

Vol. 13/ No. 51/Spring 2024

Research Article

# Bi-Threshold Cooperative Spectrum Sensing with the Ability of Simultaneous Improving Throughput and Reducing Energy Consumption in Cognitive Radio Network

Masoud Moradkhani, Assistant Professor <sup>1\*</sup>  | Farzad Soltanian, Instructor <sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Department of Electrical Engineering, Ilam Branch, Islamic Azad University, Ilam, Iran, [ma.moradkhani@iau.ac.ir](mailto:ma.moradkhani@iau.ac.ir)

<sup>2</sup>Department of Electrical Engineering, Ilam Branch, Islamic Azad University, Ilam, Iran, [farzad.64soltanian@gmail.com](mailto:farzad.64soltanian@gmail.com)

**Correspondence**

Masoud Moradkhani, Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Ilam Branch, Islamic Azad University, Ilam, Iran, [ma.moradkhani@iau.ac.ir](mailto:ma.moradkhani@iau.ac.ir)

**Received:** 24 June 2023

**Revised:** 14 August 2023

**Accepted:** 19 August 2023

## Abstract

By performing cooperative spectrum sensing in a cognitive radio network, although the network throughput increases with the increase in the number of secondary users, but at the same time, it also causes an increase in energy consumption. This makes it necessary to provide a system that is able to create a tradeoff between throughput and energy consumption. In contrast to the conventional method of spectrum sensing based on one detection threshold, spectrum sensing with double thresholds avoids reporting unreliable data to the fusion center, thus potentially leading to greater energy saving. In this paper, a double threshold spectrum sensing cognitive radio network with a non-ideal reporting channel is optimized. The values of the threshold and the sensing time are jointly optimized to maximize the throughput of the network, provided that the network energy consumption and the amount of interference with the primary users are limited. The optimization problem is formulated and a numerical method is presented to solve it. The simulation results show a flexible system that can simultaneously provide higher throughput and lower energy consumption than the conventional sensing method. These results, while confirming the higher tolerance against the error of the reporting channel, show a significant energy saving of up to 70% by guaranteeing the throughput efficiency greater than 1.

**Keywords:** Cognitive Radio, Cooperative Spectrum Sensing, Energy Consumption, Energy Detection, Throughput.

## Highlights

- Optimization of cooperative spectrum sensing in cognitive radio network with limited energy and non-ideal reporting channel.
- Converting the multi-parameter optimization problem to a single-parameter problem using an analytical method.
- Transforming the nonlinear constraint of the problem into a simple linear search using a numerical method.
- Improving network performance in terms of throughput and energy consumption.

**Citation:** M. Moradkhani, F. Soltanian, "Bi-Threshold Cooperative Spectrum Sensing with the Ability of Simultaneous Improving Throughput and Reducing Energy Consumption in Cognitive Radio Network," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 13, no. 51, pp. 22–36, 2024, doi: 10.30495/jce.2023.1989614.1211, (in Persian).

## مقاله پژوهشی

## حسگری همکارانه طیف مبتنی بر آشکارسازی دو آستانه‌ای با قابلیت بهبود همزمان گذردهی و کاهش انرژی مصرفی در شبکه رادیو شناختگر

مسعود مرادخانی\*<sup>۱</sup> | فرزاد سلطانیان<sup>۲</sup>

## چکیده:

با انجام حسگری طیف همکارانه در یک شبکه رادیو شناختگر اگر چه با افزایش تعداد کاربران ثانویه گذردهی شبکه افزایش می‌یابد، اما در عین حال باعث افزایش مصرف انرژی نیز می‌گردد. این موضوع لزوم ارائه سیستمی که قادر به ایجاد موازنه بین گذردهی و انرژی مصرفی باشد را ضروری می‌سازد. برخلاف روش متعارف حسگری طیف مبتنی بر یک مقدار آستانه آشکارسازی، حسگری طیف با دو مقدار آستانه از گزارش داده‌های غیرقابل اعتماد به مرکز همجوشی جلوگیری می‌کند، بنابراین می‌تواند به طور بالقوه منجر به صرفه‌جویی بیشتر در انرژی مصرفی شود. در این مقاله یک شبکه رادیو شناختگر با حسگری طیف دو آستانه‌ای و با فرض کانال گزارش غیر ایده‌آل بهینه‌سازی می‌گردد. مقادیر بهینه آستانه و زمان حسگری به صورت توأم محاسبه می‌گردند تا گذردهی شبکه را حداکثر کرده مشروط بر اینکه انرژی مصرفی و میزان تداخل با کاربران اولیه محدود گردد. مساله بهینه‌سازی فرمول بندی شده و روشی عددی برای حل آن ارائه می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده یک سیستم انعطاف پذیر است که می‌تواند همزمان گذردهی بالاتر و انرژی مصرفی کمتری را نسبت به روش متعارف حسگری فراهم کند. این نتایج ضمن تایید تاب‌آوری بالاتر در برابر خطای کانال گزارش، صرفه‌جویی انرژی قابل توجهی تا سقف ۷۰٪ را با تضمین کارایی گذردهی بیشتر از ۱ نشان می‌دهد.

کلید واژه‌ها: آشکارسازی انرژی، انرژی مصرفی، حسگری طیف همکارانه، رادیو شناختگر، گذردهی

<sup>۱</sup>استادیار گروه برق، واحد ایلام، دانشگاه آزاد اسلامی، ایلام، ایران، ma.moradkhani@iau.ac.ir

<sup>۲</sup>مربی گروه برق، واحد ایلام، دانشگاه آزاد اسلامی، ایلام، ایران، farzad.64soltanian@gmail.com

نویسنده مسئول

\*مسعود مرادخانی، استادیار گروه برق، واحد ایلام، دانشگاه آزاد اسلامی، ایلام، ایران، ma.moradkhani@iau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۳ تیر ۱۴۰۲

تاریخ بازنگری: ۲۳ مرداد ۱۴۰۲

تاریخ پذیرش: ۲۸ مرداد ۱۴۰۲

<https://doi.org/10.30495/jce.2023.1989614.1211>

## ۱-مقدمه

رادیو شناختگر یک فناوری ارتباطی بی‌سیم است که به طور منظم محیط رادیویی اطراف خود را پایش کرده و به شکل هوشمند کانال‌های فرکانسی مشغول و بیکار را شناسایی می‌کند. سپس از کانال‌های بیکار به صورت فرصت طلبانه برای مبادله داده استفاده کرده و از کانال‌های مشغول به منظور جلوگیری از تداخل با کاربران دارای مجوز که اصطلاحاً کاربران اولیه نامیده می‌شوند، پرهیز می‌کند. در نتیجه به عنوان کاربر ثانویه کارایی طیفی را بهبود می‌بخشد در حالی که از تداخل با کاربران اولیه جلوگیری می‌کند [۱]. این فن‌آوری قابلیت‌هایی را برای صنایع مخابراتی و فن‌آوری اطلاعات فراهم می‌کند تا نیازهای روز افزون برای خدمات ارتباطی با کیفیت و پر سرعت را برآورده کند.

کارکردهای اساسی هر رادیو شناختگر شامل حسگری طیف، مدیریت پویای طیف و مخابراتی است [۲]. حسگری طیف که هدف آن تشخیص طیف فرکانس استفاده نشده در یک زمان یا مکان خاص است، به عنوان مهمترین عملکرد رادیو شناختگر

ذکر شده است [۳]. آشکارسازی انرژی به دلیل عدم نیاز آن به دانش قبلی از سیگنال اولیه، سادگی و هزینه محاسباتی کم آن یکی از روش های متداول حسگری طیف است. اگر هر رادیو شناختگر به تنهایی کار آشکارسازی کاربر اولیه را انجام دهد، عملکرد آن به دلیل مشکلات ناشی از محو شدگی و سایه زنی کاهش می یابد. حسگری طیف همکارانه برای حل چنین مشکلاتی پیشنهاد شده است. این روش از اطلاعات همه رادیوها یا برخی از آنها در فرآیند آشکارسازی نهایی استفاده می کند [۴].

در حسگری همکارانه یک ایستگاه پایه به نام مرکز همجوشی<sup>۱</sup>، اطلاعات محلی ناشی از رادیوها را جمع آوری و پردازش می کند. این همکاری به دو صورت کلی انجام می گردد: ادغام داده ها یا ادغام تصمیمات. در ادغام داده ها یک نسخه وزنی از انرژی جمع آوری شده توسط هر کاربر ثانویه بدون پردازش از طریق کانال گزارش به مرکز همجوشی ارسال می شود و سپس با استفاده از برخی الگوریتم ها تصمیم نهایی استخراج می شود. در ادغام تصمیمات، کاربران ثانویه حسگری محلی را به طور مستقل انجام داده و هر کدام یک تصمیم دودویی (۱ یا ۰) مبنی بر فعالیت یا عدم فعالیت کاربر اولیه می گیرند. این تصمیمات محلی به مرکز همجوشی گزارش می شود که در آن بر اساس یک قانون از پیش تعریف شده، ترکیب شده و سپس تصمیم نهایی اتخاذ می گردد. یکی از قوانین بسیار مورد استفاده قانون OR است که بر اساس آن اگر حداقل یک کاربر ثانویه به فعالیت کاربر اولیه رای دهد، مرکز همجوشی نیز فعالیت کاربر اولیه را اعلام کرده و کاربران ثانویه را از اشغال کانال و مبادله داده منع می کند. این قانون ایمنی بالاتری را برای کاربران اولیه در برابر اثرات مخرب ناشی از تداخل شبکه رادیو شناختگر فراهم می کند.

متأسفانه با افزایش تعداد کاربران ثانویه شرکت کننده در فرآیند حسگری طیف، میزان مصرف انرژی نیز افزایش می یابد. این مساله به ویژه برای سیستم های با منبع تغذیه باتری مانند دستگاه های تلفن همراه و شبکه های حسگری بی سیم قابل پذیرش نیست [۵]. بنابراین یافتن روش هایی برای صرفه جویی تا حد امکان در مصرف انرژی بسیار حائز اهمیت است. در حسگری طیف غیر همکارانه هر کاربر ثانویه در هر زمان در یکی از دو فاز حسگری و انتقال عمل می کند. در فاز حسگری محیط فرکانسی خود را پایش کرده و به محض تشخیص باند بیکار به فاز انتقال رفته و مبادله داده را شروع می کند. اما در حسگری همکارانه یک مرحله اضافی بین موارد فوق وجود دارد که به آن فاز گزارش می گویند. در این فاز پس از مرحله حسگری کاربران ثانویه نتایج حسگری محلی خود را به مرکز همجوشی گزارش می کنند و منتظر دستور آن می مانند تا بدانند که آیا شروع به ایجاد ارتباط کنند یا خیر. انرژی مصرفی کل یک شبکه رادیو شناختگر همکارانه برابر با مجموع مصرف انرژی در سه فاز پیش گفته است.

حسگری طیف متعارف با یک آستانه آشکارسازی، هیچ کنترلی بر مصرف انرژی اعمال نمی کند. در این مقاله سیستمی با دو مقدار آستانه را در نظر می گیریم که در آن تنها تصمیمات محلی قابل اعتماد به مرکز همجوشی ارسال می شوند [۶]. در این روش با کاهش مصرف انرژی در فاز گزارش، انرژی مصرفی کل کاهش می یابد. در بیشتر کارهای انجام شده تا کنون کانال گزارش، ایده آل یا بدون خطا فرض شده است. بدیهی است که چنین فرضی در کاربردهای واقعی درست نیست. احتمال خطای بیت کانال گزارش حتی با وجود دقیق بودن نتایج حسگری محلی و تنظیم بودن زمان حسگری در مقدار بهینه خود، می تواند باعث کاهش شدید عملکرد حسگری همکارانه شود [۷]. به همین دلیل مدل پیشنهادی ما مبتنی بر فرض کانال گزارش غیر ایده آل است.

تاریخ توسعه روش های کارا از نظر انرژی برای شبکه های حسگری بی سیم به قدمت این فن آوری است، اما برای شبکه های رادیو شناختگر تنها به چند سال قبل باز می گردد. در [۸] روشی برای مکان یابی کاربران اولیه و ثانویه ارائه شده است تا بتوان با تعیین دقیق محدوده انتقال رادیوها و در نتیجه تنظیم موثر توان آرسالی آن ها انرژی مصرفی کل شبکه را کاهش داد. در [۹] به وسیله تنظیم فرکانس حسگری با قرار دادن زمان های خواب بین دوره های متوالی حسگری، انرژی مصرفی شبکه کاهش یافته است.

اختصاص منابع شبکه به صورت موثر میان کاربران ثانویه با هدف تامین کیفیت خدمات و صرفه جویی در منابع موضوع برخی کارهای مرتبط است [۱۰-۱۲]. افزایش کارایی طیفی هدف اصلی شبکه های رادیو شناختگر است. بنابراین افزایش گذردهی از اهمیت بسیاری در چنین شبکه هایی برخوردار است. در [۱۳] ایجاد موازنه ای بین گذردهی و دقت آشکارسازی در شرایط رفت و آمد کاربران ثانویه بررسی شده است. در [۱۴] به منظور بهبود گذردهی روشی برای اختصاص زمان مناسب به فعالیت های

<sup>1</sup> Fusion Center

مختلف رادیو شناختگر پیشنهاد شده است. برخی تحقیقات نیز در زمینه حداکثر کردن گذردهی در شبکه های دارای قابلیت جمع آوری بی سیم انرژی انجام گرفته است [۱۵-۱۷].

در سال های اخیر آشکارسازی انرژی مبتنی بر دو مقدار آستانه برای حسگری طیف در شبکه های رادیو شناختگر مورد توجه قرار گرفته است. بیشتر کارهای انجام شده بر بهبود عملکرد آشکارسازی متمرکز بوده اند [۱۸-۲۴]. برخی نیز گذردهی و انرژی مصرفی شبکه را مورد توجه قرار داده اند [۲۵-۲۷]. در [۱۸] به منظور مقابله با کمبود طیف و همچنین رفع مشکل تغییرات زیاد محیطی در شبکه های ارتباط خودروبی، از فن آوری رادیو شناختگر با قابلیت تنظیم خودکار مقادیر آستانه آشکارسازی استفاده شده است به گونه ای که احتمالات هشدار غلط و آشکارسازی در مقادیر مطلوب ثابت نگه داشته شوند. در [۱۹] حسگری همکارانه طیف با در نظر گرفتن تاریخچه حسگری ارائه شده است. در این روش در صورت قابل اعتماد نبودن آماره آزمون، نمونه های بیشتری از گذشته سیگنال دریافتی در محاسبه آماره آزمون دخالت داده می شوند. نتایج حاصل بهبود کارایی را از نظر دقت طیف سنجی نشان می دهد. در [۲۰] مقادیر آستانه های آشکارسازی با هدف حداقل کردن خطای تصمیم نهایی حسگری همکارانه مبتنی بر قانون همجوشی اکثریت بهینه سازی شده اند. در [۲۱] به منظور افزایش دقت حسگری و برای کانال های گوسی با محوشدگی رایلی به تصمیمات هر یک از رادیوهای شبکه متناسب با وضعیت کانال آن ها وزن مناسب اختصاص می یابد. تصمیم نهایی در مرکز همجوشی با ترکیب این تصمیمات وزن دار گرفته می شود. در [۲۲] یک قانون تصمیم نرم<sup>۱</sup> مبتنی بر ترکیب انرژی های دریافت شده توسط کاربران ثانویه ارائه شده است و کارایی آن از نظر گذردهی و دقت حسگری مورد ارزیابی قرار گرفته است. در [۲۳، ۲۴] از ترکیب همجوشی های سخت و نرم استفاده شده است که در آن در صورت قرار گرفتن آماره آزمون بین دو مقدار آستانه، به جای ارسال نتیجه حسگری به صورت دودویی مقدار آماره آزمون توسط کاربر ثانویه به مرکز همجوشی ارسال می شود.

در مقالات ذکر شده فوق، هدف اصلی افزایش دقت حسگری همکارانه طیف یا به عبارت دیگر بهبود منحنی مشخصه عملیاتی گیرنده ROC<sup>۲</sup> است و برخلاف مقاله حاضر شامل ارزیابی شبکه از نظر میزان گذردهی قابل دسترس و انرژی مصرفی نیست. در [۲۵] به منظور صرفه جویی در مصرف انرژی از ترکیب آشکارسازی دو آستانه ای و خوشه بندی استفاده شده است. بسته به موقعیت مکانی رادیوها، شبکه به خوشه هایی تقسیم بندی می شود که در هر خوشه تنها سرخوشه مجاز به ارتباط با مرکز همجوشی است. همچنین نتایج آشکارسازی که بین دو مقدار آستانه هستند، نادیده گرفته شده و به مرکز همجوشی ارسال نمی گردند. در این مقاله تنها کمینه کردن انرژی تحت قیود کارایی حسگری به عنوان مساله بهینه سازی مطرح شده است و پارامتر گذردهی در بهینه سازی دخالت داده نشده است.

در [۲۶] بررسی محدب بودن مساله افزایش گذردهی شبکه با انرژی مصرفی محدود مورد تاکید قرار گرفته است. در این تحقیق نشان داده شده است که برای محدوده خاصی از مقادیر احتمالات هشدار غلط و آشکارسازی و همچنین اعمال محدودیت بر تعداد کاربران ثانویه، تابع و قیود مساله محدب هستند. در مقاله حاضر بر خلاف [۲۶] ما یک راه حل عددی برای حل مساله بهینه سازی ارائه می دهیم که توسط آن قیود انرژی مصرفی و میزان تداخل با کاربران اولیه به یک جستجوی خطی ساده بین دو مقدار حدی زمان حسگری تبدیل می شود. علاوه بر این هیچگونه محدودیتی بر احتمالات هشدار غلط و آشکارسازی و تعداد کاربران ثانویه اعمال نمی شود.

در [۲۷] مدلی ارائه شده است که بر مبنای آن در صورت قرار گرفتن آماره آزمون بین دو مقدار آستانه، مرحله حسگری طیف دوباره انجام می شود و این مرحله تا زمانی که نتیجه حسگری یکی از دو وضعیت فعالیت یا عدم فعالیت کاربر اولیه باشد، تکرار می گردد. نتایج شبیه سازی بهبود گذردهی را نشان می دهد. بدیهی است که انرژی مورد نیاز برای انجام مراحل اضافی حسگری باعث افزایش انرژی مصرفی کل شبکه می شود، اما در مقاله مذکور محدودیت انرژی مصرفی به عنوان قید مساله در نظر گرفته نشده است.

1 Soft Decision Rule

2 Receiver Operating Characteristics

در مقالات اشاره شده فوق، کانال گزارش به صورت ایده‌آل و بدون خطا در نظر گرفته شده است. چنین فرضی به دلیل پدیده محوشدگی واقعی نیست. از طرف دیگر در رادیو شناختگر به دلیل محدودیت پهنای باند کانال گزارش، استفاده از روش‌های کدگذاری تشخیص و تصحیح خطا پیشنهاد نمی‌شود. در مقاله حاضر مدل پیشنهادی مبتنی بر کانال گزارش غیرایده‌آل است. موضوع اصلی این تحقیق ارائه روش حسگری همکارانه طیف است که به صورت توأم همه موارد گذردهی شبکه، انرژی مصرفی و کارایی حسگری را در بر می‌گیرد. تازه‌های روش پیشنهادی که به صورت یک مساله بهینه سازی مدل شده است، شامل موارد زیر است:

- ۱- در نظر گرفتن کانال گزارش به صورت واقعی و دارای خطا.
  - ۲- ارائه راه حل تحلیلی و تبدیل مساله با سه پارامتر بهینه سازی (مقادیر آستانه و زمان حسگری) به مساله ای با یک پارامتر بهینه سازی (زمان حسگری).
  - ۳- ارائه راه حل عددی و تبدیل قید غیرخطی مساله به یک جستجوی خطی ساده بر روی زمان حسگری.
  - ۴- معرفی پارامترهای جدید صرفه جویی و نسبت انرژی و ارزیابی تاثیر آن‌ها در عملکرد شبکه.
- ادامه مقاله به صورت زیر تنظیم شده است. بخش ۲ حسگری طیف را معرفی می‌کند. بخش ۳ مدل پیشنهادی و روابط مربوط را ارائه می‌کند. مساله بهینه سازی و تحلیل آن در بخش ۴ ارائه شده است. در بخش ۵ نتایج شبیه سازی آورده شده است و بخش ۶ نیز نتیجه گیری نهایی را بیان می‌کند.

## ۲- حسگری طیف

یک شبکه رادیو شناختگر با  $M$  کاربر ثانویه را در نظر بگیرید. هر کاربر ثانویه به یک آشکارساز انرژی مجهز است. مرکز همجوشی بر مبنای قانون همجوشی OR، همکاری کاربران ثانویه با یکدیگر و هماهنگی بین آن‌ها را مدیریت می‌کند. سیگنال دریافتی به صورت زیر است:

$$x_i[n] = \begin{cases} z_i[n] & H_0 \\ s_i[n] + z_i[n] & H_1 \end{cases}, \quad i = 1, 2, \dots, M, \quad n = 1, 2, \dots, N. \quad (1)$$

$x_i[n]$  سیگنال دریافتی توسط رادیو  $i$  و  $N = \tau f_s$  تعداد نمونه‌ها است.  $\tau$  و  $f$  نیز به ترتیب زمان حسگری و فرکانس نمونه برداری هستند.  $H_0$  و  $H_1$  فرضیه های آشکارسازی هستند که اولی بیکار بودن و دومی مشغول بودن کاربر اولیه را بیان می‌کند.  $s_i[n]$  سیگنال کاربر اولیه با واریانس  $\sigma_s^2$  و میانگین صفر و  $z_i[n]$  نویز جمع شونده با واریانس  $\sigma_z^2$  و میانگین صفر است. با فرض اینکه سیگنال و نویز متغیرهای تصادفی گوسی مستقل با توزیع یکسان هستند، آماره آزمون<sup>۱</sup> آشکارساز انرژی به صورت زیر است:

$$TS_i = \frac{1}{N \sigma_z^2} \sum_{n=1}^N |x_i[n]|^2, \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (2)$$

پارامتر فوق با استفاده از قضیه حد مرکزی دارای توزیع نرمال است که اگر کاربر اولیه غیرفعال باشد، دارای میانگین ۱ و واریانس  $1/N$  و در غیر این صورت دارای میانگین  $1+\gamma$  و واریانس  $1/N(1+\gamma)^2$  است که  $\gamma = \sigma_s^2/\sigma_z^2$  مقدار متوسط SNR است. حسگری طیف مبتنی بر آشکارسازی انرژی به صورت معمول مقایسه‌ای بین آماره آزمون و مقدار آستانه  $\lambda$  انجام می‌دهد تا تشخیص دهد که آیا کاربر اولیه فعال ( $H_1$ ) است یا خیر ( $H_0$ ). اگر آماره آزمون از  $\lambda$  بیشتر باشد،  $H_1$  و در غیر این صورت  $H_0$  به عنوان فرضیه درست اعلام می‌شود. احتمالات محلی هشدار غلط و آشکارسازی به صورت زیر هستند [۲]:

$$p_f(\tau, \lambda) = \Pr(TS_i \geq \lambda | H_0) = Q[(\lambda - 1)\sqrt{\tau f_s}] \quad (3)$$

$$p_d(\tau, \lambda) = \Pr(TS_i \geq \lambda | H_1) = Q[(\lambda - \gamma - 1)\sqrt{\tau f_s} / \gamma + 1] \quad (4)$$

فرض می‌کنیم که تصمیمات محلی از طریق کانال گزارش غیر ایده‌آل و با احتمال خطای  $P_e$  به مرکز همجوشی ارسال می‌شوند. بنابراین برای مرکز همجوشی، احتمال هشدار غلط  $P_{F,conv}$  و احتمال آشکارسازی  $P_{D,conv}$  را می‌توانیم به صورت زیر بیان کنیم:

$$P_{F,conv}(\tau, \lambda) = (1 - P_e)p_f(\tau, \lambda) + P_e[1 - p_f(\tau, \lambda)] = P_e + (1 - 2P_e)p_f(\tau, \lambda) \quad (5)$$

$$P_{D,conv}(\tau, \lambda) = (1 - P_e)p_d(\tau, \lambda) + P_e[1 - p_d(\tau, \lambda)] = P_e + (1 - 2P_e)p_d(\tau, \lambda) \quad (6)$$

همچنین این احتمالات برای کل شبکه با در نظر گرفتن قانون همجوشی OR به صورت زیر هستند که تحت عنوان احتمالات سراسری شناخته می‌شوند [۳]:

$$Q_{F,conv}(\tau, \lambda) = 1 - [1 - P_{F,conv}(\tau, \lambda)]^M = 1 - [1 - P_e - (1 - 2P_e)p_f(\tau, \lambda)]^M \quad (7)$$

$$Q_{D,conv}(\tau, \lambda) = 1 - [1 - P_{D,conv}(\tau, \lambda)]^M = 1 - [1 - P_e - (1 - 2P_e)p_d(\tau, \lambda)]^M \quad (8)$$

انرژی مصرفی کل شبکه ناشی از دو مرحله حسگری و گزارش است:

$$E_{conv}(\tau) = \sum_{i=1}^M (\tau f_s E_{s_i} + E_{r_i}) = \tau f_s \sum_{i=1}^M E_{s_i} + \sum_{i=1}^M E_{r_i} \quad (9)$$

که  $E_{s_i}$  انرژی مورد نیاز برای کاربر ثانویه  $i$  جهت حسگری یک نمونه از سیگنال اولیه و  $E_{r_i}$  انرژی مصرفی آن برای گزارش تنها یک تصمیم محلی دودویی به مرکز همجوشی است.

گذردهی متوسط شبکه را می‌توان به صورت رابطه زیر بیان کرد [۲۸]:

$$R_{conv}(\tau, \lambda) = \frac{T - \tau}{T} \{P(H_0)r_0[1 - Q_{F,conv}(\tau, \lambda)] + P(H_1)r_1[1 - Q_{D,conv}(\tau, \lambda)]\} \quad (10)$$

که  $T$  زمان قاب و  $r_0$  و  $r_1$  به ترتیب گذردهی های شبکه در زمان عدم فعالیت و فعالیت کاربر اولیه هستند. در عمل موارد استفاده رادیو شناختگر بیشتر در مواردی است که کابر اولیه عموماً غیر فعال باشد، یعنی مقدار  $P(H_0)$  خیلی بیشتر از مقدار  $P(H_1)$  باشد. از طرف دیگر به خاطر اثرات مخرب تداخل، فعالیت همزمان کاربران اولیه و ثانویه باعث افت قابل ملاحظه گذردهی شبکه می‌گردد. به عبارت دیگر مقدار  $r_1$  نسبت به  $r_0$  ناچیز بوده و قابل چشم پوشی است. همچنین ملاحظات مربوط به تداخل الزام می‌کند که مقدار آشکارسازی سراسری شبکه  $Q_{F,conv}$ ، روی عددی نزدیک به ۱ تنظیم شود. با توجه به موارد گفته شده می‌توان از جمله دوم رابطه ۱۰ صرف نظر کرد و گذردهی متوسط را به صورت زیر نوشت:

$$R_{conv}(\tau, \lambda) = \frac{T - \tau}{T} [1 - Q_{F,conv}(\tau, \lambda)] = \frac{T - \tau}{T} [1 - P_e - (1 - 2P_e)p_f(\tau, \lambda)]^M \quad (11)$$

### ۳- مدل پیشنهادی

مدل پیشنهادی مبتنی بر آشکارسازی با دو مقدار آستانه  $\lambda_1$  و  $\lambda_2$  است که مقدار  $\lambda_1$  بزرگتر یا مساوی صفر و کوچکتر یا مساوی  $\lambda_2$  است. اگر آماره آزمون بین این دو مقدار واقع شود، اطلاعات دریافتی بی اعتبار قلمداد شده و چیزی به مرکز همجوشی ارسال نمی‌شود، به عبارت دیگر نتیجه حسگری سانسور می‌گردد. اگر مقدار آماره بیشتر از  $\lambda_2$  باشد، فرضیه  $H_1$  تایید گردیده و بیت '۱' از طرف کاربر اولیه به عنوان تصمیم محلی به مرکز همجوشی ارسال خواهد شد. اگر این مقدار کوچکتر از  $\lambda_1$  باشد، فرضیه  $H_0$  تایید شده که به معنی ارسال بیت '۰' است. بنابراین تصمیم محلی هر کاربر ثانویه به صورت زیر است:

$$D = \begin{cases} 0 & TS < \lambda_1 \\ \text{No Decision} & \lambda_1 \leq TS < \lambda_2 \\ 1 & TS \geq \lambda_2 \end{cases} \quad (12)$$

اگر  $\Delta$  را به عنوان احتمال سانسور در نظر بگیریم، خواهیم داشت:

$$\Delta(\tau, \lambda_1, \lambda_2) = \Pr(\lambda_1 < TS_i < \lambda_2) = P(H_0)\Delta_0(\tau, \lambda_1, \lambda_2) + P(H_1)\Delta_1(\tau, \lambda_1, \lambda_2) \quad (13)$$

$\Delta_0(\tau, \lambda_1, \lambda_2)$  برابر با  $\Pr(\lambda_1 < T_i < \lambda_2 | H_0)$  و بیانگر احتمال شرطی سانسور در زمان عدم فعالیت کاربر اولیه است.  $\Delta_1(\tau, \lambda_1, \lambda_2)$  نیز برابر با  $\Pr(\lambda_1 < T_i < \lambda_2 | H_1)$  و بیانگر احتمال شرطی سانسور در زمان فعالیت کاربر اولیه است. این دو پارامتر را می‌توان به صورت زیر بسط داد:

$$\Delta_0(\tau, \lambda_1, \lambda_2) = \Pr(T_i > \lambda_1 | H_0) - \Pr(T_i > \lambda_2 | H_0) = p_f(\tau, \lambda_1) - p_f(\tau, \lambda_2) \quad (14)$$

$$\Delta_1(\tau, \lambda_1, \lambda_2) = \Pr(T_i > \lambda_1 | H_1) - \Pr(T_i > \lambda_2 | H_1) = p_d(\tau, \lambda_1) - p_d(\tau, \lambda_2) \quad (15)$$

با در نظر گرفتن خطای کانال گزارش، احتمالات محلی هشدار غلط و آشکارسازی در مرکز همجوشی را می‌توان از روابط زیر به دست آورد:

$$P_F(\tau, \lambda_2) = (1 - P_e)p_f(\tau, \lambda_2) + P_e[1 - p_f(\tau, \lambda_2)] = P_e + (1 - 2P_e)p_f(\tau, \lambda_2) \quad (16)$$

$$P_D(\tau, \lambda_2) = (1 - P_e)p_d(\tau, \lambda_2) + P_e[1 - p_d(\tau, \lambda_2)] = P_e + (1 - 2P_e)p_d(\tau, \lambda_2) \quad (17)$$

با فرض آن که تعداد  $i$  کاربر ثانویه تصمیمات محلی خود را به مرکز همجوشی ارسال کنند، احتمالات سراسری به صورت زیر است:

$$q_{Fi}(\tau, \lambda_2) = 1 - [1 - P_F(\tau, \lambda_2)]^i \quad (18)$$

$$q_{Di}(\tau, \lambda_2) = 1 - [1 - P_D(\tau, \lambda_2)]^i \quad (19)$$

احتمال هشدار غلط سراسری نهایی به صورت زیر قابل محاسبه است [۲۶]:

$$\begin{aligned} Q_F(\tau, \lambda_1, \lambda_2) &= \sum_{i=1}^M pr(i | H_0) q_{Fi} = \sum_{i=1}^M \binom{M}{i} (1 - \Delta_0)^i \Delta_0^{M-i} [1 - (1 - P_F)^i] \\ &= \sum_{i=1}^M \binom{M}{i} (1 - \Delta_0)^i \Delta_0^{M-i} - \sum_{i=1}^M \binom{M}{i} [(1 - \Delta_0)(1 - P_F)]^i \Delta_0^{M-i} \\ &= (1 - \Delta_0^M) - \{[(1 - \Delta_0)(1 - P_F) + \Delta_0]^M - \Delta_0^M\} \\ &= 1 - [(1 - \Delta_0)(1 - P_F) + \Delta_0]^M = 1 - [1 - (1 - \Delta_0)P_F]^M \end{aligned} \quad (20)$$

احتمال آشکارسازی سراسری نهایی نیز به روش مشابهی محاسبه می‌شود:

$$Q_D(\tau, \lambda_1, \lambda_2) = \sum_{i=1}^M pr(i | H_1) q_{Di} = 1 - [1 - (1 - \Delta_1)P_D]^M \quad (21)$$

که  $pr(i|H_0)$  احتمال شرطی انتخاب  $i$  کاربر ثانویه از بین  $M$  کاربر در شرایط عدم فعالیت کاربر اولیه است. همچنین  $pr(i|H_1)$  احتمال شرطی انتخاب  $i$  کاربر ثانویه از بین  $M$  کاربر در شرایط فعالیت کاربر اولیه است. با توجه به مطالب فوق انرژی مصرفی و گذردهی نرمالیزه نیز مطابق روابط زیر هستند:

$$E(\tau, \lambda_1, \lambda_2) = \tau f_s E_s + (1 - \Delta_0)E_r \quad (22)$$

$$R(\tau, \lambda_1, \lambda_2) = \frac{T - \tau}{T} (1 - Q_F) = \frac{T - \tau}{T} [1 - (1 - \Delta_0)P_F]^M \quad (23)$$

#### ۴- مساله بهینه سازی و تحلیل

از آنجا که رادیو شناختگر تنها در زمان هایی مجاز به مبادله داده است که کاربران اولیه غیر فعال باشند، بنابراین افزایش گذردهی در این شبکه‌ها از اهمیت بیشتری نسبت به شبکه‌های با باند فرکانسی اختصاصی برخوردار است. علاوه بر این انرژی مصرفی نیز حائز اهمیت است و افزایش گذردهی نباید به قیمت افزایش انرژی مصرفی تمام شود. در نتیجه در سیستم پیشنهادی ما یک شبکه با انرژی محدود را در نظر می‌گیریم که مقدار حداکثر آن به پارامتر  $\beta$  محدود می‌شود.

همچنین برای محافظت از کاربران اولیه در برابر تداخل رادیو شناختگر، مقدار حداقل احتمال آشکارسازی کل را به پارامتر قابل تنظیم  $\alpha$  محدود می‌کنیم. بنابراین هدف ما حداکثر کردن گذردهی شبکه تحت قیودی است که انرژی مصرفی و میزان تداخل مجاز را محدود می‌کند. زمان حسگری و مقادیر آستانه پارامترهای آشکارسازی هستند که لازم است به صورت توأم بهینه گردند، بنابراین مساله بهینه سازی را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\text{Max } R(\tau, \lambda_1, \lambda_2)$$

$$\tau, \lambda_1, \lambda_2$$

Subject to:

$$Q_D(\tau, \lambda_1, \lambda_2) \geq \alpha \quad (24)$$

$$E(\tau, \lambda_1, \lambda_2) \leq \beta \quad (25)$$

با توجه به رابطه ۲۱، قید ۲۴ به صورت زیر بازنویسی می شود:

$$(1 - \Delta_1)P_D \geq 1 - (1 - \alpha)^{\frac{1}{M}} \quad (26)$$

برای حل مساله، مشتق جزئی  $\Delta_0$  نسبت به  $\lambda_1$  را به دست می آوریم:

$$\frac{\partial \Delta_0}{\partial \lambda_1} = -\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\tau f_s} \exp\left[-\frac{1}{2} \tau f_s (\lambda_1 - 1)^2\right] \quad (27)$$

می توان دید که مقدار  $\partial \Delta_0 / \partial \lambda_1$  کوچکتر یا مساوی صفر است. با گرفتن مشتقات جزئی  $Q_F$  و  $R$  نسبت به  $\lambda_1$  خواهیم داشت:

$$\frac{\partial Q_F}{\partial \lambda_1} = -MP_F [1 - (1 - \Delta_0)P_F]^{M-1} \frac{\partial \Delta_0}{\partial \lambda_1} \quad (28)$$

$$\frac{\partial R}{\partial \lambda_1} = \frac{T - \tau}{T} \frac{\partial Q_F}{\partial \lambda_1} \quad (29)$$

چون  $\partial \Delta_0 / \partial \lambda_1$  کوچکتر یا مساوی صفر است، بنابراین  $\partial Q_F / \partial \lambda_1$  بزرگتر یا مساوی صفر و در نتیجه  $\partial R / \partial \lambda_1$  کوچکتر یا مساوی صفر است. بنابراین  $R$  یک تابع نزولی از  $\lambda_1$  است. به عبارت دیگر برای هر  $\tau$  و  $\lambda_2$ ، کمترین مقدار ممکن  $\lambda_1$  (یعنی '۰') منجر به گذردهی حداکثر می گردد. با قرار دادن '۰' به جای  $\lambda_1$  در روابط ۱۴، ۱۵ و ۲۲ خواهیم داشت [۲۶]:

$$\Delta_0(\tau, \lambda_2) = 1 - p_f(\tau, \lambda_2) \quad (30)$$

$$\Delta_1(\tau, \lambda_2) = 1 - p_d(\tau, \lambda_2) \quad (31)$$

$$E(\tau, \lambda_2) = \tau f_s E_s + p_f(\tau, \lambda_2) E_r \quad (32)$$

با توجه به رابطه ۳۱، قید ۲۶ معادل  $p_d P_D \geq \alpha_1$  خواهد بود که با بسط آن به رابطه زیر می رسیم:

$$(1 - 2P_e)p_d^2 + P_e p_d - \alpha_1 \geq 0 \quad (33)$$

در عمل  $P_e$  کوچکتر از ۰/۵ است و رابطه ۳۳ می تواند به صورت زیر بازنویسی شود:

$$p_d(\tau, \lambda_2) \geq \alpha_2 \quad (34)$$

که  $\alpha_2$  از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\alpha_2 = \frac{-P_e + \sqrt{P_e^2 + 4\alpha_1(1 - 2P_e)}}{2(1 - 2P_e)} \quad (35)$$

با قراردادن  $\Delta_0$  از رابطه ۳۰ در رابطه ۲۳ مساله بهینه سازی به شکل زیر قابل بیان است:

$$\text{Max} \quad \frac{T - \tau}{T} \{1 - P_f(\tau, \lambda_2)[P_e + (1 - 2P_e)p_f(\tau, \lambda_2)]\}^M$$

$$\tau, \lambda_2$$

Subject to:

$$p_d(\tau, \lambda_2) \geq \alpha_2 \quad (36)$$

$$E(\tau, \lambda_2) \leq \beta \quad (37)$$

برای درک بهتر کارایی روش پیشنهادی در برابر حسگری متعارف طیف، پارامتر  $v$  را که محدوده تغییرات مجاز آن بین ۰ و ۱ است به عنوان پارامتر انرژی مصرفی تعریف می کنیم به گونه ای که کمترین مقدار آن برابر با  $E(\tau, \lambda_2) / E_{\text{conv}}(\tau^*)$  باشد.  $\tau^*$  زمان بهینه حسگری متعارف است که  $R_{\text{conv}}(\tau, \lambda)$  را حداکثر می کند مشروط بر آنکه  $Q_{D, \text{conv}}(\tau, \lambda)$  بزرگتر یا مساوی  $\alpha$  باشد. همچنین  $g$  را به عنوان پارامتر صرفه جویی انرژی در نظر می گیریم به طوری که مقدار آن همواره کوچکتر یا مساوی حاصل تقسیم  $E_{\text{conv}}(\tau^*) - E(\tau, \lambda_2)$  بر  $E_{\text{conv}}(\tau^*)$  باشد. توجه کنید که مقدار  $v$  یا  $g$  را محدودیت منابع شبکه رادیو شناختگر تعیین می کند. اکنون می توان قید ۳۷ را با قید زیر جایگزین کرد:

$$E(\tau, \lambda_2) \leq v E_{\text{conv}}(\tau^*) \quad (38)$$

رابطه ۳۸ را به کمک روابط ۱۰ و ۳۲ می توان به شکل زیر نوشت:

$$p_f(\tau, \lambda_2) \leq h(\tau, v) \quad (39)$$

که  $h(\tau, v)$  عبارت است از:



$$h(\tau, v) = v(1 + \frac{f_s}{\chi} \tau^*) - \frac{f_s}{\chi} \tau \quad (40)$$

پارامتر  $\chi$  نسبت انرژی است که به صورت  $E_r/E_s$  تعریف می شود. همانطور که قبلا گفته شد  $E_s$  میزان مصرف انرژی ناشی از حسگری یک نمونه از سیگنال دریافتی است. انرژی مصرفی کل حسگری برابر است با  $\tau f_s E_s$  که به دلیل وجود پارامتر بهینه سازی  $\tau$  مقداری متغیر است. بدیهی است که  $h(\tau, v)$  مقدار مثبتی است، یعنی  $\tau$  در رابطه زیر صدق می کند:

$$\tau \leq v(\frac{\chi}{f_s} + \tau^*) \quad (41)$$

بنابراین حداکثر مقدار مجاز  $\tau$  به  $T_1$  محدود می شود که از رابطه زیر به دست می آید:

$$T_1 = \text{Min}[v(\frac{\chi}{f_s} + \tau^*), T] \quad (42)$$

در ادامه اثبات می کنیم که حداکثر گذردهی به ازای  $p_d(\tau, \lambda_2) = \alpha_2$  حاصل می شود. اگر  $\lambda_2$  را از توابع هشدار غلط  $p_f(\tau, \lambda_2) = \alpha_2$  آشکارسازی حذف کنیم، خواهیم داشت:

$$p_f = Q[\gamma \sqrt{\tau f_s} + (\gamma + 1)Q^{-1}(p_d)] \quad (43)$$

می توان دید که  $p_f$  تابعی صعودی از  $p_d$  است. همچنین گذردهی تابعی نزولی از  $p_f$  و در نتیجه تابعی صعودی از  $p_d$  است. پس کمترین مقدار احتمال آشکارسازی یعنی  $\alpha_2$ ، گذردهی را حداکثر خواهد کرد. با توجه به این نکته و با استفاده از رابطه ۴۳ نتیجه می گیریم:

$$\lambda_2 = \gamma + 1 + Q^{-1}(\alpha_2) \frac{\gamma + 1}{\sqrt{\tau f_s}} \quad (44)$$

$$p_f(\tau) = Q[\gamma \sqrt{\tau f_s} + (\gamma + 1)Q^{-1}(\alpha_2)] \quad (45)$$

بنابراین مساله تبدیل به رابطه زیر با فقط یک پارامتر بهینه سازی زمان حسگری می شود:

$$\text{Max}_{\tau} \frac{T - \tau}{T} \{1 - p_f(\tau)[P_e + (1 - 2P_e)p_f(\tau)]\}^M$$

Subject to:

$$p_f(\tau) \leq h(\tau, v) \quad (46)$$

قید ۴۶ غیرخطی است، اما در ادامه نشان می دهیم که می توان در همه شرایط مقادیر  $\tau_1$  و  $\tau_2$  را به دست آورد به گونه ای که در قید خطی  $\tau_1 \leq \tau \leq \tau_2$  صدق کنند. شکل ۱ به صورت شماتیک  $p_f(\tau)$  و  $h(\tau, v)$  را نشان می دهد. از آنجا که تغییرات این دو تابع بر حسب  $\tau$  نزولی است، بنابراین اگر رابطه  $h(0, v_1) \geq p_f(0)$  برقرار باشد، این دو نمودار فقط یک نقطه مشترک  $\tau_{i4}$  خواهند داشت و در نتیجه  $\tau_1 = 0$  و  $\tau_2 = \tau_{i4}$ . در غیراین صورت در حالتی که  $v_2$  کوچکتر یا مساوی  $v_1$  باشد و نقطه تقاطع  $\tau_{i1} = \tau_{i3}$  و  $\tau_2 = \tau_{i3}$  ایجاد می شود. بنابراین برای حداقل مقدار مجاز  $v_3 = v_{\min}$  خواهیم داشت  $\tau_1 = \tau_2 = \tau_{i2}$ . برای اینکه  $\tau_1$  و  $\tau_2$  را به دست آوریم، کافی است که ریشه های تابع جدید  $f(\tau, v) = p_f(\tau) - h(\tau, v)$  را به دست آوریم.

اگرچه  $f(\tau, v)$  یک تابع غیرخطی از  $v$  و فاقد راه حل تحلیلی است، اما نشان می دهیم که این مساله واجد شرایط لازم برای حل آن توسط الگوریتم دوبخشی<sup>۱</sup> که یک روش محاسبه عددی با همگرایی تضمین شده است، هست. این روش ریشه تابع مفروض  $y(\tau)$  را در بازه  $[a, b]$  پیدا می کند مشروط بر تحقق شرایط زیر:

$$1- \quad y(\tau) \text{ تابعی پیوسته در بازه } [a, b] \text{ باشد.}$$

$$2- \quad y'(\tau) \text{ برای } \tau \in [a, b] \text{ مخالف صفر باشد.}$$

$$3- \quad \text{حاصل عبارت } y(a)y(b) \text{ کوچکتر از صفر باشد.}$$

فرض می کنیم  $\tau_m$  نقطه حداقل  $f(\tau, v)$  به ازای هر مقدار مشخص  $v$  باشد. اگر بازه کامل  $[0, T^*]$  به دو بازه جدا از هم  $[0, \tau_m]$  و  $[\tau_m, T^*]$  تقسیم شود، در این صورت شرایط پیش گفته برای الگوریتم دو بخشی فراهم است و این الگوریتم را می توان برای هر

بازه به کار برد. اگر تنها یک ریشه موجود باشد، الگوریتم در بازه  $[0, \tau_m]$  اجرا می‌شود و برای دو ریشه در هر دو بازه  $[0, \tau_m]$  و  $[\tau_m, T^*]$  اجرا می‌گردد. برای تعیین  $\tau_m$  مقدار  $f'(\tau_m)$  را برابر صفر قرار داده و آن را بسط می‌دهیم.

$$\exp\left[-\frac{1}{2}(\gamma\sqrt{\tau_m f_s} + (\gamma+1)Q^{-1}(\alpha_2))^2\right] - \frac{2\sqrt{2\pi\tau_m f_s}}{\chi\gamma} = 0 \quad (47)$$

از آنجا که از  $\tau_m$  تنها برای تعیین بازه‌ها به منظور استفاده از الگوریتم دوبخشی استفاده می‌شود، برای محاسبه مقدار تقریبی آن با توجه به اینکه  $\exp(x)$  را می‌توان با  $1+x$  تقریب زد، معادله فوق به یک معادله درجه دوم استاندارد به شکل زیر قابل بازنویسی است،

$$at^2 + bt + c = 0 \quad (48)$$

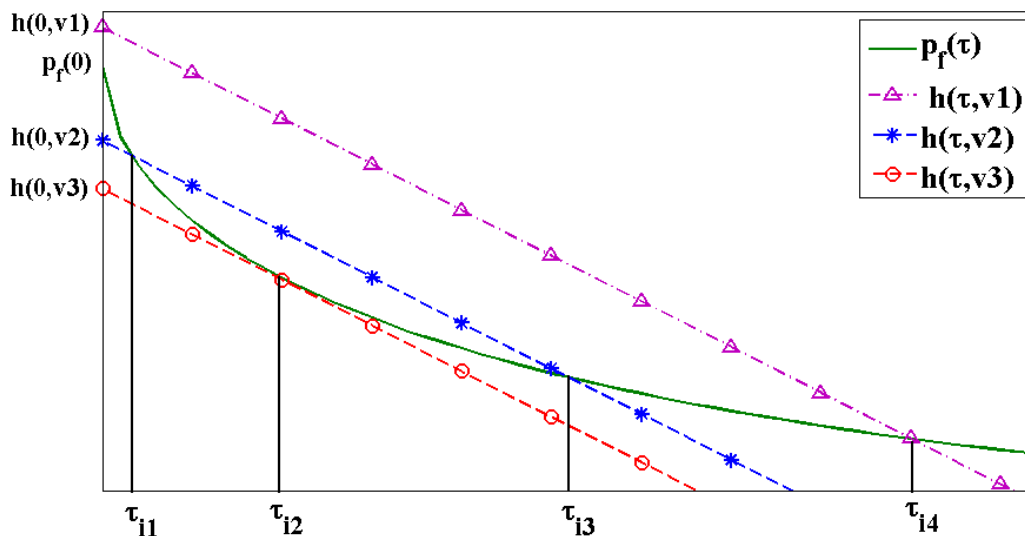
که  $t$  برابر با جذر  $\tau_m$  است و ضرایب معادله هم مطابق رابطه زیر تعیین می‌شوند:

$$a = \frac{1}{2}\gamma^2 f_s, \quad b = \gamma(\gamma+1)\sqrt{f_s}Q^{-1}(\alpha_2) + \frac{2\sqrt{2\pi f_s}}{\chi\gamma}, \quad c = \frac{1}{2}(\gamma+1)^2 Q^{-1}(\alpha_2)^2 - 1 \quad (49)$$

اگر فرض کنیم که  $t_0$  عددی مثبت و ریشه‌ای از معادله ۴۸ است که نسبت به ریشه دیگر برای حل معادله ۴۷ به خطای کمتری منجر می‌شود، در این صورت  $\tau_m$  برابر با  $t_0^2$  خواهد بود. به کمک روش دوبخشی  $\tau_1$  و  $\tau_2$  محاسبه شده و قید خطی زیر در مساله استفاده خواهد شد:

$$\tau_1 \leq \tau \leq \tau_2 \quad (50)$$

اکنون مساله بهینه‌سازی، یک الگوریتم ساده جستجوی خطی بر روی زمان حسگری  $\tau$  است. زمان حسگری بهینه  $\tau_{opt}$  مقداری است که با جستجوی  $\tau$  در محدوده  $\tau_1$  تا  $\tau_2$  منجر به حداکثر شدن گذردهی شود. با قراردادن زمان حسگری بهینه در رابطه ۴۴ مقدار آستانه بهینه محاسبه می‌شود.

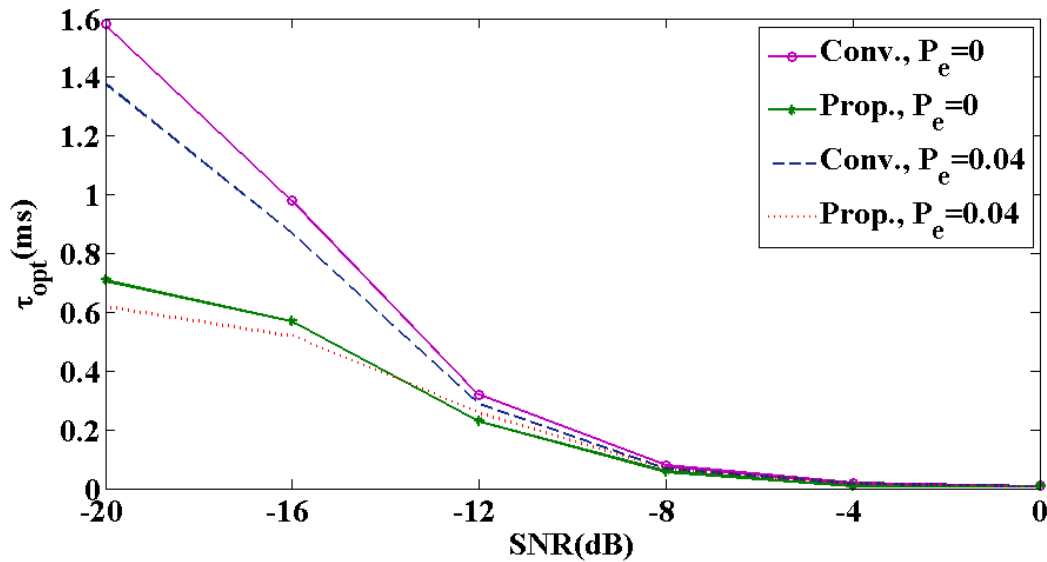


شکل ۱: نمایش ترسیمی  $P_f(\tau)$  و  $h(\tau, v)$   
Figure 1. Schematic explanation of  $P_f(\tau)$  and  $h(\tau, v)$

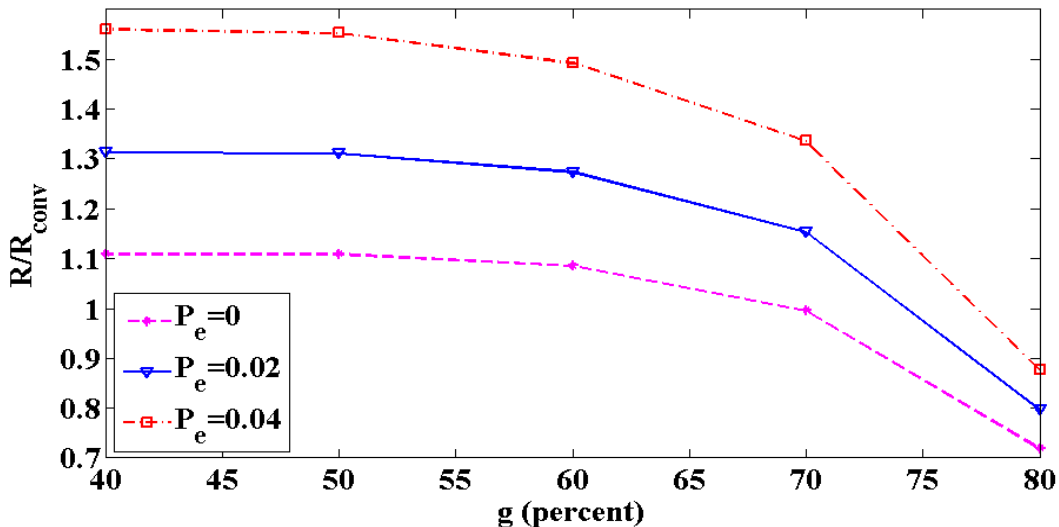
## ۵- نتایج شبیه‌سازی

پارامترهای شبیه‌سازی  $\alpha$ ،  $T$  و  $f_s$  به ترتیب برابر با ۵ میلی ثانیه، ۰/۹ و ۳ مگاهرتز در نظر گرفته می‌شوند. نسبت انرژی  $\chi$  برابر با ۲۰۰۰ و تعداد کاربران ثانویه ۱۰ است. از آنجا که رادیو شناختگر باید قادر به حسگری سیگنال‌های ضعیف اولیه باشد، در شبیه‌سازی از مقادیر SNR در محدوده ۰dB تا -۲۰dB استفاده شده است. شکل ۲ مقدار بهینه زمان حسگری را بر حسب SNR در هر دو شبکه رادیو شناختگر متعارف و پیشنهادی نشان می‌دهد. پارامتر صرفه جویی انرژی  $g$  در مقدار ۰/۶۰ تنظیم شده است. مشاهده می‌شود که در هر دو مورد کانال گزارش ایده‌آل و غیر ایده‌آل، روش پیشنهادی به مقدار حداکثر گذردهی خود در زمان حسگری کمتری دست پیدا می‌کند. مقدار آستانه آشکارسازی بهینه نیز مطابق رابطه ۴۰ با معکوس جذر زمان

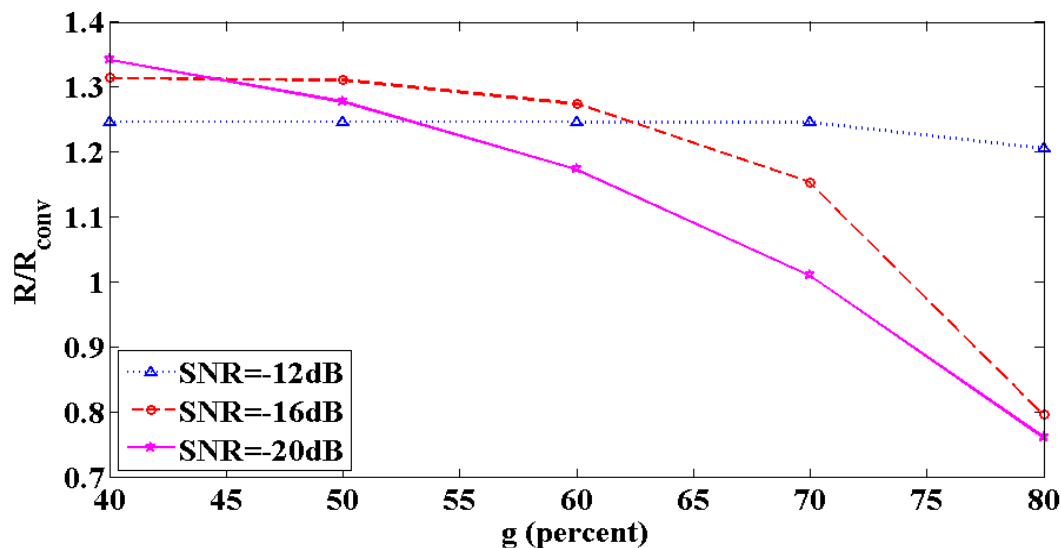
حسگری بهینه ارتباط دارد. کارایی گذردهی را به عنوان نسبت حداکثر گذردهی روش پیشنهادی به روش متعارف تعریف می‌کنیم. شکل های ۳ و ۴ چگونگی تغییرات کارایی گذردهی با مصرف انرژی را نشان می‌دهند. در شکل ۳ تحمل پذیری روش ارائه شده در برابر خطای کانال گزارش نشان داده شده است. اگر چه با افزایش خطا گذردهی هر دو روش افت پیدا می‌کند، اما در عین حال مشاهده می‌شود که کارایی گذردهی افزایش پیدا کرده است که این به معنی آن است که اثر مخرب خطای کانال گزارش بر حسگری متعارف نسبت به روش پیشنهادی به مراتب بیشتر است. همچنین به وضوح وابستگی بین صرفه جویی انرژی و گذردهی قابل دسترس، قابل مشاهده است. هرچه انتظار صرفه جویی انرژی بیشتری داشته باشیم، باید انتظار کاهش کارایی گذردهی را نیز داشته باشیم. با این وجود همچنان صرفه جویی انرژی قابل توجهی تا سقف ۷۰٪ برای مقادیر کارایی گذردهی بیشتر از ۱ قابل دستیابی است. در نمودارهای بعدی احتمال خطای کانال برابر با ۰/۰۲ تنظیم شده است. شکل ۴ کارایی انرژی را بر حسب صرفه جویی انرژی در مقادیر مختلف SNR نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که کارایی گذردهی برای هر مقدار SNR یک تابع کاهشی از صرفه جویی انرژی است، اما میزان این کاهش برای مقادیر بالاتر SNR با شیب کمتری اتفاق می‌افتد. به عنوان مثال در SNR برابر با -۱۲dB کارایی گذردهی تقریباً به ازای تمام مقادیر صرفه جویی انرژی کمتر از ۰/۸۰، بدون افت و بالاتر از یک باقی مانده است.



شکل ۲: زمان حسگری بهینه در برابر SNR  
Figure 2. Optimal sensing time versus SNR



شکل ۳: کارایی گذردهی در برابر صرفه جویی انرژی برای مقادیر مختلف احتمال خطای کانال  
Figure 3. Throughput efficiency versus energy saving for different channel error probabilities

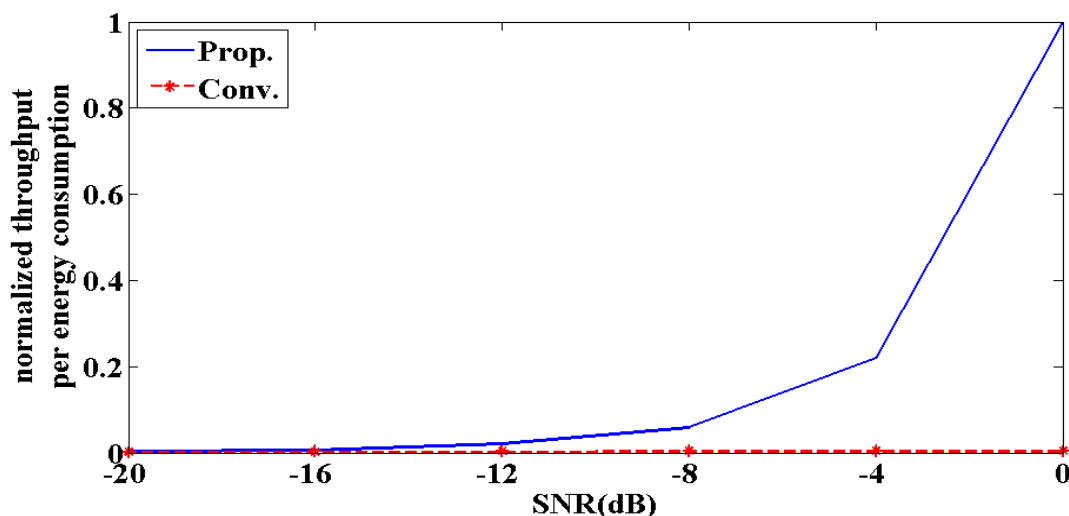


شکل ۴: کارایی گذردهی در برابر صرفه جویی انرژی برای مقادیر مختلف SNR  
Figure 4. Throughput efficiency versus energy saving for different SNRs

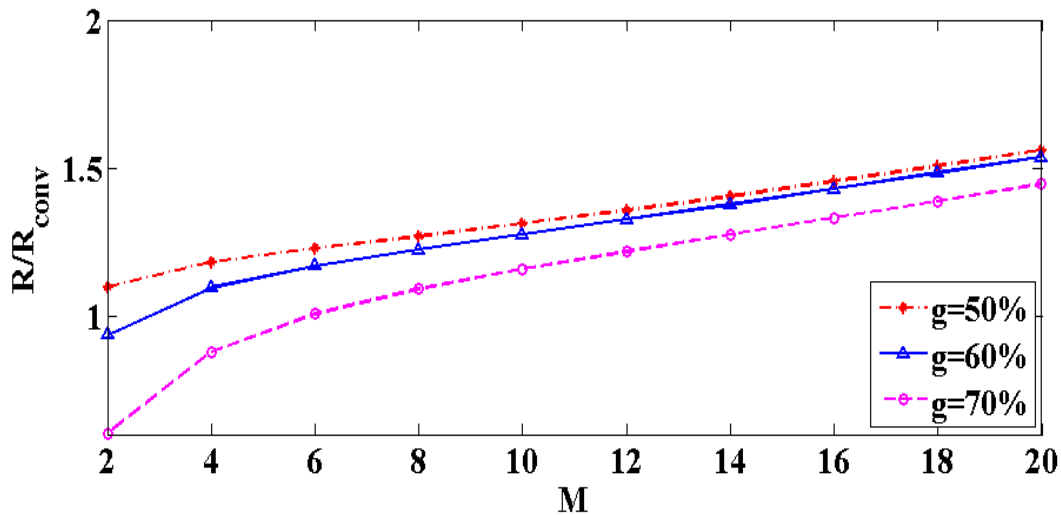
ما علاقه‌مند به ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی از دیدگاهی متفاوت هستیم. به سیستم اجازه می‌دهیم بدون توجه به گذردهی شبکه تا حد امکان در مصرف انرژی صرفه‌جویی کند. نسبت گذردهی به دست آمده به حداقل انرژی مصرفی ممکن در شکل ۵ نشان داده شده است. اگرچه این سناریو منجر به کمترین گذردهی می‌شود، اما همانطور که مشاهده می‌شود نسبت گذردهی قابل دستیابی به انرژی مصرفی در روش پیشنهادی می‌تواند بسیار بیشتر از روش متعارف باشد.

شکل ۶ به تغییرات گذردهی به عنوان تابعی از تعداد کاربران ثانویه می‌پردازد. هنگامی که شبکه شامل تعداد زیادی کاربر ثانویه باشد، عملکرد آن نیز بهبود می‌یابد. در روش متعارف همه کاربران ثانویه در فرایند حسگری همکاری می‌کنند، در حالی که در روش پیشنهادی تنها زیر مجموعه‌ای از کاربران که به عنوان کاربران قابل اعتماد شناخته می‌شوند، در حسگری طیف مشارکت می‌کنند. این موضوع بهبود هم‌زمان گذردهی شبکه و افزایش میزان صرفه‌جویی انرژی را امکان‌پذیر می‌کند.

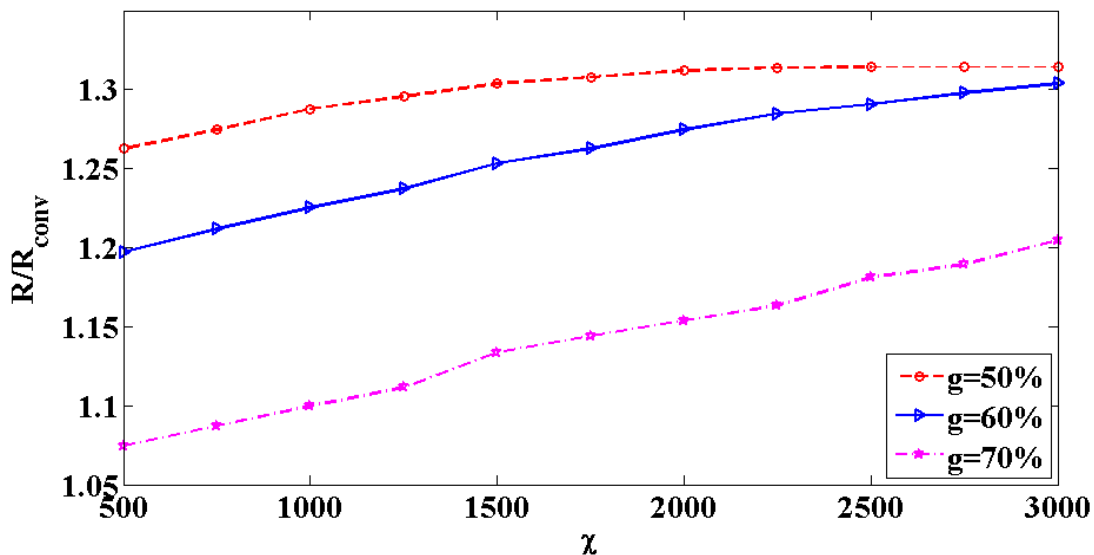
در شکل ۷ مشاهده می‌کنیم که افزایش پارامتر نسبت انرژی منجر به کارایی گذردهی بالاتر شبکه می‌گردد. با توجه به این واقعیت که تصمیمات محلی غیر قابل اعتماد به مرکز همجوشی گزارش نمی‌شوند، افزایش انرژی گزارش‌دهی نسبت به انرژی حسگری، موجب کاهش کلی مصرف انرژی در روش پیشنهادی می‌گردد. در واقع در این حالت زمان حسگری قادر به برآورده کردن قید انرژی در محدوده وسیع‌تری است که به نوبه خود باعث بهبود گذردهی می‌شود.



شکل ۵: نسبت گذردهی قابل دستیابی به کمترین انرژی مصرفی  
Figure 5. The ratio of achievable energy to minimum energy consumption



شکل ۶: کارایی گذردهی به عنوان تابعی از تعداد کاربران ثانویه (SNR=-16dB)  
Figure 6. Throughput efficiency as a function of the number of secondary users (SNR=-16dB)



شکل ۷: کارایی گذردهی به عنوان تابعی از پارامتر نسبت انرژی (SNR=-16dB)  
Figure 7. Throughput efficiency as a function of energy ratio (SNR=-16dB)

#### ۶- نتیجه گیری

در این مقاله یک سیستم رادیو شناختگر برای حسگری طیف همکارانه ارائه گردید تا بتواند ضمن بهبود گذردهی، مصرف انرژی را نیز به مقدار دلخواه محدود کند و در عین حال از کاربران اولیه در برابر تداخل محافظت نماید. برای دستیابی به این هدف مقادیر آستانه و زمان حسگری یک آشکارساز انرژی دو آستانه‌ای توأمان بهینه شده و با روش متعارف مقایسه گردید. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که روش پیشنهادی یک سیستم با انعطاف بالا است، به طوری که به راحتی می‌توانیم بین گذردهی قابل دستیابی و انرژی مصرفی تعادل برقرار کنیم.

عملکرد شبکه در حضور کانال گزارش غیر ایده‌آل مورد ارزیابی قرار گرفت و تحمل‌پذیری آن در برابر خطا نشان داده شد. مشاهده شد که روش پیشنهادی به زمان بهینه کمتری برای حسگری طیف نیازمند است. همچنین افزایش تعداد کاربران ثانویه و افزایش پارامتر نسبت انرژی، باعث بهبود کارایی سیستم گردید. از نظر گذردهی قابل دستیابی نیز به ازای انرژی مصرفی مشخص روش پیشنهادی عملکرد بهتری داشت.

## مراجع

- [1] S. Haykin and P. Setoodeh, "Cognitive Radio Networks: The Spectrum Supply Chain Paradigm," in *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, vol. 1, no. 1, pp. 3-28, March 2015, doi: 10.1109/TCCN.2015.2488627.
- [2] Y. -C. Liang, Y. Zeng, E. C. Y. Peh and A. T. Hoang, "Sensing-Throughput Tradeoff for Cognitive Radio Networks," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 7, no. 4, pp. 1326-1337, April 2008, doi: 10.1109/TWC.2008.060869.
- [3] G. M. Salama and S. A. Taha, "Cooperative Spectrum Sensing and Hard Decision Rules for Cognitive Radio Network," *2020 3rd International Conference on Computer Applications & Information Security (ICCAIS)*, Riyadh, Saudi Arabia, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICCAIS48893.2020.9096740.
- [4] J. Tong, M. Jin, Q. Guo and Y. Li, "Cooperative spectrum sensing: a blind and soft fusion detector," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 17, no. 4, pp. 2726-2737, April 2018, doi: 10.1109/TWC.2018.2801833.
- [5] K. R. Rao et al., "Genetic Algorithm for Cross-Layer-Based Energy Hole Minimization in Wireless Sensor Networks," in *IEEE Sensors Letters*, vol. 6, no. 12, pp. 1-4, Dec. 2022, Art no. 7005104, doi: 10.1109/LSSENS.2022.3219857.
- [6] R. Wan et al, "Dynamic dual threshold cooperative spectrum sensing for cognitive radio under noise power uncertainty," *Human-centric Computing and Information Sciences*, vol. 9, no. 22, pp. 1-21, 2019, doi: 10.1186/s13673-019-0181-x.
- [7] S. Chaudhari et al., "BEP walls for cooperative sensing in cognitive radios using K-out-of-N fusion rules," *Signal Processing*, vol. 93, no. 7, pp. 1900-1908, 2013, doi: 10.1016/j.sigpro.2013.01.016.
- [8] N. Saeed and H. Nam, "Energy Efficient Localization Algorithm With Improved Accuracy in Cognitive Radio Networks," in *IEEE Communications Letters*, vol. 21, no. 9, pp. 2017-2020, Sept. 2017, doi: 10.1109/LCOMM.2017.2712802.
- [9] A. Bayat and S. Aïssa, "Full-duplex cognitive radio with asynchronous energy-efficient sensing," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 17, no. 2, pp. 1066-1080, Feb. 2018, doi: 10.1109/TWC.2017.2774268.
- [10] K. Illanko et al., "Energy-Efficient Frequency and Power Allocation for Cognitive Radios in Television Systems," in *IEEE Systems Journal*, vol. 10, no. 1, pp. 313-324, March 2016, doi: 10.1109/JSYST.2015.2393834.
- [11] M. Cui et al., "Energy-Efficient Power Control Algorithms in Massive MIMO Cognitive Radio Networks," in *IEEE Access*, vol. 5, pp. 1164-1177, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2652441.
- [12] H. Xiao et al., "Energy-Efficient Resource Allocation in Multiple UAVs-Assisted Energy Harvesting-Powered Two-Hop Cognitive Radio Network," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 23, no. 7, pp. 7644-7655, 1 April, 2023, doi: 10.1109/JSEN.2023.3247436.
- [13] H. Pradhan, S. S. Kalamkar and A. Banerjee, "Sensing-Throughput Tradeoff in Cognitive Radio With Random Arrivals and Departures of Multiple Primary Users," in *IEEE Communications Letters*, vol. 19, no. 3, pp. 415-418, March 2015, doi: 10.1109/LCOMM.2015.2393305.
- [14] A. Ahmed et al., "Cognitive Radio Timing Protocol for Interference-Constrained Throughput Maximization," in *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, vol. 8, no. 2, pp. 989-1004, June 2022, doi: 10.1109/TCCN.2021.3137487
- [15] G. C. Das et al., "Throughput Analysis of a Energy Harvesting Cooperative Cognitive Radio Network," *General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science*, Rome, Italy, 2020, pp. 1-4, doi: 10.23919/URSIGASS49373.2020.9232411.

- [16] M. Zheng, W. Liang and H. Yu, "Harvesting-Throughput Tradeoff for CDMA-Based Underlay Cognitive Radio Networks With Wireless Energy Harvesting," in *IEEE Systems Journal*, vol. 12, no. 3, pp. 2395-2398, Sept. 2018, doi: 10.1109/JSYST.2016.2636278.
- [17] Y. Long et al., "Throughput Optimization in Energy Harvesting based Cognitive IoT with Cooperative Sensing," *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC2021-Spring)*, Helsinki, Finland, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/VTC2021-Spring51267.2021.9448917.
- [18] E. Hill and H. Sun, "Double Threshold Spectrum Sensing Methods in Spectrum-Scarce Vehicular Communications," in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 14, no. 9, pp. 4072-4080, Sept. 2018, doi: 10.1109/TII.2018.2816580.
- [19] Smriti and C. Chhagan, "Double Threshold-Based Energy Detection Spectrum Sensing Scheme by Considering the Sensing History in Confusion Region," *2018 5th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*, Noida, India, 2018, pp. 518-521, doi: 10.1109/SPIN.2018.8474248.
- [20] P. Maity and S. Deshmukh, "Optimization of Majority Rule Threshold in Double Threshold Based Cooperative Cognitive Radio Network," *Twenty Fourth National Conference on Communications (NCC)*, Hyderabad, India, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/NCC.2018.8599992.
- [21] S. Ghosh et al, "Performance of weighted fusion based spectrum sensing under double threshold in cognitive radio network," *International Conference on Microelectronics, Computing and Communications (MicroCom)*, Durgapur, India, 2016, pp. 1-4, doi: 10.1109/MicroCom.2016.7522442.
- [22] H. N. Abdullah, N. Sh. Bakr and A. A. Valenzuela, "Double Threshold Soft Decision Rule for Improving Performance of Cognitive Radio Networks," *IEEE 9th International Conference on Consumer Electronics (ICCE-Berlin)*, Berlin, Germany, 2019, pp. 158-161, doi: 10.1109/ICCE-Berlin47944.2019.8966232.
- [23] P. Verma and B. Singh, "Simulation study of double threshold energy detection method for cognitive radios," *2015 2nd International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*, Noida, India, 2015, pp. 232-236, doi: 10.1109/SPIN.2015.7095276.
- [24] A. Kumar, S. Saha and K. Tiwari, "A Double Threshold-Based Cooperative Spectrum Sensing With Novel Hard-Soft Combining Over Fading Channels," in *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 8, no. 4, pp. 1154-1158, Aug. 2019, doi: 10.1109/LWC.2019.2909879.
- [25] Y. Liu, C. Zhu and P. Yan, "An energy-saving spectrum sensing scheme with combined clustering and censoring in cognitive wireless sensor networks," *International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, Nanjing, China, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/WCSP.2017.8170892.
- [26] M. Moradkhani, P. Azmi and M. A. Pourmina, "Optimized energy limited cooperative spectrum sensing in cognitive radio network," *Computers & Electrical Engineering*, vol. 42, pp. 221-231, 2015, doi: 10.1016/j.compeleceng.2014.02.005.
- [27] M. Moradkhani, P. Azmi and M. A. Pourmina, "Optimized Reliable Data Combining Cooperative Spectrum Sensing Method in Cognitive Radio Networks," *Wireless Personal Communications*, vol. 74, pp. 569-583, 2014, doi: 10.1007/s11277-013-1307-5.
- [28] T. C. Thanuja, K. A. Daman and A. S. Patil, "Optimized Spectrum sensing Techniques for Enhanced Throughput in Cognitive Radio Network," *International Conference on Emerging Smart Computing and Informatics (ESCI)*, Pune, India, 2020, pp. 137-141, doi: 10.1109/ESCI48226.2020.9167576.

---

#### COPYRIGHTS

©2024 by the authors. Published by the Islamic Azad University Bushehr Branch. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

---

