

بیشینه‌سازی ظرفیت مؤثر در رله‌های نیمه دوطرفه دومسیره با بسته‌های کوچک

محمد لاری^۱، استادیار؛ زهرا کشاورز گندمانی^۲، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ الهه مداح^۳، کارشناس ارشد

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه سمنان - سمنان - ایران - m_lari@semnan.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه سمنان - سمنان - ایران - zahra_keshavarz@semnan.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه سمنان - سمنان - ایران - e.maddah@semnan.ac.ir

چکیده: ارسال با بسته‌هایی با طول کوچک، از جمله موضوعاتی است که در نسل جدید مخابراتی جهت برقراری ارتباطات کم تأخیر مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله نیز به منظور داشتن یک ارتباط کم تأخیر، سیستم مخابرات مشارکتی تحت سناریوی ارسال با بسته‌های کوچک بررسی شده است. در این سیستم رله نیمه دوطرفه دومسیره، اطلاعات دو گره را بین آنها جابجا می‌کند. رله از نوع تقویت و ارسال با گین ثابت و گین متغیر است. با توجه به اهمیت تأخیر، معیار ارزیابی عملکرد سیستم، ظرفیت مؤثر است و جهت بهبود عملکرد سیستم، از تخصیص توان بهینه جهت بیشینه‌سازی ظرفیت مؤثر استفاده شده است. تقعر این مسئله تخصیص توان تحت قید ثابت بودن مجموع توان گره‌ها و رله اثبات شده و مقدار توان بهینه برای گره‌ها و رله محاسبه شده است. در نهایت نیز تأثیر پارامترهای مختلف شامل طول بسته، نرخ خطای بیت و پارامتر کیفیت سرویس روی عملکرد کلی سیستم بررسی شده است.

واژه‌های کلیدی: بسته‌های کوچک، تأخیر، تخصیص توان، رله دومسیره، ظرفیت مؤثر.

Effective capacity Maximization in Two Way Half-Duplex Relays with Finite Blocklength Codes

M. Lari¹, Assistant Professor; Z. Keshavarz Gandomani², MSc Student; E. Maddah³, MSc

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Semnan University, Semnan, Iran, Email: m_lari@semnan.ac.ir

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Semnan University, Semnan, Iran, Email: zahra_keshavarz@semnan.ac.ir

3- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Semnan University, Semnan, Iran, Email: e.maddah@semnan.ac.ir

Abstract: Short packet transmission is one of the topics considered in the new generation of telecommunication systems for low latency connections. In this paper, in order to have a low latency communication, a cooperative system with finite block length (FBL) transmission is investigated. In this relay system, a two-way half-duplex (HD) relay replaces data packets between two nodes. The two-way relay functionality is assumed as amplify-and-forward (AF) with fixed gain and variable gains. Due to the importance of delay, the criterion for evaluating system performance is the effective capacity. Therefore, to optimize the performance of the system, the optimal power allocation is used to maximize the effective capacity. The concavity of this power allocation problem under the assumption of constant total available power between nodes and relay is calculated. Finally, the effect of various parameters including packet length, bit error rate and quality-of-service (QoS) is investigated on overall system performance.

Keywords: Finite block length, Latency, Power allocation, Two way relay, Effective capacity.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۰۴/۰۹

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۰۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۰۷

نام نویسنده مسئول: محمد لاری

نشانی نویسنده مسئول: ایران - سمنان - روبروی پارک جنگلی سوکان - پردیس شماره یک - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

۱- مقدمه

نسل پنجم سیستم‌های مخابراتی آغازگر عصر جدیدی از ارتباطات هستند که صنایع مختلف و زندگی روزمره ما را متحول خواهد کرد. از بین کاربردهای فن‌آورانه مخابراتی نسل پنجم، می‌توان به اینترنت اشیا [۱، ۲]، اتومبیل‌های خودران و هوشمند [۱-۳]، کنترل برخط و اتوماسیون صنعتی [۲] و واقعیت مجازی [۱، ۲] اشاره کرد. به‌عنوان نمونه، اینترنت اشیا یک مفهوم بسیار گسترده و به معنی ارتباط تمامی اشیا پیرامونی ما با یکدیگر است. این مفهوم می‌تواند در همه حوزه‌های انرژی، حمل‌ونقل، سلامت، ساخت و تولید و غیره برای ایجاد یک جهان هوشمند و همچنین به‌کارگیری بهینه منابع استفاده شود [۲]. جهت پاسخگویی به نیازمندی‌های جدیدی که در نسل پنجم ارتباطات طرح و هدف‌گذاری شده است، ساختار شبکه و بسیاری از پارامترهای آن دچار تحول اساسی خواهد شد [۲، ۴، ۵]. به همین علت امکان ارائه سرویس‌های جدید و رفع نیازمندی‌هایی متفاوت از قبل امکان‌پذیر خواهد بود.

یکی از موضوعاتی که در نسل‌های قبل مورد توجه نبوده و یا توجه کمی به آن شده است، پارامتر تأخیر و در نظر گرفتن آن برای ارتباطات و ترافیک‌های حساس به تأخیر است [۴، ۶]. محور اصلی در طراحی نسل‌های گذشته سیستم‌های مخابراتی (نسل اول تا چهارم) اغلب انسان بوده است. از آنجاکه حواس انسان به تأخیر چندان حساس نیست، بنابراین این پارامتر در نسل‌های قبلی معمولاً تضمین نشده و در بهترین حالت، میزان تأخیر تا چند ده میلی‌ثانیه امری کاملاً عادی بوده است [۷]. این شرایط برای نیازمندی‌های نوین مانند اتومبیل‌های خودران و هوشمند یا یک عمل جراحی از فاصله دور قابل قبول نیست [۱-۳]. در این کاربردها و بسیاری از کاربردهای دیگر که جزئیات آن در مراجع مختلف مانند [۱-۳، ۸، ۹] در دسترس است، تأخیر کم در حد چند میلی‌ثانیه و کمتر و همچنین تضمین مقدار تأخیر بسیار ضروری است [۷]. در این موارد در صورت افزایش تأخیر نسبت به میزان قابل قبول، حتی در صورت دریافت کامل و بدون خطا، بسته غیرقابل استفاده است و معمولاً دور انداخته می‌شود. تصور کنید که ارسال اطلاعات به خودروهای کناری توسط یک خودرو بدون سرنشین که در حال سبقت یا تغییر خط است، با تأخیر انجام شود. نتیجه فاجعه‌بار خواهد بود. از این رو توجه به تأخیر در لایه‌های مختلف شبکه و تکنیک‌های مختلف ارسال و دریافت و روش‌های مختلف تضمین آن به‌عنوان پارامتر کیفیت سرویس به شدت مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله با ارائه یک مدل مشارکتی جهت ارسال داده‌ها در کمترین بازه زمانی ممکن و همچنین تخصیص توان مناسب، تأخیر آماری بسته‌ها تضمین خواهد شد.

تأخیر مفهومی بسیار گسترده است و در یک سیستم یا شبکه مخابراتی به دلایل مختلفی ایجاد می‌شود. از این رو جهت کاهش تأخیر و تضمین بیشینه آن، توجه به منشأ آن ضروری است. یکی از دلایل ایجاد تأخیر، ارسال و کدگذاری بسته‌های با طول نسبتاً زیاد در گیرنده

است. از آنجاکه در تئوری شانون، رسیدن به نرخ برابر ظرفیت کانال به ازای بسته‌هایی با طول زیاد (بینهایت) امکان‌پذیر است [۴، ۱۰]، در سالیان گذشته و در مخابرات متداول، بسته‌های ارسالی از فرستنده به گیرنده، اغلب دارای طول زیاد بوده است. در صورت طراحی مناسب این بسته‌ها با طول زیاد (مثلاً استفاده از کدهای تصحیح خطای توربو یا کدهای با بیت توازن کم‌چگالی^۲)، نرخ ارسال اطلاعات به نرخ شانون بسیار نزدیک می‌شود [۸]. با این حال، ارسال این بسته‌ها زمان‌بر و تأخیر کدگذاری آن‌ها زیاد است؛ بنابراین استفاده از آن‌ها برای ترافیک‌های حساس به تأخیر اصلاً مناسب نیست. از طرف دیگر، داده‌های تولیدی فرستنده‌ها در بسیاری از کاربردها مانند شبکه‌های حسگری یا اینترنت اشیا، اغلب بسیار کم و در حد چند بایت است و استفاده از بسته‌هایی با طول زیاد جهت ارسال این اطلاعات مختصر، اصلاً به صرفه نیست [۸]. از این رو استفاده از بسته‌هایی با طول محدود و کوچک جهت انتقال اطلاعات بین فرستنده و گیرنده بسیار جذاب و کارآمد خواهد بود [۱۱]. بررسی‌های انجام‌شده نشان داده است که نرخ ارتباطی هنگام استفاده از بسته‌هایی با طول کوچک با نرخ شانون فاصله دارد و خطای بسته‌های دریافتی در گیرنده نیز صفر نیست؛ اما با توجه به مدت زمان کمتر ارسال کامل این بسته‌ها و تأخیر کدگذاری کمتر آن‌ها، بررسی و مطالعه این شکل از ارتباطات جهت استفاده و پیاده‌سازی در نسل پنجم سیستم‌های مخابراتی در حال انجام است [۱۱]. علاوه بر تأخیر ارسال و کدگذاری، بافر فرستنده نیز می‌تواند سبب معطل شدن داده‌ها و تأخیر شود. همچنین محدود بودن تعداد بازه‌های زمانی و فرکانسی موجود در سیستم مخابراتی، می‌تواند سبب تأخیر انتقال بسته‌ها شود. موارد متعدد دیگری نیز مخصوصاً در شبکه‌های مخابراتی وجود دارند که ممکن است سبب تأخیر شوند که در اینجا به آن‌ها اشاره نمی‌کنیم. جهت ارائه سرویس باکیفیت به ترافیک‌های حساس به تأخیر، در این مقاله یک سیستم مشارکتی شامل یک رله دومسیره^۳ نیمه دوطرفه^۵ بین دو گره شبکه در نظر گرفته شده است. رله از نوع تقویت و ارسال^۶ است. رله دومسیره قادر است بسته‌های مورد نیاز دو گره با طول کوچک را بین آن‌ها جابجا کند؛ یعنی بسته گره اول را گرفته و به گره دوم برساند. همچنین بسته گره دوم را گرفته و به گره اول دهد. از این روش انتقال در شبکه‌های حسگری و اینترنت اشیا جهت اشتراک‌گذاری اطلاعات بین گره‌های مختلف استفاده می‌شود [۱۲]. از این رو در مقاله حاضر، بستر ارتباطی به صورت یک رله دومسیره در نظر گرفته شده است که بسته‌های با طول کوچک را بین دو گره جابجا می‌کند. در حالت معمول و بدون استفاده از رله دومسیره، برای جابجایی اطلاعات بین دو گره به چهار بازه زمانی احتیاج داریم؛ اما رله دومسیره این تعداد بازه زمانی را به دو بازه کاهش می‌دهد. به همین سبب، استفاده از رله دومسیره جهت پاسخگویی به نیازمندی کاربران حساس به تأخیر مناسب است [۱۰].

یکی دیگر از گلوگاه‌های سیستم که سبب تأخیر می‌شود، بافر فرستنده است. در صورتی که نرخ ورود و خروج بسته‌ها به بافر در ست

محاسبه‌شده و با ظرفیت شانون که برای بسته‌هایی با طول نامحدود به کار برده می‌شود مقایسه شده است. از آنجاکه تکنیک تخصیص توان برای استفاده بهینه از منابع در دسترس و همچنین بهبود کیفیت ارسال اطلاعات بسیار مؤثر است، به کارگیری تخصیص توان به جهت پیشینه کردن ظرفیت مؤثر و نرخ گذردهی در مقالات مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است [۱۸-۲۰]. به عنوان مثال در [۱۹]، عملکرد یک رله تک مسیره تقویت و ارسال تحت سناریو بسته‌هایی با طول کوچک مورد بررسی قرار گرفته تا با تخصیص منابع، ظرفیت مؤثر سیستم پیشینه شود. همچنین بهینه‌سازی توان به منظور پیشینه کردن ظرفیت مؤثر تحت سناریو بسته‌هایی با طول کوچک در یک شبکه چندکاربره فروسو^{۱۰} نیز در [۱۸] مورد توجه قرار گرفته است. همچنین پیشینه کردن نرخ گذردهی با ارسال بسته‌هایی با طول کوچک در یک سیستم چندکاربره فروسو با به کارگیری تکنیک^{۱۱} دسترسی چندگانه تقسیم فرکانس متعامد در [۲۰] مورد بررسی قرار گرفته است. تاکنون بهینه‌سازی جهت پیشینه کردن ظرفیت مؤثر یک سیستم مخابرات مشارکتی با رله دومسیره تقویت و ارسال با گین ثابت و متغیر مورد بررسی قرار نگرفته است؛ بنابراین ما در این مقاله به آن پرداخته‌ایم.

۳- مدل سیستم

در این بخش مدل سیستم مشارکتی شامل رله دومسیره با طرح ارسال بسته‌های با طول کوچک توضیح داده خواهد شد. همچنین ظرفیت مؤثر به عنوان نرخ ورود اطلاعات به بافر فرستنده که تأخیر آماری توقف بسته-ها را نیز تضمین می‌کند، توضیح داده می‌شود.

۳-۱- مخابرات بسته‌های کوچک

ارسال اطلاعات با بسته‌های کوچک، تطبیق بهتری با کاربردهایی مانند شبکه‌های حسگری و اینترنت اشیاء دارد. همچنین سبب کاهش تأخیر ارسال و کدگذاری می‌شود [۱]. فرض کنید s بیت در فرستنده پس از کد شدن تبدیل به m سمبل شده و به صورت یک بسته m سمبلی برای گیرنده ارسال شود. از آنجاکه طول بسته محدود است، بسته‌های ارسال در گیرنده با احتمال خطای ε دریافت می‌شود. همچنین نرخ ارسال به-صورت

$$R = \frac{s}{m} \quad (1)$$

در نظر گرفته می‌شود [۱]. به عبارت دیگر در m بار استفاده از کانال مخابراتی، s بیت از فرستنده برای گیرنده ارسال می‌شود و نرخ ارسال برابر s بیت در m بار استفاده از کانال مخابراتی خواهد بود (واحد R به صورت bits/channel use بیان می‌شود). در یک سیستم مخابراتی R باید تا حد ممکن بزرگ و احتمال خطای ε کوچک باشد؛ بنابراین $R^*(m, \varepsilon)$ برابر بیشینه نرخ R در یک بسته به طول m و احتمال خطای ε در نظر گرفته می‌شود [۱]. در یک کانال مخابراتی با نسبت توان سیگنال به نویز برابر γ ، این نرخ به صورت

تنظیم نشده باشد، توقف داده‌ها در بافر فرستنده زیاد شده و همین امر سبب تأخیر می‌شود. از آنجاکه نرخ خروج بسته‌ها از بافر فرستنده متناسب با ظرفیت تصادفی و متغیر بازمان کانال بی‌سیم است، تنظیم مناسب نرخ ورود بسته‌ها به بافر، از اهمیت زیادی برخوردار است. در صورتی که این نرخ ورود مقدار زیادی تنظیم شود، معطلی و تأخیر بسته‌ها در بافر زیاد خواهد بود. از طرف دیگر اگر این نرخ ورود کم انتخاب شود، امکان ارائه سرویس‌های پرسرعت از بین می‌رود. این نرخ ورود که متناسب با کیفیت سرویس درخواستی کاربر ترافیک تنظیم می‌شود و تضمین‌کننده تأخیر آماری بسته‌های متوقف در بافر است، ظرفیت مؤثر^۲ نامیده می‌شود. در مقاله حاضر جهت پیشینه‌سازی ظرفیت مؤثر یک سیستم مخابراتی شامل رله دومسیره با ارسال بسته‌های کوچک، از تخصیص توان استفاده خواهد شد. در ادامه، این تخصیص بهینه توان بین گره‌ها و رله محاسبه شده است. سپس، ظرفیت مؤثر سیستم در شرایط مختلف برحسب پارامترهای مختلف سیستم مانند خطای بیت بسته‌های کوچک دریافتی و پارامتر کیفیت سرویس، مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که هرچقدر پارامتر کیفیت سرویس بزرگ‌تر انتخاب شود و یا به عبارتی سخت‌گیرانه باشد طول بسته کوچک، ظرفیت مؤثر بالاتری دارد و بالعکس زمانی که کیفیت سرویس خیلی سخت‌گیرانه نیست، ارسال با طول بسته بزرگ، ظرفیت مؤثر بالاتری را پشتیبانی می‌کند. علاوه بر این نشان داده‌ایم که تأثیر پارامتر کیفیت سرویس روی ظرفیت مؤثر مهم‌تر و قابل توجه‌تر از تأثیر خطای بسته‌های کوچک دریافتی است.

در ادامه در بخش ۲ مرور مختصری از تحقیقات گذشته و مرتبط با موضوع مقاله آورده شده است. در بخش ۳ مدل سیستم شامل بسته‌های با طول کوچک، رله دومسیره تقویت و ارسال با گین ثابت و متغیر و همچنین ظرفیت مؤثر توضیح داده شده است. سپس در بخش ۴ دو مسئله بهینه‌سازی جهت پیشینه‌سازی ظرفیت مؤثر به ترتیب برای رله دومسیره تقویت و ارسال با گین ثابت و گین متغیر طرح و حل شده است. نتایج شبیه‌سازی و مقایسه‌های مختلف و متنوع در بخش ۵ آورده شده است. در نهایت نیز در بخش ۶ نتیجه‌گیری مقاله انجام شده است.

۲- مرور تحقیقات گذشته

تاکنون موضوعات مختلفی در سیستم‌های مختلف مخابراتی با ارسال بسته‌های با طول کوچک مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین در مقاله‌های مختلفی از جمله [۱، ۶، ۱۳] به بررسی ظرفیت مؤثر و نرخ گذردهی سیستم هنگام ارسال بسته‌های طول کوچک پرداخته شده است. علاوه بر این در [۴، ۱۴-۱۷] عملکرد رله تک مسیره^۸ با بسته‌های کوچک بررسی شده است. در [۱۷]، نرخ خطای بلوک^۹ برای رله‌های نیمه دوطرفه و تمام دوطرفه تک مسیره مورد بررسی قرار گرفته است. در [۱۰] نیز نرخ خطای بلوک برای رله‌های نیمه دوطرفه دومسیره مطالعه شده است و در [۱۵] نیز، ظرفیت رله تک مسیره با بسته‌های کوچک

ثابت، مقدار α با تغییرات کانال تغییر نکرده و ثابت فرض می‌شود [۲۲]، [۲۳]. به این ترتیب رله نیاز به تخمین ضرایب کانال دو گره A و B تا رله را ندارد و عملکرد رله بسیار ساده می‌شود. با این حال توان ارسالی رله محدوده دینامیکی بالایی خواهد داشت. در ادامه برای سادگی بیشتر برای رله تقویت و ارسال با گین ثابت، $\alpha = 1$ فرض می‌شود؛ اما در رله تقویت و ارسال با گین متغیر، مقدار α با توجه به شرایط کانال تغییر کرده اما در عوض توان ارسالی رله در شرایط مختلف کانال ثابت خواهد ماند [۲۴، ۲۱]. در این حالت رله باید ضرایب کانال گره‌های A و B تا رله را تخمین زده و یا به روش دیگری به دست آورد. پس از دریافت بسته ارسالی از رله در گره‌های A و B، هر گره با توجه به اطلاعات قبلی که از بسته ارسالی خود دارد، اثر بسته ارسالی خود را از روی بسته دریافتی از رله حذف می‌کند. به این ترتیب بسته ارسالی گره A در گره B دریافت شده و قابل کدگشایی خواهد بود. همچنین بسته ارسالی گره B نیز در گره A دریافت شده و کدگشایی می‌شود.

مطابق توضیحات داده شده، عملکرد رله دومسیره در شکل ۱ نمایش داده شده است. فرض بر این است که اطلاعات کانال‌ها در هر دو گره وجود دارد و مسیر مستقیم بین آن‌ها موجود نیست. ضریب کانال بین گره A و رله برابر h و ضریب کانال بین گره B و رله برابر g است و کانال از نوع محو شونده ریلی است. همچنین ضرایب کانال‌ها در دو بازه زمانی متوالی ارسال از گره‌ها به رله و از رله به گره‌ها ثابت فرض می‌شود. در بازه زمانی اول گره A بسته x_A با طول m_A سمبل و گره B بسته x_B را با طول m_B سمبل به صورت هم‌زمان برای رله R ارسال می‌کنند. توان بسته‌ها نرمالیزه و برابر واحد در نظر گرفته شده است. رله نیز بسته y_R را به صورت

$$y_R = h\sqrt{P_A d_A^{-\beta}} x_A + g\sqrt{P_B d_B^{-\beta}} x_B + z_R \quad (3)$$

دریافت می‌کند. در این رابطه z_R نویز سفید جمع‌شونده گوسی با میانگین صفر و واریانس واحد در گیرنده رله است. همچنین d_B و d_A به ترتیب فاصله گره A تا رله و گره B تا رله را نشان می‌دهد و β نمای افت مسیر^{۱۳} را مشخص می‌کند. رله تقویت و ارسال، بسته دریافتی را در گین α ضرب کرده و بسته $x_R = \alpha y_R$ را جهت ارسال به گره‌های A و B می‌سازد. در صورتی که رله با گین ثابت باشد، $\alpha = 1$ فرض می‌شود و در صورتی که رله با گین متغیر در نظر گرفته شود، جهت ارسال توان ثابت از فرستنده رله،

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{P_A d_A^{-\beta} |h|^2 + P_B d_B^{-\beta} |g|^2 + 1}} \quad (4)$$

است. به این ترتیب گره A بسته y_A به صورت

$$y_A = h\sqrt{P_R d_A^{-\beta}} x_R + z_A = h\sqrt{P_R d_A^{-\beta}} \alpha \left(h\sqrt{P_A d_A^{-\beta}} x_A + g\sqrt{P_B d_B^{-\beta}} x_B + z_R \right) + z_A \quad (5)$$

و گره B بسته y_B را به صورت

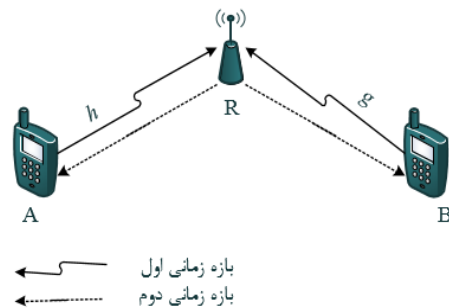
$$y_B = g\sqrt{P_R d_B^{-\beta}} x_R + z_B = g\sqrt{P_R d_B^{-\beta}} \alpha \left(h\sqrt{P_A d_A^{-\beta}} x_A + g\sqrt{P_B d_B^{-\beta}} x_B + z_R \right) + z_B \quad (6)$$

$$r = R^*(m, \varepsilon) = R(\gamma, \varepsilon, m) \triangleq \log_2(1 + \gamma) - \left(\sqrt{\frac{\gamma(\gamma+2)}{(\gamma+1)^2 m}} Q^{-1}(\varepsilon) \right) \log_2 e \quad (2)$$

تعریف می‌شود [۱، ۱۴، ۱۵]. در این رابطه $Q^{-1}(\cdot)$ معکوس تابع Q (Q-function inverse) و e عدد نپیر است [۱، ۱۴، ۱۵]. رابطه (۲) تعداد بیت‌هایی را نشان می‌دهد که هنگام ارسال بسته‌های m سمبلی، در هر بار استفاده از کانال مخابراتی برای گیرنده ارسال می‌شود و در گیرنده با خطای کمتر یا مساوی ε دریافت می‌شود. توجه کنید که r مشابه ظرفیت شانون اما برای ارسال با طول بسته محدود m است. از این رو وقتی m به بینهایت میل می‌کند، r نیز به ظرفیت شانون میل می‌کند [۱، ۱۵]. در ادامه r را نرخ گذرده‌ی^{۱۴} می‌نامیم.

۳-۲- رله دومسیره

فرض کنید که دو گره A و B قصد ارسال بسته برای یکدیگر را دارند و این ارسال داده از طریق رله R انجام می‌شود. در ضمن مسیر مستقیم بین گره‌های A و B وجود ندارد. در حالت معمول، در بازه زمانی اول، گره A بسته خود را برای رله R ارسال می‌کند. در بازه زمانی دوم، رله بسته را برای گره B باز ارسال می‌کند. به همین ترتیب در دو بازه زمانی بعدی یعنی بازه زمانی سوم و چهارم، گره B برای گره A یک بسته ارسال می‌کند. مشخص است که برای اشتراک‌گذاری دو بسته بین دو گره، به چهار بازه زمانی احتیاج است. این روش ارسال از نظر بهره طیفی و همچنین پارامتر تأخیر مقرون به صرفه نیست؛ اما در رله دومسیره که عملکرد آن در شکل ۱ نمایش داده شده است، برای ارسال بسته‌ها از گره A به B و بالعکس، تنها دو بازه زمانی مورد نیاز است [۲۱].



شکل ۱: رله دومسیره

فرض کنید گره A قصد ارسال بسته کوچک x_A با طول m_A را برای گره B دارد و گره B نیز قصد ارسال بسته کوچک x_B با طول m_B را برای گره A دارد. هر دو گره بسته خود را هم‌زمان در بازه زمانی اول برای رله R ارسال می‌کنند. گره A بسته خود را با توان P_A و گره B بسته خود را با توان P_B ارسال می‌کند. سپس در بازه زمانی دوم، رله R که از نوع تقویت و ارسال است، بسته‌های ارسالی دو گره را دریافت نموده و با گین α تقویت کرده و بسته x_R را می‌سازد و با توان P_R برای هر دو گره A و B باز ارسال می‌کند. در رله تقویت و ارسال با گین

۴-۳- جدول پارامترها

جهت سهولت بیشتر، متغیرهای اصلی مقاله در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: پارامترهای اصلی مورد استفاده در این مقاله

متغیر	توضیح
m	طول بسته کوچک
ϵ	احتمال خطای بسته کوچک دریافتی
r	نرخ گذردهی
P	توان ارسالی گره A و B
P_{tot}	کل توان در دسترس قابل تقسیم بین گره‌ها و رله
h	ضریب کانال بین گره A تا رله R
g	ضریب کانال بین گره B تا رله R
H	گین توانی کانال بین گره A تا رله R
G	گین توانی کانال بین گره B تا رله R
γ_A	نسبت توان سیگنال به توان تداخل و نویز در گره A
γ_B	نسبت توان سیگنال به توان تداخل و نویز در گره B
θ	پارامتر کیفیت سرویس (تأخیر)
R_E	ظرفیت مؤثر

۴-۳- بیشینه‌سازی ظرفیت مؤثر در رله‌های نیمه دوطرفه

دومسیره

در این بخش مسئله تخصیص توان جهت بیشینه‌سازی ظرفیت مؤثر رله‌های نیمه دوطرفه دومسیره بررسی می‌شود. بیشینه‌سازی ظرفیت مؤثر به معنی بیشینه‌سازی نرخ ارسال با در نظر گرفتن کیفیت سرویس تأخیر برای کاربران است؛ بنابراین برای کاربران با ترافیک حساس به تأخیر مطلوب است. در ادامه، مسئله برای رله تقویت و ارسال در دو حالت با گین ثابت و گین متغیر ارائه و حل شده است. فرض بر این است که کل توان در دسترس برای گره‌های A و B و رله R ثابت و برابر مقدار P_{tot} است؛ یعنی $P_{tot} = 2P + P_R$ می‌شود. در مسئله بیشینه‌سازی با این قید که توان مجموع مقدار ثابتی دارد، توان بهینه برای هر گره مشخص می‌شود.

۴-۱- مسئله بیشینه‌سازی در رله با گین ثابت

همان‌طور که قبلاً هم اشاره شد، در رله تقویت و ارسال با گین ثابت، ضریب تقویت رله در شرایط مختلف کانال تغییر نمی‌کند و به همین سبب رله نیازی به تخمین ضرایب کانال بین خود و گره‌های A و B ندارد؛ بنابراین پیچیدگی پیاده‌سازی رله در این شرایط بسیار کم خواهد بود؛ اما در عوض توان ارسالی رله در شرایط مختلف کانال تغییر کرده و این موضوع طراحی و هزینه تقویت‌کننده توان رله را زیاد می‌کند [۲۳، ۲۲]. در رله تقویت و ارسال با گین ثابت، با فرض ضریب تقویت $\alpha = 1$ و جایگذاری آن در دو رابطه (۷) و (۸)، نسبت توان سیگنال به توان تداخل و نویز^{۱۴} در دو گره A و B محاسبه می‌شود. با توجه به شباهت عملکرد دو گره A و B، در ادامه روابط را فقط برای

از رله دریافت می‌کنند. همچنین z_B و z_A نویز سفید جمع‌شونده گوسی با میانگین صفر و واریانس واحد در گیرنده گره‌های A و B است. گره A بسته ارسالی خود را در اختیار دارد؛ بنابراین اثر آن را به راحتی از روی بسته دریافتی y_A حذف می‌کند و \tilde{y}_A را می‌سازد و سپس از \tilde{y}_A برای پردازش‌های بعدی و تخمین بسته ارسالی از طرف گره B استفاده می‌کند.

$$\tilde{y}_A = h\sqrt{P_R d_A^{-\beta}} \alpha \left(g\sqrt{P_B d_B^{-\beta}} x_B + z_R \right) + z_A \quad (7)$$

به همین ترتیب گره B با توجه به در اختیار داشتن بسته ارسالی خود، اثر آن را از روی بسته دریافتی به راحتی حذف کرده و \tilde{y}_B را می‌سازد و سپس از \tilde{y}_B برای پردازش‌های بعدی و تخمین بسته ارسالی گره A استفاده می‌کند.

$$\tilde{y}_B = g\sqrt{P_R d_B^{-\beta}} \alpha \left(h\sqrt{P_A d_A^{-\beta}} x_A + z_R \right) + z_B \quad (8)$$

در ادامه بدون از دست دادن کلیت مسئله و جهت سادگی بیشتر، فرض -های زیر انجام شده است.

$$m_A = m_B = m$$

$$P_A = P_B = P$$

۳-۳- ظرفیت مؤثر

ظرفیت مؤثر برابر نرخ ورود بسته‌ها به بافر یک سیستم مخابراتی که قابل عبور از کانال مخابراتی است و کیفیت سرویس مشخص برای آن قابل تضمین است، تعریف می‌شود [۲۶، ۲۵]. منظور از کیفیت سرویس، تأخیر آماری بسته‌ها در بافر فرستنده هر گره است که به صورت

$$\mathbb{P}\{D > d\} \approx \epsilon e^{-\theta d} \quad (9)$$

نوشته می‌شود [۲۶، ۲۵، ۶]. در این رابطه $\mathbb{P}\{\cdot\}$ احتمال وقوع پیشامد، D تأخیر بسته‌ها در بافر فرستنده، d یک حد آستانه مشخص برای تأخیر، ϵ احتمال خالی نبودن بافر فرستنده و θ پارامتر کیفیت سرویس است. هرچه قدر θ بزرگ‌تر انتخاب شود، احتمال تأخیر کمتر می‌شود و کیفیت سرویس سخت‌گیرانه‌تر خواهد بود. در مقابل برای مقادیر کوچک θ ، احتمال تأخیر بیشتر است و کیفیت سرویس زیاد سخت‌گیرانه نیست. پس از مشخص شدن مقدار کیفیت درخواستی هر کاربر با استفاده از پارامتر θ ، ظرفیت مؤثر R_E به صورت

$$R_E = -\frac{1}{m\theta} \ln \left[\mathbb{E} \left\{ e^{-m\theta r} (1 - \epsilon) + \epsilon \right\} \right] \quad (10)$$

تعریف می‌شود [۱۹، ۶]. در این رابطه $\mathbb{E}\{\cdot\}$ میانگین آماری را نشان می‌دهد، r نرخ گذردهی مطابق رابطه (۲) و ϵ نرخ خطا هنگام ارسال با بسته‌های کوچک است. لازم به ذکر است که بافر فقط در فرستنده گره A و فرستنده گره B در نظر گرفته شده است و رله با توجه به عملکرد تقویت و ارسال خود، نیازی به بافر ندارد. در ادامه مقاله برای بیشینه‌سازی ظرفیت مؤثر از تخصیص توان مناسب بین گره‌ها و رله استفاده خواهد شد.

تحت فرض‌های قضیه (۱)، ظرفیت مؤثر R_E نسبت به P_R مقعر و $\frac{\partial^2 R_E}{\partial P_R^2} \leq 0$ است؛ بنابراین مسئله بیشینه‌سازی (۱۲) دارای جواب یکتا است. همچنین بیشینه‌سازی ظرفیت مؤثر R_E نسبت به P_R معادل $\frac{\partial R_E}{\partial P_R} = 0$ یعنی γ_A نسبت به P_R است؛ یعنی معادل $\frac{\partial \gamma_A}{\partial P_R} = 0$ است.

اثبات قضیه (۳):

در پیوست ۳ آورده شده است. ■
با توجه به قضیه (۳) می‌توان گفت که مسئله بهینه‌سازی (۱۲) مقعر است و دارای جواب یکتا است و این جواب یکتا با صفر قرار دادن $\frac{\partial \gamma_A}{\partial P_R}$ به صورت

$$P_R^* = \frac{\sqrt{P_{tot} H + 1} - 1}{H} \quad (13)$$

محاسبه می‌شود. در این رابطه P_R^* مقدار بهینه توان اختصاص داده شده به رله را نشان می‌دهد؛ بنابراین توان گرهای A و B نیز به صورت $P^* = \frac{P_{tot} - P_R^*}{2}$ خواهد بود.

توجه شود که در قضیه (۱) فرض کردیم $\gamma_A \geq 1$ است و مقدار بهینه توان رله و گرها با این فرض محاسبه شده است. اگر به هر دلیل این شرط برقرار نباشد، بهتر است توانی برای ارسال اطلاعات اختصاص داده نشود؛ بنابراین تخصیص توان بهینه در عمل به صورت

$$\begin{cases} (P, P_R) = \left(\frac{P_{tot} - P_R^*}{2}, P_R^* \right), & \gamma_A \geq 1 \\ (P, P_R) = (0, 0), & \text{O.W} \end{cases} \quad (14)$$

اجرا می‌شود.

۴-۲- مسئله بیشینه‌سازی در رله با گین متغیر

در رله تقویت و ارسال با گین متغیر، ضریب تقویت رله در شرایط مختلف کانال تغییر کرده و سیگنال دریافتی در رله ابتدا نرمالیزه می‌شود. سپس این سیگنال با توان P_R ارسال می‌شود. ضریب تقویت در رله تقویت و ارسال با گین متغیر در رابطه (۴) آورده شده است. با جایگذاری آن در دو رابطه (۷) و (۸)، γ_A و γ_B برای دو گر A و B محاسبه می‌شود. با توجه به شباهت عملکرد دو گر A و B، در ادامه روابط را فقط برای گر A می‌نویسیم. به این ترتیب γ_A برای گر A به صورت

$$\gamma_A = \frac{HGP_R P}{HP_R + HP + GP + 1} \quad (15)$$

محاسبه خواهد شد. در حالت رله تقویت و ارسال با گین متغیر نیز هدف بیشینه کردن ظرفیت مؤثر با قید ثابت بودن مجموع توان گرهای A و B و رله است؛ بنابراین مسئله بهینه‌سازی در اینجا نیز همان مسئله (۱۲) است. در ادامه نشان خواهیم داد که این مسئله با شرایط جدید همچنان مقعر است و مقدار بهینه توان تخصیص یافته به گرهای مختلف را محاسبه خواهیم کرد.

گره A می‌نویسیم. نسبت توان سیگنال به توان تداخل و نویز γ_A برای گره A به صورت

$$\gamma_A = \frac{HGP_R P}{HP_R + 1} \quad (11)$$

نوشته می‌شود و $G = |g|^2 d_B^{-\beta}$ ، $H = |h|^2 d_A^{-\beta}$ گین توانی کانال بین گره A تا رله و گین توانی کانال بین گره B تا رله را نشان می‌دهد. حالا با استفاده از رابطه (۱۱) و قرار دادن آن در نرخ گذردهی در رابطه (۲) و سپس جایگذاری آن در رابطه (۱۰)، ظرفیت مؤثر محاسبه می‌شود؛ بنابراین می‌توان مسئله بهینه‌سازی را با قید ثابت بودن مجموع توان را به صورت

$$\begin{aligned} \max_{P, P_R} R_E(P, P_R) \\ \text{s.t. } 2P + P_R = P_{tot} \end{aligned} \quad (12)$$

نوشته می‌شود. این مسئله در شرایطی که ذکر خواهد شد مقعر^{۱۵} است و دارای جواب بیشینه یکتا است. تقعر این مسئله با استفاده از سه قضیه اثبات می‌شود.

قضیه (۱):

با فرض نرخ خطای بیت $\varepsilon \geq 10^{-27}$ ، طول بلوک $m \geq 100$ و $\gamma_A \geq 1$ ، نرخ گذردهی r برحسب γ_A اکیداً صعودی و $\frac{\partial r}{\partial \gamma_A} > 0$ است. همچنین تقعر

تابع منفی و $\frac{\partial^2 r}{\partial \gamma_A^2} \leq 0$ است.

اثبات قضیه (۱):

در پیوست ۱ آورده شده است. ■

همان‌طور که مشاهده می‌شود، شرط نرخ خطای بیت $\varepsilon \geq 10^{-27}$ محدودکننده نیست و خطا در شرایط واقعی و عملی تقریباً همیشه خیلی بیشتر از 10^{-27} است. همچنین شرط طول بلوک $m \geq 100$ نیز اغلب محدودکننده نیست و طول بلوک‌های ارسالی حتی در مخابرات با بسته‌های کوچک، با در نظر گرفتن سربارهای لازم برای ارسال بسته، معمولاً از این عدد بزرگ‌تر است [۲۶، ۲۵]. برای نسبت توان سیگنال به توان تداخل و نویز نیز تقریباً همیشه مقدار موردنظر بیشتر از حد آستانه $\gamma_A = 1$ است. به این ترتیب می‌توان گفت که در شرایط واقعی و عملی، نرخ گذردهی نسبت به γ_A اکیداً صعودی و مشتق مرتبه دوم آن نیز منفی است.

قضیه (۲):

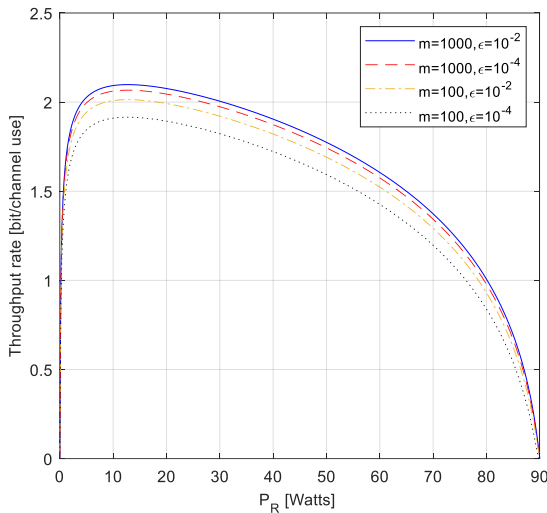
تحت فرض‌های قضیه (۱)، نرخ گذردهی r نسبت به P_R مقعر و $\frac{\partial^2 r}{\partial P_R^2} \leq 0$ است. همچنین بیشینه‌سازی نرخ گذردهی r نسبت به P_R معادل

معادل بیشینه‌سازی γ_A نسبت به P_R است؛ یعنی $\frac{\partial r}{\partial P_R} = 0$ معادل $\frac{\partial \gamma_A}{\partial P_R} = 0$ است.

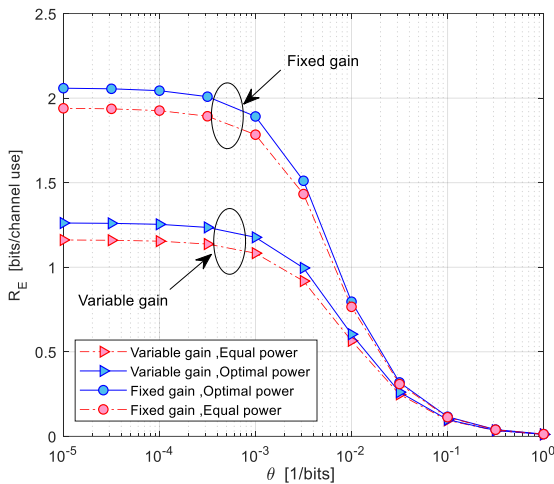
اثبات قضیه (۲):

در پیوست ۲ آورده شده است. ■

قضیه (۳):



شکل ۲: نرخ گذردهی رله نیمه دوطرفه دومسیره با گین ثابت برحسب توان رله



شکل ۳: مقایسه ظرفیت مؤثر در رله دومسیره با گین ثابت و گین متغیر برحسب پارامتر کیفیت سرویس θ

شکل ۳ ظرفیت مؤثر را در رله دومسیره با گین ثابت و گین متغیر با تخصیص توان بهینه و بدون تخصیص توان (تقسیم توان مساوی بین گره‌ها) برحسب پارامتر کیفیت سرویس θ نشان می‌دهد. احتمال خطا با خط توپر برای حالتی است که از تخصیص توان بهینه استفاده شده است و نمودارهای نقطه‌چین ظرفیت مؤثر را برای تخصیص توان مساوی بین گره‌ها نشان می‌دهد. بدیهی است که تخصیص توان بهینه عملکرد بهتری نسبت به تخصیص توان برابر دارد. هرچقدر پارامتر کیفیت سرویس θ بزرگ‌تر انتخاب شود، یعنی کیفیت سرویس سخت‌گیرانه‌تر در نظر گرفته شود، ظرفیت مؤثر کمتر می‌شود. در مقابل برای مقادیر کوچک θ وقتی کیفیت سرویس موردنظر زیاد سخت‌گیرانه نیست، ظرفیت مؤثر افزایش می‌یابد. در این حالت تخصیص توان بهینه نیز اثر خود را بهتر نشان می‌دهد. همچنین می‌توان گفت که رله دومسیره با

قضیه (۱) فارغ از گین ثابت یا گین متغیر بودن رله برقرار است؛ اما قضیه‌های (۲) و (۳) با توجه به تفاوت رابطه (۱۵) و (۱۱) باید مجدداً اثبات شوند. اثبات این دو قضیه مشابه روابط پیوست (۲) و (۳) انجام می‌شود. تنها باید γ_A را مطابق رابطه (۱۵) در نظر گرفت. جهت خلاصه‌نویسی بیشتر، این اثبات‌ها در اینجا مجدداً تکرار نشده است.

پس از اثبات تقعر مسئله بهینه‌سازی، توان بهینه رله از رابطه $\frac{\partial \gamma_A}{\partial P_R} = 0$ به صورت محاسبه می‌شود. با حل این معادله دو جواب به صورت

$$\left(\begin{array}{l} \frac{\sqrt{2}\sqrt{(P_{tot}H+1)(P_{tot}H+P_{tot}G+2)}+P_{tot}H+P_{tot}G+2}{H-G} \\ \frac{P_{tot}H-\sqrt{2}\sqrt{(P_{tot}H+1)(P_{tot}H+P_{tot}G+2)}+P_{tot}G+2}{H-G} \end{array} \right) \quad (16)$$

خواهیم داشت که قطعاً یکی از آن‌ها در شرایط مسئله بهینه‌سازی ما صدق می‌کند. با قرار دادن هر دو جواب در مشتق مرتبه دوم $\frac{\partial^2 \gamma_A}{\partial P_R^2}$ و

بررسی علامت، مشخص می‌شود که جواب بهینه برای توان رله به صورت $P_R^* = \frac{P_{tot}H - \sqrt{2}\sqrt{(P_{tot}H+1)(P_{tot}H+P_{tot}G+2)} + P_{tot}G + 2}{H-G}$ (۱۷)

است. همچنین توان گره‌های A و B به صورت $P_A^* = \frac{P_{tot} - P_R^*}{2}$ خواهد بود. با توجه به شرایط قضیه (۱)، تخصیص توان بهینه در عمل به صورت رابطه (۱۴) انجام شد.

۵- شبیه‌سازی و ارائه نتایج

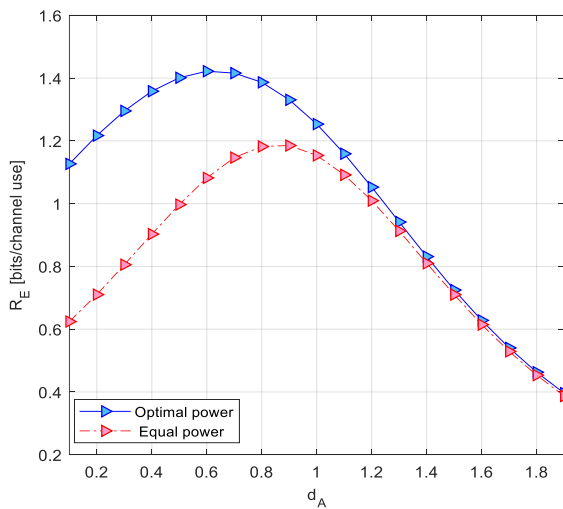
در این بخش شبیه‌سازی‌ها و نتایج آورده شده است. در همه شبیه‌سازی‌ها و نمودارها، توان کل در دسترس $P_{tot} = 90\text{mW}$ فرض شده است که در حالت تخصیص توان برابر، توان هر گره معادل $\frac{P_{tot}}{3} = 30\text{mW}$ خواهد بود. توان نویر در گره‌های A و B و رله نیز برابر

است. 1mW همچنین در همه نمودارها پارامترهای m و ϵ طوری مقداردهی شده‌اند که فرض‌های قضیه (۱) برقرار باشد.

شکل ۲ نرخ گذردهی رله نیمه دوطرفه دومسیره با گین ثابت را برحسب توان رله نشان می‌دهد. این شکل که به ازای طول بسته و احتمال خطاهای مختلف رسم شده است، نشان می‌دهد که نرخ گذردهی r در P_R مقعر است. این شکل به نوعی تأیید قضیه (۲) هست. همچنین مشخص است که هر چه m یعنی طول بسته بزرگ‌تر شود، نرخ گذردهی نیز بیشتر می‌شود؛ زیرا در این شرایط امکان طراحی کدهای تصحیح خطای قوی‌تر فراهم می‌شود. نرخ گذردهی در حالت حدی وقتی طول بسته‌ها به بینهایت میل کند، به ظرفیت شانون میل خواهد کرد.

در شکل‌هایی که در ادامه آورده شده است، فرض بر این است که رله در وسط دو گره A و B واقع شده و $d_A = d_B$ است. دقت شود که d_A فاصله بین گره A تا رله و d_B فاصله گره B تا رله است. برای سادگی در این قسمت، $d_A = d_B = 1$ در نظر گرفته شده است.

خطای نسبتاً قوی با سربار زیاد احتیاج هست؛ بنابراین بیت‌های داده کمتری در بسته ارسالی گنجانده خواهد شد. در طرف مقابل در نرخ خطای بیت زیاد هم چون تعداد کمی از بیت‌ها سالم در گیرنده دریافت می‌شود، نرخ گذردهی و ظرفیت مؤثر با کاهش روبرو می‌شود. توضیحات مشابهی نیز برای شکل ۵ برقرار است و نمودارها بر حسب طول بسته m قابل مقایسه هستند. در ادامه محل رله از وسط دو گره A و B تغییر کرده و اثر فاصله بر روی می‌شود. جهت مقایسه بهتر با نمودارهای قبلی، $d_A + d_B = 2$ در نظر گرفته شده است و نمای افت مسیر $\beta = 4$ است. همچنین شبیه‌سازی‌ها برای رله با گین متغیر انجام شده است. اگرچه نتایج برای رله با گین ثابت نیز به صورت مشابهی برقرار است.

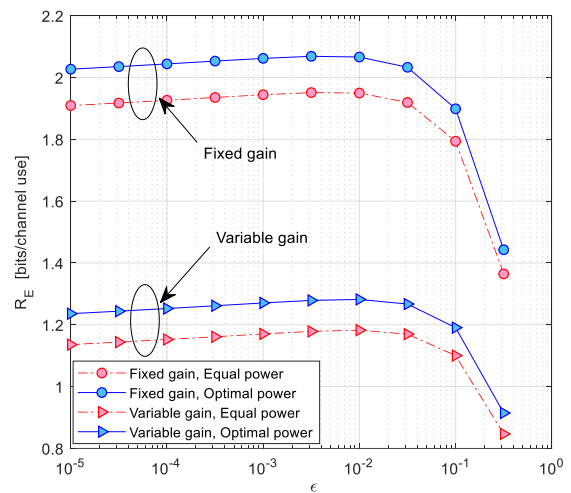


شکل ۶: ظرفیت مؤثر رله دومسیره با گین متغیر بر حسب فاصله رله و گره A

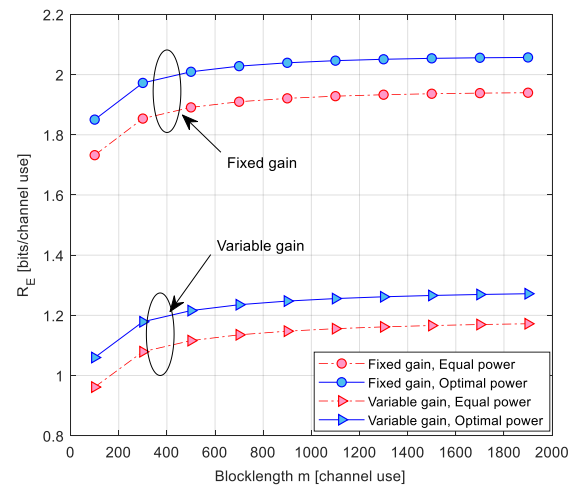
ظرفیت مؤثر رله دومسیره با گین متغیر با و بدون تخصیص توان بهینه بر حسب فاصله گره A تا رله یعنی d_A در شکل ۶ رسم شده است. احتمال خطای بیت $\epsilon = 10^{-4}$ ، طول بسته $m = 1000$ و پارامتر کیفیت سرویس $\theta = 10^{-4}$ در نظر گرفته شده است. مشاهده می‌شود که وقتی رله در فاصله نزدیک به گره A قرار گرفته باشد، بهبود ظرفیت مؤثر به دلیل استفاده از تخصیص توان بهینه چشم‌گیرتر است؛ بنابراین تحت این شرایط تخصیص توان به شدت توصیه می‌شود؛ اما در مقابل وقتی رله از گره A دور می‌شود، عملکرد سیستم با و بدون تخصیص توان تقریباً مشابه است و بنابراین تخصیص توان بهبود خاصی برای سیستم ندارد. با توجه به این نکته، در شکل‌های بعدی $d_A = 0.4$ فرض شده است.

گین ثابت ظرفیت مؤثر بالاتری نسبت به حالت گین متغیر دارد. این شکل برای مقادیر دیگر m و ϵ نیز قابل رسم است و نتایج مشابهی دارد که در اینجا تکرار نشده است.

در شکل‌های ۴ و ۵ مقایسه‌ای بین ظرفیت مؤثر در رله دومسیره با گین ثابت و گین متغیر با تخصیص توان بهینه و بدون تخصیص توان بر حسب نرخ خطای بیت ϵ و طول بسته m انجام شده است. پارامتر کیفیت سرویس $\theta = 10^{-4}$ در نظر گرفته شده است. مشخص است که عملکرد با تخصیص توان بهینه بهتر از عملکرد بدون تخصیص توان (تخصیص توان مساوی بین گره‌ها) است.



شکل ۴: مقایسه ظرفیت مؤثر در رله‌های دومسیره با گین ثابت و گین متغیر بر حسب نرخ خطای بیت ϵ



شکل ۵: مقایسه ظرفیت مؤثر در رله‌های دومسیره با گین ثابت و گین متغیر بر حسب طول بسته m

در شکل ۴ ظرفیت مؤثر در ابتدا با افزایش نرخ خطای بیت افزایش می‌یابد و به یک نقطه بهینه می‌رسد. سپس با افزایش نرخ خطای بیت کاهش می‌یابد و در نهایت به شدت افت می‌کند. دلیل این موضوع نسبتاً روشن است. برای رسیدن به نرخ خطای بیت بسیار کم، کد تصحیح

نرخ خطای بیت و دو مقدار $\theta = 10^{-2}, 10^{-5}$ برای پارامتر کیفیت سرویس در نظر گرفته شده است. جهت وضوح بیشتر، نمودارها برای حالتی که تخصیص توان نداریم از شکل حذف شده است. در این شکل مشخص است که وقتی پارامتر کیفیت سرویس سخت‌گیرانه است $\theta = 10^{-2}$ ، ظرفیت مؤثر با زیاد شدن طول بسته کاهش می‌یابد؛ اما برای کیفیت سرویس سهل‌انگارانه مانند $\theta = 10^{-5}$ ، ظرفیت مؤثر با افزایش طول بسته افزایش می‌یابد. همچنین مشخص است که اثر نرخ خطای بیت ϵ در مقادیر کوچک m بیشتر از مقادیر بزرگ m است. در ضمن می‌توان گفت که تأثیر θ بر عملکرد سیستم بیشتر از تأثیر ϵ است و بنابراین توجه و انتخاب مناسب آن ضروری‌تر است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک شبکه رله نیمه دوطرفه دومسیره با گین ثابت و گین متغیر را تحت سناریو ارسال بسته‌هایی با طول کوچک در نظر گرفتیم. از میان معیارهای مختلف ارزیابی عملکرد شبکه به بررسی ظرفیت مؤثر پرداختیم. همچنین برای این شبکه یک مسئله بهینه‌سازی توان باهدف بیشینه کردن ظرفیت مؤثر و با قید مجموع ثابت توان برای گره‌های A و B و رله R به کاربردیم و بعد از اثبات تقعر مسئله، مقدار بهینه توان را به دست آوردیم. علاوه بر این تأثیر احتمال خطای بیت، پارامتر کیفیت سرویس و طول بسته روی عملکرد ظرفیت مؤثر را بررسی کردیم. نتایج نشان داد که مسئله تخصیص توان به‌منظور بیشینه کردن ظرفیت مؤثر، در مقایسه با تخصیص توان برابر باعث بهبود در عملکرد شبکه می‌شود. همچنین وقتی که کیفیت سرویس دهی سخت‌گیرانه باشد، ارسال با طول بسته کوچک، ظرفیت مؤثر بالاتری دارد و بالعکس زمانی که کیفیت سرویس زیاد سخت‌گیرانه نیست، ارسال با طول بسته بزرگ، ظرفیت مؤثر بالاتری دارد. همچنین نشان دادیم که تأثیر θ روی ظرفیت مؤثر مهم‌تر و قابل توجه‌تر از تأثیر ϵ است؛ و در مواقعی که رله در فاصله نزدیک به منبع A قرار داشته باشد، بهبود حاصل از مسئله تخصیص توان به‌کاربرده شده نسبت به حالتی که رله در فاصله برابر از دو گره A و B قرار گیرد، بیشتر است.

پیوست‌ها

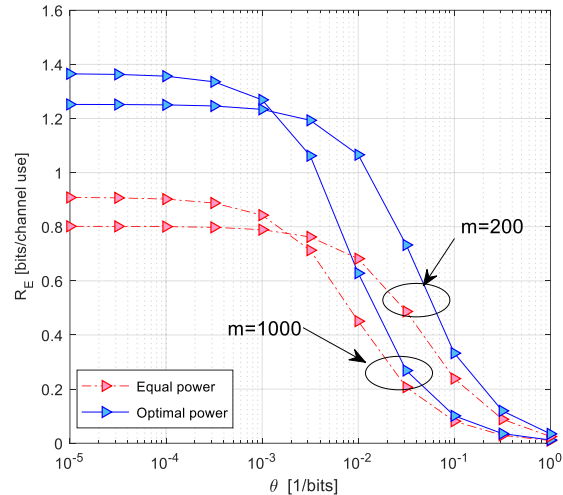
پیوست (۱):

ابتدا از نرخ گذردهی r نسبت به γ_A مشتق می‌گیریم. مشتق مرتبه اول با توجه به رابطه (۲) به صورت

$$\frac{\partial r}{\partial \gamma_A} = \frac{\log_2 e}{1 + \gamma_A} - \frac{\phi \log_2 e}{\sqrt{\left(1 - \frac{1}{(1 + \gamma_A)^2}\right)}} \frac{1}{(1 + \gamma_A)^3} \quad (18)$$

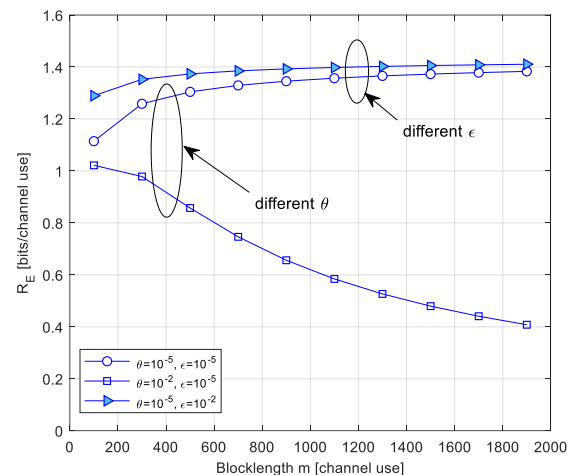
نوشته می‌شود و $\phi = Q^{-1}(\epsilon) \sqrt{\frac{1}{m}}$ ابتدا با فاکتورگیری رابطه را

به شکل



شکل ۷: ظرفیت مؤثر رله دومسیره برحسب پارامتر کیفیت سرویس در مقادیر مختلف طول بسته m

شکل ۷ مشابه شکل ۳ ظرفیت مؤثر رله دومسیره با گین متغیر را برحسب پارامتر کیفیت سرویس θ و برای دو مقدار مختلف $m = 200$ و $m = 1000$ نشان می‌دهد. همچنین فاصله گره A تا رله $d_A = 0.4$ فرض شده است. نکته جالب توجه در این شکل، تفاوت ظرفیت مؤثر برحسب θ و برای مقادیر متفاوت m است. وقتی که کیفیت سرویس سخت‌گیرانه باشد (مقادیر نسبتاً بزرگ θ) ارسال با طول بسته‌های کوچک مثل $m = 200$ منجر به ظرفیت مؤثر بالاتری می‌شود. در عوض زمانی که کیفیت سرویس سخت‌گیرانه نیست (مقادیر نسبتاً کوچک θ) ارسال با طول بسته بزرگ مثل $m = 1000$ مناسب‌تر است؛ بنابراین توجه کافی به کیفیت سرویس درخواستی کاربر می‌تواند در استراتژی انتخابی سیستم مخابراتی کاملاً تأثیرگذار باشد.



شکل ۸: ظرفیت مؤثر رله دومسیره برحسب طول بسته m در مقادیر مختلف نرخ خطای بیت ϵ و پارامتر کیفیت سرویس θ

شکل ۸ ظرفیت مؤثر رله دومسیره را با تخصیص توان برحسب طول بسته m نشان می‌دهد. جهت مقایسه بهتر، دو مقدار $\epsilon = 10^{-2}, 10^{-5}$ برای

$$\frac{\partial^2 r}{\partial P_R^2} = \frac{\partial^2 r}{\partial \gamma_A^2} \left(\frac{\partial \gamma_A}{\partial P_R} \right)^2 + \frac{\partial r}{\partial \gamma_A} \frac{\partial^2 \gamma_A}{\partial P_R^2} \quad (22)$$

≤ 0 ≥ 0 > 0 ?

برای بررسی مقعر یا محدب بودن رابطه (۲۲) لازم است که علامت هرکدام از کسرهای رابطه را بدانیم. علامت کسر اول و سوم با توجه به قضیه (۱) و در پیوست (۱) مشخص شد. کسر دوم نیز با توجه به مربع بودنش همواره مثبت است. کافی است که در رابطه (۲۲) نشان دهیم که علامت مشتق مرتبه دوم γ_A نسبت به P_R منفی است. برای این منظور $P = \frac{P_{tot} - P_R}{2}$ را در رابطه (۱۱) قرار می‌دهیم و سپس مشتق مرتبه اول و دوم γ_A نسبت به P_R را به صورت

$$\frac{\partial \gamma_A}{\partial P_R} = \frac{HG(-HP_R^2 - 2P_R + P_{tot})}{2(1 + P_R H)^2} \quad (23)$$

$$\frac{\partial^2 \gamma_A}{\partial P_R^2} = -\frac{HG(P_{tot} H + 1)}{(1 + P_R H)^3} \leq 0 \quad (24)$$

می‌نویسیم. با توجه به منفی بودن $\frac{\partial^2 \gamma_A}{\partial P_R^2}$ ، می‌توان نتیجه گرفت که تحت فرض‌های گفته‌شده در قضیه (۱)، نرخ گذردهی r نسبت به P_R نیز مقعر است؛ بنابراین مقدار بیشینه نرخ گذردهی با صفر قرار دادن مشتق مرتبه اول نرخ گذردهی r برحسب P_R مطابق

$$\frac{\partial r}{\partial P_R} = \frac{\partial r}{\partial \gamma_A} \frac{\partial \gamma_A}{\partial P_R} = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial \gamma_A}{\partial P_R} = 0 \quad (25)$$

> 0

محاسبه می‌شود. با توجه به این‌که در قضیه (۱) نشان دادیم نرخ گذردهی r نسبت به γ_A اکیداً صعودی است و $\frac{\partial r}{\partial \gamma_A} > 0$ است؛ بنابراین $\frac{\partial r}{\partial P_R}$ تنها در صورتی صفر می‌شود که $\frac{\partial \gamma_A}{\partial P_R}$ برابر صفر شود.

پیوست (۳):

ابتدا از ظرفیت مؤثر R_E نسبت به r مشتق می‌گیریم. مشتق مرتبه اول با توجه به رابطه (۱۰) به صورت

$$\frac{\partial R_E}{\partial r} = \frac{\mathbb{E}[e^{-\theta m r} (1 - \varepsilon)]}{\mathbb{E}[e^{-\theta m r} (1 - \varepsilon) + \varepsilon]} > 0 \quad (26)$$

نوشته می‌شود. مشتق در رابطه (۲۶) همیشه مثبت و بزرگ‌تر از صفر است، زیرا نرخ خطای بیت همواره از ۱ کوچک‌تر است، پس حاصل $1 - \varepsilon$ مثبت و مخالف صفر است. از طرف دیگر عبارت $e^{-\theta m r}$ نیز همیشه مثبت است. حالاً مشتق مرتبه دوم R_E نسبت به r را بررسی می‌کنیم و رابطه را به صورت

$$\frac{\partial^2 R_E}{\partial r^2} = \frac{-\theta m \mathbb{E}[e^{-\theta m r} (1 - \varepsilon)]}{\mathbb{E}[e^{-\theta m r} (1 - \varepsilon) + \varepsilon]^2} \times \frac{(\mathbb{E}[e^{-\theta m r} (1 - \varepsilon)] + \varepsilon) - \mathbb{E}[e^{-\theta m r} (1 - \varepsilon)]}{\mathbb{E}[e^{-\theta m r} (1 - \varepsilon) + \varepsilon]^2} \leq 0 \quad (27)$$

$$\frac{\partial r}{\partial \gamma_A} = \frac{\log_2 e}{1 + \gamma_A} \left[1 - \frac{\varphi}{(1 + \gamma_A) \sqrt{(1 + \gamma_A)^2 - 1}} \right] \quad (19)$$

بازنویسی می‌کنیم. سپس نشان می‌دهیم مشتق در رابطه (۱۹) همیشه مثبت است. مشخص است که $\frac{\log_2 e}{1 + \gamma_A} > 0$ است. پس باید نشان دهیم که عبارت دوم در رابطه (۱۹) نیز همیشه مثبت است. تابع $Q^{-1}(\varepsilon)$ تابع نزولی است و با افزایش ε کاهش می‌یابد. تابع $\sqrt{\frac{1}{m}}$ نیز با افزایش m کاهش می‌یابد؛ بنابراین φ تابع نزولی است و با توجه به فرض‌های قضیه (۱)، بزرگ‌ترین مقدار آن در نقطه $\varepsilon = 10^{-27}$ و $m = 100$ و تقریباً برابر ۱ خواهد بود (مقدار دقیق آن ۱.۰۸ است). همچنین در قضیه (۱) فرض شده است که $\gamma_A \geq 1$ است. با این فرض $\sqrt{(1 + \gamma_A)^2 - 1} > 1$ و $(1 + \gamma_A) \sqrt{(1 + \gamma_A)^2 - 1} > 1$ خواهد بود. با توجه به این توضیحات، $\frac{\partial r}{\partial \gamma_A} > 0$ و در نتیجه $\frac{\partial r}{\partial \gamma_A} > 0$ خواهد بود.

حالاً مشتق دوم r نسبت به γ_A را بررسی می‌کنیم و رابطه را به صورت

$$\frac{\partial^2 r}{\partial \gamma_A^2} = -\frac{\log_2 e}{(1 + \gamma_A)^2} + \frac{\varphi \log_2 e}{2((1 + \gamma_A)^2 - 1)^{\frac{3}{2}}} \frac{1}{(1 + \gamma_A)^3} + \frac{\varphi \log_2 e}{\sqrt{(1 + \gamma_A)^2 - 1}} \frac{3}{(1 + \gamma_A)^3} \quad (20)$$

می‌نویسیم. مجدداً با فاکتورگیری رابطه (۲۰) را به صورت

$$\frac{\partial^2 r}{\partial \gamma_A^2} = \left\{ -(1 + \gamma_A) + \frac{\varphi}{2(\gamma_A^2 + 2\gamma_A)^{\frac{3}{2}}} + \frac{3\varphi}{\sqrt{\gamma_A^2 + 2\gamma_A}} \right\} \times \frac{\log_2 e}{(1 + \gamma_A)^3} = \frac{\chi(\gamma_A) \log_2 e}{(1 + \gamma_A)^3} \quad (21)$$

ساده‌تر می‌کنیم. برای سادگی نوشتار، عبارت داخل آکولاد برابر $\chi(\gamma_A)$ در نظر گرفته شده است. برای تعیین علامت رابطه (۲۱)، دو حالت $\varepsilon \geq 0.5$ و $\varepsilon < 0.5$ را در نظر می‌گیریم. اگر نرخ خطای بیت $\varepsilon \geq 0.5$ باشد، آنگاه $\varphi \leq 0$ است و بنابراین $\frac{\partial^2 r}{\partial \gamma_A^2} \leq 0$ است؛ اما هنگامی که نرخ خطای بیت $\varepsilon < 0.5$ باشد، φ مثبت است. در این حالت مشابه توضیحاتی که برای تعیین علامت مشتق مرتبه اول دادیم، می‌توان نشان داد که با فرض‌های قضیه (۱)، $\chi(\gamma_A) \leq 0$ می‌شود؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که $\frac{\partial^2 r}{\partial \gamma_A^2} \leq 0$ است.

پیوست (۲):

ابتدا مشتق مرتبه دوم r نسبت به P_R را با استفاده از قاعده زنجیره‌ای محاسبه می‌کنیم.

- [8] M. Shirvanimoghaddam *et al.*, "Short block-length codes for ultra-reliable low latency communications," *IEEE Communications Magazine*, vol. 57, no. 2, pp. 130-137, 2018.
- [9] محمد لاری، «تخصیص منابع جهت کمینه‌سازی تأخیر ارسال در سامانه‌های مخابراتی تغذیه‌شونده به‌صورت بی‌سیم» *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۷، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۶
- [10] Y. Gu, H. Chen, Y. Li, L. Song, and B. Vucetic, "Short-packet two-way amplify-and-forward relaying," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 25, no. 2, pp. 263-267, 2017.
- [11] Y. Polyanskiy, H. V. Poor, and S. Verdú, "Channel coding rate in the finite blocklength regime," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 56, no. 5, p. 2307, 2010.
- [12] Z. Zhou, J. Xu, Z. Zhang, F. Lei, and W. Fang, "Energy-efficient optimization for concurrent compositions of WSN services," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 19994-20008, 2017.
- [13] G. Ozcan and M. C. Gursoy, "Throughput of cognitive radio systems with finite blocklength codes," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 31, no. 11, pp. 2541-2554, 2013.
- [14] Y. Hu, J. Gross, and A. Schmeink, "On the performance advantage of relaying under the finite blocklength regime," *IEEE Communications Letters*, vol. 19, no. 5, pp. 779-782, 2015.
- [15] Y. Hu, J. Gross, and A. Schmeink, "On the capacity of relaying with finite blocklength," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 3, pp. 1790-1794, 2016.
- [16] Y. Hu, A. Schmeink, and J. Gross, "Blocklength-limited performance of relaying under quasi-static Rayleigh channels," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15, no. 7, pp. 4548-4558, 2016.
- [17] Y. Gu, H. Chen, Y. Li, and B. Vucetic, "Ultra-reliable short-packet communications: Half-duplex or full-duplex relaying?," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 7, no. 3, pp. 348-351, 2018.
- [18] Y. Hu, M. Ozmen, M. C. Gursoy, and A. Schmeink, "Optimal power allocation for QoS-constrained downlink networks with finite blocklength codes," in *2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2018, pp. 1-6: IEEE.
- [19] Y. Hu, M. C. Gursoy, and A. Schmeink, "Optimal Power Allocation for Amplify and Forward Relaying with Finite Blocklength Codes and QoS Constraints," in *2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 2018, pp. 1-5: IEEE.
- [20] W. R. Ghanem, V. Jamali, Y. Sun, and R. Schober, "Resource Allocation for Multi-User Downlink URLLC-OFDMA Systems," *arXiv preprint arXiv:1901.05825*, 2019.
- [21] Y. Han, S. H. Ting, C. K. Ho, and W. H. Chin, "Performance bounds for two-way amplify-and-forward relaying," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 8, no. 1, pp. 432-439, 2009.
- [22] N. Maletic, M. Cabarkapa, N. Neskovic, and D. Budimir, "Hardware impairments impact on fixed-gain AF relaying performance in Nakagami-m fading," *Electronics Letters*, vol. 52, no. 2, pp. 121-122, 2016.
- [23] M. O. Hasna and M.-S. Alouini, "A performance study of dual-hop transmissions with fixed gain relays,"

می‌نویسیم. مطابق توضیحات قبلی، مشخص است که مشتق مرتبه دوم همیشه منفی است.

حالا با استفاده از قاعده زنجیره‌ای، مشتق مرتبه دوم R_E نسبت به P_R را به‌صورت (۲۸) بیان می‌کنیم.

$$\frac{\partial^2 R_E}{\partial P_R^2} = \frac{\partial^2 R_E}{\partial r^2} \left(\frac{\partial r}{\partial P_R} \right)^2 + \frac{\partial R_E}{\partial r} \frac{\partial^2 r}{\partial P_R^2} \leq 0 \quad (28)$$

≤ 0 $\underbrace{\hspace{2cm}}_{\geq 0}$ > 0 ≤ 0

برای بررسی مقعر یا محدب بودن ظرفیت مؤثر R_E نسبت به P_R لازم است که علامت هرکدام از کسرهای رابطه (۲۸) را مشخص کنیم. کسرهای اول و سوم با توجه به مشتقات نوشته‌شده در رابطه‌های (۲۷) و (۲۶) تعیین علامت شد. کسر دوم نیز با توجه به مربع بودنش همواره مثبت است و علامت کسر چهارم نیز با توجه به قضیه (۲) مشخص شد؛ بنابراین با مشخص شدن علامت هرکدام از کسرهای رابطه (۲۸) می‌توان گفت که R_E در P_R مقعر است و مقدار بیشینه ظرفیت مؤثر با صفر قرار دادن مشتق مرتبه اول ظرفیت مؤثر R_E برحسب P_R مطابق

$$\frac{\partial R_E}{\partial P_R} = \frac{\partial R_E}{\partial r} \frac{\partial r}{\partial P_R} = \frac{\partial R_E}{\partial r} \frac{\partial r}{\partial \gamma_A} \frac{\partial \gamma_A}{\partial P_R} = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial \gamma_A}{\partial P_R} = 0 \quad (29)$$

> 0 > 0

محاسبه می‌شود. در قضیه (۱) نشان دادیم نرخ گذردی r نسبت به γ_A اکیداً صعودی است و $\frac{\partial r}{\partial \gamma_A} > 0$ است. همچنین با توجه به رابطه

(۲۶) نشان دادیم $\frac{\partial R_E}{\partial P_R} > 0$ است؛ بنابراین تنها در صورتی صفر می‌شود که $\frac{\partial \gamma_A}{\partial P_R}$ برابر صفر شود.

مراجع

- [1] G. Durisi, T. Koch, and P. Popovski, "Toward massive, ultrareliable, and low-latency wireless communication with short packets," *Proceedings of the IEEE*, vol. 104, no. 9, pp. 1711-1726, 2016.
- [2] G. J. Sutton *et al.*, "Enabling Technologies for Ultra-Reliable and Low Latency Communications: From PHY and MAC Layer Perspectives," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2019.
- [3] C. She, C. Yang, and T. Q. Quek, "Radio resource management for ultra-reliable and low-latency communications," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 6, pp. 72-78, 2017.
- [4] Y. Hu, M. C. Gursoy, and A. Schmeink, "Relaying-enabled ultra-reliable low-latency communications in 5G," *IEEE Network*, vol. 32, no. 2, pp. 62-68, 2018.
- [5] T. K. Vu, C.-F. Liu, M. Bennis, M. Debbah, M. Latva-Aho, and C. S. Hong, "Ultra-reliable and low latency communication in mmWave-enabled massive MIMO networks," *IEEE Communications Letters*, vol. 21, no. 9, pp. 2041-2044, 2017.
- [6] D. Qiao, M. C. Gursoy, and S. Velipasalar, "Throughput-Delay Tradeoffs with Finite Blocklength Coding over Multiple Coherence Blocks," *IEEE Transactions on Communications*, 2019.
- [7] P. Yang, Y. Xiao, M. Xiao, and S. Li, "6G Wireless Communications: Vision and Potential Techniques," *IEEE Network*, vol. 33, no. 4, pp. 70-75, 2019.

- [26] M. Lari, A. Mohammadi, A. Abdipour, and I. Lee, "Characterization of effective capacity in AF relay systems," *IEICE Electronics Express*, vol. 9, no. 7, pp. 679-684, 2012.
- [24] X. Cheng, B. Yu, X. Cheng, and L. Yang, "Two-way full-duplex amplify-and-forward relaying," in *MILCOM 2013-2013 IEEE Military Communications Conference*, 2013, pp. 1-6: IEEE.
- [25] M. Lari, A. Mohammadi, A. Abdipour, and I. Lee, "Characterization of effective capacity in antenna selection MIMO systems," *journal of communications and networks*, vol. 15, no. 5, pp. 476-485, 2013.

زیر نویس‌ها

⁹ Block error rate¹⁰ Downlink multiuser¹¹ Orthogonal Frequency-Division Multiple Access (OFDMA)¹² Throughput rate¹³ Path loss exponent¹⁴ Signal to Interference plus Noise Ratio (SINR)¹⁵ Concave¹ Turbo² Low Density Parity Check (LDPC)³ Finite Block Length (FBL)⁴ Two-way⁵ Half-Duplex (HD)⁶ Amplify and Forward (AF)⁷ Effective capacity⁸ One-way