


Vol. 12/ No. 47/Spring 2023

Research Article

Handoff Optimization for Joint Base Station Association and Power Control with Proportional Fairness in NOMA Small-Cell Networks

Sina Pirnia, PhD Student ¹  | Hamidreza Bakhshi, Professor ^{2*}  | Mohamad Dosararian-Moghadam, Assistant Professor ³  | Ramin Khosravi, Assistant Professor ⁴ 

¹Department of Electrical Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran, pirniasina@gmail.com

²Department of Electrical Engineering, Shahed University, Tehran, Iran, hamidreza_bakhshi@yahoo.com

³Department of Electrical Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran, m_dmoghadam@yahoo.com

⁴Department of Electrical Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran, raminkhosravi53@gmail.com

Correspondence

Hamidreza Bakhshi, Professor of Electrical Engineering, Shahed University, Tehran, Iran, hamidreza_bakhshi@yahoo.com

Received: 6 September 2022

Revised: 5 October 2022

Accepted: 17 October 2022

Abstract

The handoff rate and load balancing are two important issues that have a great impact on the spectrum and energy efficiency in the small cell networks. This paper investigates the handoff optimization in small cell networks with power-domain non-orthogonal multiple access, considering the fairness among base stations. We study the joint base station association and power control problem by considering the motion of mobile users and load balancing in the small cell networks. Under the maximum allowable transmit power and minimum average-rate constraints, two optimization problems are formulated using the number of associated mobile users, the number of handoffs, and the transmit power of all MUs. We solve the formulated problem using a game theory-based algorithm and primal decomposition theory. The simulation results show that our proposed algorithm can significantly reduce the frequent handoffs and bring a fair power-controlled BS association in small cell networks. The obtained results reveal that compared with the conventional BS association algorithms, the proposed algorithm can reduce 54% of the overall handoffs and improve 32% Jain's fairness index.

Keywords: Handoff, Small Cell Networks, Base Station Association, Non-Orthogonal Multiple Access, Power Control, Proportional Fairness

Highlights

- The NOMA scheme is presented in the optimization of handoff in the small cell networks.
- The weighted sum method is used to formulate the optimization problem and a novel algorithm is proposed.
- To solve the HCA algorithm, the game theory based on the coalition formation, is employed.

Citation: S. Pirnia, H. Bakhshi, M. Dosararian-Moghadam, and R. Khosravi, "Handoff Optimization for Joint Base Station Association and Power Control with Proportional Fairness in NOMA Small-Cell Networks," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 12, no. 47, pp. 17–36, 2023, doi: 10.30495/jce.2022.1967097.1172 (in Persian).

مقاله پژوهشی

بهینه‌سازی دگرسپاری در تخصیص ایستگاه پایه توأم با کنترل توان در شبکه‌های سلولی ناهمگون با دسترسی چندگانه غیرمتعامد بر اساس معیار انصاف تناسبی

سینا پیرنیا^۱ | حمیدرضا بخشی^{۲*} | محمد دوسرانیان مقدم^۳ | رامین خسروی^۴

چکیده:

به‌منظور پاسخگویی به تقاضای فزاینده‌ای که برای استفاده از خدمات شبکه‌های بی‌سیم سلولی نسل جدید به وجود آمده است، شبکه‌ی ناهمگون شامل سلول‌های کوچک راه‌حل نظام‌مند و مطلوبی به شمار می‌رود. در این تحقیق یک شبکه با سلول‌های کوچک بر پایه فن‌آوری دسترسی چندگانه غیرمتعامد با روش حذف پی‌درپی تداخل را در نظر گرفته‌ایم. شبکه با سلول‌های کوچک، به‌صورت اجتناب‌ناپذیری با مشکل تداخل هم‌کانال و بار ترافیکی نامتعادل مواجه است که این مسئله بازده انرژی و طیفی شبکه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین در این نوع از شبکه‌ها به دلیل تحرک کاربر، تغییر شرایط کانال ارتباطی و تعداد زیاد دگرسپاری‌ها، مقدار زیادی انرژی مصرف می‌شود. بر این اساس، این تحقیق به بهینه‌سازی دگرسپاری در شبکه‌های شامل سلول‌های کوچک با روش دسترسی چندگانه غیرمتعامد می‌پردازد که کنترل توان و تخصیص ایستگاه پایه با لحاظ انصاف تناسبی در توزیع بار ترافیکی را در نظر می‌گیرد. یک مسئله بهینه‌سازی ترکیبی با تلفیق تخصیص ایستگاه پایه و کنترل توان ارائه شده است. مسئله بهینه‌سازی با به‌کاربردن نظریه‌های بازی ائتلاف و تجزیه اولیه، حل می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که الگوریتم ارائه شده در مقایسه با الگوریتم‌های دیگر از نظر تعداد دگرسپاری و انصاف عملکرد بهتری دارد به طوری که تعداد کل دگرسپاری‌ها را به میزان ۵۴٪ در مقایسه با الگوریتم بدون اعمال تحرک، کاهش داده و شاخص تعادل در توزیع بار را به میزان ۳۲٪ بهبود بخشیده است.

کلید واژه‌ها: دگرسپاری، شبکه با سلول‌های کوچک، ایستگاه پایه، دسترسی چندگانه غیرمتعامد، کنترل توان، انصاف تناسبی

^۱گروه مهندسی برق، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران، pirmiasina@gmail.com

^۲گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران، hamidreza_bakhshi@yahoo.com

^۳گروه مهندسی برق، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران، m_dmoghadam@yahoo.com

^۴گروه مهندسی برق، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران، raminkhosravi53@gmail.com

نویسنده مسئول

*حمیدرضا بخشی، استاد، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران، hamidreza_bakhshi@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۵ شهریور ۱۴۰۱

تاریخ بازنگری: ۱۳ مهر ۱۴۰۱

تاریخ پذیرش: ۲۵ مهر ۱۴۰۱

<https://doi.org/10.30495/jce.2022.1967097.1172>

۱-مقدمه

طی دهه‌های گذشته همواره درخواست فزاینده‌ای برای خدمات ارتباطی بی‌سیم وجود داشته است که امروزه از محدوده خدمات مکالمه گذشته و شامل خدمات تصویری و داده‌ای نیز می‌شود. این روند با توسعه همه‌جانبه‌ی شبکه‌های دسترسی

بی‌سیم همراه شده است. عموماً یک شبکه دسترسی بی‌سیم شامل ایستگاه‌های پایه ¹BS برای برقراری ارتباط با کاربران متحرک ²MU از طریق هسته شبکه است. به‌منظور پاسخگویی به تقاضای بی‌سابقه‌ای که برای استفاده از خدمات شبکه‌های بی‌سیم سلولی نسل جدید به وجود آمده است، توپولوژی شبکه‌های شامل سلول‌های کوچک ³SCN یا شبکه‌ی ناهمگون HetNets⁴ راه‌حل نظام‌مند و مطلوبی به شمار می‌رود [۱-۳]. توپولوژی شبکه‌های شامل سلول‌های کوچک را می‌توان چنین توصیف کرد که این نوع از شبکه‌ها شامل سلول‌های ماکرو ⁵MCN هستند که در درون خود شامل ایستگاه‌های پایه کوچک ⁶SBS با مصرف توان و هزینه کمتر و منطقه تحت پوشش کوچک‌تر می‌باشند [۴-۶]. شبکه SCN در کنار مزایای چشمگیری که دارد؛ مشکلاتی را نیز ایجاد می‌کند. استقرار و به کار بردن آن نیازمند حل معضلاتی از قبیل طراحی، معماری، تداخل و هم‌زمانی است [۷].

فن‌آوری دسترسی چندگانه غیرمتعامد NOMA⁷ که روش حذف پی‌درپی تداخل SIC⁸ را به کار می‌برد؛ روش مناسبی برای ارسال هم‌زمان اطلاعات کاربران متعدد بر روی یک حامل فرکانسی با استفاده از تفاوت در دامنه‌های توان کاربران است [۸]. بنابراین می‌توان گفت که به کار بردن NOMA با استفاده از SIC بازده طیفی و انرژی را در SCNها افزایش می‌دهد [۹]. برای دست یافتن به بازدهی طیفی، تخصیص یک BS مناسب به MU مسئله‌ای بسیار مهم محسوب می‌شود. تخصیص ایستگاه پایه BS به معنای ایجاد یک ارتباط بین ایستگاه پایه و کاربران متحرک تحت معیار بازدهی طیفی بر اساس مکان کاربران و با لحاظ توزیع بار ترافیکی و توان انتقال است. علاوه بر آن، کنترل توان به معنای اطمینان از این مسئله است که هر MU توان مناسبی را ارسال می‌کند؛ به‌گونه‌ای که کیفیت ارتباط حفظ‌شده و با سایر MUها تداخل ایجاد نشود. به‌بیان‌دیگر کنترل توان به معنای انتخاب هوشمندانه توان ارسالی هر یک از کاربران به‌منظور تخفیف تداخل هم کانال است [۱۰]. به دلیل تأثیری که تخصیص ایستگاه پایه و کنترل توان بر همدیگر دارند؛ برای دستیابی به عملکرد بهتر سیستم، این دو مقوله را باید در تلفیق با یکدیگر مورد بررسی قرارداد [۱۱-۱۳]. ناپایداری تخصیص ایستگاه پایه یک رخداد متداول در شبکه‌های سلولی فشرده است [۱۴].

با استقرار هرچه بیشتر شبکه‌های ناهمگون، پیچیدگی مدیریت تحرک نیز بیشتر می‌شود. کاربران متحرک ممکن است حین حرکت در حوزه تحت پوشش چندین سلول کوچک، بارها بین BSها دست‌به‌دست شوند. به همین دلیل خطر قطع ارتباط در این نوع از شبکه‌ها به دلیل ساختار شبکه بیشتر است. در یک شبکه سلولی، دگرسپاری⁹ فرآیندی است که این امکان را به کاربر می‌دهد تا ارتباط فعال خود را بدون از دست دادن کیفیت از یک سلول به سلول دیگر انتقال دهد. این فرآیند مزیت اصلی شبکه سلولی نسبت به دیگر شبکه‌ها به شمار می‌رود. در شبکه‌های همگون، کاربر معمولاً در سراسر شبکه، نظام یکسانی از پارامترهای دگرسپاری را به کار می‌برد. اما در شبکه‌های ناهمگون که حوزه پوشش ماکرو سل‌ها و سلول‌های کوچک یکسان نیست؛ به کار بردن پارامترهای یکسان ممکن است عملکرد تحرک را کاهش دهد. بنابراین در شبکه‌های ناهمگون پارامترهای دگرسپاری باید متناسب با مشخصات سلول‌های کوچک بهینه‌سازی شوند [۱۵]. دگرسپاری‌های مکرر بازدهی انرژی شبکه را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد [۱۶]. با توجه به تحرک کاربران، شرایط محیط ارتباطی و تعداد کاربران در SBSها متغیر هستند. بنابراین استفاده از یک طرح تلفیقی کنترل توان و تخصیص ایستگاه پایه بدون در نظر گرفتن تحرک ممکن است منجر به باز تخصیص‌های و دگرسپاری‌های مکرر بین SBSها شود.

از طرفی در شبکه‌های SCN یکسان نبودن اندازه سلول‌ها باعث عدم تعادل در توزیع بار ترافیکی می‌شود. بر این اساس در نظر گرفتن انصاف در تخصیص BS نیز امری ضروری است. اگرچه چندین کار تحقیقی در خصوص دگرسپاری در SCNهای بر پایه NOMA صورت گرفته اما مطالعات در مورد بهینه‌سازی دگرسپاری در تخصیص ایستگاه پایه و کنترل توان در شبکه‌های

¹ Base Station

² Mobile Users

³ Small Cell Networks

⁴ Heterogeneous Networks

⁵ Macro Cell Networks

⁶ Small Base Station

⁷ Non Orthogonal Multiple Access

⁸ Successive Interference Cancellation

⁹ Hand Off

SCN بر پایه NOMA کمیاب‌اند؛ بر این اساس در این تحقیق قابلیت تحرک کاربران در بهینه‌سازی مشترک تخصیص BS و کنترل توان با در نظر گرفتن انصاف تناسبی در توزیع بار ترافیکی در شبکه‌های ناهمگون در نظر گرفته شده و از مدل تحرک جهت تصادفی^۱ برای اعمال تحرک در مجموعه کاربران توزیع شده در حوزه پوشش ایستگاه‌های شبکه، استفاده می‌شود.

۲- مروری بر کارهای انجام شده

در دو دهه گذشته تحقیقات بسیاری باهدف تخصیص BSها و کنترل توان به منظور افزایش بازده طیفی و انرژی انجام شده است. در مرجع [۱۷]، تخصیص و عملکرد ایستگاه‌های پایه در شبکه‌های سلولی ناهمگون با بازدهی انرژی مطلوب مورد مطالعه قرار گرفته است. هدف از این تحقیق یافتن مجموعه‌ای از BSها برای فعالیت و تجمیع کاربران تحت شرط حداقل میزان داده‌ی مورد نیاز است. در مرجع [۱۸]، مسئله تخصیص ایستگاه پایه برای بیشینه‌سازی بازدهی انرژی در شبکه‌های شامل کاربران و سلول‌های چندگانه بررسی شده است. یک روش زیر بهینه‌ی تکرارشونده برای حل مسئله طراحی شده بر اساس تقریب متوالی محدب ارائه شده است. در مرجع [۱۹]، مسئله تخصیص BS و کنترل توان به صورت توأمان در مسیر رو به پایین شبکه‌های سلولی تحت معیار انصاف مطالعه شده است. برای حل مسئله طراحی شده یک روش دو مرحله‌ای زیر بهینه ارائه شده است. در مرجع [۲۰]، یک سازوکار تخصیص ایستگاه پایه - کاربر برای کاهش مصرف انرژی شبکه‌ی برق در شبکه‌های سلولی ناهمگون که توسط منابع انرژی ترکیبی (شبکه‌ی برق و منابع انرژی تجدید پذیر) تغذیه می‌شوند؛ ارائه شده و مورد ارزیابی قرار گرفته است.

فن‌آوری دسترسی چندگانه NOMA با SIC نیز یک موضوع تحقیقاتی مهم در راستای توسعه بازده انرژی و طیفی شبکه‌های سلولی است. به عنوان مثال بهبود مقدار خطای بیت BER^۲ و کاهش تداخل بین کاربران با استفاده از یک طرح دسته‌بندی در مرجع [۲۱] برای یک سیستم NOMA برای انواع مختلفی از کاربران انجام گرفته است. در مرجع [۲۲]، مصالحه بین بازدهی انرژی و طیفی در مسیر روبه پایین یک شبکه نامتقارن سلولی HetNets بر پایه NOMA، مورد مطالعه قرار گرفته است. در مرجع [۲۳]، مصالحه بین بازدهی طیفی و بازدهی انرژی از نظر مدیریت تداخل و تخصیص توان برای شبکه‌های ناهمگون بر پایه فن‌آوری دسترسی غیر متعامد NOMA مورد بررسی واقع شده است. مسئله بهینه‌سازی به صورت چندهدفه تحت محدودیت‌های بیشینه توان و کیفیت خدمات طراحی شده است. مرجع [۲۴]، یک شبکه ناهمگون بر پایه NOMA را در مسیر رو به پایین بررسی می‌کند. هدف از این بررسی حل مسئله بیشینه‌سازی بازدهی انرژی بر اساس بهینه‌سازی توأم زمان‌بندی کاربر و تخصیص توان است. مسئله طراحی شده‌ی اولیه یک مسئله‌ی چندهدفه و غیر محدب است که به دو مسئله تک هدفه تجزیه می‌شود. در مرجع [۲۵]، در مورد راه‌حل‌های بهینه‌ی تخصیص توان و کاربر برای دستیابی به تخصیص منابع انرژی-بازده و منصفانه در مسیر رو به پایین شبکه‌های ناهمگون بر پایه NOMA مطالعه شده است. در مسیر رو به پایین شبکه‌های NOMA شامل انواع مختلفی از ایستگاه‌های پایه، تخصیص کاربر تلفیق شده با اختصاص توان در مرجع [۲۶] مورد بررسی قرار گرفته است که در آن نویسنده دو الگوریتم تکاملی مختلف را برای حل مسئله ارائه شده به کار می‌برد.

جدا از بررسی تخصیص منابع و عملکرد در شبکه، مطالعات متعددی در مورد مسئله دگرسپاری در SCNها صورت گرفته است. یک الگوریتم کاهش دگرسپاری‌های مکرر در مرجع [۲۷] برای یک شبکه نامتقارن فوق انبوه ارائه شده است. در این تحقیق کاربرانی که دگرسپاری‌های مکرر را تجربه کرده‌اند؛ به دو دسته کاربران با حرکت سریع و کاربران به اصطلاح پینگ‌پونگی دسته‌بندی شدند. الگوریتم ارائه شده کاربران با حرکت سریع را به لایه ماکرو دست‌به‌دست می‌کرد و کاربران پینگ‌پونگی از طریق ایجاد تغییرات در پارامترهای دگرسپاری مدیریت می‌شدند. در مرجع [۲۸]، یک الگوریتم جدید برای انتخاب مؤثر شبکه در یک شبکه ناهمگون شامل ایستگاه‌های ماکرو و فمتو معرفی شد. این الگوریتم معیارهای مختلفی از QoS از قبیل قدرت سیگنال دریافتی، احتمال خروج از پوشش و سطح تداخل هم کانال را در محاسبات منظور می‌کند. مرجع [۲۹]، یک طرح مدیریت دگرسپاری سرعت-آگاه را برای مسیر رو به پایین یک شبکه سلولی دولایه‌ای به منظور کاهش میزان دگرسپاری‌ها ارائه می‌دهد. در مرجع [۳۰]، نویسندگان یک مسئله تلفیقی از تخصیص منابع و کاربر را در یک شبکه سلولی

¹ Random Direction

² Bit Error Rate

ناهمگون مجازی، در نظر گرفتند. آن‌ها یک مدل پیش‌بینی تحرک را بر اساس مدل مارکوف ساختند و سپس یک مسئله تلفیقی برای بهینه‌سازی کردن ظرفیت سیستم طراحی کردند. در مرجع [۳۱]، رویکردی بر مبنای نظریه‌ی بازی غیرتعاونی اتخاذ شده که هدف آن مدیریت دگرسپاری در شبکه‌های ناهمگون با سلول‌های کوچک انبوه است. هر ایستگاه پایه در شبکه به‌منزله یک بازیکن در نظر گرفته شده که قصد دارد با تنظیم توان ارسالی مقدار پاداش خود در بازی را افزایش دهد. در مرجع [۳۲]، به‌منظور ایجاد تعادل بار ترافیکی و افزایش توان عملیاتی در شبکه‌های ناهمگون روشی برای دگرسپاری ارائه شده است. در این روش کاربران مجبور به انتقال از سلول‌های بزرگ دارای ازدحام به سلول‌های کوچک هستند. در مرجع [۳۳]، یک سازوکار اجرای دگرسپاری تحت چندین معیار به‌منظور بهینه‌سازی تعادل بار ترافیکی در شبکه‌های سلولی ارائه شده است. در مرجع [۳۴]، توزیع بار ترافیکی در شبکه با استفاده از روشی بر پایه‌ی یادگیری زیر نظر گرفته شده و مسئله تعادل بار به‌صورت یک مسئله‌ی بهینه‌سازی فایده با در نظر گرفتن تأخیر دگرسپاری مدل شده است.

علیرغم تلاش‌های قابل توجه که برای مدیریت دگرسپاری مصرف شده؛ کارهای تحقیقی زیادی با لحاظ تحرک کاربران و بهینه‌سازی میزان دگرسپاری در راستای افزایش بازدهی انرژی و طیفی در شبکه‌های SCN بر پایه NOMA در دسترس نیست. با این انگیزه، هدف ما در این تحقیق، بهینه‌سازی دگرسپاری برای تخصیص ایستگاه پایه و کنترل توان در شبکه‌های SCN بر پایه NOMA همراه با SIC است. ما تحرک کاربران، شرایط کانال و انصاف را در مسئله تلفیقی تخصیص ایستگاه پایه و کنترل توان در شبکه‌های SCN بر پایه NOMA لحاظ می‌کنیم. به این ترتیب که از طریق دخالت دادن تأثیر تحرک کاربران بر شرایط کانال در قاب‌های زمانی متوالی، ایستگاه‌های پایه و توان ارسالی را به کاربران اختصاص داده‌ایم. نوآوری‌های این تحقیق عبارت‌اند از:

- از اصول NOMA در بهینه‌سازی دگرسپاری برای تخصیص ایستگاه پایه و کنترل توان در مسیر رو به بالای یک شبکه SCN با در نظر گرفتن تداخل، استفاده شده است.
- یک مسئله تلفیقی بهینه‌سازی بر اساس بهینه‌سازی توابع فایده‌ی "سیستم و دگرسپاری" و کمینه‌سازی مصرف توان، بر اساس معیار انصاف تناسبی ضابطه‌مند شده است.
- در طراحی مسئله‌ی بهینه‌سازی، از روش جمع وزن استفاده شده و الگوریتم جدیدی به نام کنترل دگرسپاری HCA^۱ ارائه شده است.
- برای حل الگوریتم HCA، نظریه بازی ائتلاف، روش Simulated Annealing و نظریه تجزیه اولیه به‌کاررفته است. در این قسمت ترتیب مقاله بیان می‌شود. در بخش سوم به مدل سیستم و چگونگی ضابطه‌مند کردن^۲ مسئله می‌پردازیم. بخش چهارم به تشریح الگوریتم ارائه شده می‌پردازد. نتایج شبیه‌سازی در بخش پنجم ارائه شده‌اند. بخش ششم به نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهاد اختصاص داده شده است.

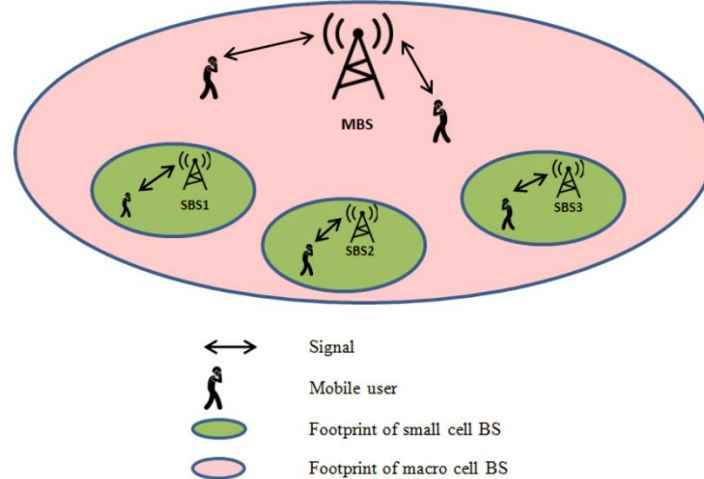
۳- مدل سیستم و ضابطه‌مند کردن مسئله

در این بخش جزئیات مدل بیان می‌شود. ما مسیر رو به بالای یک شبکه ناهمگون بی‌سیم سلولی بر پایه NOMA را که شامل ایستگاه‌های پایه و کاربران است؛ در نظر گرفته‌ایم که در آن کاربران آزادانه در حال حرکت هستند. در شبکه‌ی در نظر گرفته شده کاربران به شکل یکنواخت توزیع شده‌اند و با سرعت و جهت تصادفی در حال حرکت هستند. در این مدل کاربران به‌صورت متحرک پیاده در نظر گرفته شده‌اند. شکل ۱ شبکه SCN ارائه شده را نشان می‌دهد. ما فرض می‌کنیم که تعداد K عدد کاربر وجود دارد که به‌صورت ۱، ۲،، K نشان داده شده‌اند که اطلاعاتشان را به تعداد N عدد ایستگاه پایه BS ارسال می‌کنند که با این BSها به‌صورت ۱، ۲،، N نشان داده شده‌اند. چنین فرض شده که کلیه ایستگاه‌های پایه و کاربران دارای یک آنتن هستند. کل پهنای باند فرکانسی سیستم را برابر با B هرتز در نظر می‌گیریم که در بین کاربران به روش NOMA تسهیم شده است. چنین فرض شده است که هر BS از کلیه کاربرانی که به آن‌ها خدمات‌رسانی می‌کند؛ سیگنال آزمون‌های دریافت می‌کند که با استفاده از آن اطلاعات مربوط به حالت کانال را به دست می‌آورد. هر BS کاربران تخصیص یافته به خود را بر

¹ Handoff Control Algorithm

² Formulation

اساس یک الگوی زمانی که در آن زمان به فواصل زمانی برابر با t تقسیم شده، خدمات رسانی می‌کند. بهره کانال با $g_{kn}^{(t)}$ نشان داده شده است که اطلاعات حالت کانال مابین k امین MU و n امین BS را در قاب زمانی t بیان می‌کند و شامل تلفات مسیر، اثر سایه و اثر محوشدگی است. تحرک کاربران موجب تغییر فاصله بین کاربر k و ایستگاه‌های پایه می‌شود. در نتیجه تغییر فاصله، مقادیر بهره کانال $g_{kn}^{(t)}$ نیز در فواصل زمانی متوالی تغییر می‌کنند. تغییرات رخداد در مقادیر $g_{kn}^{(t)}$ مقادیر میزان داده و تداخل‌های درون سلولی و برون سلولی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به بیان دیگر، تأثیر تحرک هر کاربر k که بسته به فاصله‌اش با BS، m است؛ داخل $g_{kn}^{(t)}$ در قاب زمانی t منظور شده است.



شکل ۱: شبکه با سلول‌های کوچک
Figure 1. Small cell network

مابین BSها و MUها یک کانال با محوشدگی تخت رایلی با میانگین صفر در نظر گرفته شده است. سرعت پیاده‌روی کاربران متحرک تقریباً به صورت یک توزیع نرمال با میانگین $1/52$ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است [۳۵]. به دلیل تغییرات آرام کانال، فرض حالت کانال کامل در انتقال مشکلی را ایجاد نمی‌کند. ما از $S_n^{(t)}$ برای بیان مجموعه MUهای تخصیص داده شده به BS n در قاب زمانی t استفاده می‌کنیم. چنین فرض شده که BS n قادر است طرح NOMA با استفاده از SIC را به صورت کامل اجرا کند. ما π را برای نشان دادن ترتیب SIC در هر قاب زمانی به کار می‌بریم. ترتیب SIC بر اساس ترتیب کاهشی مقدار بهره کانال معین می‌شود. یعنی سیگنال کاربری که بهترین شرایط کانال را دارد، در ابتدا آشکارسازی می‌شود. بنابراین میزان داده‌ی لحظه‌ای قابل دسترس برای MU k به BS n تخصیص یافته در قاب زمانی t برابر است با،

$$R_k^{(t)} = B \log_2 \left(1 + \frac{P_k^{(t)} g_{kn}^{(t)}}{I_{Intra-cell}^{(t)} + I_{Inter-cell}^{(t)} + \sigma^2} \right) \quad (1)$$

در رابطه ۱، $p_k^{(t)}$ مقدار توان ارسالی از MU k به BS n در زمان t با شرط $p_k^{(t)} \leq P_{k,max}$ را نشان می‌دهد که $P_{k,max}$ نشان‌دهنده‌ی مقدار بیشینه مجاز توان برای کاربر k است. علاوه بر آن σ^2 مقدار توان نویز در BS n است. $I_{Intra-cell}$ نشان‌دهنده‌ی تداخل درون سلولی است. کاربرانی که بعد از MU k آشکارسازی می‌شوند و به BS n تخصیص یافته‌اند؛ این تداخل را روی MU k ایجاد می‌کنند. تداخل درون سلولی برابر است با،

$$I_{Intra-cell}^{(t)} = \sum_{l=k+1}^K p_l^{(t)} g_{ln}^{(t)} \quad (2)$$

مقدار $I_{Inter-cell}$ تداخل برون سلولی را نشان می‌دهد و برابر است با،

$$I_{Inter-cell}^{(t)} = \sum_{n'=1; n' \neq n}^N \sum_{k' \in S_{n'}^{(t)}} p_{k'}^{(t)} g_{k'n}^{(t)} \quad (3)$$

ما فرض می‌کنیم که در صورت تخصیص MU k به BS n مقدار پاداشی برابر با ρ_k تولید می‌شود (به عنوان مثال این مقدار می‌تواند برابر با بهای خدمات شبکه باشد). در نتیجه درآمد BS n را می‌توان به صورت زیر بیان کرد.

$$\sum_{k=1}^K \rho_k a_{kn}^{(t)} \quad (۴)$$

به بیان دیگر درآمد کل برابر است با مجموع وزین کل MUهایی که به BS n تخصیص داده شده اند. $a_{kn}^{(t)}$ یک شاخص تخصیص دودویی در ابتدای قاب زمانی t است. اگر $a_{kn}^{(t)}$ برابر با یک باشد؛ نشان دهنده آن است که MU k به BS n تخصیص داده شده است. در غیر این صورت این شاخص برابر با صفر است. اگر مقدار ρ_k برای همه ی MUها برابر با ۱ باشد؛ درآمد کل برابر با مجموع کل کاربران تخصیص داده شده به BS n خواهد بود. ما برای دستیابی به تعادل بار، تابع انصاف^۱ را اتخاذ کرده- ایم که در آن تابع فایده ی سیستم-گسترده، مقعر و افزایشی بوده و به صورت زیر تعریف می شود،

$$U_n(\sum_{k=1}^K a_{kn}^{(t)}) = \ln(\sum_{k=1}^K a_{kn}^{(t)}) \quad (۵)$$

با در نظر گرفتن تحرک کاربران، تابع فایده دگرسپاری به صورت زیر تعریف می شود،

$$h_n^{(t)}(a_{i...}^{(t-1)}, a_{i...}^{(t)}) \triangleq a_{i...}^{(t-1)} a_{i...}^{(t)} \quad (۶)$$

تابع ارائه شده در رابطه ۶، یک تابع دودویی است که مشخص می کند که آیا MU k دگرسپاری داشته است یا خیر. زمانی که MU k در قاب زمانی t به BS دیگری تخصیص داده شود؛ مقدار این تابع برابر با صفر است و در غیر این صورت مقدار تابع برابر با یک خواهد بود.

ضابطه ی معیار دگرسپاری برای BS n به صورت زیر است،

$$h_n^{(t)}(a_{kn}^{(t-1)}, a_{kn}^{(t)}) \triangleq \sum_{k=1}^K a_{kn}^{(t-1)} a_{kn}^{(t)} \quad (۷)$$

می توان دریافت که مقدار تابع فوق برابر است با مجموع تعداد MU های تخصیص داده شده به BS n که در قاب زمانی t به BS دیگری انتقال نیافته اند.

به منظور بیشینه سازی توابع فایده ی سیستم-گسترده و دگرسپاری هم زمان با کمینه سازی مجموع مصرف توان، تابع فایده برای هر BS به صورت زیر تعریف می شود،

$$U_n(\sum_{k=1}^K a_{kn}^{(t)}, a_{kn}^{(t)}, a_{kn}^{(t-1)}) = U_n(\sum_{k=1}^K a_{kn}^{(t)}) + \gamma h_n^{(t)}(a_{kn}^{(t-1)}, a_{kn}^{(t)}) \quad (۸)$$

تابع فوق به صورت جمع تابع فایده سیستم-گسترده و تابع فایده ی وزین دگرسپاری برای BS n بیان می شود. تابع رابطه ۵ یک تابع مقعر افزایشی و تابع رابطه ۷ یک تابع افزایشی خطی است و بنابراین می توان گفت یک تابع مقعر افزایشی است. در نتیجه رابطه ۸ به صورت مجموع دو تابع رابطه ۵ و ۷ نیز مقعر افزایشی است. پارامتر $\gamma \in [0, 1]$ یک ضریب وزنی با مقداری بین اعداد صفر و یک است. این پارامتر نشان دهنده ی اهمیت میزان دگرسپاری است. افزایش مقدار γ باعث کاهش میزان دگرسپاری می شود و بالعکس. نهایتاً مسئله تلفیقی تخصیص BS و کنترل توان برای مسیر رو به بالای یک شبکه سلولی ناهمگون بر پایه NOMA با لحاظ تحرک را می توان به صورت زیر نوشت،

$$\mathbf{P1} \quad U^* = \max_{(p,A)} \sum_{n=1}^N U_n(\sum_{k=1}^K a_{kn}^{(t)}, a_{kn}^{(t)}, a_{kn}^{(t-1)}) \quad (۹)$$

$$\text{s.t} \quad \sum_{n=1}^N a_{kn}^{(t)} R_k \geq R_{k,\min} \quad (۱۰)$$

$$\sum_{n=1}^N a_{kn}^{(t)} \leq 1 \quad (۱۱)$$

$$a_{kn}^{(t)} \in \{0, 1\} \quad \forall k \in K, \forall n \in N \quad (۱۲)$$

$$0 \leq p \leq P_{k,\max}, \quad \forall k \in K, \forall n \in N \quad (۱۳)$$

$$\min_{(p,A)} \sum_{k=1}^K p_k \quad (۱۴)$$

^۱ Proportional Fairness

$$\sum_{n=1}^N U_n(\sum_{k=1}^K a_{kn}^{(t)}, a_{kn}^{(t)}, a_{kn}^{(t-1)}) = U^* \quad (15)$$

$$(13) \text{ الی } (10) \quad (16)$$

که \mathbf{p} و \mathbf{A} به ترتیب بیان‌کننده‌ی بردار انتقال توان و ماتریس تخصیص BS در قاب زمانی t هستند. همچنین $R_{k,\min}$ بیان‌کننده‌ی کمینه‌ی میزان متوسط داده‌ی موردنیاز برای k MU است. رابطه ۹ بر اساس بیشینه‌سازی هم‌زمان توابع فایده‌ی سیستم-گسترده و دگرسپاری به‌عنوان دو تابع هدف غیرقابلی ارائه‌شده است. رابطه ۱۰ کمینه‌ی میزان داده موردنیاز را برای k امین MU بیان می‌کند. رابطه ۱۱ نشان می‌دهد که هر MU می‌تواند فقط به یک BS متصل شود. رابطه ۱۲ همان مقدار شاخص تخصیص است. شرایط توان k MU در رابطه ۱۳ ارائه‌شده است. رابطه ۱۴ تابع هدف کمینه‌سازی مجموع توان انتقال است درحالی‌که توابع فایده‌ی سیستم-گسترده و دگرسپاری بیشینه شده‌اند. طبق روش جمع وزن [۳۶]، ما ابتدا به‌صورت خطی توابع هدف چندگانه را ترکیب کرده و به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی تک هدف درمی‌آوریم. با استفاده از این روش، مسئله بهینه‌سازی به‌صورت زیر تبدیل می‌شود،

$$\mathbf{P2} \quad \min_{(p, A)} \beta \sum_{k=1}^K p_k^{(t)} - (1 - \beta) \sum_{n=1}^N U_n(\sum_{k=1}^K a_{kn}^{(t)}, a_{kn}^{(t)}, a_{kn}^{(t-1)}) \quad (17)$$

$$\text{s.t} \quad \sum_{n=1}^N a_{kn}^{(t)} R_k^{(t)} \geq R_{k,\min} \quad (18)$$

$$\sum_{n=1}^N a_{kn}^{(t)} \leq 1 \quad (19)$$

$$a_{kn}^{(t)} \in \{0, 1\} \quad \forall k \in K, \forall n \in N \quad (20)$$

$$0 \leq p \leq P_{k,\max}, \quad \forall k \in K, \forall n \in N \quad (21)$$

عدد $\beta \in [0, 1]$ یک ضریب وزنی است که وضعیت مصالحه بین دو تابع هدف را نشان می‌دهد. مقدار زیاد β در بازه تعیین‌شده، کمینه‌سازی توان مصرفی را در حل مسئله ترجیح می‌دهد درحالی‌که مقدار کم این پارامتر نشان‌دهنده برتری دادن بیشینه‌سازی تابع فایده‌ی سیستم - گسترده و دگرسپاری در حل مسئله است.

مسئله $\mathbf{P2}$ به دلیل مقادیر دودویی تخصیص کاربر در رابطه ۱۹ و مقادیر پیوسته توان انتقال MUها، یک مسئله غیر محدب عدد صحیح ترکیبی است. همچنین این مسئله به دلیل ارتباط متقابل تداخل برون سلولی کاربران، غیر محدب است؛ بنابراین یافتن راه‌حل بهینه برای این مسئله بر اساس نظریه بهینه‌سازی محدب غیرممکن است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مسئله بهینه‌سازی ضابطه سازی شده ترکیبی از مسائل تخصیص BS، کنترل توان و دگرسپاری است؛ بنابراین ما نشان می‌دهیم که مسئله بهینه‌سازی ارائه‌شده را می‌توان به‌صورت یک بازی ائتلاف در نظر گرفت. ما روش Simulated Annealing را برای به دست آوردن راه‌حل بهینه‌ی سراسری به کار می‌بریم.

۳-۱- ضابطه سازی بر اساس بازی ائتلاف

بر اساس مسئله بهینه‌سازی $\mathbf{P2}$ هر MU به یک BS شدنی^۱ تخصیص داده می‌شود که می‌تواند بر اساس بیشینه‌ی تابع فایده‌ی سیستم-گسترده و دگرسپاری، مجموع مصرف توان را کمینه کند؛ بنابراین بر طبق نظریه بازی تعاونی، ما می‌توانیم مسئله را به‌صورت یک بازی ائتلافی در نظر بگیریم [۳۷].

فرض می‌کنیم که کاربران در شبکه به‌منزله بازیکنان هستند و بخش‌بندی کاربران ساختاری ائتلافی به‌صورت مجموعه $B^{(t)}$ دارد که شامل اعضای $S_1^{(t)}$ الی $S_{N+1}^{(t)}$ است که در آن $S_n^{(t)}$ توسط n BS شکل داده‌شده به شرطی که $n \leq N$ و مجموعه کاربرانی که به هیچ BS تخصیص داده نشده‌اند؛ با $S_{N+1}^{(t)}$ نشان داده می‌شوند. بخش‌بندی $B^{(t)}$ مجموعه‌ای از ائتلاف‌های ناسازگار S_n از N است. بر اساس رابطه ۱۷، تابع ارزش هر یک از ائتلاف‌های S_n را می‌توان به شکل زیر تعریف کرد،

^۱ Feasible

$$V(S_n^{(t)}, B^{(t)}) = \begin{cases} \beta \sum_{k=1}^K \hat{p}_k^{(t)} - (1-\beta)U_n(\sum_{k=1}^K a_{kn}^{(t)}) + \gamma H \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (22)$$

که در رابطه فوق H تعداد MUهایی است که در قاب زمانی t به BS دیگری دگرسپاری نداشته‌اند و $\hat{p}_k^{(t)}$ توان ارسالی بهینه را برای k امین MU باوجود بخش‌بندی B نشان می‌دهد.

روشن است که بر اساس ساختار ائتلافی کاربران یعنی $B^{(t)}$ ، کل شاخص‌های تخصیص به دست می‌آیند. به‌این ترتیب که اگر کاربر k عضوی از ائتلاف $S_n^{(t)}$ باشد؛ $a_{kn}^{(t)}$ برابر با یک خواهد بود و در غیر این صورت برای همه n ها این شاخص برابر با صفر است. به‌منظور محاسبه تابع بخش‌بندی $V(S_n^{(t)}, B^{(t)})$ ، ما باید توان ارسالی بهینه $\hat{p}_k^{(t)}$ را به دست بیاوریم. در ادامه ما مقادیر \hat{p}_k را با توجه به $B^{(t)}$ به دست خواهیم آورد.

۳-۲- مسئله کمینه‌سازی برای به دست آوردن توان ارسالی

زمانی که ماتریس تخصیص $A^{(t)}$ معین شود؛ ما می‌توانیم توان ارسال بهینه را به دست آوریم. اگر کاربر k متعلق به ائتلاف $S_{N+1}^{(t)}$ باشد؛ $\hat{p}_k^{(t)} = 0$ است و در غیر این صورت سایر $\hat{p}_k^{(t)}$ ها را می‌توان با حل مسئله بهینه‌سازی زیر به دست آورد،

$$P3 \quad \min_{p_k^{(t)}, s} \sum_{\forall k \in S_{N+1}^{(t)}} p_k^{(t)} \quad (23)$$

$$s.t \quad R_k^{(t)} \geq R_{k,\min} \quad (24)$$

$$0 \leq p_k^{(t)} \leq P_{k,\max}, \quad \forall k \in S_n^{(t)}, \forall n \in N \quad (25)$$

می‌توان مسئله P3 را با در نظر گرفتن $R_k^{(t)}$ ها به‌عنوان متغیرهای جدید به‌صورت زیر بازنویسی کرد،

$$P4 \quad \min_{p_k^{(t)}, s} \sum_{\forall k \in S_{N+1}^{(t)}} p_k^{(t)} \quad (26)$$

$$s.t \quad R_k^{(t)} \geq R_{k,\min} \quad (27)$$

$$B \log_2 \left(1 + \frac{p_k^{(t)} g_{kn}^{(t)}}{I_{Intra-cell}^{(t)} + I_{Inter-cell}^{(t)} + \sigma^2} \right) \geq R_k^{(t)} \quad (28)$$

$$0 \leq p_k^{(t)} \leq P_{k,\max}, \quad R_k^{(t)} \geq 0, \quad \forall k \in S_n^{(t)}, \forall n \in N \quad (29)$$

مسئله P4 با مسئله P3 معادل است زیرا مسئله P4 و روابط ۲۶، ۲۷ و ۲۸ همگی توابعی به‌صورت یکنواخت افزایشی از $\hat{p}_k^{(t)}$ ها هستند.

گزاره ۱: مسئله P4 را برای مسیر روبه بالای سیستم NOMA با SIC، می‌توان از طریق تغییر لگاریتمی متغیرها و نگاشت لگاریتمی تابع هدف و محدودیت‌ها، به یک مسئله محدب تبدیل نمود.

اثبات: به‌ضمیمه الف مراجعه نمایید.

با استفاده از روش تجزیه اولیه [۳۸] ما می‌توانیم مسئله P4 را به‌صورت بهینه حل کنیم. زمانی که متغیرهای $R_k^{(t)}$ را ثابت در نظر بگیریم؛ می‌توانیم مقادیر توان را با حل مسئله بهینه‌سازی زیر به دست آوریم،

$$\min_{p_k^{(t)}, s} \sum_{n=1}^N \sum_{\forall k \in S_{N+1}^{(t)}} p_k^{(t)} \quad (30)$$

$$s.t \quad B \log_2 \left(1 + \frac{p_k^{(t)} g_{kn}^{(t)}}{I_{Intra-cell}^{(t)} + I_{Inter-cell}^{(t)} + \sigma^2} \right) \geq R_k^{(t)}$$

$$0 \leq p_k^{(t)} \leq P_{k,\max}, \quad \forall k \in S_n^{(t)}, \forall n \in N$$

ما می‌توانیم اولین محدودیت در مسئله بیان شده در رابطه ۳۰ را بر اساس رابطه ۱ به‌صورت زیر بازنویسی کنیم،

$$\begin{aligned}
B \log_2 \left(1 + \frac{p_{n_k}^{(t)} g_{kn}^{(t)}}{\sum_{l=k+1}^K p_l^{(t)} g_{ln}^{(t)} + \sum_{n'=1; n' \neq n}^N \sum_{k' \in S_n^{(t)}} p_{n'_k}^{(t)} g_{k'n'}^{(t)} + \sigma^2} \right) &\geq R_k^{(t)} \\
\Rightarrow p_{n_k}^{(t)} - \frac{(2^{R_k^{(t)}} - 1) \left(\sum_{l=k+1}^K p_l^{(t)} g_{ln}^{(t)} + \sum_{n'=1; n' \neq n}^N \sum_{k' \in S_n^{(t)}} p_{n'_k}^{(t)} g_{k'n'}^{(t)} \right)}{g_{kn}^{(t)}} &\geq \frac{(2^{R_k^{(t)}} - 1) \sigma^2}{g_{kn}^{(t)}}
\end{aligned} \quad (31)$$

زمانی که مقادیر بهینه‌ی $p_{n_k}^{(t)}$ به دست آمدند؛ می‌توان مقادیر بهینه‌ی $R_k^{(t)}$ را با حل مسئله زیر به دست آورد،

$$\begin{aligned}
\min_{p_{n_k}, s} \sum_{n=1}^N \sum_{\forall k \in S_n^{(t)}} (\hat{p}_{n_k}(\hat{R}))^{(t)} \\
\text{s.t. } R_k^{(t)} \geq R_{k, \min} / B
\end{aligned} \quad (32)$$

که در آن بردار مقادیر $R_k^{(t)}$ است و $(\hat{p}_{n_k}(\hat{R}))^{(t)}$ مقدار هدف در مسئله رابطه ۳۰ در زمان t است. بر اساس تحدب مسئله P4، هر دو مسئله رابطه ۳۰ و ۳۲ محدب‌اند. ما از روش نقاط داخلی^۱ برای حل مسئله رابطه ۳۰ و روش ساب‌گرادیان تصویر شده^۲ برای حل مسئله رابطه ۳۲ استفاده می‌کنیم.

$$R_k(\tau+1) = P(R_k(\tau) + \sum_{m=1}^{|S_n^{(t)}|} \lambda_m \left(\frac{(\ln 2)(2^{R_k^{(t)}}) \left(\sum_{l=k+1}^K p_l^{(t)} g_{ln}^{(t)} + \sum_{n'=1; n' \neq n}^N \sum_{k' \in S_n^{(t)}} p_{n'_k}^{(t)} g_{k'n'}^{(t)} \right)}{g_{kn}^{(t)}} - \frac{(\ln 2)(2^{R_k^{(t)}}) \sigma^2}{g_{kn}^{(t)}} \right)) \quad (33)$$

در رابطه ۳۳، $P(\cdot)$ نشان‌دهنده‌ی تصویر بر روی مجموعه‌ی شدنی زیر است،

$$R^{(t)} = \left\{ R_k^{(t)} \geq R_{n_k, \min} / B, \forall k \in S_n^{(t)}, \forall n \in N \right\} \quad (34)$$

پارامتر λ_k نشان‌دهنده‌ی ضرایب در ارتباط با اولین محدودیت در مسئله رابطه ۳۰ است. در ادامه ما الگوریتم پیشنهادی را ارائه می‌کنیم.

۴- الگوریتم پیشنهادی

در این بخش الگوریتم به دست آوردن توان ارسالی بهینه را ارائه می‌کنیم. بعد از به دست آوردن $\hat{\mathbf{p}}$ ، کار را با الگوریتم HCA برای افزایش بازده تحرک در بیشینه‌سازی تابع فایده‌ی سیستم-گسترده و کنترل توان در مسیر رو به بالای یک شبکه با سلول‌های کوچک، ادامه می‌دهیم. تصمیم در مورد تخصیص ایستگاه پایه به کاربران متحرک از طریق اجرای الگوریتم HCA در سرور بخش هسته^۳ شبکه به‌عنوان مثال در بخش AMF^۴ در 5G و یا در بخش MME^۵ در شبکه‌های تلفیقی 4G و 5G صورت می‌گیرد. کنترل‌کننده‌های موجود در هسته شبکه بر اساس اطلاعات کانال که از طریق ایستگاه‌های پایه دریافت می‌کنند؛ مقدار توان ارسالی هر یک از کاربران و نیز ایستگاه مربوط به هر کاربر متحرک را با اجرای الگوریتم پیشنهادی و انجام محاسبات مربوطه، تعیین می‌کنند.

¹ Interior point

² Projected subgradient

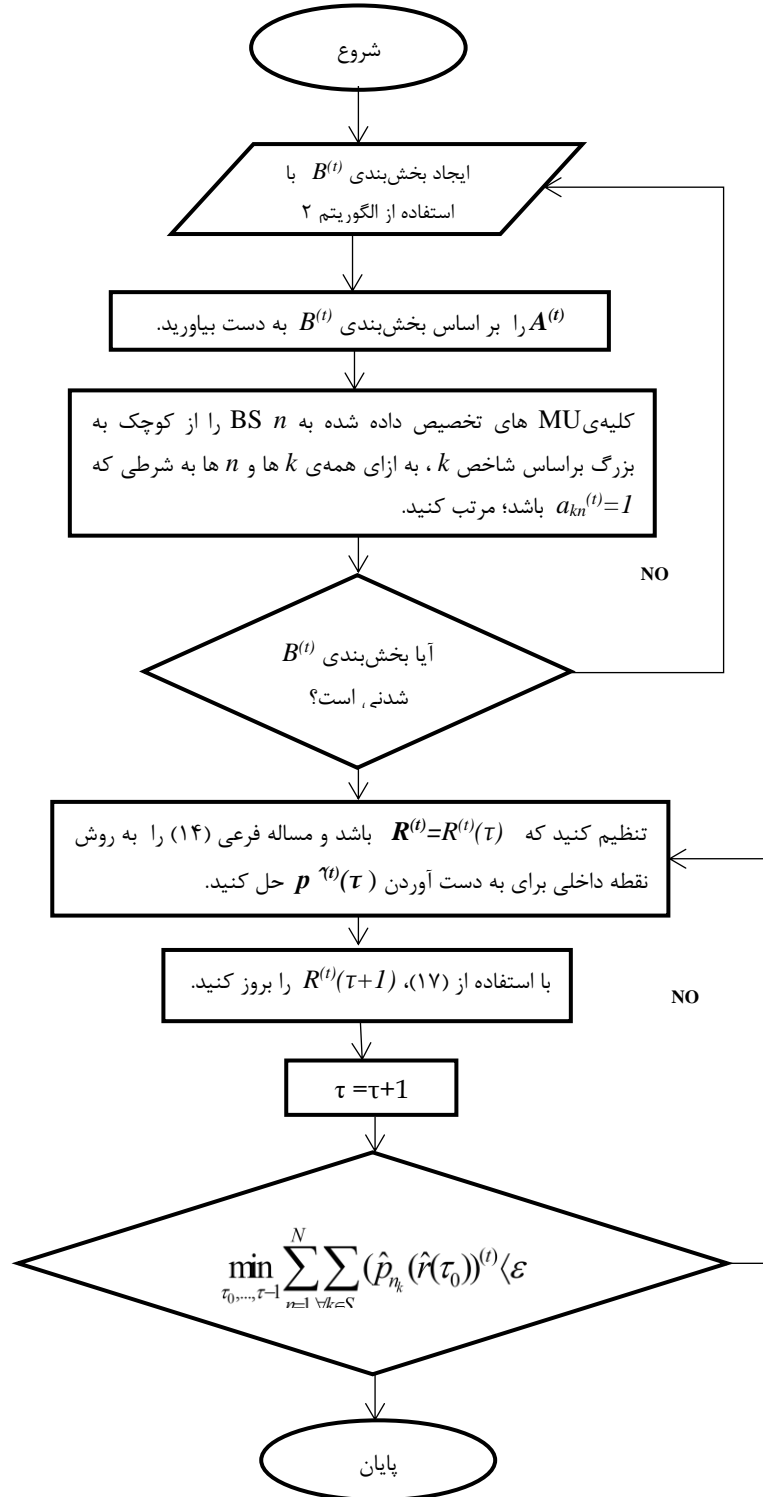
³ Core

⁴ Access & Mobility Management Function

⁵ Mobility Management Entity

۴-۱- الگوریتم به دست آوردن توان ارسالی بهینه

بر اساس بخش‌بندی ارائه‌شده‌ی $B^{(t)}$ توان ارسالی بهینه را برای هر یک از کاربران در الگوریتم ۱ مطابق شکل ۲ محاسبه می‌کنیم.



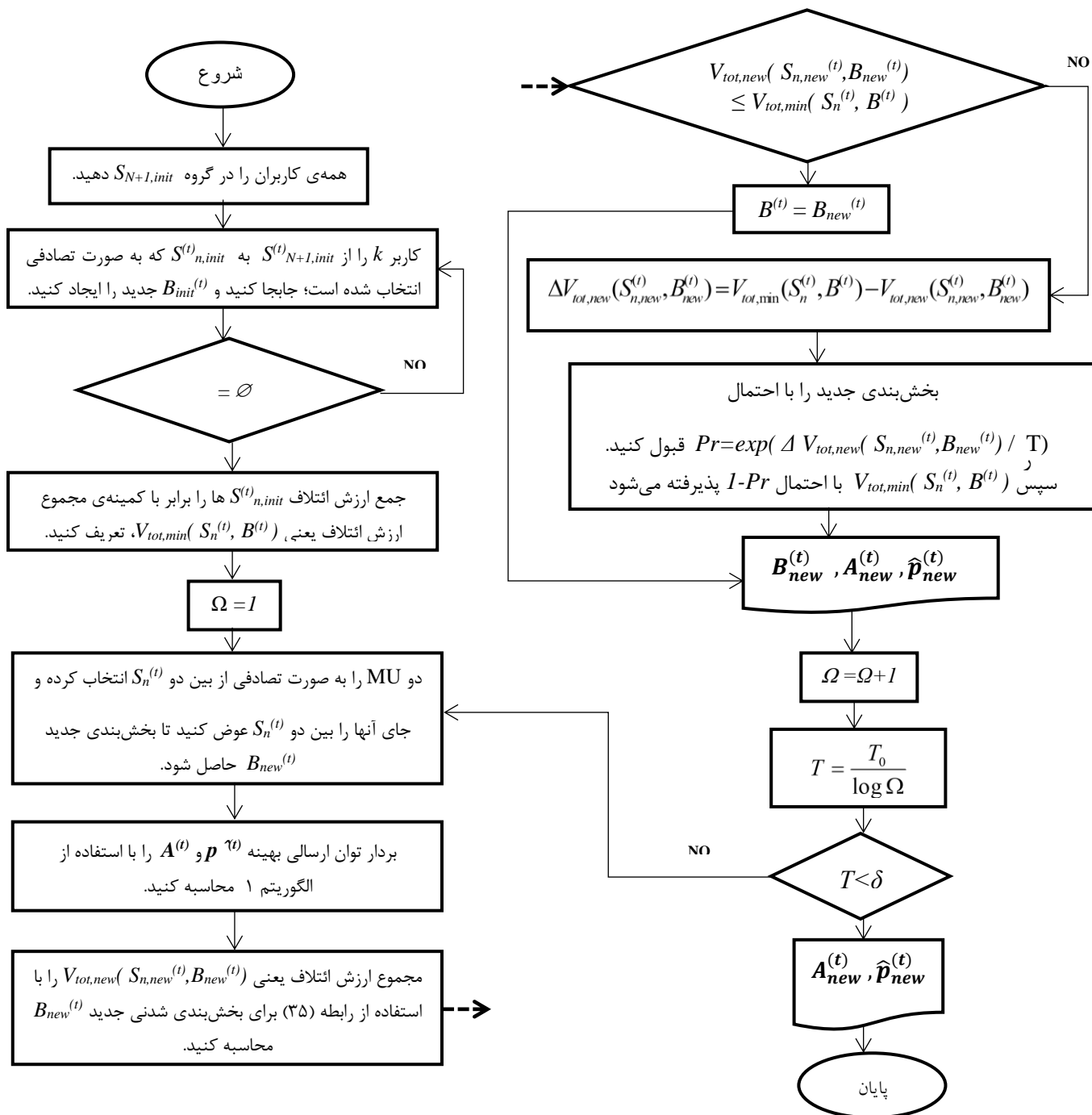
شکل ۲: الگوریتم به دست آوردن توان بهینه

Figure 2. Optimal transmit power obtaining algorithm

۴-۲- الگوریتم HCA

در الگوریتم ارائه شده مطابق شکل ۳ مجموع ارزش ائتلاف برای بخش‌بندی $B^{(t)}$ با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود

$$V_{tot}(S_n^{(t)}, B^{(t)}) = \sum_{\forall S_n^{(t)} \in B^{(t)}} V(S_n^{(t)}, B^{(t)}) \quad (35)$$



شکل ۳: الگوریتم HCA
Figure 3. HCA algorithm

در اولین گام از الگوریتم HCA بخش‌بندی اولیه‌ی شدنی $B_{init}^{(1)}$ به دست می‌آید و کمینه‌ی مجموع ارزش ائتلاف یعنی $(V_{tot, min}(S_n^{(1)}, B^{(1)}))$ بر اساس $B_{init}^{(1)}$ محاسبه می‌شود. در گام دوم، ما کاربران را بین $S_n^{(1)}$ ها تعویض کرده و $B^{(1)}$ را برای به دست آوردن بخش‌بندی بهینه‌ی کاربران بروز می‌کنیم.

در الگوریتم HCA، همگرایی روش مبتنی بر Simulated Annealing در مرجع [۳۹] مورد بررسی قرار گرفته است. در این مرجع ثابت شده است که الگوریتم مبتنی بر روش Simulated Annealing به راه‌حل بهینه همگرا می‌شود.

۵- نتایج شبیه‌سازی

در این قسمت، ما عملکرد الگوریتم ارائه‌شده HCA را مورد ارزیابی قرار می‌دهیم. پارامترهای شبیه‌سازی در جدول ۱ نشان داده شده‌اند. ما مدل انتشار را به صورت $PL = 128/1 + 37/6 \log_{10}(d)$ بر حسب دسیبل برای محیط‌های شهری و شهرک‌ها که ارتفاع بناها در آن تقریباً یکسان‌اند؛ در نظر گرفته‌ایم. در این مدل انتشار، d نشان دهنده‌ی فاصله‌ی بین BS n و MU k بر حسب کیلومتر است. این مدل برای حالت غیر خط دید NLOS معتبر است. توپولوژی شبیه‌سازی در شکل ۴ ارائه شده است که در آن یک MBS در نقطه $(100m, 100m)$ مستقر شده است. این MBS یک ناحیه‌ی دایره‌ای شکل به شعاع ۱۰۰۰ متر را تحت پوشش قرار می‌دهد. تعداد سه SBS در نقاط $(100m, 300m)$ ، $(300m, 100m)$ و $(300m, 300m)$ مستقر شده‌اند. هریک از SBSها ناحیه‌ای دایره‌ای شکل به شعاع ۳۰۰ متر را تحت پوشش خود قرار می‌دهند. تعداد ۴۵ کاربر متحرک به صورت یکنواخت در ناحیه‌ی شبیه‌سازی توزیع شده‌اند. برای ρ_k همه‌ی کاربران برابر با ۱ است.

جدول ۱: پارامترهای شبیه‌سازی
Table 1. Simulation Parameters

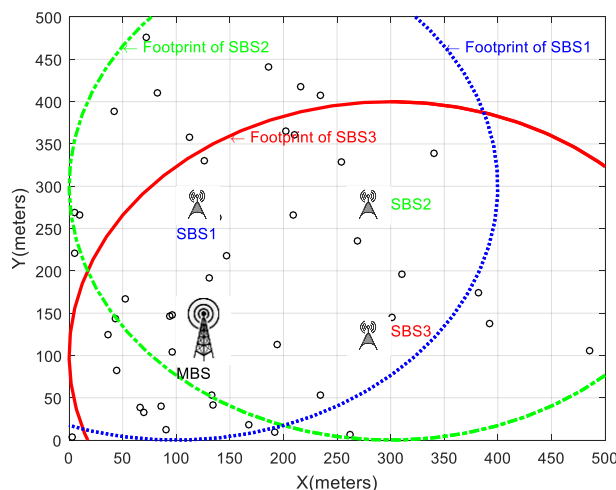
پارامترهای شبیه‌سازی	مقدار انتخاب‌شده
فرکانس حامل	۹۰۰ مگاهرتز
پهنای باند	۲۰ مگاهرتز
مدل انتشار*	$(128/1 + 37/6 \log_{10}(d))$ dB
مدل محوشدگی	محوشدگی رایلی
چگالی طیف توان نویز	-۱۷۴ dBm/Hz
$P_{k,max}$ بیشینه‌ی توان ارسالی	۲۰ dBm
$R_{k,min}$ کمینه میزان داده موردنیاز	۱ مگابیت بر ثانیه
طول قاب زمانی	۱۰۰ میلی‌ثانیه
	d^* بر حسب کیلومتر است

الگوریتم بهینه‌سازی دگرسپاری ارائه‌شده برای تخصیص BS و کنترل توان با سه الگوریتم مقایسه شده است: الگوریتم بیشینه‌سازی تابع فایده‌ی سیستم-گسترده و توان کنترل‌شده PCSUM^۱ [۱]، الگوریتم بر پایه‌ی Simulated Annealing Algorithm(SAA) [۴۰] و الگوریتم کاهش دگرسپاری‌های متواتر FHM^۲ [۲۷]. قابل توجه است که مرجع‌های [۱] و [۳۹] تأثیر تحرک کاربر را در عملکرد سیستم در نظر نگرفته‌اند و مرجع [۲۵] بازده طیفی و انرژی را در حل مسئله دگرسپاری‌های ناخواسته منظور نکرده است. به‌منظور شناسایی تأثیر الگوریتم HCA بر تعداد دگرسپاری‌ها، شبکه‌ای با توزیع یکنواخت کاربران متحرک و یک مدل تحرک جهت تصادفی با انعکاس را در نظر می‌گیریم. در این مدل، همه‌ی کاربران در ناحیه‌ی [۰، ۱] حرکت می‌کنند و به ترتیب یک سرعت و جهت تصادفی را به ترتیب از بازه‌ی از پیش تعریف شده‌ی سرعت یعنی [حداقل سرعت، حداکثر سرعت] و جهت یعنی [۰، 2π] انتخاب می‌کنند. جهت MU پس از برخورد به مرز ناحیه برعکس می‌شود. برخلاف سایر مدل‌های تحرک تحلیلی، مدل تحرک جهت تصادفی با انعکاس، از تجمع کاربران در یک بخش از ناحیه‌ی شبیه‌سازی جلوگیری می‌کند.

¹ Power Controlled System-wide Utility Maximization

² Frequent Handover Mitigation

شکل ۵ تعداد دگرسپاری‌های رخداد را در شبکه نسبت به مجموع تعداد کاربران نشان می‌دهد و همچنین تعداد دگرسپاری‌ها را برای مقادیر مختلف عامل γ در الگوریتم ارائه‌شده باهم مقایسه می‌کند. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده، الگوریتم ارائه‌شده تعداد دگرسپاری‌ها را کاهش می‌دهد. در مقایسه با الگوریتم PCSUM می‌توان دید که الگوریتم HCA تعداد دگرسپاری‌های کمتری دارد حتی زمانی که γ برابر با صفر است و رابطه (۲۲) برای هر دو الگوریتم شکل یکسانی دارد. علت آن است که الگوریتم ارائه‌شده در هر قاب زمانی، تخصیص BS را بر اساس بخش‌بندی شدنی قبلی بهینه می‌کند و روند مقداردهی اولیه را در هر قاب زمانی تکرار نمی‌کند.



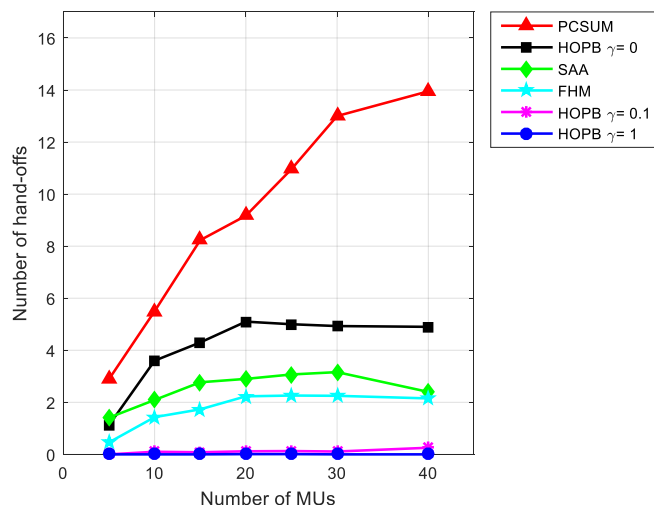
شکل ۴: یک MBS و سه SBS
Figure 4. An MBS, 3 SBSs

در صورتی که الگوریتم PCSUM یافتن بخش‌بندی بهینه‌ی کاربران را در هر قاب زمانی تکرار می‌کند؛ بنابراین در الگوریتم PCSUM کار تخصیص به صورت متواتر در قاب‌های زمانی پشت سر هم صورت می‌گیرد و منجر به تعداد دگرسپاری‌های زیاد در مقایسه با الگوریتم ارائه‌شده می‌گردد. الگوریتم پیشنهادی در این مقاله تخصیص ایستگاه پایه و کنترل توان کاربران را در هر بازه‌ی زمانی بر اساس بازه‌ی زمانی قبلی انجام می‌دهد. در تابع فایده‌ی دگرسپاری در رابطه ۷، شاخص‌های تخصیص دو قاب زمانی متوالی در نظر گرفته شده است. به بیان دیگر در زمان لازم جهت انجام محاسبات برای مقداردهی اولیه صرفه‌جویی به عمل می‌آید. لذا تأخیر دگرسپاری یعنی زمانی که کاربر متحرک در جریان دست‌به‌دست شدن قادر به ارسال یا دریافت بسته اطلاعاتی نیست؛ در این الگوریتم بسیار کمتر از الگوریتم‌های تخصیص دیگر است؛ زیرا چنانکه گفته شد سایر الگوریتم‌ها، تخصیص ایستگاه پایه به کاربران را در بازه‌های زمانی به صورت مستقل از هم انجام می‌دهند.

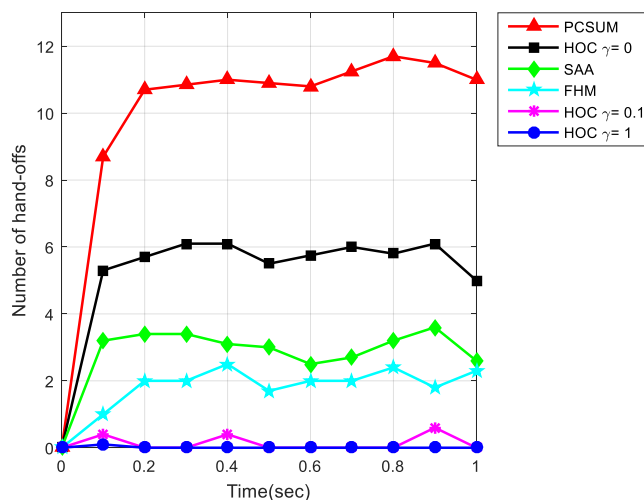
در مورد الگوریتم SAA تعداد دگرسپاری‌ها زمانی که γ برابر با صفر است، از الگوریتم HCA کمتر است اما زمانی که مقدار γ افزایش می‌یابد؛ طرح ارائه‌شده تعداد دگرسپاری‌های کمتری دارد. الگوریتم HCA یک الگوریتم با کنترل توان است. در مقابل در الگوریتم SAA در تخصیص توان، کمینه‌سازی در نظر گرفته نشده است و به همین دلیل یافتن BS‌های مناسب در الگوریتم HCA سخت‌تر بوده که منجر به تخصیص‌های مکرر در حالتی که γ برابر با صفر است، می‌شود. بدین ترتیب یک مصالحه‌ی همیشگی بین توان ارسال و تعداد دگرسپاری‌ها در الگوریتم ارائه‌شده وجود دارد و γ را می‌توان بر همین اساس متناسب با حالت استفاده از شبکه، تنظیم کرد.

در مقایسه با الگوریتم FHM، زمانی که مقدار γ افزایش می‌یابد؛ تعداد دگرسپاری‌ها در الگوریتم HCA کاهش پیدا می‌کند. به دلیل توان ارسال ثابت در الگوریتم FHM تعداد دگرسپاری‌ها زمانی که γ برابر با صفر است؛ نسبت به الگوریتم HCA کمتر است. با در نظر گرفتن کمینه‌سازی توان در الگوریتم HCA، زمانی که γ برابر با صفر است؛ تعداد دگرسپاری‌ها در مقایسه با الگوریتم FHM بیشتر است. در شکل ۶ ما می‌توانیم تعداد دگرسپاری‌های رخداد را نسبت به زمان مشاهده کنیم. شکل نشان می‌دهد که تعداد دگرسپاری‌ها زمانی که الگوریتم HCA به کار می‌رود؛ کاهش می‌یابد و زمانی که مقدار γ از ۰ تا ۱ افزایش

می‌یابد؛ میزان این کاهش بیشتر هم می‌شود. شکل بیان‌کننده‌ی عملکرد بهتر الگوریتم HCA در مقایسه با الگوریتم‌های PCSUM، SAA و FHM است به‌خصوص زمانی که مقدار γ افزایش داده می‌شود.

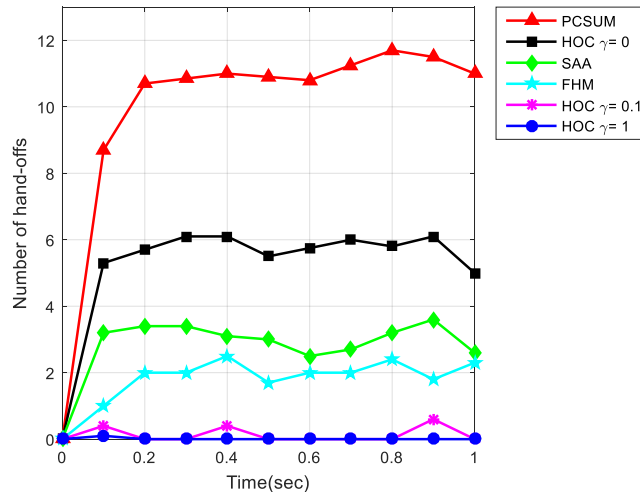


شکل ۵: تعداد دگرسپاری‌ها نسبت به مجموع تعداد کاربران
Figure 5. Number of handoffs versus the total number of MUs

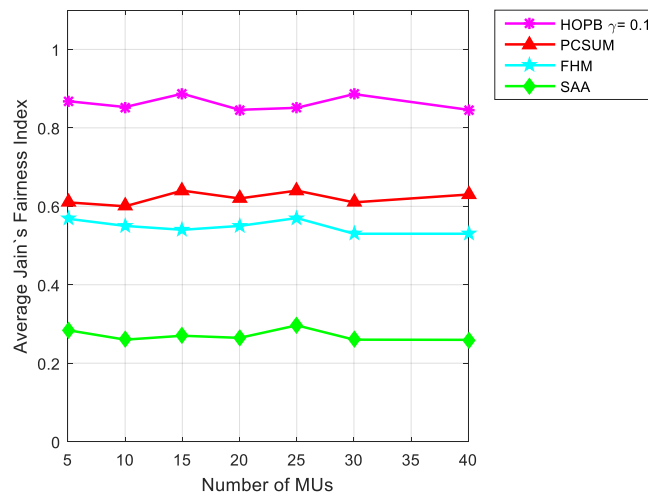


شکل ۶: تعداد دگرسپاری‌ها نسبت به زمان
Figure 6. Number of handoffs over time

شکل ۷ زمان متوسط خدمات‌رسانی نسبت به افزایش تعداد مجموع MU ها را نمایش می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که زمان متوسط خدمات‌رسانی در الگوریتم HCA، در مقایسه با الگوریتم‌های PCSUM، SAA و FHM افزایش می‌یابد که این واقعیت بیان‌کننده‌ی تعداد دگرسپاری‌های کمتر در الگوریتم HCA است. می‌توان از روی نمودار مشاهده کرد که زمان متوسط خدمات‌رسانی در الگوریتم FHM زمانی که γ برابر با صفر است؛ از الگوریتم HCA بیشتر است. دلیل این پدیده آن است که مسئله بازده طیفی و انرژی در الگوریتم FHM در نظر گرفته نشده‌اند؛ اما زمانی که γ افزایش پیدا می‌کند؛ الگوریتم HCA نسبت به الگوریتم‌های PCSUM، SAA و FHM عملکرد بهتری دارد.



شکل ۷: زمان متوسط خدمات‌رسانی نسبت به مجموع تعداد کاربران
Figure 7. Mean service time versus the total number of MUs



شکل ۸: شاخص انصاف جین برای الگوریتم‌های مختلف تخصیص BS
Figure 8. Jain's fairness index for different base station association algorithms

ما از شاخص انصاف جین [۴۱] برای ارزیابی عملکرد انصاف در الگوریتم‌های مختلف استفاده می‌کنیم که به صورت زیر تعریف می‌شود،

$$J = \frac{(\sum_{n=1}^N |S_n^{(t)}|)^2}{N \sum_{n=1}^N |S_n^{(t)}|^2} \tag{۳۶}$$

مقدار شاخص انصاف جین بین صفر و یک محدود می‌شود. حالت $J=1$ نشان‌دهنده‌ی منصفانه‌ترین حالت است. شکل ۸ نمودار شاخص انصاف جین را برای روش‌های مختلف نشان می‌دهد. نمودار نشان می‌دهد که مقدار این شاخص برای الگوریتم SAA زیر مقدار $0/3$ است درحالی‌که شاخص جین برای الگوریتم‌های PCSUM و FHM به ترتیب کمتر و بیشتر از مقدار $0/6$ است (برای هر دو الگوریتم PCSUM و FHM شاخص جین نزدیک به مقدار $0/6$ است). برای الگوریتم پیشنهادی HCA شاخص جین همواره بیشتر از مقدار $0/8$ است که نشان می‌دهد الگوریتم ارائه‌شده عملکرد انصاف بهتری در مقایسه با سه الگوریتم دیگر دارد. در مورد الگوریتم SAA علت آن است که معیار انصاف در تابع فایده‌ی این الگوریتم در نظر گرفته نشده است. علت

غیرمنصفانه بودن تخصیص در الگوریتم FHM در مقایسه با HCA آن است که در این روش تخصیص کاربران به BSها بر اساس شرایط کانال صورت می‌گیرد در صورتی که تخصیص در الگوریتم پیشنهادی بر اساس معیارهای پیچیده‌تری انجام می‌شود. همچنین در مقایسه با تابع فایده‌ای که در الگوریتم PCSUM بر اساس معیار انصاف نسبت α طراحی شده، معیار انصاف تناسبی به کاررفته در الگوریتم HCA عملکرد بهتری نشان داده است.

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

ما بهینه‌سازی دگرسپاری در تخصیص BS را در تلفیق با کنترل توان در مسیر روبه بالای یک شبکه با سلول‌های کوچک بر پایه NOMA را مورد بررسی قرار دادیم. در ابتدا، ما یک مسئله بهینه‌سازی تک هدف را با استفاده از روش جمع وزین با ترکیب دو هدف متعامل در هر قاب زمانی ضابطه‌مند کردیم. تابع فایده‌ی سیستم-گسترده و تابع فایده دگرسپاری بیشینه‌سازی و هم‌زمان مصرف توان کمینه‌سازی شدند. مسئله ضابطه‌مند شده با الگوریتم ارائه‌شده‌ی HCA با استفاده از نظریه‌ی بازی ائتلاف بر پایه روش Simulated Annealing و نظریه‌ی تجزیه‌ی اولیه حل شد. تابع ارزش ائتلاف با در نظر گرفتن تعداد دگرسپاری‌ها در هر BS و در هر قاب زمانی طراحی شد. الگوریتم ارائه‌شده به صورت عددی با مقایسه‌ی عملکرد آن با سه الگوریتم PCSUM، SAA و FHM، مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که الگوریتم ارائه‌شده در مورد تعداد دگرسپاری‌ها عملکرد بهتری در مقایسه با الگوریتم‌های PCSUM، SAA و FHM دارد به طوری که تعداد کل دگرسپاری‌ها را به میزان ۵۴٪ در مقایسه با الگوریتم بدون اعمال تحرک، کاهش داده و شاخص تعادل در توزیع بار را به میزان ۳۲٪ بهبود بخشیده است. با وجود انجام تحقیقات متعدد در مورد تخصیص ایستگاه پایه و کنترل توان و همچنین موضوع دگرسپاری و انصاف در شبکه‌های ناهمگون مبتنی بر NOMA، همچنان مباحثی جهت تحقیقات بیشتر در این خصوص وجود دارد. بهینه‌سازی ترتیب‌های SIC در آشکارسازی، استفاده از SIC غیر کامل در آشکارسازی، در نظر گرفتن کاربران متحرک با سرعت بالاتر و مطالعه تأخیر دگرسپاری در روش پیشنهادی و مقایسه آن با سایر الگوریتم‌های تخصیص از جمله موضوعاتی هستند که می‌توان در مورد آن‌ها تحقیقات بیشتری صورت داد.

مراجع

- [1] L. P. Qian, Y. Wu, H. Zhou, and X. Shen, "Joint Uplink Base Station Association and Power Control for Small-Cell Networks with Non-Orthogonal Multiple Access," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 16, no. 9, pp. 5567–5582, 2017, doi: 10.1109/TWC.2017.2664832.
- [2] A. Ullah, Z. Haq Abbas, F. Muhammad, G. Abbas, and L. Jiao, "Capacity driven small cell deployment in heterogeneous cellular networks: Outage probability and rate coverage analysis," *Trans. Emerg. Telecommun. Technol.*, vol. 31, no. 6, p. e3876, 2020.
- [3] A. Ghosh, I. Saha Misra, and A. Kundu, "Coverage and rate analysis in two-tier heterogeneous networks under suburban and urban scenarios," *Trans. Emerg. Telecommun. Technol.*, vol. 30, no. 12, pp. 1–16, 2019, doi: 10.1002/ett.3648.
- [4] J. Yang, B. Yang, S. Chen, Y. Zhang, Y. Zhang, and L. Hanzo, "Dynamic resource allocation for streaming scalable videos in SDN-aided dense small-cell networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 67, no. 3, pp. 2114–2129, 2018.
- [5] P. Paglierani *et al.*, "Techno-economic analysis of 5G immersive media services in cloud-enabled small cell networks: The neutral host business model: Providing techno-economic guidelines for the successful provision of 5G innovative services in small cell networks," *Trans. Emerg. Telecommun. Technol.*, vol. 31, no. 2, p. e3746, 2020.
- [6] K. M. Addali, S. Y. B. Melhem, Y. Khamayseh, Z. Zhang, and M. Kadoch, "Dynamic mobility load balancing for 5G small-cell networks based on utility functions," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 126998–127011, 2019.

- [7] M. Shafiei-Kordshouli, Z. Zeinalpour-Yazdi, and R. Ramezani, "Coverage improvement in femtocell networks via efficient utility pricing," *IET Commun.*, vol. 10, no. 16, pp. 2215–2221, 2016.
- [8] S. Pirnia, H. Bakhshi, M. Dosaranian-Moghadam, and R. Khosravi, "Handoff optimization for joint base station association and power control in uplink non-orthogonal multiple access small cell networks," *Trans. Emerg. Telecommun. Technol.*, p. e4465.
- [9] A. Memarinejad, M. Mohammadi, and M. B. Tavakoli, "Outage Performance Analysis of Multi-Antenna Full-Duplex NOMA Cellular Systems," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 12, no. 45, pp. 1–18, 2022, doi: 10.30495/jce.2022.692365 (in Persian).
- [10] L. P. Qian, Y. J. A. Zhang, Y. Wu, and J. Chen, "Joint base station association and power control via Benders' decomposition," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 12, no. 4, pp. 1651–1665, 2013.
- [11] H. Ding, F. Zhao, J. Tian, and H. Zhang, "Fairness-Driven Energy Efficient Resource Allocation in Uplink MIMO Enabled HetNets," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 37229–37241, 2020.
- [12] A. Dehghani Firouzabadi and A. M. Rabiei, "Joint user association, subchannel assignment, and power allocation in full-duplex OFDMA heterogeneous networks," *Trans. Emerg. Telecommun. Technol.*, vol. 29, no. 12, p. e3548, 2018, doi: 10.1002/ett.3548.
- [13] T. Zhou *et al.*, "Joint Device Association and Power Coordination for H2H and IoT Communications in Massive MIMO Enabled HCNs," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 72971–72984, 2020.
- [14] H. D. Balbi, D. Passos, R. C. Carrano, L. C. S. Magalhães, and C. V. N. Albuquerque, "Association stability and handoff latency tradeoff in dense IEEE 802.11 networks: A case study," *Comput. Commun.*, 2020.
- [15] A. S. Cacciapuoti, "Mobility-aware user association for 5G mmWave networks," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 21497–21507, 2017.
- [16] B. Zhang, W. Qi, and J. Zhang, "An energy efficiency and ping-pong handover ratio optimization in two-tier heterogeneous networks," *2018 IEEE 8th Annu. Comput. Commun. Work. Conf. CCWC 2018*, vol. 2018-Janua, pp. 532–536, 2018, doi: 10.1109/CCWC.2018.8301767.
- [17] Z. Mlika, E. Driouch, and W. Ajib, "Energy-efficient base station operation and association in HetNets: Complexity and algorithms," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 17, no. 4, pp. 2690–2702, 2018.
- [18] J. An, Y. Zhang, X. Gao, and K. Yang, "Energy-efficient base station association and beamforming for multi-cell multiuser systems," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 19, no. 4, pp. 2841–2854, 2020.
- [19] R. Sun, M. Hong, and Z.-Q. Luo, "Joint downlink base station association and power control for max-min fairness: Computation and complexity," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 33, no. 6, pp. 1040–1054, 2015.
- [20] L. A. Fletscher, J. M. Maestre, and C. Valencia Peroni, "An assessment of different user-BS association policies for green HetNets in off-grid environments," *Trans. Emerg. Telecommun. Technol.*, vol. 28, no. 12, p. e3227, 2017.
- [21] J.-H. Kim, W.-S. Lee, and H.-K. Song, "Performance Enhancement Using Receive Diversity With Power Adaptation in the NOMA System," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 102867–102875, 2019.
- [22] S. Zhang, N. Zhang, G. Kang, and Z. Liu, "Energy and spectrum efficient power allocation with NOMA in downlink HetNets," *Phys. Commun.*, vol. 31, pp. 121–132, 2018.
- [23] A. Nasser, O. Muta, H. Gacanin, and M. Elsabrouty, "Non-Cooperative Game Based Power Allocation for Energy and Spectrum Efficient Downlink NOMA HetNets," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 136334–136345, 2021.

- [24] K. Long, W. Li, M. Jiang, and J. Lu, "Non-cooperative game-based power allocation for energy-efficient NOMA heterogeneous network," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 49596–49609, 2020.
- [25] Z. J. Ali, N. K. Noordin, A. Sali, and F. Hashim, "Fair energy-efficient resource allocation for downlink NOMA heterogeneous networks," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 200129–200145, 2020.
- [26] S. K. Goudos, "Joint power allocation and user association in non-orthogonal multiple access networks: An evolutionary approach," *Phys. Commun.*, vol. 37, p. 100841, 2019.
- [27] M. M. Hasan, S. Kwon, and S. Oh, "Frequent-handover mitigation in ultra-dense heterogeneous networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 1, pp. 1035–1040, 2018, doi: 10.1109/TVT.2018.2874692.
- [28] H. Kalbkhani, S. Jafarpour-Alamdari, M. G. Shayesteh, and V. Solouk, "QoS-based multi-criteria handoff algorithm for femto-macro cellular networks," *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 98, no. 1, pp. 1435–1460, 2018.
- [29] R. Arshad, H. ElSawy, S. Sorour, T. Y. Al-Naffouri, and M.-S. Alouini, "Velocity-aware handover management in two-tier cellular networks," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 16, no. 3, pp. 1851–1867, 2017.
- [30] Z. Cheng *et al.*, "Joint User Association and Resource Allocation in HetNets Based on User Mobility Prediction," *Comput. Networks*, p. 107312, 2020.
- [31] M. Alhabo, L. Zhang, N. Nawaz, and H. Al-Kashoash, "Game theoretic handover optimisation for dense small cells heterogeneous networks," *IET Commun.*, vol. 13, no. 15, pp. 2395–2402, 2019.
- [32] M. Alhabo and L. Zhang, "Load-dependent handover margin for throughput enhancement and load balancing in HetNets," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 67718–67731, 2018.
- [33] S. Riyazuddin, D. Venkata Rao, and M. Ramarakula, "Load balancing by diversified quality factors-based handoff (DQFH) in wireless cellular networks," *Int. J. Commun. Syst.*, vol. 34, no. 6, p. e4393, 2021.
- [34] S. Lin, N. Che, F. Yu, and S. Jiang, "Fairness and load balancing in SDWN using handoff-delay-based association control and load monitoring," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 136934–136950, 2019.
- [35] R. Vogt, I. Nikolaidis, and P. Gburzynski, "A realistic outdoor urban pedestrian mobility model," *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 26, no. 2012, pp. 113–134, 2012, doi: 10.1016/j.simpat.2012.04.006.
- [36] R. T. Marler and J. S. Arora, "The weighted sum method for multi-objective optimization: new insights," *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 41, no. 6, pp. 853–862, 2010.
- [37] W. Saad, Z. Han, M. Debbah, A. Hjørungnes, and T. Basar, "Coalitional game theory for communication networks," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 26, no. 5, pp. 77–97, 2009.
- [38] D. P. Palomar and M. Chiang, "A tutorial on decomposition methods for network utility maximization," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 24, no. 8, pp. 1439–1451, 2006.
- [39] V. Granville, M. Krivánek, and J.-P. Rassin, "Simulated annealing: A proof of convergence," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 16, no. 6, pp. 652–656, 1994.
- [40] K. Wang, Y. Liu, Z. Ding, A. Nallanathan, and M. Peng, "User association and power allocation for multi-cell non-orthogonal multiple access networks," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 18, no. 11, pp. 5284–5298, 2019.
- [41] R. K. Jain, D.-M. W. Chiu, and W. R. Hawe, "A quantitative measure of fairness and discrimination," *East. Res. Lab. Digit. Equip. Corp. Hudson, MA*, vol. 21, 1984.

پیوست الف : اثبات گزاره

مطابق با تغییر متغیر لگاریتمی داریم:

$$\bar{p}_k^{(t)} = \log p_k^{(t)} \Rightarrow p_k^{(t)} = e^{\bar{p}_k^{(t)}} \quad (37)$$

$$\bar{R}_k^{(t)} = \log R_k^{(t)} \Rightarrow R_k^{(t)} = e^{\bar{R}_k^{(t)}}$$

می‌دانیم که $\log(\log(1+\exp(x_1)+\dots+\exp(x_n)))$ مقعر است پس می‌توانیم رابطه ۲۷ را با استفاده از تبدیل لگاریتمی به یک تابع مقعر تبدیل کنیم،

$$\log(\log(e^{\bar{R}_k^{(t)}})) \quad (38)$$

با استفاده از تبدیل لگاریتمی می‌توان سمت چپ نامساوی رابطه ۲۸ را به صورت زیر بازنویسی کرد،

$$\log(\log_2(1 + \exp(\log(\frac{e^{\bar{p}_k^{(t)}} g_{kn}^{(t)}}{I_{Intra-cell}^{(t)} + I_{Inter-cell}^{(t)} + \sigma^2})))) \quad (39)$$

تابع رابطه ۳۹ مقعر است زیرا $\log(\log(1+\exp(x_1)+\dots+\exp(x_n)))$ مقعر است. پس مسئله P5 را می‌توان به صورت زیر از نو نوشت،

$$\mathbf{P5} \min_{P_k, S} \log(\sum_{\forall k \notin S_{N+1}} e^{\bar{p}_k^{(t)}}) \quad (40)$$

$$\text{s.t} \quad \log(\log(e^{\bar{R}_k^{(t)}})) \geq \log(R_{k,\min}) \quad (41)$$

$$\log(\log_2(1 + \exp(\log(\frac{e^{\bar{p}_k^{(t)}} g_{kn}^{(t)}}{I_{Intra-cell}^{(t)} + I_{Inter-cell}^{(t)} + \sigma^2})))) = \bar{R}_k^{(t)} \quad (42)$$

پیداست که تابع رابطه ۴۰ محدب است رابطه ۴۲ نیز یک مجموعه محدب است. با توجه به اینکه تابع هدف در مسئله فوق محدب بوده و قیود مسئله نیز مجموعه‌های محدب هستند؛ مشاهده می‌شود که با استفاده از تبدیل لگاریتمی، مسئله P5 به یک مسئله بهینه‌سازی محدب تبدیل شده است. بر اساس آنچه که ارائه شد؛ اثبات گزاره الف تکمیل می‌شود.

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>

