JIPET

Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology
Vol. 17/ No. 66/ Summer 2026
P-ISSN: 2322-3871, E-ISSN: 2345-5594, http://jipet.iaun.ac.ir/

https://dorl.net/dor/20.1001.....
Research Article

Automatic Link Maintenance in High Frequency Radio Networks through Cognitive Frequency Hopping Technique

Masoud Khodaverdizadeh, ***Ph.D. Student,*** **Afrooz Haghbin,** ***Assistant Professor,*** **Farbod Razzazi,** ***Associate Professor***

Department of Mechanical, Electrical and Computer Engineering- Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
masoud.khodaverdizadeh@srbiau.ac.ir, a.haghbin@srbiau.ac.ir, razzazi@srbiau.ac.ir

Abstract
One of the ways to increase the reliability of communication in high frequency (HF) radio networks is to use automatic link establishment and maintenance methods using frequency hopping techniques. After the frequency hopping link establishment, it is necessary to constantly check the status of the established link, Due to the interference conditions in the HF frequency band. Then, if the efficiency of the system decreases, necessary measures are taken to change the frequency channels used for data transmission. In this paper, the frequency hopping based automatic link maintenance (FH-ALM) method is used to solve this problem. Due to the possibility of disrupting the frequency hopping pattern used for data transmission by smart jammers, in the proposed method to deal with the interference effects of the channel and mentioned type of jammers, the cognitive frequency hopping method is used to select a new frequency hopping pattern by using an intelligent algorithm. Moreover, during data transmission, the status of frequency channels is constantly checked and the desired frequency hopping sequence is selected for the next frequency hopping period. Finally, assuming the existence of a smart jammer, the performance of the proposed automatic link maintenance system is checked in comparison with the situation where the frequency hopping pattern is randomly selected among the suitable frequency channels for communication. By simulating the proposed cognitive frequency hopping method, it is found that the use of the proposed method improves the performance of the automatic link maintenance system by more than 5 dB compared to the existing methods.

Keywords: automatic link maintenance, cognitive frequency hopping, frequency hopping pattern, high frequency radio network

Received: 18 June 2023
Revised: 16 September 2023
Accepted: 21 October 2023

Corresponding Author: Dr. Afrooz Haghbin

Citation: M. Khodaverdizadeh, A. Haghbin, F. Razzazi, "Automatic link maintenance in high frequency radio networks through cognitive frequency hopping technique", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 17, no. 66, pp. 1-16, September 2026 (in Persian).

https://dorl.net/dor/20.1001.....
مقاله پژوهشی

نگه‌داری خودکار از لینک ارتباطی در شبکه‌های رادیویی فرکانس بالا با استفاده از روش پرش‌فرکانسی شناخت‌گر

مسعود خداوردی‌زاده، دانشجوی دکتری. افروز حق‌بین، استادیار، فربد رزازی، دانشیار

دانشکده مکانیک، برق و کامپیوتر- واحد علوم تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
masoud.khodaverdizadeh@srbiau.ac.ir, a.haghbin@srbiau.ac.ir, razzazi@srbiau.ac.ir

چکیده: یکی از راه‌های افزایش قابلیت اطمینان در برقراری ارتباط در شبکه‌های رادیویی فرکانس بالا (HF)، استفاده از روش‌های برقراری و نگه‌داری خودکار از لینک با استفاده از تکنیک‌های پرش‌فرکانسی است. با توجه به شرایط تداخلی در باند HF، پس از برقراری لینک پرش‌فرکانسی، لازم است تا دائما وضعیت لینک برقرارشده را بررسی کرده و در صورت کاهش کارایی سیستم، نسبت به تغییر کانال‌های فرکانسی مورد استفاده برای ارسال داده اقدامات لازم انجام شود. در این مقاله از روش نگه‌داری خودکار از لینک پرش فرکانسی (FH-ALM) برای حل این مسئله استفاده می‌شود. با توجه به امکان ایجاد اختلال در الگوی پرش‌فرکانسی مورد استفاده برای ارسال داده توسط جمرهای هوشمند، در روش پیشنهادی برای مقابله با اثرات تداخلی کانال و این نوع جمرها از روش پرش‌فرکانسی شناخت‌گر برای انتخاب الگوی جدید پرش‌فرکانسی استفاده می‌شود و با استفاده از یک الگوریتم هوشمند در حین ارسال داده، وضعیت کانال‌های فرکانسی دائما بررسی شده و دنباله‌ی پرش فرکانسی مورد نظر برای دوره آتی پرش‌فرکانسی انتخاب می‌شود. در نهایت با فرض وجود یک جمر هوشمند، عملکرد سیستم نگه‌داری خودکار از لینک پیشنهادی، در مقایسه با وضعیتی که الگوی پرش‌فرکانسی بصورت تصادفی از بین کانال‌های فرکانسی مناسب برای ارتباط انتخاب می‌شود، بررسی می‌گردد. با شبیه‌سازی روش پرش‌فرکانسی شناخت‌گر پیشنهادی، مشخص می‌شود که استفاده از این روش بیش از ۵ دی‌بی عملکرد سیستم نگه‌داری خودکار از لینک را در شرایط اختلال هوشمند نسبت به روش‌های موجود، بهبود می‌بخشد.

کلمات کلیدی: پرش فرکانسی شناخت‌گر، شبکه رادیویی فرکانس بالا، الگوی پرش‌فرکانسی، نگه‌داری خودکار لینک

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۳/۲۸
تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۶/۲۵
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۷/۲۹

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر افروز حق‌بین
نشانی نویسنده‌ی مسئول: تهران- دانشکده مکانیک، برق و کامپیوتر- دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات

۱- مقدمه

با برقراری ارتباط در باند فرکانس بالا[۱] (HF)، می‌توان بدون نیاز به استفاده از روش‌هایی مانند ارتباطات ماهواره‌ای، امکان ایجاد ارتباط در پوشش جهانی به‌وجود آورد. کانال‌های فرکانسی موجود در شبکه ارتباطی HF به دلیل تغییرات سریع در باند یونسفر و همچنین وجود اختلال‌های عمدی و غیرعمدی، با مخاطراتی روبرو هستند که باعث کاهش کارایی در برقراری ارتباط می‌شود. برای مقابله با این مخاطرات، راه‌کارهای مختلفی از جمله استفاده از روش‌های پرش‌فرکانسی، استفاده از روش برقراری خودکار لینک[۲] (ALE) و همچنین استفاده از روش‌های هوشمندسازی در ارتباطات مانند یادگیری ماشین و روش‌های شناخت‌گر، معرفی شده‌اند که به واسطه آن‌ها قابلیت اطمینان در برقراری ارتباط افزایش می‌یابد [۱]. برای افزایش قابلیت اطمینان در ایجاد ارتباط در باند HF، امکان استفاده از هرکدام از این روش‌ها در سیستم‌های ارتباطی وجود دارد. در این راستا در مرجع [۲] سیستمی با عنوان سیستم کنترل رادیویی خودکار[۳] (ARCS) معرفی شده که با استفاده از آن، رادیو در باند HF از میان لیستی از کانال‌های از پیش تعریف شده، بهترین کانال ارتباطی را انتخاب نموده و لینک را به‌طور خودکار برقرار می‌کند. در ادامه نیز به‌صورت خودکار از لینک ارتباطی محافظت می‌کند تا این ارتباط، قابلیت اطمینان بیشتری داشته باشد. یک سیستم ARCS شامل سه بخش انتخاب خودکار کانال[۴] (ACS)، برقراری خودکار لینک و نگه‌داری خودکار از لینک[۵] (ALM) است. ابتدا در بخش ACS، لیستی از کانال‌های مناسب برای برقراری ارتباط به واسطه‌ی استفاده از روش‌هایی همچون صدازدن کانال[۶]، پیش‌بینی وضعیت انتشاری کانال و یا با استفاده از مقادیر گذشته کیفیت لینک‌های ارتباطی، انتخاب می‌شود. در مرحله بعد در بخش ALE، گره‌های مختلف برای برقراری خودکار لینک در شبکه ارتباطی HF، با هم در تعامل خواهند بود. این گره‌ها، امکان برقراری ارتباط را در کانال‌هایی که در بخش ACS انتخاب شده و به‌صورت پیش‌فرض در لیست اسکن قرار گرفته‌اند، بررسی می‌کند. با توجه به شرایط ارتباطی در کانال‌های لیست اسکن و ویژگی‌های مورد نظر کاربر، کانالی که مطلوب‌ترین وضعیت را دارد، انتخاب شده و لینک ارتباطی برقرار می‌شود. در ادامه نیز در کانال انتخابی، گره‌ها شروع به ارسال و دریافت داده می‌کنند. در باند HF، به مرور زمان شرایط انتشاری کانال تغییر پیدا می‌کند و باعث ایجاد تداخلات غیرعمدی در لینک مورد نظر می‌شود. همچنین ممکن است به واسطه حضور جمر، تداخلات عمدی در لینک ارتباطی به‌وجود بیاید. این موارد می‌تواند باعث کاهش کیفیت در ارتباط شده و لینک ارتباطی را مختل نماید. همچنین در صورتی‌که تعداد کانال‌های ارتباطی برای برقراری لینک بین گره‌ها محدود باشد، به‌راحتی امکان ایجاد اختلال در لینک ارتباطی وجود خواهد داشت و با استفاده از جمرهای ساده، می‌توان این اختلال را ایجاد نمود. با این شرایط، نیاز است وضعیت ارتباطی لینک مورد نظر، به‌صورت دائمی رصد شده و در صورت کاهش کیفیت، اقدام به برقراری مجدد لینک در کانال دیگری با وضعیت ارتباطی مناسب‌تر نماییم. این وظیفه بر عهده بخش ALM است. در ادامه، مسئله مورد بررسی در این مقاله بیان می‌شود و سپس مروری بر مطالعه‌های گذشته انجام شده و به نوآوری‌های مقاله اشاره می‌گردد.

۱-۱- بیان مسئله

سیستم‌های ARCS معمول، شامل نسل‌های دوم، سوم و چهارم بوده و تعداد کانال‌های ارتباطی در این سیستم‌ها محدود به لیست اسکن است. لذا لینک ارتباطی بین یک سری کانال ثابت که از قبل در لیست اسکن مشخص شده‌اند، برقرار می‌شود. همان‌طور که گفته شد، در این شرایط جمرها به راحتی می‌توانند موجب ایجاد اختلال در برقراری لینک و تبادل داده شوند. با توجه به آسیب‌پذیری نسل‌های مختلف سیستم‌های مبتنی بر ARCS در برابر اختلال، امکان انتقال واحدهای داده پروتکل[۷] (PDUs) در این سیستم‌ها با استفاده از روش‌های پرش‌فرکانسی وجود دارد. در این روش نسبت به روش‌های سنتی ARCS، کانال‌های فرکانس ثابت با بازه‌های فرکانسی که در هر بازه یک الگوی پرش‌فرکانسی مشخصی وجود دارد، جایگزین می‌گردد. جهت دستیابی به این هدف دو رویکرد می‌تواند وجود داشته باشد. در رویکرد اول، لینک بین تمامی گره‌های[۸] شبکه با استفاده از کانال‌های فرکانس ثابت برقرار می‌شود و سپس داده‌ها با استفاده از روش‌های پرش‌فرکانسی منتقل می‌شوند. این رویکرد، لینک قبل از پرش[۹] (LBH) نامیده می‌شود. در رویکرد دوم، هم برقراری لینک بین گره‌ها و هم ارسال داده‌ها بعد از برقراری لینک، با استفاده از روش‌های پرش‌فرکانسی انجام می‌شود. به این رویکرد، لینک در حین پرش[۱۰] (LWH) گفته می‌شود. در

مرجع [۳] به عنوان مطالعه قبلی نویسندگان، روش LWH برای برقراری ارتباط توسط روش‌های پرش‌فرکانسی ملاک قرار گرفته و روش پیشنهادی در آن با عنوان سیستم برقراری خودکار لینک مبتنی بر پرش فرکانسی[۱۱] (FH-ALE) مطرح شده است. در این سیستم، لینک ارتباطی به‌صورت مقاوم شده با روش‌های پرش‌فرکانسی به‌طور خودکار برقرار می‌شود. استفاده از این روش برای ایجاد قابلیت اطمینان بیشتر در برقراری ارتباط در شرایط تداخلی کانال HF بوده و گره‌های مختلف پس از برقراری لینک، با ایجاد ترافیک پرش‌فرکانسی، امکان مقابله با تداخلات عمدی و غیرعمدی را خواهند داشت. این در حالی است که با وجود استفاده از روش‌های پرش‌فرکانسی برای برقراری لینک و ارسال داده، باز هم جمرهایی که هوشمند هستند، می‌توانند کانال‌های ترافیکی پرش‌فرکانسی را تشخیص داده و با ایجاد تداخل در این کانال‌ها، موجب خرابی ارتباط در سیستم پیشنهادی در مرجع [۴] شوند. لازم به ذکر است که در روش مبتنی بر FH-ALE، با توجه به شرایط کانال‌های فرکانسی در ابتدای برقراری لینک، یک الگوی پرش‌فرکانسی مناسب برای ارتباط انتخاب می‌شود و تا انتهای ارسال داده تغییر نمی‌یابد. لذا برای مقابله با جمرهای هوشمند، یکی از روش‌های کارآمد، استفاده از روش‌های شناخت‌گر[۱۲] برای انتخاب کانال‌های مناسب جهت تغییر در الگوی پرش‌فرکانسی است. در این مقاله علاوه بر استفاده از روش FH-ALE، برای محافظت از لینک برقرار شده، روش نگه‌داری خودکار از لینک پرش فرکانسی[۱۳] (FH-ALM) معرفی می‌گردد. در این راستا به کمک روش‌های شناخت-گر، کانال‌هایی که دچار تداخل شده‌اند و همچنین کانال‌هایی که وضعیت ارتباطی بهتری نسبت به سایر کانال‌ها دارند تشخیص داده می‌شوند تا الگوی پرش‌فرکانسی جدید برای دوره بعدی پرشی انتخاب شود. در ادامه نیز تا پایان ارسال داده، برای افزایش کارایی در ارتباطات، در انتهای هر دوره پرش‌فرکانسی، الگوی مورد نظر تغییر می‌یابد. ایجاد تغییرات در الگوی پرش‌فرکانسی، به کمک قابلیت FH-ALM خواهد بود. لذا در این مقاله با توجه به اینکه در کار قبلی نویسندگان و سایر سیستم‌های مبتنی بر برقراری خودکار لینک، برای مقابله با جمرهای هوشمند و محافظت از لینک برقرار شده در شرایط اختلال، راه‌حل مناسبی ارائه نشده است، به دنبال استفاده از روش جدیدی هستیم که به کمک روش پرش‌فرکانسی شناخت-گر، به‌طور خودکار از لینک برقرار شده محافظت نماید. با توجه به مواردی که بیان شد، در بخش بعدی مروری بر مطالعه‌های گذشته مرتبط با موضوع مقاله بیان می‌شود.

۲-۱- پیشینه تحقیق

همان‌طور که در بخش قبل عنوان شد، عمدتا از روش‌های برقراری خودکار لینک، روش‌های پرش‌فرکانسی و انتخاب کانال ارتباطی با استفاده از یادگیری ماشین برای افزایش قابلیت اطمینان در ارتباطات باند HF استفاده می‌شود. لذا در ادامه، مروری بر مطالعه‌های انجام شده در هرکدام از این حوزه‌ها در راستای دستیابی به یک سیستم پرش‌فرکانسی مبتنی بر روش‌های شناخت‌گر خواهیم داشت. برای برقراری خودکار لینک در باند HF، تاکنون نسل‌های دوم، سوم و چهارم ALE معرفی شده‌اند. در نسل دوم ALE، زمان مرجع وجود ندارد و همه گره‌هایی که منتظر برقراری تماس هستند، تمام فرکانس‌های موجود در لیست اسکن از پیش تعریف شده را به‌صورت ناهمزمان جستجو می‌کنند تا درخواست برقراری ارتباط را شناسایی کنند [۴]. معایب مهم نسل دوم ALE، زمان‌بر بودن فرآیند برقراری لینک و عدم استحکام آن و آسیب پذیر بودن در برابر اختلال است. در این راستا برخی مقاله‌ها با استفاده از مدل مارکوف برای بهبود کارایی در نسل دوم، امنیت در برقراری ارتباط و به تبع آن در مورد الزام‌های پیاده‌سازی، ارائه شده‌اند [۷-۵]. لذا برای رفع مشکل‌های موجود در سیستم‌های مبتنی بر نسل دوم، نسل سوم ALE ارائه شد. در این نسل تمامی گره‌های شبکه ارتباطی HF دارای یک زمان مرجع واحد هستند. از این‌رو، کانال‌های فرکانسی از پیش تعریف شده به‌صورت همزمان اسکن شده و از آنجایی که همه گره‌های هدف، به‌طور همزمان به فرکانس‌های از پیش تعیین شده گوش می‌دهند، گیرنده مورد نظر برای برقراری ارتباط، منتظر یک چرخه کامل جستجو نمی‌ماند [۲،۸]. همچنین در نسل سوم ALE، برقراری لینک برای حالت‌هایی که کانال شرایط ارتباطی ضعیفی دارد، طراحی شده است. ولی با وجود این تمهیدات، بازهم این سیستم‌ها در مقابل اختلال آسیب‌پذیر هستند. از طرف دیگر با توجه به نیاز ضروری به افزایش نرخ داده و افزایش سرعت برقراری لینک به کمک رادیوهای HF پهن باند[۱۴] (WBHF)، سیستم‌های مبتنی بر نسل چهارم ALE نیز معرفی شدند [۹]. در این راستا برخی از مقاله‌ها، الزام‌های مربوط به طراحی نسل چهارم را معرفی کرده و به تشریح

قابلیت‌های 4G-ALE پرداخته‌اند [۱۰،۱۱]. در سال‌های اخیر، مقاله‌های مختلفی نیز برای بهبود عملکرد نسل‌های مختلف ALE ارائه شده و جهت افزایش سرعت انتقال اطلاعات، فاصله زمانی برقراری لینک را کاهش داده است و یا پیاده سازی سخت‌افزاری آن به‌صورت بهینه‌تر انجام شده است [۱۲]. برخی از مقاله‌ها نیز، از مقادیر جدول تحلیل کیفیت لینک[۱۵] (LQA) و روش‌های سنجش طیف برای انتخاب کانال‌های فرکانسی مناسب برای ارسال داده و افزایش کارایی سیستم ارتباطی در باند HF استفاده می‌کنند [۱۳]. با توجه به اینکه اخیراً اقدام‌های متقابل الکترونیکی علیه سیستم‌های مبتنی بر ALE توسط محققان مورد توجه قرار گرفته است [۱۴] و در سیستم‌های سنتی، برقراری لینک در کانال‌های فرکانس ثابت انجام می‌شود، لازم است تا از روش‌های جدیدی برای مقابله با هرگونه تداخل یا اختلال به واسطه اقدام‌های جنگ الکترونیک جهت برقراری خودکار لینک پیشنهاد شود. با توجه به خاصیت‌های ضداختلال سیستم‌های مبتنی بر پرش‌فرکانسی، در مطالعه قبلی نویسندگان، یک روش برقراری خودکار لینک مبتنی بر FH برای بهبود عملکرد ارتباطی در شبکه‌های HF پیشنهاد شده است [۳]. پس از برقراری خودکار لینک، به دلیل تأثیر تداخل در ارتباطات و تغییر شرایط کانال انتخابی، لازم است تا لینک مورد نظر، برای دستیابی به کارایی مناسب در ارتباط، محافظت شود و در صورت نیاز کانال ارتباطی با یک کانال فرکانسی مناسب دیگر جایگزین گردد [۱۵].

برای انتخاب فرکانس جایگزین مناسب، روش‌های پیشنهادی برای گوش دادن قبل از ارسال[۱۶] (LBT) مورد استفاده قرار می‌گیرد که بر اساس روش‌های حسگری رادیو شناخت‌گرها همچون آشکارسازی بر اساس انرژی، آشکارساز فیلترهای منطبق و آشکارسازی ویژگی چرخه‌ایستان، است. این روش‌ها موجب افزایش کارایی سیستم‌های مبتنی بر ALE در شرایط بد کانال شده و با رصد دائمی شرایط کانال در یک سیستم FH-ALE، این امکان وجود دارد که بهترین کانال‌های ارتباطی به عنوان کانال‌های فرکانسی پرشی انتخاب و در دوره پرشی آتی مورد استفاده قرار گیرند. لذا برای افزایش کارایی سیستم‌ها در برقراری خودکار لینک، استفاده از خواص رادیو شناخت‌گرها مورد مطالعه و بررسی محققین بوده [۱۶] و در سال‌های اخیر نیز پژوهشگران از خواص شبکه‌های عصبی نیز در این زمینه استفاده کرده‌اند [۱۷]. همان‌طور که قبلا نیز عنوان شد، یکی از راه‌های ایجاد اختلال مؤثر در ارتباطات، استفاده از جمرهای هوشمند است. لذا در صورتی که برای مقابله با جمرهای رایج، فرکانس‌های حامل با استفاده از روش‌های پرش‌فرکانسی دائم در حال تغییر باشند، باز هم می‌توان کارایی ارتباط را با وجود جمرهای هوشمند کاهش داد. در این شرایط، برای افزایش منابع طیف فرکانسی و بهبود عملکرد ضد اختلالی سیستم‌های ارتباطی، می‌توان از روش‌های پرش‌فرکانسی شناخت‌گر استفاده نمود [۱۸]. استفاده از این روش نسبت به روش‌های پرش‌فرکانسی تطبیقی این مزیت را دارد که به کمک آن می‌توان بین تداخل خودی و تداخل از سایر سیستم‌های ارتباطی و اختلال‌کننده‌ها تمایز قائل شده و با استفاده از روش‌های سنجش طیف‌فرکانسی، به‌صورت فعال امکان شناسایی بازه‌های فرکانسی برای انتخاب الگوی مناسب برای پرش فرکانسی وجود خواهد داشت [۱۹]. این در حالی است که در شبکه‌های رادیویی مبتنی بر روش‌های Ad-hoc نیز از روش‌های پرش‌فرکانسی شناخت‌گر برای بهبود عملکرد سیستم‌های ارتباطی استفاده می‌گردد [۲۰،۲۱]. لذا با توجه به خواص ضدتداخلی استفاده از روش‌های پرش‌فرکانسی شناخت‌گر برای بهبود عملکرد سیستم‌های ارتباطی در این مقاله برای نگه‌داری خودکار لینک پرش‌فرکانسی از این روش استفاده شده و جزئیات آن مورد مطالعه قرار خواهد گرفت. در ادامه، به بیان نوآوری‌های طرح پیشنهادی خواهیم پرداخت.

۳-۱- نوآوری‌های روش پیشنهادی

نسل‌های قبلی سیستم‌های مبتنی بر روش‌های ALE، در برابر تداخل عملکرد خوبی ندارند و این مسئله در مرجع [۳]، به‌طور کامل بررسی شده و برای افزایش قابلیت اطمینان در برقراری لینک، روش FH-ALE پیشنهاد شد. این در حالی است که در سیستم پیشنهادی مرجع [۳] در ابتدا یک الگوی پرش‌فرکانسی برای برقراری ارتباط انتخاب شده و تا انتهای ارسال داده از این الگو استفاده می‌گردد. در این شرایط اگر به واسطه تغییرات کانال HF و یا وجود اختلال، الگوی انتخاب شده، کیفیت لازم برای انتقال اطلاعات را از دست بدهد، سیستم مورد نظر در این مرجع، روشی برای تغییر الگوی انتخاب شده ارائه نکرده است و در این‌صورت به واسطه جمرهای هوشمند، می‌توان عملکرد سیستم را مختل نمود. برای اینکه بتوان از لینک برقرار شده محافظت

نموده و دائما شرایط کانال‌های فرکانسی رصد گردد، در استاندارد از روش ALM استفاده می‌شود. در این مقاله نیز برای محافظت از لینک برقرار شده، جهت مقابله با جمرهای هوشمند یک سیستم با عنوان FH-ALM پیشنهاد شده است. این در حالی است که روش‌های مبتنی بر پرش‌فرکانسی که به عنوان مطالعه‌های مرتبط در بخش قبلی مرور شد نیز به دلیل عدم هوشمندی همزمان در برقراری و نگه‌داری از لینک ارتباطی، کارایی کافی را برای مقابله با جمرهای هوشمند ندارند. در سیستم پیشنهادی این مقاله، با استفاده از روش‌های پرش‌فرکانسی، مقاومت سیستم در برابر اثرات این نوع از جمرها بیشتر شده و کارایی ارتباطات در باند HF افزایش می‌یابد. روش پیشنهادی در این مقاله برای محافظت از لینک برقرار شده، با روش مبتنی بر ALM تفاوت داشته و PDU ها در آن به کمک الگوی پرش‌فرکانسی مشخصی ارسال می‌شوند و در پایان هر دوره پرشی، الگوی جدید به کمک روش پرش‌فرکانسی شناخت‌گر شناسایی شده و جایگزین الگوی قبلی می‌گردد. این شرایط تا انتهای ارسال داده‌های پرش‌فرکانسی ادامه پیدا می‌کند. به‌طور کلی، تفاوت سیستم پیشنهادی با نسل‌های سنتی قبلی برای برقراری و محافظت از لینک و همچنین مطالعه قبلی نویسندگان با عنوان FH-ALE [۳]، در جدول (۱) خلاصه شده است. با توجه به مواردی که مطرح شد، مهمترین نوآوری‌های این مقاله را می‌توان به شرح ذیل خلاصه نمود:

۱) در روش پیشنهادی علاوه‌بر برقراری لینک، محافظت خودکار از لینک نیز با استفاده از روش‌های پرش‌فرکانسی انجام می‌شود که مقاومت در برابر اثرات تداخل و جمر را افزایش می‌دهد.

۲) برای مدل‌سازی ریاضی سیستم پیشنهادی، یک روش دست به دست‌دهی[۱۷] دو طرفه علاوه بر برقراری خودکار لینک، در محافظت خودکار از لینک نیز در نظر گرفته شده است. با استفاده از زنجیره مارکوف، عملیات برقراری و محافظت از لینک و انتخاب الگوی پرش‌فرکانسی مناسب در انتهای هر دوره پرشی، مدل‌سازی می‌شود.

۳) برای نگه‌داری خودکار لینک، فرض بر این است که در طول ارسال داده، از روش پرش‌فرکانسی شناخت‌گر برای انتخاب کانال‌های مناسب برای الگوی پرش‌فرکانسی در دوره‌ی پرشی بعدی استفاده می‌شود که در پایان هر دوره این الگو تغییر می‌کند.

در ادامه مقاله در بخش دوم، به ارائه سیستم مدل پیشنهادی و بیان ریاضی مسئله پرداخته و راه‌کار پیشنهادی برای حل مسئله تشریح می‌گردد. در بخش سوم نیز شکل‌موج پیشنهادی برای ارسال داده و همچنین نگه‌داری از لینک معرفی شده و نتایج شبیه‌سازی‌ها در شرایط مختلف اختلال ارائه خواهد شد. در بخش چهارم نیز به جمع‌بندی موارد مطرح شده در مقاله اشاره شده است.

۲- سیستم مدل پیشنهادی و بیان ریاضی مسئله

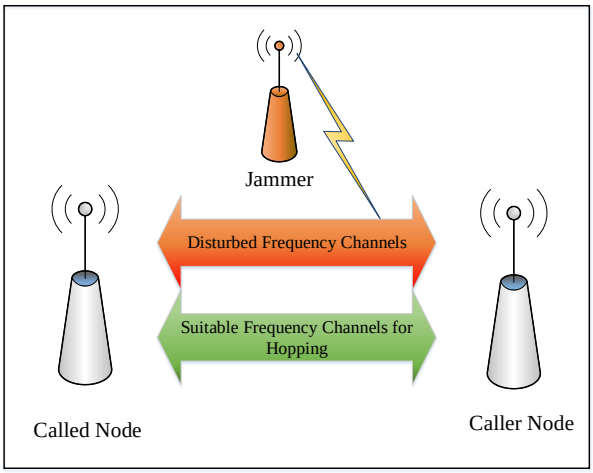
همان‌طور که در بخش مقدمه عنوان شد، با توجه به اینکه باند HF به طور دائمی در معرض تداخل و اختلال قرار دارد، برای برقراری لینک ارتباطی می‌توان از روش‌های پرش‌فرکانسی استفاده نمود. همچنین با عنایت به اینکه جمرهای هوشمند امکان شناسایی و ایجاد اختلال در الگوی پرش‌فرکانسیِ انتخاب شده را دارند، از روش پرش‌فرکانسی شناخت‌گر برای انتخاب الگوی جدید پرش‌فرکانسی و در نتیجه محافظت از لینک استفاده می‌شود. در صورت اِعمال تداخل در فرکانس‌های ارتباطی بین گره‌های فراخوان[۱۸] و فراخوانده شده[۱۹]، با استفاده از الگوریتم پیشنهادی در این مقاله از کانال‌های مناسب دیگر برای برقراری مجدد ارتباط پرش‌فرکانسی استفاده می‌شود. بنابراین سیستم مدل پیشنهادی، به‌صورت شکل (۱) قابل نمایش است.

برای برقراری خودکار لینک ارتباطی پرش‌فرکانسی، در ابتدا فرض بر این است که به جای یک سری فرکانس ثابت که در لیست اسکن سیستم ارتباطی مبتنی بر ALE قرار می‌گیرد، تعدادی بازه فرکانسی با فرکانس مرکزی متفاوت در باند HF در نظر گرفته شده و به جای یک فرکانس ثابت، یک بازه‌ی فرکانسی مناسب برای برقراری ارتباط انتخاب می‌شود [۳]. پس از این مرحله، سیگنال تماس پایش[۲۰] (SC) به‌صورت متوالی با یک الگوی پرش‌فرکانسی خاص برای برقراری خودکار لینک، ارسال می‌شود. گره فراخوانده شده هم، بازه‌های مختلف را برای تشخیص این سیگنال فراخوانی، اسکن می‌کند و به گره فراخوان پاسخ می‌دهد تا لینک پرش‌فرکانسی برقرار شود. پس از برقراری لینک و شروع ارسال و دریافت داده، وضعیت انتشاری کانال‌های فرکانسی به‌طور مداوم در بازه مورد نظر بررسی می‌شود.

Table (1): Comparison of the proposed system and previous generations of ALE in the HF band

جدول (۱): مقایسه سیستم پیشنهادی و نسل‌های قبلی برقراری و نگه‌داری خودکار لینک در باند فرکانس بالا

مرجع	توصیف روش
[۲،۹]	برقراری و محافظت خودکار از لینک در این نسل‌های سیستم‌های کنترل خودکار رادیو در کانال‌های فرکانسی ثابت انجام می‌شود و شکل‌موج‌های ارسالی به راحتی توسط جمرها قابل تشخیص هستند و به این نحو، قابلیت اطمینان برقراری لینک را کاهش می‌دهند.
[۳]	در این سیستم، برقراری لینک خودکار با روش‌های پرش فرکانسی انجام شده و می‌تواند استحکام بیشتری در برابر اثرات جمرها و تداخل ایجاد کند. با این حال، در این روش راه حلی برای نگه‌داری از لینک ارائه نشده است و در مقابله با جمرهای هوشمند آسیب‌پذیر است.
روش پیشنهادی	در روش پیشنهادی، علاوه بر اینکه بهترین بازه فرکانسی برای برقراری لینک انتخاب شده و لینک به‌طور خودکار با استفاده از روش‌های پرش‌فرکانسی برقرار می‌شود، با توجه به احتمال ایجاد اختلال توسط جمرهای هوشمند، با استفاده از روش پرش‌فرکانسی شناخت‌گر، در انتهای هر دوره پرشی یک الگوی پرش‌فرکانسی مناسب جدید انتخاب شده و محافظت از لینک به‌طور خودکار انجام می‌شود.



شکل (۱): سیستم مدل پیشنهادی

Figure (1): The proposed system model

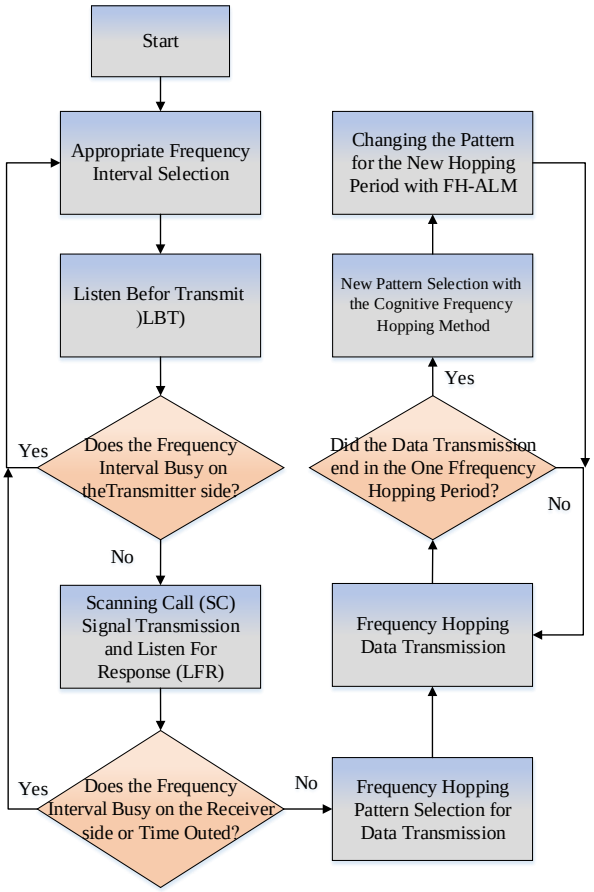
پس از یک دوره ارسال سیگنال پرش‌فرکانسی، با استفاده از الگوریتم پرش‌فرکانسی شناخت‌گر پیشنهادی و با در نظر گرفتن شرایط جدید بازه فرکانسی انتخابی، الگوی پرش‌فرکانسی تغییر می‌کند. پس از ارسال و دریافت سیگنال‌های کنترلی، یک الگوی پرش‌فرکانسی جدید برای دوره بعدی ارسال داده در مرحله FH-ALM استفاده می‌گردد. این روند تا پایان ارسال پیام ادامه دارد. شکل (۲) فلوچارت برقراری و محافظت خودکار از لینک برقرار شده را در سیستم پرش‌فرکانسی پیشنهادی نشان می‌دهد. در نمودار شکل (۲)، با توجه به مقادیر ذخیره شده در جدول LQA و با استفاده از سایر ابزارهای موجود برای تعیین بهترین کانال‌های فرکانسی در باند HF [۱،۲۲]، یک الگوی پرش‌فرکانسی از پیش تعیین شده در هر بازه فرکانسی، به‌طور پیش‌فرض برای همه گره‌ها در نظر گرفته می‌شود. قبل از شروع عملیات برقراری لینک پرش‌فرکانسی، گره فراخوان، مقادیر ذخیره شده در جدول LQA را بررسی می‌کند تا بازه فرکانسی با بهترین شرایط ارتباطی را انتخاب کند. معیار برای انتخاب بهترین بازه فرکانسی، بازه‌ای است که بیشترین تعداد کانال فرکانسی با کیفیت مطلوب را دارد. کیفیت مطلوب برای هر کانال فرکانسی به نویز و شرایط تداخل در آن بستگی دارد. از آنجایی که دو طرف ارتباط در باند HF دارای شرایط انتشاری مشابهی نیستند، مقادیر جدول LQA به‌صورت "به" و "از" ذخیره می‌شوند تا بهترین دقت انتخاب بازه فرکانسی به‌دست آید. بنابراین، در هر دو طرف ارتباط مقادیر کیفیت کانال در جدول LQA ذخیره می‌شود. از آنجایی که شرایط کانال HF متغیر است و ممکن است داده‌ها در بازه فرکانسی انتخاب شده برای ایجاد لینک پرش‌فرکانسی، با کیفیت مناسبی مبادله نشود، لذا در بخش LBT، وضعیت ارتباطی کانال‌ها در بازه فرکانسی مورد نظر برای گره فراخوان بررسی می‌شود. در نتیجه یک دست به دست‌دهی دوطرفه برای برقراری لینک انجام می‌گردد. در ابتدا، فرستنده قبل از ارسال سیگنال، گوش می‌دهد و احتمال اشغالی هر کانال فرکانسی را ارزیابی می‌کند. پس از آن، سیگنال تماس پایش (SC) به گیرنده ارسال می‌شود و فرستنده در بازه زمانی گوش دادن برای پاسخ[۲۱] (LFR) منتظر پاسخ گیرنده می‌ماند. گیرنده، وضعیت اشغالی کانال‌ها را بررسی کرده و به

اطلاع گره فراخوان می‌رساند. اگر وضعیت ارتباطی کانال‌ها در فرآیند دست به دست‌دهی دو طرفه مناسب باشد، سیگنال کنترلی ALE مبادله شده و لینک ارتباطی پرش‌فرکانسی برقرار می‌شود. احتمال اشغالی کانال فرکانسی iام در فرستنده که در رابطه (۱) به‌صورت δ^{i}_{TX} نمایش داده می‌شود، نشان دهنده احتمال بیشتر بودن قدرت سیگنال دریافتی[۲۲] (RSSI) در کانال مربوطه از یک سطح آستانه از پیش تعریف شده است و نماد TX برای نشان دادن این مقدار در سمت فرستنده است.

$$\delta^{i}_{TX} = P(RSSI^{i}_{TX} < RSSI_{Th}) \quad (۱)$$

به‌طوری‌که $RSSI_{Th}$، سطح آستانه RSSI را برای تعیین اشغالی کانال نشان می‌دهد و $RSSI^{i}_{TX}$، نشان دهنده میزان RSSI دریافتی در کانال iام در سمت فرستنده است. در مرحله LBT، به کمک رابطه (۱) وضعیت اشغالی کانال برای هر m کانال موجود در بازه فرکانسی dام بررسی می‌شود. اگر تعداد کانال‌های اشغال شده از مقدار آستانه فراتر رود، جواب سؤال "آیا بازه فرکانسی در سمت فرستنده اشغال است؟" مثبت خواهد شد. سپس فرآیند برقراری خودکار لینک به مرحله اول باز می‌گردد تا بازه‌های فرکانسی دیگر برای برقراری ارتباط بررسی شود. ولی در صورتی‌که تعداد کانال‌های اشغال شده کمتر از مقدار آستانه باشد، بازه فرکانسی اشغال نخواهد بود. در نتیجه، فرآیند برقراری لینک وارد مرحله بعدی می‌شود. در این مرحله سیگنال SC توسط گره فراخوان ارسال می‌شود تا وضعیت اشغالی کانال در بازه فرکانسی انتخابی در سمت گره فراخوانده شده بررسی شود. سیگنال SC به‌طور مکرر ارسال می‌شود تا تمام بازه‌های فرکانسی موجود در لیست اسکن توسط گره فراخوانده شده امکان بررسی داشته باشند. پس از دریافت سیگنال SC، گره فراخوانده شده شرایط انتشاری بازه‌ی فرکانسی انتخابی را بررسی می‌کند. از این‌رو، احتمال اشغالی در سمت گیرنده، با مقایسه وضعیت نسبت سیگنال به نویز[۲۳] (SNR) کانال مربوطه با مقدار آستانه تعیین می‌شود. لذا احتمال اشغالی در سمت گیرنده را می‌توان به‌صورت رابطه (۲) در نظر گرفت.

$$\delta^{i}_{RX} = P(SNR^{i}_{RX} < SNR_{Th}) \quad (۲)$$



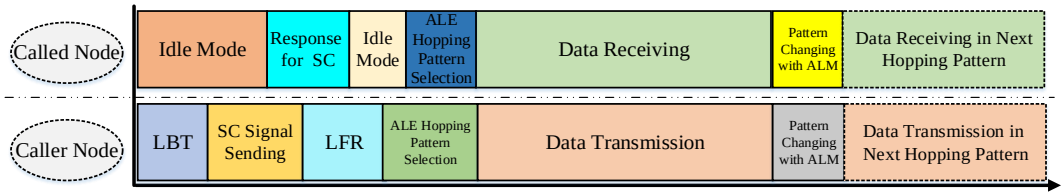
شکل (۲): نمودار عملیات پیشنهادی در سیستم مبتنی بر روش نگه‌داری خودکار از لینک پرش فرکانسی

Figure (2): Flowchart of the proposed operation in the system based on the FH-ALM method

به‌طوریکه δ^{i}_{RX} و SNR^{i}_{RX} به ترتیب، نشان‌دهنده احتمال اشغالی کانال در سمت گیرنده و مقدار سیگنال به نویز دریافتی کانال iام هستند، نماد RX برای نشان دادن مقدار احتمال را در سمت گیرنده به‌کار می‌رود. SNR_{Th} مقدار آستانه SNR است. همانند سمت گره فراخوان، در سمت گره فراخوانده شده نیز وضعیت اشغالی کانال برای هر یک از m کانال فرکانس موجود در بازه‌ی فرکانسی انتخاب شده، بررسی می‌شود. اگر تعداد کانال‌های اشغال شده از مقدار آستانه بیشتر باشد، جواب سؤال "آیا بازه فرکانسی در سمت گیرنده اشغال است؟" مثبت خواهد شد سپس فرآیند برقراری خودکار لینک به مرحله اول باز می‌گردد تا سایر بازه‌های فرکانسی که در لیست اسکن وجود دارند، بررسی شوند. وضعیت اشغالی کانال بازه فرکانسی انتخابی در سمت گره فراخوانده شده ممکن است به گونه‌ای باشد که اجازه دریافت سیگنال SC را ندهد و در نتیجه هیچ پاسخی به گره تماس گیرنده ارسال نشود. گره فراخوان منتظر پاسخ در یک زمان خاص می‌ماند. عدم پاسخ در این زمان به این معنی است که بازه‌ی انتخاب شده در سمت گره فراخوانده شده مشغول است، بنابراین سیستم برای برقراری لینک پرش‌فرکانسی باید به مرحله اول بازگردد تا یک بازه فرکانسی جدید را انتخاب نماید. اگر بازه انتخاب شده هم در سمت گره فراخوان و هم در سمت گره فراخوانده شده اشغال نبوده و آمادگی برای ارتباط داشته باشد، لینک برقرار شده و داده‌ها با استفاده از روش پرش‌فرکانسی ارسال می‌شوند. در ادامه، با توجه به احتمال اختلال در الگوی پرش‌فرکانسی انتخابی، از روش پرش‌فرکانسی شناخت‌گر برای انتخاب کانال‌های مناسب و بدون تداخل در مرحله FH-ALM استفاده می‌شود. عملیات پرش‌فرکانسی شناخت‌گر را می‌توان به چهار مرحله سنجش طیف، همزمان‌سازی، تصمیم‌گیری شناخت‌گر و برقراری ارتباط تقسیم کرد. در کل اگر زمان لازم برای انجام این چهار مرحله را با T_{CFH} نشان دهیم و میانگین مورد نیاز برای توقف در هر باند فرکانسی مورد نظر با T_B نمایش داده شود، $T_B>T_{CFH}$ خواهد بود [۱۹]. در مرحله اول برای سنجش طیف می‌توان میزان نسبت سیگنال به نویز و اعوجاج[۲۴] (SINR) را در هر کدام از کانال‌ها و بازه‌های فرکانسی به‌دست آورد. اگر کانال‌های یک بازه فرکانسی برای سنجش طیف، با وجود اثر تداخل و جمر، به‌صورت $C_k=(c_d)$ برای d=1,2,…m باشند، SINR دریافتی مطابق با رابطه (۳) خواهد بود.

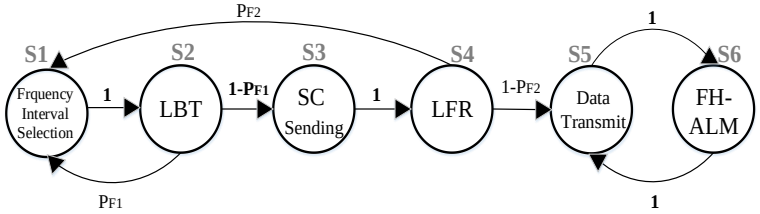
$$\rho_k(c_d)=\frac{P.g_k(c_d)}{P_J.g_k(c_J).\delta(c_k=c_J)+\sigma(c_d)} \qquad (۳)$$

به‌طوری‌که $\rho_k(c_d)$ مقدار SINR دریافتی از ارسال kام در کانال c_d و P قدرت سیگنال ارسالی است، $g_k(c_d)$ بهره توان کانال از ارسال kام در کانال c_d، P_J قدرت سیگنال جمر $g_k(c_j)$ بهره توان کانال از جمر به گیرنده از ارسال kام در کانال c_d است. مقدار $\delta(c_k=c_J)$ نیز اگر $c_k=c_J$ باشد، برابر با یک بوده و در غیر این صورت برابر با صفر خواهد بود. همچنین $\sigma(c_d)$ مقدار نویز در کانال C_d را نشان می‌دهد. میزان SINR هر کدام از کانال‌های فرکانسی در بازه پرشی مورد نظر، به عنوان پارامتر تعیین‌کننده برای سنجش کیفیت طیف فرکانسی در جدول کیفیت ذخیره می‌شود و در پایان هر دوره پرش‌فرکانسی، مناسب‌ترین فرکانس‌ها که تداخل و نویز کمتری دارند، برای تعیین الگوی پرشی در دوره پرشی آتی انتخاب می‌شود. در این مقاله فرض بر این است که همزمان‌سازی بصورت کامل در نظر گرفته شده و این در حالی است که روش‌های مناسبی برای همزمان‌سازی سیستم‌های طیف گسترده در شرایط اختلال ارائه شده است [۲۳]. همچنین مرحله‌ی تصمیم‌گیری شناخت‌گر با در نظر گرفتن شرایط تداخلی کانال انجام خواهد شد. در مرحله تصمیم‌گیری شناخت‌گر، لازم است که علاوه بر سنجش طیف، تحلیلی از وضعیت تداخل نیز داشته باشیم که به کمک پارامتر SINR این هدف نیز دنبال خواهد شد. همچنین با توجه به اینکه هدف از استفاده از روش‌های پرش‌فرکانسی شناخت‌گر عدم ایجاد تداخل در سیستم ارتباطی خودی نیز است، می‌توان با استفاده از یک کانال کنترلی، گره‌های مختلف را از لیست به‌روز شده الگوی پرش‌فرکانسی مبتنی بر روش FH-ALM با خبر نمود. همچنین این امکان وجود دارد که گره فراخوان، الگوی جدید پرش‌فرکانسی را برای دوره آتی پرشی به اطلاع گره فراخوانده‌شده برساند. با توجه به مواردی که گفته شد، دیاگرام وضعیت گره فراخوان و گره فراخوانده شده را می‌توان بصورت شکل (۳) در نظر گرفت که در آن مشخص است که در هر وضعیت از گره فراخوان، وضعیت گره فراخوانده شده به چه شکل خواهد بود. در ادامه این بخش، مدل ریاضی مناسبی را برای زمان برقراری و محافظت از لینک مشخص نموده و برای افزایش کارایی سیستم پیشنهادی، به دنبال کاهش این زمان خواهیم بود. طبق رابطه (۴) می‌توان اثبات کرد که نرخ خالص خروجی سیستم با کاهش زمان برقراری لینک، افزایش می‌یابد [۱۳].



شکل (۳): دیاگرام وضعیت گره فراخوان و گره فراخوانده شده

Figure (3): Status diagram of calling node and called node



شکل (۴): زنجیره مارکوف زمان گسسته سیستم پیشنهادی برای برقراری و محافظت از لینک خودکار پرش‌فرکانسی

Figure (4): Discrete time Markov chain for proposed automatic frequency hopping link establishment and link maintenance system

$$C \cong \frac{T - T^{i}_{Link}}{T} . \frac{1}{m} . \sum_{k=1}^{m} \log_2(1+SNR^{i}_{k}) \qquad (۴)$$

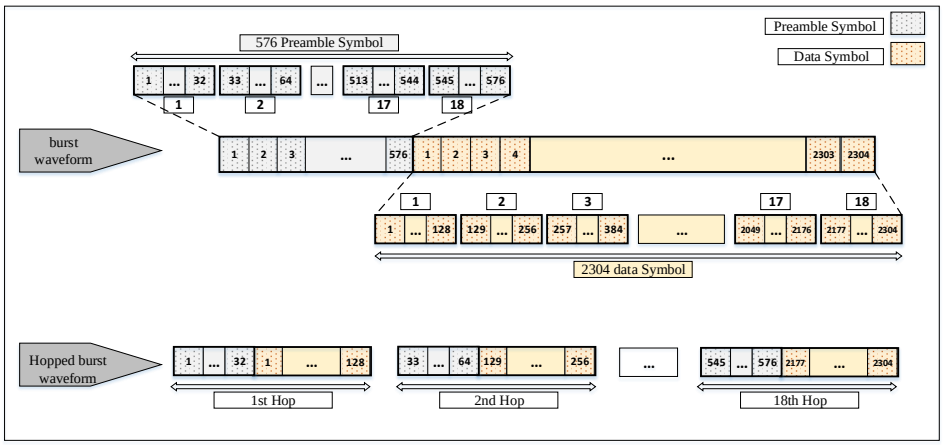
که در آن T کل زمان لازم برای برقراری لینک و ترافیک است و T^{i}_{Link} زمان برقراری لینک پرش‌فرکانسی در بازه iام و SNR^{i}_{k} مقدار سیگنال به نویز کانال kام در بازه iام است. در ادامه، رابطه‌های ریاضی مرتبط با نرخ خالص ارسالی در سیستم پیشنهادی در دو بخش برقراری خودکار لینک و نگه‌داری خودکار از لینک بررسی می‌شود. با توجه به این‌که در سیستم پیشنهادی، یک دست به دست‌دهی دوطرفه برای برقراری و نگه‌داری خودکار از لینک انجام می‌شود، در شکل (۴) فرآیند مربوط به این عملیات با استفاده از زنجیره مارکوف مدل‌سازی شده و در شش حالت نشان داده شده است. مطابق با زنجیره مارکف پیشنهادی، در وضعیت S1 بازه فرکانسی به‌طور خودکار انتخاب می‌شود و گره فراخوان در این مرحله بازه iام را انتخاب کرده و وارد حالت بعدی می‌شود. در وضعیت S2 در زمان گوش دادن قبل از ارسال (T_{LBT})، m کانال فرکانسی برای تعیین وضعیت اشغالی کانال‌ها در بازه فرکانسی انتخابی، بررسی و ارزیابی می‌شوند. در ادامه، سیگنال تماس پایش به گره فراخوانده شده ارسال می‌شود و وضعیت فعلی به وضعیت S3 تغییر می‌کند. سپس در مرحله گوش دادن برای پاسخ، وارد وضعیت S4 می‌شود. در ادامه سیستم وارد حالت S5 که وضعیت ارسال داده است، می‌شود. در این حالت، ترافیک برقرار شده و پس از ارسال داده، وارد وضعیت S6 برای عملیات FH-ALM می‌شود. در این وضعیت، در انتهای یک دوره تناوب پرش‌فرکانسی، با استفاده از روش پرش‌فرکانسی شناخت‌گر، به شناسایی کانال‌های با وضعیت انتشاری مناسب و ذخیره کیفیت ارتباطی در هر کانال، می‌پردازد. برای دوره تناوب بعدی الگوی پرش‌فرکانسی جدید که در فرکانس‌های پرشی آن تداخل کمتری وجود دارد، انتخاب شده و طی یک دست به دست‌دهی دو مرحله‌ای به اطلاع گره بعدی می‌رسد. پس از انجام عملیات FH-ALM، ارسال داده‌ها ادامه داشته و روند ارسال داده‌ها همزمان با انجام نگه‌داری خودکار لینک، تا انتهای ارسال پیام ادامه پیدا می‌کند. در زنجیره مارکف پیشنهادی، دو مورد می‌تواند باعث شکست در برقراری لینک و بررسی مجدد بازه فرکانسی پرشی دیگر برای برقراری لینک شود. حالت اول این است که سیستم در وضعیت S2 مشخص نماید که بازه فرکانسی در سمت فرستنده اشغال است و همچنین شکست دوم در وضعیت S4 و زمانی خواهد بود که بازه فرکانسی در سمت گیرنده اشغال بود و یا به هردلیلی پاسخی از گیرنده دریافت نشود. با این وجود اگر در (i-1) بازه فرکانسی عملیات برقراری لینک با شکست مواجه بوده و در نهایت لینک پرش‌فرکانسی در بازه فرکانسی iام برقرار شود، می‌توان اثبات نمود که زمان برقراری لینک با رابطه (۵) نشان داده می‌شود، جایی که T^{i}_{Link} میانگین زمان برقراری لینک پرش‌فرکانسی در بازه iام است و P_{F1} و P_{F2} به‌ترتیب احتمال بازگشت از وضعیت S2 به S1 و از وضعیت S4 به S1 هستند [۳].

$$T^{i}_{Link} = \sum_{k=1}^{i-1} \left(\binom{i-1}{k} (P_{F1})^{k} ((1-P_{F1})P_{F2})^{i-1-k} . (kT_{LBT} + (i-1-k)(T_{LBT} + T_{SC} + T_{LFR}) + T_{suc})\right) \qquad (۵)$$

همچنین T_{LBT} زمان گوش کردن به تمامی کانال‌های فرکانسی موجود در بازه انتخاب شده در سمت فرستنده و T_{LFR} زمان گوش کردن برای پاسخ از سمت گیرنده هست. T_{LBT} نیز زمان لازم برای ارسال سیگنال تماس پایش بوده و T_{suc} زمان انجام عملیات برقراری لینک موفق است. با کاهش زمان برقراری لینک، میزان نرخ خالص ارسالی داده افزایش می‌یابد [۱۳] و یک راه مناسب برای کاهش زمان نگه‌داری لینک، کاهش تعداد شکست‌ها در زنجیره مارکوف پیشنهادی است. برای این منظور در این مقاله از روش پرش‌فرکانسی شناخت‌گر استفاده شده است. در صورت انتخاب کانال‌های با شرایط مناسب برای ارتباط با استفاده از روش پیشنهادی، احتمال شکست عملیات برقراری مجدد لینک کاهش یافته و نرخ خالص خروجی سیستم افزایش می‌یابد. در ادامه، نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی برای برقراری و محافظت خودکار از لینک ارائه شده است.

۳- شبیه‌سازی سیستم پیشنهادی و بررسی نتایج

با استفاده از نرم‌افزار متلب در رایانه با پردازنده Intel Core i7-4500U با CPU@1.8GHz2.4GHz، RAM 4.00GB و برای ارسال شکل موج‌های قطاری[۲۵] (BWs) مربوط به برقراری و نگه‌داری خودکار از لینک، شبیه‌سازی و عملکرد آن در شرایط مختلف انتشاری کانال، از جمله نویز و اختلال، در این قسمت بررسی می‌گردد. لذا همان‌طور که در بخش‌های قبل بیان شد، با فرض این‌که لینک ارتباطی با استفاده از روش FH-ALE برقرار شده است، برای عملکرد مناسب سیستم در مقابله با جمرهای هوشمند، باید عملیات نگه‌داری خودکار لینک نیز انجام شود. به این نحو که در طول هر دوره پرش‌فرکانسی، با استفاده از روش‌های پرش‌فرکانسی شناخت‌گر، کانال‌های مناسب برای برقراری ارتباط پرش‌فرکانسی انتخاب شده و اندیس کانال‌های انتخابی با استفاده از کانال کنترلی مناسب، به فرستنده منتقل می‌شود. به این ترتیب، داده‌ها در دوره پرشی بعدی، در الگوی جدید انتقال می‌یابند. لذا عملیات مربوط به روش پرش‌فرکانسی شناخت‌گر برای نگه‌داری خودکار لینک در سیستم پیشنهادی، با در نظر گرفتن شکل‌موج قطاری BW1 به عنوان حامل اطلاعات مربوط به FH-ALM شبیه‌سازی و نتایج آن بررسی می‌گردد. عملکرد سیستم پیشنهادی در مقایسه با روش‌های ALM سنتی که در استاندارد STANAG4538 مطرح شده و همچنین در مقایسه با مطالعه قبلی نویسندگان [۳]، برای مقابله با جمر هوشمند بررسی می‌گردد. با توجه به این استاندارد، اطلاعات مربوط به پارامترهای برقراری لینک، با ارسال داده‌های پایه[۲۶] مربوطه توسط شکل‌موج BW، منتقل می‌شود. در روش‌های معمول، برای برقراری خودکار لینک، گیرنده در چند فرکانس ثابت که از قبل به عنوان کانال‌های لیست اسکن مشخص شده‌اند، جاروب می‌کند. فرستنده نیز با توجه به وضعیت کانال‌ها، در بهترین کانال فرکانسی یا اولین کانال مناسب، اقدام به ارسال شکل موج قطاری برای برقراری لینک می‌کند. همان‌طور که بیان شد، در روش پیشنهادی این مقاله، ارسال و دریافت شکل موج‌های قطاری به جای فرکانس‌های ثابت، در بازه‌های فرکانسی موجود در محدوده باند HF انجام می‌شود. با توجه به شرایط انتشاری بازه‌های مختلف فرکانسی، بازه‌ای که شرایط بهتری برای برقراری ارتباط دارد، توسط فرستنده انتخاب می‌شود. BW مورد نظر نیز به کمک روش‌های پرش‌فرکانسی و با یک الگوی مشخص که از قبل برای فرستنده و گیرنده تعیین شده است، در بازه انتخابی ارسال می‌شود. در این مقاله فرض می‌شود که برای نگه‌داری خودکار از لینک، مطابق با استاندارد از شکل‌موج BW1 که شامل ۵۷۶ سمبل سرفریم[۲۷] و ۲۳۰۴ سمبل داده است، استفاده می‌گردد. در شبیه‌سازی روش پیشنهادی، این سمبل‌ها مطابق با شکل (۵) به پرش‌های مختلف تقسیم می‌شود. همان‌طور که در این شکل مشخص است، این شکل‌موج در قالب ۱۸ پرش ارسال می‌گردد. این شکل موج شامل ۴۸ بیت به‌عنوان داده‌های پایه است که در شبیه‌سازی سیستم پیشنهادی، هر ۳ بیت در یک پرش قرار می‌گیرد. به این نحو که بیت‌های داده‌ی پایه به‌صورت کانولوشنال کدگذاری می‌شوند، به‌صورت بلوکی درهم‌نهی[۲۸] انجام شده و سپس با استفاده از دنباله‌های والش نگاشت داده می‌شوند. بیت‌های کدشده با استفاده از کد والش، توسط مدولاسیون کلیدزنی شیفت فاز ۸ تایی[۲۹] (8PSK) مدوله شده و مطابق با الگوی پرشی انتخاب شده، ارسال می‌شوند. هر بسته داده‌های پایه در یک دنباله با ۱۸پرش ارسال می‌شود. با توجه به شرایط کانال، می‌توان این دنباله را در چند مرحله تکرار کرد تا از دریافت آن توسط گیرنده اطمینان حاصل شود. پارامترهای مربوط به شبیه‌سازی سیستم پیشنهادی در جدول (۲) نشان داده شده است. برای محاسبه احتمال برقراری لینک، در شبیه‌سازی‌ها هر کدام از بسته‌ی داده‌های پایه ۴۸ بیتی به‌عنوان یک بسته در نظر گرفته می‌شود.



شکل (۵): شکل موج قطاری پرشی پیشنهادی برای نگه‌داری خودکار از لینک

Figure (5): Proposed hopping burst waveform for automatic link maintenance

Table (2): Parameters related to the simulation of the proposed system

جدول(۲): پارامترهای مربوط به شبیه سازی سیستم پیشنهادی

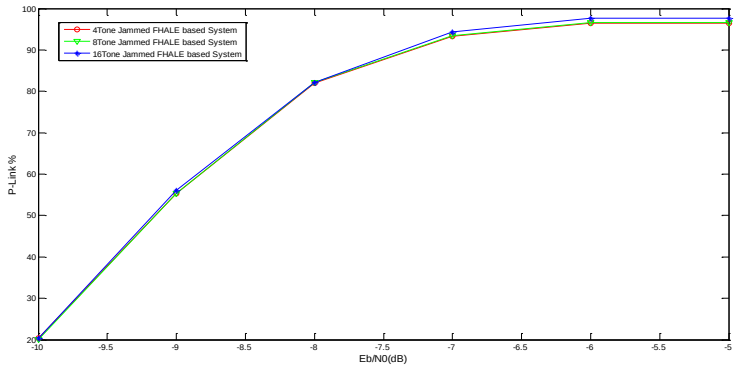
پارامتر	مقدار
تعداد بیت‌های داده پایه	۴۸
نرخ کدگذاری کانولوشنال	۱/۳
درهم نه	۱۶*۹
طول دنباله والش	۶۴
مدولاسیون	کلیدگذاری شیفت قاز ۸تایی
فرکانس حامل	۱/۸ کیلوهرتز
نرخ سمبل	۲/۴ کیلو سمبل در ثانیه
تاخیر شکل دهی پالس	۵
میزان پهنای باند اضافی فیلتر	۰/۲
تعداد کانال‌های فرکانسی در هر بازه	۳۲-۶۴-۱۲۸
تعداد پرش در شکل موج قطاری پیشنهادی	۱۸
تعداد بازه های پرش فرکانسی	۱۶

برای هرکدام از مقادیر انرژی بیت به نویز (E_b/N_0) مورد نظر تا جایی که تعداد بسته‌های خطادار به ۱۰۰۰ بسته برسد اجرای برنامه ادامه پیدا می‌کند. احتمال لینک شدن با توجه به مقدار نرخ خطای بسته[۳۰] (PER) مطابق با رابطه (۶) به‌دست می‌آید.

$$P_{Link} = (1-PER)^2 \quad (۶)$$

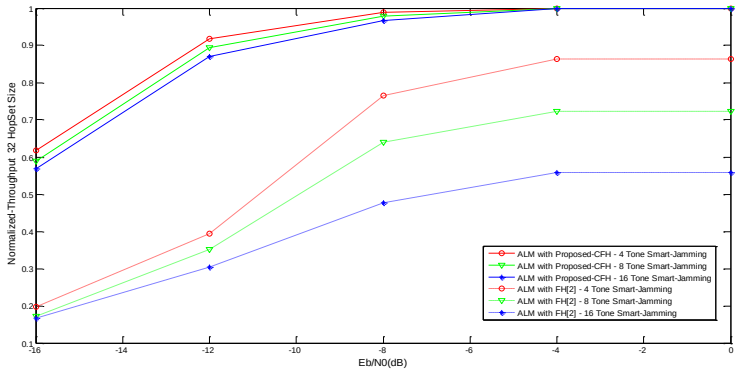
همچنین با فرض اینکه سیستم پیشنهادی به‌کمک روش‌های پرش‌فرکانسی اقدام به برقراری لینک نماید، در شکل (۶) مقدار احتمال برقراری لینک در سیگنال به نویزهای مختلف و با وجود جمر چندتون نشان داده شده است. کانال ارتباطی مورد نظر در شبیه‌سازی سیستم پیشنهادی، شامل دو بخش است که در بخش اول، یک فیلتر با دو ضربه برای ایجاد کانال دومسیره به سیستم اعمال می‌گردد. در گیرنده نیز، جبران دومسیرگی به‌صورت کامل فرض می‌شود. در بخش دوم، یک کانال با نویز سفید گوسی جمع‌شونده[۳۱] (AWGN) به سیستم اعمال می‌شود که مقدار SNR آن متناسب با E_b/N_0 مورد نظر بوده و بصورت توزیع رایلی در هر بازه پرشی در نظر گرفته شده است. در شبیه‌سازی، ارسال داده‌ها در دوره‌های تناوب ۱۰۲۴ پرشی انجام می‌شود. تست عملکرد سیستم پیشنهادی برای حداقل ۱۰۰ دوره‌ی تناوب پرش‌فرکانسی در E_b/N_0 های مورد نظر انجام می‌شود. برای تحلیل و مقایسه عملکرد سیستم پیشنهادی مبتنی بر روش پرش‌فرکانسی شناخت‌گر، از یک جمر چندتون که قابلیت ایجاد اختلال با توان ۳۰ دی‌بی[۳۲] (dB) در حداکثر ۱۶ فرکانس از بازه فرکانسی لینک ارتباطی را داشته باشد، برای ارسال

سیگنال‌های تداخلی در نظر گرفته می‌شود. با این فرض که این جمر به‌کمک روش‌های هوشمند که هوشمندی متناسب با روش‌های شناخت‌گر دارد، فرکانس‌های مناسب برای ارتباط را در هر دوره پرش‌فرکانسی شناسایی کرده و در پایان هر دوره‌ی پرشی، فرکانس‌های مختل شده را با توجه به اطلاعات دوره قبل، تغییر می‌دهد. با توجه به این‌که فرض بر این است که جمر به‌صورت هوشمندانه بهترین فرکانس‌های موجود در هر باند فرکانسی را شناسایی کرده و در هر دوره پرشی در این فرکانس‌ها اختلال ایجاد کند و همچنین با عنایت به این‌که در روش‌های ALM سنتی، بهترین فرکانس موجود در لیست پایش برای برقراری مجدد ارتباط مورد استفاده قرار می‌گیرد، لذا با شبیه‌سازی که انجام شد مشخص است که با وجود جمر هوشمند عملکرد روش‌های سنتی ALM کاملا مختل خواهد بود. لذا با فرض اینکه یک جمر چندتون که توانمندی ایجاد اختلال ۴، ۸ و ۱۶ تون از مجموعه پرش را دارد، برای مختل نمودن سیستم FH-ALM پیشنهادی در مقایسه با روش محافظت از لینک مبتنی بر FH-ALE مرجع [۳] استفاده می‌شود که قابلیت تشخیص هوشمند حضور سیگنال در هر فرکانس را دارد. شبیه‌سازی‌ها برای سه سایز از مجموعه پرش با طول‌های ۳۲، ۶۴ و ۱۲۸ پرش انجام می‌گردد. لازم به ذکر است که با توجه به این‌که با وجود جمر هوشمند، کارایی سیستم FH-ALE بطور قابل توجهی کاهش خواهد یافت، این قابلیت در شبیه‌سازی به سیستم اضافه شده است که در انتهای هر دوره پرشی، فرکانس‌های الگوی پرش‌فرکانسی به‌صورت تصادفی از بین کانال‌های مناسب برای ارتباطات انتخاب شود. در شکل (۷) نتایج شبیه‌سازی در مقایسه با سیستم مبتنی بر کار قبلی نویسندگان در مرجع [۳] برای مجموعه پرش با طول ۳۲ کانال فرکانسی نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در سیستم FH-ALM پیشنهادی فرض بر این است که به‌کمک روش مبتنی بر FH-ALE لینک برقرار شده و در ادامه با استفاده از روش پرش‌فرکانسی شناخت‌گر اقدام به محافظت از لینک با انتخاب الگوی جدید پرش‌فرکانسی می‌شود. این درحالی است که همانطور که گفته شد، در سیستم مبتنی بر مرجع [۳] پس از برقراری لینک با استفاده از روش مبتنی بر FH-ALE در انتهای هر دوره پرشی بصورت تصادفی الگوی جدید پرش فرکانسی انتخاب می‌شود. همان‌طور که گفته شد، نتایج شبیه‌سازی‌ها با تکرار عملیات محاسبه نرخ خالص ارسالی برای حداقل ۱۰۰ دوره پرش‌فرکانسی انجام می‌گردد که در جدول (۳) مقادیر خروجی شبیه‌سازی به‌ازای عملکرد سیستم پیشنهادی و سیستم مبتنی بر روش‌های سنتی به‌ازای حضور جمر ۸تون و برای ۸ تکرار اول به‌صورت نمونه نشان داده شده است که در نهایت به‌ازای هر حالت مقادیر میانگین، محاسبه شده و در خروجی شکل (۷) برای هر کدام از مقادیر E_b/N_0 لحاظ شده است. با عنایت به شکل (۶) و به‌ازای احتمال برقراری لینک بالای ۹۵ درصد، نتایج به‌دست آمده در شکل (۷) نشان می‌دهد که عملکرد سیستم پرش‌فرکانسی شناخت‌گر پیشنهادی نسبت به سیستم‌های مرسوم قبلی بیش ۸ دی‌بی افزایش کیفیت دارد که نشان دهنده عملکرد موفق آن در شرایط حضور اختلال است. با توجه به این‌که در صورت افزایش تعداد کانال‌های فرکانسی در یک مجموعه پرش، پردازش مقادیر کیفیت کانال‌ها سخت‌تر شده و نیاز به قدرت پردازش بیشتری دارد لذا این مسئله مورد قبول است که با افزایش تعداد کانال‌ها، عملکرد سیستم شناخت‌گر پیشنهادی به سیستم‌های مرسوم قبلی نزدیک‌تر شده و اختلاف سطح عملکرد کمتر خواهد شد که برای وضعیت مجموعه پرش با ۶۴ کانال فرکانسی، نتایج عملکرد سیستم در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل (۶): احتمال برقراری لینک در سیستم مبتنی بر برقراری خودکار لینک پرش‌فرکانسی با وجود جمر چندتون

Figure (6): The link establishment possibility in the system based on FH-ALE despite the presence of multiple jammers



شکل (۷): مقایسه کارایی سیستم نگه‌داری خودکار از لینک پرش فرکانسی پیشنهادی مبتنی بر پرش فرکانسی شناخت‌گر و سیستم نگه‌داری خودکار از لینک مبتنی بر روش برقراری خودکار لینک پرش فرکانسی [۳] در شرایط مختلف اختلال برای مجموعه پرش ۳۲ کانال فرکانسی

Figure (7): Comparison of the efficiency of the proposed cognitive frequency hopping based FH-ALM system and the ALM system based on the FH_ALE method [3] in different disturbance conditions for the set of 32 frequency hopping channels

Table (3): Normalized throughput for 32 hop frequency channel interval with 8-tone jammer

جدول(۳): مقادیر خروجی نرخ خالص ارسالی نرمالیزه شده برای طول مجموع پرش ۳۲ کانال فرکانسی با وجود جمر ۸تون

مشخصات سیستم	انرژی بیت به نویز	مقدار نرخ خالص ارسالی نرمالیزه شده							
		تکرار ۱	تکرار ۲	تکرار ۳	تکرار ۴	تکرار ۵	تکرار ۶	تکرار ۷	تکرار ۸
نگهداری خودکار از لینک با روش پرش فرکانسی شناخت‌گر پیشنهادی با وجود جمر هوشمند ۸تون	-۱۶	۰/۵۸۸۰	۰/۵۴۳۴	۰/۵۷۷۶	۰/۵۷۷۶	۰/۵۹۶۴	۰/۶۲۲۵	۰/۵۹۲۲	۰/۵۴۶۴
	-۱۲	۰/۸۸۲۵	۰/۸۷۳۶	۰/۸۹۴۰	۰/۹۰۴۸	۰/۸۷۷۸	۰/۸۶۲۶	۰/۸۹۴۰	۰/۹۱۱۲
	-۸	۰/۹۷۸۴	۰/۹۸۲۴	۰/۹۸۲۰	۰/۹۸۲۰	۰/۹۷۸۰	۰/۹۷۴۴	۰/۹۷۸۰	۰/۹۸۲۴
	-۴	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
نگهداری خودکار از لینک با روش پرش فرکانسی مرسوم [۳] با وجود جمر هوشمند ۸تون	-۱۶	۰/۱۴۲۴	۰/۱۷۲۰	۰/۱۵۳۶	۰/۱۵۶۲	۰/۱۹۳۸	۰/۱۷۲۲	۰/۱۴۲۴	۰/۲۰۱۵
	-۱۲	۰/۳۲۲۵	۰/۳۸۷۴	۰/۳۵۲۲	۰/۳۵۲۰	۰/۳۹۴۴	۰/۳۱۳۲	۰/۳۸۶۵	۰/۳۸۴۷
	-۸	۰/۶۲۲۲	۰/۶۰۱۳	۰/۵۹۸۴	۰/۶۴۱۵	۰/۶۸۵۶	۰/۶۳۹۰	۰/۵۹۸۴	۰/۶۱۲۱
	-۴	۰/۷۲۳۲	۰/۷۲۲۷	۰/۷۲۲۷	۰/۷۲۱۸	۰/۸۲۱۸	۰/۷۲۳۲	۰/۷۲۲۷	۰/۷۲۲۷
	۰	۰/۷۲۲۷	۰/۷۲۲۷	۰/۷۲۲۷	۰/۷۲۲۷	۰/۷۲۲۷	۰/۷۲۲۷	۰/۷۲۲۷	۰/۷۲۲۷

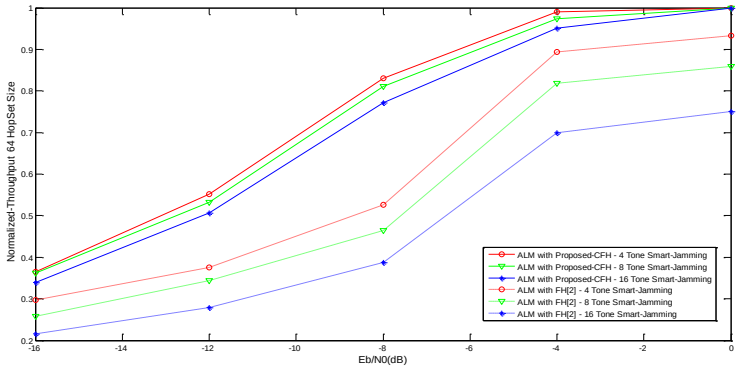
Table (4): The proposed system performance improvement compared to the system based on reference [3]

جدول (۴): میزان بهبود عملکرد در سیستم پیشنهادی نسبت به سیستم مبتنی بر مرجع [۳]

میزان بهبود عملکرد سیستم	مجموعه پرش با طول ۳۲ کانال			مجموعه پرش با طول ۶۴ کانال			مجموعه پرش با طول ۱۲۸ کانال		
	جمر ۴تون	جمر ۸تون	جمر ۱۶تون	جمر ۴تون	جمر ۸تون	جمر ۱۶تون	جمر ۴تون	جمر ۸تون	جمر ۱۶تون
احتمال برقراری لینک بیشتر از ۹۵ درصد	۸ دی‌بی	۱۰ دی‌بی	بیش از ۱۲ دی‌بی	۳ دی‌بی	۴ دی‌بی	بیش از ۷ دی‌بی	۲ دی‌بی	۲ دی‌بی	۴ دی‌بی
احتمال برقراری لینک بین ۸۰ تا ۹۵ درصد	بیش از ۶ دی‌بی	بیش از ده دی‌بی	بیش از ۱۲ دی‌بی	۴ دی‌بی	۴ دی‌بی	بیش از ۶ دی‌بی	بیش از ۴ دی‌بی	بیش از ۴ دی‌بی	۶ دی‌بی

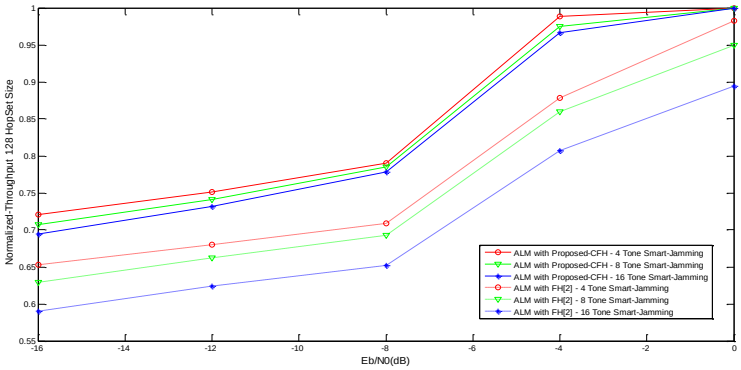
همان‌طور که در شکل (۸) مشخص هست برای احتمال برقراری لینک بالای ۹۵ درصد که معادل E_b/N_0 بیشتر از ۶- دی‌بی است، سیستم پیشنهادی نسبت به سیستم متناسب با مرجع [۳] حدود ۵ دی‌بی عملکرد بهتری دارد. همچنین در صورتی که

تعداد کانال‌های فرکانسی در یک مجموعه پرش را ۱۲۸در نظر بگیریم نتایج شبیه‌سازی آن به‌صورت شکل (۹) قابل نمایش است.



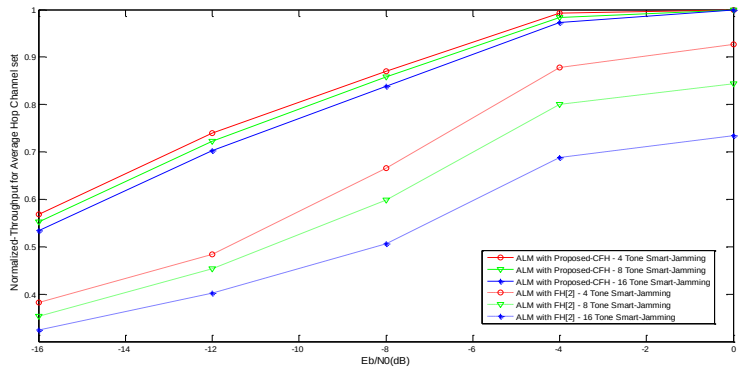
شکل(۸): مقایسه کارایی سیستم نگه‌داری خودکار از لینک پرش فرکانسی پیشنهادی مبتنی بر پرش‌فرکانسی شناخت‌گر و سیستم نگه‌داری خودکار از لینک مبتنی بر روش برقراری خودکار لینک پرش فرکانسی [۳] در شرایط مختلف اختلال برای مجموعه پرش ۶۴ کانال فرکانسی

Figure (8): Comparison of the efficiency of the proposed cognitive frequency hopping based FH-ALM system and the ALM system based on the FH_ALE method [3] in different disturbance conditions for the set of 64 frequency hopping channels



شکل (۹): مقایسه کارایی سیستم نگه‌داری خودکار از لینک پرش فرکانسی پیشنهادی مبتنی بر پرش فرکانسی شناخت‌گر و سیستم نگه‌داری خودکار از لینک مبتنی بر روش برقراری خودکار لینک پرش فرکانسی [۳] در شرایط مختلف اختلال برای مجموعه پرش ۱۲۸ کانال فرکانسی

Figure (9): Comparison of the efficiency of the proposed cognitive frequency hopping based FH-ALM system and the ALM system based on the FH_ALE method [3] in different disturbance conditions for the set of 128 frequency hopping channels



شکل (۱۰): مقایسه کارایی سیستم نگه‌داری خودکار از لینک پرش فرکانسی پیشنهادی مبتنی بر پرش فرکانسی شناخت‌گر و سیستم نگه‌داری خودکار از لینک مبتنی بر روش برقراری خودکار لینک پرش فرکانسی [۳] در شرایط مختلف اختلال برای میانگین تعداد کانال فرکانسی مجموعه پرش

Figure (10): Comparison of the efficiency of the proposed cognitive frequency hopping based FH-ALM system and the ALM system based on the FH_ALE method [3] in different disturbance conditions for the average number of frequency channels of the hopping set

همان‌طور که انتظار می‌رفت با افزایش تعداد کانال‌های فرکانسی در مجموعه پرش عملکرد دو سیستم به‌هم نزدیک‌تر شده و به‌ازای احتمال برقراری لینک بالای ۹۵ درصد، عملکرد سیستم پیشنهادی حدود ۲ دی‌بی بیشتر از سیستم‌های سنتی شبیه‌سازی شده خواهد بود. با توجه به‌این‌که در ۳ وضعیت ۳۲، ۶۴ و ۱۲۸ کانال فرکانسی در یک مجموعه‌ی پرشی، نتایج به‌دست آمده برای نرخ خالص خروجی سیستم‌های شبیه‌سازی شده، متفاوت است، در شکل (۱۰) نرخ خالص سیستم به‌ازای میانگین تعداد کانال‌های موجود در یک مجموعه پرش نشان داده شده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله پس از استفاده از یک روش کارآمد برقراری خودکار لینک مبتنی بر روش‌های پرش‌فرکانسی در کانال HF، با توجه به احتمال ایجاد اختلال در الگوی پرش‌فرکانسی در مرحله ارسال داده، یک روش جدید برای نگه‌داری خودکار از لینک پرش فرکانسی ارائه شد که به کمک آن کانال‌های مناسب برای الگوی پرش‌فرکانسی جدید با استفاده از روش پرش‌فرکانسی شناخت‌گر، انتخاب می‌شود. برای بررسی عملکرد سیستم، شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار متلب جهت بررسی کارایی سیستم نگه‌داری خودکار لینک مبتنی بر پرش‌فرکانسی انجام شد. برای اطمینان از این‌که در حین ارسال داده پرش فرکانسی، با حضور جمرهای هوشمند، سیستم پیشنهادی کارایی خود را از دست ندهد، محافظت خودکار از لینک با استفاده از روش پیشنهادی پرش‌فرکانسی شناخت‌گر انجام می‌شود. بررسی نتایج شبیه‌سازی سیستم پیشنهادی در مقایسه با روش محافظت از لینک مبتنی بر FH-ALE نشان می‌دهد که کارایی سیستم پیشنهادی برای احتمال برقراری لینک بیش از ۹۵ درصد، بیش از ۵ دی‌بی بهتر از روش‌های قبلی مرسوم است. به‌طور کلی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها نشان دهنده کارایی بالاتر سیستم پیشنهادی در حضور انواع مختلف جمرهای چندتون است.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از رساله دوره دکتری در دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از همکاران حوزه پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی و داوران محترم که ما را در انجام و ارتقای کیفی این مقاله یاری نموده‌اند، اعلام نمایند.

References

مراجع

[1] R. Buckley, W.N. Furman, "Application of machine learning techniques to HF propagation prediction", Proceeding of the IEEE/MILCOM, pp. 623-628, San Diego, CA, USA, Nov./Dec. 2021 (doi: 10.1109/MILCOM52596.2021.9653108).

[2] STANAG 4538, "Technical standards for an automatic radio control system (ARCS) for HF communication links", North Atlantic Treaty Organization, Ratification Request, Edition 1, 2000.

[3] M. Khodaverdizadeh, A. Haghbin, F. Razzazi, "Improving the performance of HF radio networks in the presence of interference through automatic link establishment with frequency hopping technique", Wireless Personal Communication Journal, no.127, pp. 2647–2666, Jul. 2022 (doi: 10.1007/s11277-022-09889-3).

[4] MIL-STD-188-141B, "Interoperability and performance standards for medium and high frequency radio systems", U.S. Deptement Defense, 1999.

[5] A. Bilal, G. Sun, "Automatic link establishment for HF radios", Proceeding of the IEEE/ICSESS, pp. 640-643, Beijing, China, Nov. 2017 (doi: 10.1109/ICSESS.2017.8342996)

[6] B. Baynat, H. Khalife V. Conan, C. Lamy-Bergot, R. Pouvez, "On the design of automatic link establishment in high frequency network", International Journal of Networking and Computing, vol. 7, no. 2, pp. 419–446, July 2017 (doi: 10.15803/ijnc.7.2_419).

[7] M. Dansarie, "Cryptoanalysis of the sodark cipher for HF radio automatic link establishment", IACR Transaction on Symmetric Cryptology, vol. 2021, no. 3, pp. 36-53, Sept. 2021 (doi: 10.46586/tosc.v20-21.i3.36-53)

[8] MIL-STD-188-141C, "Interoperability and performance standards for medium and high frequency radio systems", U.S. Department Defense, 2011.

[9] MIL-STD-188-141D, "Interoperability and performance standards for medium and high frequency radio systems", U.S. Department Defense, 2017.

[10] E.E. Johnson, "Staring link establishment for high-frequency radio", Proceeding of the IEEE/MILCOM, pp. 1433-1438, Tampa. FL, USA, Oct. 2015 (doi:10.1109/MILCOM.2015.7357646).
[11] E.E. Johnson, "Wideband ALE the next generation of HF", Proceeding of the NHFR.C, vol. 16, pp. 9.1.1-9.1.18, Aug. 2016.
[12] W. Peipei, Z. Min and S. Yingchun, "A multichannel detection method for HF 3G-ALE signal based on duffing chaaotic oscillator", Journal of University of Chinese Academy of Sciences, vol. 36, pp. 832-838, Dec. 2019 (doi:10.7523/j.issn.2095-6134.2019.06.015).
[13] Z. Qin, J. Wang, J. Chen, G. Ding, Y. Yao, X. Ji, X. Chen, "Link quality analysis based channel selection in high-frequency asynchronous automatic link establishment: A matrix completion approach", IEEE System Journal, vol. 12, no. 2, pp 1957–1968, June 2018 (doi: 10.1109/JSYST.2017.2717702).
[14] Z. Wu, H. Chen, Y. Lei, H. Xiong, "Recognizing automatic link establishment behaviors of a short-wave radio station by an improved unidimensional DenseNet", IEEE Access, No. 8, pp 96055–96064, May 2020 (doi:10.1109/ACCESS.2020.2997380)
[15] M.D. Street; M. Darnell, "Results of new automatic link establishment and maintenance techniques for HF radio systems", Proceeding of the IEEE/MILCOM, vol. 2, pp. 1067-1071, Monterey, CA, USA, Nov. 1997 (doi: 10.1109/MILCOM.1997.646780)
[16] A. Shahid, S. Ahmad, A. Akram, S.A. Khan, "Cognitive ALE for HF radios", Proceeding of the IEEE/ICCEA, pp. 28-33, Bali, Indonesia, March 2010 (doi: 10.1109/ICCEA.2010.162)
[17] Z. Wu, H. Chen, Y. Lei, "Application of convlutional neural network in radio station link establishment behaviors recognition", Journal of Physics: Conference Series, vol. 1757, no. 1, Article Number: 012063, Jan. 2021 (doi: 10.1088/1742-6596/1757/1/012063).
[18] R. Zhi, L. Zhang, Z. Zhou, "Cognitive frequency hopping", Proceeding of the IEEE/CrownCom, Singapore, pp. 1-4, May 2008 (doi: 10.1109/CROWNCOM.2008.4562466).
[19] C. Li, P. Qi, D. Wang, Z. Li, "On the anti-interference tolerance of cognitive frequency hopping communication systems", IEEE Trasactions on Relibility, vol. 69, no. 4, pp. 1453–1464, July 2020 (doi: 10.1109/TR.2020.3002105).
[20] E.S. Hennessey, K.M. Hopkinson, M.D. Silvius, "Opportunistic access in frequency hopping cognitive radio networks", Proceeding of the IEEE/WTS, pp. 1-6, Washington, DC, USA, April 2014 (doi: 10.1109/W-TS.2014.6835011)
[21] S.J. Yoo, J.M. Won, M. Seo, H.W. Cho, "Dynamic frequency hopping channel management in cognitive radio Ad-hoc networks", Proceeding of the IEEE/APCC, Kyoto, Japan, Oct. 2015 (doi: 10.1109/APCC.20-15.7412550).
[22] W. Lifeng, Z. Zhigang, "The calculation of HF ground wave propagation over complex terrain based on FEKO/PE hybrid algorithm", Proceeding of the IEEE/ICAICA, pp. 356-359, Dalian, China, March 2019 (doi: 10.1109/ICAICA.2019.8873521).
[23] H. Ahmadian, M.A. Pourmina, A. Haghbin, "The stable and anti jamming algorithm for synchronization of Hybrid Spread Spectrum system", Journal of intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 12, no. 48, pp.61-80, March 2022 (in persian) (dor: 20.1001.1.23223871.1400.12.48.3.3).

زیرنویس‌ها

1. High frequency
2. Automatic link establishment
3. Automatic eadio control system
4. Automatic channel selection
5. Automatic link maintenance
6. Channel sounding
7. Protocol data units
8. Node
9. Link before hopping
10. Link while hopping
11. Frequency hopping based automatic link establishment
12. Cognitive
13. Frequency hopping based automatic link maintenance
14. Wide band high frequency
15. Link quality analysis
16. Listen before transmit
17. Handshaking
18. Caller
19. Called
20. Scanning call
21. Listen for response
22. Received signal strength index
23. Signal to noise ratio
24. Signal to interference and noise ratio
25. Burst waveform
26. Payload
27. Preamble
28. Interleave
29. 8 array phase shift keying
30. Packet error rate
31. Additive white gaussian noise
32. Decibel