

Beamforming and Power Allocation for Coexistence of Massive MIMO Cellular Network and WiFi Network

Abbas Taherpour¹, Seyed Mehdi Hosseini Andaroli^{*2}, Vahid Ghods¹

¹ Department of Electrical and Computer Engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran

² Department of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

E-mails: optmaz.taher@gmail.com; smh_andargoli@nit.ac.ir; v.ghods@semnaniau.ac.ir

* means corresponding author

Short Abstract

The coexistence technique is a promising solution to provide enhanced fifth-generation (5G) services by sharing unlicensed bands with WiFi systems. In this paper, we study beamforming design and power allocation in a massive Multiple Input-Multiple Output (mMIMO) cellular multi-cell system coexisting with a Wireless Fidelity (WiFi) network. We design the beamforming matrices based on the Block Diagonalization (BD) method in licensed and unlicensed bands in order to create spatial nulls for interference suppression on the users of adjacent cells and the WiFi devices, respectively. In the following, the power allocation problem is formulated as a convex optimization problem to maximize the achievable sum rate while one must guarantee the minimum quality of service (QoS) corresponding to each central cell user. The formulated problem is solved by the classical convex optimization method and we present a proposed algorithm to obtain the optimal solution. In the simulation results section, it is shown that the proposed beamforming and power allocation algorithm (PAA) outperforms the conventional benchmark methods. Also, it is indicated the output of PAA is significantly close to the output of the Matlab CVX toolbox.

Keywords

Massive MIMO systems, Coexistence Communication Network, Unlicensed Band, Beamforming, Power Allocation.

1- Short Introduction (4-5 lines)

Nowadays, the growing demand for data traffic in mobile communication networks is exponentially increasing. One of the most promising solutions for solving this challenge is that wireless networks are deployed with both licensed and unlicensed bands. In cellular systems, licensed-unlicensed integration can help Base Stations (BSs) to support more users via traffic offloading and to enhance their peak data rate through carrier aggregation. The mobile networks (fifth-generation) can utilize unlicensed spectrums under the traditional standard, such as WiFi networks. WiFi networks use contention-based access with a random back-off mechanism where the WiFi device senses the channel before data transmission.

2- Proposed Work and Methodology (including comprision, simulation/experimental results and discussion)

This work studies beamforming and power allocation problems to improve coexistence performance in a multi-cell mMIMO cellular network -WiFi network. The beamforming matrices are designed based on the Block Diagonalization (BD) method in licensed and unlicensed bands in order to create spatial nulls for interference suppression on the users of adjacent cells and the WiFi devices, respectively. We derive closed-form solutions to the power allocation problem to maximize central users' sum achievable throughput so that it must guarantee a certain QoS to the central cell users. We show that the proposed power allocation algorithm is close to the CVX toolbox. Also, it is shown that the beamforming based on the BD method outperforms the ZF method which is a traditional beamforming method.

3- Conclusion (4-5 lines)

In this paper, we have investigated the beamforming and the problem of power allocation to un/licensed band users in a multi-cell mMIMO network coexisting with a WiFi Network. The BD beamforming method was applied in order to eliminate interference in un/licensed bands. Also, We presented a power allocation problem to maximize the sum achievable throughput of central cell users. The numerical simulation showed that the solution optimality of the proposed algorithm is significantly close to the results obtained from the CVX toolbox, besides BD method outperforms the ZF method as a traditional beamforming method.

4- References (2-3 references)

- [1] Li, P., Han, L., Xu, S., Wu, D. O., & Gong, P. (2020). Resource allocation for 5G-enabled vehicular networks in unlicensed frequency bands. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69(11), 13546-13555. <https://doi.org/10.1109/TVT.2020.3030322>.
- [2] Shahid, A., Maglogiannis, V., Ahmed, I., Kim, K. S., De Poorter, E., & Moerman, I. (2019). Energy-efficient resource allocation for ultra-dense licensed and unlicensed dual-access small cell networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 20(3), 983-1000. <https://doi.org/10.1109/TMC.2019.2953845>.
- [3] Elsherif, A. R., Chen, W. P., Ito, A., & Ding, Z. (2015). Resource allocation and inter-cell interference management for dual-access small cells. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 33(6), 1082-1096. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2015.2416990>.

شکل‌دهی پرتو و تخصیص توان برای همزیستی شبکه‌های سلولی چندورودی-چندخروجی حجیم با شبکه‌های WiFi

عباس طاهرپور باریکی

دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

سید مهدی حسینی اندارگلی

دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل - بابل

وحید قدس

دانشیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

چکیده

روش همزیستی یک راه‌حل امیدوارکننده برای ارائه خدمات پیشرفته نسل پنجم (5G) با به اشتراک‌گذاری باندهای بدون مجوز با سیستم‌های WiFi است. در این مقاله، ما طراحی ماتریس شکل‌دهی پرتو و تخصیص توان را در سیستم چند سلولی چندورودی-چندخروجی حجیم (mMIMO) را که با یک شبکه WiFi همزیستی می‌کنند، مطالعه می‌کنیم. ماتریس‌های شکل‌دهی پرتو را بر اساس روش قطری‌سازی بلوکی (BD) در باندهای دارای مجوز و بدون مجوز به منظور ایجاد فضای پوچ برای از بین بردن تداخل بوجود آمده به ترتیب بر روی کاربران سلول‌های مجاور و دستگاه‌های WiFi طراحی می‌کنیم. در ادامه، مسئله تخصیص توان به منظور بیشینه کردن مجموع گذردهی قابل دستیابی به صورت یک مسئله بهینه‌سازی محدب فرمول‌بندی می‌گردد. علاوه بر این در این مسئله حداقل کیفیت سرویس (QoS) مربوط به هر کاربر سلول مرکزی را تضمین می‌گردد. مسئله فرمول‌بندی شده با روش کلاسیک بهینه‌سازی محدب حل می‌شود و ما یک الگوریتم پیشنهادی برای به دست آوردن جواب بهینه ارائه خواهیم داد. در بخش نتایج شبیه‌سازی، نشان داده شده است که طراحی شکل‌دهی پرتو و الگوریتم تخصیص توان (PAA) پیشنهادی نسبت به روش‌های معیار مرسوم عملکرد بهتری دارد. اضافه‌بر این، نشان داده می‌شود که الگوریتم PAA به خروجی بدست آمده از CVX بسیار نزدیک می‌باشد.

کلمات کلیدی

سیستم‌های چندورودی-چندخروجی حجیم، شبکه‌های همزیست مخابراتی، باند بدون مجوز، شکل‌دهی پرتو، تخصیص توان.

نام نویسنده مسئول: دکتر سید مهدی حسینی اندارگلی

ایمیل نویسنده مسئول: smh_andargoli@nit.ac.ir

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۰۱

تاریخ(های) اصلاح مقاله: ۱۴۰۲/۰۷/۰۳ و ۱۴۰۲/۰۸/۲۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۱۳

۱- مقدمه

(MIMO^۲) شناخته می‌شود، رویکرد مناسبی جهت بهبود قابل توجه بهره‌وری طیفی است [۲]. به طور کلی سیستم‌های MIMO به سیستم‌های مخابراتی گفته می‌شود که دارای چند آنتن در فرستنده و چند آنتن در گیرنده هستند. با استفاده از چندین آنتن فرستنده و گیرنده، بازدهی سیستم بدون نیاز به افزایش پهنای باند و یا توان مورد نیاز، افزایش می‌یابد. تحت تحقیقات گسترده‌ای، نشان داده شده است که در شرایط انتشار موج با پراکندگی قوی با بکارگیری آرایه‌های چند آنتنی، هم در فرستنده و هم در گیرنده عملکرد بسیار بهتری نسبت به سیستم‌های بی‌سیم نقطه به نقطه تک آنتن بدست می‌آید. استفاده از آنتن‌های متعدد باعث افزایش بهره‌ی چندگانگی^۳ و همچنین چند برابر شدن بهره‌ی ارسال و دریافت می‌شود. به کار بردن چندین آنتن در فرستنده و گیرنده موجب افزایش ابعاد فضایی سیگنال می‌شود که نتیجه آن، افزایش بهره درجه‌ی آزادی است. با استفاده از آرایه‌ی آنتن‌ها در ایستگاه‌های

در دو دهه‌ی اخیر، به طور متوسط هر ده سال شاهد ظهور یک نسل جدید از سیستم‌های مخابراتی سلولی هستیم. از سال ۲۰۲۰ به تدریج سرویس‌های نسل پنجم (5G) مخابراتی عرضه تجاری شده است و تا هم اکنون نیز با سرعت بسیار زیادی در حال توسعه می‌باشد. در نسل پنجم مخابراتی از روش‌های متنوعی برای بهبود عملکرد سیستم نسبت به نسل‌های قبل از آن بهره برده شده است. یکی از مهمترین وجه تمایز نسل‌های مختلف سیستم‌های مخابرات سلولی بکارگیری روش‌های خاص در دسترسی چندگانه می‌باشد. در نسل پنجم مخابراتی از روش دسترسی چندگانه تسهیم فضایی^۱ (SDMA) بهره برده می‌شود [۱]. در واقع در این نوع شبکه‌ها با کمک روش چند آنتنه در فرستنده، از روش SDMA برای جداسازی کانال‌های ارتباطی کاربران استفاده می‌شود. استفاده از آنتن‌های متعدد که به عنوان فناوری چندورودی-چند خروجی

^۲ Multiple Input-Multiple Output^۳ Multiplexing Gain^۱ Spatial Division Multiple Access

مورد بهره‌برداری عملی قرار گرفته است. در شبکه‌های سنتی جهت همزیستی مسالمت‌آمیزی بین باندها از تقسیم زمانی اشتراک گذاری کانال استفاده می‌شده است. این در حالی است که در شبکه‌های نسل آینده با توجه به افزایش فرکانس مرکزی باند کاری و امکان ساخت آنتنهای آرایه‌ای حجیم با هزینه مناسب در ایستگاه‌های پایه، این امکان فراهم شده است که با استفاده از تقسیم فضایی، کاربران شبکه موبایل و کاربران باند آزاد بتوانند همزمان از طیف بدون مجوز استفاده نمایند بدون اینکه روی هم اثر تداخلی زیادی وارد نمایند [۶]. در سیستم‌های مخابراتی 5G، یکپارچه‌سازی باندهای مجاز و بدون مجوز به اپراتورهای تلفن این امکان را می‌دهد تا از طریق بارگیری ترافیک به کاربران بیشتری خدمات دهند و یا نقطه‌ای اوج (پیک) سرعت را از طریق تجمع حامل‌ها، افزایش دهند. علاوه بر این، فناوری‌های بدون مجوز ممکن است بازارهای عمودی جدید و درآمد متناظر به آنها را بوجود آورد. از طرف دیگر، همزیستی هماهنگ با سایر فناوری‌های فعال در طیف غیرمجاز، مانند IEEE 802.11x (Wi-Fi)، نیز باید تضمین شده باشد. این به این دلیل است که سیستم‌های Wi-Fi با یک دسترسی مبتنی بر برخورد^{۱۳} با مکانیزم پس‌نشینی تصادفی متکی^{۱۴} هستند [۷]. بنابراین یکی از مهمترین چالش‌های این همزیستی این است که جابه‌جایی مداوم ایستگاه‌های پایه به باندهای غیرمجاز، باعث اشغال کانال Wi-Fi می‌شود و در نتیجه دستگاه‌های Wi-Fi، از دسترسی به کانال‌های ارتباطی خود منع می‌شوند.

در سال ۲۰۰۹، یک مقاله تحلیلی در مورد بررسی اثر تجمع حاملی (CA^{۱۵}) برای دسترسی به دو باند ۲GHz و ۵GHz توسط نویسندگان تحت سناریوی استاندارد ارتباطات بین المللی سیار-پیشرفته (IMTA^{۱۶}) نگارش می‌شود [۸]. در این مقاله کوشش می‌شود که بر پایه‌ی معیارهایی همچون بهره‌ی کانال‌ها و تضعیف فرکانسی آن‌ها، کاربران به یکی از دو باند که یکی از آن‌ها مجوزدار و دیگری باند بدون مجوز است، تخصیص داده شود. برپایه‌ی طرح‌های پیشنهادی تخصیص کاربران به باندها، گذردهی شبکه، مقدار تاخیر و شعاع تحت پوشش مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. نویسندگان مرجع [۹] در سال ۲۰۱۵ جهت بررسی عملکرد یک سیستم سلولی با استفاده از تجمع حاملی با وجود چندین طیف بدون مجوز در دسترس شبیه‌سازی گسترده‌ای را انجام دادند. در این مقاله تعداد زیادی از فرضیات تحت سناریوهای مختلف جهت شبیه‌سازی در نظر گرفته می‌شود که این کمک می‌کند تا تصویری جامع از تأثیر تجمع حاملی بر عملکرد شبکه سلولی بدست آید. در طرح‌های پیشنهادی نویسندگان، هر یک از کاربران بسته به معیارهای در نظر گرفته شده به تعدادی از باندهای بدون مجوز (زیرحامل‌های بدون مجوز) اختصاص داده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که توابع عملکردی شبکه مانند نرخ قابل دسترس شبکه و تاخیر در شبکه در تعدادی از معیارها به طور قابل ملاحظه‌ای از عملکرد شبکه تحت فرض عدم دسترسی به تکنیک تجمع حاملی با وجود در نظر گرفتن ملاحظات پیچیدگی طرح‌های پیشنهادی، عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. در [۱۰]، یک طرح جدید تجمع حاملی برای سیستم‌های MIMO LTE با هدف دسترسی به طیف مجوز/بدون مجوز پیشنهاد شده است که در آن منابع یک گره تکامل یافته به صورت اشتراکی در زیرباندهای مختلف (مجوزدار و بدون مجوز) به کاربران شبکه تخصیص داده می‌شود. هدف از تخصیص منابع در این مقاله بیشینه کردن مجموع نرخ قابل دستیابی تمام کاربران است در حالی است

پایه، می‌توان با تعدادی کاربر که از لحاظ فضایی مستقل از هم هستند، به صورت همزمان ارتباط برقرار کرد. یکی از مهمترین تفاوت نسل پنجم مخابراتی نسبت به نسل چهارم، بهره‌گیری از تعداد بسیار بیشتری از آرایه‌های آنتنی می‌باشد، که چنین سیستم‌های تحت عنوان سیستم‌های MIMO حجیم^۴ شناخته می‌شوند [۳]. با کمک mMIMO می‌توان با پردازش سیگنال نسبتاً ساده، پتانسیل قابل توجهی برای بهبود قابلیت اطمینان لینک^۵ و افزایش نرخ ارسال اطلاعات بوجود آورد. با افزایش آنتن‌های ایستگاه پایه^۶، ظرفیت و بازدهی طیفی^۷ سیستم بدون نیاز به افزایش توان ارسال یا پهنای باند، حتی با داشتن فرستنده و گیرنده‌های ساده افزایش می‌یابد. وقتی ابعاد سیستم MIMO بزرگ شود نه تنها درجه‌ی آزادی فضایی افزایش می‌یابد، بلکه توان ارسال و میزان تداخلات نیز کاهش می‌یابد. با توجه به این خاصیت، عملیات پردازش این سیستم‌ها بسیار ساده‌تر خواهد شد، به گونه‌ای که حتی استفاده از فیلتر منطبق (MF)^۸ برای آشکارسازی چنین سیستم‌هایی، عملکردی بهینه خواهد داشت. اگر تعداد آنتن‌های ایستگاه پایه خیلی بیشتر از تعداد کاربرها باشد، اثرهای نامطلوب ناشی از عدم دانستن اطلاعات کامل کانال و یا خطای ایجاد شده در تخمین کانال در شرایط محوشدگی سریع^۹ و تداخل‌های ایجاد شده به صورت چشمگیری کاهش پیدا می‌کند و تقریباً به صفر می‌رسد [۴]. در واقع با استفاده از تکنیک mMIMO، می‌توان به شکل‌دهی پرتو در سیستم‌های مخابراتی دست یافت. روش‌های شکل‌دهی پرتو با توجه به نیاز طراح سیستم می‌تواند با کمک روش‌های مختلفی انجام شود. در تعدادی از مراجع این طراحی برپایه حل یک مسئله‌ی بهینه‌سازی برای دست یافتن بیشینه گذردهی شبکه یا کمینه کردن احتمال خطای بیت بدست می‌آید که به این روش شکل‌دهی پرتو بهینه‌سازی شده گفته می‌شود. وابسته به نوع مسئله‌ای تعریف شده، در این روش تداخل می‌تواند صفر و یا مقدار حداقلی برای آن در نظر گرفته شود. در تعدادی از مراجع از روش تحمیل صفر (ZF^{۱۰}) جهت شکل‌دهی پرتو استفاده می‌شود. در این روش سعی می‌شود که تداخل به طور کلی برابر صفر گردد. این روش یک روش متداول در ایجاد دسترسی چندگانه بین کاربران در یک سلول می‌باشد. در وضعیتی که با سناریوهای چندآنتنه در سمت کاربران نهایی سرو کار داریم، می‌توانیم از روش‌های تحمیل صفر گسترش یافته یا قطری‌سازی بلوکی (BD^{۱۱}) استفاده نماییم. استفاده از روش MMSE^{۱۲} در آشکارسازی نیز روش دیگر شکل‌دهی پرتو است که در برخی از مسئله‌های مطرح شده می‌تواند تبدیل به روش ZF شود.

با وجود استفاده از روش‌های امیدوارکننده در نسل پنجم مخابراتی، با توجه به اینکه در سال‌های اخیر با افزایش نمایی تعداد کاربران و همچنین تقاضا برای دسترسی به سرویس‌های سرعت بالا نظیر شبکه‌های اجتماعی، بازی‌های آنلاین و غیره به صورت انفجاری افزایش یافته است، کمبود طیف اختصاصی به کاربران برای دریافت سرویس‌های سرعت بالا همچنان یک چالش بزرگ در این نسل از شبکه‌های مخابراتی می‌باشد. با توجه به محدودیت‌هایی که در این نوع شبکه‌ها وجود دارد، محققان در سال‌های اخیر راهکارها و ایده‌های متنوعی برای حل این چالش پیشنهاد داده‌اند. بهره گرفتن از منابع طیفی کمکی می‌تواند یک راه‌حل جذاب برای این چالش باشد [۵]. در حال حاضر در شبکه‌های مخابراتی نسل پنجم با توجه به درخواست فزاینده کاربران از ارتباطات بی‌سیم، استفاده از طیف بدون مجوز و آزاد و همزیستی مسالمت آمیز با کاربران باندهای آزاد

¹¹ Block Diagonalization¹² Minimum Mean Square Error¹³ Contention¹⁴ Random backoff¹⁵ Carrier Aggregation¹⁶ International Mobile Telecommunications-Advanced⁴ Massive MIMO (mMIMO)⁵ Link Reliability⁶ Base Station (BS)⁷ Spectral Efficiency⁸ Matched Filter⁹ Fast Fading¹⁰ Zero-Forcing

که شکل‌دهی پرتو به گونه‌ای انجام می‌شود که در راستای کاربران دیگر شبکه‌ها نال انداخته (ایجاد تداخل صفر) شود. مسأله‌ی فرمول‌بندی شده در این مقاله شامل حل یک مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی مخلوط (MINLP) است که یک مسأله‌ی بهینه‌سازی نامحدوب محسوب می‌شود. برای حل مسأله‌ی فرمول‌بندی شده، نویسندگان یک الگوریتم زیر بهینه با پیچیدگی کم بر اساس روش تجزیه لاگرانژی دوگان ارائه می‌شود. نویسندگان در [۱۱] یک شبکه سلولی همزیست با یک شبکه WiFi در نظر گرفته شده است. هدف نویسندگان در این مقاله ارائه‌ی طرح‌هایی برای بهبود عملکرد شبکه‌ی سلولی است. در مدل سیستم مطرح شده در این مقاله، با کمک تنظیم آستانه‌ی تداخلی، هم کاربران سلولی و هم دستگاه‌های WiFi می‌توانند به طور همزمان ارسال و دریافت اطلاعات داشته باشند. در این طرح پیشنهادی، حداکثر میزان مجاز تداخل (آستانه‌ی تداخلی)، حداکثر تعداد کاربران تخصیصی به باندهای غیرمجاز تعیین می‌گردد. علاوه بر این برای عدم تداخل بین سلولی از طرح تحمیل صفر بهره گرفته می‌شود. نتایج شبیه‌سازی‌ها در این مقاله نشان می‌دهد که طرح پیشنهادی نویسندگان از طرح مرسوم LBT عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. البته باید یادآوری کرد که در این مقاله برای تخصیص توان و تخصیص کاربر به باندهای مجاز و غیرمجاز، هیچ مسأله‌ی تخصیص منابعی پیشنهاد و مطرح نمی‌گردد. در سال ۲۰۲۱، Zimmo به همراه همکارانش در [۱۲]، مسأله‌ی تخصیص توان و توان را با هدف بیشینه کردن گذردهی شبکه تحت دو سناریو مورد بررسی قرار داده‌اند. در سناریوی اول فرض می‌شود که تنها یک باند بدون مجوز در کنار چند باند مجوزدار وجود دارد. این در حالی است که برای سناریوی دوم، فرض می‌شود هم برای باندهای بدون مجوز و هم برای باندهای مجوزدار چندین باند در دسترس می‌باشد. در مثل سیستم طرح شده توسط نویسندگان، شبکه‌ی تک سلولی در نظر گرفته شده است که در آن یک ایستگاه پایه تک آنتنه و یک کاربر تک آنتنه وجود دارد که به صورت همزیست با یک شبکه‌ی Wi-Fi در حال برقراری ارتباط است. در مدل سیستم [۱۳]، یک شبکه‌ی تک سلولی با ایستگاه پایه‌ی تک آنتنه به طور همزیست با یک شبکه‌ی WiFi در نظر گرفته شده است. در این مدل سیستم، به دلیل استفاده از روش TDMA جهت استفاده از باند بدون مجوز، عملاً تداخلی بین ایستگاه پایه‌ی سلول و کاربران WiFi رخ نخواهد داد. با توجه به مدل سیستم توصیف شده، نویسندگان مسأله‌ی تخصیص منابع را به منظور بیشینه کردن مجموع گذردهی قابل دستیابی تمام کاربران در شبکه‌ی سلولی و شبکه‌ی WiFi مطرح می‌کنند.

یکی از چالش‌های مهم در شبکه‌های مخابراتی همزیست، تداخل حاصل از انتقال کاربران متعلق به کانال مجاز به کانال بدون مجوز است، به ویژه آنکه این کانال توسط شبکه‌ی WiFi مورد استفاده قرار گرفته باشد. در این صورت امکان رخ دادن عدم دسترسی به کانال برای دستگاه‌های WiFi بوجود آید. نویسندگان در [۱۴] مسأله "همزیستی شبکه‌ی WiFi و شبکه‌ی مخابراتی مبتنی بر طرح دسترسی چندگانه توان TDMA/FDMA مورد بررسی قرار می‌گیرد. در مدل سیستم این مقاله، یک شبکه‌ی مخابراتی تک سلولی در نظر گرفته شده است که در آن یک ایستگاه پایه تک آنتنه به چندین کاربر تک آنتنه به صورت ارتباط فروسو اطلاعات مبادله می‌نماید. نویسندگان در این مقاله با ارائه‌ی طرح تخصیص منبع عادلانه درصد آن بوده‌اند که مجموع نرخ کاربران در باندهای مجاز و غیرمجاز را بیشینه نمایند. از طرفی با توجه به در نظر گرفتن طرح TDMA/FDMA توان، تداخلی بین شبکه سلولی و شبکه‌ی WiFi بوجود نمی‌آید. Li به همراه همکارانش در مرجع [۱۵]، مسئله تخصیص منابع با هدف بیشینه کردن مجموع گذردهی تجهیزات کاربران خودرویی (VUEs) تحت قیدهای قابلیت اطمینان و تأخیر برای ارتباطات خودرویی و همچنین قیدهای کیفیت سرویس برای شبکه Wi-Fi در هر دو باند مجاز و بدون مجوز مورد

مطالعه قرار دادند. در مدل سیستم در نظر گرفته شده در [۱۳]، VUEها از طرح LBT برای دسترسی به باندهای بدون مجوز و کاهش تداخل در تجهیزات کاربر WiFi (WUEs) بهره برده‌اند. در این مقاله، نویسندگان مسئله تخصیص منابع را به صورت یک مسئله بهینه‌سازی MINLP فرموله کرده‌اند. از آنجایی که حل مسائل MINLP دشوار است، یک الگوریتم دو مرحله‌ای با پیچیدگی کم توسط نویسندگان پیشنهاد می‌گردد. در این الگوریتم پیشنهادی، در مرحله نخست، فاکتور زمان در طرح LBT و تعداد VUEهای اختصاص داده شده به باند بدون مجوز تعیین می‌شوند و سپس در مرحله دوم با کمک تعدادی ساده‌سازی، مسئله فرموله شده به یک مسئله بهینه‌سازی محدب تبدیل و سپس حل می‌گردد. شبکه‌های نسل پنجم و فراتر از آن برای استفاده مؤثر از منابع طیف جهت برآورد الزامات مختلف کیفیت خدمات (QoS) طراحی شده‌اند. باندهای فرکانسی بدون مجوز مورد استفاده توسط شبکه‌ی WiFi عمدتاً همیشه به طور کامل اشغال نمی‌شوند. در حال حاضر صنعت تلفن همراه به طور جدی در حال کار کردن بر روی همزیستی تلفن همراه و WiFi می‌باشد. به طور خاص، رادیو جدید 5G در طیف کانال بدون مجوز (NR-U) در ارتباط فراسو و فرسو در بازه‌ی حداکثر مدت زمان اشغال کانال (MCOT) پشتیبانی می‌کند. نویسندگان در مرجع [۱۶] با تخصیص توان و توان، نرخ کل در هر دو ارتباط فراسو و فروسو در NR-U را در طول MCOT در حالی بیشینه می‌کنند که ملاحظات مربوط به قید همزیستی منصفانه با WiFi، نیز در نظر گرفته می‌شود. در مدل سیستم بکار گرفته شده انصاف در دو مرحله تضمین می‌شود: (۱) تنظیم پارامترهای مربوط به دسترسی NR-U برای دستیابی به انصاف متناسب، و (۲) شامل عادلانه بودن 3GPP از دیدگاه گذردهی به عنوان یک محدودیت در به حداکثر رساندن توان NR-U. تجزیه و تحلیل عددی و شبیه‌سازی عملکرد برتر الگوریتم تخصیص منابع پیشنهادی را در مقایسه با استراتژی‌های استقرار مرسوم نشان داده‌اند. در [۱۷] یک شبکه سلولی متشکل از چندین ماکروسول و چندین سلول کوچک در نظر گرفته شده است که در آن کاربران به کاربران سلول کوچک اختصاص داده می‌شوند، می‌توانند به هر دو باند دارای مجوز و بدون مجوز اختصاص داده شوند، در حالی که کاربران ماکروسول فقط به باند دارای مجوز اختصاص داده می‌شوند. در [۱۷]، مسئله تخصیص منابع برای به حداکثر رساندن تابع مطلوبیت مورد بحث قرار گرفته است. در مقاله مرجع [۱۸] دو راه‌حل برای افزایش ظرفیت شبکه و کارایی طیفی پیشنهاد می‌شود: انتقال به طیف بدون مجوز و پیاده‌سازی مجازی‌سازی منابع بی‌سیم. علاوه بر این، از آنجایی که این راه‌حل‌ها سرعت انتقال داده را افزایش می‌دهند، در نتیجه مصرف انرژی را افزایش می‌یابد، این مقاله بهینه‌سازی توان-آگاهانه را به عنوان یک راه حل برای حل این چالش پیشنهاد می‌کند. به طور کلی کار در باند بدون مجوز یک چالش است زیرا باندهای ۵ گیگاهرتز عمدتاً توسط سیستم‌های Wi-Fi مورد استفاده قرار می‌گیرد. بر اساس این چالش، نویسندگان یک راه‌حل همزیستی LTE/Wi-Fi مبتنی بر مجازی‌سازی منابع بی‌سیم با اشتراک زمانی را پیشنهاد می‌دهند که تخصیص منبع/قطعه دسترسی مشترک (AP) و مشکلات کنترل توان را برای هر دو فناوری در نظر می‌گیرد. بر این اساس نویسندگان یک مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی مخلوط را فرموله می‌کنند و با استفاده از تجزیه دوگانه لاگرانژی آن را حل می‌نمایند و در انتها الگوریتمی ابتکاری با پیچیدگی کم را برای حل این مسأله پیشنهاد می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که همزیستی Wi-Fi و LTE را می‌توان در باند بدون مجوز با صرفه‌جویی در مصرف انرژی با استفاده از مجازی‌سازی به دست آورد. در مقاله‌ی [۱۹]، با هدف دستیابی به همزیستی کارآمد با سیستم WiFi و بهبود کارایی استفاده از منابع زمانی، طیفی و مکانی، ابتدا فضای انتقال به دو زیرفضا تقسیم می‌شود، جایی که داده‌های ارسال شده توسط تجهیزات کاربر سلولی (UEs) در یک قسمت قرار می‌گیرند. زیرفضا و

جدول ۱. مقایسه کارهای گذشته با کار انجام شده در مقاله حاضر

مرجع	موضوع مورد مطالعه	تمایزها با مقاله حاضر
[۸]	بررسی اثر CA در دو کانال 2GHz و 6GHz IMTA و تخصیص کانال به کاربران و استخراج معیارهایی برای تخصیص باند به کاربران	در این مقاله اساساً موضوع نسل پنجم و بکارگیری تکنیک mMIMO بحث نشده
[۹]	شبیه سازی و بررسی اثر CA با فرض وجود چندین کانال بدون مجوز تحت معیارهای مختلف مانند نرخ و تاخیر	موضوع نسل پنجم و بکارگیری تکنیک mMIMO بحث نشده
[۱۰]	تخصیص منابع در شبکه‌ی MIMO-LTE با تخصیص حامل و توان	موضوع نسل پنجم و بکارگیری تکنیک mMIMO و چگونگی حذف تداخل بحث نشده
[۱۱]	یافتن حداکثر کاربران تخصیصی به باندها و حداکثر آستانه تداخلی در شبکه‌های مخابراتی همزیست	در مقاله ما طرح‌های پیشنهاد می‌شود که به طور کامل تداخل حذف گردد
[۱۲]	تخصیص توأم زمان و توان در یک سیستم تک آنتنه در ایستگاه پایه و کاربران با طرح دسترسی چندگانه TDMA	موضوع نسل پنجم و بکارگیری تکنیک mMIMO بحث نشده
[۱۶]	تخصیص توأم زمان و توان برای بیشینه کردن گذردهی هم در ارتباط فراسو و هم در ارتباط فروسو	چگونگی حذف تداخل بحث نشده و در آن میحت چندسلولی دنبال نشده است.
[۱۷]	تخصیص منابع در یک شبکه چند سلولی با در نظر گرفتن محدودیت تخصیص کاربران	چگونگی حذف تداخل بحث نشده و تنها بررسی اثر MIMO در آن دیده می‌شود
[۱۹]	تخصیص توان و طراحی ماتریس شکل‌دهی پرتو در یک سیستم mMIMO نسل پنجم مورد بحث قرار گرفته است	چگونگی حذف تداخل و در نظر گرفتن سلول‌های مجاور بحث نشده
[۲۰]	تخصیص توان و تخصیص کاربران به باندها در یک شبکه‌ی چندسلولی همزیست mMIMO	برای کنترل تداخل آستانه‌ی تداخلی در نظر گرفته شده و به موضوع حذف تداخل نپرداخته شده است

۲- مدل سیستم

شکل ۱، یک شبکه‌ی سلولی مخابراتی را در ارتباط فروسو نشان می‌دهد که در آن سلول مرکزی با اندیس ۰، توسط N_c سلول به عنوان سلول‌های مجاور تداخلی احاطه شده است. هر سلول دارای یک BS مجهز به تعداد زیاد M آنتن می‌باشد، بنابراین در این وضعیت یک شبکه سلولی mMIMO خواهیم داشت. برای راحتی کار خواننده، در جدول ۲، خلاصه‌ای از کمیت‌ها و نمادگذاری‌هایی که در ادامه این مقاله می‌آید بیان شده است. همانطور که در شکل ۱، مشخص است، علاوه بر K_0 کاربر در سلول مرکزی، K_W دستگاه WiFi

داده‌های ارسال شده توسط دستگاه‌های اینترنت اشیا که با کاربران WiFi از طریق کنترل توان همزیستی دارند، در زیرفضای دیگر قرار دارند. سپس، همزیستی بین UE های سلولی، دستگاه های اینترنت اشیا، و کاربران WiFi به عنوان یک مدل بهینه سازی با هدف به حداکثر رساندن گذردهی کل سیستم سلولی از طریق تخصیص توان و تخصیص کانال فرموله می‌شود. اگرچه مسأله بهینه‌سازی حاصل یک مسأله‌ی بهینه‌سازی از نوع MINLP است، اما نویسندگان آن را به دو زیر مسأله‌ی جدا از هم تجزیه می‌کنند و یک الگوریتم تکراری برای حل مؤثر آنها پیشنهاد می‌دهند. در [۲۰] به موضوع تخصیص توأم توان و تخصیص کاربر به باندهای مجوزدار و بدون مجوز به منظور بیشینه کردن گذردهی شبکه پرداخته اند. در این مقاله نویسندگان از روش ZF برای ایجاد دسترسی چندگانه برای کاربران مطلوب بهره برده‌اند. در این مقاله مسئله‌ی تخصیص توان به کاربران مطلوب با در نظر گرفتن ملاحظات مربوط به تداخل در باند مجوزدار و بدون مجوز مورد بحث و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. همچنین در این مقاله، معیارهایی را برای تخصیص کاربران به دو باند مجوزدار و بدون مجوز استخراج می‌گردد. برای درک بهتر و مقایسه دقیق‌تر کارهایی که تاکنون انجام شده است با کاری که ما در این مقاله ارائه داده‌ایم، در جدول ۱ مقایسه کوتاهی بین مراجع مختلف که در حوزه‌ی تخصیص منابع در شبکه‌های همزیست کار کرده‌اند با کار ما ارائه شده است.

به طور کلی می‌توان گفت که مسئله‌ی تخصیص منابع در شبکه‌های 5G همزیست با شبکه‌های WiFi، یک موضوع تازه می‌باشد، به طوری که موضوعات و چالش‌های حل نشده‌ی بسیاری همچنان در آن باقی مانده است. نوآوری‌های این مقاله را می‌توان در چهار بخش زیر خلاصه کرد:

- ۱- مسئله تعریف شده یک مسئله‌ی جدید و با یک مدل سیستم بدیع می‌باشد. ما یک شبکه چند سلولی mMIMO همزیست با WiFi پیشنهاد می‌دهیم که در آن ملاحظات تداخلی (تداخل در باند مجوزدار و باند بدون مجوز) و قیدهای کیفیت سرویس در نظر گرفته می‌شود.
- ۲- هدف ما در این پژوهش، طراحی ماتریس شکل‌دهی پرتو بر اساس روش قطری‌سازی بلوکی به منظور ایجاد فضای تهی برای سایر کاربران موجود در باند مجوزدار و بدون مجوز می‌باشد.
- ۳- مسئله‌ی تخصیص توان به کاربران باندهای مجوزدار و بدون مجوز به صورت یک مسئله‌ی بهینه‌سازی محدب فرمول‌بندی و سپس بر پایه تحلیل‌های ریاضی مبتنی بر روش‌های کلاسیک بهینه‌سازی محدب، الگوریتمی برای یافتن جواب بهینه با پیچیدگی کم ارائه می‌گردد.
- ۴- در بخش شبیه‌سازی، طرح پیشنهادی برای شکل‌دهی پرتو و همچنین الگوریتم پیشنهادی تخصیص توان (PAA) با روش‌های و معیارهای مرسوم عملکردی مورد مقایسه قرار می‌گیرد. اضافه‌بر این، نشان داده الگوریتم PAA با خروجی بدست آمده از CVX مورد آنالیز و بحث قرار می‌گیرد.

در ادامه در این مقاله، در بخش ۲، به تشریح مدل سیستم و مدل سیگنال پرداخته می‌شود. طراحی ماتریس شکل‌دهی پرتو به منظور حذف تداخل در باند مجوزدار و بدون مجوز موضوعی است که در در بخش ۳ مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. در بخش ۴، مسأله‌ی تخصیص کاربر به باندها با در نظر گرفتن ملاحظات حداقل نرخ تضمین شده کاربران مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. بخش ۵ این مقاله به شبیه‌سازی عددی و بخش ۶ این مقاله به نتیجه‌گیری اختصاص دارد.

جدول ۲- معرفی و تعریف کمیت‌های بکار رفته

نماد	توضیح کمیت
K_i	تعداد کاربران در سلول i ام
K_w	تعداد دستگاه‌های فعال WiFi
W_i	ماتریس شکل‌دهی پرتو در سلول i ام غیرمرکزی
W_l	ماتریس شکل‌دهی پرتو در سلول مرکزی در باند مجوزدار
W_u	ماتریس شکل‌دهی پرتو در سلول مرکزی در باند بدون مجوز
H_l	ماتریس ضرایب کانال بین ایستگاه پایه و کاربران در سلول مرکزی در باند مجوزدار
H_u	ماتریس ضرایب کانال بین ایستگاه پایه و کاربران در سلول مرکزی در باند بدون مجوز
G_{ij}	ماتریس ضرایب کانال تداخلی بین ایستگاه پایه در سلول i ام و کاربران در سلول j ام در باند مجوزدار
$R_{l,k}$	گذردهی کاربر k ام در سلول مرکزی در باند مجوزدار
$R_{u,k}$	گذردهی کاربر k ام در سلول مرکزی در باند بدون مجوز

اخیر، در واقع سمبل‌های ارسالی $x_{s,ij}$ معرف سمبل اطلاعات ارسالی از ایستگاه پایه به کاربر i ام متعلق به سلول i ام غیرمرکزی می‌باشد، که به صورت متغیرهای تصادفی i.i.d. گوسی مختلط با تقارن دایروی^{۱۷}، یعنی $x_{s,ij} \sim \mathcal{CN}(0,1)$ در نظر گرفته می‌شود [۱۸]. همانطور که در بالا اشاره شد، در سلول مرکزی، علاوه بر باند مجاز، باند غیرمجاز نیز در دسترس می‌باشد و مجموعه‌ی تمام کاربران در سلول مرکزی را با S نشان می‌دهیم. از بین کاربران متعلق به S ، مجموعه‌ی از کاربرانی که استفاده کننده از باند مجازند با S_l و کاربرانی که از باند غیرمجاز استفاده می‌کنند با S_u نمایش داده می‌شوند. با توجه به جدا بودن دو باند مذکور، پر واضح است که داشته باشیم: $S_l \cap S_u = \emptyset$ و $S_l \cup S_u = S$. سیگنال ارسالی از باند مجاز و غیرمجاز در سلول مرکزی را می‌توان به شکل زیر نوشت:

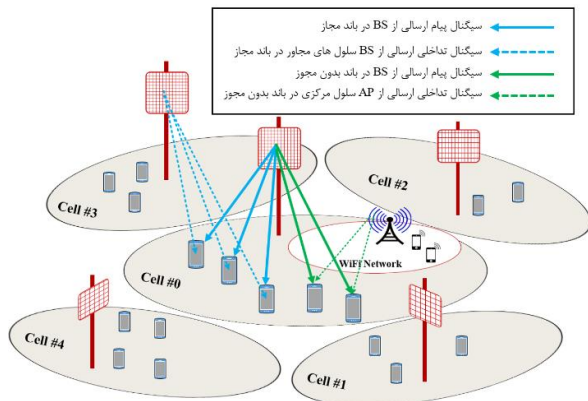
$$x_{l,0} = W_l P_{l,0}^{1/2} x_{s,0}^{(l)}, \quad l - \text{Band} \quad (3)$$

$$x_{u,0} = W_u P_{u,0}^{1/2} x_{s,0}^{(u)}, \quad ul - \text{Band} \quad (4)$$

که در آن W_l و W_u به ترتیب ماتریس پیش‌کدگذاری باند مجوزدار و غیرمجاز بوده، همچنین $P_{u,0}$ و $P_{l,0}$ ماتریس‌های توان تخصیصی BS به کاربران در سلول مرکزی به ترتیب در باندهای مجاز و غیرمجاز می‌باشند. مشابه با (۲)، $P_{u,0}$ و $P_{l,0}$ به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$P_{l,0} = \text{diag}(p_{l,1} p_{l,2} \dots p_{l,n(S_l)}) \quad , l - \text{Band} \quad (5)$$

$$P_{u,0} = \text{diag}(p_{u,1} p_{u,2} \dots p_{u,n(S_u)}) \quad , ul - \text{Band} \quad (6)$$



شکل ۱- شمایی از مدل سیستم شبکه‌ی چند سلولی چندرودی-چندخروجی حجیم

در این مقاله، ماتریس ضرایب تضعیف کانال بین BS و کاربران سلول مرکزی در باند مجاز و غیر مجاز را به ترتیب با $H_l \in \mathcal{C}^{n(S_l) \times M}$ و $H_u \in \mathcal{C}^{n(S_u) \times M}$ نمایش می‌دهیم، که عناصر این ماتریس‌ها را به صورت $[H_l] \sim \mathcal{CN}(0,1)$ و $[H_u] \sim \mathcal{CN}(0,1)$ مدل می‌شود. علاوه بر این، ماتریس G_{ij} ، را ماتریس ضرایب کانال تداخلی بین BS سلول i ام و کاربران سلول j ام نامگذاری می‌شود. که در تعریف صورت گرفته اخیر $i, j \in \{0, 1, \dots, N_c\}$ می‌باشند. به طور کلی

تک آنتنه همراه با یک AP با N_w آنتن هم وجود دارد که به دستگاه‌های WiFi سرویس می‌دهد. در این سلول، BS با توجه به ظرفیت کانال مجوزدار و میزان تداخل موجود در این کانال، از کانال بدون مجوز متعلق به WiFiها برای بهبود گذردهی کاربران شبکه سلولی بهره می‌برد. اگر به طور کلی تعداد کاربر سلول i ام برابر K_i فرض شود، بردار سیگنال ارسالی توسط BS سلول‌های غیرمرکزی در باند مجاز روی آنتنهایش را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$x_i = W_i P_i x_{s,i} \quad , i = 1, 2, \dots, N_c \quad (1)$$

در رابطه‌ی اخیر، بردار سمبل‌های نرمالیزه ارسالی برای کاربران سلول i ام و $W_i \in \mathcal{C}^{M \times K_i}$ ماتریس شکل‌دهی پرتو با ستون‌های نرمالیزه شده می‌باشد. همچنین P_i ماتریس قطری توان تخصیصی به کاربران سلول i ام غیر مرکزی در باند مجاز می‌باشد، می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P_i = \text{diag}(p_{i1} p_{i2} \dots p_{iK_i}) \quad , i = 1, 2, \dots, N_c \quad (2)$$

در (۲)، معرف توان تخصیصی ایستگاه پایه‌ی سلول i ام غیرمرکزی به کاربر j ام می‌باشد. با توجه به تعداد کاربران سلول i ام غیر مرکزی $x_{s,i}$ را می‌توان به صورت یک بردار $x_{s,i} = [x_{s,i1} x_{s,i2} \dots x_{s,iK_i}]^T$ تعریف کرد. در تعریف

¹⁷ Circularly Symmetric Complex Gaussian

خواهیم برد. در این بخش در ابتدا اجازه بدهید که ماتریس تجمیعی ضرایب کانال بین ایستگاه پایه سلول مرکزی و کاربران در سلولهای مجاور را به صورت زیر تعریف کنیم:

$$\mathbf{G}_c = [\mathbf{G}_{01}^T \mathbf{G}_{02}^T \cdots \mathbf{G}_{0N_c}^T]^T \quad (12)$$

به طور مشابه ماتریس ضرایب کانال بین ایستگاه پایه سلول مرکزی و دستگاههای WiFi در سلول مرکزی را می توان به صورت زیر معرفی کرد:

$$\mathbf{U}_w = [\mathbf{u}_{w,1} \ \mathbf{u}_{w,2} \ \cdots \ \mathbf{u}_{w,K_w}]^T \quad (13)$$

برای حذف کامل تداخل در باندهای دارای مجوز و بدون مجوز، باید طراحی ماتریس شکل دهی پرتو به صورتی باشد که $\mathbf{W}_u$ و $\mathbf{W}_l$ به ترتیب در فضای نال ماتریسهای کانال $\mathbf{G}_c$ و $\mathbf{U}_w$ قرار بگیرد. این یعنی که:

$$\mathbf{W}_l \in \text{null}\{\mathbf{G}_c\} \quad (14)$$

$$\mathbf{W}_u \in \text{null}\{\mathbf{U}_w\} \quad (15)$$

برای بدست آوردن فضای صفر ماتریس ضرایب کانال $\mathbf{G}_c$ ، می توان از تجزیه ی مقدارهای تکین ($^{\text{SVD}}$) به صورت زیر استفاده کرد:

$$\mathbf{G}_c = \tilde{\mathbf{U}}_G \tilde{\Sigma}_G^{1/2} \tilde{\mathbf{V}}_G^H \quad (16)$$

در تجزیه انجام شده در بالا، ماتریس $\tilde{\mathbf{V}}_G$ و $\tilde{\mathbf{U}}_G$ ماتریسهای یکانی و $\tilde{\Sigma}_G$ ماتریس مربعی می باشد که قطر اصلی آن شامل بردارهای ویژه متناظر با هر یک از مقادیر ویژه ماتریس $\mathbf{G}_c^H \mathbf{G}_c$ می باشد. فرض کنید که $L_G = \text{rank}(\mathbf{G}_c)$ است. در این صورت می توان با توجه به (۱۶)، $\tilde{\mathbf{V}}_G$ را به صورت $[\tilde{\mathbf{V}}_G^{(1)} \ \tilde{\mathbf{V}}_G^{(0)}]$ نمایش داد. که در آن $\tilde{\mathbf{V}}_G^{(1)}$ معرف L_G ستون اولیه ی ماتریس $\tilde{\mathbf{V}}_G$ می باشد و $\tilde{\mathbf{V}}_G^{(0)}$ معرف مابقی ستونهای ماتریس $\tilde{\mathbf{V}}_G$ می باشد. در واقع $\tilde{\mathbf{V}}_G^{(0)}$ سازنده ی فضای برداری صفر متناظر با ماتریس ضرایب کانال $\mathbf{G}_c$ می باشد. با توجه به توضیحات داده شده در بالا، می توان $\mathbf{W}_l$ را به صورت $\mathbf{W}_l = \tilde{\mathbf{V}}_G^{(0)} \mathbf{Q}_l$ نوشت. برای بدست آوردن $\mathbf{Q}_l$ ، ماتریس ضرایب کانال بین ایستگاه پایه و کاربران در سلول مرکزی، ماتریس ضرایب کانال موثر $\mathbf{H}_{l,e}$ به صورت زیر تعریف می شود:

$$\mathbf{H}_{l,e} = \mathbf{H}_l \tilde{\mathbf{V}}_G^{(0)} \quad (17)$$

حال در اینجا با هدف از بین بردن تداخل درون سلولی بین کاربران سلول مرکزی در باند مجوزدار، از روش ZF برای طراحی ماتریس $\mathbf{Q}_l$ استفاده می کنیم. بنابراین $\mathbf{Q}_l$ می تواند به صورت زیر تعریف شود:

$$\mathbf{Q}_l = \mathbf{H}_{l,e}^H (\mathbf{H}_{l,e} \mathbf{H}_{l,e}^H)^{-1} \quad (18)$$

از طرفی به صورت مشابه برای کانال باند بدون مجوز نیز می توان برای بدست آوردن فضای صفر ماتریس ضرایب کانال $\mathbf{U}_w$ ، می توان از تجزیه ی مقدارهای تکین به صورت زیر استفاده کرد:

$$\mathbf{U}_w = \tilde{\mathbf{U}}_w \tilde{\Sigma}_w^{1/2} \tilde{\mathbf{V}}_w^H \quad , ul - Band \quad (19)$$

در بالا، ماتریس $\tilde{\mathbf{V}}_w$ و $\tilde{\mathbf{U}}_w$ ماتریسهای یکانی و $\tilde{\Sigma}_w$ ماتریس مربعی می باشد که قطر اصلی آن شامل بردارهای ویژه متناظر با هر یک از مقادیر ویژه ماتریس $\mathbf{U}_w^H \mathbf{U}_w$ می باشد. ما در اینجا فرض می کنیم که رتبه ماتریس $\mathbf{U}_w$ برابر با L_w می باشد. حال اگر L_w ستون نخست ماتریس $\tilde{\mathbf{V}}_w$ را با $\tilde{\mathbf{V}}_w^{(1)}$ و سایر ستونها را با $\tilde{\mathbf{V}}_w^{(0)}$ نمایش دهیم، می توان $\mathbf{W}_u$ را به صورت $\mathbf{W}_u = \tilde{\mathbf{V}}_w^{(0)} \mathbf{Q}_u$ نوشت. در ادامه، مشابه با (۱۷)، ماتریس کانال موثر در باند بدون مجوز $\mathbf{H}_{u,e}$ را به صورت زیر تعریف می کنیم:

$$\mathbf{H}_{u,e} = \mathbf{H}_w \tilde{\mathbf{V}}_w^{(0)} \quad (20)$$

برای صفر کردن تداخل بین کاربران سلول مرکزی در باند بدون مجوز، از روش

ماتریس تداخلی را می توان به صورت $\mathbf{G}_{ij} = [\mathbf{g}_{i,j,1} \ \mathbf{g}_{i,j,2} \ \cdots \ \mathbf{g}_{i,j,K_j}]^T$ نمایش داد، که در این نمایش $\mathbf{g}_{i,j,k}$ معرف بردار ضرایب کانال تداخلی بین ایستگاه پایه سلول l ام و کاربر k ام متعلق به سلول j ام می باشد با توجه به توضیحات داده شده در بالا، بردار تجمیعی سیگنال دریافتی کل کاربران در باند مجاز $\mathbf{y}_{l,0}$ در سلول مرکزی را می توان به صورت زیر نوشت [۲۰]:

$$\mathbf{y}_{l,0} = \mathbf{H}_l \mathbf{x}_{l,0} + \sum_{i=1}^{N_c} \mathbf{G}_{i0} \mathbf{x}_i + \mathbf{n}_{l,0} \quad , l - Band \quad (7)$$

در (۷)، $\mathbf{n}_{l,0}$ معرف بردار نویز دریافتی کاربران در باند مجاز است که آن به صورت یک بردار متغیر تصادفی گوسی مختلط با تقارن دایروی یعنی $\mathbf{n}_{l,0} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{n,l}^2 \mathbf{I}_{n(S_l)})$ مدل می گردد. در این مقاله، سمبل ارسالی از AP به l امین دستگاه WiFi را با $x_{w,i}$ نمایش و با فرض $E\{|x_{w,i}|^2\} = 1$ در نظر گرفته می شود. اضافه بر این توان اختصاصی AP به l امین دستگاه WiFi را با نماد $p_{w,i}$ نمایش داده می شود. با توجه به تعاریف صورت گرفته، بردار سمبل و ماتریس توان ارسالی دستگاههای WiFi را می توان به صورت زیر بیان کرد [۲۰]:

$$\mathbf{x}_w = [x_{w,1} \ x_{w,2} \ \cdots \ x_{w,K_w}]^T \quad (8)$$

$$\mathbf{P}_w = \text{diag}(p_{w,1}, p_{w,2}, \dots, p_{w,K_w}) \quad (9)$$

حال به طور مشابه برای باند غیر مجاز، می توان بردار تجمیعی سیگنال دریافتی کاربران سلول مرکزی به صورت زیر نوشت:

$$\mathbf{y}_{u,0} = \mathbf{H}_u \mathbf{x}_{u,0} + \mathbf{G}_w \mathbf{W}_w \mathbf{P}_w^{1/2} \mathbf{x}_w + \mathbf{n}_{u,0} \quad (10)$$

در بالا، $\mathbf{G}_w \in \mathcal{C}^{n(S_u) \times N_w}$ و $\mathbf{W}_w \in \mathcal{C}^{N_w \times K_w}$ به ترتیب معرف ماتریس ضرایب کانال تداخلی بین AP و کاربران سلول مرکزی در باند غیرمجاز و ماتریس شکل دهی پرتو در AP می باشند. که در آن $\mathbf{G}_w$ می تواند به صورت زیر تعریف گردد:

$$\mathbf{G}_w = [\mathbf{g}_{w,1} \ \mathbf{g}_{w,2} \ \cdots \ \mathbf{g}_{w,n(S_u)}]^T \quad , ul - Band \quad (11)$$

که در آن $\mathbf{g}_{w,j} \in \mathcal{C}^{K_w \times 1}$ معرف بردار ضرایب کانال تداخل بین AP و کاربر j ام در سلول مرکزی می باشد که عناصر این ماتریس تضعیف کانال را بر پایه ی کانال رایلی، به صورت متغیرهای تصادفی مختلط گوسی مستقل از هم مدل می شود.

۳- طراحی ماتریس شکل دهی پرتو

همانطور که پیش تر گفته شد، امروزه با توجه به حجم تقاضای کاربران و همچنین کمبود طیف مجاز در دسترس، استفاده از باند بدون مجوز، می تواند یک راهکار عملی مناسب برای حل مشکل مخابرات سلولی موبایل باشد. اما چالش مهم در بکارگیری یک باند بدون مجوز در کنار یک باند مجاز در شبکه ی سلولی، مدیریت منابع به منظور کاهش تداخل در باند غیرمجاز و بهبود عملکرد کل شبکه می باشد. ما در این بخش سعی خواهیم کرد با طراحی مناسب ماتریسهای شکل دهی پرتو در باند مجوزدار و بدون مجوز، تداخل روی کاربران سلولهای غیرمرکزی و دستگاههای WiFi را صفر نماییم. در این وضعیت، ما از شکل دهی پرتو مطابق با طرح قطری سازی بلوکی برای حذف کامل تداخل بهره

$$\frac{\partial \psi}{\partial p_{u,k}} = -\frac{B_u \gamma_{u,k}}{1 + \gamma_{u,k} p_{l,k}} - \frac{B_u \gamma_{u,k} \lambda_{u,k}}{1 + \gamma_{u,k} p_{u,k}} + \nu = 0, \forall k \in S_u \quad (27)$$

برای بررسی جواب‌های بهینه، باید به این نکته دقت داشت که با توجه به اینکه $p_{l,k}$ ها و $p_{u,k}$ ها نامنفی هستند، لزوماً باید $\nu > 0$ باشد. بنابراین با توجه به معادله‌ی (۲۵) و (۲۶) داریم:

$$p_{l,k}^* = \left[\frac{B_l}{\nu} - \frac{1}{\chi_{l,k}(1 + \lambda_{l,k})} \right]^+, k \in S_l \quad (28)$$

$$p_{u,k}^* = \left[\frac{B_u}{\nu} - \frac{1}{\chi_{u,k}(1 + \lambda_{u,k})} \right]^+, k \in S_u \quad (29)$$

در (۲۸) و (۲۹)، ضرایب لاگرانژ ν و $\{\lambda_{l,k}\}$ و $\{\lambda_{u,k}\}$ ضرایب مجهولی هستند که می‌بایست برای بدست آوردن توان‌های تخصیصی $p_{u,k}^*$ و $p_{l,k}^*$ بدست آورده شوند. برای بدست آوردن ضرایب لاگرانژ، در ابتدا شرایط KKT را برای ضریب لاگرانژ $\lambda_{l,k}$ و $\lambda_{u,k}$ به ترتیب به صورت زیر می‌نویسیم:

$$\lambda_{l,k} (R_{l,k}^{(th)} - R_{l,k}) = 0 \Rightarrow \begin{cases} \lambda_{l,k} = 0, R_{l,k} > R_{l,k}^{(th)} \\ \lambda_{l,k} > 0, R_{l,k} = R_{l,k}^{(th)} \end{cases} \quad (30)$$

$$\lambda_{u,k} (R_{u,k}^{(th)} - R_{u,k}) = 0 \Rightarrow \begin{cases} \lambda_{u,k} = 0, R_{u,k} > R_{u,k}^{(th)} \\ \lambda_{u,k} > 0, R_{u,k} = R_{u,k}^{(th)} \end{cases} \quad (31)$$

در اینجا دو مجموعه‌ی $S_{u,\lambda}$ و $S_{l,\lambda}$ را تعریف کنیم که به ترتیب معرف مجموع کاربران سلولی در باند مجوزدار و بدون مجوز می‌باشند که $\lambda_{u,k}$ و $\lambda_{l,k}$ آن‌ها مخالف صفر می‌باشد. پر واضح است که طبق تعریف داشته باشیم: $S_{l,\lambda} \subseteq S_l$ و $S_{u,\lambda} \subseteq S_u$. از طرفی طبق (۳۰) و (۳۱) وقتی ضرایب لاگرانژ $\lambda_{l,k}$ یا $\lambda_{u,k}$ مخالف صفر می‌باشند، می‌توان جواب بهینه را مطابق با دو معادله‌ی $R_{l,k} = R_{l,k}^{(th)}$ و $R_{u,k} = R_{u,k}^{(th)}$ بدست آورد. این بدین معناست که:

$$p_{l,k}^* = \frac{1}{\chi_{l,k}} \left(2^{\frac{R_{l,k}^{(th)}}{B_l}} - 1 \right), k \in S_{l,\lambda} \quad (32)$$

$$p_{u,k}^* = \frac{1}{\chi_{u,k}} \left(2^{\frac{R_{u,k}^{(th)}}{B_u}} - 1 \right), k \in S_{u,\lambda} \quad (33)$$

از طرفی به راحتی مشخص است که مطابق (۲۸) و (۲۹)، اگر ضرایب لاگرانژ $\lambda_{l,k}$ یا $\lambda_{u,k}$ برابر با صفر باشند، توان‌های تخصیصی بهینه را می‌توان از روابط زیر استخراج کرد:

$$p_{l,k}^* = \left[\frac{B_l}{\nu} - \frac{1}{\chi_{l,k}} \right]^+, k \in S_l \setminus S_{l,\lambda} \quad (34)$$

$$p_{u,k}^* = \left[\frac{B_u}{\nu} - \frac{1}{\chi_{u,k}} \right]^+, k \in S_u \setminus S_{u,\lambda} \quad (35)$$

فرم بدست آمده برای جواب‌های بهینه در دو رابطه‌ی اخیر نشان می‌دهد که برای یافتن جواب بهینه، ما تنها نیاز به یافتن ضریب لاگرانژ ν داریم. بنابراین مشابه با یک روش جستجوی تک بعدی می‌توان جواب‌های بهینه‌ی مسئله‌ی $P0$ را بدست آورد. اما مشکل در پیاده‌سازی این الگوریتم آن است که

ZF برای طراحی ماتریس Q_l استفاده می‌کنیم. بنابراین Q_l می‌تواند به صورت زیر تعریف شود:

$$Q_u = H_{u,e}^H (H_{u,e} H_{u,e}^H)^{-1}, ul - Band \quad (21)$$

با توجه به ماتریس‌های شکل‌دهی پرتو، می‌توان گذردهی برای دو باند مجوزدار و بدون مجوز را به ترتیب به صورت زیر نوشت [۲۱]:

$$R_{l,k} = B_l \log_2(1 + \chi_{l,k} p_{l,k}), k \in S_l, l - Band \quad (22)$$

$$R_{u,k} = B_u \log_2(1 + \chi_{u,k} p_{u,k}), k \in S_u, ul - Band \quad (23)$$

که در رابطه‌ی اخیر، $\chi_{l,k}^{-1} = \|W_l(:,k)\|^2 (\sigma_{n,l}^2 + I_{l,k})$ و $\chi_{u,k}^{-1} = \|W_u(:,k)\|^2 (\sigma_{n,u}^2 + I_{u,k})$ که در تعریف اخیر $I_{l,k}$ و $I_{u,k}$ به ترتیب میزان توان تداخلی در گیرنده‌ی k امین کاربر سلول مرکزی در باند مجوزدار و بدون مجوز می‌باشد. همچنین دقت شود که در بالا، $\|W_l(:,k)\|^2$ و $\|W_u(:,k)\|^2$ اثر نرمالیزه بودن ماتریس شکل‌دهی پرتو می‌باشد. در ادامه، با توجه به شکل‌دهی پرتو طراحی شده در این بخش، در زیر بخش بعدی به موضوع تخصیص توان مطابق با رویکرد دوم خواهیم پرداخت.

۴- تخصیص توان

همانطور که در بالا گفته شد، در رویکرد دوم، طراحی صورت گرفته در ماتریس شکل‌دهی پرتو هم در باند مجاز و هم در باند بدون مجوز، به گونه‌ای انجام می‌شود که عملاً شرایط تداخل صفر در باند مجوزدار و بدون مجوز وجود دارد. در نتیجه در مسأله‌ی تخصیص توان در رویکرد دوم، بر خلاف رویکرد اول، قیدهای مربوط به آستانه‌های تداخلی بر روی کاربران سلولی غیرمرکزی و دستگاه‌های WiFi وجود ندارد. بنابراین مسأله‌ی تخصیص توان در شبکه‌ی سلولی mMIMO را با هدف بیشینه کردن مجموع گذردهی قابل دسترس کاربران را مطابق با رویکرد دوم را می‌توان به صورت زیر فرمول‌بندی کرد:

$$P0: \begin{cases} \max_{\{p_{l,k}\}, \{p_{u,k}\}} R \\ R_{l,k} \geq R_{l,k}^{(th)} \quad \forall k \in S_l \quad (24-1) \\ R_{u,k} \geq R_{u,k}^{(th)} \quad \forall k \in S_u \quad (24-2) \\ \sum_{k \in S_l} p_{l,k} + \sum_{k \in S_u} p_{u,k} \leq p_{total} \quad (24-3) \end{cases} \quad (24)$$

مسأله‌ی تخصیص توان $P0$ یک مسأله‌ی بهینه‌سازی محدب می‌باشد. در مسأله‌ی (۲۴)، دو قید (۲۴-۳) و (۲۴-۲) به ترتیب معرف قیدهای کیفیت سرویس در باند مجوزدار و بدون مجوز می‌باشد. حال تابع لاگرانژ مربوط به مسأله‌ی $P4$ را به صورت زیر می‌نویسیم [۲۲]:

$$\psi(p_{l,k}, p_{u,k}, \nu) = -R + \nu \left(\sum_{k \in S_l} p_{l,k} + \sum_{k \in S_u} p_{u,k} - p_{total} \right) + \sum_{k \in S_l} \lambda_{l,k} (R_{l,k}^{(th)} - R_{l,k}) + \sum_{k \in S_u} \lambda_{u,k} (R_{u,k}^{(th)} - R_{u,k}) \quad (25)$$

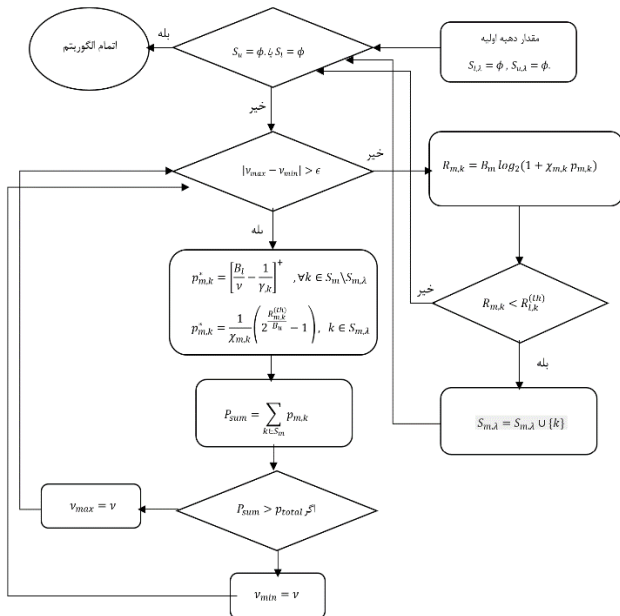
حال از تابع لاگرانژ ψ نسبت به $p_{l,k}$ مشتق می‌گیریم:

$$\frac{\partial \psi}{\partial p_{l,k}} = -\frac{B_l \chi_{l,k}}{1 + \chi_{l,k} p_{l,k}} - \frac{B_l \chi_{l,k} \lambda_{l,k}}{1 + \chi_{l,k} p_{l,k}} + \nu = 0, \forall k \in S_l \quad (26)$$

به طور مشابه برای بدست آوردن معادله‌ی دیگر بهینگی، از تابع لاگرانژ ψ نسبت به $p_{u,k}$ مشتق می‌گیریم:

Power Allocation Algorithm (PAA)

1. Initial Setup: $S_{l,\lambda} = \phi$, $S_{u,\lambda} = \phi$.
2. While $S_l \neq \phi$ or $S_u \neq \phi$
- 3- $v_{min} = 0$, $v_{max} = a \text{ large enough number}$, $\epsilon = a \text{ small number and } Idx = 1$.
- 4- While $|v_{max} - v_{min}| > \epsilon$
- 5- $v = \frac{v_{max} + v_{min}}{2}$
- 6- Calculate $p_{l,k}^* = \left[\frac{B_l}{v} - \frac{1}{\gamma_{l,k}} \right]^+$, $\forall k \in S_l \setminus S_{l,\lambda}$ and $p_{u,k}^* = \left[\frac{B_u}{v} - \frac{1}{\gamma_{u,k}} \right]^+$, $\forall k \in S_u \setminus S_{u,\lambda}$.
- 7- Calculate $p_{l,k}^* = \frac{1}{\chi_{l,k}} \left(2^{\frac{R_{l,k}^{(th)}}{B_l}} - 1 \right)$, $k \in S_{u,\lambda}$ and $p_{u,k}^* = \frac{1}{\chi_{u,k}} \left(2^{\frac{R_{u,k}^{(th)}}{B_u}} - 1 \right)$, $k \in S_{u,\lambda}$
- 8- Compute $P_{sum} = \sum_{k \in S_l} p_{l,k} + \sum_{k \in S_u} p_{u,k}$
- 9- If $P_{sum} > p_{total}$
- 10- $v_{min} = v$
- 11- Else (If)
- 12- $v_{max} = v$
- 13- End (If)
- 14- End (While)
- 15- For $m \in \{l, u\}$
- 16- For $k \in S_m \setminus S_{m,\lambda}$
- 17- Compute $R_{m,k} = B_m \log_2(1 + \chi_{m,k} p_{m,k})$.
- 18- If $R_{m,k} < R_{l,k}^{(th)}$
- 19- $S_{m,\lambda} = S_{m,\lambda} \cup \{k\}$
- 20- $Idx = 0$
- 21- End (If)
- 22- End (For)
- 23- End (For)
- 24- If $Idx = 1$
- 25- Terminate algorithm.
- 26- End (If)
- 27- End (While)



شکل ۲- فلوچارت الگوریتم تخصیص توان پیشنهادی

دایروی و با شعاع R_c مدل می‌گردد، که در آن ایستگاه‌های پایه در مرکز سلول‌ها قرار گرفته‌اند. در جدول ۳ مشخصات کانال و سیستمی که شبیه‌سازی بر اساس

مجموعه‌های $S_{u,\lambda}$ و $S_{l,\lambda}$ نامشخص می‌باشند. در بهینه‌سازی اگر بتوان جواب‌های بهینه‌ایی با غیرفعال بودن قیدهای کیفیت سرویس بدست آورد، قطعاً به لحاظ مقدار بهینگی از وضعیتی که قیدهای کیفیت سرویس فعال می‌باشند، بهتر می‌باشد. بنابراین می‌توان در ابتدا با فرض تهی بودن مجموعه‌های $S_{u,\lambda}$ و $S_{l,\lambda}$ توان‌های بهینه مطابق با (۳۴) و (۳۵) بدست آورد. سپس اگر جواب‌های بدست آمده قیدهای کیفیت سرویس را برآورده نمایند، پس جواب بهینه بدست آمده است. اگر برای تعدادی از کاربرها در هر باندی، قیدهای کیفیت سرویس‌شان برآورده نشود، این کاربران مجموعه‌های $S_{u,\lambda}$ و $S_{l,\lambda}$ را تشکیل می‌دهند. در این وضعیت پر واضح است که توان‌های تخصیصی برای آن‌ها مطابق با (۳۲) و (۳۳) بدست خواهد آمد. سپس برای مجموعه کاربران متعلق به $S_{u,\lambda}$ و $S_{l,\lambda}$ الگوریتمی مشابه بکار گرفته می‌شود. اگر این بار هم خروجی توان‌های تخصیص داده شده به کاربران مجموعه $S_{u,\lambda}$ یا $S_{l,\lambda}$ نتواند، برای تعدادی از کاربران قید کیفیت سرویس را راضی نمایند، کاربرهای مورد نظر به مجموعه $S_{u,\lambda}$ یا $S_{l,\lambda}$ اضافه می‌شوند. این کار انقدر ادامه پیدا می‌کند تا با تخصیص توان، تمام قیدهای کیفیت سرویس برآورده شوند. اما سوال بسیار مهم آن است که آیا می‌توان با وضعیتی مواجه شد که نتوان قیدهای کیفیت سرویس کاربران را برآورده کرد؟ برای پاسخ دادن به این سوال، قضیه ۱ را مطرح خواهیم کرد.

قضیه ۱: مسأله‌ی بهینه‌سازی P_0 ، فاقد ناحیه شدنی است اگر شرایط (۳۶) برقرار باشد.

$$\sum_{k \in S_l} \frac{1}{\chi_{l,k}} \left(2^{\frac{R_{l,k}^{(th)}}{B_l}} - 1 \right) + \sum_{k \in S_u} \frac{1}{\chi_{u,k}} \left(2^{\frac{R_{u,k}^{(th)}}{B_u}} - 1 \right) > p_{total} \quad (36)$$

اثبات: از آنجایی که گذرده‌ی یک رابطه‌ی صعودی با توان‌های تخصیصی به هر کاربر دارد، می‌توان در نظر گرفت که حداقل توان مورد نیاز برای هر کاربر به منظور برآورده کردن قید کیفیت سرویس، از روابط (۳۲) و (۳۳) بدست می‌آید. بنابراین برای اثبات کافی است که بدترین شرایط ممکن در نظر گرفته شود که در آن تمام کاربران در باند مجوزدار و در باند بدون مجوز، دارای حداقل نرخ قابل دستیابی می‌باشند. در این صورت می‌توان مجموع توان تخصیصی را به صورت $\sum_{k \in S_l} \frac{1}{\chi_{l,k}} \left(2^{\frac{R_{l,k}^{(th)}}{B_l}} - 1 \right) + \sum_{k \in S_u} \frac{1}{\chi_{u,k}} \left(2^{\frac{R_{u,k}^{(th)}}{B_u}} - 1 \right)$ نوشت. پر واضح است که در این وضعیت، اگر p_{total} از این مجموع توان کمتر باشد، هیچ ناحیه شدنی برای مسأله‌ی P_0 یافت نمی‌شود.

با توجه به توضیحات داده شده، می‌توان شبه کد الگوریتم تخصیص توان را به صورت الگوریتم PAA نوشت. همچنین در شکل ۲، فلوچارت الگوریتم پیشنهادی به صورت شماتیک رسم شده است.

۵- نتایج شبیه‌سازی عددی

در این شبیه‌سازی برای محوشدگی مقیاس کوچک، کانال‌ها به صورت رایلی مدل می‌گردند. همچنین اثر محوشدگی مقیاس بزرگ به صورت تلفات مسیر در نظر گرفته شده است، که در آن تلفات مسیر به صورت $L_k = A_0 \left(\frac{d_k}{d_0} \right)^{-n}$ می‌گردد. در این مدل A_0 میزان افت توان در فاصله‌ی مرجع d_0 فاصله‌ی کاربر k ام تا ایستگاه پایه و n نمای تلفات مسیر می‌باشد. سلول‌ها به صورت

آن انجام گرفته است، آورده شده است. نکته مهم دیگر در شبیه‌سازی انجام شده، چگونگی تخصیص کاربران به باندهای مجوزدار و بدون مجوز می‌باشد. ما در این شبیه‌سازی، برای تخصیص کاربران به هر یک از کانال‌ها، اندازه ضریب تضعیف کانال بین کاربران با ایستگاه پایه در دو باند بدون مجوز و باند مجوزدار به عنوان معیار انتخاب در نظر گرفته شده است. بنابراین می‌توان تخصیص کاربران به دو باند مجوزدار ($\{l\}$) و بدون مجوز ($\{u\}$) را به صورت زیر بیان نمود:

$$m^* = \underset{m \in \Omega}{\operatorname{argmax}} ||[H_m(i, :)]|| \quad \text{where } i \in \{1, \dots, n(S_m)\} \text{ \& } \Omega = \{l, u\} \quad (37)$$

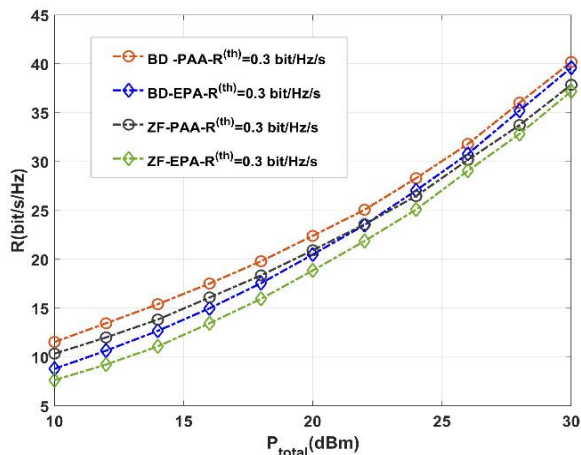
جدول ۳- مشخصات سیستم برای شبیه‌سازی عددی

پارامتر	مقدار
R_c	250 m
K_0	8
K_c	6
K_w	10
P_c	40 dBm
N_c	3
A_0	0 dBm
n	3
P_{total}	10 to 50 dBm
M	64
B_l	100 MHz
B_u	100 MHz
M_{itter}	100
NSD	-174 dBm/Hz

در شکل ۳، به مقایسه طرح پیشنهادی برای طراحی شکل‌دهی پرتو (BD) و تخصیص توان (PAA) مطرح شده در بخش ۴ با دیگر طرح‌های مرسوم پرداخته شده است. یکی از طرح‌های مرسوم در شکل‌دهی پرتو در سیستم‌های mMIMO، استفاده از طرح ZF می‌باشد. برای یک مقایسه عادلانه با روش BD مطرح شده در بخش ۳، شکل‌دهی پرتو به روش ZF به گونه‌ای انجام می‌شود که سیگنال‌های پیام ایستگاه پایه‌ی سلول مرکزی توسط کاربران سلولی و دستگاه‌های WiFi، به ترتیب در باند مجاز و باند غیرمجاز دریافت نشود. علاوه بر این، برای بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی در تخصیص توان، آن را به طرح تخصیص توان یکسان (EPA) مورد مقایسه قرار خواهیم داد. دقت شود که در طرح EPA، در ابتدا به تمام کاربران در باند مجاز و چه در باند غیرمجاز توان تخصیص توان یکسان (P_{total}) مورد مقایسه قرار خواهیم داد. دقت شود که در طرح EPA، در ابتدا به تمام کاربران در باند مجاز و چه در باند غیرمجاز توان تخصیص داده می‌شود. اگر با وجود تخصیص داده شده، گذردهی برای تعدادی از کاربران کمتر از حداقل مقدار تضمین شده باشد، برای آن کاربران توان تخصیصی از رابطه‌ی (۳۲) و (۳۳) بدست می‌آید. سپس مجموع توان باقیمانده (P_{res}) بین سایر کاربران به صورت مساوی تخصیص داده می‌شود. یعنی: $P_{res}/(K - n(S_{l,\lambda}) - n(S_{u,\lambda}))$ ، جایی که P_{res} از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$P_{res} = P_{total} - \sum_{k \in S_{l,\lambda}} p_{l,k}^* - \sum_{k \in S_{u,\lambda}} p_{u,k}^* \quad (38)$$

این روند تا جایی ادامه پیدا می‌کند که برای تمام کاربران چه در باند مجاز و چه در باند غیر مجاز حداقل گذردهی تضمین شده بدست آید. در غیر این صورت مسئله در این طرح جواب نخواهد داشت. با توجه به توضیحات داده شده، در شکل ۳، چهار طرح توأم شکل‌دهی پرتو و تخصیص توان BD-PAA،

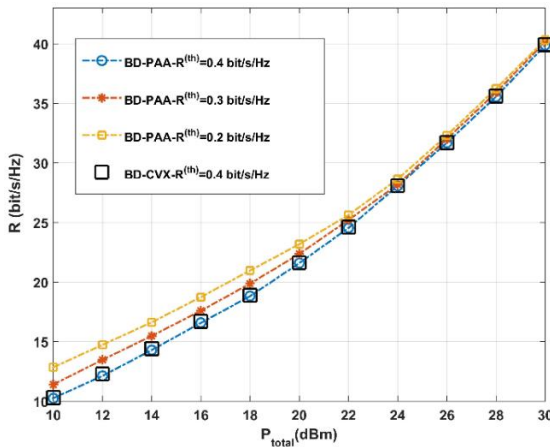


شکل ۳- تغییرات مجموع گذردهی کاربران بر حسب تغییرات توان کل برای طرح‌های مختلف ماتریس شکل‌دهی و تخصیص توان

تخصیص توان می‌باشد. در نتیجه این سبب می‌شود که روش BD-EPA از ZF-PAA عملکرد بهتری از خود نشان دهد.

یکی از معیارهای مهم در بررسی عملکرد یک سیستم مخابراتی، تحلیل بهره‌وری انرژی آن سیستم می‌باشد [۲۳]. در شکل ۴، تغییرات بهره‌وری انرژی دو طرح BD و ZF با در نظر گرفتن طرح تخصیص توان PAA بررسی شده است. همانطور که در شکل ۳ قابل مشاهده است، طرح پیشنهادی BD در رژیم

گذردهای ترمین شده شبیه‌سازی شده‌اند، به یکدیگر همگرا می‌شوند.



شکل ۵- تغییرات مجموع گذردهای کاربران بر حسب تغییرات توان کل برای حداقل گذردهای تضمین شده مختلف برای کاربران

در جدول ۴، مقایسه بین سه روش BD-PAA، BD-CVX و ZF-PAA به لحاظ متوسط اجرای برنامه انجام شده است. همانطور که در این جدول قابل مشاهده است، طرح BD-PAA در مقایسه با طرح ZF-PAA دارای پیچیدگی بیشتری است. برای مقایسه دقیق‌تر باید دقت کرد هر دو طرح ZF-PAA و BD-PAA دارای طرح‌های تخصیص توان یکسان است. بدیهی است که وجه تمایز اجرای این دو طرح را باید در روش‌های ZF و BD جستجو کرد. در طرح شکل‌دهی پرتو با کمک ZF، از باید شبه معکوس ماتریس کانال محاسبه شود. این در حالی است که در طرح BD، علاوه بر محاسبه‌ی شبه معکوس کانال موثر، نیاز است که عملگر SVD نیز بر روی ماتریس کانال نیز انجام شود. همچنین در روش BD نیاز به عملگر یافتن بردارهای ویژه متناظر با مقادیر ویژه صفر می‌باشد. بنابراین می‌توان انتظار داشت روش BD، پیچیدگی بیشتری نسبت به روش ZF از خود نشان می‌دهد.

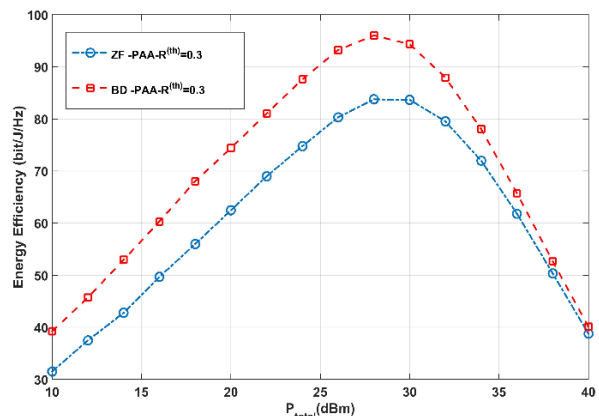
از طرفی، در مسئله‌ی تخصیص توان، ما الگوریتم PAA را برای تخصیص توان به کاربران سلول مرکزی در باند مجوزدار و بدون مجوز پیشنهاد دادیم. الگوریتم پیشنهادی ما در واقع از دو الگوریتم تصف کردن تودرتو ساخته شده است. این در حالی است که روش CVX مطرح شده یک الگوریتم عددی بهینه‌سازی محدب است که منطبق با الگوریتم سد^{۱۹} بنا نهاده شده است [۲۲]. که با توجه بار محاسباتی الگوریتم سد، می‌توان انتظار داشت که پیچیدگی محاسباتی CVX به مراتب بیشتر از الگوریتم پیشنهادی PAA باشد.

جدول ۴- مقایسه پیچیدگی محاسباتی روش‌های پیشنهادی

Scheme	BD-PAA	BD-CVX	ZF-PAA
Average runtime (second)	0.0۱۸۲	3.5921	0.0109

در شکل ۶، اثر تغییرات مجموع گذردهای کاربران را تحت طرح BD-PAA بر حسب تغییرات نمای تضعیف تلفات مسیر (n) به ازای حداقل گذردهای تضمین شده نشان می‌دهد. قبل از تحلیل نمودارهای بدست آمده از شکل ۵، بیان این نکته بسیار حائز اهمیت است که به طور کلی با افزایش نمای تضعیف، بهره‌ی توان کانال کاهش می‌یابد که به این معناست که گذردهای در آن کانال‌های

بودجه توان‌های کل ضعیف و متوسط (در حدود 30 dBm) برتری محسوسی نسبت به ZF دارد. علت این موضوع را باید در تحلیلی که در نمودار شکل ۲ مطرح شده است جستجو کرد. در حقیقت با توجه به اینکه مقدار گذردهای در روش DB از روش ZF بیشتر است، می‌توان انتظار داشت که بهره‌وری انرژی بدست آمده در روش BD از بهره‌وری انرژی بدست آمده از روش ZF بیشتر خواهد بود. از طرفی نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در رژیم بودجه توان‌های بزرگ دو روش ZF و BD به همدیگر بسیار نزدیک می‌شوند. برای یافتن پاسخ این سوال می‌توان دوباره شکل ۳ را مورد بحث و بررسی قرار داد. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، مجموع گذردهای کاربران در دو روش ZF و BD بسیار به هم نزدیک می‌شوند. بدیهی است که تحت این شرایط انتظار داشته باشیم، بهره‌وری انرژی این دو طرح به هم نزدیک شوند.

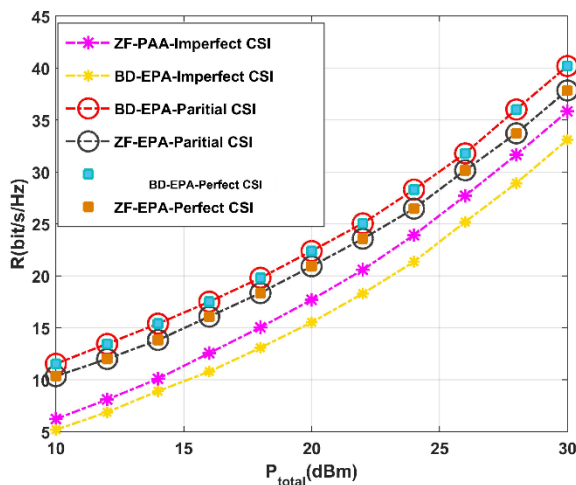


شکل ۴- تغییرات بهره‌وری انرژی بر حسب تغییرات توان کل برای طرح‌های مختلف ماتریس شکل‌دهی و تخصیص توان PAA

در شکل ۵ به بررسی عملکرد الگوریتم PAA تحت گذردهای تضمین شده متفاوت با فرض بکارگیری روش BD در طراحی ماتریس شکل‌دهی پرتو پرداخته شده است. اضافه بر این برای $R_{i,k}^{(th)} = 0.4 \text{ bit/s/Hz}$ این الگوریتم با خروجی جعبه ابزار CVX در برنامه Matlab مورد مقایسه قرار گرفته است. در حقیقت، CVX یک ابزار قدرتمند برای حل مسئله‌های بهینه‌سازی محدب به صورت عددی با دقت بسیار بالا می‌باشد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، الگوریتم پیشنهادی PAA به نتایج بدست آمده از CVX بسیار نزدیک می‌باشد. در نتیجه به راحتی می‌توان درک کرد که الگوریتم پیشنهادی PAA به جواب بهینه سراسری بسیار نزدیک می‌باشد. از طرفی که در شکل 4 می‌توان مشاهده کرد، با افزایش بودجه توان کل در دسترس برای ایستگاه پایه سلول مرکزی، مجموع گذردهای شروع به افزایش می‌یابد. از طرفی دیگر، مشاهده می‌شود که با افزایش حداقل گذردهای تضمین شده، مجموع گذردهای در رژیم بودجه توان کل (P_{total}) کوچک، شروع به کاهش می‌کند. علت این رویداد این است که در حداقل گذردهای تضمین شده بزرگ، جواب بهینه‌ی مسئله‌ی بدست آمده از PAA وادار می‌شود که برای برآورده کردن قید کیفیت سرویس تعدادی از کاربران، از مقدار بهینه‌ی مطلوب خود فاصله بگیرد. این در حالی است که در رژیم بودجه توان کل (P_{total}) بزرگ، عملاً توان به اندازه کافی وجود دارد، بنابراین برای برآورده کردن قید کیفیت سرویس نیاز به اعمال مقدار مجبور شده نمی‌باشد. بنابراین همانطور که در شکل ۳ می‌توان مشاهده کرد، در رژیم بودجه توان کل (P_{total}) بزرگ، نمودارهای مختلف گذردهای که به ازای حداقل

جزئی می‌نامیم. اگر برای هر دو نوع کانال گفته شده، CSI دارای خطای تخمین باشد، به آن CSI ناقص گفته می‌شود.

همانطور که در شکل ۷ می‌توان مشاهده کرد، در وضعیت CSI جزئی، که CSI کانال تداخلی باید تخمین زده شود، خطای تخمین در مقدار متوسط مجموع گذردهی در هر دو روش شکل‌دهی پرتو ZF و BD تأثیری ندارد. علت این موضوع آن است که در هر دو روش ZF و BD، خطای تخمین کانال نوع دوم سبب می‌شود که تداخل بر روی کاربران سلول غیر مرکزی به طور کامل صفر نگردد، ولی همچنان تداخل بر روی کاربران سلول مرکزی به طور کامل صفر می‌باشد. بنابراین می‌توان انتظار داشت مقدار متوسط گذردهی کاربران سلول مرکزی بدون تغییر بماند. ذکر این نکته در اینجا لازم است که نویسندگان در [۲۰] مسئله‌ی تخصیص توان را تحت شرایط وجود تداخل بر روی کاربران سلول مرکزی مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. بنابراین در این مقاله از بررسی میزان تأثیر مقدار آستانه‌ی تداخلی بر روی کاربران سلول غیرمرکزی صرفنظر شده است. از طرفی تحت فرض CSI ناقص، برای هر دو نوع کانال تداخلی و مطلوب، خطای تخمین وجود دارد. تحت این شرایط هم برای کاربران سلول مرکزی و هم سلول غیرمرکزی تداخل به طور کامل از بین نمی‌رود بلکه مقدار کمی تداخل همچنان بر روی کاربران سلول مرکزی و غیرمرکزی وجود دارد. این تداخل سبب می‌شود که مقدار مجموع گذردهی کاربران افت محسوسی داشته باشد. نکته مهم دیگر که باید به آن اشاره کنیم آن است که همانطور که مشاهده می‌شود، روش BD در مقابل روش ZF مقاومت کمتری نسبت به وجود خطای تخمین کانال از خود نشان می‌دهد. علت این موضوع آن است که در روش BD نیاز به تجزیه SVD می‌باشد که این تجزیه سبب افزایش خطای تخمین می‌گردد [۲۴]. بنابراین تحت فرض وجود اطلاعات ناقص از CSI، افت مجموع گذردهی کانال در روش BD بیشتر از ZF خواهد بود.

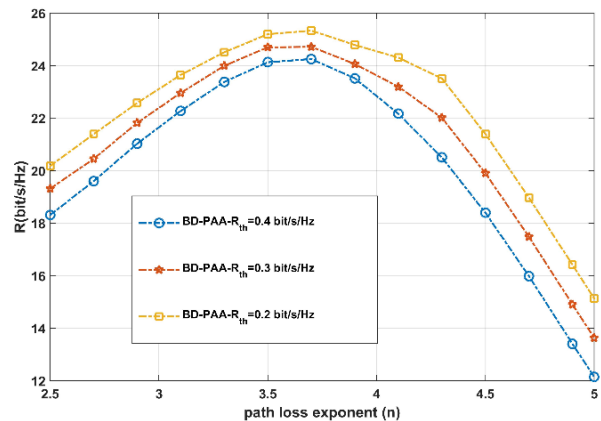


شکل ۷- تغییرات مجموع گذردهی کاربران بر حسب تغییرات توان کل تحت فرض‌های CSI کامل و ناقص

در شکل ۸ به بررسی اثر تغییرات R_{th} بر روی مجموع گذردهی کاربران پرداخته شده است. در مسئله‌ی فرمول‌بندی شده در P_0 ، برای حفظ کیفیت سرویس کاربران، قیدهای (۲-۲۴) و (۲-۲۴) در نظر گرفته شده است. در حقیقت در ترافیک‌های پایین (R_{th} کم)، الگوریتم تخصیص توان پیشنهادی PAA قادر است که با تخصیص بهینه‌ی توان به کاربری که به لحاظ وضعیت کانال و میزان تداخلی وضعیت مناسبی دارد (کاربر قوی‌تر)، توان بیشتری تخصیص دهد و از طرفی با مقدار کمی توان تخصیصی به کاربر ضعیف‌تر، حداقل ترافیک مورد نیاز را برآورده نماید. بدین ترتیب مقدار مجموع گذردهی کاربران را بهبود دهد. این در حالی است که در ترافیک‌های بسیار بالا، عملاً الگوریتم PAA تلاش

ارتباطی کاهش می‌یابد. اما همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش نمای تضعیف در ابتدا مجموع گذردهی کاربران شروع به افزایش می‌یابد. علت این موضوع آن است که اگر چه با افزایش نمای تضعیف، بهره‌ی توان کانال بین ایستگاه پایه سلول مرکزی و کاربران سلول مرکزی در هر دو باند مجوزدار و بدون مجوز کاهش می‌یابد، ولی بهره‌ی توان کانال‌های تداخلی بین ایستگاه پایه‌ی سلول‌های غیر مرکزی با کاربران سلول مرکزی در باند مجاز و همچنین بهره‌ی توان کانال ارتباطی بین AP با کاربران سلول مرکزی در باند بدون مجوز نیز به طور محسوسی کاهش می‌یابد. در این وضعیت، رابطه‌ی گذردهی بدست آمده در (۲۲) و (۲۳)، صورت و مخرج کسر مربوط به SINR شروع به کاهش می‌یابد، که برآیند این کاهش برای $n < 3.7$ به صورت افزایش در مجموع گذردهی کاربران ظاهر می‌شود. در واقع عملاً با افزایش مقدار نمای تضعیف از یک مقدار معین که در اینجا تقریباً برابر با $n = 3.7$ می‌باشد، فاکتور غالب در مخرج کسر SINR در روابط گذردهی در هر دو باند مجوزدار و بدون مجوز، تنها توان نویز می‌باشد. بنابراین می‌توان انتظار داشت با افزایش نمای تضعیف، عامل اصلی صورت کسر SINR باشد که این عامل باعث کاهش SINR و در نتیجه کاهش مجموع گذردهی کاربران در شکل ۵ می‌گردد. از طرفی مقدار مجموع گذردهی بدست آمده برای حداقل گذردهی‌های تضمین شده‌ی کوچک بزرگتر از مجموع گذردهی بدست آمده برای حداقل گذردهی‌های تضمین شده‌ی بزرگ می‌باشد.

در شکل ۷ به بررسی اثر کامل بودن اطلاعات حالت کانال و ناقص بودن اطلاعات حالت کانال خواهیم پرداخت. برای تحلیل دقیق اثر خطای تخمین کانال‌های مخابراتی، ما تحلیل را تنها به باند مجوزدار محدود می‌کنیم. بدیهی است که این تحلیل به راحتی می‌تواند برای باند بدون مجوز هم بسط داده شود. به طور کلی ما با دو نوع کانال مخابراتی در باند مجوزدار با توجه به مدل سیستم در نظر گرفته شده سرو کار داریم: ۱- کانال بین ایستگاه پایه سلول مرکزی و کاربران سلول مرکزی ۲- کانال بین ایستگاه پایه سلول مرکزی و کاربران سلول غیر مرکزی. تخمین کانال نوع اول که در آن سیگنال مطلوب از ایستگاه پایه به کاربران سلول مرکزی ارسال می‌شود، معمولاً با خطای کمتری انجام می‌شود.



شکل ۶- تغییرات مجموع گذردهی کاربران بر حسب تغییرات نمای

تضعیف در رابطه‌ی تلفات مسیر به ازای حداقل گذردهی‌های تضمین شده مختلف برای کاربران

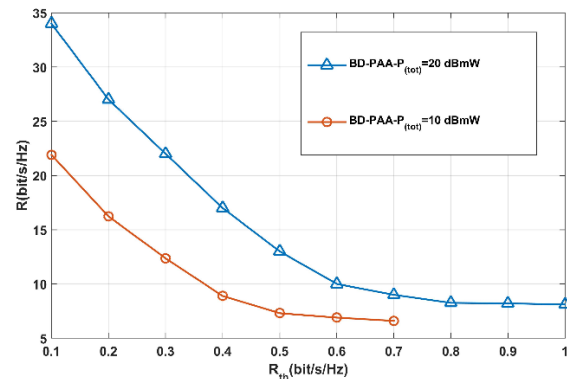
این در حالی است که در تخمین کانال نوع دوم که در آن سیگنال تداخلی توسط کاربران سلول غیرمرکزی دریافت می‌شود، خطای بیشتری خواهیم داشت. برای بررسی دقیق‌تر تأثیر تخمین کانال‌ها، سه وضعیت تعریف می‌کنیم: وضعیت نخست آن است که CSI هر دو نوع کانال شناخته شده است که آن را CSI کامل نامگذاری می‌کنیم. در وضعیت دوم، فرض می‌شود که CSI مربوط به کانال نوع اول ولی CSI کانال نوع دوم دارای خطای تخمین می‌باشد که آن را CSI

انجام شده است. برای کارهای آتی می‌توان معیارها و روش‌های متنوع‌تر با کارایی بیشتری را برای تخصیص کاربران به باندها ارائه کرد.

مراجع

- [1] Z. H. Shaik, E. Björnson and E. G. Larsson, "MMSE-Optimal Sequential Processing for Cell-Free Massive MIMO With Radio Stripes," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 69, no. 11, pp. 7775-7789, Nov. 2021.
- [2] Marzetta, T. L., & Ngo, H. Q. (2016). *Fundamentals of massive MIMO*. Cambridge University Press.
- [3] F. A. Pereira de Figueiredo, "An Overview of Massive MIMO for 5G and 6G," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 20, no. 6, pp. 931-940, June 2022.
- [4] Y. Huang, Y. He, W. He, L. Shi, T. Cheng and Y. Sui, "Channel Estimation in Massive MIMO Systems Based on Generalized Block Adaptive Matching Pursuit Algorithm," in *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 9, no. 12, pp. 2098-2101, Dec. 2020.
- [5] C. Cano and D. J. Leith, "Unlicensed LTE/WiFi coexistence: Is LBT inherently fairer than CSAT?," 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC), 2016, pp. 1-6.
- [6] Y. Pang, A. Babaei, J. AndreoliFang, and B. Hamzeh, "WiFi coexistence with dutycycled LTEU," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol.2017, 2017.
- [7] M. M. Bin Tariq, K. Faizan, M. Ali and F. Qamar, "LTE-Unlicensed and WiFi: Sharing Unlicensed Spectrum in 5GHz Band," *2019 15th International Conference on Emerging Technologies (ICET)*, Peshawar, Pakistan, 2019, pp. 1-6.
- [8] F. Meucci, O. Cabral, F. J. Velez, A. Mihovska and N. R. Prasad, "Spectrum Aggregation with Multi-band User Allocation over Two Frequency Bands," 2009 IEEE Mobile WiMAX Symposium, Napa Valley, CA, USA, 2009, pp. 81-86, doi: 10.1109/MWS.2009.25.
- [9] M. Alotaibi, M. Sirbu and J. Peha, "Impact of spectrum aggregation technology and frequency on cellular networks performance," 2015 IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN), Stockholm, Sweden, 2015, pp. 326-335.
- [10] Tsinos, C. G., Foukalas, F., & Tsiftsis, T. A. (2017). Resource allocation for licensed/unlicensed carrier aggregation MIMO systems. *IEEE Transactions on Communications*, 65(9), 3765-3779.
- [11] G. Geraci, A. Garcia-Rodriguez, D. López-Pérez, A. Bonfante, L. G. Giordano and H. Claussen, "Enhancing coexistence in the unlicensed band with massive MIMO," 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC), 2017, pp. 1-6.
- [12] Y. Zhao, X. Chi, L. Qian, Y. Zhu and F. Hou, "Resource Allocation and Slicing Puncture in Cellular Networks With eMBB and URLLC Terminals Coexistence," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, no. 19, pp. 18431-18444, 1 Oct.1, 2022.
- [13] Fang, Y., Wang, C., Ding, G., & Sun, Y. (2015). Optimal traffic balancing scheme in small cells between licensed and unlicensed bands. In 2015 International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP) (pp. 1-6). IEEE.
- [14] Cano, C., & Leith, D. J. (2015, June). Coexistence of WiFi and LTE in unlicensed bands: A proportional fair allocation scheme. In 2015 IEEE international conference on communication workshop (ICCW) (pp. 2288-2293). IEEE.
- [15] Li, P., Han, L., Xu, S., Wu, D. O., & Gong, P. (2020). Resource allocation for 5G-enabled vehicular networks in unlicensed frequency bands. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69(11), 13546-13555.
- [16] H. Bao, Y. Huo, X. Dong and C. Huang, "Joint Time and Power Allocation for 5G NR Unlicensed Systems," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 20, no. 9, pp. 6195-6209, Sept. 2021.

خواهد کرد که توان بسیار زیادی به کاربران ضعیف‌تر تخصیص دهد که این موجب افت محسوس مجموع گذردهی در شبکه می‌شود. همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، برای توان کل $P_{tot} = 20 \text{ dBmW}$ با افزایش ترافیک، نمودار مجموع گذردهی به یک مقدار معین که همان مجموع گذردهی حداقلی (R_{th}) تمام کاربران است، میل می‌کند. از طرفی در شکل ۸ به راحتی قابل مشاهده است که برای توان کل $P_{tot} = 10 \text{ dBmW}$ هم به طور مشابه مجموع گذردهی به یک مقدار معین میل می‌کند، ولی به دلیل کمبود بودجه توان کل، عملاً نمی‌تواند حداقل ترافیک مورد نیاز تمام کاربران را برآورده کنید و به این ترتیب به لحاظ بهینه‌سازی، الگوریتم PAA، ناحیه شدنی (feasible) برای یافتن پاسخ پیدا نمی‌کند.



شکل ۸- تغییرات مجموع گذردهی کاربران بر حسب تغییرات حداقل گذردهی در بودجه توان کل 20 dBmW و 10 dBmW

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله با طراحی ماتریس شکل‌دهی پرتو با استفاده از روش BD، هر دو نوع تداخل مطرح شده به طور کامل حذف گردید. در واقع روش BD کمک می‌کند که ماتریس‌های شکل‌دهی پرتو در فضای پوچ ماتریس‌های ضرایب کانال مربوط به کاربران غیر سلول مرکزی و دستگاه‌های WiFi به ترتب در باند مجوزدار و بدون مجوز قرار بگیرند. پس از طراحی ماتریس‌های شکل‌دهی پرتو، مسئله تخصیص توان به کاربران سلول مرکزی به صورت یک مسئله بهینه‌سازی محدب فرمول‌بندی گردید. با کمک روش‌های کلاسیک بهینه‌سازی محدب، الگوریتمی برای یافتن جواب بهینه مسئله پیشنهاد شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که الگوریتم پیشنهادی به طور قابل ملاحظه‌ای با خروجی بدست آمده از جعبه ابزار CVX که یک روش استاندارد بهینه‌سازی عددی در مسئله‌های بهینه‌سازی محدب است، نزدیک بوده است. علاوه بر این شبیه‌سازی بدست آمده نشان داد که استفاده از روش BD در طراحی ماتریس شکل‌دهی می‌تواند نسبت به روش متداول ZF که به طور گسترده در شبکه‌های mMIMO بکار گرفته می‌شود، برتری محسوس داشته باشد.

۷- کارهای آینده

در این مقاله به موضوع طراحی ماتریس شکل‌دهی پرتو و تخصیص توان در یک شبکه mMIMO چندسلولی همزیست با یک شبکه WiFi پرداختیم. رویکرد اصلی در نظر گرفته شده در این مقاله، حذف تداخل در باند مجوزدار و بدون مجوز بر پایه‌ی دو روش BD و ZF بوده است. یکی از کارهایی که می‌تواند در آینده مورد توجه قرار گیرد، طراحی ماتریس شکل‌دهی پرتو برپایه روش‌های بهینه‌سازی به منظور بیشینه کردن مجموع گذردهی کاربران می‌باشد. از طرفی در این مقاله، تخصیص کاربران به باندهای مجوزدار و بدون مجوز بر اساس بهره‌ی کانال مطلوب

- [۲۱] وصال حکمی، سید اکبر مصطفوی، زیبا عارفی نژاد "تخصیص منابع مبتنی بر یادگیری تقویتی برای بهبود گذردهی در ارتباطات D2D سلولی" مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۵۰، شماره ۳، صفحات ۱۱۶۵-۱۱۷۷، پاییز ۱۳۹۹.
- [22] Boyd, S., Boyd, S. P., & Vandenberghe, L. (2004). *Convex optimization*. Cambridge university press.
- [۲۳] جواد واحدیان اکندی، سید مهدی حسینی اندرگلی، "تخصیص منابع با هدف برقراری عدالت در بهره‌وری انرژی کاربران در شبکه‌های مخابراتی با قابلیت برداشت انرژی بی‌سیم." مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۹، شماره ۳، صفحات ۱۴۱۵-۱۴۲۶، پاییز ۱۳۹۸.
- [24] E. Björnson, M. Bengtsson and B. Ottersten, "Receive combining vs. multistream multiplexing in multiuser MIMO systems," 2011 IEEE Swedish Communication Technologies Workshop (Swe-CTW), Stockholm, Sweden, 2011, pp. 103-108.
- [17] Elsherif, A. R., Chen, W. P., Ito, A., & Ding, Z. (2015). Resource allocation and inter-cell interference management for dual-access small cells. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 33(6), 1082-1096.
- [18] S. Zimmo, A. Moubayed, A. R. Hussein and A. Shami, "Power-Aware Coexistence of Wi-Fi and LTE in the Unlicensed Band Using Time-Domain Virtualization," in *IEEE Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 44, no. 3, pp. 289-301, Summer 2021.
- [19] L. Wang et al., "Spatial-Reuse-Based Efficient Coexistence for Cellular and WiFi Systems in the Unlicensed Band," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, no. 3, pp. 1885-1898, 1 Feb.1, 2022.
- [20] Taherpour, Abbas, Seyed Mehdi Hosseini Andargoli, and Vahid Ghods. "Joint power allocation and user assignment for licensed/unlicensed band users in massive MIMO cellular systems." *Physical Communication* 52 (2022): 101590.