

تخصیص سازگار دنباله پایلوت در سیستم چند آنتنی چندسلولی

چندکاربره انبوه در شبکه مخابرات بی سیم 5G

رضا ابراهیمی^۱ حسین ضمیری جعفریان^۲ مرتضی خادمی^۳

۱- دکتری مهندسی برق- مخابرات سیستم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
reza.ebrahimi@mail.um.ac.ir

۲- دانشیار گروه مهندسی برق-مخابرات، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
hzamiri@um.ac.ir

۳- استاد گروه مهندسی برق-مخابرات، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
khademi@um.ac.ir

چکیده: سیستم چندورودی-چندخروجی انبوه^۱ یک تکنولوژی امیدبخش در دستیابی به مزایای متعدد نسل پنجم مخابرات بی سیم از جمله کارایی طیفی و کارایی انرژی بسیار بالا است. چالش عمده جهت بهره‌وری از مزایای این سیستم، تخمین مناسب کانال است. آلودگی پایلوت باعث خطا در تخمین کانال کاربران می‌شود و مانعی جدی در استفاده از مزایای سیستم است. با هدف حذف اثر مخرب آلودگی پایلوت و دنبال کردن تغییرات زمانی کانال کاربران (به علت جابجایی) در مدل کانال گوس-مارکف معرفی شده، یک الگوریتم سازگار تخصیص هوشمند دنباله پایلوت در طرف فراسو در مد TDD ارائه شده است. در روش پیشنهادی، مقدار تداخل بین سلولی تحمیلی بر کاربران سلول هدف به عنوان هزینه تخصیص در نظر گرفته شده است. همچنین با استفاده از تکنیک مدل سازی کانال مجازی یک راه حل جایگزین محاسبه هزینه‌های تخصیص مجازی، معادل با هزینه‌های تخصیص حقیقی در هر بلوک به صورت سازگار و با پیچیدگی محاسباتی کم ارائه شده است. در انتها، با استفاده از شبیه سازی کامپیوتری کارایی الگوریتم پیشنهادی سازگار تخصیص دنباله پایلوت مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده، کارایی خوب و همگرایی سریع الگوریتم پیشنهادی را تحت سرعت‌های متفاوت کاربران نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: سیستم MIMO انبوه، سیستم مخابرات بی سیم 5G، آلودگی پایلوت، تخصیص هوشمند دنباله پایلوت، الگوریتم سازگار

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.19.3.23

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۳/۲۶

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۰/۳/۲۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۶/۲۸

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر حسین ضمیری جعفریان

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - مشهد - میدان آزادی - دانشگاه فردوسی مشهد - دانشکده‌ی مهندسی - گروه مهندسی برق

۱- مقدمه

با گسترش روزافزون تقاضا برای دستیابی به نرخ تبادل داده بالاتر در سیستم‌های مخابراتی بی‌سیم و ظهور سرویس‌هایی مانند اینترنت اشیا^۱، مخابرات ماشین به ماشین^۲، سیستم‌های سلامت الکترونیک^۳، یادگیری الکترونیک^۴، بانکداری الکترونیک^۵ و ... حرکت به سمت دستیابی به تکنولوژی‌های جدید که قادر به فراهم آوردن ظرفیت‌های بالاتر در مقایسه با تکنولوژی‌های سلولی موجود 4G باشد، بسیار مورد توجه است. در این رابطه سیستم MIMO انبوه به عنوان یک تکنولوژی امیدبخش برای تأمین ظرفیت داده بالاتر برای شبکه موبایل 5G در سال ۲۰۲۰ و پس از آن پیشنهاد شده است [۴]-[۱]. یکی از اطلاعات بسیار مهمی که ایستگاه‌های پایه در هر سلول برای دستیابی به بهره‌های بالا در سیستم‌های MIMO انبوه نیاز دارند، اطلاعات وضعیت کانال^۶ هر کاربر است. با توجه به مقرون به صرفه بودن کسب اطلاعات کانال در مُد TDD^۸ (بر خلاف مُد FDD^۹ که علاوه بر نیاز به فیدبک، تخمین اطلاعات در آن به تعداد آنتن‌های ایستگاه پایه نیز وابسته است)، این مُد برای کسب اطلاعات کانال کاربران در این سیستم پیشنهاد شده است. از طرفی در حالت چندسلولی و به هنگام انتخاب مُد TDD و ارسال سیگنال آموزشی در طرف فراسو^{۱۰} پدیده‌ای به نام آلودگی پایلوت بوجود می‌آید [۵]. این پدیده ناشی از بهره‌برداری مجدد از دنباله‌های پایلوت یکسان^{۱۱} در سلول‌های مجاور است. از طرفی استفاده از دنباله‌های پایلوت یکسان به علت محدودیت در تعداد دنباله‌های پایلوت متعامد است که خود ناشی از محدودیت در طول دنباله‌های پایلوت بوده و آن نیز به دلیل محدودبودن زمان هم‌دوس در کانال‌های مخابراتی است. آلودگی پایلوت بر اطلاعات بردار کانال کاربران در طرف فرستنده^{۱۲} BS، اثر خواهد گذاشت. در این صورت تخمین کانال ممکن است بوسیله ترکیب خطی کانال‌های کاربران دیگر که از همان دنباله پایلوت در بقیه سلول‌ها استفاده می‌کنند، آلوده شود. نتیجه این امر تحت تأثیر قرارگرفتن بسیار زیاد عملکرد آشکارسازها، پیش‌کدورها و الگوریتم‌های تخصیص توان، همچنین موجب تداخل بین سلولی و در نتیجه کاهش عملکرد صحیح سیستم خواهد شد [۶]. در حالت کلی، آلودگی پایلوت در میان کاربران مختلف از شدت متفاوتی برخوردار است، اما این مسأله توسط اکثر روش‌های قبلی حذف اثر آلودگی پایلوت نادیده گرفته شده و نگاه یکسانی به همه کاربران شده است. از طرفی به منظور کنترل بیشتر تداخل بین سلولی و افزایش عملکرد کلی سیستم با توجه به آنکه در مقالات متعدد، تخصیص دنباله پایلوت برای تخمین کانال و حذف اثر آلودگی پایلوت کاملاً به صورت تصادفی انجام می‌پذیرد، مناسب خواهد بود تا از روش‌های تخصیص هوشمند دنباله پایلوت استفاده گردد [۷]. در این صورت با در اختیار داشتن درجه آزادی بیشتر نسبت به حالت تخصیص تصادفی دنباله پایلوت به کاربران مختلف، می‌توان جمع نرخ را ارتقا و تداخل بین-سلولی را کنترل بیشتری کرد.

در حوزه تخصیص هوشمند دنباله پایلوت، روش‌های مختلف را می‌توان با توجه به نوع مدل‌سازی کانال تئوری در سیستم MIMO انبوه در مقابل کانال فیزیکی آن، دسته‌بندی نمود. محققان مختلف پیشنهادهایی در هر دو حوزه روش‌های تخصیص برای کانال‌های محوشدگی^{۱۳} i.i.d [۱۰]-[۷] در مقابل روش‌های مناسب برای کانال-های فیزیکی در سیستم MIMO انبوه [۱۵]-[۱۱] ارائه نموده‌اند.

با بررسی حوزه اول، در [۷] یک استراتژی اختصاص دنباله پایلوت هوشمند ارائه شده است که در آن دنباله پایلوتی که دارای کمترین تداخل بین سلولی است را به کاربری که دارای بدترین کیفیت کانال است اختصاص می‌دهد. با این وجود این روش نیاز به در اختیار داشتن ضرایب محوشدگی مقیاس-بزرگ کاربران سلول‌های مختلف و همکاری بین سلولی داشته و در عین حال همگرایی این روش در شرایط مختلف تضمین نشده است. در [۸] یک روش دیگر تخصیص هوشمند دنباله پایلوت بر اساس کمینه‌سازی جمع معکوس مقادیر^{۱۵} SINR تمام کاربران سلول هدف ارائه شده است. از آنجایی که در این روش، اطلاعات دقیق وضعیت کانال کاربران در اختیار نیست، با فرض در اختیار داشتن اطلاعات ضرایب محوشدگی مقیاس-بزرگ، تابع هدف جایگزین را کمینه می‌کند. با توجه به آن که روش ارائه شده متمرکز بر بهبود حداقل SINR است، نشان داده می‌شود که نرخ قابل حصول بدترین کاربر در روش پیشنهادی بالاتر از روش [۷] است. یکی دیگر از روش-های پیشنهادی در حوزه اول برای حذف اثر آلودگی پایلوت و تخمین کانال، روش نرم^{۱۶} استفاده مجدد از دنباله پایلوت با توجه به تقسیم کلیه کاربران برای هر سلول به دو دسته کاربران مرکزی و کاربران لبه سلول بر اساس ضرایب محوشدگی مقیاس-بزرگشان است [۹]. در این روش فرض می‌شود کاربران مرکزی سلول از آلودگی پایلوت کمتری رنج می‌برند، در حالی که کاربران لبه سلول‌ها دچار تداخل بین سلولی بیشتری هستند. از معایب روش پیشنهادی نیاز به دنباله‌های پایلوت متعامد بسیار زیاد برای کاربران مرزی تمام سلول‌هاست. همچنین در این روش نیاز به همکاری بین سلولی در تعیین کاربران مرزی سلول است که برای آنها از دنباله‌های پایلوت متعامد به صورت اضافه استفاده می‌شود. در [۱۰] یک الگوریتم تخصیص گروه‌بندی کاربران با ترکیب روش شیفت زمانی ارائه شده است که تخصیص کاربر و تخصیص سلول را به صورت توأمان انجام می‌دهد. در این روش مسأله تخصیص دنباله پایلوت به صورت یک مسأله برنامه‌ریزی غیرخطی صحیح، مدل‌سازی شده است که توسط کاهش شبکه سلولی به چندیدن گروه سلولی کوچک با کاهش ابعاد مسأله توانسته آن را به یک مسأله تخصیص خطی تبدیل کند. در این روش تخصیص دنباله پایلوت بر اساس اطلاعات محوشدگی مقیاس-بزرگ به صورت سلسله مراتبی با هدف کاهش فضای جواب انجام می‌پذیرد. همچنین اطلاع از محوشدگی مقیاس-بزرگ به عنوان فرضی محدودکننده در این روش الزامی است و از آن به عنوان ابزاری جهت بررسی میزان تداخل ایجاد شده هر سلول بر سلول‌های دیگر استفاده می‌شود.

در حوزه دوم (روش‌های ارائه شده تخصیص هوشمند برای کانال‌های فیزیکی)، راه‌حل‌های مختلفی برای تخصیص هوشمند دنباله‌های پایلوت ارائه شده است [۱۳]–[۱۱]. در [۱۱] یک روش تخصیص دنباله پایلوت ارائه می‌شود که ایده اصلی آن اطمینان از عدم تخصیص دنباله‌های یکسان به کاربران دارای AOA متفاوت است. در این روش فرض می‌شود که کاربران، دارای AOA متفاوت می‌باشند. همچنین در این تحقیق با استفاده از ویژگی بردار هدایت^{۱۸}، یک روش پس‌پردازش^{۱۹} بر پایه FFT^{۲۰} ارائه می‌شود که پس از تخمین کانال به روش حداقل مربعات^{۲۱} [۶]–[۵]، به تخمین بدست آمده اعمال شده و تخمین بدون آلوده بردارهای کانال بدست آورده می‌شود. در این روش به یک جستجوی جامع برای یافتن کلیه حالاتی از تخصیص که معیار مقدار تداخل همپوشان بین کاربران مختلف را همواره کمینه کند، نیاز است. یافتن چنین جستجوی جامعی نیاز به پیچیدگی بسیاری در عمل دارد. در [۱۲] یک روش تخصیص دنباله پایلوت در شبکه‌های ناهمگن^{۲۲} ارائه شده است که نیاز به دانستن اطلاعات AOA کاربران مختلف و نیز همکاری بین‌سلولی است. کلیت روش ارائه‌شده و معیارهای آن عیناً مشابه مقاله [۱۱] است، اما فضای پیاده‌سازی برای یک شبکه ناهمگن است. در [۱۳] یک روش حریص تخصیص دنباله پایلوت ارائه شده است که در آن مسأله آلودگی پایلوت را به‌صورت یک مسأله برنامه‌ریزی درجه دو صحیح مدل می‌کند. البته به‌منظور کاهش پیچیدگی محاسباتی، حل آن را با استفاده از الگوریتم‌های ابتکاری^{۲۳} پیشنهاد می‌دهد. در این روش پس از محاسبه نوع تخصیص پیشنهادی دنباله پایلوت به کاربران مختلف، از اطلاعات ماتریس همبستگی کانال کاربران برای تخمین بردارهای کانال روش MMSE^{۲۴} استفاده می‌کند. به همین دلیل دارای پیچیدگی محاسباتی بسیار بالا در معکوس‌گیری ماتریس‌هایی با ابعاد بسیار بزرگ است. همچنین در اختیار داشتن این اطلاعات، فرضی غیرکاربردی و ساده‌کننده است. قابل ذکر است در تمام روش‌های مکان-آگاه^{۲۵} [۱۴]–[۱۱] فرض می‌شود که هر BS، اطلاعات موقعیت تمام کاربران را بداند که فرضی ساده‌کننده است. در [۱۴] نیز یک روش برای تخصیص دنباله پایلوت هوشمند برای کانال‌های فیزیکی در سیستم MIMO انبوه ارائه شده است. در این روش کاربران سلول هدف از کاربران سلول‌های تداخلی، جداسازی و کاربران سلول هدف نیز به تعدادی ردیف^{۲۶} تقسیم‌بندی می‌شوند. کاربران در ردیف اول بر اساس اطلاعات فاصله‌شان از BS (که مجدداً فرض می‌شود این اطلاعات در دسترس است) تقسیم‌بندی می‌شوند. به همه این کاربران، دنباله پایلوت متعامد تخصیص داده می‌شود. سپس تخصیص دنباله پایلوت کاربران ردیف دوم نیز با محاسبه مقدار تداخل خط دید^{۲۷} تحمیلی کاربر i ام سلول i ام با کاربر k ام سلول i ام تعیین می‌شود. در این روش به کاربر i امی که کمترین تداخل خط دید را با کاربر k ام سلول i ام ایجاد می‌کند، دنباله پایلوت یکسان اختصاص می‌یابد. نحوه محاسبه مقدار تداخل خط دید نیز در [۱۴] ذکر شده است. از جمله معایب این روش وجود

فرض‌های محدودکننده داشتن اطلاعات موقعیت و فاصله کاربران مختلف از سلول هدف است.

با توجه به مرور مقالات فوق مشاهده می‌شود بیشتر راهبردهای پیشنهاد شده برای حذف آلودگی پایلوت از معایب پیچیدگی محاسباتی بالا و همچنین نیاز به برخی شرایط ساده‌کننده و یا اطلاعات قبلی در طراحی الگوریتم پیشنهادی رنج می‌برند. در [۱۵] به ارائه روش تخصیص هوشمند دنباله پایلوت براساس مسأله بهینه‌سازی تخصیص (برنامه ریزی صفر و یک) پرداخته شده است. روش تخصیص هوشمند دنباله پایلوت پیشنهادی دارای مزایای بسیاری از جمله عدم نیاز به اطلاعات آمارگان مرتبه دوم کانال، عملکرد بهتر در فرونشانی تداخل، پیچیدگی محاسباتی کم و کارایی بهتر از لحاظ معیارهای خطای نرمالیزه شده NMSE^{۲۸} و نرخ قابل حصول دارد. اما یکی از مواردی که باید مورد توجه قرار گیرد تغییرات زمانی (تغییرات بردار کانال کاربران در هر بلوک به علت جابجایی و ...) بردارهای کانال کاربران در هر بلوک و دنبال کردن این تغییرات توسط الگوریتم تخصیص هوشمند دنباله پایلوت پیشنهادی است. بنابراین لازم است توسط یک الگوریتم سازگار^{۲۹} (وقفی) هزینه‌های تخصیص به صورت برخط^{۳۰} بر اساس تغییرات بردار کانال کاربران برزورسانی شود. در این مقاله به ارائه یک الگوریتم سازگار به منظور ردیابی و دنبال کردن برخط محاسبه هزینه‌های تخصیص در مسأله تخصیص هوشمند دنباله پایلوت پیشنهادی [۱۵] پرداخته می‌شود. در قسمت بعد، در ابتدا مدل‌سازی کانال و سیستم ارائه می‌شود. برای تغییرات زمانی بردارهای کانال از یک مدل گوس-مارکوف^{۳۱} ایستان^{۳۲} مرتبه یک استفاده می‌شود که مدل عملی در چنین مواردی است [۱۸]–[۱۶]. در این مدل اطلاعات بردار کانال در هر بلوک به بلوک قبلی وابسته است، سپس روش تخمین کانال برپایه زیرفضا^{۳۳} [۱۹] ارائه می‌شود. در ادامه نیز به شرح راه حل پیشنهادی با جزئیات پرداخته می‌شود. در انتها ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی توسط شبیه‌سازی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته شده است.

۲- مدل‌سازی کانال و سیستم

۲-۱- مدل‌سازی کانال

به‌منظور اعمال تغییرات کانال در زمان برای بلوک‌های مختلف از مدل کانال فضای حالت^{۳۴} استفاده شده است. در این صورت رابطه دینامیک کانال توسط یک فرآیند ایستان مرتبه اول گوس-مارکف بیان می‌شود [۱۷]، [۱۸]. در این حالت بردار کانال کاربر i ام در سلول ℓ ام به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود.

$$\begin{cases} \mathbf{h}_{i,\ell}(0) = \mathbf{R}_{i,\ell}^{1/2} \mathbf{g}_{i,\ell}(0) \in \mathbb{C}^{M \times 1} \\ \mathbf{h}_{i,\ell}(n) = \eta_{i,\ell} \mathbf{h}_{i,\ell}(n-1) + \sqrt{1 - \eta_{i,\ell}^2} \mathbf{R}_{i,\ell}^{1/2} \mathbf{g}_{i,\ell}(n) \in \mathbb{C}^{M \times 1}, n \geq 1 \end{cases} \quad (1)$$

که $\mathbf{h}_{i,\ell}(n)$ بردار کانال کاربر i ام در سلول ℓ ام برای بلوک n ام از ابعاد $M \times 1$ است که در آن M تعداد آنتن‌های BS است، $\mathbf{R}_{i,\ell}$ ماتریس همبستگی بردار کانال کاربر i ام در سلول ℓ ام،

در رابطه (۶)، $y_I(n)$ سیگنال کلی دریافت شده تمام کاربران در سلول هدف است (بدون از دست دادن کلیت، سلول اول به عنوان سلول هدف در نظر گرفته شده است). همچنین

پرتوهای مجازی کلیه کاربران بوده و $\tilde{\phi} = [\tilde{\phi}_1 \ \tilde{\phi}_2 \ \dots \ \tilde{\phi}_K] \in \mathbb{C}^{M \times MK}$ ماتریس توأم دنباله پایلوت و پرتوهای مجازی کاربر i ام در سلول ℓ ام $\tilde{\phi}_i = [\phi_i \otimes a_r(\tilde{\theta}_0) \ \dots \ \phi_i \otimes a_r(\tilde{\theta}_{M-1})] \in \mathbb{C}^{M \times M}$ ماتریس توأم دنباله پایلوت و پرتوهای مجازی کاربر i ام در سلول هدف است. $\phi_i \in \mathbb{C}^{T \times 1}$ نیز دنباله پایلوت کاربر i ام بوده و به صورت $\|\phi_i\|_2^2 = 1, \phi_i^H \phi_j = 0, i \neq j$ معرفی می شود. همچنین

جمع بردار کانال مجازی کلیه کاربران دریافتی $\tilde{h}_v(n) = \sum_{\ell=1}^L \tilde{h}_{v_\ell}(n)$ ،

در سلول هدف بوده که در آن $\mathbf{h}_{v_\ell}(n) = [h_{v_{1,\ell}}^T(n) \ h_{v_{2,\ell}}^T(n) \ \dots \ h_{v_{K,\ell}}^T(n)]^T \in \mathbb{C}^{MK \times 1}$ بردار کانال

مجازی کلیه کاربران در سلول ℓ ام و بلوک n ام به طرف آنتن های BS سلول هدف است. علاوه بر این، $z_I(n) \sim CN(0, \sigma^2 \mathbf{I})$ نویز فضا-زمان در بلوک n ام است. قابل ذکر است به دلیل تقسیم فازهای ارسال دنباله پایلوت برای کاربران تداخلی و کاربران سلول هدف در دوفاز مجزا، رابطه (۷) را برای فاز ارسال دنباله پایلوت برای کاربران تداخلی خواهیم داشت.

$$y_I(n) = \sum_{\ell=2}^L \sum_{i=1}^K x_{i,\ell}(n) + z_I(n) = \tilde{\phi} \tilde{h}_v(n) + z_I(n) \quad (7)$$

بطوری که $x_{i,\ell}(n)$ سیگنال دریافت شده از i امین کاربر در ℓ امین سلول، $y_I(n)$ بردار سیگنال کلیه کاربران تداخلی سلول های مجاور

سلول هدف، $\tilde{h}_v(n) = \sum_{\ell=2}^L \tilde{h}_{v_\ell}(n)$ جمع بردار کانال کلیه کاربران

تداخلی برای بلوک n ام و $z_I(n) \sim CN(0, \sigma^2 \mathbf{I})$ نویز فضا-زمان برای بلوک n ام است.

۲-۳- روش تخمین کانال برپایه زیرفضا

در بسیاری از محیط های انتشار واقعی مانند مدل های کانال همبسته فضایی که در استاندارد سازی استفاده می شود، نشان داده شده است که اگرچه بردار کانال کاربران دارای زیرفضای با ابعاد بزرگ می باشد، اما آنها می توانند در یک زیرفضای با ابعاد کوچک قرار گیرند، زیرا دارای گستره زاویه ای ^{۳۸} (همبستگی فضایی) اندکی می باشند [۲۱]. از طرفی اغلب استراتژی های پیشنهاد شده برای حذف اثر آلودگی پایلوت از پیچیدگی محاسباتی بالا و در نظر گرفتن برخی فرض های محدود کننده، مانند در اختیار داشتن ماتریس های همبستگی کانال کاربران یا دانستن اطلاعاتی از کاربران سلول های مجاور رنج می برند. در این قسمت، یک روش برپایه زیرفضا با پیچیدگی محاسباتی کم برای حذف اثر آلودگی پایلوت و همچنین انجام تخمین کانال ارائه شده است

$g_{i,\ell}(n)$ فرآیند نوآوری ^{۳۵} کاربر i ام در سلول ℓ ام برای بلوک محوشدگی کانال n ام و $\eta_{i,\ell}$ ضریب همبستگی زمانی ^{۳۶} بین دو عنصر ثابت بردار کانال $h_{i,\ell}(n)$ در دو بلوک محوشدگی متوالی و عددی بین (۰ و ۱) است [۱۷]، [۱۸].

اکنون بدون از دست دادن کلیت مسأله با حذف شماره بلوک از بردار کانال $h_{i,\ell}(n)$ ، می توان بردار کانال فیزیکی کاربر i ام در سلول ℓ ام ($h_{i,\ell}$) (رابطه ۲) را با استفاده از مدل سازی کانال مجازی به صورت معادل بردار کانال مجازی $h_{i,\ell}$ در رابطه (۴) نشان داد [۲۰]:

$$h_{i,\ell} = \sum_{p=1}^P \beta_{p,i,\ell} a_r(\theta_{p,i,\ell}) \in \mathbb{C}^{M \times 1} \quad (2)$$

$$a_r(\theta_{p,i,\ell}) = \frac{1}{\sqrt{M}} [1, e^{-j2\pi\theta_{p,i,\ell}}, \dots, e^{-j2\pi(M-1)\theta_{p,i,\ell}}]^T \quad (3)$$

$$h_{i,\ell} = \sum_{m=1}^M h_{v_{i,\ell}}(m) a_r(\tilde{\theta}_m) \in \mathbb{C}^{M \times 1}, \tilde{\theta}_m = \frac{m}{M} \quad (4)$$

$$a_r(\tilde{\theta}_m) = \frac{1}{\sqrt{M}} [1, e^{-j2\pi\tilde{\theta}_m}, \dots, e^{-j2\pi(M-1)\tilde{\theta}_m}]^T \in \mathbb{C}^{M \times 1} \quad (5)$$

در رابطه (۲)، $\beta_{p,i,\ell} \sim CN(0, \alpha_{i,\ell})$ ضریب تضعیف تصادفی مسیر p ام برای کاربر i ام در سلول ℓ ام است و در آن وابسته به تلفات مسیر و اثر سایه ^{۳۷} بین کاربر i ام در سلول ℓ ام و BS سلول هدف بوده و P تعداد کل مسیرها است. همچنین $a_r(\theta_{p,i,\ell})$ در رابطه (۲) بردار هدایت سیگنال مسیر p ام برای کاربر i ام در سلول ℓ ام است (رابطه ۳) که از جهت تصادفی $\theta_{p,i,\ell}$ به آرایه BS فرود می آید بطوری که $\theta_{p,i,\ell} = d \sin(\varphi_{p,i,\ell}) / \lambda$ زاویه نرمالیزه شده وابسته به جهت فیزیکی $\varphi_{p,i,\ell}$ است. همچنین، $h_{v_{i,\ell}}(m)$ بهره پرتو مجازی m ام است که در آن اثر ضریب های تصادفی مسیرهای مختلفی که جهت های آن در این پرتو مجازی $a_r(\tilde{\theta}_m)$ قرار می گیرند، در این ضریب یکپارچه شده است. همچنین $a_r(\tilde{\theta}_m)$ در رابطه (۴) بردار هدایت برای جهت ثابت $\tilde{\theta}_m = \frac{m}{M}, m = 1, 2, \dots, M$ به صورت رابطه (۵) است [۲۰].

۲-۲- مدل سازی سیستم

یک سیستم مخابرات بی سیم MIMO انبوه را در نظر بگیرید. در هر سلول یک BS و K کاربر وجود دارد. هر BS دارای M آنتن بوده در حالی که کاربران هر کدام تنها یک آنتن دارند. در فرآیند فاز آموزشی در طرف فراسو فرض می شود همه کاربران در تمام L سلول به-طور همزمان دنباله های پایلوت (دارای طول τ) خود را ارسال می کنند. با فرض آنکه همه L سلول از مجموعه دنباله های پایلوت یکسان استفاده می کنند، در این صورت با استفاده از مدل سازی کانال مجازی معرفی شده در بخش قبل رابطه کلی سیگنال دریافتی از تمام کاربران در سلول هدف به صورت رابطه (۶) بیان می شود:

$$y_I(n) = \tilde{\phi} \tilde{h}_v(n) + z_I(n) \in \mathbb{C}^{M \times 1} \quad (6)$$

۳-۱- ساختار کلی

بنیای روش پیشنهادی مدل سازی مسئله تخصیص هوشمند دنباله پایلوت به صورت یک مسئله برنامه ریزی خطی صفر و یک یا به عبارتی مسئله تخصیص و سپس محاسبه سازگار هزینه های مربوطه و در نهایت حل مسئله به کمک یکی از روش های حوزه تحقیق در عملیات از جمله روش مجارستانی [۲۲] با هدف کمترین تداخل بین سلولی، خطای تخمین کانال کم و در نتیجه افزایش جمع نرخ کلی سیستم است. مقدار تداخل بین سلولی تحمیل شده c_{ij} به عنوان هزینه تخصیص در مسئله بهینه سازی تخصیص پیشنهادی به صورت رابطه (۱۱) معرفی می شود (سلول اول به عنوان سلول هدف در نظر گرفته شده است).

$$c_{ij} = \sum_{q=1}^Q c_{ij}(\theta_q^i) = \sum_{q=1}^Q a_r^H(\theta_q^i) \Psi_j a_r(\theta_q^i), \quad \Psi_j = \sum_{\ell=2}^L R_{j,\ell} \quad (11)$$

در معیار پیشنهادی فوق، $R_{j,\ell} = E[h_{j,\ell} h_{j,\ell}^H]$ ماتریس همبستگی برای کاربر j ام در سلول ℓ ام است که دارای دنباله پایلوت ϕ_j است. همچنین $a_r(\theta_q^i)$ بردار هدایت برای کاربر i ام در سلول هدف است که θ_q^i به آرایه از جهات $\theta_q^i \in [\theta_q^{i(\min)}, \theta_q^{i(\max)}]$ فرود می آید که در آن به ترتیب $\theta_q^{i(\min)}$ و $\theta_q^{i(\max)}$ کمینه و بیشینه θ_q^i است. همچنین تعداد کل مسیرهای فیزیکی فرود آمده از طرف کاربران مختلف به آرایه BS است. برای بدست آوردن ضرایب c_{ij} یا هزینه های تخصیص دنباله پایلوت j ام به کاربر i ام، باید مقدار تداخل تحمیلی بین سلولی را در صورت انجام این تخصیص محاسبه نمود. در صورتی که از معیار رابطه (۱۱) به عنوان تداخل تحمیلی کاربر j ام دارای دنباله پایلوت ϕ_j در سلول تداخلی بر روی کاربر i ام سلول هدف استفاده شود و این دو کاربر هیچ گونه همپوشانی در زوایای فرودی سیگنال هایشان به آرایه آنتنی BS هدف نداشته باشند، تداخل به سمت صفر میل خواهد کرد. اثبات این نکته به مراجعه به اثبات لم ۳ در قسمت ضمیمه در [۲۳] قابل تأیید است. در آنجا بیان می شود اگر که ϕ در اینجا $\theta_{p,j,\ell}$ است در بازه زوایای سیگنال مطلوب نباشد یعنی $\theta_q^i \in [\theta_q^{i(\min)}, \theta_q^{i(\max)}]$ در این صورت خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \sum_{q=1}^Q a_r^H(\theta_q^i) \Psi_j a_r(\theta_q^i) &= \sum_{q=1}^Q a_r^H(\theta_q^i) \left(\sum_{\ell=2}^L R_{j,\ell} \right) a_r(\theta_q^i) = \\ &= \sum_{q=1}^Q \left(\sum_{\ell=2}^L a_r^H(\theta_q^i) E[h_{j,\ell} h_{j,\ell}^H] a_r(\theta_q^i) \right) = \\ &= \sum_{q=1}^Q \left(\alpha_{i,\ell} E[a_r^H(\phi) a_r(\theta_q^i)] \right)^2 \\ \text{if } \phi \in \theta_q^i \text{ then } \lim_{M \rightarrow \infty} \sum_{q=1}^Q a_r^H(\theta_q^i) \left(\sum_{\ell=2}^L R_{j,\ell} \right) a_r(\theta_q^i) &\rightarrow 0 \end{aligned} \quad (12)$$

که از مدل سازی کانال مجازی به همراه یک تکنیک نوینی برای فرمول بندی مسئله بهره می برد [۱۹]. با بکارگیری تکنیک جستجوی پرتو مجازی و نیز انجام تصویر^۳ بر روی زیرفضای توأم دنباله های پایلوت و پرتوهای مجازی، روش پیشنهادی بردار کانال کاربران مختلف را با پیچیدگی محاسباتی خیلی کم تخمین می زند. در این روش در یک مکانیزم دوفازه در ابتدا دنباله های پایلوت، تنها توسط کاربران سلول های تداخلی ارسال می شوند. سپس تمام کاربران در تمام سلول ها دنباله های پایلوت خود را ارسال می کنند. در فاز اول، رابطه (۷) برای ارسال دنباله پایلوت از کاربران سلول های تداخلی به طرف BS سلول هدف برقرار است. علاوه بر این در فاز دوم با ارسال دنباله های پایلوت از تمام کاربران در تمام سلول ها به طور همزمان رابطه (۶) برقرار است. بر این اساس، مراحل گام به گام روش پیشنهادی به صورت زیر بیان می شود:

گام ۱) فرمول بندی مسئله براساس مدل سازی کانال مجازی و ضرب کرونیگر و انجام جستجوی پرتو مجازی برای پیدا کردن Γ تا از M تا بردار توأم دنباله پایلوت و پرتو مجازی متناظر با Γ تا از M بزرگترین اندازه های تفاضل $|\tilde{h}_v - \tilde{h}_{v_I}|$. (با استفاده از روابط ۹-۸)

$$\tilde{y}_I = \tilde{\phi}^H y_I = \tilde{\phi}^H \tilde{\phi} \tilde{h}_{v_I} + \tilde{\phi}^H z_I = \tilde{h}_{v_I} + z_I \in \mathbb{C}^{MK \times 1} \quad (8)$$

$$\tilde{y}_t = \tilde{\phi}^H y_t = \tilde{\phi}^H \tilde{\phi} \tilde{h}_v + \tilde{\phi}^H z_t = \tilde{h}_v + z_t \in \mathbb{C}^{MK \times 1} \quad (9)$$

گام ۲) بدست آوردن زیرفضای سیگنال مطلوب $\tilde{\phi}_D$ یا زیرفضای پوشش داده شده توسط بردارهای توأم دنباله پایلوت و پرتو مجازی کاربران سلول هدف متناظر با Γ تا از M تا بردار توأم دنباله پایلوت و پرتو مجازی غالب یافت شده در گام ۱. (برای جزئیات و اثبات ها به [۱۹] مراجعه شود).

گام ۳) انجام تصویر سیگنال دریافت شده BS بر روی زیرفضای پوشش داده شده در گام دوم به منظور استخراج بردارهای کانال مجازی برای کاربران متفاوت.

$$\hat{h}_{v_D} = \tilde{\phi}_D^H y_t \quad (10)$$

گام ۴) بازگشت از حوزه مجازی به حوزه حقیقی به منظور بدست آوردن بردارهای کانال فیزیکی کاربران مختلف.

۳-۲ روش تخصیص دنباله پایلوت

در این قسمت در ابتدا در بخش ۳-۱ به ارائه ساختار کلی روش تخصیص دنباله پایلوت در محاسبه هزینه های تخصیص برپایه بردارهای کانال کلی کاربران پرداخته می شود. سپس در بخش ۳-۲ به منظور ردیابی تغییرات بردار کانال در هر بلوک نسبت به بلوک قبلی که از مدل کانال گوس-مارکوف برای تغییرات کانال و مدل Jakes [۱۶] برای همبستگی زمانی استفاده شده به ارائه راهکار سازگار پرداخته خواهد شد.

همبستگی جمع بردارهای کانال کاربران تداخلی سلولهای مجاور مطابق رابطه (۱۴) است. ذکر این نکته در رابطه (۱۴) ضروری است که بردار کانال کاربران مختلف در سلولهای گوناگون از یکدیگر مستقل می‌باشند.

$$R_{V_I} = \begin{bmatrix} E \left[\sum_{\ell=2}^L h_{v_{1,\ell}} h_{v_{1,\ell}}^H \right] & \cdots & E \left[\sum_{\ell=2}^L h_{v_{1,\ell}} h_{v_{K,\ell}}^H \right] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ E \left[\sum_{\ell=2}^L h_{v_{K,\ell}} h_{v_{K,\ell}}^H \right] & \cdots & E \left[\sum_{\ell=2}^L h_{v_{K,\ell}} h_{v_{K,\ell}}^H \right] \end{bmatrix} \quad (14)$$

بطوریکه بلوک z ام بر روی قطر اصلی ماتریس R_{V_I} برابر است با:

$$\Psi_{V_j} = E \left[\sum_{\ell=2}^L h_{v_{j,\ell}} h_{v_{j,\ell}}^H \right] = \sum_{\ell=2}^L E \left[h_{v_{j,\ell}} h_{v_{j,\ell}}^H \right] = \sum_{\ell=2}^L R_{v_{j,\ell}} \quad (15)$$

با توجه به ویژگی $\tilde{\phi}^H \tilde{\phi} = I$ در فرمول‌بندی معرفی‌شده برای مدل سیستم پیشنهادی، R_{V_I} مطابق رابطه (۱۶) بدست می‌آید:

$$R_{V_I} = \tilde{\phi}^H R_{y_I} \tilde{\phi} - \sigma^2 I \quad (16)$$

در نهایت Ψ_{V_j} به عنوان جمع ماتریس همبستگی بردار کانال کلیه کاربران تداخلی z ام در سلولهای تداخلی مجاور سلول هدف به صورت بلوک z ام از قطر اصلی ماتریس R_{V_I} در رابطه (۱۶) با ابعاد $M \times M$ بدست می‌آید.

در ادامه به نحوه محاسبه پارامتر w_i پرداخته می‌شود. در این قسمت با ارسال دنباله پایلوت از تمام کاربران تمام سلول‌ها (که ما آن را وضعیت بعد از درخواست تخصیص $(AR)^{+1}$) منابع ارسال فراسو می‌نامیم) به محاسبه w_i خواهیم پرداخت. در این حالت بدون از دست دادن کلیت مسئله با اختصاص دنباله پایلوت ϕ_1 به کاربر اول، ϕ_2 به کاربر دوم و ... ϕ_K به کاربر K ام رابطه (۶) را خواهیم داشت. در ادامه با ضرب از سمت چپ رابطه (۶) در $\tilde{\phi}^H$ و محاسبه ماتریس همبستگی بردار حاصله، رابطه (۱۸) بدست می‌آید. قابل ذکر است مشخصات ماتریس همبستگی نویز $\tilde{\phi}^H z_t$ مطابق رابطه (۱۷) بدون تغییر باقی می‌ماند.

$$R_{(\tilde{\phi}^H z_t)} = E \left[\tilde{\phi}^H z_t z_t^H \tilde{\phi} \right] = \tilde{\phi}^H E \left[z_t z_t^H \right] \tilde{\phi} = \sigma^2 I (\tilde{\phi}^H \tilde{\phi}) = \sigma^2 I \quad (17)$$

$$\begin{aligned} R_{(\tilde{\phi}^H y_t)} &= E \left[\tilde{\phi}^H y_t y_t^H \tilde{\phi} \right] = \\ &= \tilde{\phi}^H E \left[y_t y_t^H \right] \tilde{\phi} = \left(\tilde{\phi}^H \tilde{\phi} \right) E \left[\tilde{h}_v \tilde{h}_v^H \right] \left(\tilde{\phi}^H \tilde{\phi} \right) + \sigma^2 I = \\ &= R_v + \sigma^2 I \in \mathbb{C}^{MK \times MK} \end{aligned} \quad (18)$$

در این صورت مشابه رابطه (۱۶) می‌توان R_v را با استفاده از رابطه (۱۹) بدست آورد.

$$R_v = R_{(\tilde{\phi}^H y_t)} - \sigma^2 I \quad (19)$$

بطوریکه بلوک z ام بر روی قطر اصلی ماتریس R_v برابر است با:

یعنی این که اگر کلیه زوایای تداخلی در بازه زوایای مطلوب نباشد، با افزایش تعداد آنتن‌ها به سمت بی نهایت (یعنی در سیستم MIMO انبوه) تداخل به سمت صفر میل خواهد کرد. همچنین در [۱۵] اثبات می‌شود هزینه‌های تخصیص حقیقی رابطه (۱۱) و هزینه‌های تخصیص مجازی

مجازی $\tilde{c}_{ij} = \sum_{m=1}^M w_i^H \Psi_{V_j} w_i$ در مسئله تخصیص هوشمند دنباله پایلوت پیشنهادی با هم برابر می‌باشند. در رابطه $w_i = \tilde{A}_r^H a_r(\theta_q^i)$ ، \tilde{c}_{ij} اشاره به تصویر بردار هدایت $a_r(\theta_q^i)$ بر روی پاسخ مجازی ثابت $\tilde{A}_r = [a_r(\tilde{\theta}_1), \dots, a_r(\tilde{\theta}_m), \dots, a_r(\tilde{\theta}_M)]$ دارد.

همچنین Ψ_{V_j} ، به صورت $\Psi_{V_j} = \sum_{\ell=2}^L R_{v_{j,\ell}}$ است که در آن سلول اول ($\ell=1$) به عنوان سلول هدف در نظر گرفته شده است. همچنین

$R_{v_{j,\ell}} = E \left[h_{v_{j,\ell}} h_{v_{j,\ell}}^H \right]$ نیز ماتریس همبستگی مجازی بردار کانال مجازی کاربر تداخلی z ام در سلول ℓ ام است. برای محاسبه هزینه‌های تخصیص مجازی \tilde{c}_{ij} ، از آنجایی که هیچ کدام از پارامتر Ψ_{V_j} و w_i به عنوان سیگنال‌های ورودی به آرایه BS نمی‌باشند نحوه محاسبه این پارامترها به صورت زیر توصیف می‌شود. در ابتدا برای محاسبه ماتریس همبستگی مجازی کانال کاربران یعنی Ψ_{V_j} فرض می‌شود ما در سلول هدف (سلول اول) هستیم و به تعدادی از کاربران دنباله پایلوت اختصاص داده شده است و برای تعداد دیگر عمل تخصیص می‌خواهد طوری صورت پذیرد که کمترین تداخل را داشته باشیم. در این صورت در حالتی که به برخی یا در بدترین حالت به تمام کاربران سلول هدف، دنباله پایلوت اختصاص داده نشده است، BS می‌تواند اطلاعات همبستگی کانال مجازی کلیه کاربران تداخلی سلولهای دیگر که در حال ارسال دنباله پایلوت بودند را بیابد. ما این شرایط را در سیستم وضعیت قبل از درخواست تخصیص $(BR)^{+1}$ منابع ارسال فراسو می‌نامیم. قابل ذکر است فرمول‌بندی نیز بر اساس این سناریوی کلی که قرار است به تمام کاربران سلول هدف تخصیص هوشمند دنباله پایلوت صورت پذیرد انجام پذیرفته است.

حال به منظور محاسبه Ψ_{V_j} ، در ابتدا سیگنال تداخلی $y_I \in \mathbb{C}^{M \tau \times 1}$ مطابق رابطه (۷) بدست می‌آید و در ادامه ماتریس همبستگی سیگنال تداخلی $R_{y_I} \in \mathbb{C}^{M \tau \times M \tau}$ مطابق رابطه (۱۳) بدست می‌آید.

$$R_{y_I} = E \left[y_I y_I^H \right] = \tilde{\phi} R_{V_I} \tilde{\phi}^H + R_{z_I} \in \mathbb{C}^{M \tau \times M \tau} \quad (13)$$

بطوریکه R_{z_I} ماتریس همبستگی نویز تداخلی دارای توزیع گوسی به صورت $R_{z_I} = E \left[z_I z_I^H \right] = \sigma^2 I$ و نیز

$$R_{v_I} = E \left[\tilde{h}_v \tilde{h}_v^H \right] = E \left[\left(\sum_{\ell=2}^L h_{v_{\ell}} \right) \left(\sum_{\ell=2}^L h_{v_{\ell}} \right)^H \right]$$

ماتریس

۲-۳- الگوریتم محاسبه سازگار هزینه‌های مجازی مسئله تخصیص

به‌منظور محاسبه سازگار هزینه‌های تخصیص مجازی در الگوریتم تخصیص هوشمند دنباله پایلوت می‌توان به‌صورت زیر عمل کرد. در- حالت کلی مقدار هزینه تخصیص مجازی دنباله پایلوت ϕ_j به کاربر i ام سلول هدف در بلوک n ام به صورت رابطه (۲۲) بیان می‌شود،

$$\tilde{c}_{ij}^{(n)} = \sum_{m=1}^M \mathbf{w}_i^{H(n)} \Psi_{v_j}^{(n)} \mathbf{w}_i^{(n)} \quad (22)$$

که $\Psi_{v_j}^{(n)}$ ماتریس همبستگی مجازی کلیه کاربران داخلی در سلول- های مجاور دارای دنباله پایلوت ϕ_j در بلوک n ام و $\mathbf{w}_i^{(n)}$ ، تصویر بردار هدایت بر روی پاسخ مجازی ثابت $\tilde{\mathbf{A}}_r$ در بلوک n ام است. از آنجایی که دو پارامتر تأثیرگذار در محاسبه هزینه‌های تخصیص در کانال متغیر با زمان به طور پیوسته در هر بلوک تغییر پیدا می‌کنند، روش پیشنهادی نیز باید تغییرات این دو پارامتر را دنبال کند. از آنجایی که هیچ کدام از پارامتر $\Psi_{v_j}^{(n)}$ و $\mathbf{w}_i^{(n)}$ به عنوان سیگنال‌های

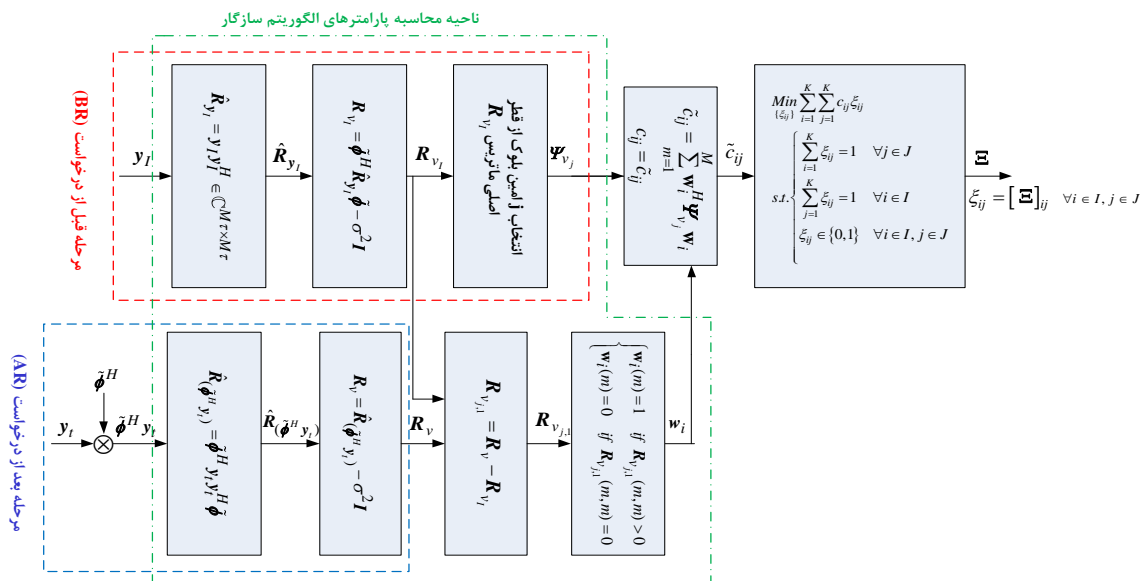
$$\Psi_{v_j}' = E \left[\sum_{\ell=1}^L h_{v_j, \ell} h_{v_j, \ell}^H \right] = \sum_{\ell=1}^L E \left[h_{v_j, \ell} h_{v_j, \ell}^H \right] = \sum_{\ell=1}^L R_{v_j, \ell} \quad (20)$$

در نهایت $R_{v_j, 1}$ به عنوان ماتریس همبستگی بردار کانال کاربران سلول هدف به صورت تفاضل ماتریس‌های R_{v_j} و $R_{v_j, 1}$ و یا به طور متناظر تفاضل هر کدام از بلوک‌های Ψ_{v_j}' با ابعاد $M \times M$ بر روی قطر اصلی ماتریس‌های R_{v_j} و $R_{v_j, 1}$ در رابطه‌های (۱۶) و (۱۹) برای هر کاربر محاسبه می‌شوند. در این حالت \mathbf{w}_i به صورت زیر بدست می‌آید:

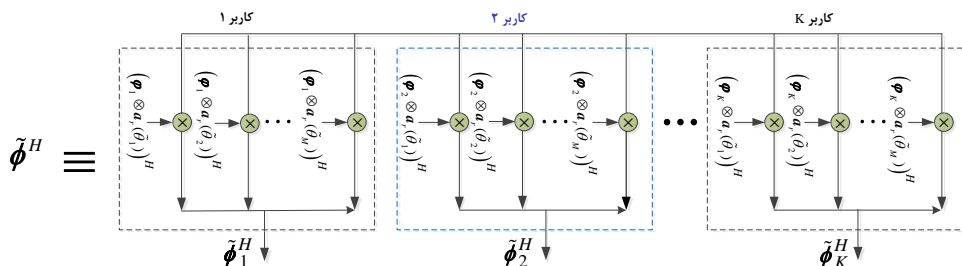
$$\begin{cases} \mathbf{w}_i(m) = 1 & \text{if } R_{v_j, 1}(m, m) > 0 \quad \forall i = j = 1: K \\ \mathbf{w}_i(m) = 0 & \text{if } R_{v_j, 1}(m, m) = 0 \quad \forall i = j = 1: K \end{cases} \quad (21)$$

قابل ذکر است در رابطه بالا اندیس شماره کاربر i و شماره دنباله پایلوت j یکسان است. زیرا با در نظر گرفتن این فرض که دنباله پایلوت ϕ_1 به کاربر اول، ϕ_2 به کاربر دوم و ... ϕ_K به کاربر K ام اختصاص داده شده است به محاسبه انرژی دریافتی بردار کانال کاربران سلول هدف پرداخته شد.

بدیهی است این انرژی با تغییر دنباله پایلوت تغییر نمی‌کند. در شکل (۱) بلوک دیاگرام روش پیشنهادی تخصیص هوشمند دنباله پایلوت پیشنهادی ارائه شده است. همچنین در شکل (۲) نمایش تکنیک توأم جستجوی پرتومجازی و دنباله پایلوت (اثر ماتریس $\tilde{\phi}^H$) نشان داده شده است.



شکل (۱): بلوک دیاگرام روش پیشنهادی برای تخصیص هوشمند دنباله پایلوت در سیستم MIMO انبوه چندسلولی



شکل (۲): نمایش تکنیک توأم جستجوی پرتومجازی و دنباله پایلوت (اثر ماتریس $\tilde{\phi}^H$) در شکل (۱)

Inputs: $\Psi_{v_j}^{(n)}, R_{v_j,1}^{(n)}$
 Aim: Compute $\tilde{c}_{ij}^{(n)}$
 Psudo code for n th channel use:
 $\tilde{c}_{ij}^{(n)} = \text{zeros}(K, K)$
 for $i = 1 : K$
 for $j = 1 : K$
 for $m = 1 : M$
 $\mathbf{w}_i^{(n)} = [0 \ \dots \ 0]^T \text{ \%size: } M \times 1$
 $\% \mathbf{w}_i^{(n)} = [w_i^{(n)}(1), \dots, w_i^{(n)}(m), \dots, w_i^{(n)}(M)]^T$
 if $R_{v_j,1}^{(n)}(m, m) > 0$
 $w_i^{(n)}(m) = 1$
 end
 $\tilde{c}_{ij}^{(n)} = \tilde{c}_{ij}^{(n)} + \mathbf{w}_i^{H(n)} \Psi_{v_j}^{(n)} \mathbf{w}_i^{(n)}$
 end
 end
 end

جدول (۲): الگوریتم محاسبه سازگار وزن های تخصیص مجازی $\tilde{c}_{ij}^{(n)}$

ورودی ها: $y_I(n)$ (مطابق رابطه (۷) در وضعیت BR) و $y_I(n)$ (مطابق رابطه (۶) در وضعیت AR)

هدف: محاسبه سازگار وزن های تخصیص $\tilde{c}_{ij}^{(n)} = \sum_{m=1}^M \mathbf{w}_i^{H(n)} \Psi_{v_j}^{(n)} \mathbf{w}_i^{(n)}$

گام ۱: محاسبه سیگنال تداخلی دریافتی در وضعیت BR و عدم تخصیص دنباله پایلوت برای ایشان توسط BS سلول هدف مطابق رابطه

$$y_I(n) = \sum_{\ell=2}^L \sum_{i=1}^K x_{i,\ell}(n) + z_I(n) = \tilde{\phi} h_{v_I}(n) + z_I(n) \quad (7)$$

گام ۲: محاسبه ماتریس همبستگی سیگنال تداخلی دریافتی R_{y_I} در وضعیت BR مطابق رابطه (۱۳):

$$R_{y_I} = E[y_I y_I^H] = \tilde{\phi} R_{v_I} \tilde{\phi}^H + R_{z_I} \in \mathbb{C}^{M\tau \times M\tau}$$

تذکر: به منظور محاسبه تخمین سازگار $\hat{R}_{y_I}^{(n)}$ در بلوک n ام، از روابط

$$\hat{R}_{y_I}^{(1)} = y_I(1) y_I^H(1) \quad (24) \text{ و } (25) \text{ استفاده می شود:}$$

$$\hat{R}_{y_I}^{(n)} = \frac{1}{n} \tilde{R}_{y_I}^{(n)} \quad \left\{ \begin{array}{l} \tilde{R}_{y_I}^{(n)} = \sum_{b=1}^n y_I(b) y_I^H(b) \\ \tilde{R}_{y_I}^{(n)} = \tilde{R}_{y_I}^{(n-1)} + y_I(n) y_I^H(n) \end{array} \right.$$

گام ۳: محاسبه تخمین ماتریس همبستگی بردار کانال کلیه کاربران

$$\hat{R}_{v_I}^{(n)} = \tilde{\phi}^H \hat{R}_{y_I}^{(n)} \tilde{\phi} - \sigma^2 I \quad (23):$$

در این صورت $\Psi_{v_j}^{(n)}$ بلوک j ام بر روی قطر اصلی ماتریس $\hat{R}_{v_I}^{(n)}$ با ابعاد $M \times M$ است.

گام ۴: محاسبه سیگنال دریافتی از تمام کاربران تمام سلول ها در

ورودی به آرایه BS نمی باشند، بلکه y_I و y_I به عنوان سیگنال های ورودی در مرحله قبل از درخواست BR یعنی مرحله ارسال دنباله پایلوت کاربران تداخلی و نیز مرحله AR گام ارسال دنباله پایلوت تمام کاربران در تمام سلول ها می باشند. در این صورت برای محاسبه ماتریس همبستگی مجازی کانال کاربران در بلوک n ام یعنی $\Psi_{v_j}^{(n)}$ می توان به صورت زیر عمل نمود. اگر $y_I(n)$ مطابق رابطه (۷)، بردار سیگنال دریافتی سیگنال های کاربران تداخلی سلول های مجاور در مرحله BR در بلوک n ام باشد، در این صورت مشابه رابطه (۱۳)، می توان به رابطه (۲۳) دست یافت.

$$R_{v_I}^{(n)} = \tilde{\phi}^H R_{y_I}^{(n)} \tilde{\phi} - \sigma^2 I \quad (23)$$

در رابطه (۲۳)، $R_{y_I}^{(n)}$ ماتریس همبستگی سیگنال های تداخلی دریافتی در مرحله BR و $R_{v_I}^{(n)}$ ماتریس همبستگی بردارهای کانال مجازی در بلوک n ام می باشند. به منظور محاسبه $R_{v_I}^{(n)}$ به صورت زیر تخمین می شود. در ابتدا برای تخمین بلوک اول $\hat{R}_{y_I}^{(1)}$ رابطه (۲۴) بدست آورده می شود.

$$\hat{R}_{y_I}^{(1)} = y_I(1) y_I^H(1) \quad (24)$$

سپس برای بلوک n ام، $\hat{R}_{y_I}^{(n)}$ مطابق رابطه (۲۵) بدست می آید.

$$\hat{R}_{y_I}^{(n)} = \frac{1}{n} \tilde{R}_{y_I}^{(n)} \quad \left\{ \begin{array}{l} \tilde{R}_{y_I}^{(n)} = \sum_{b=1}^n y_I(b) y_I^H(b) \\ \tilde{R}_{y_I}^{(n)} = \tilde{R}_{y_I}^{(n-1)} + y_I(n) y_I^H(n) \end{array} \right. \quad (25)$$

که در آن $\hat{R}_{y_I}^{(n)}$ تخمین ماتریس همبستگی سیگنال های دریافتی کاربران تداخلی به آرایه BS در بلوک n ام با بهره برداری از تمام بلوک های قبلی تاکنون است. در نهایت با جایگزینی رابطه (۲۵) در رابطه (۲۳)، تخمین ماتریس همبستگی مجازی بردارهای کانال کاربران تداخلی مطابق رابطه (۲۳) به صورت سازگار محاسبه می شود. قابل ذکر است $\Psi_{v_j}^{(n)}$ نیز به عنوان j امین بلوک از قطر اصلی ماتریس $\hat{R}_{v_I}^{(n)}$ است. در نهایت به منظور محاسبه سازگار هزینه های تخصیص مجازی شبه کد جدول (۱) ارائه شده است.

جدول (۱): شبه کد محاسبه سازگار هزینه های تخصیص مجازی \tilde{c}_{ij}

در رابطه (۲۶)، P تعداد کل پراکنده‌ها بوده و عددی فرد است که معمولاً $P > 10$ است. در شبیه‌سازی‌ها $P=11$ در نظر گرفته شد، یعنی سیگنال‌های کاربر i ام موجود در سلول ℓ ام از ۱۱ مسیر مختلف با جهات تصادفی مختلف به آرایه BS وارد می‌شوند. θ_0 زاویه مرکزی است که پراکنده‌ها در جهات اطراف آن به آرایه فرود می‌آیند. θ_0 نیز به صورت یک توزیع تصادفی یکنواخت در بازه (0-180) مدل گردیده است. $\theta_{r,p} = \frac{P}{P-1} \theta_{BW}$ زاویه مسیر p ام برای پراکنده p ام است که به آرایه وارد می‌شود. θ_{BW} ، محدوده زاویه‌ای است که در اطراف θ_0 وجود دارد که در شبیه‌سازی‌ها برابر ۵ درجه در نظر گرفته شد. فاصله بین دو آنتن مجاور در آرایه آنتنی است. قابل ذکر است در تمام شبیه‌سازی‌ها برای تمام کاربران در همه سلول‌ها، دو زاویه مرکزی تصادفی انتخاب گردید که پراکنده‌ها در اطراف آن به آرایه وارد می‌شوند (این فرض براساس مدل فیزیکی کانال انتشار کاربران در سیستم MIMO انبوه انتخاب گردیده است). همچنین در شبیه‌سازی مدل کانال گوس-مارکوف رابطه (۱)، از مدل Jakes برای همبستگی زمانی استفاده شده است که در آن $\eta_{i,\ell} = J_0(2\pi f_{D_{i,\ell}} T)$ ضریب همبستگی بین دو بلوک محوشدگی متوالی، $J_0(\cdot)$ تابع بسل مرتبه صفر، $f_{D_{i,\ell}}$ فرکانس داپلر برای کاربر i ام در سلول ℓ ام و T فاصله زمانی ثابت بودن کانال بوده که برابر 5ms در نظر گرفته شد [۱۶]. همچنین فرکانس داپلر برابر $f_{D_{i,\ell}} = v_{i,\ell} f_c / c$ است. بطوریکه $v_{i,\ell}$ سرعت کاربر i ام در سلول ℓ ام، c سرعت نور و f_c فرکانس حامل است [۱۶]. نحوه تولید ماتریس دنباله‌های پایلوت کاربران مختلف در هر سلول نیز از رابطه (۲۷) پیروی می‌کند:

$$[\Phi]_{u,i} = \frac{1}{\sqrt{\max(\tau, K)}} \left[e^{-j2\pi \frac{(u-1)(i-1)}{\max(\tau, K)}} \right] \quad (27)$$

در این صورت دنباله‌های پایلوت کاربران مختلف در هر سلول بر هم متعامدند، اما این دنباله‌ها به طور یکسان در تمام سلول‌ها تکرار می‌شوند. نوع آرایه آنتنی BS، آرایه خطی یکنواخت^{۲۲} با فاصله گذاری بین آنتنی یکسان $\lambda/2$ در نظر گرفته شد. تعداد $L=2$ سلول در نظر گرفته شد بطوری که در هر سلول $M=128$ آنتن و نیز $K=7$ کاربر وجود دارد. طول دنباله پایلوت نیز $\tau=7$ در نظر گرفته شد. قدرت سیگنال تداخلی برای هر کاربر در سلول‌های مجاور برابر قدرت سیگنال کاربران مطلوب و نرمالیزه واحد در نظر گرفته شد. به منظور مقایسه توانایی روش‌های مختلف در حذف اثر آلودگی پایلوت و تخمین کانال از معیار خطای تخمین نرمالیزه شده بین بردار کانال واقعی و تخمین زده شده مطابق رابطه (۲۸) استفاده می‌شود:

$$\text{NMSE} = 10 \log_{10} \left(\sum_{i=1}^K \frac{\|\hat{h}_{i,\ell} - h_{i,\ell}\|_2^2}{\|h_{i,\ell}\|_2^2} \right) \quad (28)$$

وضعیت AR مطابق رابطه (۶): $y_t(n) = \tilde{\phi}^H h_v(n) + z_t(n) \in \mathbb{C}^{M \times 1}$
 گام ۵: ضرب از سمت چپ رابطه (۶) گام ۴ در $\tilde{\phi}^H$ و محاسبه ماتریس همبستگی بردار حاصله توسط رابطه (۱۸):

$$\begin{aligned} R_{(\tilde{\phi}^H y_t)} &= E[\tilde{\phi}^H y_t y_t^H \tilde{\phi}] = \\ &= \tilde{\phi}^H E[y_t y_t^H] \tilde{\phi} = (\tilde{\phi}^H \tilde{\phi}) E[\tilde{h}_v \tilde{h}_v^H] (\tilde{\phi}^H \tilde{\phi}) + \sigma^2 I = \\ &= R_v + \sigma^2 I \in \mathbb{C}^{MK \times MK} \end{aligned}$$

تذکر: به منظور محاسبه تخمین سازگار $\hat{R}_{(\tilde{\phi}^H y_t)}^{(n)}$ در بلوک n ام از روابط زیر استفاده می‌شود:

$$\hat{R}_{(\tilde{\phi}^H y_t)}^{(1)} = \tilde{\phi}^H y_t(1) y_t^H(1) \tilde{\phi}$$

$$\hat{R}_{(\tilde{\phi}^H y_t)}^{(n)} = \frac{1}{n} \sum_{b=1}^n \tilde{\phi}^H y_t(b) y_t^H(b) \tilde{\phi} = \tilde{\phi}^H \left(\frac{1}{n} \sum_{b=1}^n y_t(b) y_t^H(b) \right) \tilde{\phi}$$

گام ۶: محاسبه تخمین ماتریس همبستگی بردار کانال کلیه کاربران شامل کاربران تداخلی و مطلوب در سلول هدف مطابق رابطه زیر:

$$\hat{R}_v^{(n)} = \hat{R}_{(\tilde{\phi}^H y_t)}^{(n)} - \sigma^2 I$$

در این صورت $\Psi_{v_j}^{(n)}$ بلوک زام بر روی قطر اصلی ماتریس $\hat{R}_v^{(n)}$ با ابعاد $M \times M$ است.

گام ۷: انجام مراحل زیر:

- محاسبه $R_{v_{j,1}}^{(n)}$ به صورت تفاضل ماتریس‌های $\Psi_{v_j}^{(n)}$ و $\Psi_{v_j}^{(n)}$ با ابعاد $M \times M$ ، محاسبه شده در گام‌های ۳ و ۶.

- محاسبه وزن‌های $w_i^{(n)}$ در بلوک n ام با استفاده از رابطه (۲۱):

$$\begin{cases} w_i^{(n)}(m) = 1 & \text{if } R_{v_{j,1}}^{(n)}(m, m) > 0 \\ w_i^{(n)}(m) = 0 & \text{if } R_{v_{j,1}}^{(n)}(m, m) = 0 \end{cases}$$

گام ۸: محاسبه وزن‌های تخصیص مجازی \tilde{z} از جدول شماره ۱

استفاده از پارامترهای $\Psi_{v_j}^{(n)}$ و $w_i^{(n)}$ محاسبه شده در گام‌های ۳ و ۷.

۴- نتایج شبیه‌سازی

در این قسمت به بررسی شبیه‌سازی و کارایی روش ارائه شده در حذف آلودگی پایلوت و تخمین کانال برای سیستم MIMO انبوه پرداخته می‌شود. در ابتدا نحوه مدل‌سازی برای کانال کاربر i ام در سلول ℓ ام که در آن سیگنال‌های تصادفی از P مسیر مختلف می‌آیند بیان می‌شود. یک سیستم MIMO انبوه دارای L سلول که در هر سلول یک BS با M آنتن و K کاربر وجود دارد در نظر گرفته شده است. بردار کانال تصادفی کاربر i ام در سلول ℓ ام دارای توزیع $h_{i,\ell} \sim CN(0, (R_{\theta_r})_{i,\ell})$ است که 0 بردار میانگین توزیع از ابعاد $M \times 1$ و $(R_{\theta_r})_{i,\ell}$ ماتریس همبستگی فضایی بردار کانال کاربر i ام موجود در سلول ℓ ام است که عنصر (m, n) ام آن به صورت رابطه (۲۶) مدل می‌شود [۲۴]:

$$[(R_{\theta_r})_{i,\ell}]_{m,n} = \frac{1}{P} \sum_{p=-(P-1)/2}^{(P-1)/2} e^{-j2\pi(n-m)\frac{d}{\lambda} \cos(\theta_0 + \theta_{r,p})} \quad (26)$$

خواهد کرد. این مهم در سناریوی دوم با افزایش سرعت کاربران مطلوب و تداخلی به ترتیب به $v_{i,\ell} = 5 \text{ km/h}$ و $v_{i,\ell} = 10, 15 \text{ km/h}$ به خوبی توسط روش پیشنهادی حفظ شده است و در شکل (۴) به خوبی نشان داده شده است.

در ادامه ارزیابی عملکرد نحوه تغییرات منحنی خطای نرمالیزه شده و نرخ قابل حصول بر حسب بلوک روش پیشنهادی در مقایسه با حالت بدون هوشمندسازی تخصیص دنباله پایلوت [۱۹]، با هوشمندسازی اما بدون محاسبه سازگار وزن‌های تخصیص برای کانال گوس-مارکف [۱۵] و نیز روش LS در سناریوهای سرعتی متفاوت (که مقدار همبستگی زمانی بردار کانال کاربران مختلف را تداعی می‌کند) توسط شکل‌های (۵) و (۶) نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود روش‌های LS و روش تخمین کانال بر پایه زیرفضا [۱۹] به ترتیب با افزایش شماره بلوک بدون تفاوت و با افزایش خطا مواجه شده‌اند که امری قابل پیش بینی است. زیرا بدون در نظر گرفتن تخصیص هوشمند دنباله پایلوت، آلودگی پایلوت و متعاقباً خطای تخمین کانال با افزایش شماره بلوک در سناریوهای مختلف تحرک کاربران در شبکه سلولی اضافه می‌شود. همچنین روش [۱۵] بدلیل عدم محاسبه سازگار وزن‌های تخصیص و ردیابی تغییرات کانال گوس-مارکف نتوانسته است به همگرایی برسد و خطای نرمالیزه شده کانال مدام در نوسانات شدید است و عملکرد پایین تری نسبت به روش سازگار دارد.

قابل ذکر است با مراجعه به شکل (۵) مشاهده می‌شود در روش پیشنهادی محاسبه سازگار هزینه‌های تخصیص حتی در بدترین سناریو که در آن کاربران سلول هدف (سلول اول) دارای سرعت $v_{i,\ell} = 5 \text{ km/h}$ و کاربران سلول تداخلی دارای سرعت‌های $v_{i,\ell} = 10, 15 \text{ km/h}$ می‌باشند، با افزایش شماره بلوک خطای تخمین کانال به سرعت کاسته شده و قدرت تخمین بهبود می‌یابد. در شکل (۶) نیز به بررسی نحوه تغییرات نرخ قابل حصول با افزایش شماره بلوک در الگوریتم سازگار محاسبه وزن‌های تخصیص پیشنهادی با وجود کانال دارای همبستگی زمانی گوس-مارکف پرداخته شده است. در این شکل نحوه عملکرد روش پیشنهادی در محاسبه سازگار وزن‌های تخصیص و حل مسأله تخصیص نهایی و افزایش محسوس نرخ قابل حصول پیشنهادی با افزایش شماره بلوک و کاهش آن در شرایط بدون وجود هوشمندسازی تخصیص دنباله پایلوت ملاحظه می‌شود.

در رابطه (۲۸)، $\hat{h}_{i,\ell}$ تخمین $h_{i,\ell}$ است. با استفاده از گیرنده نسبت حداکثری^{۴۳} (MRC) برای هر کاربر در سلول هدف، نرخ قابل حصول توسط رابطه (۲۹) بیان می‌شود [۲۵]:

$$C = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \log_2(1 + \text{SINR}_i) \quad (29)$$

که SINR_i نسبت سیگنال به نویز و تداخل مؤثر برای کاربر i ام بعد از گیرنده MRC است که به صورت رابطه (۳۰) بیان می‌شود،

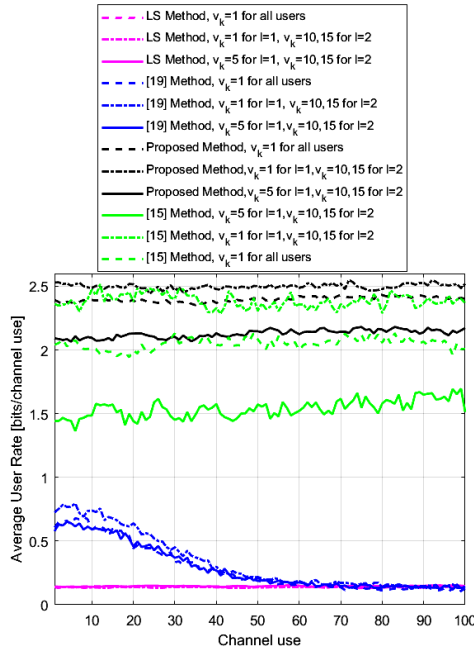
$$\text{SINR}_i = \frac{E\left\{|s_i|^2 |v_i^H h_{i,1}|^2\right\}}{\sum_{k \neq i} \sum_{\ell \neq 1} E\left\{|s_k|^2 |v_i^H h_{k,\ell}|^2\right\} + E\left\{|v_i^H n|^2\right\}} \quad (30)$$

در رابطه (۳۰)، $v_i = \hat{h}_{i,1}$ ، بردار آشکارساز خطی برای کاربر i ام در سلول هدف در گیرنده MRC است، s_i سیگنال ارسال شده برای کاربر i ام و نویز n به صورت $n \sim CN(0, \sigma^2 I)$ مدل می‌شود. علاوه بر این، عملکرد روش‌های متفاوت با فرض برابری $(R_{\theta_r})_{3,1} = (R_{\theta_r})_{4,2}$ و $(R_{\theta_r})_{7,1} = (R_{\theta_r})_{7,2}$ مورد سنجش قرار گرفته شده است. این بدان معناست که ماتریس همبستگی کانال کاربر سوم در سلول اول برابر ماتریس همبستگی چهارم در سلول دوم است و همچنین ماتریس همبستگی کاربر هفتم در سلول‌های اول و دوم یکسان در نظر گرفته شده است. در این شرایط آلودگی پایلوت بسیار شدید بوده و عملکرد روش‌های مختلف در چنین شرایطی مقایسه شده است.

به منظور مدل‌سازی همبستگی زمانی سه سناریوی مختلف باتوجه به سرعت کاربران در شبکه در نظر گرفته شد. در سناریوی اول فرض شد کلیه کاربران در تمام سلول‌ها (سلول هدف و تداخلی) با سرعت $v_{i,\ell} = 1 \text{ km/h}$ در حرکت باشند. این حالت ضریب همبستگی زمانی $\eta_{i,\ell} = 0.986$ است. در سناریوی دوم سرعت کاربران سلول هدف $(L=1)$ بدون تغییر برابر $v_{i,\ell} = 1 \text{ km/h}$ باقی ماند و سرعت کاربران سلول تداخلی برابر $v_{i,\ell} = 10 \text{ km/h}$ برای کاربران فرد یعنی $i=1,3,5,7$ و نیز به صورت $v_{i,\ell} = 15 \text{ km/h}$ برای کاربران زوج یعنی $i=2,4,6$ تعیین گردید. در این شرایط ضریب همبستگی زمانی به ترتیب برابر $\eta_{i,\ell} = 0.8721$ برای کاربران دارای سرعت $v_{i,\ell} = 10 \text{ km/h}$ و $\eta_{i,\ell} = 0.7239$ برای کاربران دارای سرعت $v_{i,\ell} = 15 \text{ km/h}$ است. در سناریوی سوم نیز سرعت کاربران سلول اول به صورت $v_{i,\ell} = 5 \text{ km/h}$ تعیین شد و سرعت کاربران سلول تداخلی مشابه سناریو دوم برابر $v_{i,\ell} = 10 \text{ km/h}$ و $v_{i,\ell} = 15 \text{ km/h}$ تعیین گردید.

در شکل (۳) نحوه تغییرات هزینه تخصیص پس از اختصاص دنباله پایلوت در مسأله بهینه‌سازی تخصیص بر حسب بلوک برای سناریوی $v_{i,\ell} = 1 \text{ km/h}$ برای تمام کاربران تمام سلول‌ها و نیز برای SNRهای مختلف مشاهده می‌شود. همانطور که در این شکل مشهود است در سیگنال به نویزهای مختلف پس از تعداد محدودی بلوک به سرعت الگوریتم همگرا شده و مقدار هزینه تخصیص یافته بهینه نهایی در مسأله تخصیص هوشمند دنباله پایلوت به مقدار ماندگار خود میل

شکل (۵): منحنی خطای نرمالیزه شده تخمین برحسب بلوک برای سرعت‌های متفاوت کاربران در روش‌های مختلف برای $SNR = 15dB$



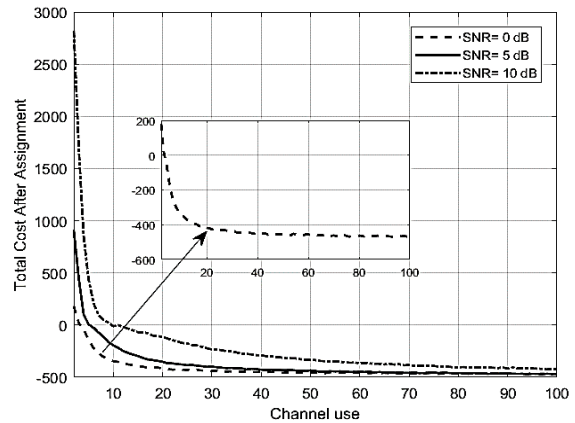
شکل (۶): منحنی نرخ قابل حصول برحسب بلوک برای سرعت‌های متفاوت کاربران در روش‌های مختلف برای $SNR = 15dB$

۵- نتیجه‌گیری

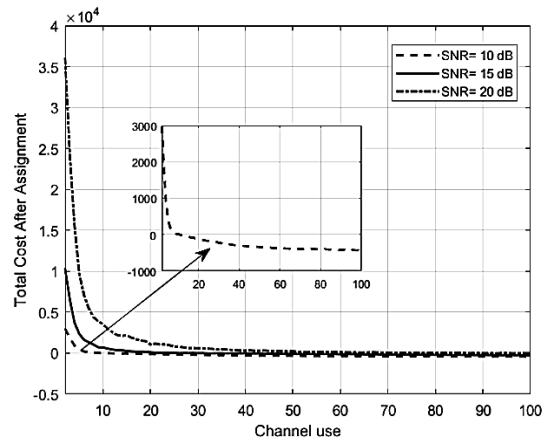
در این مقاله یک روش تخصیص هوشمند و سازگار دنباله پایلوت برای حل مشکل آلودگی پایلوت در سیستم MIMO انبوه ارائه گردید. در روش پیشنهادی نخست تخصیص دنباله پایلوت به صورت یک مسئله تخصیص صفر و یک مدل‌سازی گردید. سپس با استفاده از مدل‌سازی کانال مجازی یک راه‌حل جایگزین و ساده جهت محاسبه وزن‌های تخصیص ارائه شد بطوریکه وزن‌های تخصیص مبتنی بر الگوریتم سازگار محاسبه و ردیابی می‌شود. روش پیشنهادی نیازی به همکاری بین‌سلولی در تبادل داده، دسترسی به اطلاعات همبستگی برداری کانال کاربران مختلف و اطلاع از موقعیت کاربران مختلف نداشته و از عملکرد مناسب و همگرایی سریع برخوردار است.

مراجع

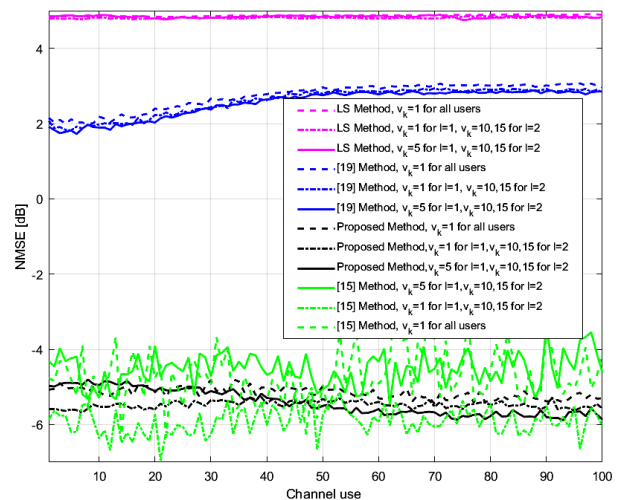
- [۱] حامد معصومی، محمدجواد عمادی، "تخصیص بهینه‌ی توان پایلوت و داده در سیستم چند-ورودی چند-خروجی ابعاد بزرگ با در نظر گرفتن نارسایی سخت افزار"، مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران، جلد ۱۷، شماره ۱، صفحات ۶۸-۶۱، ۱۳۹۹.
- [۲] مهدی بیانی فر، سید محمد رضوی زاده، "بررسی کارایی توان کانال تداخلی رله چندورودی-چند خروجی انبوه"، مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران، جلد ۱۴، شماره ۲، صفحات ۲۲-۱۱، ۱۳۹۶.
- [3] Luo, F.L. and Zhang, C.J. eds.: "Signal processing for 5G: algorithms and implementations" (John Wiley & Sons, 2016).
- [4] Kanatas, A.G., Nikita, K.S. and Mathiopoulos, P.T. eds.: "New Directions in Wireless Communications Systems:



شکل (۳): منحنی تغییرات هزینه تخصیص پس از اختصاص دنباله پایلوت در مسئله بهینه‌سازی تخصیص برحسب بلوک برای $v_{i,\ell} = 1km/h$ برای تمام کاربران تمام سلول‌ها برای سه SNR مختلف



شکل (۴): منحنی تغییرات هزینه تخصیص پس از اختصاص دنباله پایلوت در مسئله بهینه‌سازی تخصیص برحسب بلوک برای $v_{i,\ell} = 5km/h$ برای $\ell = 1$ و $v_{i,\ell} = 10, 15km/h$ برای $\ell = 2$ سه SNR مختلف



- [17] H. Kim and J. Choi, "Channel estimation for spatially/temporally correlated massive MIMO systems with one-bit ADCs," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 1, no. 1, pp. 1-15, 2019.
- [18] J. Choi, B. Clerckx, N. Lee, and G. Kim, "A new design of polar-cap differential codebook for temporally/spatially correlated MISO channels," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 11, no. 2, pp. 703-711, 2011.
- [19] R. Ebrahimi, H. Zamiri-Jafarian, M. Khademi, "A Low Complexity Pilot Contamination Elimination Method for Channel Estimation in Massive MIMO Systems," *Int. Journal of Communication System*, Wiley, Vol. 33, Issue. 16, Oct. 2020.
- [20] A. M. Sayeed and V. Raghavan, "Maximizing MIMO capacity in sparse multipath with reconfigurable antenna arrays," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 1, no. 1, pp. 156-166, 2007.
- [21] S. Haghighatshoar and G. Caire, "Low-complexity massive MIMO subspace estimation and tracking from low-dimensional projections," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 66, no. 7, pp. 1832-1844, 2018.
- [22] H. W. Kuhn, "The Hungarian method for the assignment problem," *Naval research logistics quarterly*, vol. 2, no. 1- 2, pp. 83-97, 1955.
- [23] H. Yin, D. Gesbert, M. Filippou, and Y. Liu, "A coordinated approach to channel estimation in large-scale multiple-antenna systems," *IEEE Journal on selected areas in communications*, vol. 31, no. 2, pp. 264-273, 2013.
- [24] Gesbert, D., Bolcskei, H., Gore, D.A. and Paulraj, A.J.: "Outdoor MIMO wireless channels: Models and performance prediction", *IEEE Trans. Commun.*, 2002, 50, (12), pp. 1926-1934.
- [25] C.-K. Wen, S. Jin, K.-K. Wong, J.-C. Chen, and P. Ting, "Channel estimation for massive MIMO using Gaussian-mixture Bayesian learning," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 14, 3, pp. 1356-1368, 2014.
- From Mobile to 5G' (CRC Press, 2017)
- [5] Elijah O, Leow CY, Rahman TA, Nunoo S, Iliya SZ. "A comprehensive survey of pilot contamination in massive MIMO-55G system," *IEEE Commun Surv Tutor*. Vol. 18, no. 2 .pp. 905-923, 2015.
- [6] Lu L, Li GY, Swindlehurst AL, Ashikhmin A, Zhang R. "An overview of massive mimo: benefits and challenges," *IEEE J Sel Top Sig Proces*. Vol. 8, no. 5, pp. 742-758, 2014.
- [7] X. Zhu, Z. Wang, L. Dai, and C. Qian, "Smart pilot assignment for massive MIMO," *IEEE Communications Letters*, vol. 19, no. 9, pp. 1644-1647, 2015.
- [8] S. Ma, E. L. Xu, A. Salimi, and S. Cui, "A novel pilot assignment scheme in massive MIMO networks," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 7, no. 2, pp. 262-265, 2017.
- [9] X. Zhu et al., "Soft pilot reuse and multicell block diagonalization precoding for massive MIMO systems," *IEEE Trans. on Veh. Tech.*, vol. 65, no. 5, pp. 3285-3298, 2015.
- [10] T. Wei, W. Feng, R. Shi, N. Ge, and J. Lu, "Coordinated multi-cell multi-user pilot allocation in massive MIMO systems with time-shifted pilots," in 2015 International Conference on Wireless Commun. & Signal Process. (WCSP), 2015: IEEE, pp. 1-5.
- [11] Z. Wang, C. Qian, L. Dai, J. Chen, C. Sun, and S. Chen, "Location-based channel estimation and pilot assignment for massive MIMO systems," in 2015 IEEE International Conference on Commun. Workshop (ICCW), 2015: IEEE, pp. 1264-1268.
- [12] P. Zhao, Z. Wang, C. Qian, L. Dai, and S. Chen, "Location-aware pilot assignment for massive MIMO systems in heterogeneous networks," *IEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 8, pp. 6815-6821, 2015.
- [13] L. S. Muppirisetty, T. Charalambous, J. Karout, G. Fodor, and H. Wymeersch, "Location-aided pilot contamination avoidance for massive MIMO systems," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 17, no. 4, pp. 2662-2674, 2018.
- [14] N. Akbar, S. Yan, N. Yang, and J. Yuan, "Location-aware pilot allocation in multicell multiuser massive MIMO networks," *IEEE Trans. on Veh. Tech.*, vol. 67. No. 8, pp. 7774-7778, 2018.
- [15] R. Ebrahimi, H. Zamii-Jafarian, M. Khademi, "A Smart Pilot Assignment in Multi-Cell Massive MIMO systems Using Virtual Modeling of Assigning Cost", *IEEE Transaction on Signal Processing*, vol. 69, pp. 2468 – 2480, Apr. 2021.
- [16] K. T. Truong and R. W. Heath, "Effects of channel aging in massive MIMO systems," *Journal of Communications and Networks*, vol. 15, no. 4, pp. 338-351, 2013.

¹⁰ uplink¹¹ Pilot reuse¹² BS: Base Station¹³ Fading¹⁴ i.i.d: independent and identically distributed¹⁵ SINR: Signal to Noise plus Interference ratio¹⁶ soft¹⁷ AOA: Angle of Arrival¹⁸ Steering vector¹⁹ Post processing²⁰ FFT: Fast Fourier Transform²¹ LS: Least Square¹ Massive Multi-Input Multi-Output² Internet of Things³ M2M: Machine to Machine⁴ e-health⁵ e-learning⁶ e-banking⁷ CSI: Channel State Information⁸ TDD: Time Division Duplex⁹ FDD: Frequency Division duplex

- ²² HetNet: Heterogeneous Network
- ²³ heuristic
- ²⁴ MMSE: Minimum Mean Square Error
- ²⁵ Location-Aware
- ²⁶ Tier
- ²⁷ LOS: Line of sight
- ²⁸ NMSE: Normalized Mean Square Error
- ²⁹ Adaptive
- ³⁰ Online
- ³¹ Gauss-Markov
- ³² Stationary
- ³³ Subspace
- ³⁴ State-space channel model
- ³⁵ Innovation
- ³⁶ Temporal correlation coefficient
- ³⁷ Shadowing
- ³⁸ Angle spread
- ³⁹ Projection
- ⁴⁰ BR: Before Request
- ⁴¹ AR: After Request
- ⁴² ULA: Uniform Linear array
- ⁴³ MRC: Maximum Ratio Combining