

Vol. 12/ No. 47/Spring 2023

Research Article

# Resource Management in Hybrid Millimeter-Wave and Microwave Ultra-Dense Networks using TDD Duplexing

Zahra Mahjoobi, MsC<sup>1</sup>  | Nima Reisi, Assistant Professor<sup>2\*</sup> 

<sup>1</sup>Department of Electrical Engineering, Central Tehran Branch, Tehran, Iran, [z.mahjoobi@gmail.com](mailto:z.mahjoobi@gmail.com)

<sup>2</sup>Department of Electrical Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, [n.raeisi@iauctb.ac.ir](mailto:n.raeisi@iauctb.ac.ir)

**Correspondence**

Nima Reisi, Assistant Professor of Electrical Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, [n.raeisi@iauctb.ac.ir](mailto:n.raeisi@iauctb.ac.ir)

**Received:** 5 July 2022

**Revised:** 29 August 2022

**Accepted:** 30 September 2022

## Abstract

Millimeter wave (mW) communication is one of the key enabling technologies for meeting the vast data demand growth and bandwidth scarcity. It offers higher bandwidth which results in higher capacity. To improve the user experience in the 5G communication, it is proposed to utilize the composition of microwave ( $\mu$ W) and mW networks. On the other hand, an ultra-dense network (UDN) has been envisioned as a promising network paradigm for spectrum efficiency (SE) enhancement. In this paper, the cellular network using TDD duplexing, consists of both mW and  $\mu$ W base stations. BSs and users are distributed in indoor and outdoor environments. Our aim is to calculate the spectral efficiency for both mW and  $\mu$ W systems, based on the BSs and users distribution. Moreover, the effect of BS density on spectral efficiency is evaluated. Finally, the problem of maximizing the downlink rate is formulated and solved as a linear optimization problem so that the minimum uplink rate is guaranteed. The simulation results show that by servicing both mW and  $\mu$ W simultaneously on uplink and downlink, high SE can be achieved and with the help of optimal resources allocation, the network's performance is improved significantly.

**Keywords:** 5G Cellular Network, Ultra-dense Network, Millimeter Wave, Microwave, Resource Allocation.

## Highlights

- Millimeter-wave and microwave are used for both UL and DL communications.
- Based on the statistical models of BSs distribution, users and blockage, the indoor-outdoor spectral efficiencies are calculated for both UL and DL communications.
- A detailed analysis of density effect in both types of base stations on spectral efficiency is discussed.
- TDD duplexing is used, which has less complexity compared to FDD in terms of implementation complexity.

**Citation:** Z. Mahjoobi and N. Reisi, "Resource Management in Hybrid Millimeter-Wave and Microwave Ultra-Dense Networks using TDD Duplexing," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 12, no. 47, pp. 1–16, 2023, doi: 10.30495/jce.2022.1962597.1165 (in Persian).

## مقاله پژوهشی

## مدیریت منابع در شبکه‌های فوق متراکم هیبریدی موج میلی‌متری و مایکروویوی با تقسیم دوگانه زمانی

زهرا مهجویی<sup>۱</sup> | نیما رئیسی<sup>۲\*</sup> 

## چکیده:

در نسل پنجم سیستم‌های سلولی، برای سرویس‌دهی هر چه بهتر به کاربران، پیشنهاد شده است که از ترکیب باندهای مایکروویوی و موج میلی‌متری استفاده شود. از طرفی با کوچک‌تر شدن سلول‌ها به‌منظور بهبود بهره‌وری طیفی، معمولاً با یک شبکه فوق متراکم سروکار داریم. در این پژوهش، شبکه سلولی فوق متراکم با تقسیم دوگانه‌ی زمانی از دو نوع ایستگاه پایه‌ی موج میلی‌متری و مایکروویوی تشکیل شده است. ایستگاه‌های پایه و کاربران در هر دو محیط داخلی و خارجی با توزیع پواسون توزیع می‌گردند. در ادامه بر پایه‌ی مدل توزیع ایستگاه‌های پایه، توزیع کاربران و همچنین مدل کردن موانع و انسدادها با مدل بولین، بازده طیفی برای هر دو ارتباط فراسو و فروسو محاسبه می‌گردد و تأثیر تراکم هر دو نوع ایستگاه پایه بر روی بازده طیفی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در انتها مسئله‌ی حداکثر کردن نرخ فروسو با تضمین داشتن حداقل نرخ فراسو به‌صورت یک مسئله‌ی بهینه‌سازی خطی فرمول‌بندی شده و حل می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با سرویس‌دهی توأم ایستگاه پایه موج میلی‌متری و مایکروویوی هم در ارتباط فراسو و هم در ارتباط فروسو، می‌توان به بهره‌وری طیفی بالا در هر دو ارتباط دست‌یافت و با کمک تخصیص بهینه‌ی منابع مبتنی بر تقسیم دوگانه زمانی، ارتباط فروسو بهبود کلانی در حدود 3 dB می‌یابد.

**کلید واژه‌ها:** شبکه سلولی نسل پنجم، شبکه فوق متراکم، موج میلی‌متری، امواج مایکروویوی، تخصیص منابع

<sup>۱</sup>گروه مهندسی برق، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، [zmahjoobi@gmail.com](mailto:zmahjoobi@gmail.com)

<sup>۲</sup>گروه مهندسی برق، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، [n.raeisi@iauctb.ac.ir](mailto:n.raeisi@iauctb.ac.ir)

نویسنده مسئول

\*نیما رئیسی، استادیار، گروه مهندسی برق، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، [n.raeisi@iauctb.ac.ir](mailto:n.raeisi@iauctb.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۷ تیر ۱۴۰۱

تاریخ بازنگری: ۱ مرداد ۱۴۰۱

تاریخ پذیرش: ۲۹ شهریور ۱۴۰۱

<https://doi.org/10.30495/jce.2022.1962597.1165>

## ۱-مقدمه

امروزه با توجه به نیاز به نرخ داده بالا، ترافیک زیادی بر ایستگاه پایه تحمیل می‌شود. به‌منظور تطبیق ترافیک چند رسانه‌ی، بایستی ظرفیت شبکه‌های سلولی با گسترش باند فرکانسی در دسترس یا استقرار ایستگاه پایه جدید، بهبود یابد. با این حال منابع رادیویی در شبکه‌های سلولی محدود هستند و نصب و راه‌اندازی ایستگاه‌های پایه جدید هزینه بالایی در بر خواهد داشت [۱]؛ بنابراین انجام پژوهش مرتبط بر روی بهبود ظرفیت شبکه‌های سلولی با حفظ زیرساخت‌های موجود مانند نسل چهارم (LTE-A<sup>۱</sup>) ضروری هستند. فمتوسل‌ها<sup>۲</sup>، رله‌ها و پیکوسل‌ها<sup>۳</sup> که تحت استاندارد LTE-A هستند، از جمله تکنولوژی‌هایی هستند که برای افزایش ظرفیت شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرند، ولی این سیستم‌ها توانایی لازم برای تأمین نرخ داده در مناطق شلوغ

<sup>۱</sup> Long term evolution-advanced

<sup>۲</sup> Femtocell

<sup>۳</sup> Picocell

مانند سالن کنسرت و فروشگاه‌های بزرگ را ندارند و ممکن است در مناطق با تراکم بالای کاربران، ارتباطات با کمبود خدمات و یا تأخیر همراه شود [۲]. از نیازهای اساسی کاربران سلولی برقراری تماس صوتی و ارسال پیام‌های متنی هستند، ولی ایجاد رضایت در کاربران توسط اپراتورهای شبکه سلولی با برآورده کردن این نیازها نمی‌توانند به‌طور کامل جلب گردد، به همین دلیل اپراتورهای شبکه سلولی با چالش‌های زیادی در رابطه با برنامه‌های کاربردی و در حال توسعه موبایل برای نسل جدیدی از دستگاه‌های تلفن همراه، نظیر تلفن‌های هوشمند و تبلت‌ها روبرو هستند. این دستگاه‌های تلفن همراه جدید، استفاده از سرویس‌هایی مثل مکالمه تصویری، داده‌های ویدئویی/ صوتی، شبکه‌های اجتماعی و بازی آنلاین را برای کاربران فراهم می‌سازند که این سرویس‌ها به کیفیت بالایی از خدمات نیازمند دارند. نفوذ گوشی‌های هوشمند آن‌قدر به سرعت اتفاق افتاده است که اپراتورها به دنبال زیرساخت‌هایی برای پشتیبانی از برنامه‌های جدید هستند. با وجود اینکه فناوری نسل سوم و چهارم تلفن همراه (مانند UMTS<sup>۱</sup> و LTE) برای ارائه‌ی خدمات داده با سرعت بالا طراحی شده‌اند، ولی اپراتورها همچنان با افزایش تقاضای پهنای باند از سوی کاربران روبرو هستند. این محدودیت‌های برجسته، نیازمند ایجاد نوع جدیدی از ارتباطات هستند. یکی از تکنیک‌های اصلی می‌تواند بهره‌مندی از تعداد بسیار زیادی ایستگاه پایه در شبکه‌های سلولی باشد که این نوع شبکه‌ها تحت عنوان شبکه‌های فوق متراکم یا ابرچگال (UDN<sup>۲</sup>) شناخته می‌شوند [۳]. اگرچه این نوع ارتباطات از لحاظ کنترل تداخل به‌صرفه نباشند، اما از لحاظ استفاده از منابع و پهنای باند، مقرون به‌صرفه هستند. یکی از اهداف فنی کلیدی، دستیابی به ۱۰۰۰ برابر حجم داده‌های تلفن همراه در هر ناحیه یا افزایش ۱۰ تا ۱۰۰ برابری نرخ داده‌های کاربر است. به‌منظور دستیابی به این اهداف، شبکه‌ی فوق متراکم به‌عنوان یکی از روش‌های کلیدی برای تأمین نیازهای شبکه آینده، همراه با دیگر روش‌های کلیدی مانند انتقال فرکانس بالا، انتقال آنتن چندگانه و دستگاه به دستگاه در نظر گرفته می‌شود. شبکه‌های فوق متراکم اصولاً دارای گره‌های دسترسی با توان کم هستند که تراکم استقرار آن‌ها از شبکه‌های ارتباطی امروزی بسیار بالاتر است [۲]. هدف این نوع شبکه‌ها، ارائه ظرفیت بالای ترافیکی و نرخ داده بیشتر در وضعیت‌های خاصی همچون آپارتمان‌ها، دفاتر و مراکز خرید است. استقرار شبکه‌های فوق متراکم، معمولاً به‌صورت برنامه‌ریزی شده نیست و گره‌های دسترسی معمولاً با مدل‌های تصادفی و به‌صورت متراکم توزیع می‌شوند، در نتیجه تحلیل عملکرد این نوع شبکه‌ها نسبت به مدل شبکه‌های شش ضلعی مرسوم، دشوارتر خواهد بود. با استفاده از ابزارهای هندسه تصادفی، می‌توان این گره‌ها با توان مصرفی پایین را مدل‌سازی نمود و کاربران تصادفی به‌طور تصادفی در دو فرآیند نقطه‌ای پواسن (PPP<sup>۳</sup>) مختلف در حالت شبکه‌ی فوق متراکم قرار داد [۴]. اگرچه استفاده از رویکرد هندسه تصادفی جدید نیست، اما یک روش جدید به‌ویژه برای تحلیل ظرفیت شبکه است و بر اساس مدل PPP، تحلیل عملکرد شبکه در شبکه فوق متراکم امکان‌پذیر است.

سلول‌های کوچک متراکم یک روش نوظهور برای بهبود گذردهی شبکه از طریق فراهم کردن نقاط دسترسی نزدیک‌تر به کاربران است. یکی از جنبه‌های مهم در مطالعه سلول کوچک این است که چگونه با تغییر در روشن-خاموش کردن سلول‌های کوچک، عملکرد این سلول‌ها بهتر شود. برای مقابله با رشد ترافیک داده‌های مورد انتظار، شبکه ناهمگن با سلول‌های کوچک متراکم یک راه‌حل مشخص برای شبکه‌های آینده است. با اضافه کردن سلول‌های کوچک در شبکه‌های ماکرو موجود، شبکه‌های ناهمگن می‌توانند بار را از ایستگاه‌های پایه میکروویو موجود تخلیه کنند [۵]. در سلول‌های کوچک، نیاز برای انعطاف‌پذیری طیف/پهنای باند و همچنین برای بهره‌مندی از شکل‌دهی پرتو، تقسیم دوگانه زمانی (TDD<sup>۴</sup>) یا تقسیم دوگانه فرکانسی (FDD<sup>۵</sup>)، یک استراتژی فرآیند دوگانه جذاب برای mW است. سیستم‌های تلفن همراه در حال حاضر برای پردازش دیجیتال از سیستم‌های چند آنتن استفاده می‌کنند؛ بنابراین به دلیل بالا بودن تعداد آنتن و پهنای باند گسترده این مورد از نظر اقتصادی مناسب نیست. از طرفی انتقال‌های FDMA در LTE از طریق بلوک‌های پشتیبانی، امکان‌پذیر نخواهد بود. محدود کردن برنامه‌ریزی TDMA<sup>۶</sup> در یک فاصله زمانی TDD نشان می‌دهد که توان موردنیاز کاربران را تنها می‌توان در یک زمان دریافت کرد. از آنجایی که تلفن‌های همراه در لبه سلول ممکن است دارای توان محدود باشند، این کاهش توان به‌طور قابل توجهی می‌تواند ظرفیت را کاهش دهد

<sup>۱</sup> Universal Mobile Telecommunications System

<sup>۲</sup> Ultra Dense Network

<sup>۳</sup> Poisson point process

<sup>۴</sup> Time Division Duplexing

<sup>۵</sup> Frequency Division Duplexing

<sup>۶</sup> Time Division Multiple Access

[۶]. پشتیبانی از انتقال چند کاربر هم‌چنین برای پشتیبانی از پیام‌ها با بسته‌های کوچک از دیدگاه مصرف انرژی ضروری است. در این وضعیت ممکن است برای کاربران سلولی، فقط یک بخش کوچک از یک گروه، در یک بلوک زمان پردازش شود. تخصیص چنین زیرباندهایی می‌تواند مصرف انرژی پردازش باندها را به‌طور کلی کاهش دهد.

گذردهی شبکه و پوشش با افزودن تراکم سلول‌های کوچک می‌تواند به‌طور بالقوه بهبود یابد. با این وجود، این امر منجر به چالش‌هایی در استقرار شبکه برای حصول اطمینان از عملکرد کارآمد می‌شود. به‌عنوان مثال، هنگامی که در گسترش شبکه‌ی فوق متراکم سلول کوچک به‌کار گرفته می‌شود مصرف انرژی در لایه سلول کوچک اهمیت بسزایی خواهد یافت. در استقرار سلول کوچک متراکم، مسأله تداخل به‌صورت تداخل غالب ناشی از یک سلول کوچک تشدید می‌گردد. به‌دلیل استقرار متراکم سلول‌های کوچک ممکن است سلول‌ها دارای همپوشانی شوند و این خود باعث ایجاد تداخل شود؛ بنابراین، هماهنگی بین سلول‌های کوچک برای مبارزه با تداخل، روشی مؤثر برای بهبود عملکرد شبکه است. به‌عنوان مثال، این موضوع به‌ویژه برای سلول‌های کوچک در مجاورت یکدیگر، به‌عنوان مثال در یک خوشه ضروری است. علاوه بر اجتناب از تداخل، یک بررسی دیگر از عملکرد مؤثر، راندمان انرژی است. گسترش سلول‌های کوچک متراکم می‌تواند هزینه نگهداری و عملیات را به‌طور چشمگیری افزایش دهد. مطالعه بر روی رشد سلول کوچک در سناریوهای استقرار سلولی، مانند سلول‌های کوچک با یا بدون پوشش ماکرو، استقرار در فضای باز یا داخل ساختمان، متراکم یا پراکنده، با بک‌هال<sup>۱</sup> ایده‌آل یا غیر ایده‌آل، به‌عنوان اهداف پیشرفت سلول‌های کوچک در نظر گرفته می‌شوند [۷].

دهه جاری فضای متفاوتی را پیش روی تکامل دستگاه‌های همراه روشن کرده است که مفهوم شبکه فوق متراکم یک تغییر جدید در شبکه‌های آینده را نشان می‌دهد. ایده‌ی اساسی که در پشت شبکه‌های فوق متراکم وجود دارد آن است که گره‌های دسترسی باید تا حد امکان به کاربران نهایی نزدیک باشند. برای تحقق این امر، گسترش متراکم سلول‌های کوچک در نقاطی که دارای ترافیک زیاد است، صورت می‌گیرد. هر یک از این سلول‌های کوچک این توانایی را دارند که به گره‌های کوچک با توان انتقال کوچک دسترسی داشته باشند و در نتیجه یک ناحیه پوشش کوچک را به وجود آورند.

در مرجع [۸] با استفاده از آنتن چندرودی-چندخروجی حجیم و فناوری‌های ارتباطی موج میلی‌متری، گسترش متراکم‌سازی سلول‌های کوچک به شبکه‌های سلولی ۵G انجام شده است که در آن ایستگاه پایه‌ی سلول کوچک معمولاً نمی‌تواند به‌طور مستقیم ترافیک بک‌هال بی‌سیم را به دروازه داده شده منتقل کند، چرا که ایستگاه‌های پایه‌ی سلول‌های کوچک دارای فناوری موج میلی‌متری فاصله انتقال بی‌سیم را محدود می‌کنند. در این مقاله به بررسی چالش‌های استفاده از فناوری ارتباطی موج میلی‌متری در شبکه‌های فوق متراکم پرداخته شده است. در [۹]، نویسندگان تخصیص منابع را با هدف به حداکثر رساندن ظرفیت سیستم بر روی سیستم‌های سلولی فوق متراکم در یک شبکه‌ی ۵G را مورد مطالعه قرار می‌دهند. در سناریویی در نظر گرفته شده در این مقاله، تعداد کاربران ۲D2D<sup>۲</sup> بیشتر از کاربران سلولی است. در این مقاله نشان داده می‌شود که بلوک‌های منابع رادیویی باید ابتدا به کاربران D2D تحت سناریوی فوق متراکم اختصاص داده شوند. نتایج شبیه‌سازی انجام شده در این مقاله نشان می‌دهد که طرح پیشنهادی تخصیصی می‌تواند ظرفیت سیستم و کارایی طیف را به طور قابل توجهی بهبود بخشد. در مرجع [۱۰]، به موضوع حداکثر نرخ مجموع فرسو با تضمین دست یافتن به حداقل محدودیت نرخ ارتباط فراسو در یک شبکه فوق متراکم سلولی پرداخته می‌شود. نتایج بدست آمده در این مقاله نشان می‌دهد که ۳mW<sup>۳</sup> تمایل بیشتری به انتقال ارتباطی فرسو دارد در حالی که ۴μW<sup>۴</sup> اولویت بالایی برای ارائه‌ی سرویس به ارتباط فراسو، تحت تقسیم زمانی دوطرفه از خود نشان می‌دهد. چنین تخصیص منابعی به ارتباط فراسو توسط ایستگاه‌های پایه‌ی μW<sup>۵</sup>، ناشی از استفاده محدود از پهنای باند فراسوی mW به دلیل مصرف بیش از حد توان و/یا نسبت پیک به متوسط توان (PAPR)<sup>۵</sup> بالای کاربران تلفن همراه است. برای حل این چالش در ارتباط فراسو، نویسندگان روش جداسازی در کانال موج میلی‌متری فراسو پیشنهاد می‌دهند که در آن به هر ایستگاه پایه مایکروویو این اجازه داده می‌شود که سیگنال‌های موج میلی‌متری را دریافت کنند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد

<sup>1</sup> Backhaul

<sup>2</sup> Device to Device

<sup>3</sup> Millimeter Wave

<sup>4</sup> Micro Wave

<sup>5</sup> Peak To Average Power Ratio

که تأثیر آن بر مدیریت منابع به طور قابل ملاحظه‌ای باعث بهبود عملکرد بهره‌وری طیفی جمعیتی  $\mu W$ -mm می‌شود. تحلیل‌های انجام گرفته شده در این مقاله، الگوریتم‌ها مبتنی بر هندسه تصادفی در ارتباط با آمار انسداد و ساختمان سه بعدی بنا نهاده می‌شوند، به خوبی با یک مدل واقعی شهری در سنول (در کشور کره جنوبی) مطابقت دارد.

در مرجع [۱۱] برای کاهش مصرف توان شبکه سلولی الگوریتم‌های حالت خاموشی کارآمدی برای ایستگاه‌های پایه سلولی کوچک معرفی شده است. الگوریتم‌های طراحی شده در شرایط بیکاری به مولفه‌های سخت افزاری موجود در BS<sup>۱</sup> اجازه می‌دهند تا خاموش شوند، به گونه‌ای که مصرف انرژی بر روی تغییرات بار ترافیکی بهینه باشد. سه استراتژی متفاوت برای کنترل الگوریتم مورد بحث قرار گرفته که به صورت استفاده از رویکردهای سلول کوچک، مبتنی بر هسته و کاربر محور هستند و یک کلاس از الگوریتم‌های حالت خواب<sup>۲</sup> کارآمد برای ایستگاه‌های پایه کوچک معرفی شده و الگوریتم‌های پیشنهادی در شرایط بیکاری این اجازه را به مولفه‌های سخت‌افزاری در BS می‌دهند تا خاموش شوند، به گونه‌ای که مصرف انرژی بر روی تغییرات بار ترافیکی بهینه باشد. سپس سه استراتژی متفاوت برای کنترل الگوریتم، با تکیه بر سلول‌های کوچک، مورد بحث قرار گرفته‌اند. همچنین اهمیت تنظیمات ماکروسال با توسعه‌های سلولی کوچک نیز مورد بحث قرار گرفته‌اند که بر مبنای ترکیبی از مدل ترافیک صدا و داده، نشان داده شده است که تقریباً ۱۰ تا ۶۰ درصد صرفه‌جویی انرژی در شبکه در مقایسه با بدون حالت خواب در سلول‌های کوچک ارائه می‌شود. مدل مصرف توان بیان شده در این مقاله بر بخش دسترسی رادیویی شبکه متمرکز است و مصرف توان را شامل نمی‌شود. با گسترش سلول کوچک، فاصله فرستنده/گیرنده به شدت کاهش می‌یابد که منجر به کاهش توان انتقال و در نتیجه طول عمر باتری برای کاربران می‌شود [۱۱].

بررسی رابطه بین چگالی ایستگاه پایه و بهره‌وری طیفی (SE<sup>۳</sup>) متوسط در ارتباط فرسو در یک شبکه سلولی فوق متراکم در مرجع [۱۲] پرداخته شد. اگر چه تا پیش از این مقاله، بحث‌های کلی در مورد تأثیر افزایش چگالی ایستگاه‌های پایه بر افزایش بهره‌وری طیفی شده بود، اما هیچ فرمول و یا فرم بسته‌ایی بین رابطه چگالی (تراکم) ایستگاه پایه و بهره‌وری طیفی تا پیش از این مقاله استخراج نشده بود. نویسندگان در [۱۲] برای اولین بار در سال ۲۰۱۴ نشان دادند که بهره‌وری طیفی به طور مجانبی با یک تابع لگاریتمی از چگالی ایستگاه پایه با افزایش چگالی، افزایش می‌یابد. علاوه بر این، تأثیر این رابطه را بر سود اپراتور شبکه در زمانی که تقاضای کاربر تغییر می‌کند، مورد مطالعه قرار گرفت. در انتها نیز مسأله‌ی بهینه‌سازی با هدف به حداکثر رساندن سود با تخصیص بهینه‌ی چگالی ایستگاه پایه و مقدار بهینه طیف (پهنای باند) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و برای جواب‌های بهینه آن، فرم بسته‌ایی استخراج می‌گردد. در مرجع [۱۳]، یک شبکه سلولی را پیشنهاد می‌کند که از موج میلی‌متری‌ها و بکارگیری ایستگاه‌های پایه فوق متراکم برای دستیابی به نرخ متوسط فرسویی بیشتر در شبکه‌ی ۵G استفاده می‌شود. با این حال، شبکه پوشش داده شده توسط mw دچار این مشکل می‌شود که نرخ داده کافی آن تنها برای انتقال‌های فرسو به دلیل دشواری پیاده‌سازی در کاربران تلفن همراه قابل استفاده است که منجر به تفاوت بسیار زیاد بین نرخ‌های فراسو و فرسو می‌شود؛ بنابراین نویسندگان در این مقاله، توجه خود را نه تنها به حداکثر رساندن نرخ لینک فرسو، بلکه برای اطمینان از حداقل نرخ فرسو معطوف می‌کنند. در این مقاله، ابتدا با استفاده از هندسه تصادفی از طریق یک تقریب کران پایین‌تر، بازده طیفی شبکه سلولی فوق متراکم با پوشش mw را برای ارتباط فراسو و فرسو به فرم تحلیلی و بسته استخراج گردید. سپس برای یک سناریوی عملی، نتایج نشان دادند که منبع سلولی موجود مایکروویو باید عمدتاً به انتقال فراسو اختصاص داده شود تا با بهبود نرخ پیوند پایین موج میلی‌متری مطابقت داشته باشد. علاوه بر این، افزایش نرخ فراسو از طریق افزایش تراکم ایستگاه پایه‌ی  $\mu W$  نمی‌توانست صرفاً با عدم تقارن نرخ فراسو و فرسو در منابع mw مقابله کند و بنابراین به طیف  $\mu W$  اضافی در شبکه‌های سلولی ۵G نیاز داشت. بهینه‌سازی بر روی بهره‌وری انرژی سیستم در سیستم‌های چندرودی-چندخروجی حجیم<sup>۴</sup> فوق متراکم موضوعی بود که در [۱۴] مورد بحث و بررسی قرار گرفت. برای توسعه کارکردهای چندرودی-چندخروجی حجیم، در ابتدا یک مدل سیستمی پیشنهاد گردید که در آن چندرودی-چندخروجی حجیم انرژی الکترومغناطیسی را از محیط با

<sup>1</sup> Base Stations

<sup>2</sup> Sleep mode

<sup>3</sup> Spectral Efficiency

<sup>4</sup> Massive MIMO

استفاده از فناوری انتقال همزمان اطلاعات و توان بی‌سیم (SWIPT)<sup>۱</sup> که در ایستگاه پایه پیاده‌سازی شده است، برداشت می‌کند. سپس، مسئله بهینه‌سازی بهره‌وری انرژی، برای سیستم‌های چندوردی-چندخروجی حجیم موج میلی‌متری در شبکه فوق متراکم فرموله گردید. با توجه به ویژگی غیرمحدب تابع هدف، یک الگوریتم تکراری بر اساس روش دینکلباخ برای حل مسأله‌ی بهینه‌سازی توسعه داده شد. برای استفاده از نقش انتقال و دریافت چند نقطه‌ای هماهنگ (CoMP<sup>۲</sup>) برای بهبود بهره‌وری انرژی، یک COMP مبتنی بر الگوریتم ارتباط کاربر-ایستگاه پایه‌ی هماهنگ با حداکثر بهره‌وری انرژی (MaxEE)<sup>۳</sup> پیشنهاد شد. نتایج شبیه‌سازی نشان دادند که الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با روش‌های موجود، نرخ هم‌گرایی بسیار سریع‌تری دارد و عملکرد بسیار مؤثر نیز دارد.

در این پژوهش، ما فرض می‌کنیم که شبکه‌ای سلولی فوق متراکم از دو نوع ایستگاه پایه که یکی از آن‌ها امواج میلی‌متری و دیگری امواج مایکروویوی است، متشکل شده است. مهمترین نوآوری‌های صورت گرفته در این مقاله به شرح زیر است:  
الف- بر خلاف کارهای گذشته، در این مقاله برای هر دو ارتباط فراسو و فروسو از امواج mW و  $\mu$ W بهره برده شده است.  
ب- در این مقاله، بر پایه‌ی مدل‌های آماری توزیع ایستگاه‌های پایه، کاربران و موانع، بازده طیفی داخلی<sup>۴</sup> - خارجی<sup>۵</sup> برای هر دو ارتباط فراسو و فروسو محاسبه گردید.  
ج- در این مقاله آنالیز و تحلیل دقیقی از تاثیر تراکم (چگالی) هر دو نوع ایستگاه پایه بر روی بازده طیفی مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت.

د- در این مقاله، برای مدیریت منابع در ارتباط فراسو و فروسو، فرض تقسیم دوگانه زمانی (TDD) در نظر گرفته شده است. در واقع در این مقاله از تقسیم دوگانه زمانی بهره گرفته شده است که دارای پیچیدگی کمتری به لحاظ پیاده‌سازی در مقایسه با تقسیم دوگانه فرکانسی (FDD) برخوردار است که در اغلب پژوهش‌های پیشین فرض FDD در نظر گرفته شده است.  
در ادامه، بخش دوم این مقاله به ارائه‌ی مدل سیستم شبکه‌ی فوق متراکم می‌پردازد. بخش سوم به محاسبه‌ی بازده طیفی در کانال‌های mW و  $\mu$ W در ارتباط فراسو و فروسو اختصاص دارد. سپس در بخش چهارم، موضوع تخصیص بهینه‌ی شیارهای زمانی در ارتباط فراسو و فروسو تحت پروتکل TDD، با هدف بیشینه کردن نرخ قابل دسترس ارتباط فراسو با حفظ کیفیت لینک ارتباطی فراسو مطرح می‌گردد. شبیه‌سازی‌های گسترده‌ای در بخش پنجم مقاله جهت بررسی روابط بدست آمده شده در بخش‌های گذشته ارائه خواهد گردید. در بخش انتهایی نیز جمع‌بندی و مهمترین نتایج بدست آمده به صورت خلاصه مرور خواهد شد.

## ۲- مدل سیستم

مدل سیستم در نظر گرفته شده در این مقاله بدین صورت است که ایستگاه‌های پایه mW به صورت فرآیند نقطه‌ای پواسون همگن  $\varphi_m$  با چگالی  $\lambda_m$  به صورت تصادفی پراکنده شده‌اند. همچنین فرض می‌شود که این ایستگاه‌های پایه هر دو حالت ارتباطی فراسو و فروسو را پشتیبانی می‌کنند. با توجه به مشکلات انتشار امواج موج میلی‌متری ایستگاه‌های پایه  $\mu$ W نیز در شبکه همزیست با mW در نظر گرفته می‌شود که به صورت فرآیند تصادفی نقطه‌ای پواسون همگن  $\varphi_u$  با تراکم  $\lambda_u$  در سراسر سلول توزیع شده‌اند. ایستگاه‌های پایه  $\mu$ W نیز همانند ایستگاه‌های پایه mW از هر دو حالت ارتباطی فروسو و فراسو پشتیبانی می‌کنند. لازم به ذکر است که در اینجا فرایند  $\varphi_u$  را مستقل از  $\varphi_m$  در نظر می‌گیریم و ایستگاه‌های پایه‌ای که هیچ خدمتی ارائه نمی‌دهند، خاموش فرض می‌گردند. به طور مشابه برای مدل‌سازی توزیع کاربران در شبکه، کاربران را به طور مستقل به صورت فرآیند نقطه‌ای پواسون  $\varphi_u$  و با چگالی  $\lambda_u$  توزیع شده در شبکه در نظر می‌گیریم. بدیهی است که کاربران از هر دو نوع ارتباط مخابراتی (فراسو و فروسو) پشتیبانی کرده و هم این قابلیت را دارند که به طور همزمان، سیگنال‌های ارسال‌ی از هر دو ایستگاه پایه mW و  $\mu$ W که در دو باند متفاوت قرار دارند، دریافت نمایند. موانع که معمولاً ساختمان‌ها در مناطق شهری هستند، در واقع فرآیندی از اشکال تصادفی را تشکیل می‌دهند. این اشکال تصادفی معمولاً با یک طرح تصادفی مدل می‌شوند. برای مثال طرح بولی

<sup>1</sup> Simultaneous Wireless Information And Power Transfer

<sup>2</sup> Coordinated multipoint

<sup>3</sup> Maximum Spectral Efficiency

<sup>4</sup> Indoor

<sup>5</sup> Outdoor

مستطیل‌ها [۶] که بر روی یک صفحه قرار می‌گیرند. ما توزیع فرآیند موانع و انسداد<sup>۱</sup> را ثابت و همسانگرد - به عبارت دیگر - غیرمتغیر نسبت به حرکات انتقالی و چرخش فرض می‌کنیم. در این مقاله، ناحیه داخلی به صورت ناحیه‌ای در نظر گرفته شده است که در آن مرزها دیواره‌های غیرقابل نفوذ mW هستند. با در نظر گرفتن مدل بولین [۱۵]، ناحیه داخلی با توزیع یکنواخت به صورت حلقه‌هایی با شعاع R و با چگالی  $\lambda$  در نظر گرفته شده است. برای سادگی، فرض می‌شود که مناطق داخلی همیشه ارتباط دید مستقیم<sup>۲</sup> را تضمین می‌کنند. علاوه بر این، ما فرض می‌کنیم که شبکه به اندازه کافی بزرگ است به طوری که می‌توان از همپوشانی مناطق داخلی صرف نظر کرد. ما مناطق داخلی را فقط برای امواج موج میلی‌متری در نظر گرفته‌ایم زیرا این امواج به انسداد حساس‌اند و امواج مایکروویو با توجه به ویژگی‌هایش در هر مکانی قرار بگیرد، می‌تواند به تمام کاربران اعم از بیرونی و درونی خدمت ارائه دهد.

## ۲-۱- محاسبه‌ی سیگنال به نویز به تداخل در مدل‌های مختلف کانال

با توجه به ویژگی‌های متفاوت انتشار ایستگاه‌های پایه، مدل کانال در نظر گرفته شده در این پژوهش را می‌توان به صورت دو بخش کانال موج میلی‌متری و کانال مایکروویو تقسیم‌بندی می‌شود.

الف- کانال موج میلی‌متری:

هنگامی که آرایه آنتن mW جهتدار، سیگنال داده‌های خود را با توان واحد، به کاربران خود منتقل می‌کند، سیگنال‌ها در کانال انتشاری که دارای ضریب افت مسیر  $\alpha_m > 2$  می‌باند، دچار محوشدگی رایلی با میانگین واحد می‌شوند. ما فرض می‌کنیم که بیم جهتدار انتقالی دارای زاویه لوب اصلی  $\theta$  رادیان است و شدت تابشی در این زاویه تابشی در سراسر  $\theta$  رادیان یکسان است. در واقع این فرض به این معنا خواهد بود که توان سیگنال دریافتی در فاصله‌های برابر در سراسر محدوده‌ی زاویه‌ای  $\theta$ ، برای تمام کاربران یکسان در نظر گرفته شده است. کاربران می‌توانند فقط در صورتی که هیچ مانعی در مسیر ارتباطی با ایستگاه‌های پایه مرتبطشان نباشند (مسیر LOS وجود داشته باشد)، سیگنال‌های mW را دریافت نمایند. یک کاربر معمولی  $U_0$  در مبدا و یک ایستگاه پایه در  $X_i$  که با کاربر فاصله  $r_i$  دارد را در نظر می‌گیریم.  $u_i$  را یک بردار جهتی مخالف از سمت ایستگاه پایه به  $U_0$  تعریف می‌کنیم که به صورت  $|X_i|/r_i$  در نظر گرفته می‌شود. پس از مشخص شدن تعریف بردار  $u_i$ ، تابع فاصله‌ی  $L(u_i)$  را تحت عنوان فاصله غیر مسدود، تعریف می‌گردد. کاربر زمانی می‌تواند سیگنال ارسالی را دریافت کند که شرط  $L(u_i) > r_i$  برقرار باشد. برای لینک‌های تداخلی، تداخلگرها را به عنوان ایستگاه‌های پایه ناخواسته که در مسیر سرویس‌دهی‌هایشان فعال هستند در نظر می‌گیریم که مرکز لوب اصلی بیم‌شان به سمت  $U_0$  است؛ که این منجر به بهره آنتن  $\theta_i$  می‌شود که یک تابع صعودی از  $\theta$  و هم چنین تعداد ایستگاه‌های پایه ای که به کاربران سرویس ارائه می‌دهند، است. زمانی که  $U_0$  در خارج از ناحیه داخلی است، سیگنال به تداخل به نویز (SINR) در باند موج میلی‌متری به صورت زیر بدست می‌آید [۱۴]:

$$SINR_{m,out,DL} = \begin{cases} \frac{\eta r^{-\alpha_m}}{\sum_{i \in \Phi_{m,out}} \theta_i \eta_i r_i^{-\alpha_m} + \sigma^2} & \text{if } L(u) > r \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

$$SINR_{m,out,UL} = \begin{cases} \frac{\eta r^{-\alpha_m}}{\sum_{i \in \Phi_i} \theta_i \eta_i r_i^{-\alpha_m} + \sigma^2} & \text{if } L(u) > r \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

که در دو رابطه‌ی اخیر،  $\Phi_{m,out}$  یک ایستگاه‌های پایه mW فعال بدون انسداد در ناحیه بیرونی و  $\Phi_{u_i}$  نیز کاربر فعال انتخاب شده است. علاوه بر این، بهره‌ی توان محوشدگی و  $\sigma^2$  توان نویز است. به طور مشابه زمانی که  $U_0$  در مناطق داخلی قرار دارد، سیگنال به نویز mW به این شرح است [۱۴]:

<sup>1</sup> Blockage

<sup>2</sup> Line Of Sight (LOS)

$$SINR_{m,in,DL} = \frac{\eta r^{-2}}{\sum_{i \in \Phi_{m,in}} \theta_i \eta_i r_i^{-2} + \sigma^2} \quad (3)$$

$$SINR_{m,in,UL} = \frac{\eta r^{-2}}{\sum_{i \in \Phi_i} \theta_i \eta_i r_i^{-2} + \sigma^2} \quad (4)$$

که در آن،  $\Phi_{m,in}$  معرف یک ایستگاه پایه mW تداخلی فعال در محیط درونی است.

ب- کانال مایکروویوی:

به طور مشابه با ایستگاه‌های پایه‌ی mW، سیگنال انتقال داده شده توسط ایستگاه‌های پایه‌ی  $\mu W$  با توان واحد بوده که آنها در طی انتشار ضریب افت مسیر  $\alpha_{\mu} > 2$  را در یک کانال دارای محوشدگی رایلی تجربه می‌کند. بهره توان محوشدگی را با  $g$  نمایش می‌دهیم که دارای توزیع نمایی با میانگین یک است. در  $U_0$ ، سیگنال به تداخل به نوبت ( $SINR$ ) در باند مایکروویو به صورت زیر بدست می‌آید [14]:

$$SINR_{\mu,DL} = \frac{g r^{-\alpha_{\mu}}}{\sum_{i \in \Phi_{\mu}} \theta_i g_i r_i^{-\alpha_{\mu}} + \sigma^2} \quad (5)$$

$$SINR_{\mu,UL} = \frac{g r^{-2}}{\sum_{i \in \Phi_i} \theta_i g_i r_i^{-\alpha_{\mu}} + \sigma^2} \quad (6)$$

که در آن  $\Phi_{\mu}$  معرف ایستگاه پایه فعال تداخلی است.

### ۳- بازده طیفی در شبکه‌های سلولی فوق متراکم

مقدار اطلاعاتی که می‌تواند از طریق پهنای باند معین در یک سیستم مخابراتی خاص منتقل شود، بازده طیفی<sup>۱</sup> گفته می‌شود. هم چنین این پارامتر با افزایش تراکم ایستگاه‌های پایه، به صورت لگاریتمی افزایش می‌یابد. در این مقاله به دلیل دوگانگی<sup>۲</sup> بین ارتباط فراسو و فروسو، بازده طیفی هر دو ایستگاه پایه ذکر شده در هر دو حالت فراسو و فروسو با هم برابر است. در واقع دوگان بودن فراسو و فروسو به این معناست که می‌توان کانال فروسو را معادل مزدوج هرمیتی کانال فراسو دانست. در TDD با بهره‌گیری از دوگانگی کانال ارتباطی، فرستنده می‌تواند کانال فروسو را از روی کانال فراسو تخمین بزند. به طور کلی رابطه‌ی دقیق متوسط نرخ هر کاربر در یک ارتباط فروسو از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$\gamma = \int_0^{\infty} [1 + \rho_i (e^t - 1)^{\frac{2}{\alpha}} \{1 - (1 + \frac{\lambda_u}{1.35 \lambda_b})^{-3.5}\}] dt \quad (7)$$

$$\text{where } \rho_i = \int_{(e^t - 1)^{\frac{2}{\alpha}}}^{\infty} \frac{1}{(1 + u^{\frac{2}{\alpha}})} du$$

اما موضوع بسیار مهمی که در اینجا باید به آن اشاره کنیم این است که ما در این مقاله، در یک رژیم معین از شبکه‌های مخابراتی سلولی تحت عنوان «شبکه‌های سلولی فوق متراکم» قرار داریم. در این رژیم، فرض می‌شود که تعداد ایستگاه‌های پایه به مراتب بیشتر از تعداد کاربران فعال است به طوری که فاصله کاربر تا ایستگاه پایه تداخلگر را می‌توان با فاصله‌ی نزدیک‌ترین کاربر فعال متعلق به ایستگاه پایه تقریب زد. به طور کلی می‌توان به لحاظ چگالی توزیع کاربران و ایستگاه پایه مقایسه دو رژیم  $\lambda_u \gg \lambda_m$  و  $\lambda_m \gg \lambda_u$  را مطرح نمود. در ادامه بر پایه‌ی رابطه‌ی دقیق نوشته شده در رابطه (۳) برای نرخ قابل دسترس هر کاربر، روابط بهره‌وری انرژی را تحت این رژیم مطرح شده ارائه می‌گردد.

<sup>1</sup> Spectral Efficiency

<sup>2</sup> Duality



### ۳-۱- بازده طیفی امواج مایکروویوی

برای کاربر  $U_0$  با فرض  $\lambda_u \ll \lambda_m$ ، بازده طیفی فراسو و یا فروسو برای امواج مایکروویوی را می توان از رابطه زیر بدست آورد.

$$\gamma_\mu = \log \left( 1 + \left[ \frac{\lambda_\mu}{\rho_\mu \lambda_u} \right]^{\alpha_\mu/2} \right) \quad (۸)$$

$$\text{where } \rho_\mu = \int_0^\infty \frac{1}{(1+u^{\alpha_\mu/2})} du$$

### ۳-۲- محاسبه بازده طیفی امواج میلیمتری

به دلیل این که این امواج در هر دو محیط درونی و بیرونی بررسی شده است، محاسبه بازده طیفی آن نیز باید برای هر دو محیط محاسبه گردد. برای کاربر  $U_0$  در شرایط برقراری فرض  $\lambda_m \gg \lambda_u$ ، بازده طیفی فراسو و یا فروسو برای امواج میلیمتری بازده طیفی برای محیط بیرونی از رابطه زیر پیروی می کند.

$$\gamma_{m.out} = \log \left( 1 + \frac{2\pi}{\theta} \left[ \frac{e^\lambda g^s \lambda_m}{(\rho_m \lambda_u)} \right]^{\alpha_m/2} \right)^{1-\sqrt{s/\lambda_m}} \quad (۹)$$

$$\text{where } \rho_m = \int_0^\infty \frac{1}{(1+u^{\alpha_m/2})} du$$

هم چنین بازده طیفی برای محیط درونی با فرض محیط فوق متراکم می توان رابطه ی زیر را نوشت:

$$\gamma_{m.in} = \log \left( 1 + \frac{\pi \lambda_m}{\sigma^2} \right) \quad (۱۰)$$

برای محاسبه بازده طیفی کل برای امواج میلیمتری با تجميع محاسبات بالا داریم:

$$\gamma_m = \log \left( 1 + \frac{\pi \lambda_m^{\frac{(\alpha_m-1)e^{-\lambda g^s} + 1}{2}}}{\sigma^2} \left[ \frac{2\sigma^2}{\theta} \left( \frac{e^\lambda g^s}{\rho_m \lambda_u} \right)^{\alpha_m/2} \right] e^{-\lambda g^s} \right) \quad (۱۱)$$

از رابطه (۱۱) مشخص است که بازده طیفی کل با پهنای لوب اصلی پرتو ( $\theta$ ) رابطه ی مستقیم دارد. این بدین معناست که پرتو تیزتر ( $\theta$  کوچک) بازده طیفی را افزایش می دهد. هم چنین از آن جایی که کاربران بیشتر باعث ایجاد تداخل بیشتر می شوند، تابع بازده طیفی بدست آمده در رابطه (۱۱) با افزایش تراکم کاربر، نزولی می شود.

### ۴- مدیریت منابع در شبکه های فوق متراکم

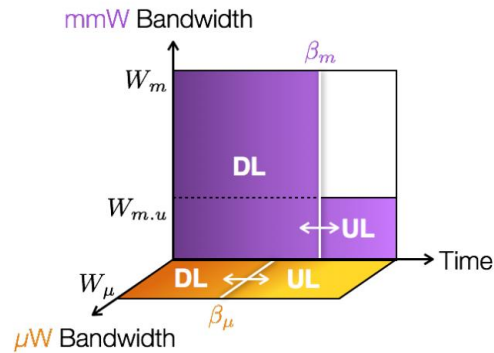
در این بخش می خواهیم به موضوع تخصیص زمان فراسو و فروسو تحت فرض TDD بپردازیم. همانطور که بالا به آن اشاره شد، در روش TDD، برای ارتباط فراسو و فروسو از یک باند فرکانسی یکسان استفاده می شود و تنها در بلوک های زمانی متفاوتی ارسال ها صورت می گیرد. نرخ میانگین در کانال های موج میلی متری و مایکروویو برای ارتباط فراسو و فروسو به ترتیب به صورت زیر تعریف می شوند.

$$R_u = \beta_m W_m \gamma_{m.u} + \beta_\mu W_\mu \gamma_{\mu,u} \quad (۱۲)$$

$$R_d = (1 - \beta_m) W_m \gamma_{m,d} + (1 - \beta_\mu) W_\mu \gamma_{\mu,d} \quad (۱۳)$$

در روابط اخیر  $R_d$  نرخ میانگین فروسو،  $R_u$  نرخ میانگین فراسو،  $\beta_m$  نسبت تخصیص زمانی فراسو در کانال موج میلی متری،  $\beta_\mu$  نسبت تخصیص فراسو در کانال مایکروویو است. اضافه بر این،  $W_\mu$  و  $W_m$  به ترتیب پهنای باند در دسترس کانال های موج میلی متری و مایکروویو است. در شکل ۱، چگونگی تخصیص زمانی در هر یک از کانال های موج میلی متری و مایکروویو در ارتباط

فراسو و فروسو نمایش داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود می‌توان با تخصیص بهینه‌ی هر یک از پارامترها به مانند  $\beta_m$ ،  $\beta_\mu$ ،  $W_m$  و  $W_\mu$  می‌توان نرخ قابل دسترس کاربران را بیشینه کرد.



شکل ۱: شمایی از تخصیص منابع در شبکه‌ی سلولی فوق متراکم

Figure 1. Schematic of resource allocation in ultra-dense cellular network

هدف ما در این بخش، حداکثر کردن نرخ میانگین ارتباط فراسو برای کاربران فعال با قید تضمین حداقل نرخ فراسو با تعیین پارامترهای بهینه‌سازی  $\beta_\mu$  و  $\beta_m$  است؛ بنابراین با توجه به توضیحات داده شده، مسأله‌ی بهینه‌سازی مورد نظر را به صورت زیر فرمول‌بندی می‌کنیم.

$$\begin{aligned} & \max_{\beta_m, \beta_\mu} R_d \\ & \text{st} : R_u / R_d \geq \zeta \\ & 0 \leq \beta_m, \beta_\mu \leq 1 \end{aligned} \quad (14)$$

در رابطه‌ی بالا،  $\zeta$  ضریب نسبت فراسو به فروسو تعریف می‌شود که طراحی‌های شبکه‌های مخابراتی بی‌سیم باید یک مقدار مثبت کوچکتر از یک باشد ( $0 < \zeta < 1$ ). مسأله‌ی بهینه‌سازی یک مسأله‌ی بهینه‌سازی خطی نسبت به متغیرهای بهینه‌سازی  $\beta_\mu$  و  $\beta_m$  است. به طور کلی، برنامه‌ریزی خطی یک تکنیک برای بهینه‌سازی تابع هدف خطی است به طوری که قیدها، تساوی‌ها و نامساوی‌ها خطی هستند و در این صورت ناحیه‌ی شدنی مسأله به صورت یک چندوجهی محدب خواهد بود که اشتراک تعداد متناهی نیم‌فاضا است. هر یک از این نیم‌فضاها به وسیله‌ی یک نامساوی خطی تعریف می‌شود. در این مسأله‌ی بهینه‌سازی، تابع هدف یک تابع مستوی مقدار حقیقی تعریف شده روی این چند وجهی است. هر الگوریتم حل مسأله‌های بهینه‌سازی خطی، نقطه‌ای از چندوجهی را می‌یابد که تابع هدف در این نقطه، کمترین (بیشترین) مقدار را داشته باشد (البته اگر چنین نقطه‌ای وجود داشته باشد).

به طور کلی فرم ماتریسی یک مسأله‌ی بهینه‌سازی خطی به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} & \max_x C^T x \\ & \text{st} : Ax \succ b \end{aligned} \quad (15)$$

در فرم نمایش داده شده در رابطه (۱۵)، بردار  $x$ ، بردار متغیرهای بهینه‌سازی مسأله بوده و  $C$  بردار ضرایب تابع هدف برنامه‌ریزی خطی و  $A$  ماتریس ضرایب متناظر با قیدهای مسأله است. در ادامه سعی خواهیم کرد مسأله‌ی بهینه‌سازی مطرح شده در رابطه (۱۴) را به صورت استاندارد ماتریسی مطرح شده در رابطه (۱۵) بنویسیم. برای این منظور، در ابتدا بردار متغیرهای بهینه‌سازی را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$x = [1 - \beta_m \quad 1 - \beta_\mu]^T \quad (16)$$

همچنین بردار ضریب تابع هدف  $C$  را با توجه به رابطه (۱۳) می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$c = \begin{bmatrix} W_m \gamma_{m.d} & W_\mu \gamma_{\mu.d} \end{bmatrix}^T \quad (17)$$

دقت شود که در بالا، بردار متغیرهای بهینه‌سازی بر حسب  $1-\beta_m$  و  $1-\beta_\mu$  نوشته شده است. حال باید دو قید رابطه (۱۴) را به فرم ماتریسی در بیاوریم. برای قید اول رابطه (۱۴) داریم:

$$R_u/R_d \geq \zeta \Rightarrow \beta_m W_m \gamma_{m.u} + \beta_\mu W_\mu \gamma_{\mu.u} \geq \zeta (1-\beta_m) W_m \gamma_{m.d} + \zeta (1-\beta_\mu) W_\mu \gamma_{\mu.d} \quad (18)$$

حال با کمی محاسبه، نامساوی بالا را بر حسب متغیرهای  $\beta_m$  و  $\beta_\mu$  می‌نویسیم، یعنی:

$$\beta_m (W_m \gamma_{m.u} + W_m \gamma_{m.d}) + \beta_\mu (W_\mu \gamma_{\mu.u} + W_\mu \gamma_{\mu.d}) \geq \zeta W_m \gamma_{m.d} + \zeta W_\mu \gamma_{\mu.d} \quad (19)$$

اما نکته بسیار مهم در رابطه‌ی اخیر این است که متغیرهای بهینه‌سازی ما بر حسب  $1-\beta_m$  و  $1-\beta_\mu$  نوشته شده است، بنابراین ما نامساوی اخیر را بر حسب متغیرهای بهینه‌سازی بازنویسی می‌کنیم:

$$\begin{aligned} & (1-\beta_m)(W_m \gamma_{m.u} + W_m \gamma_{m.d}) + (1-\beta_\mu)(W_\mu \gamma_{\mu.u} + W_\mu \gamma_{\mu.d}) \\ & \leq W_m \gamma_{m.u} + W_m \gamma_{m.d} + W_\mu \gamma_{\mu.u} + W_\mu \gamma_{\mu.d} - \zeta W_m \gamma_{m.d} - W_\mu \gamma_{\mu.d} \end{aligned} \quad (20)$$

با کمی مرتب‌سازی رابطه (۲۰) داریم:

$$\begin{aligned} & (1-\beta_m)(W_m \gamma_{m.u} + W_m \gamma_{m.d}) + (1-\beta_\mu)(W_\mu \gamma_{\mu.u} + W_\mu \gamma_{\mu.d}) \\ & \leq W_m \gamma_{m.u} + (1-\zeta) W_m \gamma_{m.d} + W_\mu \gamma_{\mu.u} + (1-\zeta) W_\mu \gamma_{\mu.d} \end{aligned} \quad (21)$$

حال برای قید دوم رابطه (۱۴) نیز باید فرمی مشابه با فرم رابطه (۲۱) بسازیم، برای این منظور خواهیم داشت:

$$0 \leq \beta_m \leq 1 \Rightarrow 0 \leq (1-\beta_m) \leq 1 \quad (22)$$

$$0 \leq \beta_\mu \leq 1 \Rightarrow 0 \leq (1-\beta_\mu) \leq 1 \quad (23)$$

حال از پنج نامعادله‌ی بدست آمده از روابط (۲۱) تا (۲۳)، ماتریس ضرایب A را به صورت زیر تشکیل می‌دهیم:

$$A = \begin{bmatrix} W_m \gamma_{m.u} + W_m \gamma_{m.d} & W_\mu \gamma_{\mu.u} + W_\mu \gamma_{\mu.d} \\ -1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

در این وضعیت مشخص است که بردار عرض از مبدأ به صورت زیر بدست آورده می‌شود:

$$b = \begin{bmatrix} W_m \gamma_{m,u} + (1 - \zeta) W_m \gamma_{m,d} + W_\mu \gamma_{\mu,u} + (1 - \zeta) W_\mu \gamma_{\mu,d} \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

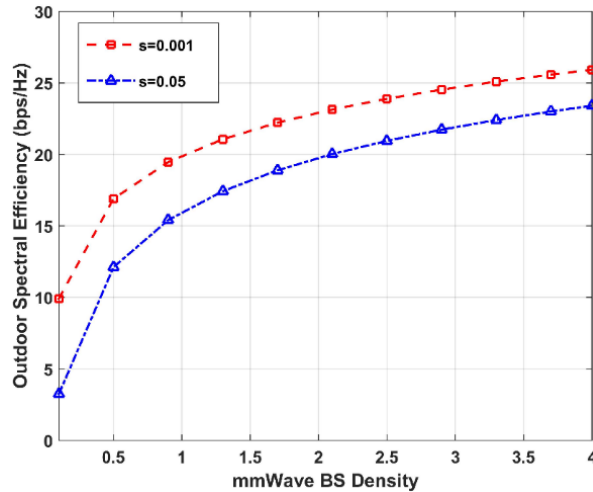
حال که فرم‌های استاندارد ماتریسی برنامه‌ریزی خطی برای مسأله‌ی بهینه‌سازی استخراج شد، با کمک یک نرم افزار عددی استاندارد مانند Matlab که برای حل مسأله‌های برنامه‌ریزی خطی توسعه داده شده است می‌توان مسأله‌ی بهینه‌سازی بالا را حل کرد.

## ۵- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش می‌خواهیم برای شبکه‌هایی با محیط‌های فوق متراکم، با استفاده از شبیه‌سازی عددی، روابط بدست آمده شده در بخش‌های قبل و نتایج گرفته شده را مورد ارزیابی و تجزیه و تحلیل قرار دهیم. قبل از بررسی و تحلیل نتایج شبیه‌سازی بدست آمده، لازم به ذکر است که این شبیه‌سازی توسط یک سیستم رایانه‌ای با مشخصات سخت‌افزاری، پردازنده ۷ هسته‌ای از نوع GY ۱۱۶۵ و با ۱۲ گیگ بایت رم در محیط نرم افزار متلب ۲۰۱۸ صورت پذیرفته است.

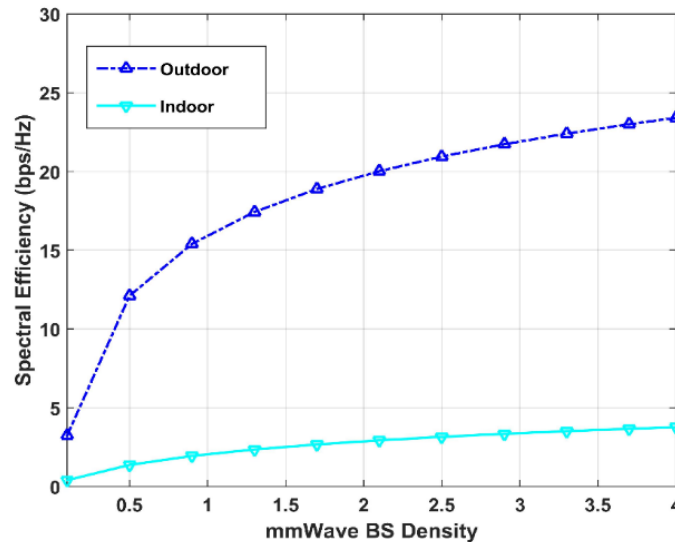
در شکل ۲، بهره‌وری طیفی ناحیه خارجی را به ازای مساحت ناحیه داخلی  $s = 0.01 \text{ m}^2$  و  $s = 0.05 \text{ m}^2$  بر حسب تغییرات چگالی ایستگاه پایه‌ی mW نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، مطابق انتظار با افزایش چگالی توزیع ایستگاه‌های پایه‌ی mW، بهره‌وری طیفی سیر صعودی خواهد داشت. علت این سیر صعودی را می‌توان در چگونگی تخصیص ایستگاه‌های پایه به کاربران جستجو کرد که در آن افزایش تعداد ایستگاه‌های پایه در یک محیط مشخص سبب کاهش فاصله‌ی بین کاربران تا ایستگاه پایه خواهد شد و در نتیجه انسداد کاهش خواهد یافت. علاوه بر این مشاهده می‌کنیم که با کاهش مساحت ناحیه داخلی که به صورت  $S = \pi R^2$  تعریف می‌شود، بهره‌وری طیفی افزایش می‌یابد. علت این اتفاق آن است که با کاهش مساحت تحت پوشش ناحیه داخلی، میزان تداخل بر روی کاربران ناحیه خارجی افت محسوسی خواهد داشت، در حالی که از طرف دیگر، افزایش مساحت پوشش ناحیه داخلی، باعث افزایش انسداد شده و در نتیجه افت بهره‌وری طیفی را به دنبال خواهد داشت. این دو عامل سبب می‌شود که با افزایش شعاع R، افت عملکرد در سیستم داشته باشیم.

در نمودار شکل ۳، تغییرات بهره‌وری کانال موج میلی‌متری بر حسب تغییرات میزان چگالی ایستگاه پایه‌ی mW برای ناحیه بیرونی و ناحیه درونی با هم مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، بهره‌وری طیفی ناحیه داخلی به مراتب کوچکتر از بهره‌وری ناحیه خارجی به ازای  $s = 0.02 \text{ m}^2$ ،  $\theta = 10^\circ$  و  $\alpha_m = 5/76$  است. علت این موضوع این می‌تواند باشد که در ناحیه داخلی به دلیل شعاع کم، تعداد بسیار کمی کاربر می‌تواند قرار گیرند، این در حالی است که در ناحیه خارجی می‌تواند تعداد بیشتری از نقاط تصادفی پواسن کاربر در محدوده‌ی سرویس دهی ایستگاه‌های پایه mW قرار گیرند؛ بنابراین، مقدار بهره‌وری طیفی در ناحیه خارجی در مقایسه با ناحیه داخلی، مقدار بزرگتری خواهد بود.



شکل ۲: تغییرات بهره‌وری طیفی ناحیه خارجی در کانال mWave با تغییر چگالی ایستگاه پایه برای مساحت ناحیه‌های داخلی  $S=[10^{-3} \ 5 \times 10^{-2}]$

Figure 2. Spectrum efficiency mWave outdoor region versus base station's density for  $S=[10^{-3} \ 5 \times 10^{-2}]$



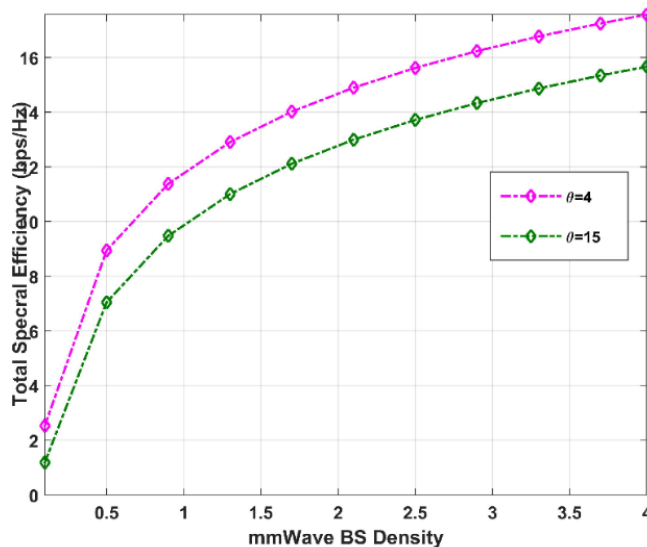
شکل ۳: مقایسه بهره‌وری طیفی ناحیه داخلی و ناحیه خارجی در کانال موج میلی‌متری

Figure 3. Spectrum efficiency comparison of indoor and outdoor regions in mw channel

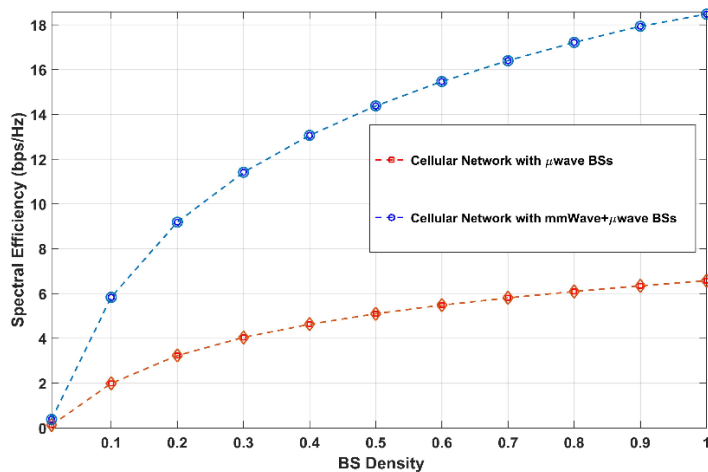
نمودار شکل ۴ تاثیر چگالی ایستگاه پایه امواج میلی‌متری بر روی بهره‌وری طیفی کل امواج میلی‌متری را برای پهنای پرتو  $\theta=40^\circ$  و  $\theta=15^\circ$  نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌کنیم با افزایش چگالی (تراکم) ایستگاه‌های پایه، بهره‌وری طیفی به طور چشمگیری افزایش می‌یابد. از طرفی دیگر، مشاهده می‌شود که با باریک شدن پرتو ارسالی توسط ایستگاه پایه، بهره‌وری طیفی افزایش می‌یابد. علت این رویداد این است که با باریک شدن پرتو و یا در واقع متمرکز شدن پرتو ایستگاه پایه بر روی کاربران خود، میزان تداخل بر روی سایر کاربران به طور محسوسی کاهش خواهد یافت؛ بنابراین این عامل باعث می‌شود که سیگنال به تداخل به نوبت در کاربران فعال مختلف به میزان قابل توجهی کاهش یابد و در نتیجه به دنبال آن نرخ افزایش یافته و در کل بهره‌وری طیفی نیز افزایش یابد.

در شکل ۵ عملکرد شبکه سلولی نسل جدید (با ایستگاه‌های پایه هیبریدی متشکل از ایستگاه پایه‌ی موج میلی‌متری و ایستگاه پایه‌ی مایکروویو) و شبکه سلولی نسل قدیم (با ایستگاه‌های پایه مبنی بر امواج مایکروویو)، به لحاظ بهره‌ی طیفی با همدیگر مقایسه شده‌اند. همانطور که از شکل ۵ مشخص است، نسل جدید شبکه‌های سلولی هیبریدی عملکرد به مراتب بهتری در مقایسه با شبکه‌های سلولی نسل قدیم از خود نشان داده است. دلیل این موضوع رو باید در این نکته جستجو کرد که در وضعیت

بهره بردن از ایستگاه‌های پایه mWave، محاسبه‌ی بهره‌ی طیفی در دو محیط بیرونی و درونی به صورت جداگانه انجام می‌شود. همانطور که از شکل ۳ نیز مشخص است، بهره‌ی طیفی بدست آمده از محیط بیرونی در مقایسه با محیط درونی بسیار بزرگ است، این در حالی است که با بکارگیری ایستگاه‌های پایه موج میلی‌متری، مطابق با شکل ۴، بهره‌ی طیفی محیط درونی آن به مراتب بهتر از بهره‌ی طیفی بدست آمده از ایستگاه‌های پایه mWave در محیط درونی است. پر واضح است که در وضعیت هیبریدی با توجه به اینکه به طور همزمان از مزایای بهره‌ی طیفی در محیط بیرونی ایستگاه‌های پایه‌ی mWave و مزایای بهره‌ی طیفی در محیط درونی ایستگاه‌های پایه‌ی مایکروویوی به طور همزمان بهره خواهیم برد، سبب خواهد شد که بهره‌ی طیفی در در نسل جدید که سیستم‌های هیبریدی هستند، به مراتب نسبت به نسل قدیم بهبود قابل توجهی از خود نشان دهد.



شکل ۴: تغییرات بهره‌وری طیفی کل در کانال موج میلی‌متری با تغییر چگالی ایستگاه‌های پایه برای پهنای پرتوهای  $\theta=[4 \ 15]$   
Figure 4. Spectrum efficiency versus mw densities of base stations for  $\theta=[4 \ 15]$

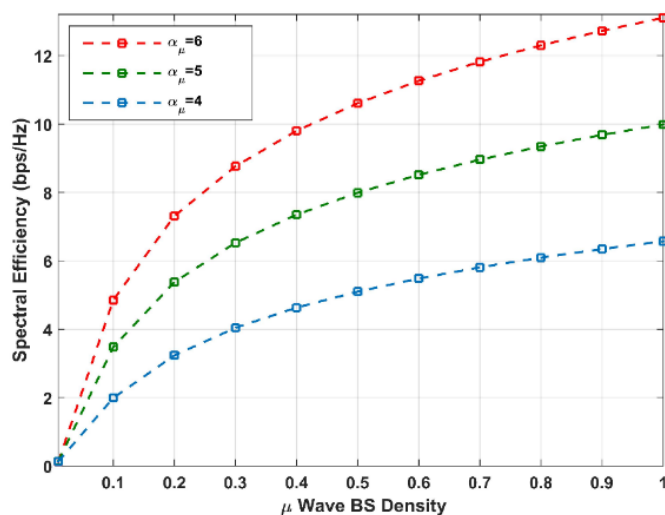


شکل ۵: مقایسه بهره‌وری طیفی در یک شبکه سلولی متراکم متشکل از تنها ایستگاه‌های پایه‌ی ماکروویو و شبکه سلولی متراکم هیبریدی نسل جدید متشکل از ایستگاه‌های پایه مایکروویو و موج میلی‌متری

Figure 5. Spectrum efficiency comparison between a dense microwave-only network and a dense hybrid network

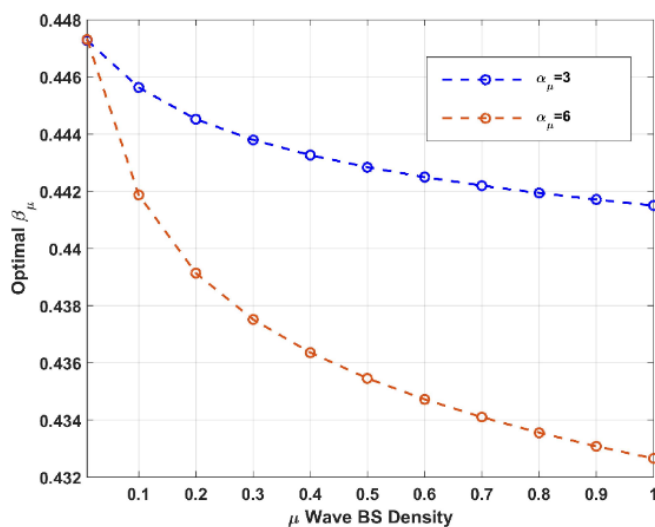
در شکل ۶، بهره‌وری طیفی برای کانال مایکروویو به ازای  $\alpha_{\mu}$  های مختلف شبیه‌سازی شده است. همانطور که در این شکل دیده می‌شود با افزایش چگالی توزیع ایستگاه‌های پایه‌ی  $\mu$ W، بهره‌وری طیفی نیز افزایش می‌یابد. علت این افزایش این است که به خاطر افزایش تعداد ایستگاه‌های پایه  $\mu$ W در یک محیط مشخص، فاصله‌ی کاربران فعال از ایستگاه‌های پایه  $\mu$ W سرویس‌دهنده

بسیار کم خواهد شد که این فاصله‌ی بسیار کم سبب می‌شود که اثر تلفات مسیر آزاد کانال به صورت نمایی (با نمای  $\alpha_\mu$ ) کاهش یابد. از طرفی با افزایش نمای تلفات مسیر  $\alpha_\mu$ ، بهبود در عملکرد بهره‌وری طیفی دیده می‌شود. با وجود اینکه افزایش نمای تلفات مسیر باعث افزایش تلفات مسیر آزاد برای دریافت سیگنال مطلوب می‌شود، اما در مقابل باعث کاهش میزان سیگنال‌های تداخلی دریافتی از ایستگاه‌های دیگر نیز می‌شود. نتایج شبیه‌سازی انجام شده در شکل ۶ نشان می‌دهد که در فرایند افزایش  $\alpha_\mu$ ، اثر کاهش سیگنال‌های تداخلی بر تضعیف سیگنال مطلوب غالب است.



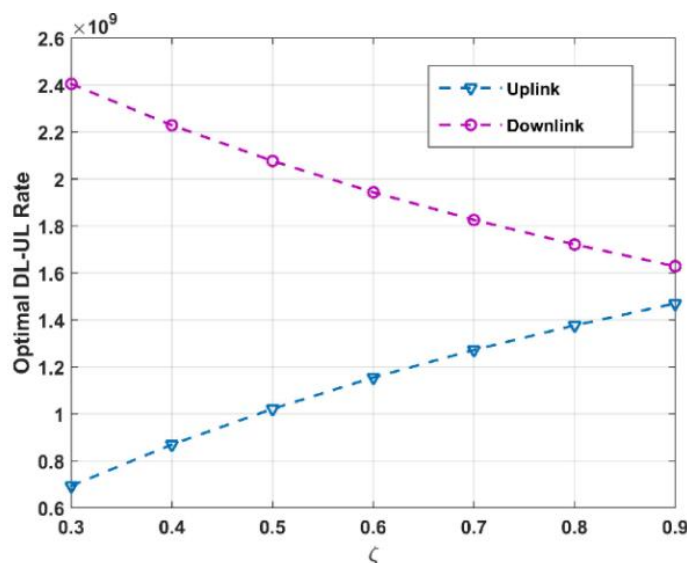
شکل ۶: تغییرات بهره‌وری طیفی در کانال موج مایکروویو با تغییر چگالی ایستگاه‌های پایه  $\mu W$  برای  $\alpha_\mu = [3 \ 4 \ 5]$   
Figure 6. Spectrum efficiency versus  $\mu W$  densities of base stations for  $\alpha_\mu = [3 \ 4 \ 5]$

در این بخش می‌خواهیم به بررسی اثر تخصیص منابع در بهبود عملکرد یک شبکه فوق متراکم بپردازیم. شکل ۷، مقدار بهینه‌ی بدست آمده  $\beta_\mu$  را بر حسب تغییرات چگالی ایستگاه پایه‌ی  $\mu W$  به ازای نمای تلفات مسیر  $\alpha_\mu = 3$  و  $\alpha_\mu = 6$  نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۷ قابل مشاهده است، با افزایش چگالی ایستگاه پایه‌ی  $\mu W$ ، مقدار  $\beta_\mu$  شروع به کاهش می‌کند. علت این رویداد این است که با افزایش چگالی ایستگاه پایه‌ی  $\mu W$ ، مقدار سیگنال به نویز به تداخل افزایش می‌یابد، بنابراین اصولاً به مقدار  $\beta_\mu$  کمتری برای برقراری تعادل بر حسب  $\beta_\mu$  معین بین دو نرخ فراسو و فرسوسو نیاز است.



شکل ۷: تغییرات ضریب  $\beta_\mu$  بهینه بر حسب تغییر چگالی ایستگاه‌های پایه  $\mu W$  بر پایه‌ی دو نمای تلفات مسیر  $\alpha_\mu = [3 \ 6]$   
Figure 7. Optimum  $\beta_\mu$  versus densities of  $\mu W$  base stations for  $\alpha_\mu = [3 \ 6]$

در شکل ۸ بر حسب تغییرات پارامتر تخصیص  $\zeta$ ، نرخ در ارتباط فراسو و فروسو با همدیگر مورد مقایسه قرار گرفته است. همانطور که مشاهده می‌شود به ازای  $\zeta$ های نزدیک به عدد ۱، مطابق انتظار، خروجی دستور linprog در برنامه متلب نشان می‌دهد که نرخ‌های فراسو و فروسو به یکدیگر همگرا می‌شوند.



شکل ۸: تغییرات نرخ ارتباط فراسو و فروسو بدست آمده از دستور linprog نرم‌افزار Matlab  
Figure 8. Uplink and downlink rate using linprog command in MATLAB

## ۶- نتیجه‌گیری

مطالعات و تحقیقات گذشته در حوزه‌ی مخابرات سلولی معمولاً تنها به باند مایکروویوی معطوف بوده است. امروزه به دلیل افزایش سرسام‌آور دستگاه‌های متصل، مالتی مدیاهای حجیم و هم چنین کمبود پهنای باند، باعث شده استفاده از امواج میلیمتری به شدت در نسل جدید مخابراتی مورد توجه قرار گیرد. امواج میلیمتری دارای فرکانس کاری بین ۳۰ تا ۳۰۰ گیگاهرتز هستند و پهنای باند بیشتری را در مقایسه با امواج مایکروویوی ارائه می‌دهند و همین امر باعث افزایش ظرفیت شبکه می‌شود. نسل جدید شبکه‌های سلولی (نسل پنجم) برای سرویس‌دهی هر چه بهتر کاربران، ترکیبی از شبکه‌های مایکروویو و شبکه‌های موج میلی‌متری هستند. از طرفی در نسل جدید شبکه سلولی، به دلیل کوچک‌تر شدن سلول‌ها به منظور پشتیبانی هر چه بیشتر از کارکرد موج میلی‌متری، معمولاً در این نوع شبکه‌ها با یک شبکه فوق متراکم سروکار داریم. در این پژوهش، شبکه‌ای متشکل از دو نوع ایستگاه پایه که یکی از آن‌ها امواج میلیمتری و دیگری امواج مایکروویوی را ارسال می‌کنند در نظر گرفته شد. ما کاربران را اساس فاصله تا ایستگاه پایه به دو محیط داخلی و خارجی با توزیع پواسون مستقر کردیم. سپس بر اساس مدل توزیع ایستگاه‌های پایه، توزیع کاربران و همچنین مدل کردن موانع و انسدادها با مدل بولین، بازده طیفی برای هر دو ارتباط فراسو و فروسو محاسبه گردید و تاثیر تراکم (چگالی) هر دو نوع ایستگاه پایه را بر روی بازده طیفی مورد ارزیابی قرار دادیم. در انتهای این پژوهش، به مدیریت منابع در ارتباط فراسو فروسو تحت فرض TDD پرداخته شد. مسأله‌ی بهینه‌سازی در نظر گرفته شده در این پژوهش این بوده است که با نرخ فروسو با تضمین داشتن حداقل نرخ فراسو حداکثر گردد. ما نشان دادیم که مسأله‌ی فرمول‌بندی شده یک مسأله‌ی بهینه‌سازی «برنامه‌ریزی خطی» است. برای حل مسأله‌ی فرمول‌بندی شده، از الگوریتم سیمپلکس استفاده گردید. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با سرویس‌دهی توأم ایستگاه پایه موج میلی‌متری و مایکروویو هم در ارتباط فراسو و هم در ارتباط فروسو، می‌توان به بهره‌وری طیفی بالا در هر دو ارتباط دست یافت و با کمک تخصیص بهینه‌ی منابع مبتنی بر تقسیم دوگانه زمانی، ارتباط فروسو بهبود قابل ملاحظه‌ای می‌یابد.



## مراجع

- [1] J. Navarro-Ortiz, P. Romero-Diaz, S. Sendra, P. Ameigeiras, J. J. Ramos-Munoz and J. M. Lopez-Soler, "A Survey on 5G Usage Scenarios and Traffic Models," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 22, no. 2, pp. 905-929, Secondquarter 2020, doi: 10.1109/COMST.2020.2971781.
- [2] M. Kamel, W. Hamouda and A. Youssef, "Ultra-Dense Networks: A Survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 4, pp. 2522-2545, Fourthquarter 2016, doi: 10.1109/COMST.2016.2571730.
- [3] J. D. Roth, M. Tummala and J. C. McEachen, "Fundamental Implications for Location Accuracy in Ultra-Dense 5G Cellular Networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 2, pp. 1784-1795, Feb. 2019, doi: 10.1109/TVT.2018.2885413.
- [4] M. Ardanuç, M. Başaran and L. Durak-Ata, "Energy Efficient Base Station Deployment in Ultra Dense Heterogeneous Networks via Poisson Hole Process," *2019 27th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/SIU.2019.8806459.
- [5] K. Venkateswararao and P. Swain, "Traffic aware sleeping strategies for Small-Cell Base Station in the Ultra dense 5G Small Cell Networks," *2020 IEEE REGION 10 CONFERENCE (TENCON)*, 2020, pp. 102-107, doi: 10.1109/TENCON50793.2020.9293754.
- [6] Q. Zhang, K. Luo, W. Wang and T. Jiang, "Joint C-OMA and C-NOMA Wireless Backhaul Scheduling in Heterogeneous Ultra Dense Networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 19, no. 2, pp. 874-887, Feb. 2020, doi: 10.1109/TWC.2019.2949791.
- [7] W. Yang, J. Zhang and J. Zhang, "On Performance of Ultra-Dense Neighborhood Small Cell Networks in Urban Scenarios," *IEEE Communications Letters*, vol. 25, no. 4, pp. 1378-1382, April 2021, doi: 10.1109/LCOMM.2020.3043205.
- [8] Q. Liu and Z. Zhang, "The Joint Allocation of Spectrum Resources with Power Control in Ultra Dense Networks," *2019 IEEE 19th International Conference on Communication Technology (ICCT)*, 2019, pp. 888-891, doi: 10.1109/ICCT46805.2019.8947261.
- [9] Trung Q. Duong; Xiaoli Chu; Himal A. Suraweera, "Cooperative Video Streaming in Ultra- dense Networks with D2D Caching," in *Ultra-Dense Networks for 5G and Beyond: Modelling, Analysis, and Applications*, Wiley, 2019, pp.267-288, doi: 10.1002/9781119473756.ch12.
- [10] J. Park, S. -L. Kim and J. Zander, "Tractable Resource Management With Uplink Decoupled Millimeter-Wave Overlay in Ultra-Dense Cellular Networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15, no. 6, pp. 4362-4379, June 2016, doi: 10.1109/TWC.2016.2540626.
- [11] R. Tao, W. Liu, X. Chu and J. Zhang, "An Energy Saving Small Cell Sleeping Mechanism With Cell Range Expansion in Heterogeneous Networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 18, no. 5, pp. 2451-2463, May 2019, doi: 10.1109/TWC.2019.2895028.
- [12] J. Park, S. -L. Kim and J. Zander, "Asymptotic behavior of ultra-dense cellular networks and its economic impact," *2014 IEEE Global Communications Conference*, 2014, pp. 4941-4946, doi: 10.1109/GLOCOM.2014.7037588.
- [13] Park, Jihong, Seong-Lyun Kim, and Jens Zander. "Resource management and cell planning in millimeter-wave overlaid ultra-dense cellular networks." *arXiv preprint arXiv:1504.05025*, 2015.
- [14] B. Li, Y. Dai, Z. Dong, E. Panayirci, H. Jiang and H. Jiang, "Energy-Efficient Resources Allocation With Millimeter-Wave Massive MIMO in Ultra Dense HetNets by SWIPT and CoMP," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 20, no. 7, pp. 4435-4451, July 2021, doi: 10.1109/TWC.2021.3058776.
- [15] M. Kim, S. -E. Hong and J. Kim, "Analysis of Directional Communication via Relaying Devices in mmWave WPANs," *IEEE Communications Letters*, vol. 16, no. 3, pp. 342-345, March 2012, doi: 10.1109/LCOMM.2011.122211.112196.

## COPYRIGHTS

©2023 by the authors. Published by the Islamic Azad University Bushehr Branch. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

