربران اختصاص داده‌ایم.

۲-۳ مسئله تخصیص توان برای بیشینه‌کردن مجموع نرخ کاربران

در شبکه‌های رادیوشناختگر، توجیهی که کاربران ثانویه برای انتخاب کاربر اولیه و پرداخت هزینه به آن دارند، کیفیت طیف و نرخ است که کاربر اولیه برای کاربران ثانویه تأمین می‌کند. بنابراین کاربر اولیه باید علاوه بر در نظر گرفتن $R_{th}^{[1]}$ خود، نرخ مجموع کاربران ثانویه را نیز بیشینه کند. ما در این بخش با ارائه یک مسئله بهینه‌سازی به همین مورد پرداخته‌ایم. برای این کار زمانی که $2p_{t_min} \leq p_{max}$ برقرار است، حداقل توان ارسالی لازم برای منبع و رله کاربر اولیه را به آن و باقی توان $(p_{max} - 2p_{t_min}^{[1]})$ را به کاربرهای ثانویه اختصاص داده‌ایم. با تخصیص توان نرخ مجموع کاربرهای ثانویه (همان بهره طیفی) را بیشتر کرده و بنابراین مسئله بهینه‌سازی را به فرم (۱۶) مطرح کرده‌ایم

$$\begin{cases} \max_{p_t^{[1]}, p_t^{[2]}, \dots, p_t^{[K]}} \sum_{k=2}^K \log_{\tau} (1 + d_k^{-\alpha} |h_{k+1}|^{\tau} \frac{p_t^{[k]}}{\sigma^{\tau}}) \\ \text{s.t. } p_t^{[k]} \geq 0, \forall k = 2, \dots, K \\ \sum_{\tau} p_t^{[k]} = p_{max} - 2p_{t_min} \end{cases} \quad (16)$$

با استفاده از روش حل waterfilling برای توان کاربرهای ثانویه به فرم بسته رسیده و در (۱۷) نشان داده‌ایم

$$p_t^{*[k]} = (v - \frac{\sigma^{\tau}}{d_k^{-\alpha} |h_{k+1}|^{\tau}})^+ \quad (17)$$

که $x^+ = \max(x, 0)$ است و v از (۱۸) محاسبه می‌شود

$$\sum_{k=2}^K (v - \frac{\sigma^{\tau}}{d_k^{-\alpha} |h_{k+1}|^{\tau}})^+ = p_{max} - 2p_{t_min} \quad (18)$$

به دست آوردن جواب‌های این مسئله با (۱۷) و (۱۸) ساده و باعث کاهش پیچیدگی الگوریتم پیشنهادی ما می‌شود (شکل ۲).

۳-۳ مسئله تخصیص توان برای بیشینه‌کردن بهره انرژی شبکه

بهره انرژی یکی از مواردی است که به دلیل افزایش ۱۰۰۰ برابری تعداد دستگاه‌های متصل به شبکه مخابرات بی‌سیم در نسل ۵ مورد توجه قرار گرفته است که علاوه بر کاهش هزینه‌ها و مصرف انرژی باعث جلوگیری از مشکلات آلودگی زیستی می‌شود. یکی از روش‌های مؤثر برای افزایش بهره انرژی تخصیص توان است. به طور کلی بهره انرژی را نسبت مجموع نرخ کاربران (حاصل از توان مصرفی) در یک دوره ارسال به کل انرژی مصرفی تعریف می‌کنند که واحد آن بر حسب bit/s/J است. ما در این بخش بهره انرژی و یک مسئله تخصیص توان را برای بهینه‌کردن آن بررسی کرده‌ایم. کاربر اولیه از تکنیک SR استفاده می‌کند، یعنی از رله استفاده می‌شود. در این بخش خواهیم دید که با وجود استفاده از رله و منبع، بهره انرژی افزایش پیدا می‌کند.

$$p_t^{[S]} = p_t^{[R]} = p_t^{[1]} \geq \sigma^{\tau} \frac{((r_{th}^{[1]} - 1)(|h_{\tau}|^{\tau} d_{RD}^{-\alpha} + |h_1|^{\tau} d_{SR}^{-\alpha})) + \sqrt{(r_{th}^{[1]} - 1)^{\tau} (|h_{\tau}|^{\tau} d_{RD}^{-\alpha} + |h_1|^{\tau} d_{SR}^{-\alpha})^{\tau} + \tau (r_{th}^{[1]} - 1) |h_{\tau}|^{\tau} |h_1|^{\tau} d_{RD}^{-\alpha} d_{SR}^{-\alpha}}}{2 |h_{\tau}|^{\tau} |h_1|^{\tau} d_{RD}^{-\alpha} d_{SR}^{-\alpha}} \quad (14)$$

در بیشتر فعالیت‌های در این زمینه، یک توان ارسالی ثابت را برای هر کاربر در نظر گرفته‌اند که این مانع از افزایش بهبود عملکرد سیستم می‌شود، ولی در این مقاله از تخصیص توان بهینه به هر کدام از این کاربرها استفاده کرده‌ایم. برای این کار با توجه به مقدار سطح آستانه نرخ ارسال، ابتدا حداقل مقدار توان ارسالی کاربر اول را مشخص و سپس دو الگوریتم تخصیص توان را معرفی کرده‌ایم. یکی از شرایطی که در همه این موارد باید رعایت شود این است که مجموع توان ارسالی همه کاربرها از یک مقدار ثابتی کمتر باشد.

۱-۳ حداقل توان مورد نیاز کاربر اولیه برای رسیدن به کیفیت سرویس کاربر اولیه

زمانی که در شبکه رادیوشناختگر بر اساس IA، از تخصیص توان استفاده می‌شود، در درجه اول فراهم‌بودن حداقل نرخ برای کاربر اولیه اهمیت دارد. هدف ما در این بخش به دست آوردن حداقل توان لازم برای رله و منبع، به جهت تضمین کیفیت سرویس دهی کاربر اولیه است. برای رسیدن به این هدف فرض کرده‌ایم که توان‌های ارسالی از منبع و رله $(p_t^{[S]}, p_t^{[R]})$ با هم مساوی و برابر $p_t^{[1]}$ باشند، سپس با حل (۱۳) حداقل توان لازم برای رله و منبع $(p_t^{[1]})$ را به فرم (۱۴) دست آورده‌ایم. در این مقاله، الگوریتم‌های تخصیص توان وابسته به دو شرط اصلی هستند. شرط اول، محدودیت مجموع توان‌های ارسالی فرستنده‌ها و شرط دوم، حداقل توان مورد نیاز رله و منبع کاربر اولیه برای تضمین کیفیت سرویس آن است و بنابراین برای نحوه اختصاص توان به کاربرهای ثانویه و اولیه دو حالت به وجود می‌آید. حداقل توانی که برای $p_t^{[1]}$ لازم است، باید از (۱۵) پیروی کند

$$\begin{cases} p_t^{[1]} = \frac{p_{max}}{2} \text{ If } 2p_{t_min} > p_{max} \\ p_t^{[1]} \leq \frac{p_{max}}{2} \text{ If } 2p_{t_min} \leq p_{max} \end{cases} \quad (15)$$

با توجه به (۱۵) دو حالتی که اشاره شد به این صورت است:

- اگر $2p_{t_min} > p_{max}$ باشد یعنی حداقل توان مورد نیاز برای منبع و رله از کل توانی که در اختیار شبکه قرار دارد (p_{max}) بیشتر است و کاربر اولیه به کیفیت سرویس مورد نظر خود نمی‌رسد. پس کل p_{max} باید بین رله و منبع کاربر اولیه تقسیم شده و کاربران ثانویه غیر فعال شوند.

- اگر $2p_{t_min} \leq p_{max}$ باشد یعنی حداقل توان مورد نیاز برای منبع و رله فراهم می‌شود. بنابراین با توجه به تخصیص توان به کار برده شده، توان اختصاص یافته به منبع و رله مقداری بین p_{t_min} و $p_{max}/2$ است. در این حالت علاوه بر کاربر اولیه، کاربران ثانویه نیز ممکن است فعال باشند. به این صورت که p_{max} با استفاده از یک تخصیص توان بهینه با توجه به فراهم‌بودن حداقل توان مورد نیاز منبع و رله، به کاربران اختصاص داده می‌شود. در این مقاله با دو مسئله تخصیص توان بهینه‌سازی نرخ مجموع کاربران ثانویه و

$$\max_{p_t^{[1]}, \dots, p_t^{[K]}} \log_{\gamma}(\gamma + p_t^{[1]}) + \sum_{\nu} \log_{\gamma}(\gamma + p_t^{[k]} \frac{d_k^{-\alpha} |h_{k+1}|^{\nu}}{\sigma^{\nu}}) \quad (۱)$$

محاسبه p_{t_min} طبق (۱۳)

$$p_t^{[1]} \geq p_{t_min}, p_t^{[k]} \geq 0, k = 2, \dots, K \quad (۲)$$

اگر $2p_{t_min} < p_{t_max}$ (۲)

$$p_t^{[1]} = p_{t_min} \quad (۳)$$

تخصیص $2p_{t_min} - p_{t_max}$ به کاربران ثانویه طبق (۱۷) و (۱۸)

$$2 \times p_t^{[1]} + \sum_{k=2}^K p_t^{[k]} \leq p_{max} \quad (۴)$$

در غیر این صورت (۵)

اختصاص p_{max} به کاربر اولیه (۶)

غیر فعال شدن کاربران ثانویه (۷)

پایان (۸)

ارسال اطلاعات با توان‌های اختصاص یافته (۹)

پایان بازه زمانی (۱۰)

شکل ۲: الگوریتم ۱- تخصیص توان به جهت بیشینه کردن مجموع نرخ کاربران ثانویه.

مسئله تخصیص توان را برای K کاربر (یک کاربر اولیه و $K-1$ کاربر ثانویه) به فرم (۱۹) تعریف کرده‌ایم

$$\max_{p_t^{[1]}, \dots, p_t^{[K]}} EE = \frac{\log_{\gamma}(\gamma + SNR^{[k]}) + \sum_{k=2}^K \log_{\gamma}(\gamma + p_t^{[k]} \frac{d_k^{-\alpha} |h_{k+1}|^{\nu}}{\sigma^{\nu}})}{(K+1)(p_{ct} + p_{cr}) + 2p_t^{[1]} + \sum_{k=2}^K p_t^{[k]}} \quad (۱۹)$$

$$p_t^{[k]} \geq 0, p_t^{[1]} \geq p_{t_min}, k = 2, \dots, K$$

$$2 \times p_t^{[1]} + \sum_{k=2}^K p_t^{[k]} \leq p_{max}$$

که p_{ct} و p_{cr} به ترتیب توان مصرفی در سخت‌افزار گیرنده‌ها و فرستنده‌ها هستند. این مسئله یک رابطه مقعر-محدب کسری است که حل آن پیچیده و مشکل است. این مسئله زمانی که $2p_{t_min} \leq p_{max}$ برقرار است جواب بهینه دارد که برای رسیدن به جواب بهینه آن را در دو قسمت حل کرده‌ایم.

قسمت ۱

زمانی که $2p_t^{[1]} + \sum_{k=2}^K p_t^{[k]} = p_{max}$ (تمام توان برای سرویس‌دهی به کاربران مورد استفاده قرار می‌گیرد) است، بنابراین مخرج کسر در (۱۹) یک مقدار ثابت می‌شود و بهینه‌کردن صورت معادل بهینه‌کردن کل کسر است، اما با وجود متغیرهای بهینه‌سازی در مخرج $SNR^{[1]}$ حل این مسئله دشوار است. ما در این مقاله با یک تقریب مناسب به حل این مسئله پرداخته‌ایم.

همان طور که قبل‌تر هم بیان شد ما $p_t^{[R]} = p_t^{[S]} = p_t^{[1]}$ فرض کرده‌ایم، پس با تقسیم‌کردن صورت و مخرج بر $p_t^{[1]}$ رابطه $SNR^{[1]}$ را به صورت (۲۰) بازنویسی کرده‌ایم

$$SNR^{[1]} = \frac{p_t^{[1]} |h_{\nu}|^{\nu} |h_{\lambda}|^{\nu} d_{RD}^{-\alpha} d_{RD}^{-\alpha}}{|h_{\nu}|^{\nu} d_{RD}^{-\alpha} \sigma^{\nu} + |h_{\lambda}|^{\nu} d_{SR}^{-\alpha} \sigma^{\nu} + \frac{\sigma^{\nu}}{p_t^{[1]}}} \quad (۲۰)$$

که می‌توان $p_t^{[1]}$ موجود در مخرج را با تقریب خوبی برابر با p_{t_min} در نظر گرفت و بنابراین $SNR^{[1]}$ را می‌توان به صورت $p_t^{[1]} \gamma$ بیان کرد که

$$\gamma = \frac{|h_{\nu}|^{\nu} |h_{\lambda}|^{\nu} d_{SR}^{-\alpha} d_{RD}^{-\alpha}}{|h_{\nu}|^{\nu} d_{RD}^{-\alpha} \sigma^{\nu} + |h_{\lambda}|^{\nu} d_{SR}^{-\alpha} \sigma^{\nu} + \frac{\sigma^{\nu}}{p_{t_min}}} \quad (۲۱)$$

است و مسئله به فرم (۲۲) ساده می‌شود

با حل این مسئله به جواب بهینه (۲۳) رسیده‌ایم

$$p_t^{*[1]} = \left(\frac{1}{2\nu \ln \gamma} - \frac{1}{\hat{\gamma}} \right)^+ + p_{t_min} \quad (۲۳)$$

$$p_t^{*[k]} = \left(\frac{1}{\nu \ln \gamma} - \frac{\sigma^{\nu}}{d_k^{-\alpha} |h_{k+1}|^{\nu}} \right)^+, k = 2, \dots, K$$

که ν از (۲۴) محاسبه می‌شود

$$2 \left(\frac{1}{2\nu \ln \gamma} - \frac{1}{\hat{\gamma}} \right)^+ + p_{t_min} + \sum_{k=2}^K \left(\frac{1}{\nu \ln \gamma} - \frac{\sigma^{\nu}}{d_k^{-\alpha} |h_{k+1}|^{\nu}} \right)^+ \leq p_{max} \quad (۲۴)$$

و $\hat{\gamma}$ هم به فرم (۲۵) نمایش داده می‌شود

$$\hat{\gamma} = \frac{\gamma}{1 + p_{t_min}} \quad (۲۵)$$

اثبات: پیوست را ببینید.

وقتی که شرایط کانال مناسب نیست و SNR پایین است، بعد از بهینه‌سازی، توان بیشتری برای ارسال مصرف می‌شود. پس شرط $2p_t^{[1]} + \sum_{k=2}^K p_t^{[k]} = p_{max}$ برای بهینه‌سازی مناسب است. ولی در صورتی که شرایط کانال خوب و SNR زیاد باشد، مجموع توان همه کاربرها از مقدار بیشینه توان کمتر است ($2p_t^{[1]} + \sum_{k=2}^K p_t^{[k]} < p_{max}$) و قسمت ۱ و waterfilling برای بهینه‌سازی مناسب نیست به همین دلیل از روش جدیدی استفاده کرده‌ایم که برای حل مسئله‌های بهینه‌سازی کسری است و در قسمت ۲ شرح داده‌ایم.

قسمت ۲

در این حالت با یک مسئله محدب-مقعر کسری [۴۰] روبه‌رو هستیم، پس به جای حل (۱۹) می‌توان جواب‌های بهینه را از (۲۶) به دست آورد

$$f(\lambda) = \max_{p_t^{[1]}, \dots, p_t^{[K]}} \log_{\gamma}(\gamma + SNR^{[1]}) + \sum_{k=2}^K \log_{\gamma}(\gamma + p_t^{[k]} \frac{d_k^{-\alpha} |h_{k+1}|^{\nu}}{\sigma^{\nu}}) - \lambda \left((K+1)(p_{ct} + p_{cr}) + 2p_t^{[1]} + \sum_{k=2}^K p_t^{[k]} \right) \quad (۲۶)$$

$$p_t^{[k]} \geq 0, p_t^{[1]} \geq p_{t_min}, k = 2, \dots, K$$

$$2p_t^{[1]} + \sum_{k=2}^K p_t^{[k]} \leq p_{max}$$

که این مسئله هم با استفاده از تقریبی که در قسمت ۱ برای $SNR^{[1]}$ به کار برده شد ($SNR^{[1]} = p_t^{[1]} \gamma$) به یک مسئله محدب تبدیل می‌شود. پس با استفاده از روش KKT جواب‌های بهینه را می‌توان به راحتی به صورت (۲۷) به دست آورد

اطلاعات شرایط کانال به طور کامل در همه گره‌ها وجود دارد.

در این بخش علاوه بر بررسی الگوریتم‌های ارائه شده، بهبود عملکرد شبکه‌های رادیوشناختگر با استفاده از تکنیک SR را نشان می‌دهیم. برای نشان دادن هر کدام از نمودارها از عبارات مخفی استفاده کردیم. حالتی که کاربر اولیه از تکنیک SR استفاده می‌کند را با SRPU و حالتی که کاربر اولیه از SR استفاده نمی‌کند و فقط شامل یک فرستنده و یک گیرنده است (مسیر بدون رله) را با Simple PU نشان می‌دهیم. همچنین حالتی را که از الگوریتم ۱ برای پیشینه‌سازی نرخ مجموع کاربران ثانویه استفاده شده با SUPA، حالتی را که از الگوریتم ۲ برای پیشینه‌سازی بهره انرژی شبکه استفاده شده با EEPA و حالتی را که توان‌های برابر به هر کدام از کاربران (با توجه به کیفیت سرویس کاربر اولیه) اختصاص داده شده است را با Eq PA نشان می‌دهیم.

در شکل ۴، حداقل توان مورد نیاز کاربر اولیه را در حالت‌هایی که از SR بهره گرفته و زمانی که ارسال اطلاعات از مسیر بدون رله انجام شده است، در بازه‌های زمانی مختلف با هم مقایسه می‌کنیم. در هر دو حالت (۱۴)، $2p_{t_min}$ را برای کاربر اولیه با عملکرد SR و p_{t_min} را برای کاربر اولیه بدون رله (با استفاده از رابطه‌ای که [۲۸] برای p_{t_min} محاسبه کرده) رسم کردیم. همان طور که در شکل ۵ می‌بینیم در هر دو حالت نرخ کاربر اولیه به نرخ آستانه ۵ bit/sec رسیده است اما برای رسیدن به این نرخ، زمانی که کاربر اولیه از عملکرد SR بهره گرفته، توان کمتری نیاز است. بنابراین حداقل توان مورد نیاز کاربر اولیه در زمان‌های بیشتری فراهم شده و در نتیجه کاربران ثانویه بیشتری مجاز به استفاده از طیف کاربر اولیه هستند.

همان طور که مشخص است، کمترین و بیشترین مقدار توان در بازه‌های زمانی متفاوت، اختلاف زیادی دارند و بنابراین اگر در همه بازه‌های زمانی توانی برابر به کاربرها اختصاص دهیم، ممکن است توان اختصاص داده شده به کاربر اول گاهی خیلی بیشتر از توان مورد نیاز آن باشد. همچنین ممکن است با وجود p_{max} کافی توانی کمتر از نیاز کاربر اولیه به آن اختصاص داده شود که مورد اول موجب کاهش عملکرد کاربران ثانویه و مورد دوم موجب عدم عملکرد صحیح کاربر اولیه خواهد شد. با بهره‌گرفتن از تخصیص توان‌های بهینه می‌توان به افزایش عملکرد کاربران ثانویه علاوه بر فراهم کردن کیفیت سرویس‌دهی کاربر اولیه دست پیدا کرد.

در شکل ۶ و ۷، $P_{max} = K \times 0.1 \text{ W}$ ، $R_{th} = 5$ و $K = 3$ در نظر گرفته‌ایم.

در شکل ۶ به مقایسه مجموع نرخ کاربران ثانویه در دو حالت استفاده و بدون استفاده از عملکرد SR پرداخته‌ایم. زمانی که کاربر اولیه از عملکرد SR استفاده نمی‌کند (از مسیر بدون رله اطلاعات ارسال می‌شوند) در SNRهای پایین (۰ dB تا ۵ dB) حداقل توان مورد نیاز برای تضمین کیفیت سرویس‌دهی کاربر اولیه بیشتر یا برابر با کل توان در اختیار شبکه است و بنابراین همه توان به فرستنده کاربر اولیه اختصاص یافته و توانی برای سرویس‌دهی به کاربران ثانویه باقی نمانده است. استفاده از عملکرد

(۱) محاسبه p_{t_min} طبق (۱۳)

(۲) اگر $2p_{t_min} < p_{t_max}$

(۳) حل مسئله بهره انرژی (۱۹) طبق جواب کلی ارائه شده طبق قسمت ۱ و ۲

(۴) در غیر این صورت

(۵) اختصاص p_{max} به کاربر اولیه

(۶) غیر فعال شدن کاربران ثانویه

(۷) پایان

(۸) ارسال اطلاعات با توان‌های اختصاص یافته

(۹) پایان بازه زمانی

شکل ۳: الگوریتم ۲- تخصیص توان به جهت پیشینه‌کردن بهره انرژی شبکه.

$$p_t^{*[1]} = \max \left\{ \frac{1}{\gamma \lambda \ln 2} - \frac{1}{\gamma}, p_{t_min} \right\}$$

$$p_t^{*[k]} = \max \left\{ \frac{1}{\lambda \ln 2} - \frac{\sigma^\tau}{d_k^{-\alpha} |h_{k+1}|}, 0 \right\}, k = 2, \dots, K \quad (27)$$

که در این جواب‌ها شرط $2p_t^{*[1]} + \sum_{k=2}^K p_t^{*[k]} \leq p_{max}$ همچنان وجود دارد.

با جایگذاری این روابط در $f(\lambda)$ و حل کردن $f(\lambda) = 0$ ، بهینه به دست می‌آید [۴۰]. اگر (۲۷) به صورت $p_t^{*[1]} = p_{t_min}$ و $p_t^{*[k]} = 0$ باشد، λ بهینه به راحتی به دست می‌آید ولی اگر روابط به صورت $p_t^{*[k]} = \frac{1}{\lambda \ln 2} - \frac{\sigma^\tau}{d_k^{-\alpha} |h_{k+1}|}, k = 2, \dots, K$ و $p_t^{*[1]} = \frac{1}{\gamma \lambda \ln 2} - \frac{1}{\gamma}$ باشد، حل $f(\lambda) = 0$ دشوار است که با حل آن λ^* به صورت (۲۸) حاصل می‌شود و $\varphi(x)$ تابع Lambert است.

در نهایت با استفاده از قسمت ۱ و قسمت ۲ جواب کلی (۱۹) را با اعمال شرط $2p_t^{*[1]} + \sum_{k=2}^K p_t^{*[k]} \leq p_{max}$ بیان کرده‌ایم:

الف) اگر $2p_t^{*[1]} + \sum_{k=2}^K p_t^{*[k]} < p_{max}$ باشد از (۲۷) و (۲۸) استفاده می‌کنیم.

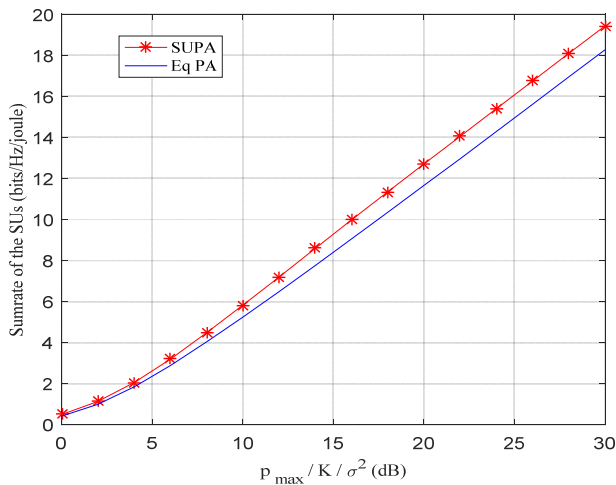
ب) اگر $2p_t^{*[1]} + \sum_{k=2}^K p_t^{*[k]} \geq p_{max}$ و $2p_{t_min} \leq p_{max}$ باشد از (۲۲) و (۲۳) استفاده می‌کنیم.

ج) اگر $2p_{t_min} \geq p_{max}$ باشد، در این حالت همه توان به منبع و رله کاربر اولیه اختصاص داده می‌شود و مسئله جواب نخواهد داشت. جواب بهینه با استفاده از شکل ۳ به دست می‌آید.

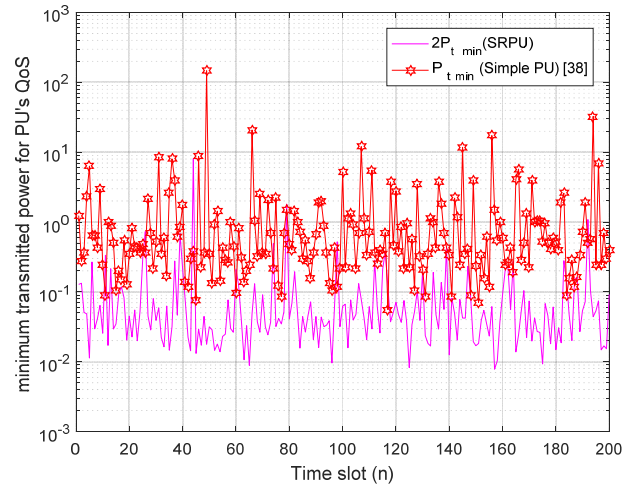
۴- شبیه‌سازی

ما در این بخش به شبیه‌سازی الگوریتم‌های ارائه شده و بررسی آنها خواهیم پرداخت. به این منظور فرض کرده‌ایم که هر فرستنده ۱ رشته داده را ارسال می‌کند و از الگوریتم حداقل‌سازی نشتی تداخل یا Minimum Interference Leakage (MinIL) برای طراحی ماتریس‌ها و حذف تداخل‌ها استفاده می‌شود [۴۱]. کانال‌ها دارای محوشوندگی رایلی بلوکی و تحت تأثیر افت مسیر با ضریب تضعیف ۶ هستند و فاصله‌ها به صورت $d_{SD} = d_k = 1$ و $d_{RD} = d_{SD} = 0.5$ می‌باشد. تعداد آنتن‌های فرستنده و گیرنده را نیز ۳ در نظر گرفتیم. همچنین فرض می‌شود که

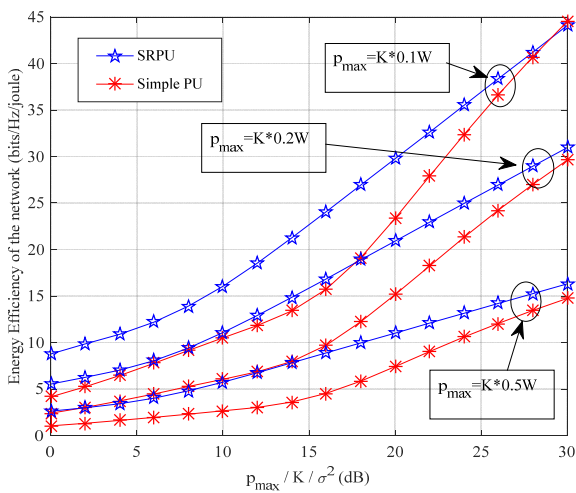
$$\lambda^* = \frac{K \varphi \left(\frac{\ln 2}{eK} \left(\frac{\gamma}{\gamma \ln 2} \prod_{k=2}^K \frac{d_k^{-\alpha} |h_{k+1}|^\tau}{\sigma^\tau \ln 2} \right)^{\frac{1}{K}} ((K+1)(p_{ct} + p_{cr}) - \frac{\gamma}{\gamma} - \sum_{k=2}^K \frac{\sigma^\tau}{d_k^{-\alpha} |h_{k+1}|^\tau} \right)}{((K+1)(p_{ct} + p_{cr}) - \frac{\gamma}{\gamma} - \sum_{k=2}^K \frac{\sigma^\tau}{d_k^{-\alpha} |h_{k+1}|^\tau}) \ln 2} \quad (28)$$



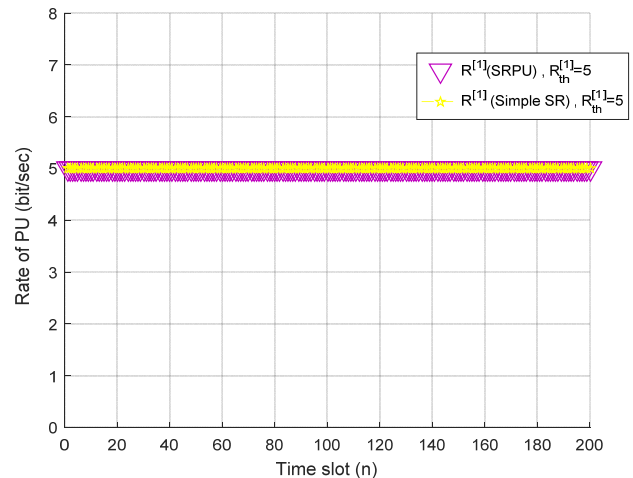
شکل ۷: مجموع نرخ کاربران ثانویه در دو حالت SUPA و Eq PA برای کاربر اولیه با عملکرد SR.



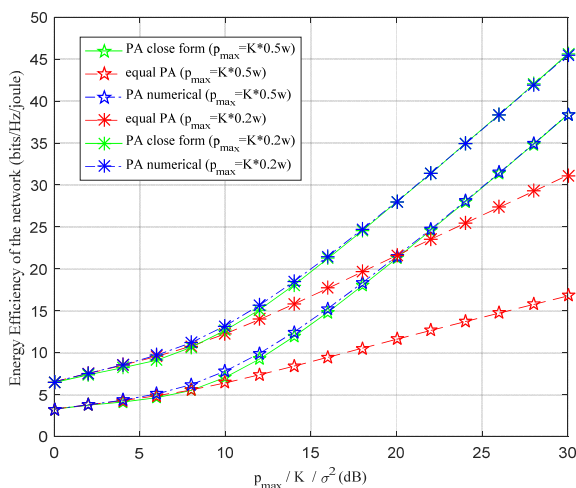
شکل ۴: حداقل توان ارسالی کاربر اولیه برای تضمین کیفیت سرویس آن.



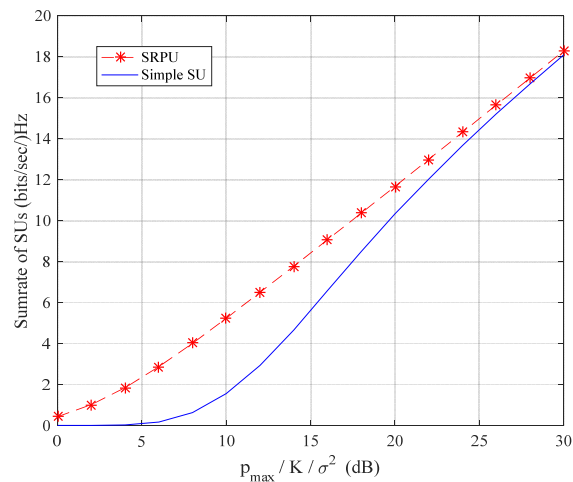
شکل ۸: بهره انرژی شبکه در حالت‌های SRPU و Simple SR در p_{max} های مختلف.



شکل ۵: نرخ کاربر اولیه که به نرخ آستانه $R_{th}^{(1)} = 5$ رسیده است.



شکل ۹: بهره انرژی شبکه در حالت‌های Eq PA، EEPA و روش عددی تخصیص توان برای حالتی که کاربر اولیه از SR بهره می‌برد.



شکل ۶: نرخ مجموع کاربران ثانویه در دو حالت Simple PU و SRPU.

توان‌های برابر (با در نظر گرفتن کیفیت سرویس‌دهی کاربر اولیه) به کاربران اختصاص داده شده است، مقایسه کرده‌ایم. در این شکل مشخص است که علاوه بر فراهم‌شدن کیفیت سرویس‌دهی کاربر اولیه، مجموع نرخ کاربران ثانویه نیز بهبود پیدا کرده است. در شکل‌های ۸ و ۹، $p_{cr} = p_{ct} = 0.5W$ و $R_{th} = 7$ در نظر گرفته‌ایم.

SR باعث شده تا توان کمتری برای کاربر اولیه مورد نیاز باشد و در نتیجه توان بیشتری در اختیار کاربران ثانویه قرار گرفته و نرخ مجموع افزایش پیدا کند. در SNRهای بالا به دلیل شرایط بسیار خوب کانال، توان مورد نیاز کاربر اولیه در هر دو حالت بسیار کم و تا حد زیادی برابر است. مجموع نرخ کاربران ثانویه در هر دو حالت به هم نزدیک می‌شوند. در شکل ۷ نرخ مجموع کاربران ثانویه را زمانی که از الگوریتم پیشینه‌سازی مجموع نرخ کاربران ثانویه، استفاده شده و زمانی که

۵- نتیجه

ما در این مقاله یک شبکه رادیوشناختگر مشارکتی را که کاربر اولیه آن از عملکرد SR استفاده می‌کند، ارائه کردیم. به جهت تضمین عملکرد صحیح کاربر اولیه و مناسب بودن نرخ برای کاربران ثانویه فراهم می‌شود به حذف همه تداخل‌ها (تداخل بین رله‌ای در عملکرد SR و تداخل کاربران بر همدیگر) با استفاده از روش هم‌سوسازی تداخل پرداختیم. سپس با در نظر گرفتن یک نرخ آستانه برای کاربر اولیه، حداقل توان لازم را برای منبع و رله به منظور تضمین کیفیت سرویس دهی کاربر اولیه به دست آوردیم. برای افزایش نرخ مجموع کاربران ثانویه و افزایش بهره انرژی شبکه به طرح دو مسئله تخصیص توان پرداختیم که با حل آنها به جواب‌های بهینه به فرم بسته رسیدیم و دو الگوریتم تخصیص توان را ارائه دادیم. در نهایت با شبیه‌سازی روابط به دست آمده در این مقاله، بهبود عملکرد شبکه پیشنهادشده را نشان دادیم. با این شبیه‌سازی‌ها نشان دادیم که استفاده از عملکرد SR باعث تضمین عملکرد صحیح کاربر اولیه، افزایش نرخ مجموع کاربر ثانویه و بهره انرژی شبکه شده است. همچنین استفاده تخصیص توان که کیفیت سرویس کاربر اولیه را نیز تضمین می‌کند، در افزایش نرخ مجموع کاربران و به خصوص بهره انرژی بسیار مؤثر واقع شده است.

پیوست

اثبات: زمانی که $\sum_{k=2}^K p_t^{[k]} + 2p_t^{[1]} = p_{\max}$ باشد، مخرج کسر یک مقدار ثابت می‌شود یعنی داریم

$$2P_c + 2p_t^{[1]} + \sum_{k=2}^K p_t^{[k]} + P_c = 2P_c + \sum_{k=2}^K P_c + p_{\max} = cte \quad (پ-۱)$$

پس در بهینه‌سازی تأثیری ندارد. همچنین $\hat{p}_t^{[1]} = p_t^{[1]} - p_{t_min}$ در نظر می‌گیریم و بنابراین (۱۹) را به صورت (۲۲) و سپس (پ-۲) می‌توان بیان کرد که $\hat{\gamma}$ به صورت (۲۵) نشان داده شده است. مسئله بهینه‌سازی (پ-۲) مسئله تخصیص توان در چندین کانال موازی است و با استفاده از روش Waterfilling، جواب‌های بهینه مسئله به دست می‌آیند، بنابراین زمانی که $\sum_{k=2}^K p_t^{[k]} + 2p_t^{[1]} = p_{\max}$ باشد، فرم بسته جواب‌های مسئله (۲۲) به صورت (۲۳) و (۲۴) بیان می‌شود.

مراجع

- [1] X. Hong, J. Wang, C. X. Wang, and J. Shi, "Cognitive radio in 5G: a perspective on energy-spectral efficiency trade-off," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 7, pp. 46-53, Jul. 2014.
- [2] Z. Zhang, X. Chai, K. Long, A. V. Vasilakos, and L. Hanzo, "Full duplex techniques for 5G networks: self-interference cancellation, protocol design, and relay selection," *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 5, pp. 128-137, May. 2015.
- [3] S. Haykin, "Cognitive radio: brain-empowered wireless communications," *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, vol. 23, no. 2, pp. 201-220, Feb. 2005.

$$\max_{p_t^{[1]}, \dots, p_t^{[K]}} \log_r[(1 + p_{t_min})(1 + \hat{p}_t^{[1]}\hat{\gamma})] + \sum_{\nu} \log_r(1 + p_t^{[k]} \frac{|h_k|^r}{\sigma_r^2}) =$$

$$\log_r(1 + p_{t_min}) + \log_r(1 + \hat{p}_t^{[1]}\hat{\gamma}) + \sum_{\nu} \log_r(1 + p_t^{[k]} \frac{|h_k|^r}{\sigma_r^2}) = \log_r(1 + \hat{p}_t^{[1]}\hat{\gamma}) + \sum_{\nu} \log_r(1 + p_t^{[k]} \frac{|h_k|^r}{\sigma_r^2}) \quad (پ-۲)$$

$$\text{st. } \hat{p}_t^{[1]} \geq 0, p_t^{[k]} \geq 0, k = 2, \dots, K$$

$$2\hat{p}_t^{[1]} + \sum_{k=2}^K p_t^{[k]} \leq p_{\max} - 2p_{t_min}$$

در شکل ۸ به مقایسه بهره انرژی شبکه در دو حالت استفاده و عدم استفاده کاربر اولیه از عملکرد SR در p_{\max} های متفاوت با استفاده از فرمول کلی بهره انرژی پرداخته‌ایم. همان طور که در شکل مشخص است، هرچه p_{\max} که برای شبکه در نظر گرفته شده بیشتر می‌شود، بهره انرژی کاهش پیدا می‌کند و این ویژگی از خاصیت log در صورت رابطه بهره انرژی حاصل شده است.

در شرایط بد کانال همه یا اکثر توان در اختیار شبکه (P_{\max}) به کاربران اختصاص داده می‌شود، در نتیجه بهره انرژی کم است ولی با استفاده از عملکرد SR به دلیل مشارکت رله در ارسال اطلاعات، توان کمتری مورد نیاز شبکه است که موجب افزایش بهره انرژی شبکه شده است.

هرچه P_{\max} کمتر باشد، توان کمتری به کاربران در هر دو حالت اختصاص می‌یابد. همچنین هرچه شرایط کانال بهتر می‌شود مثلاً در $SNR = 30 \text{ dB}$ ، توان‌های تخصیص یافته به کاربران کمتر شده و در نتیجه اختلاف مجموع توان‌های آنها در هر دو حالت کمتر می‌شود. به همین دلیل از این SNR به بعد توان مصرفی مداری کاربران اثر خود را بیشتر نشان می‌دهد. به دلیل استفاده از رله در کاربر اولیه، توان مصرفی مداری بیشتر شده و بنابراین ارتباط مسیر مستقیم عملکرد بهتری دارد، اما در p_{\max} بالاتر، سیستم مدل SR در محدوده بیشتری از SNR عملکرد بهتری دارد.

در شکل ۹، بهبود بهره انرژی شبکه را برای دو کاربر ($K = 2$) و به ازای دو مقدار $p_{\max} = 1 \text{ W}$ و $p_{\max} = 0.4 \text{ W}$ نشان دادیم که از الگوریتم بهینه‌سازی بهره انرژی شبکه (الگوریتم ۲) استفاده شده است. ما در این شکل به شبیه‌سازی بهره انرژی شبکه با استفاده از روابط به دست آمده طبق الگوریتم ۲ پرداختیم که در مقایسه با حالتی که توان به صورت مساوی به کاربران اختصاص می‌یابد، افزایش چشم‌گیری دارد. همچنین برای نشان دادن درستی روابطی که به دست آوردیم و مناسب بودن تقریبی که به کار بردیم، مسئله تخصیص توان را با روش عددی نیز حل و بهره انرژی را مطابق با آن رسم کردیم. همان طور که در شکل مشخص است در SNRهای بالاتر برخلاف SNRهای اطراف ۱۰ dB، تقریب به کار برده شده، تقریب مناسبی است و عملکردی برابر با شبیه‌سازی عددی (بدون تقریب) دارد. زمانی که از روش بهینه برای تخصیص توان استفاده نشده و کل توان در اختیار شبکه (p_{\max})، بین همه کاربران به صورت مساوی (با در نظر گرفتن کیفیت سرویس دهی کاربر اولیه) تقسیم شده است، توان اختصاص داده شده به هر کاربر خیلی زیاد است در صورتی که مجموع نرخ کاربران خیلی تغییر نمی‌کند. در حالی که با استفاده از تخصیص توان بهینه برای بهبود بهره انرژی به خصوص در شرایط خوب کانال از همه توان p_{\max} استفاده نمی‌شود و در نتیجه بهره انرژی افزایش پیدا می‌کند که این بهبود در p_{\max} بالاتر بیشتر مشهود است.

- [26] A. H. A. El-Malek and S. A. Zummo, "A bandwidth-efficient cognitive radio with two-path amplify-and-forward relaying," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 4, no. 1, pp. 66-69, Feb. 2015.
- [27] Z. Li, F. Xiao, S. Wang, T. Pei, and J. Li, "Achievable rate maximization for cognitive hybrid satellite-terrestrial networks with af-relays," *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, vol. 36, no. 2, pp. 304-313, Feb. 2018.
- [28] S. Masrour, A. H. Bastami, and P. Halimi, "Spectrum sharing in cognitive radio networks using beamforming and two-path successive relaying," in *Proc. Iranian Conf. on Electrical Engineering, ICEE'17*, pp. 1810-1814, Tehran, Iran, 2-4 May 2017.
- [29] C. Luo, Y. Gong, and F. Zheng, "Full interference cancellation for two-path relay cooperative networks," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 60, no. 1, pp. 343-347, Jan. 2011.
- [30] Y. Ji, C. Han, A. Wang, and H. Shi, "Partial inter-relay interference cancellation in two path successive relay network," *IEEE Communications Letters*, vol. 18, no. 2, pp. 451-454, Mar. 2014.
- [31] M. A. Maddah-Ali, A. S. Motahari, and A. K. Khandani, "Communication over MIMO X channels: interference alignment, decomposition, and performance analysis," *IEEE Trans. on Information Theory*, vol. 54, no. 8, pp. 3457-3470, Aug. 2008.
- [32] N. Zhao, F. R. Yu, M. Jin, Q. Yan, and V. C. Leung, "Interference alignment and its applications: a survey, research issues, and challenges," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 3, pp. 1779-1803, 3rd Quarter 2016.
- [33] J. Tang, S. Lambotharan, and S. Pomeroy, "Interference cancellation and alignment techniques for multiple-input and multiple-output cognitive relay networks," *IET Signal Process.*, vol. 7, no. 3, pp. 188-200, May 2013.
- [34] S. Arzykulov, G. Nauryzbayev, T. A. Tsiftsis, and M. Abdallah, "On the performance of wireless powered cognitive relay network with interference alignment," *IEEE Trans. on Communications*, vol. 66, no. 9, pp. 3825 - 3836, Sept. 2018.
- [35] E. Biglieri, J. Proakis, and S. Shamai, "Fading channels: information-theoretic and communications aspects," *IEEE Trans. on Information Theory*, vol. 44, no. 6, pp. 2619-2692, Oct. 1998.
- [36] N. Zhao, F. R. Yu, and H. Sun, "Power allocation for interference alignment based cognitive radio networks," in *Proc. IEEE Computer Communications Workshops*, pp. 742-746, Toronto, Canada, 27 Apr.-2 May 2014.
- [37] I. Chih-Lin, C. Rowell, S. Han, Z. Xu, G. Li, and Z. Pan, "Toward green and soft: a 5G perspective," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 66-73, Feb. 2014.
- [38] N. Zhao, F. R. Yu, H. Sun, and M. Li, "Adaptive power allocation schemes for spectrum sharing in interference-alignment-based cognitive radio networks," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 5, pp. 3700-3714, May 2016.
- [39] C. M. Yetis, T. Gou, S. A. Jafar, and A. H. Kayran, "On feasibility of interference alignment in MIMO interference networks," *IEEE Trans. on Signal Processing*, vol. 58, no. 9, pp. 4771-4782, Sept. 2010.
- [40] A. Zappone and E. Jorswieck, "Energy efficiency in wireless networks via fractional programming theory," *Foundations and Trends® in Communications and Information Theory*, vol. 11, no. 3-4, pp. 185-396, 2015.
- [41] K. Gomadam, V. R. Cadambe, and S. A. Jafar, "A distributed numerical approach to interference alignment and applications to wireless interference networks," *IEEE Trans. on Information Theory*, vol. 57, no. 6, pp. 3309-3322, Jun. 2011.
- [42] T. Luan, F. Gao, and X. D. Zhang, "Joint resource scheduling for relay-assisted broadband cognitive radio networks," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol. 11, no. 9, pp. 3090-3100, Sept. 2012.
- [43] A. Goldsmith, S. A. Jafar, I. Maric, and S. Srinivasa, "Breaking spectrum gridlock with cognitive radios: an information theoretic perspective," *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, no. 5, pp. 894-914, May 2009.
- [44] J. T. MacDonald and D. R. Ucci, "Interference temperature limits of IEEE 802.11 protocol radio channels," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Electro/Information Technology*, pp. 64-69, Chicago, IL, USA, 17-20 May 2007.
- [45] B. Wang and K. R. Liu, "Advances in cognitive radio networks: a survey," *IEEE J. of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 5, no. 1, pp. 5-23, Feb. 2011.
- [46] S. J. Kim and G. B. Giannakis, "Optimal resource allocation for MIMO ad hoc cognitive radio networks," *IEEE Trans. on Information Theory*, vol. 57, no. 5, pp. 3117-3131, May 2011.
- [47] Z. Sheng, J. Fan, C. H. Liu, V. C. Leung, X. Liu, and K. K. Leung, "Energy-efficient relay selection for cooperative relaying in wireless multimedia networks," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 64, no. 3, pp. 1156-1170, Mar. 2015.
- [48] M. Hajiaghayi, M. Dong, and B. Liang, "Jointly optimal channel and power assignment for dual-hop multi-channel multi-user relaying," *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, vol. 30, no. 9, pp. 1806-1814, Oct. 2012.
- [49] N. Zhang, N. Cheng, N. Lu, H. Zhou, J. W. Mark, and X. Shen, "Risk-aware cooperative spectrum access for multi-channel cognitive radio networks," *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, vol. 32, no. 3, pp. 516-527, Mar. 2014.
- [50] F. Gomez-Cuba, R. Asorey-Cacheda, and F. J. Gonzalez-Castano, "A survey on cooperative diversity for wireless networks," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 14, no. 3, pp. 822-835, 3rd Quarter 2012.
- [51] H. A. Suraweera, I. Krikidis, G. Zheng, C. Yuen, and P. J. Smith, "Low-complexity end-to-end performance optimization in MIMO full-duplex relay systems," *IEEE Trans. Wireless Communications*, vol. 13, no. 2, pp. 913-927, Feb. 2014.
- [52] G. Liu, F. R. Yu, H. Ji, V. C. Leung, and X. Li, "In-band full-duplex relaying: a survey, research issues and challenges," *Resource*, vol. 147, no. 2, pp. 500-524, 2nd Quarter 2015.
- [53] Y. Fan, C. Wang, J. Thompson, and H. Poor, "Recovering multiplexing loss through successive relaying using repetition coding," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol. 6, no. 12, pp. 4484-4493, Dec. 2007.
- [54] M. Lari, "Power allocation and effective capacity of AF successive relays," *Wireless Networks*, vol. 24, no. 3, pp. 885-895, Apr. 2018.
- [55] C. Wang, Y. Fan, I. Krikidis, J. S. Thompson, and H. V. Poor, "Superposition-coded concurrent decode-and-forward relaying," in *Proc. IEEE Int. Symp. on Information Theory, ISIT'08*, pp. 2390-2394, Toronto, Canada, 6-11 Jul. 2008.
- [56] I. Orikumhi, C. Y. Leow, and Y. Li, "Reliable virtual full-duplex relaying in the presence of interrelay interference," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 10, pp. 9098-9109, Oct. 2017.
- [57] M. S. Gilan and A. Olfat, "New beamforming and space-time coding for two-path successive decode and forward relaying," *IET Communications*, vol. 12, no. 3, pp. 1573-1588, Aug. 2018.
- [58] Q. Y. Liao, C. Y. Leow, and Z. Ding, "Amplify-and-forward virtual full-duplex relaying-based cooperative NOMA," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 7, no. 3, pp. 464-467, Jun. 2018.
- [59] T. Charalambous, S. M. Kim, N. Nomikos, M. Bengtsson, and M. Johansson, "Relay-pair selection in buffer-aided successive opportunistic relaying using a multi-antenna source," *Ad Hoc Networks*, vol. 84, pp. 29-41, Mar. 2019.
- [60] F. Li, X. Tan, and L. Wang, "Power scheme and time-division bargaining for cooperative transmission in cognitive radio," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 15, pp. 379-388, 2015.
- [61] L. Lv, J. Chen, Q. Ni, Z. Ding, and H. Jiang, "Cognitive non-orthogonal multiple access with cooperative relaying: a new wireless frontier for 5G spectrum sharing," *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 4, pp. 188-195, Apr. 2018.
- [62] Y. Zou, J. Zhu, B. Zheng, and Y. D. Yao, "An adaptive cooperation diversity scheme with best-relay selection in cognitive radio networks," *IEEE Trans. on Signal Processing*, vol. 58, no. 10, pp. 5438-5445, Oct. 2010.
- [63] C. Zhai, W. Zhang, and P. Ching, "Cooperative spectrum sharing based on two-path successive relaying," *IEEE Trans. on Communications*, vol. 61, no. 6, pp. 2260-2270, Jun. 2013.

الهه مداح تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق مخابرات سیستم به ترتیب در سال‌های ۱۳۹۵ و ۱۳۹۷ از دانشگاه سمنان به پایان رسانده است و هم‌اکنون دانشجوی دکترای مهندسی برق مخابرات سیستم دانشگاه سمنان می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: شبکه‌های مشارکتی، رله‌های تمام دوطرفه، صفحات هوشمند.

محمد لاری تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد و دکترای مهندسی برق به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۴، ۱۳۸۶ و ۱۳۹۱ از دانشگاه صنعتی امیرکبیر در تهران به پایان رسانده است. دکتر لاری از سال ۱۳۹۱ در دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه سمنان مشغول به فعالیت گردید و اینک نیز عضو هیأت علمی این دانشکده می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان شامل سیستم‌های مخابراتی بی‌سیم است.