

سنجش طیف و تخصیص همزمان منابع با استفاده از دسترسی احتمالاتی به طیف در شبکه‌های رادیوشناختی چندحاملی

محمد کریمی^۱، سید محمدسجاد صدوق^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری ۲- دانشیار، دانشکده مهندسی برق- دانشگاه شهیدبهشتی

(دریافت: ۹۶/۰۸/۲۳، پذیرش: ۹۶/۱۰/۱۷)

چکیده

روش سنجش طیف و تخصیص منابع همزمان در شبکه‌های رادیوشناختی به منظور بهینه‌سازی همزمان مؤلفه‌های سنجش و دسترسی به طیف و تخصیص منابع رادیویی، نرخ ارسال بالاتری را برای کاربران شبکه رادیوشناختی فراهم می‌نماید. در این مقاله، سنجش طیف و تخصیص همزمان توان در یک شبکه رادیوشناختی چندحاملی بررسی می‌شود. بدین منظور، ابتدا با تعریف تابع احتمال دسترسی به طیف، روابط احتمال آشکارسازی، احتمال هشدار اشتباه، نرخ قابل دسترس و تداخل اعمال شده به کاربر اولیه به دست آمده و سپس، مسئله سنجش طیف و تخصیص توان همزمان با تعریف یک مسئله بهینه‌سازی با هدف بیشینه‌سازی نرخ ارسال در شبکه رادیوشناختی تحت قید تداخل اعمال شده به شبکه کاربر اولیه و نیز محدودیت بودجه توان شبکه رادیوشناختی مدل‌سازی می‌شود. مسئله بهینه‌سازی حاصل یک مسئله غیرمحدب بوده که با ارائه دو راه کار مبتنی بر الگوریتم ژنتیک، جواب بهینه برای آن به دست می‌آید. این دو راه کار عبارتند از: الف) بهینه‌سازی محدب با استفاده از روش ضرایب لاگرانژ و ب) روش برنامه‌ریزی خطی. در انتها، با ارائه نتایج شبیه‌سازی عددی، عملکرد روش‌های ارائه شده را در مقایسه با روش‌های موجود مورد تحلیل و ارزیابی قرار می‌دهیم.

واژگان کلیدی: فن‌آوری رادیوشناختی، سنجش طیف، تخصیص منابع رادیویی، تابع احتمال دسترسی به طیف، بهینه‌سازی محدب، الگوریتم ژنتیک.

۱- مقدمه

بنیادی در روش مدیریت طیف فرکانسی است. در واقع، شبکه‌های رادیوشناختی دارای هوشمندی، یادگیری و تصمیم‌گیری براساس میزان شناخت از وضعیت کنونی سامانه است [۱-۲]. سه وظیفه بنیادی یک سامانه رادیوشناختی عبارتند از: ۱) تحلیل طیف رادیویی که این کار باید در گیرنده رادیوشناختی انجام گیرد. ۲) بازخورد اطلاعات مربوط به محیط رادیویی به فرستنده که این کار توسط گیرنده انجام می‌شود و ۳) مدیریت پویای طیف و کنترل مؤلفه‌های ارسال که این کار در فرستنده رادیوشناختی صورت می‌پذیرد [۲]. از زمان ارائه مفهوم رادیوشناختی که تقریباً یک دهه از آن می‌گذرد، علاقه‌مندی به رادیوشناختی و تئوری‌ها و کاربردهای عملی آن به طرز چشمگیری رشد یافته است که علت آن در واقع، توانایی فن‌آوری رادیوشناختی در استفاده بهینه از طیف رادیویی و آرایه راه کار برای حل مسئله کمبود طیف و بهره‌وری پایین استفاده از طیف فرکانسی است که در ادامه به آن می‌پردازیم.

در سال‌های اخیر، استفاده از فناوری مخابرات بی‌سیم پیشرفت بسیار زیادی داشته است. این پیشرفت هم در زمینه تعداد و تنوع سامانه‌های مبتنی بر مخابرات بی‌سیم رخ داده است و هم در زمینه کیفیت خدماتی که به کاربران ارائه می‌شود. از این‌رو، مدیریت بهینه منابع رادیویی در سامانه‌های مخابرات بی‌سیم نوین به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های عمده این سامانه‌ها مطرح است. یکی از ارزشمندترین منابع رادیویی در سامانه‌های مخابرات بی‌سیم، طیف فرکانس رادیویی است که به دلیل تخصیص ایستای طیف در حال حاضر دارای بهره‌وری بسیار پایینی است.

۱-۱- پیشینه تحقیق

بدون استفاده از طیف فرکانسی، هیچ گونه ارتباط رادیویی بی‌سیم یا خدمات اینترنت بی‌سیم امکان‌پذیر نخواهد بود. فن‌آوری رادیوشناختی^۱ نه تنها یک فن‌آوری رادیویی بلکه یک تغییر

غیرمؤثر تلقی شود. در نتیجه، ارائه راه کارهای بهتری برای بهره‌وری بهینه از طیف فرکانسی در دسترس بسیار ضروری به نظر می‌رسد [۴].

در فن‌آوری رادیوشناختی، کاربر اولیه دارای اولویت بالاتری است به طوری که هر زمان اقدام به استفاده از طیف فرکانسی نماید، کاربر ثانویه یا کاربر رادیوشناختی باید بلافاصله طیف فرکانسی را آزاد کند. بدین منظور، شبکه رادیوشناختی باید دارای قابلیت‌های شناختی از جمله سنجش مطمئن طیف فرکانسی باشد تا بتواند حضور یا عدم حضور کاربر اولیه را تشخیص داده و سپس با تغییر مؤلفه‌های ارسال خود، از بخش‌های بدون استفاده طیف فرکانسی بصورت بهینه استفاده نماید [۱-۲]. بنابراین، توانایی سنجش طیف یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های یک شبکه رادیوشناختی است. واحد سنجش طیف در یک شبکه رادیوشناختی در واقع وظیفه به‌دست آوردن اطلاعات مربوط به بهره‌وری طیف توسط کاربر اولیه در زمان‌ها و مکان‌های مختلف را برعهده دارد. به‌دست آوردن این اطلاعات می‌تواند به کمک یک پایگاه داده، سیگنال‌های نشانگر (پایلوت) یا به وسیله سنجش طیف صورت پذیرد [۵].

۱-۲- انگیزه تحقیق

سنجش طیف و تصمیم‌گیری در مورد حضور یا عدم حضور کاربران اولیه، اولین گام در ارسال رادیوشناختی است. در سنجش طیف، روش‌های مختلفی برای آشکارسازی سیگنال‌های کاربر اولیه وجود دارد که مهم‌ترین این روش‌ها عبارتند از: روش فیلتر منطبق^۵، روش آشکارسازی انرژی^۶، روش آشکارسازی مشخصات^۷ و روش سنجش مبتنی بر شکل موج^۸ [۵]. در صورتی که کاربر ثانویه اطلاعات کافی از سیگنال‌های ارسالی توسط کاربر اولیه در اختیار نداشته باشد، آشکارساز بهینه در این وضعیت یک آشکارساز انرژی خواهد بود [۶]. در این روش، انرژی سیگنال دریافتی در یک بازه زمانی مشخص اندازه‌گیری می‌شود. سپس، با مقایسه انرژی به‌دست آمده با یک سطح آستانه، تصمیم مناسب در مورد حضور یا عدم حضور کاربر اولیه اتخاذ می‌شود [۷-۱۱]. در مقابل، روش‌های کلاسیک، راه‌کار نوین دسترسی احتمالاتی به طیف در [۱۲] ارائه شده است که برخلاف روش‌های کلاسیک، از یک تابع احتمالاتی برای دسترسی به طیف کاربران رادیوشناختی استفاده شده است.

طیف رادیویی الکترومغناطیسی یکی از منابع طبیعی در اختیار بشر است که استفاده از آن توسط سامانه‌های رادیویی مختلف نیازمند اخذ مجوز از مراجع قانونی است. در نوامبر ۲۰۰۲ میلادی، گزارشی توسط FCC^۱ ارائه شد که در آن، بهبود نحوه استفاده از طیف فرکانسی هدف‌گذاری شده بود و دلیل این هدف‌گذاری این واقعیت بود که در بسیاری از باندهای فرکانسی، دسترسی طیفی مسئله قابل توجه‌تری نسبت به کمبود طیف فرکانسی است. عمده این مسئله به‌خاطر قوانینی است که دسترسی کاربران بالقوه را به طیف فرکانسی محدود می‌کند.

اندازه‌گیری‌ها نشان داده‌اند که مشکل کمبود طیف عمدتاً ناشی از استفاده ناکارآمد و غیربهینه از منابع طیفی است نه کمبود فیزیکی منابع طیفی. به بیانی دیگر، بهره‌وری طیفی در رویکرد فعلی تخصیص منابع طیف فرکانسی، بسیار پائین بوده و در اغلب مواقع باندهای فرکانسی اختصاص داده‌شده به بسیاری از کاربردها بدون استفاده باقی می‌ماند [۳]. با توجه به بهره‌وری پایین طیف الکترومغناطیسی، مفهوم حفره‌های طیفی مطرح می‌شوند. یک حفره‌ی طیفی یک باند فرکانسی است که به کاربر دارای مجوز که اصطلاحاً کاربر اولیه^۲ نامیده می‌شود، اختصاص داده شده اما در یک بازه زمانی مشخص و در یک منطقه جغرافیایی خاص توسط آن کاربر استفاده نمی‌شود. لذا، بهره‌وری طیفی را می‌توان با فراهم آوردن اجازه دسترسی به کاربران ثانویه^۳ (کاربران رادیوشناختی) به این حفره‌های طیفی افزایش داد. می‌توان رادیوشناختی را به‌عنوان راه‌کار جدیدی دانست که جهت ارتقاء بهره‌وری طیفی با کمک بهره‌برداری از حفره‌های طیفی ارائه شده است.

از سوی دیگر، به‌دلیل افزایش تقاضا در ارائه خدمات چندرسانه‌ای^۴ با سرعت و راندمان طیفی بالا، فن‌آوری ارتباطات بی‌سیم پیشرفت بسیار چشمگیری داشته است. از جمله می‌توان به شبکه‌های تلفن همراه اشاره نمود که خدماتی نظیر کنفرانس ویدئویی، بازی و انتقال اطلاعات چندرسانه‌ای با سرعت بالا را پشتیبانی می‌کنند. دستیابی به راندمان طیفی بالا و برقراری ارتباط مطمئن در شرایط محوشدگی شدید، از چالش‌های اصلی در سامانه‌های رادیویی بی‌سیم به حساب می‌آید. پیشرفت بسیار گسترده فن‌آوری‌های ارتباط بی‌سیم از یک سو و محدودیت منابع طیف فرکانسی از سوی دیگر باعث شده است تا رویکرد تخصیص فرکانس ثابت به کاربردهای مشخص یک رویکرد

5- Matched Filter (MF)
6- Energy Detection (ED)
7- Cyclostationary Feature Detection
8- Waveform-Based Sensing

1- Federal Communications Commission
2- Primary User
3- Secondary Users
4- Multimedia

حاصل در حالت کلی از نوع مسایل غیرمحدب بوده و لذا پیچیدگی پیاده‌سازی و محاسباتی بیشتری را به همراه دارد [۳۰-۲۵].

۱-۳- نوآوری تحقیق

در پژوهش‌هایی که تاکنون انجام شده است، مؤلفه دسترسی به طیف برای کاربران رادیوشناختی به صورت یک عدد دودویی با مقادیر صفر و یک در نظر گرفته شده است که این امر منجر به یک مسئله بهینه‌سازی ترکیبی گسسته- پیوسته و غیرمحدب می‌شود. در این مقاله، با بهره‌گیری از مفهوم دسترسی احتمالاتی به طیف فرکانسی که در [۱۲] ارایه شده است، مسئله سنجش طیف و تخصیص همزمان منابع در شبکه رادیوشناختی فرمول‌بندی می‌شود که در این صورت، دسترسی به طیف براساس یک مدل احتمالاتی پیوسته بوده و لذا پیچیدگی مسئله بهینه‌سازی حاصل برابر پیچیدگی مسائل غیرمحدب خواهد بود. در گام بعدی، به کمک الگوریتم ژنتیک ابتدا مسئله بهینه‌سازی غیرمحدب به یک مسئله بهینه‌سازی محدب تبدیل شده و سپس، با استفاده از روش ضرایب لاگرانژ^۴ و نیز روش برنامه‌ریزی خطی، جواب بهینه مسئله محدب حاصل استخراج می‌شود. از آنجایی که در راه کار دسترسی به طیف پیشنهادی، تابع دسترسی به طیف می‌تواند مقادیر پیوسته به خود بگیرد، لذا به کمک نتایج عددی نشان داده می‌شود که روش پیشنهادی نسبت به روش کلاسیک عملکرد بهتری در استفاده از فرصت‌های طیفی و افزایش بهره‌وری طیفی خواهد داشت.

۱-۴- ساختار مقاله

در بخش ۲، مدل سامانه شبکه رادیوشناختی مورد نظر ارایه خواهد شد. در بخش ۳، روش دسترسی به طیف احتمالاتی ارایه شده در [۱۲] به صورت مختصر شرح داده می‌شود. روش سنجش طیف و تخصیص منابع همزمان به همراه مؤلفه‌ها و معیارهای عملکردی شبکه رادیوشناختی در بخش ۴، فرمول‌بندی شده و مسئله بهینه‌سازی مربوط استخراج می‌شود. در ادامه، به منظور حل مسئله بهینه‌سازی غیرمحدب به دست آمده، دو روش مبتنی بر الگوریتم ژنتیک ارایه خواهد شد. در بخش ۵، راه کار انتخاب الگوریتم بهینه از نظر فضای جستجوی الگوریتم ژنتیک و سرعت همگرایی آن با دو راه حل ارایه شده بحث خواهد شد. نتایج شبیه‌سازی عددی در بخش ۶ مورد بررسی قرار می‌گیرد و در نهایت، در بخش ۷، نتیجه‌گیری پژوهش ارایه خواهد شد.

عملکرد شبکه رادیوشناختی بر مبنای معیارهای متفاوت در محیط‌های محوشدگی مختلف به طور گسترده مورد بحث قرار گرفته است. به عنوان مثال، در [۱۳] و [۱۴]، نویسندگان با بهینه‌سازی نرخ قابل دسترس در شبکه رادیوشناختی تحت قید متوسط تداخل اعمال شده به شبکه کاربر اولیه، سطح آستانه بهینه مورد استفاده در آشکارساز انرژی را استخراج نموده‌اند. همچنین، مسئله بهینه‌سازی زمان سنجش طیف و نیز افزایش نرخ ارسال در شبکه رادیوشناختی به ترتیب در [۱۵] و [۱۶] بررسی شده است. یک روش سنجش طیف مبتنی بر تجزیه مقادیر ویژه^۱ در [۱۷] ارایه شده است. با توجه خطاهای ذاتی سنجش طیف که متأثر از پدیده‌هایی مانند چندمسیرگی، محوشدگی، خطای تخمین سطح نویز در گیرنده و غیره هستند، انجام سنجش طیف تنها توسط یک کاربر رادیوشناختی قابل اعتماد نبوده و لذا روش سنجش طیف مشارکتی^۲ ارایه شده است [۲۰-۱۸]. از سوی دیگر، شبکه رادیوشناختی باید با توجه به نتایج سنجش طیف، منابع رادیویی موجود را به گونه‌ای بین کاربران رادیوشناختی تقسیم کند که بیشترین میزان بهره‌وری از طیف فرکانسی به دست آید و کمترین مقدار تداخل ممکن روی شبکه کاربر اولیه ایجاد شود. به عنوان مثال، در [۲۰] یک الگوریتم بهینه و دو الگوریتم زیربهینه برای تخصیص توان در شبکه‌های رادیوشناختی مبتنی بر مدولاسیون تسهیم فرکانس متعامد^۳ پیشنهاد شده است. در [۲۱] مسئله تخصیص منابع در شبکه‌های رادیوشناختی مبتنی بر OFDM با در نظر گرفتن خطاهای موجود در سنجش طیف مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور افزایش بهره‌وری طیفی در شبکه‌های رادیوشناختی و نیز کاهش اثر خطاهای ذاتی سنجش طیف، راه کار سنجش طیف و تخصیص منابع به طور همزمان در پژوهش‌های اخیر پیشنهاد شده است [۲۲-۲۵]. به عنوان مثال، در [۲۴]، مسئله همزمان سنجش طیف، تخصیص توان و ارسال داده به صورت همزمان در یک شبکه رادیوشناختی مبتنی بر رله با رویکرد بهبود نرخ ارسال شبکه رادیوشناختی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، یک روش همزمان برای بهینه‌سازی زمان سنجش طیف و افزایش بهره‌وری طیفی در شبکه‌های رادیوشناختی در [۲۵] ارایه شده است. هر چند راه کار سنجش طیف و تخصیص منابع همزمان در شبکه‌های رادیوشناختی باعث افزایش بهره‌وری طیفی و بهبود عملکرد سامانه‌های رادیویی بی‌سیم می‌شود، مسائل بهینه‌سازی

4- Lagrange Multipliers

1- Singular Value Decomposition (SVD)

2- Cooperative Spectrum Sensing

3- Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

دریافتی $y_{n,k}$ در هر دو حالت حضور و عدم حضور کاربر اولیه، دارای توزیع گاوسی با میانگین صفر و واریانس‌های $\sigma_{1,n}^2$ و $\sigma_{2,n}^2$ به ترتیب برای حالت حضور و عدم حضور کاربر اولیه است که از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$\begin{cases} \sigma_{1,n}^2 = P_n \lambda_n^2 + \sigma_n^2, & \text{under } H_1^{(n)}, \\ \sigma_{2,n}^2 = \sigma_n^2, & \text{under } H_0^{(n)}. \end{cases} \quad (2)$$

به کمک روش آشکارسازی انرژی در مرحله سنجش طیف، انرژی اندازه‌گیری شده در هر زیرباند که با Y_n نشان داده می‌شود، به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$Y_n = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M |y_{n,k}|^2. \quad (3)$$

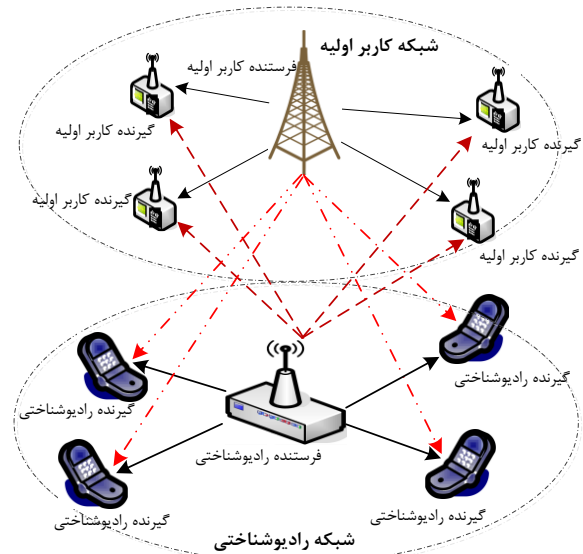
که در آن، M تعداد کل نمونه‌های مختلط دریافتی در هر بار سنجش طیف است. با توجه به رابطه (۳)، از آن جایی که Y_n مجموع مربعات نمونه‌های $y_{n,k}$ است، لذا طبق قضیه حد مرکزی [۳۱]، برای مقادیر بزرگ M ، متغیر تصادفی Y_n دارای توزیع گاوسی با میانگین μ_n و واریانس δ_n^2 است که به ترتیب به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$\mu_n = \begin{cases} P_n \lambda_n^2 + \sigma_n^2, & \text{under } H_1^{(n)}, \\ \sigma_n^2, & \text{under } H_0^{(n)}, \end{cases} \quad (4)$$

$$\delta_n^2 = \begin{cases} \frac{2}{M} (P_n \lambda_n^2 + \sigma_n^2)^2, & \text{under } H_1^{(n)}, \\ \frac{2}{M} \sigma_n^4, & \text{under } H_0^{(n)}. \end{cases} \quad (5)$$

۳- مروری بر روش احتمالاتی دسترسی به طیف

در روش سنجش طیف کلاسیک مبتنی بر آشکارسازی انرژی، تصمیم در مورد حضور یا عدم حضور کاربر اولیه در باند فرکانسی به صورت مطلق بوده که براساس انرژی اندازه‌گیری شده این نتیجه به دست می‌آید. به طور دقیق‌تر، در صورتی که انرژی اندازه‌گیری شده از سطح آستانه بیشتر باشد، حضور کاربر اولیه با احتمال یک اعلام می‌شود. در حالی که اگر انرژی اندازه‌گیری شده کمتر از سطح آستانه باشد، عدم حضور کاربر اولیه با احتمال یک (حضور با احتمال صفر) اعلام خواهد شد. پس از تصمیم در مورد حضور یا عدم حضور کاربر اولیه، مرکز تصمیم‌گیری شبکه رادیوشناختی براساس این تصمیم، اقدام به تخصیص توان و فرکانس به کاربران رادیوشناختی می‌نماید. به عنوان یک راه کار جایگزین، روش سنجش طیف مبتنی بر روش احتمالاتی برای دسترسی کاربران ثانویه به طیف در [۱۲] ارائه شده است. در این روش، برخلاف روش کلاسیک، با توجه به انرژی اندازه‌گیری شده، تصمیم‌گیری



شکل (۱): مدل سامانه شبکه رادیوشناختی مورد نظر

۲- مدل سامانه شبکه رادیوشناختی

همان گونه که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، در این مقاله یک شبکه مخابراتی چندحاملی در نظر گرفته شده است که در آن، یک کاربر رادیوشناختی به صورت فرصت طلبانه از پهنای باند اختصاص داده شده به کاربر اولیه استفاده می‌کند. به طور دقیق‌تر، کاربر رادیوشناختی با انجام سنجش طیف فرکانسی و تصمیم‌گیری در مورد حضور یا عدم حضور کاربر اولیه، اقدام به استفاده از طیف فرکانسی می‌نماید. فرض می‌کنیم که پهنای باند اختصاص داده شده به کاربر اولیه به N زیرباند مساوی تقسیم شده است. در ادامه از زیرباند n, k برای تمییز دادن زیرباند n -ام و بازه زمانی k -ام استفاده می‌کنیم. همچنین، حضور و عدم حضور کاربر اولیه در زیرباند n -ام را به ترتیب با $H_1^{(n)}$ و $H_0^{(n)}$ نمایش می‌دهیم. بنابراین، سیگنال دریافتی در گیرنده رادیوشناختی در زیرباند n -ام و زمان k -ام را با $y_{n,k}$ نشان می‌دهیم که به صورت زیر نوشته می‌شود: (۱)

$$y_{n,k} = \begin{cases} \sqrt{P_n} x_{n,k} h_{n,k} + v_{n,k}, & \text{under } H_1^{(n)}, \\ v_{n,k}, & \text{under } H_0^{(n)}, \end{cases} \quad (1)$$

که در آن، $x_{n,k}$ نشان دهنده سیگنال ارسالی از کاربر اولیه، P_n توان ارسالی کاربر اولیه و $v_{n,k}$ نویز گاوسی جمع‌شونده در گیرنده کاربر رادیوشناختی است که فرض می‌شود دارای توزیع گاوسی مختلط با میانگین صفر و واریانس σ_n^2 باشد. همچنین، فرض می‌کنیم که ضرایب کانال بین کاربر اولیه و کاربر رادیوشناختی که با $h_{n,k}$ نشان داده شده دارای توزیع گاوسی مختلط با میانگین صفر و واریانس λ_n^2 باشد. به منظور سهولت در محاسبات، فرض می‌کنیم $E\{|x_{n,k}|^2\} = 1$ ، سیگنال

اشتباه و احتمال آشکارسازی در زیرباند n -ام به صورت زیر نوشته می شوند [۱۲]:

$$P_f^{(n)} = 1 - \int_0^\infty \phi_n(y) f_{Y_n}(y | H_0^{(n)}) dy, \quad (۸)$$

$$P_d^{(n)} = 1 - \int_0^\infty \phi_n(y) f_{Y_n}(y | H_1^{(n)}) dy, \quad (۹)$$

که در روابط فوق، $H_0^{(n)}$ و $H_1^{(n)}$ به ترتیب بیان گر عدم حضور و حضور کاربر اولیه در زیرباند n -ام است.

۴- سنجش طیف و تخصیص منابع همزمان

یکی از مهم ترین وظایف یک سامانه مبتنی بر فناوری رادیوشناختی، تصمیم گیری در مورد حضور یا عدم حضور کاربر اولیه است. در صورتی که سامانه رادیوشناختی عدم حضور کاربر اولیه را تشخیص دهد، در مرحله دسترسی به طیف فرکانسی باید مؤلفه های ارسال را به گونه ای کنترل نماید که بیشترین بهره وری طیفی بدست آید. با توجه به اینکه فرآیند سنجش طیف همواره با خطاهایی همراه است، سنجش طیف و مدیریت منابع می تواند به صورت همزمان صورت گیرد که این راهکار می تواند خطاهای سنجش طیف را تا حدودی کاهش داده و بهره وری طیفی را افزایش دهد.

۴-۱- نرخ ارسال قابل دسترس برای کاربر

رادیوشناختی

طبق قضیه شانون، حداکثر نرخ قابل دستیابی در یک کانال با نویز گاوسی جمع شونده برابر است با:

$$\bar{C} = \log_2 \left(1 + \frac{S}{N_0} \right). \quad (۱۰)$$

در رابطه (۱۰)، S توان سیگنال دریافتی و N_0 متوسط توان نویز گاوسی جمع شونده است. در صورتی که تداخل در محیط وجود داشته باشد، می توان آن را به صورت یک نویز گاوسی جمع شونده مدل کرد. در این صورت، اگر متوسط تداخل را با J نشان دهیم، نرخ ارسال قابل دستیابی برابر می شود با:

$$\bar{C} = \log_2 \left(1 + \frac{S}{J + N_0} \right). \quad (۱۱)$$

در شبکه رادیوشناختی در زمان ارسال کاربر ثانویه ممکن است کاربر اولیه نیز حضور داشته باشد که این امر می تواند ناشی از خطاهای سنجش طیف باشد. پس در زمان ارسال کاربر ثانویه، غیر از نویز گاوسی جمع شونده تداخل مربوط به کاربر اولیه وجود دارد. بنابراین، رابطه (۱۱) باید برای نرخ ارسال کاربر ثانویه

در مورد حضور کاربر اولیه به صورت مطلق نبوده و لذا دسترسی به طیف فرکانسی برای کاربر ثانویه نیز مطلق نخواهد بود. به طور دقیق تر، در این روش با توجه به انرژی اندازه گیری شده، احتمال دسترسی به طیف برای کاربر رادیوشناختی صفر یا یک نیست بلکه می تواند هر مقدار حقیقی در بازه $[0,1]$ به خود بگیرد که مقدار این احتمال تابعی از انرژی اندازه گیری شده است. در واقع، روش سنجش طیف کلاسیک مبتنی بر روش آشکارسازی انرژی حالت خاصی از روش ارایه شده در [۱۲] است.

در سنجش طیف کلاسیک مبتنی بر آشکارسازی انرژی، انرژی اندازه گیری شده با یک سطح آستانه ثابت مقایسه می شود. در صورتی که انرژی اندازه گیری شده کمتر از سطح آستانه باشد، کاربر رادیوشناختی تصمیم می گیرد کاربر اولیه وجود ندارد و لذا اقدام به استفاده از طیف فرکانسی می نماید. اما در صورتی که انرژی اندازه گیری شده بیشتر از سطح آستانه باشد، حضور کاربر اولیه تشخیص داده شده و لذا امکان استفاده از طیف برای کاربر ثانویه وجود نخواهد داشت. به عبارت دیگر، تصمیم گیری در روش کلاسیک به صورت زیر است:

$$Y_n \begin{cases} H_1 \\ \geq \gamma_{th}^{(n)} \\ H_0 \end{cases}, \quad (۶)$$

که در آن، $\gamma_{th}^{(n)}$ سطح آستانه مورد استفاده در زیرباند n -ام است. با توجه به آن چه گفته شد، می توان برای کاربر رادیوشناختی مفهوم تابع دسترسی به طیف را ارایه کرد. تابع دسترسی به طیف برای کاربر رادیوشناختی در واقع احتمال ارسال کاربر رادیوشناختی با توجه به انرژی اندازه گیری شده را نشان می دهد. به عبارت دیگر، تابع دسترسی به طیف تابع احتمال $\Pr\{T_n | Y_n\}$ بوده که T_n پیشامد دسترسی به طیف توسط کاربر ثانویه در زیرباند n -ام را نشان می دهد. در روش کلاسیک سنجش طیف، تابع دسترسی به طیف با توجه به انرژی اندازه گیری شده برابر خواهد بود با:

$$\Pr\{T_n | Y_n = y_n\} = \begin{cases} 1, & y_n \leq \gamma_{th}^{(n)} \\ 0, & y_n > \gamma_{th}^{(n)}. \end{cases} \quad (۷)$$

همان طور که از رابطه فوق ملاحظه می شود، تابع دسترسی به طیف کلاسیک تنها می تواند دو مقدار صفر یا یک را به خود بگیرد. اما برای رسیدن به عملکرد بهینه در یک شبکه رادیوشناختی، تابع دسترسی به طیف می تواند یک تابع پیوسته یا هر تابع دیگری باشد. در صورتی که تابع دسترسی به طیف $\Pr\{T_n | Y_n = y_n\}$ را با تابع $\phi_n(y_n)$ نشان دهیم، احتمال هشدار

که در روابط فوق، $\Pr(H_0^{(n)})$ و $\Pr(H_1^{(n)})$ به ترتیب احتمال‌های پیشین حضور و عدم حضور کاربر اولیه در زیرباند n -ام، $f_{Y_n}(y | H_0^{(n)})$ و $f_{Y_n}(y | H_1^{(n)})$ به ترتیب توابع چگالی احتمال شرطی انرژی اندازه‌گیری شده به شرط حضور و عدم حضور کاربر اولیه است.

با متوسط‌گیری از رابطه (۱۲) بر روی تمامی زیرباندهای فرکانسی و نیز تحت شرایط $H_0^{(n)}$ و $H_1^{(n)}$ نرخ ارسال متوسط بر روی زیرباندهای کاربر اولیه که با \bar{R} نشان می‌دهیم، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} \bar{R} &= \frac{1}{N} \sum_{n \in J} \sum_{j=0}^1 \phi_n(y_n) G_{j,n}(y_n) \log_2 \left(1 + \frac{g_n |h_n^{ss}|^2}{J_{j,n} + \sigma_n^2} \right) \\ &= \frac{1}{N} \sum_{n \in J} \sum_{j=0}^1 \phi_n(y_n) G_{j,n}(y_n) \log_2(1 + g_n \gamma_{j,n}), \end{aligned} \quad (15)$$

که در آن، متغیرهای $\gamma_{j,n}$ و $G_{j,n}(y_n)$ به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\begin{cases} \gamma_{j,n} \triangleq \frac{|h_n^{ss}|^2}{J_{j,n} + \sigma_n^2}, & j \in \{0,1\} \\ G_{j,n}(y_n) = \frac{f_{Y_n}(y_n | H_1^{(n)}) \Pr(H_1^{(n)})}{f_{Y_n}(y_n)}, & j \in \{0,1\}. \end{cases} \quad (16)$$

۴-۲- محاسبه تداخل اعمال شده بر روی کاربر اولیه

در زیربخش قبل، تداخل ایجاد شده بر روی کاربر رادیوشناختی ناشی از حضور کاربر اولیه را بررسی کردیم. مسئله مهم‌تر، تداخل کاربر رادیوشناختی بر روی کاربر اولیه است زیرا این تداخل در صورت عدم کنترل می‌تواند عملکرد شبکه کاربر اولیه را مختل کند. بنابراین، در این قسمت به محاسبه تداخل اعمال شده بر روی شبکه کاربر اولیه در روش دسترسی به طیف پیشنهادی می‌پردازیم و روابط مربوط به آن را بر حسب تابع دسترسی به طیف $\phi_n(y)$ به دست می‌آوریم. بدین منظور، تداخل ایجاد شده توسط ارسال کاربر ثانویه در زیرباند n -ام بر روی زیرباند m -ام که کاربر اولیه در آن حضور دارد را با $I_{n \rightarrow m}$ نشان می‌دهیم. با تعریف تابع $S(f)$ به عنوان تابع چگالی طیف توان سیگنال ارسالی توسط کاربر ثانویه، تداخل $I_{n \rightarrow m}$ را می‌توان به صورت زیر به دست آورد [۳۲]:

$$I_{n \rightarrow m} = |h_m^{sp}|^2 g_n \int_{f_m - \frac{\Delta f}{2}}^{f_m + \frac{\Delta f}{2}} S(f - f_n) df \triangleq \theta_{nm} g_n, \quad (17)$$

که در آن، f_m و f_n به ترتیب بیان‌گر فرکانس‌های مرکزی زیرباندهای n -ام و m -ام، Δf پهنای باند هر زیرباند، h_m^{sp} ضریب بهره کانال بین کاربر اولیه و کاربر ثانویه در زیرباند m -ام و g_n توان تخصیص داده شده به زیرباند n -ام است. به منظور بررسی روابط به کمک شبیه‌سازی‌های عددی، می‌توان تابع چگالی طیف

استفاده شود. از طرفی، با توجه به این‌که ارسال کاربر اولیه و کاربر ثانویه به صورت چندحاملی در نظر گرفته شده است، ارسال در یک باند می‌تواند بر روی باندهای کناری نیز تداخل ایجاد کند که این مسئله ناشی از متعامد نبودن سیگنال‌های کاربران اولیه و ثانویه در باندهای مختلف است. بنابراین، در ارسال چندحاملی، تداخل می‌تواند ناشی از حضور همزمان کاربر اولیه و کاربر ثانویه در یک باند باشد یا این‌که ناشی از حضور آن‌ها در باندهای متفاوت باشد. بدین منظور، لازم است تداخل متوسط را در دو حالت "حضور همزمان کاربر اولیه و کاربر رادیوشناختی در یک باند" و "حضور کاربر اولیه و کاربر ثانویه در باندهای متفاوت" در نظر گرفته و محاسبه کنیم. نرخ ارسال قابل دستیابی برای کاربر ثانویه در زیرباند n -ام را با R_n نشان داده و داریم:

$$R_n = \begin{cases} \log_2 \left(1 + \frac{g_n |h_n^{ss}|^2}{J_{1,n} + \sigma_n^2} \right), & \text{under } H_1^{(n)}, \\ \log_2 \left(1 + \frac{g_n |h_n^{ss}|^2}{J_{0,n} + \sigma_n^2} \right), & \text{under } H_0^{(n)}, \end{cases} \quad (12)$$

که در روابط فوق، $J_{1,n}$ و $J_{0,n}$ به ترتیب نشان‌دهنده متوسط تداخل‌های ایجاد شده بر روی زیرباند n -ام کاربر ثانویه با فرض عدم حضور و حضور کاربر اولیه در زیرباند n -ام است. همچنین، g_n توان ارسالی در زیرباند n -ام توسط کاربر ثانویه و $|h_n^{ss}|^2$ مجذور بهره کانال بین فرستنده و گیرنده کاربر رادیوشناختی در زیرباند n -ام است. احتمال توأم حضور کاربر اولیه در باند n -ام و ارسال کاربر ثانویه در باند n -ام به شرط انرژی اندازه‌گیری شده $Y_n = y_n$ را می‌توانیم بر حسب تابع دسترسی به طیف $\phi_n(y)$ به صورت زیر بنویسیم:

$$\begin{aligned} \Pr\{H_1^{(n)}, T_n | Y_n = y_n\} &= \Pr\{H_1^{(n)} | Y_n = y_n\} \Pr\{T_n | Y_n = y_n\} \\ &= \phi_n(y_n) \frac{f_{Y_n}(y_n | H_1^{(n)}) \Pr(H_1^{(n)})}{f_{Y_n}(y_n)}, \end{aligned} \quad (13)$$

به طریق مشابه، احتمال توأم عدم حضور کاربر اولیه در باند n -ام و ارسال کاربر ثانویه در باند n -ام به شرط انرژی اندازه‌گیری شده $Y_n = y_n$ را می‌توانیم بر حسب تابع دسترسی به طیف $\phi_n(y)$ به صورت زیر بنویسیم:

$$\begin{aligned} \Pr\{H_0^{(n)}, T_n | Y_n = y_n\} &= \Pr\{H_0^{(n)} | Y_n = y_n\} \Pr\{T_n | Y_n = y_n\} \\ &= \phi_n(y_n) \frac{f_{Y_n}(y_n | H_0^{(n)}) \Pr(H_0^{(n)})}{f_{Y_n}(y_n)}, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\sum_{n=1}^N p_n s_n \bar{I}_n \leq I_{th} \quad (23)$$

$$\sum_{n=1}^N p_n \leq P_t \quad (24)$$

$$p_n \geq 0, \forall n \in \{1, 2, \dots, N\}, \quad (25)$$

$$0 \leq s_n \leq 1, \forall n \in \{1, 2, \dots, N\}, \quad (26)$$

که در روابط فوق، $s_n = \phi_n(y_n)$ ، $\mathbf{p} = [p_1, \dots, p_N]^T$ و $\mathbf{s} = [s_1, \dots, s_N]^T$ به ترتیب بیانگر بردارهای مربوط به مؤلفه‌های احتمال دسترسی به طیف و توان اختصاص داده شده به هر زیرباند فرکانسی است. برای بررسی محدب یا غیرمحدب بودن توابع چندمتغیره مانند تابع هزینه در مسئله بهینه‌سازی (۲۲)، لازم است ماتریس هسیان^۲ این توابع محاسبه و سپس مثبت یا منفی معین بودن آن بررسی شود [۳۳]. در پیوست (الف)، غیرمحدب بودن تابع هزینه در مسئله (۲۲) و نیز قید (۲۳) اثبات شده است. براساس آن چه در پیوست (الف) اشاره شده است، مسئله بهینه‌سازی (۲۲) غیرمحدب بوده و لذا به کمک روش‌های بهینه‌سازی محدب نمی‌توان آن را حل نمود. در ادامه، دو راه‌کار جهت حل مسئله بهینه‌سازی فوق ارائه می‌شود که برپایه استفاده از الگوریتم ژنتیک [۳۴] است. در راه‌کار اول، با فرض استفاده از الگوریتم ژنتیک، مسئله بهینه‌سازی به یک مسئله بهینه‌سازی محدب تبدیل می‌شود و در راه‌کار دوم با استفاده از الگوریتم ژنتیک، یک مسئله برنامه‌ریزی خطی^۳ حاصل می‌شود.

۴-۴- حل مسئله (۲۲) از طریق بهینه‌سازی محدب

در این راه‌کار، در مرحله اول با استفاده از الگوریتم ژنتیک و با فرض معلوم بودن بردار توان‌های \mathbf{p} بردار احتمال دسترسی به طیف \mathbf{s} محاسبه می‌شود. سپس، در مرحله بعد با استفاده از مقادیر محاسبه شده برای بردار \mathbf{s} ، مقدار بهینه بردار \mathbf{p} به روش بهینه‌سازی محدب به دست می‌آید. لازم به ذکر است که با فرض معلوم بودن s_n ها، مسئله بهینه‌سازی (۲۲) برحسب متغیرهای $\{p_n\}_{n=1}^N$ یک مسئله بهینه‌سازی محدب است که به صورت زیر نوشته می‌شود:

Problem II:

$$\max_p \sum_{n=1}^N s_n G_{0,n}(y_n) \log_2(1 + p_n \gamma_{0,n}) \quad (27)$$

$$+ \sum_{n=1}^N s_n G_{1,n}(y_n) \log_2(1 + p_n \gamma_{1,n}) \quad (28)$$

$$\sum_{n=1}^N p_n s_n \bar{I}_n \leq I_{th} \quad (29)$$

$$\sum_{n=1}^N p_n \leq P_t$$

توان کاربر ثانویه را به صورت یک پالس نایکوئیست^۱ در نظر گرفت که در این صورت، θ_{nm} در رابطه (۱۷) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\theta_{nm} = \tau_s |h_m^{sp}|^2 \int_{f_m - \frac{\Delta f}{2}}^{f_m + \frac{\Delta f}{2}} \left(\frac{\sin(\pi(f - f_n)\tau_s)}{\pi(f - f_n)\tau_s} \right)^2 df, \quad (18)$$

که در آن، τ_s نشان‌دهنده عرض پالس استفاده شده در ارسال سیگنال توسط فرستنده کاربر ثانویه است. تداخل متوسطی که توسط کاربر ثانویه بر روی زیرباند m -ام کاربر اولیه ایجاد می‌شود را با I_m نشان داده و داریم:

$$I_m = \sum_{n=1}^N \Pr\{H_1^{(m)}, T_n | Y_m = y_m, Y_n = y_n\} I_{n \rightarrow m} \quad (19)$$

$$= \sum_{n=1}^N \Pr\{H_1^{(m)} | Y_m = y_m\} \Pr\{T_n | Y_n = y_n\} g_n \theta_{nm}$$

$$= \sum_{n=1}^N G_{1,m}(y_m) \phi_n(y_n) g_n \theta_{nm},$$

و لذا متوسط تداخل ایجاد شده بر روی تمام زیرباندهای کاربر اولیه برابر است با:

$$\bar{I} = \sum_{m=1}^N I_m = \sum_{m=1}^N \left[\sum_{n=1}^N G_{1,m}(y_m) \phi_n(y_n) g_n \theta_{nm} \right] \quad (20)$$

$$= \sum_{n=1}^N \phi_n(y_n) g_n \bar{I}_n,$$

که در آن، \bar{I}_n از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\bar{I}_n = \sum_{m=1}^N G_{1,m}(y_m) \theta_{nm}. \quad (21)$$

۴-۳- مسئله سنجش طیف و تخصیص منابع همزمان

در روش سنجش طیف و تخصیص منابع همزمان، مسئله بهینه‌سازی که در این مقاله پیشنهاد می‌کنیم، عبارت است از تعیین همزمان مؤلفه‌های s_n و p_n ، به طوری که حداکثر نرخ ارسال در شبکه رادیوشناختی تحت قیدهای متوسط تداخل و حداکثر توان شبکه رادیوشناختی محقق شود. بنابراین، مسئله بهینه‌سازی مربوطه به صورت زیر نوشته می‌شود:

Problem I:

$$\max_{s,p} \sum_{n=1}^N s_n G_{0,n}(y_n) \log_2(1 + p_n \gamma_{0,n}) \quad (22)$$

$$+ \sum_{n=1}^N s_n G_{1,n}(y_n) \log_2(1 + p_n \gamma_{1,n})$$

1- Nyquist Pulse

2- Hessian Matrix

3- Linear Programming (LP)

۴-۵- حل مسئله (۲۲) از طریق برنامه‌ریزی خطی

در این راه‌کار، نخست با استفاده از الگوریتم ژنتیک و با فرض معلوم بودن بردار s ، بردار p محاسبه می‌شود. سپس، با استفاده از مقدار محاسبه‌شده برای بردار p ، مقدار بهینه بردار s به روش برنامه‌ریزی خطی [۳۵] به دست می‌آید. بنابراین، با فرض معلوم بودن بردار s ، مسئله بهینه‌سازی مربوطه به صورت زیر نوشته می‌شود:

Problem III:

$$\max_s (c_1 + c_2)\Phi \quad (39)$$

$$\text{subject to: } A\Phi \leq b, \quad (40)$$

$$\Phi \geq 0. \quad (41)$$

که در رابطه فوق، $\Phi = [s_1, \dots, s_N]^T$ و بردارهای b ، c_1 و c_2 به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$b = [I_{th}, 1, 1, \dots, 1]^T, \quad (42)$$

$$c_1 = \begin{bmatrix} G_{0,1}(y_1) \log_2(1 + p_1\gamma_{0,1}) \\ G_{0,2}(y_2) \log_2(1 + p_2\gamma_{0,2}) \\ \dots \\ G_{0,N}(y_N) \log_2(1 + p_1\gamma_{0,N}) \end{bmatrix}, \quad (43)$$

$$c_2 = \begin{bmatrix} G_{1,1}(y_1) \log_2(1 + p_1\gamma_{1,1}) \\ G_{1,2}(y_2) \log_2(1 + p_2\gamma_{1,2}) \\ \dots \\ G_{1,N}(y_N) \log_2(1 + p_1\gamma_{1,N}) \end{bmatrix}, \quad (44)$$

$$A = \begin{bmatrix} p_1\tilde{I}_1 & p_2\tilde{I}_2 & \dots & p_N\tilde{I}_N \\ 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}. \quad (45)$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مسئله بهینه‌سازی (۳۹) یک مسئله برنامه‌ریزی خطی برحسب متغیرهای $\{s_n\}_{n=1}^N$ است [۳۵] که به کمک روش‌های برنامه‌ریزی خطی مانند روش سیمپلکس^۱ به سادگی قابل حل است. همانند روش قبل، در این روش نیز خطای هر مرحله از الگوریتم به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$e_{2,i} = |\bar{R}_i - \bar{R}_{i-1}| \quad (46)$$

و فرآیند تا زمانی که $e_{2,i}$ از یک آستانه دلخواه بیشتر باشد، ادامه خواهد یافت.

۴-۶- مقایسه روش پیشنهادی با روش کلاسیک

همان‌گونه که در بخش ۳ اشاره شد، در روش‌های کلاسیک، احتمال دسترسی به طیف برای کاربران ثانویه تنها دارای دو

$$p_n \geq 0, \quad \forall n \in \{1, 2, \dots, N\}. \quad (30)$$

با استفاده از روش ضرایب لاگرانژ، مسئله بهینه‌سازی (۲۷) را می‌توان به صورت زیر حل نمود. تابع لاگرانژ مربوط به مسئله (۲۷) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$L = \bar{R} - \lambda \left(\sum_{n=1}^N p_n s_n \tilde{I}_n - I_{th} \right) - \mu \left(\sum_{n=1}^N p_n - P_t \right), \quad (31)$$

که در آن، λ و μ ضرایب لاگرانژ مربوط به قیدهای (۲۸) و (۲۹) مسئله (۲۷) هستند. با مشتق‌گیری از رابطه (۳۱) برحسب مؤلفه p_n داریم:

$$\frac{\partial L}{\partial p_n} = \sum_{j=0}^1 \frac{\gamma_{j,n} s_n G_{j,n}(y_n)}{(1 + p_n \gamma_{j,n}) \ln 2} - (\lambda s_n \tilde{I}_n + \mu) = 0. \quad (32)$$

رابطه (۳۲) را می‌توان به صورت یک چندجمله‌ای از مرتبه ۲ برحسب p_n بصورت $a_n p_n^2 + b_n p_n + c_n = 0$ نوشت که در ضرایب a_n ، b_n و c_n و نیز ریشه‌های معادله به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$a_n = \gamma_{0,n} \gamma_{1,n}, \quad (33)$$

$$b_n = \gamma_{0,n} + \gamma_{1,n} - \frac{\gamma_{0,n} \gamma_{1,n} (G_{0,n}(y_n) + G_{1,n}(y_n))}{(\lambda s_n \tilde{I}_n + \mu) \ln 2}, \quad (34)$$

$$c_n = 1 - \frac{\gamma_{0,n} G_{0,n}(y_n) + \gamma_{1,n} G_{1,n}(y_n)}{(\lambda s_n \tilde{I}_n + \mu) \ln 2}, \quad (35)$$

$$p_n = \frac{-b_n \pm \sqrt{b_n^2 - 4a_n c_n}}{2a_n}. \quad (36)$$

از آنجایی که توان p_n باید یک مقدار مثبت باشد می‌توان نوشت:

$$p_n^* = \max \left\{ \frac{-b_n + \sqrt{b_n^2 - 4a_n c_n}}{2a_n}, 0 \right\} \quad (37)$$

دو مرحله اشاره‌شده تا زمانی که مقادیر بهینه توان‌ها و احتمال‌های دسترسی به طیف برای هر زیرباند به دست آید، تکرار خواهند شد. در هر مرحله از فرآیند فوق، تابع خطا را به صورت زیر محاسبه می‌کنیم:

$$e_{1,i} = |\bar{R}_i - \bar{R}_{i-1}| \quad (38)$$

و فرآیند تا زمانی که $e_{1,i}$ از یک آستانه مطلوب بیشتر باشد ادامه خواهد یافت.

الف و ب) روش بهینه‌سازی محدب، ج و د) روش برنامه‌ریزی خطی.

حجم چهار فضای تعریف‌شده توسط روابط (۴۷-۵۰) به ترتیب با $|V_1|, |V_2|, |V_3|$ و $|V_4|$ نشان داده شوند، داریم:

$$|V_1| = 1, \quad (51)$$

$$|V_2| = \int \int \dots \int ds_1 ds_2 \dots ds_N = \int_0^{I_{th}} \int_0^{I_{th}-s_1 p_1 \tilde{I}_1} \dots \int_0^{I_{th}-s_1 p_1 \tilde{I}_1 - \dots - s_{N-1} p_{N-1} \tilde{I}_{N-1}} \frac{1}{p_N \tilde{I}_N} ds \quad (52)$$

$$= \frac{1}{N!} \prod_{n=1}^N \left(\frac{I_{th}}{p_n \tilde{I}_n} \right)$$

$$|V_3| = \int \int \dots \int dp_1 dp_2 \dots dp_N = \int_0^{P_t} \int_0^{P_t-p_1} \dots \int_0^{P_t-p_1-\dots-p_{N-1}} dp = \frac{(P_t)^N}{N!} \quad (53)$$

$$|V_4| = \int \int \dots \int dp_1 dp_2 \dots dp_N = \int_0^{I_{th}} \int_0^{I_{th}-s_1 p_1 \tilde{I}_1} \dots \int_0^{I_{th}-s_1 p_1 \tilde{I}_1 - \dots - s_{N-1} p_{N-1} \tilde{I}_{N-1}} \frac{1}{s_N \tilde{I}_N} dp \quad (54)$$

$$= \frac{1}{N!} \prod_{n=1}^N \left(\frac{I_{th}}{s_n \tilde{I}_n} \right)$$

که در روابط فوق، $ds = ds_1 \dots ds_N$ و $dp = dp_1 \dots dp_N$ بنابراین، حجم متناظر با فضای جستجوی مربوط به روش اول (بهینه‌سازی محدب) و روش دوم (برنامه‌ریزی خطی) به ترتیب برابر است با:

$$V_{CVX} = V_1 \cap V_2, \quad |V_{CVX}| \leq \min\{|V_1|, |V_2|\} \quad (55)$$

$$V_{LP} = V_3 \cap V_4, \quad |V_{LP}| \leq \min\{|V_3|, |V_4|\} \quad (56)$$

بسته به مقادیر مؤلفه‌های P_t, I_{th} و N ، کران بالای مربوط به دو روش ارائه‌شده می‌تواند بسیار متفاوت باشند و لذا با توجه به مقادیر مؤلفه‌های P_t, I_{th} و N ، می‌توان الگوریتم سریع‌تر را انتخاب نمود.

۶- شبیه‌سازی عددی

در این بخش، با استفاده از شبیه‌سازی عددی، عملکرد روش‌های ارائه شده را بررسی می‌نماییم. در این شبیه‌سازی‌ها فرض می‌کنیم که کاربر اولیه و کاربر رادیوشناختی به‌طور مشترک از یک باند فرکانسی با ۱۶ زیرباند ($N = 16$) استفاده می‌کنند.

مقدار صفر و یک است، درحالی‌که در روش دسترسی به طیف مبتنی بر تابع احتمال $\phi(y)$ ، دسترسی به طیف می‌تواند هر مقدار حقیقی‌ای در بازه $[0,1]$ اختیار کند. بنابراین، تابع دسترسی به طیف پیوسته $\phi_n(y)$ را می‌توان به مقادیر گسسته‌ی صفر و یک در روش کلاسیک یک به یک صورت $\phi_n^{(c)}(y) = [2\phi_n(y)] - 1$ تصویر نمود که در این رابطه، $\phi_n^{(c)}(y)$ تابع دسترسی به طیف کلاسیک و $[]$ نماد تابع جزء صحیح است.

۵- انتخاب الگوریتم بهینه

در این بخش، با معرفی فضای جستجوی مربوط به الگوریتم ژنتیک و به‌دست آوردن روابط مربوط، معیاری برای مقایسه دو روش پیشنهادی در زیربخش‌های ۴-۴ و ۴-۵ استخراج می‌شود. فضای جستجوی روش اول به کمک قیدهای زیر تعریف می‌شود:

$$V_1: 0 \leq s_1 \leq 1, 0 \leq s_2 \leq 1, \dots, 0 \leq s_N \leq 1, \quad (47)$$

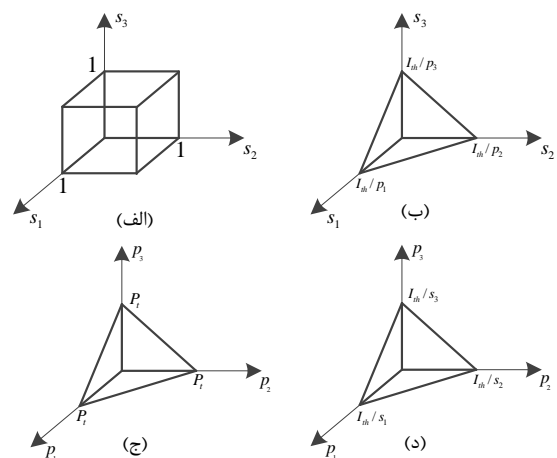
$$V_2: p_1 s_1 \tilde{I}_1 + p_2 s_2 \tilde{I}_2 + \dots + p_N s_N \tilde{I}_N \leq I_{th}, \quad (48)$$

روابط (۴۷) و (۴۸) به ترتیب یک ابرمکعب و ابرچندوجهی را در فضای N -بعدی نشان می‌دهند (اشکال ۲-الف و ۲-ب). در مقابل، فضای جستجوی روش دوم به کمک قیدهای زیر تعریف می‌شود:

$$V_3: p_1 + p_2 + \dots + p_N \leq P_t, \quad p_1 \geq 0, \dots, p_N \geq 0, \quad (49)$$

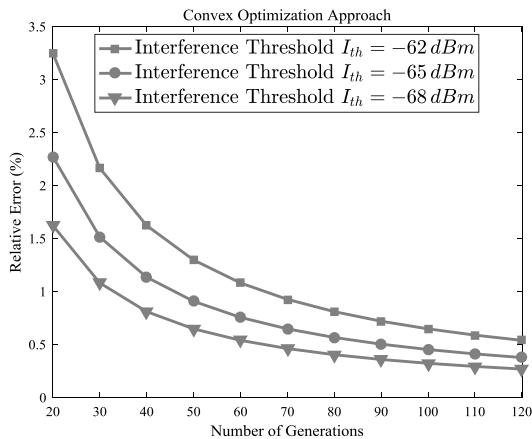
$$V_4: p_1 s_1 \tilde{I}_1 + p_2 s_2 \tilde{I}_2 + \dots + p_N s_N \tilde{I}_N \leq I_{th}, \quad (50)$$

که روابط (۴۹) و (۵۰) بیان‌گر دو ابرچندوجهی N -بعدی هستند. جهت مقایسه دو روش، از معیار حجم فضای جستجو استفاده می‌شود اگر:

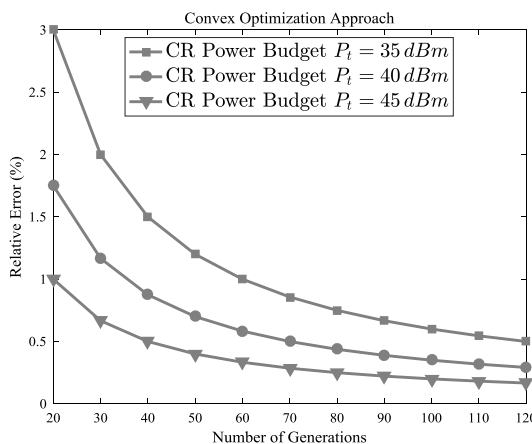


شکل (۲): فضای جستجوی مربوط به روش‌های ارائه‌شده برای $N = 3$.

اندازه‌گیری شده احتمال دسترسی به طیف برای کاربر رادیوشناختی کاهش می‌یابد. واضح است که با افزایش انرژی اندازه‌گیری شده احتمال پسین حضور کاربر اولیه، یعنی احتمال $\Pr\{H_1^{(n)}|Y_n = y\}$ ، افزایش می‌یابد و لذا لازم است که دسترسی به طیف کاربران ثانویه محدود شود.

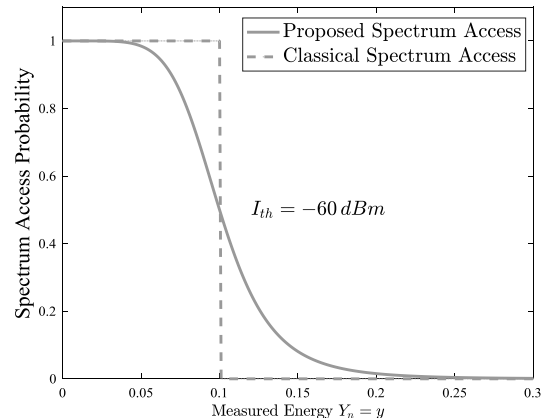


شکل (۵): سرعت همگرایی و تعداد تکرار لازم در روش اول (بهینه‌سازی محدب) برحسب تعداد تکرار الگوریتم ژنتیک برای مقادیر مختلف I_{th}

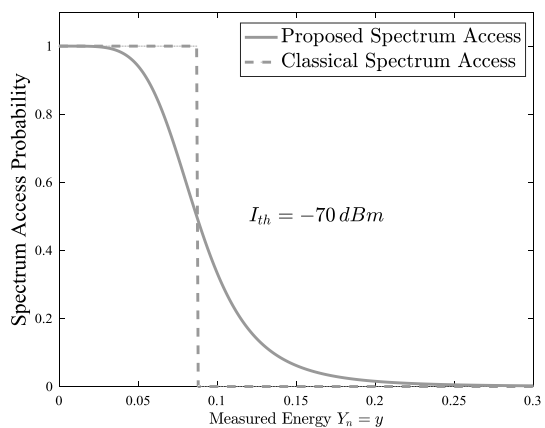


شکل (۶): سرعت همگرایی و تعداد تکرار لازم در روش اول (بهینه‌سازی محدب) برحسب تعداد تکرار الگوریتم ژنتیک برای مقادیر مختلف P_t

لذا نتیجه به‌دست آمده در اشکال (۳-۴) یک نتیجه منطقی خواهد بود. از طرفی، با تغییر مقادیر I_{th} (حداکثر آستانه مجاز تداخل اعمال شده به کاربر اولیه)، هرچه مقدار I_{th} بیشتر باشد، مقدار تابع $\phi_n(y)$ که همان احتمال دسترسی به طیف توسط کاربر رادیوشناختی است افزایش می‌یابد. به بیان دیگر، با افزایش I_{th} ، دسترسی بیشتری به کاربر ثانویه برای استفاده از طیف فرکانسی می‌دهد که این مطلب به‌وضوح از مقایسه اشکال (۳-۴) دریافت می‌شود. به منظور مقایسه روش پیشنهادی و روش کلاسیک، در اشکال (۳-۴)، تابع دسترسی به طیف در حالت



شکل (۳): تابع دسترسی به طیف حاصل از شبیه‌سازی، $I_{th} = -60dBm$



شکل (۴): تابع دسترسی به طیف حاصل از شبیه‌سازی، $I_{th} = -70dBm$

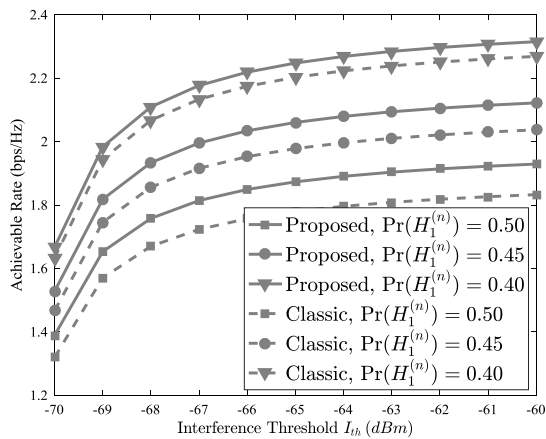
همچنین، فرض می‌کنیم که $\sigma_n^2 = 0.15$ ، $\lambda_n^2 = 0.1$ و $P_n = 1 \text{ Watt}$ و $M = 100$ باشد. احتمال پیشین حضور کاربر اولیه در هر زیرباند برابر 0.4 در نظر گرفته می‌شود. مقادیر $J_{0,n}$ و $J_{1,n}$ به‌صورت یک متغیر تصادفی یکنواخت در بازه $[0.01, 0.05]$ برای N زیرباند فرکانسی تولید می‌شود. به‌علاوه، فرض می‌کنیم که در مرحله ارسال داده شبکه رادیوشناختی، بهره کانال بین فرستنده و گیرنده رادیوشناختی به کمک روش‌های تخمین کانال محاسبه شده و در اختیار است. شبیه‌سازی‌ها به تعداد ۱۰۰۰۰ بار تکرار و متوسط‌گیری شده است.

۱-۶- تحلیل رفتار تابع دسترسی به طیف $\phi_n(y)$

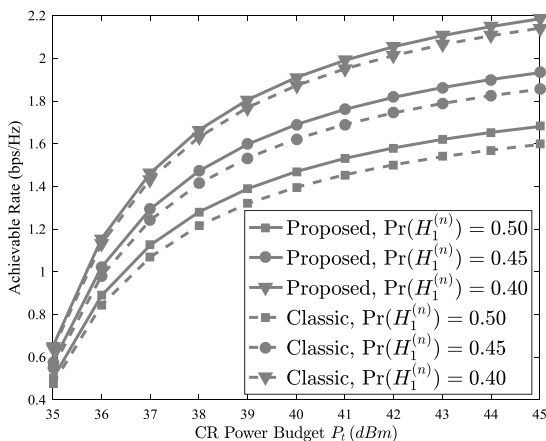
اشکال (۳-۴)، تابع دسترسی به طیف $\phi_n(y)$ مستخرج از نتایج شبیه‌سازی را نشان می‌دهند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، برخلاف روش کلاسیک، در روش ارائه‌شده مقادیر تابع دسترسی به طیف $\phi_n(y)$ مقادیری حقیقی از بازه $[0,1]$ بوده و لذا احتمال ارسال توسط کاربر رادیوشناختی می‌تواند عددی مخالف صفر و یک باشد. از طرفی، تابع $\phi_n(y)$ یک تابع کاهشی برحسب انرژی اندازه‌گیری شده y است. بدین معنا که با افزایش مقدار انرژی

کاهش خواهد یافت که این امر به وضوح از اشکال (۵-۶) قابل رؤیت است.

اشکال (۷-۸) نیز سرعت همگرایی روش دوم (برنامه‌ریزی خطی) را برحسب تعداد تکرار الگوریتم ژنتیک نشان می‌دهد. در این جا نیز شبیه‌سازی برای مقادیر مختلف I_{th} (شکل ۷) و P_t (شکل ۸) انجام شده است. مطابق اشکال (۷-۸)، با افزایش تعداد تکرار الگوریتم ژنتیک، خطای الگوریتم به سمت صفر میل می‌کند. همچنین، با افزایش I_{th} یا P_t سرعت همگرایی کاهش می‌یابد چراکه فضای جستجوی الگوریتم ژنتیک افزایش می‌یابد.



شکل (۹): نرخ ارسال قابل دسترس برحسب I_{th} برای مقادیر مختلف احتمال حضور کاربر اولیه

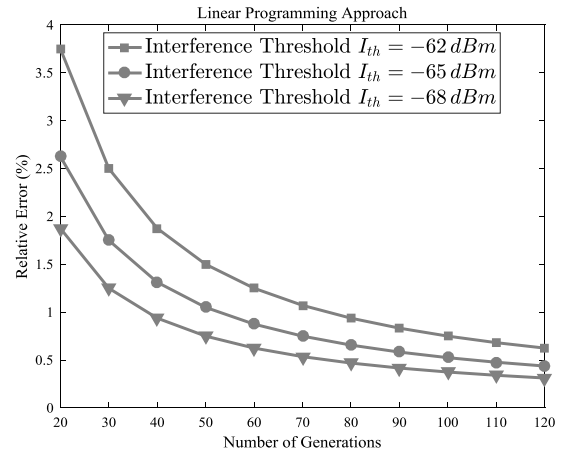


شکل (۱۰): نرخ ارسال قابل دسترس برحسب P_t برای مقادیر مختلف حضور کاربر اولیه

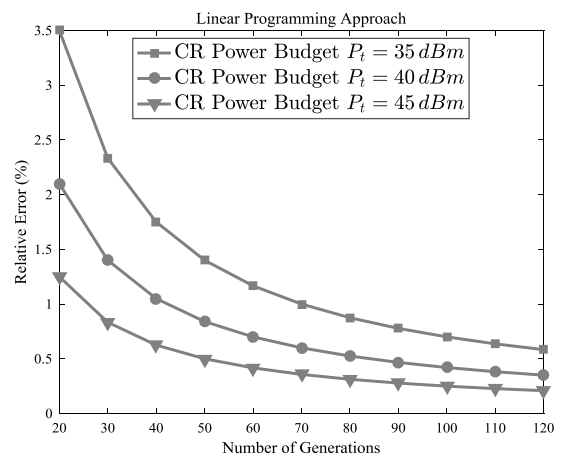
۳-۶ تحلیل عملکرد شبکه رادیوشناختی

اشکال (۹-۱۰)، نرخ ارسال قابل دسترس برای شبکه رادیوشناختی را به ترتیب برحسب آستانه تداخل مجاز I_{th} و حداکثر بودجه توان P_t برای مقادیر مختلف احتمال حضور کاربر اولیه نشان می‌دهند. با افزایش مقدار تداخل مجاز I_{th} ، کاربر رادیوشناختی محدودیت کمتری در استفاده از طیف فرکانسی دارد. بنابراین، با افزایش آستانه تداخل مجاز I_{th} احتمال دسترسی

کلاسیک نیز رسم شده است (منحنی خط چین). همان‌طور که مشاهده می‌شود، در حالت کلاسیک تابع دسترسی به طیف تنها دو مقدار صفر و یک را به خود می‌گیرد.



شکل (۷): سرعت همگرایی و تعداد تکرار لازم در روش دوم (برنامه‌ریزی خطی) برحسب تعداد تکرار الگوریتم ژنتیک برای مقادیر مختلف I_{th}



شکل (۸): سرعت همگرایی و تعداد تکرار لازم در روش دوم (برنامه‌ریزی خطی) برحسب تعداد تکرار الگوریتم ژنتیک برای مقادیر مختلف P_t

۲-۶ تحلیل همگرایی الگوریتم‌های ارایه‌شده

اشکال (۵-۶) سرعت همگرایی روش اول (بهینه‌سازی محدب) را برحسب تعداد تکرار الگوریتم ژنتیک نشان می‌دهد. شبیه‌سازی برای مقادیر مختلف آستانه تداخل مجاز I_{th} (شکل ۵) و حداکثر بودجه توان P_t (شکل ۶) انجام شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد تکرار الگوریتم ژنتیک، خطای الگوریتم به سمت صفر میل می‌کند اما سرعت همگرایی برای مقادیر مختلف آستانه تداخل مجاز I_{th} یا حداکثر بودجه توان P_t متفاوت خواهد بود. به عبارت دیگر، با افزایش آستانه تداخل مجاز I_{th} یا حداکثر بودجه توان P_t ، از آن جا که ابعاد فضای جستجوی الگوریتم ژنتیک افزایش می‌یابد (شکل ۲)، لذا سرعت همگرایی

استفاده از شبیه‌سازی عددی برتری روش پیشنهادی به روش‌های دسترسی به طیف موجود مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت و نشان داده شد که روش پیشنهادی به‌صورت مؤثرتری از فرصت‌های طیفی در مقایسه با روش‌های موجود استفاده می‌کند.

۸- منابع

- [1] J. Mitola and G. Q. Maguire, "Cognitive radio: making software radios more personal," IEEE Personal Communications, vol. 6, no. 4, pp. 13-18, Aug. 1999.
- [2] S. Haykin, "Cognitive radio: brain-empowered wireless communications," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 23, no. 2, pp. 201-220, Feb. 2005.
- [3] Federal Communications Commission, pp. 03-322, Dec. 2003.
- [4] N. Janatian, M. Modarres-Hashemi, and S. Sun, "Joint versus separate spectrum sensing and resource allocation in OFDMA-based cognitive radio networks," IET Communications, vol. 10, no. 7, pp. 839-847, 2016.
- [5] C. Kabiri, "On the Performance of Underlay Cognitive Radio Networks with Interference Constraints and Relaying," 2015.
- [6] A. Sahai, N. Hoven, and R. Tandra, "Some fundamental limits on cognitive radio," In Proc. 42nd Allerton Conf. Communication, Control, Computing, Monticello, IL, pp. 131-136, Oct. 2004.
- [7] S. Srinu and S. L. Sabat, "Optimal multinode sensing in a malicious cognitive radio network," IEEE Systems Journal, vol. 9, no. 3, pp. 855-864, Sept. 2015.
- [8] E. Chatziantoniou, B. Allen, and V. Velisavljevic, "Threshold optimization for energy detection-based spectrum sensing over hyper-rayleigh fading channels," IEEE Commun. Lett., vol. 19, no. 6, pp. 1077-1080, June 2015.
- [9] S. H. Hojjati, A. Ebrahimzadeh, M. Najimi, and A. Reihanian, "Sensor Selection for Cooperative Spectrum Sensing in Multiantenna Sensor Networks Based on Convex Optimization and Genetic Algorithm," IEEE Sensors Journal, vol. 16, no. 10, pp. 3486-3487, 2016.
- [10] M. Tavana, A. Rahmati, V. Shah-Mansouri, and B. Maham, "Cooperative Sensing With Joint Energy and Correlation Detection in Cognitive Radio Networks," IEEE Commun. Lett., vol. 21, no. 1, pp. 132-135, Jan. 2017.
- [11] N. R. Banavathu and M. Z. A. Khan, "Optimal Number of Cognitive Users in K-Out-of-M Rule," IEEE Wireless Commun. Lett., vol. 6, no. 5, pp. 606-609, Oct. 2017.
- [12] M. Karimi and S. M. S. Sadough, "Efficient Transmission Strategy for Cognitive Radio Systems under Primary User Emulation Attack," IEEE Syst. J., vol. 12, no. 4, pp. 3767-3774, 2018.
- [13] Z. Quan, S. Cui, A. Sayed, and H. Poor, "Optimal multiband joint detection for spectrum sensing in cognitive radio networks," IEEE Trans. Signal Process, vol. 57, no. 3, pp. 1128-1140, March 2009.
- [14] Z. Quan, S. Cui, and A. H. Sayed, "Optimal linear cooperation for spectrum sensing in cognitive radio networks," IEEE J. Sel. Topics Signal Process, vol. 2, no. 1, pp. 28-40, February 2008.
- [15] Y. C. Liang, Y. Zeng, E. C. Y. Peh, and A. T. Hoang, "Sensing throughput tradeoff for cognitive radio networks,"

به طیف برای کاربر رادیوشناختی و به‌تبع آن، نرخ ارسال قابل دسترس در شبکه رادیوشناختی افزایش می‌یابد که این رویکرد از شکل (۹) قابل رؤیت است. این افزایش نرخ ارسال تا زمانی ادامه دارد که محدودیت بودجه توان کاربر رادیوشناختی (قید ۲۴) برآورده شود و در صورتی که این محدودیت توان نقض شود، با افزایش سطح آستانه λ_{th} ، نرخ ارسال در شبکه رادیوشناختی ثابت باقی خواهد ماند.

از طرفی، با افزایش حداکثر بودجه توان P_t ، نسبت سیگنال به نویز در گیرنده رادیوشناختی افزایش یافته و لذا مطابق رابطه (۱۰)، حداکثر نرخ ارسال قابل دسترس نیز افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است این افزایش نرخ تا زمانی ممکن است که تداخل اعمال شده به کاربر اولیه از آستانه مجاز آن فراتر نرود (قید ۲۳). به بیان دیگر، در صورتی که بودجه توان کاربر رادیوشناختی از یک مقدار مشخص بیشتر شود، تداخل اعمال شده به کاربر اولیه بیشتر از آستانه مجاز شده و لذا نرخ ارسال قابل دسترس ثابت خواهد ماند (شکل ۱۰). همچنین، از اشکال (۹-۱۰) می‌توان دریافت با افزایش احتمال حضور کاربر اولیه، نرخ ارسال قابل دسترس در شبکه رادیوشناختی کاهش می‌یابد. در روش کلاسیک، با توجه به این که تابع دسترسی به طیف تنها دو مقدار صفر و یک را به خود می‌گیرد، لذا انتظار می‌رود که عملکرد ضعیف‌تری نسبت به روش پیشنهادی داشته باشد. همان‌طور که از اشکال (۹-۱۰) می‌توان مشاهده نمود، در حالت کلاسیک (منحنی خط چین) نرخ ارسال پایین‌تری به‌دست آمده است که نشان می‌دهد بهره‌وری طیفی در روش پیشنهادی نسبت به روش کلاسیک بالاتر بوده و لذا می‌توان نتیجه گرفت روش پیشنهادی از فرصت‌های طیفی به‌صورت مؤثرتری استفاده می‌نماید.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مسئله سنجش طیف و تخصیص منابع همزمان با استفاده از مفهوم تابع احتمال دسترسی به طیف در یک شبکه رادیوشناختی چندحاملی مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا با بررسی مفهوم دسترسی احتمالاتی به طیف، مؤلفه‌های عملکردی شبکه رادیوشناختی بازنویسی شده و سپس مسئله سنجش طیف و تخصیص منابع همزمان فرمول‌بندی شد. مسئله بهینه‌سازی حاصل که یک مسئله غیرمحدب بود، با استفاده از الگوریتم ژنتیک به یک مسئله محدب تبدیل و به کمک روش‌های بهینه‌سازی محدب و برنامه‌ریزی خطی جواب بهینه برای آن به‌دست آمد. به کمک نتایج عددی نشان داده شد که تابع احتمال دسترسی به طیف برخلاف تابع دسترسی به طیف کلاسیک می‌تواند تابعی پیوسته با مقادیری حقیقی در بازه $[0,1]$ باشد. با

[31] B. V. Gnedenko and A. N. Kolmogorov, "Limit Distributions for Sums of Independent Random Variables," Addison-Wesley Publishing Co., Reading, Mass.-London-Don Mills., Ont., 1968.

[32] P. Kaligineedi, G. Bansal, and V. K. Bhargava, "Power Loading Algorithms for OFDM-Based Cognitive Radio Systems with Imperfect Sensing," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 11, no. 12, pp. 4225-4230, December 2012.

[33] S. Boyd and L. Vandenberghe, "Convex Optimization," Cambridge University Press, 2004.

[34] J. H. Holland, "Adaptation in Natural and Artificial System," Ann Arbor, MI: Univ. of Michigan Press, 1975.

[35] D. Luenberger, "Linear and Nonlinear Programming," Addison-Wesley, 1984.

پیوست الف) اثبات غیرمحدب بودن مسئله (۲۲)

از آن جا که تابع هزینه (۲۲) مجموع $2N$ عبارت لگاریتمی به صورت $f(x, y) = x \log_2(1 + y)$ است، پس ماتریس هسیان تابع $f(x, y)$ را که با $\nabla^2 f$ نشان می دهیم، به دست می آوریم:

$$\nabla^2 f = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{(1+y) \ln 2} \\ \frac{1}{(1+y) \ln 2} & \frac{-x}{(1+y)^2 \ln 2} \end{bmatrix}$$

شرط محدب بودن تابع $f(x, y)$ این است که ماتریس هسیان آن منفی - معین باشد، یعنی به ازای هر بردار دوعبده دلخواه مانند $[u, v]^T$ باید حاصل عبارت $[u, v]^T \times \nabla^2 f \times [u, v]$ همواره منفی باشد. حاصل عبارت $[u, v]^T \times \nabla^2 f \times [u, v]$ برابر است با:

$$[u, v]^T \times \nabla^2 f \times [u, v] = \frac{uv \left(2(1+y) - \frac{x}{u^2} uv \right)}{(1+y)^2 \ln 2}$$

در صورتی که $uv < 0$ حاصل (۵۸) همواره منفی خواهد بود. اما برای $uv > 0$ بسته به مقدار عبارت $2(1+y) - \frac{x}{u^2} uv$ حاصل (۵۸) می تواند مثبت یا منفی باشد. بنابراین، حاصل عبارت $[u, v]^T \times \nabla^2 f \times [u, v]$ هم می تواند مثبت و هم می تواند منفی باشد و لذا نتیجه می گیریم که ماتریس هسیان منفی - معین نیست. در این صورت، تابع $f(x, y)$ نمی تواند محدب باشد. به منظور بررسی محدب بودن قید (۲۳)، با توجه به این که این قید مجموع N جمله است، هر جمله را به صورت $g(x, y) = \xi xy$ نشان می دهیم. به طریق مشابه آنچه برای تابع $f(x, y)$ انجام شد، داریم:

$$[u, v]^T \times \nabla^2 g \times [u, v] = 2\xi uv.$$

واضح است که بسته به علامت uv حاصل (۵۹) می تواند مثبت یا منفی باشد و لذا تابع $g(x, y)$ لزوماً محدب نیست.

IEEE Trans. on Wireless Commun., vol. 7, no. 4, pp. 1326-1337, April 2008.

[16] P. P. Hoseini and N. C. Beaulieu, "An optimal algorithm for wideband spectrum sensing in cognitive radio systems," In 2010 IEEE International Conference on Communications, pp. 1-6, May 2010.

[17] F. Rezaei, F. Torkamani-Azar, and S. M. S. Sadough, "An adaptive multitaper-svd spectrum sensing method for OFDM-based cognitive radio systems," Wireless Pers. Commun., vol. 79, no. 2, pp. 831-846, 2014.

[18] D. Cabric, S. Mishra, and R. Brodersen, "Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios," in Signals, Systems and Computers, 2004. Conference Record of the Thirty-Eighth Asilomar Conference on, vol. 1, pp. 772-776, Nov. 2004.

[19] S. Mishra, A. Sahai, and R. Brodersen, "Cooperative sensing among cognitive radios," in Communications, 2006. ICC '06. IEEE International Conference on, vol. 4, pp. 1658-1663, June 2006.

[20] P. Kaligineedi, G. Bansal, and V. Bhargava, "Power loading algorithms for OFDM-based cognitive radio systems with imperfect sensing," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 11, no. 12, pp. 4225-4230, December 2012.

[21] G. Bansal, J. Hossain, and V. Bhargava, "Optimal and suboptimal power allocation schemes for OFDM-based cognitive radio systems," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 7, no. 11, pp. 4710-4718, November 2008.

[22] R. Fan, H. Jiang, Q. Guo, and Z. Zhang, "Joint optimal cooperative sensing and resource allocation in multichannel cognitive radio networks," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 60, no. 2, pp. 722-729, Feb 2011.

[23] Y. Wu, D. H. K. Tsang, L. Qian, and L. Meng, "Sensing based joint rate and power allocations for cognitive radio systems," IEEE Wireless Commun. Lett, vol. 1, no. 2, pp. 113-116, April 2012.

[24] S. Huang, H. Chen, and Y. Zhang, "Optimal power allocation for spectrum sensing and data transmission in cognitive relay networks," IEEE Wireless Commun. Lett, vol. 1, no. 1, pp. 26-29, February 2012.

[25] L. M. Lopez-Ramos, A. G. Marques, and J. Ramos, "Jointly optimal sensing and resource allocation for multiuser interweave cognitive radios," IEEE Trans. Wireless Commun, vol. 13, no. 11, pp. 5954-5967, Nov 2014.

[26] N. Janatian, S. Sun, and M. Modarres-Hashemi, "Joint optimal spectrum sensing and power allocation in cdma-based cognitive radio networks," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 64, no. 9, pp. 3990-3998, Sept. 2015.

[27] F. A. Awin, E. Abdel-Raheem, and M. Ahmadi, "Designing an optimal energy efficient cluster-based spectrum sensing for cognitive radio networks," IEEE Commun. Lett., vol. 20, no. 9, pp. 1884-1887, Sept. 2016.

[28] W. Xu, X. Li, C. H. Lee, M. Pan, and Z. Feng, "Joint Sensing Duration Adaptation, User Matching, and Power Allocation for Cognitive OFDM-NOMA Systems," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. PP, no. 99, p. 1, 2017.

[29] M. Karimi and S. M. S. Sadough, "A probabilistic spectrum access approach to joint sensing and power allocation in multiband cognitive radio," 2017 Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), Tehran, pp. 1933-1937, 2017.

[30] X. Liu, F. Li, and Z. Na, "Optimal Resource Allocation in Simultaneous Cooperative Spectrum Sensing and Energy Harvesting for Multichannel Cognitive Radio," IEEE Access, vol. 5, pp. 3801-3812, 2017.

Joint Spectrum Sensing and Power Allocation for Multiband Cognitive Radio Networks Using Probabilistic Spectrum Access

M. Karimi, S. M. S. Sadough*

*Shahid Beheshti University

(Received: 14/11/2017, Accepted: 07/01/2018)

ABSTRACT

Joint optimization of spectrum sensing and spectrum access parameters of a cognitive radio sensor network (CRSN) leads to a higher sum throughput of secondary users (SUs) while the interference introduced to primary users (PUs) is kept under certain tolerable level. In this work, first, by using the concept of probabilistic spectrum access, joint spectrum sensing and power allocation is performed in a multiband CRSN. The considered optimization problem is formulated with the aim of maximizing the average opportunistic secondary data rate under constraints on the interference introduced to PU and limited power budget of SU. The considered system model leads to a non-convex optimization problem which is converted into a convex problem. Based on using genetic algorithms, optimal solution of this problem is obtained using two different approaches: i) Lagrange multipliers method and ii) Linear programming method. We provide several numerical simulation results to evaluate the performance of our proposed methods in terms of achievable CR data rate, interference introduced to the PU and convergence properties of the proposed algorithms.

Keywords: Cognitive Radio Technology, Spectrum Sensing, Radio Resource Allocation, Probabilistic Spectrum Access Function, Convex Optimization, Genetic Algorithm

* Corresponding Author Email: s_sadough@sbu.ac.ir