Iranian Journal of Wargaming
AJA Command and Staff University
http://www.ijwg.ir/
Online ISSN: 2676-7708
Print ISSN: 2676-5284

Relay Selection and Power Control for Secure Cooperative Device-to-Device Communications in the Presence of Electronic Warfare

Akbar Asgharzadeh-Bonab[1]✉ , Jafar Saadati Razian[2]

1. Department of Science and Technology Studies, AJA Command and Staff University, Tehran, Iran. E-mail: Akbar.asgharzadeh@casu.ac.ir

2. Lecturer, Imam Ali Officer University, Tehran, Iran. E-mail: jsfarmandeh@gmail.com

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received:

2023/12/28

Received in revised form:

2024/02/27

Accepted:

2024/02/29

Published online:

2024/02/29

Keywords:

Device-to-device communication, relay selection, energy efficiency, electronic warfare, power control

ABSTRACT

Objective: The progress of electronic warfare and the possibility of eavesdropping in base stations reveal the necessity of establishing direct communication between operational forces on the battlefield. Recently, device-to-device (D2D) communication has been introduced to establish direct communication between users, in which pairs of users can directly exchange data with each other. However, with the increase in the number of pairs, the interference increases, the quality of service decreases, and there is a need for relay nodes to cooperate in D2D communication.

Methodology: In this paper, we consider the data transmission system of several pairs in D2D format, where intermediate nodes, or relays, participate in data transmission. Also, due to the energy supply of the devices by the battery, the maximum data transfer should be performed with the minimum power consumption. The purpose of this paper is to provide a new solution for choosing a relay and transmission power control to maximize energy efficiency. In the proposed method, we allow multiple D2D pairs to use the same relay while D2D pairs use the same channel to increase spectrum utilization. To reduce interference, precoding is used to detect transmissions for each D2D pair and increase system capacity. To evaluate the performance of the proposed method, *Monte Carlo* simulations have been performed in MATLAB software.

Findings: The simulations show that the proposed method improves spectral efficiency and energy efficiency and increases system reliability.

Originality: The results show that the proposed system can be used as a reliable communication system in the battlefield and wargaming simulations.

Cite this article: Asgharzadeh- Bonab, A., & Saadati, J. (2024). Relay Selection and Power Control for Secure Cooperative Device-to-Device Communications in the Presence of Electronic Warfare. Iranian Journal of Wargaming, 6 (12), 135- 151

.

DOI: 10.22034/ijwg.2024.432797.1071

© The Author(s) **Publisher:** AJA Command and Staff University

دوفصلنامه علمی بازی جنگ
شاپای چاپی: ۵۲۸۴-۲۶۷۶ شاپای الکترونیکی: ۷۷۰۸-۲۶۷۶ http://www.ijwg.ir/
دانشگاه فرماندهی و ستاد آجا

انتخاب رله و کنترل توان برای ارتباطات امن دستگاه–به–دستگاه مشارکتی در حضور جنگ الکترونیک

اکبر اصغرزاده بناب[1]✉ جعفر سعادتی رازیان[2]

۱. گروه مطالعات علم و فناوری، دانشگاه فرماندهی و ستاد آجا، تهران، ایران.
رایانامه: Akbar.asgharzadeh@casu.ac.ir

۲. مدرس دانشگاه افسری امام علی(ع)، تهران، ایران. رایانامه: jsfarmandeh@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقالهٔ پژوهشی
تاریخ دریافت:
۱۴۰۲/۱۰/۰۷
تاریخ بازنگری:
۱۴۰۲/۱۲/۰۸
تاریخ پذیرش:
۱۴۰۲/۱۲/۱۰
تاریخ انتشار:
۱۴۰۲/۱۲/۱۰
کلیدواژه‌ها:
ارتباطات دستگاه-به-دستگاه، انتخاب رله، بهره-وری انرژی، جنگ الکترونیک، کنترل توان.

چکیده

زمینه: پیشرفت جنگ الکترونیک و امکان شنود در ایستگاه‌های پایه، ضرورت برقراری ارتباط مستقیم بین نیروهای عملیاتی در صحنه نبرد را بیش از پیش آشکار می‌کند. اخیراً ارتباطات دستگاه-به-دستگاه (D2D) به منظور برقراری ارتباط مستقیم بین کاربران معرفی شده است که در آن هر جفت کاربر می‌توانند به صورت مستقیم با یکدیگر به تبادل داده بپردازند. با این حال، با افزایش تعداد جفت‌ها تداخل افزایش یافته و کیفیت خدمات کاهش می‌یابد و نیاز به گره‌های رله برای مشارکت در اتباطات D2D است.

هدف: در این مقاله، سیستم انتقال داده چندین جفت در قالب D2D را که در آن گره‌های میانی، یا رله‌ها، در انتقال داده مشارکت دارند، بررسی می‌کنیم. هم‌چنین به دلیل تأمین توان انرژی دستگاه‌ها توسط باتری، باید با مصرف کمترین توان بیشترین انتقال داده صورت گیرد.

روش پژوهش: در این مقاله راه‌حلی جدید برای انتخاب رله و کنترل توان ارسالی به آن به منظور بیشینه‌کردن بهره‌وری انرژی ارائه شده است. در روش پیشنهادی به چندین جفت D2D اجازه می‌دهیم از یک رله استفاده کنند، در حالی که جفت‌های D2D از کانال مشابهی برای افزایش استفاده از طیف استفاده می‌کنند. برای کاهش تداخل، از پیش‌کدگذاری برای تشخیص انتقال برای هر جفت D2D و افزایش ظرفیت سیستم استفاده می‌شود. برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی، شبیه‌سازی‌های مونت‌کارلو در نرم‌افزار MATLAB انجام شده است.

یافته‌ها: شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که روش پیشنهادی، بهره‌وری طیفی و بهره‌وری انرژی را بهبود داده و قابلیت اعتماد سیستم افزایش می‌یابد.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان می‌دهند سیستم پیشنهادی می‌تواند به عنوان سیستم ارتباطی قابل اعتماد، در میدان نبرد و شبیه‌سازی بازی جنگ استفاده شود.

استناد: اصغرزاده بناب، اکبر و سعادتی، جعفر (۱۴۰۲). انتخاب رله و کنترل توان برای ارتباطات امن دستگاه- به- دستگاه مشارکتی در حضور جنگ الکترونیک. دوفصلنامه بازی جنگ، ۶ (۱۲)، ۱۳۵- ۱۵۱.
DOI: 10.22034/ijwg.2024.432797.1071

ناشر: دانشگاه فرماندهی و ستاد ارتش جمهوری اسلامی ایران
© نویسندگان.

مقدمه

در محیط جنگ الکترونیک، ارتباط دستگاه به دستگاه (D2D[1]) بستر ارتباط مستقیم بین تجهیزات کاربران (UE[2]) در مجاورت یکدیگر را بدون نیاز به حضور شبکه مرکزی برای انتقال داده فراهم می‌کند (Gandotra et al. 2016, Malik et al. 2020). این نوع ارتباطات، مزایای متعددی دارد که می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد (Fodor et al. 2016, Zhou et al. 2017, Hasan et al. 2014):

- ارتباط D2D امکان ایجاد کانال‌های ارتباطی ایمن و کم‌شنود را فراهم می‌کند که شناسایی یا رهگیری آن برای دشمنان در مقایسه با ارتباطات مبتنی بر شبکه سنتی سخت‌تر است.
- در سناریوهای جنگ الکترونیکی که زیرساخت شبکه ممکن است به خطر بیفتد یا مسدود شود، ارتباطات D2D می‌تواند جایگزینی انعطاف‌پذیر باشد که به دستگاه‌ها اجازه می‌دهد مستقیماً با یکدیگر حتی در محیط‌های متخاصم ارتباط برقرار کنند.
- ارتباط D2D هماهنگی و همکاری بین دستگاه‌ها در میدان جنگ را بدون نیاز به کنترل متمرکز امکان پذیر می‌کند که می‌تواند چابکی و اثربخشی عملیات جنگ الکترونیک را افزایش دهد.
- ارتباطات D2D می‌تواند به راحتی مقیاس شود تا تعداد زیادی دستگاه را در یک سناریوی میدان نبرد جای دهد و انعطاف‌پذیری و سازگاری را در عملیات جنگ الکترونیکی فراهم کند.
- ارتباطات D2D با کاهش طول کانال و بهبود شرایط آن، ظرفیت سیستم و بهره-وری طیفی شبکه‌های بی‌سیم را افزایش می‌دهد. هم‌چنین با حذف مصرف انرژی در ایستگاه‌های پایه و کاهش فاصله بین فرستنده و گیرنده، مصرف انرژی کاهش یافته و در نتیجه بهره‌وری انرژی بهبود می‌یابد که به افزایش مدت سرویس‌دهی تجهیزات در صحنه نبرد منجر می‌شود.

---

[1]. Device-to-device (D2D)
[2]. User equipment (UE)

- ارتباطات D2D اجازه می‌دهد تا پوشش شبکه را بدون استقرار زیرساخت جدید، با استفاده از رله D2D گسترش داد. رله‌سازی D2D به منبع D2D اجازه می‌دهد تا داده‌ها را از طریق یک رله نشان‌داده‌شده توسط یک کاربر میانی به مقصد D2D ارسال کند.

به طور معمول، سه نوع رله D2D وجود دارد: رمزگشایی و ارسال (DF[1])، تقویت و ارسال (AF[2])، و فشرده‌سازی و ارسال (CF[3]) (Ni et al., 2017, Ni et al., 2014, Ghallab et al, 2018). رله AF، سیگنال دریافتی را بدون کدگشایی محتوای آن، صرفاً تقویت کرده و مجدداً به سمت مقصد ارسال می‌کند. در رله DF، ابتدا محتوای سیگنال دریافتی کدگشایی شده و بعد از کدگذاری مجدد به سمت مقصد ارسال می‌شود. استراتژی رله فشرده‌سازی و ارسال زمانی استفاده می‌شود که رله نتواند پیام ارسال‌شده توسط منبع را کدگشایی کند، اما هم‌چنان می‌تواند با فشرده‌سازی و ارسال مشاهده خود به مقصد کمک کند. در یک پژوهش، رله DF را برای ارتباطات D2D استفاده شده و ظرفیت سیستم را از طریق تخصیص توان بهبود داده است (Ni et al., 2017). رله CF را بر اساس کدگذاری شبکه لایه فیزیکی برای ارتباطات D2D پیشنهاد شده است (Ghallab, 2018). با این حال، مقالات ذکر شده در بالا حوزهٔ فعالیت خود را فقط به سناریویی با یک منبع D2D، یک مقصد D2D و یک رله محدود می‌کنند. با این حال، یک سناریوی عملی با چندین جفت D2D و رله مورد توجه قرار نگرفته است.

با افزایش تعداد جفت‌های D2D امکان یافتن رله اختصاصی برای هر رله به دلیل محدودیت در تعداد رله‌ها وجود ندارد و چندین جفت D2D باید رله مشترکی داشته باشند. در این پژوهش، ما یک راه‌حل جدید برای انتخاب رله‌هایی که به چندین جفت D2D سرویس می‌دهند، پیشنهاد می‌کنیم و فرض می‌شود هر جفت D2D توسط یک رله حمایت می‌شود (Ma et al., 2012, Ma et al., 2017, Atapattu et al., 2017). برای افزایش ظرفیت، از انتقال چندپخشی[4] با پیش‌کدگذاری[5] برای متمایزکردن انتقال

---

1. Decode-and-forward (DF)
2. Amplify-and-forward (AF)
3. Compress-and-forward (CF)
4. Multicast
5. Precoding

برای هر جفت D2D استفاده می‌کنیم. هدف اصلی این پژوهش، انتخاب رله و کنترل توان است به طوری‌که با کاهش تداخل بین جفت‌های D2D، بهره‌وری انرژی[۱] سیستم بیشینه شود. شایان ذکر است که مزیت مفهوم پیشنهادی فقط به ارتباطات D2D محدود نمی‌شود، بلکه برای هر مفهوم رله، از جمله وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین (UAV[۲]) برای رله‌کردن داده کاربران دیگر مناسب است (Nasraoui et al., 2020).

مبانی نظری و پیشینه‌های پژوهش

در این بخش به بررسی و تحلیل پژوهش‌های پیشین انجام‌شده در خصوص انتخاب رله و تخصیص توان برای ارتباط D2D مشارکتی می‌پردازیم تا تاثیر این دو مورد بر کیفیت ارتباط D2D مشارکتی بیشتر آشکار شود. رله D2D برای چندین جفت D2D در نظر گرفته شده است (Yuan et al., 2019, Lee et al., 2019, Cao et al., 2015). یوآن[۳] و همکاران (۲۰۱۹)، رله‌های همکار با کاربران را بررسی می‌کنند که به عنوان رله برای چند کاربر سلولی، در ازای فرصتی برای استفاده از طیف این کاربران سلولی، عمل می‌کنند. تخصیص مشترک کانال‌ها و توان ارسالی برای ارتباط D2D توسط لی[۴] و همکاران (۲۰۱۹) نشان داده شده است تا تداخل را به حداقل برساند. کائو[۵] و همکاران (۲۰۱۵) یک رله مشارکتی و تخصیص کانال را برای بهبود عملکرد شبکه پیشنهاد کردند. با این حال، مقالات مذکور انتخاب یک رله مناسب را در یک سناریوی عمومی با چندین جفت D2D بررسی نمی‌کنند. انتخاب یک رله مناسب برای چندین جفت D2D در برخی مراجع بررسی شده است. ما[۶] و همکاران (۲۰۱۲) یک انتخاب رله توزیع‌شده برای هماهنگ کردن تداخل به و از ایستگاه پایه پیشنهاد می‌کنند. انتخاب رله هم‌چنین برای سناریویی با تعداد زیادی رله مورد بررسی قرار گرفته است (Ma et al. 2017). مسئله انتخاب رله، برای سناریویی که چندین جفت D2D با رله‌ها همکاری دارند، بررسی شده

---

1. Energy efficiency
2. Unmanned aerial vehicle (UAV)
3. Yuan
4. Lee
5. Cao
6. Ma

است (Atapattu et al., 2017). با این حال، فرض شده است که هر جفت D2D تنها از یک رله استفاده می‌کند و هر رله تنها به یک جفت D2D کمک می‌کند. بنابراین، سناریویی با یک کاربر D2D که عملیات رله را برای چندین منبع و مقصد D2D انجام می‌دهد در نظر گرفته نمی‌شود.

در پژوهش‌های اخیر، یک رله برای همکاری با چندین جفت D2D در نظر گرفته شده است. به عنوان مثال، ما[1] و همکاران (۲۰۱۸)، انتخاب رله مشترک و تخصیص توان را برای به کمینه‌کردن توان ارسالی و به طور همزمان برای بیشینه‌کردن ظرفیت جفت‌های D2D پیشنهاد می‌کنند. به دلیل متعامدبودن کانال‌ها، هیچ تداخلی وجود ندارد، اما از طیف موجود به طور موثر استفاده نمی‌شود. یک طرح نیز برای انتخاب رله و تخصیص کانال به رله‌ها و جفت‌های D2D پیشنهاد شده‌است (Bai et al. 2015). با این حال، اگر تعداد زیادی جفت D2D در مجاورت یکدیگر وجود داشته باشند که کانال یکسانی را بدون کاهش تداخل به اشتراک می‌گذارند، ظرفیت به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. طرح جدید ارتباطات D2D دوگامی[2] برای سرویس‌های با نرخ داده بالا و تأخیر کم پیشنهاد شده است (Urosevic, 2023). این طرح‌ها را می‌توان برای برنامه‌های واقعیت افزوده[3] و مجازی، پخش چندرسانه‌ای، بازی‌های موبایلی و غیره استفاده کرد. هدف اصلی اجرای پردازشی با پیچیدگی کم، بهره‌وری انرژی بالا و تاخیر کم در دستگاه رله در عین تنوع بالای خدمات بود. ارتباط D2D با کمک رله که ارتباط نور مرئی را با فرکانس رادیویی ترکیب می‌کند، یک الگوی امیدوارکننده در اینترنت اشیا است. با استفاده از پهپاد به عنوان ایستگاه رله، می‌توان از موانعی مانند ساختمان‌ها جلوگیری کرد و در یک محیط دید مستقیم (LoS[4]) که با نیاز سیستم‌های ارتباط نور مرئی هماهنگ است، ارتباط برقرار کرد. یک طرح تخصیص مشترک منابع و انتخاب رله هواپیماهای بدون سرنشین را پیشنهاد شده است که با هدف به حداکثر رساندن نرخ مجموع سیستم D2D در حالی که از الزامات کیفیت خدمات برای کاربران سلولی و کاربران D2D اطمینان حاصل می‌کند (Liu et al. 2023). پژوهش‌های بررسی‌شده، بر

---

[1]. Ma

[2] Two-hop

[3] Augmented reality

[4] Line-of-sight (LoS)

روی ارتباطات D2D مشارکتی متمرکز شده‌اند ولی مشکل انتخاب رله را هنگامی که چندین جفت D2D از یک کانال با استفاده از انتقال چندپخشی استفاده می‌کنند، حل نمی‌کنند. در این پژوهش تلاش شده است با توجه به محدودیت منابع انرژی در تجهیزات کاربران، بهره‌وری انرژی کاربران با انتخاب مناسب رله و تخصیص توان بیشینه شود.

روش‌شناسی پژوهش

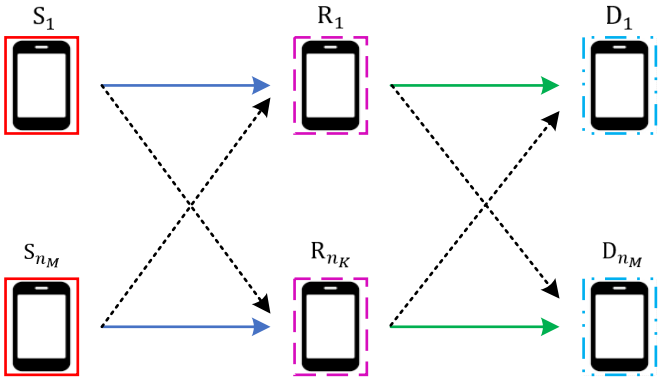
مدل سیستم

مدل سیستم در نظر گرفته شده در این پژوهش شامل n_M فرستنده (یا منبع) D2D، n_K رله که می‌تواند کاربر زمینی یا پهپاد باشد و n_M گیرنده (یا مقصد) D2D است. بنابراین، در کل، $n_u = 2n_M + n_K$ کاربر D2D در سیستم وجود دارد. منابع و مقاصد D2D به تعداد n_M جفت D2D ایجاد می‌کنند. فرض می‌کنیم که تعداد رله‌ها از تعداد جفت‌های D2D بیشتر نیست (یعنی $n_K \leq n_M$) تا رله بتواند بین چندین جفت D2D به اشتراک گذاشته شود. از این رو، چندین جفت D2D می‌توانند از رله یکسان استفاده کنند.

کاربران D2D از کانال‌های اختصاصی برای جلوگیری از تداخل بین کاربران سلولی و جفت‌های D2D استفاده می‌کنند. با این حال، جفت‌های D2D از کانال فرکانسی یکسانی استفاده مجدد می‌کنند، زیرا استفاده مجدد بهره‌وری طیفی را در مقایسه با کانال‌های متعامد افزایش می‌دهد (Wang et al., 2017). هم‌چنین، دوپلکس تقسیم زمانی (TDD[1]) را برای جداکردن دریافت و ارسال داده توسط کاربران D2D در نظر گرفته می‌شود، به این صورت که در هر شیار زمانی فقط یک فرستنده D2D داده خود را به رله می‌فرستد. در نتیجه، همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، جفت‌های D2D به طور متقابل با یکدیگر تداخل دارند. در غیر این صورت، اگر همه فرستنده‌های D2D داده خود را به صورت همزمان به رله‌ها بفرستند، در این صورت تداخل در همه رله‌ها ایجاد می‌شود و کیفیت به صورت شدیدی افت می‌کند. فرض می‌شود که اطلاعات

[1]. Time-division duplexing (TDD)

وضعیت کانال (CSI[1]) در سیستم موجود است، بنابراین رله، اطلاعات وضعیت کانال برای منبع D2D را به رله و از رله به مقصد D2D را می‌داند.



شکل (۱) سیستم مدل در نظر گرفته‌شده در این پژوهش. مسیرهای انتقال داده به صورت خطوط یکپارچه و مسیرهای تداخلی با خط‌چین نمایش داده شده‌اند.

اگر رله k-ام در ارسال منبع D2D m-ام مشارکت کند، نسبت سیگنال به تداخل به اضافه نویز (SINR[2]) در رله به صورت زیر محاسبه می‌شود. SINR معیاری است که کیفیت ارتباط بین دستگاه‌ها را نشان می‌دهد. مقدار SINR بالاتر به معنی سیگنال قوی‌تر نسبت به تداخل و نویز است که منجر به عملکرد بهتر ارتباط از نظر نرخ داده، قابلیت اطمینان و کیفیت کلی می‌شود. SINR یک پارامتر حیاتی در ارتباطات D2D است، زیرا مستقیماً بر کیفیت ارتباطات، مدیریت تداخل، پوشش، تخصیص منابع، ظرفیت و توان عملیاتی تأثیر می‌گذارد، که همگی برای اطمینان از قابلیت اطمینان و کارایی شبکه‌های ارتباطی D2D ضروری هستند.

$$\gamma_{m,k} = \frac{P_{m,k} g_{m,k} w_{m,k}}{\sum_{n \neq m}^{n_M} P_{n,k} g_{n,k} + \sum_{l \neq k}^{n_K} P_{l,k} g_{l,k} + \sigma_k^2} \qquad (۱)$$

که در آن $P_{m,k}$ توان ارسال منبع D2D m-ام، $P_{n,k}$ توان ارسال منبع D2D تداخل‌گر n-ام و $P_{l,k}$ توان ارسالی رله l-ام است. هم‌چنین $g_{m,k}$ بهره کانال از منبع D2D m-ام به رله k-ام، $g_{n,k}$ بهره کانال از منبع D2D تداخل‌گر n-ام به رله k-ام و $g_{l,k}$ بهره

---

[1]. Channel state information (CSI)
[2]. Signal-to-interference-plus-noise ratio (SINR)

کانال از رله l-ام به رله k-ام است. شایان ذکر است $w_{m,k}$ پیش‌کدگذاری منبع D2D m-ام به رله k-ام و σ_k^2 توان نویز حرارتی در رله k-ام است. پیش‌کدگذاری به شرح ذیل در این پژوهش استفاده می‌شود (F. Wang et al. 2017):

$$g_{n,k}w_{n,k} = 0, \quad \forall n \neq m \tag{۲}$$

پیش‌کدگذاری، تداخل را در رله k-ام انتخاب شده با محدودکردن پیش‌کدگذاری $w_{n,k}$ برای برآوردن $g_{n,k}w_{n,k} = 0$ حذف می‌کند. با پیش‌کدگذاری، n-امین جفت D2D با جفت m-امین D2D تداخلی ندارد. پیش‌کدگذاری جفت همسایه D2D به صورت $g_{n,k}^* w_{n,k}^* = u\Lambda v = u\Lambda[v_n v_k^*]$ بیان می‌شود، که u و v به ترتیب ماتریس قطری چپ و راست بهره کانال از جفت D2D تداخلی $g_{n,k}^*$ هستند. ماتریس نشان می‌دهد که پیش‌کدگذاری $w_{n,k}^*$ تداخل بهره کانال $g_{n,k}^*$ را به حداقل می‌رساند. بنابراین $\gamma_{n,k}^*$ بالاترین SINR را با رله انتخاب شده و پیش‌کدگذاری اولیه نشان می‌دهد. برای اطمینان از اینکه انتخاب رله و پیش‌کدگذاری از منبع D2D به رله و سپس به مقصد D2D به بالاترین ظرفیت می‌رسد، SINR باید شرط $\gamma_{m,k}^* > min(g_{m,k}, g_{k,m})$ را برآورده کند.

به طور مشابه، مقدار SINR کانال از رله k-ام تا m-امین مقصد D2D به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\gamma_{k,m} = \frac{P_{k,m}g_{k,m}w_{k,m}}{\sum_{n\neq m}^{n_M} P_{n,m}g_{n,m} + \sum_{l\neq k}^{n_K} P_{l,k}g_{l,k} + \sigma_m^2} \tag{۳}$$

که در آن $P_{k,m}$ توان ارسالی رله k-ام، $P_{n,m}$ توان ارسال منبع D2D تداخل‌گر n-ام و $P_{l,k}$ توان ارسالی رله تداخل‌گر l-ام است. هم‌چنین $g_{m,k}$ بهره کانال از منبع D2D m-ام به رله k-ام، $g_{n,k}$ بهره کانال از منبع D2D تداخلی n-ام به رله k-ام و $g_{l,k}$ بهره کانال از رله l-ام به k-ام است. شایان ذکر است $w_{k,m}$ پیش‌کدگذاری رله k-ام به مقصد D2D m-ام و σ_m^2 توان نویز حرارتی در مقصد D2D m-ام است.

بهره‌وری طیفی کانال ارتباطی بین منبع D2D m-ام و رله k-ام انتخابی، $\eta_{SE}^{m,k}$، و کانال ارتباطی بین رله k-ام انتخابی و مقصد D2D m-ام، $\eta_{SE}^{k,m}$، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\eta_{SE}^{m,k} = \log_2(1+\gamma_{m,k}) \quad \text{bits/sec/Hz} \tag{۴}$$

$$\eta_{SE}^{k,m} = \log_2(1+\gamma_{k,m}) \quad \text{bits/sec/Hz} \tag{۵}$$

در نهایت ظرفیت ارسال به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\eta_{SE} = \min(\eta_{SE}^{m,k}, \eta_{SE}^{k,m}) \quad \text{bits/sec/Hz} \tag{۶}$$

توان مصرفی در این سیستم، شامل توان ارسالی منابع D2D و توان ارسالی رله‌ها است. با در نظر گرفتن n_M فرستنده D2D و n_K رله، توان ارسالی کل سیستم به صورت محاسبه می‌شود:

$$P_{tot} = n_M P_d + n_K P_r \tag{۷}$$

که P_d و P_r به ترتیب بیانگر توان ارسالی منابع D2D و رله‌ها هستند. با در نظرگرفتن روابط (۵) و (۶)، بهره‌وری انرژی برای سیستم توصیف‌شده، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\eta_{EE} = \frac{\sum \eta_{SE}}{P_{tot}} \quad \text{bits/sec/Hz/J} \tag{۸}$$

که $\sum \eta_{SE}$ بیانگر مجموع بهره‌وری طیفی همه جفت‌های D2D است. شایان ذکر است می‌توان تحلیل‌های انجام‌شده را با لحاظ مسیرهای مستقیم و تداخلی و هم‌چنین وضعیت کانال‌های ارتباطی، برای هر سیستم مدل توسعه داد.

مسئله پیشنهادی برای انتخاب رله و تخصیص توان ارسالی

با در نظرگرفتن مدل سیستم پیشنهادی، مسئله پیشنهادی در این مقاله بیشینه‌کردن بهره‌وری انرژی با تخصیص مناسب رله و توان ارسالی رله‌ها است. فرض می‌شود که فرستنده‌های D2D با بیشینه توان ارسالی کار می‌کنند و توان رله‌ها به منظور کاهش اثرات تداخلی و هم‌چنین کاهش توان مصرفی کنترل خواهد شد. بنابراین، مسئله پیشنهادی به صورت بیشینه‌کردن بهره‌وری انرژی با رعایت برآورده‌شدن حداقل بهره‌وری طیفی مورد نیاز کاربران به صورت زیر بیان می‌شود:

$$[\mathbf{P}_r^*, \boldsymbol{\alpha}^*] = \text{argmax}(\eta_{EE}) \tag{۹}$$

subject to:

$$\eta_{SE} > \eta_{SE,min} \quad (۱۰)$$

$$P_r > P_{max} \quad (۱۱)$$

$$\boldsymbol{\alpha} \in 0,1 \quad (۱۲)$$

که $\mathbf{P}_r^*$ بیانگر توان ارسالی رله‌های در درسترس و $\boldsymbol{\alpha}^*$ یک ماتریس باینری به اندازه $n_M \times n_K$ است که هر درایهٔ آن نشان‌دهندهٔ مشارکت هر رله در ارسال جفت D2D متناظر است. اگر $\alpha_{m,k}$ برابر یک باشد، نشان‌دهنده مشارکت رله k-ام در ارسال جفت D2D m-ام است، در غیراین صورت مقدار آن برابر صفر است. هم‌چنین $\eta_{SE,min}$ بیانگر حداقل بهره‌وری طیفی مورد نیاز است که باید برآورده شود و P_{max} بیانگر حداکثر توان قابل ارسال توسط رله‌ها است. در ارتباطات D2D، گیرنده و فرستنده از نوع تجهیزات کاربر هستند، بنابراین مقدار انرژی منبع توان آن‌ها (یعنی باتری)، محدود است. از این رو در این پژوهش، کنترل توان ارسالی فرستنده لحاظ شده است تا فرستنده با حداقل توان مورد نیاز فعالیت کرده و بهره‌وری طیفی مورد نیاز کاربر را فراهم کند.

شایان ذکر است هر جفت D2D می‌تواند حداکثر از یک رله استفاده کند ولی یک رله می‌تواند برای بیش از یک جفت D2D به اشتراک گذاشته شود. برای انتخاب رله برای جفت D2D مورد نظر، از روش جست‌وجوی شبکه توری[1] استفاده می‌کنیم که این روش به جواب بهینه می‌رسد. بنابراین، جواب‌های به دست آمده توسط روش پیشنهادی بهینه هستند. به این صورت که ابتدا، بهره‌وری انرژی به ازای هر کدام از رله‌های در دسترس محاسبه می‌شود و رله‌ای که بهره‌وری انرژی را با در نظر گرفتن قید تأمین حداقل بهره‌وری طیفی مورد نیاز و حداکثر توان قابل ارسال بیشینه کند، به عنوان رله برای جفت مورد نظر انتخاب می‌شود. اگر رله‌های در دسترس نتوانند حداقل بهره‌وری طیفی مورد نیاز را برآورده کنند، در این صورت ارتباط D2D به صورت مستقیم و غیرمشارکتی انجام خواهد شد. شبه‌کد روش پیشنهادی برای انتخاب رله در الگوریتم ۱ نمایش داده شده است.

[1]. Grid search

الگوریتم (۱) شبه‌کد روش پیشنهادی برای انتخاب رله و تخصیص توان پیشنهادی

1. **Initialize** $\alpha_{k,m} = 0$ for $k = 1, \dots, n_K$ and considered *m*-th D2D pair and $P_r = 0$
2. **for** $k = 1, \dots, n_K$
3. **Assume** that *k*-th relay cooperate with *m*-th D2D pair
4. **Calculate** the transmit power of *k*-th relay considering the constraints (9)-(10)
5. **if** $\eta_{SE} > \eta_{SE,min}$, **then**
6. **Calculate** the energy efficiency considering the equations (4)-(8)
7. **if** $\eta_{EE} > \eta_{EE,max}$, **then**
8. set $\alpha_{k,m} = 1$ and $\eta_{EE,max} = \eta_{EE}$
9. **end**
10. **end**
11. **end**

همان‌طور که بیان شد روش پیشنهادی با استفاده از روش جست و جوی شبکه توری جواب بهینه برای رله انتخابی و توان ارسالی را پیدا می‌کند که با افزایش تعداد رله‌های کاندید، پیچیدگی محاسباتی افزایش می‌یابد. برای رفع این چالش، می‌توان از روش‌های یادگیری تقویتی استفاده کرد. هم‌چنین روش پیشنهادی نیازمند دانستن اطلاعات وضعیت کانال است که امروزه روش‌های متعددی برای این امر توسعه یافته و در دسترس است.

نتایج شبیه‌سازی

در این بخش نتایج حاصل‌شده از شبیه‌سازی مونت کارلو[1] برای نشان‌دادن کارآیی سیستم پیشنهادی می‌پردازیم. پارامترهای استفاده‌شده در شبیه‌سازی در جدول (۱) ارائه شده‌اند. شبیه‌سازی برای $۱۰^۶$ تکرار مونت‌کارلو صورت گرفته است. در هر تکرار عملکرد سیستم مدل پیشنهادی محاسبه گردیده و در نهایت میانگین نتایج گزارش شده‌است. در این پژوهش، فرض شده است که بهره کانال دارای توزیع رایلی[2] است. در هر تکرار مونت‌کارلو، محل کاربران در ناحیه شبیه‌سازی به صورت تصادفی با توزیع یکنواخت و هم‌چنین بهره کانال‌های مختلف بر اساس توزیع رایلی مشخص می‌شوند.

---

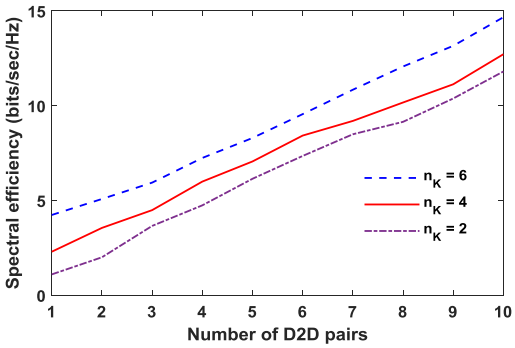
[1]. Monte Carlo

[2]. Rayleigh

جدول (۱) پارامترهای استفاده‌شده در شبیه‌سازی

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
ناحیه شبیه‌سازی	۵۰۰ متر × ۵۰۰ متر	پهنای باند هر کانال	۱۸۰ کیلوهرتز
تعداد جفت‌های D2D	حداکثر ۲۰	توان نویز	-۱۷۴ dBm/Hz
تعداد رله‌ها	حداکثر ۲۰	توان ارسالی	متغیر بین ۳ تا ۲۰ dBm
حداقل نرخ مورد نیاز	متغیر، ۱ تا ۵ bits/sec/Hz		

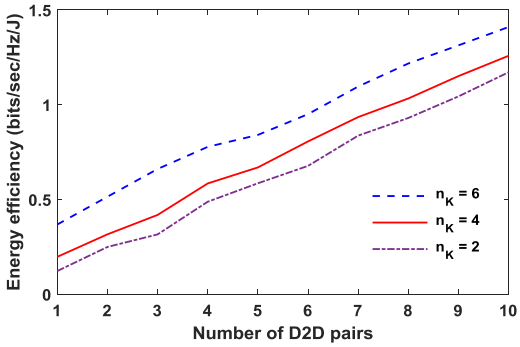
نمودار (۱)، بهره‌وری طیفی سیستم پیشنهادی را برای تعداد مختلف جفت D2D از یک تا ۱۰ و تعداد رله‌های مختلف شامل دو، چهار و شش نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که بهره‌وری طیفی با افزایش تعداد جفت‌های D2D افزایش می‌یابد. هم‌چنین افزایش تعداد رله‌ها با بهبود گزینه‌های در دسترس برای جفت‌های D2D باعث افزایش بهره‌وری طیفی می‌شود.



نمودار (۱) بهره‌وری طیفی سیستم پیشنهادی برای تعداد مختلف رله و جفت‌های D2D

بهره‌وری انرژی سیستم پیشنهادی در نمودار (۲) نمایش داده شده‌است. نتایج نشان می‌دهند افزایش تعداد جفت‌های D2D، بهره‌وری انرژی را در سیستم افزایش می‌دهد. گرچه افزایش تعداد جفت‌های جفت‌های D2D، توان مصرفی کل را افزایش می‌دهد، ولی با توجه به افزایش چشم‌گیر بهره‌وری طیفی مطابق نمودار (۱)، بهره‌وری انرژی بهبود می‌یابد. به صورت مشابه، افزایش تعداد رله‌ها، مصرف انرژی را افزایش می‌دهد

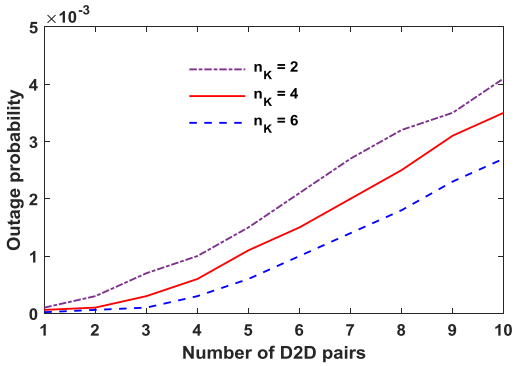
ولی با توجه به افزایش قابل توجه بهره‌وری طیفی، مقدار نهایی بهره‌وری انرژی افزایش می‌یابد.



نمودار (۲) بهره‌وری انرژی سیستم پیشنهادی برای تعداد مختلف رله و جفت‌های D2D

احتمال قطع سرویس سیستم پیشنهادی در نمودار (۳) نشان داده شده است. احتمال قطع سرویس به صورت مقابل تعریف می‌شود: احتمال این‌که مقدار بهره‌وری کمتر از حداقل مقدار مورد نیاز باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد جفت‌های D2D در تعداد ثابت رله‌های در دسترس، مقدار احتمال قطع سرویس افزایش می‌یابد، که به دلیل افزایش تداخل هم‌کانال است. در طرف مقابل، با افزایش تعداد رله-های در دسترس در تعداد ثابت جفت‌های D2D، مقدار احتمال قطع سرویس به دلیل کاهش تداخل هم‌کانال کاهش می‌یابد. شایان ذکر است که احتمال قطع سرویس به مقدار SINR و تداخل هم کانال تولیدشده ناشی از اشتراک‌گذاری طیف بین چندین جفت D2D است. برای رفع این چالش می‌توان از روش‌هایی مانند کدگذاری شبکه[1] استفاده کرد.

[1]. Network coding



نمودار (۳) احتمال قطع سرویس سیستم پیشنهادی برای تعداد مختلف رله و جفت‌های D2D

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

با توجه به نیاز روزافزون به برقراری ارتباطات امن و بدون واسطه در میدان نبرد، در این پژوهش سیستم جدید ارتباطی بر اساس ارتباطات مشارکتی و دستگاه-به-دستگاه ارائه شد. سیستم ارائه‌شده به چندین جفت D2D اجازه می‌دهد که رله یکسانی را استفاده کنند و به این صورت بهره‌وری طیفی سیستم را افزایش می‌دهد. با توجه به محدودیت منابع تامین‌کننده توان در ارتباطات D2D و لزوم استفاده بهینه از منابع محدود، بهینه-سازی بهره‌وری انرژی با انتخاب رله مناسب و کنترل توان ارسالی بررسی شد. شبیه-سازی‌های انجام‌شده نشان دادند با افزایش تعداد جفت‌های D2D، بهره‌وری طیفی و انرژی سیستم پیشنهادی بهبود می‌یابد. هم‌چنین با افزایش تعداد رله‌ها، به دلیل افزایش درجه آزادی در انتخاب رله مناسب، عملکرد سیستم بهبود می‌یابد.

از آنجا که تعادل بار و استفاده منصفانه از منابع موجود در هر سیستمی باید رعایت شود، پیشنهاد می‌شود در کارهای آتی تعادل بار نیز در انتخاب رله مد نظر قرار گیرد تا بار محاسباتی به صورت عادلانه بین گره‌های میانی توزیع گردد.

منابع

Atapattu, S., Dharmawansa, P., Di Renzo, M., Tellambura, C., & Evans, J. S. (2018). Multi-user relay selection for full-duplex radio. *IEEE Transactions on Communications*, *67*(2), 955-972.

Bai, B., Chen, W., Letaief, K. B., & Cao, Z. (2015). Distributed WRBG matching approach for multiflow two-way D2D networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, *15*(4), 2925-2939.

Cao, Y., Jiang, T., & Wang, C. (2015). Cooperative device-to-device communications in cellular networks. *IEEE wireless communications*, *22*(3), 124-129.

Ghallab, R., Sakr, A., Shokair, M., & Abou El-Azm, A. (2018). Compress and forward cooperative relay in device-to-device communication with and without coding techniques. *13th International Conference on Computer Engineering and Systems (ICCES)*.

Gandotra, P., & Jha, R. K. (2016). Device-to-device communication in cellular networks: A survey. *Journal of Network and Computer Applications*, *71*, 99-117.

Fodor, G., Roger, S., Rajatheva, N., Slimane, S. B., Svensson, T., Popovski, P., ... & Ali, S. (2016). An overview of device-to-device communications technology components in METIS. *IEEE Access*, *4*, 3288-3299.

Hasan, M., Hossain, E., & Kim, D. I. (2014). Resource allocation under channel uncertainties for relay-aided device-to-device communication underlaying LTE-A cellular networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, *13*(4), 2322-2338.

Lee, J., & Lee, J. H. (2019). Performance analysis and resource allocation for cooperative D2D communication in cellular networks with multiple D2D pairs. *IEEE Communications Letters*, *23*(5), 909-912.

Liu, X., Huang, S., Zhang, K., Maimaiti, S., Chuai, G., Gao, W., Chen, X., Hou, Y. and Zuo, P. (2023). Joint Resource Allocation and Drones Relay Selection for Large-Scale D2D Communication Underlaying Hybrid VLC/RF IoT Systems. *Drones*, *7*(9), p.589.

Ma, B., Shah-Mansouri, H., & Wong, V. W. (2018). Full-duplex relaying for D2D communication in millimeter wave-based 5G networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, *17*(7), 4417-4431.

Ma, R., Chang, Y. J., Chen, H. H., & Chiu, C. Y. (2017). On relay selection schemes for relay-assisted D2D communications in LTE-A systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, *66*(9), 8303-8314.

Ma, X., Yin, R., Yu, G., & Zhang, Z. (2012). A distributed relay selection method for relay assisted device-to-device communication system. *IEEE 23rd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications-(PIMRC)*.

Malik, P. K., Wadhwa, D. S., & Khinda, J. S. (2020). A survey of device to device and cooperative communication for the future cellular networks. *International Journal of Wireless Information Networks*, *27*(3), 411-432.

Nasraoui, L., & Roy, S. (2020). Optimal uav positioning for terrestrial users. *IEEE 91th Vehicular Technology Conference*.

Ni, Y., Wang, Y., Jin, S., Wong, K. K., & Zhu, H. (2017). Two-way DF relaying assisted D2D communication: ergodic rate and power allocation. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, *2017*(1), 1-14.

Urosevic, U., 2023. Low-complexity dual-hop D2D design. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*.

Yuan, Y., Yang, T., Hu, Y., Feng, H., & Hu, B. (2019, October). Matching based two-timescale resource allocation for cooperative D2D communication. *11th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*.

Wang, F., Song, Q., Ning, Z. and Zhou, L. (2017). Joint relay antenna and precoding selection for K- user MIMO Y channels with physical- layer network coding. *International Journal of Communication Systems*, *30*(5), p.e3071.

Wang, J., Xu, X., Tang, X., Zhang, S., & Tao, X. (2018). Analytical modeling of mode selection for UE-to-network relay enabled cellular networks with power control. *IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*.

Zhou, X., Wang, W., Wang, Y., Chen, L., & Zhang, Z. (2017). Moderate incentive design for delay-constrained device-to-device relaying. *Mobile Networks and Applications*, *22*, 577-588.