



Research paper

(Received Jan. 18. 2025

Accepted Apr. 12., 2025)

Green Communications in mid-band of 6G Cellular Communications Systems

Ehsan Soleimani-Nasab^{*1}

Graduate University of Advanced Technology

Abstract

It is estimated that the Information and Communication Technology (ICT) industry is responsible for approximately 2 to 4 percent of the total carbon produced by human activities, which is equivalent to about 25 percent of total vehicle emissions and almost equal to the total carbon emissions of aircraft in the world. In the meantime, fifth generation (5G) and sixth generation (6G) communications play a major role in current and future ICT by providing high data rates for users and industries and have high energy consumption. On the other hand, due to high losses in 5G and 6G operating frequencies, the communication range is short and for maximum network coverage, many base stations (BS) are required, which both have high energy consumption and cause environmental pollution. To reduce energy consumption in wireless systems, especially 5G and 6G, reflective smart surfaces (RIS) have recently been proposed, which enable communication in blind spots with minimal energy consumption. This feature makes them a suitable option for improving energy efficiency in wireless networks. In this paper, the energy efficiency of 6G telecommunication systems at two mid-band frequencies of 7.8 and 15 GHz is investigated and calculated using RIS. The effect of path loss on signals is considered with real data resulting from the 3rd Generation Partnership Project (3GPP) standard, and the effect of the number of RIS elements, transmission rate, operating frequency, and other parameters in different scenarios is investigated. It is shown that the use of RIS can provide higher energy efficiency, which also increases with increasing frequency.

Keywords: Sixth generation communications (6G), 6G mid-band, green communications, spectral efficiency, energy efficiency

* Corresponding Author: Ehsan Soleimani Nasab
Email: ehsan.soleimani@kgut.ac.ir
Phone: +3433776611



مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱/۲۳ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱/۱

ارتباطات سبز در باند میانی سیستم‌های مخابرات سلولی نسل ششم

احسان سلیمانی نسب*

دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

چکیده

تخمین زده می‌شود که صنعت فناوری اطلاعات و ارتباطات (ICT) مسئول تقریباً ۲ تا ۴ درصد از کل کربن تولید شده توسط فعالیت‌های انسانی است که معادل حدود ۲۵ درصد از کل آلاینده‌های خودروها و تقریباً برابر با کل انتشارات کربن هواپیماها در جهان است. در این میان ارتباطات نسل ششم (6G) با فراهم کردن نرخ داده بالا برای کاربران و صنایع، نقش عمده‌ای در صنعت ICT کنونی و آینده ایفا می‌کنند و مصرف انرژی بالایی دارند. از طرفی به دلیل تلفات بالا در فرکانس‌های کاری 6G، برد ارتباطی کوتاه است و برای پوشش حداکثری در شبکه، نیاز به تعداد زیادی ایستگاه پایه (BS) می‌باشد که هم مصرف انرژی بالایی دارند و هم آلودگی محیط زیستی بوجود می‌آورند. به منظور کاهش مصرف انرژی در سیستم‌های بی‌سیم علی‌الخصوص 6G، اخیراً سطوح هوشمند انعکاسی (RIS) مطرح شده‌اند که با مصرف حداقل انرژی ارتباط را در نقاط کور میسر می‌سازند. این ویژگی آن‌ها را به گزینه‌ای مناسب برای بهبود کارایی انرژی در شبکه‌های بی‌سیم تبدیل می‌کند در این مقاله به کمک RIS، راندمان انرژی سیستم‌های مخابراتی 6G در دو فرکانس باند میانی ۷.۸ و ۱۵ گیگاهرتز بررسی و محاسبه می‌شود. اثر پدیده افت مسیر روی سیگنال‌ها با داده‌های واقعی منتج از استاندارد 3GPP در نظر گرفته شده و تاثیر تعداد عناصر RIS، نرخ ارسال، فرکانس کاری و دیگر پارامترها در سناریوهای مختلف بررسی شده است. نشان داده شده است که استفاده از RIS می‌تواند راندمان انرژی بالاتری را فراهم آورد که با افزایش فرکانس، راندمان انرژی نیز افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: ارتباطات نسل ششم (6G)، باند میانی 6G، مخابرات سبز، راندمان طیفی، راندمان انرژی

۱- مقدمه

امروزه شاهد تقاضای فزاینده‌ای برای پهنای باند در ارتباطات سیار هستیم. به طوری که رشد تصاعدی در تقاضای ترافیک اینترنت بسیار سریع‌تر از پیش‌بینی قانون مور که در آن ترافیک داده‌ها هر پنج سال، ده برابر می‌شود؛ افزایش یافته است. طبق آخرین گزارش اریکسون، مصرف ترافیک جهانی داده تلفن همراه در ماه از ۱,۵ اگزابایت در ۲۰۱۳ به ۱۷۵ اگزابایت در ۲۰۲۴ رسیده است. همچنین دستگاه‌های موبایل از ۶,۹ میلیارد در ۲۰۱۳ به ۸,۷ میلیارد در ۲۰۲۴ افزایش یافته است. همچنین پیش‌بینی شده که در ۲۰۲۹، تعداد دستگاه‌ها به ۹,۳ میلیارد و ترافیک به ۳۱۳ اگزابایت در ماه برسد. از طرفی نرخ ارسال فرسو از ۱,۴ مگابیت بر ثانیه در ۲۰۱۳ به ۱۰۰ مگابیت بر ثانیه در ۲۰۲۴ رسیده است [1].

توسعه فناوری‌های اطلاعات و ارتباطات (ICT) در چند دهه اخیر زندگی ما را به شدت بهبود بخشیده است، اطلاعات را بسیار در دسترس قرار داده و بهره‌وری را به سطوح بی‌سابقه‌ای افزایش داده است. با این حال، این پیشرفت خارق‌العاده در زندگی ما هزینه پنهانی دارد. فناوری اطلاعات و ارتباطات از رایانه‌ها، تجهیزات جانبی و تجهیزات ارتباطی استفاده می‌کند که همگی از انرژی استفاده می‌کنند، حتی در مواردی که بی‌کار هستند. در نتیجه مصرف انرژی و در نتیجه تولید گازهای گلخانه‌ای توسط این فناوری در حال حاضر در سطوح بسیار بالایی قرار دارد. در حال حاضر تخمین زده می‌شود که صنعت ICT مسئول تقریباً ۲-۴٪ از کل کربن تولید شده توسط فعالیت‌های انسانی است. این مربوط به حدود ۲۵ درصد از کل آلاینده‌گی خودروها و تقریباً برابر با همه انتشارات کربن هواپیماها در جهان است [2]. تخمین زده می‌شود که نرخ رشد سالانه نزدیک به ۵۰ درصد در ترافیک جهانی داده‌های تلفن همراه در سال‌های ۲۰۲۴ تا ۲۰۲۹ وجود داشته باشد. با گسترش هوشمند تلفن‌ها، ویدیوها و شبکه‌های اجتماعی، می‌توان انتظار داشت که این میزان افزایش حداقل برای سال‌های آینده ادامه داشته باشد. در نتیجه، نگرانی‌های جدی در مورد تأثیر کربن تولیدی این توسعه مطرح شده است و موضوع "ارتباطات سبز و شبکه" توجه محافل ICT را به خود جلب کرده است. به طور فزاینده‌ای، و ابتکارات دانشگاهی و صنعتی بر نیاز به توسعه رویکردهای جدید برای ارتباطات و شبکه متمرکز می‌شوند که منجر به کاهش شدید مصرف انرژی می‌شود. از آنجایی که سیستم‌ها و پروتکل‌های ارتباطی و شبکه‌ای فعلی با این ملاحظات طراحی نشده‌اند، و از آنجایی که در بسیاری از موارد باید رویکرد سبز اتخاذ شود، این تلاش احتمالاً زمان زیادی خواهد برد. ارتباطات سبز به پیاده‌سازی روش‌های سخت‌افزاری و یا نرم‌افزاری در صنعت ICT اشاره دارد که هدف آن کاهش مصرف انرژی است. انگیزه آن نیاز به کاهش آلودگی زیست محیطی و کاهش هزینه‌های اقتصادی مرتبط با عملیات ICT است. چشم‌انداز 6G در ارتباطات سبز حول محور ایجاد شبکه‌های بی‌سیم پایدارتر و کارآمدتر است. هدف 6G کاهش قابل توجه مصرف انرژی از طریق فناوری‌های پیشرفته مانند طراحی شبکه آگاه از انرژی، مدیریت پویای توان و برداشت انرژی است. این فناوری‌ها به بهینه‌سازی استفاده از منابع و به حداقل رساندن اتلاف انرژی کمک می‌کنند. از طرفی انتظار می‌رود شبکه‌های 6G زیرساخت‌های سبز را ادغام کنند، مانند ایستگاه‌های پایه کارآمد انرژی و منابع انرژی تجدیدپذیر. این امر ردپای کربن را کاهش می‌دهد و پایداری زیست محیطی را ارتقا می‌دهد. استفاده از هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در شبکه‌های 6G می‌تواند با بهینه‌سازی عملیات شبکه و پیش‌بینی تقاضای انرژی، کارایی انرژی را افزایش دهد. این امر منجر به مدیریت هوشمندتر و پایدارتر شبکه می‌شود. علاوه بر این شبکه‌های 6G بر بهینه‌سازی استفاده از منابع از جمله طیف و انرژی تمرکز دارند. روش‌هایی مانند مدولاسیون و کدگذاری تطبیقی، مسیریابی آگاه از انرژی، و ذخیره کارآمد داده‌ها در این مورد اثر بسیاری دارد. شبکه‌های 6G با در نظر گرفتن آگاهی زیست محیطی با هدف کاهش آلودگی الکترومغناطیسی و بهبود اثرات زیست محیطی کلی ارتباطات بی‌سیم طراحی شده و خواهند شد [3].

سیستم‌های مخابراتی نسل ششم (6G) که نرخ 1Tbps را هدف‌گذاری کرده‌اند، راندمان انرژی و راندمان طیفی دوبرابری را نسبت به سیستم‌های مخابراتی نسل پنجم (5G) خواهند داشت [3]. باند^۵ FR3 یا همان باند میانی 6G در محدوده ۷ گیگاهرتز تا ۲۴ گیگاهرتز قرار دارد و نقش کلیدی در 6G ایفا می‌کند. این باند فرکانسی تعادلی بین پوشش‌دهی و ظرفیت ایجاد کند و نقطه میانی

^۱Information and Communications Technology

^۲Carbon Footprint

^۳Sixth Generation

^۴Fifth Generation

^۵Frequency Range 3

بین فرکانس‌های پایین‌تر (زیر ۶ گیگاهرتز) و فرکانس‌های بالاتر (امواج میلی‌متری و زیر تراهرتز) ارائه می‌دهد. نسبت به سایر محدوده‌های فرکانسی بهره‌وری طیفی بالاتری دارد که آن را برای محیط‌های شهری متراکم مناسب می‌سازد. به خوبی با فناوری‌هایی مانند شبکه‌های غیرزمینی (NTN)، MIMO عظیم، سطوح هوشمند قابل پیکربندی (RIS) و ارتباطات و حسگرهای یکپارچه (ISAC) هم‌افزایی دارد. همچنین ویژگی‌های کانال در باند میانی 6G مشابه باند زیر ۶ گیگاهرتز است که به تسهیل استقرار و یکپارچه‌سازی آن کمک می‌کند.

فناوری RIS به‌عنوان یک فناوری نوظهور در ارتباطات بی‌سیم، سطوح شامل سطح‌های مسطحی هستند که از تعداد زیادی عنصر کوچک و قابل کنترل به نام "سلول‌های واحد" تشکیل شده‌اند. این سلول‌ها می‌توانند به طور پویا خصوصیات خود را تغییر دهند تا سیگنال‌های بی‌سیم را از طریق بازتاب، انکسار، تمرکز، تراز کردن، مدولاسیون یا جذب کنترل کنند. ابعاد این عناصر معمولاً در محدوده میلی‌متر و حتی میکرومتر بسته به طول موج قرار دارد و می‌توانند به دقت بالایی برای هدایت و بهینه‌سازی سیگنال‌های بی‌سیم دست یابند. با استفاده از RIS می‌توان بهبودهای قابل توجهی در عملکرد سیستم‌های ارتباطی از نظر ظرفیت، پوشش دهی، موقعیت‌یابی، امنیت و پایداری ایجاد کرد. مزیت قابل توجه استفاده از RIS مکانیسم صرفه‌جویی در انرژی آن است؛ زیرا یک سطح منعکس‌کننده غیرفعال است و پیاده‌سازی‌های عملی نشان می‌دهد که انرژی زیادی برای کار کردن مصرف نمی‌کند. برعکس، سیستم‌های عظیم MIMO می‌توانند انرژی زیادی داشته باشند، زیرا به زنجیره‌های RF^۲ زیادی در فرستنده گیرنده نیاز دارند. یکی از رقبا برای RIS، استقرار ایستگاه‌های پایه کوچکی است که نقاط کور را پوشش می‌دهند که جایگزین مناسبی است؛ اما به اجزای اضافی مانند زیرساخت backhaul نیاز دارد.

ارتباطات سبز به‌عنوان ارتباطات کارآمد انرژی نیز نامیده می‌شود. بهره‌وری انرژی اندازه‌گیری می‌کند که چه مقدار داده می‌تواند با استفاده از یک مقدار انرژی معین منتقل شود. در شبکه‌های مبتنی بر RIS، یک روش بهینه‌سازی برای دستیابی به بالاترین بازده انرژی مهم است؛ زیرا این پارامتر عملکرد برای متعادل کردن توان و توان مصرفی ضروری است. RIS به سخت‌افزار مصرف‌کننده انرژی اضافی نیاز ندارد، بنابراین RIS یک راه‌حل امیدوارکننده برای بهبود بهره‌وری انرژی با افزایش نرخ داده در میزان مصرف انرژی برابر/مستقیم است. شبکه‌های مبتنی بر RIS می‌توانند سیگنال‌ها را بدون تقویت‌کننده‌های توان اضافی تقویت و ارسال کنند، زیرا می‌توانند تغییر فاز سیگنال منعکس شده را با اجزای بازتابی تغییر دهند. از سوی دیگر، فشارهای زیست‌محیطی و ضرورت کاهش ردپای کربنی، اهمیت توسعه رویکردهای نوین در طراحی شبکه‌های مخابراتی را دوچندان کرده است. فناوری‌هایی نظیر RIS، بهینه‌سازی منابع طیفی، و طراحی شبکه‌های کم‌مصرف، راهکارهایی امیدبخش برای مواجهه با این چالش‌ها ارائه می‌دهند.

پژوهش‌های پیشین در شبکه‌های 6G، به بررسی راهکارهای متنوعی برای ارتباطات سبز پرداخته‌اند. پژوهش‌های متعددی به بررسی استفاده از فناوری RIS در سیستم‌های 6G پرداخته‌اند. این فناوری باهدف بهبود بهره‌وری انرژی و بهره‌وری طیفی معرفی شده است. در ادامه، به برخی از این مطالعات اشاره می‌شود:

مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۳ نشان می‌دهد که RIS می‌تواند بدون نیاز به سرمایه‌گذاری سنگین در زیرساخت‌های اضافی، ظرفیت و پوشش شبکه را در باند موج میلی‌متری بهبود بخشد [4]. مقاله‌ای در سال ۲۰۲۴ به مقایسه RIS‌های فعال و غیرفعال پرداخته و نشان می‌دهد که RIS‌های غیرفعال با مصرف توان کمتر و هزینه پایین‌تر می‌توانند بهره‌وری طیفی را افزایش داده و مصرف انرژی را کاهش دهند [5]. مطالعات نشان داده‌اند که لینک‌های مبتنی بر RIS غیرفعال دچار تلفات مسیر مضاعف می‌شوند، در حالی که RIS‌های فعال با تلفات مسیر جمعی مواجه هستند. این تفاوت‌ها در طراحی و بهینه‌سازی سیستم‌های ارتباطی اهمیت دارند [6]. مقاله‌ای در سال ۲۰۲۴ به بررسی بهینه‌سازی پرتو در سیستم‌های ارتباطی با کمک RIS در ارتباطات غیرزمینی پرداخته و نشان می‌دهد که این فناوری می‌تواند کیفیت سیگنال را بهبود بخشد و بهره‌وری طیفی را افزایش دهد [7]. مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۳ به بررسی ساختارهای

^۱Non-Terrestrial Networks

^۲Multiple Input Multiple Output

^۳Reconfigurable Intelligent Surfaces

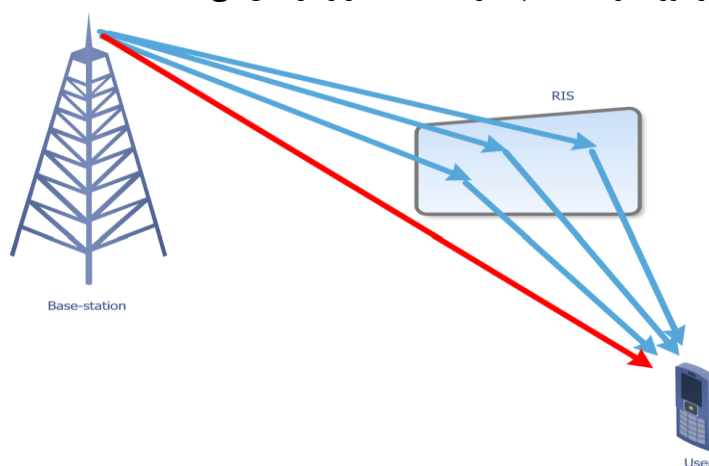
^۴Integrated Sensing and Communications

^۵Radio Frequency

سخت‌افزاری نوظهور و چالش‌های مرتبط با RIS در شبکه‌های 6G پرداخته و نشان می‌دهد که این فناوری می‌تواند به بهبود کارایی انرژی کمک کند [8]. مدل‌های مختلفی برای تلفات مسیر در سیستم‌های ارتباطی وجود دارد. این مدل‌ها در طراحی و بهینه‌سازی سیستم‌های مبتنی بر RIS اهمیت دارند [9]. مقاله‌ای در سال ۲۰۲۳ به بررسی استفاده از RIS‌های توزیع‌شده برای بهبود کارایی انرژی در ارتباطات بی‌سیم داخلی در باند تراهرتز پرداخته و نشان می‌دهد که این فناوری می‌تواند پوشش سیگنال را بهبود بخشد و نسبت سیگنال به نویز را افزایش دهد [10]. مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۲ به بررسی ترکیب یادگیری طیف و RIS برای بهبود کارایی انرژی در شبکه‌های 6G پرداخته و نشان می‌دهد که این ترکیب می‌تواند نسبت سیگنال به تداخل و نویز را بهبود بخشد [11]. تحقیقی در سال ۲۰۲۴ به بررسی استفاده از دستگاه‌های پوشیده شده با مناسطح برای ارتباطات امن و کارآمد در شبکه‌های 6G پرداخته و نشان می‌دهد که این رویکرد می‌تواند نرخ امنیتی را بهبود بخشد [12]. مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۲ به بررسی استفاده از RIS برای بهبود کارایی انرژی در ارتباطات بی‌سیم پرداخته و نشان می‌دهد که این فناوری می‌تواند بدون نیاز به اطلاعات کامل از وضعیت کانال، کارایی انرژی را افزایش دهد [13]. این مطالعات نشان می‌دهند که استفاده از RIS می‌تواند به بهبود بهره‌وری انرژی و طیفی در سیستم‌های 5G و 6G کمک کند. با این حال، چالش‌هایی مانند تلفات مسیر و پیچیدگی‌های سخت‌افزاری همچنان نیازمند تحقیقات بیشتری هستند. می‌توان نتیجه گرفت که سطوح هوشمند قابل تنظیم مجدد (RIS) تأثیر قابل توجهی بر ارتباطات بی‌سیم، به‌ویژه از نظر اثرات زیست‌محیطی دارند. مثلاً RIS می‌تواند با انعکاس و هدایت هوشمند سیگنال‌ها، کارایی انرژی را در شبکه‌های بی‌سیم بهبود بخشد. این امر نیاز به فرستنده‌های پر قدرت و زیرساخت‌های گسترده را کاهش می‌دهد و منجر به مصرف انرژی کمتر می‌شود. با بهینه‌سازی انتشار سیگنال، RIS می‌تواند تداخل و آلودگی الکترومغناطیسی را به حداقل برساند. این در مناطق شهری پرجمعیت که چندین دستگاه شبکه به طور هم‌زمان کار می‌کنند بسیار مهم است. RIS می‌تواند پوشش و اتصال را در محیط‌های چالش‌برانگیز، مانند دره‌های شهری و فضاهای داخلی افزایش دهد. این امر نیاز به ایستگاه‌های پایه و زیرساخت اضافی را کاهش می‌دهد و ردپای کربنی را بیشتر کاهش می‌دهد. در زمینه اینترنت اشیا (IoT)، RIS می‌تواند عملکرد و پایداری شبکه را به میزان قابل توجهی افزایش دهد. با بهینه‌سازی استفاده از منابع، RIS می‌تواند تعداد بیشتری از دستگاه‌ها را با حداقل مصرف انرژی پشتیبانی کند [14] - [22].

۲- سیستم پیشنهادی

مدل سیستم پیشنهادی در شکل ۱ نشان داده شده است. همانگونه که دیده می‌شود، در لینک فروسو، یک ایستگاه پایه ارتباطی را با کاربر موبایل برقرار می‌کند. بدلیل امکان وجود و یا عدم وجود لینک دید-مستقیم (LOS)، از یک سطح هوشمند انعکاسی که همان RIS است برای پشتیبانی از لینک BS-User استفاده می‌شود که صدها و حتی هزاران عنصر RIS که هر کدام ابعادی در حدود یک پنجم طول موج دارند، سیگنال برخوردی از ایستگاه پایه را به سمت کاربر بازتابش می‌کنند.



شکل ۱- مدل سیستم پیشنهادی در مسیر فروسو

با فرض شیفت فاز درست در RIS، سیگنال دریافتی در گیرنده با رابطه (۱) نمایش داده می‌شود

$$y = \sqrt{P_t} \left(\alpha \sum_{i=1}^N h_i^{S-RIS} h_i^{RIS-D} + h^{S-D} \right) x + n \quad (1)$$

در رابطه (۱)، P_t توان سیگنال ارسالی BS، x سیگنال ارسالی BS، و n نویز گوسی سفید جمع شونده با واریانس σ^2 در گیرنده می‌باشد. α ضریب انعکاس RIS است که در حالت کامل برابر یک است. همچنین h_i^{S-RIS} ضریب کانال بین BS و RIS، h_i^{RIS-D} ضریب کانال بین RIS و D، و h^{S-D} ضریب کانال بین BS و کاربر می‌باشند.

با تعریف $\beta_{RIS} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |h_i^{S-RIS}| |h_i^{RIS-D}|$ و $\beta_{S-D} = |h^{S-D}|$ ، طبق قضیه شانون می‌توان نرخ انتقال داده را مشخص کرد:

$$R = B \times \log_2 \left(1 + \frac{P_t}{\sigma^2} (\beta_{S-D} + N\alpha\beta_{RIS})^2 \right) \quad (2)$$

در رابطه (۱)، B پهنای باند سیستم می‌باشد.

واریانس نویز از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\sigma^2 = NF + 10 \times \log_{10}(B) \quad (3)$$

که NF چگالی طیف نویز است.

در مدل UMi^۱ استاندارد 3GPP^۲ [23] که برای محیط‌های شهری چگال بکار می‌رود، رابطه توان سیگنال دریافتی کاربر بر حسب توان ارسالی فرستنده و افت مسیر LoS (PL_{LoS})، به صورت رابطه (۴) نوشته می‌شود:

$$P_r [dBm] = P_t [dBm] - PL_{LoS} [dB] + G_T [dB] + G_R [dB] \quad (4)$$

که G_T و G_R بترتیب بهره آنتن‌های فرستنده و گیرنده می‌باشند.

رابطه (۴) در حالت وجود مسیر LoS بکار می‌رود و در آن افت مسیر ارتباط LoS به صورت تابعی از فاصله فرستنده-گیرنده و فرکانس کاری به صورت رابطه (۵) بدست می‌آید:

$$PL_{LoS} [dB] = 32.4 + 21 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f_c) \quad (5)$$

در رابطه (۵) انحراف معیار اثر سایه حدود ۴ دسیبل فرض شده و ارتفاع آنتن فرستنده ۱۰ متر و ارتفاع آنتن گیرنده بین ۱٫۵ تا ۲۲٫۵ متر از سطح زمین فرض شده است.

در حالت عدم وجود مسیر LoS، رابطه توان سیگنال دریافتی کاربر بر حسب توان ارسالی فرستنده، افت مسیر دید غیرمستقیم (nLoS)، و بهره آنتن‌های فرستنده و گیرنده به صورت رابطه (۶) نوشته می‌شود:

$$P_r [dBm] = P_t [dBm] - PL_{nLoS} [dB] + G_T [dB] + G_R [dB] \quad (6)$$

^۱Base Station

^۲Noise Figure

^۳Urban Micro

^۴3rd Generation Partnership Project

که در آن، افت مسیر^۱ nLoS با رابطه (۷) محاسبه می‌شود:

$$PL_{nLoS} [dB] = \max(PL_{LoS}, PL') \quad (7)$$

در رابطه (۷)، افت مسیر وابسته به nLoS از رابطه (۸) بدست می‌آید:

$$PL' [dB] = 22.4 + 35.3 \log_{10}(d) + 21.3 \log_{10}(f_c) - 0.3(h_{UT} - 1.5) \quad (8)$$

که h_{UT} ارتفاع کاربر موبایل از سطح زمین است. در رابطه (۸) انحراف معیار اثر سایه حدود ۷,۸۲ دسیبل فرض شده و ارتفاع آنتن فرستنده ۱۰ متر و ارتفاع آنتن گیرنده بین ۱,۵ تا ۲۲,۵ متر از سطح زمین فرض شده است.

طبق استاندارد که بر اساس اندازه‌گیری‌های واقعی است، وجود یا عدم وجود مسیر LoS وابسته به یک احتمال است که بر اساس رابطه (۹) محاسبه می‌شود:

$$Pr_{LoS} = \begin{cases} 1 & d_{2D} \leq 18 \text{ m} \\ \frac{18}{d_{2D}} + \exp\left(-\frac{d_{2D}}{36}\right) \left(1 - \frac{18}{d_{2D}}\right) & d_{2D} > 18 \text{ m} \end{cases} \quad (9)$$

در رابطه (۹)، d_{2D} فاصله دوبعدی بین فرستنده و گیرنده بدون در نظر گرفتن بعد ارتفاع بر حسب متر می‌باشد. برای ارزیابی عملکرد، دو پارامتر راندمان طیفی (SE) و راندمان انرژی (EE) به ترتیب به صورت روابط (۱۰) و (۱۱) تعریف می‌شوند:

$$SE [\text{Bit/Sec/Hz}] = \frac{R}{B} \quad (10)$$

$$EE [\text{Bit/Joul}] = \frac{R}{P_t} \quad (11)$$

این دو پارامتر نقش مهمی در ارزیابی عملکرد سیستم‌های مخابراتی سلولی دیجیتال دارند. ارتباط این دو پارامتر با استفاده از دلایل فیزیکی و تئوری‌های موجود قابل توجیه است. از دیدگاه دلایل فیزیکی یکی انتشار سیگنال مؤثر است. در واقع انتقال سیگنال با توان بالاتر می‌تواند به معنای راندمان طیفی بیشتر باشد، زیرا نویز و تداخل را کاهش می‌دهد و امکان ارسال داده‌های بیشتر در پهنای باند معین را فراهم می‌کند. از طرف دیگر افزایش توان سیگنال به مصرف انرژی بیشتر منجر می‌شود که راندمان انرژی را کاهش می‌دهد. دیگر اینکه میزان پهنای باند و نرخ بیت در مقدار این دو پارامتر مؤثر است. افزایش پهنای باند یا نرخ بیت به معنی افزایش راندمان طیفی است، زیرا داده‌های بیشتری در واحد زمان انتقال می‌یابد. اما این افزایش پهنای باند معمولاً به مصرف انرژی بالاتر برای پردازش و ارسال سیگنال‌ها منجر می‌شود. تئوری‌های موجود یکی قضیه شانون است که بر اساس قضیه شانون، راندمان طیفی حداکثری زمانی حاصل می‌شود که سیگنال به نویز در حد مطلوب باشد. این مسئله نیازمند مصرف انرژی بالاست تا نویز به حداقل برسد. همچنین مصالحه‌ای بین راندمان طیفی و راندمان انرژی وجود دارد. به این معنی که افزایش یکی معمولاً به کاهش دیگری منجر می‌شود. به‌عنوان مثال، الگوریتم‌های مدولاسیون پیچیده‌تر راندمان طیفی بالاتری دارند؛ اما به مصرف انرژی بیشتری نیاز دارند. [24]

^۱non Line of Sight

^۲Spectral Efficiency

^۳Energy Efficiency

۳- شبیه‌سازی

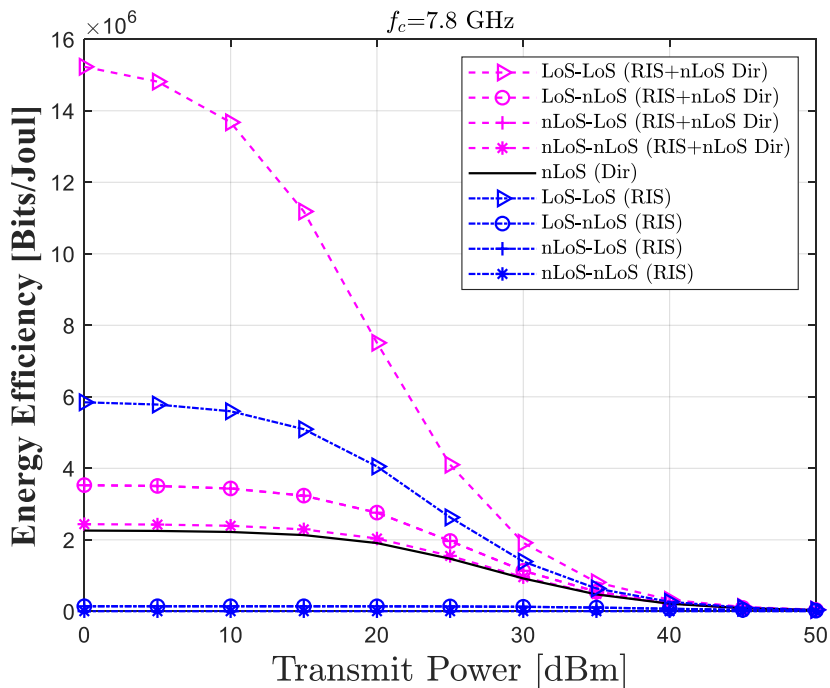
به‌منظور بررسی بهتر، شبیه‌سازی سیستم پیشنهادی مطابق با پارامترهای جدول یک انجام می‌گیرد. شبیه‌سازی به‌ازای یک میلیون کانال تصادفی انجام می‌شود. از نرم‌افزار MATLAB برای تولید داده‌های تصادفی، هندسه قرارگیری کاربران، BS و RIS و همچنین محاسبه روابط راندمان انرژی و راندمان طیفی استفاده می‌شود.

جدول ۲- پارامترهای تنظیمی سیستم

پارامتر	مقدار
فرکانس کاری	۷,۸ و ۱۵ گیگاهرتز
پهنای باند	۴۰۰ مگاهرتز
توان ارسالی	0:50 dBm
چگالی طیف نویز	-174 dBm/Hz
مدل کانال	3GPP Umi
تعداد عناصر RIS	۲۰۰۰
بهره آنتن فرستنده	10 dBi
بهره آنتن گیرنده	3 dBi
ارتفاع فرستنده	۱۰ متر
ارتفاع کاربر	۲,۵ متر
ارتفاع RIS	۵ متر

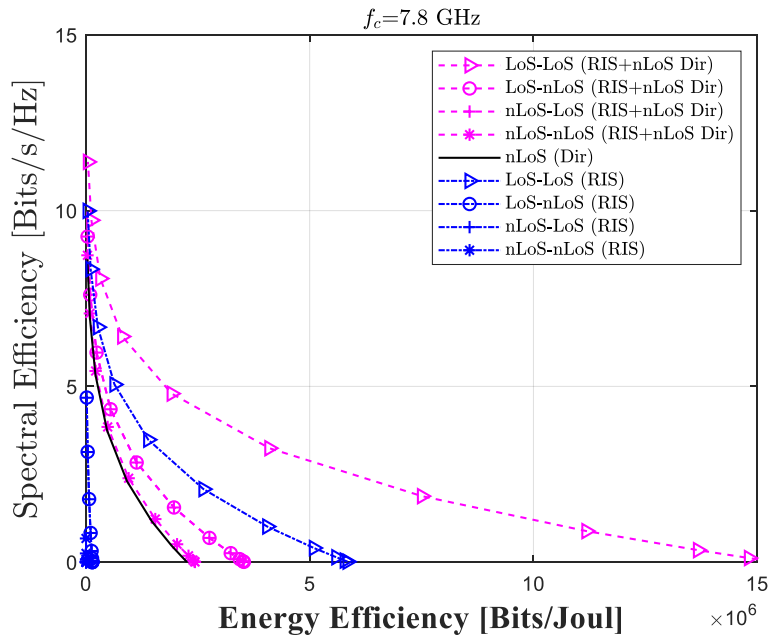
در این شبیه‌سازی ۹ سناریو در نظر گرفته شده‌اند که در چهار تا مسیر مستقیم بین BS و کاربر وجود ندارد و فقط RIS وجود دارد. در این ۴ سناریو، مسیر اول و دوم RIS یا LoS است و یا nLoS که از رابطه (۹) مشخص می‌شود. در ۴ سناریوی دیگر، علاوه بر مسیرهای LoS، یک مسیر nLoS بین BS و کاربر وجود دارد. در سناریوی نهم فقط مسیر مستقیم بین BS و کاربر وجود دارد و RIS بکار نرفته است.

شکل ۲، راندمان انرژی را بر حسب توان ارسالی فرستنده نشان می‌دهد. نتایج در شکل ۲ برای فرکانس ۷,۸ گیگاهرتز نشان می‌دهد که هنگام در نظر گرفتن معیار واقعی (با یک مسیر BS-User ضعیف اما نادیده گرفته نشده)، RIS می‌تواند عملکرد مناسبی را در سناریوهای خاص ارائه دهد. شکل ۲ نشان می‌دهد که ارتباطات به کمک RIS تا ۳ برابر، راندمان انرژی بالاتری نسبت به ارتباطات نقطه به نقطه ارائه می‌دهد. اهمیت وجود مسیر بین BS و کاربر نیز در شکل مشخص است که نسبت به حالت بودن مسیر مستقیم تا ۲,۵ برابر راندمان انرژی افزایش داشته است. تنها نگرانی در اینجا این است که RIS باید با مسیر LoS به ایستگاه پایه متصل شود و فقط می‌تواند به کاربرانی کمک کند که مسیرهای LoS را نیز دارند. بنابراین ظرفیت و تعداد مشتریان در هر ایستگاه پایه را می‌توان با استقرار RISهایی که با ایجاد مسیرهای LoS مجازی، پوشش را گسترش می‌دهند، در باند میانی 6G افزایش داد.



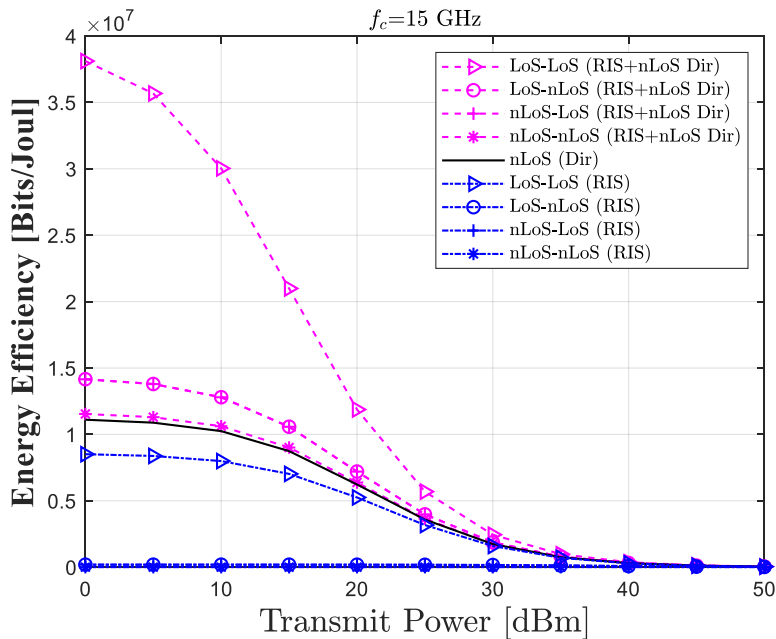
شکل ۲- راندمان انرژی بر حسب توان ارسالی فرستنده در فرکانس ۷٫۸ گیگاهرتز

شکل ۳، راندمان طیفی را برحسب راندمان انرژی نشان می‌دهد. راندمان طیفی نشان دهنده این است که چقدر پهنای باند داده شده با راندمان مناسب برای ارسال داده استفاده شده است. نتایج در شکل ۳ برای فرکانس ۷٫۸ گیگاهرتز نشان می‌دهد که با افزایش راندمان انرژی، راندمان طیفی کاهش می‌یابد و بالعکس. افزایش SE اغلب منجر به مصرف انرژی بیشتر می‌شود که می‌تواند EE را کاهش دهد. برعکس، بهبود EE ممکن است مستلزم استفاده از توان کمتر باشد که می‌تواند SE را کاهش دهد. بنابراین، بهینه‌سازی شبکه‌های بی‌سیم شامل یافتن تعادلی بین این دو معیار برای دستیابی به نرخ داده‌های بالا و صرفه‌جویی در مصرف انرژی است. مطابق شکل سناریوی مسیر مستقیم و RIS حدود ۵۰ درصد بهبود نسبت به سناریوی بدون مسیر مستقیم در توان 20dBm را داراست. این بهبود نسبت به سناریوی که فقط از مسیر مستقیم بهره گرفته شود حدود ۲۰۰ درصد است. با افزایش توان میزان بهبود عملکرد کاهش می‌یابد که امری طبیعی است. برای مقایسه با دیگر فناوری‌ها از جمله MIMO عظیم می‌توان گفت که این فناوری اگرچه می‌تواند تقویت‌کننده‌های پر قدرتی ایجاد کند، اما به دلیل نیاز به تعداد زیادی عناصر فعال و زنجیره‌های RF، مصرف انرژی بالایی دارد. RIS می‌تواند بهبودهای مشابهی را در برخی موارد بدون تقاضای انرژی زیاد ارائه دهد و به همین دلیل گزینه‌ای جذاب برای کاربردهای حساس به انرژی محسوب می‌شود.



شکل ۳- راندمان طیفی بر حسب راندمان انرژی در فرکانس ۷٫۸ گیگاهرتز

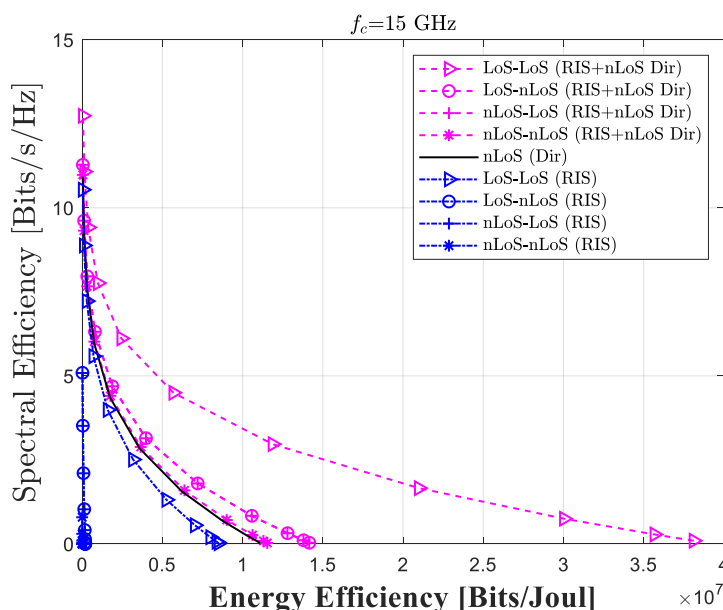
شکل ۴، راندمان انرژی را بر حسب توان ارسالی فرستنده در فرکانس ۱۵ گیگاهرتز نشان می‌دهد. نتایج در شکل ۴ به این معنی است که کماکان راندمان انرژی مسیر ترکیبی BS-User و BS-RIS از همه سناریوهای دیگر بهتر است. در مقام مقایسه با شکل ۲، افزایش فرکانس کاری، راندمان انرژی را نسبت به فرکانس ۷٫۸ گیگاهرتز افزایش داده است. در این حالت اما RIS به تنهایی نمی‌تواند بهتر از تنها مسیر BS-User عمل کند. مطابق شکل سناریوی مسیر مستقیم و RIS حدود ۲۰۰ درصد بهبود نسبت به سناریوی بدون مسیر مستقیم در مقدار راندمان انرژی ۵ بیت بر ژول را داراست. با افزایش راندمان انرژی، میزان بهبود عملکرد افزایش می‌یابد که امری طبیعی است.



شکل ۴- راندمان انرژی بر حسب توان ارسالی فرستنده در فرکانس ۱۵ گیگاهرتز

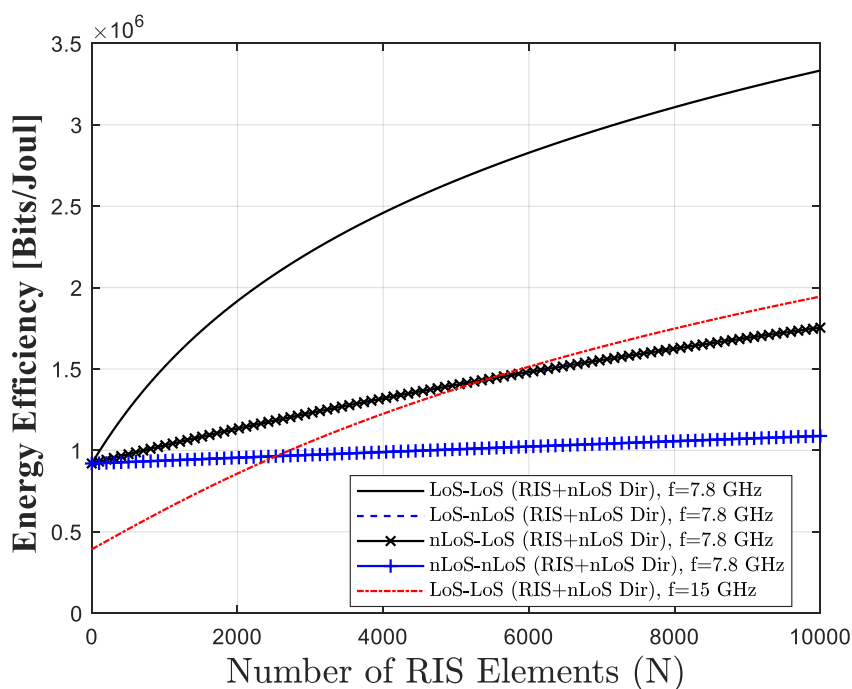
شکل ۵، راندمان طیفی را بر حسب راندمان انرژی در فرکانس ۱۵ گیگاهرتز نشان می‌دهد. در اینجا نیز مشابه شکل ۳، راندمان انرژی و راندمان طیفی در خلاف جهت یکدیگر حرکت می‌کنند و باید تعادلی را بین آنها ایجاد کرد. در مقام مقایسه با شکل ۳، افزایش

فرکانس کاری، راندمان طیفی را نسبت به فرکانس ۷٫۸ گیگاهرتز کاهش داده است. مطابق شکل سناریوی مسیر مستقیم و RIS بیش از ۵۰ درصد بهبود نسبت به سناریوی بدون مسیر مستقیم در توان 20dBm را داراست. این بهبود نسبت به سناریویی که فقط از مسیر مستقیم بهره گرفته شود حدود ۵۰ درصد است. با افزایش توان میزان بهبود عملکرد کاهش می‌یابد که امری طبیعی است.



شکل ۵- راندمان طیفی بر حسب راندمان انرژی در فرکانس ۱۵ گیگاهرتز

در پایان در شکل ۶، راندمان انرژی بر حسب تعداد عناصر RIS در فرکانس ۷٫۸ گیگاهرتز بررسی شده است. همانگونه که مشخص است با الزامات راندمان انرژی بالاتر، ارتباط فقط زمانی می‌تواند کار کند که حدود تعداد زیادی عنصر RIS وجود داشته باشد. با افزایش فرکانس، تعداد عناصر RIS به صورت خطی افزایش می‌یابد و از ۷٫۸ گیگاهرتز به ۱۵ گیگاهرتز، باید تعداد عناصر را حداقل دو برابر کرد. مطابق شکل برای سناریوی وجود همزمان مسیر RIS و مسیر مستقیم، در فرکانس ۱۵ گیگاهرتز حدود ۷۰ درصد بهبود نسبت به فرکانس ۷٫۸ گیگاهرتز با تعداد ۱۰۰۰۰ عنصر RIS را شاهد هستیم.



شکل ۶- راندمان انرژی بر حسب تعداد عناصر RIS در فرکانس‌های ۷٫۸ و ۱۵ گیگاهرتز

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر فناوری RIS بر ارتباطات سبز بررسی شد و به طور خاص راندمان انرژی و راندمان طیفی سیستم پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج تحلیل و شبیه‌سازی، بهبود راندمان انرژی را در باند میانی سیستم‌های 6G نشان دادند. اگرچه RIS در انرژی صرفه‌جویی می‌کند، برای دستیابی به بهبودهای قابل توجه، اغلب به سطوح بزرگی با هزاران عنصر (مثلاً ۱۰,۰۰۰ یا بیشتر) نیاز است که این موضوع می‌تواند پیچیدگی در استقرار و هزینه‌های عملیاتی حاشیه‌ای را برای کنترل و بهینه‌سازی افزایش دهد. پیاده‌سازی فناوری RIS در مقیاس گسترده می‌تواند هزینه‌های مختلفی شامل هزینه‌های سخت‌افزاری، هزینه‌های نرم‌افزاری، هزینه‌های نگهداری و پشتیبانی، هزینه‌های آموزش و توسعه نیروی انسانی، و هزینه‌های تحقیق و توسعه را داشته باشد. این هزینه‌ها می‌تواند به صورت مداوم و در طول زمان افزایش یابد. پیاده‌سازی RIS در مقیاس گسترده نیازمند سرمایه‌گذاری قابل توجهی است، اما با توجه به مزایای این فناوری در بهبود راندمان انرژی و کاهش اثرات زیست‌محیطی، این سرمایه‌گذاری می‌تواند در بلندمدت به صرفه باشد. به‌رحال RIS به‌عنوان جایگزینی کم‌مصرف برای بهبود کارایی و قابلیت اطمینان در شبکه‌های 6G آینده، پتانسیل بالایی را دارد.

۵- فهرست علائم

علائم انگلیسی

f_c	فرکانس، Hz
d	فاصله، متر
B	پهنای باند، متر
N	تعداد عناصر RIS، عنصر
G_T	بهره آنتن فرستنده، dBi
G_R	بهره آنتن گیرنده، dBi
h_{UT}	ارتفاع آنتن موبایل کاربر، متر
P_t	توان سیگنال فرستنده، dBm

علائم یونانی

σ^2	واریانس نویز، dBm
------------	-------------------

۶- منابع و مراجع

1. Ericsson mobility report, Ericsson Inc., Stockholm, Sweden, Tech. Rep., Nov. 2024. [Online]. Available: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/reports/november-2024>.
2. M. Shafi, R. K. Jha and S. Jain, 6G: Technology Evolution in Future Wireless Networks, *IEEE Access*, 2024. 12: p. 57548-57573.
3. E. Basar, G. C. Alexandropoulos, Y. Liu, Q. Wu, S. Jin, C. Yuen, O. A. Dobre, R. Schober, Reconfigurable Intelligent Surfaces for 6G: Emerging Hardware Architectures, Applications, and Open Challenges, *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2024. 19(3): p. 27-47.
4. M. Asif, A. Ihsan, W. U. Khan, Z. Ali, S. Zhang and S. X. Wu, Energy-Efficient Beamforming and Resource Optimization for STAR-IRS Enabled Hybrid-NOMA 6G Communications, *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2023. 7(3): p. 1356-1368.

5. M. Sode, M. Ponschab, L. N. Ribeiro, S. Haesloop, E. Tohidi, M. Peter, S. Stańczak, B. H. Mohamed, W. Keusgen, H. Mellein, E. Yassin, and B. Schroeder., Reconfigurable Intelligent Surfaces for 6G Mobile Networks: An Industry R&D Perspective, *IEEE Access*, 2024. 12: p. 163155-163171.
6. Z. Zhang, L. Dai, X. Chen, C. Liu, F. Yang, R. Schober, and H. V. Poor, Active RIS vs. Passive RIS: Which Will Prevail in 6G? *IEEE Transactions on Communications*, 2023. 71(3): p. 1707-1725.
7. M. A. Jamshed, A. Kaushik, S. Manzoor, M. Z. Shakir, J. Seong, M. Toka, W. Shin, M. Schellmann, A Tutorial on Non-Terrestrial Networks: Towards Global and Ubiquitous 6G Connectivity, 2024. <https://arxiv.org/abs/2407.05754>
8. M. Wu, X. Lei, X. Zhou, X. Tang and O. A. Dobre, RIS-Assisted Energy- and Spectrum-Efficient Symbiotic Transmission in NOMA Systems, *IEEE Transactions on Communications*, 2023. 71(5): p. 2801-2815.
9. Y. Huo, X. Dong, and N. Ferdinand, Distributed Reconfigurable Intelligent Surfaces for Energy-Efficient Indoor Terahertz Wireless Communications, *IEEE Internet of Things Journal*, 2023. 10(3): p. 2728-2742.
10. B. Yang *et al.*, "Spectrum-Learning-Aided Reconfigurable Intelligent Surfaces for "Green" 6G Networks," *IEEE Network*, 2021. 35(6): p. 20-26.
11. T. A. Tsiftsis, C. Valagiannopoulos, H. Liu, A. -A. A. Boulogeorgos and N. I. Miridakis, Metasurface-Coated Devices: A New Paradigm for Energy-Efficient and Secure 6G Communications, *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2022. 17(1): p. 27-36.
12. Y. Zhang, W. Cheng, and W. Zhang, Dumb RIS-Assisted Random Beamforming for Energy Efficiency Enhancement of Wireless Communications, 2024. <https://arxiv.org/abs/2407.05754>
13. M. Yang, W. Chen, W. Saad, M. Xu, H. Shikh-Bahaei, H. Vincent Poor, S. Cui, Energy-Efficient Wireless Communications with Distributed Reconfigurable Intelligent Surfaces, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022. 21(1): p. 665-679.
14. V. Sharma, A. Paul, S. K. Singh, K. Singh and S. Biswas, Robust Transmission for Energy-Efficient Sub-Connected Active RIS-Assisted Wireless Networks: DRL Versus Traditional Optimization, *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2024. 8(4): p. 1902-1916.
15. J. Yaswanth, S. K. Singh, K. Singh and M. F. Flanagan, Energy-Efficient Beamforming Design for RIS-Aided MIMO Downlink Communication With SWIPT, *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2023. 7(3): p. 1164-1180.
16. D. Jia, Y. Zhong, X. Zhou and X. Ge, Energy Efficiency Enhancement in RIS-Assisted Networks: Deployment and Phase Shifter Configuration, *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2025.
17. S. Ghose, A. Kundu, D. Mishra, S. P. Maity, A. Al-Nahari and R. Jäntti, Energy Efficient RIS-assisted Wireless Powered D2D Communications in Cognitive Radio Networks, *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2025.

18. N. Lin, T. Wu, L. Zhao, A. Hawbani, S. Wan and M. Guizani, An Energy Effective RIS-Assisted Multi-UAV Coverage Scheme for Fairness-Aware Ground Terminals, *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2025. 9(1): p. 164-176.
19. K. D. Gupta, R. Nigam, D. K. Sharma and S. K. Dhurandher, LSTM-Based Energy-Efficient Wireless Communication with Reconfigurable Intelligent Surfaces, *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2022. 6(2): p. 704-712.
20. S. Wang, J. Xu and Y. Zeng, On the Energy-Efficiency Trade-off Between Active and Passive Communications With RIS-Based Symbiotic Radio, *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2025.
21. A. Bhowal, S. Aïssa and R. S. Kshetrimayum, RIS-Assisted Advanced Spatial Modulation Techniques for Ambient Backscattering Communications, *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2025.
22. M. Diamanti, P. Charatsaris, E. E. Tsiropoulou and S. Papavassiliou, The Prospect of Reconfigurable Intelligent Surfaces in Integrated Access and Backhaul Networks, *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2022. 6(2): p. 859-872.
23. ETSI, "TR 138 901 - V18.0.0 - 5G; Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (3GPP TR38.901 version 18.0.0 Release 18)," April 2024. https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/138900_138999/138901/18.00.00_60/tr_138901v180000p.pdf
24. Z. Ma *et al.*, "Energy-and-Spectrum-Efficient Trade-off Oriented Multi-Domains Resource Management Approach in RIS-Aided IABN Using NOMA With Imperfect SIC," *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2025.