

## افزایش دقت سنجش طیف با استفاده از آشکارساز انرژی بهبود یافته در شبکه های ارتباطی رادیو شناختی

یعثوب اقبالی<sup>۱</sup>، محمود احمدیان<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناس ارشد، ۲- دانشیار دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

(دریافت: ۹۱/۰۱/۲۳، پذیرش: ۹۲/۰۲/۰۱)

### چکیده

آشکارساز انرژی وسیله مناسب و ساده ای برای سنجش طیف در شبکه های رادیو شناختی است و به طور گسترده در شبکه های مخابرات بی سیم مورد استفاده قرار می گیرد. در این مقاله، عملکرد سنجش طیف با آشکارساز انرژی بهبود یافته بررسی می شود. در آشکارساز انرژی بهبود یافته، تصمیم گیری در رابطه با وضعیت طیف با محاسبه نرم بهینه از سیگنال دریافتی انجام می شود. همچنین به منظور کاهش تداخل و بهبود استفاده مجدد از طیف، رابطه سطح آستانه بهینه برای آشکارساز بهبود یافته به دست آمده است. در شبکه های رادیو شناختی، گذردهی ارسال، عامل بسیار مهمی است که نشان دهنده میزان مؤثر بودن یک شبکه مخابراتی است. نتایج عددی نشان از بهبود میزان گذردهی در صورت استفاده از آشکارساز انرژی بهبود یافته در مقایسه با آشکارساز انرژی رایج است.

**کلیدواژه ها:** سنجش طیف، آشکارساز انرژی بهبود یافته، مشارکت کاربران ثانویه، گذردهی.

## Increasing Spectrum Sensing Accuracy by Improved Energy Detector in Cognitive Radio Communication Networks

Y. Eghbali, M. Ahmadian\*

K. N. Toosi University of Technology

(Received: 11 /04/2012; Accepted: 21 /04/2013)

### Abstract

Energy detector is a simple detector for spectrum sensing in cognitive radio networks, and is used widely in wireless communication systems. In this paper, an improved energy detector for spectrum sensing is investigated. Improved energy detector makes decisions about spectrum, based on calculation of the optimal norm of received signal's samples. In order to reduce the interference and improve the spectrum reuse, an optimum threshold for the improved energy detector is obtained. Throughput is an important factor in cognitive radio networks, which shows the effectiveness of a network. Numerical results show the throughput increases by using improved energy detector compared to the traditional energy detector.

**Keywords:** Spectrum Sensing, Improved Energy Detector, Secondary User Cooperation, Throughput.

## ۱. مقدمه

کاربران مختلف، تصمیم‌گیری نهایی را درباره وضعیت طیف انجام می‌دهد.

تعیین سطح آستانه مناسب برای سنجش طیف، عامل بسیار مهمی است. انتخاب سطح آستانه بالا، منجر به کاهش احتمال آشکارسازی و افزایش تداخل با کاربران اولیه می‌شود و در صورتی که سطح آستانه، پایین انتخاب شود احتمال هشدار غلط افزایش یافته و منجر به از دست رفتن فرصت‌های طیفی می‌شود. بنابراین باید سطح آستانه به‌نحوی انتخاب شود که علاوه بر افزایش استفاده از فرصت‌های طیفی، تداخل با کاربران اولیه نیز تا حد امکان کاهش یابد. به‌همین منظور پس از معرفی مدل سیستم در بخش دوم این مقاله، در بخش سوم به‌منظور حداقل کردن تداخل و نیز افزایش میزان استفاده از طیف، رابطه بهینه برای سطح آستانه به‌دست آمده است.

در بخش چهارم، میزان گذردهی ارسال برای کاربر ثانویه مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شبکه‌های ثانویه، گذردهی ارسال عامل بسیار مهمی است که نشان دهنده میزان مؤثر بودن یک سیستم رادیو شناختگر است [۱۱]. سنجش طیف غیر دقیق منجر به تداخل با کاربر اولیه، از دست رفتن فرصت‌های طیفی و در نتیجه کاهش گذردهی ارسال می‌شود.

همان‌طور که گفته شد، محوشدگی چند مسیره می‌تواند نتایج تصمیم‌گیری کاربران ثانویه را تحت تأثیر قرار دهد. در این حالت مناسب است که از مشارکت کاربران ثانویه استفاده شود. به همین منظور در بخش پنجم، مهم‌ترین قانون‌های موجود در سنجش طیف مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین در بخش ششم، گذردهی ارسال مورد بررسی قرار گرفته و نشان داده شده که انتخاب آشکارساز مناسب، گذردهی قابل حصول کاربران ثانویه را به میزان قابل توجهی بهبود می‌بخشد.

## ۲. مدل سیستم

یک سیستم شامل  $N$  کاربر ثانویه، یک کاربر اولیه و یک مرکز ترکیب در نظر گرفته می‌شود. مسأله آشکارسازی برای کاربر ثانویه  $i$  ام به‌صورت زیر است:

$$H_0: r_i(m) = v_i(m) \quad (1)$$

$$H_1: r_i(m) = s(m) + v_i(m)$$

در رابطه (۱)،  $H_0$  عدم حضور کاربر اولیه و  $H_1$  حضور کاربر اولیه را در باند مورد بررسی نشان می‌دهد.  $s(m)$  سیگنال ارسال شده در لحظه  $m$  از فرستنده اولیه بوده و دارای توزیع نرمال با میانگین صفر و متوسط توان ارسالی  $\sigma_s^2$  است. همچنین  $v_i(m)$  نویز سفید گوسی با میانگین صفر و واریانس  $\sigma_{v_i}^2$  است. تابع تصمیم‌گیری در آشکارساز انرژی رایج به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۱۳ و ۱۲]:

شبکه‌های بی‌سیم امروزی بر اساس سیاست تخصیص طیف ثابتی نظم‌بندی شده‌اند که این سیاست منجر به عدم استفاده بهینه از طیف شده است. به‌منظور بهبود میزان استفاده از طیف، فناوری رادیو شناختی پیشنهاد شده است [۱۱]. رادیوهای شناختی، از دیدگاه کمیته مخابرات فدرال، رادیوهایی هستند که به‌طور پیوسته طیف فرکانسی را بررسی کرده و به‌طور پویا باندهای فرکانسی بدون استفاده از طیف را شناسایی و در این باندها به تبادل داده می‌پردازند [۲]. یکی از چالش‌های اصلی در شبکه‌های رادیو شناختگر، سنجش طیف با هدف پیدا کردن حفره‌های طیفی است. معمولاً از آشکارساز انرژی [۴ و ۳] فیلتر منطبق [۵] و آشکارسازی بر اساس ویژگی ایستای تناوبی [۷ و ۶] برای سنجش طیف استفاده می‌شود.

آشکارساز انرژی یک آشکارساز غیرهمدوس و مناسب برای سیگنال‌های آغشته به نویز گوسی است. این آشکارساز، حضور سیگنال را با محاسبه انرژی نمونه‌های دریافتی از محیط و مقایسه آن با یک سطح آستانه معین، مشخص می‌کند. در این آشکارساز، اندازه‌گیری‌ها و مقایسه‌ها به اطلاعات کانال بستگی ندارند، به همین دلیل آشکارساز انرژی ساختار ساده‌ای دارد و به‌طور گسترده در شبکه‌های مخابرات بی‌سیم مورد استفاده قرار می‌گیرد.

آشکارساز انرژی اغلب به‌دلیل نیاز به زمان کم برای سنجش طیف و نیز پیاده‌سازی ساده‌تر در مقایسه با آشکارساز مبتنی بر ویژگی که نیاز به تعداد نمونه بالا برای محاسبه کواریانس دارد و همچنین فیلتر منطبق به دلیل پیاده‌سازی پیچیده‌اش، مورد توجه قرار گرفته است. در حالت کلی، آشکارسازی که تابع نسبت درست‌نمایی کلی را بیشینه می‌سازد با آشکارسازی که احتمال آشکارسازی صحیح را بیشینه می‌کند، برابر نیست. بنابراین باید به دنبال آشکارساز جدیدی بود که نسبت به آشکارساز انرژی رایج، عملکرد بهتری داشته باشد. به‌همین منظور آشکارساز انرژی بهبودیافته با اصلاح آشکارساز انرژی رایج پیشنهاد شده است [۸]. به این ترتیب که با جایگذاری توان دامنه سیگنال دریافتی با عدد اختیاری  $p$  می‌توان به آشکارساز جدیدی تحت عنوان آشکارساز انرژی بهبودیافته دست یافت.

تشخیص صحیح حفره‌های طیفی معمولاً توسط شرایط مخرب ناشی از محوشدگی در کانال بین فرستنده اولیه و گیرنده ثانویه، در معرض خطر قرار می‌گیرد. در این حالت، جداسازی سیگنال تضعیف شده کاربر اولیه از نویز با مشکل مواجه می‌شود. در چنین شرایطی، یک شبکه با مشارکت کاربران ثانویه پیشنهاد می‌شود. در شبکه‌های مشارکتی، به دلیل توزیع کاربران در محیط، هر کاربر شرایط کانال متفاوتی نسبت به دیگر کاربران تجربه می‌کند. در روش مشارکتی متمرکز، هر کاربر ثانویه پس از انجام فرایند سنجش طیف، نتیجه مشاهده خود را از طریق کانال مشترک عمومی به مرکز ترکیب ارسال می‌کند [۱۰ و ۹]. مرکز ترکیب با توجه به اطلاعات دریافتی از

$$\lambda_i = \theta_0^i \gamma^{-1} (k_0^i, 1 - P_f^i) \quad (7)$$

بنابراین رابطه منحنی مشخصه عملیاتی گیرنده برای آشکارساز انرژی رایج، به صورت زیر تعیین می شود:

$$P_d^i = 1 - \gamma(k_1, \frac{\lambda_i}{\theta_1^i}) \\ = 1 - \gamma(k_1, \frac{\theta_0^i \gamma^{-1} (k_0^i, 1 - P_f^i)}{\theta_1^i}) \quad (8)$$

برای بهبود عملکرد سنجش طیف، آشکارساز انرژی بهبود یافته رابطه زیر پیشنهاد شده است [۸]:

$$Y_i = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M \left( \frac{|r_i(n)|}{\sigma_v} \right)^p \stackrel{H_1}{\geq} \lambda_i \quad (9)$$

در این آشکارساز،  $p$  یک ثابت اختیاری است. مشاهده می شود که به ازای  $p = 2$ ، رابطه آشکارساز انرژی بهبود یافته، همان رابطه آشکارساز انرژی رایج خواهد بود. در حالت کلی، متغیر تصمیم گیری  $Y_i$  از توزیع گاما پیروی نمی کند. با این وجود،  $Y_i$  را می توان با یک توزیع گاما تقریب زد. در ادامه به وسیله شبیه سازی نشان داده خواهد شد که این تقریب با دقت بالایی صحیح می باشد. متغیر تصمیم گیری  $Y_i$  تحت فرض  $H_0$  دارای میانگین و واریانس های زیر است:

$$E[Y_i | H_0] = \frac{2^{(p/2)}}{\sqrt{\pi}} \Gamma\left(\frac{p+1}{2}\right) \quad (10) \\ \text{Var}[Y_i | H_0] = 2^p \frac{\Gamma\left(\frac{2p+1}{2}\right)}{M\sqrt{\pi}} - \frac{2^p}{M\pi} \Gamma^2\left(\frac{p+1}{2}\right)$$

با در نظر گرفتن فرض  $H_1$  نیز داریم:

$$E[Y_i | H_1] = \frac{2^{(p/2)}}{\sqrt{\pi}} \Gamma\left(\frac{p+1}{2}\right) (\sqrt{1+\gamma_i})^p \\ \text{Var}[Y_i | H_1] = \frac{2^p (1+\gamma_i)^p}{M\sqrt{\pi}} \Gamma\left(\frac{2p+1}{2}\right) \\ - \frac{2^p (1+\gamma_i)^p}{M\pi} \Gamma^2\left(\frac{p+1}{2}\right) \quad (11)$$

توزیع متغیر تصمیم گیری  $Y_i$  با فرض  $H_0$  دارای پارامترهای زیر است:

$$k_0^i = \frac{E^2[Y_i | H_0]}{\text{Var}[Y_i | H_0]} = M \cdot \frac{\Gamma^2\left(\frac{p+1}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{2p+1}{2}\right)\sqrt{\pi} - \Gamma^2\left(\frac{p+1}{2}\right)} \quad (12) \\ \theta_0^i = \frac{\text{Var}[Y_i | H_0]}{E[Y_i | H_0]} = \frac{2^p}{M} \cdot \frac{\Gamma\left(\frac{2p+1}{2}\right)\sqrt{\pi} - \Gamma^2\left(\frac{p+1}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{p+1}{2}\right)\sqrt{\pi}}$$

با فرض  $H_1$  نیز داریم:

$$Y_i = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{r_i(m)}{\sigma_{v_i}} \stackrel{H_1}{\geq} \lambda_i \quad (2)$$

در رابطه (۲)،  $M$  تعداد نمونه های دریافتی از سیگنال موجود در محیط را نشان می دهد. دامنه نمونه های دریافتی از سیگنال کاربر اولیه نسبت به انحراف معیار نویز، نرمالیزه شده و به توان ۲ رسانده می شود. در این رابطه،  $\lambda_i$  سطح آستانه آشکارسازی را نشان می دهد. تابع چگالی احتمال  $Y_i$  تحت فرض  $H_0$  را می توان به صورت یک توزیع گاما  $chi - square$  یا  $chi - square$  نشان داد [۱۴]:

$$p_{Y_i | H_0}(x) = \frac{1}{(\theta_0^i)^{k_0^i} \Gamma(k_0^i)} x^{k_0^i - 1} e^{-\frac{x}{\theta_0^i}}, x \geq 0 \quad (3)$$

که در آن،  $k_0^i = \frac{M}{2}$ ،  $\theta_0^i = \frac{2}{M}$  است. همچنین تحت فرض  $H_1$ ، تابع چگالی احتمال  $Y_i$  به صورت زیر محاسبه می شود:

$$p_{Y_i | H_1}(x) = \frac{1}{(\theta_1^i)^{k_1^i} \Gamma(k_1^i)} x^{k_1^i - 1} e^{-\frac{x}{\theta_1^i}}, x \geq 0 \quad (4)$$

که در آن،  $k_1^i = \frac{M}{2} (1 + \gamma_i)$ ،  $\theta_1^i = \frac{2}{M} (1 + \gamma_i)$ ،  $\gamma_i = \frac{\sigma_s^2}{\sigma_v^2}$  متوسط نسبت توان سیگنال به نویز می باشد.

در این روابط  $\Gamma(a) = \int_0^\infty t^{a-1} e^{-t} dt$  تابع گامای کامل است.

با داشتن تابع چگالی احتمال انرژی دریافتی، می توان احتمال هشدار غلط هر کاربر  $P_f^i$  و احتمال آشکارسازی هر کاربر  $P_d^i$  را محاسبه کرد:

$$P_f^i = P_r \{Y_i > \lambda_i | H_0\} = 1 - \gamma(k_0^i, \frac{\lambda_i}{\theta_0^i}) \quad (5)$$

$$P_d^i = P_r \{Y_i > \lambda_i | H_1\} = 1 - \gamma(k_1^i, \frac{\lambda_i}{\theta_1^i}) \quad (6)$$

لازم به ذکر است که در رابطه های (۵) و (۶)،  $\gamma(a, x) = \int_0^x \frac{t^{a-1} e^{-t}}{\Gamma(a)} dt$

منحنی مشخصه عملیاتی گیرنده که رابطه بین احتمال آشکارسازی صحیح و احتمال هشدار غلط را نشان می دهد، در بررسی عملکرد بسیار مهم است. با توجه به یکنواخت بودن تابع گامای غیر کامل، می توان با استفاده از رابطه (۵)، سطح آستانه آشکارسازی کاربر نام را به صورت زیر تعیین نمود:

خطای کل به صورت زیر به دست می آید:

$$\lambda_i^{opt} = \frac{\theta_0^i \theta_1^i}{\theta_0^i - \theta_1^i} \ln \left( \frac{P(H_1)}{P(H_0)} \left( \frac{\theta_0^i}{\theta_1^i} \right)^{k_0^i} \right) \quad (17)$$

اثبات:

خطا در آشکارسازی زمانی اتفاق می افتد که باند پر به اشتباه خالی یا باند خالی به اشتباه پر تشخیص داده شود. احتمال تشخیص اشتباه باند پر برابر  $P(H_1)(1 - P_d^i)$  و احتمال تشخیص اشتباه باند خالی  $P(H_0)P_f^i$  است. احتمال خطا به صورت مجموع دو خطا تعریف می شود:

$$\begin{aligned} P_e^i &= P(H_0)P_f^i + P(H_1)(1 - P_d^i) \\ &= P(H_0)(1 - \gamma(k_0^i, \frac{\lambda_i}{\theta_0^i})) + (1 - P(H_0))\gamma(k_1^i, \frac{\lambda_i}{\theta_1^i}) \end{aligned}$$

برای به دست آوردن سطح آستانه بهینه باید از رابطه احتمال خطا نسبت به سطح آستانه مشتق گرفته شود:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_e^i}{\partial \lambda_i} &= -P(H_0) \frac{1}{\theta_0^i} \times \frac{(\frac{\lambda_i}{\theta_0^i})^{k_0^i - 1} e^{-\frac{\lambda_i}{\theta_0^i}}}{\Gamma(k_0^i)} + \\ &\quad \frac{(\frac{\lambda_i}{\theta_1^i})^{k_1^i - 1} e^{-\frac{\lambda_i}{\theta_1^i}}}{\Gamma(k_1^i)} \\ (1 - P(H_0)) \left( \frac{1}{\theta_1^i} \times \frac{(\frac{\lambda_i}{\theta_1^i})^{k_1^i - 1} e^{-\frac{\lambda_i}{\theta_1^i}}}{\Gamma(k_1^i)} \right) &= 0 \end{aligned}$$

$$\text{if } k_0^i = k_1^i \rightarrow \frac{1 - P(H_0)}{P(H_0)} \left( \frac{\theta_0^i}{\theta_1^i} \right)^{k_0^i} = e^{\frac{-\lambda_i}{\theta_0^i} + \frac{\lambda_i}{\theta_1^i}}$$

$$\begin{aligned} \lambda_i \left( \frac{1}{\theta_1^i} - \frac{1}{\theta_0^i} \right) &= \ln \left( \frac{1 - P(H_0)}{P(H_0)} \left( \frac{\theta_0^i}{\theta_1^i} \right)^{k_0^i} \right) \\ \rightarrow \lambda_i^{opt} &= \frac{\theta_1^i \theta_0^i}{\theta_0^i - \theta_1^i} \ln \left( \frac{1 - P(H_0)}{P(H_0)} \left( \frac{\theta_0^i}{\theta_1^i} \right)^{k_0^i} \right) \end{aligned}$$

در بخش شبیه سازی و نتایج عددی، نشان داده خواهد شد که سطح آستانه بهینه منجر به کاهش خطای کل و همچنین افزایش احتمال آشکارسازی صحیح می شود.

#### ۴. محاسبه گذردهی

در یک شبکه رادیو شناختی، گذردهی ارسال عامل بسیار مهمی محسوب می شود. گذردهی ارسال، به دقت سنجش طیف و زمان ارسال بستگی دارد. اگر سنجش طیف غیردقیق انجام شود، با از دست رفتن فرصت های طیفی موجود و نیز تداخل با کاربران اولیه، گذردهی کاهش می یابد. در شکل (۱) ساختار هر فریم برای سنجش و ارسال کاربر ثانویه نشان داده شده است. اگر با صرف زمان زیاد، دقت سنجش طیف افزایش داده شود، با مشکل کمبود زمان برای ارسال مواجه خواهیم شد که این مسأله خود باعث کاهش گذردهی ارسال می شود. بنابراین نیاز است که علاوه بر افزایش زمان ارسال،

$$\begin{aligned} k_1^i &= \frac{E^2[Y_i | H_1]}{\text{Var}[Y_i | H_1]} = \frac{M \times \Gamma^2(\frac{p+1}{2})}{\Gamma(\frac{2p+1}{2}) \sqrt{\pi} - \Gamma^2(\frac{p+1}{2})} \\ \theta_1^i &= \frac{\text{Var}[Y_i | H_1]}{E[Y_i | H_1]} = \frac{\frac{p}{2^2} (\sqrt{1+\gamma_i})^2}{M} \times \\ &\quad \frac{\sqrt{\pi} \Gamma(\frac{2p+1}{2}) - \Gamma^2(\frac{p+1}{2})}{\Gamma(\frac{p+1}{2}) \sqrt{\pi}} \end{aligned} \quad (13)$$

با استفاده از پارامترهای به دست آمده، می توان رابطه سطح آستانه آشکارساز انرژی بهبود یافته را به صورت زیر محاسبه کرد:

$$\lambda_i = \theta_0^i \gamma^{-1}(k_0^i, 1 - P_f^i) \quad (14)$$

در این حالت، رابطه منحنی مشخصه عملیاتی گیرنده برای آشکارساز جدید به صورت زیر به دست می آید:

$$\begin{aligned} P_d^i &= 1 - \gamma(k_1^i, \frac{\lambda_i}{\theta_1^i}) \\ &= 1 - \gamma(k_1^i, \frac{\theta_0^i \gamma^{-1}(k_0^i, 1 - P_f^i)}{\theta_1^i}) \end{aligned} \quad (15)$$

با توجه به رابطه (۱۵) مشاهده می شود که مقدار  $p$  به  $P_d^i$  و  $P_f^i$  و  $\gamma_i$  و  $M$  وابسته است. یک روش برای پیدا کردن مقدار بهینه  $p$  این است که با استفاده از رابطه (۱۵) به ازای  $\gamma_i$  و  $P_f^i$  و  $M$  ثابت، مقداری از  $p$  که  $P_d^i$  را بیشینه می سازد، به عنوان مقدار بهینه انتخاب شود. روش دیگر برای پیدا کردن مقدار بهینه  $p$  استفاده از رابطه (۱۵) به ازای  $P_d^i$ ،  $\gamma_i$  و  $M$  ثابت است. در این حالت مقداری از  $p$  که  $P_f^i$  را حداقل می سازد، به عنوان مقدار بهینه  $p$  انتخاب می شود. همچنین مقدار بهینه  $p$  را می توان با حداقل کردن تعداد نمونه برای سنجش به ازای مقادیر ثابت  $P_d^i$ ،  $P_f^i$  و  $\gamma_i$  به کمک رابطه (۱۵) به دست آورد. روش دیگر برای پیدا کردن  $p$  بهینه، حداقل کردن احتمال خطا است.

#### ۳. تعیین سطح آستانه بهینه برای آشکارساز انرژی بهبود یافته

با توجه به اینکه هدف شبکه های رادیو شناختی، استفاده از طیف به صورت فرصت طلبانه و بدون ایجاد تداخل با کاربران اولیه است، در این بخش، تابع جدیدی با نام تابع خطای کل برای هر کاربر ثانویه تعریف می شود:

$$P_e^i = P(H_0)P_f^i + P(H_1)(1 - P_d^i) \quad (16)$$

در این رابطه،  $P(H_0)$  و  $P(H_1)$  به ترتیب احتمال خالی و پر بودن باند طیفی مورد نظر را نشان می دهد. به دلیل عدم استفاده بهینه از طیف، توسط کاربران اولیه، در بیشتر باندهای فرکانسی  $P(H_0) > P(H_1)$  است. سطح آستانه بهینه به منظور حداقل کردن

$$P_D^{OR} = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_d^i) \quad (23)$$

و اگر  $k = N$  باشد، قانون  $k$  از  $N$  به قانون  $AND$  تبدیل خواهد شد و برای احتمال هشدار غلط و احتمال آشکارسازی داریم:

$$P_F^{AND} = \prod_{i=1}^N P_f^i \quad (24)$$

$$P_D^{AND} = \prod_{i=1}^N P_d^i \quad (25)$$

### ۶. شبیه‌سازی و نتایج عددی

در این بخش، عملکرد آشکارساز انرژی راجع با آشکارساز انرژی بهبودیافته مقایسه می‌شود. به منظور شبیه‌سازی از نرم‌افزار Matlab استفاده شده است.

برای نشان دادن دقت تقریب گاما، در شکل (۳ و ۴)، از تابع توزیع تجمعی  $Y_i$ ،  $(F_{Y_i|H}(x, k, \theta))$  تحت دو فرض  $H_0$  و  $H_1$  استفاده شده است. برای رسم تابع توزیع تجمعی از تابع  $ecdf$  نرم‌افزار Matlab استفاده شده است. مشاهده می‌شود که تقریب گاما برای آشکارساز انرژی بهبودیافته تحت دو فرض  $H_0$  و  $H_1$  تقریب مناسبی است. دقت تقریب با کاهش  $p$ ، افزایش  $M$  و یا کاهش  $\gamma_i$  افزایش می‌یابد. مقدار  $\gamma_i$  تأثیر زیادی در خطای تقریب دارد. از آنجا که سیستم‌های  $UWB$  اغلب به دلیل مصرف انرژی کم در نسبت سیگنال به نویز پایین کار می‌کنند، معمولاً سیگنال دریافت شده از فرستنده آنها در گیرنده‌های ثانویه ضعیف می‌باشند، بنابراین دقت تقریب گاما برای حالت‌های عملی قابل قبول است. علاوه بر این می‌توان با افزایش تعداد نمونه‌های دریافتی از سیگنال کاربر اولیه، دقت تقریب را بالا برد.

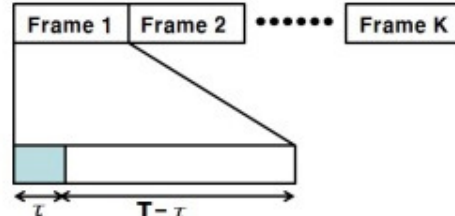
در این بخش فرض می‌شود که در یک محدوده جغرافیایی ناهمگن، ۵ کاربر ثانویه با نسبت سیگنال به نویز متفاوت در سنجش طیف مشارکت دارند. به منظور بررسی عملکرد آشکارسازها از رابطه (۱۵) استفاده می‌شود. هر کاربر ثانویه از ۱۰ نمونه سیگنال دریافتی برای تصمیم‌گیری استفاده می‌کند.

در شکل (۴)، مقدار  $p$  بهینه برای هر کاربر ثانویه با نسبت سیگنال به نویز مشخص، به ازای احتمال هشدار غلط رسم شده است. با توجه به رابطه (۱۵)، در یک احتمال هشدار غلط معین، مقداری از  $p$  که احتمال آشکارسازی را بیشینه کند، به عنوان  $p$  بهینه انتخاب می‌شود. مشاهده می‌شود که  $p$  بهینه برای هر کاربر متفاوت است. به هر اندازه که کاربر ثانویه موقعیت بهتری نسبت به فرستنده شبکه اولیه داشته باشد (سیگنال ارسالی را با نسبت سیگنال به نویز بالاتری دریافت کند)،  $p$  بهینه آن کاربر کوچک‌تر خواهد بود.

تداخل با کاربران اولیه نیز تا حد امکان کاهش داده شود. در یک شبکه ثانویه، گذردهی ارسال به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۱]:

$$R = \left( \frac{T - \tau}{T} \right) \cdot r \cdot (1 - P_F) \cdot P(H_0) \quad (18)$$

در رابطه بالا  $T$  دوره فریم،  $\tau$  زمان سنجش طیف و  $r$  گذردهی قابل حصول در باند مورد نظر است.



شکل ۱. زمان بندی ارسال و سنجش [۱۱]

### ۵. سنجش طیف مشارکتی مبتنی بر آشکارساز بهبودیافته

به منظور صرفه‌جویی در مصرف پهنای باند مورد نیاز برای ارسال نتایج تصمیم‌گیری کاربران ثانویه به مرکز ترکیب و همچنین انجام سریع‌تر روند تصمیم‌گیری نهایی، روش مشارکتی در نظر گرفته می‌شود که در آن، هر کاربر ثانویه تصمیم‌گیری خود را درباره وضعیت طیف به صورت دودویی از طریق کانال گزارش ایده‌آل به مرکز ترکیب ارسال می‌کند. با فرض اینکه هیچ گره مخربی در شبکه وجود نداشته باشد، قانون  $k$  از  $N$ ، معیار مناسبی برای تصمیم‌گیری خواهد بود. با توجه به این معیار، احتمال هشدار غلط و احتمال آشکارسازی در مرکز ترکیب به صورت زیر تعریف می‌شوند [۱۵]:

$$P_F = \sum_{j=k}^N \sum_{u_i=j}^N \prod_{i=1}^N (P_f^i)^{u_i} (1 - P_f^i)^{1-u_i} \quad (19)$$

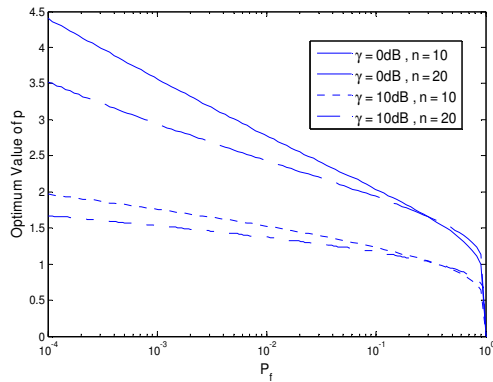
$$P_D = \sum_{j=k}^N \sum_{u_i=j}^N \prod_{i=1}^N (P_d^i)^{u_i} (1 - P_d^i)^{1-u_i} \quad (20)$$

در روابط بالا،  $u_i$  نتیجه تصمیم‌گیری کاربر  $i$  ام است:

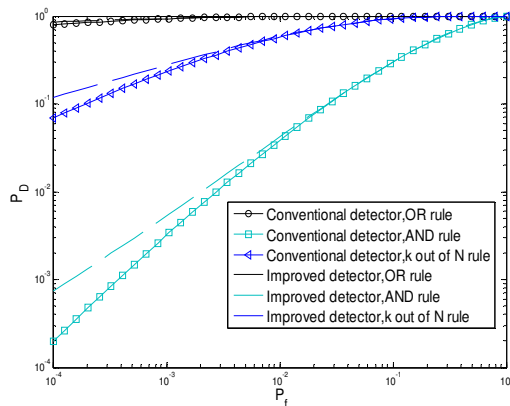
$$u_i = \begin{cases} 0 & H_0 \\ 1 & H_1 \end{cases} \quad (21)$$

در حالت خاص اگر  $k = 1$  باشد، قانون  $k$  از  $N$  به قانون  $OR$  تبدیل می‌شود و احتمال هشدار غلط و احتمال آشکارسازی در مرکز ترکیب برای این حالت به صورت زیر محاسبه خواهد شد:

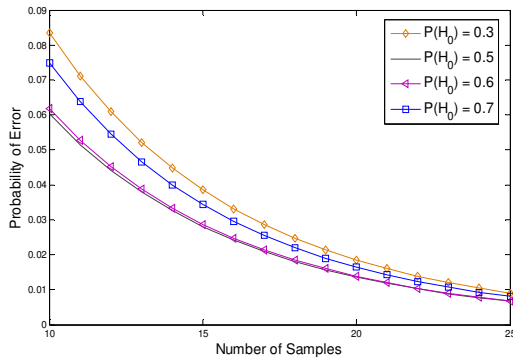
$$P_F^{OR} = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_f^i) \quad (22)$$



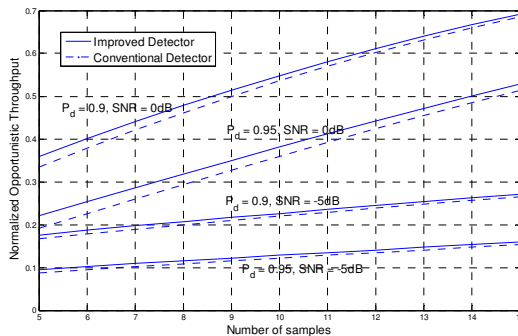
شکل ۴. مقدار بهینه  $p$  هر کاربر به ازای احتمال هشدار غلط



شکل ۵. منحنی ROC به ازای قانون‌های تصمیم‌گیری AND, OR, k out of N



شکل ۶. احتمال خطای کل با انتخاب سطح آستانه بهینه

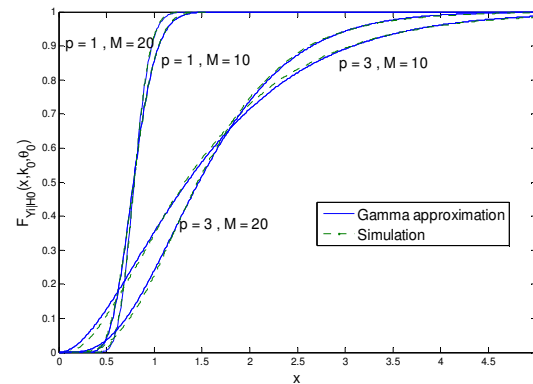


شکل ۷. گذردهی قابل حصول نرمالیزه شده بر حسب تعداد نمونه

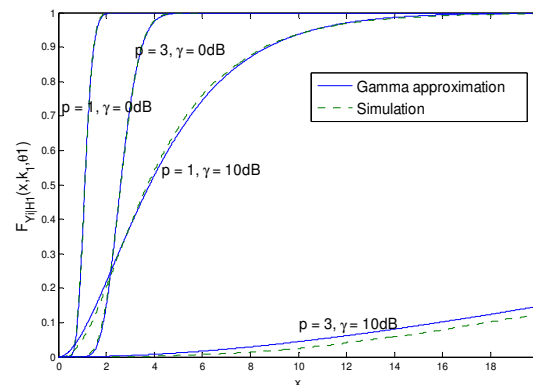
در شکل (۵) منحنی مشخصه عملیاتی گیرنده به‌ازای قانون‌های تصمیم‌گیری متفاوت برای دو آشکارساز مقایسه شده است. به‌منظور مقابله با محوشدگی چند مسیره و سایه در محیط بی‌سیم، از مشارکت کاربران ثانویه استفاده شده است. همان‌طور که در شکل (۵) نیز مشاهده می‌شود در تمام حالت‌های مورد بررسی، آشکارساز انرژی بهبودیافته عملکرد بهتری نسبت به آشکارساز انرژی رایج دارد.

همان‌طور که در بخش ۴ نیز ذکر شد، تعیین سطح آستانه بهینه که میزان تداخل با کاربران اولیه را حداقل و استفاده از فرصت‌های طیفی را افزایش می‌دهد، در شبکه‌های رادیو شناختگر حائز اهمیت است. در این بخش، از رابطه به‌دست آمده در بخش ۳ برای سطح آستانه استفاده می‌شود. شکل (۶) نشان می‌دهد که با انتخاب سطح آستانه بهینه، می‌توان احتمال خطای کل را به میزان قابل توجهی بهبود بخشید.

در بخش آخر، شبیه‌سازی‌های مربوط به این مقاله و میزان بهبود گذردهی ارسال، مورد بررسی قرار می‌گیرد. انتخاب آشکارساز مناسب منجر به افزایش میزان گذردهی فرصت‌طلبانه شبکه رادیو شناختگر خواهد شد. برای بررسی عملکرد آشکارسازها، گذردهی را نرمالیزه کرده و نتایج گذردهی حاصل از آشکارساز انرژی رایج و بهبود یافته با هم مقایسه می‌شوند. همچنین فرض می‌شود که مدت زمان هر فریم ۰/۵ ثانیه و فرکانس نمونه‌برداری ۶ MHz است (شکل ۸ و ۷).



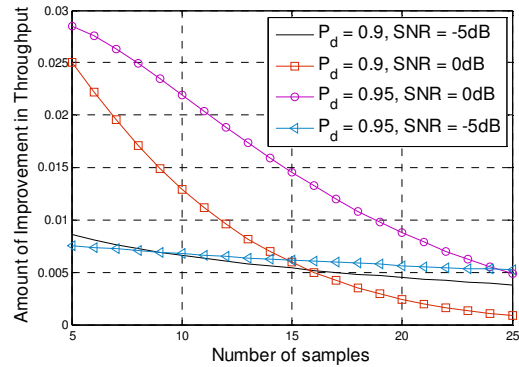
شکل ۲. مقایسه تابع توزیع تجمعی با تقریب گاما تحت فرض  $H_0$



شکل ۳. مقایسه تابع توزیع تجمعی با تقریب گاما تحت فرض  $H_1$

## ۸. مراجع

- [1] Mitola, J.; Maguire, G. Q. "Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal"; Personal Communications, IEEE, 1999, 6, 13-18.
- [2] Beibei, W.; Liu, K. J. R. "Advances in Cognitive Radio Networks: A Survey"; Selected Topics in Signal Proc., IEEE J. 2011, 5, 5-23.
- [3] Digham, F. F.; Alouini, M. S.; Simon, M. K. "on the Energy Detection of Unknown Signals over Fading Channels"; Communications, ICC '03. IEEE Int. Conf. 2003, 5, 3575- 3579.
- [4] Kay, S. M. "Fundamentals of Statistical Signal Processing: Detection Theory Upper Saddle River"; NJ: Prentice-Hall, 1998.
- [5] Zhi, Q.; Shuguang, C.; Poor, H.; Sayed, A. "Collaborative Wideband Sensing for Cognitive Radios"; Signal Proc. Magazine, IEEE 2008, 25, 60-73.
- [6] Cabric, D.; Mishra, S. M.; Brodersen, R. W. "Implementation Issues in Spectrum Sensing for Cognitive Radios"; Signals, Sys. and Computers, Conf. Record of the Thirty-Eighth Asilomar, 2004, 1, 772- 776.
- [7] Fehske, A.; Gaedert, J.; Reed, J. H. "A New Approach to Signal Classification Using Spectral Correlation and Neural Networks"; New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks. Dyspan 2005. First IEEE Int. Symposium 2005, 144-150.
- [8] Yunfei, C. "Improved Energy Detector for Random Signals in Gaussian Noise"; Wireless Communications, IEEE Trans. 2010, 9, 558-563.
- [9] Niu, R.; Varshney, P.; Moore, M. H.; Klamer, D. "Decision Fusion in a Wireless Sensor Network with a Large Number of Sensors"; Int. Conf. Inf. Fusion. 2004, 4, 861-864.
- [10] Ghasemi, A.; Sousa, E. S. "Optimization of Spectrum Sensing for Opportunistic Spectrum Access in Cognitive Radio Networks"; Consumer Communications and Networking Conf. 4th IEEE. 2007, 1022-1026
- [11] Chongjoon, Y.; Hongkyu, K.; Jun, H. "Cooperative TV Spectrum Sensing in Cognitive Radio for Wi-Fi Networks"; Consumer Elect., IEEE Trans. 2011, 57, 62-67.
- [12] Kostylev, V. I. "Energy Detection of a Signal with Random Amplitude"; Communications, 2002. ICC , IEEE Int. Conf. 2002, 3, 1606-1610.
- [13] Digham, F. F.; Alouini, M. S.; Simon, M. K. "On the Energy Detection of Unknown Signals over Fading Channels"; Communications, 2003. ICC '03. IEEE Int. Conf. 2003, 5, 3575-3579.
- [14] Arsalan, H. "Software Defined Radio and Adaptive Wireless Systems"; Springer, 2007.
- [15] Zheng, Y.; Xianzhong, Xie; Yang, L. "Cooperative Spectrum Sensing Based on SNR Comparison in Fusion Center for Cognitive Radio"; Advanced Computer Control, 2009. ICACC '09. Int. Conf. 2009, 212-216.



شکل ۸. میزان بهبود گذردهی قابل حصول نرمالیزه شده بر حسب تعداد نمونه

## ۷. نتیجه گیری

در شبکه‌های رادیو شناختی، سنجش طیف به‌منظور جلوگیری از تداخل و ارائه سرویس بهتر به کاربران ثانویه، اهمیت ویژه‌ای دارد. سنجش طیف باید در زمان اندک، دقت بالا و با قابلیت پیاده‌سازی عملی با پیچیدگی تا حد امکان پایین، صورت گیرد. بنابراین باید روشی برای آشکارسازی انتخاب شود که علاوه بر سادگی، از عملکرد خوبی برخوردار باشد.

آشکارساز انرژی یکی از روش‌هایی است که پیاده‌سازی ساده‌ای دارد ولی کارایی این آشکارساز در برخی موارد مطلوب نمی‌باشد. برای بهبود کارایی این روش، آشکارساز انرژی بهبودیافته با یک اصلاح بر روی آشکارساز رایج پیشنهاد شده است. مشکلاتی مانند محو شدگی چند مسیر، اثر سایه و وجود نویز در شبکه‌های رادیو شناختگر می‌توانند عملکرد این آشکارساز را تحت تأثیر قرار دهند. برای رفع این مشکلات، از طرح مشارکتی برای سنجش طیف استفاده می‌شود. همچنین تعیین سطح آستانه مناسبی که از تداخل کاربران اولیه و ثانویه جلوگیری کرده و مانع از دست رفتن فرصت‌های طیفی شود نیز حائز اهمیت است. بنابراین، برای حداقل کردن خطای کل هر کاربر، سطح آستانه بهینه هر کاربر با توجه به شرایط آن کاربر تعیین می‌شود.