

## مروری بر روش های کاهش آلودگی پایلوت در سیستم های چندورودی چندخروجی انبوه

داریوش عباسی مقدم<sup>۱</sup>، علی افضلی ده زیاری<sup>۲</sup>، نازنین کلانتری نژاد<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانشیار مهندسی برق، بخش مهندسی برق، دانشکده فنی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران، Abbasimoghdam@uk.ac.ir

<sup>۲</sup>کارشناسی ارشد مهندسی برق مخابرات، بخش مهندسی برق، دانشکده فنی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

<sup>۳</sup>کارشناسی ارشد مهندسی برق مخابرات، بخش مهندسی برق، دانشکده فنی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

### چکیده

سیستم های چند ورودی چند خروجی انبوه یکی از سیستم های پیشنهادی برای نسل پنجم سیستم های مخابراتی بی سیم هستند. در این سیستم ها در هر ایستگاه پایه تعداد زیادی آنتن (صدها و یا حتی هزاران آنتن) مورد استفاده قرار می گیرد که نتیجه این امر، افزایش ظرفیت، بازده طیفی و همچنین بازده انرژی در مقایسه با سیستم های چندورودی چندخروجی معمولی است. تداخل ناشی از استفاده مجدد از دنباله های پایلوت یکسان توسط کاربرهای سلول های متفاوت در مرحله تخمین کانال، مهم ترین عامل محدودیت عملکرد در این سیستم ها است که به عنوان پدیده ی آلودگی پایلوت شناخته می شود. در این مقاله ابتدا به بررسی آلودگی پایلوت پرداخته می شود. سپس روش های ارائه شده برای کاهش اثر آلودگی پایلوت، در پنج گروه با عنوان های روش های براساس پروتکل، روش های پیش کدینگ، روش های مبتنی بر AOA، روش های کور و روش های تخصیص پایلوت هوشمند دسته بندی شده و مزایا و چالش های هر روش مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین روش پیشنهادی مبتنی بر تخصیص پایلوت هوشمند برای کاهش آلودگی پایلوت ارائه شده است. روش پیشنهادی مبتنی بر گروه بندی کاربران به دو گروه مرزی و مرکزی انجام شد. نتایج شبیه سازی بهبود عملکرد سیستم را در حضور روش پیشنهادی در دستیابی به حداکثر نرخ فراسو و دقت تخمین کانال نسبت به سایر روش های مرجع نشان می دهد. همچنین روش پیشنهادی دیگر مبتنی بر ترکیب دو روش مبتنی بر پروتکل و پیش کدینگ نیز ارائه شده است. در پایان حوزه های پژوهشی در ارتباط با پدیده آلودگی پایلوت در سیستم های چندورودی چندخروجی انبوه نیز معرفی شده اند.

### کلیدواژه

آلودگی پایلوت، پیش کدینگ، تخمین کانال، سیستم های چندورودی چندخروجی انبوه، تخصیص پایلوت هوشمند.

### مقدمه

ما شین از سوی دیگر، موجب افزایش چشمگیر تعداد ابزارهای متصل به شبکه های ارتباطی بی سیم در دهه آینده خواهد شد. این دو عامل و برخی از عوامل دیگر مانند افزایش تقاضا برای بهبود پارامترهای مختلف کیفیت سرویس، نظیر نرخ داده، تأخیر و پوشش باعث شده که بازیگران حوزه مخابراتی در جهان در اندیشه تکامل شبکه های نسل چهارم به سمت شبکه های فراتر از نسل چهارم که اصطلاحاً شبکه های نسل پنجم نامیده می شوند، باشند. برای برآورده سازی الزامات نسل پنجم، فناوری های زیادی برای بهره گیری در شبکه های نسل پنجم معرفی و در حال توسعه هستند. فناوری های مطرح در حوزه نسل پنجم یا شکل تکامل یافته ای از فناوری های مورد استفاده در نسل های قبلی هستند و یا بعضاً فناوری های جدیدی هستند که در نسل های قبلی مورد استفاده نبوده اند. از سوی دیگر بسیاری از فعالیت های تحقیقاتی جاری بر ارائه روش های جدید یا

دهه ۲۰۱۰ میلادی دهه ظهور و رشد شبکه های نسل چهارم سیار است. آمارهای به دست آمده در طول چند سال اول این دهه و پیش بینی های موجود برای سال های آینده آن، نشان دهنده دو برابر شدن رشد تقاضا در بخش ترافیک دیتا در هر سال است. بدین ترتیب پیش بینی می شود که تقاضا برای شبکه های داده در سال ۲۰۲۰ به حدود ۱۰۰۰ برابر مقدار آن در سال ۲۰۱۰ برسد. همچنین پیش بینی های شرکت سیسکو نشان می دهد که ترافیک داده سیار در سطح جهان در سال ۲۰۱۸ از مرز ۱۵ اگزا بایت در ماه (۱/۶ گیگابایت برای هر کاربر در هر ماه) فراتر خواهد رفت. عامل دوم محرک تحقیقات در حوزه نسل پنجم، افزایش تعداد کاربران متصل به شبکه های سیار در سال های آینده خواهد بود. افزایش تعداد کاربران سیار از یک سو و مفاهیمی نظیر اینترنت اشیا و ارتباطات ماشین به

آلودگی پایلوت شناخته می شود که مهم ترین عامل محدودیت عملکرد در سیستم های چندرودی چندخروجی انبوه است [۷]. در این مقاله روش های ارائه شده برای کاهش اثر آلودگی پایلوت بررسی شده است. روش های ارائه شده در پنج گروه با عنوان های روش های بر اساس پروتکل، روش های پیش کدینگ، روش های مبتنی بر 'AOA، روش های کور و روش های تخصیص پایلوت هوشمند مورد مطالعه قرار گرفته اند. در روش های بر اساس پروتکل سعی شده است که عمل ارسال و دریافت از سلول های مختلف به نحوی انجام شود که تداخل کمتری در مرحله تخمین کانال ایجاد شود. ایده اصلی در این روش ها استفاده مجدد فرکانس و یا کاهش تعداد کاربرهایی است که به طور هم زمان از دنباله های پایلوت غیرمتعامد استفاده می کنند. در روش های پیش کدینگ، ماتریس پیش کدینگ در ایستگاه پایه به گونه ای طراحی می شود که اثر آلودگی پایلوت تا حد ممکن کاهش یابد [۸]. مدل کانال در روش های مبتنی بر AOA، مدل کانال همبسته در نظر گرفته شده است. در این مدل کانال، همبستگی بین آنتن های ایستگاه که ناشی از کمبود فضای بین آنتن ها می باشد نیز در مدل کانال در نظر گرفته می شود [۹]. در روش های کور نیز از ایده جداسازی زیرفضای تداخل و زیرفضای سیگنال مطلوب برای کاهش آلودگی پایلوت استفاده شده است. در تمامی روش های استفاده شده در چهار گروه ذکر شده، تخصیص دنباله پایلوت به کاربران به صورت تصادفی است. با توجه به اینکه شدت آلودگی پایلوت در تخصیص های متفاوت، تغییر می کند، روش هایی برای تخصیص دنباله های پایلوت به کاربران پیشنهاد شده است که این روش ها در گروه روش های تخصیص پایلوت هوشمند، مورد مطالعه قرار گرفته اند.

### مدل سیستم

یک شبکه سلولی متشکل از  $L$  سلول را در نظر می گیریم که در مرکز هر سلول یک ایستگاه پایه قرار دارد که با  $M$  آنتن مجهز شده است و هر سلول شامل  $K$  کاربر تک آنتنی است. فرض می شود که مالتی پلکس تقسیم فرکانس متعامد (OFDM) استفاده شده است و برای هر زیرحامل OFDM، یک مدل کانال محوشدگی تخت در نظر می گیریم. برای یک زیرحامل مشخص، ضریب کانال بین  $m$  امین آنتن در  $i$  امین ایستگاه پایه و  $k$  امین کاربر واقع در  $l$  امین سلول را به صورت زیر نمایش می دهیم [۱۰]:

$$g_{mkl} = h_{mkl} \sqrt{\beta_{ikl}} \quad (1)$$

که در این رابطه  $h_{mkl}$ ، ضریب محوشدگی سریع و دارای توزیع مستقل یک سان (i.i.d) با میانگین صفر و واریانس واحد است.

بهبود یافته در بخش دسترس رادیویی و به منظور افزایش کارایی طیف فرکانسی و کاهش تأخیر متمرکز می باشند [۱]. [۲]

سیستم های چندرودی چندخروجی انبوه یکی از سیستم های پیشنهادی برای نسل پنجم سیستم های مخابراتی بسیار می باشند. اولین بار مارزتا در یک ارائه در سال ۲۰۰۷ [۳] و مقاله ای که مفاهیم ارائه شده اش را فرمول سازی کرده بود [۴]، به استفاده از تعداد زیادی آنتن برای ارسال و دریافت اطلاعات، پرداخت. پیشنهاد او این بود که ایستگاه های پایه با تعداد آنتن بیشتر از تعداد مورد نیاز برای کاربران فعال در حوزه فرکانس و زمان تجهیز شوند. او نشان داد که تحت شرایط فرکانسی و زمانی حساب شده می توان تعداد آنتن ها در هر ایستگاه را تا صدها عدد افزایش داد. این ایده ی مهم که در ابتدا سیستم های آنتنی مقیاس بالا نامیده شد و در حال حاضر با نام سیستم های چندرودی چندخروجی انبوه شناخته می شود، مزایای مهمی را دارد که در ادامه به آن ها اشاره شده است:

- بهبود زیاد در کارایی طیفی، بدون نیاز به تراکم سازی سلول ها [۵] و [۶].
- بهبود پاسخ کانال به دلیل چند ارسالی فضایی، این کار باعث می شود تغییرات تصادفی کانال که روی یک مسیر تأثیر می گذارند، تأثیری روی سیگنال دریافتی نداشته باشد.
- ساختار ساده گیرنده و فرستنده به خاطر ساختار گوسی و متعامد کانال بین ایستگاه پایه و کاربران فعال.

این مزایا باعث شده که استفاده از سیستم های چندرودی چندخروجی انبوه به یک موضوع مهم در تحقیقات حوزه ی نسل پنجم تبدیل شود و نشان داده شده است که این سیستم ها می توانند در فراهم آوری ظرفیت بیشتر و پوشش گسترده در سیستم های سلول کوچک، نقش مهمی ایفا کنند.

اکثر مزایای سیستم های چندرودی چندخروجی انبوه در صورتی تحقق می یابند که ایستگاه پایه اطلاعات کاملی از حالت کانال داشته باشد که در عمل این گونه نیست و ایستگاه پایه باید اطلاعات حالت کانال را تخمین بزند. متداول ترین روش برای تخمین کانال استفاده از پایلوت های لینک فراسو است. در کانال های با تغییرات سریع، زمان هم دوسی کانال محدود است و در نتیجه کاربرها باید از پایلوت های بسیار کوتاه استفاده کنند؛ بنابراین تعداد دنباله های پایلوت متعامد نیز محدود است و دنباله های پایلوت باید در سلول های دیگر مورد استفاده مجدد قرار گیرند. در نتیجه با توجه به ارسال پایلوت های غیرمتعامد توسط کاربرهای سلول های دیگر، تخمین کانال به دست آمده در یک سلول مشخص، تخمینی دقیق نیست. این پدیده با عنوان

<sup>1</sup> Angle of Arrival

المان‌های ماتریس محوشدگی سریع، متغیرهای تصادفی گوسی با توزیع مستقل هم‌توزیع می‌باشند. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های این مدل، تعامد کانال‌های مربوط به کاربران متفاوت است، به طوری که:

$$\frac{1}{M} \mathbf{H}_{il_1}^H \mathbf{H}_{il_2} \approx \begin{cases} I_K & , l_1 = l_2 \\ 0 & , l_1 \neq l_2 \end{cases} \quad (3)$$

در شکل (۱)،  $\mathbf{H}_{il_1}^H \mathbf{H}_{il_2}$  برای حالتی که  $l_1 = l_2$  است، رسم شده است. در این بررسی تعداد کاربران  $K = 10$  در نظر گرفته شده است و برای تعداد آنتن‌های ایستگاه پایه چهار حالت متفاوت  $M = 20$ ،  $M = 60$ ،  $M = 150$  و  $M = 300$  فرض شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد آنتن‌های ایستگاه پایه ( $M$ ) نسبت به تعداد کاربران، تقریب استفاده شده در رابطه (۳)، تقریب دقیق‌تری است. انتشار مطلوب نیز یکی از ویژگی‌های مهم در سیستم‌های چندورودی چندخروجی انبوه است، به طوری که برای حالت  $M \gg K$  طبق لم ۱ در مرجع [۱۱]، داریم:

$$\frac{1}{M} \mathbf{G}_{jl_1}^H \mathbf{G}_{jl_2} = \mathbf{D}_{jl_1}^{1/2} \left( \frac{\mathbf{H}_{jl_1}^H \mathbf{H}_{jl_2}}{M} \right) \mathbf{D}_{jl_1}^{1/2} \approx \begin{cases} \mathbf{D}_{jl_2} & , l_1 = l_2 \\ 0 & , l_1 \neq l_2 \end{cases} \quad (4)$$

$\mathbf{D}_{il} = \text{diag}\{\beta_{i1l}, \beta_{i2l}, \dots, \beta_{iKl}\}$  ویژگی دیگر پدیده channel hardening است که بر اساس آن، نرم اقلیدی کانال هر کاربر تقریباً با ضریب محوشدگی مقیاس بزرگ مربوط به آن کاربر برابر است. زیرا با توجه به قانون اعداد بزرگ داریم:

$$\frac{1}{M} \mathbf{g}_{ikl}^2 = \beta_{ikl} \quad , \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (5)$$

این ویژگی‌ها نه تنها عملکرد سیستم را بهتر می‌کند بلکه طراحی الگوریتم سیستم چندورودی چندخروجی انبوه را نیز

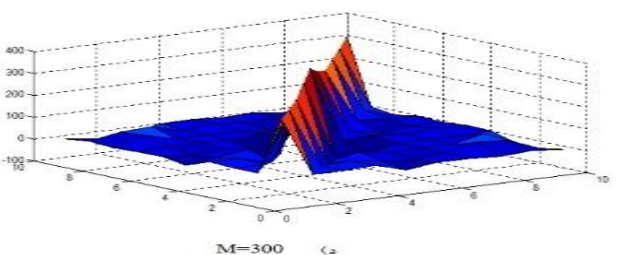
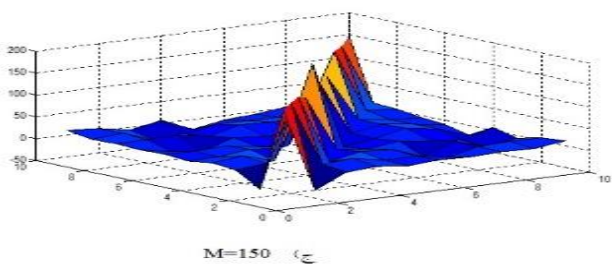
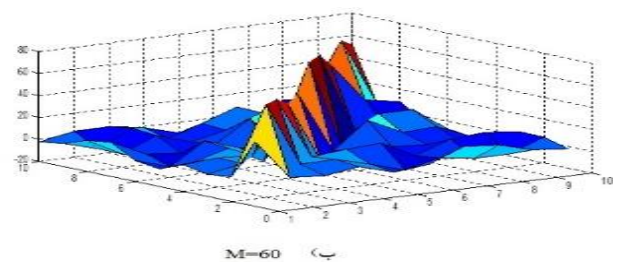
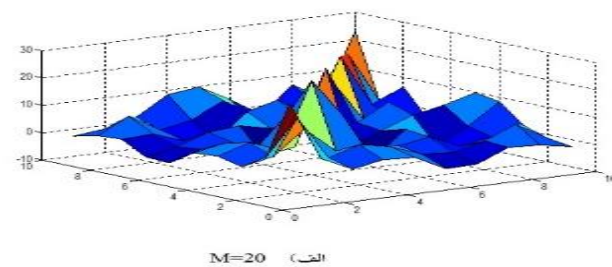
ضریب محوشدگی کند است. ضریب محوشدگی کند شامل تضعیف مسیر و محوشدگی سایه است و می‌توان آن را به صورت زیر بیان کرد:

$$\beta_{ikl} = \frac{z_{ikl}}{r_{ikl}^\gamma} \quad (2)$$

که  $r_{ikl}$  فاصله بین  $i$  امین ایستگاه پایه و  $k$  امین کاربر واقع در  $i$  امین سلول و  $\gamma$  ضریب تضعیف مسیر است. همچنین  $z_{ikl}$  مربوط به محوشدگی سایه و دارای توزیع لگ-نرمال است یعنی  $10 \log_{10} z_{ikl}$  دارای توزیع گوسی با متوسط صفر و انحراف معیار  $\sigma_{shadow}$  می‌باشد. بنابراین ضریب محوشدگی کند به محوشدگی سایه و فاصله بین ایستگاه پایه و کاربر بستگی دارد. معمولاً فاصله بین آنتن‌های ایستگاه پایه بسیار کمتر از فاصله بین ایستگاه پایه و کاربر است و بنابراین ضرایب محوشدگی مستقل از اندیس آنتن‌های ایستگاه پایه ( $m$ ) است. همچنین فرض شده است که در باند فرکانسی استفاده شده نیز ضرایب محوشدگی کند ثابت می‌باشند.

ضرایب کانال بین  $M$  آنتن واقع در  $i$  امین ایستگاه پایه و  $K$  کاربر واقع در  $l$  امین سلول، ماتریس کانال  $\mathbf{G}_{il} \in \mathbb{C}^{M \times K}$  را تشکیل می‌دهند به نحوی که المان واقع در  $m$  امین سطر و  $k$  امین ستون، با  $g_{mikl}$  برابر است.  $k$  امین ستون از ماتریس کانال  $\mathbf{G}_{il}$  نیز بردار  $\mathbf{g}_{ikl} = (g_{1ikl}, g_{2ikl}, \dots, g_{Mikl})^T \in \mathbb{C}^{M \times 1}$  را تشکیل می‌دهد. همچنین فرض می‌کنیم که کانال خاصیت متقابل بودن دارد یعنی ضرایب کانال برای لینک‌های فراسو و فرسو یکسان می‌باشند.

این مدل به صورت گسترده برای بررسی تئوری سیستم‌های چندورودی چندخروجی انبوه مورد استفاده قرار می‌گیرد که در آن فرض می‌شود که هیچ‌گونه همبستگی و تزویج متقابل بین آنتن‌های ارسالی یا آنتن‌های دریافتی وجود ندارد. در نتیجه



شکل ۱. تعامد کانال‌های کاربرهای متفاوت (ضرب ماتریس‌های  $\mathbf{H}_{il}^H \mathbf{H}_{il}$ )

بهبود می‌بخشد. همچنین خاصیت تعامد باعث کاهش تداخل بین سلولی و یا درون سلولی می‌شود که منجر به بهبود ظرفیت سیستم می‌گردد.

## تخمین کانال

برای تحقق اکثر مزایای سیستم‌های چندرودی چندخروجی انبوه و دستیابی به عملکرد بهینه در این سیستم‌ها، داشتن اطلاعات کامل از حالت کانال، ضروری است؛ اما در عمل ایستگاه پایه اطلاعات حالت کانال را در اختیار ندارد و باید این اطلاعات را تخمین بزند. این موضوع در لینک فراسو با ارسال پیلوت توسط کاربرها و دریافت پیلوت از سالی و تخمین پاسخ کانال توسط ایستگاه پایه، به آسانی انجام می‌شود. اما در لینک فراسو این عمل کمی مشکل‌تر است؛ در سیستم‌های چندرودی چندخروجی معمولی، ایستگاه پایه شکل موج پیلوت را ارسال می‌کند و بر اساس آن، کاربرها پاسخ کانال را تخمین می‌زنند و کوانتیزه می‌کنند و به ایستگاه پایه برمی‌گردانند که این روش در سیستم‌های چندرودی چندخروجی انبوه به دو دلیل امکان‌پذیر نیست [۷] (حداقل برای زمانی که با محیط با تحرک زیاد سروکار داریم):

الف: پیلوت‌های بهینه‌ی لینک فراسو، باید دوبه‌دو بر هم عمود باشند یعنی پیلوتی که هر آنتن از سال می‌کند با پیلوت آنتن‌های دیگر متعامد باشد؛ در نتیجه تعداد منابع زمان-فرکانسی لازم برای پیلوت‌های لینک فراسو به اندازه‌ی تعداد آنتن‌ها افزایش می‌یابد و بنابراین یک سیستم چندرودی چندخروجی انبوه به صدها منبع بیشتر از سیستم‌های معمولی نیاز دارد [۷].

ب: تعداد پاسخ‌های کانال که هر کاربر باید تخمین بزند، متناسب با تعداد آنتن‌های ایستگاه پایه است. بنابراین منابع لینک فراسوی موردنیاز برای اطلاع ایستگاه پایه از پاسخ کانال صدها برابر بیشتر از سیستم‌های معمولی است [۷].

راه‌حل این است که در مود TDD عمل کنیم؛ اگرچه در موارد خاص می‌توان از FDD<sup>۳</sup> نیز استفاده کرد. اگر FDD استفاده شود یعنی لینک فراسو و لینک فراسو، باندهای فرکانسی متفاوتی استفاده کنند، اطلاعات حالت کانال مربوط به لینک فراسو و لینک فراسو متفاوت است. از آنجائی که منابع زمانی با فرکانسی مورد نیاز برای تخمین کانال در یک سیستم چندرودی چندخروجی، متناسب با تعداد آنتن‌های ارسالی است و مستقل از تعداد آنتن‌های دریافتی است، در نتیجه زمان لازم برای ارسال پیلوت لینک فراسو مستقل از تعداد آنتن‌های ایستگاه پایه است اما زمان لازم برای ارسال پیلوت لینک فراسو، متناسب با تعداد آنتن‌های ایستگاه پایه است و در نتیجه

با توجه به تعداد زیاد آنتن‌ها در ایستگاه پایه در سیستم‌های چندرودی چندخروجی انبوه، استراتژی متداول تخمین کانال فراسو در سیستم‌های FDD، غیرعملی می‌شود؛ اما در سیستم‌های TDD با فرض متقابل بودن کانال، لازم است که تنها اطلاعات حالت کانال برای لینک فراسو تخمین زده شود زیرا با توجه به فرض متقابل بودن کانال، ضرایب انتشار بین کاربرها و آنتن‌های ایستگاه پایه در لینک فراسو و لینک فراسو یکسان است و بنابراین تخمین اطلاعات حالت کانال برای لینک فراسو، لازم نیست [۷].

با توجه به این مطالب، مطالعات سیستم‌های چندرودی چند خروجی انبوه، عمدتاً با این فرض انجام می‌شوند که این سیستم‌ها در حالت TDD عمل می‌کنند. در سیستم‌های چندرودی چندخروجی انبوه که در حالت TDD عمل می‌کنند، برای تخمین کانال در لینک فراسو، دنباله‌های پیلوت توسط کاربرها ارسال می‌شوند. به‌طور ایده‌آل به هر کاربر در یک سیستم چندرودی چندخروجی انبوه یک دنباله پیلوت لینک فراسو متعامد اختصاص داده می‌شود. یعنی به‌طور ایده‌آل دنباله‌های پیلوت که توسط کاربرهای یک سلول و همچنین سلول‌های مجاور به کار می‌روند باید متعامد باشند ولی در عمل ما کریم تعداد دنباله‌های پیلوت متعامد که می‌توان استفاده کرد توسط مدت‌زمان بازه همدوسی تقسیم بر تأخیر انتشار کانال محدود است و در نتیجه کاربرهای متفاوت در سلول‌های متفاوت دنباله پیلوت یکسانی استفاده می‌کنند که اثر و نتیجه استفاده مجدد از پیلوت‌ها توسط کاربرهای متفاوت، آلودگی پیلوت نامیده می‌شود [۴].

به صورت تئوری می‌توان نتیجه استفاده از پیلوت‌های یکسان را توسط کاربرهای متفاوت در سلول‌های متفاوت به این صورت بیان کرد که تخمین کانال محاسبه‌شده در ایستگاه پایه یک سلول، تخمینی دقیق نیست زیرا با توجه به شکل (۲)، از سال پیلوت غیرمتعامد از کاربران واقع در سلول‌های دیگر نیز بر این تخمین اثر می‌گذارد. در مرحله پیش‌کدینگ، با توجه به اینکه ماتریس‌های پیش‌کدینگ بر اساس کانال تخمین‌زده‌شده محاسبه می‌شوند، در نتیجه با توجه به شکل (۳)، شکل‌دهی پرتوی لینک فراسو به‌گونه‌ای انجام می‌دهد که باعث هدایت تداخل به سمت کاربرهایی می‌شود که دنباله پیلوت غیرمتعامد و یا یکسانی استفاده کرده‌اند.

در سیستم چندرودی چندخروجی تک‌سلولی و همچنین سیستم چندرودی چندخروجی چند سلولی، با افزایش بدون محدودیت آنتن‌های ایستگاه پایه، نویز حرارتی و محوشدگی رایلی مقیاس کوچک حذف می‌شوند اما در سیستم چندرودی چندخروجی چند سلولی با توجه به مطالب گفته‌شده، تداخل

<sup>3</sup> Frequency division duplexing

<sup>2</sup> Time division duplexing

که با ماتریس  $\Phi = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_K)^T$  و با ابعاد  $K \times \tau$  نمایش داده می‌شود که  $\Phi^H \Phi = I$ . پس در تمامی سلول‌ها،  $k$  امین کاربر، دنباله پایلوت  $\varphi_k$  را که برداری با ابعاد  $1 \times \tau$  است، ارسال می‌کند. با توجه به هم‌زمانی ارسال پایلوت از تمامی سلول‌ها، ماتریس سیگنال دریافتی در  $i$  امین ایستگاه پایه را می‌توان به صورت زیر نمایش داد:

$$Y_i^p = \sqrt{\rho_p} \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K g_{ikl} \varphi_k + N_i^p \quad (6)$$

که  $N_i^p \in \mathbb{C}^{M \times \tau}$  نویز دریافتی در  $i$  امین ایستگاه پایه در طول مدت ارسال پایلوت است که متغیرهای تصادفی گوسی مختلط با متوسط صفر و واریانس واحد می‌باشند و  $\rho_p$  نیز توان ارسالی پایلوت است. برای تخمین بردار کانال بین  $i$  امین ایستگاه پایه و  $k$  امین کاربر واقع در  $i$  امین سلول، سیگنال دریافتی توسط  $i$  امین ایستگاه پایه در بردار  $\varphi_k^H$  ضرب می‌شود. در نتیجه بردار کانال  $g_{iki}$  تخمین زده شده که با  $\hat{g}_{iki}$  نمایش داده می‌شود، به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\hat{g}_{iki} = Y_i^p \varphi_k^H = \sqrt{\rho_p} g_{iki} + \sqrt{\rho_p} \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq i}}^L g_{ikl} + N_i^p \varphi_k^H \quad (7)$$

مشاهده می‌شود که ترکیبی خطی از بردارهای کانال  $g_{ikl}$ ،  $l = 1, \dots, L$  است که مربوط به کاربرهای واقع در سلول‌های متفاوت است که دنباله پایلوت یکسانی استفاده کرده‌اند. این پدیده با عنوان آلودگی پایلوت شناخته می‌شود. با توجه به تخمین کانال بدست آمده، بردار شکل دهی پرتو در لینک فرسو از  $i$  امین ایستگاه پایه به  $k$  امین کاربر واقع در  $i$  امین سلول، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$w_{ki} = \frac{\hat{g}_{iki}^*}{\|\hat{g}_{iki}\|} = \frac{\hat{g}_{iki}^*}{\alpha_{ki} \sqrt{M}} \quad (8)$$

که  $\alpha_{ki}$  ضریب نرمالیزاسیون است و به صورت  $\alpha_{ki} = \frac{\|\hat{g}_{iki}\|}{\sqrt{M}}$  تعریف می‌شود.

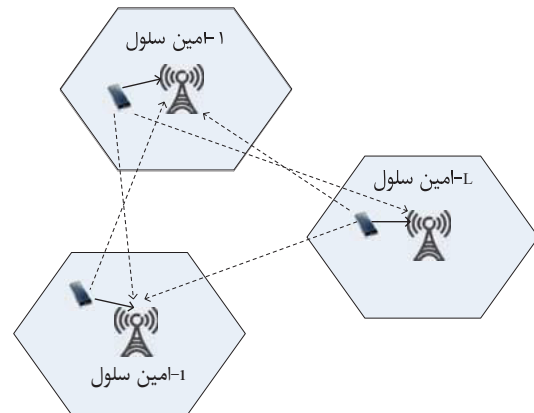
### کاهش اثر آلودگی پایلوت

عمده روش‌های پیشنهاد شده برای کاهش اثر آلودگی پایلوت را می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی کرد:

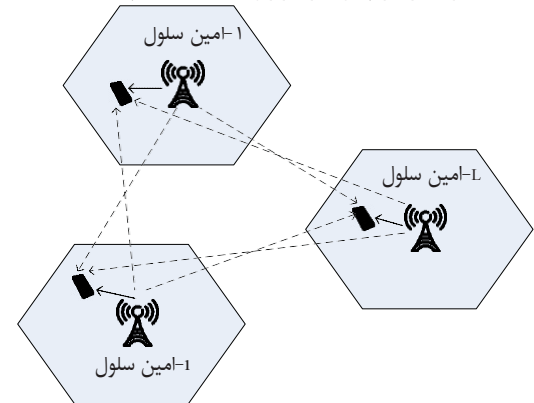
#### روش‌های براساس پروتکل

یک روش برای کاهش اثر آلودگی پایلوت، استفاده مجدد پایلوت یا کاهش تعداد کاربرهایی است که دنباله‌های پایلوت غیرمتعامد استفاده می‌کنند که در [۴] و [۱۳] بررسی شده‌اند. در این روش‌ها ضریب استفاده مجدد پایلوت، الزاماً یک در نظر گرفته نمی‌شود. در نتیجه تمامی سلول‌ها، مجموعه یکسانی از

ایجاد شده توسط سلول‌های مجاور به دلیل پدیده آلودگی پایلوت حذف نمی‌شود و با افزایش آنتن‌های ایستگاه پایه نیز این تداخل افزایش می‌یابد.



شکل ۲. ارسال پایلوت از کاربران به ایستگاه‌های پایه [۱۲]



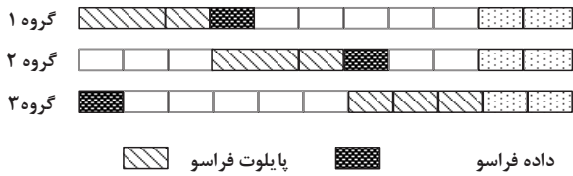
شکل ۳. ارسال سیگنال لینک فرسو از ایستگاه‌های پایه به کاربران [۱۲]

یک سیستم چندورودی چندخروجی انبوه چند سلولی با  $L$  سلول را در نظر بگیرید که در تمامی سلول‌ها،  $K$  کاربر مستقل و  $M$  آنتن در ایستگاه پایه وجود دارد و همچنین فرض می‌شود که  $M \gg K$  است. ماتریس کانال لینک فراسو بین کاربرهای واقع در  $i$  امین سلول و  $i$  امین ایستگاه پایه با  $G_{ii}$  نمایش داده می‌شود. با توجه به خاصیت متقابل بودن کانال، ماتریس کانال لینک فرسو بین ایستگاه پایه واقع در سلول  $i$  ام و کاربرهای سلول  $i$  ام،  $G_{ii}^T$  است.

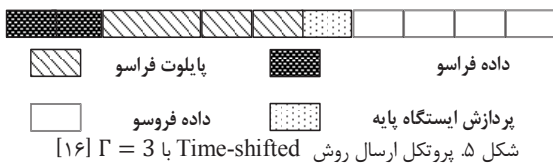
فرض می‌کنیم که به منظور تخمین کانال، تمامی کاربرها به صورت هم‌زمان پایلوت را ارسال می‌کنند. همان‌گونه که ذکر شد با توجه به محدود بودن زمان هم‌دوسی کانال، تعداد دنباله‌های پایلوت متعامد نیز محدود است و بنابراین کاربرهای واقع در سلول‌های متفاوت باید پایلوت‌های غیرمتعامد استفاده کنند و یا پایلوت‌های یکسانی را مورد استفاده مجدد قرار دهند. با در نظر گرفتن بدترین حالت فرض می‌کنیم که تمامی  $L$  سلول، مجموعه یکسانی از  $K$  دنباله پایلوت را استفاده می‌کنند

می‌شود. این روش برخلاف سایر روش‌هایی که در ادامه ذکر خواهند شد، نیازی به اطلاعات حالت کانال بین ایستگاه پایه و کاربران سایر سلول‌های دیگر ندارد. همچنین افزایش تعداد آنتن‌های ایستگاه پایه و یا تعداد کاربران، موجب افزایش پیچیدگی این روش نمی‌گردد.

با وجود عملکرد قابل قبول روش TSP، چالشی بزرگ وجود خواهد داشت. در عمل کنترل مکانیسم پیشنهادشده در این روش، نیازمند این است که به صورت دینامیکی ارسال پایلوت‌ها از سلول‌ها به نحوی کنترل شود که در زمان همپوشانی نداشته باشند. لازم به ذکر است که با توجه به ظهور و پیدایش شبکه‌های سلولی Multi-tier Heterogeneous و قرارگیری و چینش دینامیکی سلول‌های کوچک، همواره همپوشانی در زمان و فرکانس در شبکه وجود دارد.



شکل ۴. پروتکل ارسال سیستم چند ورودی چند خروجی چندکاربره در حالت TDD [۱۴]



شکل ۵. پروتکل ارسال روش Time-shifted با  $\Gamma = 3$  [۱۶]

در لینک فراسو، توان سیگنال دریافتی در ایستگاه پایه، به توان ارسال از کاربر و موقعیت کاربر نسبت به ایستگاه پایه بستگی دارد. بنابراین با توجه به شکل (۶) کاربران نزدیک به مرز سلول در مقایسه با کاربران نزدیک به مرکز سلول، در ایستگاه پایه سلول خود، دارای SNR پایینی می‌باشند. همچنین کاربرهای نزدیک به مرز سلول نسبت به کاربرهای واقع در مرکز سلول، در ایستگاه پایه سلول مجاور، تداخل بیشتری ایجاد می‌کنند. در نتیجه اگر دو کاربر مرزی واقع در دو سلول متفاوت، از دنباله‌های پایلوت یکسانی استفاده کنند، در این حالت پدیده آلودگی پایلوت تشدید می‌گردد. با توجه به این نکات، در [۱۷] برای کاهش اثر آلودگی پایلوت روش SPR<sup>۵</sup> پیشنهاد شده است که در آن کاربرهای واقع در مرز سلول‌ها از دنباله‌های پایلوت متعامد استفاده می‌کنند. در شکل (۷)، نمونه‌ای از توزیع دنباله‌های پایلوت در این روش نشان داده شده است.

دنباله‌های پایلوت را استفاده نمی‌کنند. برای مثال برای حالتی که ضریب استفاده مجدد پایلوت، دو در نظر گرفته می‌شود، تنها نیمی از سلول‌ها از دنباله‌های پایلوت یکسان استفاده می‌کنند. در [۱۳] ضریب بهینه برای استفاده مجدد پایلوت برای توپولوژی‌های متفاوت شبکه محاسبه شده است و نشان داده شده است که این روش منجر به کاهش اثر آلودگی پایلوت می‌گردد.

در پروتکل ارسال پیشنهادشده در [۴]، تمامی کاربرها دنباله‌های پایلوت را به طور هم‌زمان ارسال می‌کنند (با توجه به شکل (۴)). برای کاهش آلودگی پایلوت، یک روش بر اساس پروتکل Time-Shifted (غیر هم‌زمان) در [۱۴] و [۱۳] پیشنهادشده است که روش TSP<sup>۴</sup> نامیده می‌شود. ایده اصلی در این روش، تقسیم‌بندی سلول‌ها به چندین گروه  $(A_1, \dots, A_T)$  و استفاده از پروتکل Time-Shifted در هر گروه است. یک مثال این روش با  $\Gamma = 3$  در شکل (۵) نشان داده شده است. در حالی که کاربرهای گروه  $A_1$  پایلوت‌ها را ارسال می‌کنند، ایستگاه‌های پایه‌ی گروه  $A_2$ ، سیگنال‌های داده‌ی فروسو ارسال می‌کنند. این از وقوع آلودگی پایلوت در میان کاربرهای گروه‌های  $A_1$  و  $A_2$  اجتناب می‌کند. هم‌زمان ایستگاه‌های پایه‌ی گروه  $A_1$  باید بردارهای کانال را در حضور سیگنال‌های لینک فروسو ارسال‌شده توسط ایستگاه‌های پایه‌ی گروه  $A_2$  و  $A_3$  تخمین بزنند. با توجه به اینکه توان ارسال لینک فروسو معمولاً به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از توان دنباله‌های پایلوت است، نمی‌توان از قبل کارآمدی این روش را تأیید کرد. اما با توجه به [۱۵] و [۱۱]، زمانی که  $M \rightarrow \infty$ ، می‌توان SINR لینک فروسو را بدین فرم نوشت:

$$SIR_{ki}^d = \frac{\beta_{ki}^2 / \alpha_{ki}^2}{\sum_{l \in A_\gamma, l \neq i} \beta_{li}^2 / \alpha_{li}^2} \quad (۹)$$

مشاهده می‌شود که تنها کاربرهای واقع در گروه یکسان، برای یکدیگر تداخل ایجاد می‌کنند که در نتیجه منجر به عملکرد بهتر می‌شود. بنابراین در این روش تمامی تداخلات مربوط به سلول‌هایی که در گروه‌های دیگر قرار دارند، حذف می‌شود اما سلول‌های موجود در یک گروه یکسان همچنان برای یکدیگر تداخل ایجاد می‌کنند.

اگر چه روش TSP منجر به ایجاد تداخل بین پایلوت و داده می‌شود، اما برای سیستم‌هایی که در آن‌ها تعداد آنتن‌های ایستگاه پایه نامحدود (بسیار زیاد) باشد، نشان داده شده است که این روش می‌تواند با اجتناب از ارسال هم‌زمان در سلول‌های مجاور، نسبت سیگنال به تداخل را به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود بخشد. در [۱۱] نشان داده شده است که استفاده از الگوریتم‌های تخصیص توان همراه با روش TSP موجب بهبود عملکرد

<sup>5</sup> soft pilot reuse

<sup>4</sup> Time-shifted Pilots

گام صفر) ایستگاه پایه سیگنال کنترلی را برای دریافت متوسط بهره کانال و همزمانی با ایستگاه پایه در هر سلول ارسال می‌کند.

گام اول) مجموعه‌ای از کاربران غیرفعال در هر سلول فعال خواهند شد که از مجموعه پایلوت  $RA^V$  دنباله پایلوت به آنها تخصیص می‌یابد. در صورتیکه دنباله پایلوت تکراری باشد، برخورد صورت گرفته و ایستگاه پایه نمی‌تواند کانال کاربر را تشخیص دهد.

گام دوم) برای جلوگیری از برخورد، ایستگاه پایه سیگنال فرسوی دریافتی را با بهره  $M$  بین کاربرانی که از دنباله پایلوت یکسان از مجموعه  $RA$  استفاده کرده‌اند تقسیم می‌کند. این تقسیم بهره با توجه به بهره سیگنال فراسو خواهد بود.

گام سوم) کاربری که بهره قوی‌تری در لینک فراسو داشته باشد، پایلوت  $RA$  مربوطه را برمی‌دارد.

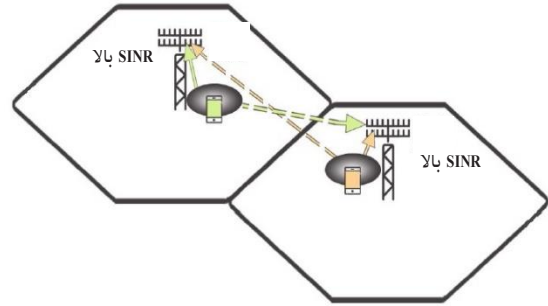
گام چهارم) تضمین می‌کند که به کاربر دنباله پایلوت تخصیص یافته‌است.

در مواردی که هنوز برخورد وجود داشته‌باشد، یا با تکرار همین الگوریتم و یا با روش‌های متداول، آلودگی پایلوت رفع خواهد شد. نتایج شبیه‌سازی با الگوریتم فوق، رفع ۹۰ درصدی برخوردها را اثبات کرده و در برابر تداخلات بین‌سلولی و نوع توزیع کانال مقاوم است.

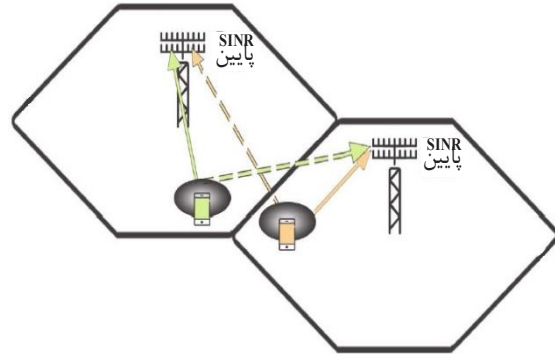
### روش‌های پیش‌کدینگ

پیش‌کدینگ یکی از روش‌های پردازش سیگنال در لینک فرسو است که موجب دستیابی به اطلاعات صحیح حالت کانال در فرستنده خواهد شد و جهت افزایش بهبود عملکرد لینک فرسو استفاده خواهد شد [۱۹]. بنابراین پیش‌کدینگ پایلوت در سیستم‌های چند-ورودی چند-خروجی انبوه موجب کاهش آلودگی پایلوت خواهد شد. در [۲۰] یک روش پیش‌کدینگ تک‌سلولی توزیع شده پیشنهاد شده است. با توجه به این روش، ماتریس پیش‌کدینگ در یک ایستگاه پایه به گونه‌ای طراحی می‌شود که مجموع مربعات خطای کاربرهای خودش و تداخل کاربرهای سایر سلول‌ها را کاهش دهد. نشان داده شده است که روش پیشنهادی عملکرد سیستم را به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌بخشد و تداخل بین سلولی و درون سلولی را در مقایسه با روش پیش‌کدینگ تک‌سلولی متداول کاهش می‌دهد. اگرچه در روش پیشنهادی تمامی کاربران بدون در نظر گرفتن تفاوت آن‌ها از نظر کانال‌ها، یکسان در نظر گرفته می‌شوند.

روش‌های پیش‌کدینگ بر اساس همیاری بین سلول‌ها در [۲۱] و [۲۲] نیز می‌توانند اثر آلودگی پایلوت را کاهش دهند. در این

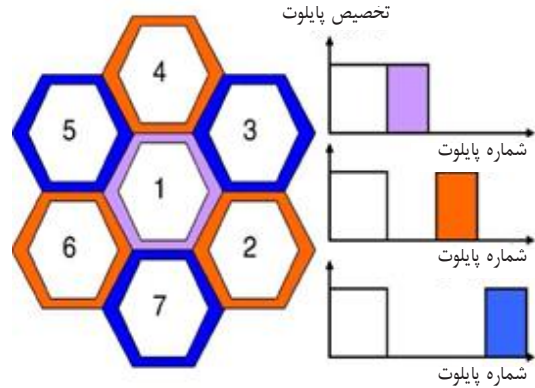


(الف)



(ب)

شکل ۶. مقایسه SNR کاربران نزدیک به مرز سلول و کاربران نزدیک به مرکز سلول: الف) کاربران نزدیک به مرکز سلول و دارای SINR بالا. ب) کاربران نزدیک به مرز سلول و دارای SINR پایین [۱۷]



شکل ۷. توزیع دنباله‌های پایلوت در روش SPR [۱۷]

در مرجع [۱۸] با تقسیم کاربران به دو گروه فعال و غیرفعال پروتکلی را برای تخصیص دنباله‌های پایلوت به کاربران ارائه شده است. طبق تعریف کاربران فعال در حال رد و بدل اطلاعات و کاربران غیرفعال در حال ارسال سیگنال پایلوت هستند. همچنین در هر بلوک هم‌دوسی زمانی برای کاربران فعال و زمانی برای کاربران غیرفعال در نظر گرفته شده که در سلول‌های متفاوت موقعیت زمانی و مکانی متفاوتی خواهند داشت. الگوریتم پیشنهادی  $SUCR^6$  در چهار گام به صورت زیر به تخصیص دنباله‌های پایلوت به کاربران گروه‌ها پرداخته‌است:

<sup>6</sup> Strongest-User Collision Resolution  
<sup>7</sup> Random Access

$$\mathbf{B}_k = \begin{bmatrix} \beta_{k1}/\alpha_{k1} & \dots & \beta_{Lk1}/\alpha_{kL} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \beta_{kL}/\alpha_{k1} & \dots & \beta_{LkL}/\alpha_{kL} \end{bmatrix} \quad (14)$$

با توجه به این روابط، سیگنال های دریافتی در کاربرهای  $k$  ام واقع در تمامی  $L$  سلول را می توان به فرم زیر نمایش داد:

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{B}_k \mathbf{s}_k \quad (15)$$

اما در روش PCP، ماتریس پیش کدینگ به صورت زیر تعریف می شود:

$$\mathbf{A}_k = \mathbf{B}_k^{-1}, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (16)$$

سپس  $L$  امین سطر از  $\mathbf{A}_k$  که با  $\mathbf{a}_{kl}$  نمایش داده می شود، به  $L$  امین ایستگاه پایه ارسال می شود و  $L$  امین ایستگاه پایه نیز سیگنال زیر را تشکیل می دهد:

$$\mathbf{s}'_{kl} = \mathbf{a}_{kl} \mathbf{s}_k \quad (17)$$

در این روش،  $L$  امین ایستگاه پایه سیگنال  $\mathbf{s}'_{kl}$  را ارسال می نماید. در نتیجه در این حالت می توان سیگنال های ارسالی از تمامی  $L$  سلول را به فرم زیر نمایش داد:

$$\mathbf{s}'_k = \begin{pmatrix} \mathbf{s}'_{k1} \\ \vdots \\ \mathbf{s}'_{kL} \end{pmatrix} \quad (18)$$

بنابراین در این حالت سیگنال های دریافتی در کاربرهای  $k$  ام واقع در تمامی  $L$  سلول را می توان با رابطه زیر نمایش داد:

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{B}_k \mathbf{s}'_k = \mathbf{B}_k \mathbf{A}_k \mathbf{s}_k = \mathbf{s}_k \quad (19)$$

مشاهده می شود که اثر تداخلات بین سلولی به صورت کامل حذف شده است. همچنین کارایی این روش به دقت ضرایب محوشدگی مقیاس بزرگ تخمین زده شده بستگی دارد. برخلاف روش های پیش کدینگ بر اساس همیاری بین سلول ها که نیازمند تخمین های کانال واقعی بین کاربران و آنتن های ایستگاه پایه سلول های تداخلی است، PCP تنها ضرایب محوشدگی مقیاس بزرگ مربوطه را احتیاج دارد. بنابراین این روش نیازمند سربرای کمی برای تبادل اطلاعات حالت کانال بین ایستگاه های پایه است از آنجائی که بردارهای پیش کدینگ تابعی از ضرایب محوشدگی مقیاس بزرگ می باشد. اما سربرای ناشی از تبادل اطلاعات موجب کاهش بازده طیفی می گردد.

در [۲۳]، ضرایب PCP ( $a_{ikl}$ ) با استفاده از معیار ZF<sup>۹</sup> محاسبه می شوند که با عنوان ZF-PCP شناخته می شوند. این امکان را فراهم می آورد که هم زمان نویز جمع شوند و تداخل بین سلولی، حذف می شوند. بنابراین، ZF-PCP به صورت تئوری منجر به SINR های نامحدود می شود اما لازم به ذکر است که ZF-PCP برای حالتی که تعداد آنتن های ایستگاه پایه محدود می باشند، نتایج خوبی را نمی دهد.

روش ها هر ایستگاه پایه باید اطلاعات حالت کانال کاربرهای سایر سلول ها را در اختیار داشته باشد. بنابراین سربرای مبادله اطلاعات در میان ایستگاه های پایه با افزایش تعداد آنتن ها، افزایش می یابد و در نتیجه این روش ها فقط برای سیستم های چندرودی چندخروجی با تعداد آنتن های محدود، عملی می باشند. برای به دست آوردن مزایای همیاری درحالی که محدودیت سربرای مبادله اطلاعات را داریم، روش PCP<sup>۸</sup> در [۲۳] پیشنهاد شده است.

PCP بر اساس دو فرض استوار است: اول اینکه سیگنال های منبع برای تمامی کاربرهای سلول ها، در هر ایستگاه پایه در دسترس می باشند و در فرض دوم، ضرایب محوشدگی مقیاس بزرگ ( $\beta_{ikl}$ ) در تمامی ایستگاه های پایه یا یک Network hub در دسترس می باشند. به علت پدیده آلودگی پایلوت، تخمین بردار کانال  $\hat{\mathbf{g}}_{ikl}$ ، ترکیبی خطی از بردارهای کانال کاربرهای مشابه در تمامی سلول ها ( $g_{ikl}, l = 1, \dots, L$ ) است. به جای کاهش تداخل ناشی از این تخمین، هر ایستگاه پایه از آلودگی پایلوت برای ارسال اطلاعات به تمامی کاربرها در شبکه، استفاده می کند (به نحوی که در ادامه آورده شده است)

در لینک فروسو برای ارسال اطلاعات به  $k$  امین کاربر واقع در تمامی سلول ها،  $i$  امین ایستگاه پایه، سیگنال زیر را به جای سمبل  $s_{ki}$  ارسال می کند:

$$\hat{s}_{ki} = \sum_{l=1}^L a_{ikl} s_{kl} \quad (10)$$

که  $s_{ki}$  سیگنال اختصاص داده شده به  $k$  امین کاربر واقع در  $i$  امین سلول در حالت لینک فروسو است. ضرایب  $a_{ikl}$ ، ضرایب PCP نامیده می شوند که به عنوان تابعی از ضرایب محوشدگی مقیاس بزرگ ( $\beta_{ikl}$ ) محاسبه می شوند. انتخاب  $a_{ikl} = \delta[i - l]$  مربوط به حالت بدون PCP است. سؤال اینجاست که ضرایب PCP چگونه محاسبه می شوند؟ برای یافتن پاسخ، لازم است که ابتدا رابطه مربوط به سیگنال دریافتی در  $k$  امین کاربر واقع در  $i$  امین سلول را در نظر بگیریم که به صورت زیر بیان می شود:

$$\mathbf{y}_{ki} = \frac{\sqrt{\rho_f \rho_p}}{\alpha_{ki}} \beta_{iki} s_{ki} + \sum_{l \neq i} \frac{\sqrt{\rho_f \rho_p}}{\alpha_{kl}} \beta_{lki} s_{kl} \quad (11)$$

در ادامه بردارهای  $\mathbf{y}_k$  و  $\mathbf{s}_k$  و همچنین ماتریس  $\mathbf{B}_k$  به صورت زیر تعریف می شود:

$$\mathbf{y}_k = \begin{pmatrix} y_{k1} \\ \vdots \\ y_{kL} \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{s}_k = \begin{pmatrix} s_{k1} \\ \vdots \\ s_{kL} \end{pmatrix} \quad (13)$$

<sup>۹</sup> Zero-forcing

<sup>۸</sup> pilot contamination precoding

ساده و نیز یک مرحله پیش‌کدکننده به طور چشمگیری تداخل بین‌سلولی و در نتیجه آلودگی پایلوت کاهش می‌یابد.

### روش‌های مبتنی بر AOA

در [۲۹] و [۳۰] روش‌های تخمین کانال با کمک کوواریانس پیشنهاد شده‌است که با استخراج اطلاعات کوواریانس کانال‌های کاربران مطلوب و تداخلی، آن‌ها را تخمین می‌زند. نشان داده شده‌است که در حالت ایده‌آل که کوواریانس تداخل و کوواریانس کانال مطلوب، زیرفضای مجزایی را جابجایی می‌کند، اثر آلودگی پایلوت در حالتی که تعداد آنتن‌های ایستگاه پایه افزایش می‌یابد، حذف خواهد شد. در نتیجه کاربرانی که زاویه ورود (AOA) دوبه‌دو غیر همپوشان دارند، یکدیگر را آلوده نمی‌سازند حتی اگر از دنباله پایلوت یکسانی استفاده کنند. یک روش هماهنگ برای تخصیص دنباله‌های پایلوت یکسان، تنها به کاربرهایی از این نوع در [۳۰] آورده شده‌است. این روش کاهش چشمگیری در تداخل بین‌سلولی و در نتیجه افزایش در SINR های لینک فرسو به وجود می‌آورد.

روش مشابهی در [۳۱] برای سیستم‌های چندورودی چندخروجی انبوه رادیویی استفاده شده‌است. اگرچه این روش کاهش قابل توجهی را در تداخل درون‌سلولی و در نتیجه افزایش در SINR های لینک فرسو و لینک فرسو نشان می‌دهد اما در عمل پیاده‌سازی آن کمی مشکل‌است زیرا نیاز به آماره‌های مرتبه دوم تمامی کانال‌های لینک فرسو می‌باشد. با توجه به [۳۲]، بر اساس مدل کانال چند مسیری برای آرایه‌های آنتنی خطی، بردارهای کانال از  $k$  امین کاربر در  $l$  امین سلول به  $i$  امین ایستگاه پایه، به فرم زیر است:

$$h_{ikl} = \frac{1}{\Theta} \sum_{\theta=1}^{\Theta} \mathbf{a}(\theta) \eta_{ikl} \quad (20)$$

که  $\Theta$  تعداد مسیریها است و  $\eta_{ikl} \sim CN(0, \sigma_{ikl}^2)$  مستقل از اندیس مسیر  $(\theta)$  است و  $\sigma_{ikl}^2$  متوسط تلفات مسیر کاربر است و  $\mathbf{a}(\theta)$ ، بردار جهت است. برای یک آرایه خطی یکنواخت،  $\mathbf{a}(\theta)$  به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\mathbf{a}(\theta) = \begin{bmatrix} 1 \\ e^{-j2\pi \frac{D}{\lambda} \cos(\theta)} \\ \vdots \\ e^{-j2\pi \frac{(M-1)D}{\lambda} \cos(\theta)} \end{bmatrix} \quad (21)$$

که  $D$  فاصله بین آنتن‌ها،  $\lambda$  طول موج حامل و  $\theta$  زاویه ورود تصادفی با تابع چگالی احتمال برابر با  $f(\theta)$  است. در [۳۱] با طراحی یک تخمین‌گر کانال بر پایه‌ی اطلاعات کوواریانس کانال و همچنین در نظر گرفتن اطلاعات زاویه ورود اطلاعات به

در [۲۴] مطالعات بیشتری به منظور تعمیم روش PCP صورت گرفته‌است. در این روش برای حالتی که تعداد آنتن‌های ایستگاه پایه محدود می‌باشد، پیش‌کدینگ چند سلولی که پیش‌کدینگ محوشدگی مقیاس بزرگ (LFSP<sup>10</sup>) و دیکدینگ محوشدگی مقیاس بزرگ (LFSD<sup>11</sup>) نامیده می‌شود، پیشنهاد شده‌است.

در [۲۵] روش استفاده از دنباله‌های پیش‌کدکننده متعامد (OPS<sup>12</sup>) پیشنهاد شده‌است. در این روش، فرض می‌شود که تمامی کاربران در تمامی سلول‌ها هم‌زمان دنباله‌های پایلوت لینک فراسو را ارسال می‌کنند. در این روش، سیگنال‌های ارسال شده از یک ایستگاه پایه یا کاربرهای واقع در یک سلول در دنباله‌های پیش‌کدکننده یکسانی ضرب می‌شوند. یعنی برای هر سلول یک دنباله پیش‌کدکننده در نظر می‌گیریم که این دنباله‌ها برای سلول‌های متفاوت، متعامد می‌باشند. از طرف دیگر سیگنال‌های دریافتی در ایستگاه پایه یا کاربرها، در مزدوج-ترانهاده دنباله پیش‌کدکننده مربوطه ضرب می‌شوند. فرض کنید که  $\{r_1, \dots, r_L\}$  مجموعه‌ی دنباله‌های پیش‌کدکننده متعامد باشد  $(r_i r_j^H = \delta_{ij})$  که می‌تواند به عنوان مثال توسط ماتریس هادامارد تشکیل شود. تمامی سیگنال‌های ارسال شده از ایستگاه پایه یا کاربرهای واقع در سلول  $i$  ام در دنباله  $r_i = (r_{i1}, \dots, r_{iT})^T$  ضرب می‌شوند که مقدار  $T$  به تعداد سلول‌ها بستگی دارد  $(T \geq L)$ . در سمت گیرنده نیز سیگنال‌های دریافتی توسط ایستگاه پایه یا کاربرهای واقع در سلول  $i$  ام در مزدوج-ترانهاده دنباله  $r_i = (r_{i1}, \dots, r_{iT})^T$  ضرب می‌شوند که با توجه به متعامد بودن دنباله‌های سلول‌های متفاوت، اثر تداخل‌های ناشی از سلول‌های مجاور حذف خواهد شد. نشان داده شده‌است زمانی که تداخل سلول‌های مجاور بسیار جدی است و تعداد آنتن‌های ایستگاه پایه زیاد می‌باشد، این روش بهترین عملکرد را دارد. همچنین برای تخمین کانال سریع و کاهش اثر آلودگی پایلوت روش تخمین مبتنی بر Diagonal jacket در [۲۶] پیشنهاد شده‌است. روش‌های پیش‌کدینگ دیگر که نیازمند CSI<sup>13</sup> کمتری می‌باشند (مانند روش پیش‌کدینگ هرمیتی ارائه‌شده در [۲۷]) می‌توانند اثر آلودگی پایلوت را کاهش دهند.

در [۲۸] علاوه بر مرحله‌ی پیش‌کدینگ، مرحله‌ی ترکیب با اطلاعات حالت کانال مثل اطلاعات زاویه ورود، در نظر گرفته شده‌است. روش فوق هم در حالت TDD و هم FDD قابل اجراست و در سه سناریو بررسی شده‌است؛ (۱) پیش‌کدکننده و ترکیب‌نشده (۲) پیش‌کد شده و ترکیب‌نشده (۳) پیش‌کد شده و ترکیب‌شده. نشان داده شده‌است با استفاده از یک ترکیب‌کننده

<sup>13</sup> channel state information

<sup>10</sup> Large-Scale Fading Precoding

<sup>11</sup> Large-Scale Fading Decoding

<sup>12</sup> Orthogonal Precoding Sequences

حالت FDD، و همچنین بر مبنای تبدیل فوری سریع دنباله‌های پایلوت در لینک فرسوسو، به تخمین کانال در این حالت پرداخته‌است. در این روش تنها با ارسال شماره ستون FFT دنباله‌های پایلوت، موجب کاهش سربار اطلاعات ارسالی نیز می‌گردد. همچنین با توجه به تقارن زاویه ورود و خروج پایلوت‌ها در لینک فراسو و فرسوسو، نشان داده‌است که تعداد سمبل‌های مورد نیاز برای فیدبک در لینک فرسوسو، با تعداد مسیرهای کانال افزایش می‌یابد نه با افزایش تعداد آنتن‌های ایستگاه پایه.

### روش‌های کور

استفاده از روش‌های تخمین کانال با استفاده از زیرفضا نیز در برخی از مقالات مورد مطالعه قرار گرفته است. استفاده از این روش‌ها موجب افزایش بازده طیفی می‌گردد زیرا در این روش‌ها نسبت به روش‌های ذکر شده در قبل از دنباله‌های پایلوت کمتری برای تخمین کانال استفاده می‌شود و یا حتی در برخی از روش‌ها از دنباله پایلوت استفاده نمی‌شود. در این دسته از روش‌ها مشخصه‌های سیگنال از قبیل آماره‌های مرتبه دوم و بالاتر برای تخمین کانال استفاده می‌شود. بنابراین در برخی از مقالات از این روش تخمین کانال برای کاهش و یا حذف اثر آلودگی پایلوت استفاده می‌شود.

در [۳۶] از روش کور بر اساس تقسیم زیرفضا برای کاهش آلودگی پایلوت استفاده شده است. در این روش یک تخمین کانال بر اساس تجزیه مقادیر ویژه (EVD)<sup>۱۵</sup> و الگوریتم تخمین بردار کانال ILSP<sup>۱۶</sup> پیشنهاد شده است. تخمین مبتنی بر EVD بر این فرض استوار است که زمانی که تعداد آنتن‌های ایستگاه پایه به بی‌نهایت میل می‌کند، بردارهای کانال بین کاربران و ایستگاه‌های پایه دویبه‌دو متعامد می‌باشند. این فرض این امکان را فراهم می‌آورد که بردارهای کانال را با استفاده از آماره‌های داده‌ی دریافتی، تخمین بزنیم. اگرچه در عمل تعداد آنتن‌های ایستگاه‌های پایه محدود می‌باشد و این موضوع موجب بروز خطا در عملکرد روش می‌شود. برای کاهش این خطا الگوریتم EVD با الگوریتم ILSP ارائه شده در [۳۷] ترکیب شده است. این روش را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

در طول مدت ارسال لینک فراسو، کاربران ابتدا سیگنال‌های دیتا را و سپس دنباله‌های پایلوت سلول را ارسال می‌کنند. تخمین شامل گام‌های ذیل است:

گام اول: ماتریس کوواریانس سیگنال دریافتی به صورت زیر تخمین زده می‌شود:

$$R_{y_r} = \mathbb{E} \left[ \mathbf{y}_r^H \mathbf{y}_r \right] \approx \hat{R}_{y_r} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \mathbf{y}_r^H [t] \mathbf{y}_r [t] \quad (22)$$

کاهش اثر آلودگی پایلوت پرداخته‌است. در مرجع [۳۲] نیز نشان داده شده است کاربرهایی که توابع همبستگی احتمال مربوط به زاویه ورود تصادفی آن‌ها همپوشانی ندارند، یکدیگر را آلوده نمی‌سازند حتی اگر از دنباله پایلوت یکسانی استفاده کنند.

در [۱۲] یک روش براساس حوزه فضا پیشنهاد شده است که ایده اصلی آن این است که مشخصه‌های فضایی ضرایب کانال کاربران متفاوت (به عنوان مثال جهت ورود (DOA)<sup>۱۴</sup> و یا زاویه ورود) قابل تشخیص می‌باشند. در این روش ضریب کانال قوی‌ترین مسیر لینک فراسو برای شکل‌دهی پرتوی لینک فرسو انتخاب می‌شود.

در [۳۳] یک روش حذف اثر آلودگی پایلوت پیشنهاد شده است که از دو مرحله تشکیل شده است. مرحله اول که مرحله Downlink Training نامیده می‌شود، از دو فاز تشکیل شده است. در فاز اول، سیگنال‌های پایلوت لینک فرسو توسط اولین آنتن واقع در هر ایستگاه پایه به کاربران ارسال می‌شوند. در این حالت با ضرب سیگنال دریافتی در مزدوج-ترانهاده سیگنال پایلوت مربوط به آن کاربر، کانال بین کاربر و اولین آنتن ایستگاه پایه به دست می‌آید. در فاز دوم، سیگنال‌های پایلوت لینک فرسوسو همزمان توسط تمامی آنتن‌های واقع در هر ایستگاه پایه به کاربران ارسال می‌شوند. در این حالت نیز با ضرب سیگنال دریافتی در مزدوج-ترانهاده سیگنال پایلوت مربوط به هر کاربر، کانال بین کاربران و تمامی آنتن‌های ایستگاه پایه به دست می‌آید.

مرحله دوم نیز مرحله‌ی Scheduled Uplink Training نامیده می‌شود و از  $L+1$  فاز تشکیل شده است (با فرض وجود  $L$  سلول در شبکه). در فاز ابتدایی که فاز صفرم نامیده می‌شود، تمامی کاربران واقع در تمامی سلول‌ها سیگنال‌های پایلوت خود را همزمان ارسال می‌کنند. (در این حالت مجموعه یکسانی از دنباله‌های پایلوت در سلول‌ها مورد استفاده مجدد قرار می‌گیرد). در ادامه و در فاز  $L$ ام ( $1 \leq L$ )، کاربران واقع در سلول  $L$ ام سیگنال پایلوت ویژه‌ی خود را ارسال می‌کنند در حالی که کاربران واقع در سایر سلول‌ها همان دنباله پایلوت‌های فاز صفرم را ارسال می‌کنند.

در [۳۳] با فرمول‌نویسی این مراحل نشان داده شده است که با استفاده از این الگوریتم می‌توان اثر آلودگی پایلوت را حذف کرد.

همچنین در دو مرجع [۳۴] و [۳۵] نیز با در نظر گرفتن زاویه ورود و خروج دنباله‌های پایلوت به کاهش آلودگی پایلوت پرداخته‌اند. در [۳۵] با تخمین زاویه ورود و خروج پایلوت‌ها در

<sup>16</sup> iterative least-square with projection

<sup>14</sup> directions of arrival

<sup>15</sup> eigenvalue decomposition

نتایج به دست آمده نشان می دهد که روش EVD اثر آلودگی پایلوت را کاهش می دهد اما دقت آن به تعداد آنتن های ایستگاه پایه و افزایش نمونه های دریافتی در مدت زمان همدموسی بستگی دارد.

در [۳۸] و [۳۹]، یک روش کور برای کاهش آلودگی پایلوت برای سیستم های با استراتژی Handoff کنترل شده با توان، پیشنهاد شده است که این روش می تواند زیر فضای تداخل را از زیر فضای سیگنال مطلوب جدا کند. ایده اصلی این روش ها، یافتن تجزیه مقادیر منفرد (SVD<sup>۱۷</sup>) ماتریس سیگنال دریافتی و مشخص کردن زیر فضای سیگنال مطلوب می باشد. نتایج الگوریتم نشان می دهد که برای به دست آوردن تخمین های کانال، کافی است زیر فضایی را که بردارهای کانال سیگنال مطلوب جاروب می کند، در اختیار داشته باشیم. اما محدودیت این روش در عمل این است که فرض اینکه تمامی کانال های مطلوب قوی تر از تمامی کانال های تداخلی همواره برقرار نیست. برای غلبه بر این محدودیت در [۴۰] روش MAP<sup>۱۸</sup> پیشنهاد شده است. نشان داده شده است که روش MAP عملکرد را بهبود می بخشد اما موجب افزایش پیچیدگی می شود.

مراجع [۴۱] و [۴۲] و [۴۳] نیز از روش های کور برای تخمین کانال استفاده کرده اند. بدون دانستن اطلاعات پیشین در مورد کانال و تنها با دانستن نوع مدلاسیون فضایی، داده های فراسو تخمین زده شده و به عنوان سمبل های پایلوت در نظر گرفته می شوند. همچنین در روش های superimposed با سوار کردن دنباله پایلوت بر روی داده فرسو نیز می توان طول دنباله پایلوت را افزایش داد که در این حالت تداخل بین دنباله های پایلوت و داده به وجود خواهد آمد. عیب اصلی این روش ها در پیچیدگی محاسباتی بالا در حین تخمین کانال است که نیازمند تحقیقات گسترده تر است.

### روش های تخصیص هوشمند پایلوت

در سال ۲۰۱۵، در [۴۴] برای کاهش اثر آلودگی پایلوت روشی پیشنهاد شد که در آن برخلاف سایر روش های ارائه شده قبلی، دنباله های پایلوت به صورت تصادفی به کاربران اختصاص داده نمی شدند. در روش های قبلی بدون در نظر گرفتن کیفیت کانال کاربرهای متفاوت و صرف نظر از اینکه شدت آلودگی پایلوت با تخصیص های متفاوت، تغییر می کند، دنباله های پایلوت به صورت تصادفی به کاربران اختصاص داده می شدند. در [۴۴] سعی شده است که دنباله های پایلوت به نحوی به کاربرهای متفاوت اختصاص داده شوند که مینیمم SINR مربوط به کاربرهای واقع در یک سلول، ماکزیمم شود. به عبارت دیگر اگر SINR مربوط به  $k$  امین کاربر واقع در  $i$  امین سلول را در حالت

که  $y_l^u[t]$  سیگنال دریافتی توسط  $l$  امین ایستگاه پایه در زمان  $t$  است که به صورت زیر تعریف می شود:

$$y_l^u = \sqrt{\rho_u} \sum_{i=1}^L \sum_{k=1}^K g_{lki} x_{ki}^u + n_l^u \quad (23)$$

که  $x_{ki}^u$  سمبل ارسالی از  $k$  امین کاربر واقع در  $i$  امین سلول و  $n_l^u$  نیز نویز دریافتی در این مرحله است. گام دوم: ماتریس  $U_l$  با ابعاد  $M \times K$  به نحوی تشکیل داده می شود که  $k$  امین ستون آن، بردار ویژه  $\hat{R}_{y_l^u}$  متناظر با مقدار ویژه ای است که نزدیک به مقدار  $M \rho_u \beta_{lk} + 1$  است.

گام سوم: در نهایت تخمین  $\hat{H}_{ll} = U_l \hat{\Xi}_l$  محاسبه می شود که در آن  $\hat{\Xi}_l$  یک تخمین از ماتریس  $\Xi_l$  است. همچنین ماتریس  $\Xi_l$  به صورت  $\Xi_l \triangleq \text{diag}(c_1, c_1, \dots, c_K)$  تعریف می شود و  $c_k \in \mathbb{C}$  می باشد. نشان داده شده است که می توان  $\hat{\Xi}_l$  را با استفاده از تعدادی دنباله پایلوت به دست آورد. بدین منظور از دنباله های پایلوت کوتاه با طول  $U$  استفاده می شود که در سلول های متفاوت، این دنباله های پایلوت متعامد می باشند. بنابراین در این حالت، ماتریس سیگنال دریافتی در  $l$  امین ایستگاه پایه برابر است با:

$$Y_{t,l} = \sqrt{\rho_l} G_{ll} X_{t,l} + N_{t,l} \quad (24)$$

که  $\sqrt{\rho_l} X_{t,l}$  ماتریس پایلوت های ارسالی با ابعاد  $K \times U$  و  $\rho_l$  توان ارسالی توسط هر کاربر می باشد.  $N_{t,l}$  نیز ماتریس نویز دریافتی می باشد. حال ماتریس  $\hat{\Xi}_l$  با توجه به رابطه زیر تخمین زده می شود:

$$\hat{\Xi}_l = \arg \min_{\Xi} \|Y_{t,l} - \sqrt{\rho_l} U_{ll} \Xi D_{ll}^{1/2} X_{t,l}\|_F^2 \quad (25)$$

که  $D_{ll}$  یک ماتریس قطری با ابعاد  $K \times K$  می باشد که  $k$  امین المان روی قطر اصلی آن برابر است با  $\beta_{lk}$  و منظور از  $\|\cdot\|_F$ ، نرم فروبینوسی است.

در تخمین ILSP فرض می کنیم که  $X_l$  یک ماتریس  $K \times T$  باشد که شامل  $T$  سیگنال متوالی ارسالی از  $K$  عدد کاربر واقع در  $l$  امین سلول است و  $\%$  مجموعه تمامی  $X_l$  های ممکن باشد و  $Y_l$  ماتریس سمبل های دریافتی است. همچنین  $\hat{G}_{ll}^{(0)}$  یک تخمین اولیه از  $G_{ll}$  است که برای مثال با کمک تخمین مبتنی بر EVD به دست آمده است.

در این صورت ILSP شامل مراحل زیر است:  
مرحله اول:

$$\hat{X}_l^{(i)} = \arg \max_{X_l \in \mathcal{X}} \frac{1}{\rho_u} \hat{G}_{ll}^{(i-1)H} Y_l - X_l \quad (26)$$

مرحله دوم:

$$\hat{G}_{ll}^{(i)} = \frac{1}{\rho_u} Y_l \hat{X}_l^{(i)H}, \quad i = i + 1 \quad (27)$$

<sup>18</sup> Maximum A-Posteriori estimation

<sup>17</sup> singular value decomposition

$U_k$  که برابر است با مجموع نرخ مربوط به هر یک از کاربران گروه، به صورت زیر تعریف می شود:

$$R(U_k) = \sum_{l=1}^L \log_2(1 + SIR_{lk}^{up}) \quad (33)$$

ایده الگوریتم Greedy این است که در هر مرحله، گروه کاربری که بیشترین نرخ را دارد، انتخاب می شود و این روند ادامه می یابد تا تمامی  $K$  گروه انتخاب شوند. به عبارت دیگر الگوریتم Greedy شامل مراحل زیر می شود:

- ۱- برای تمامی  $K^L$  گروه ممکن، نرخ گروه را با توجه به رابطه (۳۳) محاسبه می کنیم و جدول  $K^L$  بعدی  $\mathcal{A}$  را تشکیل می دهیم.
- ۲- عضو ماکزیمم  $\mathcal{A}$  را می یابیم و گروه مربوط به آن را به عنوان  $U_1^{opt}$  انتخاب می کنیم.
- ۳- سطر و ستون مربوط به  $U_1^{opt}$  را برابر با صفر قرار می دهیم و سپس در عضوهای باقیمانده، ماکزیمم عضو را می یابیم. گروه مربوط به این عضو را به عنوان  $U_2^{opt}$  انتخاب می کنیم.
- ۴- این روند تا زمانی که تمامی  $K$  گروه انتخاب شوند، ادامه می یابد.

- ۵- در نهایت  $I_{greedy}^{opt}$  برابر است با  $I_{greedy}^{opt} = \{U_1^{opt}, U_2^{opt}, \dots, U_K^{opt}\}$

با شبیه سازی الگوریتم Greedy مشاهده می شود که این الگوریتم تنها برای زمانی که تعداد کاربران موجود در هر سلول زیاد است (حداقل بیش از ده کاربر)، موجب بهبود عملکرد سیستم می گردد.

مراجع [۴۷]، [۴۸]، [۴۹] با استفاده از تئوری رنگ کردن گراف به تخصیص دنباله های پایلوت میان کاربران پرداخته اند. در روش رنگ کردن گراف، هیچ دو رأس و لبه دارای رنگ های یکسانی نیستند. برای تشکیل یک گراف شاخص  $\eta$  که نشان دهنده ی نسبت قدرت کانال تداخل به قدرت کانال موثر است به صورت زیر زیر تعریف شد،

$$\eta_{(j,k),(j',k')} = \frac{\beta_{(j,k),j}^2}{\beta_{(j',k'),j}^2} + \frac{\beta_{(j,k),j}^2}{\beta_{(j',k'),j}^2} \quad (34)$$

هرچه این شاخص بیشتر باشد، تداخل میان دو کاربری که از دنباله پایلوت یکسان استفاده کرده اند بیشتر خواهد بود. با در نظر گرفتن یک حد آستانه  $\eta_{thr}$  ماتریس باینری تحت شرایط زیر تولید و تشکیل یک گراف را خواهند داد؛

لینک فراسو با  $SINR_{ik}^u$  نمایش دهیم، می توان مسئله را به صورت زیر بیان کرد:

$$\mathcal{P} : \max_{\{F_s\}} \min_{\forall k} SINR_{ik}^u \quad (28)$$

که  $\{F_s, s=1, \dots, K!\}$  تمامی  $K!$  حالت ممکن برای تخصیص پایلوت به  $K$  کاربر واقع در  $I$  امین سلول است. راه حل پیشنهادی برای حل مسئله بهینه سازی فوق، بدین صورت است که ابتدا ایستگاه پایه تداخل بین سلولی مربوط به هر دنباله پایلوت را به دست می آورد که این تداخل ناشی از استفاده دنباله پایلوت یکسان توسط کاربرهای سلول های مجاور است. سپس کیفیت کانال هر کاربر واقع در سلول هدف نیز محاسبه می شود. بدین منظور پارامترهای  $\{a_k\}_{k=1}^K$  و  $\{\gamma_k\}_{k=1}^K$  به ترتیب برای سنجش کیفیت کانال کاربرها و تداخل بین سلولی مربوط به دنباله های پایلوت، به صورت زیر تعریف می شوند:

$$\alpha_k = \beta_{ki}^2, k=1, 2, \dots, K \quad (29)$$

$$\gamma_k = \sum_{j \neq i} \beta_{kj}^2, k=1, 2, \dots, K \quad (30)$$

سرانجام دنباله های پایلوت با تداخل بین سلولی کوچک تر به کاربرهایی اختصاص داده می شوند که بدترین کیفیت کانال را دارند.

در [۴۵]-[۴۶] به مطالعه روش های متفاوتی برای تخصیص پایلوت پرداخته شده است که به عنوان مثال در [۴۵] به منظور افزایش نرخ مجموع، از الگوریتم های Greedy، Tabu Search (TS) و Greedy TS برای تخصیص پایلوت استفاده شده است. به عنوان مثال در الگوریتم Greedy، مجموعه کاربرانی که به آن ها دنباله پایلوت  $k$  اختصاص داده شده است با مجموعه  $U_k \triangleq \{k_1^k, \dots, k_L^k\}$  نمایش داده می شوند که  $k_L^k$  اندیس کاربر واقع در  $I$  امین سلول است که دنباله پایلوت  $k$  ام به آن اختصاص داده شده است. سپس ماتریس  $I$  به صورت زیر تعریف می شود:

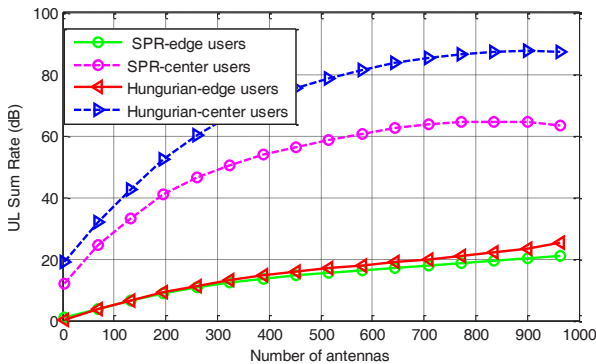
$$I \triangleq \{U_1, \dots, U_K\}, I \in \mathbb{Z}^{L \times K} \quad (31)$$

که  $I$  امین سطر این ماتریس که به صورت  $p_i \triangleq I(i, :) = \{k_1^i, \dots, k_L^i\}$  بیان می شود، یک ترکیب ممکن برای تخصیص دنباله های پایلوت به کاربرهای  $I$  امین سلول است. باید در نظر داشت که تعداد حالات ممکن برای مجموعه  $U_k$  برابر با  $K^L$  حالت و برای ماتریس  $I$  برابر با  $(K!)^{L-1}$  حالت است. همچنین معیار عملکرد سیستم نیز به صورت زیر تعریف شده است:

$$R_{sum}^{up} = \sum_{j=1}^L \sum_{k=1}^K \log_2(1 + SIR_{jk}^{up}) \quad (32)$$

که منظور از  $SIR_{jk}^{up}$ ،  $SIR$  مربوط به  $k$  امین کاربر واقع در  $j$  امین سلول است. در الگوریتم Greedy برای یافتن بهترین حالت ممکن برای تخصیص دنباله های پایلوت، نرخ مربوط به گروه

هر بار تکرار تحت نرم افزار متلب تولید شده است. نتایج شبیه سازی با روش فوق، بهبود عملکرد هر دو گروه کاربران مرزی و مرکزی را در نرخ قابل دستیابی فراسو و همچنین دقت تخمین کانال نشان می دهد. نمودار ۱ نرخ قابل دستیابی فراسوی کاربران مرزی و مرکزی را با افزایش تعداد آنتن ها نشان می دهد. همانطور که در نمودار ۱ نشان داده شده است با افزایش تعداد آنتن ها عملکرد روش پیشنهادی نسبت به روش مرجع بهتر بوده و نرخ کاربران هر دو گروه افزایش یافته است. نرخ کاربران گروه مرزی در حدود ۳ دسی بل و نرخ کاربران مرکزی در حدود ۲۳ دسی بل با تعداد آنتن ۸۰۰ بهبود یافته است. با افزایش تعداد آنتن ها میزان تداخلات برون سلولی و درون سلولی بیشتر شده و روش پیشنهادی تخصیص پایلوت که مبتنی بر افزایش نرخ ارسال فراسو است بهتر عمل کرده است. پیچیدگی محاسباتی روش پیشنهادی با افزایش تعداد آنتن ها و کاربران در هر گروه افزایش می یابد. در الگوریتم SPR برای هر بار گروه بندی، متوسط توان دو ضرایب محوشدگی مقیاس بزرگ به اندازه تعداد کاربران محاسبه می شود این در حالیست که در الگوریتم پیشنهادی، ماکزیمم SINR نسبت به مرز گروه بندی به اندازه تعداد کاربران محاسبه می شود.



نمودار ۱- عملکرد روش پیشنهادی Hungarian و روش مرجع SPR[50] در نرخ قابل دستیابی فراسو با افزایش تعداد آنتن ها.

همچنین برای نشان دادن دقت تخمین کانال و به دست آوردن اطلاعات صحیح حالت کانال خطای حداقل مربعات کانال هر دو کاربران مرزی و مرکزی با روش مرجع مقایسه شده است. نمودار ۲ نتایج شبیه سازی را نشان می دهد. همانطور که نتایج شبیه سازی نشان می دهند، دقت روش پیشنهادی در تخمین کانال و به دست آوردن اطلاعات صحیح حالت کانال در مقایسه با روش

$$b_{(j,k),(j',k')} = \begin{cases} 1, & j = j', k \neq k' \\ 1, & j \neq j', \eta_{(j,k),(j',k')} > \eta_{thr} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (35)$$

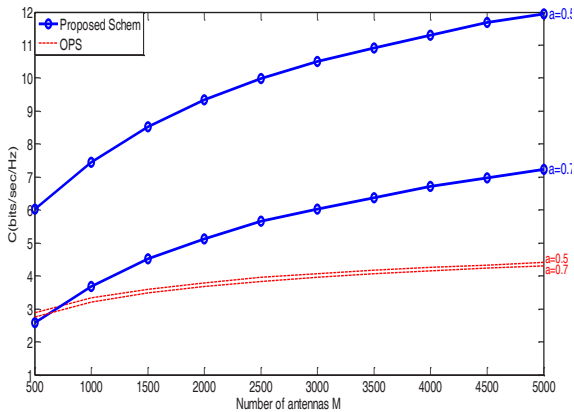
طبق این روش دنباله های پایلوت رنگ های گراف با کمترین رنگ و کمترین میزان تداخل میان کاربران توزیع خواهد شد. این روش موجب افزایش نرخ فراسوی کاربران شده است.

### روش پیشنهادی اول برای کاهش آلودگی پایلوت

در این بخش روش پیشنهادی مبتنی بر تخصیص پایلوت هوشمند، برای کاهش آلودگی پایلوت معرفی شده است. هدف اصلی این روش در تخصیص دنباله های پایلوت متعامد منحصر به فرد به تمامی کاربران یک سلول و سلول های همسایه است. بنابراین، در روش پیشنهادی با گروه بندی کاربران یک سلول به دو گروه مرزی و مرکزی با هدف بیشینه سازی نرخ ارسال فراسوی کاربران گروه ها، دنباله های پایلوت متعامد به کاربران تخصیص می یابد. برای جزئیات بیشتر فرض کنید  $R_c$  شعاع یک سلول و  $r_{ijk}$  فاصله ی کاربر  $k$  ام در سلول  $j$  ام با ایستگاه پایه  $i$  ام باشد، گروه بندی کاربران بر اساس فاصله ی هر کاربر تا ایستگاه پایه بوده و بهترین مرز گروه بندی به نحوی انتخاب می شود که سیگنال به نوبت هر دو گروه کاربران بیشینه شود. سپس دنباله های پایلوت متعامد و منحصر به فردی که برای هر گروه از کاربران مرزی و مرکزی در نظر گرفته شده است با الگوریتم مجارستانی<sup>۱۹</sup> و هدف بیشینه سازی نرخ ارسال فراسوی کاربران گروه ها تخصیص می یابد. در حین تخصیص با الگوریتم مجارستانی که رویکرد ماتریسی دارد، دنباله پایلوتی به کاربر تعلق می یابد که بالاترین نرخ را برای کاربر به همراه داشته باشد. در این روش تخصیص مطمئن هستیم که به تمامی کاربران یک سلول و سلول های همسایه دنباله پایلوت منحصر به فرد و متعامد تخصیص یافته، بنابراین تداخلات درون و برون سلولی ناشی از استفاده از دنباله های پایلوت تکراری و نامتعامد در یک سلول و سلول های همسایه کاهش می یابد.

در شبیه سازی ها، تعداد ۷ سلول هر کدام به شعاع ۵۰۰ متر در نظر گرفته شده، همچنین موقعیت کاربران به صورت تصادفی در

<sup>19</sup> Hungarian



نمودار ۴- مقایسه نرخ روش پیشنهادی و روش OPS در لینک فرسوی سیستم های چند ورودی چند خروجی انبوه با افزایش تعداد آنتن ها.

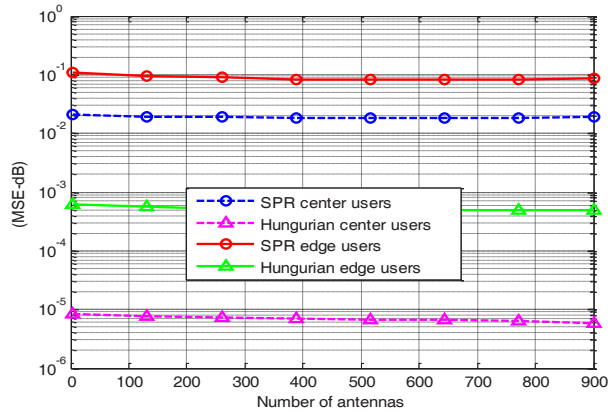
### حوزه های پژوهشی

روش های متنوعی برای مقابله با اثر آلودگی پایلوت پیشنهاد شده است. اما برای اینکه سیستم های چندورودی چندخروجی انبوه را بتوان در عمل مورد استفاده قرار داد، در چندین حوزه نیاز به مطالعات بیشتر می باشد که در این بخش به معرفی تعدادی از این موضوعات پرداخته شده است.

### مدل های انتشار

در بسیاری از مطالعات که تاکنون پیرامون کاهش اثر آلودگی پایلوت در سیستم های چندورودی چندخروجی انبوه انجام شده است، فرض شده است که هر چه تعداد آنتن های ایستگاه پایه افزایش یابد، کانال های کاربرهای متفاوت تحت شرایط انتشار مطلوب، دوبره و متعامد می باشند. اکثر مطالعات تئوری سیستم های چندورودی چندخروجی انبوه، شرایط گوسی مختلط i.i.d (محوشدگی رایلی) را در نظر می گیرند که در بعضی از مواقع این شرایط توجیه ندارد. چندین مطالعه تجربی با آرایه های آنتنی بزرگ و در فرکانس ۲/۶ گیگاهرتز انجام شده است که در آن ها از آرایه های استوانه ای کوچک با ۱۲۸ آنتن و یا آرایه های خطی با ۱۱۲ آنتن استفاده شده است. در این آزمایش ها نتایج جالبی به دست آمده است. به عنوان مثال با توجه به نتایج [۵۱]، ضرایب همبستگی بین آنتن ها در عمل بسیار بزرگ تر از مقداری است که با فرض شرایط انتشار مطلوب، تصور می کردیم. علاوه بر این بردارهای کانال با همبستگی بالا، نمی توانند با افزایش تعداد آنتن ها، متعامد فرض شوند. این نشان می دهد که زمان بندی کاربر یک موضوع مهم در سیستم های چندورودی چندخروجی انبوه است زیرا در سیستم های چندورودی چندخروجی معمولی می توان از پردازش سیگنال های پیچیده، برای مجزا کردن کاربرهای همبسته فضایی استفاده کرد.

مرجع به مراتب بیشتر بوده و با افزایش تعداد آنتن ها کاهش نیافته است.

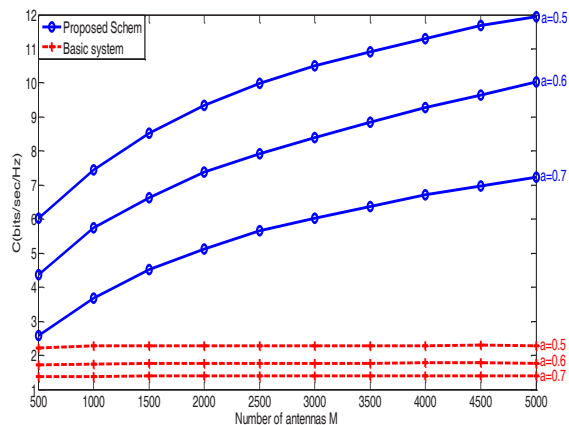


نمودار ۲- عملکرد روش پیشنهادی Hungarian و روش مرجع SPR[50] در خطای حداقل مربعات تخمین کانال.

### روش پیشنهادی دوم برای کاهش آلودگی پایلوت

در این روش با تقسیم سلول ها به دو گروه مشابه با روش پروتکل زمانی TSP، در هر بازه از بلوک همدوسی ابتدا کاربران گروه اول سیگنال پایلوت ارسال کرده و گروه دوم داده لینک فرسو دریافت می کنند سپس گروه دوم سیگنال پایلوت ارسال کرده و گروه اول داده دریافت خواهد کرد. در نهایت پس از اتمام دریافت سیگنال پایلوت، هر دو گروه به صورت همزمان، داده فرا سو ارسال خواهند کرد. در لینک فرسو با استفاده از پیش کدینگ PCP سیگنال ها پیش کدینگ شده و تداخلات ناشی از آلودگی پایلوت حذف خواهند شد.

نتایج شبیه سازی با روش فوق، نشان داده است که زمانی که تعداد آنتن های ایستگاه پایه به سمت بی نهایت میل می کند، تداخل و نویز جمع شونده کاملاً حذف خواهد شد.



نمودار ۳- مقایسه نرخ روش پیشنهادی و سیستم پایه در لینک فرسوی سیستم های چند ورودی چند خروجی انبوه با افزایش تعداد آنتن ها.

مطالعات تنها به مدل‌های پردازش سیگنال محدود می‌شوند. با توجه به [۵۴]، خوشبختانه کاهش اثر آلودگی پایلوت در حالت غیر ایده‌آل در مقایسه با حالت ایده‌آل، آسان‌تر می‌باشد و بنابراین می‌توان با در نظر گرفتن این موضوع، مطالعات بیشتری برای بررسی اثر آلودگی پایلوت و کاهش آن انجام داد.

### نتیجه‌گیری

در این مقاله ابتدا پدیده آلودگی پایلوت به عنوان مهمترین عامل محدودیت عملکرد سیستم‌های چندرودی چندخروجی انبوه مورد مطالعه قرار گرفت. سپس به معرفی روش‌های ارائه شده برای کاهش اثر آلودگی پایلوت در سیستم‌های چندرودی چندخروجی انبوه پرداخته شد. در معرفی روش‌های ذکر شده، مزایا و چالش‌های مربوط به هر یک از آنها نیز مورد بررسی قرار گرفتند. خلاصه‌ای از روش‌های ذکر شده در جدول ۱ آورده شده است. در ادامه حوزه‌های پژوهشی مرتبط، معرفی شدند و ذکر شد که با در نظر گرفتن مدل‌های انتشار و مدل‌های کانال عملی می‌توان به مطالعه دقیق‌تر اثر آلودگی پایلوت پرداخت. همچنین با توجه به اینکه در مطالعات سیستم‌های چندرودی چندخروجی انبوه، عمدتاً فرض شده است که سیستم در حالت TDD عمل می‌کند، نیاز به ارائه روش‌هایی است که بتوان این سیستم‌ها را در حالت FDD مورد استفاده قرار داد. در پایان نیز اشاره شد که با در نظر گرفتن تأثیر اختلالات سخت‌افزاری کاهش اثر آلودگی پایلوت آسان‌تر می‌باشد و بنابراین لازم است مطالعات بیشتری در این زمینه انجام شود. همچنین در انتها روش پیشنهادی برای کاهش آلودگی پایلوت مبتنی بر تخصیص پایلوت هوشمند پیشنهاد شده است. در این روش با گروه بندی کاربران به دو گروه مرزی و مرکزی سعی در بهبود کیفیت سیگنالینگ هر دو گروه به صورت همزمان شده است. بطوریکه به هر دو گروه دنباله‌های پایلوت متعام تخصیص یافته و در یک سلول هیچ دو کاربری از دنباله پایلوت تکراری و یا ناتعام استفاده نخواهد کرد. روش پیشنهادی در مقایسه با سایر روش‌های تخصیص پایلوت بهتر عمل کرده است و موجب بهبود کیفیت تخمین کانال و نیز افزایش نرخ فراسوی کاربران در حین ارسال دنباله‌های پایلوت با افزایش تعداد آنتن‌ها شده است. در روش پیشنهادی دوم نیز با در نظر گرفتن یک پروتکل زمانی برای ارسال و پیش‌کدینگ در لینک فرسوسو، موجب کاهش آلودگی پایلوت و افزایش نرخ ارسال فرسوسو شده است.

بنابراین بایستی با در نظر گرفتن مدل‌های انتشار عملی به بررسی اثر آلودگی پایلوت پرداخته شود.

### حالت‌های TDD و FDD

همان‌گونه که قبلاً بحث شد، مطالعات سیستم‌های چندرودی چندخروجی انبوه، عمدتاً با این فرض انجام می‌شوند که این سیستم‌ها در حالت TDD عمل می‌کنند. باید توجه داشت که چندین روش وجود دارد که بتوان سیستم‌های چندرودی چندخروجی انبوه را در حالت FDD مورد استفاده قرار داد. یکی از روش‌ها، طراحی روش‌های پیش‌کدینگ بر اساس اطلاعات جزئی حالت کانال و یا حتی بدون در اختیار داشتن اطلاعات حالت کانال می‌باشد.

روش دیگر استفاده از ایده Compressed Sensing برای کاهش سربار اطلاعات حالت کانال برگشتی است. در ایستگاه پایه، زمانی که تعداد زیادی آنتن در ناحیه کوچکی قرار می‌گیرند، معمولاً همبسته می‌باشند. به دلیل همبستگی بین پاسخ‌های کانال آنتن‌های متفاوت، لازم نیست که کانال‌های مربوط به تمامی آنتن‌های ایستگاه پایه را به دست آوریم؛ بنابراین اطلاعات حالت کانال تخمین زده شده توسط کاربرها را در ابتدا می‌توان فشرده کرد و سپس این اطلاعات فشرده‌سازی شده را می‌توان به ایستگاه پایه برگشت داد. ایستگاه پایه با توجه به اطلاعات دریافتی می‌تواند اطلاعات حالت کانال را بازسازی کند. بنابراین در این روش می‌توان سربار مربوط به اطلاعات حالت کانال برگشتی را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش داد. علاوه بر این، حتی اگر به لینک فراسو و لینک فرسوسو فرکانس‌های متفاوتی اختصاص داده شود، این دو لینک مستقل از یکدیگر نمی‌باشند. چندین روش وجود دارد که در سیستم‌های FDD از فرض متقابل بودن کانال استفاده می‌شود. در این زمینه، الگوریتم‌های تصحیح فرکانس مانند تصحیح فرکانس بر اساس جهت زاویه ورود، ماتریس کوواریانس و همبستگی فضا-زمانی در [۵۲] پیشنهاد شده‌اند و مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با این وجود، باید مطالعات بیشتری در این زمینه انجام شود.

### اختلالات سخت‌افزاری

مطالعات در زمینه تأثیر اختلالات سخت‌افزاری بر سیستم‌های چندرودی چندخروجی انبوه، بسیار محدود می‌باشند. مطالعات اولیه در [۵۳] و [۵۴] نشان می‌دهد که اختلالات سخت‌افزاری منجر به خطای تخمین کانال و کاهش ظرفیت در سیستم‌های چندرودی چندخروجی انبوه می‌گردد. برخی از کارهای اولیه دیگر، اثر نویز فاز [۵۵] و [۵۶]، محدودیت‌های توان در هر آنتن [۵۷] و [۵۸]، اتصال متقابل [۵۹] و ساختار شکل‌دهی پرتو دیجیتال/آنالوگ ترکیبی [۶۰] را مورد مطالعه قرار داده‌اند اما این

جدول ۱. روش های کاهش آلودگی پیلوت

مراجع	خلاصه روش و نکات	نام روش پیشنهادی	
[۴]. [۱۴]	کاهش تعداد کاربرانی که پیلوت یکسان استفاده می کنند.	Pilot Reuse	روش های بر اساس پروتکل
[۱۷]	توزیع دنباله پیلوت به کاربران با توجه به فاصله آن ها از ایستگاه پایه	Soft Pilot Reuse	
[۱۵]. [۱۴]	تقسیم سلول ها به چندین گروه و ارسال غیرهمزمان پیلوت ها از گروه های متفاوت چالش: کنترل دینامیکی مکانیزم ارسال پیلوت ها از سلول ها به نحوی که در زمان همپوشانی نداشته باشند.	Time-Shifted Pilots	
[۱۱]	بهبود عملکرد روش TSP با استفاده از الگوریتم های تخصیص توان	power allocation algorithm with the time-shifted protocol	
[۱۸]	تقسیم کاربران به دو گروه فعال و غیرفعال و تخصیص پیلوت از مجموعه پیلوت تصادفی گروه غیرفعال.	Random Access Protocol	
[۲۰]	طراحی ماتریس پیش کدینگ به گونه ای که مجموع مربعات خطای کاربرهای خودش و تداخل کاربرهای سایر سلول ها را کاهش دهد. چالش: یکسان در نظر گرفتن تمامی کاربران بدون در نظر گرفتن تفاوت آن ها از نظر کانال ها	Multi-cell MMSE-based pre-coding	روش های پیش کدینگ
[۲۲]. [۲۱]	طراحی روش های پیش کدینگ بر اساس همیاری بین سلول ها چالش: افزایش سربار مبادله اطلاعات در میان ایستگاه های پایه با افزایش تعداد آنتن ها، با توجه به اینکه هر ایستگاه پایه باید اطلاعات حالت کانال کاربرهای سایر سلول ها را در اختیار داشته باشد.	Multi-cell cooperation Pre-coding	
[۲۳]	طراحی ماتریس پیش کدینگ بر اساس ضرایب محوشدگی مقیاس بزرگ به منظور کاهش سربار مبادله اطلاعات بین ایستگاه های پایه نسبت به روش های ارائه شده در [۱۷] و [۱۶]. چالش: عملکرد نامطلوب روش برای حالتی که تعداد آنتن های ایستگاه پایه محدود می باشند.	Pilot Contamination Pre-coding	
[۲۴]	تعمیم روش PCP برای حالتی که تعداد آنتن های ایستگاه پایه محدود می باشد.	Large-Scale Fading Pre-coding and Decoding	
[۲۵]	اختصاص دنباله های پیش کدکننده متعامد به سلول های متفاوت و ضرب کردن سیگنال های ارسالی و دریافتی هر سلول در دنباله اختصاص داده شده به آن سلول	Orthogonal Pilot Sequences	
[۲۸]	ترکیب اطلاعات در دسترس کانال و پیش کدینگ به منظور کاهش آلودگی پیلوت.	Pilot precoding and combining	
[۳۰]. [۲۹]	تخمین کاربران مطلوب و تداخلی با استخراج اطلاعات کوواریانس مربوط به آن ها	Covariance-aided channel estimation method	
[۱۲]	تشخیص مشخصه های فضایی ضرایب کانال کاربران متفاوت (به عنوان مثال جهت ورود DOA) و یا زاویه ورود) و انتخاب ضریب کانال قوی ترین مسیر لینک فراسو برای شکل دهی پرتوی لینک فراسو	Spatial domain based method	
[۳۳]	ارائه روشی برای تخمین کانال با استفاده از ارسال پیلوت در هر دو حالت لینک فراسو و لینک فراسو	Downlink training and scheduled Uplink training scheme	
[۳۵]	ارائه روشی مبتنی بر تبدیل فوریه سریع برای کاهش سربار پیلوت.	A Scalable Framework for CSI Feedback in FDD	
[۳۶]	تخمین بردارهای کانال با استفاده از تجزیه مقادیر ویژه داده های دریافتی و با فرض متعامد بودن بردارهای کانال بین کاربران و ایستگاه های پایه در حالتی که تعداد آنتن های ایستگاه پایه به بی نهایت میل می کند. چالش: محدود بودن تعداد آنتن های ایستگاه پایه و صادق نبودن فرض ذکر شده در عمل.	EVD-based Method	روش های کور
[۳۹]. [۳۸]	کاهش آلودگی پیلوت برای سیستم های با استراتژی Handoff کنترل شده با توان با استفاده از تجزیه مقادیر منفرد ماتریس سیگنال دریافتی چالش: برقرار نبودن فرض قوی تر بودن تمامی کانال های مطلوب از تمامی کانال های تداخلی	SVD-based Methods	
[۴۰]	تعمیم روش های مبتنی بر SVD با غلبه بر چالش ذکر شده برای این روش ها چالش: افزایش پیچیدگی نسبت به روش های مبتنی بر SVD	Maximum A-Posteriori estimation (MAP)	
[۲۶]	ارائه روشی به منظور افزایش سرعت تخمین کانال	Diagonal jacket-based Method	
[۲۷]	ارائه روش پیش کدینگ که به اطلاعات حالت کانال کمتری نیاز دارد.	Hermitian pre-coding	
[۴۲]. [۴۳]	سوار کردن دنباله پیلوت بر داده ی فراسو به منظور افزایش طول دنباله پیلوت. چالش: کاهش پیچیدگی های محاسباتی.	superimposed	

[۴۴]	اختصاص دنباله‌های پایلوت به کاربرهای متفاوت به نحوی که مینیمم SINR مربوط به کاربرهای واقع در یک سلول، ماکزیمم شود.	Smart Pilot Assignment	روش‌های تخصیص پایلوت هوشمند
[۴۵]	استفاده از الگوریتم‌های Greedy، Greedy TS و Tabu Search(TS) برای تخصیص پایلوت به منظور افزایش نرخ مجموع	Pilot scheduling scheme	
[۶۱]	توزیع دنباله پایلوت به کاربران با توجه به موقعیت آن‌ها در مرکز و یا مرز سلول	Pilot sequences allocation	
[۴۶]	تخصیص دنباله پایلوت به کاربران با هدف ماکزیمم کردن بازده انرژی سیستم	Resource allocation optimization	
[۶۲]، [۴۷]، [۴۹]	تخصیص پایلوت بر اساس تئوری گراف‌ها.	Graph-coloring	
[۶۵]، [۶۴]، [۶۳]	تخصیص پایلوت بر اساس نظریه بازی‌ها.	Game theory	
[۶۷]، [۶۶]	تخصیص دنباله پایلوت با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی ژنتیک و ماهی‌ها. چالش: ارائه راهکاری جهت استفاده آنلاین از الگوریتم‌های هوش مصنوعی در سیستم‌های مخابراتی.	Genetic & fish swarm algorithms	

مراجع

- [13] Yang Li, Young-Han Nam, Boon Loong Ng, and Jianzhong Zhang, "A non-asymptotic throughput for massive MIMO cellular uplink with pilot reuse," in *2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 2012, pp. 4500–4504.
- [14] K. Appaiah, A. Ashikhmin, and T. L. Marzetta, "Pilot Contamination Reduction in Multi-User TDD Systems," in *2010 IEEE International Conference on Communications*, 2010, pp. 1–5.
- [15] "F. Fernandes, A. Ashikhmin, and T. Marzetta, 'Interference reduction on cellular networks with large antenna arrays,' in Proc. of IEEE International Conference on Communications (ICC), 2012."
- [16] L. Lu, G. Y. Li, A. L. Swindlehurst, A. Ashikhmin, and R. Zhang, "An Overview of Massive MIMO: Benefits and Challenges," *IEEE J. Sel. Top. Signal Process.*, vol. 8, no. 5, pp. 742–758, Oct. 2014.
- [17] V. L. Saxena, "Pilot Contamination and Mitigation Techniques in Massive MIMO Systems," 2014.
- [18] E. Bjornson, E. De Carvalho, J. H. Sorensen, E. G. Larsson, and P. Popovski, "A Random Access Protocol for Pilot Allocation in Crowded Massive MIMO Systems," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 16, no. 4, pp. 2220–2234, 2017.
- [19] N. Fatema, G. Hua, Y. Xiang, D. Peng, and I. Natgunanathan, "Massive MIMO Linear Precoding: A Survey," *IEEE Syst. J.*, pp. 1–12, 2017.
- [20] J. Jose, A. Ashikhmin, T. L. Marzetta, and S. Vishwanath, "Pilot Contamination and Precoding in Multi-Cell TDD Systems," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 10, no. 8, pp. 2640–2651, Aug. 2011.
- [21] H. Huh, S.-H. Moon, Y.-T. Kim, I. Lee, and G. Caire, "Multi-Cell MIMO Downlink With Cell Cooperation and Fair Scheduling: A Large-System Limit Analysis," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 57, no. 12, pp. 7771–7786, Dec. 2011.
- [22] H. Huh, A. M. Tulino, and G. Caire, "Network MIMO With Linear Zero-Forcing Beamforming: Large System Analysis, Impact of Channel Estimation, and Reduced-Complexity Scheduling," *IEEE Trans. Inf. Commun. and Networking in China (CHINACOM)*, 2013, pp. 218–222.
- [1] R. Vannithamby and S. Talwar, *Towards 5G Applications, Requirements and Candidate Technologies*. 2017.
- [2] P. M. Afif Osseiran, Jose F. Monserrat, *5G Mobile and Wireless Communications Technology*. 2016.
- [3] C. T. Marzetta, Proc., San Diego, "The case for MANY (greater than 16) antennas as the base station," *Inf. Theory its Appl. (ITA)*, 2007.
- [4] T. L. Marzetta, "Noncooperative Cellular Wireless with Unlimited Numbers of Base Station Antennas," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 9, no. 11, pp. 3590–3600, Nov. 2010.
- [5] and M. D. J. Hoydis, S. Ten Brink, "Massive MIMO in the UL/DL of cellular networks: How many antennas do we need?," *Sel. Areas Commun. IEEE J.*, vol. 31, p. 160–171., 2013.
- [6] F. Rusek, D. Persson, Buon Kiong Lau, E. G. Larsson, T. L. Marzetta, and F. Tufvesson, "Scaling Up MIMO: Opportunities and Challenges with Very Large Arrays," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 30, no. 1, pp. 40–60, Jan. 2013.
- [7] E. Björnson, J. Hoydis, and L. Sanguinetti, "Massive MIMO Networks: Spectral, Energy, and Hardware Efficiency," *Found. Trends® Signal Process.*, vol. 11, no. 3–4, pp. 154–655, 2017.
- [8] M. T. D. D. Systems *et al.*, "Pilot Contamination and Precoding in Multi-Cell TDD Systems," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 10, no. 8, pp. 2640–2651, 2011.
- [9] and X. Y. K. Zheng, S. Ou, "Massive MIMO channel models: A survey," *Int. J. Antennas Propagation*.
- [10] K. Zheng, S. Ou, and X. Yin, "Massive MIMO Channel Models: A Survey," *Int. J. Antennas Propag.*, vol. 2014, pp. 1–10, 2014.
- [11] F. Fernandes, A. Ashikhmin, and T. L. Marzetta, "Inter-Cell Interference in Noncooperative TDD Large Scale Antenna Systems," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 31, no. 2, pp. 192–201, Feb. 2013.
- [12] Hualei Wang, Zhengang Pan, Jiqing Ni, and Chih-Lin I, "A spatial domain based method against pilot contamination for multi-cell massive MIMO systems," in *2013 8th International Conference on*

- Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2012, pp. 3249–3252.
- [37] S. Talwar, M. Viberg, and A. Paulraj, “Blind separation of synchronous co-channel digital signals using an antenna array. I. Algorithms,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 44, no. 5, pp. 1184–1197, May 1996.
- [38] R. R. Muller, L. Cottatellucci, and M. Vehkaperä, “Blind Pilot Decontamination,” *IEEE J. Sel. Top. Signal Process.*, vol. 8, no. 5, pp. 773–786, Oct. 2014.
- [39] L. Cottatellucci, R. R. Muller, and M. Vehkaperä, “Analysis of Pilot Decontamination Based on Power Control,” in *2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 2013, pp. 1–5.
- [40] “Neumann D, Gruendinger A, Joham M, Utschick W. Pilot coordination for large-scale multi-cell TDD systems. In Smart Antennas (WSA), 2014 18th International ITG Workshop on 2014 Mar 12 (pp. 1-6). VDE.”
- [41] D. Hu, L. He, and X. Wang, “Semi-Blind Pilot Decontamination for Massive MIMO Systems,” *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 15, no. 1, pp. 525–536, Jan. 2016.
- [42] D. Verenzuela, E. Björnson, and L. Sanguinetti, “Spectral and Energy Efficiency of Superimposed Pilots in Uplink Massive MIMO,” *arXiv Prepr. arXiv1709.07722*, pp. 1–32, Sep. 2017.
- [43] H. Zhang, S. Gao, D. Li, H. Chen, and L. Yang, “On Superimposed Pilot for Channel Estimation in Multicell Multiuser MIMO Uplink: Large System Analysis,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 65, no. 3, pp. 1492–1505, 2016.
- [44] X. Zhu, Z. Wang, L. Dai, and C. Qian, “Smart Pilot Assignment for Massive MIMO,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 19, no. 9, pp. 1644–1647, Sep. 2015.
- [45] Y. Du, M. Li, Y. Huang, X. Gao, and S. Jin, “Pilot scheduling schemes for multi-cell massive multiple-input–multiple-output transmission,” *IET Commun.*, vol. 9, no. 5, pp. 689–700, 2015.
- [46] T. M. Nguyen, V. N. Ha, and L. Bao Le, “Resource Allocation Optimization in Multi-User Multi-Cell Massive MIMO Networks Considering Pilot Contamination,” *IEEE Access*, vol. 3, pp. 1272–1287, 2015.
- [47] X. Zhu, L. Dai, Z. Wang, and X. Wang, “Weighted-Graph-Coloring-Based Pilot Decontamination for Multicell Massive MIMO Systems,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 66, no. 3, pp. 2829–2834, 2017.
- [48] H. Han, Y. Li, and X. Guo, “A Graph-Based Random Access Protocol for Crowded Massive MIMO Systems,” *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 16, no. 11, pp. 7348–7361, Nov. 2017.
- [49] X. Zhu *et al.*, “Graph Coloring Based Pilot Allocation to Mitigate Pilot Contamination for Multi-Cell Massive MIMO Systems,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 19, no. 10, pp. 1842–1845, 2018.
- [50] X. Zhu *et al.*, “Soft pilot reuse and multicell block diagonalization precoding for massive MIMO systems,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 65, no. 5, pp. 3285–3298, 2016.
- [51] J. Hoydis, C. Hoek, T. Wild, and S. ten Brink, “Channel measurements for large antenna arrays,” in *Theory*, vol. 58, no. 5, pp. 2911–2934, May 2012.
- [23] A. Ashikhmin and T. Marzetta, “Pilot contamination precoding in multi-cell large scale antenna systems,” in *2012 IEEE International Symposium on Information Theory Proceedings*, 2012, pp. 1137–1141.
- [24] A. Ashikhmin, T. L. Marzetta, and L. Li, “Interference Reduction in Multi-Cell Massive MIMO Systems I: Large-Scale Fading Precoding and Decoding,” Nov. 2014.
- [25] Z. G. Zhang C, “Pilot contamination reduction scheme in massive MIMO multi-cell TDD systems. J. Comput. Inf. Syst.,” *Comput. Inf. Syst.*, p. 10(15):6721-9., 2014.
- [26] M. A. Latif Sarker and M. H. Lee, “A fast channel estimation and the reduction of pilot contamination problem for massive MIMO based on a diagonal Jacket matrix,” in *2013 4th International Workshop on Fiber Optics in Access Network (FOAN)*, 2013, pp. 26–30.
- [27] J. Zhang, X. Yuan, and L. Ping, “Hermitian Precoding for Distributed MIMO Systems with Individual Channel State Information,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 31, no. 2, pp. 241–250, Feb. 2013.
- [28] N. N. Moghadam, H. Shokri-Ghadikolaei, G. Fodor, M. Bengtsson, and C. Fischione, “Pilot Precoding and Combining in Multiuser MIMO Networks,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 35, no. 7, pp. 1632–1648, 2017.
- [29] H. Yin, D. Gesbert, M. Filippou, and Y. Liu, “A Coordinated Approach to Channel Estimation in Large-Scale Multiple-Antenna Systems,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 31, no. 2, pp. 264–273, Feb. 2013.
- [30] H. Yin, D. Gesbert, M. C. Filippou, and Y. Liu, “Decontaminating pilots in massive MIMO systems,” in *2013 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2013, pp. 3170–3175.
- [31] M. Filippou, D. Gesbert, and H. Yin, “Decontaminating pilots in cognitive massive MIMO networks,” in *2012 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, 2012, pp. 816–820.
- [32] Jiann-An Tsai, R. M. Buehrer, and B. D. Woerner, “The impact of AOA energy distribution on the spatial fading correlation of linear antenna array,” in *Vehicular Technology Conference. IEEE 55th Vehicular Technology Conference. VTC Spring 2002 (Cat. No.02CH37367)*, vol. 2, pp. 933–937.
- [33] J. Zhang, B. Zhang, S. Chen, X. Mu, M. El-Hajjar, and L. Hanzo, “Pilot Contamination Elimination for Large-Scale Multiple-Antenna Aided OFDM Systems,” *IEEE J. Sel. Top. Signal Process.*, vol. 8, no. 5, pp. 759–772, Oct. 2014.
- [34] L. Zhao, G. Geraci, T. Yang, D. W. K. Ng, and J. Yuan, “A Tone-based AoA Estimation and Multiuser Precoding for Millimeter Wave Massive MIMO,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 6778, no. c, pp. 1–17, 2017.
- [35] X. Luo, P. Cai, X. Zhang, D. Hu, and C. Shen, “A Scalable Framework for CSI Feedback in FDD Massive MIMO via DL Path Aligning,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 65, no. 18, pp. 4702–4716, Sep. 2017.
- [36] H. Q. Ngo and E. G. Larsson, “EVD-based channel estimation in multicell multiuser MIMO systems with very large antenna arrays,” in *2012 IEEE International*

- “Mutual coupling effects in multi-user massive MIMO base stations,” in *Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*, 2012, pp. 1–2.
- [60] O. N. Alrabadi, E. Tsakalaki, H. Huang, and G. F. Pedersen, “Beamforming via Large and Dense Antenna Arrays Above a Clutter,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 31, no. 2, pp. 314–325, Feb. 2013.
- [61] X. Yan, H. Yin, M. Xia, and G. Wei, “Pilot sequences allocation in TDD massive MIMO systems,” *2015 IEEE Wirel. Commun. Netw. Conf. WCNC 2015*, pp. 1488–1493, 2015.
- [62] X. Zhu, L. Dai, and Z. Wang, “Graph Coloring Based Pilot Allocation to Mitigate Pilot Contamination for Multi-Cell Massive MIMO Systems,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 19, no. 10, pp. 1842–1845, 2015.
- [63] H. Ahmadi, A. Farhang, N. Marchetti, and A. MacKenzie, “A Game Theoretic Approach for Pilot Contamination Avoidance in Massive MIMO,” *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, vol. 5, no. 1, pp. 12–15, 2016.
- [64] R. Mochaourab, E. Bjornson, and M. Bengtsson, “Adaptive pilot clustering in heterogeneous massive MIMO networks,” *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 15, no. 8, pp. 5555–5568, 2016.
- [65] R. Mochaourab, E. Bjornson, and M. Bengtsson, “Pilot clustering in asymmetric massive MIMO networks,” *IEEE Work. Signal Process. Adv. Wirel. Commun. SPAWC*, vol. 2015–August, pp. 231–235, 2015.
- [66] N. Zhang, Z. Q. Bai, B. Zhang, Y. Y. Su, T. Han, and K. S. Kwak, “Genetic algorithm based pilot allocation scheme for massive MIMO system,” in *2016 IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS)*, 2016, pp. 1–5.
- [67] B. Zhang *et al.*, “Artificial fish swarm algorithm based pilot allocation in massive MIMO system,” in *2016 16th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT)*, 2016, pp. 82–86.
- 2012 *International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, 2012, pp. 811–815.
- [52] “Han Y, Ni J, Du G. The potential approaches to achieve channel reciprocity in FDD system with frequency correction algorithms. In *Communications and Networking in China (CHINACOM)*, 2010 5th International ICST Conference on 2010 Aug 25 (pp. 1–5). IEEE.”
- [53] E. Bjornson, J. Hoydis, M. Kountouris, and M. Debbah, “Hardware impairments in large-scale MISO systems: Energy efficiency, estimation, and capacity limits,” in *2013 18th International Conference on Digital Signal Processing (DSP)*, 2013, pp. 1–6.
- [54] E. Bjornson, J. Hoydis, M. Kountouris, and M. Debbah, “Massive MIMO Systems With Non-Ideal Hardware: Energy Efficiency, Estimation, and Capacity Limits,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 60, no. 11, pp. 7112–7139, Nov. 2014.
- [55] A. Pitarokoilis, S. K. Mohammed, and E. G. Larsson, “Effect of oscillator phase noise on uplink performance of large MU-MIMO systems,” in *2012 50th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton)*, 2012, pp. 1190–1197.
- [56] A. Pitarokoilis, S. K. Mohammed, and E. G. Larsson, “Uplink Performance of Time-Reversal MRC in Massive MIMO Systems Subject to Phase Noise,” *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 14, no. 2, pp. 711–723, Feb. 2015.
- [57] S. K. Mohammed and E. G. Larsson, “Single-User Beamforming in Large-Scale MISO Systems with Per-Antenna Constant-Envelope Constraints: The Doughnut Channel,” *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 11, no. 11, pp. 3992–4005, Nov. 2012.
- [58] S. K. Mohammed and E. G. Larsson, “Per-Antenna Constant Envelope Precoding for Large Multi-User MIMO Systems,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 61, no. 3, pp. 1059–1071, Mar. 2013.
- [59] X. Artiga, B. Devillers, and J. Perruisseau-Carrier,

