تخصیص بهینه‌ی توان پایلوت و داده در سیستم چند- ورودی چند- خروجی ابعاد بزرگ با در نظر گرفتن نارسایی سخت‌افزار

حامد معصومی[۱] **محمدجواد عمادی[۲]**

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران
hamed_masoomy@aut.ac.ir

۲- استادیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر - تهران- ایران
mj.emadi@aut.ac.ir

چکیده: در این مقاله، لینک فراسوی سیستم چند-ورودی چند-خروجی ابعاد بزرگ تک سلولی با فرض غیرایده‌آل بودن آنتن‌های گیرنده در نظر گرفته می‌شود. از آن‌جایی که کاربران انرژی محدودی در هر بازه‌ی همدوسی دارند، باید آن را به صورت بهینه برای ارسال پایلوت به منظور تخمین کانال در گیرنده و ارسال سمبل‌های اطلاعات خود تخصیص دهند. غیرایده‌آلی آنتن‌های گیرنده در هر دو مرحله‌ی تخمین کانال و دریافت اطلاعات در گیرنده در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، ابتدا تخمین کانال کاربران در گیرنده انجام می‌شود و سپس با استفاده از کانال‌های تخمین زده شده و با به کار گیری گیرنده‌ی ترکیب بیشینه نسبت، نرخ قابل حصول برای هر کاربر با توان پایلوت و داده‌ی متفاوت استخراج می‌شود. سپس مسئله‌ی بیشینه‌سازی کمترین نرخ کاربران با فرض محدودیت انرژی در بازه‌ی همدوسی ارائه می‌شود. مسئله‌ی مطرح شده که یک مسئله‌ی غیر محدب است به یک مسئله‌ی برنامه‌ریزی هندسی تبدیل می‌شود که با توجه به الگوریتم‌های موجود به طور بهینه‌ای قابل حل است. در نهایت نتایج شبیه‌سازی که نشان دهنده‌ی بهبود قابل توجه نرخ کاربران با تخصیص توام توان پایلوت و داده نسبت به حالت‌های ساده‌ی تخصیص فقط توان داده و تخصیص توان یکسان برای پایلوت و داده است، ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: سیستم چند-ورودی چند-خروجی ابعاد بزرگ، لینک فراسو، تخصیص توان، تخمین کانال، نارسایی سخت‌افزار، برنامه‌ریزی هندسی، گیرنده ترکیب بیشینه نسبت.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۰۳/۲۱

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۸/۰۷/۰۱

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۸/۰۷/۲۹

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر محمدجواد عمادی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران – تهران – خیابان حافظ – پلاک ۴۲۴ – دانشگاه صنعتی امیر کبیر – دانشکده‌ی برق

۱- مقدمه

به منظور پاسخگویی به رشد روز افزون نیاز کاربرها به نرخ داده‌ی بالا، سیستم چند-ورودی چند-خروجی ابعاد بزرگ[1] به عنوان تکنولوژی‌ای که بازدهی طیفی و بازدهی انرژی بالا را برای سیستم مخابراتی به ارمغان می‌آورد [۱]، معرفی شده است. در این تکنولوژی با به کارگیری تعداد بسیار زیاد آنتن در ایستگاه پایه، می‌توان از گیرنده‌های خطی استفاده کرد (به عنوان نمونه گیرنده ترکیب بیشینه نسبت[2])، که به علت قانون ضعیف اعداد بزرگ عملکرد نزدیک به گیرنده‌های پیچیده‌ی بهینه را دارند [۲].

بعد از معرفی تکنولوژی چند-ورودی چند-خروجی ابعاد بزرگ، تحقیق‌های بسیاری به منظور بهبود هر چه بیشتر عملکرد این سیستم از جنبه‌های مختلف انجام شده است [۳-۱۱]. مرجع [۳] تخصیص توان پایلوت و داده را برای لینک فراسوی سیستم چند-ورودی چند-خروجی ابعاد بزرگ تک سلولی با هدف بیشینه کردن نرخ مجموع و کمترین نرخ مورد بررسی قرار می‌دهد. مسئله‌ی تخصیص توان پایلوت و داده برای لینک فراسوی سیستم چند-ورودی چند-خروجی ابعاد بزرگ چند سلولی برای بیشینه‌سازی نرخ مجموع در [۴] بررسی شده است. [۵] طراحی پایلوت و تخصیص توان داده را برای لینک فراسوی سیستم چند-ورودی چند-خروجی ابعاد بزرگ چند سلولی با هدف بیشینه کردن کمترین نرخ تحلیل می‌کند. برای سیستم چند-ورودی چند-خروجی ابعاد بزرگ، در مراجع [۶]، [۷] و [۸] به ترتیب تخصیص توان پایلوت و داده برای بهبود بازدهی انرژی لینک فراسوی سیستم تک سلولی مبتنی بر رادیو-شناختی، بهبود نرخ مجموع لینک فروسوی سیستم تک سلولی و بهبود بازدهی انرژی لینک فروسوی سیستم چند سلولی بررسی می‌شود. به علاوه برای سیستم‌های چند-ورودی چند-خروجی ابعاد بزرگ بدون سلول[3] تخصیص توان پایلوت و داده در [۹] و تخصیص توان فقط داده در [۱۰] به منظور بهبود نرخ کاربران انجام شده است. همچنین برای سیستم چند-ورودی چند-خروجی ابعاد بزرگ تک سلولی با روش دسترسی چندگانه‌ی نیمه متعامد، تخصیص توان پایلوت وداده در مراجع [۱۲] و [۱۳] مورد بررسی قرار گرفته است.

در عمل شبکه‌های مخابراتی تحت تاثیر عوامل غیرایده‌آل متعددی از جمله آفست فرکانس حامل[4] و نرخ نمونه برداری[5]، عدم توازن شاخه هم‌فاز و فاز متعامد[6]، نویز فاز[7] و قطعات آنالوگ غیرخطی هستند. این مسئله را می‌توان با بکارگیری سخت‌افزارهای دقیق‌تر/گران‌تر یا الگوریتم‌های پیچیده تر، که به معنای هزینه و توان مصرفی بالا است، جبران کرد. با این وجود، باز هم خطای غیرقابل صرف نظری به دلیل ماهیت متغیر با زمان و تصادفی بودن این غیرایده‌آلی‌ها در سیستم باقی خواهد ماند [۱۴]. بنابراین به منظور داشتن سیستم چند-ورودی چند-خروجی ابعاد بزرگ با هزینه‌ی معقول، تحلیل عملکرد این سیستم تحت نارسایی سخت‌افزار بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۱۵-۲۶]. نشان داده شده است که نارسایی سخت‌افزار عامل محدود کننده‌ای برای بازدهی طیفی/انرژی و همچنین دقت تخمین کانال، حتی برای مقادیر سیگنال به نویز و تداخل بالا است [۱۵]، [۱۶]. برای سیستم بدون سلول ابعاد بزرگ نیز نتایج مشابهی در [۱۷] بدست آمده است و نشان داده شده است که با افزایش تعداد آنتن‌ها تاثیر نارسایی سخت‌افزار در ایستگاه پایه جبران می‌شود. [۱۹] تاثیر نارسایی سخت‌افزار را برای سیستم تک کاربریِ چند-ورودی چند-خروجی با مدل کانال محوشونده‌ی Rician مطالعه می‌کند. این مرجع نشان داده است که در سیگنال به نویز بالا با افزایش تعداد آنتن‌ها در دو طرف لینک اثرات نارسایی ناپدید می‌شود. در مرجع [۲۱]، بازدهی طیفی انتقال فراسوی سیستم چند سلولی ابعاد بزرگ با نارسایی سخت‌افزار در گیرنده مطالعه می‌شود و [۲۲] با فرض سخت‌افزار ایده‌آل و غیرایده‌آل در فرستنده (کاربران)، طرح جدیدی برای طراحی پایلوت به منظور کاهش آلودگی پایلوت[8] ارائه می‌دهد. تاثیر نارسایی سخت‌افزار بر قوانینِ مقیاس‌پذیری توانی برای سیستمی که در آن چندین زوج گیرنده-فرستنده‌ی تک آنتنی از طریق یک رله‌ی مجهز به تعداد آنتن‌های بسیار زیاد ارتباط برقرار می‌کنند در [۲۳] بررسی می‌شود. به علاوه، نرخِ secrecy سیستم ابعاد بزرگ در [۲۴]، رفتار مقیاس‌پذیری نرخ داده‌ی سیستم چند سلولی ابعاد بزرگ با محوشوندگی Rician در [۲۵]، و عملکرد سیستم چند آنتنی ابعاد بزرگ با کانال محوشوندگیِ ضربی در [۲۶] با در نظر گرفتن نارسایی سخت‌افزار تحلیل می‌شود.

با الهام گرفتن از بحث فوق، به منظور پیاده‌سازی سیستم ابعاد بزرگ با هزینه‌ی معقول و بهبود عملکرد آن، در این مقاله بهینه‌سازی نرخ کاربران با تخصیص توان پایلوت و داده با در نظر گرفتن حالت واقعی‌تر نارسایی سخت‌افزار در ایستگاه پایه و انرژی محدود کاربران در هر بازه‌ی همدوسی، مطالعه و تحلیل می‌شود. به طور خلاصه موارد زیر در این مقاله بررسی می‌شود؛

- بدست آوردن تخمین کانال در ایستگاه پایه و شکل بسته‌ی نرخ قابل حصول کاربران با در نظر گرفتن توان پایلوت وداده‌ی متفاوت و نارسایی سخت‌افزار در ایستگاه پایه.
- ارائه‌ی تخصیص توان پایلوت و داده با هدف سرویس‌دهی منصفانه‌ی بیشینه‌سازی کمترین نرخ در شبکه، و تبدیل آن به یک مسئله‌ی برنامه‌ریزی هندسی که به طور کارایی توسط الگوریتم‌های موجود قابل حل است .
- بررسی عملکرد سیستم و تخصیص توان ارائه شده با فراهم کردن نتایج عددی.

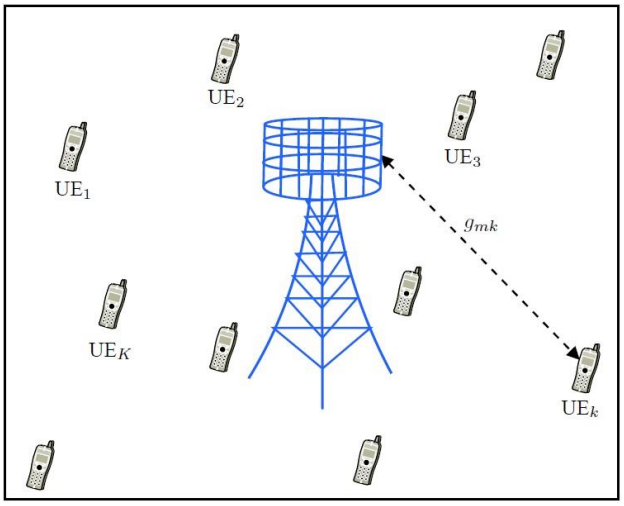
در ادامه در بخش ۲ سیستم مدل در نظر گرفته شده معرفی می‌شود، در بخش ۳ تخمین کانال و نرخ قابل حصول، و در بخش ۴ مسئله‌ی تخصیص توان مطرح و راهکار ارائه شده آورده می‌شود. در نهایت در بخش ۵ نتیجه‌گیری مقاله ارائه شده است.

۲- سیستم مدل

همان طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، لینک فراسوی یک سیستم چند-ورودی چند-خروجی ابعاد بزرگ تک سلولی را در نظر می‌گیریم، که تعداد K کاربر تک آنتنی توسط یک نقطه‌ی دسترسی[۹] (ایستگاه پایه) با M آنتن سرویس‌دهی می‌شوند. به علاوه، کانال بین کاربران و ایستگاه پایه به صورت محوشونده‌ی تخت در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، فرض می‌شود که کانال کاربران برای هر زمان همدوسی T_c [ثانیه] و پهنای باند همدوسی B_c [هرتز] یا بازه همدوسی $T=[T_cB_c]$ [نمونه] ثابت است و از هر بازه‌ای به بازه‌ی دیگر به طور مستقل و تصادفی تغییر می‌کند. بنابراین، کانال بین ایستگاه پایه و کاربر k-ام را به صورت رابطه‌ی (۱) فرض می‌شود.

$$\boldsymbol{g}_k = \sqrt{\beta_k}\boldsymbol{h}_k \quad \text{برای} \quad m=\{1,..,M\} \text{ و } k=\{1,..,K\}, \qquad (۱)$$

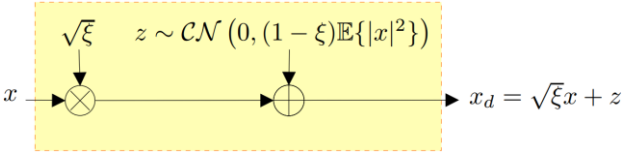
که β_k نشان دهنده‌ی ضریب مربوط به محوشوندگی مقیاس بزرگ و $\boldsymbol{h}_k$ بردار $m\times 1$ ضریب محوشوندگی مقیاس کوچک است که برای کاربرهای مختلف مولفه‌های آن مستقل و به صورت یکسان با توزیع گوسی مختلط با میانگین صفر و واریانس ۱ است، یعنی $h_{mk} \sim CN(0,1)$. قبل از محاسبه‌ی نرخ کاربران و طرح مساله‌ی تخصیص منابع در ادامه پیش‌نیاز مربوط به نارسایی سخت‌افزار را مطرح کنیم.



شکل (۱): سیستم چند-ورودی چند-خروجی ابعاد بزرگ تک سلولی

۲-۱- مدل نارسایی سخت‌افزار

برای مدل کردن نارسایی سخت‌افزار، فرض می‌شود که سیگنال دریافتی توسط یک نویز گوسی جمع شونده دچار اعوجاج می‌شود[۱۶]. همانگونه که در شکل (۲) نشان داده می‌شود، سیگنال دچار اعوجاج شده به صورت $x_d = \sqrt{\xi}x + z$ مدل می‌شود، که x سیگنال ورودی به سخت‌افزار غیرایده‌آل است، $\xi \in [0,1]$ نشان دهنده‌ی ضریب کیفیت سخت‌افزار است و اعوجاج ناشی از سخت‌افزار غیرایده‌آل به صورت $z \sim CN\left(0,(1-\xi)E\left\{|x|^2\right\}\right)$ مدل می‌شود که مستقل از ورودی x است. E بیانگر اپراتور امید ریاضی است. لازم به ذکر است که در این مدل واریانس سیگنال ورودی و خروجی سخت‌افزار غیرایده‌آل یکسان است، یعنی $E\left\{|x|^2\right\} = E\left\{|x_d|^2\right\}$. همچنین، $\xi = 1$ و $\xi = 0$ به ترتیب نشان دهنده‌ی سخت‌افزار ایده‌آل و سخت‌افزار بلا استفاده است.



شکل (۲): مدل نارسایی سخت‌افزار

۳- محاسبه‌ی نرخ داده‌ی لینک فراسو

در این بخش ابتدا تخمین کانال در ایستگاه پایه انجام می‌شود و سپس ارسال داده توسط کاربران و محاسبه نرخ قابل حصول ارائه می‌شود.

۳-۱- آموزش در لینک فراسو

در این مرحله، کاربرها دنباله پایلوت به طول K را به نحوی که دو به دو بر هم متعامد باشند را ارسال می‌کنند. سپس ایستگاه پایه با توجه به سیگنال دریافتی از کاربران، کانال آن‌ها را که برای یک بازه‌ی همدوسی معتبر است تخمین می‌زند.

بنابراین، کاربر k-ام دنباله‌ی پایلوت $\sqrt{\tau}\boldsymbol{\varphi}_k \in C^{\tau\times 1}$ را ارسال می‌کند، که $\tau = K \le T$ طول دنباله پایلوت است. با توجه به متعامد بودن پایلوت ارسالی کاربران داریم $\boldsymbol{\varphi}_k^H\boldsymbol{\varphi}_{k'} = \delta(k-k')$ که $\delta(.)$ تابع دیراک دلتا است. سیگنال دریافتی $M\times K$ در این مرحله در ایستگاه پایه به صورت رابطه‌ی (۲) است.

$$\boldsymbol{Y}_p = \sqrt{\xi}\sum_{k=1}^{K}\boldsymbol{g}_k\sqrt{\tau\rho_{pk}}\boldsymbol{\varphi}_k^T + \boldsymbol{Z}_p + \boldsymbol{N}_p, \qquad (۲)$$

که در عبارت بالا ρ_{pk} توان تخصیص داده شده برای ارسال پایلوت توسط کاربر k-ام، $\boldsymbol{N}_p$ نویز کانال است که مولفه‌های آن مستقل با توزیع $CN(0,N)$ هستند. در نهایت، $\boldsymbol{Z}_p$ ماتریس $M\times K$ اعوجاج ناشی از سخت‌افزار است که مولفه‌های آن مستقل از هم بوده و هر ستون دلخواه از آن (ستون i-ام) توزیعی به صورت زیر دارد.

$$\boldsymbol{Z}_p[:,i] \sim CN\left(0,(1-\xi)\sum_{k=1}^{K}\begin{bmatrix}\rho_{pk}|g_{1k}|^2 & 0 & \cdots & 0\\ 0 & \rho_{pk}|g_{2k}|^2 & \ddots & \vdots\\ \vdots & \ddots & \ddots & 0\\ 0 & \cdots & 0 & \rho_{pk}|g_{Mk}|^2\end{bmatrix}\right) \qquad (۳)$$

در ایستگاه پایه، به منظورِ تخمینِ کانالِ کاربرِ k-ام، ابتدا همبستگی سیگنال پایلوت دریافتی با دنباله پایلوت کاربر محاسبه می‌شود، یعنی در ایستگاه پایه $y_{pk} = Y_p\varphi^*$ به صورت زیر تشکیل می‌شود؛

$$\boldsymbol{y}_{pk} = \boldsymbol{Y}_p \boldsymbol{\varphi}_k^* = \underbrace{\sqrt{\xi\tau\rho_{pk}}\,\boldsymbol{g}_k}_{Desired\ pilot} + \underbrace{\boldsymbol{Z}_p \boldsymbol{\varphi}_k^*}_{Hardware\ impairment} + \underbrace{\boldsymbol{N}_p \boldsymbol{\varphi}_k^*}_{Noise}, \tag{۴}$$

سپس با استفاده از تخمین‌گر خطی میانگین کمترین مربعات خطا[۱۰]، تخمین کانال به صورت زیر بدست می‌آید [۲۷، فصل ۱۲]:

$$\hat{\boldsymbol{g}}_k = C_{\boldsymbol{g}_k \boldsymbol{y}_{pk}} C_{\boldsymbol{y}_{pk}\boldsymbol{y}_{pk}}^{-1} \boldsymbol{y}_{pk} \tag{۵}$$

$$C_{\boldsymbol{g}_k \boldsymbol{y}_{pk}} = E\left\{\boldsymbol{g}_k \boldsymbol{y}_{pk}^H\right\} = \sqrt{\xi\tau\rho_{pk}}\,\beta_k \boldsymbol{I}_{M\times M}$$

$$C_{\boldsymbol{y}_{pk}\boldsymbol{y}_{pk}} = E\left\{\boldsymbol{y}_{pk}\boldsymbol{y}_{pk}^H\right\} = \left(\xi\tau\rho_{pk}\beta_k + (1-\xi)\sum_{i=1}^{K}\rho_{pi}\beta_i + N\right)\boldsymbol{I}_{M\times M},$$

پس تخمین کانال کاربر k-ام در ایستگاه پایه به صورت زیر است:

$$\hat{\boldsymbol{g}}_k = \frac{\sqrt{\xi\tau\rho_{pk}}\,\beta_k}{\xi\tau\rho_{pk}\beta_k + (1-\xi)\sum_{i=1}^{K}\rho_{pi}\beta_i + N}\boldsymbol{y}_{pk} = \lambda_k \boldsymbol{y}_{pk}, \tag{۶}$$

و واریانس کانال تخمین زده شده در رابطه‌ی فوق برابر با $E\left\{\hat{\boldsymbol{g}}_k\hat{\boldsymbol{g}}_k^H\right\} = \gamma_k \boldsymbol{I}_{M\times M} = \sqrt{\xi\tau\rho_{pk}}\,\beta_k\lambda_k \boldsymbol{I}_{M\times M}$ است.

تذکر ۱: می‌توان نشان داد که خطای تخمین کانال در سیگنال به نویز بالا به مقدار محدود زیر میل می‌کند که وابسته به ضریب کیفیت سخت‌افزار است.

$$\varepsilon_k^\infty = \frac{(1-\xi)\beta_k\sum_{i=1}^{K}\beta_i}{\xi\tau\beta_k + (1-\xi)\sum_{i=1}^{K}\beta_i}. \tag{۷}$$

۳-۲- نرخ داده در لینک فراسو

در این مرحله، تمام K کاربر به طور مستقل و در یک منبع زمان-فرکانسی داده‌های خود را ارسال می‌کنند. بنابراین، در ایستگاه پایه سیگنال زیر دریافت می‌شود.

$$\boldsymbol{y}_u = \sqrt{\xi}\sum_{k=1}^{K}\sqrt{\rho_{uk}}\,\boldsymbol{g}_k s_k + \boldsymbol{z}_u + \boldsymbol{n}_u, \tag{۸}$$

که در عبارت بالا، s_k سمبل ارسالی توسط کاربر k-ام است که از یک کتاب کد گوسی انتخاب می‌شود، به عبارت دیگر $s_k \sim CN(0,1)$. توان تخصیص داده شده برای ارسال داده ρ_{uk} است، $\boldsymbol{n}_u \sim CN(0, N\boldsymbol{I}_{M\times M})$ نویز کانال و $\boldsymbol{z}_u$ بردار اعوجاج ناشی از سخت‌افزار است که مولفه‌های آن مستقل از هم بوده و توزیعی مشابه رابطه‌ی (۳) دارد، با این تفاوت که به جای ρ_{pk} عبارت ρ_{uk} قرار دارد.

با استفاده از کانال تخمین زده شده در ایستگاه پایه، با بکارگیری گیرنده ترکیب بیشینه نسبت، برای کاربر k-ام داریم:

$$r_k = \hat{\boldsymbol{g}}_k^H \boldsymbol{y}_u = \underbrace{\sqrt{\xi\rho_{uk}}\,E\left\{\hat{\boldsymbol{g}}_k^H \boldsymbol{g}_k\right\} s_k}_{DS_k} + \underbrace{\sqrt{\xi\rho_{uk}}\left(\hat{\boldsymbol{g}}_k^H \boldsymbol{g}_k - E\left\{\hat{\boldsymbol{g}}_k^H \boldsymbol{g}_k\right\}\right) s_k}_{BU_k}$$
$$+ \underbrace{\sqrt{\xi}\sum_{k'\neq k}^{K}\sqrt{\rho_{uk'}}\,\hat{\boldsymbol{g}}_k^H \boldsymbol{g}_{k'} s_{k'}}_{IUI_k} + \underbrace{\hat{\boldsymbol{g}}_k^H \boldsymbol{z}_u}_{HI_k} + \underbrace{\hat{\boldsymbol{g}}_k^H \boldsymbol{n}_u}_{TN_k}, \tag{۹}$$

توجه شود که برای بدست آوردن نرخ قابل حصول به سادگی نمی‌توان از تکنیک بکارگرفته شده در حالت بدون نارسایی سخت‌افزار مشابهِ [۲] استفاده کرد. بنابراین در این جا از روش استفاده-و-سپس-فراموشی[۱۱] [۲۸] استفاده می‌کنیم که در آن فقط از مشخصات آماری کانال برای آشکارسازی استفاده می‌شود. در رابطه‌ی (۹)، DS_k بخش مطلوب سیگنال است، BU_k به دلیل این است که فقط از آمارگان کانال برای آشکارسازی استفاده شده است، IUI_k تداخل سایر کاربرها بر کاربر k-ام است، HI_k بخاطر نارسایی سخت‌افزار است و TN_k به دلیل نویز کانال است.

قضیه ۱. عبارت‌های DS_k، BU_k، IUI_k، HI_k و TN_k دو به دو ناهمبسته بوده و با فرض عبارت‌های تداخل به عنوان نویز معادل گوسی نرخ قابل حصول برای کاربر k-ام با توان پایلوت و داده‌ی متفاوت و نارسایی سخت‌افزار به صورت زیر بدست می‌آید:

$$R_k = \frac{T-\tau}{T}\log_2\left(1 + \frac{|DS_k|^2}{E\left\{|BU_k|^2\right\} + E\left\{|IUI_k|^2\right\} + E\left\{|HI_k|^2\right\} + E\left\{|TN_k|^2\right\}}\right)$$
$$= \frac{T-\tau}{T}\log_2\left(1 + \frac{\xi\rho_{uk}M\gamma_k}{\sum_{k'=1}^{K}\rho_{uk'}\left(\beta_{k'} + \frac{1-\xi}{\tau\xi}\left(\frac{\beta_{k'}}{\beta_k}\right)^2\gamma_k\right) + (1-\xi)\rho_{uk}\gamma_k + N}\right), \tag{۱۰}$$

کلیات اثبات: با در نظر داشتن اینکه کانال کاربران مختلف و سمبل ارسالی آن‌ها مستقل هستند، با محاسبه‌ی کورلیشن دو به دوی عبارت‌های رابطه‌ی (۹) ناهمبسته بودن این عبارت‌ها به سادگی قابل اثبات است. به علاوه، عبارت‌های امید ریاضی را نیز مشابه [۲۹] می‌توان محاسبه کرد.

تذکر ۲: برای مقادیر بالای نسبت توان سیگنال به توان نویز نرخ کاربر k-ام به مقدار حدی زیر میل می‌کند. ($\gamma_k^\infty = \beta_k - \varepsilon_k^\infty$).

$$R_k^\infty = \lim_{\{\rho_{pk},\rho_{uk}\}_k \to \infty} R_k$$
$$= \frac{T-\tau}{T}\log_2\left(1 + \frac{\xi M\gamma_k^\infty}{\sum_{k'=1}^{K}\left(\beta_{k'} + \frac{1-\xi}{\tau\xi}\left(\frac{\beta_{k'}}{\beta_k}\right)^2\gamma_k^\infty\right) + (1-\xi)\gamma_k^\infty}\right). \tag{۱۱}$$

۴- تخصیص توان پایلوت و داده

در این بخش به منظور بهبود هر چه بیشتر بازدهی طیفی سیستم تخصیص توام توان پایلوت و داده برای کاربران ارائه می‌شود. بنابراین، برای ارائه‌ی سرویس تقریبا یکنواخت برای کاربران موجود در شبکه مسئله‌ی بیشینه‌سازی کمترین نرخ موجود در شبکه را مورد توجه قرار می‌دهیم. به علاوه، فرض می‌کنیم که کاربران در هر بازه‌ی همدوسی انرژی محدودی برابر با E_{max} دارند. بنابراین برای هر بازه‌ی همدوسی داریم:

$$\tau\rho_{pk}+(T-\tau)\rho_{uk}\le E_{max},\quad k=1,2,...,K. \qquad (۱۲)$$

در نتیجه مساله‌ی بهینه‌سازی را به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$P_1:\begin{cases}\max\limits_{\{\rho_{uk},\rho_{pk}\}_k} \quad \min\limits_{\{k\}} \quad R_k\\ S.\,t. \quad \tau\rho_{pk}+(T-\tau)\rho_{uk}\le E_{max},\ \ k=1,2,...,K,\\ \qquad \rho_{uk}\ge 0,\qquad \rho_{pk}\ge 0.\end{cases}$$

بسادگی می‌توان نشان داد که مساله‌ی بهینه‌سازی P_1 نسبت به متغیرهای بهینه‌سازی غیرمحدب (به خصوص به دلیل وجود ضرب متغیرهای بهینه‌سازی) است. با توجه به رابطه‌ی نرخ به صورت $R_k=\frac{T-\tau}{T}log_2\left(1+SINR_k\right)$، از ضریب ثابت پشت لگاریتم می‌توان چشم پوشی کرد و نیز به علت یکنوا صعودی بودن تابع $log\left(1+x\right)$ نسبت به x، می‌توان تابع هدف را با $SINR_k$ جایگزین کرد بدون اینکه مقدار متغیرهای بهینه کننده‌ی تابع هدف تغییر کند. بنابراین، در مساله‌ی بهینه‌سازی P_1 به جای تابع هدفِ R_k می‌توان $SINR_k$ را جایگزین کرد. سپس برای حل مساله‌ی بدست آمده، شکل epigraph [۳۰] آن را به صورت زیر بدست می‌آوریم:

$$P_2:\begin{cases}\max\limits_{\{\rho_{uk},\rho_{pk},\alpha\}_k} \quad \alpha\\ S.\,t. \quad SINR_k\ge\alpha,\\ \qquad \tau\rho_{pk}+(T-\tau)\rho_{uk}\le E_{max},\ \ k=1,2,...,K,\\ \qquad \rho_{uk}\ge 0,\qquad \rho_{pk}\ge 0.\end{cases}$$

مساله‌ی بهینه‌سازی P_2 همچنان به شکل یک مسئله‌ی قابل حل توسط الگوریتم‌های موجود نیست. بنابرین، ابتدا عبارت $SINR_k$ را به صورت زیر بازنویسی می‌کنیم:

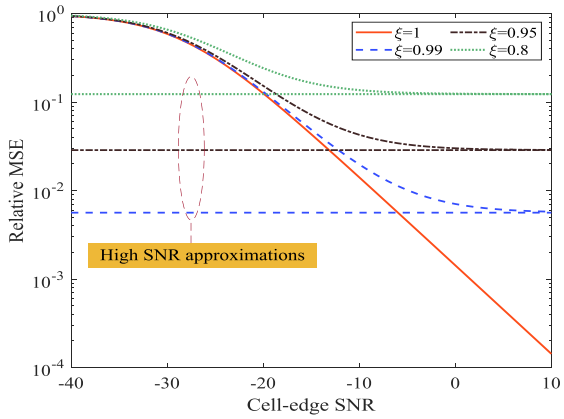
$$\begin{aligned}SINR_k&=\frac{M\xi^2\tau\beta_k^2\rho_{uk}\rho_{pk}}{D_k},\\ D_k&=\xi\tau\rho_{pk}\beta_k\sum_{k'=1}^{K}\rho_{uk'}\beta_{k'}+(1-\xi)\left[\sum_{k''=1}^{K}\rho_{pk''}\beta_{k''}\right]\left[\sum_{k'=1}^{K}\rho_{uk'}\beta_{k'}\right]\\ &+N\sum_{k'=1}^{K}\rho_{uk'}\beta_{k'}+(1-\xi)\rho_{pk}\sum_{k'=1}^{K}\rho_{uk'}\beta_{k'}^2+(1-\xi)\xi\tau\beta_k^2\rho_{pk}\rho_{uk}\\ &+N\xi\tau\beta_k\rho_{pk}+(1-\xi)N\sum_{k''=1}^{K}\rho_{pk'}\beta_{k'}+N^2.\end{aligned} \qquad (۱۳)$$

با جایگذاری رابطه‌ی (۱۳) در مساله‌ی P_2 و با محاسبات جبری می‌توان به مسئله‌ی برنامه‌ریزی هندسی[۱۲] (GP) P_3 برای مسئله‌ی اصلی P_1 دست یافت. P_3 از این جهت یک مسئله‌ی GP است، که تابع هدف آن monomial بوده و قیدهای نامساوی آن posynomial (مجموع مثبت monomial) هستند و متغیرهای بهینه‌سازی (ρ_{uk},ρ_{pk}) نامنفی هستند [۳۱]. در نتیجه می‌توان مسئله‌ی تخصیص توان پایلوت وداده با نارسایی سخت‌افزار را به طور بهینه‌ای با استفاده از solver-های موجود مثل MOSEK در CVX انجام داد.

$$P_2:\begin{cases}\min\limits_{\{\rho_{uk},\rho_{pk},\alpha\}_k} \quad \alpha^{-1}\\ S.\,t. \quad \dfrac{\alpha D_k}{M\xi^2\tau\beta_k^2\rho_{uk}\rho_{pk}}\le 1,\ \ k=1,2,...,K,\\ \qquad \dfrac{\tau}{E_{max}}\rho_{uk}+\dfrac{(T-\tau)}{E_{max}}\rho_{pk}\le 1,\ \ k=1,2,...,K,\\ \qquad \rho_{uk}\ge 0,\quad \rho_{pk}\ge 0,\quad k=1,2,...,K.\end{cases}$$

۵- نتایج عددی

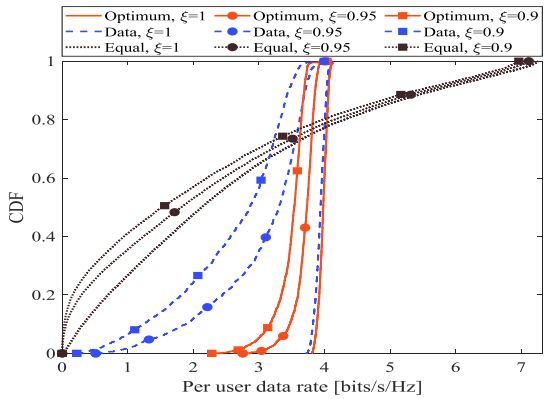
در این بخش عملکرد سیستم و تخصیص توان ارائه شده برای حالت‌های مختلف مقایسه و بررسی شده است. به این منظور، سیستم تک سلولی با شعاع $R=500\ [m]$ را در نظر می‌گیریم، که در مرکز آن ایستگاه پایه‌ای با $M=200$ آنتن قرار دارد و $K=10$ کاربر به طور یکنواخت و تصادفی در ناحیه مورد نظر به نحوی قرار دارند که حداقل 50 متر از ایستگاه پایه فاصله دارند. مدل ضریب محو شوندگی مقیاس بزرگ به صورت $\beta_k=\nu_k/r_k^{3.76}$ است که در آن r_k فاصله‌ی ایستگاه پایه از کاربر و ν_k به دلیل اثر سایه است که توزیع log-normal با انحراف معیار $7\ [dB]$ دارد. به علاوه طول بازه‌ی همدوسی $T=200$ نمونه (معادل زمان همدوسی $1\ [ms]$ و پهنای باند همدوسی $200\ [kHz]$) است. در این بخش معیار سیگنال به نویز را لبه‌ی سلول در نظر می‌گیریم، بنابراین فرض می‌کنیم $E_{max}=10^{SNR/10}R^{3.76}T$ که در نتیجه‌یِ آن با تخصیص یکسان توان پایلوت و داده به سیگنال به نویز مشخص شده در لبه‌ی سلول دست می‌یابیم [۳].



شکل (۳): میانگین مربع خطای نسبی بر حسب نسبت سیگنال به نویز

شکل (۳) تاثیر نارسایی سخت‌افزار بر کیفیت تخمین کانال را برای مقادیر سیگنال به نویز مختلف نشان می‌دهد. در این شکل میانگین مربع خطای نسبی تخمین کانال، به صورت $Relative\ MSE = (\beta_k - \gamma_k)/\beta_k$ تعریف شده است. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش سیگنال به نویز کیفیت تخمین کانال افزایش می‌یابد، ولی این افزایش کیفیت در سیگنال به نویزهای بالا توسط نارسایی سخت‌افزار محدود می‌شود و به یک مقدار حدی میل می‌کند. این مقدار حدی در رابطه‌ی (۷) در تذکر (۱) محاسبه شده است. همچنین همانطور که انتظار هست با افزایش نارسایی سخت‌افزار این مقدار حدی بیشتری می‌شود و کیفیت تخمین کانال کاهش می‌یابد.

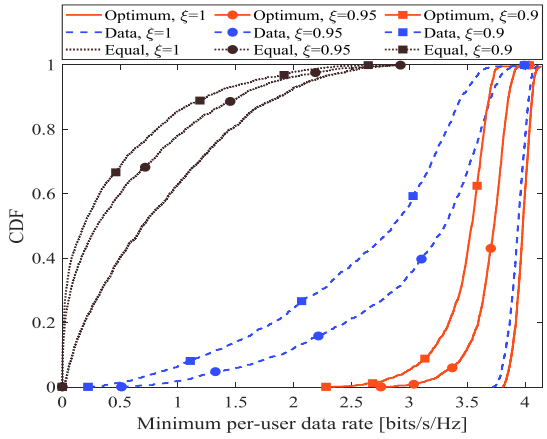
در ادامه نتایج مربوط به بهبود نرخ کاربران با تخصیص منابع ارائه شده (در شکل با Optimum مشخص شده است)، آورده شده است و با حالتی که فقط تخصیص توان داده داشته باشیم (در شکل با Data مشخص شده است) و وقتی که توان به طور یکسان بین پایلوت و داده تقسیم می‌شود (یعنی $\rho_{pk} = \rho_{uk} = E_{mxa} / T$، که با Equal در شکل‌ها مشخص شده است) مقایسه شده است. نمودارهای تابع توزیع تجمعی برای تعداد ۱۵۰۰ تحقق سیستم، به دست آمده است.



شکل (۴): تابع توزیع تجمعی نرخ داده کاربر در سیگنال به نویز 10- [dB]

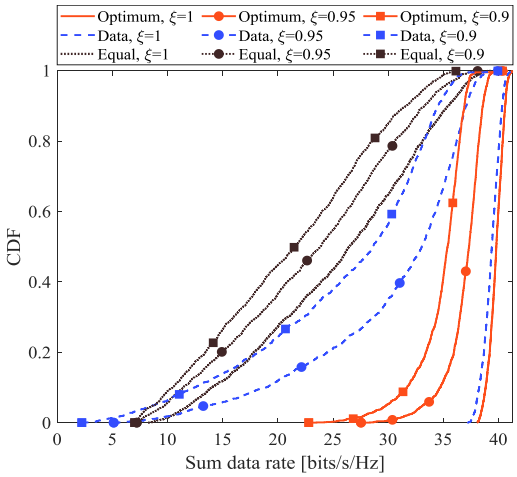
در شکل (۴) تابع توزیع تجمعی[۱۳] (CDF) نرخ کاربران نشان داده شده است، همان طور که از این شکل مشاهده می‌شود تخصیص توان پایلوت و داده‌ی ارائه شده عملکرد سیستم (از نظر نرخ ۵٪-outage) را نسبت به حالتی که توان به طور مساوی برای پایلوت و داده تخصیص داده می‌شود به طور قابل توجهی بهبود می‌دهد. همچنین با توجه به تابع هدف مسئله‌ی بهینه سازی که بیشینه کردن کمترین نرخ است، سرویس تقریبا یکسانی به کاربران داده می‌شود. به علاوه، بهبود حاصل از تخصیص توام توان پایلوت و داده نسبت به حالتی که فقط تخصیص توان داده انجام می‌شود برای زمانی که نارسایی سخت‌افزار وجود دارد بسیار قابل توجه است، و نشان دهنده‌ی اهمیت تخصیص توامان توان داده و پایلوت در حالتی است که سخت‌افزار غیرایده‌آل است.

شکل (۵) تابع توزیع تجمعی کمینه نرخ در سیستم را نشان می‌دهد ($Prob\left\{\min_{\{k\}}[R_k] \le r\right\}$). همانگونه که ملاحظه می‌شود، مشابه شکل قبل با تخصیص توام توان پایلوت و داده می‌توان عملکرد سیستم را به طور قابل ملاحظه‌ای نسبت به حالت‌های ساده‌تر بهبود داد.



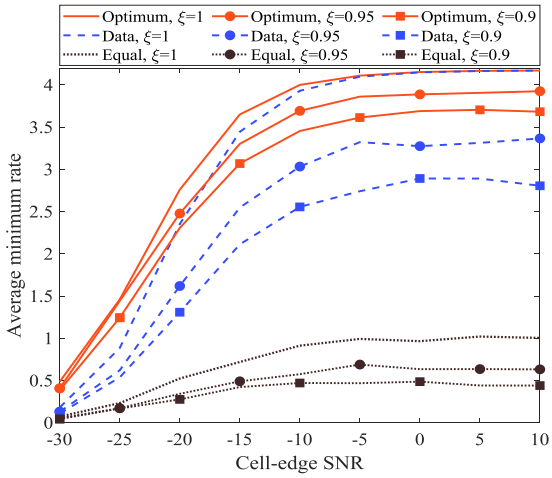
شکل (۵): تابع توزیع تجمعی کمترین نرخ در سیگنال به نویز 10- [dB]

شکل (۶) تاثیر تخصیص توان ارائه شده برای نرخ مجموع سیستم را نشان می‌دهد. علی رغم اینکه هدف مساله‌ی تخصیص توان ارائه شده بیشینه کردن کمترین نرخ بود ولی بهبود قابل ملاحظه‌ای از نظر نرخ مجموع را نیز برای سیستم به ارمغان می‌آورد، به اندازه‌ای که نرخ ۵٪-outage را ۳ تا ۴ برابر برای مقادیر مختلف ضریب کیفیت سخت‌افزار نسبت به حالت تخصیص یکسان توان افزایش می‌دهد.



شکل (۶): تابع توزیع تجمعی مجموع نرخ داده در سیگنال به نویز 10- [dB]

در شکل (۷) متوسط نرخ کمینه برای مقادیر مختلف سیگنال به نویز نشان داده شده است. برای مقادیر مختلف سیگنال به نویز، تخصیص توام توان پایلوت و داده به طور قابل توجهی عملکرد سیستم را به ویژه برای حالت سخت‌افزار غیر ایده‌آل بهبود می‌دهد. به علاوه برای سیگنال به نویز بالا نرخ کاربران به دلیل تداخل سایر کاربران و نیز سخت‌افزار غیرایده‌آل اشباع می‌شود.



شکل (۷): متوسط کمترین نرخ داده کاربران بر حسب سیگنال به نویز

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله تخصیص توام توان پایلوت و داده برای لینک فراسوی سیستم چند-ورودی چند-خروجی ابعاد بزرگ تک سلولی با قید محدود بودن انرژی مصرفی کاربران در هر بازه همدوسی و نارسایی سخت‌افزار درگیرنده، مطرح شد. مسئله‌ی بهینه‌سازی کمینه نرخ در سیستم یک مسئله‌ی غیر محدب بود که پس از محاسبات ریاضی به یک مسئله‌ی قابل حل برنامه ریزی هندسی تبدیل شد. در نهایت بهبود حاصل از تخصیص توان ارائه شده با حالت‌های ساده‌ی تخصیصِ فقط توان داده و تخصیص یکسان توان پایلوت و داده، توسط نتایج عددی ارائه شده برای مقادیر مختلف ضریب کیفیت سخت‌افزار مقایسه شد، که نتایج حاکی از بهبود چند برابری نرخ کاربران به ویژه برای حالت سخت‌افزار غیرایده‌آل بود.

سپاسگزاری

این مقاله توسط صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) حمایت مالی شده است.

مراجع

[1] T. L. Marzetta, “Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of BS antennas,” IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 9, no. 11, pp. 3590–3600, Nov. 2010.

[2] H. Q. Ngo, E. G. Larsson, and T. L. Marzetta, “Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems,” IEEE Transactions on Communications, vol. 61, no. 4, pp. 1436–1449, 2013.

[3] H. V. Cheng, E. Björnson, and E. G. Larsson, “Optimal pilot and payload power control in single-cell massive MIMO systems,” IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 65, no. 9, pp. 2363–2378, 2017

[4] H. Q. Ngo, M. Matthaiou, and E. G. Larsson, “Massive MIMO with optimal power and training duration allocation,” IEEE Wireless Communications Letters, vol. 3, no. 6, pp. 605–608, 2014.

[5] T. Van Chien, E. Björnson, E. G. Larsson, "Joint pilot design and uplink power allocation in multi-cell massive MIMO systems", IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 17, pp. 2000-2015, Mar. 2018.

[6] M. Cui, B.-J. Hu, J. Tang, and Y. Wang, “Energy-efficient joint power allocation in uplink massive MIMO cognitive radio networks with imperfect CSI,” IEEE Access, vol. 5, pp. 27611–27621, 2017

[7] O. Saatlou, M. O. Ahmad and M. N. S. Swamy, "Joint data and pilot power allocation for massive MU-MIMO downlink TDD systems," in IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, vol. 66, no. 3, pp. 512-516, March 2019.

[8] Y. Zhang, W. Zhu and J. Ouyang, "Energy efficient pilot and data power allocation in multi-cell multi-user massive MIMO communication systems," in proceeding IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), pp. 1-5, 2016.

[9] H. Masoumi and M. J. Emadi, "Joint pilot and data power control in cell-free massive MIMO system," in Fifth International Conference on Millimeter-Wave and Terahertz Technologies (MMWaTT), pp. 34-37, 2018.

[10] H. Masoumi, and M. J. Emadi, “Transmission strategies for cell-free massive mimo with limited capacity fronthaul links,” arXiv preprint arXiv:1902.00700, 2019.

[۱۱] بیانی فر مهدی، رضوی زاده سید محمد. "بررسی کارایی توان کانال تداخلی رله چند ورودی-چند خروجی انبوه". مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران. ۱۳۹۶; ۱۴ (۲) :۱۱-۲۲.

[12] A. Kabiri, M. J. Emadi, and M. N. Khormuji, “Optimal design of semi-orthogonal multiple-access massive MIMO systems,” IEEE Communications Letters, vol. 21, no. 10, pp. 2230–2233, 2017.

[13] A. Kabiri, M. J. Emadi, and M. N. Khormuji, "On the performance of the SOMA-massive MIMO system with multi-user detection," in IEEE International Workshop on

Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD) , pp. 1-5, 2017.

[14] C. Studer, M. Wenk, and A. Burg, "MIMO transmission with residual transmit-RF impairments," in Proceeding IEEE International ITG Workshop on Smart Antennas (WSA), pp. 189–196, 2010.

[15] E. Björnson, J. Hoydis, M. Kountouris, and M. Debbah, "Massive MIMO systems with non-ideal hardware: Energy efficiency, estimation, and capacity limits," IEEE Transactions on Information Theory, vol. 60, no. 11, pp. 7112–7139, 2014.

[16] E. Björnson, J. Hoydis, L. Sanguinetti, et al., "Massive MIMO networks: Spectral, energy, and hardware efficiency," Foundations and Trends in Signal Processing, vol. 11, no. 3-4, pp. 154–655, 2017.

[17] J. Zhang, Y. Wei, E. Björnson, Y. Han, and S. Jin, "Performance analysis and power control of cell-free massive MIMO systems with hardware impairments," IEEE Access, vol. 6, pp. 55302–55314, 2018.

[18] X. Zhang, M. Matthaiou, M. Coldrey, and E. Björnson, "Impact of residual transmit RF impairments on training-based MIMO systems," IEEE Transactions on Communications, vol. 63, no. 8, pp. 2899–2911, 2015.

[19] J. Zhang, L. Dai, X. Zhang, E. Björnson, and Z. Wang, "Achievable rate of Rician large-scale MIMO channels with transceiver hardware impairments," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 65, no. 10, pp. 8800–8806, 2016.

[20] J. Zhang, Y. Wei, E. Björnson, Y. Han, and X. Li, "Spectral and energy efficiency of cell-free massive MIMO systems with hardware impairments," in Proceeding IEEE International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), pp. 1–6, 2017.

[21] E. Björnson, M. Matthaiou, and M. Debbah, "Massive MIMO with non-ideal arbitrary arrays: Hardware scaling laws and circuit-aware design," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 14, no. 8, pp. 4353–4368, 2015.

[22] T. Van Chien, E. Björnson, and E. G. Larsson, "Joint pilot design and uplink power allocation in multi-cell massive MIMO systems," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 17, no. 3, pp. 2000–2015, 2018.

[23] S.-N. Jin, D.-W. Yue, and H. H. Nguyen, "Power scaling laws of massive MIMO full-duplex relaying with hardware impairments," IEEE Access, vol. 6, pp. 40860–40882, 2018.

[24] J. Zhu, D. W. K. Ng, N. Wang, R. Schober, and V. K. Bhargava, "Analysis and design of secure massive MIMO systems in the presence of hardware impairments," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 16, no. 3, pp. 2001–2016, 2017.

[25] Q. Zhang, T. Q. Quek, and S. Jin, "Scaling analysis for massive MIMO systems with hardware impairments in Rician fading," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 17, no. 7, pp. 4536–4549, 2018.

[26] A. Papazafeiropoulos, S. Sharma, T. Ratnarajah, and S. Chatzinotas, "Impact of residual additive transceiver hardware impairments on Rayleigh-product MIMO channels with linear receivers: Exact and asymptotic analyses," IEEE Transactions on Communications, vol. 66, no. 1, pp. 105–118, 2018.

[27] S. M. Kay, Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1993.

[28] T. L. Marzetta, E. G. Larsson, H. Yang, and H. Q. Ngo, Fundamentals of massive MIMO. Cambridge University Press, 2016.

[29] J. Zhang, Y. Wei, E. Björnson, Y. Han, and X. Li, "Spectral and energy efficiency of cell-free massive MIMO systems with hardware impairments," in Proceeding IEEE International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), pp. 1–6, 2017.

[30] S. Boyd and L. Vandenberghe, Convex optimization. Cambridge university press, 2004.

[31] S. Boyd, S.-J. Kim, L. Vandenberghe, and A. Hassibi, "A tutorial on geometric programming," Optimization and engineering, vol. 8, no. 1, p. 67, 2007.

زیرنویس‌ها

[1] Massive multiple-input multiple-output (mMIMO)

[2] Maximum ratio combining

[3] Cell-free mMIMO

[4] Carrier frequency offset

[5] Sampling-rate offset

[6] In-phase/quadrature-phase offset

[7] Phase noise

[8] Pilot contamination

[9] Access point

[10] Linear minimum mean square error (LMMSE)

[11] Use-and-then-forget (UatF)

[12] Geometric programming (GP)

[13] Cumulative distribution function (CDF)