

انتخاب رله و کنترل توان ارسالی برای بیشینه کردن بهره‌وری انرژی در شبکه رله دوطرفه با کدگذاری شبکه و دسترسی چندگانه غیرمتعامد

اکبر اصغرزاده بناب*^۱هاشم کلبخانی^۲

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

دسترسی چندگانه غیرمتعامد (NOMA)، به عنوان یک فناوری امیدوارکننده، بهره‌وری طیفی و ظرفیت سیستم را با تخصیص یک بلوک منبع به چندین کاربر افزایش می‌دهد. کدگذاری شبکه (NC) دارای مزایای فشرده سازی داده و بهره‌وری طیفی بالا است و نقش مهمی در شبکه‌های رله دو طرفه ایفا می‌کند. با این حال، شبکه های رله دوطرفه معمولی به دلیل استفاده از دسترسی چندگانه متعامد (OMA) از محدودیت‌های توان ارسالی رنج می‌برند. عملکرد این نوع شبکه، به رله انتخاب شده و توان ارسالی وابسته است. با توجه به نیاز به ارتباطات امن و هم‌چنین محدودیت انرژی در ارتباطات نظامی، در این مقاله روشی برای انتخاب رله و کنترل توان ارسالی به منظور بیشینه‌کردن بهره‌وری انرژی در شبکه‌های رله دو طرفه با کدگذاری شبکه و کنترل توان ارسالی با در نظر گرفتن محدودیت‌های بیشینه توان ارسالی و کمینه بهره‌وری طیفی قابل قبول ارائه شده است. برای حل این مسأله، آن را به دو زیرمسأله تبدیل کرده و ابتدا به ازای هر رله کاندید، توان ارسالی برای بیشینه‌کردن بهره‌وری انرژی محاسبه می‌شود. در نهایت، کاندیدی که بیشترین بهره‌وری انرژی را داشته باشد به عنوان رله نهایی انتخاب می‌شود. عملکرد سیستم بر حسب بهره‌وری طیفی، بهره‌وری انرژی و احتمال قطع ارتباط در نسبت‌های مختلف سیگنال به نویز (SNR) ارسالی ارزیابی می‌شود. همچنین تاثیر تعداد رله‌های کاندید و کمینه بهره‌وری طیفی قابل قبول بر بهره‌وری سیستم بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که کدگذاری شبکه در ارتباطات NOMA بهره‌وری طیفی و بهره‌وری انرژی را افزایش داده و احتمال قطع ارتباط را کاهش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی:

ارتباطات امن، انتخاب رله، بهره‌وری انرژی، شبکه رله دوطرفه، کنترل توان.

^۱ گروه مطالعات علوم و فناوری، دانشگاه فرماندهی و ستاد ارتش، تهران، ایران.

^۲ گروه مهندسی برق، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران.

* نویسنده مسئول: Email: a.asgharzadeh@casu.ac.ir



مقدمه

تکنیک دسترسی چندگانه غیرمتعامد (NOMA^۱) به فناوری دسترسی چندگانه برای ارتباطات بی‌سیم نسل پنجم (5G^۲) و نسل ششم (6G^۳) تبدیل خواهد شد که بخش مهمی از توسعه 5G/6G برای پیاده‌سازی فناوری کدگذاری پلاریزاسیون^۴ و بهینه‌سازی طرح تجزیه قطبش کانال^۵ با توجه به اصل پلاریزاسیون تعمیم‌یافته است. تمرکز اصلی در شبکه 6G بر روی طراحی و بهینه‌سازی سیستم دسترسی چندگانه پلاریزاسیون و استفاده از هواپیماهای بدون سرنشین (محمدی و همکاران ۱۴۰۱، حبیبی، ۱۳۹۶) برای بهبود کیفیت خدمات خواهد بود. تکنیک NOMA خدماتی را برای چندین کاربر/فرکانس/کد/فضا به طور همزمان ارائه می‌دهد. در سمت گیرنده، تکنیک‌هایی مانند حذف تداخل متوالی (SIC^۶) یا تشخیص چندکاربره می‌توانند تداخل را حذف کرده و سیگنال‌های کاربر را رمزگشایی کنند که با افزایش اتصالات، ظرفیت موثر شبکه را افزایش داده و تاخیرهای ارتباطی را کاهش می‌دهند. فناوری NOMA عمدتاً شامل حوزه‌های توان و کد است (Ankarali et al. , 2017; Lu & Zheng, 2020).

رشد بی‌سابقه شبکه‌های بی‌سیم منجر به افزایش سریع مصرف انرژی شده و منجر به روند نوظهور رادیو سبز شده است (Chen et al. , 2011). طراحی سیستم کم‌توان برای رادیو سبز توجه زیادی را از سوی صنعت و دانشگاه به دلیل تأثیر مثبت آن بر محیط زیست به خود جلب کرده است. بهره‌وری انرژی^۷ که به طور گسترده به صورت نسبت بهره‌وری طیفی در واحد انرژی تعریف می‌شود، به یکی از معیارهای عملکرد حیاتی برای سیستم‌های ارتباطی آینده تبدیل شده است (Feng et al. , 2012). در سیستم‌های ارتباط سبز، چندین تکنیک پیشرفته ارتباط بی‌سیم، مانند ارسال رله مشارکتی و سلول‌های کوچک برای بهبود قابل توجه ظرفیت و کاهش مصرف انرژی در نظر گرفته شده‌اند. در مقایسه با انتقال مستقیم، تکنیک رله برای ارائه یک انتقال قابل اطمینان به دلیل تضعیف افت مسیر کمتر در گام‌های کوتاه‌تر ضروری است.

شبکه رله دوطرفه (TWRN^۸) بی‌سیم، یک ساختار پایه در سیستم‌های ارتباطی است (Rankov & Wittneben, 2006; Zhang et al. , 2012). این شبکه از یک گره رله^۹ و دو گره

¹ Non-orthogonal multiple access (NOMA)

² Fifth-generation (5G)

³ Sixth-generation (6G)

⁴ Polarization coding

⁵ Channel polarization decomposition

⁶ Successive interference cancellation (SIC)

⁷ Energy efficiency

⁸ Two-way relay network (TWRN)

⁹ Relay node

پایانه^۱ (ارسال کننده و دریافت کننده) تشکیل شده است. هنگامی که وضعیت کانال بین دو گره پایانه ضعیف باشد، گره رله به آن‌ها کمک می‌کند تا انتقال بهتری را انجام دهند. با ترکیب دو فناوری کدگذاری و مسیریابی، کدگذاری شبکه (NC^۲) که توسط Ahlswede و سایر محققان در سال ۲۰۰۰ پیشنهاد شد، در شبکه رله دو طرفه اعمال شده است (Ahlswede et al., 2000). در این حالت، گره رله به جای استفاده از تقویت یا ارسال ساده، اطلاعاتی را که باید با استفاده از کدگذاری شبکه ارسال شود، کدگذاری می‌کند. از این رو، کدگذاری شبکه بهبود عملکرد را در سیستم رله دو طرفه در مسیر فرسو به ارمغان می‌آورد.

با توجه به توسعه روزافزون ارتباطات نظامی و لزوم افزایش ظرفیت و حفظ محرمانگی، استفاده از تکنیک‌ها و روش‌های جدید اجتناب‌ناپذیر است. هم‌چنین با توجه به شرایط میدانی ارتباطات نظامی، برقراری ارتباط با کیفیت مناسب باید با مصرف کمینه انرژی صورت گیرد. با توجه به موارد ذکر شده، در این مقاله بهره‌وری انرژی در ارتباطات مشارکتی با دسترسی چندگانه غیرمتعامد در شبکه رله بی‌سیم دوطرفه با کدگذاری شبکه را مورد بررسی قرار می‌گیرد. این شبکه نمونه پرکاربردی از ارتباطات دوطرفه می‌باشد که در ارتباطات نظامی استفاده می‌شود. برای نیل به این هدف، ابتدا به مدل‌سازی روش ارسال و دریافت داده در این شبکه پرداخته می‌شود و در ادامه معیارهای عملکردی شبکه نظیر بهره‌وری طیفی و بهره‌وری انرژی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. با توجه به این که امکان حضور چندین رله کاندید در منطقه جغرافیایی وجود دارد، انتخاب رله بهینه و هم‌چنین تنظیم توان ارسالی آن باید مورد بررسی قرار گیرد که راه‌حلی برای دستیابی به آن‌ها ارائه شده است. در نهایت نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهاد شده برای بیان کارایی آن ارائه شده است. بنابراین اهداف این مقاله به صورت زیر خلاصه می‌شوند:

- ارائه مدل دسترسی چندگانه غیرمتعامد در شبکه رله بی‌سیم دوطرفه با کدگذاری شبکه
- فرمول‌بندی مساله بیشینه‌کردن بهره‌وری انرژی با انتخاب رله و تخصیص توان مناسب و ارائه راه‌حل مناسب برای آن
- ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی با انجام شبیه‌سازی *Monte Carlo*

مبانی نظری و پیشینه‌های پژوهش

^۱ Terminal nodes

^۲ Network coding (NC)

چندین طرح از NOMA مشارکتی در پژوهش‌های قبلی پیشنهاد شده است. به منظور بهبود بهره‌وری طیفی، NOMA با کدگذاری برهم نهی^۱ در یک سیستم هماهنگ^۲ استفاده شده است که در آن سیگنال‌های لینک فرسو^۳ از کاربران نزدیک و لبه سلول به طور همزمان ارسال می‌شوند (Choi, 2014). با بهره‌برداری از اطلاعات قبلی ارسال شده از کاربران با شرایط کانال قوی، مشارکت چند کاربره معرفی شده است و نتایج نشان داده است که قابلیت اطمینان دریافت برای کاربران با اتصالات ضعیف نیز بهبود می‌یابد (Ding et al., 2015). علاوه بر این، یک سیستم مشارکتی با استفاده از NOMA پیشنهاد شده است که نه تنها نرخ متوسط قابل دستیابی را بهبود می‌بخشد، بلکه پیچیدگی تخصیص توان را نیز کاهش می‌دهد (Kim & Lee, 2015a). برای کاهش بیشتر پیچیدگی سیستم NOMA با انتقال مستقیم و رله هماهنگ، طراحی گیرنده جدید با استفاده از ویژگی ذاتی NOMA که به یکی از گیرنده‌ها اجازه می‌دهد اطلاعات را به دست آورد، بررسی شده است (Kim & Lee, 2015b). نشان داده شده است که لغو تداخل نرخ مجموع و احتمال قطع را به طور قابل توجهی بهبود می‌دهد. به منظور پرداختن به تقاضای روزافزون ظرفیت بالا در شبکه‌های بی‌سیم، دسترسی NOMA مشارکتی با تکنیک SIC برای بهبود ظرفیت سیستم استفاده شده است (Xu et al., 2016; Xu et al., 2015). علاوه بر این، برخی کارها نیز با تمرکز بر مدل‌های کانال‌های مختلف، مانند کانال‌های محوشوندگی Rician و Nakagami-m در سیستم‌های مشارکتی NOMA، ارائه شده‌اند (Jiao et al., 2017; Wan et al., 2017).

با گسترش سناریوهای کاربردی و بهبود عملکرد سیستم، شبکه‌های NOMA با رله‌های متعدد مورد توجه قرار گرفته‌اند. تاثیر انتخاب رله بر روی NOMA مشارکتی مورد مطالعه قرار گرفته و یک استراتژی انتخاب رله دو مرحله‌ای پیشنهاد شده است (Ding et al., 2016). نتایج تحلیلی نشان می‌دهد که طرح دو مرحله‌ای می‌تواند بهره‌وری طیفی را افزایش داده و احتمال خاموشی را کاهش دهد. برای برآوردن الزامات مختلف کیفیت خدمات (QoS^۴) کاربران، یک طرح انتخاب دو مرحله‌ای جدید پیشنهاد شده است که در آن QoS یک کاربر می‌تواند در مرحله اول کاملاً برآورده شود، در حالی که کاربران در مرحله دوم نرخ باقی‌مانده را به حداکثر می‌رسانند (Yang et al., 2017). الگوریتم انتخاب همزمان کاربر و رله نیز برای شبکه‌های NOMA مشارکتی بررسی شده است که در آن پیام‌های کاربران متعدد با استفاده از رله

¹ Superposition coding

² Coordinated

³ Downlink

⁴ Quality-of-service (QoS)

های متعدد به دو مقصد منتقل می‌شوند (Deng et al. , 2017). با در نظر گرفتن کدگذاری فضا-زمان توزیع شده، انتخاب رله دو مرحله‌ای با تخصیص توان ثابت و انتخاب رله دو مرحله‌ای با تخصیص توان پویا پیشنهاد شده است (Zhao et al. , 2018). بر خلاف روش انتخاب زیربهینه کاربر که با توجه به الزامات QoS کاربران از پیش تعریف شده است، استراتژی‌های انتخاب بهینه کاربر به صورت تطبیقی با توجه به اطلاعات حالت کانال (CSI)^۱ آنی طراحی شده‌اند (Xu et al. , 2018). برای بررسی همزمان بهره‌وری طیفی و بهره‌وری انرژی برای کاربرانی که به طور تصادفی مستقر شده‌اند، انتقال همزمان اطلاعات و توان به صورت NOMA بررسی شده است (Liu et al. , 2016). تأثیر انتخاب بر عملکرد NOMA مشارکتی، که در آن گره‌های رله قادر به کار در حالت تمام دوطرفه یا نیمه دوطرفه هستند، بیشتر مورد بررسی قرار گرفته است (Yue et al. , 2018). علاوه بر این، برای دستیابی به سطوح مختلف توازن بین کاربران، یک طرح تخصیص توان بهینه برای بیشینه‌سازی مجموع توان عملیاتی سیستم NOMA بررسی شده است (Timotheou & Krikidis, 2015).

در تکنیک‌های مشارکتی، گره‌های رله، داده‌های ارسالی را قبل از ارسال مجدد سیگنال‌های حاصل در یک کانال متعامد با استفاده از یک تکنیک خاص برای بیشینه کردن نسبت سیگنال به نویز دریافتی یا نرخ داده قابل دستیابی یا کمینه کردن نرخ خطای بیت کلی، دریافت و پردازش می‌کنند. با افزایش تعداد رله‌ها، بهره تنوع فضایی بهبود می‌یابد. تکنیک‌های ارتباطی دو جهته به منظور بهبود عملکرد سیستم پیشنهاد شده‌اند که در آن دو گره داده‌های خود را از طریق گره‌های رله متفاوت ارسال و دریافت می‌کنند (Alabed et al. , 2012). طرح‌های رله دو طرفه برای تبادل پیام بین تمام گره‌ها بر اساس تعداد شیارهای زمانی مورد نیاز به سه گروه، پروتکل‌های دو فازی، سه فازی و چهار فازی دسته‌بندی می‌شوند. کاهش تعداد شیارهای انتقال از چهار فاز به سه فاز یا به دو فاز منجر به بهبود قابل توجهی در بهره‌وری طیفی این سیستم‌ها خواهد شد و عملکرد دو و سه فاز بهتر از عملکرد سیستم چهار فاز است. علاوه بر این، با استفاده از کانال‌های متعامد، گره‌های رله می‌توانند سیگنال‌های دریافتی را ارسال کنند، همچنین می‌توانند با استفاده از تکنیک‌های کدگذاری متعامد یا غیرمتعامد، آن‌ها را کدگذاری کنند. تکنیک‌های کدگذاری متعامد مانند کدگذاری فضا-زمان (STC)^۲ از تنوع کامل با پیچیدگی رمزگشایی کم برخوردار هستند (Alabed, 2016). تکنیک‌های کدگذاری غیرمتعامد عملکرد کلی سیستم و نرخ داده قابل دستیابی را بهبود می‌بخشند و همچنین تنوع کامل و بهره کدگذاری بالا را فراهم می‌آورند. با این حال، آن‌ها از پیچیدگی رمزگشایی بالایی رنج می‌

^۱ Channel state information (CSI)

^۲ Space-time coding (STC)

برند. افزایش تنوع فضایی کامل با پیچیدگی رمزگشایی کم در کدگذاری غیرمتعامد را می‌توان از طریق استفاده از تکنیک‌های انتخاب رله به دست آورد. برای این منظور، تکنیک‌های مشارکتی با استراتژی‌های انتخاب رله تک و دوگانه بررسی و پیشنهاد شده‌اند. یک نمای کلی از کدگذاری شبکه لایه فیزیکی در ارتباطات رله دوطرفه معرفی شده است (Chen et al., 2019). همچنین یک مرور کلی از یک کد بررسی برابری با چگالی کم پروتوگراف به نام کد پروتوگراف ریشه بر روی کانال‌های محوشوندگی از دیدگاه طراحی کد مورد بحث قرار گرفته است (Fang et al., 2019). شایان ذکر است که هر دو طرح رله دو طرفه کدگذاری شبکه لایه فیزیکی^۱ به صورت رمزگشایی و ارسال مجدد و رله با کمک کد^۲، یعنی مشارکت کدگذاری شده، می‌توانند به عملکرد نزدیک به ظرفیت دست یابند (Chen et al., 2019). جنبه‌های مختلف پیاده‌سازی عملی و نرم‌افزاری کدگذاری شبکه مورد بررسی قرار گرفته است (Zhu et al., 2021). با هدف کاهش اثرات تصادفی کانال، کدگذاری شبکه خطی تصادفی با رویکرد دسته‌بندی شده معرفی شده است (Yin et al., 2021). با هدف کاهش سربار ارسال‌های مجدد، کدگذاری خطی تصادفی جداشده ارائه شده است که در آن ضرایب کدگذاری و بسته‌های کدگذاری شده به صوت جداگانه ارسال می‌شوند (Park & Cho, 2021). کدهای غیرخطی با هدف افزایش امنیت در شبکه‌های رله تک‌گامی پیشنهاد شده‌اند (Hayashi & Cai, 2021).

یک روش max-min پیشنهاد شده است که گره رله بهینه را از مجموعه‌ای از گره‌های رله انتخاب می‌کند تا نسبت سیگنال به نویز (SNR^۳) یا نرخ کلی داده قابل دستیابی را به حداکثر برساند (Li et al., 2010). اخیراً چندین روش انتخاب رله به طور خاص برای انتخاب بهترین یک یا دو گره رله از گروهی از رله‌ها پیشنهاد شده است. استراتژی انتخاب رله دوگانه را پیشنهاد و ثابت شده است که استراتژی‌های انتخاب رله دوگانه از استراتژی‌های تک رله بهتر است (Cui et al., 2011).

مدل سیستم

در این بخش شبکه رله دوطرفه در نظر گرفته شده در این مقاله را با جزئیات شرح داده می‌شود. در این شبکه، دو کاربر u_1 و u_2 رشته بیت‌های x_1 و x_2 را به ترتیب به کاربران u_1 و u_2 ارسال می‌کنند. بدون از دست دادن کلیت فرض می‌کنیم که بهره کانال بین کاربر u_2 و رله از بهره کانال بین کاربر u_1 و رله بیشتر است، یعنی داریم $|h_2|^2 > |h_1|^2$. از این رو کاربر u_2 به عنوان کاربر قوی و کاربر u_1 به عنوان کاربر ضعیف شناخته می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱

¹ Physical layer network coding

² Decode-and-forward (DF)

³ Signal-to-noise ratio (SNR)

نشان داده شده است سناریوی ارسال بی سیم در نظر گرفته شده در این مقاله در دو فاز انجام می شود. در فاز اول (فاز فراسو)، که در شکل ۱(الف) نشان داده شده است، کاربران u_1 و u_2 به ترتیب سمبل های S_1 و S_2 را هم زمان و به صورت NOMA با توان ارسالی یکسان ($P_1 = P_2$) به رله ارسال می کنند. شایان ذکر است این سمبل ها با استفاده از رشته بیت های متناظر x_1 و x_2 به دست می آیند. سیگنال دریافتی در رله (y) به صورت زیر بیان می شود (Wei et al., 2019):

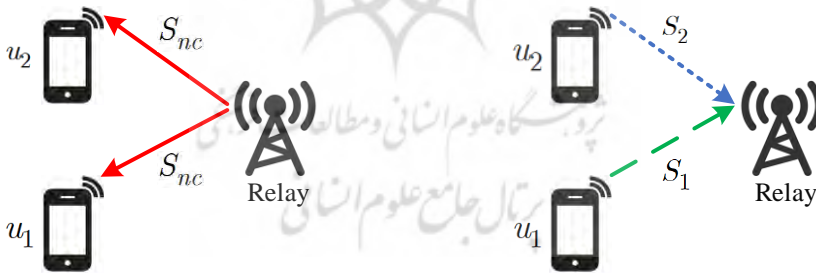
$$y = \sqrt{P_1}h_1S_1 + \sqrt{P_2}h_2S_2 + n_r \quad (۱)$$

که h_1 و h_2 به ترتیب بیانگر ضرایب توان کانال از کاربران u_1 و u_2 به رله بوده و n_r بیانگر نویز سفید گوسی جمع شونده در رله است. رله پس از دریافت پیام NOMA، پیام هر کدام از کاربران را با استفاده از تکنیک SIC آشکار می کند. پیام های آشکار شده \hat{S}_1 و \hat{S}_2 به صورت زیر هستند:

$$\hat{S}_2 = g_2(h_1S_1 + h_2S_2 + n_r) \quad (۲)$$

$$\hat{S}_1 = g_1(y - h_2\hat{S}_2) \quad (۳)$$

که g_1 و g_2 به ترتیب ضرایب متعادل کننده کمینه میانگین مربعات خطا (MMSE^۱) به ترتیب برای کاربران u_1 و u_2 می باشد.



(ب) فاز دوم ارسال - فاز فرسو

(الف) فاز اول ارسال - فاز فراسو

شکل (۱) فازهای مختلف ارسال در شبکه رله دوطرفه با کدگذاری شبکه

^۱ Minimum mean square error (MMSE)

پس از آشکارسازی سیگنال‌های کاربران، رشته‌های بیت‌های آشکاری \hat{x}_1 و \hat{x}_2 به دست می‌آید و در ادامه رله برای انجام عملیات کدگذاری شبکه، آن‌ها را با استفاده عملیات XOR به صورت زیر ترکیب می‌کند:

$$X = \hat{x}_1 \oplus \hat{x}_2 \quad (۴)$$

که X بیانگر پیام کدگذاری شده بوده و در ادامه سیگنال سمبل‌های کدشده S_{nc} به دست می‌آیند.

در فاز دوم ارسال، سیگنال کدشده S_{nc} توسط رله در مسیر فراسو به صورت همزمان به هر دو کاربر ارسال می‌شود. سیگنال دریافتی در کاربران u_1 و u_2 به صورت زیر خواهد بود (Wei et al. , 2019):

$$\begin{aligned} y_1 &= \sqrt{P_r} h_1 S_{nc} + n_1 \\ y_2 &= \sqrt{P_r} h_2 S_{nc} + n_2 \end{aligned} \quad (۶)$$

هر کدام از گیرنده‌ها پس از دریافت پیام، به صورت زیر اقدام به آشکارسازی سمبل‌های دریافتی می‌کنند:

$$\hat{S}'_1 = g_1(\sqrt{P_r} h_1 S_{nc} + n_1) \quad (۷)$$

$$\hat{S}'_2 = g_2(\sqrt{P_r} h_2 S_{nc} + n_2) \quad (۸)$$

در ادامه رشته‌بیت‌های \hat{X}_1 و \hat{X}_2 با استفاده از سمبل‌های آشکار شده به دست می‌آیند. در نهایت هر کاربر رشته بیت دریافتی خودش را به صورت زیر به دست می‌آورد:

$$\hat{x}'_1 = \hat{X}_2 \oplus \hat{x}_2$$

$$\hat{x}'_2 = \hat{X}_1 \oplus \hat{x}_1$$

در فاز اول کاربران پیام خود را به صورت NOMA در مسیر فراسو به رله ارسال می‌کنند. با فرض $|h_2|^2 > |h_1|^2$ ، رله ابتدا پیام کاربر u_2 را آشکار می‌کند. بر اساس قانون ظرفیت شانون، بهره‌وری طیفی کاربران در مسیر فراسو به صورت زیر به دست می‌آید (Wei et al. , 2019):

$$\eta_{SE}^{u_1,1} = \log_2 \left(1 + \frac{P_1 |h_1|^2}{\sigma_n^2} \right) \quad (۱۱)$$

$$\eta_{SE}^{u_2,1} = \log_2 \left(1 + \frac{P_2 |h_2|^2}{P_1 |h_1|^2 + \sigma_n^2} \right)$$

که σ_n^2 بیانگر توان نویز کانال AWGN است. هم‌چنین نرخ مجموع در این ارسال برابر است با:

$$\eta_{SE}^{sum,1} = \log_2 \left(1 + \frac{P_1 |h_1|^2 + P_2 |h_2|^2}{\sigma_n^2} \right) \quad (۱۳)$$

در مسیر فروسو (فاز دوم ارسال)، در رله عملیات کدگذاری شبکه با عملگر XOR بر روی داده کاربران انجام می‌گیرد و کاربران بلوک منبع یکسانی را برای دریافت پیام از رله استفاده می‌کنند. از این رو بهره‌وری طیفی کاربران و بهره‌وری طیفی مجموع در مسیر فروسو در حالت کدگذاری شبکه به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned}\eta_{SE}^{u_1,2} &= \log_2 \left(1 + \frac{P_r |h_1|^2}{\sigma_n^2} \right) \\ \eta_{SE}^{u_2,2} &= \log_2 \left(1 + \frac{P_r |2|^2}{\sigma_n^2} \right) \\ \eta_{SE}^{sum,2} &= \eta_{SE}^{u_1,2} + \eta_{SE}^{u_2,2}\end{aligned}\quad (16)$$

با در نظر گرفتن روابط (۱۳) و (۱۶)، بهره‌وری طیفی شبکه رله دوطرفه با کدگذاری شبکه به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\eta_{SE} = \min\{\eta_{SE}^{sum,1}, \eta_{SE}^{sum,2}\} \quad (17)$$

در نهایت بهره‌وری انرژی برای این ارسال از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\eta_{EE} = \frac{\eta_{SE}}{\sum_{i \in \{1,2,r\}} P_i + P_{cir,r} + 2P_{cir,u}} \quad (18)$$

که $P_{cir,u}$ و $P_{cir,r}$ به ترتیب بیانگر توان مصرفی مدار در رله و هر کدام از کاربران می‌باشند.

تجزیه و تحلیل

روش پیشنهادی برای انتخاب رله و تخصیص توان

در بخش قبل عملکرد شبکه رله دوطرفه در حضور کدگذاری شبکه بررسی گردید. با توجه به محدودیت انرژی کاربران و ایستگاه رله، تعداد بیت‌هایی که به‌طور صحیح به ازای مصرف هر واحد انرژی ارسال می‌شوند، یعنی بهره‌وری انرژی، باید به عنوان یک چالش جدی برای ارتباطات بی‌سیم در نظر گرفته شود. انتخاب یک رله کارآمد برای کدگذاری شبکه یک گام اساسی در شبکه رله دو طرفه با کدگذاری شبکه است. این مقاله روشی را برای انتخاب رله و کنترل توان ارسالی آن برای کدگذاری شبکه در رله دوطرفه با هدف بیشینه‌کردن بهره‌وری انرژی ارائه می‌شود.

فرض می‌شود که $\mathbf{P}_R = \{P_R(1), \dots, P_R(N)\}$ و $\mathbf{R} = \{\mathbf{R}(1), \dots, \mathbf{R}(n_i)\}$ به ترتیب بیانگر مجموعه توان‌های ارسالی و مجموعه رله‌های در دسترس هستند. مساله بهینه‌سازی پیشنهادی برای انتخاب رله و تخصیص توان برای بیشینه‌کردن بهره‌وری انرژی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$[R^*, P_R^*] = \operatorname{argmax}(\eta_{EE}) \quad (19)$$

با در نظر گرفتن:

$$\begin{aligned} \text{C1)} \quad & \eta_{SE} > \eta_{th} \\ \text{C2)} \quad & P_R > P_{R,max} \end{aligned} \quad (20)$$

محدودیت C1 بیان می‌کند که بهره‌وری طیفی به دست آمده از رابطه (۱۷) باید کمینه بهره‌وری طیفی مورد نیاز کاربران را تامین کند. هم چنین بر اساس محدودیت C2، توان ارسالی رله باید از مقدار بیشینه مجاز $P_{R,max}$ کمتر باشد. انتخاب همزمان ایستگاه رله و تعیین توان ارسالی آن، که در روابط (۱۹)–(۲۰) بیان شده است، زمان‌بر و دارای پیچیدگی زیاد است. از این رو برای حل مساله بهینه‌سازی، آن را به دو زیرمساله انتخاب رله و تخصیص توان ارسال تجزیه کرده و دو زیرمساله را به صورت متوالی حل می‌شوند. شبه‌کد^۱ راه‌حل ارائه شده برای این مساله در الگوریتم ۱ نشان داده شده است. برای این منظور، برای هر رله کاندید متعلق به مجموعه \mathbf{R} ، ابتدا توان ارسالی را با حل زیرمساله زیر به دست می‌آید:

$$[P_R^*] = \operatorname{argmax}(\eta_{EE}) \quad (21)$$

با در نظر گرفتن:

$$\begin{aligned} \text{C1)} \quad & \eta_{SE} > \eta_{th} \\ \text{C2)} \quad & P_R > P_{R,max} \end{aligned} \quad (22)$$

برای حل این مساله، ابتدا بازه توان ارسالی $[P_{R,min}, P_{R,max}]$ را به N نقطه با فاصله یکسان ΔP_R تقسیم می‌شود به طوری که هر نقطه بیانگر یک توان ارسالی ممکن است، بنابراین داریم:

$$P_R = \{P_{R,min} + P_{R,min} + \Delta P_R, \dots, P_{R,min} - \Delta P_R, P_{R,max}\} \quad (23)$$

به ازای هر توان ارسالی در مجموعه نشان داده در رابطه (۲۳)، مساله توصیف شده در (۲۱) – (۲۲) را حل کرده و توانی که بیشترین بهره‌وری انرژی را ارائه دهد به عنوان توان ارسالی برای آن رله در نظر گرفته می‌شود. شبه‌کد روش ارائه شده تخصیص توان در الگوریتم ۲ نمایش داده شده است.

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

-
1. **Initialize** $R^* = [], P_R^* = 0, \eta_{EE}^* = 0$
 2. **for** each relay $R(k)$ belonging \mathbf{R} , **do**
 3. **Obtain** transmit power P_R^* and corresponding $\eta_{EE,max}$ using Algorithm 2
 4. **if** $\eta_{EE,max} > \eta_{EE}^*$, **then**
 5. $\eta_{EE}^* \leftarrow \eta_{EE,max}$
 6. $R^* \leftarrow R(k)$
 7. $P_R^* \leftarrow P_R$
 8. **end if**
-

¹ Pseudo-code

9. end for

10. Return R^*, P_R^*, η_{EE}^*

الگوریتم (۲) شبه‌کد راه‌حل روش پیشنهادی برای تخصیص توان برای رله

```

1. Initialize  $P_R^* = 0, \eta_{EE,max} = 0$ 
2. for each transmit power  $P_R(k)$  belonging  $P_R$ , do
3.   Obtain corresponding  $\eta_{SE}$ 
4.   if  $\eta_{SE} > \eta_{SE,max}$ , then
5.      $\eta_{EE,max} \leftarrow \eta_{EE}$ 
6.      $P_R^* \leftarrow P_R(k)$ 
7.   end if
8. end for
9. Return  $P_R^*, \eta_{EE,max}$ 

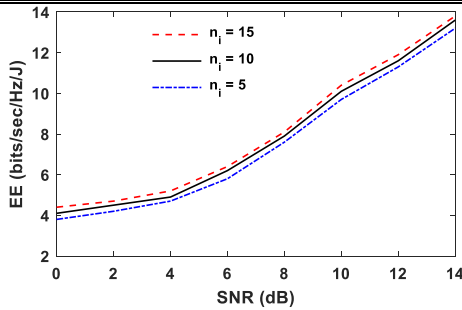
```

نتایج شبیه‌سازی

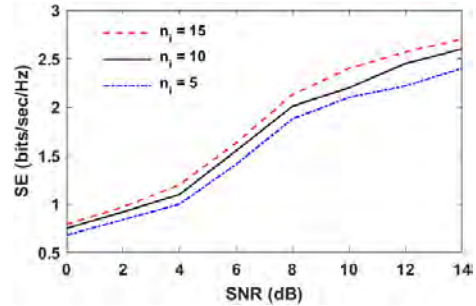
در این بخش عملکرد روش پیشنهادی از نظر بهره‌وری انرژی، بهره‌وری طیفی و احتمال قطع ارتباط (OP)^۱ به دست آورده و تأثیر پارامترهای مختلف مانند تعداد رله‌های کاندید، کمینه نرخ قابل قبول و نسبت سیگنال به نویز ارسالی را بر روی معیارهای ذکر شده بررسی خواهند شد. احتمال قطع ارتباط به صورت مقابل تعریف می‌شود: احتمال این که بهره‌وری طیفی از کمینه بهره‌وری مورد نیاز کمتر باشد. پارامترهای استفاده‌شده در شبیه‌سازی به شرح مقابل هستند: تعداد کاربران NOMA: ۲، کمینه توان ارسالی رله: ۱۵ dBm، بیشینه توان ارسالی رله ۲۳ dBm، فرکانس حامل: ۲ GHz، توان نویز سفید: ۱۷۴ dBm/Hz، پهنای باند بلوک منبع: ۱۸۰ kHz، انحراف معیار سایه‌افکنی لینک‌های بی‌سیم: ۸ dB.

در نمودار ۱، اثر تعداد رله‌های کاندید بر کارایی روش پیشنهادی در نسبت‌های مختلف سیگنال به نویز ارسالی بررسی شده است. رله‌های کاندید به صورت تصادفی در محدوده جغرافیایی اطراف کاربران پخش شده‌اند و کمینه بهره‌وری طیفی قابل قبول برابر bits/sec/Hz ۲ در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در نمودار ۱ نشان داده شده است بهره‌وری طیفی (SE)، بهره‌وری انرژی (EE) و احتمال قطع ارتباط (OP) با افزایش تعداد رله‌های کاندید افزایش می‌یابد.

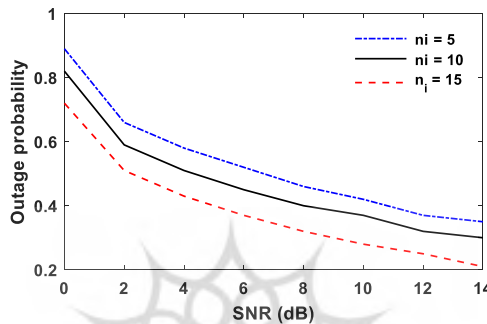
^۱ Outage probability (OP)



(ب) بهره‌وری انرژی



(الف) بهره‌وری طیفی

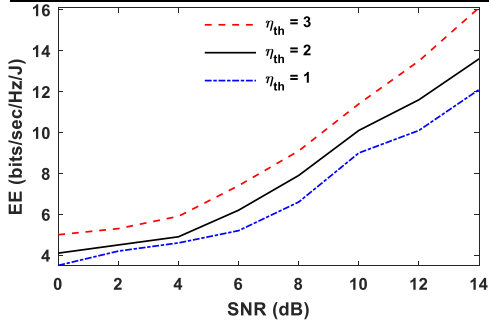


(پ) احتمال قطع ارتباط

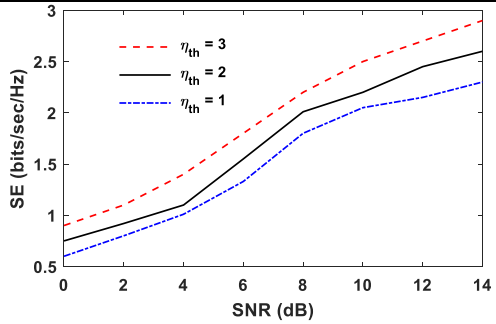
نمودار (۱) اثر تعداد رله‌های کاندید بر عملکرد روش پیشنهادی

با افزایش تعداد رله‌های کاندید شرایط کانال بین کاربران و رله مورد نظر بهبود یافته، در نتیجه بهره‌وری طیفی افزایش می‌یابد. همچنین افزایش سیگنال به نویز ارسالی با بهبود شرایط کانال بین کاربران و رله انتخاب شده، کارایی سیستم را بهبود می‌دهد. با بهبود نسبت سیگنال به نویز، توان ارسالی مورد نیاز برای دستیابی به کمینه بهره‌وری طیفی مورد نیاز کمتر می‌شود، بنابراین بهره‌وری انرژی بهبود می‌یابد.

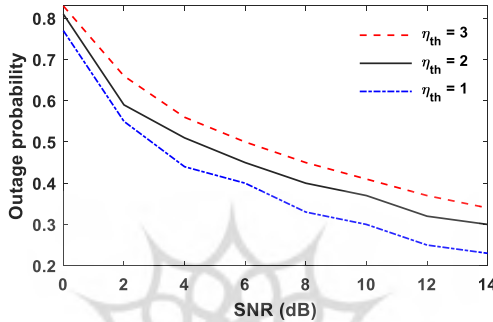
نمودار ۲ تاثیر کمینه مقدار بهره‌وری طیفی قابل قبول بر عملکرد شبکه پیشنهادی را نشان می‌دهد. نتایج نمایش داده شده در این نمودار با در نظر گرفتن ۱۰ رله کاندید به دست آمده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش کمینه بهره‌وری طیفی قابل قبول، مقادیر بهره‌وری طیفی و بهره‌وری انرژی افزایش می‌یابند که به دلیل تمایل روش پیشنهادی به افزایش بهره‌وری طیفی به دلیل نیاز کاربران است. همچنین افزایش کمینه بهره‌وری طیفی مورد نیاز باعث افزایش احتمال قطع ارتباط می‌شود.



(ب) بهره‌وری انرژی



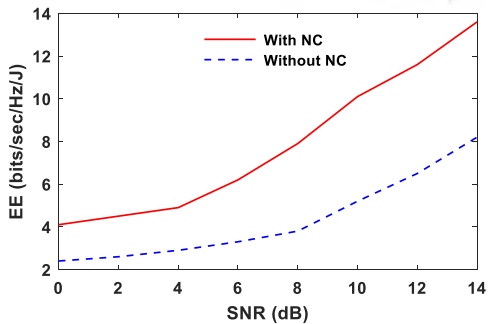
(الف) بهره‌وری طیفی



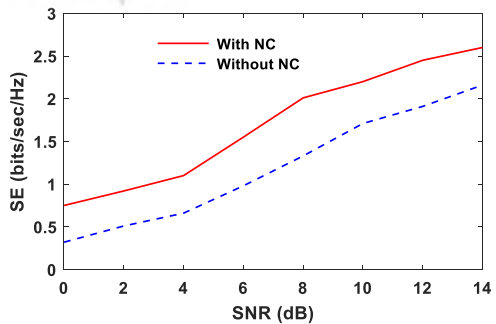
(پ) احتمال قطع ارتباط

نمودار (۲) اثر کمینه بهره‌وری طیفی مورد نیاز بر عملکرد روش پیشنهادی

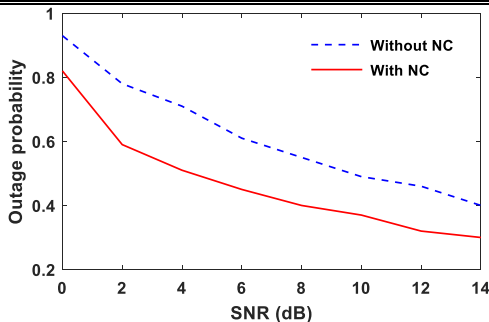
کارایی روش پیشنهادی برای انتخاب رله و کنترل توان در شبکه رله بی‌سیم دوطرفه با کدگذاری شبکه با حالت بدون کدگذاری شبکه در نمودار ۳ مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود کدگذاری شبکه به صورت چشم‌گیری بهره‌وری طیفی، بهره‌وری انرژی شبکه رله بی‌سیم دوطرفه را افزایش داده و احتمال قطع ارتباط را کاهش می‌دهد. کدگذاری شبکه نسبت سیگنال به نویز کانال ارتباط را بهبود می‌دهد که در نتیجه عملکرد ارتباط بهبود می‌یابد.



(ب) بهره‌وری انرژی



(الف) بهره‌وری طیفی



(پ) احتمال قطع ارتباط

نمودار (۳) مقایسه بهره‌وری روش پیشنهادی با شبکه بدون کدگذاری شبکه

نتیجه‌گیری

با توجه به کاربردهای گسترده شبکه رله بی‌سیم دو طرفه در ارتباطات نظامی و هم‌چنین محدودیت توان مصرفی، بیشینه‌کردن بهره‌وری انرژی این شبکه با دسترسی چندگانه غیرمتعامد و کدگذاری شبکه در این مقاله مورد بررسی قرار گرفت. برای نیل به این هدف، روشی برای انتخاب رله و کنترل توان ارسالی آن ارائه شد. رله از بین کاربران فاقد سرویس در اطراف کاربران مورد نظر انتخاب شده و توان تخصیص یافته به آن باید کمینه بهره‌وری طیفی مورد نیاز کاربران در شبکه رله را تامین کند. تاثیر تعداد رله‌های کاندید و هم‌چنین کمینه بهره‌وری طیفی مورد نیاز کاربران در نسبت‌های مختلف سیگنال به نویز بررسی شد. نتایج نشان دادند که با افزایش تعداد رله‌های کاندید و هم‌چنین نسبت سیگنال به نویز، به دلیل بهبود شرایط کانال بین رله و کاربران، بهره‌وری طیفی و بهره‌وری انرژی افزایش یافته و احتمال قطع ارتباط کاهش می‌یابد. هم‌چنین با افزایش کمینه بهره‌وری طیفی مورد نیاز، بهره‌وری طیفی، بهره‌وری انرژی و احتمال قطع ارتباط افزایش می‌یابد. مقایسه نتایج روش پیشنهادی با حالت بدون کدگذاری شبکه نشان داد که روش پیشنهادی بهره‌وری بالاتری نسبت به آن دارد. با توجه به گسترش روزافزون استفاده از هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در عرصه‌های مختلف، پیشنهاد می‌شود در کارهای آتی از روش‌های یادگیری ماشین نظیر یادگیری تقویتی برای انتخاب رله و کنترل توان ارسالی استفاده شود.

قدردانی

از کلیه اساتید و همکارانی که ما را فرآیند انجام این پژوهش یاری رساندند، کمال تشکر و قدردانی را داریم.

منابع

- حبیبی، نیکبخش (۲۰۱۷). ارائه مدل اثربخش بکارگیری بهینه پهپاد در توانمندسازی عملیات آینده سازمان‌های دفاعی (مطالعه موردی عملیات پروازی نیروی هوایی). آینده‌پژوهی دفاعی، ۲(۴)، ۳۵-۶۲.
- محمدی، اردشیر، نواده توپچی، حسین، فروزان، ایرج، شکوهی، حسین، و ایجابی، ابراهیم. (۲۰۲۲). مؤلفه‌های اثرگذار بر کشف و مقابله با هواپیمای بدون سرنشین در صحنه‌های نبرد آینده. آینده‌پژوهی دفاعی، ۷(۲۵)، ۱۳۹-۱۶۸.
- Ahlswede, R. , Cai, N. , Li, S. -Y. , & Yeung, R. W. (2000). Network information flow. *IEEE transactions on information theory*, 46(4), 1204-1216.
- Alabed, S. (2016). Performance analysis of two-way DF relay selection techniques. *ICT Express*, 2(3), 91-95.
- Alabed, S. J. , Paredes, J. M. , & Gershman, A. B. (2012). A simple distributed space-time coded strategy for two-way relay channels. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 11(4), 1260-1265.
- Ankarali, Z. E. , Peköz, B. , & Arslan, H. (2017). Flexible radio access beyond 5G: A future projection on waveform, numerology, and frame design principles. *IEEE Access*, 5, 18295-18309.
- Chen, P. , Xie, Z. , Fang, Y. , Chen, Z. , Mumtaz, S. , & Rodrigues, J. J. (2019). Physical-layer network coding: An efficient technique for wireless communications. *IEEE network*, 34(2), 270-276.
- Chen, Y. , Zhang, S. , Xu, S. , & Li, G. Y. (2011). Fundamental trade-offs on green wireless networks. *IEEE Communications Magazine*, 49(6), 30-37.
- Choi, J. (2014). Non-orthogonal multiple access in downlink coordinated two-point systems. *IEEE Communications Letters*, 18(2), 313-316.
- Cui, H. , Zhang, R. , Song, L. , & Jiao, B. (2011). Performance analysis of bidirectional relay selection with imperfect channel state information. *arXiv preprint arXiv: 1112/2374*.
- Deng, D. , Fan, L. , Lei, X. , Tan, W. , & Xie, D. (2017). Joint user and relay selection for cooperative NOMA networks. *IEEE Access*, 5, 20220-20227.
- Ding, Z. , Dai, H. , & Poor, H. V. (2016). Relay selection for cooperative NOMA. *IEEE Wireless Communications Letters*, 5(4), 416-419.
- Ding, Z. , Peng, M. , & Poor, H. V. (2015). Cooperative non-orthogonal multiple access in 5G systems. *IEEE Communications Letters*, 19(8), 1462-1465.
- Fang, Y. , Chen, P. , Cai, G. , Lau, F. C. , Liew, S. C. , & Han, G. (2019). Outage-limit-approaching channel coding for future wireless

- communications: Root-protograph low-density parity-check codes. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 14(2), 85-93.
- Feng, D. , Jiang, C. , Lim, G. , Cimini, L. J. , Feng, G. , & Li, G. Y. (2012). A survey of energy-efficient wireless communications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 15(1), 167-178.
 - Hayashi, M. , & Cai, N. (2021). Secure Non-Linear Network Code Over a One-Hop Relay Network. *IEEE Journal on Selected Areas in Information Theory*, 2(1), 296-305.
 - Jiao, R. , Dai, L. , Zhang, J. , MacKenzie, R. , & Hao, M. (2017). On the performance of NOMA-based cooperative relaying systems over Rician fading channels. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66(12), 11409-11413.
 - Kim, J. -B. , & Lee, I. -H. (2015a). Capacity analysis of cooperative relaying systems using non-orthogonal multiple access. *IEEE Communications Letters*, 19(11), 1949-1952.
 - Kim, J. -B. , & Lee, I. -H. (2015b). Non-orthogonal multiple access in coordinated direct and relay transmission. *IEEE Communications Letters*, 19(11), 2037-2040.
 - Li, Y. , Louie, R. H. , & Vucetic, B. (2010). Relay selection with network coding in two-way relay channels. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 59(9), 4489-4499.
 - Liu, Y. , Ding, Z. , ElKashlan, M. , & Poor, H. V. (2016). Cooperative non-orthogonal multiple access with simultaneous wireless information and power transfer. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 34(4), 938-953.
 - Lu, Y. , & Zheng, X. (2020). 6G: A survey on technologies, scenarios, challenges, and the related issues. *Journal of Industrial Information Integration*, 19, 100158.
 - Park, J. , & Cho, D. -H. (2021). Separated random linear network coding based on cooperative medium access control. *IEEE Networking Letters*, 3(2), 66-69.
 - Rankov, B. , & Wittneben, A. (2006). Achievable rate regions for the two-way relay channel. 2006 IEEE international symposium on information theory ,
 - Timotheou, S. , & Krikidis, I. (2015). Fairness for non-orthogonal multiple access in 5G systems. *IEEE Signal Processing Letters*, 22(10), 1647-1651.
 - Wan, D. , Wen, M. , Ji, F. , Liu, Y. , & Huang, Y. (2017). Cooperative NOMA systems with partial channel state information over Nakagami- m fading channels. *IEEE Transactions on Communications*, 66(3), 947-958.
 - Wei, F. , Zhou, T. , Xu, T. , & Hu, H. (2019). Modeling and analysis of two-way relay networks: A joint mechanism using NOMA and network coding. *IEEE Access*, 7, 152679-152689.

- Xu, M. , Ji, F. , Wen, M. , & Duan, W. (2016). Novel receiver design for the cooperative relaying system with non-orthogonal multiple access. *IEEE Communications Letters*, 20(8), 1679-1682.
- Xu, P. , Yang, Z. , Ding, Z. , & Zhang, Z. (2018). Optimal relay selection schemes for cooperative NOMA. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(8), 7851-7855.
- Xu, Y. , Sun, H. , Hu, R. Q. , & Qian, Y. (2015). Cooperative non-orthogonal multiple access in heterogeneous networks. 2015 IEEE global communications conference (GLOBECOM) ,
- Yang, Z. , Ding, Z. , Wu, Y. , & Fan, P. (2017). Novel relay selection strategies for cooperative NOMA. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66(11), 10114-10123.
- Yin, H. H. , Tang, B. , Ng, K. H. , Yang, S. , Wang, X. , & Zhou, Q. (2021). A unified adaptive recoding framework for batched network coding. *IEEE Journal on Selected Areas in Information Theory*, 2(4), 1150-1164.
- Yue, X. , Liu, Y. , Kang, S. , Nallanathan, A. , & Ding, Z. (2018). Spatially random relay selection for full/half-duplex cooperative NOMA networks. *IEEE Transactions on Communications*, 66(8), 3294-3308.
- Zhang, S. , Gao, F. , & Pei, C. -X. (2012). Optimal training design for individual channel estimation in two-way relay networks. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 60(9), 4987-4991.
- Zhao, J. , Ding, Z. , Fan, P. , Yang, Z. , & Karagiannidis, G. K. (2018). Dual relay selection for cooperative NOMA with distributed space time coding. *IEEE Access*, 6, 20440-20450.
- Zhu, F. , Zhang, C. , Zheng, Z. , & Farouk, A. (2021). Practical network coding technologies and softwarization in wireless networks. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(7), 5211-5218.