

سنجش طیف باندپهن در شبکه‌های رادیوشناختی با استفاده از آشکارساز انرژی بهبودیافته

یعثوب اقبالی، محمود احمدیان عطاری و حمید حسنی

بهبودیافته با اصلاح آشکارساز انرژی رایج، پیشنهاد شده است [۴]. در این آشکارساز، علاوه بر حفظ سادگی، دقت آشکارسازی نیز بالاتر رفته است. در [۵] یک روش بهینه برای سنجش طیف باندپهن با استفاده از آشکارساز انرژی پیشنهاد شده است. همچنین [۶] با فرض وجود همبستگی بین زیرباندها، طرح ارائه شده در [۵] را بسط داده است. علاوه بر این [۷] با در نظر گرفتن زمان سنجش به عنوان یک متریک مهم در شبکه‌های رادیوشناختی، به بررسی سنجش طیف باندپهن پرداخته است. در این مقاله، مسأله سنجش طیف باندپهن به کمک آشکارساز انرژی بهبودیافته با هدف حداکثر کردن مجموع گذردهی فرصت طلبانه کاربران ثانویه با در نظر گرفتن محدودیت تداخل با کاربران اولیه بررسی می‌شود. به همین منظور، طیف فرکانسی مورد نظر به تعدادی زیرباند تقسیم می‌شود. هدف اصلی، انتخاب دقیق سطح آستانه انرژی زیرباندها به منظور تشخیص صحیح وجود یا عدم وجود سیگنال کاربر اولیه در محیط است. تفاوت این روش با روش‌های دیگر در این است که به جای آن که سطح آستانه مربوط به هر زیرباند فرکانسی به طور مجزا نسبت به سایر زیرباندها انتخاب شود، کلیه زیرباندها به طور همزمان بررسی و بر اساس عواملی که ترکیبی از اطلاعات همه زیرباندها را در اختیار دارد، سطح آستانه هر زیرباند مشخص می‌شود.

برای رسیدن به هدف فوق باید سطح آستانه انرژی هر زیرباند به گونه‌ای انتخاب شود که محدودیت‌های مورد نظر رعایت شده و عوامل مهمی که در ادامه به آنها اشاره خواهد شد، بهینه شوند. در این مقاله با فرض این که تنها یک کاربر ثانویه در محیط قرار گرفته است، به تعریف دو متریک مهم می‌پردازیم. متریک اول، کل داده قابل ارسال از طریق تمام زیرباندهای موجود می‌باشد که به آن مجموع گذردهی فرصت طلبانه داده گفته می‌شود. متریک دوم، مجموع تداخل سیگنال‌های کاربران ثانویه با سیگنال‌های کاربران اولیه در کلیه زیرباندها را بیان می‌کند. در این مسأله، به دنبال بهینه کردن مجموع گذردهی فرصت طلبانه داده خواهیم بود. بنابراین سطوح آستانه زیرباندها باید به نحوی انتخاب شوند که بیشترین میزان گذردهی و کمترین میزان تداخل را داشته باشیم. دو متریک خطا نیز در ادامه تعریف خواهند شد که آن دو نیز باید از مقادیر معینی کم‌تر باشند.

در بخش ۲ مدل سیستم برای سنجش طیف باندپهن تشریح می‌شود. در بخش ۳ الگوریتم آشکارسازی همزمان زیرباندها با استفاده از آشکارساز انرژی بهبودیافته به منظور سنجش طیف باندپهن معرفی خواهد شد. در بخش ۴ مجموع گذردهی فرصت طلبانه ناشی از طیف باندپهن مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش ۵ مزایای استفاده از آشکارساز انرژی بهبودیافته به منظور سنجش طیف باندپهن با شبیه‌سازی نشان داده می‌شود و در بخش ۶ نتیجه کار انجام شده ارائه خواهد شد.

چکیده: در شبکه‌های رادیوشناختی، سنجش طیف با هدف پیدا کردن حفره‌های طیفی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مقاله، سنجش طیف باندپهن با استفاده از آشکارساز انرژی بهبودیافته بررسی می‌شود. به منظور آشکارسازی دقیق و پیدا کردن حفره‌های خالی، طیف باندپهن به زیرباندهای مساوی و بدون هم‌پوشانی تقسیم می‌شود. هدف اصلی، انتخاب سطح آستانه‌های زیرباندها به صورت هم‌زمان می‌باشد. در این مقاله با فرموله کردن مسأله سنجش طیف به صورت یک دسته از مسایل بهینه‌سازی، به دنبال بهینه‌کردن مجموع گذردهی فرصت طلبانه کاربران رادیوشناختی می‌باشیم. با اعمال برخی شرایط عملی، مسأله بهینه‌سازی به یک مسأله محدب تبدیل شده و جواب بهینه آن محاسبه شده است. در بخش شبیه‌سازی نشان داده می‌شود که استفاده از آشکارساز انرژی بهبودیافته، مجموع گذردهی را به میزان قابل توجهی بهبود می‌بخشد.

کلید واژه: آشکارساز انرژی بهبودیافته، آشکارسازی هم‌زمان، سنجش طیف باندپهن، رادیوشناختی.

۱- مقدمه

یکی از چالش‌های اساسی برای سیستم‌های مبتنی بر رادیوشناختی، سنجش باندهای فرکانسی پهن با هدف یافتن حفره‌های طیفی موجود و استفاده از آنها برای دسترسی فرصت طلبانه به طیف می‌باشد. این نیازمندی، چالش‌های منحصر به فردی را در زمینه طراحی سخت‌افزار و طراحی الگوریتم‌های پردازش سیگنال با قابلیت اطمینان بالا، به وجود می‌آورد. اولاً سنجش طیف نیاز به یک RF front-end باندپهن به همراه مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال با دقت و سرعت بالا دارد که دارای هزینه پیاده‌سازی بالایی می‌باشد [۱]. علاوه بر این، به منظور بهبود دسترسی فرصت طلبانه به طیف و جلوگیری از تداخل با شبکه‌های اولیه، باید وضعیت استفاده از باندهای فرکانسی با دقت بالا و در زمان اندک مشخص گردند. بنابراین، طراحی الگوریتم‌های سنجش طیف باندپهن، نیازی ضروری به نظر می‌رسد.

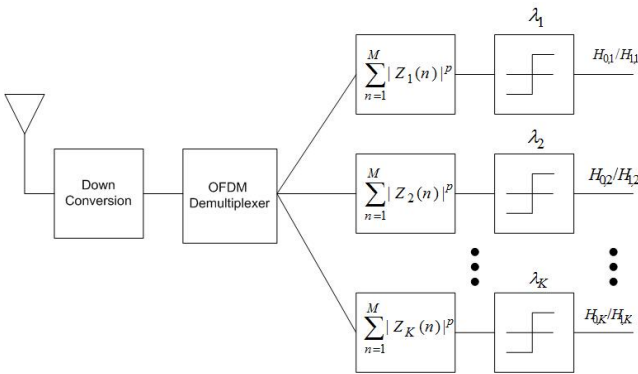
در بیشتر تحقیقات انجام شده، آشکارساز انرژی به دلیل سادگی در پیاده‌سازی و عدم نیاز به اطلاعات اضافی از سیگنال کاربر اولیه، مورد توجه قرار گرفته است [۲] و [۳]. این آشکارساز در مقایسه با دیگر آشکارسازها، پیاده‌سازی ساده‌تری دارد اما در حالت کلی از کارایی پایین‌تری برخوردار است. به منظور بهبود کارایی، آشکارساز انرژی

این مقاله در تاریخ ۲۳ اسفند ماه ۱۳۹۰ دریافت و در تاریخ ۱ بهمن ماه ۱۳۹۱ بازنگری شد.

یعثوب اقبالی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران (email: y_eghbalii@ee.kntu.ac.ir).

محمود احمدیان عطاری، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران (email: m_ahmadian@kntu.ac.ir).

حمید حسنی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران (email: hamid.hassani@ee.kntu.ac.ir).



شکل ۲: آشکارسازی هم‌زمان زیرباندها با استفاده از آشکارساز انرژی بهبودیافته.

برای هر زیرباند، آزمایش تشخیص وجود و یا عدم وجود سیگنال به این ترتیب انجام می‌شود که از سیگنال دریافت‌شده از محیط، M نمونه گرفته شده و سپس متریک Y_k که معادل نرم p نمونه‌های دریافتی در آن بازه می‌باشد، محاسبه می‌گردد

$$Y_k = \sum_{n=1}^M |R_k(n)|^p \stackrel{H_1}{\geq} \lambda_k \quad (5)$$

در (۵)، λ_k آستانه تصمیم‌گیری برای زیرباند k ام می‌باشد. شکل ۲، آشکارسازی هم‌زمان چند زیرباند با استفاده از آشکارساز انرژی بهبودیافته را نشان می‌دهد.

مطابق با قضیه حد مرکزی، چنان چه تعداد نمونه‌ها از سیگنال دریافتی به اندازه کافی زیاد باشد (در عمل $M \geq 20$)، Y_k دارای توزیع نرمال خواهد بود [۱۰]. بنابراین متغیر تصادفی Y_k را می‌توان با میانگین و واریانس‌های زیر در صورت تحقق هر یک از دو فرضیه $H_{\nu,k}$ و $H_{\nu,k}$ نشان داد

$$\begin{cases} E[Y_k | H_{\nu,k}] = M \frac{\sigma_v^p}{\sqrt{\pi}} \Gamma\left(\frac{p+1}{2}\right) \\ \text{Var}[Y_k | H_{\nu,k}] = M \sigma_v^p \sigma_v^{p-2} \cdot \left(\frac{\Gamma(\frac{p+1}{2})}{\sqrt{\pi}} - \frac{\Gamma^2(\frac{p+1}{2})}{\pi} \right) \end{cases} \quad (6)$$

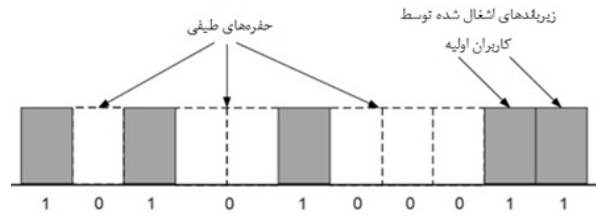
$$\begin{cases} E[Y_k | H_{\nu,k}] = M \frac{\sigma_v^p}{\sqrt{\pi}} (\sigma_v^2 + |H_k|^2)^{\frac{p}{2}} \Gamma\left(\frac{p+1}{2}\right) \\ \text{Var}[Y_k | H_{\nu,k}] = M \sigma_v^p (\sigma_v^2 + |H_k|^2)^{p-2} \cdot \left(\frac{\Gamma(\frac{p+1}{2})}{\sqrt{\pi}} - \frac{\Gamma^2(\frac{p+1}{2})}{\pi} \right) \end{cases} \quad (7)$$

پس از تعیین مشخصات آماری Y_k ، احتمال هشدار غلط و احتمال آشکارسازی هر زیرباند به صورت زیر قابل محاسبه می‌باشد

$$P_f^k = P(Y_k \geq \lambda_k | H_{\nu,k}) = Q\left(\frac{\lambda_k - E[Y_k | H_{\nu,k}]}{\sqrt{\text{Var}[Y_k | H_{\nu,k}]}}\right) \quad (8)$$

$$P_d^k = P(Y_k \geq \lambda_k | H_{\nu,k}) = Q\left(\frac{\lambda_k - E[Y_k | H_{\nu,k}]}{\sqrt{\text{Var}[Y_k | H_{\nu,k}]}}\right) \quad (9)$$

با توجه به روابط فوق، انتخاب مقادیر λ_k تأثیر مهمی بر احتمال هشدار غلط و احتمال آشکارسازی دارد. به این ترتیب که هر اندازه λ_k مقدار بزرگ‌تری داشته باشد، احتمال هشدار غلط و احتمال آشکارسازی



شکل ۱: نمایش وضعیت پر یا خالی بودن زیرباندها.

۲- مدل سیستم

یک شبکه مخابراتی اولیه را در نظر بگیرید. فرض کنید طیف باندهایی به عرض w به این شبکه اختصاص داده شده است. در زمان‌های مختلف، بخش‌هایی از این طیف توسط کاربران اولیه اشغال شده و بخش‌های دیگر خالی می‌باشند. در نتیجه، این امکان برای کاربران ثانویه به وجود می‌آید که به صورت فرصت‌طلبانه از بخش‌های خالی طیف مورد نظر، استفاده کنند. برای افزایش میزان استفاده فرصت‌طلبانه، باید موقعیت دقیق بخش‌های خالی طیف تعیین گردد. به همین منظور، پهنای باند مورد نظر را به K زیرباند مساوی و مجزا تقسیم می‌کنیم. شکل ۱ وضعیت زیرباندها را در یک طیف باندهای نشان می‌دهد.

سیگنال ارسال‌شده توسط فرستنده اولیه که از طریق مسیرهای مختلف به RF front-end گیرنده ثانویه می‌رسد به شکل زیر نشان داده می‌شود

$$r(n) = \sum_{l=1}^{L-1} h(l)s(n-l) + v(n) \quad (1)$$

که در آن $h(l)$ پاسخ ضربه کانال بین فرستنده اولیه و گیرنده ثانویه، $s(n)$ سیگنال فرستنده اولیه در لحظه n و $v(n)$ نویز محیط می‌باشد. فرض می‌کنیم که نویز و سیگنال به ترتیب دارای توزیع گوسی با میانگین‌های صفر و واریانس‌های σ_s^2 و σ_v^2 می‌باشند. در یک محیط با محوشدگی چندمسیره، کانال باندهای ویژگی‌های انتخاب‌گر فرکانسی از خود به نمایش می‌گذارد [۸]. برای هر زیرباند، سیگنال دریافت‌شده در حوزه فرکانس، با استفاده از تبدیل فوریه گسسته، به شکل زیر نشان داده می‌شود

$$R_k = \frac{1}{\sqrt{K}} \sum_{n=0}^{K-1} r(n) e^{-\frac{j2\pi nk}{K}} = H_k S_k + V_k \quad (2)$$

به دلیل خطی بودن تبدیل فوریه، ویژگی‌های آماری سیگنال دریافت‌شده در حوزه فرکانس مشابه با حوزه زمان می‌باشد. فرض می‌کنیم که سیگنال ارسالی کاربر اولیه، بهره کانال و نویز جمع‌شونده مستقل از هم باشند. در یک محیط با محوشدگی چندمسیره، کانال باندهای ویژگی‌های انتخاب‌گر فرکانسی از خود به نمایش می‌گذارد و پاسخ فرکانسی کانال را می‌توان از طریق تبدیل فوریه گسسته K نقطه‌ای به دست آورد

$$H_k = \frac{1}{\sqrt{K}} \sum_{n=0}^{L-1} h(n) e^{-\frac{j2\pi nk}{K}}, \quad k = 1, \dots, K \quad (3)$$

۳- آشکارسازی طیف باندهای با استفاده از آشکارساز انرژی بهبودیافته

ابتدا از آشکارسازی سیگنال در یک زیرباند شروع می‌کنیم. به منظور تصمیم‌گیری درباره وضعیت زیرباند k ام، دو فرض زیر را آزمایش می‌کنیم [۹]

$$\begin{cases} H_{\nu,k} : R_k = V_k \\ H_{\nu,k} : R_k = H_k S_k + V_k \end{cases} \quad (4)$$

باشند. همچنین فرض می‌کنیم که هر کاربر اولیه، یک زیرمجموعه S_j تایی از زیرباند‌ها را اشغال کرده است. مجموع تداخل اعمال شده به کاربر اولیه z ام به صورت زیر بیان می‌شود

$$\sum_{i \in S_j} c_i P_m^i(\lambda_i) \quad (12)$$

که S_j مجموعه زیرباند‌های اشغال شده توسط کاربر اولیه z ام می‌باشد. هدف، انتخاب سطح آستانه بهینه هر زیرباند می‌باشد، به گونه‌ای که میزان مجموع گذردهی تمام زیرباند‌ها بیشینه شده به شرطی که مجموع تداخل با کاربران اولیه، احتمال آشکارسازی غلط و احتمال هشدار غلط از مقادیر معینی کمتر باشند. بنابراین مسأله بهینه‌سازی مجموع گذردهی در یک سیستم با چند کاربر اولیه را می‌توان به شکل زیر فرموله کرد

$$\begin{aligned} (P1) \quad & \max_{\lambda} R(\lambda) \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{i \in S_j} c_i P_m^i(\lambda_i) \leq \varepsilon_j, \quad j=1,2,\dots,J \\ & P_m(\lambda) \leq \alpha \\ & P_f(\lambda) \leq \beta \end{aligned} \quad (13)$$

علامت \leq در رابطه فوق، نمایش‌دهنده نامساوی مخروطی می‌باشد. برای زیرباند با نرخ گذردهی بالا، باید سطح آستانه بزرگ‌تر انتخاب شود تا کاربر ثانویه از زیرباند مورد نظر استفاده بیشتری نماید (احتمال هشدار غلط پایین) و برای زیرباندی که توسط کاربر اولیه با اولویت بالا اشغال شده است، باید سطح آستانه کوچک‌تر انتخاب شود تا از دسترسی کاربران ثانویه به آن جلوگیری شود (احتمال آشکارسازی غلط پایین)، همچنین مصالحه‌ای در زیرباند‌های اشغالی توسط کاربران اولیه با اولویت پایین‌تر، می‌تواند دسترسی فرصت‌طلبانه به طیف را به میزان قابل قبولی افزایش دهد. بنابراین در تعیین بردار سطح آستانه بهینه، برقراری تعادل بین شرایط کانال، گذردهی فرصت‌طلبانه و نسبت اولویت هر زیرباند ضروری می‌باشد.

تابع هدف و قیدهای مسأله $P1$ در حالت کلی محدب نمی‌باشند. این شرایط، حل مسأله برای پیدا کردن جواب بهینه را با مشکل مواجه می‌سازد. در بیشتر موارد باید راه حل‌های شبه‌بهینه یا ابتکاری برای حل پذیر شدن مسأله اعمال گردد. به همین دلیل در این مقاله شرایطی را اعمال می‌کنیم که مسأله را تبدیل به یک مسأله محدب سازد. همان طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، تابع Q تابع کاهشی یکنوا می‌باشد. با استفاده از این ویژگی، می‌توان قیدهای دوم و سوم مسأله $P1$ را به قیدهای خطی تبدیل کرد

$$1 - P_d^k(\lambda_k) \leq \alpha_k, \quad k=1,2,\dots,K \quad (14)$$

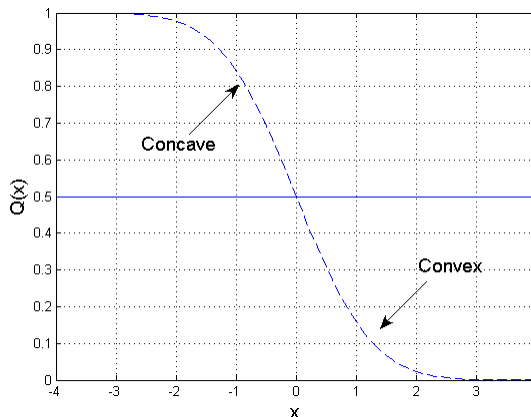
با جایگذاری (۹) در (۱۴) داریم

$$\lambda_k \leq \lambda_{\max,k}, \quad k=1,2,\dots,K \quad (15)$$

به طوری که

$$\begin{aligned} \lambda_{\max,k} = & \frac{M \gamma^{\frac{p}{2}}}{\sqrt{\pi}} (\sigma_v^{\frac{p}{2}} + |H_k|^{\frac{p}{2}} \sigma_s^{\frac{p}{2}})^{\frac{p}{2}} \Gamma\left(\frac{p+1}{2}\right) \\ & + \sqrt{\gamma^p M (\sigma_v^{\frac{p}{2}} + |H_k|^{\frac{p}{2}} \sigma_s^{\frac{p}{2}})^p \left(\frac{\Gamma(\frac{2p+1}{2})}{\sqrt{\pi}} - \frac{\Gamma(\frac{p+1}{2})}{\pi}\right)} \quad (16) \\ & \times Q^{-1}(1 - \alpha_k) \end{aligned}$$

به طور مشابه برای قید سوم مسأله $P1$ داریم



شکل ۳: تابع $Q(x)$.

کوچک‌تر خواهد بود و برعکس. بنابراین مقدار λ_k باید به نحوی انتخاب گردد که این احتمال‌ها در مقادیر مناسب قرار گیرند.

۴- آشکارسازی توأم زیرباند‌ها

در این بخش، ساختاری برای آشکارسازی هم‌زمان زیرباند‌ها به منظور سنجش طیف باندپهن با استفاده از آشکارساز انرژی بهبودیافته ارائه می‌کنیم. همان طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، هدف از حل این مسأله، پیدا کردن بردار آستانه بهینه $\lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_K]^T$ برای زیرباند‌ها می‌باشد. λ باید به نحوی تعیین شود که شبکه رادیوشناختی از باند‌های خالی با ایجاد کمترین تداخل با کاربران اولیه، بیشترین استفاده را نماید. برای یک بردار آستانه معین λ ، احتمال هشدار غلط، احتمال آشکارسازی و احتمال آشکارسازی غلط مطابق زیر تعریف می‌گردند

$$\begin{aligned} P_f(\lambda) &= [P_f^1(\lambda_1), P_f^2(\lambda_2), \dots, P_f^K(\lambda_K)]^T \\ P_d(\lambda) &= [P_d^1(\lambda_1), P_d^2(\lambda_2), \dots, P_d^K(\lambda_K)]^T \\ P_m(\lambda) &= [P_m^1(\lambda_1), P_m^2(\lambda_2), \dots, P_m^K(\lambda_K)]^T \end{aligned} \quad (10)$$

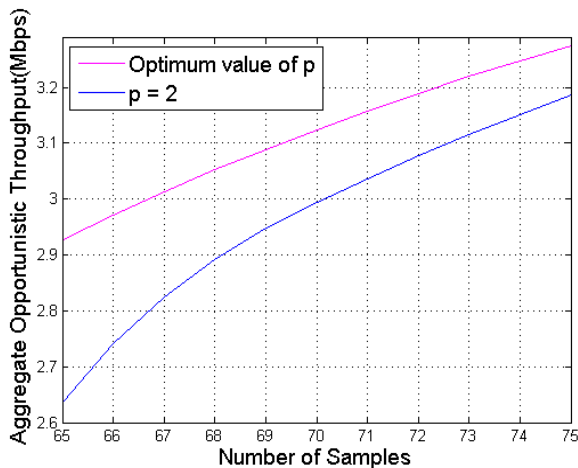
اگر r_k گذردهی قابل دستیابی توسط کاربر ثانویه در زیرباند k ام باشد، $r = [r_1, r_2, \dots, r_K]^T$ بردار گذردهی زیرباند‌ها خواهد بود. با مشخص بودن توان ارسالی و بهره کانال بین فرستنده اولیه و گیرنده ثانویه، می‌توان r را مطابق با رابطه ظرفیت شانون تخمین زد [۸]. از آنجا که $1 - P_f^k(\lambda_k)$ احتمال دسترسی فرصت‌طلبانه به زیرباند k ام می‌باشد، مجموع گذردهی قابل حصول برای شبکه رادیوشناختی را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد [۵]

$$R(\lambda) = r^T [1 - P_f(\lambda)] \quad (11)$$

مطابق (۱۱)، هر اندازه میزان P_f کمتر باشد، گذردهی فرصت‌طلبانه بیشتری حاصل خواهد شد. اما کاهش P_f موجب افزایش P_m خواهد شد که این نیز به نوبه خود، منجر به افزایش تداخل می‌شود. بنابراین باید بین P_f و P_m مصالحه‌ای انجام گیرد.

حداکثر کردن $R(\lambda)$ منجر به افزایش P_m گردیده و تداخل با شبکه اولیه افزایش می‌یابد. بنابراین باید تداخل ناشی از شبکه ثانویه محدود گردد. برای یک شبکه اولیه باندپهن، تأثیر تداخل ناشی از شبکه ثانویه را می‌توان با یک ضریب ثابت برای هر کاربر اولیه فعال در زیرباند متناظر در نظر گرفت.

بردار $c = [c_1, c_2, \dots, c_K]^T$ را به عنوان بردار تداخل ایجاد شده توسط شبکه ثانویه در نظر می‌گیریم. فرض می‌کنیم که J کاربر اولیه بخشی از طیف که شامل K زیرباند می‌باشد را با کاربران ثانویه به اشتراک گذاشته



شکل ۶: مجموع گذردهی فرصت‌طلبانه بر حسب تعداد نمونه به ازای $\varepsilon = 1$.

جدول ۱: متریک‌های مورد استفاده برای شبیه‌سازی.

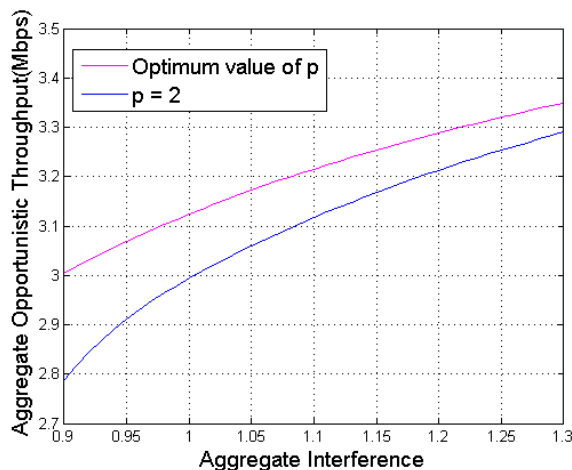
k	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
$ H_k ^2$	۰/۶۱	۰/۴۹	۰/۳۵	۰/۲۵	۰/۲۳	۰/۳۵	۰/۵۲	۰/۵۹
$r(kbps)$	۶۱۲	۵۲۴	۶۲۳	۱۳۹	۴۵۱	۴۰۹	۹۰۹	۴۰۱
c	۱/۹۱	۸/۱۷	۴/۲۳	۳/۸۶	۷/۱۶	۶/۰۵	۰/۸۲	۱/۳

فرض می‌کنیم که پهنای باند ۴۸ MHz به یک شبکه اولیه اختصاص داده شده باشد. طیف فرکانسی مورد نظر را به ۸ قسمت مساوی تقسیم می‌کنیم. ضرایب r_k ، c_k و بهره کانال به ازای هر زیرباند در جدول ۱ ذکر شده است. حداکثر احتمال هشدار غلط برابر ۰/۵ و برای آشکارسازی غلط ۰/۲ در نظر گرفته می‌شود. به منظور راحت‌تر شدن محاسبات، توان سیگنال ارسالی از فرستنده اولیه را ۱ وات در نظر می‌گیریم. همچنین فرض می‌کنیم که SNR در گیرنده‌های مختلف برابر با ۲ dB باشد.

مسئله P۲ را به ازای آشکارساز انرژی رایج و بهبودیافته مورد بررسی قرار می‌دهیم. برای به دست آوردن مجموع گذردهی فرصت‌طلبانه با استفاده از آشکارساز انرژی بهبودیافته، مقدار p را از ۱ تا ۵ اندازه گام ۰/۱ تغییر داده و به محاسبه مجموع گذردهی فرصت‌طلبانه می‌پردازیم، مقداری از p که مجموع گذردهی فرصت‌طلبانه را بیشینه می‌سازد، به عنوان مقدار بهینه انتخاب می‌گردد. شکل ۴، منحنی مجموع گذردهی قابل حصول برای شبکه ثانویه (پاسخ مسئله P۱) را بر حسب مجموع تداخل اعمال شده به کاربر اولیه نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که آشکارساز انرژی بهبودیافته، مجموع گذردهی فرصت‌طلبانه به مراتب بالاتری نسبت به آشکارساز انرژی رایج فراهم می‌سازد. نتایج، بیانگر این واقعیت است که استفاده از آشکارساز انرژی بهبودیافته، امکان استفاده بیشتر از طیف و حجم تبادل اطلاعات بالاتری را در اختیار کاربران شبکه ثانویه قرار می‌دهد.

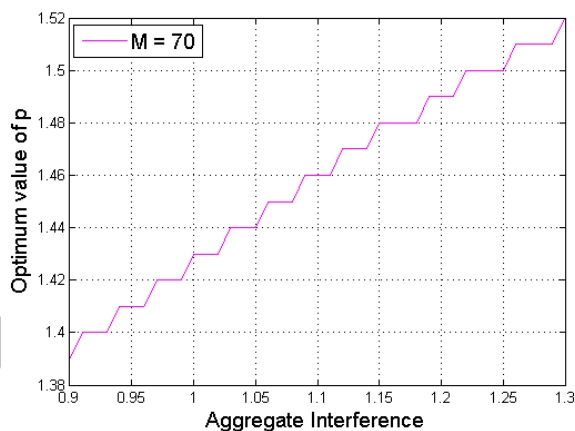
شکل ۵، مقادیری از p که به ازای مجموع تداخل‌های متفاوت، منجر به بیشینه شدن مجموع گذردهی فرصت‌طلبانه می‌گردند را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش مجموع تداخل، مقدار p نیز افزایش می‌یابد.

در شکل ۶، مجموع گذردهی فرصت‌طلبانه بر حسب تعداد نمونه به ازای مجموع تداخل $\varepsilon = 1$ مورد بررسی قرار گرفته است. به ازای یک مجموع تداخل مشخص، مجموع گذردهی فرصت‌طلبانه در صورت استفاده از آشکارساز انرژی بهبودیافته نسبت به آشکارساز انرژی رایج به میزان قابل توجهی بهبود می‌یابد.



شکل ۴: مجموع گذردهی فرصت‌طلبانه بر حسب محدودیت مجموع تداخل به ازای

$M = 70$.



شکل ۵: مقدار p بر حسب مجموع تداخل.

$$\lambda_k \geq \lambda_{\min,k}, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (17)$$

که

$$\lambda_{\min,k} = M \frac{\frac{p}{2} \sigma_v^p \Gamma(\frac{p+1}{2})}{\sqrt{\pi}} + \frac{p}{2} \sigma_v^p \sqrt{M \left(\frac{\Gamma(\frac{2p+1}{2})}{\sqrt{\pi}} - \frac{\Gamma(\frac{p+1}{2})}{\pi} \right) Q^{-1}(\beta_k)} \quad (18)$$

در نتیجه مسئله P۱ به مسئله معادل زیر تبدیل می‌شود

$$(P2) \quad \min_{\lambda} \sum_{k=1}^K r_k P_f^k(\lambda_k) \quad (19)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i \in S_j} c_i P_m^i(\lambda_i) \leq \varepsilon_j, \quad j = 1, 2, \dots, J$$

$$\lambda_{\min,k} \leq \lambda_k \leq \lambda_{\max,k}, \quad k = 1, 2, \dots, K$$

با توجه به ویژگی تابع Q ، با در نظر گرفتن شرایط (۲۰)، زیرمسئله P۱ به یک مسئله برنامه‌ریزی محدب تبدیل می‌شود

$$0 \leq \alpha_k \leq \frac{1}{2} \text{ and } 0 \leq \beta_k \leq \frac{1}{2}, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (20)$$

۵- نتایج شبیه‌سازی‌ها

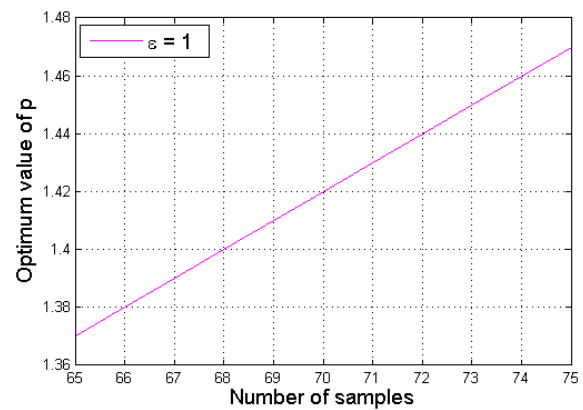
در این قسمت، به بررسی نتایج عددی طرح پیشنهاد شده می‌پردازیم.

- [2] D. Cabric, S. M. Mishra, and R. W. Brodersen, "Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios," in *38th Asilomar Conf. on Signals, Systems, and Computers*, vol. 1, pp. 772-776, Nov. 2004.
- [3] M. Ghozzi, M. Dohler, F. Marx, and J. Palico, "Cognitive radios: methods for the detection of free bands," *Elsevier Science J.*, vol. 7, pp. 794-805, Sep. 2006.
- [4] Y. Chen, "Improved energy detector for random signals in Gaussian noise," *Wireless Communications, IEEE Trans. on*, vol. 9, no. 2, pp. 558-563, Feb. 2010.
- [5] Z. Quan, S. Cui, A. H. Sayed, and H. V. Poor, "Optimal multiband joint detection for spectrum sensing in cognitive radio networks," *Signal Processing, IEEE Trans. on*, vol. 57, no. 3, pp. 1128-1140, Mar. 2009.
- [6] K. Hossain and B. Champagne, "Wideband spectrum sensing for cognitive radios with correlated subband occupancy," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 18, no. 1, pp. 35-38, Jan. 2011.
- [7] P. Paysarvi-Hoseini and N. C. Beaulieu, "Optimal wideband spectrum sensing framework for cognitive radio systems," *Signal Processing, IEEE Trans. on*, vol. 59, no. 3, pp. 1170-1182, Mar. 2011.
- [8] A. Goldsmith, *Wireless Communications*, Cambridge, U. K.: Cambridge Univ. Press, 2006.
- [9] Initial Evaluation of the Performance of Prototype TV-Band White Space Devices, FCC/OET 07-TR-1006, Jul. 2007.
- [10] Z. Quan, S. Cui, and A. H. Sayed, "Optimal linear cooperation for spectrum sensing in cognitive radio networks," *Selected Topics in Signal Processing, IEEE J. of*, vol. 2, no. 1, pp. 28-40, Feb. 2008.

یعسوب اقبالی تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی در سال ۱۳۸۷ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرری و در مقطع کارشناسی ارشد در سال ۱۳۹۰ از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی در رشته مهندسی برق- مخابرات سیستم به پایان رسانیده است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان در حوزه مخابرات دیجیتال و بی‌سیم به خصوص شبکه‌های رادیو شناختی می‌باشد.

محمود احمدیان عطاری تحصیلات کارشناسی و کارشناسی ارشد را در سال ۱۳۵۶ در دانشکده فنی دانشگاه تهران در رشته مهندسی برق- الکترونیک به پایان رسانید و از سال ۱۳۵۸ ابتدا در دانشگاه تربیت معلم تهران و سپس در دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی به عنوان مربی استخدام گردید. وی در سال ۱۳۷۱ جهت ادامه تحصیل در مقطع دکتری به کشور انگلستان اعزام شد و در سال ۱۳۷۶ به دریافت درجه دکتری در رشته مهندسی برق گرایش مخابرات از دانشگاه منچستر نائل شد و به کشور بازگشت. دکتر احمدیان در سال ۱۳۸۲ آزمایشگاه شناسه و رمز را در دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی بنیان گذاشت و اکنون با رتبه دانشیاری به تدریس و تحقیق در حوزه مخابرات دیجیتال و بی‌سیم به خصوص زمینه‌های تئوری اطلاعات، کدینگ، رمزنگاری، مخابرات امن، شبکه‌های حسگر و شبکه‌های رادیو شناختی اشتغال دارد.

حمید حسینی در سال ۱۳۸۹ مدرک کارشناسی مهندسی برق- الکترونیک را از دانشگاه زنجان و در سال ۱۳۹۱ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق- مخابرات سیستم را از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی دریافت نمود. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه وی در حوزه مخابرات دیجیتال و بی‌سیم به خصوص شبکه‌های رادیو شناختی می‌باشد.



شکل ۷: مقدار p بهینه بر حسب تعداد نمونه.

در شکل ۷، مقادیر مختلف p که به ازای تعداد نمونه‌های مختلف، منجر به بیشینه‌شدن مجموع گذردهی فرصت‌طلبانه می‌گردد، نشان داده شده است. با افزایش تعداد نمونه لازم برای تصمیم‌گیری مقدار بهینه p نیز افزایش یافته است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، آشکارسازی هم‌زمان زیرباندها با هدف سنجش طیف باندپهن در شبکه‌های رادیو شناختی پیشنهاد شد. به منظور آشکارسازی دقیق‌تر و پیدا کردن حفره‌های خالی، طیف باندپهن به زیرباندهای کوچک‌تر تقسیم و در هر زیرباند از آشکارساز انرژی بهبودیافته استفاده شده است. هدف اصلی از پیشنهاد این روش، انتخاب سطح آستانه‌ها به صورت هم‌زمان با استفاده از آشکارساز انرژی بهبودیافته می‌باشد که در نهایت به انجام دقیق سنجش طیف منجر گردیده و مجموع گذردهی فرصت‌طلبانه طیف فرکانسی مورد بررسی را به میزان قابل توجهی بهبود بخشید. در این مقاله، مسأله آشکارسازی هم‌زمان زیرباندها به صورت یک دسته از مسایل بهینه‌سازی مطرح شد. با طرح این روش و به کارگیری آشکارساز انرژی بهبودیافته، میزان استفاده از طیف (تبادل داده) به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد.

مراجع

- [1] A. Sahai and D. Cabric, "A tutorial on spectrum sensing: fundamental limits and practical challenges," in *Proc. IEEE Symp. New Frontiers Dynamic Spectrum Access Networks, DySPAN*, Baltimore, MD, US, Nov. 2005.