

بهبود کارایی طیفی برای سیستم‌های چند ورودی - چند خروجی انبوه با استفاده از طرح‌های اختصاص توان

آرش شیخ‌پور^۱ بهزاد مظفری تازه‌کند^۲

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تبریز- تبریز- ایران

arash.f11994@yahoo.com

۲- استاد- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تبریز- تبریز- ایران

mozaffary@tabrizu.ac.ir

چکیده: سیستم چند ورودی - چند خروجی انبوه، به‌عنوان یکی از فناوری‌های نسل بعدی مخابرات بی‌سیم شناخته شده است که بهره طیفی بالایی فراهم می‌کند. به دلیل توزیع متراکم کاربران در سلول‌های مخابراتی، پشتیبانی از اتصالات گسترده، کاهش تأخیر، کارایی طیفی و کارایی توان بالا به‌عنوان چالش‌های اصلی شبکه‌های بی‌سیم نسل بعدی شناخته شده‌اند. استراتژی مناسب برای تخصیص توان به کاربران مختلف یکی از راه‌های بهبود کارایی طیفی و کارایی توان است. در این مقاله، برای بهبود کارایی طیفی سیستم چند ورودی - چند خروجی انبوه با معماری ترکیبی و بر مبنای پردازش تبدیل فوریه گسسته، دو روش برای تخصیص توان به کاربران پیشنهاد می‌شود. در روش اول، با هدف بهبود کارایی طیفی کاربران با شرایط کانال ضعیف، به تخصیص ضریب توان ثابت به هر کاربر متناسب با شرایط کانال آن کاربر می‌پردازیم. در روش دوم به تخصیص ضرایب بهینه توان به کاربران با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات می‌پردازیم. همچنین، تأثیر تعداد زنجیره‌های فرکانس رادیویی، نسبت سیگنال به نویز و تعداد کاربران را روی کارایی طیفی سیستم ارزیابی می‌کنیم. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که دو روش پیشنهادی اختصاص توان، کارایی طیفی کلی سیستم را بهبود می‌بخشند.

واژه‌های کلیدی: سیستم چند ورودی - چند خروجی انبوه، اختصاص توان، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، کارایی طیفی.

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.61186/jiaeee.21.3.37

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۹/۲۸

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۰۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۲۰

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر بهزاد مظفری تازه‌کند

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - تبریز - بلوار ۲۹ بهمن - دانشگاه تبریز - دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر

۱- مقدمه

در طول چند سال گذشته به دلیل افزایش تعداد وسیله‌های ارتباطی مانند تلفن‌های هوشمند و تبلت‌ها، ترافیک داده به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است. در آینده نیز نیاز به ترافیک داده‌ی بی‌سیم بیشتر از امروز خواهد بود. به همین دلیل نیاز به فناوری‌های جدید بیش از پیش احساس می‌شود [۱]. همچنین در طراحی سیستم‌های مخابراتی آینده، بهره طیفی بالا یکی از هدف‌های اصلی است. سیستم چند ورودی - چند خروجی در مقیاس بزرگ، به‌عنوان یکی از فناوری‌های نسل جدید که می‌تواند با استفاده از آرایه‌های آنتنی گسترده، بهره طیفی بالایی فراهم کند در بسیاری از کارهای تحقیقاتی مورد توجه قرار گرفته است [۲]. از طرفی، سیستم چند ورودی - چند خروجی به‌عنوان یکی از فناوری‌های شبکه بی‌سیم شناخته شده است که از چندین آنتن در طرف فرستنده و گیرنده استفاده می‌کند و می‌تواند ظرفیت سیستم و قابلیت اطمینان لینک ارتباطی را بهبود ببخشد [۳]. یکی از مزیت‌های فراهم شده توسط سیستم چند ورودی - چند خروجی، چندگانگی مکانی است. با استفاده از این ویژگی می‌توان با ایجاد چندین مسیر بین فرستنده و گیرنده، اثرات ناشی از افت سیگنال را کاهش داد. اگر شرایط محیط و سایر پارامترهای وابسته به کانال (مانند گسترش تأخیر و محوشدگی سایه) طوری باشند که بین فرستنده و گیرنده چندین کانال مستقل به وجود آید، در این صورت فرستنده قادر خواهد بود با استفاده همزمان از کانال‌های مستقل، درجه آزادی سیستم را افزایش دهد. افزایش درجه آزادی سبب افزایش ظرفیت سیستم خواهد شد [۴، ۵]. در مرجع [۴]، یک مدل‌سازی فضایی از کانال سیستم چند ورودی - چند خروجی، در دو حالت وجود و عدم وجود آنتن‌های قطبی شده^۱ ارائه شده است که می‌تواند پیچیدگی‌های ناشی از طراحی را به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش دهد. در این مدل فضایی کانال سیستم چند ورودی - چند خروجی، با افزایش فاصله بین آنتن‌های آرایه فرستنده، می‌توان ظرفیت سیستم را بهبود بخشید [۵].

سیستم چند ورودی - چند خروجی انبوه، اشاره به حالتی دارد که در آن تعداد آنتن‌ها بسیار زیاد می‌باشد. با استفاده از این فناوری، سیستم‌های مخابراتی با بهره‌گیری از آرایه‌های آنتنی با صدها آنتن، سیگنال کاربران را در منابع زمان - فرکانس مشترک ارسال خواهند کرد. افزایش ظرفیت سیستم، بهبود بهره‌وری انرژی، فراهم کردن درجه آزادی اضافی و کاهش تأخیر برخی از مزیت‌های فراهم شده توسط سیستم چند ورودی - چند خروجی انبوه هستند [۶].

یکی از چالش‌های مخابرات بی‌سیم نسل پنجم، تخمین کانال مسیر فروسو در سیستم چند ورودی - چند خروجی انبوه است. در کانال با محوشدگی تخت می‌توان با اعمال پیش کدگذاری‌های صفر واداری^۲ (ZF) یا حداکثر نسبت^۳ (MR)، تخمین کانال مسیر فروسو را به تخمین مقدار بهره کانال و محوشدگی مقیاس بزرگ تبدیل کرد.

اخیراً برای حل مشکلات به وجود آمده در تخمین کانال از قبیل افزایش سربراری داده‌ی آموزشی و کاهش نرخ ارسال اطلاعات، از تخمین کور کانال مسیر فروسو در سیستم چند ورودی - چند خروجی انبوه استفاده شده است که در آن، با فرض معلوم بودن مقدار محوشدگی مقیاس بزرگ، مقدار بهره کانال به‌صورت کور تخمین زده می‌شود. محققین در [۷]، روش جدیدی برای تخمین کور و همزمان مقدار بهره و محوشدگی مقیاس بزرگ، در سیستم چند ورودی - چند خروجی انبوه چند کاربری پیشنهاد داده‌اند که در آن، دو ضریب کنترل توان با مقادیر نزدیک به هم، به کانال با دو بازه‌ی زمانی هم‌دوسی متفاوت اعمال می‌شوند. در سمت گیرنده و در هر دو بازه‌ی زمانی، مقدار توان متوسط سیگنال دریافتی به‌صورت جداگانه محاسبه می‌شود. در این روش، به دلیل قابلیت تخمین مقدار محوشدگی مقیاس بزرگ، نیازی به ارسال این مقدار در مسیر فروسو نیست. در نتیجه نرخ ارسال اطلاعات افزایش می‌یابد و خطای ارسال مقدار محوشدگی مقیاس بزرگ نیز اثری روی عملکرد سیستم نخواهد داشت. با هدف حذف اثر مخرب آلودگی پیلوت و دنبال کردن تغییرات زمانی کانال کاربران برای تخمین کانال سیستم چند آنتنی انبوه، یک الگوریتم سازگار تخصیص هوشمند دنباله پیلوت در طرف فراسو در مد TDD^۴ برای سیستم چند آنتنی چند سلولی چند کاربری در [۸] پیشنهاد شده است. مرجع [۹] به تخصیص بهینه‌ی توان پیلوت و داده در سیستم چند-ورودی چند-خروجی انبوه با در نظر گرفتن نارسایی سخت‌افزار می‌پردازد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که نرخ کاربران با تخصیص توأم توان پیلوت و داده، نسبت به حالت‌های ساده‌ی تخصیص توان داده و تخصیص توان یکسان برای پیلوت و داده بهبود می‌یابد. مرجع [۱۰] به ارزیابی کارایی توان در یک کانال مشارکتی می‌پردازد که در آن رله مجهز به آنتن‌های انبوه بوده و از استراتژی‌های تقویت ارسال و کدگذاری مبتنی بر پردازش‌های MRC^۵، MRT^۶ و ZF بهره می‌برد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که با استفاده از آنتن‌های انبوه در رله، می‌توان توان ارسالی فرستنده و رله را به‌طور محسوسی کاهش داد و در عین حال کارایی سیستم را حفظ نمود.

در مرجع [۱۱]، کارایی طیفی قابل دستیابی سیستم چند ورودی - چند خروجی انبوه بر اساس پردازش تبدیل فوریه گسسته^۷ (DFT) مورد ارزیابی قرار گرفته است. در سیستم‌های چند ورودی - چند خروجی، هر فرستنده و گیرنده به یک زنجیره فرکانس رادیویی^۸ (RF) که شامل مبدل آنالوگ به دیجیتال می‌شود، نیاز دارد [۱۲]. با افزایش تعداد آنتن‌ها، اختصاص زنجیره فرکانس رادیویی جدا به هر آنتن، هزینه و مصرف انرژی بالایی را می‌طلبد. یکی از راه‌های کاهش تعداد زنجیره‌های فرکانس رادیویی در کنار کاهش هزینه سخت‌افزاری، استفاده از معماری ترکیبی آنالوگ/دیجیتال می‌باشد [۱۳]. معماری ترکیبی مبتنی بر شیفتر دهنده فاز ایده‌آل، شیفتر دهنده فاز کوانتیزه شده و تبدیل فوریه گسسته از جمله معماری‌های مورد استفاده در

کانال بهتر اختصاص داده می شود. هدف از این کار، بهبود شرایط کانال و جلوگیری از افت سیگنال کاربران با محوشدگی بدتر است.

- در روش دوم، برای دستیابی به حداکثر کارایی طیفی، به جستجوی توان بهینه به کاربران از طریق الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات^{۱۰} (PSO) می پردازیم.
- نتایج شبیه سازی نشان می دهند که روش های پیشنهادی تخصیص توان، کارایی طیفی مطلوبی را برای سیستم چند ورودی - چند خروجی انبوه با معماری ترکیبی در مقایسه با روش تخصیص توان یکسان به تمام کاربران سلولی فراهم می کنند.

۲- مدل سیستم

فرض کنید در یک سیستم چند ورودی - چند خروجی انبوه تک سلولی، یک ایستگاه پایه به N_t آنتن فرستنده تجهیز شده است. هر یک از این آنتن های فرستنده به N_s زنجیره فرکانس رادیویی وصل شده اند که به طور همزمان سیگنال اطلاعات را به K کاربر تک آنتنی ارسال می کنند. تعداد آنتن های ایستگاه پایه بیشتر از تعداد کاربران است ($N_t \gg K$). همچنین تعداد زنجیره های فرکانس رادیویی بیشتر از تعداد کاربران فعال و کمتر از تعداد آنتن های ایستگاه پایه می باشد ($K \leq N_s \leq N_t$). فرض کنید $\mathbf{x}$ بردار سیگنال ورودی همه ی کاربران با ابعاد $K \times 1$ باشد که شرط $E[\mathbf{x}\mathbf{x}^H] = \mathbf{I}_K$ را برآورده می کند که در آن $E[\cdot]$ و $\{\cdot\}^H$ به ترتیب بیانگر ماتریس همانی با ابعاد $K \times K$ ، عملگر میانگین گیری و مزدوج ترانهاد هستند. با اعمال سیگنال ورودی گوسی به سیستم، سیگنال دریافتی بعد از پردازش سیگنال آنالوگ و پیش کدگذاری دیجیتال می تواند توسط رابطه (۱) بیان شود:

$$\mathbf{y} = \sqrt{\frac{P}{K}} \mathbf{G}^H \mathbf{F} \mathbf{W} \mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (1)$$

که در آن، P معرف SNR، $\mathbf{W}$ نشان دهنده ی ماتریس پیش کدگذاری دیجیتال با ابعاد $N_s \times K$ ، $\mathbf{F}$ بیانگر ماتریس پردازش آنالوگ با ابعاد $N_t \times N_s$ و $\mathbf{n}$ نویز گوسی متقارن با میانگین صفر و واریانس واحد است. ضمن اینکه $\mathbf{G}$ بیانگر ماتریس کانال از ایستگاه پایه به کاربران بوده و به صورت رابطه (۲) تعریف می شود:

$$\mathbf{G} = \mathbf{H} \mathbf{D}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

در رابطه (۲)، ماتریس $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{N_t \times K}$ شامل ضرایب محوشدگی سریع است. این ضرایب به عنوان متغیرهای تصادفی گوسی مختلط با میانگین صفر و واریانس واحد، دارای توزیع یکسان و مستقل هستند. همچنین $\mathbf{D}$ بیانگر یک ماتریس قطری با ابعاد $K \times K$ و با المان های قطری

سیستم های چند آنتنی انبوه هستند. در معماری مبتنی بر شیفت دهنده فاز ایده آل، پردازش آنالوگ با شیفت فاز ایده آل صورت می گیرد و نیاز است که زنجیره های فرکانس رادیویی با وضوح بی نهایت در دسترس باشند تا اینکه قادر به تولید زوایای دقیق فاز باشند. با این حال، در سناریوی عملی چنین شیفت دهنده هایی با فاز پیوسته، به دلیل اجزایی که نیاز به کنترل دقیق فاز و اطلاعات حالت کانال دارند، ناممکن هستند. در معماری مبتنی بر شیفت دهنده فاز کوانتیزه شده، زنجیره فرکانس رادیویی با استفاده از شیفت دهنده فاز با وضوح یک یا چند بیت ساخته می شود [۱۴]. در معماری ترکیبی مبتنی بر پردازش DFT، شیفت دهنده های فاز با یک مدار مجتمع یا یک پیاده ساز نرم افزاری جایگزین می شوند. در چنین حالتی، پردازش آنالوگ با استفاده از ماتریس Bulter یا گیت های ترانزیستور می تواند پیاده شود که به صورت مؤثر مصرف توان و پیچیدگی سخت افزاری را می تواند کاهش دهد. برای چنین معماری تمام سیگنال های ارسالی از طریق یک بخش از ماتریس پیش کدگذاری DFT قبل از عملیات باند پایه دیجیتال عبور می کنند [۱۱]، [۱۵].

در مرجع [۱۱]، با فرض پیش کدگذاری باند پایه صفر واداری، کران های بالا و پایین برای کارایی طیفی قابل دستیابی به صورت تحلیلی استنتاج شده است. در جهت کاهش پیچیدگی سخت افزاری و نیز مصرف توان از مزیت پردازش DFT بهره گرفته شده است. نویسندگان نشان داده اند که کارایی طیفی قابل دستیابی، مستقل از تعداد آنتن های فرستنده می تواند با افزایش تعداد زنجیره های فرکانس رادیویی و نیز نسبت سیگنال به نویز^۹ (SNR) بهبود یابد. برای دستیابی به حداکثر کارایی طیفی، رابطه تحلیلی برای تعداد بهینه ی کاربران نیز ارائه شده است.

نقطه ضعف اساسی روش بیان شده در [۱۱]، مربوط به نحوه ی تخصیص توان به کاربران است که کارایی طیفی مطلوب را نتیجه نمی دهد. با اختصاص توان یکسان، به کاربرانی که شرایط کانال متفاوتی در سلول تجربه می کنند، کارایی طیفی کل سیستم کاهش می یابد.

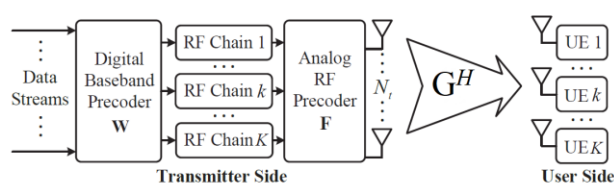
به دلیل اینکه کاربران با شرایط کانال ضعیف، برای دستیابی به کارایی طیفی مطلوب، نیاز به توان بیشتری دارند، از این رو، در این مقاله با هدف بهبود کارایی طیفی قابل دستیابی در سیستم چند ورودی - چند خروجی انبوه با معماری ترکیبی، دو روش تخصیص توان به کاربران فعال در سلول پیشنهاد می شود. نوآوری و مزیت های اصلی این مقاله می تواند به صورت زیر بیان شود:

- توان های اختصاصی به هر کاربر در هر دو روش پیشنهادی، مطابق با شرایط کانال و نیز محوشدگی مقیاس بزرگ کاربران و همچنین تعداد زنجیره های فرکانس رادیویی، متفاوت خواهند بود.
- در روش اول پیشنهادی، با مرتب سازی کاربران متناسب با بهره کانال کاربران در کانال محوشدگی، توان بیشتر به کاربر با شرایط کانال ضعیف و توان کمتر به کاربر با شرایط

که در آن، Λ بیانگر ماتریس قطری نرمالیزه شده یعنی $[\Lambda]_{k,k} = 1/\sqrt{[\mathbf{W}^H \mathbf{W}]_{k,k}}$ است. در این حالت، کارایی طیفی قابل دستیابی کاربر k بر حسب بیت بر ثانیه بر هرتز، می‌تواند توسط رابطه (۵) بیان شود:

$$R_k = E \left\{ \log_2 \left(1 + \frac{P}{K[(\mathbf{G}_{eq} \mathbf{G}_{eq}^H)^{-1}]_{k,k}} \right) \right\} \quad (5)$$

ارزیابی دقیق نشان می‌دهد که رابطه (۵)، شامل توابع انتگرال نمایی بوده و هیچ دید فیزیکی ارائه نمی‌دهد. به همین دلیل، با الهام از [۱۱] به ارزیابی عملکرد سیستم از منظر کران‌های بالا و پایین کارایی طیفی می‌پردازیم.



شکل (۱): مدل سیستم معماری ترکیبی

۳-۲- کران‌های بالا و پایین برای کارایی طیفی قابل دستیابی

مطابق با روش بیان شده در [۱۱]، برای یک سیستم چند ورودی - چند خروجی انبوه با معماری ترکیبی و بر مبنای پردازش DFT، کارایی طیفی قابل دستیابی دقیق کاربر k با پیش‌کدگذاری صفر واداری، می‌تواند به صورت رابطه (۶) کران‌دار باشد:

$$R_k^L \leq R_k \leq R_k^U \quad (6)$$

کران‌های پایین و بالا به ترتیب توسط روابط (۷) و (۸) قابل بیان هستند:

$$R_k^L = \log_2 \left(1 + \frac{P\beta_k}{K} e^{\psi(N_s - K)} \right) \quad (7)$$

$$R_k^U = \log_2 \left(\frac{N_s!}{(N_s - (K-1))!} + \frac{P\beta_k}{K} \frac{N_s!}{(N_s - K)!} \right) - \frac{1}{\ln 2} \left(\sum_{k=0}^{K-1} \psi(N_s - k) \right) \quad (8)$$

اثبات روابط (۷) و (۸) در [۱۱] آورده شده است. حال می‌توان با در نظر گرفتن برخی پارامترهای فیزیکی مانند تعداد زنجیره‌های فرکانس رادیویی و تعداد کاربران، به ارزیابی کارایی طیفی سیستم چند ورودی

نشان‌دهنده‌ی هر دو مدل سایه‌اندازی و β_k است. $[\mathbf{D}]_{k,k} = \beta_k$ تلفات مسیر است و به صورت $\beta_k = Z_k r_k^{-\gamma}$ تعریف می‌شود که در آن r_k بیانگر فاصله کاربر k از ایستگاه پایه، γ بیانگر توان تلفات مسیر و Z_k نیز بیانگر متغیر تصادفی با توزیع Log-Normal هستند. مطابق با شکل ۱، به دلیل استفاده از معماری ترکیبی بر اساس پردازش DFT، تمام سیگنال‌های ارسالی قبل از پردازش باند پایه، باید از ماتریس پیش‌پردازش DFT عبور کنند. ماتریس پردازش آنالوگ $\mathbf{F}$ را می‌توان توسط رابطه (۳) بیان کرد:

$$\mathbf{F} = \frac{1}{\sqrt{N_t}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & w & w^2 & \dots & w^{(N_s-1)} \\ 1 & w^2 & w^4 & \dots & w^{2(N_s-1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & w^{(N_t-1)} & w^{2(N_t-1)} & \dots & w^{(N_t-1)(N_s-1)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

در رابطه (۳)، $w = e^{-2\pi j/N_t}$ است.

۳- تجزیه و تحلیل کارایی طیفی

مطابق با روش بیان شده در [۱۱]، در این بخش ابتدا به صورت تحلیلی به ارزیابی کران‌های بالا و پایین برای کارایی طیفی قابل دستیابی در سیستم ترکیبی خواهیم پرداخت. سپس بر اساس روابط تحلیلی، تأثیر برخی پارامترهای فیزیکی مانند تعداد زنجیره‌های فرکانس رادیویی و تعداد کاربران را روی عملکرد سیستم مورد ارزیابی قرار خواهیم داد.

۳-۱- کارایی طیفی ارگودیک قابل دستیابی

فرض کنید ایستگاه پایه دارای اطلاعات حالت کانال^{۱۱} (CSI) کامل است. برای به دست آوردن CSI کامل نیاز به تخمین کانال است که در آن CSI با ارسال دنباله‌های پایلوت یا راهنما و برگشت آن به فرستنده در مد^{۱۲} FDD، قابل دستیابی است. در مد CSI، TDD با تخمین کانال فراسو و استفاده از تقابل کانال‌ها قابل دستیابی است. در این زمینه استفاده از روش‌های LS^{۱۳} و MMSE^{۱۴} در سیستم‌های چند آنتنی مرسوم است که برای اطلاعات بیشتر در زمینه تخمین کانال به [۱۶]، [۱۷] و [۱۸] مراجعه شود. و در پردازش باند پایه، پیش‌کدگذاری مورد استفاده از نوع صفر واداری است که می‌تواند تداخل بین کاربران را به طور کامل حذف کند. در این حالت، ضرب دو ماتریس آنالوگ و ماتریس کانال، هم‌ارز با ماتریس $\mathbf{G}_{eq} = \mathbf{G}^H \mathbf{F}$ با ابعاد کمتر خواهد شد. بنابراین ماتریس پیش‌کدگذاری باند پایه با پیش‌کدگذاری صفر واداری توسط رابطه (۴) قابل بیان است:

$$\mathbf{W} = \mathbf{G}_{eq}^H (\mathbf{G}_{eq} \mathbf{G}_{eq}^H)^{-1} \Lambda \quad (4)$$

که در آن، $[\cdot]$ بیانگر مفهوم گرد کردن به سمت نزدیکترین عدد صحیح و $w_0(\cdot)$ بیانگر تابع لمبرت هستند. اثبات رابطه (۱۲) در [۱۱] آورده شده است.

با توجه به رابطه (۱۲)، می‌توان استنباط کرد که برای تعداد زنجیره‌های فرکانس رادیویی و SNR ثابت، کارایی طیفی کلی قابل دستیابی با افزایش تعداد کاربران ابتدا افزایش و سپس رفته‌رفته کاهش می‌یابد. چنین رفتار عملکرد ناشی از این است که با افزایش تعداد کاربران، توان اختصاص یافته به کاربران کاهش می‌یابد. کاهش توان کاربران، باعث افت کارایی طیفی کل سیستم می‌شود. همچنین رابطه (۱۲) نشان می‌دهد که می‌توان تعداد بهینه‌ی کاربران، برای حداکثر کردن کارایی طیفی کل را به دست آورد که به تعداد زنجیره‌های فرکانس رادیویی، SNR و فاکتور محوشدگی مقیاس بزرگ بستگی خواهد داشت. در نهایت برای حالتی که تمام کاربران موجود در سلول دارای شرایط کانال یکسانی هستند، یعنی $\beta_k = \beta$ به ازای هر k است، کارایی طیفی کل سیستم چند ورودی - چند خروجی انبوه با معماری ترکیبی می‌تواند به صورت رابطه (۱۳) بیان شود:

$$R_{sum} = K \log_2 \left(1 + \frac{P\beta}{K} (N_s - K + 1) \right) \quad (13)$$

۴- روش‌های پیشنهادی برای تخصیص توان به کاربران

۴-۱- تخصیص توان با شرایط محوشدگی

اختصاص توان یکسان به همه‌ی کاربران فعال در سلول، بدون در نظر گرفتن شرایط محوشدگی آن‌ها یکی از نقاط ضعف مدل سیستم بیان شده در بخش قبلی است. این روش تخصیص توان به کاربران، باعث می‌شود کارایی طیفی کل سیستم به سمت بهره‌وری مطلوب سوق پیدا نکند. چون در این حالت کاربران با شرایط محوشدگی بدتر، به دلیل افت سیگنال قادر به دستیابی به کارایی طیفی مطلوب نخواهند بود.

در عمل یک سلول مخابراتی تنها شامل کاربران با شرایط کانال یکسان نیست. بلکه کاربران در یک سلول می‌توانند حرکت کرده و در فاصله‌های متفاوت قرار گیرند، از این رو شرایط محوشدگی مختلفی داشته باشند. کاربران نزدیک به ایستگاه پایه، شرایط کانال بهتری نسبت به کاربران حاشیه سلول تجربه می‌کنند. همچنین سیگنال کاربران نزدیک به ایستگاه پایه نسبت به سیگنال کاربران حاشیه سلول، کمتر دچار افت می‌شود. بنابراین می‌توان با اختصاص توان ارسالی بیشتر به کاربران حاشیه سلول، SNR دریافتی این کاربران را بالا برد و شرایط کانال آن‌ها را بهبود بخشید. بنابراین، اختصاص توان به کاربران مطابق با شرایط کانال آن‌ها می‌تواند باعث بهبود کارایی طیفی کل سیستم شود. مطابق با مدل سیستم بیان شده در بخش ۲،

- چند خروجی انبوه با معماری ترکیبی و بر مبنای پردازش DFT پرداخت.

۳-۲-۱- تأثیر تعداد زنجیره‌های فرکانس رادیویی روی کارایی طیفی

برای یک معماری ترکیبی با پردازش DFT، زمانی که تعداد زنجیره‌های فرکانس رادیویی افزایش می‌یابد، رابطه تحلیلی دقیق از کارایی طیفی قابل دستیابی را می‌توان توسط رابطه (۹) بیان کرد:

$$R_k \rightarrow \overline{R_k} = \log_2 \left(1 + \frac{P\beta_k}{K} (N_s - K + 1) \right) \quad (9)$$

در این حالت می‌توان کران‌های بالا و پایین را زمانی که N_s افزایش می‌یابد، با استفاده از هم‌ارزی‌های بیان شده در (۱۰)، توسط رابطه (۱۱) بیان کرد:

$$\begin{aligned} (i): \psi(N_s - K) &\approx \ln(N_s - K + 1) \\ (ii): \frac{1}{\ln 2} \left(\sum_{k=0}^{K-1} \psi(N_s - k) \right) &= \log_2 \left(\frac{N_s!}{(N_s - K + 1)!} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

$$R_k^{U,L} = \log_2 \left(1 + \frac{P\beta_k}{K} (N_s - K + 1) \right) \quad (11)$$

از رابطه (۱۱) می‌توان استنباط کرد که با افزایش تعداد زنجیره‌های فرکانس رادیویی، کران‌های بالا و پایین روی هم منطبق می‌شوند و همچنین رابطه تقریبی برابر با رابطه تحلیلی دقیق می‌شود. از طرفی برای حالتی که تعداد کاربران ثابت می‌باشد، کارایی طیفی به دست آمده از رابطه (۹)، می‌تواند با افزایش تعداد زنجیره‌های فرکانس رادیویی و یا SNR، افزایش یابد.

۳-۲-۲- تأثیر تعداد کاربران روی کارایی طیفی قابل دستیابی

با فرض اینکه همه‌ی کاربران دارای فاکتور محوشدگی مقیاس بزرگ یکسان هستند؛ یعنی به ازای هر k ، $\beta_k = \beta$ است و نیز تعداد زیادی از زنجیره‌های فرکانس رادیویی در ایستگاه پایه استفاده شده است، تعداد بهینه کاربران برای حداکثر کردن کارایی طیفی کلی قابل دستیابی، می‌تواند به صورت رابطه (۱۲) بیان شود:

$$K^{opt} = \left\lfloor \frac{P\beta(N_s + 1)}{(P\beta - 1) \left[\frac{1}{w_0((P\beta - 1)e^{-1})} + 1 \right]} \right\rfloor \quad (12)$$

توان بهینه به کاربران استفاده کرد. در این روش با هدف حداکثر کردن کارایی طیفی کل سیستم، به دنبال یافتن توان‌های بهینه خواهیم بود. الگوریتم PSO، یک روش تحقیقاتی بر مبنای پرواز دسته‌جمعی ذرات یا پرندگان است. در ابتدا، الگوریتم PSO برای تجزیه و تحلیل الگوهای پرواز همبسته و نیز تغییر ناگهانی جهت ذرات طراحی شد. در الگوریتم PSO، ذرات در فضای جستجوی مورد نظر توزیع می‌شوند. هر تغییری در مختصات ذرات، وابسته به اطلاعات خود ذرات و همچنین اطلاعات ذرات مجاور است. بنابراین موقعیت یا مختصات هر ذره، روی توانایی جستجوی ذرات تأثیر می‌گذارد. نتیجه‌ای این پدیده، همگرایی ذرات به یک منطقه‌ی مشخص است که اصطلاحاً به آن منطقه‌ی موفق می‌گویند. با توجه به وجود تعداد زیاد ذرات، تکرار این فرآیند می‌تواند ما را در رسیدن به یک منطقه‌ی موفق‌تر (همگرایی ذرات در یک منطقه‌ی مطلوب‌تر) یاری کند، چون ذرات همواره در حال یادگیری از همدیگر هستند. اساس این الگوریتم نیز بر این مبنا است که در هر بار تکرار، هر ذره با به حداقل رساندن فاصله‌ی خود از بهترین مختصات ممکن، موقعیت خود را در فضای جستجوی مورد نظر تعیین می‌کند [۱۹]، [۲۰]. برای پیاده‌سازی الگوریتم PSO تعداد ذرات را برابر با N در نظر گرفته‌ایم. جابه‌جایی یک ذره از موقعیت فعلی آن به بهترین موقعیت نهایی ممکن، توسط رابطه (۱۶) بیان می‌شود [۲۱]:

$$x(i)_{new} = x(i)_{past} + V(i)_{new} \quad (16)$$

که در آن، V بیانگر سرعت ذرات است و به‌صورت (۱۷) تعریف می‌شود:

$$V(i)_{new} = c_1 r_1 (x(i)_{LocalBest} - x(i)_{past}) + c_2 r_2 (x(i)_{GlobalBest} - x(i)_{past}) + v(i)_{past} \quad (17)$$

در رابطه (۱۷)، $x(i)_{LocalBest}$ بیانگر بهترین مختصات اولیه ممکن و $x(i)_{GlobalBest}$ بیانگر بهترین مختصات نهایی ممکن بعد از جستجوی کلی است. همچنین c_1 و c_2 بیانگر ضرایب جستجو بوده و r_1 و r_2 نیز متغیرهای تصادفی با توزیع یکنواخت بین ۰ و ۱ هستند.

در این الگوریتم، با داشتن N به‌عنوان اندازه ذرات، موقعیت فعلی و نیز سرعت ذره i ام در یک فضای برداری، موقعیت و سرعت هر ذره در طول فرآیند بهینه‌سازی در هر گام مبتنی بر روابط (۱۶) و (۱۷) بروز می‌شود. مطابق با تعریف $x(i)_{LocalBest}$ و $x(i)_{GlobalBest}$ ، بهترین مختصات اولیه ممکن به‌صورت رابطه (۱۸) قابل تعریف است.

$$x(i)_{LocalBest}^{new} = \begin{cases} x(i)_{LocalBest}, & \text{if } f(x(i)_{new}) < f(x(i)_{LocalBest}) \\ x(i)_{new}, & \text{if } f(x(i)_{new}) \geq f(x(i)_{LocalBest}) \end{cases} \quad (18)$$

برای حذف تداخل بین کاربران، پیش‌کدگذاری صفر واداری مورد استفاده قرار می‌گیرد.

فرض کنید در یک سلول، K کاربر با شرایط کانال متفاوت برای دستیابی به اطلاعات خود در فواصل مختلف نسبت به ایستگاه پایه توزیع شده‌اند و h_i نشان دهنده ضریب کانال کاربر i ام باشد. به دلیل شرایط کانال متفاوت کاربران، فاکتور محوشدگی مقیاس بزرگ کاربران متناسب با اثر سایه‌اندازی و فاصله کاربران نسبت به ایستگاه پایه یکسان نخواهد بود. با توجه به تعریف β_k که شامل اثرات محوشدگی مقیاس بزرگ یعنی اثرات سایه‌اندازی و تلفات مسیر است، فرض می‌کنیم معیار β_k برای کاربران سلولی به‌صورت $\beta_1 > \beta_2 > \dots > \beta_K$ مرتب شده است. در این صورت بهره‌های کانال کاربران به شکل $|h_1|^2 > |h_2|^2 > \dots > |h_K|^2$ مرتب می‌شوند. در این حالت، مطابق با روش پیشنهادی و با هدف پشتیبانی از تمام کاربران سلولی و بهبود کارایی طیفی کلی سیستم، ضرایب توان ثابت به کاربران متناسب با بهره کانال آن‌ها اختصاص می‌یابد که به‌صورت (۱۴) مرتب شده‌اند.

$$P_1 < P_2 < \dots < P_K \quad (14)$$

که در این رابطه، p_i بیانگر ضریب اختصاصی توان برای کاربر i ام بوده و به ازای کل توان‌های اختصاصی $P = \sum_{i=1}^K p_i$ می‌باشد، یعنی مجموع توان‌های اختصاصی به کاربران باید برابر توان کل باشد. در این روش پیشنهادی، توان‌های اختصاصی به کاربران مبتنی بر شرایط محوشدگی متفاوت برای کاربران و مستقل از تعداد زنجیره‌های فرکانس رادیویی، در نظر گرفته شده است. در نهایت کارایی طیفی کل را می‌توان به‌صورت (۱۵) محاسبه کرد:

$$R_{sum}^{new} = \sum_{k=1}^K R_k^{new} \quad (15)$$

$$R_k^{new} = \log_2 (1 + P_k \beta_k (N_s - K + 1))$$

توجه شود که در روش اختصاص توان ثابت با شرایط محوشدگی، قیدی در جهت برآورده کردن حداقل کیفیت سرویس کاربران یا نرخ کاربران وجود ندارد. چون در این حالت ممکن است در جهت برآورده کردن کیفیت سرویس کاربران، توان بیشتری به برخی کاربران اختصاص یابد و هیچ توانی به دیگر کاربران اختصاص نیابد و در عمل این کاربران داده‌ای دریافت نکنند. بنابراین، در این روش مصالحه یا tradeoff ای بین خدمت‌رسانی به تمام کاربران و بهبود عملکرد سیستم وجود خواهد داشت.

۴-۲- الگوریتم PSO

جهت بهبود کارایی طیفی کل سیستم چند ورودی - چند خروجی انبوه، می‌توان از الگوریتم‌های بهینه‌سازی، مانند PSO، جهت تخصیص

ضرایب اختصاصی توان به کاربران، در روش تخصیص توان با شرایط محوشدگی برای N_s های مختلف به صورت رابطه (۲۱) در نظر گرفته شده اند:

$$\begin{aligned} p_1 &= 0.09P, \quad p_2 = 0.1P, \quad p_3 = 0.11P, \quad p_4 = 0.12P, \\ p_5 &= 0.13P, \quad p_6 = 0.14P, \quad p_7 = 0.15P, \quad p_8 = 0.16P \end{aligned} \quad (21)$$

برای الگوریتم PSO داریم: ضرایب جستجو برابر با $c_1 = c_2 = 2$ و تعداد ذرات موجود برابر با ۲۰۰ فرض شده است. همچنین تعداد تکرار الگوریتم برابر ۱۰۰ در نظر گرفته شده است. ضرایب اختصاصی توان به دست آمده برای کاربران، از طریق الگوریتم PSO، برای $N_s \in \{10, 20, 50\}$ در جدول ۱ آورده شده است.

شکل ۲، کارایی طیفی کلی قابل دستیابی سیستم چند ورودی - چند خروجی انبوه را برای سه روش متفاوت اختصاص توان با شرایط محوشدگی، الگوریتم PSO و روش [۱۱]، نسبت به SNR نشان می دهد که در آن SNR از ۵ تا ۳۰ دسی بل متغیر است. ضرایب محوشدگی مقیاس بزرگ هر کاربر، برای روش بیان شده در [۱۱] و N_s های مختلف، در شکل ۲-آ یکسان و برابر ۰/۰۰۱ و در شکل ۲-ب برای تعداد زنجیره های فرکانس رادیویی برابر با ۱۰، ۲۰ و ۵۰ به ترتیب از چپ به راست به صورت $10^{-3} \times \{1/79, 2/85, 3/35\}$ در نظر گرفته شده است. مهم ترین نتایج به دست آمده از شکل ۲ می تواند به صورت زیر بیان شود:

۱) با افزایش SNR، کارایی طیفی کل سیستم با هر سه روش تخصیص توان افزایش می یابد. ۲) با افزایش تعداد زنجیره های فرکانس رادیویی، کارایی طیفی کل سیستم با هر سه روش افزایش می یابد. ۳) دو روش پیشنهادی تخصیص توان با شرایط محوشدگی و الگوریتم PSO، کارایی طیفی بهتری نسبت به روش [۱۱] فراهم می کنند. ۴) با افزایش SNR، شکاف عملکرد بین دو روش پیشنهادی تخصیص توان و روش [۱۱] بیشتر می شود. ۵) الگوریتم PSO، در N_s و SNR های پایین، کارایی طیفی بهتری نسبت به دیگر روش ها فراهم می کند. ۶) با افزایش SNR و N_s ، بهره عملکرد فراهم شده توسط روش تخصیص توان با شرایط محوشدگی، نسبت به الگوریتم PSO افزایش می یابد. ۷) با افزایش β ، کارایی طیفی به دست آمده از روش [۱۱] بهبود می یابد؛ چون با نزدیک شدن کاربران به ایستگاه پایه، اثرات محوشدگی روی آن ها کاهش می یابد.

شکل ۳، کارایی طیفی کلی قابل دستیابی سیستم چند ورودی - چند خروجی انبوه را برای دو روش الگوریتم PSO و روش [۱۱]، نسبت به تعداد کاربران و تعداد زنجیره های فرکانس رادیویی متفاوت نشان می دهد. برای روش [۱۱]، $\beta = 0.001$ در نظر گرفته شده است. برای الگوریتم PSO، تعداد ذرات برابر با ۶۰۰ و تعداد تکرار الگوریتم برابر با ۱۰۰ در نظر گرفته شده است. از شکل ۳ معلوم است که کارایی طیفی کلی قابل دستیابی از طریق هر دو روش اختصاص توان، با افزایش تعداد کاربران ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد.

که در آن $f(.)$ بیانگر تابع هدف بوده و در این مقاله به فرم روابط (۱۳) و (۱۵) به عنوان کارایی طیفی تعریف می شود. همچنین، بهترین مختصات نهایی ممکن به صورت (۱۹) تعریف می شود.

$$x_{GlobalBest}^{new} = \arg \max_{x(i)_{LocalBest}} f(x(i)_{LocalBest}), \quad 1 \leq i \leq N \quad (19)$$

بر این اساس، شبه کد الگوریتم PSO به صورت الگوریتم ۱ نوشته می شود.

الگوریتم ۱: شبه کد الگوریتم PSO

برای هر ذره $i \in [1, \dots, N]$

۱) مقداردهی اولیه برای سرعت ذره و مختصات اولیه

۲) قرار دادن $x(i)_{LocalBest} = x(i)^{initial}$

پایان برای

$$x_{GlobalBest} = \arg \max_{x(i)_{LocalBest}} f(x(i)_{LocalBest}) \quad (1)$$

تکرار کن:

برای هر ذره $i \in [1, \dots, N]$

۱) به روزرسانی سرعت ذره بر اساس رابطه (۱۷)

۲) بررسی کران های سرعت

۳) به روزرسانی مختصات ذره بر اساس رابطه (۱۶)

۴) اعمال رابطه (۱۸)

پایان برای

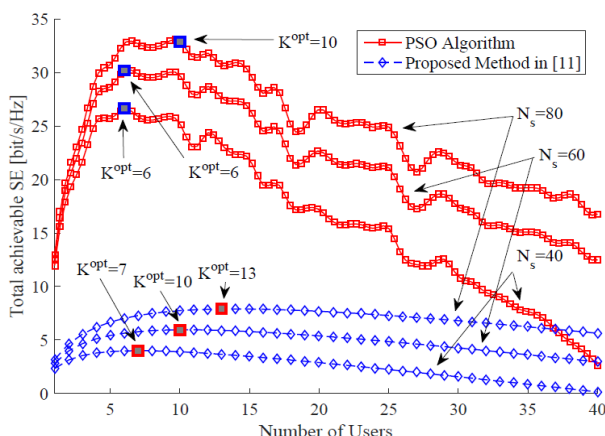
تا زمانی که معیارهای توقف برآورده شوند.

۵- نتایج عددی و شبیه سازی ها

در این بخش، به ارائه نتایج حاصل از شبیه سازی ها برای ارزیابی عملکرد کارایی طیفی کلی قابل دستیابی سیستم چند ورودی - چند خروجی انبوه می پردازیم. همچنین دقت نتایج تحلیلی را بررسی می کنیم. تأثیر روش های پیشنهادی تخصیص توان را روی کارایی طیفی کل سیستم، برای N_s های مختلف ارزیابی می کنیم. در شبیه سازی ها، کران های بالا و پایین، با تقریبی، یکسان در نظر گرفته شده اند. با در نظر گرفتن یک سلول دایره ای به شعاع ۵۰۰ متر و محیط محافظ ۲۰ متر برای سیستم چند ورودی - چند خروجی انبوه، فرض می کنیم ۸ کاربر تک آنتنی و یک فرستنده با ۱۲۸ آنتن در سلول توزیع شده اند. توان تلفات مسیر برابر با $\gamma = 2.1$ و انحراف معیار محوشدگی سایه اندازی برابر با $\sigma_{shad} = 4.9 \text{ dB}$ در نظر گرفته شده اند. برای دو روش پیشنهادی تخصیص توان، ضرایب محوشدگی مقیاس بزرگ کاربران به صورت (۲۰) در نظر گرفته شده اند:

$$\begin{aligned} \beta_1 &= 1, \quad \beta_2 = 0.125, \quad \beta_3 = 0.037, \quad \beta_4 = 0.015, \\ \beta_5 &= 0.008, \quad \beta_6 = 0.0046, \quad \beta_7 = 0.003, \quad \beta_8 = 0.002 \end{aligned} \quad (20)$$

شکل (۲): کارایی طیفی کلی قابل دستیابی نسبت به SNR برای سه روش مختلف تخصیص توان به کاربران و تعداد زنجیره‌های فرکانس رادیویی متفاوت ($N_s \in \{10, 20, 50\}$): کاربران با ضرایب محوشدگی یکسان برای N_s های مختلف در روش [۱۱] - (ب): کاربران با ضرایب محوشدگی متفاوت برای N_s های مختلف در روش [۱۱]



شکل (۳): کارایی طیفی کلی قابل دستیابی نسبت به تعداد کاربران برای SNR = 20 dB و تعداد زنجیره‌های فرکانس رادیویی متفاوت ($N_s \in \{40, 60, 80\}$): روش PSO و روش [۱۱]

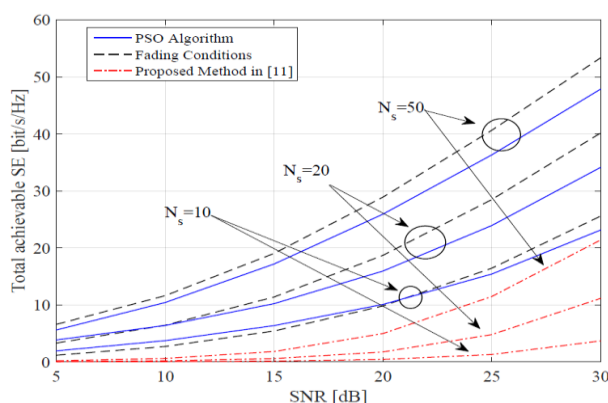
۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، کارایی طیفی کلی سیستم چند ورودی - چند خروجی انبوه با معماری ترکیبی در نظر گرفته شد. همچنین نقطه ضعف مربوط به نحوه اختصاص توان به کاربران، در این سیستم مورد ارزیابی قرار گرفت و ملاحظه شد که به دلیل تخصیص توان یکسان به تمامی کاربران، بدون در نظر گرفتن شرایط محوشدگی آن‌ها، دستیابی به عملکرد مطلوب ممکن نخواهد بود. با هدف بهبود و حداکثر کردن کارایی طیفی کلی سیستم چند ورودی - چند خروجی انبوه، دو روش تخصیص توان به کاربران پیشنهاد کرده‌ایم. در روش اول با مرتب‌سازی کاربران برحسب شرایط کانال آن‌ها، توان بیشتر به کاربر با شرایط کانال ضعیف و توان کمتر به کاربر با شرایط کانال خوب اختصاص می‌دهیم. با این روش می‌توان از افت سیگنال کاربران با شرایط کانال ضعیف جلوگیری کرد. همچنین از الگوریتم بهینه‌سازی PSO برای تعداد زنجیره‌های فرکانسی متفاوت بهره گرفته‌ایم. همچنین تعداد بهینه کاربران، برای دستیابی به کارایی طیفی مطلوب را مشخص کرده‌ایم. مطابق با شبیه‌سازی‌های انجام شده، نشان دادیم که روش‌های پیشنهادی اختصاص توان، کارایی طیفی مطلوبی فراهم می‌کنند. کارایی طیفی مطلوب فراهم شده، با افزایش تعداد زنجیره‌های فرکانس رادیویی و نیز SNR بهبود بیشتری می‌یابد.

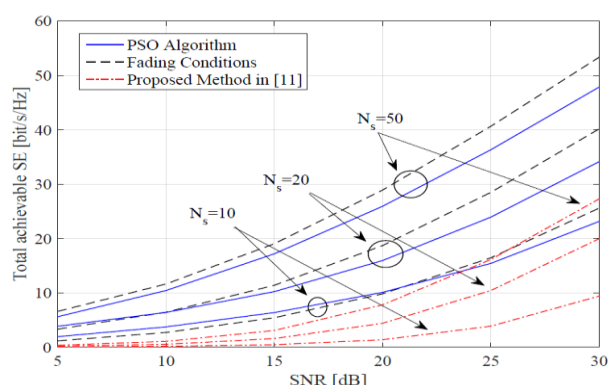
همچنین تعداد بهینه کاربران برای دستیابی به حداکثر کارایی طیفی در هر دو روش مشخص شده است. از طریق الگوریتم PSO با تعداد ۶ و ۱۰ کاربر فعال در سلول، می‌توان به حداکثر کارایی طیفی به ترتیب برای N_s های {۴۰ و ۶۰} و ۸۰ دست یافت.

جدول (۱): ضرایب اختصاصی توان به کاربران با استفاده از الگوریتم PSO برای N_s های مختلف

	$N_s = 10$	$N_s = 20$	$N_s = 50$	
p_1	۰/۲۲۷۳۴۸۸۲	۰/۲۱۲۶۵۱۳۳	۰/۰۳۰۷۶۰۳۸	$\times P$
p_2	۰/۱۴۲۷۴۲۰	۰/۰۰۱	۰/۱۲۹۹۳۸۳۹	$\times P$
p_3	۰/۰۰۸۵۷۴۲۹	۰/۱۷۴۶۱۸۳۲	۰/۱۹۶۲۵۲۵۵	$\times P$
p_4	۰/۰۲۵۵۴۹۴۵	۰/۰۴۸۷۳۲۷۴	۰/۰۰۱	$\times P$
p_5	۰/۱۴۲۶۴۱۱۱	۰/۱۸۱۸۹۷۵۶	۰/۱۹۱۴۲۵۶۶	$\times P$
p_6	۰/۱۷۵۵۸۸۰۲	۰/۲۴۸۷۶۰۷۷	۰/۱۳۶۷۸۴۴۹	$\times P$
p_7	۰/۰۹۲۶۷۴۹۰	۰/۰۴۴۸۷۵۴۷	۰/۱۹۹۹۷۶۹۴	$\times P$
p_8	۰/۱۸۴۸۷۹۹۰	۰/۰۸۷۴۷۴۹۲	۰/۱۱۳۹۰۰۷۸	$\times P$



(آ)



(ب)

مراجع

- Hybrid Architectures Based on Phase Shifters," IEEE Access, vol. 6, pp. 11751-11759, 2018.
- [15] W. Tan, et al. "Low cost and high efficiency hybrid architecture massive MIMO systems based on DFT processing," Wireless Communications and Mobile Computing, 2018.
- [16] K. Dovelos, M. Matthaiou, H. Q. Ngo and B. Bellalta, "Channel Estimation and Hybrid Combining for Wideband Terahertz Massive MIMO Systems," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 39, no. 6, pp. 1604-1620, 2021.
- [17] K. Chen, C. Qi and G. Y. Li, "Two-Step Codeword Design for Millimeter Wave Massive MIMO Systems with Quantized Phase Shifters," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 68, pp. 170-180, 2020.
- [18] E. Björnson, H. Jakob, and S. Luca, "Massive MIMO networks: Spectral, energy, and hardware efficiency," Foundations and Trends® in Signal Processing, 2017.
- [19] G.-c. Chen, and J.-s. Yu, "Particle swarm optimization algorithm," INFORMATION AND CONTROL-SHENYANG, vol. 34, no. 3, pp. 318, 2005.
- [20] M. R. G. Aghdam, R. Abdoolee, S. S. Sahbari, and B. M. Tazehkand, "Non-Gradient Based PDF Approximation for Sensor Selection in Cognitive Sensor Networks," International Journal of Interdisciplinary Telecommunications and Networking (IJITN), vol. 11, no. 1, pp. 1-16, 2019.
- [21] Eberhart, and Y. Shi, "Particle swarm optimization: developments, applications and resources," Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation, vol. 1, pp. 81-86, 2001.
- [1] G. Skourletopoulos, and et al., "Towards mobile cloud computing in 5G mobile networks: applications, big data services and future opportunities", Advances in Mobile Cloud Computing and Big Data in the 5G Era. Springer, pp. 43-62, 2017.
- [2] P. Liu, K. Luo, D. Chen, T. Jiang, and M. Matthaiou, "Spectral Efficiency Analysis of Multi-Cell Massive MIMO Systems with Ricean Fading", In 2018 10th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), pp. 1-7, 2018.
- [3] M. D. Renzo, H. Haas, A. Ghayeb, S. Sugiura, and L. Hanzo, "Spatial modulation for generalized MIMO: Challenges, opportunities and implementation", Proc. IEEE, vol. 102, no. 1, pp. 56-103, 2014.
- [4] زراعتکارمقدم، جواد. ناصر، ندا. قاضی‌زاده، رضا. "مدل‌سازی دو بعدی کانال‌های چند ورودی - چند خروجی با آرایه‌های قطبی شده"، مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال ۱۱، شماره ۲، پاییز و زمستان ۱۳۹۳.
- [5] زراعتکارمقدم، جواد. فرخی، حمید. ناصر، ندا. "بررسی تأثیر فاصله‌ی بین آنتن‌ها در فرستنده و گیرنده بر روی ظرفیت کانال MIMO"، مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال ۱۳، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۵.
- [6] E. G. Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson, and T. L. Marzetta, "Massive MIMO for next generation wireless systems", IEEE Communications Magazine, vol. 54, no. 2, pp. 186-195, 2014.
- [7] آتشبار، محمود. پاسنگی، پریسا. "روش جدید برای تخمین کور کانال مسیر پایین رونده در سیستم MIMO حجیم"، مجله سامانه‌های غیرخطی در مهندسی برق، سال ۵، شماره ۱، زمستان ۱۳۹۷.
- [8] ابراهیمی، رضا. ضمیری جعفریان، حسین. خادمی، مرتضی. "تخصیص سازگار دنباله پایلوت در سیستم چندآنتنی چندسلولی چندکاربره انبوه در شبکه مخابرات بی سیم 5G"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال ۱۹، شماره ۳، ۱۴۰۱.
- [9] عمادی، محمدجواد. معصومی، حامد. "تخصیص بهینه‌ی توان پایلوت و داده در سیستم چند-ورودی چند-خروجی ابعاد بزرگ با در نظر گرفتن نارسایی سخت‌افزار"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال ۱۷، شماره ۱، ۱۳۹۹.
- [۱۰] بیانی‌فر، مهدی. رضوی زاده، سید محمد. "بررسی کارایی توان کانال تداخلی رله چند ورودی-چند خروجی انبوه"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال ۱۴، شماره ۲، ۱۳۹۶.
- [11] W. Tan, M. Matthaiou, S. Jin, and X. Li, "Spectral Efficiency of DFT-Based Processing Hybrid Architectures in Massive MIMO", IEEE Wireless Communications Letters, vol. 6, no. 5, pp. 586-589, 2017.
- [12] M. Vu, and A. Paulraj, "MIMO wireless linear precoding", IEEE Signal Process. Mag., vol. 24, no. 5, pp. 86-105, Sep. 2007.
- [13] A. Alkhateeb, O. El-Ayach, G. Leus, and R. W. Heath, "Hybrid precoding for millimeter wave cellular systems with partial channel knowledge," 2013 Information Theory and Applications Workshop (ITA), pp. 1-5, Feb. 2013.
- [14] W. Tan, D. Xie, J. Xia, W. Tan, L. Fan and S. Jin, "Spectral and Energy Efficiency of Massive MIMO for

زیر نویس‌ها

- ¹ Polarized
² Zero Forcing
³ Maximal Ratio
⁴ Time Division Duplexing
⁵ Maximal Ratio Combining
⁶ Maximal Ratio Transmitting
⁷ Discrete Fourier Transform
⁸ Radio Frequency
⁹ Signal to Noise Ratio
¹⁰ Particle Swarm Optimization
¹¹ Channel State Information
¹² Frequency Division Duplexing
¹³ Least Square
¹⁴ Minimum Mean Square Error