

تخصیص بهینه توان برای حداکثر کردن نرخ انتقال داده در شبکه رادیوشناختی دو کاربره با حذف کننده تداخل متوالی MMSE

آناهیتا پاکدلیان^{*}، روح‌اله آقاجانی^۲

۱- دانشکده مهندسی برق، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

۲- دانشکده مهندسی برق، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

خلاصه

در این مقاله ما تخصیص بهینه توان برای دست یابی به بیشترین نرخ انتقال داده در یک شبکه 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، و روابط تحلیلی را براساس حذف کننده‌ی تداخل MMSE (minimum mean square error) به دست می‌آوریم. شبیه‌سازی مسئله تخصیص توان بهینه را براساس مکان‌های مختلف قرار گرفتن رله و مکان‌های مختلف قرار گرفتن شبکه‌ی اولیه انجام داده ایم. و نتایج را با حالت تخصیص توان مساوی مقایسه می‌کنیم.

کلمات کلیدی: شبکه‌رادیوشناختی، تخصیص توان بهینه، محدودیت‌های تداخل، ارسال مستقیم و به کمک رله با راهبرد تقویت و گسیل

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[‡] 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 شده‌است. رادیوشناختی[§] یکی از روش‌های نوظهوری است، که قصد افزایش بهره‌وری طیف رادیویی را دارد.

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^{**} داده شده است. ولی این طیف در یک زمان و یا مکان مشخص، مورد استفاده آن

* Corresponding author: M.Sc. student in Islamic azad university of najafabad

Email: anahitap66@gmail.com

† Amplify-and-forward relay

‡ Non-Dynamic

§ Cognitive Radio

** Primary user

کاربر قرار نگرفته است. حال اگر کاربر دیگری که از این پس او را کاربر ثانویه* 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.

در یک دسته بندی سه رویکرد به اشتراک گذاری طیف فرکانسی بیان شده است [۱]:

۱- دسترسی فرصت طلبانه به طیف[†]: که در آن یک کاربر ثانویه تنها زمانی به یک باند دسترسی دارد که این باند در حال استفاده توسط کاربر اولیه نباشد [۲].

۲- اشتراک طیف[‡]: که در آن کاربر ثانویه، همزمان با کاربر اولیه، از یک طیف فرکانسی برای انتقال داده استفاده می‌کنند، اما کاربر ثانویه محدودیت توان ارسالی، برای تضمین کیفیت خدمات[§] کاربر اولیه را لحاظ می‌کند [۳].

۳- اشتراک طیف بر اساس گوش دادن^{**}: که در آن کاربر ثانویه اول به وضعیت کاربر اولیه (فعال/بیکار)[□] گوش می‌دهد و سپس روش به اشتراک گذاری طیف را بر اساس نتیجه گوش کردن انتخاب می‌کند. اگر کاربر اولیه فعال تشخیص داده شد، کاربر ثانویه روش اول را انتخاب می‌کند و با توان کمتری انتقال داده را انجام می‌دهد. در غیر این صورت، کاربر ثانویه به روش دوم، با حداکثر بودجه توانی خود- برای دستیابی به نرخ داده بالاتر- کار می‌کند [۴].

در روش اشتراک طیف، تداخل سیگنال کاربر ثانویه با سیگنال کاربر اولیه وجود دارد که برای تضمین کیفیت خدمات برای کاربر اولیه، این تداخل نباید از یک حد قابل تحمل^{‡‡} برای کاربر اولیه بیشتر شود. همچنین، سیگنال به تداخل به علاوه نویز (SINR)^{§§} هر کاربر ثانویه، برای تضمین کیفیت خدمات برای کاربر ثانویه، باید بزرگتر از میزان معینی باشد. به همین دلیل مسئله کنترل توان برای این سیستم‌ها مهم است.

شبکه‌های رله^{***} به منظور افزایش گذردهی^{†††} شبکه و گسترش پوشش شبکه‌های بی‌سیم به کار می‌روند [۵-۶]. از دیگر مزیت‌های شبکه‌های 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^{‡‡‡} 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 [۷] و مشارکت بین کاربران ثانویه [۸].

هدف از تخصیص توان این است که داده با بالاترین نرخ ممکن با توجه به محدودیت‌های تداخل و با توجه به توان تجهیزات ارسال شود. کارهای زیادی در زمینه تخصیص توان در شبکه‌های رادیوشناختی انجام شده است. الگوریتم‌های زیادی برای تبیین تخصیص توان بین کاربران ثانویه با توجه به مکان کاربران و نوع رله و نوع محوشدگی^{§§§} کانال و روش به اشتراک گذاری طیف مورد مطالعه قرار گرفته است [۹-۱۱].

* Secondary user

† Opportunistic spectrum access

‡ Spectrum sharing

§ QOS (Quality Of Service)

** Sensing-based spectrum sharing

†† idle/active

‡‡ Tolerable level

§§ Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio

*** Relay Network

††† Throughput

‡‡‡ Cognitive Relay Network

§§§ Fading

در [۱۲] تخصیص کانال و توان به صورت همزمان برای یک شبکه با ۳ گره* رادیوشناختی به منظور بهینه کردن توان عملیاتی انتها به انتها[†] نیز مطالعه شده است. اشتراک گذاری طیف در الگوی لایه‌ی زیرین بررسی شده است و در آن گذرده‌ی پایدار شبکه رادیوشناختی با قابلیت استفاده از رله و بدون این قابلیت مقایسه شده است و نشان داده شده است که مزایای استفاده از رله به شدت به ساختار شبکه، بستگی دارد [۷]. در [۱۳] برای یک ساختار متشکل از چند رله، تخصیص توان به همراه یک شیوه ساده انتخاب رله ساده با راهبرد تقویت و ارسال، مطالعه شده است. راهبرد تقویت و ارسال چند پرشی تحلیل و توصیف شده است و تخصیص توان برای حداکثر کردن توان عملیاتی در یک شبکه رادیوشناختی مورد بررسی قرار گرفته است که در آن از کاربران ثانوی به عنوان رله استفاده می‌شود [۱۴]. در [۱۵] تخصیص توان بین رله‌های شناختی با هدف بهینه کردن عملکرد سیستم رادیوشناختی همزمان با محدود کردن تداخل با شبکه‌ی اولیه بررسی 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.

در [۱۶-۱۸] یک شبکه با دو کاربر که یکی به کمک رله دریافت اطلاعات دارد و دیگری بدون کمک رله، نیز بررسی شده است. در این کارها فعالیت شبکه بدون حضور یک شبکه اولیه، بررسی شده است. در [۱۶] 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. در [۱۷] بر اساس روش گوش دادن به طیف[‡] انتقال داده توسط یک رله با راهبرد کدبرداری و ارسال بررسی شده است. احتمال خاموشی برای چهار طرح، شامل دو طرح ارتباط فراسو[§] و دو طرح ارتباط فرسو^{**} محاسبه شده است.

وای-لی مطالعات [۱۶-۱۸] را به یک شبکه رادیوشناختی بسط داده است [۱۹]. ساختار بررسی شده، بسیار شبیه به یکی از چهار ساختار بررسی شده در [۱۸] 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^{††} استفاده شده است. راهبرد تقویت و ارسال یکی از راهبردهای کارآمد (در مواقعی که رله به مقصد نزدیک تر 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.

* Node

† End to end Throughput

‡ Overhearing

§ Uplink

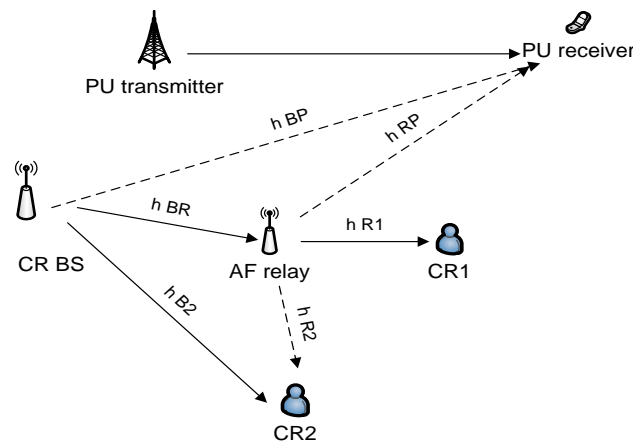
** Downlink

†† Decode-and-Forward

۲. توصیف سیستم

راهبرد کد برداری و ارسال در مواقعی استفاده می‌شود که رله به منبع (فرستنده) نزدیک باشد. در مواقعی که رله از منبع دور است و به گیرنده نزدیک است، راهبرد تقویت و ارسال مفیدتر است. در این مقاله قصد داریم، تخصیص توان برای شبکه رادیو شناختی 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 لایه ی زیرین مطابق شکل ۱ را بررسی می‌کنیم. در این شبکه‌ی رادیو شناختی، یک فرستنده‌ی رادیو شناختی برای دو کاربر رادیو شناختی با دریافت کننده‌ی MMSE به ترتیب دو داده متفاوت را ارسال می‌کند.



شکل ۱- ساختار مطالعه شده

در فاز اول فرستنده سیگنال \mathbf{X}_1 را (سیگنال 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 \mathbf{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 \mathbf{X}_1 را برای لغو تداخل این سیگنال با سیگنال \mathbf{X}_2 ، در فاز ۲ به کار ببرد.

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

انتقال همه کانال‌ها به صورت کانال با محوشدگی رایلی مدل شده‌اند و فرض شده است که بهره‌ی کانال‌ها در دوفاز ثابت باقی می‌ماند. بهره‌های کانال توزیع رایلی دارند و به مسافت وابسته هستند. که این وابستگی به صورت:

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

به ترتیب ضریب های کانال فرستنده به کاربر دوم، به رله و به گیرنده شبکه اولیه را نشان می‌دهند. h_{BP} ، h_{BR} ، h_{B2} به ترتیب ضرایب کانال رله به کاربر اول، به کاربر دوم و به گیرنده شبکه‌ی اولیه را نشان می‌دهد. Φ یک متغیر تصادفی با توزیع رایلی 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 ۱ سیگنالی که رله و کاربر دوم دریافت می‌کنند به صورت زیر است:

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

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

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 $CN(0, \sigma^2)$ برای رله و کاربر دوم در فاز اول است.

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

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

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

P_2 و P_3 به ترتیب توان سیگنال ارسالی به وسیله رله و فرستنده در طول فاز ۲ است. $n_1[2]$ و $n_2[2]$ نویز سفید گوسی مختلط با $CN(0, \sigma^2)$ برای کاربر اول و کاربر دوم در فاز دوم است.

نرخ انتقال داده X_1 از رابطه زیر به دست می‌آید:

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

که در رابطه فوق γ_1 نسبت سیگنال به نویز برای سیگنال X_1 است و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

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

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 SNR 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 ($h_{B2} \geq h_{BR}$).

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

با در نظر گرفتن رابطه فوق γ_2 که نسبت سیگنال به نویز برای سیگنال X_2 است، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

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

حالت دوم - اگر فرض کنیم کانال BS به CR2 آنقدر خوب نباشد که CR2 بتواند کامل X_1 را دیکد کند ($h_{BR} \geq h_{B2}$). در این حالت با استفاده از گیرنده‌های مجهز به حذف‌کننده تداخل متوالی* (SIC) می‌توان تاحدی به حذف تداخل کمک کرد.

و چون از یک دریافت‌کننده MMSE استفاده می‌کنیم داریم:

* Successive Interference Cancellation

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

بنابراین، برای کاربر دوم نرخ انتقال داده به صورت زیر محاسبه می‌شود:

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

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:

$$\max_{p_1, p_2, p_3} R_a(P_1, P_2, P_3),$$

$$s. t \quad P_1 |h_{BP}|^2 \leq I, \quad (14)$$

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

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

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

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

رابطه‌های (14) و (15) 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. رابطه‌های (16)-(18) حداکثر توان‌هایی هستند که فرستنده و رله در فاز اول و دوم می‌توانند تولید کنند.

از رابطه‌های (7) و (8) می‌بینیم که نرخ انتقال داده‌ی کاربر اول با افزایش P_1 افزایش می‌یابد.

و از رابطه‌های (10)، (11) و (12) واضح است، که نرخ انتقال داده‌ی کاربر دوم، 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 بهینه باید حداکثر توان ممکن با توجه به محدودیت‌های ذکر شده در رابطه‌های (14) و (16) باشد:

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

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 بهینه باید. حداکثر توان ممکن با توجه به محدودیت‌های ذکر شده در رابطه‌های (15) و (18) باشد:

$$P_3^* = \min \left\{ P_{BS}, \frac{1-P_2|h_{RP}|^2}{|h_{BP}|^2} \right\} \quad (20)$$

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 فرستنده در فاز دو، P_2 ، مسئله به دو حالت تقسیم می‌شود:

حالت اول - وقتی که $P_2 \leq \frac{1-P_{BS}|h_{BP}|^2}{|h_{RP}|^2}$ یعنی $P_2^* = P_{BS}$. در این حالت از معادله R_a برحسب P_2 مشتق می‌گیریم. برحسب این که R_a نسبت به P_2 صعودی باشد یا نزولی، مقدار بهینه P_2 مشخص می‌شود حد بالای P_2 در این حالت برابر PU_1 و حد پایین آن صفر است.

$$PU_1 = \min \left\{ \frac{1-P_{BS}|h_{BP}|^2}{|h_{RP}|^2}, P_R \right\} \quad (21)$$

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

حالت دوم - وقتی که $P_2 \geq \frac{1-P_{BS}|h_{BP}|^2}{|h_{RP}|^2}$ یعنی:

$$P_3^* = \left\{ \frac{1-P_2|h_{RP}|^2}{|h_{BP}|^2} \right\} \quad (23)$$

در این حالت هم از معادله R_a برحسب P_2 مشتق می‌گیریم. حد بالا و پایین P_2 در این حالت با توجه به محدودیت‌ها به صورت زیر است:

$$PU_2 = \min \left\{ \frac{1}{|h_{RP}|^2}, P_R \right\} \quad (24)$$

$$PL_2 = \frac{1-P_{BS}|h_{BP}|^2}{|h_{RP}|^2} \quad (25)$$

به طور کلی

$$P_2^* = \underset{P_{2,i}^*}{\operatorname{argmax}} R_a(P_1^*, P_{2,i}^*, P_{3,i}^*) \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (26)$$

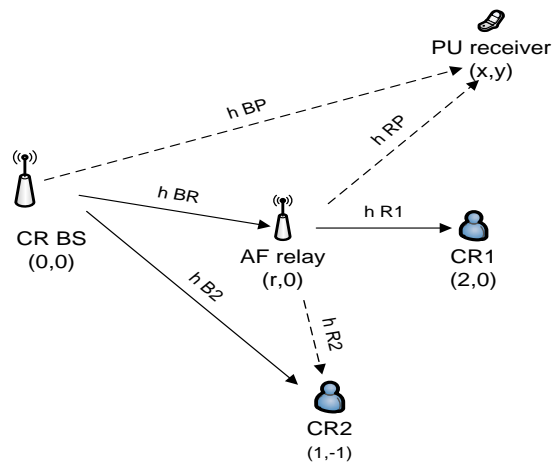
۴- نتایج عددی

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

$$P_1 = P_2 = P_3 = \min \left\{ P_{BS}, P_R, \frac{1}{|h_{BP}|^2 + |h_{RP}|^2} \right\} \quad (27)$$

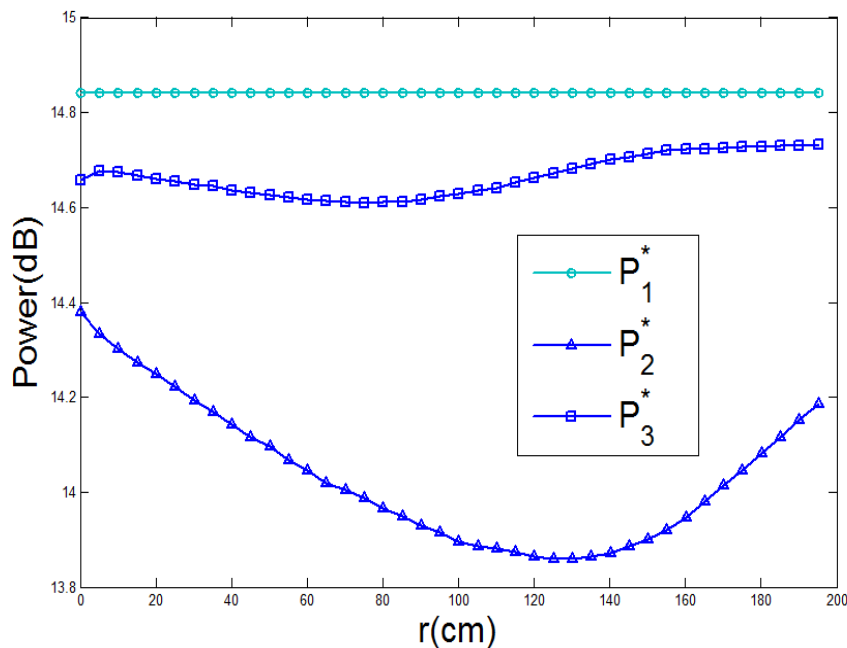
* Equal power allocation

همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده، فرض می‌کنیم که مکان فرستنده، کاربر اول و کاربر دوم ثابت است و مختصات شبکه اولیه (1,2) 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 $\delta = 4$ در نظر گرفته شده است.



شکل ۲ - نمایش مختصات

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 می‌شود و باید تقویت شود.

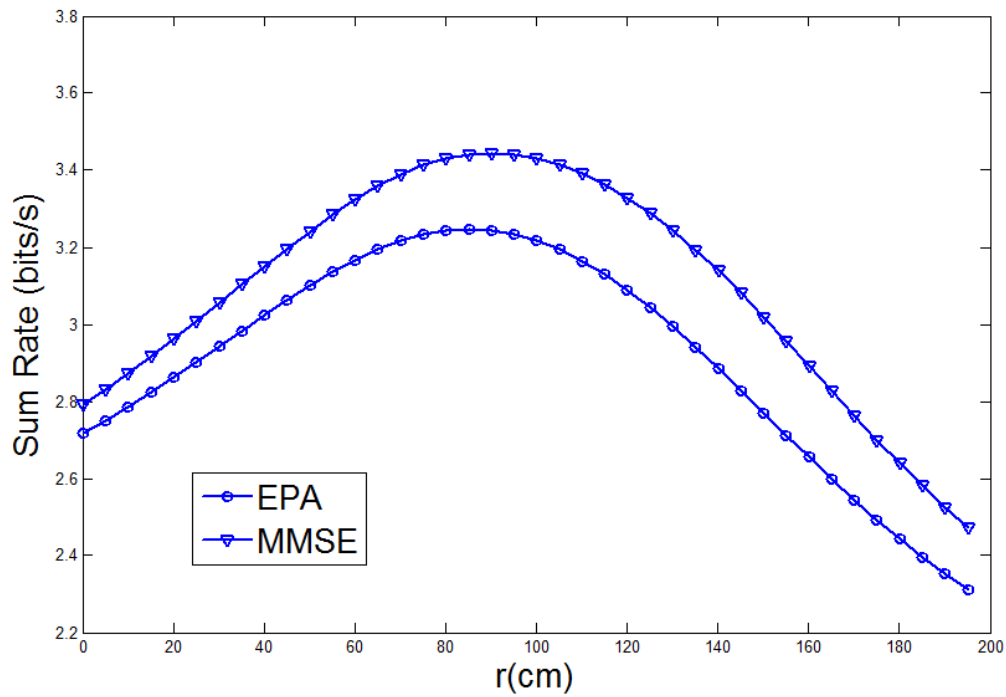


شکل ۳ - نمودار توان های بهینه تخصیص یافته بر حسب مکان های مختلف رله

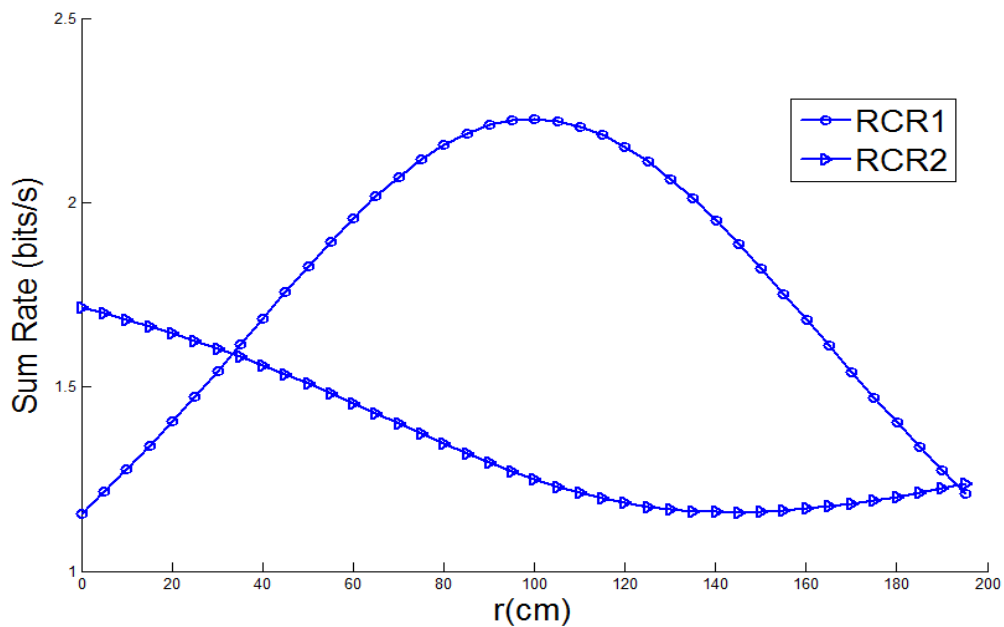
با دور شدن رله از فرستنده ابتدا با کاهش مقدار P_2 و افزایش مقدار $|h_{RP}|^2$ مواجه هستیم. همان طور که در شکل ۳ دیده می‌شود و با توجه به رابطه (20) این نتیجه به دست می‌آید که این تغییرات در ابتدا منجر به کاهش مقدار P_3 و سپس باعث افزایش آن شده است. بعد از آن با نزدیک شدن رله به گیرنده که کاهش میزان $|h_{RP}|^2$ را در پی دارد و با زیاد شدن میزان P_2 مقدار P_3 افزایش یافته است. از سوی دیگر 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.

همان طور که از رابطه (19) 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 رفتار نرخ مجموع شبیه به 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. حداکثر نرخ مجموع در حالت EPA زمانی اتفاق می‌افتد که $r=0.9$ است ولی حداکثر نرخ مجموع در حالت تخصیص توان بهینه در $r=0.95$ اتفاق می‌افتد یعنی وقتی رله کمی به CR1 نزدیک‌تر می‌شود. زیرا وقتی رله به CR1 نزدیک‌تر می‌شود توان رله‌ی کمتری می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد و در عوض توان بیشتری به فرستنده در فاز ۲ اختصاص داده شود با وجود اینکه این کار نرخ CR1 را کاهش می‌دهد افزایش نرخ CR2 بیشتر از کاهش نرخ CR1 است و نرخ مجموع افزایش می‌یابد. وقتی رله به CR1 نزدیک‌تر می‌شود، کاهش نرخ CR1 شدید است و در نتیجه نرخ مجموع برای هر دو حالت تخصیص توان کاهش می‌یابد.



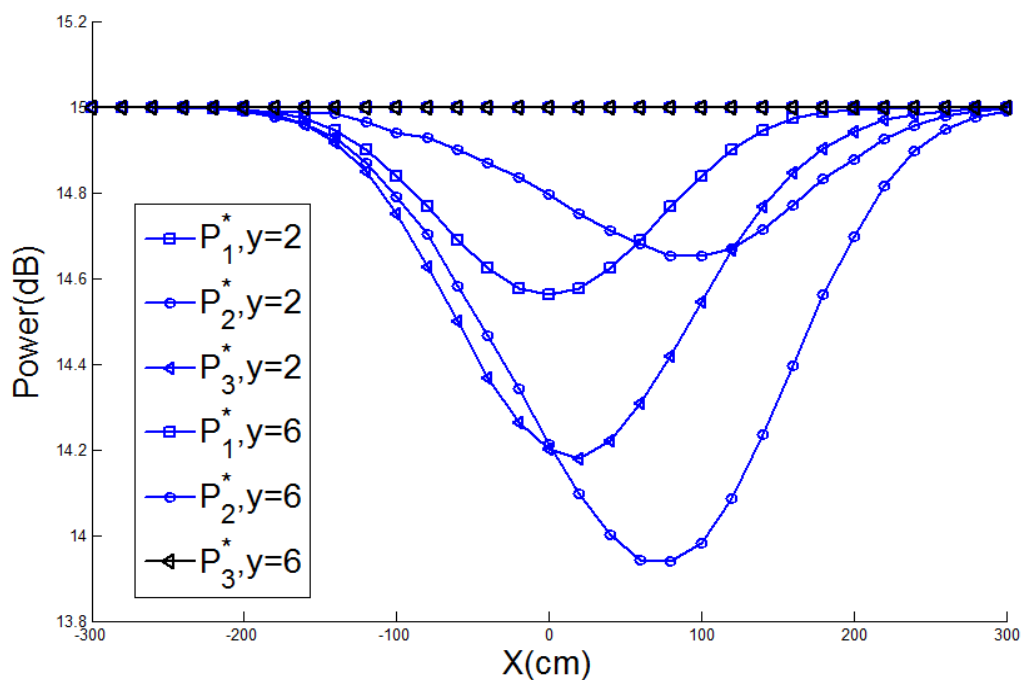
شکل ۴ - نرخ انتقال بهینه به ازای مکان‌های مختلف رله



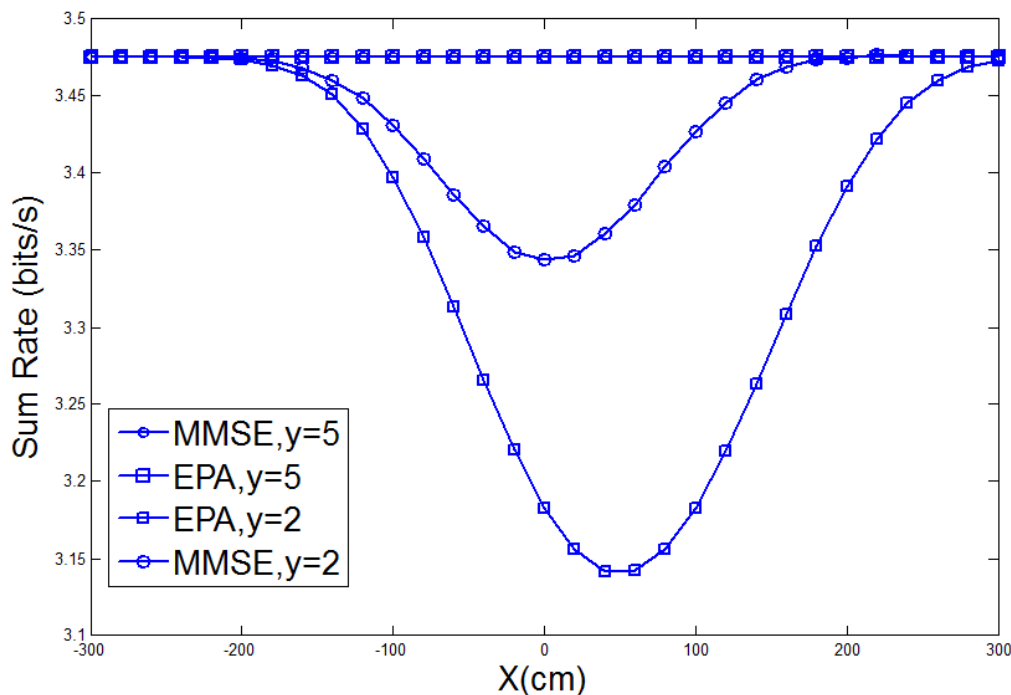
شکل ۵ - نمودار نرخ کاربر اول و نرخ کاربر دوم

در شکل ۶ فرض شده رله در مکان (1,0) ثابت است و شبکه‌ی اولیه روی محور X بین $[-3,3]$ حرکت می‌کند. یک‌بار مکان عمودی شبکه‌ی اولیه را $y=2$ در نظر می‌گیریم. و به بار دورتر به شبکه ثانویه روی $y=6$ قرار می‌دهیم. وقتی $y=2$ است هر سه توان بهینه با افزایش x ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. زیرا با تغییر مکان شبکه‌ی اولیه روی محور X این شبکه ابتدا به فرستنده و رله نزدیک می‌شود، یعنی تداخل شبکه‌ی ثانوی با شبکه‌ی اولیه افزایش می‌یابد. و برای کم کردن تداخل باید توان تولیدی شبکه‌ی ثانویه را کم کرد و سپس شبکه‌ی اولیه از شبکه‌ی ثانویه دور می‌شود.

وقتی $y=6$ مشاهده می‌شود که با دور شدن شبکه اولیه، چون امکان تداخل از بین می‌رود، فرستنده و رله با حداکثر توان ممکن با توجه به محدودیت حداکثر توان منبع و رله سیگنال را ارسال می‌کنند. همچنین در این حالت چون توان بهینه‌ی استفاده شده در هر گره تنها به ساختار شبکه‌ی شناختی بستگی دارد، پس مقادیر آنها برای مقادیر مختلف x ثابت می‌ماند.



شکل ۶ - توان انتقال بهینه به ازای مکان‌های مختلف شبکه اولیه



شکل ۷- نرخ انتقال بهینه به ازای مکان‌های مختلف شبکه اولیه

۵. مراجع

1. J.Zou, H.Xiong, D. Wang, and C. W. Chen, (May 2013) "Optimal power allocation for hybrid overlay/underlay spectrum sharing in multiband cognitive radio networks," *IEEE Trans. on Veh. Technol.*, **62**, (4), pp1827-1837.
2. Q. Zhao and B. M. Sadler,(May 2007), "A survey of dynamic spectrum access," *IEEE Signal Process. Mag.*, **24**, (3), pp. 79–89.
3. L. Le and E. Hossain,(Dec. 2008), "Resource allocation for spectrum underlay in cognitive radio networks," *IEEE Trans.on Wireless Commun.*, **7**, (12), pp. 5306–5315.
4. Y. Kang, Y. C. Liang, H. K. Garg, and L. Zhang,(Oct. 2009), "Sensing-based spectrum sharing in cognitive radio networks," *IEEE Trans. on Veh. Technol.*, **58**, (8), pp. 4649–4654.
5. G. Kramer, M. Gastpar, and P. Gupta,(Sept. 2005), "Cooperative strategies and capacity theorems for relay networks," *IEEE Trans. Inf. Theory*, **51**, (9), pp. 3037–3063.

6. Y. Liang and V. V. Veeravalli,(March 2007), “Cooperative relay broadcast channels,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, **53**, (3), pp. 900–928.
7. O. Simeone, U. Spagnolini, and Y. Bar-Ness,(Dec. 2007), “Stable throughput of cognitive radios with and without relaying capability,” *IEEE Trans. Commun.*, **55**, (12), pp. 2351-2360.
8. S. Kim, W. Choi, Y. Choi, J. Lee, Y. Han, and I. Lee, (May 2008), “Downlink performance analysis of cognitive radio based cellular relay networks,” in *Proc. Int. Conf. Cognitive Radio Oriented Wireless Netw. Commun.*, pp. 1-6,
9. J.Zou, H.Xiong, D. Wang, and C. W. Chen,(May 2013), “Optimal power allocation for hybrid overlay/underlay spectrum sharing in multiband cognitive radio networks,” *IEEE Trans. on Veh. Technol.*, **62**,(4), pp1827-1837..
10. L. Musavian and S. Aissa, (Jan. 2009), “Capacity and power allocation for spectrum sharing communications in fading channels,” *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, **8**, (1), pp. 148–156.
11. V. Asghari and S. Aissa,(Oct. 2010), “Adaptive rate and power transmission in spectrum-sharing systems,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, **9**, (10), pp. 3272–3280.
12. G. Zhao, C. Yang, G. Y. Li, D. Li, and A. Soong,(Feb. 2011), “Power and channel allocation for cooperative relay in cognitive radio networks,” *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.*, **15**,(1), pp. 151–159..
13. L. Li, X. Zhou, H. Xu, G. Y. Li, D. Wang, and A. Soong,(Jan. 2011), “Simplified relay selection and power allocation in cooperative cognitive radio systems,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, **10**, pp. 33–36,.
14. Z. Liu, Y. Xu, D. Zhang and S. Guan,(Oct. 2010) “An efficient power allocation algorithm for relay assisted cognitive radio network,” *Proc. Int. Conf. on Wireless Commun. and Signal Processing*, pp.1-5,
15. J. Mietzner, L. Lampe, and R. Schober,(Oct. 2009), “Distributed transmit power allocation for multihop cognitive radio systems,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, **8**, pp. 5187–5201..

16. 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.
17. C. Thai and P. Popovski, "Coordinated direct and relay transmission with interference cancellation in wireless systems," *IEEE Commun. Lett.*, **15**, (4), pp. 416–418, Apr. 2011,
18. C. D. T. Thai and P. Popovski, "Rate regions for coordination of decode-and-forward relays and direct users," in *Proc. 2012 IEEE Int. Conf. Commun.*, pp. 4468–4472.
19. Lu Lu, Geoffrey Ye Li and Gang Wu, (Apr 2013), "Optimal power allocation for CR networks with direct and relay-aided", *IEE Trans. On wireless commun.*, **12**,(4),