

## Interference Mitigation in Cognitive Radio Communication Systems Based on the Wavelet Transform

A. Ebrahimi Sookht Abanani<sup>1</sup>, M. Bayat<sup>2\*</sup>, R. Hooshmand<sup>3</sup>

\* Shahid Sattari Aeronautical University of Science and Technology

(Received: 12/02/2021, Accepted: 20/06/2021)

### ABSTRACT

*One of the destructive factors in communication and radar systems is intentional interference which is created by using jammers to disrupt the enemy's systems. If the intentional interference is not reduced well, the efficiency of the communication system would be completely disrupted. Jammers purposefully interfere and affect the optimal performance of the system. The NLMS adaptive algorithm is one of effective algorithms in eliminating intentional interference. In this paper, a new algorithm for eliminating intentional interference in cognitive radio systems using wavelet transform is presented. In the simulations, a 25-user cognitive radio system is used as a victim network in the vicinity of a network of primary users with Markov channel functionality. Considering eleven different scenarios, the performance of the proposed algorithm is investigated. To evaluate the performance of the proposed algorithm, the criterion of successful transmission of information in terms of signal to jammer ratio in each of the scenarios is discussed. According to the simulation results, the proposed algorithm, compared to the adaptive algorithm (NLMS), shows a significant improvement. The results, show 13% improvement for the proposed algorithm in successful transmission at SJR=5dB compared to the NLMS adaptive algorithm .*

**Keywords:** Cognitive Radio Network, Intentional Interference, Interference Mitigation, Markov, Secondary Users, Wavelet Transform .

\* Corresponding Author Email: m\_bayat@ssau.ac.ir

## کاهش تداخل عمدی در سیستم‌های مخابراتی رادیوشناختگر با استفاده از تبدیل موجک

علی ابراهیمی سوخت آبدانی<sup>۱</sup>، میثم بیات<sup>۲\*</sup>، رضا هوشمند<sup>۳</sup>

۱- کارشناسی ارشد، ۲ و ۳- استادیار، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

(دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۲۴، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۰۳)

### چکیده

یکی از عوامل مخرب در سامانه‌های مخابراتی و راداری، تداخل عمدی است، تداخل عمدی با استفاده از جمر به منظور تخریب سامانه‌های ارتباطی و راداری دشمن ایجاد می‌شود. اگر تداخل عمدی به خوبی کاهش داده نشود، کارایی سامانه مخابراتی به طور کامل مختل می‌گردد. جمرها به صورت هدفمند، ایجاد تداخل می‌نمایند و عملکرد بهینه سامانه را تحت تأثیر قرار می‌دهند. الگوریتم تطبیقی NLMS یکی از الگوریتم‌های مؤثر در حذف تداخل عمدی است. در این مقاله الگوریتمی جدید برای حذف تداخل عمدی در سامانه‌های رادیوشناختگر با استفاده از تبدیل موجک ارائه شده است. در شبیه‌سازی‌های انجام شده، از یک سیستم رادیوشناختگر ۲۵ کاربره (به عنوان شبکه قربانی) در مجاورت شبکه‌ای از کاربران اولیه با عملکرد کانالی مارکوف، استفاده شده است. با در نظر گرفتن یازده سناریو مختلف به بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی پرداخته شده است. برای بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی از معیار ارسال موفق اطلاعات بر حسب نسبت سیگنال به جمر در هر یک از سناریوها، پرداخته شده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، الگوریتم پیشنهادی، در مقایسه با الگوریتم تطبیقی NLMS، بهبود قابل ملاحظه‌ای را از خود نشان می‌دهد. بر اساس نتایج به دست آمده، الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم تطبیقی NLMS، ۱۳ درصد بهبود در ارسال موفق را در  $SJR = 5 \text{ dB}$  از خود نشان می‌دهد.

**کلید واژه‌ها:** تبدیل موجک، تداخل عمدی، رادیو شناختگر، کاربران ثانویه، کاهش تداخل، مارکوف

### ۱- مقدمه

از جمله سامانه‌های مخابراتی نوین، سیستم مخابراتی رادیوشناختگر می‌باشد. سامانه‌های رادیوشناختگر دارای مشخصات برجسته‌ای هستند که استفاده از آن‌ها را در مخابرات تجاری و نظامی بسیار مفید و گاه ضروری می‌سازد [۱]. استفاده از سامانه‌های رادیوشناختگر به دلیل بروز محدودیت‌هایی همچون کمبود عرض باند در سیستم‌های مخابراتی، پیشنهاد شده‌اند [۲]. یک سامانه رادیوشناختگر بر آن است تا با شناخت مناسب از محیط مخابراتی، پارامترهای مخابراتی را به نحوی تنظیم نماید که به بهترین نحو از امکانات در دسترس استفاده گردد [۳]. سامانه رادیوشناختگر با استفاده از سنجش طیف و یافتن بازه‌های فرکانسی خالی و تخصیص آن به کاربران بدون مجوز (کاربران ثانویه)، بدون آن که تداخل آسیب‌زننده‌ای به کاربران مجوزدار (کاربران اولیه) وارد کند، از آن حفره‌ها برای ارسال و دریافت سیگنال خود اقدام می‌کند [۴]. این سیستم به صورت دینامیکی، با در نظر گرفتن قوانین موجود، شکل موج ارسالی خود را با وضعیت طیف مطابقت می‌دهد [۵]. با توجه به اصول عملکرد سامانه‌های رادیوشناختگر، یکی از عوامل بسیار مخرب در این سامانه‌ها تداخل عمدی است [۶]. اگر تداخل عمدی در این سامانه‌ها حذف نشود عملکرد سامانه به کلی مختل می‌شود.

امروزه، حفاظت سامانه‌های مخابراتی در مقابل تداخل یکی از مهم‌ترین جنبه‌هایی است که برای گسترش و توسعه آن‌ها در نظر گرفته می‌شود. این مسئله همراه با توسعه دانش الکترونیک در زمینه ارتباطات بی‌سیم و پیدایش روش‌های سریعتر و مؤثر ایجاد تداخل، اهمیت روزافزونی یافته است. اگر تداخل به خوبی حذف نشود، ممکن است کارایی سامانه مخابراتی به طور کامل مختل شود و عملکرد بهینه سیستم را تحت تأثیر قرار دهد. در حالت کلی در مخابرات نظامی، تلفات ناشی از تداخل می‌تواند بسیار نامطلوب باشد. گاهی مواقع، اعمال تداخل به سیگنال کاربران از روی عمد می‌باشد که در این حالت، تداخل وارده به سیگنال کاربران از نوع جمینگ بوده که بسیار نامطلوب است [۱]. بنابراین حذف یا کاهش تداخل عمدی در سیستم‌های مخابراتی همواره به عنوان یک موضوع مهم و ضروری مطرح می‌باشد.

روش‌های مختلفی برای حذف تداخل در حوزه‌های مختلف زمان، فرکانس و زمان-فرکانس وجود دارند که هر یک، دارای مزایا و معایبی هستند. از جمله روش‌های حوزه زمان و فرکانس می‌توان به فیلترهای تطبیقی<sup>۱</sup> LMS، NLMS<sup>۲</sup>، VSLMS<sup>۳</sup>، RLS<sup>۴</sup>، VSRLS<sup>۵</sup> و FIR اشاره نمود [۲-۴].

\*رایانامه نویسنده مسئول: m\_bayat@ssau.ac.ir

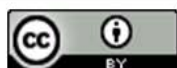
<sup>۱</sup> Least Mean Square

<sup>۲</sup> Normalized Least Mean Square

<sup>۳</sup> Variable Step-size Least Mean Square

<sup>۴</sup> Recursive Least Square

<sup>۵</sup> Variable Step-size Recursive Least Square



چندفرکانس و تک فرکانس، پالسی و تعقیبی اشاره نمود [۱۱]. در مورد سیستم‌های رادیو شناختگر، سیگنال تداخل عمدی اعمال شده به کاربران، نه تنها ممکن است کیفیت سرویس را پایین آورد، بلکه امکان بازیابی سیگنال کاربران را بسیار سخت می‌نماید. یکی دیگر از الگوریتم‌های پرکاربرد به‌منظور کاهش تداخلات عمدی و غیر عمدی در سامانه‌های ناوبری و مخابراتی الگوریتم‌های تطبیقی خطی می‌باشند [۱۲]. در واقع با اعمال تداخل عمدی به کاربران، آن کاربران با افت کیفیت مخابراتی مواجه می‌شوند. معمولاً الگوریتم‌های پیشنهاد شده جهت حذف تداخل، به‌منظور کاهش و یا حذف کامل تداخل، به‌کار می‌روند. این الگوریتم‌ها سیگنال کاربران را جهت شناسایی، کاهش یا حذف تداخل مورد بررسی قرار می‌دهند [۱۳، ۱۴]. همواره طراحی الگوریتم‌های مختلف حذف یا کاهش تداخل برای سامانه‌های مخابراتی مورد توجه بوده است [۱۴].

کلید پردازش‌هایی که جهت حذف تداخل مورد استفاده قرار گرفته‌اند، را می‌توان به سه بخش پردازش در حوزه زمان، فرکانس و زمان-فرکانس دسته‌بندی نمود [۱۵]. الگوریتم‌های تطبیقی بر اساس الگوریتم LMS و فیلترهای RLS از جمله تکنیک‌های خطی حذف تداخل در حوزه زمان محسوب می‌شوند [۱۶]. تکنیک‌های حذف تداخل در حوزه فرکانس، اساساً بر مبنای فیلتر کردن در حوزه تبدیل استوارند؛ به این ترتیب که در آن‌ها از تخمین سیگنال دریافتی جهت طراحی فیلترهایی استفاده می‌شود که تداخل را کاهش می‌دهند [۱۷]. برای نمونه با به کارگیری الگوریتم DFT طیف سیگنال دریافتی آنالیز می‌شود و بر اساس تخمین طیف و طراحی فیلتر مناسب، تداخل حذف می‌شود و یا به کمک تبدیل KLT محدوده تخریب تداخل تخمین زده می‌شود و سپس عملیات حذف تداخل با کمک فیلترهای مناسب انجام می‌گیرد [۱۸]. برخی از الگوریتم‌های مبتنی بر فیلترینگ حوزه زمان [۱۹] دارای عملکرد بسیار مطلوبی نسبت به الگوریتم‌های دیگر در جداسازی تداخل سنکرون از سیگنال می‌باشند. این الگوریتم‌ها به خصوص در سیستم‌های پهن‌بند بسیار مؤثر هستند [۱۷]. از جمله این الگوریتم‌ها می‌توان به الگوریتم‌های STFT [۱۶]، بانک فیلتر [۱۹]، تبدیل موجک و پردازش زیرفضا [۱۳] اشاره نمود.

به‌طور خاص الگوریتم تبدیل موجک با ایجاد موازنه بین زمان و فرکانس می‌تواند عملکرد خوبی در این مجموعه برای کاهش تداخل در یک سیستم مخابراتی داشته باشد.

### ۳- مبانی فنی روش پیشنهادی

با توجه به این‌که روش پیشنهاد شده در این مقاله، مبتنی بر تبدیل موجک بر روی سامانه رادیو شناختگر است، در این بخش ابتدا به مبانی تبدیل موجک و سپس به بررسی اصول عملکرد سامانه‌های رادیو شناختگر پرداخته شده است.

مطالعه انجام شده است. این در حالی است که الگوریتم‌های ارائه شده بیشتر با تمرکز بر الگوریتم‌های زمانی و یا فرکانسی انجام شده‌اند و الگوریتم‌های حوزه زمان-فرکانس و تبدیل موجک گسسته کمتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. الگوریتم‌های پیشنهادی برای حذف تداخل، اکثراً در حوزه سیستم‌های مخابراتی متعارف قدیمی می‌باشند و این در حالی است که سیستم‌های نوظهور همچون شبکه مخابراتی رادیو شناختگر دارای چالش‌های خاص خود در این زمینه می‌باشند و نیاز است به این نوع از سیستم‌ها نیز توجه ویژه‌ای شود. در حقیقت، با پیشرفت تکنولوژی و توسعه سیستم‌های ارتباطی، اخلاص گره‌های جدیدی نیز به صحنه وارد شده‌اند. یک سامانه رادیو شناختگر نیز از این قاعده مستثنی نمی‌باشد. در مراجع [۷، ۸] به ایجاد تداخل عمدی و کاهش آن در شبکه رادیو شناختگر اشاره شده است. این روش‌ها به صورت دینامیک عمل کرده و سامانه رادیو شناختگر را مختل می‌نمایند. ضمن این‌که در برخی روش‌ها [۹، ۱۰] لزومی بر ایجاد تداخل عمدی به طور مستقیم روی سامانه رادیو شناختگر نمی‌باشد و از تکنیک ایجاد تداخل روی فرکانس‌های مورد استفاده شبکه رادیو شناختگر، استفاده می‌شود. در حقیقت با ایجاد تداخل عمدی روی کانال مشخص از کاربران اولیه، شبکه رادیو شناختگر نیز دچار تداخل می‌گردد و می‌بایست از انتخاب فرکانس‌های مختل شده، دوری کرد و یا در صورت مختل شدن بتوان سیگنال را بازیابی نمود.

در این مقاله الگوریتمی جدید برای حذف تداخل عمدی در شبکه‌های رادیو شناختگر با استفاده از تبدیل موجک ارائه شده است. در شبیه‌سازی‌های انجام شده، از یک سیستم رادیو شناختگر ۲۵ کاربر به عنوان شبکه قربانی در مجاورت شبکه‌ای از کاربران اولیه با عملکرد کانالی مارکوف، استفاده شده است. با در نظر گرفتن هفت سناریو مختلف به بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی پرداخته شده است. برای بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی از معیار ارسال موفق اطلاعات بر حسب نسبت سیگنال به جمر استفاده شده است.

در ادامه در بخش ۲ به بررسی روش‌های موجود جهت حذف تداخل، پرداخته شده است. در بخش ۳ مبانی و ساختار کلی سامانه رادیو شناختگر آورده شده است. در بخش ۴ به ارائه و تشریح الگوریتم پیشنهادی پرداخته شده است. در بخش ۵، نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها آورده شده است. در نهایت و در بخش ۶ نیز به آنالیز عملکردی الگوریتم پیشنهادی و مقایسه با الگوریتم‌های موجود جهت حذف تداخل پرداخته شده است.

### ۲- روش‌های حذف تداخل

روش‌های متعددی برای ایجاد تداخل عمدی (جمینگ) وجود دارد. از جمله این موارد می‌توان به جمینگ نویزی، نویز نقطه‌ای، نویز رگباری، نویز ضربه‌ای، فریب، بانده پهن، تکه بانده،

### ۳-۱- تبدیل موجک

تبدیل موجک ابزار بسیار قدرتمند و مناسبی برای آنالیز پدیده‌های غیرایستا و متغیر با زمان می‌باشد و ویژگی‌های تابع را هم در حوزه زمان و هم در حوزه فرکانس بیان می‌کند. این تبدیل با بزرگنمایی سیگنال اجازه بررسی دقیق ساختار جزئی سیگنال را می‌دهد و با خارج شدن از حالت بزرگنمایی می‌توان ویژگی‌های سیگنال در مقیاس بزرگ را مطالعه نمود [۲۰]. در تبدیل موجک، هم وضوح زمانی و هم وضوح فرکانسی در نمودار زمان-فرکانس تغییر می‌کند. این روش در فرکانس‌های بالا، وضوح زمانی خوب و وضوح فرکانسی ضعیف و در فرکانس‌های پایین، وضوح فرکانسی خوب و وضوح زمانی ضعیفی را نتیجه می‌دهد [۲۱].

### ۳-۲- سیستم مخابراتی رادیوشناختگر

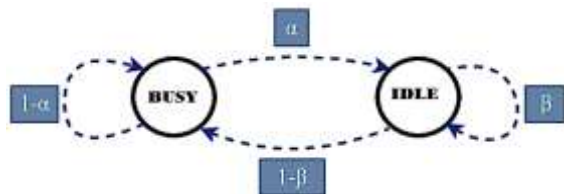
رادیوشناختگر مفهومی برای مخابرات بی‌سیم است که طبق آن یک شبکه و یا یک گره بی‌سیم پارامترهای ارسال و دریافت خود را به گونه‌ای تغییر می‌دهد که علاوه بر تأمین کیفیت سرویس بالاتر برای کاربران خود، تداخل با کاربران مجاز را نیز کاهش می‌دهد [۲۱]. این سامانه با استفاده از تحلیل طیف (شناسایی طیف) و یافتن بازه‌های فرکانسی خالی از کاربران بدون مجوز (حفره‌های طیفی)، بدون آن‌که تداخل آسیب‌زننده‌ای به کاربران مجوزدار ایجاد کند، از آن حفره‌ها برای ارسال و دریافت سیگنال خود اقدام می‌کند. این سیستم به صورت دینامیکی، با در نظر گرفتن قوانین موجود، شکل موج ارسالی خود را با وضعیت طیف مطابقت می‌دهد [۲۲]. یک سیستم رادیوشناختگر قادر است در مورد طیف فرکانسی تصمیم‌گیری نماید و بخش‌هایی از طیف را که در زمان و مکان خاصی بدون استفاده هستند، مشخص نموده و سپس بهترین باند فرکانسی را به همراه پارامترهای ارسال برای عملکرد مناسب، تعیین نماید [۲۲].

در شبکه‌های رادیوشناختگر، بحث اولویت دهی به کاربران از جمله مهم‌ترین مباحث است. در این راستا، برخی از کاربران که برای استفاده از طیف هزینه (یا هزینه بیشتری) پرداخته‌اند، دارای بالاترین اولویت مخابراتی هستند. از آنجایی که این کاربران برای اجازه استفاده از طیف، هزینه (یا هزینه بیشتر) پرداخته‌اند، به آن‌ها کاربران دارای مجوز (یا کاربران اولیه) می‌گویند. در مقابل، مابقی کاربران را کاربران بدون مجوز (یا کاربران ثانویه) می‌نامند. کاربران بدون مجوز نسبت به کاربران دارای مجوز از اولویت مخابراتی کمتری برخوردار هستند [۲۱]. در رادیوشناختگر کاربران بدون مجوز آنچنان از طیف کاربران اولیه استفاده می‌کنند که کیفیت مخابره کاربران دارای مجوز کاهش

محسوسی نیابد. با این کار بازده استفاده از طیف<sup>۱</sup> افزایش می‌یابد. استاندارد IEEE 802.22 استاندارد جدیدی برای شبکه بیسیم منطقه‌ای WRAN<sup>۲</sup> است. این سیستم، با استفاده از رادیوشناختگر، استفاده بهینه‌ای از طیف می‌کند [۲۲].

### ۳-۲-۱- مدل کانال در سیستم رادیوشناختگر

در حالت کلی وضعیت کانال‌های مخابراتی کاربران اولیه به دو صورت آزاد و مشغول می‌باشد. مدل مارکوف ۲-حالته بیان خوبی از وضعیت کانال کاربران اولیه می‌باشد. در حقیقت، فعالیت کاربر اولیه به صورت یک فرایند مارکوف باینری مدل می‌شود که در آن کانال ارتباطی شامل دو حالت اشغال و آزاد است. نمایشی از مدل مارکوف ۲-حالته در شکل (۱) آورده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، احتمال گذار از کانال مشغول به آزاد با پارامتر  $\alpha$  و احتمال باقی ماندن در حالت آزاد با پارامتر  $\beta$  مشخص می‌شود [۲۳].



شکل (۱): مدل مارکوف ۲-حالته [۱۹]

در مدل مارکوف ۲-حالته، دو وضعیت آزاد (I) و مشغول (B) وجود دارد که بیانگر وضعیت (حالت) کانال کاربران اولیه می‌باشد. یعنی  $S = \{I, B\}$  است. وضعیت کانال با گذشت زمان بین این دو حالت، تغییر می‌نماید. در لحظه شروع به کار، به ازای عرض سمبل مشخص، ممکن است کانال در یکی از این دو وضعیت قرار داشته باشد. اگر کانال در وضعیت I باشد، احتمال خطای ارسال سمبل ناچیز خواهد بود. اما اگر کانال در وضعیت B قرار داشته باشد، احتمال خطای ارسال به طور قابل توجهی بالا می‌باشد. به هر حال قبل از این‌که بخواهد سمبل یا بیت جدیدی ارسال شود، ممکن است وضعیت کانال تغییر نماید. این تغییر وضعیت کانال، یک احتمال شرطی می‌باشد. اگر این احتمال با پارامتر  $a_{ij}$  نشان داده شود، برای مدل ۲-حالته مارکوف ماتریس احتمال  $M$  به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود. فرض بر این است که وضعیت کانال در زمان  $t$  به صورت  $Q_t$  و در زمان  $t+1$  به صورت  $Q_{t+1}$  تعریف گردد. بنابراین احتمال‌های زیر برای مدل مارکوف ۲-حالته وجود خواهد داشت که به صورت یک ماتریس حالت شرطی  $2 \times 2$  نشان داده می‌شود [۲۳].

<sup>1</sup> spectrum utilization efficiency

<sup>2</sup> wireless regional area networks

یا کاهش اثر مخرب تداخلی سیگنال جمر ضروری می‌باشد. با انجام این کار از ظرفیت ایجاد شده توسط سیستم‌های رادیو شناختگر برای بهینه‌سازی استفاده از عرض باند محدود در اختیار، به طور کامل استفاده می‌شود. با توجه به این که سیستم‌های نظامی نسل آینده به صورت شناختگر خواهند بود، یافتن الگوریتم‌هایی جهت مقابله با جمرهای فعال در این حوزه، مهم می‌باشد. در این مقاله به ارائه یک الگوریتم در حوزه موجک جهت کاهش اثر جمر فعال در سامانه‌های رادیوشناختگر پرداخته شده است. حوزه موجک‌ها، به آنالیز و تبدیل سیگنال‌ها در یک ساختار چندوضوحی مربوط می‌شود که می‌تواند برای به‌دست آوردن نمایش زمانی-فرکانسی یک سیگنال استفاده گردد. این حوزه با استفاده از توابع تحلیلی که مرتبط با موجک‌ها است، حاصل می‌شود.

تبدیل موجک می‌تواند به‌عنوان یک روش فیلترینگ مؤثر برای گروه سیگنال‌هایی که دارای تعداد کمی ضرایب موجک غیرصفر برای گروه مشخصی از موجک‌ها هستند، استفاده شود [۲۵-۲۹]. به منظور جداسازی بین سیگنال مطلوب و تداخل در فضای موجک، نیاز به آستانه‌گذاری ضرایب موجک می‌باشد. این امر بر این پایه استوار است که سیگنالی که دارای ساختار شکل موج معینی است روی تعداد محدودی از ضرایب در فضای موجک متمرکز می‌شود. در حالی که تداخل که دارای ساختار تصادفی است بر روی تعداد بسیار بیشتری از ضرایب موجک پخش می‌شود [۲۷].

#### ۴- الگوریتم پیشنهادی

الگوریتم ارائه شده به منظور حذف یا کاهش تداخل در سامانه‌های رادیو شناختگر به کار می‌رود. این الگوریتم برای اولین بار با استفاده از تبدیل موجک به کاهش اثر تداخل عمده در سامانه‌های رادیوشناختگر پرداخته است. طراحی الگوریتم متناسب با ویژگی‌های سامانه‌های رادیوشناختگر می‌باشد. الگوریتم ارائه شده دارای مراحل زیر است:

- ۱) اعمال تبدیل موجک به سیگنال دارای تداخل
- ۲) تعیین آستانه بر اساس ضرایب در فضای تبدیل
- ۳) حذف یک سری از ضرایب بر اساس آستانه انتخاب شده
- ۴) بازسازی سیگنال توسط معکوس تبدیل موجک

در شکل (۲) ساختار کلی الگوریتم پیشنهادی برای کاهش تداخل عمده در یک سیستم مخابراتی رادیوشناختگر، ارائه شده است.

$$M = \begin{bmatrix} a_{II} & a_{IB} \\ a_{BI} & a_{BB} \end{bmatrix} \quad (۱)$$

هر یک از درایه‌های این ماتریس به صورت احتمالات شرطی، در روابط معادله (۲) تعریف می‌شوند [۲۳]:

$$\begin{aligned} a_{II} &= P_r\{Q_{t+1} = I | Q_t = I\} \\ a_{IB} &= P_r\{Q_{t+1} = B | Q_t = I\} \\ a_{BI} &= P_r\{Q_{t+1} = I | Q_t = B\} \\ a_{BB} &= P_r\{Q_{t+1} = B | Q_t = B\} \end{aligned} \quad (۲)$$

در شبیه‌سازی به‌منظور تعیین مدل سیستم، لازم است از حالت اولیه  $P_0$  به عنوان احتمال اولیه حالت کانال استفاده شود. به این معنی که با احتمال  $P_0$  کانال در وضعیت I و به احتمال  $1 - P_0$  در وضعیت B قرار دارد. معمولاً مقدار  $P_0$  برابر با ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود. یعنی حالت‌های اولیه I و B هم‌احتمال می‌باشند. در نهایت نیز وضعیت کانال به حالت پایدار  $M_{SS}$  خواهد رسید. رابطه توزیع احتمال حالت در لحظه t با  $M_t$  بیان می‌شود [۲۳]:

$$M_t = [m_{t,I} \quad m_{t,B}] \quad (۳)$$

در این رابطه  $m_{t,I}$  بیانگر احتمال بودن کانال در حالت I و  $m_{t,B}$  بیانگر بودن کانال در وضعیت B است. همچنین داریم [۲۳]:

$$M_{t+1} = M_t \cdot M \quad (۴)$$

بر این اساس خواهیم داشت [۲۳]:

$$M_{t+2} = M_{t+1} \cdot M = (M_t \cdot M) \cdot M = M_t \cdot M^2 \quad (۵)$$

اگر روابط ادامه داده شود، به رابطه (۶) می‌رسند [۲۳]:

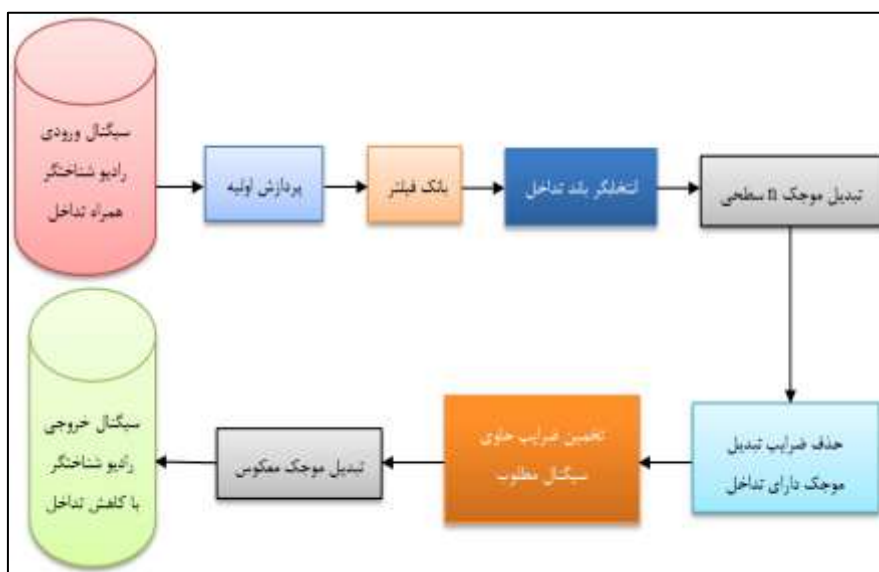
$$M_{t+k} = M_t \cdot M^k \quad (۶)$$

در بسیاری از موارد فرایند مارکوف به توزیع احتمال ماندگار می‌رسد که معمولاً به صورت رابطه (۷) نشان داده می‌شود [۲۳]:

$$M_{SS} = M_t \cdot M^k \quad (۷)$$

#### ۳-۴- حذف تداخل با استفاده از تبدیل موجک

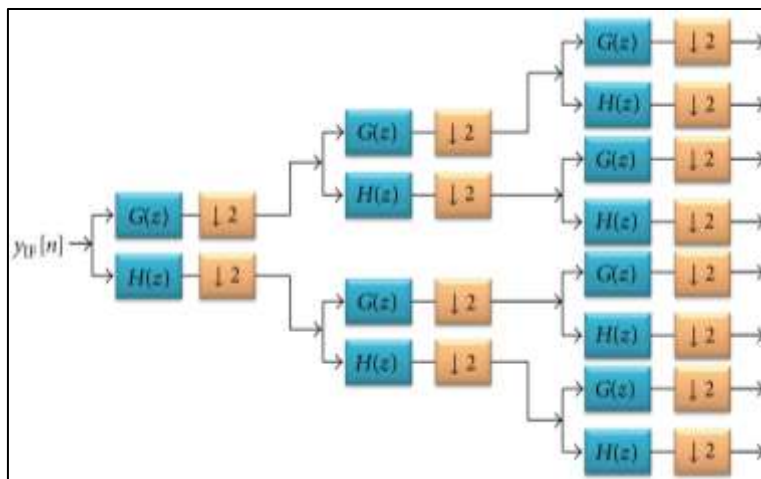
سامانه رادیوشناختگر همواره با هدف بهینه نمودن میزان کارایی سامانه مخابراتی و بهره‌وری میزان استفاده از طیف اقدام به تنظیم و به روز رسانی پارامترهای سامانه مخابراتی می‌نماید [۲۴]. یکی از مسائلی که می‌تواند باعث افت کیفیت مخابرات باشد، تداخل عمده (جمینگ) وارده از دشمن بر طیف مورد استفاده توسط سامانه مخابراتی خودی است. عمل شناسایی و ردیابی سیگنال جمینگ و چگونگی مقابله با اثر آن موضوع بسیار مهمی است. بنابراین لزوم به‌کارگیری الگوریتم‌هایی جهت حذف



شکل (۲): ساختار الگوریتم پیشنهادی جهت کاهش تداخل

می‌باشد، باند مناسب برای پردازش موجک انتخاب خواهد شد. سپس با استفاده از تبدیل موجک، یک ساختار چندوضوحی از سیگنال دارای تداخل ایجاد می‌شود. سپس بخش‌های شامل تداخل، شناسایی و تا حد ممکن، از سیگنال مطلوب، حذف می‌گردند. در نهایت بخش‌های مختلف تبدیل موجک به صورت معکوس تبدیل موجک با هم ترکیب شده و سیگنال اصلی از روی آن‌ها بازسازی می‌شود.

همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، سیگنال ورودی به صورت یک سیگنال تداخلی بوده و در بخش خروجی نیز سیگنالی را خواهیم داشت که میزان تداخل، در آن کاهش پیدا کرده است. از آن‌جا که قرار است از یک سیستم رادیوشناختگر استفاده گردد، عرض باند وسیع است. بنابراین با استفاده از بانک فیلتر میان‌گذر، باند سیگنال دریافتی در گیرنده رادیوشناختگر، به صورت چند زیرباند تقسیم شده و با توجه به سیگنال تداخلی که دارای باند باریک‌تری در مقایسه با سیستم رادیوشناختگر



شکل (۳): عملکرد تبدیل موجک در یک ساختار سه سطحی [۲۷]

### ۵- نتایج شبیه‌سازی

برای انجام شبیه‌سازی، لازم است که شبکه‌ای از کاربران رادیوشناختگر در یک مساحت مشخص، ایجاد گردند. این شبکه با تعداد ۲۵ کاربر ثانویه در نظر گرفته شده است. این کاربران در محدوده‌ای مربع شکل به مساحت  $200 \times 200$  مترمربع ( $m^2$ )

در شکل (۳) نیز نحوه عملکرد تبدیل موجک روی یک سیگنال ورودی در یک ساختار سه مرحله‌ای فیلترینگ، آورده شده است. در این شکل، به خوبی ساختار چندوضوحی از سیگنال اصلی قابل مشاهده است. می‌توان در هر بخش از خروجی‌های تبدیل موجک با اعمال تغییرات مناسب به حذف یا کاهش تداخل و جداسازی آن از سیگنال مطلوب پرداخت.

به صورت تصادفی پخش شده‌اند و همگی در مکان ثابتی (فاقد حرکت) قرار گرفته‌اند. همچنین در مختصات مکانی خود مستقر هستند.

فرض می‌شود که هر کاربر رادیو شناختگر دارای یک رادیوی دوطرفه است که می‌تواند به صورت همزمان به ارسال و دریافت داده بپردازد. توپولوژی شبکه با  $G(V,E)$  نشان داده می‌شود. در این ساختار، پارامتر  $V = \{1, 2, \dots, N\}$ ، نشان‌دهنده تعداد کاربران ثانویه (گره‌های شبکه یا نودها) می‌باشند. پارامتر  $E = \{e_{ij} | j \in N_i\}$  بیانگر مجموعه لینک‌های موجود در شبکه است.  $N_i$  نیز نماینده همسایه‌های یک نود مشخص است. واضح است که  $e_{ij}$  بیانگر لینک ارتباطی بین کاربران ثانویه  $i$  و  $j$  است. به طور فیزیکی وجود یک لینک در گراف شبکه براساس نسبت سیگنال به نویز ( $SNR$ ) در  $l$  امین کانال کاربران اولیه که در اختیار کاربران ثانویه قرار دارد، مشخص می‌شود. بر این اساس داریم:

فرض می‌شود که هر کاربر رادیو شناختگر دارای یک رادیوی دوطرفه است که می‌تواند به صورت همزمان به ارسال و دریافت داده بپردازد. توپولوژی شبکه با  $G(V,E)$  نشان داده می‌شود. در این ساختار، پارامتر  $V = \{1, 2, \dots, N\}$ ، نشان‌دهنده تعداد کاربران ثانویه (گره‌های شبکه یا نودها) می‌باشند. پارامتر  $E = \{e_{ij} | j \in N_i\}$  بیانگر مجموعه لینک‌های موجود در شبکه است.  $N_i$  نیز نماینده همسایه‌های یک نود مشخص است. واضح است که  $e_{ij}$  بیانگر لینک ارتباطی بین کاربران ثانویه  $i$  و  $j$  است. به طور فیزیکی وجود یک لینک در گراف شبکه براساس نسبت سیگنال به نویز ( $SNR$ ) در  $l$  امین کانال کاربران اولیه که در اختیار کاربران ثانویه قرار دارد، مشخص می‌شود. بر این اساس داریم:

$$SNR(i, j, l) = 10 \log_{10} \left( \frac{P_t L_{ijl}}{\sigma^2} \right) \quad (3)$$

که در این رابطه:

$$L_{ijl} = \frac{\lambda_l^2}{(4\pi d_{ij})^2} \quad (4)$$

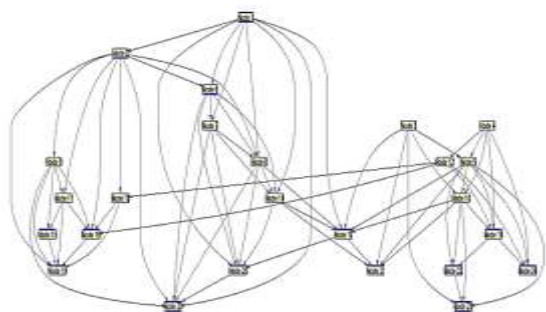
در این روابط، پارامتر  $L_{ijl}$  بیانگر ضریب تلفات مسیر،  $P_t$  بیانگر توان ارسالی توسط کاربر رادیو شناختگر (ما توان ارسالی را برای تمامی کاربران رادیو شناختگر بطور یکسان و ثابت در نظر می‌گیریم)،  $\lambda_l$  طول موج،  $f_l$  فرکانس مرکزی کانال  $l$  ام،  $\sigma^2$  نویز و بالاخره  $d_{ij}$  نشانگر فاصله بین کاربران نام و زام می‌باشند.

چنانچه مقدار  $SNR$  محاسبه شده برای دو کاربر ثانویه مشخص از یک سطح آستانه بیشتر باشد، آنگاه لینکی بین جفت گره متناظر در شبکه وجود خواهد داشت، در غیر این صورت هیچ لینک ارتباطی بین این دو کاربر وجود نخواهد داشت [۲۹]. یعنی داریم:

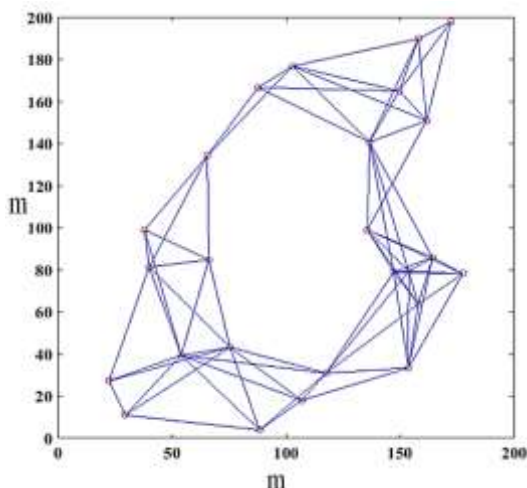
$$\text{if } SNR(i, j, l) \geq k \rightarrow e_{ij} = 1 \quad (5)$$

$$\text{if } SNR(i, j, l) \leq k \rightarrow e_{ij} = 0 \quad (6)$$

بنابراین، با توجه به مقدار  $SNR$  به دست آمده مربوط به هر دو گره مشخص درون شبکه، توپولوژی شبکه به دست خواهد آمد. یعنی مشخص خواهد شد که بین گره‌های شبکه در گراف، لینکی وجود دارد یا خیر. توان ارسالی هر کاربر رادیو شناختگر نیز در اینجا ۰/۵ وات در نظر گرفته شده و برای همگی یکسان می‌باشد. بر اساس مقدار آستانه که معادل با ۵ دسیبل می‌باشد و مقادیر

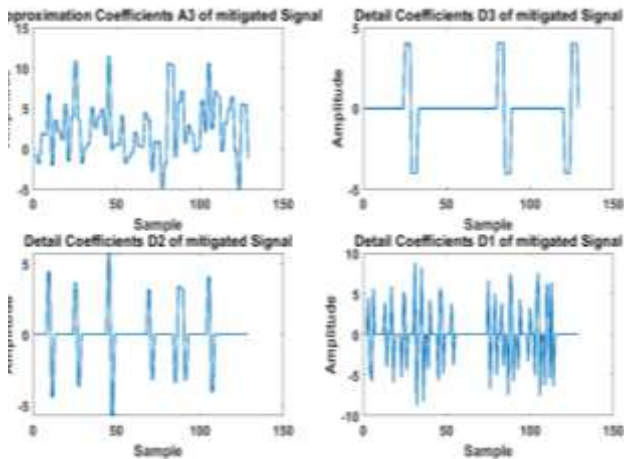


شکل (۴): شبکه رادیو شناختگر با ۲۵ کاربر ثانویه با ذکر شماره هر کاربر

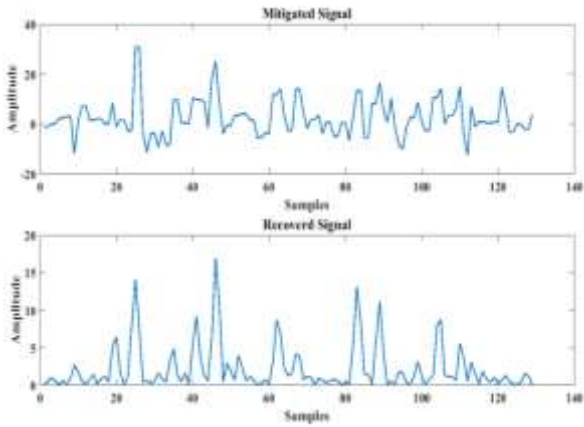


شکل (۵): گراف متناظر با شبکه رادیو شناختگر دارای ۲۵ کاربر ثانویه با موقعیت مکانی مشخص در یک مساحت مشخص برای مقیاس‌گذاری به منظور تغییر تعداد کاربران و یا مساحت تحت پوشش شبکه رادیو شناختگر می‌توان اعداد متناظر با هر یک را تغییر داد و شبکه مورد نظر را توسعه داد و یا اینکه کوچک‌سازی نمود. همچنین می‌توان با تغییر مقدار سطح توان ارسالی کاربران رادیو شناختگر تعداد لینک‌ها و یا ناحیه تحت پوشش را کاهش و یا افزایش داد.

به طور مثال اگر توان ارسالی فرستنده افزایش یابد، کاربران می‌توانند در فاصله دورتری از یکدیگر قرار داشته باشند و ناحیه تحت پوشش شبکه رادیو شناختی افزایش خواهد یافت. از طرفی با توجه به وابستگی مقدار  $SNR$  به مقدار توان ارسالی هر کاربر، با افزایش توان تعداد لینک‌های ارتباطی افزایش خواهند یافت.

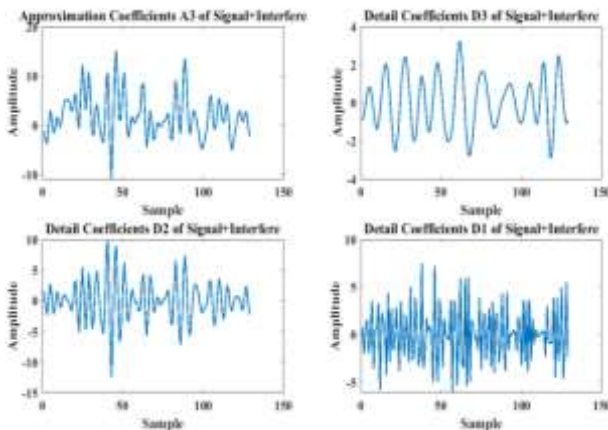


شکل (۹): ضرایب تقریب و جزئیات تبدیل موجک تا سطح ۳ برای سیگنال با تداخل کاهش‌یافته در حالت تداخل تک‌کاناله

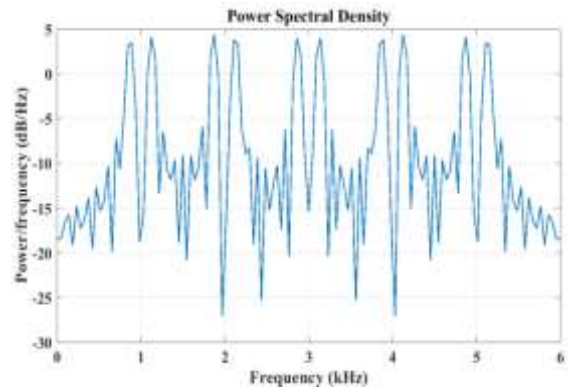


شکل (۱۰): سیگنال با تداخل کاهش‌یافته (بالا) و سیگنال بازیابی شده (پایین) با یک باند تداخلی

همین نتایج در مورد شبیه‌سازی‌های مربوط به اعمال تبدیل موجک رو سیگنال دارای تداخل دو کاناله، با تداخل کاهش‌یافته و همچنین بازیابی شده، تکرار شده که به‌ترتیب در شکل‌های (۱۱-۱۳) نمایش داده شده‌اند.

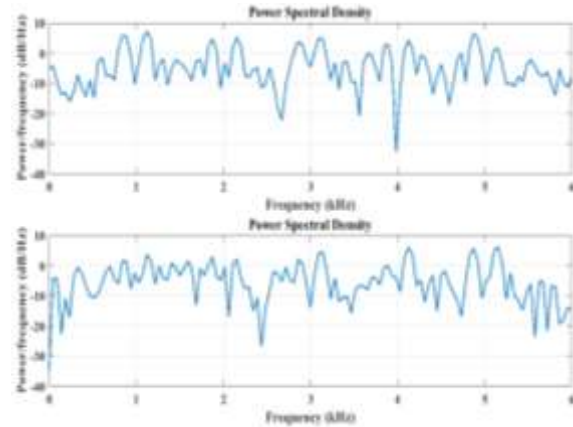


شکل (۱۱): ضرایب تقریب و جزئیات تبدیل موجک تا سطح ۳ برای سیگنال دارای دو باند تداخلی



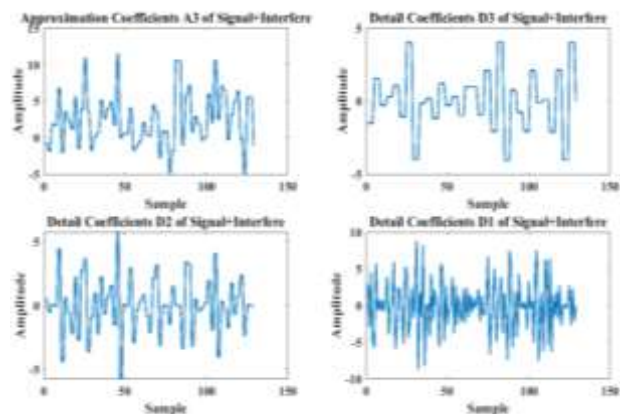
شکل (۶): سیگنال رادیو شناختگر کاربران ثانویه بدون جمینگ

در شکل (۶)، سیگنال کاربران رادیو شناختگر بدون اعمال جمینگ و در نمودارهای شکل (۷)، سیگنال جمینگ شده شبکه رادیوشناختگر در حالت جمر تک‌کاناله و دوکاناله نمایش داده شده‌اند.



شکل (۷): سیگنال جمینگ شده شبکه رادیوشناختگر در حالت جمر تک کاناله (بالا) و جمر دوکاناله (پایین)

نتایج شبیه‌سازی مربوط به اعمال تبدیل موجک رو سیگنال دارای تداخل تک‌کاناله، با تداخل کاهش‌یافته و همچنین بازیابی شده به ترتیب در شکل‌های (۸-۱۰) نمایش داده شده‌اند.



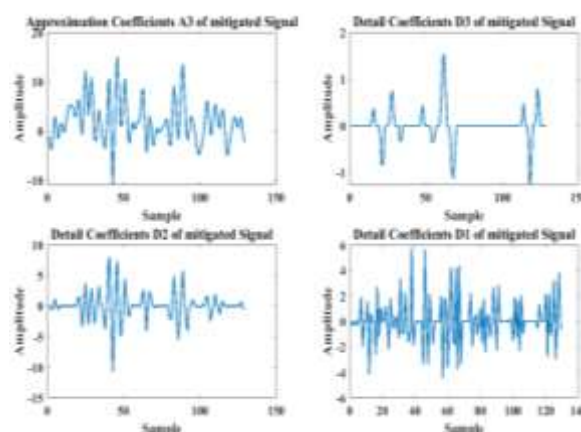
شکل (۸): ضرایب تقریب و جزئیات تبدیل موجک تا سطح ۳ برای سیگنال دارای یک باند تداخل



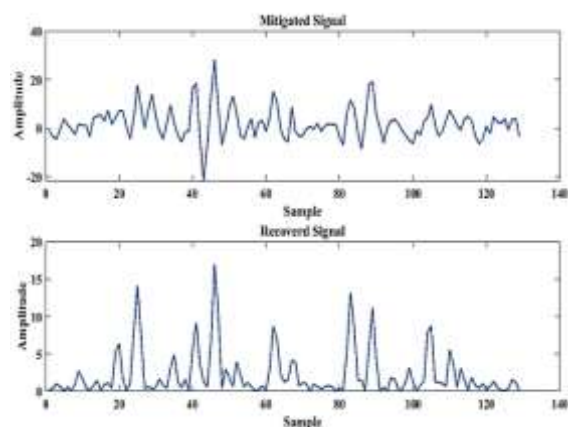
(ز) شبکه رادیوشناختگر با سیگنال تداخل کاهش یافته در یک باند تداخلی با الگوریتم NLMS

برای انجام شبیه‌سازی نهایی فرضیاتی در نظر گرفته شده است. موضوع اول، شبکه کاربران اولیه می‌باشد که کانال‌های در اختیار آن‌ها در زمان‌های مختلف در یکی از حالت‌های اشغال و یا آزاد می‌باشند. با انجام عملیات سنجش طیف مشخص می‌شود که در چه لحظاتی هر یک از کانال‌های فرکانسی کاربران اولیه به صورت آزاد و یا اشغال است. در حقیقت شناسایی حفره‌های طیفی با استفاده از سنجش طیف انجام می‌شود. خروجی مرحله سنجش (شناسایی) طیف، تعیین حفره‌های طیفی در هر لحظه از زمان می‌باشد. در این بخش به منظور داشتن یک مدل مشخص از وضعیت کانال‌های کاربران اولیه و نحوه فعالیت آن‌ها در استفاده از این کانال‌های فرکانسی، می‌توان از مدل‌های تصادفی استفاده کرد. در شبیه‌سازی‌های انجام شده، فعالیت کاربران اولیه به صورت زنجیره مارکوف مدل شده است. بدین مفهوم که در هر اسلات زمانی، احتمال حضور یا عدم حضور کاربر اولیه و یا به عبارتی دیگر احتمال وجود یا عدم وجود کانال فرکانسی خالی (سنجش طیف) با استفاده از زنجیره مارکوف مشخص شده است.

در خصوص شبکه کاربران رادیوشناختگر، هر کاربر به صورت یک فرستنده-گیرنده دوطرفه در نظر گرفته شده است؛ به این مفهوم که امکان ارسال و دریافت را خواهد داشت. در یک شبکه بیسیم رادیو شناختگر، بر اساس فاصله بین کاربران ثانویه، میزان سطح نویز، سطح توان ارسالی هر کاربر ثانویه و میزان تلفات مسیر مرتبط با مدل کانال، مشخص شده است که امکان برقراری ارتباط بیسیم بین کدام یک از کاربران ثانویه بر اساس کانال آزاد کاربر اولیه، وجود دارد. در حقیقت گراف ارتباطی مربوط به کاربران شبکه رادیو شناختگر با استفاده از این الگوریتم مدل می‌شود. ساده‌ترین و در عین حال یکی از پرکاربردترین مدل‌هایی که برای کانال می‌توان در نظر گرفت، مدل ساده کانال AWGN و بدون فیدینگ و سایه است. این مسئله در [۲۴-۲۶] بررسی شده است. در انجام شبیه‌سازی‌های این مقاله، نویز به صورت گوسی و کانال نیز به صورت کانال AWGN بدون فیدینگ و اثرات چندمسیرگی و داپلر، در نظر گرفته شده‌اند. بعد از اینکه برای کاربران رادیو شناختگر یک لینک برای ارسال به صورت فرصت‌طلبانه ایجاد شد، طراحی لایه شبکه و مسیریابی درون شبکه یکی از مهمترین و هوشمندانه‌ترین اعمال خواهند بود. مواردی نظیر کنترل جریان اطلاعات، مدیریت منابع، مدیریت تحرک کاربران شبکه که تا حد زیادی وابسته به نوع مسیریابی در شبکه رادیو شناختگر است، نیز در این لایه، مطرح هستند. یک نود شبکه رادیوشناختگر، یک نود با قابلیت دسترسی فعال به طیف و قابل برنامه‌ریزی برای کاربردهای چند رادیویی است [۲۹]. یک کاربر ثانویه همواره در حال جستجو بوده و از حفره‌های طیفی برای ارسال بسته‌های خود استفاده می‌کند. از این رو کاملاً



شکل (۱۲): ضرایب تقریب و جزئیات تبدیل موجک تا سطح ۳ برای سیگنال با دو باند تداخلی کاهش یافته



شکل (۱۳): سیگنال با تداخل کاهش یافته (بالا) و سیگنال بازیابی شده (پایین) با دو باند تداخلی

در ادامه و پس از ایجاد شبکه رادیوشناختگر، به ارسال و دریافت اطلاعات درون شبکه پرداخته شده است. نتایج شبیه‌سازی برای بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی در ۷ حالت مختلف بر اساس معیار نرخ خطای بیت در ادامه آورده شده است. این پنج حالت شامل سناریوهای زیر می‌باشند:

(الف) شبکه رادیوشناختگر بدون اعمال جمینگ

(ب) شبکه رادیوشناختگر با حضور سیگنال جمر با تک باند تداخلی

(ج) شبکه رادیوشناختگر با حضور سیگنال جمر با دو باند تداخلی

(د) شبکه رادیوشناختگر با سیگنال تداخل کاهش یافته در یک باند تداخلی با الگوریتم پیشنهادی

(ه) شبکه رادیوشناختگر با سیگنال تداخل کاهش یافته در دو باند تداخلی با الگوریتم پیشنهادی

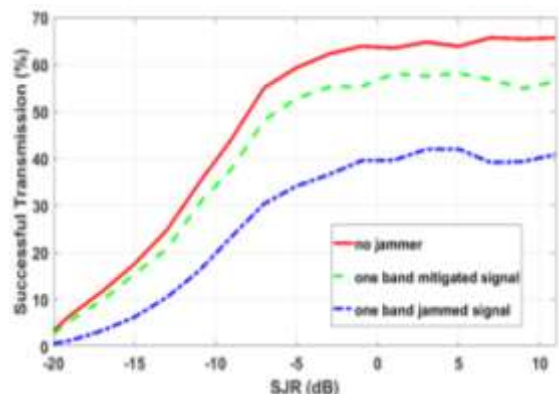
(و) شبکه رادیوشناختگر با سیگنال تداخل کاهش یافته در دو باند تداخلی با الگوریتم NLMS

تداخل جمینگ دوکاناله با الگوریتم پیشنهادی (نقطه‌چین)، سیگنال کاهش داده شده از تداخل جمینگ تک کاناله با الگوریتم NLMS (مارکر مثلثی) و سیگنال کاهش داده شده از تداخل جمینگ دوکاناله با الگوریتم NLMS (نقطه‌چین با مارکر دایره)، نشان داده شده است و عملکرد مناسب الگوریتم پیشنهادی به خوبی قابل مشاهده است.

با توجه به این نمودارها، بهترین درصد ارسال موفق در حالت بدون جمینگ در یک شبکه رادیوشناختگر وجود دارد. البته باید توجه نمود که چون کانال‌های مورد استفاده کاربران ثانویه، به صورت فرصت‌طلبانه از کاربران اولیه اخذ می‌شود، با توجه به مارکوف بودن فعالیت کاربران اولیه، در زمان ارسال در مواقعی با توجه به حضور مجدد کاربر اولیه کانال اشغال شده و از اختیار کاربر ثانویه خارج می‌شود و این سبب ارسال ناموفق اطلاعات در شبکه می‌شود. به همین خاطر نیز میزان ارسال موفق نیز حتی در حالت بدون جمینگ، صد در صد نمی‌باشد. البته این به شرایط کانال و پارامترهای شبکه بستگی دارد.

در زمان حضور جمینگ، اگر شبکه غیرشناختی باشد، ممکن است درصد ارسال موفق بسیار پایین باشد، زیرا که در یک سیستم غیرشناختی کانال فرکانسی به صورت ثابت می‌باشد. اما در یک شبکه شناختگر، با توجه به وجود کانال‌های متعدد که در باندهای مختلف قرار دارند، حتی در صورت جمینگ یک کانال ارتباطی، یک کاربر ثانویه می‌تواند از کانال‌های موجود دیگر استفاده نماید.

بنابراین یک شبکه رادیوشناختگر می‌تواند به عنوان یک سیستم ارتباطی مقاوم در برابر جمینگ عمل نماید. نمودار نقطه-خط‌چین نیز این موضوع را تأیید می‌نماید. زیرا علی‌رغم جمینگ، درصد ارسال موفق در شبکه همچنان قابل قبول است. اگر چه این میزان از موفقیت نسبت به حالات دیگر فاصله قابل توجهی دارد.



شکل (۱۴): درصد موفقیت در ارسال اطلاعات از یک کاربر به یک کاربر

دیگر بر حسب سیگنال به تداخل در جمینگ تک کاناله با

الگوریتم پیشنهادی

مشخص است که مسئله اصلی در لایه شبکه، چگونگی انجام مسیریابی خواهد بود. در این مقاله برای انجام مسیریابی و به منظور ارسال داده‌ها از الگوریتم DSR<sup>۱</sup> استفاده شده است [۳۰-۳۲]. در این الگوریتم، منبع، تنها در زمانی که داده‌ای برای ارسال داشته باشد، مسیر به طرف مقصد را تعیین می‌کند. در نتیجه می‌توان گفت این الگوریتم بر اساس تقاضا عمل می‌کند. این الگوریتم از سه نوع بسته کنترل RREQ<sup>۲</sup>، RREP<sup>۳</sup> و RERR<sup>۴</sup> استفاده می‌کند. هر گاه یک گره برای ارسال، داده‌ای داشته باشد، به گره‌های اطراف خود بسته RREQ با مفهوم این که درخواست مسیر بین خود و گره مقصد را دارد، به همسایه‌های خود ارسال می‌کند. گره‌های میانی نیز همین عملیات را برای همسایگان خود ارسال کرده تا سرانجام به گره مقصد برسد. هر گره‌ای که بسته RREQ را دریافت کرد، اطلاعات خود را بر مبنای فرستنده و گیرنده به روز می‌کند و نشانگر RREP را در جهت فرستنده جهت ارسال تأیید مسیر به وجود می‌آورد. در ادامه هر گره با دریافت این پیغام، همان را با شمارنده به روز شده به همسایه‌های خود ارسال می‌کند. در صورت رسیدن پیغام به مقصد، مقصد پیغام تأیید دریافت و یا عدم دریافت در صورت عدم تمایل و پر بودن بافر، در مسیری که آن را دریافت کرده بود، RERR ارسال می‌کند. پس از تعیین مسیر اطلاعات از مبدأ به سمت مقصد ارسال می‌شود.

در زمان ارسال نیز اگر به هر دلیل (از جمله تصادفی بودن شرایط کانال در اختیار کاربر ثانویه با توجه به حضور یا عدم حضور کاربران اولیه، از بین رفتن کاربر ثانویه، بالا رفتن سطح نویز و یا تداخل) پس از اطمینان کاربران همسایه از عدم حضور سایر کاربران، مسیر به روزسانی می‌شود. البته ممکن است در اثر هر یک از این موارد و یا تمام شدن نیمه‌عمر اطلاعات هر بسته درون شبکه، اطلاعات از بین روند که منجر به ارسال موفق اطلاعات از فرستنده به گیرنده نخواهد شد. در این مقاله نیز کاربران رادیو شناختگر به صورت مکان ثابت فرض شده‌اند. بر اساس مفروضات بیان شده در این قسمت، در شکل‌های (۱۴) تا (۱۷)، نمودارهای مربوط به درصد ارسال موفق در یک شبکه ۲۵ کاربره بر حسب نسبت سیگنال به تداخل در حالت‌های مختلف نمایش داده شده‌اند.

در شکل (۱۸)، نمودار تجمیعی درصد موفقیت در ارسال اطلاعات از یک کاربر به یک کاربر دیگر بر حسب سیگنال به تداخل در ۷ حالت بدون جمینگ (خط)، حضور جمینگ تک کانال (نقطه-خط‌چین)، سیگنال کاهش داده شده از تداخل جمینگ تک کاناله با الگوریتم پیشنهادی (خط‌چین)، حضور جمینگ دو کاناله (مارکدار ضربدر)، سیگنال کاهش داده شده از

<sup>۱</sup> Dynamic Source Routing

<sup>۲</sup> Route Request

<sup>۳</sup> Route Reply

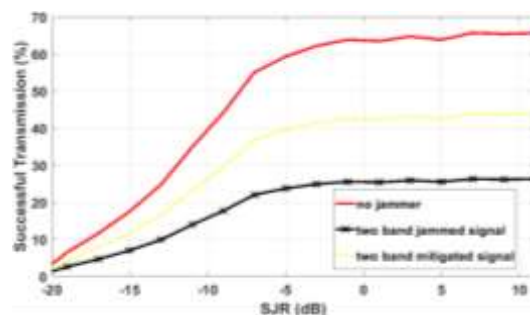
<sup>۴</sup> Route Error

با توجه به شکل (۱۸)، عملکرد الگوریتم پیشنهادی در کاهش اثر تداخل بسیار مطلوب بوده است. همان طور که دیده می شود عملکرد این الگوریتم باعث شده تا ارسال موفق اطلاعات قابل قبول باشد و فاصله چندانی با حالت بدون جیمینگ نداشته باشد. همچنین در مقایسه الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم های NLMS [۳۳، ۳۴]، LMS و RLS [۳۵] مشاهده می شود که الگوریتم از موفقیت بالایی برخوردار است.

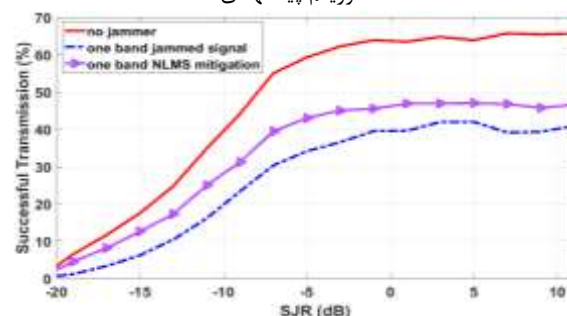
در پایان نیز به منظور مقایسه کمی نمودارهای نشان داده شده در شکل (۱۸)، جدول ۱ احصاء شده است. در این جدول درصد ارسال موفق هر یک از ۱۱ حالت مختلف نشان داده شده در شکل (۱۸)، در مقادیر مختلف SJR برابر با -۱۵، -۱۱، -۷، -۳، ۱ و ۵ دسیبل آورده شده اند. این مقادیر عملکرد بسیار خوب الگوریتم پیشنهاد شده در این مقاله را نشان می دهند.

جدول (۱): درصد موفقیت در ارسال اطلاعات از یک کاربر به یک کاربر دیگر بر حسب سیگنال به جمر

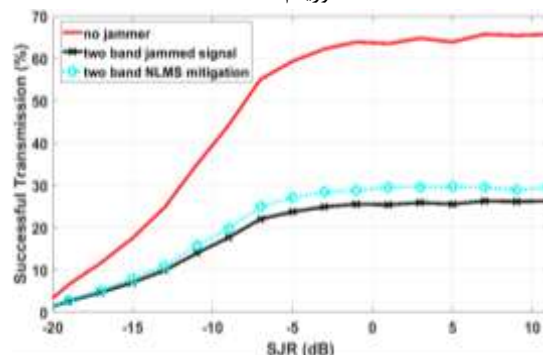
سیگنال داده شده از تداخل جیمینگ تک کاناله با الگوریتم پیشنهادی	۵ دسیبل	۱ دسیبل	-۳ دسیبل	-۷ دسیبل	-۱۱ دسیبل	-۱۵ دسیبل
بدون جیمینگ	٪۶۳/۸۶	٪۶۲/۴۸	٪۶۲/۲۲	٪۵۵/۰۵	٪۳۴/۸۳	٪۱۷/۵۳
حضور جیمینگ تک کاناله	٪۴۱/۹۹	٪۳۹/۶۱	٪۳۶/۵۵	٪۳۰/۳۴	٪۱۶/۱۱	٪۶/۲۲
حضور جیمینگ دو کاناله	٪۲۵/۵۴	٪۲۵/۳۹	٪۲۴/۸۹	٪۲۲/۰۲	٪۱۳/۹۳	٪۷/۰۱
سیگنال کاهش داده شده از تداخل جیمینگ تک کاناله با الگوریتم پیشنهادی	٪۵۸/۱۶	٪۵۸/۰۵	٪۵۵/۲۱	٪۴۸/۱۴	٪۳۰/۴۸	٪۱۵/۴
سیگنال کاهش داده شده از تداخل جیمینگ تک کاناله با الگوریتم NLMS	٪۴۷	٪۴۶/۸۵	٪۴۵/۰۴	٪۳۹/۴۸	٪۲۴/۹۹	٪۱۲/۶۱
سیگنال کاهش داده شده از تداخل جیمینگ تک کاناله با الگوریتم LMS	٪۴۹	٪۴۸/۲۳	٪۴۶/۱۱	٪۴۲/۵۷	٪۲۵/۳۷	٪۱۲/۲۵



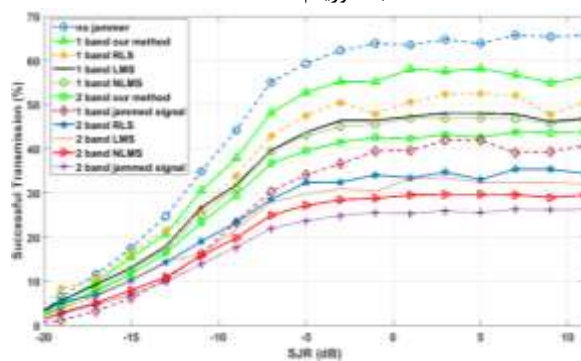
شکل (۱۵): درصد موفقیت در ارسال اطلاعات از یک کاربر به یک کاربر دیگر بر حسب سیگنال به تداخل در جیمینگ دو کاناله با الگوریتم پیشنهادی



شکل (۱۶): درصد موفقیت در ارسال اطلاعات از یک کاربر به یک کاربر دیگر بر حسب سیگنال به تداخل در جیمینگ تک کاناله با الگوریتم NLMS



شکل (۱۷): درصد موفقیت در ارسال اطلاعات از یک کاربر به یک کاربر دیگر بر حسب سیگنال به تداخل در جیمینگ دو کاناله با الگوریتم NLMS



شکل (۱۸): درصد موفقیت در ارسال اطلاعات از یک کاربر به یک کاربر دیگر بر حسب سیگنال به تداخل در ۱۱ سناریو مختلف

شبیه‌سازی‌های انجام شده، از یک سیستم رادیوشناختگر با ۲۵ کاربر به عنوان شبکه قربانی استفاده گردید. این شبکه در مجاورت شبکه‌ای از کاربران اولیه با مدل کانال مارکوف، استفاده شد. با در نظر گرفتن یازده سناریو مختلف به بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی پرداخته شد و برای بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی از معیار ارسال موفق اطلاعات بر حسب نسبت سیگنال به جمر، پرداخته شد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، الگوریتم پیشنهادی، در مقایسه با الگوریتم‌های تطبیقی NLMS، LMS و RLS، بهبود قابل ملاحظه‌ای را از خود نشان می‌دهد.

## ۷- مراجع

- [1] Y. Liang, K. Chen, G. Li, and P. Mahonen, "Cognitive radio networking and communications: An overview," Vehicular Technology, IEEE Transactions on, vol. 60, no. 7, pp. 3386–3407, 2011.
- [2] Q. Zhao and B. Sadler, "A survey of dynamic spectrum access," Signal Processing Magazine, IEEE, vol. 24, no. 3, pp. 79–89, 2007.
- [3] I. Akyildiz, W. Lee, M. Vuran, and S. Mohanty, "A survey on spectrum management in cognitive radio networks," Communications Magazine, IEEE, vol. 46, no. 4, pp. 40–48, 2008.
- [4] S. Haykin, D. Thomson, and J. Reed, "Spectrum sensing for cognitive radio," Proceedings of the IEEE, vol. 97, no. 5, pp. 849–877, 2009.
- [5] J. Guo, J. Li and Q. Lv, "Survey on Radar ECCM Methods and Trends in its Developments," 2006 CIE International Conference on Radar, Shanghai, 2006, pp. 1-4. doi: 10.1109/ICR.2006.343210.
- [6] M. Lv and L. Wang, "Research on the Efficiency of the Chaff Jamming Corridor," 2017 4th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE), Changsha, 2017, pp. 1673-1676. doi: 10.1109/ICISCE.2017.349.
- [7] R. D. Pietro and G. Oligeri, "Jamming mitigation in cognitive radio networks," in IEEE Network, vol. 27, no. 3, pp. 10-15, May-June 2013, doi: 10.1109/MNET.2013.6523802.
- [8] F. Slimeni, B. Scheers, Z. Chtourou and V. Le Nir, "Jamming mitigation in cognitive radio networks using a modified Q-learning algorithm," 2015 International Conference on Military Communications and Information Systems (ICMCIS), Cracow, Poland, 2015, pp. 1-7, doi: 10.1109/ICMCIS.2015.7158697.
- [9] Dabcevic, K., Betancourt, A., Marcenaro, L. et al. Intelligent cognitive radio jamming - a game-theoretical approach. EURASIP J. Adv. Signal Process. 2014, 171 (2014). <https://doi.org/10.1186/1687-6180-2014-171>
- [10] H. Pirayesh and H. Zeng, "Jamming Attacks and Anti-Jamming Strategies in Wireless Networks: A Comprehensive Survey", arXiv:2101.00292v1, Jan., 2021.

ادامه جدول (۱): درصد موفقیت در ارسال اطلاعات از یک کاربر به یک کاربر دیگر بر حسب سیگنال به جمر

سیگنال کاهش داده شده از تداخل جمینگ تک‌کاناله با الگوریتم RLS	%۱۳/۸۷	%۲۷/۶۰	%۴۵/۱۲	%۴۷/۹۱	%۴۹/۶۸	%۵۱
سیگنال کاهش داده شده از تداخل جمینگ دوکاناله با الگوریتم پیشنهادی	%۱۱/۶۸	۲۳/۲۲ %	۳۶/۷۰ %	%۴۱/۴۹	%۴۲/۳۲	%۴۲/۵۷
سیگنال کاهش داده شده از تداخل جمینگ دوکاناله با الگوریتم NLMS	%۷/۹۶	%۱۵/۷۹	۲۴/۹۵ %	%۲۸/۴۴	%۲۹/۵۲	%۲۹/۶۳
سیگنال کاهش داده شده از تداخل جمینگ دوکاناله با الگوریتم LMS	%۸/۱۸	%۱۶/۴۴	۲۶/۷۳ %	%۳۱/۹۳	%۳۵/۲۹	%۳۹/۱۴
سیگنال کاهش داده شده از تداخل جمینگ دوکاناله با الگوریتم RLS	%۹/۳۳	%۱۶/۷۵	۲۷/۷۸ %	%۳۴/۴۰	%۳۶/۳۹	%۴۰/۶۴

## ۶- نتیجه‌گیری و مقایسه

یکی از عوامل مخرب در سامانه‌های مخابراتی و راداری، تداخل عمدی است. تداخل عمدی با استفاده از جمر به منظور تخریب عملکرد سامانه‌های ارتباطی و راداری دشمن ایجاد می‌شود. اگر تداخل عمدی به خوبی کاهش داده نشود، کارایی سامانه مخابراتی به‌طور کامل مختل می‌گردد. امروزه الگوریتم‌های مختلفی جهت حذف تداخل به‌کار می‌روند. برخی از این الگوریتم‌ها براساس فیلترهای تطبیقی و با به روز رسانی وزن‌های خود به شناسایی و حذف تداخل می‌پردازند. در این مقاله الگوریتمی جدید برای حذف تداخل عمدی در سامانه‌های رادیوشناختگر با استفاده از تبدیل موجک ارائه شد. در

- [23] I. Mitola, J. and J. Maguire, G. Q., "Cognitive radio: making software radios more personal," *IEEE Personal Communications*, vol. 6, no. 4, pp. 13-18, Aug. 1999.
- [24] S. Haykin, "Cognitive radio: brain-empowered wireless communications," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 23, no. 2, pp. 201-220, Feb. 2005.
- [25] G. Cheng, W. Liu, Y. Li, and W. Cheng, "Joint on-demand routing and spectrum assignment in cognitive radio networks," in *Proc. of IEEE International Conference on Communications*, Jun. 2007, pp. 6499-6503.
- [26] Li Tong, Tang Yinhui and Lv Jun, "Parameter estimation of FH signals based on STFT and music algorithm," *2010 International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCSM 2010)*, Taiyuan, 2010, pp. V5-232-V5-236. doi: 10.1109/ICCSM.2010.5619186
- [27] Wang, D., Safavi, A.A. and Romagnoli, J.A. "Wavelet-based adaptive robust M-estimator for non-linear system identification", *AIChE Journal*, Vol. 46, No. 8, pp. 1607-1615, August (2000).
- [28] Won Lee, J., "Noise Reduction in Wavelet Domain", EE368, Digital image processing class project, (2000).
- [29] Ebrahimi Sookht Abandani, A. and Bayat, M. "Interference Mitigation in cognitive Radio Communication Systems Based on Wavelet Transform", Msc. These, Sattari University, Octobre 2020 (in Persian).
- [30] L. Ding, T. Melodia, S. Batalama, I. Matyjas, and M. Medley, "Crosslayer routing and dynamic spectrum allocation in cognitive radio ad-hoc networks," *IEEE Trans. Vehicular Technology*, vol. 59, no. 4, pp. 1969-1979, May 2010.
- [31] Q. Zhao, L. Tong, A. Swami, and Y. Chen, "Decentralized cognitive mac for opportunistic spectrum access in ad hoc networks: A pomdp framework," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 25, no. 3, pp. 589-600, Apr. 2007.
- [32] S. N. Keshavarz, M. A. Kakhki, M. G. Omali et al., "A novel UWB pulse design method using particle swarm optimization algorithm," *Scientific Research and Essays*, vol. 5, no. 20, pp. 3049-3058, Oct 18, 2010.
- [33] Z. Hao, C. Liu and Q. Zhou, "An Improved NLMS Algorithm for Interference Cancellation," *2019 IEEE 3rd Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC)*, Chongqing, China, 2019, pp. 327-331, doi: 10.1109/IMCEC46724.2019.8984040.
- [34] Dai, Jing & Han, Zhonghua & Zhang, Feng. (2012). Research on the Interference Cancellation Based on Adaptive Algorithms. *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*. 5. 18-25. 10.22266/ijies2012.1231.03.
- [11] Grover, Kanika & Lim, Alvin & Yang, Qing. (2014). Jamming and anti-jamming techniques in wireless networks: A survey. *International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing*. 17. 197. 10.1504/IJAHUC.2014.066419.
- [12] Bayat, M.; Madani, M.H. "Design and Simulation of a linear adaptive system to remove the CWI in Loran navigation system receivers"; *J. Advanced Defence Sci. & Tech*. 2018, 5, 50-62.
- [13] Bayat, M., "Analysis and simulation of noise reduction using wavelet transform for detecting defects in materials," *Scientific Journal of Information and communication Technology and Law Enforcement (ICT) on Vol.1. No.3*, 2020.
- [14] L. Run-hua and K. Duan, "Barrage Noise Jamming Suppression methods for Airborne phased array radar" *IET International Conf. on Radar*, Guillin, China, Apr. 2009, pp.333-339.
- [15] Bayat, M.; Madani, M.H. "Analysis and Simulation of a Hybrid Filter to Cancel Cross Rate Interference in Loran System"; *J. Advanced Defence Sci. & Tech*. 2017, 4, 51-60.
- [16] Teja MVSR, K. Meghashyam and A. Verma, "Comprehensive analysis of LMS and NLMS algorithms using adaptive equalizers," *2014 International Conference on Communication and Signal Processing, Melmaruvathur*, 2014, pp. 1101-1104. doi: 10.1109/ICCSP.2014.6950018.
- [17] Quan, Houde & Zhao, Huan & Cui, Peizhang. (2014). Anti-jamming Frequency Hopping System Using Multiple Hopping Patterns. *Wireless Personal Communications*. 81. 1159-1176. 10.1007/s11277-014-2177-1.
- [18] Teimouri, M. and Kakaei Motlagh, H. R. and Garshasbi, J., "Blind Identification of Communications Networks in Service Layer," *Scientific Journal of Passive Defense Quarterly*, vol. 10, no. 4, pp. 91-101, Imam Hossein University, 2019.
- [19] Bayat, M.; Madani, M.H. "A New Algorithm For Synchronous Continuous Wave Interference Cancellation in Loran Navigation System," *J. of Electronical & Cyber Defence*, vol. 4, no. 2, pp. 23-38, 2016.
- [20] C. Y. Guo and J. P. Li, "Development and future of wavelet analysis," *2013 10th International Computer Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing (ICCWAMTIP)*, Chengdu, 2013, pp. 335-338. doi: 10.1109/ICCWAMTIP.2013.6716661
- [21] Yang Lin, Wang Chong-yang and Z. Wu, "Research on the selection of wavelet bases for wavelet-based signal trend elimination," *2012 International Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing (ICWAMTIP)*, Chengdu, 2012, pp. 20-24. doi: 10.1109/ICWAMTIP.2012.6413430
- [22] S. N. Keshavarz, S. Hajizadeh, M. Hamidi and M. G. Omali, "A Novel UWB Pulse Waveform Design Method," *2010 Fourth International Conference on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies*, Amman, 2010, pp. 168-173.