

طراحی روش‌های انتخاب پیوند ارسال در سیستم‌های رله همیار و رادیوشناختی برفراز با رله مجهز به بافر و نرخ ارسال تطبیقی گسسته

جلیل سیفعلی هرسینی^۱، استادیار؛ مریم اصغر نیا^۲، کارشناس ارشد

۱- گروه مهندسی برق - دانشکده فنی - دانشگاه گیلان - رشت - ایران - harsini@guilan.ac.ir

۲- گروه مهندسی برق - دانشکده فنی - دانشگاه گیلان - رشت - ایران - maryamasgharnia86@yahoo.com

چکیده: در این مقاله با هدف حداکثر نمودن نرخ بیت قابل انتقال، طراحی روش‌های انتخاب پیوند ارسال بی‌سیم در شبکه‌های مخابراتی دوگامی رله و رادیوشناختی که از رله مجهز به بافر و مدولاسیون-کدینگ تطبیقی استفاده می‌کنند، مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته است. نخست یک مدل ساده همکاری رله در یک سیستم مخابراتی دوگامی در نظر گرفته می‌شود که در آن گره میانی (رله) به بافر مجهز است و گره‌های فرستنده و رله از مدولاسیون و کدینگ تطبیقی با نرخ‌های گسسته استفاده می‌کنند. برای این مدل، ابتدا مسئله انتخاب پیوند ارسال داده به صورت یک مسئله بهینه‌سازی از نوع برنامه‌ریزی صحیح فرمول‌بندی شده است و سپس نحوه حصول پاسخ بهینه و تقریبی بر اساس الگوریتم ژنتیک ارائه گردیده است. در ادامه با توسعه مدل ابتدایی، یک مدل همکاری رله در حالت رادیوشناختی برفراز متشکل از چهار گره (دو جفت فرستنده-گیرنده) در نظر گرفته شده است. برای این مدل ضمن معرفی مسئله انتخاب پیوند ارسال داده که حداکثر گذردهی سیستم ثانویه را با رعایت حداقل مقدار گذردهی سیستم اولیه فراهم آورد، نحوه به دست آوردن پاسخ تقریبی از طریق الگوریتم ژنتیک مورد بحث قرار گرفته است. در انتها بر اساس نتایج عددی و شبیه‌سازی عملکرد الگوریتم‌های ارائه‌شده مورد ارزیابی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: رله مجهز به بافر، انتخاب بهینه پیوند، رادیوشناختی برفراز، بهینه‌سازی ژنتیک، مدولاسیون و کدینگ تطبیقی.

Link Selection Strategies for Buffer-Aided Relaying and Overlay Cognitive Radio Systems with Adaptive Discrete Rates

J. Seifali Harsini¹, Assistant Professor; M. Asgharnia², MSc

1- Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran, Email: harsini@guilan.ac.ir

2- Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran, Email: maryamasgharnia86@yahoo.com

Abstract: In this paper, aiming at maximizing the system throughput link selection strategies for buffer-aided two-hop relaying and overlay cognitive radio systems which employ discrete-rate adaptive modulation and coding (AMC), have been proposed. At first, a simple tree-node relaying scenario is considered in which the intermediate node (relay) equipped with a buffer and AMC, facilitates data communication between a source (also equipped with AMC) and a destination node in a two-hop communications system. For this scenario we formulate the optimal link selection problem as an integer programming problem and subsequently propose a genetic-based approximate solution using relaxation techniques. We then extend the simple buffer-aided relaying model to an overlay cognitive radio scenario comprising a pair of primary source-destination nodes and a pair of secondary (cognitive) source-destination nodes. In this model, the cognitive source node equipped with a buffer, acts as a relay to facilitate data transmission in the primary system and by this way it finds some opportunities to transmit its data to the cognitive destination node. Hence we optimize the cognitive link throughput by proposing a genetic-based link selection strategy which satisfies a target predefined average rate for the primary system. Numerical and simulation results are provided to evaluate the performance of the proposed link selection strategies.

Keywords: Buffer-aided relaying, optimal link selection, overlay cognitive radio, genetic optimization, adaptive modulation- coding.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۱/۰۵

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۰۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۱۹

نام نویسنده مسئول: جلیل سیفعلی هرسینی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - رشت - کیلومتر ۵ جاده قزوین - مجتمع دانشگاهی گیلان - دانشکده فنی - گروه مهندسی برق.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر استفاده از شبکه‌های رله همیار^۱ و رادیوشناختی^۲ مورد توجه جدی پژوهشگران در حوزه مخابرات بی‌سیم قرار گرفته است [۴-۱]. در این شبکه‌ها گره‌های رله که در مکان‌های مناسب قرار دارند بعد از دریافت پیام یک منبع، آن را پردازش نموده و سپس به سمت گره مقصد ارسال می‌کنند و به این طریق به افزایش رنج و ظرفیت انتقال داده کمک می‌کنند. مکانیسم رله کردن به خصوص در سناریوهایی که مسیر دید مستقیمی بین گره‌های منبع و مقصد وجود نداشته باشد می‌تواند مفید باشد. به این جهت امروزه قابلیت استفاده از مکانیسم رله در استانداردهای بی‌سیم جدیدی مانند IEEE802.16j و 3GPP LTE تعبیه شده است. از طرف دیگر تقاضا برای سرویس‌های متنوع بی‌سیم دسترسی به طیف فرکانسی مطلوب را محدودتر و سخت‌تر کرده است. در این راستا برای استفاده بهتر از باند فرکانسی موجود، پژوهشگران ایده‌ی استفاده از روش رادیوشناختی را ارائه کرده‌اند. در یک مدل رادیوشناختی، یک سیستم ثانویه^۳ (حداقل شامل یک جفت فرستنده-گیرنده) در حالی تصمیم می‌گیرد که از یک طیف فرکانسی مشخص برای انتقال داده بهره‌بردارد که مجوز استفاده از طیف مذکور در اختیار یک سیستم اولیه^۴ ارسال داده می‌باشد. در یکی از پرکاربردترین مدل‌ها موسوم به رادیوشناختی برفراز^۵، سیستم ثانویه با در اختیار قرار دادن بخشی از توان خود موجب افزایش کیفیت انتقال داده برای سیستم اولیه می‌شود (از طریق رله نمودن داده فرستنده اولیه) و بخش باقی‌مانده از توان خود را نیز صرف ارسال پیام خود به گیرنده ثانویه می‌کند [۳].

با معرفی و تحلیل عملکرد کانال رله سه‌گره‌ای (منبع-رله-مقصد) در مراجع [۲-۱]، علاقه‌مندی زیادی روی طراحی پروتکل‌های ارتباطی در شبکه‌های رله به وجود آمد. با این حال در غالب کارهای گزارش شده روی سیستم رله سه‌گره‌ای با پروتکل کدگشایی و گسیل^۶، فرض بر این است که رله در یک شکاف زمانی^۷ یک بسته داده از منبع دریافت می‌کند و در شکاف زمانی بعدی این بسته را به مقصد ارسال می‌نماید. چنین پروتکل‌هایی را اصطلاحاً رله عرفی^۸ گویند [۵]. اخیراً نشان داده شده است که اگر رله به یک بافر جهت ذخیره موقت بسته‌های داده دریافتی از منبع مجهز باشد می‌تواند با طراحی یک روش مناسب زمان‌بندی ارسال داده روی پیوندهای^۹ منبع-رله و رله-مقصد، بهره‌گونه‌گونی^{۱۰} موجود در جفت پیوندهای بی‌سیم را برای بهبود گذردهی سیستم مورد بهره‌برداری قرار داد. به‌طور خاص، در [۵] با کمک یک بافر در گره رله، مکانیسمی به کار برده شده است که در آن گره رله تعداد معینی از بسته‌های داده منبع را قبل از اینکه بسته‌ای برای مقصد بفرستد دریافت می‌کند. نویسندگان مقاله نشان داده‌اند که چنین مکانیسمی برای کانال‌های با محو شوندهی آرام^{۱۱} در ازای افزایش تأخیر بسته‌ها می‌تواند ظرفیت انتقال داده سیستم را بالا ببرد. در [۶] برای رله بافردار این اختیار به گره رله داده شده است که در هر شکاف زمانی بر اساس وضعیت لحظه‌ای کیفیت پیوندهای

بی‌سیم منبع-رله و رله-مقصد، تصمیم بگیرد که آیا از منبع بسته داده‌ای را دریافت کند و یا اینکه بسته‌ای را برای مقصد ارسال نماید. در آنجا نشان داده شده است که قابلیت انتخاب پیوند ارسال می‌تواند به بهبود گذردهی سیستم رله منجر شود. به علاوه، زلاتانوف و همکاران او ایده ارائه شده در مرجع [۶] را برای سناریویی که یک گره رله از بین چندین رله کاندید انتخاب شود مورد مطالعه قرار داده‌اند و کران بالای نرخ‌های قابل انتقال سیستم را استخراج نموده‌اند [۷]. با این وجود الگوریتم‌های انتخاب پیوند ارائه شده در [۷-۵] بر مبنای قابل دسترس بودن نرخ انتقال شانون یعنی سناریویی که در آن نرخ انتقال بیت تابعی پیوسته از SNR^{۱۲} کانال باشد (عبارت موسوم به ظرفیت کانال)، توسعه پیدا کرده‌اند. هرچند در سناریوهای عملی از نرخ بیت‌های گسسته مبتنی بر شمای مدولاسیون و کدینگ تطبیقی^{۱۳} (AMC) استفاده می‌شود [۹-۸] و بنابراین در عمل الگوریتم‌های انتخاب پیوند ارائه‌شده در [۷-۵] تنها برای بررسی کران‌های بالای گذردهی سیستم مفید هستند.

اخیراً ایده استفاده از رله مجهز به بافر برای مدل‌های مخابرات رادیوشناختی نیز به کار گرفته شده است [۱۱-۱۰]. در یک سناریوی رادیوشناختی موسوم به زیرکف^{۱۴}، شبکه سه‌گره‌ای منبع-رله-مقصد به‌عنوان سیستم ثانویه به نحوی عمل می‌کند که میزان تداخل روی سیستم اولیه (شامل یک جفت فرستنده-گیرنده) زیر یک مقدار معین قرار گیرد [۱۰]. به علاوه، برای یک سناریوی رادیوشناختی برفراز کران‌های بالای نرخ قابل انتقال شبکه که از طریق روش‌های ارسال فرصت‌طلبانه^{۱۵} قابل حصول هستند، محاسبه شده‌اند [۱۱]. لازم به ذکر است که ایده‌های ارائه‌شده در [۱۱-۱۰] بر مبنای فرضیات تئوری اطلاعاتی مانند استفاده از نرخ انتقال شانون و حذف تداخل متوالی استوار هستند و مجدداً برای تعیین کران بالای گذردهی سیستم مفید خواهند بود.

هدف این مقاله ارائه روش طراحی الگوریتم‌های انتخاب پیوند ارسال بی‌سیم در شبکه‌های مخابراتی دوگامی رله و رادیوشناختی برفراز است که از رله مجهز به بافر از نوع کدگشایی و گسیل و نرخ انتقال گسسته استفاده می‌کنند. در قسمت اول مقاله، برای یک شبکه سه‌گره‌ای منبع-رله-مقصد که در آن رله مجهز به بافر است با تعریف نرخ بیت‌های گسسته بر مبنای شمای AMC، مسئله انتخاب پیوند ارسال به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی از نوع برنامه‌ریزی صحیح مدل‌سازی شده است. سپس با کمک روش‌های سست‌سازی^{۱۶} روی متغیرهای تصمیم‌گیری نحوه به دست آوردن جواب تقریبی (زیر بهینه) مسئله از طریق الگوریتم ژنتیک ارائه گردیده است. در قسمت دوم مقاله یک شبکه رادیوشناختی برفراز متشکل از چهار گره منبع اولیه، مقصد اولیه، منبع ثانویه (که به‌عنوان رله برای سیستم اولیه نیز عمل می‌کند) و مقصد ثانویه در نظر گرفته می‌شود. در این مدل فرض شده است که گره‌های منبع از AMC استفاده می‌کنند و گره منبع ثانویه نیز به بافر مجهز است. برای این مدل نیز مسئله انتخاب پیوند



شکل ۱: مدل سیستم مخابراتی دوگامی تشکیل شده از منبع S، گره میانی R و نود مقصد D. گره R از یک بافر برای ذخیره موقت بسته‌های دریافتی از منبع استفاده می‌کند.

داده را که قبلاً از منبع دریافت کرده است (در بافر ذخیره کرده است) به گره مقصد ارسال می‌کند.

فرض شده است که پیوندهای S-R و R-D تحت تأثیر محو شونده‌گی باندباریک و نویز AWGN باشند. ضرایب محو شونده‌گی کانال‌های S-R و R-D در طی شکاف زمانی نام به ترتیب با فرآیندهای تصادفی $h_1(i)$ و $h_2(i)$ نشان داده می‌شوند. این فرآیندها ایستاد و ارگودیک^{۱۹} فرض می‌شوند و در طی یک شکاف زمانی ثابت هستند. به علاوه، گره‌های منبع و رله ارسال بسته را با توان‌های ثابت به ترتیب P_S و P_R انجام می‌دهند. مقادیر واریانس نویز AWGN در مقصد و رله نیز به ترتیب با σ_D^2 و σ_R^2 نشان داده شده‌اند. بر اساس نمادهای فوق، مقادیر SNR لحظه‌ای در رله و مقصد در شکاف زمانی نام که به ترتیب با $\gamma_1(i)$ و $\gamma_2(i)$ نشان داده شده‌اند، مطابق روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$\gamma_1(i) = \frac{P_S}{\sigma_R^2} |h_1(i)|^2, \quad \gamma_2(i) = \frac{P_R}{\sigma_D^2} |h_2(i)|^2 \quad (1)$$

میانگین این دو متغیر به ترتیب با $\Omega_1 = E\{\gamma_1(i)\}$ و $\Omega_2 = E\{\gamma_2(i)\}$ نشان داده می‌شوند. برای کانال‌های مخابراتی با محو شونده‌گی رابلی، تابع چگالی احتمال متغیر γ_1 (و به همین ترتیب γ_2) دارای توزیع نمایی مطابق رابطه زیر است:

$$p_{\gamma_1}(\gamma) = \frac{1}{\Omega_1} \exp\left(-\frac{\gamma}{\Omega_1}\right), \quad \gamma \geq 0 \quad (2)$$

۲-۲- شمای AMC با نرخ ارسال گسسته

یکی از روش‌های مرسوم برای تحقق نرخ‌های ارسال تطبیقی گسسته استفاده از شمای AMC است که امروزه قابلیت استفاده از آن در اکثر استانداردهای مخابراتی نوین مانند WiMAX و LTE قرار داده شده است. در این روش بازه تغییرات متغیر SNR کانال به $N+1$ بازه جدا از هم به فرم $[\Gamma_n, \Gamma_{n+1}]$, $n=0,1,2,\dots,N$ با مرزهای تصمیم $\{\Gamma_n\}_{n=0}^{N+1}$, $\Gamma_0=0, \Gamma_{N+1}=\infty$ تقسیم می‌شود و متناظر با بازه وضعیت $\gamma \in [\Gamma_n, \Gamma_{n+1}]$ وضعیت n ام شمای AMC با نرخ R_n (با واحد بیت بر سمبل) برای ارسال داده مورد استفاده قرار می‌گیرد. در اینجا وضعیت اول متناظر بازه $\gamma \in [\Gamma_0, \Gamma_1]$ با نرخ ارسال $R_0=0$ حالت خاموشی^{۲۱} کانال نامیده می‌شود و در آن ارسالی صورت نمی‌گیرد. در ادبیات موضوع روش‌های مختلفی برای ساختن شمای AMC وجود دارد. در یک نمونه در مرجع [۸]، هر وضعیت AMC بر اساس ترکیب یک شمای کدینگ حلقوی با نرخ مشخص و یک شمای مدولاسیون QAM

ارسال در هر شکاف زمانی به صورتی معرفی و فرمول‌بندی شده است که با رعایت کیفیت سرویس مورد نظر سیستم اولیه (در قالب تضمین نرخ انتقال بیت)، بیشینه گذردهی سیستم ثانویه فراهم آید. به علاوه، روش به دست آوردن جواب تقریبی (زیر بهینه) مسئله بهینه‌سازی مذکور از طریق الگوریتم ژنتیک ارائه شده است.

این مقاله به صورت زیر سازمان‌دهی شده است. در قسمت دوم مدل سیستم دوگامی رله مجهز به بافر و AMC معرفی شده است. در قسمت سوم فرمول‌بندی مسئله انتخاب پیوند ارسال در قالب یک مسئله بهینه‌سازی و روش به دست آوردن جواب آن ارائه شده است. در قسمت چهارم مقاله مدل سیستم رادیوشناختی برفراز و فرمول‌بندی مسئله انتخاب پیوند ارسال به همراه جواب آن، ارائه می‌شود. نتایج عددی و ارزیابی کارایی الگوریتم‌های ارائه‌شده نیز در قسمت پنجم مقاله گنجانده شده است. قسمت آخر مقاله به نتیجه‌گیری می‌پردازد.

۲-۲- مدل سیستم دوگامی رله مجهز به بافر و AMC

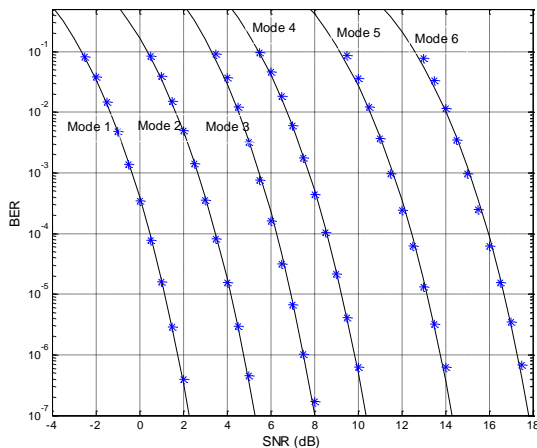
در عمل، شبکه‌های مبتنی بر سیستم رله یک‌طرفه^{۱۷} در مقایسه با سیستم رله دوطرفه پیاده‌سازی ساده‌تری دارد و به این دلیل استفاده از آن‌ها متداول‌تر است. با این وجود سیستم رله یک‌طرفه از مشکل افت بهره تسهیم^{۱۸} برخوردار است. برای رفع این مشکل و جبران افت بهره، پروتکل‌های موجود برای سیستم رله یک‌طرفه از پیوند مستقیم منبع-مقصد نیز برای دستیابی به بهره گونه‌گونی استفاده می‌کنند [۲-۱]. هرچند در فواصل بزرگ به خاطر فاصله زیاد بین منبع و مقصد این پیوند معمولاً به شدت تضعیف شده است و غالباً در دسترس نیست. در قسمت اول این مقاله یک سیستم دوگامی رله بدون پیوند مستقیم منبع-مقصد در نظر گرفته شده است که برای کاربردهای که به افزایش رنج انتقال و پوشش نیاز دارند مفید است.

۲-۱- توصیف مدل سیستم

مطابق شکل ۱ یک شبکه ساده شامل یک منبع (S)، یک رله (R) از نوع یک‌طرفه با مکانیسم کدگشایی و گسیل و یک مقصد (D) در نظر گرفته شده است. منبع تنها توسط رله قادر است که با مقصد ارتباط برقرار کند و پیوند مستقیمی از منبع به مقصد موجود ندارد. منبع بسته‌های داده را به رله می‌فرستد و رله آن‌ها را کدگشایی کرده و در صورت لزوم در بافر ذخیره می‌کند تا در فرصت مناسب آن‌ها را به مقصد ارسال کند. فرض بر این است که زمان به شکاف‌های زمانی مساوی تقسیم شده است و ارسال بسته‌های داده در طول یک شکاف زمانی انجام می‌گیرد. در شکاف زمانی فعلی اگر پیوند منبع-رله (S-R) برای ارسال انتخاب شود، منبع عمل ارسال داده را انجام می‌دهد و رله اطلاعات را از منبع دریافت می‌کند. در اینجا فرض می‌شود که منبع همواره داده کافی برای ارسال دارد و بنابراین می‌توان تعداد شکاف‌های زمانی زیادی را برای تحلیل سیستم به کار گرفت. با فرض اینکه بافر موجود در رله دارای ظرفیت نامحدود است، اگر در شکاف زمانی فعلی پیوند رله-مقصد (R-D) برای ارسال انتخاب شود، گره رله بسته‌های

جدول ۱: شمای AMC با نرخ گسسته و پارامترهای برازش منحنی‌های

BER					
Mode	Coding rate-Modulation	Rate bits/sym.	a_n	g_n	Γ_{bn}
۱	۱/۲ BPSK	۰.۵	۷۰/۹۵۱۷	۱۲/۰۹۰۰	-۳/۸۷۳۷
۲	۱/۲ QPSK	۱	۶۸/۶۴۸۵	۶/۰۲۷۰	-۰/۸۷۹۵
۳	۳/۴ QPSK	۱.۵	۱۱۵/۰۰۷۸	۳/۳۹۸۰	۲/۱۷۲۰
۴	۱/۲ ۱۶-QAM	۲	۷۲/۴۵۷۵	۱/۸۷۷۰	۴/۲۳۴۲
۵	۳/۴ ۱۶-QAM	۳	۴۴/۵۶۷۳	۰.۷۳۹۹	۷/۸۳۰۹
۶	۲/۳ ۶۴-QAM	۴	۳۶/۴۵۲۱	۰.۳۳۴۷	۱۱/۲۰۸۹



شکل ۲: منحنی‌های نرخ خطای بیت برای وضعیت‌های مختلف AMC

در شکل ۲ نقاط مشخص شده با ستاره از شبیه‌سازی به دست آمده‌اند. منحنی‌های توپر نیز بر اساس مدل تحلیلی (۳) با تنظیم ضرایب مناسب ترسیم شده‌اند.

۳- روش انتخاب پیوند ارسال برای سیستم دوگامی رله

در این بخش مبانی ریاضی لازم جهت فرمول‌بندی مسئله انتخاب پیوند در قالب یک مسئله بهینه‌سازی ارائه شده است. برای شکل ۱ مسئله انتخاب پیوند به این صورت مطرح است که در شکاف زمانی جاری با توجه به وضعیت کانال‌های مخابراتی S-R و R-D (SNR)های لحظه‌ای آن‌ها و سایر فیلدهای سیستم تصمیم گرفته می‌شود که آیا ارسال از رله به مقصد انجام گیرد و یا اینکه منبع برای رله داده ارسال نماید.

همان‌گونه که پیش‌تر ذکر شد این مسئله قبلاً در ادبیات موضوع سیستم‌های رله مجهز به بافر معرفی شده است و بنابراین در این بخش ابتدا ویژگی‌های یک روش بهینه انتخاب پیوند مرور می‌شود.

۳-۱- ویژگی‌های یک روش بهینه انتخاب پیوند

فرض کنید در شکاف زمانی n ام انتقال با نرخ‌های AMC به ترتیب $R_1(i)$ و $R_2(i)$ (بیت بر سمبل) برای منبع و رله امکان‌پذیر باشد. متغیرهای $R_1(i)$ و $R_2(i)$ به ترتیب متعلق به مجموعه‌هایی از

با مرتبه معین برای استاندارد شبکه محلی IEEE 802.11n معرفی شده است. در ادبیات موضوع مدولاسیون تطبیقی نشان داده شده است که در عمل با استفاده از تعداد محدودی وضعیت ارسال (در رنج ۶ الی ۸) تقریباً همه بهره کارایی طیفی قابل حصول در کانال محو شونده‌گی به دست می‌آید [۹]. جدول ۱ شش وضعیت AMC برگرفته از استاندارد IEEE 802.11n را به همراه مشخصات آن‌ها شامل نوع مدولاسیون، کدگذاری و نرخ انتقال نشان می‌دهد. در این مقاله نرخ خطای بیت در وضعیت n ام به‌عنوان تابعی از SNR لحظه‌ای که با $BER_n(\gamma)$ نشان داده می‌شود، با کمک معادله زیر تقریب زده می‌شود:

$$BER_n(\gamma) = \begin{cases} 1/2, & \gamma < \Gamma_{bn} \\ a_n \exp(-g_n \gamma), & \gamma \geq \Gamma_{bn} \end{cases} \quad (3)$$

در (۳) پارامترهای $\{a_n, g_n, \Gamma_{bn}\}$ ثابت‌هایی وابسته به وضعیت n ام هستند که بر اساس روش برازش منحنی با تطبیق مقادیر شبیه‌سازی شده بر معادله (۳) به دست می‌آیند. نمودارهای BER بر حسب SNR برای شمای AMC در شکل ۲ ترسیم شده است. همان‌گونه که این شکل نشان می‌دهد با تنظیم ضرایب در مدل تحلیلی (۳) این مدل به خوبی توانسته است که مقادیر BER حاصل از شبیه‌سازی را تقریب بزند. ضرایب برازش منحنی BER به دست آمده در جدول ۱ گزارش شده‌اند.

برای تعیین وضعیت ارسال در شمای AMC لازم است که مرزهای تصمیم Γ_n مشخص شوند. در عمل مرز تصمیم Γ_n همواره از Γ_{bn} بزرگ‌تر است و بنابراین مقدار متوسط نرخ خطای بیت در وضعیت n ام که با \overline{BER}_n نمایش داده می‌شود، به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\overline{BER}_n = \frac{1}{\pi_n} \int_{\Gamma_n}^{\Gamma_{n+1}} a_n \exp(-g_n \gamma) p_{\gamma_i}(\gamma) d\gamma = \frac{a_n}{\pi_n d_n \Omega_i} (\exp(-d_n \Gamma_n) - \exp(-d_n \Gamma_{n+1})) \quad (4)$$

در رابطه فوق $d_n = \frac{1}{\Omega_i} + g_n$ و π_n نیز احتمال انتخاب وضعیت n ام را نشان می‌دهد که برای تابع چگالی احتمال رایلی در معادله (۲) به‌صورت زیر به دست می‌آید:

$$\pi_n = \int_{\Gamma_n}^{\Gamma_{n+1}} p_{\gamma_i}(\gamma) d\gamma = \exp(-\Gamma_n / \Omega_i) - \exp(-\Gamma_{n+1} / \Omega_i) \quad (5)$$

با در نظر گرفتن یک مقدار هدف برای نرخ خطای بیت که با P_e نشان داده می‌شود، طراحی AMC بر این مبنا صورت می‌گیرد که در هر وضعیت به‌طور متوسط نرخ خطای بیت برابر P_e باشد. بر این اساس N معادله به فرم $\overline{BER}_n = P_e, \forall n = 1, 2, \dots, N$ برای به دست آوردن مقادیر مرزهای تصمیم Γ_n تشکیل می‌شود که با کمک روش‌های عددی قابل حل است. بر اساس توضیحات فوق، گره S نرخ ارسال خود را بر اساس مقدار لحظه‌ای γ_1 از بین N_1 وضعیت AMC انتخاب می‌کند. در روالی مشابه، گره R نیز نرخ ارسال خود را بر اساس مقدار لحظه‌ای γ_2 از بین N_2 وضعیت AMC انتخاب می‌کند که در حالت کلی می‌تواند با حالت ارسال گره S متفاوت باشد.

نرخ‌های AMC با N_1 و N_2 عضو هستند. متغیر باینری d_i به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$d_i = \begin{cases} 1, & \text{Relay transmits} \\ 0, & \text{Source transmits} \end{cases} \quad (6)$$

به عبارت دیگر در شکاف زمانی i ام اگر $d_i = 0$ آنگاه منبع به رله، عمل ارسال داده با نرخ $R_1(i)$ را انجام می‌دهد و اگر $d_i = 1$ آنگاه رله با نرخ $R_2(i)$ اقدام به ارسال داده به گره مقصد می‌کند. بر اساس نمادگذاری فوق تعداد متوسط بیت‌هایی (نرمالیزه شده با واحد بیت بر سمبل یا بیت بر ثانیه بر هر ترز) که در هر شکاف زمانی از طرف منبع ارسال و وارد بافر رله می‌شود را می‌توان به صورت زیر به دست آورد:

$$T_1 = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L (1-d_i) R_1(i) \quad (7)$$

در رابطه (۷) L تعداد شکاف‌های زمانی در نظر گرفته شده را نشان می‌دهد. علاوه بر این، مقدار متوسط بیت بر شکاف زمانی که بافر رله را ترک می‌کنند نیز با رابطه (۸) قابل محاسبه است:

$$T_2 = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L d_i \min\{Q(i-1), R_2(i)\} \quad (8)$$

در رابطه (۸) $Q(i)$ تعداد (نرمالیزه) بیت‌های موجود در بافر رله را در انتهای شکاف زمانی i ام نشان می‌دهد (طول بیتی صف). باید توجه کرد که مقدار T_2 در واقع میزان گذردهی سیستم دوگامی شکل ۱ را نیز نشان می‌دهد. از دیدگاه نظریه صف بندی اگر $T_2 < T_1$ باشد آنگاه صف تشکیل شده در رله در حالت جذب کنندگی^{۳۳} عمل می‌کند و اگر $T_2 > T_1$ صف در حالت غیر جذب کنندگی عمل خواهد کرد. با این وجود از نقطه نظر قانون بقاء جریان همیشه باید شرط $T_2 \leq T_1$ برقرار باشد. در ادامه، قضیه ۱ ارتباط یک الگوریتم انتخاب پیوند بهینه و بیشینه گذردهی قابل حصول را نشان می‌کند.

قضیه ۱: یک شرط لازم برای روش بهینه انتخاب پیوند در شکل ۱ که بتواند بیشینه گذردهی سیستم را ایجاد نماید این است که صف تشکیل شده در بافر رله در مرز بین حالت‌های جذب کنندگی و غیر جذب کنندگی قرار داشته باشد، یعنی $T_1 = T_2$.

اثبات قضیه ۱: در پیوست (الف) از مرجع [۵] اثباتی بر این قضیه ارائه شده است. به دلیل اینکه این اثبات هم برای نرخ بیت‌های پیوسته و هم گسسته برقرار است، در اینجا از اثبات صرف نظر می‌شود.

قضیه ۲ عبارت ساده تری را برای گذردهی سیستم شکل ۱ در اختیار قرار می‌دهد.

قضیه ۲: اگر فرآیندهای تصادفی $R_1(i)$ و $R_2(i)$ ایستاد و ارگودیک باشند، آنگاه یک روش بهینه انتخاب پیوند در شکل ۱ به نحوی عمل می‌کند که تساوی زیر برقرار باشد:

$$E\{(1-d_i)R_1(i)\} = E\{d_i R_2(i)\} \quad (9)$$

و در این حالت مقدار گذردهی سیستم شکل ۱ با رابطه زیر مشخص می‌شود:

$$\tau = E\{d_i R_2(i)\} \quad (10)$$

در روابط فوق $E\{\cdot\}$ عملگر متوسط آماری را نشان می‌دهد.

اثبات قضیه ۲: اثبات درستی این قضیه نیز به پیوسته یا گسسته بودن مجموعه نرخ‌های ارسال مورد استفاده بستگی ندارد. بنابراین اثبات ارائه شده در پیوست (ب) از مرجع [۵] در اینجا نیز قابل استفاده است.

در واقع بر اساس قضیه ۲، برای یک روش بهینه انتخاب پیوند همواره پیشامد $Q(i-1) \geq R(i)$ با احتمال یک اتفاق می‌افتد (یعنی هر بار که رله برای ارسال انتخاب شود همواره در بافر آن به اندازه لازم بیت برای ارسال وجود خواهد داشت) و اثر پیشامد $Q(i-1) < R(i)$ در محاسبه گذردهی قابل چشم‌پوشی است. از این رو برای $L \rightarrow \infty$ رابطه

$$\tau = T_2 = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L d_i \min\{Q(i-1), R_2(i)\} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L d_i R_2(i) \quad (11)$$

است و شرط (۹) به صورت زیر نیز قابل بیان است:

$$\frac{1}{L} \sum_{i=1}^L (1-d_i) R_1(i) = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L d_i R_2(i) \quad (11)$$

۳-۲- فرمول بندی مسئله انتخاب بهینه پیوند ارسال

با توجه به بحث ارائه شده در قسمت قبل، برای تعیین یک روش بهینه انتخاب پیوند که بتواند بیشینه گذردهی سیستم شکل ۱ را فراهم آورد، لازم است که نحوه تنظیم پارامتر d_i و وابستگی آن به پارامترها و متغیرهای موجود در سیستم تعیین شود. برای این منظور مسئله بهینه سازی زیر روی تعداد بزرگی از شکاف‌های زمانی (L بزرگ) در نظر گرفته می‌شود:

$$\text{Minimize}_{\{d_i\}_{i=1}^L} -\frac{1}{L} \sum_{i=1}^L d_i R_2(i) \quad \text{subject to:}$$

$$C1: \quad \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L d_i R_2(i) = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L (1-d_i) R_1(i) \quad (12)$$

$$C2: \quad d_i(1-d_i) = 0, \quad \forall i = 1, 2, \dots, L$$

در (۱۲) شرط C1 معرف ویژگی روش بهینه انتخاب پیوند در معادله (۱۱) است. شرط C2 نیز تضمین می‌کند که متغیر d_i باینری باشد. با حل این مسئله روش بهینه انتخاب پیوند تعیین می‌شود. باید توجه کرد که مسئله (۱۲) یک مسئله بهینه سازی از نوع برنامه ریزی صحیح با بعد بسیار بزرگ است. نویسندگان مقاله [۵] مسئله‌ای مشابه (۱۲) را در نظر گرفته‌اند و با کمک روش سست سازی ابتدا به متغیر d_i اجازه داده‌اند از حالت باینری خارج شود و به عنوان یک متغیر پیوسته در فاصله (۰، ۱) تغییر کند. بر این اساس با کمک روش لاگرانژ و مشتق گیری نسبت به متغیر d_i سعی شده است که یک جواب برای مسئله سست شده به دست آید و در انتها نیز جواب به دست آمده در دو نقطه $d_i = 0$ و $d_i = 1$ ارزیابی شده است. در آنجا نشان داده شده است که اگر نرخ ارسال تابعی پیوسته و معکوس پذیر از SNR کانال باشد (مانند نرخ لگاریتمی شانون)، روش لاگرانژ به یک جواب تحلیلی می‌رسد. البته باید توجه کرد که روش ارائه شده در [۵] برای سناریویی که از نرخ‌های گسسته AMC استفاده شود نه تنها به جواب تحلیلی نمی‌رسد بلکه اساساً قابل استفاده نیست زیرا که در آن روش

۳-۳- معیار مقایسه

به‌عنوان معیار مقایسه برای ارزیابی جواب حاصل از الگوریتم ژنتیک در مسئله (۱۲)، از دو مکانیسم رله کردن دیگر که قبلاً در ادبیات موضوع به کار گرفته شده‌اند، استفاده می‌شود. در مکانیسم نخست فرض می‌شود که رله به این صورت عمل نماید که در یک شکاف زمانی یک بسته داده را از منبع دریافت نماید و در شکاف زمانی بعدی این بسته داده را به مقصد بفرستد (یعنی گره رله تنها به اندازه یک بسته داده حافظه ذخیره‌ساز دارد) [۱۶]. در ادبیات موضوع به چنین مکانیسمی رله عرفی می‌گویند. برای رله عرفی متوسط گذردهی نرمالیزه روی تعداد L شکاف زمانی به‌صورت زیر به دست می‌آید:

$$\tau_{\text{conv},1} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^{L/2} \min\{R_1(2i-1), R_2(2i)\} \quad (14)$$

در مکانیسم دوم فرض می‌شود که رله به بافر مجهز است و به این صورت عمل می‌کند که روی L شکاف زمانی (L زوج) در $L/2$ ابتدایی شکاف‌های زمانی منبع به رله ارسال داده خواهد داشت و گره رله بعد از دریافت بسته‌های داده آن‌ها را موقتاً ذخیره می‌کند. در $L/2$ شکاف زمانی بعدی رله بسته‌های داده موجود در بافرش را به مقصد مورد نظر ارسال می‌کند [۵]. در ادامه چنین مکانیسمی با نام رله عرفی بافردار معرفی می‌شود. برای رله عرفی بافردار متوسط گذردهی نرمالیزه روی تعداد L شکاف زمانی به‌صورت زیر به دست می‌آید:

$$\tau_{\text{conv},2} = \frac{1}{L} \times \min\left\{\sum_{i=1}^{L/2} R_1(i), \sum_{i=\frac{L}{2}+1}^L R_2(i)\right\} \quad (15)$$

۴- انتخاب پیوند ارسال در مدل سیستم رادیوشناختی برفراز

در ادبیات موضوع برای سیستم‌های رادیوشناختی سه الگوی اصلی کاری با عناوین زیرکف، برفراز و درهم‌آمیختن^{۲۴} معرفی شده‌اند [۳]. در الگوی رادیوشناختی برفراز، فرستنده‌های رادیوشناختی با کمک روش‌های پردازش سیگنال و کدگذاری ارتباط کاربرهای اولیه را تسهیل می‌کنند و از این طریق می‌توانند فرصت یابند تا از پهنای باند سیستم اولیه برای ارسال داده خود نیز استفاده کنند. در این مدل، فرستنده ثانویه از کتاب کد کاربرهای اولیه اطلاع دارد (به‌عنوان مثال اگر کاربرهای اولیه از یک استاندارد یکسان بر اساس یک کتاب کد منتشر شده استفاده کنند و یا کتاب کد خود را به‌صورت متناوب منتشر کنند) و بنابراین پیام‌های کاربر اولیه با کدگشایی در گیرنده رادیوشناختی قابل دستیابی می‌باشند. در شکل مرسوم کاربرهای رادیوشناختی می‌توانند بخشی از توان خود را برای کمک به فرستنده‌های اولیه (از طریق رله کردن داده‌های آن‌ها) صرف کنند و بخش باقی‌مانده توان را نیز برای انتقال داده‌های خود به کار گیرند. یک شکل برای پیاده‌سازی مبادله توان فوق را می‌توان با تقسیم مناسب شکاف‌های زمانی ارسال داده بین سیستم‌های اولیه و ثانویه به این صورت مطرح کرد که گره فرستنده رادیوشناختی

شرط C1 تنها با نرخ‌های ارسال پیوسته برآورده می‌شود. از طرف دیگر جواب ارائه‌شده در [۵] بهینه محلی (و نه سراسری) است. علت این ادعا این است که با فرض d_i پیوسته آنگاه قید C2 در (۱۲) مستوی نیست و بنابراین مسئله (۱۲) محدب نخواهد بود و در این حالت با بهره‌گیری از روش لاگرانژ تنها یک جواب بهینه محلی قابل‌حصول خواهد بود. به‌عنوان یک نتیجه، مسئله (۱۲) در حالتی که گره‌های منبع و رله از نرخ‌های گسسته ارسال استفاده کنند یک جواب تحلیلی ندارد. با توجه به اینکه در مخابرات عملی از نرخ‌های گسسته استفاده می‌شود، بنابراین لازم است که مسئله انتخاب پیوند در این حالت نیز مورد ارزیابی قرار گیرد.

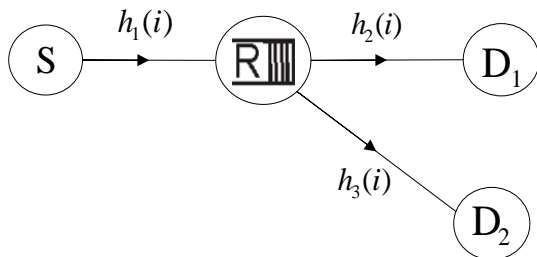
در ادبیات موضوع بهینه‌سازی، الگوریتم‌های ژنتیک و تکاملی برای بهینه‌سازی روی فضاهای جواب با بعد بالا که در آن‌ها جستجوی فراگیر بسیار هزینه‌بر است، به کار گرفته شده‌اند. در این الگوریتم‌ها با تقلید از فرآیند تکامل طبیعی (شامل انتخاب، ترکیب مجدد و جهش) عمل کاوش در فضای بزرگ جواب برای رسیدن به نقطه بهینه محلی صورت می‌گیرد. استفاده از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی کارایی سیستم‌های الکتریکی و مخابراتی در ابعاد بزرگ قبلاً گزارش شده است [۱۴-۱۲]. بنابراین در این مقاله جواب مسئله (۱۲) از طریق الگوریتم ژنتیک مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور از تابع $ga(\cdot)$ از جعبه ابزار نرم‌افزار MATLAB استفاده می‌شود [۱۵]. به کمک یک مثال بزرگی فضای جستجو را می‌توان به این شکل تصور نمود که اگر تعداد شکاف‌های زمانی ۱۰۰۰ در نظر گرفته شود، آنگاه تعداد جواب‌های ممکن ۲۱۰۰۰ مورد است که یک عدد با بیش از ۳۰۰ رقم در مبنای ده‌دهی را نشان می‌دهد. در چنین فضای جواب بزرگی به دست آوردن جواب بهینه با داشتن قیود ذکرشده به راحتی ممکن نیست. برای افزایش سرعت حل مسئله، می‌توان در الگوریتم شبیه‌سازی جواب را از حالت مقید به جواب باینری خارج نمود. سپس با تعریف یک نگاهت، مجدداً از محدوده جواب به دست آمده به فضای باینری مناسب رسید. در واقع تابع $ga(\cdot)$ در حضور قیدهای تساوی در مسئله (۱۲) دقیقاً به همین منوال عمل می‌کند و تنها روی متغیر پیوسته (در اینجا با x_i نشان داده می‌شود) عمل جستجوی جواب بهینه را انجام می‌دهد. بنابراین در ابتدا متغیر d_i با x_i جایگزین شده و به x_i اجازه داده می‌شود که در بازه $(-1, 2)$ تغییرات پیوسته داشته باشد. بعد از همگرایی الگوریتم ژنتیک و تعیین مقادیر بهینه x_i با نگاهت زیر متغیر d_i (به‌عنوان جواب زیر بهینه مسئله (۱۲)) بازیابی می‌شود:

$$d_i = \begin{cases} 0, & -1 \leq x_i < \frac{1}{2} \\ 1, & \frac{1}{2} \leq x_i \leq 2 \end{cases} \quad (13)$$

در ادامه، جواب مسئله انتخاب پیوند (۱۳) با نام اختصاری LSA_DBR^{۲۵} مورد اشاره قرار گرفته است.

۴-۲- فرمول‌بندی مسئله انتخاب پیوند ارسال سیستم رادیوشناختی

با توجه به کارکرد یک‌طرفه گره رله در شکل ۳، مسئله انتخاب پیوند ارسال در هر شکاف زمانی به این صورت مطرح می‌شود که کدام یک از گره‌های S یا R ارسال را انجام دهند و در صورتی که گره R فرصت ارسال داده را به دست آورد، این گره داده کدام یک از مقاصد D₁ و D₂ را ارسال خواهد کرد (انتخاب بین پیوندهای R-D₁ و R-D₂). از این نظر، در هر شکاف زمانی انتخاب بین یکی از سه پیوند S-R، R-D₁ و R-D₂ مطرح است. انتخاب پیوند مذکور با کمک دو متغیر باینری زیر قابل بیان است:



شکل ۳: مدل سیستم رادیوشناختی برفراز متشکل از چهار گره. در اینجا گره رله علاوه بر تسهیل مخابره داده بین منبع S و مقصد D₁ سعی می‌کند که در فرصت مناسب داده‌های خود را نیز به مقصد مورد نظر یعنی D₂ بفرستد.

$$d_i = \begin{cases} 1, & \text{Relay transmits} \\ 0, & \text{Source transmits} \end{cases} \quad (17)$$

$$\lambda_i = \begin{cases} 1, & \text{Relay transmits to } D_2 \text{ (If } d_i=1) \\ 0, & \text{Relay transmits to } D_1 \text{ (If } d_i=1) \end{cases} \quad (18)$$

فرض کنید در شکاف زمانی i ام با توجه به مقادیر SNR لحظه‌ای، انتقال با نرخ‌های AMC به ترتیب $R_1(i)$ ، $R_2(i)$ و $R_3(i)$ (بیت بر سمبل) بر روی کانال‌های S-R، R-D₁ و R-D₂ امکان‌پذیر باشد. متغیرهای $R_1(i)$ ، $R_2(i)$ و $R_3(i)$ به ترتیب متعلق به مجموعه‌هایی از نرخ‌های AMC با N_1 ، N_2 و N_3 عضو هستند. با توجه به متغیرهای باینری تعریف شده در روابط (۱۸-۱۷)، نرخ ارسال متوسط (نرمالیزه شده) برای کانال‌های S-R، R-D₁ و R-D₂ به ترتیب به صورت زیر به دست می‌آید:

$$T_1 = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L (1-d_i) R_1(i) \quad (19)$$

$$T_2 = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L (1-\lambda_i) d_i R_2(i) \quad (20)$$

$$T_3 = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \lambda_i d_i R_3(i) \quad (21)$$

مسئله انتخاب پیوند بهینه در شکل ۳ به این صورت فرمول‌بندی می‌شود که نرخ بیت متوسط کاربر ثانویه (T_3) به حداکثر ممکن برسد و در همان حال کاربر اولیه نیز از کیفیت سرویس مورد نظر خود

حداکثر نرخ ارسال داده به مقصد خود را به دست آورد و در عین حال با رله نمودن داده‌ها نرخ ارسال کاربر اولیه نیز در حد از پیش تعیین‌شده‌ای تضمین کند. برای این منظور در ادامه با معرفی یک مدل سیستم رادیوشناختی چهار گره‌ای شامل یک جفت فرستنده-گیرنده به عنوان سیستم اولیه و یک جفت فرستنده-گیرنده به عنوان سیستم ثانویه، موضوع مبادله توان مذکور در قالب یک مسئله بهینه‌سازی انتخاب پیوند ارسال داده (تخصیص شکاف زمانی) فرمول‌بندی می‌شود.

۴-۱- مدل سیستم رادیوشناختی

مطابق شکل ۳ یک سیستم مخابراتی رادیوشناختی برفراز متشکل از چهار گره در نظر گرفته می‌شود. گره‌های S و D₁ به ترتیب متناظر فرستنده و گیرنده سیستم اولیه هستند که مجوز استفاده از پهنای باند را دارند. گره‌های R و D₂ نیز به ترتیب متناظر گره‌های فرستنده و مقصد ثانویه (همان رادیوشناختی) می‌باشند. در این مدل، همانند آنچه در شکل ۱ در نظر گرفته شد، فرستنده ثانویه با ایفای نقش رله در یک ارتباط دوگامی، مخابره داده بین گره‌های S و D₁ را امکان‌پذیر می‌کند و از این طریق فرصت می‌یابد تا داده‌های خود را نیز به مقصد D₂ بفرستد. باید توجه نمود که تفاوت اساسی مدل شکل ۳ با مدل شکل ۱ در اضافه شدن پیوند مخابراتی R-D₂ است و سایر فرضیاتی که قبلاً برای مدل شکل ۱ لحاظ شد در اینجا نیز برقرار است. هر پیوند بی‌سیم در شکل ۳ تحت تأثیر محو‌شوندگی باند باریک و نویز AWGN قرار دارد. ضرایب محو‌شوندگی که به ترتیب برای پیوندهای S-R، R-D₁ و R-D₂ با $h_1(i)$ و $h_2(i)$ و $h_3(i)$ نشان داده شده‌اند، متغیرهای تصادفی ارگادیک و ایستانی فرض می‌شوند که در طی یک شکاف زمانی ثابت هستند. اگر گره‌های منبع و رله ارسال بسته را با توان‌های ثابت به ترتیب P_S و P_R انجام دهند و مقادیر واریانس نویز AWGN در مقصدهای D₁، R و D₂ نیز به ترتیب با $\sigma_{D_1}^2$ ، σ_R^2 و $\sigma_{D_2}^2$ نشان داده شوند، آنگاه مقادیر SNR لحظه‌ای در گره‌های R، D₁ و D₂ در شکاف زمانی i ام به ترتیب با $\gamma_1(i)$ ، $\gamma_2(i)$ و $\gamma_3(i)$ نشان داده می‌شوند و مطابق روابط زیر محاسبه خواهند شد:

$$\gamma_1(i) = \frac{P_S}{\sigma_R^2} |h_1(i)|^2, \quad \gamma_2(i) = \frac{P_R}{\sigma_{D_1}^2} |h_2(i)|^2, \quad (16)$$

$$\gamma_3(i) = \frac{P_R}{\sigma_{D_2}^2} |h_3(i)|^2 \quad (16)$$

میانگین این متغیرها نیز به ترتیب با $\Omega_1 = E\{\gamma_1(i)\}$ ، $\Omega_2 = E\{\gamma_2(i)\}$ و $\Omega_3 = E\{\gamma_3(i)\}$ نشان داده شده است. بر اساس نمادگذاری فوق، گره S بر اساس مقدار لحظه‌ای γ_1 وضعیت ارسال AMC خود را انتخاب می‌کند. در روالی مشابه، گره R نیز وضعیت ارسال AMC خود را به توجه به مقادیر لحظه‌ای γ_2 و γ_3 انتخاب خواهد کرد (برای هر کانال وضعیت ارسال جداگانه انتخاب می‌شود).

بازه زمانی مورد شبیه‌سازی (L) نامحدود باشد، به علت تقارن بازه جستجو گزینه منطقی برای مقادیر آستانه روی هر دو بعد $x_{\lambda,i}$ و $x_{d,i}$ در معادله (۲۳) مقدار 0.5 می‌باشد. در مقادیر محدود L (مثلاً $L=1000$) که در بخش شبیه‌سازی این مقاله استفاده شده است) ممکن است بهترین مقدار آستانه برای این متغیرها لزوماً 0.5 نباشد. برای این منظور با قرار دادن پارامتر Threshold روی متغیر $x_{\lambda,i}$ در معادله (۲۳) می‌توان مقداری برای این پارامتر یافت که گذردهی را حداکثر می‌کند. به دلیل عدم دسترسی به یک رابطه تحلیلی بین متغیرهای بهینه‌سازی $x_{\lambda,i}$ و $x_{d,i}$ و مقدار نرخ بیت متوسط کاربر ثانویه، در قسمت بعدی مقاله برای پیدا کردن مقدار Threshold از روش محاسبات عددی و از طریق تغییر این پارامتر در یک رنج بسیار محدود و با طول قدم گسسته حول مقدار 0.5 ، استفاده شده است.

در ادامه، جواب مسئله انتخاب پیوند در معادلات (۲۲-۲۳) با نام اختصاری LSA_DOCR^{۲۵} معرفی شده است.

۵- ارزیابی کارایی الگوریتم‌های انتخاب پیوند

در این بخش کارایی الگوریتم‌های انتخاب پیوند ارائه شده مورد ارزیابی و مقایسه قرار می‌گیرد. برای محاسبه مقادیر متوسط از طول زمانی معادل هزار شکاف زمانی ($L=1000$) استفاده شده است. برای حل مسائل بهینه‌سازی به مقادیر لحظه‌ای SNR کانال‌ها روی شکاف‌های زمانی نیاز است که بر اساس تولید ضرایب محو شونده کانال‌ها با توزیع رابلی ایجاد شده‌اند. در طراحی شمای AMC نیز از مقدار نرخ خطای بیت هدف برابر $P_e=0.01$ و تعداد یکسان وضعیت انتقال (شش مورد ارائه شده در جدول ۱) برای تمامی پیوندها استفاده شده است. هر گونه تغییر دیگری که در شرایط آزمایش‌های انجام شده صورت گرفته باشد به صورت مجزا مورد اشاره قرار گرفته است.

۵-۱- سیستم دوگامی با رله مجهز به بافر

در شکل ۴ مقدار گذردهی سیستم دوگامی شکل ۱ برای سه روش مختلف انتخاب پیوند ارسال داده برحسب SNR کانال R-D ترسیم شده است. برای دستیابی به نمودارهای هموارتر مقادیر گذردهی با متوسط‌گیری روی ده تحقق کانال محو شونده که در آن هر تحقق خود شامل هزار شکاف زمانی است، محاسبه شده است. از این شکل مشخص است مقدار گذردهی الگوریتم ارائه شده همواره از دو روش رله عرفی و رله عرفی بافردار بیشتر است. به طور خاص برای نشان دادن بهره گذردهی، در شکل ۵ نسبت مقدار گذردهی الگوریتم LSA_DBR به مقدار گذردهی روش‌های رله عرفی و رله عرفی بافردار برحسب نسبت متوسط SNRهای دو پیوند R-D و S-R یعنی Ω_2/Ω_1 و برای یک مقدار ثابت Ω_1 ترسیم شده است. اگرچه اطلاعات موجود در شکل‌های ۴ و ۵ یکسان هستند، ولیکن نمودارهای شکل ۵ به خوبی نشان می‌دهند که در شرایطی که کیفیت SNR پیوندهای R-D و S-R تفاوت زیادی داشته باشند (متناظر مقادیر بزرگ و یا کوچک Ω_2/Ω_1)

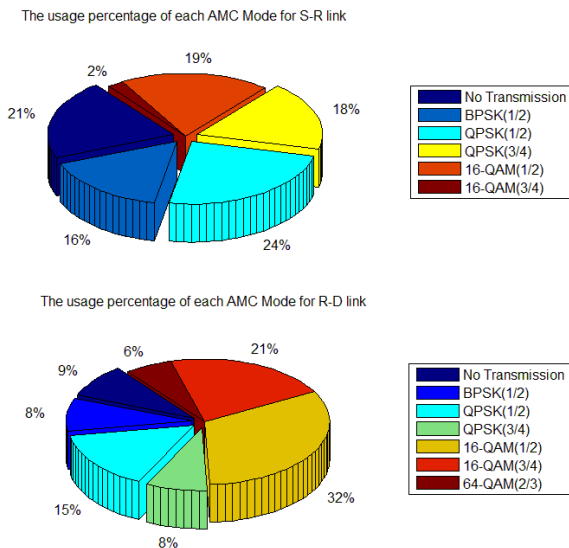
برخوردار باشد. برای این منظور، کیفیت سرویس کاربر اولیه در قالب نرخ بیت ارسال متوسط بزرگ‌تر از آستانه R_p^{th} نشان داده می‌شود. به این ترتیب با توجه به تابع هدف و محدودیت‌ها، مسئله بهینه‌سازی زیر روی تعداد بزرگی از شکاف‌های زمانی (L بزرگ) تشکیل می‌شود:

$$\begin{aligned} & \text{Minimize}_{d_i, \lambda_i, 1 \leq i \leq L} -\frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \lambda_i d_i R_3(i) \quad \text{subject to:} \\ \text{C1:} & \quad \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L (1-\lambda_i) d_i R_2(i) \geq R_p^{\text{th}} \\ \text{C2:} & \quad \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L (1-d_i) R_1(i) = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L (1-\lambda_i) d_i R_2(i) \quad (22) \\ \text{C3:} & \quad \lambda_i (1-\lambda_i) = 0, \quad \forall i=1,2,\dots,L \\ \text{C4:} & \quad d_i (1-d_i) = 0, \quad \forall i=1,2,\dots,L \end{aligned}$$

قید اول مربوط به تضمین حداقل کیفیت سرویس کاربر اولیه است. قید دوم شرط لازم را برای اینکه گره ثانویه به‌عنوان یک رله در مرز حالت‌های جذب‌کنندگی و غیر جذب‌کنندگی عمل نماید، بیان می‌کند (قضیه ۱ را ببینید). قیدهای سوم و چهارم هم‌باینری بودن متغیرهای تصمیم‌گیری در انتخاب پیوند را نشان می‌دهند. لازم به ذکر است که مسئله (۲۲) یک مسئله بهینه‌سازی از نوع برنامه‌ریزی صحیح با ابعاد بزرگ است و در حالتی که گره‌های منبع و رله از نرخ‌های گسسته AMC ارسال استفاده کنند جواب تحلیلی ندارد. با این وجود، با کمک روش سست‌سازی روی متغیرهای d_i و λ_i و الگوریتم ژنتیک می‌توان یک جواب تقریبی آن را به دست آورد. برای این منظور در ابتدا L متغیر $d_i, i=1,2,\dots,L$ در قالب یک بردار L بعدی با مؤلفه‌های پیوسته جایگزین می‌شود که در ادامه با نماد X_d نشان داده شده است. در روالی مشابه، L متغیر $\lambda_i, i=1,2,\dots,L$ در قالب یک بردار L بعدی با مؤلفه‌های پیوسته با نام X_λ جایگزین شده است. در این جایگزینی به مؤلفه‌های بردارهای X_d و X_λ اجازه داده می‌شود که در بازه (۰،۲) تغییرات پیوسته داشته باشند. بر اساس این جایگزینی حل مسئله (۲۲) با کمک الگوریتم ژنتیک (تابع $ga(\cdot)$) امکان‌پذیر است. بعد از همگرایی الگوریتم ژنتیک و تعیین مقادیر بهینه بردارهای X_d و X_λ ، با نگاشت زیر متغیرهای d_i و λ_i به‌عنوان یک جواب زیر بهینه بازیابی می‌شوند:

$$\begin{aligned} x_{d,i} \leq \frac{1}{2} & \rightarrow d_i = 0 \\ x_{d,i} > \frac{1}{2} & \rightarrow d_i = 1 \\ x_{\lambda,i} \geq \text{Threshold} & \rightarrow \lambda_i = 1 \\ x_{\lambda,i} < \text{Threshold} & \rightarrow \lambda_i = 0 \end{aligned} \quad (23)$$

در رابطه (۲۳)، $x_{\lambda,i}$ و $x_{d,i}$ مؤلفه‌های نام به ترتیب بردارهای X_λ و X_d و پارامتر Threshold نیز یک آستانه قابل تنظیم را نشان می‌دهند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با تنظیم پارامتر Threshold حول مقدار 0.5 می‌توان عملکرد نگاشت مذکور را برای حصول حداکثر مقدار گذردهی بهبود بخشید. باید توجه کرد که در حالتی که طول



شکل ۶: درصد استفاده از وضعیت‌های مختلف AMC روی هزار شکاف زمانی نمونه، به ترتیب برای پیوندهای S-R و R-D با $\Omega_1 = 5\text{dB}$ و $\Omega_2 = 10\text{dB}$.

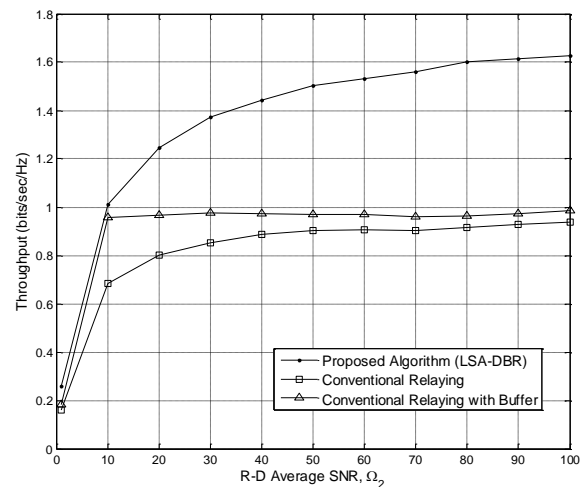
S-R صورت گیرد، میزان گذردهی قابل ملاحظه‌ای در مقایسه با الگوریتم رله عرفی حاصل خواهد شد. از طرف دیگر هنگامی که SNR کانال R-D از SNR کانال S-R خیلی کمتر است (متناظر Ω_2 / Ω_1 خیلی کوچک) انتخاب پیوند S-R در مقایسه با پیوند R-D به‌ندرت اتفاق می‌افتد و بهره گذردهی بالایی حاصل می‌آید.

در شکل ۶ برای یک نمونه از تحقق کانال محو شوندگی، درصد استفاده از وضعیت‌های مختلف AMC در الگوریتم LSA_DBR در طی یک دوره زمانی متشکل از هزار شکاف زمانی برای هر دوی پیوندهای R-D و S-R نشان داده شده است. با وجود اینکه انتخاب وضعیت‌هایی با درصد بالاتر به متوسط SNR کانال‌ها بستگی دارد، ولیکن هنوز می‌توان توزیع آماری بین حالت‌های مختلف را در این شکل مشاهده نمود. به‌طور خاص برای کانال S-R با متوسط SNR پایین‌تر $\Omega_1 = 5\text{dB}$ ، حالت خاموشی با ۲۱ درصد و وضعیت $1/2$ QPSK با بیشترین درصد (۲۴٪) انتخاب شده‌اند و وضعیت ششم در جدول ۱ هرگز انتخاب نشده است. همچنین برای کانال S-R با متوسط SNR بالاتر 10dB $\Omega_2 =$ حالت خاموشی با ۹ درصد و وضعیت ۱۶-QAM $1/2$ با بیشترین درصد (۳۲٪) انتخاب شده‌اند.

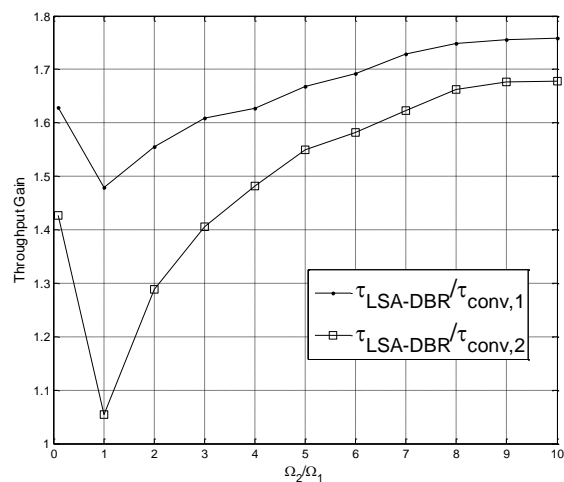
۵-۲- سیستم رادیوشناختی برفراز با فرستنده ثانویه مجهز به بافر

در این زیربخش متوسط SNRهای سیستم رادیوشناختی به‌صورت $\Omega_1 = 10\text{dB}$ ، $\Omega_2 = 10\text{dB}$ ، $\Omega_3 = 12\text{dB}$ تنظیم شده‌اند و مقادیر متوسط گزارش شده نیز روی یک نمونه تحقق کانال‌های محو شوندگی با طول هزار شکاف زمانی محاسبه شده‌اند. در شکل ۷ نمودارهای تغییرات نرخ متوسط پیوندهای S-R، $R-D_1$ و $R-D_2$ برحسب مقدار کیفیت سرویس R_p^{th} که از طریق اجرای الگوریتم LSA_DOCR به دست آمده‌اند، نشان داده شده است. به‌طور حسی این مسئله قابل درک است که با افزایش کیفیت سرویس سیستم اولیه (مقدار R_p^{th}) فرصت‌های

در این صورت الگوریتم LSA_DBR بهره بالاتری نسبت به روش‌های پیشین فراهم می‌کند. علت این پدیده را می‌توان به‌صورت زیر توضیح داد. در شرایطی که SNR کانال R-D از SNR کانال S-R خیلی بیشتر می‌شود (متناظر Ω_2 / Ω_1 بزرگ) پیوند R-D در مقایسه با پیوند S-R به‌ندرت برای ارسال انتخاب می‌شود. این در حالی است که در الگوریتم رله عرفی در نصف شکاف‌های زمانی پیوند S-R و در نصف دیگر پیوند R-D انتخاب می‌شود. در واقع وقتی که کیفیت کانال R-D در مقایسه با کانال S-R خیلی بهتر باشد در یک فرصت انتخاب پیوند R-D از شمای AMC با نرخ بالا استفاده خواهد شد که باعث می‌شود در یک شکاف زمانی تعداد بیشتری بیت در مقایسه با پیوند S-R انتقال بیابد. واضح است که اگر در بیشتر شکاف‌های زمانی ارسال داده روی پیوند

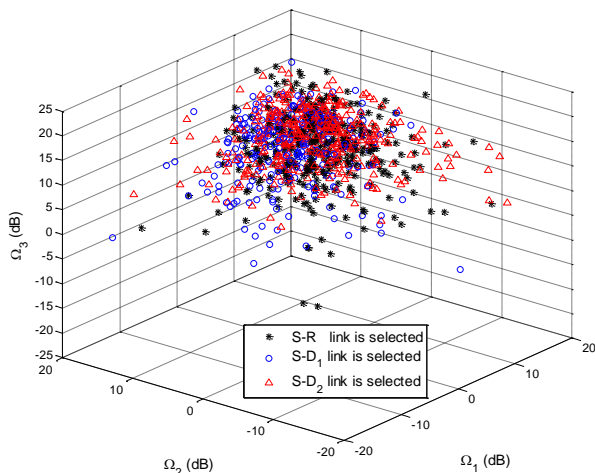


شکل ۴: گذردهی سیستم رله دوگامی برای سه روش مختلف انتخاب پیوند ارسال داده برحسب SNR پیوند R-D با $\Omega_1 = 10\text{dB}$.

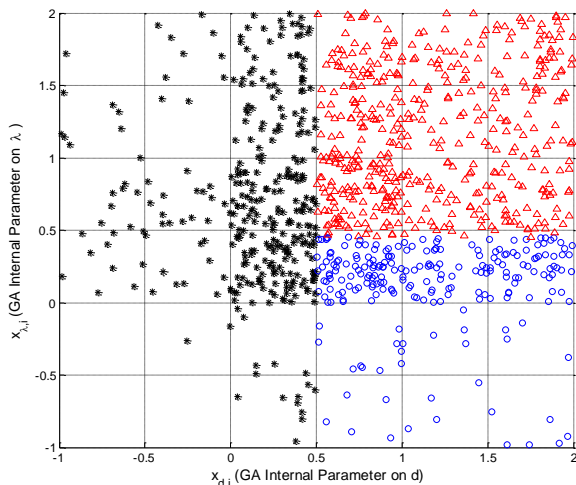


شکل ۵: نسبت مقدار گذردهی الگوریتم LSA_DBR به مقدار گذردهی رله عرفی و رله عرفی بافردار. محور افقی نسبت متوسط SNRهای دو پیوند R-D و S-R را برای $\Omega_1 = 10\text{dB}$ نشان می‌دهد.

ارسال، مشخص می‌کنند. با دقت در این شکل همچنان می‌توان دریافت که در این آزمایش خاص مقدار پارامتر Threshold در نگاشت (۲۳) به عددی کم‌تر از سطح ۵، تنظیم شده است (هرچند با فاصله جزئی). در شکل ۱۰ مقدار نرخ بیت متوسط پیوند رادیوشناختی برحسب پارامتر Threshold برای $R_p^{th} = 1/7$ و در بازه $(1/3 - 1/7)$ ترسیم شده است. در اینجا پارامتر Threshold با طول قدم ۰.۱، تغییر داده شده است و هر مقدار نرخ بیت گزارش شده بهترین نتیجه ممکن در پنج بار اجرای الگوریتم ژنتیک بوده است (با این کار جواب الگوریتم از نقاط بهینه محلی دور می‌گردد). همان‌گونه که ملاحظه می‌شود در این اجرا از برنامه، بهترین مقدار آستانه در رابطه (۲۳) که در بیشینه سراسری منحنی مشخص می‌شود عددی در بازه $(1/55 - 1/5)$ است و لزوماً برابر ۵، انتخاب نمی‌شود.

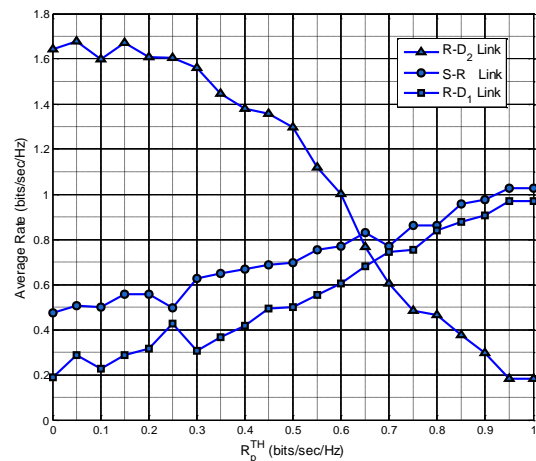


شکل ۸: نمایش انتخاب گره‌های منبع و رله به‌عنوان فرستنده در فضای سه‌بعدی مقادیر SNRهای سه پیوند S-R، R-D1 و R-D2. این شکل پیچیدگی بسیار بالای تصمیم‌گیری در فضای SNR را نشان می‌دهد.



شکل ۹: این شکل یک نمونه از صفحه نگاشت رابطه (۲۳) برای تقریب جواب مسئله بهینه‌سازی (۲۲) را نشان می‌دهد. نقاط مشخص شده با ستاره، دایره و مثلث به ترتیب سه ناحیه تعیین شده برای انتخاب پیوندهای S-R، R-D1 و R-D2 را نشان می‌دهند که به‌خوبی از یکدیگر قابل تفکیک هستند.

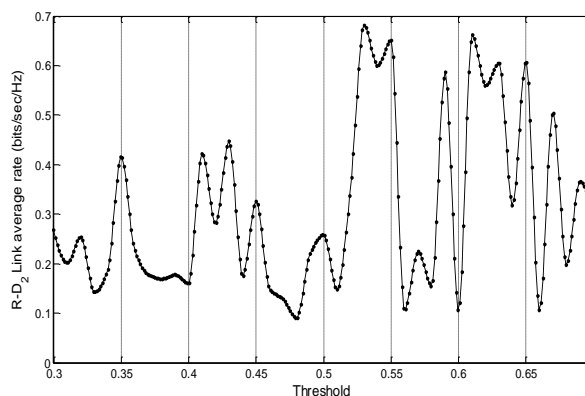
انتخاب پیوند رادیوشناختی R-D2 کم شده و رله مجبور است فرصت‌های ارسال بیشتری را برای پیوند R-D1 فراهم کند. از این رو با افزایش R_p^{th} ، مقدار نرخ ارسال متوسط (نرمالیزه شده) برای کانال‌های S-R، R-D1 و R-D2 به ترتیب افزایش، افزایش و کاهش می‌یابند. علت نوسانات مشاهده‌شده در این نمودارها را می‌توان به استفاده از تعداد محدود شکاف زمانی (هزار شکاف زمانی) برای انجام متوسط‌گیری مرتبط دانست. با این وجود سیر کاهشی و افزایشی مشاهده‌شده در نمودارهای شکل ۷ روندهایی منطقی را نشان می‌دهند. قابل ذکر است که به علت استفاده از نگاشت (۲۳) روی جواب بهینه حاصل از الگوریتم ژنتیک، جواب ارائه‌شده در شکل ۷ یک تقریب از جواب بهینه مسئله (۲۲) می‌باشد. در این حالت قیدهای مسئله (۲۲) نیز تقریب زده می‌شوند. به‌عنوان مثال از شکل ۷ روشن است که قید C1 در مسئله (۲۲) همواره برآورده شده است، چرا که منحنی مربوط به نرخ ارسال پیوند R-D1 همواره بالای خطی با شیب واحد قرار می‌گیرد. به علاوه، قید C2 نیز بر اساس نزدیکی نرخ‌های ارسال پیوندهای S-R و R-D1 به‌طور تقریبی برآورده شده است.



شکل ۷: تغییرات نرخ متوسط پیوندهای S-R، R-D1 و R-D2 برحسب مقدار کیفیت سرویس سیستم اولیه R_p^{th} (پارامتر R_p^{th} به صورت گسسته با طول قدم ۰.۵، تغییر داده شده است).

شکل ۸ یک نمایش تصویری از نحوه انتخاب پیوند ارسال بر اساس جواب مسئله (۲۱) را در فضای سه‌بعدی مقادیر SNR کانال‌های S-R، R-D1 و R-D2 برای $R_p^{th} = 1/5$ نشان می‌دهد. از این شکل به خوبی مشخص است که اگر بخواهیم انتخاب پیوند ارسال را در فضای متغیرهای $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$ انجام دهیم مسئله از پیچیدگی بسیار بالایی برخوردار خواهد بود، چرا که جداسازی نقاط مشخص شده در این شکل ساده نیست. از طرف دیگر شکل ۹ چگونگی عملکرد نگاشت (۲۳) روی جواب بهینه مسئله (۲۲) بعد از اعمال سست‌سازی را برای داده‌های شکل ۸ نشان می‌دهد. نقاط مشخص شده (هزار نقطه) بر اساس موقعیت ابعاد بردارهای X_d و X_r در رابطه (۲۳) سه ناحیه کاملاً قابل تفکیک را برای انتخاب یکی از پیوندهای S-R، R-D1 و R-D2 به‌عنوان پیوند

- [2] J. N. Laneman, D. N. Tse, and G. W. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior," *IEEE Trans. on Information Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062-3080, 2004.
- [3] A. Goldsmith, S. A. Jafar, I. Maric, and S. Srinivasa, "Breaking spectrum gridlock with cognitive radios: An information theoretic perspective," *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, no. 5, pp. 894-914, 2009.
- [4] A. Ahmadfard, A. Jamshidi, and M. Biguesh, "Capacity and power allocation for spectrum sharing in cognitive radio systems under unknown channel state information and imperfect spectrum sensing," *IET Communications*, vol. 6, no. 15, pp. 2387-2394, 2012.
- [5] B. Xia, Y. Fan, J. Thompson, and H. V. Poor, "Buffering in a three-node relay network," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol. 7, no. 11, pp. 4492-4496, 2008.
- [6] N. Zlatanov, R. Schober, and P. Popovski, "Buffer-aided relaying with adaptive link selection," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 31, no. 8, pp. 1530-1542, 2013.
- [7] N. Zlatanov, V. Jamali, and R. Schober, "Achievable rates for the fading half-duplex single relay selection network using buffer-aided relaying," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol. 14, no. 8, pp. 4494-4507, 2015.
- [8] F. Peng, J. Zhang, and W. E. Ryan, "Adaptive modulation and coding for IEEE 802.11n," *In Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, pp. 656-661, 2007.
- [9] S. T. Chung and A. J. Goldsmith, "Degrees of freedom in adaptive modulation: A unified view," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 49, no. 9, pp. 1561-1571, 2001.
- [10] M. Darabi, V. Jamali, B. Maham, and R. Schober, "Adaptive link selection for cognitive buffer-aided relay networks," *IEEE Communications Letters*, vol. 19, no. 4, pp. 693 - 696, 2015.
- [11] M. Shaqfeh, A. Zafar, H. Alnuweiri, and M-S. Alouini, "Overlay cognitive radios with channel-aware adaptive link selection and buffer-aided relaying," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 63, no. 8, pp. 2810-2822, 2015.
- [12] P. Calegari, P. Kuonen, F. Guidec, and D. Wagner, "A genetic approach to radio network optimization for mobile systems," *In Proc. VTC'97*, pp.755-759, 1997.
- [۱۳] عباس صابری نوقایی و نادر هاتفی ترشیزی، «تنظیم بهینه رله دیستانس با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۶، شماره ۱، صفحات ۲۳۱-۲۲۱، ۱۳۹۵.
- [۱۴] احد عابسی، وحید وحیدی نسب و محمد صادق قاضی‌زاده، «بررسی تأثیر حضور منابع تولیدپراکنده ولتاژ ثابت بر کنترل توزیع‌شده ولتاژ شبکه‌های هوشمند با بهره‌گیری از مصرف‌کنندگان نهایی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۶، شماره ۱، صفحات ۲۷۵-۲۶۷، ۱۳۹۵.
- [15] <http://www.mathworks.com/discovery/geneticalgorithm.html>, [see also <http://www.mathworks.com/help/gads/ga.html?requestedDomain=www.mathworks.com>].
- [16] A. Host-Madsen and J. Zhang, "Capacity bounds and power allocation for wireless relay channels," *IEEE Trans. On Information Theory*, vol. 51, no. 6, pp. 2020-2040, 2005.



شکل ۱۰: نمایش اثر پارامتر Threshold روی نرخ بیت متوسط پیوند رادیوشناختی در یک بازه زمانی محدود متشکل از هزار شکاف زمانی.

۶- نتیجه

در این مقاله روش‌های انتخاب پیوند ارسال داده در سیستم‌های مخابراتی دوگامی رله و رادیوشناختی بر فراز که از رله مجهز به بافر و نرخ ارسال تطبیقی گسسته استفاده می‌کنند، مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفتند. در ابتدا برای هر یک از سیستم‌های مذکور مسئله انتخاب پیوند ارسال به صورت یک مسئله بهینه‌سازی از نوع برنامه‌ریزی صحیح فرمول‌بندی شد و در ادامه با کمک روش‌های سست‌سازی روی متغیرهای تصمیم‌گیری نحوه به دست آوردن جواب تقریبی از طریق الگوریتم ژنتیک ارائه گردید. نتایج ارزیابی کارایی الگوریتم‌های ارائه شده نشان می‌دهد که با بهره‌برداری بهینه از بافر گره رله می‌توان بهره‌گذاری قابل ملاحظه‌ای نسبت به سایر الگوریتم‌های سنتی رله کردن به دست آورد.

باید توجه داشت که مسائل بهینه‌سازی در این مقاله با فرض در دسترس بودن نرخ ارسال لحظه‌ای (معادل با داشتن اطلاعات حالت کانال‌ها) همه کانال‌های سیستم در گره رله حل شده‌اند. به عنوان کار آتی می‌توان (۱) سناریویی مانند تحلیل تحت شرایط در دسترس بودن اطلاعات غیرکامل حالت کانال‌ها، (۲) سناریویی که در آن تأخیر ارسال بسته نیز اهمیت داشته باشد و یا (۳) تحلیل در شرایط حضور چندین کاربر اولیه و رادیوشناختی را مورد بررسی قرار داد.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از هم‌فکری اعضای هیئت تحریریه مجله علمی-پژوهشی مهندسی برق دانشگاه تبریز و داوران محترمی که زحمت داوری مقاله را تقبل نموده‌اند کمال سپاسگزاری را دارند.

مراجع

- [1] A. Sendonaris, E. Erkip, and B. Aazhang, "User cooperation diversity - Part I: System description," *IEEE Trans. on Communications*, vol. 51, no. 11, pp. 1927-1938, 2003.

زیرنویس‌ها

- ¹ Cooperative relay network
- ² Cognitive radio
- ³ Secondary (cognitive radio) system
- ⁴ Primary system
- ⁵ Overlay
- ⁶ Decode-and-forward
- ⁷ Time-slot
- ⁸ Conventional
- ⁹ Links
- ¹⁰ Diversity gain
- ¹¹ Slow fading
- ¹² Signal to noise ratio (SNR)
- ¹³ Adaptive modulation and coding (AMC)
- ¹⁴ Underlay
- ¹⁵ Opportunistic transmission
- ¹⁶ Relaxation
- ¹⁷ Half duplex
- ¹⁸ Multiplexing gain
- ¹⁹ Ergodic
- ²⁰ Mode
- ²¹ Outage
- ²² Absorbing
- ²³ LSA_DBR: Link Selection Algorithm for Discrete-rate Buffer-aided Relaying
- ²⁴ Interweave
- ²⁵ LSA_DOOR: Link Selection Algorithm for Discrete-rate Overlay Cognitive Radio