

تخصیص بهینه توان برای حداکثر کردن نرخ انتقال داده در شبکه رادیوشناختی با ارسال داده‌ی مستقیم و به کمک رله با راهبرد تقویت و گسیل

آناهیتا پاکدلیان، روح‌اله آقاجانی

دانشکده مهندسی برق

واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی

نجف‌آباد، ایران

aghajani@iaun.ac.ir, anhita.pakdelian@yahoo.com

۱. مقدمه

فن‌آوری استفاده از شبکه‌های بی‌سیم در دهه‌های اخیر به یکی از فن‌آوری‌های مطرح تبدیل شده است. تخصیص طیف در شبکه‌های بی‌سیم متداول (همچون استاندارد (IEEE802.11) به صورت غیر پویا است. طیف رادیویی یک منبع با ارزش و محدود است، که فرستنده‌ها و گیرنده‌ها برای استفاده از آن باید از سازمان مربوطه مجوز دریافت کنند. در سال ۲۰۰۲ کمیته مخابرات فدرال آمریکا (FCC) ۲ گزارشی را با هدف بهبود روش‌های استفاده از این منبع ارزشمند در ایالات متحده منتشر کرد [۱]. در میان یافته‌ها و پیشنهادات این کمیته به این مطلب اشاره شده بود: «در طیف رادیویی بعضی باندهای فرکانسی، اکثر اوقات بدون استفاده می‌مانند و برخی دیگر فقط قسمتی از ظرفیت کل‌شان استفاده می‌شود و برخی دیگر از باندهای فرکانسی به شدت مورد استفاده قرار می‌گیرند.» برطبق این گزارش، بهره‌گیری از طیف با توجه به موقعیت‌ها و زمان‌های مختلف، از حدود ۱۵ درصد تا حداکثر ۸۵ درصد می‌باشد. افزایش تقاضا برای دسترسی به طیف، محدودیت در طیف قابل استفاده و بازده کم روش‌های تخصیص طیف قدیمی، باعث کمبود طیف آزاد در باندهای خاصی شده است.

در دهه‌ی گذشته، روش‌های متنوعی در مقالات برای بهره‌برداری موثر از منابع رادیویی پیشنهاد شده است، از جمله‌ی این روش‌ها و سیستم‌ها، سیستم‌های رادیوشناختی^۳ [۱-۵] و مخابرات مشارکتی^۴ است [۶-۸].

چکیده — فناوری رادیوشناختی برای حل مشکل بهینه نبودن روش‌های غیرپویای تخصیص طیف در حال گسترش است. در شبکه‌های رادیوشناختی، کاربرهای رادیوشناختی امکان استفاده از طیف‌های مجوزدار که به کاربران اولیه تخصیص داده شده است را دارند. ولی با توجه به اینکه کاربران اولیه در دسترسی به طیف اولویت دارند، کاربران شناختگر نباید برای آن‌ها تداخل مخرب تولید کنند در جهت رسیدن به این هدف، تخصیص توان ارسالی کاربرهای شناختگر مسئله‌ای مهم است. در این مقاله ما تخصیص بهینه توان برای دستیابی به بیشترین نرخ انتقال داده در یک شبکه‌ی رادیوشناختی با ارسال داده‌ی مستقیم و به کمک رله با راهبرد تقویت و گسیل را بررسی می‌کنیم. ابتدا مسئله حداکثر نرخ مجموع با توجه به محدودیت‌های تداخل با شبکه اولیه را بررسی می‌کنیم، سپس مسئله را تحلیل می‌کنیم و شبیه‌سازی مسئله تخصیص توان بهینه را براساس مکان‌های مختلف قرار گرفتن رله انجام داده‌ایم. نتایج را با حالت تخصیص توان مساوی، مقایسه می‌کنیم.

واژه‌های کلیدی — شبکه‌ی رادیوشناختی، تخصیص توان بهینه، محدودیت‌های تداخل، ارسال مستقیم و به کمک رله با راهبرد تقویت و گسیل

¹ Non-Dynamic

² Federal Communications Commission

³ Cognitive Radio System

⁴ Cooperative Communication

مبتنی بر رله ایجاد تنوع در ارسال و دریافت است که با استفاده از یک رله بین منبع و مقصد به دست می‌آید.

با الهام از شبکه‌های رادیوشناختی و رله، شبکه رله‌ای شناختی^{۱۶} به عنوان راهی به منظور بهبود توان عملیاتی کاربر ثانویه، گسترش پوشش شبکه، استفاده از توان ارسال پایین در شبکه و بهره‌وری انرژی بالاتر، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این شبکه‌ها این کار را به دو طریق انجام می‌دهند: مشارکت بین کاربرهای اولیه و ثانویه [۱۶] و مشارکت بین کاربران ثانویه [۱۷].

اشتراک گذاری طیف در الگوی لایه‌ی زیرین بررسی شده است و در آن گذردهی پایدار شبکه رادیوشناختی با قابلیت استفاده از رله وبدون این قابلیت مقایسه شده است و نشان داده شده است که مزایای استفاده از رله به شدت به ساختار شبکه، بستگی دارد [۱۷].

هدف از تخصیص توان این است که داده با بالاترین نرخ ممکن با توجه به محدودیت‌های تداخل و همچنین با توجه به محدودیت توان تجهیزات، ارسال شود.

در [۱۸] تخصیص توان برای شبکه رله‌ی چندپرسی بررسی شده است. در این شبکه‌ها توان ارسال، تحت محدودیت‌های تداخل و همچنین محدودیت نسبت سیگنال به نویز مورد نیاز گیرنده، حداقل شده است.

همچنین تخصیص توان برای حداکثر کردن مجموع نرخ دریافت داده در یک شبکه‌ی رادیوشناختی با راهبرد تقویت و ارسال^{۱۷} بررسی شده است [۱۹].

در [۱۸] و [۲۰] راهبرد تقویت و ارسال چند پرسی توصیف و تحلیل شده است.

با این حال در ساختارهای در نظر گرفته شده، یا برای همه کاربران ثانویه انتقال اطلاعات به کمک رله انجام می‌شود یا برای همه آن‌ها انتقال داده به صورت مستقیم انجام می‌شود.

یک شبکه با دو کاربر که یکی به کمک رله دریافت اطلاعات دارد و دیگری بدون کمک رله، نیز بررسی شده است [۲۱-۲۳]. در این کارها فعالیت شبکه بدون حضور یک شبکه اولیه، بررسی شده است.

در [۲۱] برای مدیریت تداخل، یک روش برای کاهش موثر تداخل ارائه شده است. در این شبکه، کاربری که به کمک رله اطلاعات دریافت می‌کند، نسبت به کاربری که مستقیم داده دریافت می‌کند، اولویت دارد.

¹⁶ Cognitive Relay Network

¹⁷ Amplify-and-Forward Relay

استفاده غیر بهینه از طیف رادیویی منجر به حفره‌های فرکانسی می‌شود. یک حفره فرکانسی پهنای باندی است، که مجوز استفاده از آن به یک کاربر اولیه^۵ داده شده است. ولی این طیف در یک زمان یا مکان مشخص، مورد استفاده آن کاربر قرار نگرفته است. حال اگر کاربر دیگری که از این پس او را کاربر ثانویه^۶ می‌نامیم، بتواند به این حفره فرکانس دسترسی داشته باشد و در آن زمان و مکان مشخص، از آن باند فرکانسی استفاده نماید، بهبود چشم‌گیری در استفاده از طیف، حاصل خواهد شد. رادیوشناختی^۷ فن‌آوری است که قصد افزایش بهره‌وری^۸ طیف فرکانس رادیویی را به وسیله اجازه دادن به کاربران ثانویه برای استفاده از باندهای فرکانسی کم بهره، دارد [۹].

در یک دسته بندی دو رویکرد به اشتراک گذاری طیف فرکانسی بیان شده است [۲]:

۱- دسترسی فرصت طلبانه به طیف^۹: که در آن یک کاربر ثانویه تنها زمانی به یک باند دسترسی دارد که این باند در حال استفاده توسط کاربر اولیه نباشد [۳].

۲- اشتراک طیف^{۱۰}: که در آن کاربر ثانویه، همزمان با کاربر اولیه، از یک طیف فرکانسی برای انتقال داده استفاده می‌کنند، اما کاربر ثانویه محدودیت توان ارسال، برای تضمین کیفیت خدمات^{۱۱} کاربر اولیه را لحاظ می‌کند [۴].

برای یک شبکه رادیوشناختی لایه‌ی زیرین^{۱۲} (استفاده همزمان کاربران اولیه و ثانویه از طیف مشترک)، کنترل توان^{۱۳} مهمترین مسئله برای تضمین عملکرد^{۱۴} شبکه رادیوشناختی است، تا از شبکه اولیه در برابر تداخل مضر محافظت شود [۱۰-۱۳].

شبکه‌های رله به منظور افزایش گذردهی^{۱۵} شبکه و گسترش پوشش شبکه‌های بی‌سیم به کار می‌روند [۱۴-۱۵]. از دیگر مزیت‌های شبکه‌های

⁵ Primary User

⁶ Secondary User

⁷ Cognitive Radio

⁸ Utilization

⁹ Opportunistic Spectrum Access

¹⁰ Spectrum Sharing

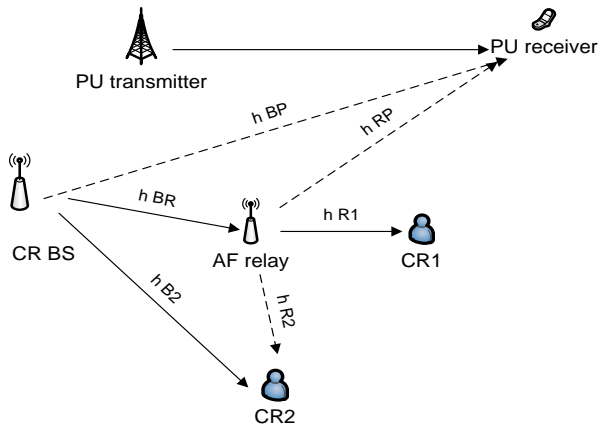
¹¹ QOS (Quality Of Service)

¹² Underlay

¹³ Power Control

¹⁴ Performance

¹⁵ Throughput



شکل 1: ساختار مطالعه شده

۲. توصیف سیستم

در این مقاله قصد داریم، تخصیص توان برای شبکه رادیوشناختی با دو کاربر که یکی از طریق رله با راهبرد تقویت و ارسال داده دریافت می‌کند و یکی به صورت مستقیم، را بررسی کنیم.

ما یک سیستم لایه‌ی زیرین مطابق «شکل ۱» را بررسی می‌کنیم. در این شبکه‌ی رادیوشناختی، یک فرستنده‌ی رادیوشناختی برای دو کاربر رادیوشناختی به ترتیب دو داده متفاوت را ارسال می‌کند. انتقال داده‌ی کاربر اول، به دلیل تلفات بالای مسیر به وسیله یک رله و در دو فاز انجام می‌شود. در فاز اول داده کاربر اول توسط فرستنده برای رله ارسال می‌شود و در فاز دوم رله سیگنال دریافتی را برای کاربر اول ارسال می‌کند. کاربر اول فقط یک توان سیگنال قابل صرف‌نظر کردن از فرستنده دریافت می‌کند. به دلیل محدودیت‌های عملی، استفاده از رله‌ی دوسمتی^{۲۲} چالش برانگیز است، رله به صورت نیمه‌دوسمتی^{۲۳} در نظر گرفته می‌شود.

کاربر دوم داده‌ی خود را مستقیماً از فرستنده و در فاز دوم دریافت می‌کند.

همه کانال‌ها به صورت کانال با محوشدگی رایلی مدل شده‌اند و فرض می‌کنیم، بهره‌ی کانال‌ها در دوفاز ثابت باقی می‌ماند. بهره‌های کانال توزیع رایلی دارند و به مسافت وابسته هستند. این وابستگی به صورت

$$|h| = \sqrt{\beta}\Phi \quad (1)$$

²² Full-duplex
²³ Half-duplex

در [۲۲] بر اساس روش گوش دادن به طیف^{۱۸} انتقال داده توسط یک رله با راهبرد تقویت و ارسال بررسی شده است. احتمال خاموشی برای چهار طرح، شامل انتقال ارتباط فراسو^{۱۹} و ارتباط فرسوسو^{۲۰} محاسبه شده است.

وای-لی مطالعات [۲۱-۲۳] را به یک شبکه رادیوشناختی بسط داده است [۲۴]. ساختار بررسی شده، بسیار شبیه به یکی از چهار ساختار بررسی شده در [۲۲] است. این اولین مطالعه‌ای است که تخصیص توان در یک شبکه رادیوشناختی، هر دو مسیر مستقیم و مسیر به کمک رله بررسی می‌شود. در این کار از راهبرد کدبرداری و ارسال^{۲۱} استفاده شده است.

راهبرد تقویت و ارسال یکی از راهبردهای کارآمد (در مواقعی که رله به مقصد نزدیک‌تر است) در شبکه‌های مشارکتی است. در ساختارهای توضیح داده شده در بالا هیچ یک از این راهبردها استفاده نکرده‌اند. در این مقاله یک شبکه شناختگر مطابق «شکل ۱» را بررسی می‌کنیم، که شامل یک ایستگاه فرستنده مرکزی است که داده را به ترتیب به دو کاربر CR منتقل می‌کند. در این شبکه برای یکی از کاربران مسیر به صورت مستقیم در نظر گرفته شده است و انتقال اطلاعات در یک فاز انجام می‌شود. و برای کاربر دیگر، انتقال داده به وسیله رله و در دو فاز انجام می‌شود. در این شبکه از راهبرد تقویت و ارسال استفاده می‌شود. رله به صورت دو طرفه غیرهمزمان در نظر گرفته می‌شود. هدف یافتن ضرایب تخصیص توان در این شبکه رادیوشناختی برای ارسال داده با کمک رله و ارسال مستقیم، به گونه‌ای است که نرخ مجموع داده در شبکه، حداکثر شود.

قسمت‌های بعدی این مقاله به این صورت است که در بخش دوم ساختار شبکه مورد مطالعه، را معرفی می‌کنیم. در بخش سه نرخ مجموع بهینه را با توجه به محدودیت‌های سیستم تحلیل می‌کنیم. در بخش چهارم نتایج شبیه‌سازی را ارائه می‌کنیم و سرانجام در بخش پنجم یک نتیجه‌گیری کلی از مقاله ارائه می‌دهیم.

¹⁸ Overhearing
¹⁹ Uplink
²⁰ Downlink
²¹ Decode-and-Forward Relay

$$y_2[2] = \sqrt{P_3} h_{B2} x_2 + h_{R2} \frac{\sqrt{P_2}}{\sqrt{P_1 |h_{BR}|^2 + N}} \left[\sqrt{P_1} h_{BR} x_1 + n_R[1] \right] + n_2[2] \quad (6)$$

P_3 و P_2 به ترتیب توان سیگنال ارسالی به وسیله رله و فرستنده در طول فاز ۲ است. $n_2[2]$ و $n_1[2]$ نویز سفید گوسی مختلط با $\text{CN}(0, \sigma^2)$ برای کاربر اول و کاربر دوم در فاز دوم است. نرخ انتقال داده X_1 از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$R_1(P_1, P_2) = \frac{1}{2} \log_2(1 + \gamma_1) \quad (7)$$

$$\gamma_1 = \frac{P_1 P_2 h_{R1}^2 h_{BR}^2}{N_0^2 + N_0 P_1 h_{BR}^2 + N_0 P_2 h_{R1}^2} \quad (8)$$

γ_1 نسبت سیگنال به نویز برای سیگنال X_1 است.

همان‌طور که می‌بینیم نرخ انتقال داده‌ی X_1 به P_2 و P_1 بستگی دارد. و مستقل از P_3 است.

برای به دست آوردن نسبت سیگنال به نویز برای سیگنال X_2 دو حالت را در نظر می‌گیریم:

حالت اول - اگر فرض کنیم کانال BS به CR2 آنقدر خوب باشد که CR2 بتواند X_1 را دیکد کند ($h_{B2} \geq h_{BR}$)

$$\widehat{y}_2[2] = \sqrt{P_3} h_{B2} x_2 + h_{R2} \frac{\sqrt{P_2}}{\sqrt{P_1 |h_{BR}|^2 + N}} n_R[1] + n_2[2] \quad (9)$$

$$\gamma_2 = \frac{P_3 h_{B2}^2 (P_1 h_{BR}^2 + N_0)}{P_2 h_{R2}^2 N_0 + N_0 (P_1 h_{BR}^2 + N_0)} \quad (10)$$

حالت دوم - اگر فرض کنیم کانال BS به CR2 آنقدر خوب نباشد که CR2 بتواند X_1 را دیکد کند ($h_{BR} \geq h_{B2}$). اگر از یک دریافت‌کننده‌ی ZF (zero-forcing) استفاده کنیم، داریم:

$$\gamma_2 = \frac{P_3 h_{B2}^4 (P_1 h_{BR}^2 + N_0)}{P_2 h_{R2}^2 h_{BR}^2 N_0 + P_2 h_{R2}^2 h_{B2}^2 N_0 + (P_1 h_{BR}^2 + N_0) h_{B2}^2 N_0} \quad (11)$$

$$R_2(P_1, P_2, P_3) = \frac{1}{2} \log_2(1 + \gamma_2) \quad (12)$$

به ترتیب ضرایب های کانال فرستنده به کاربر دوم، h_{BP} ، h_{BR} ، h_{B2} به رله و به گیرنده‌ی شبکه اولیه را نشان می‌دهند. h_{RP} ، h_{R2} ، h_{R1} به ترتیب ضرایب کانال رله به کاربر اول، به کاربر دوم و به گیرنده‌ی شبکه اولیه را نشان می‌دهد. Φ یک متغیر تصادفی با توزیع ریلی و واریانس ۱ است و β تلفات مسیر است، که با فاصله به صورت زیر مرتبط می‌شود:

$$\beta = d^{-\delta} \quad (2)$$

در رابطه فوق d فاصله و δ ضریب تلفات است. همان‌طور که گفته شد، انتقال داده در دو فاز انجام می‌شود:

در فاز اول فرستنده سیگنال X_1 (سیگنال برای کاربر اول) را برای کاربر اول به رله می‌فرستد، کاربر دوم هم این سیگنال را دریافت می‌کند. که این سیگنال برای کاربر دوم تداخل محسوب می‌شود.

در فاز دوم رله سیگنال دریافتی از فرستنده را تقویت و به کاربر ۱ ارسال می‌کند. که کاربر دوم هم آن را دریافت می‌کند. همچنین فرستنده سیگنال X_2 را برای کاربر دوم ارسال می‌کند. اگر تلفات مسیر بین فرستنده و کاربر دوم بالا نباشد، کاربر دوم می‌تواند اطلاعات به دست‌آمده در فاز ۱ در مورد X_1 را برای لغو تداخل این سیگنال با سیگنال X_2 ، در فاز ۲ به کار ببرد.

از تداخل سیگنال شبکه اولیه با سیگنال شبکه‌ی ثانویه صرف نظر می‌کنیم.

در فاز ۱ سیگنالی که رله و کاربر دوم دریافت می‌کنند به صورت زیر است:

$$y_R[1] = \sqrt{P_1} h_{BR} x_1 + n_R[1] \quad (3)$$

$$y_2[1] = \sqrt{P_1} h_{B2} x_1 + n_2[1] \quad (4)$$

که در آن، P_1 توان سیگنال ارسالی به وسیله فرستنده در طول فاز ۱ است. $n_R[1]$ و $n_2[1]$ نویز سفید گوسی مختلط با $\text{CN}(0, \sigma^2)$ برای رله و کاربر دوم در فاز اول است.

در فاز ۲ سیگنال دریافتی توسط کاربر اول و کاربر دوم به صورت زیر است:

$$y_1[2] = h_{R1} \frac{\sqrt{P_2}}{\sqrt{P_1 |h_{BR}|^2 + N}} \left[\sqrt{P_1} h_{BR} x_1 + n_R[1] \right] + n_1[2] \quad (5)$$

$$P_1^* = \left\{ P_{BS}, \frac{I}{|h_{BP}|^2} \right\} \quad (19)$$

توان به کار رفته توسط فرستنده در فاز دوم، P_3 ، تأثیری بر $R_1(P_1, P_2)$ ندارد و $R_2(P_1, P_2, P_3)$ با افزایش P_3 زیاد می‌شود. پس نرخ مجموع با افزایش P_3 افزایش می‌یابد. پس P_3 باید حداکثر توان ممکن با توجه به محدودیت‌های ذکر شده در (۱۵)، (۱۷) و (۱۸) باشد:

$$P_3^* = \left\{ P_{BS}, \frac{I - P_2 |h_{RP}|^2}{|h_{BP}|^2} \right\} \quad (20)$$

اگر توان ارسالی از رله در فاز دوم، P_2 ، معین باشد، معادله‌ی بالا برای همه مقادیر قابل قبول برای P_2 ، صدق می‌کند.

در مورد P_2 ، هم $R_1(P_1, P_2)$ و هم $R_2(P_1, P_2, P_3)$ وابسته به P_2 هستند. R_1 با افزایش P_2 افزایش می‌یابد و R_2 با افزایش P_2 کاهش می‌یابد. پس برای مشخص شدن نزولی یا صعودی بودن تابع $R_a(P_1, P_2, P_3)$ نسبت به P_2 ، از این تابع نسبت به P_2 مشتق می‌گیریم. براساس توان سیگنال ارسالی توسط فرستنده در فاز دو، P_3 ، مسئله به دو حالت تقسیم می‌شود.

حالت اول- وقتی که $P_2 \leq \frac{I - P_{BS}|h_{BP}|^2}{|h_{RP}|^2}$ یعنی: $P_3^* = P_{BS}$ در این حالت از معادله R_a برحسب P_2 مشتق می‌گیریم. این تابع به ازای مقادیری از P_2 و برحسب مکان قرار گیری رله نسبت به P_2 در بعضی نواحی مثبت و در بعضی نواحی منفی می‌شود. حد بالا و پایین P_2 در این حالت با توجه به محدودیت‌ها به صورت زیر است:

$$PU_1 = \min \left\{ \frac{I - P_{BS}|h_{BP}|^2}{|h_{RP}|^2}, P_R \right\} \quad (21)$$

$$PL_1 = 0 \quad (22)$$

حالت دوم- وقتی که $P_2 \geq \frac{I - P_{BS}|h_{BP}|^2}{|h_{RP}|^2}$ یعنی: $P_3^* = \frac{I - P_2 |h_{RP}|^2}{|h_{BP}|^2}$. در این حالت هم از معادله R_a برحسب P_2 مشتق می‌گیریم. این تابع به ازای مقادیری از P_2 و برحسب مکان قرار گیری رله نسبت به P_2 در بعضی نواحی مثبت و در بعضی نواحی منفی می‌شود. حد بالا و پایین P_2 در این حالت با توجه به محدودیت‌ها به صورت زیر است:

$$PU_2 = \min \left\{ \frac{I}{|h_{RP}|^2}, P_R \right\} \quad (23)$$

$$PL_2 = \frac{I - P_{BS}|h_{BP}|^2}{|h_{RP}|^2} \quad (24)$$

به طور کلی

همان‌طور که مشاهده می‌شود نرخ ارسال داده X_2 به P_2, P_1 و P_3 بستگی دارد. نرخ انتقال این شبکه رادیوشناختی مجموع نرخ انتقال داده‌ی دو کاربر است:

$$R_a(P_1, P_2, P_3) = R_1(P_1, P_2) + R_2(P_1, P_2, P_3) \quad (13)$$

۳. حداکثر کردن نرخ مجموع

در یک سیستم لایه‌ی زیرین، به شبکه رادیوشناختی اجازه داده می‌شود که همراه با شبکه اولیه داده منتقل کند. با این وجود شبکه اولیه در استفاده از طیف اولویت دارد و شبکه ثانویه نباید برای آن تداخل مخرب ایجاد کند. به همین دلیل کنترل توان اهمیت پیدا می‌کند. مسئله حداکثر کردن نرخ داده مجموع با توجه به محدودیت‌های تداخل با شبکه اولیه به صورت زیر تنظیم می‌شود:

$$\begin{aligned} & \max_{p_1, p_2, p_3} R_a(P_1, P_2, P_3), \\ & s. t \quad P_1 |h_{BP}|^2 \leq I, \end{aligned} \quad (14)$$

$$P_3 |h_{BP}|^2 + P_2 |h_{RP}|^2 \leq I, \quad (15)$$

$$P_1 \leq P_{BS}, \quad (16)$$

$$P_2 \leq P_R, \quad (17)$$

$$P_3 \leq P_{BS}, \quad (18)$$

(۱۴) و (۱۵) محدودیت‌هایی هستند که باید برای عدم تداخل مخرب سیگنال کاربر ثانویه با شبکه رادیوشناختی لحاظ شود، که I (Interference) آستانه‌ی تداخلی است که شبکه اولیه می‌تواند تحمل کند. (۱۶)-(۱۸) حداکثر توان‌هایی هستند که فرستنده و رله در فاز اول و دوم می‌توانند تولید کنند.

از (۷) و (۸) می‌بینیم که نرخ انتقال داده‌ی کاربر اول با افزایش P_1 افزایش می‌یابد. و از (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) مشاهده می‌شود که نرخ انتقال داده‌ی کاربر دوم هم با افزایش P_1 افزایش می‌یابد.

پس هر دوی $R_1(P_1, P_2)$ و $R_2(P_1, P_2, P_3)$ با زیاد شدن P_1 زیاد می‌شوند. پس P_1 باید حداکثر توان ممکن با توجه به محدودیت‌های ذکر شده در (۱۴) و (۱۶) باشد:

$$P_2^* = \underset{P_{2,i}^*}{\operatorname{argmax}} R_a(P_1^*, P_{2,i}^*, P_3^*) \quad i = 1, 2 \quad (25)$$

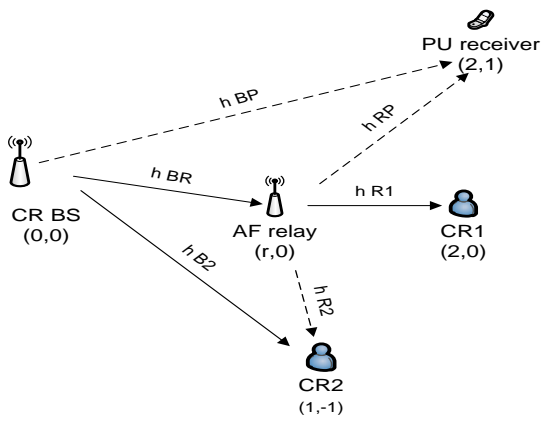
۴. نتایج عددی

نتایج عددی در شکل‌ها نشان داده شده است. و به منظور مشاهده‌ی میزان بهینه‌سازی نرخ مجموع در شبکه ذکر شده، نرخ مجموع با نرخ مجموع همین شبکه با تخصیص توان برابر (EPA) مقایسه شده است، که در آن

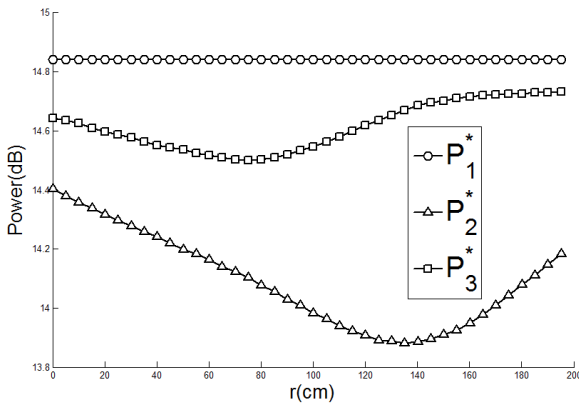
$$P_1 = P_2 = P_3 = \min \left\{ P_{BS}, P_R, \frac{I}{|h_{BP}|^2 + |h_{RP}|^2} \right\} \quad (25)$$

همان‌طور که در «شکل ۲» نشان داده شده، فرض می‌کنیم که مکان فرستنده، کاربر اول و کاربر دوم ثابت است و مختصات شبکه اولیه (۱، ۲) و ثابت است و رله روی خطی که فرستنده و کاربر اول را به هم وصل می‌کند جابه‌جا می‌شود. $P_{BS} = P_R = 15(\text{dB})$ و توان نویز روی هر کانال $\sigma^2 = 1$ و ضریب تلفات مسیر $\delta = 4$

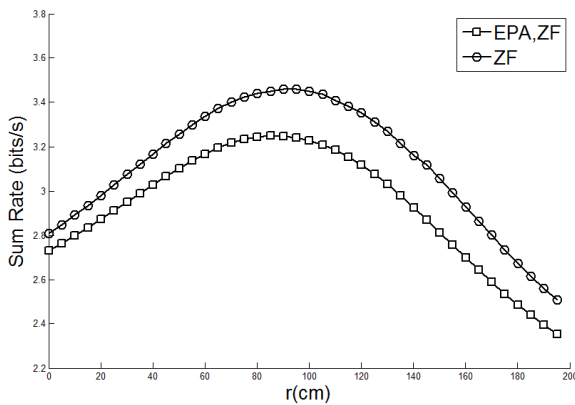
همان‌طور که در «شکل ۳» دیده می‌شود، هرچه رله به کاربر اول نزدیک‌تر می‌شود، ابتدا توان بهینه برای P_2 کاهش می‌یابد و سپس افزایش می‌یابد. این به این دلیل است که هر چه رله به گیرنده نزدیک‌تر باشد نیاز کمتری به تقویت سیگنال فرستنده وجود دارد، ولی وقتی رله از فرستنده خیلی دور می‌شود، سیگنال دریافتی رله ضعیف است و باید تقویت شود. همچنین همان‌طور که از ۱۹ برمی‌آید، توان بهینه فرستنده در فاز اول، ثابت است و به r بستگی ندارد. در شکل «۴» دیده می‌شود که نرخ مجموع ابتدا با افزایش r افزایش می‌یابد و سپس کاهش می‌یابد در «شکل ۵». مشاهده می‌شود، که این رفتاری است، که نرخ انتقال داده‌ی CR1 دارد در حالی که نرخ انتقال داده‌ی CR2 برخلاف این است. پس نتیجه می‌گیریم، نرخ انتقال داده‌ی مجموع، تحت تسلط کاربر اول است. پس تخصیص توان بهینه هم تحت تسلط شرایط بهتر برای کاربر اول است. هرچه رله به کاربر اول نزدیک‌تر است احتیاج به تقویت سیگنال کمتری دارد پس بدون کمتر شدن نرخ دریافت داده‌ی کاربر اول، می‌توان P_2 را کاهش داد تا فرستنده بتواند با توان (P_3) بیشتری داده را برای کاربر دوم ارسال کند. و نرخ انتقال داده‌ی مجموع افزایش یابد.



شکل ۲: نمایش مختصات



شکل ۳: نمودار توان های بهینه تخصیص یافته برحسب مکان های مختلف رله



شکل ۴: نرخ انتقال بهینه به ازای مکان های مختلف رله

²⁴ Equal power allocation

[9] M. R. Aref, Information Flow in Relay Networks. Ph.D. thesis, Stanford University, may 1980.

[10] L. Musavian and S. Aissa, "Capacity and power allocation for spectrum sharing communications in fading channels," *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, vol. 8, no 1, pp. 148–156, Jan. 2009.

[11] V. Asghari and S. Aissa, "Adaptive rate and power transmission in spectrum-sharing systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 9, no.10, pp. 3272–3280, Oct. 2010.

[12] K. Son, B. C. Jung, S. Chong, and D. K. Sung, "Opportunistic underlay transmission in multi-carrier cognitive radio systems", in proc. *IEEE Wireless Commun. Netw. Conf.*, 2009, pp.1-6.

[13] Y. J. A. Zhang and A. M.-C. So, "Optimal spectrum sharing in MIMO cognitive radio networks via semi definite programming," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 29, no.2, pp. 362–373, Feb. 2011.

[14] G. Kramer, M. Gastpar, and P. Gupta, "Cooperative strategies and capacity theorems for relay networks," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 51, no.9, pp. 3037–3063, Sept. 2005.

[15] Y. Liang and V. V. Veeravalli, "Cooperative relay broadcast channels," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 53, no.3, pp. 900–928, March 2007.

[16] O. Simeone, U. Spagnolini, and Y. Bar-Ness, "Stable throughput of cognitive radios with and without relaying capability," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 55, no. 12, pp. 2351-2360, Dec. 2007.

[17] S. Kim, W. Choi, Y. Choi, J. Lee, Y. Han, and I. Lee, "Downlink performance analysis of cognitive radio based cellular relay networks," in *Proc. Int. Conf. Cognitive Radio Oriented Wireless Netw. Commun.*, pp. 1-6, May 2008.

[18] J. Mietzner, L. Lampe, and R. Schober, "Distributed transmit power allocation for multihop cognitive radio systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, pp. 5187–5201. Oct. 2009.

[19] Z. Liu, Y. Xu, D. Zhang and S. Guan, "An efficient power allocation algorithm for relay assisted cognitive radio network," *Proc. Int. Conf. on Wireless Commun. and Signal Processing*, pp.1-5, Oct. 2010.

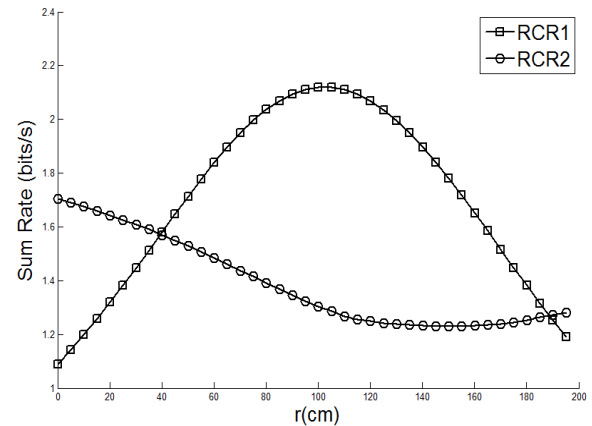
[20] Y. Xiao, G. Bi and D. Niyato, "Game theoretic analysis for spectrum sharing with multi-hop relaying," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol.10, no.5, pp.1527-1537, May 2011.

[21] B. Bandemer, Q. Li, X. E. Lin, and A. Paulrag, "Overhearing-based interference cancellation for relay networks," in *Proc. 2009 IEEE Veh. Technol. Conf.* – Fall, pp. 1–5.

[22] C. Thai and P. Popovski, "Coordinated direct and relay transmission with interference cancelation in wireless systems," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 15, no. 4, pp. 416–418, Apr. 2011,

[23] C. D. T. Thai and P. Popovski, "Rate regions for coordination of decodeand- forward relays and direct users," in *Proc. 2012 IEEE Int. Conf. Commun.*, pp.4468-4472

[24] Lu Lu, Geoffrey Ye Li and Gang Wu, "Optimal power allocation for CR networks with direct and relay-aided



شکل ۵- نمودار نرخ کاربر اول و نرخ کاربر دوم با تخصیص توان بهینه

۵. نتیجه

در این مقاله ما ابتدا تخصیص توان بهینه در یک شبکه رادیوشناختی لایه زیرین با انتقال داده به صورت مستقیم و به کمک رله تقویت و ارسال را بررسی کردیم. سپس حداکثر نرخ انتقال داده را با توجه به محدودیت‌های تداخل با شبکه‌ی اولیه شبیه‌سازی کردیم. مشاهده می‌شود که نرخ نسبت به حالت EPA بهبود می‌یابد.

منابع

- [1] F.C. Commission, Spectrum policy task force, Technical report, November. 2002
- [2] J.Zou, H.Xiong, D. Wang, and C. W. Chen, "Optimal power allocation for hybrid overlay/underlay spectrum sharing in multiband cognitive radio networks," *IEEE Trans. on Veh. Technol.*, vol. 62, no. 4, pp1827-1837, May 2013.
- [3] Q. Zhao and B. M. Sadler, "A survey of dynamic spectrum access," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 24, no. 3, pp. 79–89, May 2007.
- [4] L. Le and E. Hossain, "Resource allocation for spectrum underlay in cognitive radio networks," *IEEE Trans.on Wireless Commun.*, Dec. 2008, vol. 7, no. 12, pp. 5306–5315, Dec. 2008.
- [5] Y. Kang, Y. C. Liang, H. K. Garg, and L. Zhang, "Sensing-based spectrum sharing in cognitive radio networks," *IEEE Trans. on Veh. Technol.*, vol. 58, no. 8, pp. 4649–4654, Oct. 2009.
- [6] Su. Weifeng, K. A. Sadek and K. J. Ray Liu, "Cooperative communication protocols in wireless networks: Performance analysis and optimum power allocation," *Wireless Personal Communications Springer*, vol. 44, no. 2, pp. 181-217, Jan. 2008.
- [7] S. Zahedi, "On Reliable Communication Over Relay Networks," Ph.D. thesis, Stanford Univ., 2005.
- [8] E. Kurniawan, A. Madhukumar, "Relaying and power control strategy for 2-hop distributed cooperative communication," in *Proc. the 67th IEEE Veh. Tech. Conf.*, pp. 98-102, May 2008.