

# تخصیص بهینه توان در شبکه رادیوشناختی با ارسال داده‌ی مستقیم و به کمک رله با راهبرد تقویت و گسیل

آناهیتا پاکدلیان<sup>(۱)</sup> – روح‌اله آقاجانی<sup>(۲)</sup>

(۱) کارشناس ارشد - دانشکده مهندسی برق، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، اصفهان، ایران

(۲) استادیار - دانشکده مهندسی برق، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، اصفهان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۰/۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۶/۹

**خلاصه:** در شبکه‌های رادیوشناختی، کاربرهای شناختگر 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 دست یابی به بیشترین نرخ انتقال داده در یک شبکه رادیوشناختی دو کاربره با ارسال داده‌ی مستقیم و به کمک رله با راهبرد تقویت و گسیل را بررسی می‌کنیم. ابتدا مسئله حداکثر نرخ مجموع را با توجه به محدودیت‌های تداخل با شبکه اولیه بررسی می‌کنیم، سپس مسئله را از نظر ریاضی تحلیل می‌کنیم. شبیه‌سازی مسئله تخصیص توان بهینه را براساس مکان‌های مختلف قرار گرفتن رله و مکان‌های مختلف قرار گرفتن شبکه‌ی اولیه انجام داده‌ایم. همچنین نتایج حالت تخصیص بهینه با حالت تخصیص توان مساوی مقایسه شده است.

**کلمات کلیدی:** شبکه رادیوشناختی، تخصیص توان بهینه، محدودیت‌های تداخل، ارسال مستقیم، راهبرد تقویت و گسیل

## Optimal Power Allocation for CR Networks with Direct and AF Relay-Aided Transmissions

Anahita Pakdelian<sup>(1)</sup> – Rooholah Aghajani<sup>(2)</sup>

(1) Msc – Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University, Najafabad Branch, Najafabad, Isfahan, Iran

anahitap66@gmail.com

(2) Assistant Professor - Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University, Najafabad Branch, Najafabad, Isfahan, Iran

aghajani@iaun.ac.ir

One of the most prominent challenges in meeting the demand is the scarcity of radio resources. Cognitive radio is one of the techniques has been proposed for efficiently utilizing the radio resources. In CR networks, the CR users have opportunities to access the licensed spectrum bands assigned to the primary users (PUs). Since the PUs have priorities to use the bands, the CR users are not allowed to generate unacceptable interference to them. In this paper, we investigate power allocation schemes for CR networks with both direct and AF relay-aided transmissions. We first formulate an overall rate optimization problem with interference constraints to the PU and peak power constraints at each node and obtain solutions by theoretical analysis. We also simulate the solution base on different location of the relay and different location of the PU network. we compare the results with equal power allocation

**Index Terms:** Cognitive Radio Networks, Optimum power allocation, Interference Constraints, Direct transmission, Amplify and forward

---

نویسنده مسئول: روح‌اله آقاجانی، استادیار، دانشکده مهندسی برق، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، اصفهان، ایران، aghajani@iaun.ac.ir

## ۱- مقدمه

تحقیقات اخیر سازمان‌های ملی تخصیص فرکانس نشان می‌دهند که، طیف فرکانسی به شکل بهینه مورد استفاده قرار نمی‌گیرد؛ بعضی باندهای فرکانسی اکثر اوقات به شدت مورد استفاده قرار می‌گیرند، در حالی که بقیه فقط گاهی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در رادیوشناختی<sup>۱</sup> با اجازه دادن به کاربران ثانویه<sup>۲</sup> برای دسترسی به باندهایی که بدون استفاده مانده‌اند یا بخشی از آن باندها که به وسیله‌ی کاربران اولیه<sup>۳</sup> استفاده نشده‌اند، تا زمانی که با کاربران اولیه تداخل مخرب ایجاد نکنند، قصد افزایش بهره‌وری طیف را دارد [۱].

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

۱- دسترسی فرصت طلبانه به طیف<sup>۴</sup>: که در آن یک کاربر ثانویه تنها زمانی به یک باند فرکانسی دسترسی دارد که این باند در حال استفاده توسط کاربر اولیه نباشد. ۲- اشتراک طیف<sup>۵</sup>: که در آن کاربر ثانویه، همزمان با کاربر اولیه، از یک طیف فرکانسی برای انتقال داده استفاده می‌کند، اما کاربر ثانویه محدودیت توان ارسالی برای تضمین کیفیت خدمات<sup>۶</sup> کاربر اولیه را لحاظ می‌کند. ۳- اشتراک طیف بر اساس گوش دادن<sup>۷</sup>: که در آن کاربر ثانویه ابتدا به وضعیت کاربر اولیه (فعال/بیکار)<sup>۸</sup> گوش می‌دهد و سپس روش به اشتراک‌گذاری طیف را بر اساس نتیجه‌ی گوش کردن انتخاب می‌کند [۲].

در فن‌آوری اشتراک طیف، یک کاربر ثانویه تا زمانی که تداخل ایجاد شده برای کاربران اولیه پایین‌تر از حد مجاز باقی بماند، می‌تواند از باند مجوزدار استفاده کند. به همین دلیل کنترل توان یکی از کلیدی‌ترین مسائل در این فن‌آوری است [۳-۴].

فن‌آوری دیگری که نیز اخیراً به آن توجه بیشتری شده است مخابرات مشارکتی<sup>۹</sup> است. مخابرات مشارکتی و روش‌های مختلف رله کردن<sup>۱۰</sup> می‌تواند باعث بهبود چشم‌گیر در گذرده‌ی<sup>۱۱</sup> افزایش نرخ و گسترش دامنه پوشش<sup>۱۲</sup> و اسفاده مؤثرتر از توان بشود [۵-۹]. مزیت شبکه‌های رله ایجاد تنوع در ارسال و دریافت با استفاده از یک رله بین منبع و مقصد است [۶]. راهبردهای معمول مورد استفاده در مقالات به منظور بهبود عملکرد شبکه‌های بی‌سیم، راهبردهای تقویت و ارسال<sup>۱۳</sup>، کدبرداری و ارسال<sup>۱۴</sup> و فشرده‌سازی و ارسال<sup>۱۵</sup> هستند [۷-۹].

در [۱۰] یک روش مشارکت مدیریت شده بررسی شده است و نشان داده شده که مدیریت بر منابع از جمله توان و زمان استفاده از رله، منجر به کاهش نرخ خطای سمبل، کاهش توان متوسط مصرفی و ایجاد فرصت ارسال و دریافت برای رله خواهد شد.

در شبکه‌های شناختی چون کاربران ثانویه باید تداخل ایجاد شده برای کاربران اولیه را محدود کنند، معمولاً با توان پائینی کار می‌کنند، شیوه‌های مشارکت و ارسال با کمک رله<sup>۱۶</sup> در شبکه‌های رادیوشناختی می‌تواند در جبران ارسال با توان پایین مؤثر باشند. با الهام از شبکه‌های رادیوشناختی و رله، شبکه رله‌ای شناختی<sup>۱۷</sup> 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 [۸] و [۷].

در [۱۱]، نویسندگان نرخ‌های قابل دستیابی به وسیله روش‌های مشارکتی کدبرداری و ارسال و تقویت و ارسال را در شبکه‌های رله حسگری با محدودیت‌های توان و پهنای باند برای تعداد زیادی رله بررسی کرده‌اند.

در یک شبکه مبتنی بر شناخت با اشتراک گذاری طیف در الگوی لایه‌ی زیرین، 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 [۱۲].

هدف از تخصیص توان این است که داده با بالاترین نرخ ممکن با توجه به محدودیت‌های تداخل و با توجه به محدودیت 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<sup>۱۸</sup> کانال و روش به اشتراک گذاری طیف مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۳-۱۹].

در [۲۰] تخصیص توان برای راهبرد کدبرداری و گسیل نمودی در یک کانال m-nakagami بررسی شده است.

همچنین در [۲۱] تخصیص توان برای شبکه رله‌ی چندپرسی بررسی شده است. در این شبکه‌ها توان ارسالی، تحت محدودیت‌های تداخل و همچنین نسبت سیگنال به نویز مورد نیاز گیرنده، حداقل 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.

## ۲- کارهای مرتبط

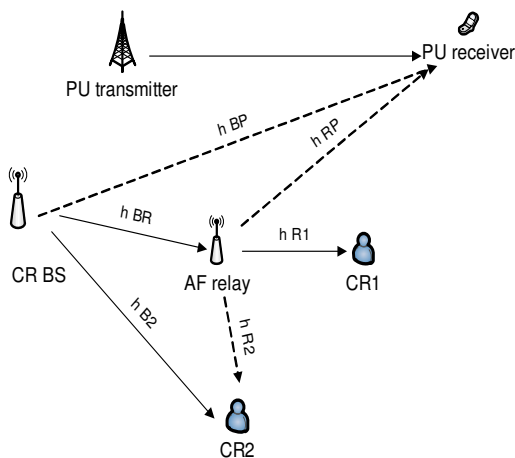
در تحقیقات دیگری یک شبکه با دو کاربر که یکی به کمک رله دریافت اطلاعات دارد و دیگری بدون کمک رله، نیز بررسی شده است [۲۲-۲۴]. در این کارها فعالیت شبکه بدون حضور یک شبکه اولیه، بررسی شده است.

در [۲۲] برای مدیریت تداخل در داخل شبکه، یک روش برای کاهش مؤثر 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 [۲۳] بر اساس روش گوش دادن به طیف<sup>۱۹</sup> انتقال داده توسط یک رله با راهبرد کدبرداری و ارسال بررسی شده است. احتمال خاموشی برای چهار طرح، شامل انتقال ارتباط فراسو<sup>۲۰</sup> و ارتباط فراسو<sup>۲۱</sup> محاسبه شده است.

نواحی نرخ<sup>۲۲</sup> برای طرح‌های فراسو و فروسو برای راهبرد کدبرداری و ارسال بررسی شده است [۲۴].

می‌دهد.  $\Phi$  یک متغیر تصادفی با توزیع رابلی و واریانس ۱ است و  $\beta$  تلفات مسیر است، که با فاصله به صورت زیر مرتبط می‌شود.



شکل (۱): ساختار مورد مطالعه

Fig.(1): The structure of a studied CR network.

$$1. \beta = d^{-\delta} \quad (2)$$

در رابطه فوق  $d$  فاصله و  $\delta$ ، ضریب تلفات است.

۲. همان‌طور که گفته شد، انتقال داده در دو فاز انجام می‌شود:

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

۳. 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  $X_2$  (سیگنال برای کاربر دوم) را 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 حذف تداخل این سیگنال با سیگنال  $X_2$ ، در فاز ۲ به کار ببرد.

۴. از اثر تداخل سیگنال‌های ارسالی شبکه اولیه بر روی گیرنده‌های شبکه ثانویه صرف نظر می‌کنیم.

۵. 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 فاز ۱ است.  $n_R[1]$  و  $n_2[1]$  نویز سفید گوسی مختلط با  $CN(0, \sigma^2)$  به ترتیب برای رله و کاربر دوم در فاز اول است.

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

در [۲۵] روش‌های تخصیص توان بهینه در براساس راهبرد تقویت و ارسال بررسی شده است. این اولین مطالعه‌ای است که در آن تخصیص توان در یک شبکه رادیوشناختی دو کاربره با دو مسیر، یک مسیر مستقیم و دیگری مسیر ارسال به کمک رله، بررسی می‌شود. در این کار از راهبرد کدبرداری و ارسال استفاده شده است. 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 [۷].

در این مقاله، هدف حداکثر کردن مجموع نرخ دو کاربر ثانویه است که یکی به دلیل نزدیکی به ایستگاه مرکزی از دریافت مستقیم استفاده می‌کند و دیگری به دلیل دور بودن از ایستگاه مرکزی از یک رله با راهبرد تقویت و گسیل بهره می‌برد.

در این مقاله یک شبکه شناختگر مطابق شکل (۱) را بررسی می‌کنیم، که شامل یک ایستگاه فرستنده مرکزی است که داده را 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 (کاربر دورتر)، انتقال داده به وسیله رله و در دو فاز انجام 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 سوم 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 از مقاله ارائه می‌دهیم.

### ۳- توصیف سیستم

ما یک سیستم لایه ی زیرین مطابق شکل (۱) را بررسی می‌کنیم. در این شبکه‌ی رادیوشناختی، یک فرستنده‌ی رادیوشناختی برای دو کاربر رادیوشناختی دو داده متفاوت را ارسال می‌کند.

در این شبکه از راهبرد تقویت و ارسال استفاده می‌شود. رله به صورت دو طرفه غیرهمزمان در نظر گرفته می‌شود.

همه کانال‌ها به صورت کانال با محوشدگی رابلی مدل شده‌اند و فرض شده است که بهره‌ی کانال‌ها در دو فاز ثابت باقی می‌ماند. ضرایب کانال با توزیع رابلی مل شده‌اند و به مسافت وابسته هستند. که این وابستگی به صورت

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

بیان می‌شود. با توجه به شکل (۱)  $h_{BP}$ ،  $h_{BR}$ ،  $h_{B2}$  به ترتیب ضرایب‌های کانال فرستنده - کاربر دوم، فرستنده-رله و فرستنده-گیرنده شبکه اولیه را نشان می‌دهند.  $h_{RP}$ ،  $h_{R2}$ ،  $h_{R1}$  به ترتیب ضرایب کانال رله-کاربر اول، رله-کاربر دوم و رله-گیرنده شبکه‌ی اولیه را نشان

بررسی کرده‌ایم ZF(zero-forcing) است. با استفاده از این گیرنده، سیگنال دریافتی در گیرنده دوم بعد از حذف کننده تداخل متوالی به صورت رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\hat{y}_2[2] = \sqrt{P_3}h_{B2}x_2 + h_{R2} \frac{\sqrt{P_2}}{\sqrt{P_1|h_{BR}|^2+N_0}} \left[ \sqrt{P_1}h_{BR}(X_1 - \hat{X}_1) + n_R[1] \right] + n_2[2] \quad (11)$$

در رابطه فوق  $\hat{X}_1$  تخمینی از مقدار  $X_1$  است که با گیرنده مجهز به ZF به صورت رابطه زیر تخمین زده می‌شود.

$$\hat{X}_1 = \frac{1}{\sqrt{P_1}h_{B2}} y_2[1] = x_1 + \frac{n_2[1]}{\sqrt{P_1}h_{B2}} \quad (12)$$

با توجه به اینکه  $\sqrt{P_3}h_{B2}x_2$  جمله مربوط به سیگنال مطلوب است و جمله مربوط به نویز شامل سه جمله به صورت

$$h_{R2} \frac{\sqrt{P_2}}{\sqrt{P_1|h_{BR}|^2+N_0}} \left[ \sqrt{P_1}h_{BR}(x_1 - \hat{x}_1) + n_R[1] \right] + n_2[2]$$

است، بنابراین نسبت سیگنال به نویز در گیرنده‌ی ZF برابر است با:

$$\gamma_{2ZF} = \frac{P_3 h_{B2}^2 (P_1 h_{BR}^2 + N_0)}{P_2 h_{R2}^2 h_{BR}^2 N_0 + P_2 h_{R2}^2 h_{B2}^2 N_0 + (P_1 h_{BR}^2 + N_0) h_{B2}^2 N_0} \quad (13)$$

حالت سوم - اگر از یک گیرنده با حذف کننده تداخل به روش MMSE (minimum mean square error) استفاده کنیم در رابطه (۱۱) تخمین مقدار  $X_1$ ، از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\hat{X}_1 = \frac{\sqrt{P_1}h_{B2}}{(\sqrt{P_1}h_{B2})^2+N_0} y_2[1] \quad (14)$$

بنابراین سیگنال به نویز با استفاده از گیرنده MMSE به صورت زیر خواهد بود:

$$\gamma_{2MMSE} = \frac{P_3 h_{B2}^2}{N_0 + \frac{P_2(N_0 h_{R2}^2(N_0 + P_1 h_{BR}^2 + P_1 h_{B2}^2))}{N_0^2 + N_0 P_1 h_{B2}^2 + N_0 P_1 h_{BR}^2 + P_2^2 h_{B2}^2 h_{BR}^2}} \quad (15)$$

نرخ کاربر دوم برای هر دو حالت فوق با استفاده از نسبت سیگنال به نویز (رابطه (۱۳) یا رابطه (۱۵)) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$R_{2i}(P_1, P_2, P_3) = \frac{1}{2} \log_2 \left( 1 + \gamma_{2i} \right) \quad i = ZF, MMSE \quad (16)$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود نرخ ارسال داده  $X_2$  به  $P_3$  و  $P_1$  بستگی دارد.

بنابراین نرخ انتقال مجموع دو کاربر این شبکه رادیوشناختی برابر است با:

$$R_{ai}(P_1, P_2, P_3) = R_1(P_1, P_2) + R_{2i}(P_1, P_2, P_3) \quad i = ZF, MMSE \quad (17)$$

مسئله این مقاله حداکثر کردن نرخ انتقال مجموع در رابطه فوق است.

#### ۴- 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 استفاده از طیف اولویت دارد و شبکه ثانویه نباید برای آن تداخل مخرب ایجاد کند. به همین دلیل کنترل توان اهمیت پیدا می‌کند. بنابراین مسئله حداکثر کردن نرخ داده مجموع با توجه به محدودیت‌های تداخل با شبکه اولیه باید حل شود. بنابراین یک مسئله بهینه سازی مقید به صورت زیر خواهیم داشت:

$$\max_{P_1, P_2, P_3} R_{ai}(P_1, P_2, P_3),$$

$$y_1[2] = h_{R1} \frac{\sqrt{P_2}}{\sqrt{P_1|h_{BR}|^2+N_0}} \left[ \sqrt{P_1}h_{BR}x_1 + n_R[1] \right] + n_1[2] \quad (5)$$

$$y_2[2] = \sqrt{P_3}h_{B2}x_2 + h_{R2} \frac{\sqrt{P_2}}{\sqrt{P_1|h_{BR}|^2+N_0}} \left[ \sqrt{P_1}h_{BR}x_1 + n_R[1] \right] + n_2[2] \quad (6)$$

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

۷. نرخ انتقال داده  $X_1$  از رابطه زیر به دست می‌آید:

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

که در رابطه فوق  $\gamma_1$  نسبت توان سیگنال به توان نویز است و به کمک رابطه‌ی (۵) و با توجه به اینکه  $h_{R1} \frac{\sqrt{P_2}}{\sqrt{P_1|h_{BR}|^2+N_0}} \sqrt{P_1}h_{BR}x_1$  جمله مربوط به سیگنال مطلوب و  $h_{R1} \frac{\sqrt{P_2}}{\sqrt{P_1|h_{BR}|^2+N_0}} n_R[1] + n_1[2]$  جمله مربوط به نویز است، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

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

۸. همان‌طور که می‌بینیم نرخ انتقال داده‌ی  $X_1$  به  $P_2$  و  $P_1$  (توان رله و فرستنده در فاز اول) بستگی دارد. و مستقل از  $P_3$  (توان فرستنده در فاز دوم) است.

۹. در به دست آوردن SNR سیگنال  $X_2$  به این نکته باید توجه کرد که سیگنال  $X_1$  برای کاربر دوم تداخل محسوب می‌شود و نسبت سیگنال به نویز بعلاوه تداخل را کاهش می‌دهد و باید حذف شود. برای حذف این تداخل دو حالت را در نظر می‌گیریم:

حالت اول - اگر فرض کنیم کانال BS به CR2 آنقدر خوب باشد که CR2 بتواند  $X_1$  را در فاز اول به خوبی دیکد کند ( $h_{B2} \geq h_{BR}$ ). کاربر دوم در فاز دوم می‌تواند سیگنال  $X_1$  دریافتی از رله در فاز دوم را از سیگنال دریافتی کم کند و رابطه‌ی (۶) با صرف نظر کردن از تداخل سیگنال  $X_1$  به صورت زیر در می‌آید

$$\hat{y}_2[2] = \sqrt{P_3}h_{B2}x_2 + h_{R2} \frac{\sqrt{P_2}}{\sqrt{P_1|h_{BR}|^2+N_0}} n_R[1] + n_2[2] \quad (9)$$

با در نظر گرفتن رابطه فوق و با توجه به اینکه  $\sqrt{P_3}h_{B2}x_2$  جمله مربوط به سیگنال مطلوب و  $h_{R2} \frac{\sqrt{P_2}}{\sqrt{P_1|h_{BR}|^2+N_0}} n_R[1] + n_2[2]$  جمله مربوط به نویز است،  $\gamma_{21}$  که نسبت توان سیگنال به توان نویز برای سیگنال  $X_2$  در حالت اول است، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\gamma_{21} = \frac{P_3 h_{B2}^2 (P_1 h_{BR}^2 + N_0)}{P_2 h_{R2}^2 N_0 + N_0 (P_1 h_{BR}^2 + N_0)} \quad (10)$$

در راهبرد A رله کدبرداری انجام نمی‌دهد بنابراین این حالت فقط در راهبرد DF اتفاق خواهد افتاد.

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 حذف کننده تداخل متوالی<sup>۲۳</sup> (SIC) می‌توان تاحدی به حذف تداخل کمک کرد. دو نوع گیرنده با مجهز به حذف کننده متوالی تداخل در نظر می‌گیریم. یکی از گیرنده‌هایی که

$$P_{2L}^1 = 0 \quad (23)$$

حالت دوم- وقتی که  $P_2 \geq \frac{1-P_{BS}|h_{BP}|^2}{|h_{RP}|^2}$  از رابطه‌ی (۲۰)  $P_3^* = \left\{ \frac{1-P_2|h_{RP}|^2}{|h_{BP}|^2} \right\}$ : به دست می‌آید.

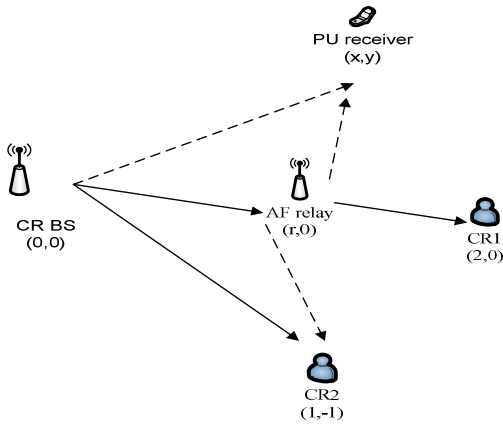
در این حالت هم از معادله  $R_{a_i}$  (رابطه‌ی ۲۱) برحسب  $P_2$  مشتق می‌گیریم (ضمیمه‌ی ۲). حداکثر و حداقل  $P_2$  در این حالت با توجه به محدودیت‌ها به صورت زیر است:

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

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

به طور کلی

$$P_2^* = \underset{P_{2,i}^*}{\operatorname{argmax}} R_{a_i}(P_1^*, P_{2,i}^*, P_{3,i}^*) \quad i = ZF, MMSE \quad (25)$$



شکل (۲): نمایش مختصات  
Fig. (2): The location illustration

## ۵- نتایج عددی

در این قسمت، عملکرد تخصیص توان بهینه را بررسی کرده‌ایم به منظور مشاهده‌ی اثر تخصیص توان بر میزان بهبود نرخ مجموع در شبکه ذکر شده، نرخ مجموع در حالت تخصیص توان بهینه با نرخ مجموع همین شبکه با تخصیص توان برابر (EPA) مقایسه شده است، که در آن:

$$P_1 = P_2 = P_3 = \min \left\{ P_{BS}, P_R, \frac{1}{|h_{BP}|^2 + |h_{RP}|^2} \right\} \quad (26)$$

همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده، فرض می‌کنیم که مکان فرستنده، کاربر اول و کاربر دوم ثابت است و مختصات گیرنده شبکه اولیه (۱،۲) و ثابت است و رله روی خطی که فرستنده و کاربر اول را به هم وصل می‌کند جابه‌جا می‌شود. توان ارسالی در شبکه ثانویه برابر با  $P_{BS} = P_R = 15$  (dB) و چگالی طیف توان نویز در همه کانال‌ها  $\sigma^2 = 1$  و ضریب تلفات مسیر  $\delta = 4$  در نظر گرفته شده است.

شکل (۳) تاثیر مکان رله بر روی توان بهینه را نشان می‌دهد. همان‌طور که از رابطه‌ی (۱۶) برمی‌آید، توان بهینه فرستنده در فاز اول، ثابت است و به  $r$  بستگی ندارد. علاوه بر آن، می‌توانیم نتیجه بگیریم که توان بهینه

$$s.t \quad P_1 |h_{BP}|^2 \leq I, \quad (18-a)$$

$$P_3 |h_{BP}|^2 + P_2 |h_{RP}|^2 \leq I, \quad (18-b)$$

$$P_1 \leq P_{BS}, \quad (18-c)$$

$$P_2 \leq P_R, \quad (18-d)$$

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

رابطه‌های (18-a) و (18-b) محدودیت‌هایی هستند که باید برای عدم ایجاد تداخل مخرب از جانب کاربر ثانویه برای کاربران اولیه در شبکه رادیوشناختی لحاظ شود.  $I$  آستانه‌ی تداخلی است که شبکه اولیه می‌تواند تحمل کند. رابطه‌های (18-c)-(18-e) حداکثر توان‌هایی هستند که فرستنده و رله با توجه به محدودیت‌های سخت افزاری در فاز اول و دوم می‌توانند تولید کنند.

از رابطه‌های (۷) و (۸) می‌بینیم که نرخ انتقال داده‌ی کاربر اول با افزایش  $P_1$  افزایش می‌یابد.

و از رابطه‌های (۱۳)، (۱۵) و (۱۶) 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 (18-a) و (18-c) باشد:

$$P_1^* = \left\{ P_{BS}, \frac{1}{|h_{BP}|^2} \right\} \quad (19)$$

توانی که فرستنده در فاز دوم به کار می‌برد،  $P_3$ ، تاثیری بر  $R_1(P_1, P_2)$  ندارد ولی  $R_2(P_1, P_2, P_3)$  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 (18-b) و (18-e) 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  $P_2$ ، صدق می‌کند.

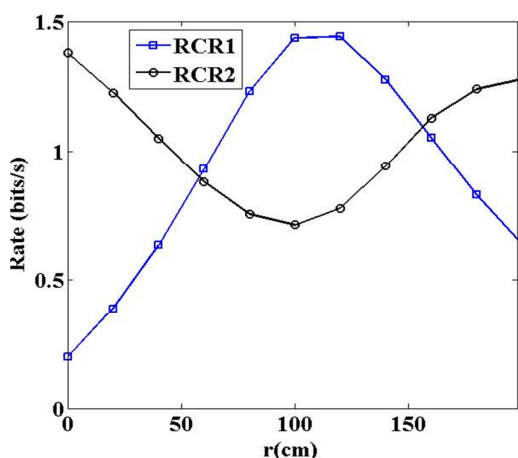
در مورد  $P_2$ ، هم نرخ انتقال کاربر اول  $R_1(P_1, P_2)$  و هم نرخ انتقال کاربر دوم  $R_2(P_1, P_2, P_3)$  وابسته به  $P_2$  هستند.  $R_1$  با افزایش  $P_2$  افزایش می‌یابد و  $R_2$  با افزایش  $P_2$  کاهش می‌یابد. پس برای مشخص شدن نزولی یا صعودی بودن تابع  $R_a(P_1, P_2, P_3)$  نسبت به  $P_2$ ، از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

حالت اول- وقتی که  $P_2 \leq \frac{1-P_{BS}|h_{BP}|^2}{|h_{RP}|^2}$  باشد، از رابطه‌ی (۲۰):  $P_3^* = P_{BS}$  به دست می‌آید.

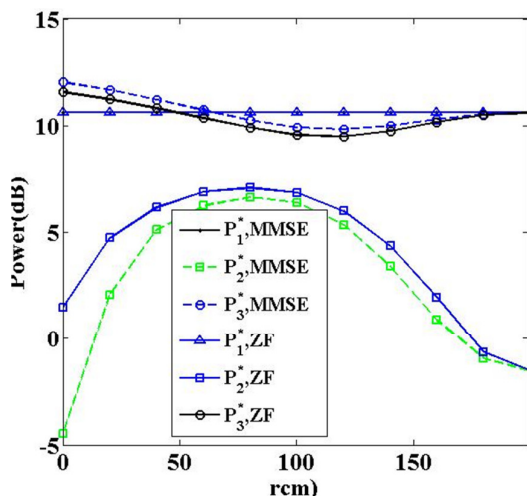
$$R_{a_i}(P_1^*, P_2, P_3^*) = R_1(P_1^*, P_2) + R_{2i}(P_1^*, P_2, P_3^*) \quad i = ZF, MMSE \quad (21)$$

در این حالت از معادله  $R_{a_i}$  برحسب  $P_2$  مشتق می‌گیریم. برحسب این که  $R_{a_i}$  نسبت به  $P_2$  صعودی باشد یا نزولی، مقدار بهینه‌ی  $P_2$  مشخص می‌شود (ضمیمه‌ی ۱). حداکثر  $P_2$  در این حالت برابر  $P_{2U}^1$  و حداقل آن،  $P_{2L}^1$ ، صفر است (بالانویس یک نشان دهنده حالت اول است).

$$P_{2U}^1 = \min \left\{ \frac{1-P_{BS}|h_{BP}|^2}{|h_{RP}|^2}, P_R \right\} \quad (22)$$



شکل (۴): نمودار نرخ بهینه برای کاربر اول و نرخ کاربر دوم  
Fig.(4): Optimized rate for CR1 and CR2



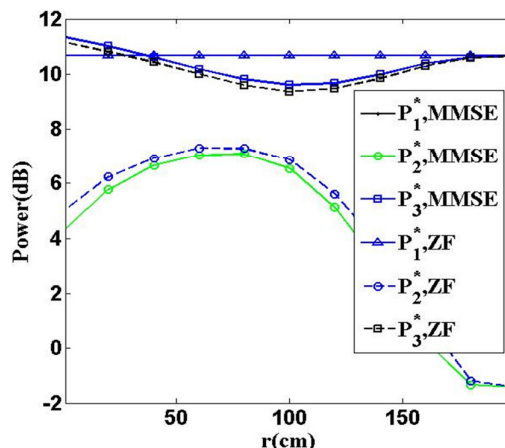
شکل (۵): نمودار توان‌های بهینه تخصیص یافته برحسب مکان‌های مختلف رله به ازای  $\sigma^2 = 4$   
Fig.(5): Optimized power solution for different relay locations for  $\sigma^2 = 4$

شکل (۵) شبیه‌سازی توان بهینه برای  $\sigma^2 = 4$  است و نشان می‌دهد که اگر  $\sigma^2$  بزرگ شود، تفاوت دو گیرنده کمی محسوس‌تر می‌شود. به دلیل این‌که گیرنده MMSE نسبت به گیرنده ZF حذف‌کننده تداخل بهتری است، وقتی توان زیاد است، گیرنده MMSE بهتر عمل می‌کند. در شکل (۶) نرخ مجموع دو کاربر بر حسب مکان رله ترسیم شده است. نرخ مجموع ابتدا با افزایش  $r$  افزایش می‌یابد و سپس کاهش می‌یابد. همان‌طور که پیشتر گفته شد، رله AF با تخصیص توان بهینه به صورت خطی عمل می‌کند.

حداکثر نرخ مجموع در حالت EPA زمانی اتفاق می‌افتد که  $r = 1$  است ولی حداکثر نرخ مجموع در حالت تخصیص توان بهینه در  $r = 1.6$  اتفاق می‌افتد یعنی وقتی رله به CR1 نزدیک‌تر می‌شود. زیرا وقتی رله به CR1 نزدیک‌تر می‌شود توان رله‌ی کمتری می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد با وجود اینکه این کار نرخ CR1 را کاهش

فرستنده و رله در فاز دوم،  $P_3^*$ ،  $P_2^*$ ، وقتی رله به فرستنده نزدیک است، تحت کنترل کاربر اول است و با دور شدن رله از فرستنده تحت کنترل کاربر دوم قرار می‌گیرد. یعنی وقتی رله به فرستنده نزدیک است با وجودی که افزایش توان بهینه‌ی رله، باعث کاهش نرخ CR2 می‌شود، توان بهینه برای بالا رفتن نرخ CR1 افزایش می‌یابد.

با دور شدن رله از فرستنده از یک سو رله به کاربر دوم نزدیک می‌شود یعنی تداخل افزایش می‌یابد و از سوی دیگر هر چه رله به گیرنده نزدیک‌تر باشد نیاز کمتری به تقویت سیگنال فرستنده وجود دارد. پس با کاهش مقدار  $P_2^*$  مواجه هستیم. که منجر به افزایش نرخ CR2 می‌شود. این تغییرات نرخ دو کاربر در شکل (۴) دیده می‌شود.



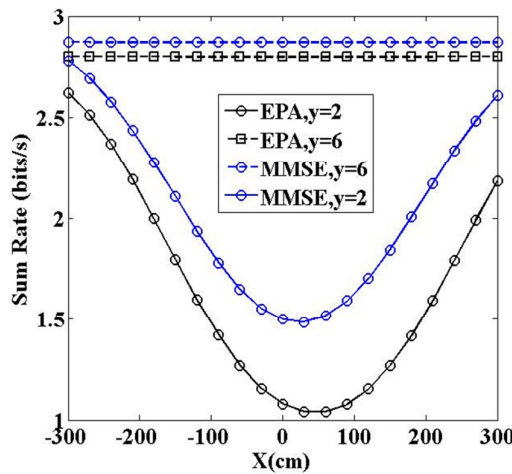
شکل (۳): نمودار توان‌های بهینه تخصیص یافته برحسب مکان رله  
Fig.(3): Optimized power solution for different relay locations

همان‌طور که در شکل (۴) دیده می‌شود، 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 نرخ داده کاربر اول است.

همان‌طور که در شکل (۳) دیده می‌شود و با توجه به رابطه‌ی (۲۰) این نتیجه به دست می‌آید که این تغییرات  $P_2^*$  در ابتدا منجر به کاهش مقدار  $P_3^*$  و سپس باعث افزایش آن شده است. مقایسه‌ی دو دریافت‌کننده نشان می‌دهد که توان بهینه فرستنده در فاز اول در هر دو گیرنده تقریباً مشابه است.

از سوی دیگر،  $P_3^*$  در گیرنده‌ی MMSE در مقایسه با گیرنده‌ی ZF کمی بیشتر است در حالی که  $P_2^*$  در گیرنده‌ی MMSE در مقایسه با گیرنده‌ی ZF کمی کمتر است. این تفاوت اندک به این دلیل است که در شبیه‌سازی اثر  $(\sigma^2 = 1)$  روی نرخ CR2 قابل توجه نیست، به همین دلیل تفاوت نتایج دو گیرنده کم است.

عبارتی دور شدن شبکه اولیه، چون امکان تداخل کمتر می‌شود، 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 (۸) مقایسه نرخ مجموع برای مکان‌های مختلف شبکه‌ی اولیه را به‌ازای تخصیص توان مساوی و تخصیص توان بهینه نشان می‌دهد. وقتی  $y=2$  است، به دلیل محدودیت‌های تداخل با شبکه اولیه، هر دو نمودار به ازای  $X$  ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابند. (با حرکت روی محور  $X$  تداخل ابتدا زیاد و سپس کم می‌شود. وقتی  $y=6$  است، تداخل وجود ندارد، بنابراین نرخ ثابت است.



شکل (۸): نرخ مجموع برای مکان‌های مختلف شبکه‌ی اولیه  
Fig. (8): Sum rate for different PU locations.

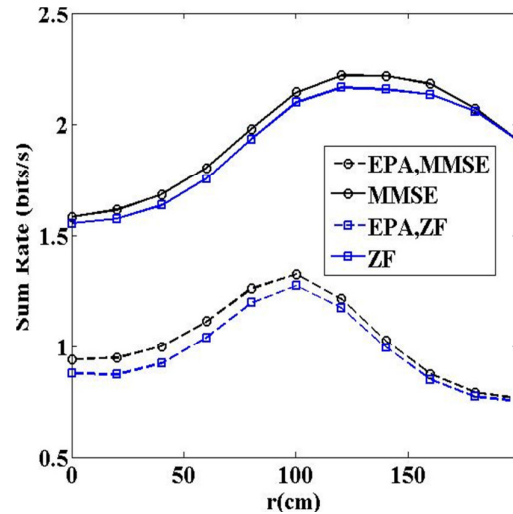
#### ۶- نتیجه گیری

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. و با حالت تخصیص توان مساوی مقایسه کردیم. بهبود نرخ بین ۲۰ تا ۸۰ درصد به دست می‌آید.

#### پی‌نوشت:

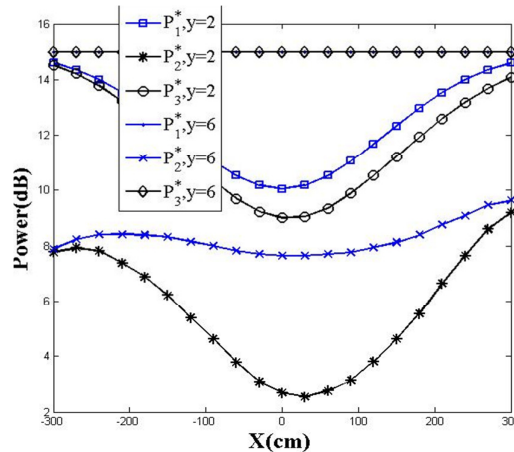
1. Cognitive radio
2. Secondary user
3. Primary user
4. Opportunistic spectrum access
5. Spectrum sharing
6. QOS (Quality Of Service)
7. Sensing-based spectrum sharing
8. idle/active
9. Cooperative communication
10. Relay techniques
11. Throughput

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 کاهش می‌یابد. در شکل (۷) فرض شده رله در مکان (1,0) ثابت است و شبکه‌ی اولیه روی محور  $X$  بین  $[-3,3]$  متر حرکت می‌کند. یک‌بار مکان عمودی شبکه‌ی اولیه را  $y=2$  در نظر می‌گیریم. و یک بار دورتر به شبکه ثانویه روی  $y=6$  قرار می‌دهیم.



شکل (۶): نرخ انتقال بهینه به ازای مکان‌های مختلف رله

Fig. (6): Optimized power solution for different relay locations.



شکل (۷): توان بهینه برای مکان‌های مختلف شبکه‌ی اولیه

Fig.(7): Optimized power solution for different PU locations.

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 ارسالی شبکه‌ی ثانویه را کم کرد و سپس شبکه‌ی اولیه از شبکه‌ی ثانویه دور می‌شود و می‌توان توان را افزایش داد. وقتی  $y=6$  است، به

if  $(k_1 > i_1, b_1 < 0, d_1 > 0)$ ,  $\frac{\partial Ra_1}{\partial P_2} > 0$  for  $P_2 \in [0, P_L], P_2^*$

$= \{P_L\}$  if  $(k_1 > i_1, b_1 < 0, d_1 < 0)$ ,  $\frac{\partial Ra_1}{\partial P_2} < 0$  for  $P_2$

$$\in \left[ -\sqrt{\frac{-d_1}{k_1 - i_1}} - b_1, \sqrt{\frac{-d_1}{k_1 - i_1}} - b_1 \right], P_2^* = 0$$

if  $(k_1 > i_1, b_1 < 0, d_1 < 0)$ ,  $\frac{\partial Ra_1}{\partial P_2} < 0$  for  $P_2$

$$\in \left[ \sqrt{\frac{-d_1}{k_1 - i_1}} - b_1, P_N \right] \cup P_2$$

$$\in \left[ 0, -\sqrt{\frac{-d_1}{k_1 - i_1}} - b_1 \right], P_2^* = \{P_L\}$$

if  $(K_1 < i_1, b_1 > 0)$ ,  $\frac{\partial Ra_1}{\partial P_2} < 0$  for  $P_2 \in [0, P_L], P_2^* = 0$

if  $(K_1 < i_1, b_1 > 0)$ ,  $\frac{\partial Ra_1}{\partial P_2} > 0$  for  $P_2 < \sqrt{\frac{-d_1}{K_1 - i_1}} - b_1, P_2^* = \sqrt{\frac{-d_1}{K_1 - i_1}} - b_1$

if  $(K_1 < i_1, b_1 > 0)$ ,  $\frac{\partial Ra_1}{\partial P_2} < 0$  for  $P_2 > \sqrt{\frac{-d_1}{K_1 - i_1}} - b_1, P_2^* = 0$

if  $(K_1 < i_1, b_1 < 0, d_1 < 0)$ ,  $\frac{\partial Ra_1}{\partial P_2} < 0$  for  $P_2 \in [0, P_L], P_2^* = 0$

if  $(K_1 < i_1, b_1 < 0, d_1 > 0)$ ,  $\frac{\partial Ra_1}{\partial P_2} > 0$  for  $P_2 \in$

$$\left[ -\sqrt{\frac{-d_1}{k_1 - i_1}} - b_1, \sqrt{\frac{-d_1}{k_1 - i_1}} - b_1 \right], P_2^* = \{P_L\}$$

if  $(K_1 < i_1, b_1 < 0, d_1 > 0)$ ,  $\frac{\partial Ra_1}{\partial P_2} > 0$  for  $P_2 \in$

$$\left[ \sqrt{\frac{-d_1}{k_1 - i_1}} - b_1, P_N \right] \cup P_2 \in$$

$$\left[ \sqrt{0, -\sqrt{\frac{-d_1}{k_1 - i_1}} - b_1 \right], P_2^* = 0$$

## ضمیمه‌ی ۲

$$P_U = \min \left\{ \frac{I}{|h_{RP}|^2}, P_R \right\}$$

وقتی که  $P_2 > \frac{1 - P_{BS}|h_{BP}|^2}{|h_{RP}|^2}$  باشد، از رابطه‌ی (۲۰):  $P_3^* = \left\{ \frac{1 - P_2|h_{RP}|^2}{|h_{BP}|^2} \right\}$  به دست می‌آید.

$$d = \frac{h_{R2}^2 (h_{BR}^2 + h_{B2}^2)}{h_{B2}^2 (P_1^* h_{BR}^2 + N_0)}$$

$$e = \frac{I h_{B2}^2}{N_0 h_{BP}^2}, f = \frac{h_{RP}^2 h_{B2}^2}{N_0 h_{BP}^2}, k = ad^2$$

$$i_2 = deb^2 + deb + fb + fb^2 + afd$$

$$b_2 = \frac{ad - dabe - adf - af}{ad^2 - deb - deb^2 - afd - fb^2 - fb}$$

$$d_2 = a + ae - dea^2 - fa^2 - \frac{(ad - deab - abf - af)^2}{ad^2 - deb^2 - deb - afd - fb^2 - fb}$$

12. range

13. Amplify-and-forward

14. Decode-and-forward

15. Compress-and-forward

16. Relay-aided

17. Cognitive Relay Network

18. Fading

19. Overhearing

20. Uplink

21. Downlink

22. Rate regions

23. Successive Interference Cancellation

24. Equal power allocation

## ضمائم

### ضمیمه‌ی ۱

وقتی که  $P_2 \leq \frac{1 - P_{BS}|h_{BP}|^2}{|h_{RP}|^2}$  باشد، از رابطه‌ی (۲۰):  $P_3^* = P_{BS}$  به دست می‌آید.

$$P_L = \frac{I - P_{BS} |h_{BP}|^2}{|h_{RP}|^2}$$

$$a = \frac{N_0^2}{P_1^* h_{BR}^2 h_{R1}^2} + \frac{N_0}{h_{R1}^2}, b = \frac{N_0}{P_1^* h_{BR}^2}, c = \frac{P_{BS} h_{B2}^2}{N_0}, d = \frac{h_{R2}^2 (h_{BR}^2 + h_{B2}^2)}{h_{B2}^2 (P_1^* h_{BR}^2 + N_0)}$$

$$k_1 = ad^2, i_1 = dcb^2 + dcb, b_1 = \frac{ad - dabc}{ad^2 - dcb - dcb^2}$$

$$d_1 = a + ac - dca^2 - \frac{(ad - dcb)^2}{ad^2 - dcb^2 - dcb}$$

$$s = \frac{h_{R2}^2 (N_0 + P_1^* h_{B2}^2)}{N_0 (P_1^* h_{BR}^2 + P_1^* h_{B2}^2 + N_0) + P_1^* h_{B2}^2 h_{BR}^2}$$

$$k_4 = as^2, i_4 = scb^2 + scb$$

$$b_4 = \frac{as - sabc}{as^2 - scb - scb^2}$$

$$d_4 = a + ac - sca^2 - \frac{(ad - dcab)^2}{ad^2 - dcb^2 - dcb}$$

$$\frac{\partial R_{aZF}}{\partial P_2} =$$

$$\frac{(K_1 - i_1)(P_2 + b_1)^2 + d_1}{d^2 (P_2^2 + \frac{2d + cd}{d^2} P_2 + \frac{c+1}{d^2})(b + b^2)(P_2^2 + \frac{a + 2ab}{b^2 + b} P_2 + \frac{a^2}{b^2 + b})}$$

$$a = \frac{N_0^2}{P_1^* h_{BR}^2 h_{R1}^2}, b = \frac{N_0}{P_1^* h_{BR}^2}, c = \frac{P_{BS} h_{B2}^2}{N_0}$$

$$\frac{\partial R_{aMMSE}}{\partial p_2} =$$

$$\frac{(K_4 - i_4)(P_2 + b_4)^2 + d_4}{S^2 (P_2^2 + \frac{2s + cs}{S^2} P_2 + \frac{c+1}{S^2})(b + b^2)(P_2^2 + \frac{a + 2ab}{b^2 + b} P_2 + \frac{a^2}{b^2 + b})}$$

برای گیرنده ZF هم بهینه به شکل زیر به دست می‌آید. برای گیرنده MMSE هم توان بهینه کاملاً مشابه گیرنده ZF به دست می‌آید:

if  $(K_1 > i_1, b_1 > 0)$ ,  $\frac{\partial Ra_1}{\partial P_2} > 0$  for  $P_2 \in [0, P_L], P_2^* = \{P_L\}$

if  $(k_1 > i_1, b_1 > 0)$ ,  $\frac{\partial Ra_1}{\partial P_2} < 0$  for  $P_2 > \sqrt{\frac{-d_1}{k_1 - i_1}} - b_1, P_2^* = \{P_L\}$

if  $(k_1 > i_1, b_1 > 0)$ ,  $\frac{\partial Ra_1}{\partial P_2} < 0$  for  $P_2 < \sqrt{\frac{-d_1}{K_1 - i_1}} - b_1, P_2^* = 0$



$P_2 \in [P_L, P_U]$  کوچکتر از صفر است.  
 و اگر  $(k_2 - i_2)(P_L + b_2)^2 + d_2 > 0$  باشد اگر  
 $P_2 \in \left[ P_L, \sqrt{\frac{d_2}{k_2 - i_2}} - b_2 \right]$  باشد صورت کسر بزرگتر از صفر است و اگر  
 $P_2 \in \left[ \sqrt{\frac{d_2}{k_2 - i_2}} - b_2, P_U \right]$  صورت کسر کوچکتر از صفر است.  
 برای  $P_L < -b_2$   
 اگر  $d_2 < 0$  صورت کسر برای همه  $P_2 \in [P_L, P_U]$   
 کوچکتر از صفر است.

و اگر  $d_2 > 0$  باشد برای  $P_2 \in \left[ -\sqrt{\frac{d_2}{k_2 - i_2}} - b_2, \sqrt{\frac{d_2}{k_2 - i_2}} - b_2 \right]$  صورت  
 کسر بزرگتر از صفر است. و برای  
 $P_2 \in \left[ \sqrt{\frac{d_2}{k_2 - i_2}} - b_2, P_U \right] \cup P_2 \in \left[ P_L, \sqrt{\frac{d_2}{k_2 - i_2}} - b_2 \right]$  صورت کسر  
 کوچکتر از صفر است.  
 و برای مخرج کسر داریم:  
 اگر  $k_3 > i_3$   
 برای  $P_L \geq -b_3$   
 اگر  $(k_3 - i_3)(P_L + b_3)^2 + d_3 > 0$  صورت کسر برای همه  
 $P_2 \in [P_L, P_U]$  بزرگتر از صفر است.

و اگر  $(k_3 - i_3)(P_L + b_3)^2 + d_3 < 0$  باشد اگر  
 $P_2 \in \left[ P_L, \sqrt{\frac{d_3}{k_3 - i_3}} - b_3 \right]$  باشد صورت کسر کوچکتر از صفر است و اگر  
 $P_2 \in \left[ \sqrt{\frac{d_3}{k_3 - i_3}} - b_3, P_U \right]$  صورت کسر بزرگتر از صفر است.  
 برای  $P_L < -b_3$   
 اگر  $d_3 > 0$  صورت کسر برای همه  $P_2 \in [P_L, P_U]$   
 بزرگتر از صفر است.

و اگر  $d_3 < 0$  باشد، برای  $P_2 \in \left[ -\sqrt{\frac{d_3}{k_3 - i_3}} - b_3, \sqrt{\frac{d_3}{k_3 - i_3}} - b_3 \right]$  صورت  
 کسر کوچکتر از صفر است. و برای  
 $P_2 \in \left[ \sqrt{\frac{d_3}{k_3 - i_3}} - b_3, P_U \right] \cup P_2 \in \left[ P_L, \sqrt{\frac{d_3}{k_3 - i_3}} - b_3 \right]$  صورت کسر بزرگتر  
 از صفر است  
 اگر  $k_3 < i_3$   
 برای  $P_L \geq -b_3$   
 اگر  $(k_3 - i_3)(P_L + b_3)^2 + d_3 < 0$  صورت کسر برای همه  
 $P_2 \in [P_L, P_U]$  کوچکتر از صفر است.

و اگر  $(k_3 - i_3)(P_L + b_3)^2 + d_3 > 0$  باشد اگر  
 $P_2 \in \left[ P_L, \sqrt{\frac{d_3}{k_3 - i_3}} - b_3 \right]$  باشد صورت کسر بزرگتر از صفر است و اگر  
 $P_2 \in \left[ \sqrt{\frac{d_3}{k_3 - i_3}} - b_3, P_U \right]$  صورت کسر کوچکتر از صفر است.  
 برای  $P_L < -b_3$   
 اگر  $d_3 < 0$  صورت کسر برای همه  $P_2 \in [P_L, P_U]$   
 کوچکتر از صفر است.

و اگر  $d_3 > 0$  باشد برای  $P_2 \in \left[ -\sqrt{\frac{d_3}{k_3 - i_3}} - b_3, \sqrt{\frac{d_3}{k_3 - i_3}} - b_3 \right]$  صورت  
 کسر بزرگتر از صفر است. و برای  $P_2 \in \left[ \sqrt{\frac{d_3}{k_3 - i_3}} - b_3, P_U \right] \cup P_2 \in \left[ P_L, \sqrt{\frac{d_3}{k_3 - i_3}} - b_3 \right]$  صورت  
 کسر کوچکتر از صفر است.  
 الگوریتم کلی یافتن  $P_2^*$  به صورت زیر است:

$$k_3 = d^2, i_3 = fd, b_3 = \frac{2d + ed - f}{2d^2 - 2fd}, d_3 = 1 + e - \frac{(2d - ed - f)^2}{4d^2 - 4fd}$$

$$s = \frac{h_{R2}^2(N_0 + P_1^* h_{BR}^2 + P_1^* h_{B2}^2)}{N_0(P_1^* h_{BR}^2 + P_1^* h_{B2}^2 + N_0) + P_1^* h_{B2}^2 h_{BR}^2}$$

$$K_s = as^2$$

$$i_s = seb^2 + seb + fb + fb^2 + afs$$

$$b_s = \frac{as - sabe - abf - af}{as^2 - seb - seb^2 - afs - fb^2 - fb}$$

$$d_s = a + ae - sea^2 - fa^2 - \frac{(as - seab - abf - af)^2}{as^2 - seb^2 - seb - afs - fb^2 - fb}$$

$$k_6 = s^2$$

$$i_6 = fs$$

$$b_6 = \frac{2s + es - f}{2s^2 - 2fs}$$

$$d_6 = 1 + e - \frac{(2s - es - f)^2}{4s^2 - 4fs}$$

$$\frac{\partial Ra_{ZF}}{\partial P_2} = \frac{(k_2 - i_2)(P_2 + b_2)^2 + d_2}{((k_3 - i_3)(P_2 + b_3)^2 + d_3)(b + b^2)(P_2^2 + \frac{a + 2ab}{b^2 + b}P_2 + \frac{a^2}{b^2 + b})}$$

$$\frac{\partial Ra_{MMSE}}{\partial P_2} = \frac{(k_5 - i_5)(P_2 + b_5)^2 + d_5}{((k_6 - i_6)(P_2 + b_6)^2 + d_6)(b + b^2)(P_2^2 + \frac{a + 2ab}{b^2 + b}P_2 + \frac{a^2}{b^2 + b})}$$

برای گیرنده ZF توان بهینه به شکل زیر به دست می آید. برای گیرنده  
 MMSE هم توان بهینه کاملاً مشابه گیرنده ZF به دست می آید:

برای صورت کسر داریم:

اگر  $k_2 > i_2$   
 برای  $P_L \geq -b_2$   
 اگر  $(k_2 - i_2)(P_L + b_2)^2 + d_2 > 0$  صورت کسر برای همه  
 $P_2 \in [P_L, P_U]$  بزرگتر از صفر است.  
 و اگر  $(k_2 - i_2)(P_L + b_2)^2 + d_2 < 0$  باشد اگر  
 $P_2 \in \left[ P_L, \sqrt{\frac{d_2}{k_2 - i_2}} - b_2 \right]$  باشد صورت کسر کوچکتر از صفر است و اگر  
 $P_2 \in \left[ \sqrt{\frac{d_2}{k_2 - i_2}} - b_2, P_U \right]$  صورت کسر بزرگتر از صفر است.  
 برای  $P_L < -b_2$   
 اگر  $d_2 > 0$  صورت کسر برای همه  $P_2 \in [P_L, P_U]$   
 بزرگتر از صفر است.

و اگر  $d_2 < 0$  باشد برای  $P_2 \in \left[ -\sqrt{\frac{d_2}{k_2 - i_2}} - b_2, \sqrt{\frac{d_2}{k_2 - i_2}} - b_2 \right]$  صورت کسر  
 کوچکتر از صفر است. و برای

$P_2 \in \left[ \sqrt{\frac{d_2}{k_2 - i_2}} - b_2, P_U \right] \cup P_2 \in \left[ P_L, \sqrt{\frac{d_2}{k_2 - i_2}} - b_2 \right]$  صورت کسر  
 بزرگتر از صفر است  
 اگر  $k_2 < i_2$   
 برای  $P_L \geq -b_2$

اگر  $(k_2 - i_2)(P_L + b_2)^2 + d_2 < 0$  صورت کسر برای همه

```

else (i.e.  $(k_3 - i_3)(P_L + b_3)^2 + d_3 < 0$ )
arg max $P_2 \in \{P_L, P_U\}$   $R_{a1}(P_1^*, P_2, P_3^*)$ 
endif  $(k_3 - i_3)(P_L + b_3)^2 + d_3 > 0$ 
else (i.e.  $d_2 < 0$ )
if  $(k_3 - i_3)(P_L + b_3)^2 + d_3 > 0$ 
arg max $P_2 \in \{P_U, -\sqrt{\frac{d_2}{k_2 - i_2}} - b_2\}$   $R_{a1}(P_1^*, P_2, P_3^*)$ 
else (i.e.  $(k_3 - i_3)(P_L + b_3)^2 + d_3 < 0$ )
arg max $P_2 \in \{P_L, \sqrt{\frac{d_3}{k_3 - i_3}} - b_3, -\sqrt{\frac{d_2}{k_2 - i_2}} - b_2, \sqrt{\frac{d_2}{k_2 - i_2}} - b_2, P_U\}$   $R_{a1}(P_1^*, P_2, P_3^*)$ 
endif  $(k_3 - i_3)(P_L + b_3)^2 + d_3 > 0$ 

endif  $d_2 > 0$ 
else (i.e.  $P_L \leq -b_3$ )
if  $d_2 > 0$ 
if  $d_3 > 0$ 
 $P_2^* = P_U$ 
else (i.e.  $d_3 \leq 0$ )
arg max $P_2 \in \{P_U, -\sqrt{\frac{d_3}{k_3 - i_3}} - b_3\}$   $R_{a1}(P_1^*, P_2, P_3^*)$ 
endif  $d_3 > 0$ 
else (i.e.  $d_2 < 0$ )
if  $d_3 > 0$ 
arg max $P_2 \in \{P_U, -\sqrt{\frac{d_2}{k_2 - i_2}} - b_2\}$   $R_{a1}(P_1^*, P_2, P_3^*)$ 
else (i.e.  $(d_3 < 0)$ )
arg max $P_2 \in \{P_L, \sqrt{\frac{d_3}{k_3 - i_3}} - b_3, \sqrt{\frac{d_2}{k_2 - i_2}} - b_2, -\sqrt{\frac{d_3}{k_3 - i_3}} - b_3, P_U, -\sqrt{\frac{d_2}{k_2 - i_2}} - b_2\}$   $R_{a1}(P_1^*, P_2, P_3^*)$ 
endif  $(d_3 > 0)$ 
endif  $(d_2 > 0)$ 
endif  $(P_L > -b_3)$ 
endif  $(P_L > -b_2)$ 
endif  $(k_3 > i_3 \text{ و } k_2 > i_2)$ 

```

مشابه این الگوریتم را برای حالات  $(k_3 < i_3 \text{ و } k_2 < i_2)$  و  $(k_3 > i_3 \text{ و } k_2 < i_2)$  و  $(k_3 < i_3 \text{ و } k_2 > i_2)$  هم باید نوشت.

```

if  $k_3 > i_3$  و  $k_2 > i_2$ 
if  $P_L \geq -b_2$ 
if  $P_L \geq -b_3$ 
if  $(k_2 - i_2)(P_L + b_2)^2 + d_2 > 0$ 
if  $(k_3 - i_3)(P_L + b_3)^2 + d_3 > 0$ 
 $P_2^* = P_U$ 
else (i.e.  $(k_3 - i_3)(P_L + b_3)^2 + d_3 < 0$ )
 $P_2^* = \arg \max_{P_2 \in \{P_L, P_U\}} R_{a1}(P_1^*, P_2, P_3^*)$ 
endif  $((k_3 - i_3)(P_L + b_3)^2 + d_3 > 0)$ 
else (i.e.  $(k_2 - i_2)(P_L + b_2)^2 + d_2 < 0$ )
if  $(k_3 - i_3)(P_L + b_3)^2 + d_3 > 0$ 
 $P_2^* = \arg \max_{P_2 \in \{P_L, P_U\}} R_{a1}(P_1^*, P_2, P_3^*)$ 
else (i.e.  $(k_3 - i_3)(P_L + b_3)^2 + d_3 < 0$ )
arg max $P_2 \in \{P_L, \sqrt{\frac{d_2}{k_2 - i_2}} - b_2, \sqrt{\frac{d_3}{k_3 - i_3}} - b_3\}$   $R_{a1}(P_1^*, P_2, P_3^*)$ 
endif  $(k_3 - i_3)(P_L + b_3)^2 + d_3 > 0$ 
endif  $(k_2 - i_2)(P_L + b_2)^2 + d_2 > 0$ 
else (i.e.  $P_L \leq -b_3$ )
if  $(k_2 - i_2)(P_L + b_2)^2 + d_2 > 0$ 
if  $d_3 > 0$ 
 $P_2^* = P_U$ 
else (i.e.  $d_3 < 0$ )
arg max $P_2 \in \{P_U, -\sqrt{\frac{d_3}{k_3 - i_3}} - b_3\}$   $R_{a1}(P_1^*, P_2, P_3^*)$ 
endif  $d_3 > 0$ 
else (i.e.  $(k_2 - i_2)(P_L + b_2)^2 + d_2 < 0$ )
if  $d_3 > 0$ 
arg max $P_2 \in \{P_L, P_U\}$   $R_{a1}(P_1^*, P_2, P_3^*)$ 
else (i.e.  $d_3 < 0$ )
arg max $P_2 \in \{P_L, \sqrt{\frac{d_3}{k_3 - i_3}} - b_3, \sqrt{\frac{d_2}{k_2 - i_2}} - b_2, -\sqrt{\frac{d_3}{k_3 - i_3}} - b_3\}$   $R_{a1}(P_1^*, P_2, P_3^*)$ 
endif  $(d_3 > 0)$ 
endif  $(k_2 - i_2)(P_L + b_2)^2 + d_2 > 0$ 
endif  $(P_L \geq -b_3)$ 
else (i.e.  $P_L < -b_2$ )
if  $P_L \geq -b_3$ 
if  $d_2 > 0$ 
if  $(k_3 - i_3)(P_L + b_3)^2 + d_3 > 0$ 
 $P_2^* = P_U$ 

```

## References

- [1] S. Ashrafinia, U. Pareek, M. Naeem, D. Lee, "Biogeography-based optimization for joint relay assignment and power allocation in cognitive radio systems", Proceeding IEEE Symposium on Swarm Intelligence (SIS), pp.1-8, 2011.
- [2] J. Zou, H. Xiong, D. Wang, 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, pp. 1827-1837, May 2013.
- [3] L. Musavian, 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.
- [4] X. Gong, A. Ispas, G. Dartmann, G. Ascheid, "Power allocation and performance analysis in spectrum sharing systems with statistical CSI", IEEE Trans. on Wireless Commun., Vol 12, No. 4, pp. 1819-1831, Apr. 2013.
- [5] C. Chang, J. Chang, "Optima design parameters in a multi hop packet radio network using random access techniques", Computer networks and ISDN systems, Vol. 5, No. 11 pp. 493-497, Nov. 1986.
- [6] J. Lee, H. Wang, J.G. Andrews, D. Hong, "Outage probability of cognitive relay networks with interference constraints", IEEE Trans. on Wireless Commun., Vol. 10, No. 2, Feb. 2011.
- [7] M. Naeem, A. Anpalagan, M. Jaseemuddin, D. C. Lee, "Resource allocation techniques in cooperative cognitive radio networks," IEEE Commun. Surveys and Tutorials, Vol. 16, No. 5, pp.729-744, May 2014.

- [8] D. X. He, F.Y. Li, "Throughput and energy efficiency comparison of one hop, two hop, virtual relay and cooperative retransmission schemes", *Proceeding European Wireless*, pp.580-587, 2010.
- [9] K. J. R. Liu, A. K. Sadek, W. Su, A. Kwasinski, "Cooperative communications and networking", Cambridge university, Press 2008.
- [10] R. Aghajani, R. Saadat, M. R. Aref, "Comparison of managed decode-and-forward scheme and common decode-and-forward scheme in cooperative communication systems", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, Vol 6, No. 22, pp. 3-12, Summer 2015.
- [11] I. Maric, R. D. Yates, "Bandwidth and power allocation for cooperative strategies in gaussian relay network", *IEEE Trans. On Inf. Theory*, Vol. 56, No.4, pp. 1880-1889, Apr. 2010.
- [12] O. Simeone, U. Spagnolini, Y. Bar-Ness, "Stable throughput of cognitive radios with and without relaying capability", *IEEE Trans. On Commun.*, Vol. 55, No. 12, pp. 2351-2360, Dec. 2007.
- [13] L. Musavian, 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.
- [14] Y. J. A. Zhang, A. M. C. So, "Optimal spectrum sharing in MIMO cognitive radio networks via semi definite programming," *IEEE J. on Sel. Areas Commun.*, Vol. 29, No.2, pp. 362-373, Feb. 2011.
- [15] C. D. T. Thai, P. Popovski, "Rate regions for coordination of decodeand- forward relays and direct users," *Proceeding IEEE Int. Conf. Commun.*, pp.4468-4472, 2012.
- [16] S.Y. Lien, K.C. Chen, Y.C. Liang, Y. Lin. "Cognitive radio resource managment for future cellular networks" *IEEE Trans. On Wireless Commun.*, Vol. 21, No.1, pp 70-79, Feb. 2014
- [17] S. Weifeng, K. A. Sadek, 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
- [18] F. Gomez-Cuba, R. A. Cacheda, F.G. Castano, "A survey on cooperative diversity for wireless networks", *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*, Vol.14, No.3, pp.822-835, Fall 2012.
- [19] S. Zahedi, "On Reliable Communication Over Relay Networks", Ph.D. thesis, Stanford Univ., 2005.
- [20] R. Aghajani, R. Saadat, M. R. Aref, "Power allocation and performance analysis for incremental-selective decode-and-forward cooperative communications over Nakagami-m fading channels," *IEICE Trans. on Commu.* ,Vol. E96-B, No. 6, pp.1531-1539, Jul. 2013.
- [21] J. Mietzner, L. Lampe, R. Schober, "Distributed transmit power allocation for multihop cognitive radio systems", *IEEE Trans. On Wireless Commun.*, Vol. 8, No. 10, pp. 5187-5201. Oct. 2009.
- [22] B. Bandemer, Q. Li, X. E. Lin, A. Paulrag, "Overhearing-based interference cancellation for relay networks", *Proceeding IEEE Veh. on Technol. Conf.*, pp. 1-5, Fall 2009.
- [23] C. Thai, 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,
- [24] C. D. T. Thai, P. Popovski, "Rate regions for coordination of decodeand- forward relays and direct users," *Proceeding IEEE Int. Conf. on Commun.*, pp.4468-4472, 2012
- [25] L. Lu, G. Y. Li, G. Wu, "Optimal power allocation for CR networks with direct and relay-aided transmissions," *IEEE Trans. on wireless commun.*, Vol. 12, No. 4, pp.1832-1842, Apr. 2013.

