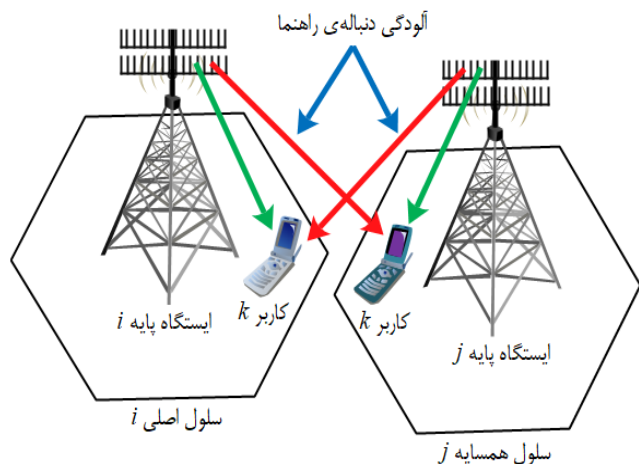


کاهش آلودگی دنباله‌های راهنما با کمک رنگ‌آمیزی گراف وزن‌دار و استفاده مجدد از آنها به صورت نرم

امیر روستائی و حسین خالقی بیزکی



شکل ۱: مشکل آلودگی دنباله راهنما.

انبوه، توان ارسالی ایستگاه پایه افزایش می‌یابد. این افزایش توان باعث بهبود نسبت سیگنال به تداخل و نویز^۲ (SINR) شده و در نتیجه، ظرفیت کانال مخابرات بی‌سیم افزایش می‌یابد [۲]. علی‌رغم مزایای قابل توجه MIMO انبوه، چالش اصلی در بهره‌برداری از این مزایا، تخمین دقیق کانال مخابراتی است.

در سیستم‌های مخابرات بی‌سیم، تخمین کانال با استفاده از دنباله‌های راهنما^۳ انجام می‌شود. زمانی که کانال مخابراتی دارای تغییرات سریع باشد، زمان همدوسی کانال محدود می‌شود. این محدودیت باعث می‌شود کاربران هر سلول تنها بتوانند از تعداد محدودی دنباله راهنمای متعامد استفاده کنند. محدودیت در تعداد دنباله‌های راهنما در هر سلول باعث می‌شود که سلول‌های مجاور دقیقاً از نسخه‌های یکسان همان دنباله‌های راهنما استفاده کنند [۳]. این وضعیت (مطابق شکل ۱) می‌تواند منجر به پدیده‌ای به نام آلودگی دنباله راهنما شود.

مطابق با شکل ۱، آلودگی دنباله راهنما باعث می‌گردد که ایستگاه پایه موجود در سلول اصلی، علاوه بر دریافت دنباله‌های راهنمای کاربران خود، دنباله‌های راهنمای مشابه از کاربران واقع در لبه سلول‌های مجاور را نیز دریافت کند. در نتیجه، ایستگاه پایه کانال را با در نظر گرفتن این آلودگی تخمین می‌زند. این امر باعث می‌شود که سیگنال فرسوی ارسالی از ایستگاه پایه اصلی، علاوه بر دریافت توسط کاربران سلول اصلی، به صورت ضعیف‌تر توسط کاربران سلول‌های مجاور نیز دریافت شود که این سیگنال برای آنها به عنوان تداخل لینک فرسو محسوب می‌گردد.

چکیده: شبکه‌های سلولی مبتنی بر فناوری MIMO انبوه، علی‌رغم توانایی سرویس‌دهی همزمان به چندین کاربر، با چالش جدی ناشی از آلودگی دنباله‌های راهنما مواجه هستند. مقاله حاضر، الگوریتمی نوآورانه و دومرحله‌ای برای کاهش این آلودگی و افزایش نرخ داده کاربران در لینک‌های فراسو و فرسو ارائه می‌کند. نوآوری کلیدی روش پیشنهادی در تلفیق هوشمندانه مزایای سه تکنیک نهفته است: استفاده مجدد از دنباله راهنما به صورت نرم (SPR)، الگوریتم انتخاب دنباله راهنمای بهینه و الگوریتم رنگ‌آمیزی گراف وزن‌دار (WGC). این ترکیب به طور همزمان سه مشکل اساسی را حل می‌کند: آلودگی در طرح SPR ناشی از آستانه ثابت، افزایش سربار دنباله راهنما در طرح WGC و مشکل پیشینه‌کردن نرخ داده کاربر با کمترین نرخ. الگوریتم پیشنهادی در دو مرحله عمل می‌کند: در مرحله اول، کاربران به دو گروه مرکزی و لبه‌ای تقسیم شده و دنباله‌های راهنمای بهینه بر اساس نرخ داده آنها تعیین می‌شوند. سپس در مرحله دوم با استفاده از الگوریتم WGC و ایجاد گراف تداخلی با لبه وزن‌دار (EWIG)، آلودگی دنباله راهنمای کاربران بر اساس شدت آلودگی‌شان کاهش می‌یابد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که این روش در مقایسه با بهترین روش موجود (WGC)، بهبود چشمگیری در عملکرد سیستم ایجاد می‌کند. در لینک فرسو، بهبود ۱۱ dB در نسبت سیگنال به تداخل و نویز (SINR) و افزایش 0.16 bps/Hz در میانگین نرخ قابل دستیابی مشاهده شده است. در لینک فراسو نیز بهبود ۲/۴ dB در SINR و افزایش 0.46 bps/Hz در میانگین نرخ قابل دستیابی به دست آمده است. از نظر پیچیدگی محاسباتی، روش پیشنهادی نسبت به طرح WGC، پیچیدگی کمتری دارد. همچنین تحلیل کارایی انرژی نیز برتری روش پیشنهادی را در هر دو سناریوی لینک فراسو و فرسو تأیید می‌کند.

کلیدواژه: آلودگی دنباله راهنما، تخمین کانال MIMO انبوه، رنگ‌آمیزی گراف وزن‌دار (WGC)، گراف تداخلی با لبه وزن‌دار (EWIG).

۱- مقدمه

سامانه‌های سلولی نسل پنجم (5G) از فناوری MIMO^۱ انبوه بهره می‌برند. در این فناوری از تعداد زیادی آنتن برای خدمت‌رسانی به کاربران متعدد استفاده می‌شود. این رویکرد در پاسخ به افزایش چشمگیر تقاضای ترافیک کاربران طراحی شده است [۱]. با افزایش تعداد آنتن‌ها در MIMO

این مقاله در تاریخ ۱۰ اسفند ماه ۱۴۰۲ دریافت و در تاریخ ۱۳ مهر ماه ۱۴۰۳ بازنگری شد.

امیر روستائی، دانشکده رایانه، شبکه و ارتباطات، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران، (email: amirroostaei21@gmail.com).

حسین خالقی بیزکی (نویسنده مسئول)، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، تهران، ایران، (email: bizaki@gmail.com).

1. Multiple Input-Multiple Output

2. Signal-to-Interference-Plus-Noise Ratio

3. Pilot Signals

یادگیری عمیق و تخمین کانال به روش حداقل میانگین مربعات خطای خطی^۶ (LMMSE) برای طراحی دنباله راهنما و تخمین کانال استفاده کردند. این روش با بهره‌گیری از یادگیری انتقالی، اثرات آلودگی دنباله راهنما و نقص‌های سخت‌افزاری را کاهش می‌دهد. با وجود این مزایا، پیچیدگی محاسباتی بالا و نیاز به تعداد زیاد دنباله‌های راهنما از چالش‌های اصلی این رویکرد به شمار می‌روند.

نویسندگان در [۱۴] روشی نوآورانه برای طراحی دنباله راهنما با استفاده از یادگیری عمیق ارائه دادند. هدف اصلی این روش، بهینه‌سازی تخصیص توان به توالی‌های دنباله راهنما به منظور حداقل‌سازی خطای میانگین مربعات در تخمین کانال است. این رویکرد با بهره‌گیری از شبکه‌های عصبی عمیق، امکان تخصیص بهینه توان به دنباله‌های راهنما را فراهم می‌آورد. در مجموع، یادگیری عمیق پتانسیل بالایی در کاهش آلودگی دنباله راهنما دارد و مزایای قابل توجهی ارائه می‌دهد. با این حال، چالش‌هایی مانند پیچیدگی پیاده‌سازی و مسائل مقیاس‌پذیری، استفاده گسترده از این فناوری را محدود می‌کند.

در [۱۵]، روش استفاده مجدد دنباله‌های راهنما به صورت نرم (SPR)^۷ معرفی شده است. این روش با تقسیم کاربران به دو گروه مرکزی و لبه، تلاش می‌کند که مشکل آلودگی را حل کند. برای کاربران مرکزی که آلودگی کمتری دارند، یک گروه دنباله راهنمای مشترک در تمام سلول‌ها استفاده می‌شود؛ در حالی که برای کاربران لبه با آلودگی بیشتر، گروه‌های جداگانه در سلول‌های مجاور به کار گرفته می‌شود. این روش موجب کاهش چشمگیر آلودگی برای کاربران لبه و بهبود تخمین کانال می‌شود. با این حال به دلیل استفاده از یک حد آستانه مشخص برای تعیین شدت آلودگی، تفاوت‌های جزئی در میزان آلودگی بین کاربران همچنان نادیده گرفته می‌شود. نکته مهم این است که روش‌های موجود برای کاهش آلودگی دنباله‌های راهنما، تفاوت در شدت آلودگی بین کاربران را به طور کامل در نظر نمی‌گیرند. این مسئله باعث کاهش بازدهی روش‌های فعلی می‌شود؛ زیرا در حالی که برخی کاربران از آلودگی شدید دنباله‌های راهنما رنج می‌برند، این آلودگی برای کاربران دیگر ممکن است ناچیز باشد. برای حل این مشکل در [۱۶]، روش رنگ‌آمیزی گراف وزن‌دار (WGC)^۸ برای بهینه‌سازی تخصیص دنباله‌های راهنما به کاربران در شبکه‌های سلولی معرفی شده است. این روش با ایجاد یک گراف تداخلی وزن‌دار عمل می‌کند که در آن هر گره نشان‌دهنده یک کاربر بوده و وزن هر لبه بین دو گره، میزان تداخل دنباله راهنما میان آن دو کاربر را نشان می‌دهد. هدف WGC، اختصاص رنگ‌های متفاوت به کاربران است؛ به گونه‌ای که هیچ دو کاربر مجاور هم‌رنگ نباشند. این امر سبب کاهش آلودگی دنباله راهنما بین کاربران می‌شود. این روش آلودگی بین کاربران سلولی را با در نظر گرفتن تفاوت در شدت آلودگی کاهش می‌دهد، اما منجر به افزایش سربار دنباله‌های راهنما و افزایش تعداد دنباله‌های راهنما با آلودگی بیشتر در لبه سلولی می‌شود.

برای غلبه بر محدودیت‌های روش‌های موجود، این مقاله طرح ترکیبی نوآورانه‌ای به نام WGC + SPR^۹ پیشنهاد می‌دهد که مزایای روش‌های روش‌های قبلی را با هم ترکیب می‌کند. این طرح ترکیبی از طریق چند مکانیزم کلیدی عمل می‌کند:

در سال‌های اخیر، کاهش آلودگی دنباله راهنما به یکی از چالش‌های اساسی در حوزه مخابرات بی‌سیم تبدیل شده است. این مسئله توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده و راهکارهای متعددی برای مقابله با آن ارائه شده که هر یک از این راهکارها دارای مزایا و معایب خاص خود هستند. یکی از رویکردهای رایج در این زمینه، طرح تخصیص تصادفی دنباله‌های راهنما به کاربران است. در [۴] دنباله‌های راهنما به صورت تصادفی به کاربران در هر سلول اختصاص داده می‌شوند. اگرچه این طرح از تکرار دنباله‌های راهنما در داخل یک سلول جلوگیری می‌کند، اما می‌تواند منجر به آلودگی شدید بین کاربران در سلول‌های مجاور شود. این مشکل ناشی از عدم در نظر گرفتن ارتباط بین سلول‌ها در فرایند تخصیص است.

در [۵] و [۶]، روش‌های پیش‌کدگذار دنباله راهنما^۱ مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این روش‌ها می‌توانند تداخل درون‌سلولی را در فرایند اتصال چندسلولی کاهش دهند. با این حال، این بهبود به قیمت کاهش بازدهی طیفی به دلیل افزایش سربار^۲ اطلاعات حاصل می‌شود. در [۷] و [۸] به بررسی روش‌های دنباله راهنمای جابه‌جایی زمانی^۳ پرداخته شده است. در این روش‌ها، سلول‌های مجاور دنباله‌های راهنمای خود را به صورت غیرهمزمان و در زمان‌های متفاوت ارسال می‌کنند. این فرایند کارآمد است، اما با چالش‌هایی نیز همراه است. از جمله این چالش‌ها می‌توان به تداخل متقابل بین داده‌ها و دنباله‌های راهنما اشاره کرد. علاوه بر این، این روش نیازمند هماهنگی دقیق بین سلول‌ها برای جلوگیری از همپوشانی زمانی است که به نوبه خود منجر به افزایش پیچیدگی سیستم می‌شود.

در [۹] و [۱۰]، روش‌های مبتنی بر زاویه ورود (AOA)^۴ مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در این روش‌ها نشان داده شده که اگر کاربران از نظر مکانی از یکدیگر فاصله داشته باشند و زاویه ورود سیگنال‌های دریافتی آنها هم‌پوشانی نداشته باشد، می‌توان از یک دنباله راهنمای یکسان برای چند کاربر، بدون اینکه آلودگی دنباله راهنما ایجاد شود، استفاده کرد. با این وجود، در نظر گرفتن زاویه ورود برای هر کاربر در سیستم‌های بی‌سیم همواره از نظر عملی امکان‌پذیر نیست.

اخیراً در [۱۱]، پژوهشگران رویکردی نوآورانه برای مقابله با آلودگی دنباله راهنما ارائه کرده‌اند. در این رویکرد با ترکیب تکنیک دسترسی چندگانه تقسیم نرخ^۵ (RSMA) و سیستم‌های MIMO انبوه، چارچوبی جدید برای ارسال اطلاعات در لینک فرسوس طراحی شده است. این روش با تفکیک پیام به بخش‌های مشترک و خصوصی، امکان آشکارسازی مؤثرتر داده‌ها را در شرایط وجود آلودگی دنباله راهنما فراهم می‌آورد. به عبارت دیگر، این تکنیک اجازه می‌دهد تا سیگنال‌های دریافتی با دقت بیشتری، حتی در حضور تداخل ناشی از آلودگی دنباله راهنما، پردازش شوند. علاوه بر این در [۱۲]، محققان استراتژی‌های پیش‌کدگذاری و تخصیص توان را برای بهینه‌سازی عملکرد شبکه توسعه داده‌اند. این استراتژی‌ها به طور خاص برای بهبود کارایی سیستم در حضور آلودگی دنباله راهنما طراحی شده‌اند. با وجود این، پیچیدگی پیاده‌سازی و نیاز به سخت‌افزار پیشرفته از جمله چالش‌های اصلی این روش به شمار می‌آیند.

پژوهشگران در [۱۳] یک روش جدید برای بهبود تخمین کانال در سیستم‌های MIMO انبوه چندسلولی ارائه کرده‌اند. آنها از ترکیب

1. Pilot Contamination Precoding
2. Overhead
3. Time Shifted Pilot
4. Angle-of-Arrival
5. Rate Splitting Multiple Access

6. Linear Minimum Mean Square Error
7. Soft Pilot Reuse
8. Weighted Graph Coloring
9. Weighted Graph Coloring + Soft Pilot Reuse

مدیریت دقیق‌تر منابع و کاهش هدفمند آلودگی را فراهم می‌کند. (و) **بهبود کارایی انرژی:** طرح پیشنهادی نه تنها آلودگی را کاهش می‌دهد، بلکه کارایی انرژی را نیز بهبود می‌بخشد. نتایج نشان می‌دهند که در لینک فراسو، کارایی انرژی به ۰/۲۲ بیت بر ثانیه بر هرتز بر وات می‌رسد که بالاتر از سایر روش‌های موجود است.

(ه) **کاهش پیچیدگی محاسباتی:** علی‌رغم ترکیب چند روش، الگوریتم پیشنهادی پیچیدگی محاسباتی کمتری نسبت به روش WGC دارد.

ساختار مقاله به این صورت است: بخش ۲، مدل سیستم پیشنهادی را با تکیه بر تعاریف و روابط مورد نیاز ارائه می‌کند. بخش ۳، یک الگوریتم دومرحله‌ای را برای بهبود عملکرد سیستم‌های MIMO انبوه با هدف کاهش آلودگی دنباله راهنما و افزایش نرخ داده برای کاربران در لینک‌های فراسو و فرسوس معرفی می‌کند. در بخش ۴، مقایسه و تحلیل عملکرد روش پیشنهادی WGC+SPR با سایر روش‌ها بررسی می‌شود. بخش ۵ به پیچیدگی محاسباتی روش پیشنهادی WGC+SPR می‌پردازد و نهایتاً مقاله با نتیجه‌گیری در بخش ۶ خاتمه می‌یابد.

۲- مدل سیستم

یک سیستم مبتنی بر فناوری MIMO انبوه چندسلولی و چندکاربره را در نظر بگیرید. این سیستم از ترکیب L سلول شش ضلعی تشکیل شده و هر سلول شامل یک ایستگاه پایه با M آنتن و K کاربر تک‌آنتنه است؛ به طوری که $K \ll M$ در نظر گرفته شده است. تحت این شرایط، بردار کانال بین کاربر k ام در سلول z ام با ایستگاه پایه در سلول i ام را می‌توان به صورت زیر بیان نمود [۱۵]

$$\mathbf{h}_{i,j,k} = \mathbf{g}_{i,j,k} \sqrt{\beta_{i,j,k}} \quad (1)$$

در این مدل از ۳ اندیس اصلی استفاده می‌شود: i برای نمایش سلول اصلی که می‌تواند مقادیر ۱ تا L را بگیرد، j برای نمایش سلول‌های مجاور سلول اصلی i که آن هم می‌تواند مقادیر ۱ تا L بگیرد و k برای نمایش کاربران در هر سلول که مقادیر ۱ تا K را می‌پذیرد. مدل کانال استفاده شده در این سیستم، کانال محوشدگی تخت‌کند است که در آن بردار کانال $\mathbf{h}_{i,j,k}$ در طول زمان همدوسی کانال ثابت در نظر گرفته می‌شود. طبق (۱)، بردارهای محوشدگی مقیاس کوچک $\mathbf{g}_{i,j,k} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ برای هر کاربر از الگوی محوشدگی رایلی تبعیت می‌کنند؛ به طوری که هر عنصر این بردارها یک متغیر تصادفی مستقل با توزیع گاوسی مختلط دارای میانگین صفر و ماتریس کوواریانس واحد \mathbf{I}_M است. به بیان دقیق‌تر $\mathbf{g}_{i,j,k}$ از توزیع $CN(\mathbf{0}, \mathbf{I}_M)$ پیروی می‌کند [۱۸]. $\beta_{i,j,k}$ نیز ضرایب محوشدگی مقیاس بزرگ را نشان می‌دهد که برای تخمین میزان آلودگی دنباله راهنمای کاربر k ام در سلول z ام با ایستگاه پایه در سلول i ام به کار می‌رود. با توجه به این اطلاعات، ماتریس کانال برای تمام K کاربر در سلول z ام در ارتباط با ایستگاه پایه در سلول i ام را می‌توان به صورت زیر نمایش داد [۱۹]

$$\mathbf{H}_{i,j,k} = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_{i,j,1} & \mathbf{h}_{i,j,2} & \dots & \mathbf{h}_{i,j,K} \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} \mathbf{g}_{i,j,1} & \mathbf{g}_{i,j,2} & \dots & \mathbf{g}_{i,j,K} \end{bmatrix} \mathbf{D}_{i,j,k}^{M \times K} \quad (2)$$

که در آن $\mathbf{D}_{i,j,k}$ به عنوان ماتریس محوشدگی مقیاس بزرگ تعریف می‌شود که ارتباط تمامی K کاربر در سلول z ام با ایستگاه پایه سلول i ام نشان می‌دهد. این پارامتر به طور همزمان دو اثر مهم را مدل‌سازی

(۱) با گروه‌بندی هوشمندانه کاربران به دسته‌های مرکزی و لبه، امکان مدیریت بهتر منابع را فراهم می‌آورد. این رویکرد نه تنها کارایی سیستم را افزایش می‌دهد، بلکه از افزایش بیش از حد سربار دنباله‌های راهنما که یکی از چالش‌های اصلی روش WGC است، جلوگیری می‌کند.

(۲) این روش از الگوریتمی برای انتخاب بهینه دنباله راهنما استفاده می‌کند که عملکرد کاربران با نرخ داده پایین‌تر را بهبود می‌بخشد. در این الگوریتم، ابتدا کاربری که کمترین نرخ داده را دارد شناسایی می‌شود و سپس دنباله راهنمایی انتخاب می‌شود که بیشترین نرخ داده را برای آن کاربر ایجاد می‌کند. الگوریتم پیشنهادی در هر تکرار، بهترین دنباله‌های راهنما را برای کاربران با کمترین نرخ داده انتخاب می‌کند. این رویکرد علاوه بر بهبود عملکرد کلی سیستم، یک رویکرد عادلانه در مدیریت منابع را نیز تضمین می‌کند [۱۷].

(۳) تخصیص دقیق‌تر دنباله‌های راهنمای بهینه بر اساس میزان آلودگی هر کاربر، عملکرد کلی سیستم را ارتقا می‌دهد. این روش مشکل آلودگی دنباله راهنما را که در روش SPR به‌خاطر استفاده از یک حد آستانه ثابت برای تعیین شدت آلودگی به‌وجود می‌آید، رفع می‌کند.

در نتیجه، روش WGC+SPR با بهینه‌سازی تخصیص دنباله‌های راهنما و افزایش مجموع نرخ داده کاربران، زمینه را برای بهبود قابل توجه عملکرد کلی سیستم فراهم می‌آورد. این نوآوری نه تنها نقاط ضعف روش‌های قبلی را برطرف کرده، بلکه راه را برای پیشرفت‌های بیشتر در زمینه سیستم‌های MIMO انبوه هموار می‌سازد. با توجه به مطالب فوق، نوآوری‌های کلیدی روش پیشنهادی عبارتند از:

الف) رویکرد تخصیص دنباله راهنما بر اساس شدت آلودگی: طرح پیشنهادی، برخلاف روش SPR که از یک آستانه ثابت برای تشخیص آلودگی دنباله راهنما استفاده می‌کند، رویکردی مبتنی بر WGC را اتخاذ می‌نماید که در آن تخصیص دنباله راهنما بر اساس شدت آلودگی صورت می‌گیرد. در این طرح، آلودگی دنباله راهنمای هر کاربر متناسب با میزان دقیق آلودگی آن کاهش می‌یابد، نه بر مبنای یک معیار ثابت. این رویکرد نوآورانه منجر به تخصیص دقیق‌تر منابع و کاهش مؤثرتر آلودگی در سیستم می‌شود.

ب) ترکیب هوشمندانه SPR و WGC: طرح ما با ترکیب نوآورانه SPR و WGC، مزایای هر دو روش را حفظ کرده و معایب آنها را برطرف می‌کند. این طرح از SPR برای جلوگیری از افزایش بی‌رویه تعداد دنباله‌های راهنما در لبه سلول استفاده می‌کند. از WGC نیز برای تخصیص بهینه دنباله‌های راهنما به کاربران بهره می‌برد؛ به طوری که آلودگی دنباله‌های راهنما بر اساس شدت آلودگی هر کاربر کاهش می‌یابد.

ج) الگوریتم انتخاب دنباله راهنمای بهینه: این الگوریتم نوآورانه با هدف پیشینه‌کردن مجموع نرخ قابل دستیابی کاربران در لینک‌های فراسو و فرسوس طراحی شده است. برخلاف روش‌های قبلی، این الگوریتم به طور خاص بر بهبود عملکرد کاربران با نرخ داده پایین‌تر تمرکز دارد که به نوبه خود منجر به توزیع عادلانه‌تر منابع می‌شود.

د) رویکرد دومرحله‌ای: این رویکرد شامل دو مرحله اصلی است. در مرحله اول، تقسیم‌بندی هوشمندانه کاربران (کاربران لبه سلولی و درون سلولی) و تعیین دنباله‌های راهنمای بهینه انجام شده و سپس در مرحله دوم از EWIC برای کاهش آلودگی بر اساس شدت آن استفاده می‌شود؛ به طوری که این رویکرد دومرحله‌ای، امکان

دنباله‌های راهنمای کاربران سلول‌های مجاور را نیز دریافت کند؛ در نتیجه، تخمین کانال ارتباطی در ایستگاه پایه تحت تأثیر این تداخل قرار می‌گیرد که دقت تخمین کانال را کاهش داده و چالشی برای عملکرد بهینه شبکه ایجاد می‌کند [۱۵].

برای تحلیل دقیق‌تر این پدیده می‌توان ماتریس توالی‌های دنباله راهنمای دریافت‌شده در ایستگاه پایه سلول i ام را طی زمان τ_p در نظر گرفت. این ماتریس که با $\mathbf{Y}_i^p \in \mathbb{C}^{M \times \tau}$ نشان داده می‌شود، به صورت زیر بیان می‌گردد [۱۵]

$$\mathbf{Y}_i^p = \sqrt{\rho_p} \sum_{j=1}^L \mathbf{H}_{i,j,K} \boldsymbol{\phi} + \mathbf{N}_i^p \quad (4)$$

که در آن ρ_p توان ارسال دنباله‌های راهنما و $\mathbf{N}_i^p \in \mathbb{C}^{M \times \tau}$ ماتریس نویز سفید گوسی جمع‌شونده (AWGN) کانال است. پس از دریافت توالی دنباله‌های راهنما، ایستگاه پایه سلول i ام با استفاده از همبستگی مستقیم بین ماتریس دنباله‌های راهنمای دریافتی و ماتریس دنباله‌های راهنمایی محلی، تخمینی از ماتریس کانال $\mathbf{H}_{i,j,K}$ به صورت زیر به دست می‌آورد [۱۵]

$$\hat{\mathbf{H}}_{i,j,K} = \frac{1}{\sqrt{\rho_p}} \mathbf{Y}_i^p \boldsymbol{\phi}^H = \mathbf{H}_{i,i,K} + \sum_{i \neq j} \mathbf{H}_{i,j,K} + \frac{1}{\sqrt{\rho_p}} \mathbf{N}_i^p \boldsymbol{\phi}^H \quad (5)$$

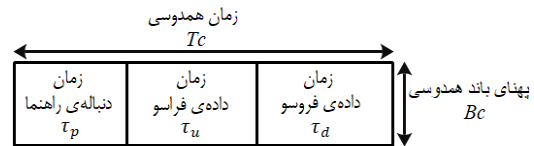
که در این رابطه، هر سطر از ماتریس $\hat{\mathbf{H}}_{i,j,K}$ مربوط به بردار کانال تخمین‌زده‌شده یک کاربر است. به عبارت دیگر، سطر k ام از ماتریس $\hat{\mathbf{H}}_{i,j,K}$ بردار کانال تخمین‌زده‌شده مربوط به کاربر k ام در سلول i ام را نشان می‌دهد. مشکل اصلی این است که به دلیل استفاده مجدد از دنباله‌های راهنمای مشابه در سلول‌های مجاور، ماتریس کانال تخمین زده‌شده $\hat{\mathbf{H}}_{i,j,K}$ دچار آلودگی دنباله راهنما می‌شود. تخمین کانال کاربر k ام در سلول i ام، یعنی $\hat{\mathbf{h}}_{i,i,k}$ ، ترکیب خطی کانال‌های $\mathbf{h}_{i,i,k}$ برای $L \geq j \geq 1$ است که شامل کانال‌های کاربران در سلول‌های مجاور است که از دنباله‌های راهنمای مشابه استفاده می‌کنند.

ب) در زمان τ_u

در این بازه زمانی، تمامی کاربران در سلول اصلی و کاربران واقع در لبه سلول‌های مجاور به طور همزمان داده‌های فراسو را به ایستگاه پایه سلول i ام ارسال می‌کنند. داده‌های دریافت‌شده از K کاربر در ایستگاه پایه سلول i ام را می‌توان به صورت زیر نمایش داد [۱۵]

$$\mathbf{y}_i^u = \sqrt{\rho_u} \sum_{j=1}^L \sum_{k=1}^K \mathbf{h}_{i,j,k} x_{i,k}^u + \mathbf{n}_i^u \quad (6)$$

که $x_{i,k}^u$ با $E\{|x_{i,k}^u|^2\} = 1$ بیانگر سمبل ارسالی از کاربر k ام در سلول i ام است. همچنین $\mathbf{n}_i^u \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ نشان‌دهنده بردار نویز AWGN کانال فراسو با ماتریس کوواریانس $E\{\mathbf{n}_i^u (\mathbf{n}_i^u)^H\} = (\sigma_n^u)^2 \mathbf{I}_M$ می‌باشد. همان‌طور که در (۶) مشاهده می‌شود، افزایش توان سیگنال داده (ρ_u) به تنهایی نمی‌تواند نرخ ارسال داده را در لینک فراسو افزایش دهد که این محدودیت به دلیل آلودگی ناشی از دنباله راهنما ایجاد می‌شود. برای بهبود نرخ ارسال داده در لینک فراسو لازم است راهکارهایی برای مقابله با آلودگی دنباله راهنما ارائه شود. با در نظر گرفتن ماتریس تخمین کانال $\hat{\mathbf{H}}_{i,j,K}$ و به‌کارگیری آشکارساز فیلتر منطبق (MF)^۶، سمبل آشکارشده از کاربر k ام در سلول i ام می‌تواند به‌صورت زیر نمایش داده شود [۱۵]



شکل ۲: بلوک همدوسی در پروتکل دوبلکس تقسیم زمانی (TDD).

می‌کند: اثر تضعیف مسیر ناشی از فاصله^۱ و اثر سایه‌ای^۲ بر روی سیگنال. سیگنال. هر دو اثر برای تمامی K کاربر در سلول i ام نسبت به ایستگاه پایه سلول i ام در نظر گرفته می‌شود.

با فرض این که S تعداد کل دنباله‌های راهنما در هر سلول و τ طول هر دنباله راهنما است، تعداد کل دنباله‌های راهنما (S) بر اساس زمان همدوسی کانال (T_C) تعیین می‌شود، به طوری که $1 \leq T_C \leq S$ برقرار است. علاوه بر این فرض می‌شود که تمام دنباله‌های راهنمای قابل دستیابی ($\boldsymbol{\phi}_{T_C}$) که متعلق به فضای $C^{\tau-1}$ هستند و طول τ دارند، در یک سلول با یکدیگر متعامد هستند؛ یعنی

$$\boldsymbol{\phi} = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_{S-1}]^T \in C^{S \times \tau}, \quad \boldsymbol{\phi} \boldsymbol{\phi}^H = \mathbf{I}_S \quad (3)$$

به دلیل محدودیت منابع دنباله راهنما، تمام دنباله‌های راهنمای گروه $\boldsymbol{\phi}$ در سلول‌های دیگر مجدداً مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این راستا نشان‌دهنده دنباله راهنمای کاربر k ام در سلول i ام است که در آن $s_{(i,k)}$ شماره دنباله راهنمایی است که به این کاربر اختصاص داده شده است. همان‌طور که در (۳) آمده است، توالی‌های دنباله‌های راهنما در یک سلول بر یکدیگر متعامد هستند. این ویژگی باعث می‌شود که کاربران یک سلول برای یکدیگر آلودگی دنباله راهنما ایجاد نکنند. با این حال، آلودگی دنباله راهنما برای کاربران یک سلول توسط کاربران سلول‌های مجاور که از دنباله‌های راهنمای یکسان استفاده می‌کنند، به وجود می‌آید [۱۹].

با توجه به شکل ۲ می‌توان از روش تقسیم زمانی (TDD)^۳ برای ایجاد ایجاد یک کانال متقابل استفاده کرد. در این روش، کانال‌های فراسو^۴ و فرسوسو^۵ دارای بلوک‌های همدوسی یکسانی هستند. هر بلوک همدوسی در روش TDD از نمونه‌هایی تشکیل شده که دارای پهنای باند همدوسی B_C و زمان همدوسی T_C هستند [۲۰].

در ادامه با استناد به شکل ۲ به تحلیل جامع زمان همدوسی می‌پردازیم که از سه بازه زمانی مجزا تشکیل شده است: زمان تخمین کانال (τ_p)، زمان سیگنال داده فراسو (τ_u) و زمان سیگنال داده فرسوسو (τ_d). هدف اصلی این تحلیل، ارائه درکی بهتر از عملکرد اثرات آلودگی دنباله‌های راهنما در طول زمان همدوسی کانال است.

الف) در زمان τ_p

در این بازه زمانی، ایستگاه پایه هر سلول دنباله‌های راهنما را از دو منبع اصلی دریافت می‌کند: کاربران داخل همان سلول و کاربران لبه سلول‌های مجاور. کاربران لبه سلول‌های مجاور به دلیل استفاده از دنباله‌های راهنمای مشابه با سلول اصلی، این دنباله‌ها را همزمان به ایستگاه پایه سلول خود و سلول اصلی ارسال می‌کنند. این پدیده موجب می‌شود هر ایستگاه پایه، علاوه بر دنباله‌های راهنمای کاربران خود،

1. Path Loss
2. Shadowing
3. Time-Division Duplexing
4. Uplink
5. Downlink

6. Additive Gaussian White Noise

7. Match Filter

که در آن n_i^d بردار نویز AWGN کانال فروسو است که دارای ماتریس کواریانس $E\{n_i^d (n_i^d)^H\} = (\sigma_n^d)^2 I_M$ می‌باشد. در طول این بازه زمانی، ایستگاه پایه در سلول i ام یک بردار سیگنال M بعدی را ارسال می‌کند که به صورت $x_i^d = [x_{i,1}^d \ x_{i,2}^d \ \dots \ x_{i,K}^d]^T$ نمایش داده می‌شود. این بردار نشان‌دهنده بردار منبع سمبل برای K کاربر در سلول i ام است؛ به گونه‌ای که $E\{x_{i,K}^d\} = 1$ برقرار است.

با در نظر گرفتن ماتریس کانال تخمین زده شده $\hat{H}_{i,j,k}^*$ ، سمبل ارسالی از ایستگاه پایه در سلول i ام می‌تواند توسط کاربر k ام به صورت زیر آشکار شود [۱۵]

$$\hat{x}_{i,k}^d = \hat{h}_{i,j,k}^T \mathcal{Y}_i^d = \sqrt{\rho_d} (h_{i,i,k}^T h_{i,i,k}^* x_{i,k}^d + \sum_{j \neq i} h_{i,j,k}^T h_{i,j,k}^* x_{j,k}^d) + \sigma_{i,j,k}^d \quad (11)$$

در این رابطه، ρ_d نشان‌دهنده توان ارسال داده لینک فروسو بوده و $\sigma_{i,j,k}^d$ به توان نویز AWGN لینک فروسو اشاره دارد. با توجه به این رابطه، SINR کاربر k ام در سلول i ام در لینک فروسو به صورت زیر بیان می‌شود [۱۶]

$$SINR_{i,k}^d = \frac{|h_{i,i,k}^T h_{i,i,k}^*|^2}{\sum_{j \neq i} |h_{i,j,k}^T h_{i,j,k}^*|^2 + \frac{\sigma_{i,j,k}^d}{\rho_d}} \approx \frac{\beta_{i,i,k}^d}{\sum_{j \neq i} \beta_{i,j,k}^d} \quad (12)$$

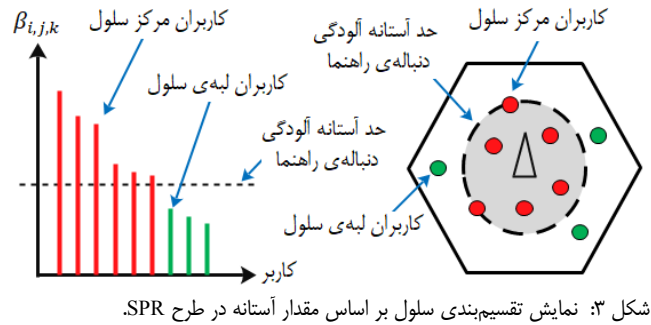
از (۷) و (۱۲) چنین برمی‌آید که می‌توان نویز AWGN و تأثیرات محوشدگی مقیاس کوچک را با افزایش تعداد آنتن‌های ایستگاه پایه (M) به سمت بی‌نهایت به طور میانگین محاسبه کرد. تحت این شرایط تنها ضرایب محوشدگی مقیاس بزرگ باقی می‌ماند. این امر اجازه می‌دهد تا عبارت SINR لینک فروسو و فروسو تنها با استفاده از جملات $\beta_{i,j,k}$ تقریب زده شود. بنابراین با توجه به (۱۲) می‌توان میانگین نرخ قابل دستیابی کاربر k ام در سلول i ام در لینک فروسو را به صورت زیر بیان کرد [۱۶]

$$C_{i,k}^d = (1 - \mu_S) E\{\log_r(1 + SINR_{i,k}^d)\} \quad (13)$$

این بررسی نشان می‌دهد که آلودگی دنباله راهنما، چالشی اساسی در سامانه‌های MIMO انبوه چندسولوی بوده و بر عملکرد لینک‌های فروسو و فروسو تأثیر می‌گذارد؛ به گونه‌ای که این پدیده باعث کاهش دقت تخمین کانال و در نتیجه کاهش SINR می‌شود. برای مقابله با این مشکل از طرحی ترکیبی شامل رنگ‌آمیزی گراف وزن دار و استفاده مجدد دنباله راهنما به صورت نرم (WGC + SPR) استفاده شده تا آلودگی دنباله‌های راهنما کاهش یابد. برای این منظور باید مراحل زیر انجام گیرد:

الف) در ابتدا مطابق با شکل ۳ در روش SPR، کاربران هر سلول به دو گروه تقسیم می‌شوند: کاربران مرکزی و کاربران لبه. این تقسیم‌بندی بر اساس میزان آلودگی ناشی از دنباله‌های راهنمای کاربران انجام می‌شود. کاربران مرکزی که آلودگی کمتری ایجاد می‌کنند، از یک گروه دنباله راهنمای مشترک در تمام سلول‌ها استفاده می‌کنند. در مقابل برای کاربران لبه که آلودگی بیشتری دارند، گروه‌های جداگانه دنباله راهنما در سلول‌های مجاور به کار گرفته می‌شود. این روش باعث می‌شود آلودگی برای کاربران لبه به طور قابل توجهی کاهش یافته و تخمین کانال بهبود پیدا کند.

ب) در ادامه، تخصیص دنباله‌های راهنما به کاربران به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی ترکیبی فرموله می‌شود. در این راستا یک الگوریتم انتخاب دنباله راهنمای بهینه طراحی شده که این الگوریتم،



شکل ۳: نمایش تقسیم‌بندی سلول بر اساس مقدار آستانه در طرح SPR.

$$\hat{x}_{i,k}^u = \hat{h}_{i,j,k}^H \mathbf{y}_i^u = \sqrt{\rho_p} (\mathbf{h}_{i,i,k}^H \mathbf{h}_{i,i,k} x_{i,k}^u + \sum_{j \neq i} \mathbf{h}_{i,j,k}^H \mathbf{h}_{i,j,k} x_{j,k}^u) + \sigma_{i,j,k}^u \quad (14)$$

به طوری که ρ_u نشان‌دهنده توان ارسال داده لینک فراسو، $\sigma_{i,j,k}^u$ بیانگر توان نویز AWGN لینک فراسو و \mathbf{y}_i^u داده‌های دریافت‌شده در ایستگاه پایه سلول i ام است. این رابطه به خوبی نشان می‌دهد که سیگنال دریافتی در ایستگاه پایه صرفاً شامل اطلاعات مربوط به کاربر مورد نظر نیست؛ بلکه تحت تأثیر تداخل ناشی از کاربران سلول‌های مجاور نیز قرار دارد. این پدیده که به عنوان آلودگی دنباله راهنما شناخته می‌شود، یکی از چالش‌های اصلی در بهینه‌سازی عملکرد شبکه‌های مخابراتی محسوب می‌شود. با توجه به این پیچیدگی‌ها محاسبه SINR برای کاربر k ام در سلول i ام در لینک فراسو اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند. با استفاده از گیرنده فیلتر منطبق در ایستگاه پایه مطابق (۷) داریم [۱۶]

$$SINR_{i,k}^u = \frac{|\mathbf{h}_{i,i,k}^H \mathbf{h}_{i,i,k}|^2}{\sum_{j \neq i} |\mathbf{h}_{i,j,k}^H \mathbf{h}_{i,j,k}|^2 + \frac{\sigma_{i,j,k}^u}{\rho_u}} \approx \frac{\beta_{i,i,k}^u}{\sum_{j \neq i} \beta_{i,j,k}^u} \quad (15)$$

بنابراین با توجه به (۸) می‌توان میانگین نرخ قابل دستیابی کاربر k ام در سلول i ام در لینک فراسو را به صورت زیر بیان کرد [۱۶]

$$C_{i,k}^u = (1 - \mu_S) E\{\log_r(1 + SINR_{i,k}^u)\} \quad (16)$$

μ_S میزان بازدهی طیفی^۱ از دست‌رفته است که به دلیل ارسال دنباله‌های راهنما برای تخمین کانال رخ می‌دهد. این مقدار از نسبت طول دنباله راهنما (τ) بر زمان همدموسی کانال (T_C) به صورت $\mu_S = \tau/T_C$ محاسبه می‌شود. نرخ ارسال داده قابل دستیابی در لینک فراسو به دو دلیل عمده محدود می‌شود: (۱) پدیده آلودگی دنباله راهنما و (۲) کاهش بازدهی طیفی ناشی از ارسال دنباله‌های راهنما. این عوامل به ترتیب باعث کاهش SINR و محدود شدن منابع برای تبادل داده‌های مفید می‌شوند [۱۶].

ج) در زمان τ_d

کاربران در این بازه زمانی، اطلاعات لازم را از ایستگاه پایه سلول اصلی دریافت می‌کنند. این اطلاعات بر اساس تخمین کانالی است که در زمان τ_p با استفاده از دنباله راهنما انجام شده و بنابراین آلودگی دنباله راهنما بر ارسال داده در لینک فروسو در این بازه زمانی تأثیر می‌گذارد [۲۰]. داده‌های ارسالی از ایستگاه پایه سلول i ام به سمت K کاربر را می‌توان به صورت زیر نمایش داد [۱۵]

$$\mathbf{y}_i^d = \sqrt{\rho_d} \sum_{j=1}^L \hat{H}_{i,j,K}^* x_j^d + \mathbf{n}_i^d \quad (17)$$

۳-۱ مرحله اول روش پیشنهادی

در مرحله اول روش پیشنهادی از روش SPR مطابق شکل ۳ برای تقسیم‌بندی کاربران به دو گروه مرکز و لبه سلولی به صورت رابطه زیر استفاده می‌شود

$$\beta_{i,j,k}^r > \sigma_i \begin{cases} Yes \rightarrow \text{Cell Center Users} \\ No \rightarrow \text{Cell Edge Users} \end{cases} \quad (14)$$

در این رابطه، مقدار حد آستانه آلودگی دنباله راهنما (σ_i) با ضرایب محوشدگی مقیاس بزرگ ($\beta_{i,j,k}$) کاربران در سلول اصلی و سلول‌های مجاور مقایسه می‌شود. این مقایسه، امکان تشخیص کاربران مرکزی (با آلودگی کمتر) از کاربران لبه سلولی (با آلودگی بیشتر) را فراهم می‌کند؛ به طوری که مقدار حد آستانه آلودگی دنباله راهنما به صورت رابطه زیر قابل محاسبه است [۱۵]

$$\sigma_i = \frac{g}{K} \sum_{k=1}^K \beta_{i,j,k}^r \quad (15)$$

در نتیجه این تقسیم‌بندی، کاربران مرکزی که آلودگی کمتری ایجاد می‌کنند، از یک گروه دنباله راهنمای مشترک در تمام سلول‌ها بهره می‌برند. در مقابل برای کاربران لبه سلولی که آلودگی بیشتری دارند، گروه‌های جداگانه دنباله راهنما در سلول‌های مجاور به کار گرفته می‌شود. مقدار g را می‌توان بر اساس پیکربندی (۱۵) تنظیم کرد. لازم به ذکر است که مقدار حد آستانه آلودگی دنباله راهنما بر اساس مقدار $\beta_{i,j,k}$ تعیین می‌شود، نه بر اساس موقعیت جغرافیایی کاربران.

اگر $K_{eu} = \sum_{i=1}^L K_{i,e}$ و $K_{cu} = \max\{K_{i,c}, i=1, 2, \dots, L\}$ به ترتیب تعداد کاربران مرکز سلولی و کاربران لبه سلولی تعریف شوند، تعداد کل کاربران یک سلول K_{all} را مطابق شکل ۳ می‌توان به صورت زیر بیان نمود [۱۵]

$$K_{all} = K_{cu} + K_{eu} \quad (16)$$

بنابراین تمام دنباله‌های راهنمای گروه Φ_{all} را می‌توان برای کاربران مرکز سلولی و لبه سلولی به صورت زیر تقسیم بندی کرد [۱۵]

$$\Phi_{all} = [\Phi_{cu}^T \ \Phi_{eu}^T]^T \quad (17)$$

که در آن $\Phi_{cu} \in C^{K_{cu} \times \lambda}$ نشان‌دهنده دنباله‌های راهنما برای کاربران مرکز سلول و $\Phi_{eu} \in C^{K_{eu} \times \lambda}$ بیانگر دنباله‌های راهنما برای کاربران لبه سلول است. پس از تقسیم‌بندی کاربران به دو گروه مرکزی و لبه‌ای توسط روش SPR، الگوریتم انتخاب دنباله راهنمای بهینه که در شکل ۴ ارائه شده، اجرا می‌شود. این الگوریتم بر اساس دو معیار اصلی عمل می‌کند: الف) افزایش نرخ داده کاربرانی که دارای نرخ داده کمتری هستند و ب) بیشینه‌کردن مجموع نرخ داده تمام کاربران. برای دستیابی به این اهداف، الگوریتم پارامترهای مختلفی را در نظر می‌گیرد؛ از جمله نرخ داده هر کاربر و تعداد دنباله‌های راهنمای موجود. با توجه به این پارامترها الگوریتم به صورت بهینه تعیین می‌کند که هر کاربر به کدام دنباله راهنما متصل شود تا اهداف مذکور محقق گردند.

می‌توان نرخ داده هر کاربر را با توجه به دنباله راهنمای انتخاب شده برای آن کاربر از رابطه زیر محاسبه کرد [۱۵]

$$R_{k,s} = B \times \log_2 \left(1 + \frac{P_s \times SINR_{(k,s)}}{\Gamma} \right) \quad (18)$$

که $R_{k,s}$ نرخ داده کاربر k ام را برای دنباله راهنمای s ام نشان می‌دهد. P_s توان تخصیص‌یافته به دنباله راهنمای s ام است که با استفاده از

ابتدا کاربر با کمترین نرخ داده را شناسایی کرده و سپس دنباله راهنمایی را انتخاب می‌کند که بیشترین نرخ داده را در آن کاربر ایجاد کند. این فرایند تا زمان تعیین بهترین دنباله راهنما برای تمام کاربران ادامه می‌یابد. پس از تعیین دنباله‌های راهنمای بهینه، این اطلاعات در جدول شناسه هر کاربر ثبت می‌شود تا در الگوریتم WCG مورد استفاده قرار گیرد.

ج) سپس یک گراف تداخلی با لبه وزن‌دار^۱ (EWIG) ایجاد می‌شود. هدف این گراف نمایش شدت آلودگی دنباله‌های راهنما بین کاربران است. در این گراف، کاربران در سلول‌های مختلف به عنوان گره‌ها نمایش داده می‌شوند و لبه‌های گراف نشان‌دهنده ارتباط بین کاربران است. وزن هر لبه بیانگر شدت آلودگی احتمالی است، در صورتی که دو کاربر متصل از دنباله راهنمای یکسان استفاده کنند.

د) نهایتاً طرح ارائه‌شده با اختصاص هر رنگ به یک دنباله راهنما و هر گره به یک کاربر در گراف تداخلی با لبه وزن‌دار، روشی برای پاکسازی آلودگی دنباله راهنما مبتنی بر WGC ارائه می‌دهد که با الگوریتم کلاسیک دساتور بهبود یافته است [۲۱]. این طرح با تخصیص دنباله‌های راهنمای متفاوت به کاربران متصل در گراف تداخلی، شدت آلودگی دنباله‌های راهنما را کاهش داده و کاربران را از گراف تداخلی با لبه وزن‌دار خارج می‌کند. به عبارت دیگر، این رویکرد نوآورانه از طریق تخصیص دنباله‌های راهنمای بهینه، نه تنها آلودگی دنباله راهنما را کاهش می‌دهد و کیفیت سرویس‌دهی را بهبود می‌بخشد، بلکه با بهینه‌سازی استفاده از منابع شبکه، عملکرد کلی سیستم را نیز ارتقا می‌دهد.

۳- طرح پیشنهادی

این مقاله، الگوریتمی دومرحله‌ای را برای بهبود عملکرد سیستم‌های MIMO انبوه ارائه می‌دهد. هدف اصلی، کاهش آلودگی دنباله راهنما و افزایش نرخ داده برای کاربران در لینک‌های فراسو و فروسو است. برای این کار در مرحله اول، روش SPR کاربران را بر اساس میزان آلودگی به دو گروه تقسیم می‌کند: کاربران مرکزی با آلودگی کمتر و کاربران لبه با آلودگی بیشتر. برای کاربران مرکزی، یک گروه دنباله راهنمای مشترک در تمام سلول‌ها استفاده می‌شود؛ اما برای کاربران لبه، گروه‌های جداگانه در سلول‌های مجاور به کار می‌رود. سپس الگوریتم انتخاب دنباله راهنمای بهینه، دنباله‌هایی را برای کاربران با کمترین نرخ داده انتخاب می‌کند تا بیشترین نرخ داده برای این کاربران فراهم شود.

مرحله دوم الگوریتم با استفاده از روش WGC آغاز می‌شود. در این مرحله، ابتدا یک گراف تداخلی به نام EWIG ایجاد می‌گردد. این گراف، شدت تداخل میان کاربران لبه سلول‌های مجاور را که دارای دنباله‌های راهنمای یکسان هستند، مشخص می‌کند. سپس دنباله‌های راهنمای بهینه که در مرحله اول برای هر کاربر انتخاب شده‌اند، مجدداً به کاربران تخصیص داده می‌شوند. این تخصیص مجدد بر اساس میزان آلودگی دنباله راهنما صورت می‌گیرد. فرایند تخصیص مجدد به گونه‌ای طراحی شده است که در گراف تداخلی EWIG، هیچ دو کاربر مجاوری دنباله راهنمای یکسان دریافت نکنند. این رویکرد هوشمندانه موجب کاهش آلودگی دنباله‌های راهنما می‌شود. در ادامه، هر یک از مراحل ذکرشده با جزئیات بیشتری مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

دنباله راهنما به K کاربر در هر سلول برابر $A_S^K = S! / (S - K)!$ است. با در نظر گرفتن L سلول، تعداد کل حالت‌های ممکن برای تخصیص دنباله راهنما به $(A_S^K)^{L-1}$ افزایش می‌یابد. یافتن بهترین تخصیص دنباله راهنما با توجه به تعداد زیاد حالت‌های ممکن، یک مسئله بهینه‌سازی پیچیده است. الگوریتم‌های موجود برای تخصیص منابع در حل این مسئله، پیچیدگی محاسباتی بالایی دارند؛ بنابراین در این مقاله الگوریتمی با پیچیدگی محاسباتی کمتر ارائه شده که قادر است مسئله بهینه‌سازی پیچیده فوق را مطابق با شبه‌کد ارائه شده در شکل ۴ حل کند.

الگوریتم انتخاب دنباله راهنمای بهینه مطابق شکل ۴ را می‌توان به چهار مرحله اصلی تقسیم کرد:

(۱) مقداردهی اولیه (خطوط ۱ تا ۱۰): ابتدا نرخ داده اولیه همه کاربران

(r_k) صفر در نظر گرفته شده و سپس بردارهای موقعیت ($a_{s_{best}}$)

و شاخص ($e_{s_{best}}$) دنباله‌های راهنما مقداردهی اولیه می‌شوند. پس

از آن با استفاده از الگوریتم واترفیلینگ، توان بهینه (P_S) به

دنباله‌های راهنما تخصیص داده می‌شود. نهایتاً با استفاده از (۱۸)،

نرخ داده هر کاربر برای هر دنباله راهنما ($R_{k,s}$) محاسبه می‌شود.

(۲) انتخاب کاربر (خط ۱۱): برای انتخاب کاربران به ترتیب اهمیت،

کاربری با کمترین نرخ داده (k_{min}) انتخاب می‌شود. این کاربر

اولویت بیشتری برای تخصیص دنباله راهنما خواهد داشت.

(۳) تخصیص دنباله راهنما (خطوط ۱۲ تا ۱۵): پس از انتخاب کاربر

k_{min} ، الگوریتم به دنبال انتخاب بهترین دنباله راهنما برای این

کاربر است. ابتدا بهترین دنباله راهنما (s_{best}) که بیشترین نرخ داده

را برای کاربر k_{min} فراهم می‌کند، انتخاب می‌شود. سپس نرخ داده

کاربر k_{min} به اندازه نرخ داده ارائه شده توسط دنباله راهنمای s_{best}

افزایش می‌یابد. نهایتاً اطلاعات تخصیص دنباله راهنمای بهینه در

بردارهای $a_{s_{best}}$ و $e_{s_{best}}$ ذخیره می‌شود.

(۴) محاسبه ظرفیت کل (خطوط ۱۶ و ۱۷): این فرایند تا زمانی که همه

دنباله‌های راهنما تخصیص یابند، تکرار می‌شود. در پایان، ظرفیت

کل سیستم با جمع نرخ داده همه کاربران که با استفاده از (۲۰)

محاسبه شده‌اند، به دست می‌آید.

این الگوریتم یک روش بهینه‌سازی برای تخصیص منابع در سیستم‌های

ارتباطی چندکاربره است. هدف اصلی آن، بهینه‌سازی مجموع نرخ داده

کاربران از طریق انتخاب بهینه دنباله‌های راهنماست. الگوریتم در یک

حلقه تکرارشونده عمل می‌کند. در هر تکرار برای کاربر با کمترین نرخ

داده، دنباله راهنمایی را انتخاب می‌کند که بیشترین نرخ داده را در آن

کاربر ایجاد کند. نتایج این الگوریتم در قالب بردارهای موقعیت و شاخص

ذخیره می‌شود. این بردارها شامل شناسه و شماره بهترین دنباله راهنمای

تخصیص داده شده به هر کاربر است. این اطلاعات برای استفاده در مرحله

دوم الگوریتم پیشنهادی (WGC) به کار می‌رود. هدف مرحله دوم،

پاکسازی آلودگی دنباله‌های راهنما و بهبود عملکرد کلی سیستم است.

۳-۲ مرحله دوم روش پیشنهادی

الگوریتم شکل ۵، روشی بهینه را برای تخصیص دنباله‌های راهنما

به کاربران سلولی با هدف کاهش آلودگی دنباله راهنما معرفی می‌کند.

این الگوریتم از دنباله‌های راهنمای بهینه‌ای استفاده می‌کند که توسط

الگوریتم شکل ۴ مقاله تولید شده‌اند. نوآوری اصلی این روش، تخصیص

غیریکنواخت دنباله‌های راهنما بر اساس میزان آلودگی ایجاد شده هر

کاربر است. بدین منظور از یک گراف تداخلی با لبه‌های وزن‌دار (EWIG)

استفاده می‌گردد که به صورت $EWIG = (V, E)$ نمایش داده می‌شود.

Optimal pilot selection algorithm

```

1: for  $k=0$  to  $K-1$  do
2:    $r_k \leftarrow 0$ 
3: end for
4: for  $s=0$  to  $S-1$  do
5:    $a_s \leftarrow 0$ 
6:    $e_s \leftarrow 0$ 
7: end for
8:  $[P_S] = \text{water-filling}(SINR_{(k,s)}, P_T)$ 
9: Calculate  $R_{k,s}$  from (۱۸)
10: for  $s=0$  to  $S-1$  do
11:    $k_{min} \leftarrow \arg \min(r)$ 
12:    $s_{best} \leftarrow \arg \max_{s=0}^{S-1} (R_{k_{min}, s_{best}})$ 
13:    $r_{k_{min}} \leftarrow r_{k_{min}} + R_{k_{min}, s_{best}}$ 
14:    $e_{s_{best}} \leftarrow k_{min}$ 
15:    $a_{s_{best}} \leftarrow s$ 
16: end for
17: Total capacity =  $\sum_{k=0}^{K-1} r_k$ 

```

شکل ۴: الگوریتم انتخاب دنباله راهنما بهینه.

روش بهینه‌سازی واترفیلینگ^۱ محاسبه می‌شود. این روش برای تخصیص

بهینه توان به دنباله‌های راهنما به کار می‌رود. پارامتر Γ بیانگر اختلاف

بین SINR تئوری و عملی مورد نیاز برای دستیابی به عملکرد مطلوب

است. در این مقاله، مقدار Γ برابر با یک در نظر گرفته شده است.

SINR_(k,s) نشان‌دهنده نسبت سیگنال به تداخل و نویز برای کاربر k ام

در ارتباط با دنباله راهنمای s ام است. این پارامتر را می‌توان به صورت

$SINR_{(k,s)} = SINR_{i,k}^{u \text{ or } d}$ نیز نمایش داد که در آن اندیس‌های u و

d به ترتیب نشان‌دهنده SINR در لینک فراسو و فروسو هستند.

هدف در این مقاله برخلاف روش‌های متداول که دنباله‌های راهنمای

ϕ را به صورت تصادفی به کاربران تخصیص می‌دهند، بهینه‌سازی

مجموع نرخ داده کاربران K در L سلول شش‌ضلعی است. این هدف را

می‌توان در قالب مسئله بهینه‌سازی P_1 به صورت زیر فرمول‌بندی کرد

$$P_1 = \max_{s(i,k)} \left\{ \sum_{(i,k)} \log_r(1 + SINR) \right\} \quad (۱۹)$$

با این حال، حل مسئله بهینه‌سازی P_1 با چالش‌هایی روبه‌رو است. علت

این امر، عدم توانایی ایستگاه پایه در کسب اطلاعات دقیق کانال به دلیل

وجود آلودگی دنباله راهنماست. با توجه به این محدودیت می‌توان رویکرد

جایگزینی را اتخاذ کرد. در این روش، مجموع نرخ داده قابل دستیابی

کاربران در لینک‌های فراسو و فروسو بر اساس ضرایب محوشدگی در

مقیاس بزرگ ($\beta_{i,j,k}$) محاسبه می‌شود. این رویکرد امکان تخمین

عملکرد سیستم را بدون نیاز به اطلاعات دقیق کانال فراهم می‌کند و

در نتیجه با در نظر گرفتن آلودگی دنباله‌های راهنما می‌توان مسئله

بهینه‌سازی P_1 را به صورت تقریبی به مسئله بهینه‌سازی P_2 تبدیل کرد.

این تقریب در رابطه زیر نشان داده شده است

$$P_2 = \max_{s(i,k)} \left\{ \sum_{(i,k)} B \times \log_r \left(1 + \frac{\beta_{i,i,k}^r}{\sum_{j \neq i} \beta_{i,j,k}^r} \right) \right\} \quad (۲۰)$$

مسئله ساده شده P_2 می‌تواند برای انواع مختلف دنباله‌های راهنما حل

شود تا مجموع نرخ داده کاربران را بهینه کند. در هر سلول i ، تعداد K

کاربر و S دنباله راهنما وجود دارد. تعداد راه‌های ممکن برای تخصیص

(۱) مقذاردهی اولیه (خطوط ۱ تا ۱۰): ابتدا پارامترهای ورودی الگوریتم مشخص می‌شود که شامل K یا تعداد کاربران در هر سلول، L یا تعداد سلول‌ها و S یا تعداد دنباله‌های راهنمای متعامد است. سپس یک گراف تداخلی با لبه وزن‌دار (EWIG) بین کاربران سلول اصلی و کاربران در لبه سلول‌های مجاور که از دنباله راهنمای یکسانی استفاده می‌کنند، ساخته می‌شود. دو کاربر با بیشترین آلودگی دنباله راهنما در گراف تداخلی از سلول‌های مختلف انتخاب می‌شوند. به هر یک از این دو کاربر، دنباله راهنمای بهینه‌ای از جدول شناسه مربوط به آن کاربر اختصاص داده می‌شود. نهایتاً این دو کاربر به مجموعه Ω که مجموعه کاربران دارای دنباله راهنما است، اضافه می‌شوند.

(۲) انتخاب کاربر (خطوط ۱۱ و ۱۲): برای انتخاب کاربران به ترتیب اهمیت، پارامتر اولویت‌بندی $\delta_{(i,k)}$ برای هر کاربر (i,k) محاسبه می‌شود. این پارامتر نشان‌دهنده مجموع آلودگی دنباله راهنما بین کاربر (i,k) و سایر کاربران موجود در سلول‌های دیگر است که در مجموعه Ω قرار دارند. پس از محاسبه این پارامتر برای تمام کاربران، کاربری با بیشترین مقدار $\delta_{(i,k)}$ که هنوز در مجموعه Ω قرار نگرفته است، به عنوان کاربر (i,k) انتخاب می‌شود.

(۳) تخصیص دنباله راهنما (خطوط ۱۳ تا ۱۶): پس از انتخاب کاربر (i,k) ، مجموعه Λ شامل دنباله‌های راهنمای قابل تخصیص به این کاربر ساخته می‌شود. برای هر دنباله s در Λ ، مقدار η_s محاسبه می‌شود که نشان‌دهنده میزان آلودگی احتمالی بین کاربر (i,k) و سایر کاربران دارای دنباله s است. دنباله‌ای با کمترین مقدار η_s به کاربر (i,k) اختصاص داده شده و این کاربر به مجموعه Ω اضافه می‌شود.

این فرایند تا زمانی که همه کاربران دارای دنباله راهنما شوند ادامه می‌یابد. نهایتاً مجموعه $\{s_{best(i,k)}\}$ شامل دنباله‌های راهنمای بهینه برای تمام کاربران به عنوان خروجی الگوریتم برگردانده می‌شود.

در طرح رنگ‌آمیزی گراف وزن‌دار (WGC)، کاربران شبکه به عنوان گره‌های یک گراف تداخلی در نظر گرفته می‌شوند. وزن هر گره بر اساس میزان تداخلی که دنباله راهنمای آن کاربر بر روی سایر کاربران ایجاد می‌کند، تعیین می‌گردد. این معیار که به عنوان شدت آلودگی دنباله‌های راهنما شناخته می‌شود، نشان‌دهنده میزان تأثیر هر کاربر بر عملکرد کلی شبکه است. با استفاده از این رویکرد، رنگ‌آمیزی دنباله‌های راهنمای کاربران و اختصاص بهترین دنباله راهنما به هر کاربر توسط الگوریتم انتخاب دنباله راهنما بهینه انجام می‌شود. این فرایند به طور همزمان دو هدف مهم را دنبال می‌کند: (۱) افزایش میانگین نرخ داده قابل دستیابی کاربران در لینک‌های فراسو و فروسو و (۲) کاهش آلودگی دنباله‌های راهنمای کاربران سلولی [۱۶].

۴- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

پارامترهای شبیه‌سازی طرح پیشنهادی در جدول ۱ نشان داده شده است. شکل‌های ۶ و ۷ نشان می‌دهند که با افزایش توان ارسالی، میانگین نرخ قابل دستیابی برای هر کاربر در لینک‌های فراسو و فروسو برای تمام طرح‌های مورد بررسی بهبود می‌یابد. این طرح‌ها شامل طرح تخصیص تصادفی، SPR، WGC و طرح پیشنهادی هستند. نکته قابل توجه این است که طرح پیشنهادی در هر دو لینک عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌ها از خود نشان می‌دهد. این برتری ناشی از کاهش قابل توجه آلودگی دنباله راهنماست که به افزایش SINR منجر می‌شود. در لینک

WGC algorithm

- 1: **Input:**
- 2: System Parameters: K, L and S ;
- 3: The constructed EWIG: $G = (V, E)$
- 4: **Output**
- 5: Pilot allocation: $\{s_{best(i,k)}\}$, for $1 \leq i \leq L, 1 \leq k \leq K$
- 6: Initialization:
- 7: $\{i_1, k_1, i_2, k_2\} = \arg \max_{\{i,j,k,i \neq j\}} \xi_{i,j,k}^2$
- 8: $\{s_{(i,k)}\} = \cdot, s_{(i_1,k_1)} = 1, s_{(i_2,k_2)} = 2$
- 9: $\Omega = \{(i_1, k_1), (i_2, k_2)\}$
- 10: **While** $\exists s_{(i,k)} = \cdot$ **do**
- 11: $\delta_{(i,k)} = \sum_{(j,k) \in \Omega, i \neq j} \xi_{i,j,k}^2$
- 12: $\langle i, k \rangle = \arg \max_{\langle i,j,k \rangle} \{\delta_{(i,j,k)} : \langle i_1, k_1 \rangle \notin \Omega\}$
- 13: $\Lambda = \{s : \forall k s_{(i,k)} \neq s, 1 \leq s \leq S\}$
- 14: $\eta_s = \sum_{(j,k) \in \Omega, s_{(i,k)} = s} \xi_{(i,k)-(j,k)}^2$
- 15: $s_{(i,k)} = \arg \min_s \{\eta_s : s \in \Lambda\}$
- 16: $\Omega = \Omega \cup \{(i, k)\}$
- 17: **end while**
- 18: **return** $\{s_{best(i,k)}\}$

شکل ۵: الگوریتم رنگ‌آمیزی گراف وزن‌دار.

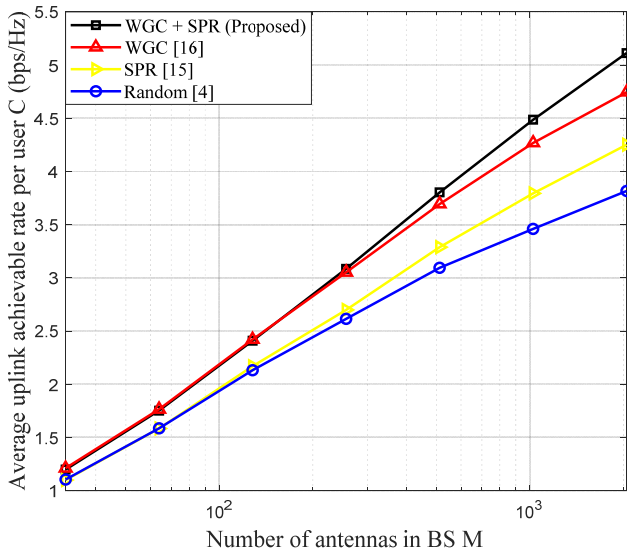
در این گراف، V مجموعه‌ای از گره‌های گراف است که نمایانگر کاربران سیستم می‌باشد و به صورت $V = \{i, k : 1 \leq i \leq L, 1 \leq k \leq K\}$ تعریف می‌شود. E مجموعه‌ای از لینک‌های وزن‌دار بین کاربران است که وزن هر لینک، معادل شدت آلودگی دنباله راهنما $(\xi_{i,j,k}^2)$ است و به صورت $E = \{\xi_{i,j,k}^2 : j \neq i\}$ تعریف می‌گردد. برای سنجش شدت آلودگی دنباله‌های راهنما بین دو کاربر متفاوت، مثلاً کاربر k ام در سلول اصلی i ام و کاربر k ام دیگری در سلول مجاور j ام که هر دو از دنباله‌های راهنمای یکسان استفاده می‌کنند، از رابطه زیر استفاده می‌شود [۱۶]

$$\xi_{i,j,k}^2 = \frac{\beta_{i,j,k}^r}{\beta_{i,i,k}^r} + \frac{\beta_{i,j,k}^v}{\beta_{j,j,k}^v} \quad (21)$$

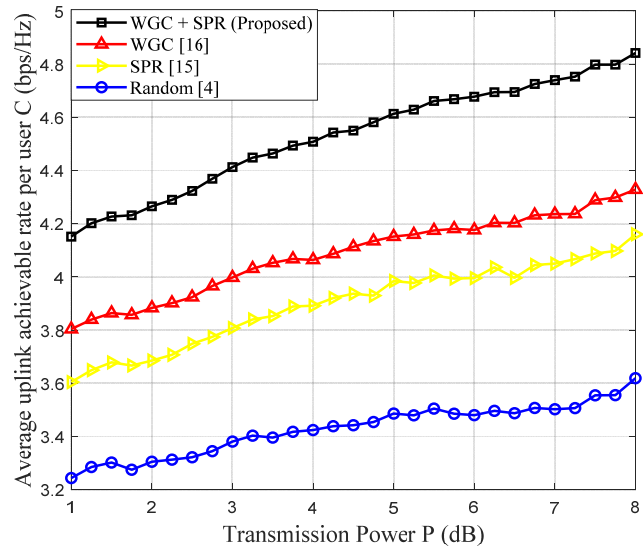
در این رابطه $\xi_{i,j,k}^2$ نشان‌دهنده نسبت توان کانال تداخلی به توان کانال مؤثر میان کاربران سلول اصلی و کاربران سلول مجاور است. این پارامتر برای کاربرانی محاسبه می‌شود که در لبه سلول از دنباله راهنمای یکسانی استفاده کرده‌اند و معیاری برای سنجش شدت آلودگی دنباله راهنما بین کاربران سلول اصلی و سلول مجاور به شمار می‌رود.

الگوریتم با استفاده از گراف EWIG، دو کاربری که بیشترین آلودگی دنباله راهنما را با هم دارند، با استفاده از (۲۱) پیدا کرده و با روش WGC، رنگ‌های متفاوتی به آنها اختصاص می‌دهد. سپس دنباله‌های راهنمای بهینه به کاربران با رنگ‌های مختلف تخصیص داده می‌شود.

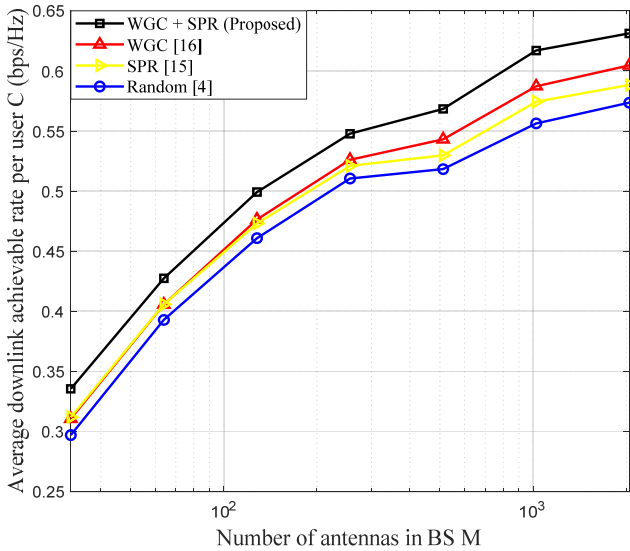
نوآوری اصلی این روش در استفاده از گراف EWIG و الگوریتم WGC برای تصمیم‌گیری هوشمندانه در مورد تخصیص دنباله‌های راهنما است. این راهبرد نه تنها آلودگی کلی دنباله‌های راهنما در شبکه را کاهش می‌دهد، بلکه با تخصیص دنباله‌های راهنمای بهینه انتخاب‌شده برای هر کاربر از الگوریتم شکل ۴، نرخ قابل دستیابی کاربران در لینک‌های فراسو و فروسو را نیز افزایش می‌دهد. نهایتاً تخصیص دنباله‌های راهنمای بهینه برای کاهش آلودگی دنباله راهنما مطابق شبه‌کد ارائه‌شده در شکل ۵ انجام می‌شود. با توجه به شبه‌کد ارائه‌شده در شکل ۵، عملکرد الگوریتم WGC در ادامه آمده است:



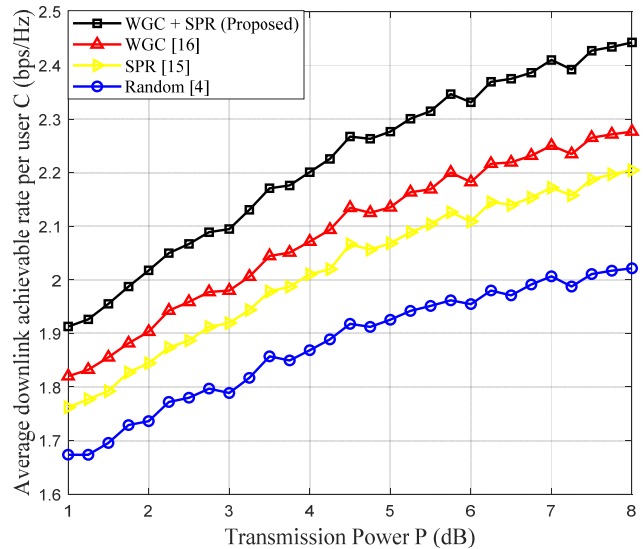
شکل ۸: میانگین نرخ قابل دستیابی کاربران در لینک فراسو در برابر افزایش تعداد آنتن‌های ایستگاه پایه یا M .



شکل ۶: میانگین نرخ قابل دستیابی در لینک فراسو برای هر کاربر در برابر تغییرات توان ارسالی یا ρ_u .



شکل ۹: میانگین نرخ قابل دستیابی کاربران در لینک فروسو در برابر افزایش آنتن BS یا M .



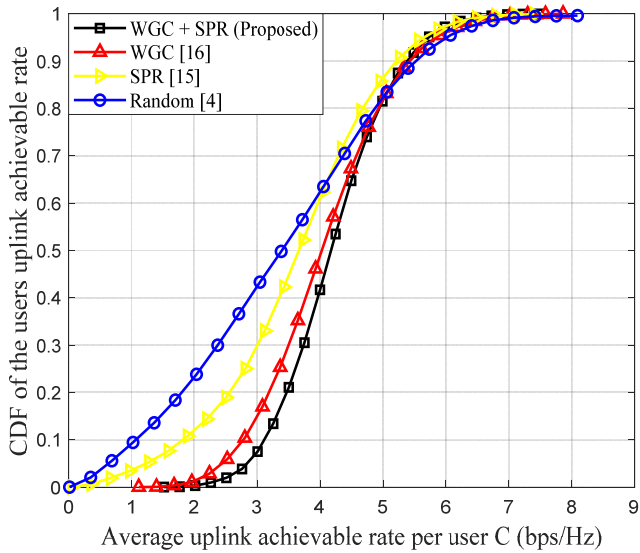
شکل ۷: میانگین نرخ قابل دستیابی در لینک فروسو برای هر کاربر در برابر تغییرات توان ارسالی یا ρ_d .

فراسو، این افزایش SINR در ایستگاه پایه رخ می‌دهد؛ در حالی که در لینک فروسو، دریافتی کاربران از ایستگاه پایه افزایش می‌یابد و در نتیجه، نرخ قابل دستیابی کاربران در هر دو لینک بهبود می‌یابد. در مقایسه با بهترین طرح مقایسه‌شده (WGC)، طرح پیشنهادی در لینک فراسو حدود ۰٫۴۶ بیت بر ثانیه بر هرتز و در لینک فروسو حدود ۰٫۱۶ بیت بر ثانیه بر هرتز عملکرد بهتری دارد. این برتری در هر دو لینک نشان‌دهنده کارایی بیشتر طرح پیشنهادی در مقابله با آلودگی دنباله راهنما است.

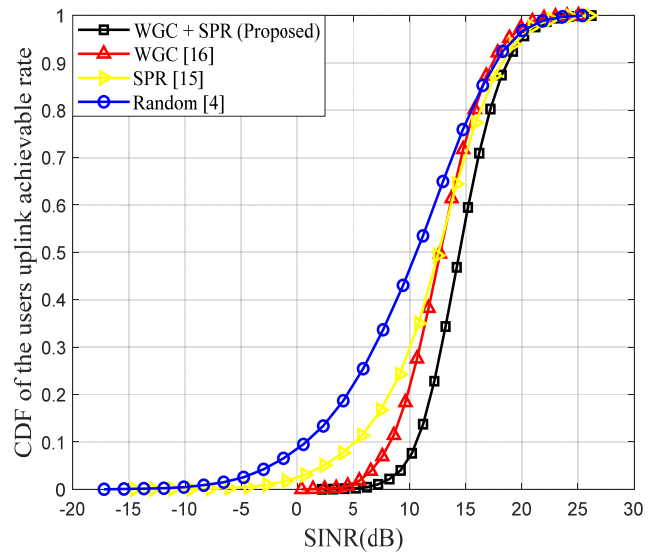
شکل‌های ۸ و ۹ نشان می‌دهند که با افزایش تعداد آنتن‌های ایستگاه پایه (M) میانگین نرخ قابل دستیابی برای هر کاربر در لینک‌های فراسو و فروسو برای تمامی طرح‌های مورد بررسی بهبود می‌یابد. این طرح‌ها شامل طرح تخصیص تصادفی، SPR، WGC و طرح پیشنهادی هستند. نکته قابل توجه این است که طرح پیشنهادی با افزایش M عملکرد بهتری نسبت به سایر طرح‌ها در هر دو لینک نشان می‌دهد که دلیل آن، توانایی بیشتر طرح پیشنهادی در کاهش آلودگی دنباله راهنماست. در مقایسه با بهترین طرح شبیه‌سازی شده (WGC) طرح پیشنهادی در لینک

جدول ۱: مؤلفه‌های شبیه‌سازی.

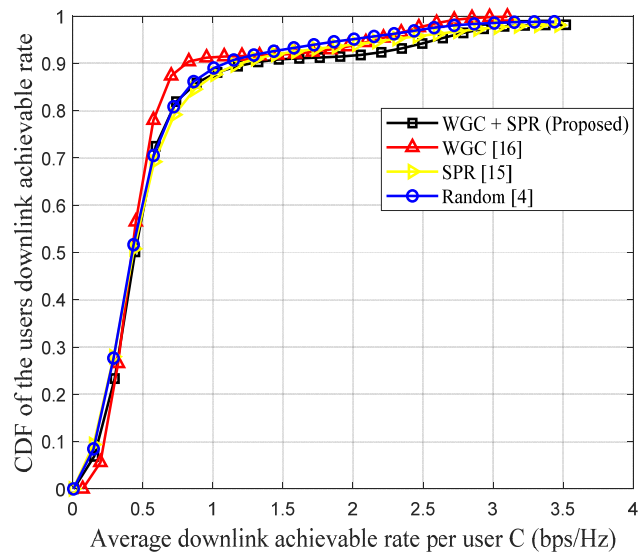
$L = 7$	تعداد سلول‌ها
$\Gamma = 1$	اختلاف بین SINR تئوری و SINR در عمل برای رسیدن به عملکرد مطلوب
$37 \leq M \leq 2048$	تعداد آنتن‌های ایستگاه پایه
$K = 10$	تعداد کاربران در هر سلول
$S = 15$	تعداد دنباله‌های راهنمای متعامد
$R = 500$ m	شعاع سلول
۱۰ dBm	توان ارسالی برای سیگنال دنباله راهنما ρ_p و سیگنال اطلاعات فراسو ρ_u
۱۲ dBm	توان ارسالی برای سیگنال اطلاعات فروسو ρ_d
$\alpha = 3$	ضریب تلفات مسیر
$\sigma_{shadow} = 8$ dB	واریانس لگاریتمی تضعیف سیگنال
$0.5 \leq \theta \leq 1$	مقدار حد آستانه
۱۰ MHz	پهنای باند سیستم
$N_i = -145$ dB/Hz	چگالی طیفی توان نویز AWGN
$\sigma_{fading} = 7$ dB	واریانس محوشدگی چندمسیری



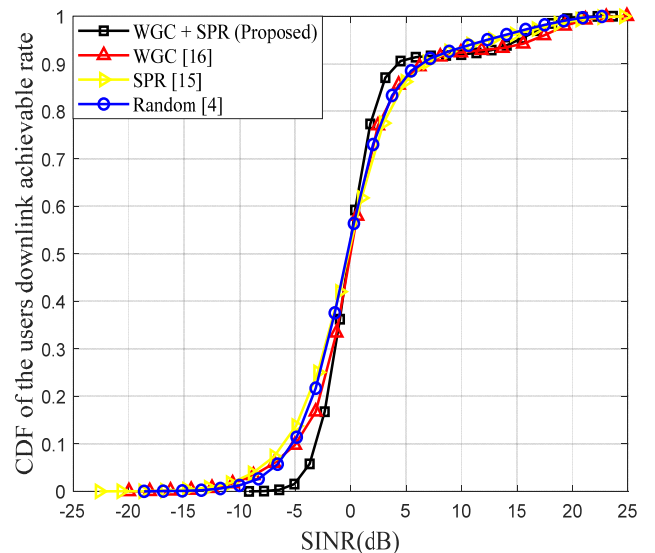
شکل ۱۲: CDF مربوط به میانگین نرخ قابل دستیابی کاربران در لینک فراسو.



شکل ۱۰: CDF مربوط به SINR قابل دستیابی کاربران در لینک فراسو.



شکل ۱۳: CDF مربوط به C میانگین نرخ قابل دستیابی کاربران در لینک فروسو.



شکل ۱۱: CDF مربوط به SINR قابل دستیابی کاربران در لینک فروسو.

پیشنهادی نسبت به طرح WGC بهبود عملکردی معادل ۱۱ دسی‌بل را نشان می‌دهد.

شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نمودارهای CDF مربوط به میانگین نرخ قابل دستیابی کاربران را به ترتیب در لینک‌های فراسو و فروسو نمایش می‌دهند. این نمودارها امکان مقایسه عملکرد طرح پیشنهادی با سایر روش‌ها از جمله طرح تخصیص تصادفی، SPR و WGC را فراهم می‌کنند. در لینک فراسو (شکل ۱۲)، طرح پیشنهادی در مقایسه با سایر روش‌ها میانگین نرخ قابل دستیابی بالاتری برای کاربران فراهم می‌کند. منحنی CDF نشان می‌دهد در طرح پیشنهادی، تعداد کمتری از کاربران دارای میانگین نرخ قابل دستیابی کمتر از ۱/۵ بیت بر ثانیه بر هرتز هستند؛ در حالی که در طرح‌های دیگر این مقدار به مراتب کمتر است. علاوه بر این در نقطه ۰/۱ نمودار تابع توزیع تجمعی، میانگین نرخ قابل دستیابی کاربران برای طرح پیشنهادی تقریباً برابر با ۳/۱ بیت بر ثانیه بر هرتز است؛ در حالی که این مقدار برای طرح WGC حدود ۲/۷ بیت بر ثانیه بر هرتز می‌باشد. این مقایسه نشان می‌دهد طرح پیشنهادی عملکرد بهتری نسبت به بهترین طرح شبیه‌سازی شده (WGC) دارد. در لینک فروسو (شکل ۱۳) نتایج نشان می‌دهند که طرح پیشنهادی از نظر میانگین نرخ قابل دستیابی در رتبه دوم قرار می‌گیرد. مشاهده می‌شود تمامی طرح‌های

فراسو حدود ۰/۵۷ بیت بر ثانیه بر هرتز و در لینک فروسو حدود ۰/۰۳ بیت بر ثانیه بر هرتز بهره‌وری بیشتری دارد. این نتایج نشان می‌دهند که طرح پیشنهادی به طور مؤثرتری از افزایش تعداد آنتن‌های ایستگاه پایه بهره می‌برد و می‌تواند بهبود قابل توجهی در عملکرد سیستم ایجاد کند؛ به‌ویژه در لینک فراسو.

شکل‌های ۱۰ و ۱۱ تابع توزیع تجمعی (CDF) مربوط به SINR قابل دستیابی کاربران را به ترتیب در لینک‌های فراسو و فروسو نمایش می‌دهند. هر دو نمودار نشان می‌دهند که طرح پیشنهادی در مقایسه با سایر روش‌ها، از جمله طرح تخصیص تصادفی، SPR و WGC، تحلیل بالاتری را برای کاربران فراهم می‌کند. در لینک فراسو (شکل ۱۰)، تحلیل منحنی CDF حاکی از آن است که در طرح پیشنهادی، تعداد کمتری از کاربران SINR برابر با ۲ دسی‌بل یا کمتر دارند؛ در حالی که در سایر طرح‌ها، SINR اکثر کاربران از این مقدار بسیار پایین‌تر است. طرح پیشنهادی بهبودی معادل ۲/۴ دسی‌بل نسبت به طرح WGC که بهترین طرح در میان سایر روش‌های شبیه‌سازی شده است، نشان می‌دهد. در لینک فروسو (شکل ۱۱) مشاهده می‌شود که در طرح پیشنهادی، تعداد کمتری از کاربران SINR برابر با ۹- دسی‌بل را تجربه می‌کنند؛ در حالی که در طرح‌های دیگر SINR به مراتب پایین‌تر است. در این لینک، طرح

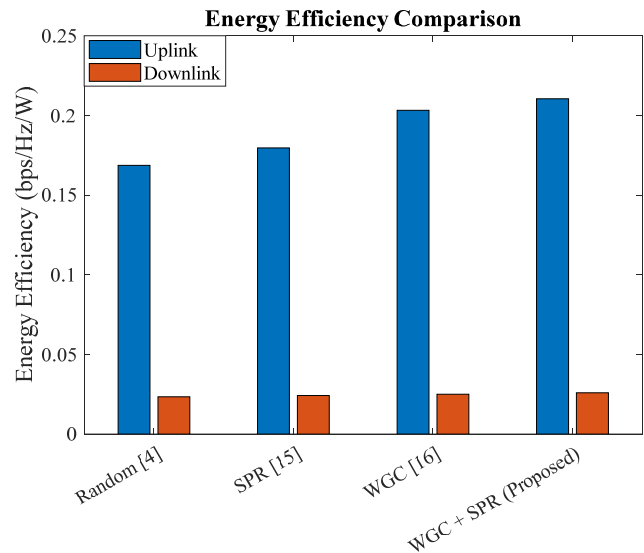
دنباله‌های راهنما را نشان می‌دهد. $O(L^r)$ مربوط به محاسبات تخصیص دنباله راهنما در هر سلول است که از سه حلقه تودرتو ناشی می‌شود: انتخاب سلول اصلی، انتخاب سلول مجاور برای مقایسه با سلول اصلی و تقسیم‌بندی کاربران به دو بخش لبه سلولی و مرکز سلولی. $O(K^r)$ به محاسبات تداخل بین کاربران و بهینه‌سازی تخصیص منابع اشاره داشته و شامل دو مرحله است: انتخاب یک کاربر در سلول اصلی و انتخاب کاربر دیگر از سلول مجاور برای مقایسه. $O(K_{eu})$ نشان‌دهنده عملیات اضافی برای هر کاربر لبه است که شامل بررسی وضعیت آلودگی دنباله راهنمای کاربر می‌شود. همچنین در جدول ۲، پیچیدگی محاسباتی روش‌های مختلف با استفاده از پارامترهای ارائه‌شده در جدول ۱ محاسبه شده است. در طرح SPR، فرض بر این است که تعداد کاربران لبه سلولی (K_{eu}) و مرکز سلولی (K_{cu}) هر دو برابر با ۵ هستند. نتایج نشان می‌دهند که طرح پیشنهادی WGC+SPR از پیچیدگی محاسباتی بالاتری نسبت به طرح‌های تخصیص تصادفی و SPR برخوردار است؛ اما در مقایسه با طرح WGC، پیچیدگی کمتری دارد. این کاهش پیچیدگی را می‌توان به رویکرد نوآورانه در ترکیب این روش‌ها نسبت داد. طرح WGC+SPR با استفاده از یک رویکرد ترکیبی، از افزایش تعداد دنباله‌های راهنما با آلودگی بیشتر در لبه سلولی جلوگیری می‌کند و میزان آلودگی دنباله راهنما برای کاربران لبه سلولی را کاهش می‌دهد. علاوه بر این با استفاده از الگوریتم انتخاب دنباله راهنمای بهینه، عملکرد کلی سیستم بهبود می‌یابد. این الگوریتم با هدف بیشینه‌کردن مجموع نرخ قابل دستیابی کاربران طراحی شده است. ترکیب این الگوریتم با طرح‌های SPR و WGC، منجر به ایجاد یک رویکرد جامع و کارآمد می‌شود که ضمن کاهش آلودگی دنباله راهنما، بهره‌وری کلی سیستم را نیز افزایش می‌دهد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک راهکار ترکیبی نوین برای بهبود عملکرد سیستم‌های MIMO انبوه ارائه شده است. این روش با تلفیق تکنیک‌های SPR، WGC و استفاده از الگوریتم انتخاب دنباله راهنمای بهینه، به طور همزمان سه مشکل اساسی را حل می‌کند: آلودگی در طرح SPR ناشی از آستانه ثابت، افزایش سربار دنباله راهنما در طرح WGC و بیشینه‌سازی نرخ داده کاربر با کمترین نرخ. شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که این روش در مقایسه با بهترین روش شبیه‌سازی‌شده (WGC)، بهبود ۲/۴ دسی‌بل در SINR و افزایش ۰/۴۶ بیت بر ثانیه بر هرترز در میانگین نرخ قابل دستیابی در لینک فراسو ایجاد کرده است. در لینک فراسو نیز بهبود ۱۱ دسی‌بل در SINR و افزایش ۰/۱۶ بیت بر ثانیه بر هرترز در میانگین نرخ قابل دستیابی به دست آمده است. از نظر پیچیدگی محاسباتی، روش پیشنهادی نسبت به طرح WGC، پیچیدگی کمتری دارد و توازن مناسبی بین عملکرد و پیچیدگی برقرار می‌کند. عملکرد پایدار در برابر تغییرات پارامترهای سیستم مانند توان ارسال و تعداد آنتن‌های ایستگاه پایه، از دیگر نقاط قوت این روش است. علاوه بر این، تحلیل کارایی انرژی، برتری روش پیشنهادی را در هر دو سناریوی لینک فراسو و فرسوس تأیید می‌کند. در نتیجه، این راهکار منجر به بهبود قابل توجهی در عملکرد سیستم و کارایی انرژی می‌شود.

مراجع

- [1] Y. Han, S. Jin, M. Matthaiou, T. Q. S. Quek, and C. K. Wen, "Toward extra large-scale MIMO: new channel properties and low-cost designs," *IEEE Internet of Things J.*, vol. 10, no. 16, pp. 14569-14594, Aug. 2023.



شکل ۱۴: مقایسه کارایی انرژی طرح‌های شبیه‌سازی‌شده در لینک‌های فراسو و فراسو.

شبیه‌سازی‌شده در نقطه ۰/۵ نمودار CDF، مقدار یکسانی معادل ۰/۴۸ بیت بر ثانیه بر هرترز را نشان می‌دهند. همچنین در نزدیکی نقطه ۱ نمودار CDF، عملکرد تمامی طرح‌ها تقریباً مشابه است.

کارایی انرژی که به صورت نسبت نرخ داده به مصرفی تعریف می‌شود، در شکل ۱۴ تحلیل شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهند که طرح ترکیبی WGC+SPR با کارایی ۰/۲۲ و ۰/۰۳ بیت بر ثانیه بر هرترز بر وات به ترتیب در لینک‌های فراسو و فرسوس، بهترین عملکرد را در میان تمامی طرح‌های مورد بررسی ارائه می‌دهد. در مقایسه در میان طرح‌های منفرد، طرح WGC با کارایی ۰/۲ و ۰/۰۲ بیت بر ثانیه بر هرترز بر وات در لینک‌های فراسو و فرسوس، برترین عملکرد را از خود نشان می‌دهد. این نتایج به‌وضوح برتری رویکرد ترکیبی WGC+SPR را در بهینه‌سازی کارایی انرژی نمایان می‌سازد. همچنین مقایسه لینک فراسو و فرسوس نشان می‌دهد که ساختار آنتنی نامتقارن تأثیر قابل توجهی بر کارایی انرژی دارد. در لینک فراسو، چندین کاربر با آنتن‌های محدود به یک ایستگاه پایه با آنتن‌های بسیار زیاد سیگنال ارسال می‌کنند؛ در حالی که در لینک فرسوس، عکس این حالت برقرار است. این ساختار نامتقارن منجر به تفاوت چشمگیر در کارایی انرژی بین لینک‌های فراسو و فرسوس می‌شود. به طور مشخص در طرح ترکیبی WGC+SPR، کارایی انرژی در لینک فراسو (۰/۲۲ بیت بر ثانیه بر هرترز بر وات) تقریباً ۷/۳ برابر لینک فرسوس (۰/۰۳ بیت بر ثانیه بر هرترز بر وات) است. این تفاوت قابل توجه را می‌توان به توانایی آنتن‌های متعدد ایستگاه پایه در دریافت سیگنال‌های ضعیف‌تر نسبت داد که به نوبه خود امکان ارسال سیگنال با توان کمتر توسط کاربران را فراهم می‌کند.

۵- پیچیدگی محاسباتی

پیچیدگی محاسباتی، یکی از معیارهای کلیدی در ارزیابی و مقایسه عملکرد سیستم‌هاست. در این مقاله، طرح‌های شبیه‌سازی‌شده بر اساس پیچیدگی محاسباتی طبق جدول ۲ مورد تحلیل و مقایسه قرار گرفته‌اند. در این جدول O نشان‌دهنده مرتبه پیچیدگی محاسباتی الگوریتم برای اجرای روش‌هاست. پیچیدگی محاسباتی الگوریتم WGC+SPR به صورت $O(S(K^r K_{eu} L^r))$ بیان می‌شود که نشان‌دهنده چندین مرحله پیچیدگی در فرآیند مدیریت دنباله‌های راهنما و بهینه‌سازی منابع در یک شبکه سلولی است؛ به طوری که $O(S)$ پیچیدگی تخصیص کل

جدول ۲: پیچیدگی محاسباتی روش‌ها.

Random [۴]	SPR [۱۴]	WGC [۱۵]	WGC + SPR (Proposed)
$O(SK)$	$O(M(K_{ev}^* + K_{cu}^*))$	$O(S(KL)^*)$	$O(S(K^* K_{ev} L^*))$
۱۵۰	۱۰۲۴۰۰	۵۱۴۵۰۰۰	۲۵۷۲۵۰۰

- [15] X. Zhu, *et al.*, "Soft pilot reuse and multicell block diagonalization precoding for massive MIMO systems," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 5, pp. 3285-3298, May 2016.
- [16] X. Zhu, L. Dai, Z. Wang, and X. Wang, "Weighted-graph-coloring-based pilot decontamination for multicell massive MIMO systems," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 3, pp. 2829-2834, Mar. 2017.
- [17] M. Manini, C. Gueguen, R. Legouable, and X. Lagrange, "Efficient system capacity user selection algorithm in MU-MIMO," in *Proc. IEEE 93rd Int. Vehicular Technology Conf.*, 6 pp., Helsinki, Finland, 25-28 Apr. 2021.
- [۱۸] ح. خالقی بیزکی، سیستم‌های مخابرات بی‌سیم، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۱۳۹۹.
- [19] S. M. Sanaie and H. Khaleghi Bizaki, "Performance analysis of multicell massive MIMO THP with pilot contamination," *Wiley Trans. on Emerging Telecommunications Technologies*, vol. 30, no. 5, Article ID: e3574, May 2019.
- [20] A. S. Al-hubaishi, N. K. Noordin, A. Sali, S. Subramaniam, and A. Mohammed Mansoor, "An efficient pilot assignment scheme for addressing pilot contamination in multicell massive MIMO systems," *Electronics*, vol. 8, no. 4, Article ID: 372, Mar. 2019.
- [21] V. Doshi, D. Shah, M. Médard, and M. Effros, "Functional compression through graph coloring," *IEEE Trans. on Information Theory*, vol. 56, no. 8, pp. 3901-3917, Aug. 2010.
- [2] O. Elijah, *et al.*, "Intelligent massive MIMO systems for beyond 5G networks: an overview and future trends," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 102532-102563, 2022.
- [3] H. Taleb, K. Khawam, S. Lahoud, M. E. Helou, and S. Martin, "Pilot contamination mitigation in massive MIMO cloud radio access networks," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 58212-58224, 2022.
- [4] T. L. Marzetta, "Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol. 9, no. 11, pp. 3590-3600, Nov. 2010.
- [5] A. Ashikhmin and T. L. Marzetta, "Pilot contamination precoding in multi-cell large scale antenna systems," in *Proc. IEEE Int. Sym. Inf. Theory*, pp. 1137-1141, Cambridge, MA, USA, 1-6 Jul. 2012.
- [6] J. Zuo, J. Zhang, C. Yuen, W. Jiang, and W. Luo, "Multicell multiuser massive MIMO transmission with downlink training and pilot contamination precoding," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 8, pp. 6301-6314, Aug. 2016.
- [7] F. Fernandes, A. Ashikhmin, and T. L. Marzetta, "Inter-cell interference in noncooperative TDD large scale antenna systems," *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, vol. 31, no. 2, pp. 192-201, Feb. 2013.
- [8] B. Sun, Y. Zhou, J. Yuan, and J. Shi, "Interference cancellation based channel estimation for massive MIMO systems with time shifted pilots," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol. 19, no. 10, pp. 6826-6843, Oct. 2020.
- [9] H. Yin, D. Gesbert, M. Filippou, and Y. Liu, "A coordinated approach to channel estimation in large-scale multiple-antenna systems," *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, vol. 31, no. 2, pp. 264-273, Feb. 2013.
- [10] Y. Omid, S. M. Hosseini, S. M. Shahabi, M. Shikh-Bahaei, and A. Nallanathan, "AoA-based pilot assignment in massive MIMO systems using deep reinforcement learning," *IEEE Communications Letters*, vol. 25, no. 9, pp. 2948-2952, Sep. 2021.
- [11] A. Mishra, Y. Mao, C. K. Thomas, L. Sanguinetti, and B. Clerckx, "Mitigating intra-cell pilot contamination in M-MIMO: a rate splitting approach," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol. 22, no. 5, pp. 3472-3487, May 2023.
- [12] A. Mishra, Y. Mao, L. Sanguinetti, and B. Clerckx, "Rate-splitting assisted massive machine-type communications in cell-free M-MIMO," *IEEE Communications Letters*, vol. 26, no. 6, pp. 1358-1362, Jun. 2022.
- [13] B. Lim, W. J. Yun, J. Kim, and Y. C. Ko, "Joint pilot design and channel estimation using deep residual learning for multi-cell massive MIMO under hardware impairments," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 71, no. 7, pp. 7599-7612, Jul. 2022.
- [14] J. Xu, P. Zhu, J. Li, and X. You, "Deep learning-based pilot design for multi-user distributed M-MIMO systems," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 8, no. 4, pp. 1016-1019, Aug. 2019.

امیر روستائی مدرک کاردانی خود را در رشته برق گرایش پست و انتقال از دانشکده فنی و حرفه‌ای خوارزمی ملایر در سال ۱۳۹۸ و مدرک کارشناسی خود را در رشته برق گرایش کنترل و ابزار دقیق از دانشکده فنی انقلاب اسلامی تهران در سال ۱۴۰۰ دریافت نمود. همچنین در سال ۱۴۰۳ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق گرایش مخابرات سیستم خود را از دانشگاه جامع امام حسین (ع) دریافت نمود. پایان‌نامه ایشان با عنوان «بهبود امنیت لایه فیزیکی در شبکه 5G مبتنی بر رله مشارکتی» با موفقیت مورد دفاع قرار گرفت. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان شامل مخابرات بی‌سیم، سیستم‌های MIMO، امنیت لایه فیزیکی، شکل‌دهی پرتو و مخابرات ماهواره‌ای می‌باشد.

حسین خالقی بیزکی مدرک دکتری خود را در رشته مهندسی برق گرایش مخابرات سیستم در سال ۱۳۸۶ از دانشگاه علم و صنعت ایران دریافت نموده است. دکتر خالقی مولف/همکار بیش از هشتاد مقاله و مولف چندین کتاب می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان شامل موضوعاتی مانند سیستم‌های مخابرات بی‌سیم، سیستم‌های مخابراتی MIMO، نظریه اطلاعات، کدگذاری کانال، پردازش سیگنال‌های مخابراتی و راداری، امنیت لایه فیزیکی و کاربرد هوش مصنوعی در سیستم‌های مخابراتی است.