

## هبود ظرفیت در سیستم‌های چند ورودی-چند خروجی با استفاده از آنتن‌های آرایه‌ای با پیکربندی مجدد

نصیرالدین نجات بخش<sup>۱</sup>، محسن غفاری میاب<sup>۲</sup>، نادر مکاری یامچی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد برق مخابرات میدان، دانشگاه تربیت مدرس

استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس mghaffari@modares.ac.ir

<sup>۳</sup>استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس

### چکیده

آنتن‌های با قابلیت پیکربندی مجدد این توانایی را دارند که الگوی تشعشعی خود را بر اساس نیاز تغییر دهند. برای اینکه بتوان از قابلیت پیکربندی مجدد این آنتن‌ها بهره برد، باید با استفاده از پارامترهای تخمین زده شده‌ی کانال، بهترین حالت یا الگوی تشعشعی را برای آنتن پیدا کرد. در این مقاله با در نظر گرفتن یک سیستم چند کاربره‌ی MIMO، با تعریف یک مسئله‌ی بهینه سازی، تأثیر استفاده از آنتن‌های پیکربندی مجدد با الگوهای تشعشعی مختلف در افزایش نرخ تبادل اطلاعات مورد بررسی قرار می‌گیرد. با استفاده از الگوهای تشعشعی استاندارد سیستم‌های MIMO و با فرض استفاده از یک آنتن آرایه‌ای ایستگاه پایه با المان‌های با قابلیت پیکربندی مجدد و چند کاربر تک آنتنی، نمودارهای ظرفیت متوسط هر کاربر بر حسب سیگنال به نویز و همچنین نمودار ظرفیت متوسط بر حسب تعداد کاربران رسم شده‌است. بر اساس این نمودارها، ظرفیت متوسط کاربران برای حالت بدون شکل دهی پرتو ۴۰٪ (به میزان 0.045bps/Hz) و با شکل دهی پرتو MRC ۵٪ (به میزان 0.052 bps/Hz) نسبت به حالتی که آنتن‌ها قابلیت پیکربندی مجدد نداشته باشند بهتر خواهد بود.

### کلید واژه‌ها

آنتن‌های با قابلیت پیکربندی مجدد، MIMO، نسل پنجم شبکه‌های مخابراتی بی سیم

### مقدمه

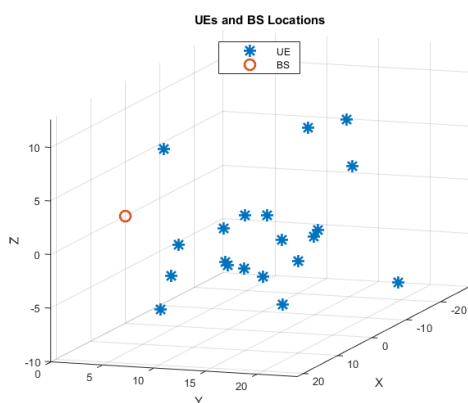
تا کنون تکنیک‌های متفاوتی برای تغییر توزیع جریان در سطح آنتن و در نتیجه آن تغییر الگوی تشعشعی به کار گرفته شده است. به عنوان نمونه در [۴] یک آنتن Yagi-Uda با المان‌های پارازیتی قابل پیکربندی مجدد طراحی شده است. در این طراحی المان‌های پارازیتی به کمک میکروسوئیچ‌هایی که در مرکز آن‌ها قرار داده شده‌است می‌توانند در الگوی تشعشعی آنتن تغییر ایجاد کنند. همچنین در [۵] یک آنتن مایکرواستریپ با قابلیت پیکر بندی مجدد طراحی شده است که به کمک دیودهای PIN می‌توان توزیع جریان سطح آنتن و در پی آن الگوی تشعشعی آنتن را تغییر داد. یکی از نیازمندی‌های کلیدی نسل پنجم شبکه‌های مخابراتی سلولی نرخ تبادل اطلاعات زیاد است [۶، ۷]. برای این منظور تا کنون فناوری‌های زیادی پیشنهاد شده است. یکی از فناوری‌های مهم در جهت افزایش نرخ تبادل اطلاعات فناوری massive MIMO است. سیستم‌های MIMO با به کار گیری آرایه‌های آنتنی با تعداد بیش از ۱۰۰ المان اصطلاحاً Massive MIMO نامیده می‌شود [۸]. هدف این مقاله، تحلیل و بررسی روش استفاده از آنتن‌های با قابلیت پیکر مجدد با الگوی تشعشعی

آنتن‌های آرایه‌ای با قابلیت پیکربندی مجدد از فناوری‌های جدیدی است که در سال‌های اخیر کاربردهایی از آن‌ها در شبکه‌های مخابراتی مطرح شده است. قابلیت پیکربندی مجدد آنتن‌ها می‌تواند به منظور پویاسازی الگوی تشعشعی آنتن، پویاسازی پاسخ فرکانسی آنتن، پویا سازی پلاریزاسیون آنتن و یا ترکیب هر کدام از این سه حالت به کار گرفته شود [۱]. معمولاً با تعبیه‌ی دیودهای PIN، دیود های Varactor و میکروسوئیچ های MEMS با تغییر در توزیع جریان در سطح آنتن، توانایی پیکربندی مجدد به آنتن‌ها اضافه می‌شود. به طور مثال با استفاده از میکروسوئیچ‌ها در ساختار آنتن می‌توان ساختار فعال آنتن را در هر لحظه به شکلی تغییر داد که الگوی تشعشعی، یا سخ فرکانسی و یا پلاریزاسیون آنتن متناسب با وضعیت میکروسوئیچ تغییر کند. در تحقیقات متعددی با استفاده از ادوات مختلف، آنتن‌های با قابلیت پیکربندی مجدد ارائه شده‌است [۲-۴].

ماتریس  $A$  است. علائم و نشانه‌های دیگر در صورت نیاز در متن مقاله توضیح داده خواهد شد.

### سیستم گیرنده-فرستنده

مدل سیستم گیرنده-فرستنده تعریف شده در این مقاله شامل یک ایستگاه پایه با یک آرایه  $N$  آنتنی و  $K$  کاربر تک آنتنی است. ایستگاه پایه یک آرایه مسطح مستطیلی  $N_x \times N_y$  بوده و فرض شده است که هر آنتن ایستگاه پایه به دلیل داشتن قابلیت پیکربندی مجدد چندین الگوی تشعشعی داشته باشد. البته هر آنتن با قابلیت پیکربندی مجدد در هر لحظه می‌تواند تنها یکی از چندین حالت الگوی تشعشعی را داشته باشد. الگوی تشعشعی آنتن‌های کاربران نیز همسانگرد<sup>۲</sup> تعریف شده‌اند تا بتوان تأثیر قابلیت پیکربندی مجدد آنتن‌های ایستگاه پایه را بهتر رصد کرد. محیط در نظر گرفته شده برای شبیه سازی یک مکعب مستطیل به طول ۴۰ متر، عرض ۲۰ متر و ارتفاع ۲۰ متر در نظر گرفته شده است. فرض شده است که ایستگاه پایه در مبدأ مختصات قرار داشته و کاربران در روبه‌روی ایستگاه پایه قرار داشته‌باشند. بنابراین طول، عرض و ارتفاع کاربران به ترتیب در بازه‌های (۲۰, ۲۰, -۲۰)، (۰, ۲۰) و (۰, ۱۰, -۱۰) قرار می‌گیرد. فاصله کاربران در راستای شعاعی و در صفحه افق نسبت به ایستگاه پایه تصادفی و دارای توزیع یواسن با میانگین ۵ بوده و ارتفاع کاربران نسبت به ایستگاه پایه دارای توزیع نرمال با میانگین صفر و واریانس یک در نظر گرفته شده است. در شکل ۱ آرایش مکانی کاربران و ایستگاه پایه برای حالتی که ۲۰ کاربر وجود دارد قابل مشاهده است. در این شکل ایستگاه پایه با دایره قرمز و کاربران با ستاره‌های آبی مشخص شده‌اند. همچنین در محیط انجام شبیه‌سازی فرض شده که هیچ شیء و پراکننده‌سازی وجود نداشته و به همین دلیل تنها لینک‌های LoS<sup>۳</sup> بین آنتن و کاربران در نظر گرفته شده است.



شکل ۱. مختصات سه بعدی کاربرها نسبت به آنتن ایستگاه پایه با توزیع یواسن

متغیر در سیستم‌های MIMO و Massive MIMO است. در حالت عادی در سیستم‌های MIMO الگوهای آنتنی دارای یک الگوی تشعشعی ثابت هستند که می‌توان به وسیله فناوری‌ها و الگوریتم‌های شکل‌دهی پرتو الگوی تشعشعی کلی آرایه را تغییر داد. هنگامی که هر کدام از آنتن‌های آرایه بتواند در حالت‌های مختلف الگوهای تشعشعی مختلفی را تولید کند، انتخاب اینکه هر آنتن چه حالتی داشته باشد امری مهم است [۱, ۹]. در این مقاله با طرح یک مسئله بهینه‌سازی، روش انتخاب بهترین حالت برای هر آنتن مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

در این مقاله، در بخش نخست مدل سیستم مورد استفاده و روابط گیرنده-فرستنده و همچنین نحوه نشانه‌گذاری<sup>۱</sup> شرح داده می‌شود. در بخش بعدی تأثیر استفاده از آنتن‌های با قابلیت پیکربندی مجدد بر روابط گیرنده-فرستنده و همچنین روابط مربوط به ظرفیت سیستم مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در بخش سوم نحوه انتخاب حالت هر یک از آنتن‌ها با تعریف یک مسئله بهینه‌سازی برای دو حالت استفاده از شکل‌دهی پرتو بدون شکل‌دهی پرتو ارائه می‌شود. در این بخش همچنین نحوه حل مسئله بهینه‌سازی به کمک روش‌های بهینه‌سازی و نرم‌افزارهای مورد استفاده شرح داده خواهد شد. در بخش چهارم نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده و تعاریف مربوط به الگوهای تشعشعی که استفاده شدند تشریح شده و در انتها مقاله با ارائه نتایجی از تحلیل خروجی‌های شبیه‌سازی و پیشنهادهایی برای تحقیقات بیشتر در این حوزه پایان می‌یابد.

### مدل سیستم

#### نشانه‌گذاری

نشانه‌گذاری‌های استفاده شده در این مقاله به شرح زیر می‌باشد: حروف بزرگ پر رنگ و حروف کوچک پررنگ به ترتیب نشان‌دهنده ماتریس‌ها و بردارها می‌باشند و تمامی حروف معمولی نشان‌دهنده کمیت‌ها و اعداد اسکالر هستند. ترانوادهی هرمیتی، ترانواده و معکوس ماتریس به ترتیب با بالانویس حروف  $H$ ,  $T$  و  $-1$  نشان داده شده است.  $\mathbf{I}_{K \times K}$  نشان دهنده ماتریس همانی  $K \times K$  است. علامت  $\otimes$  نشان دهنده ضرب کرنر دو ماتریس،  $\det(\cdot)$  نشان دهنده دترمینان یک ماتریس، علامت  $\text{vec}(\cdot)$  نشان دهنده برداری کردن یک ماتریس به شکل ستونی،  $\text{diag}(\cdot)$  تبدیل‌کننده یک بردار به یک ماتریس قطری مربعی و  $\mathbb{E}\{\cdot\}$  نشان دهنده امید ریاضی می‌باشد. همچنین  $[A]_{i,j}$  نشان دهنده درایه‌ی واقع در سطر  $i$ ام و ستون  $j$ ام در

<sup>1</sup> Notation  
<sup>2</sup> Isotropic  
<sup>3</sup> Line of Sight

قابليت پيكربندي مجدد، الكوي تشعشعي هر آنتن نسبت به آنتن‌هاي ديگر متفاوت خواهد بود، لذا لازم است براي هر کدام از آنتن‌ها الكوي تشعشعي متفاوتي در نظر گرفت كه با تعريف ماتريس  $\mathbf{G}_k$  برسي تأثير اين مسئله ممكن مي‌شود. با استفاده از اين نوع نمايش همچنين مي‌توان تأثير تغييرات الكوي تشعشعي آنتن‌ها زماني كه در آرايه قرار مي‌گيرند مورد برسي قرار گيرد كه در [۱۳] به آن اشاره شده است.

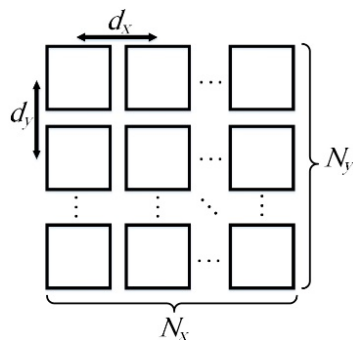
با فرض اينكه فاصلهي كاربرها تا ايستگاه‌پايه به اندازهي كافي زياد باشد به طوري كه موج ارسال شده توسط كاربر  $k$  در نهايت به صورت يك موج صفحه‌اي با جبهه‌ي موج تخت به آرايه‌ي آنتني مسطح مستطيلي برخورد كند، بردار  $\mathbf{a}_k$  نشان‌دهنده اختلاف فاز موج دريافتي در هر يك از آنتن‌هاي آرايه مي‌باشد. ماتريس  $\mathbf{a}_k$  به صورت رابطه‌ي (۴) تعريف مي‌شود:

$$\mathbf{a}_k = \text{vec} \left\{ \begin{bmatrix} 1 & e^{j\mu_{x,k}} & \dots & e^{j\mu_{x,k}(N_x-1)} \\ \otimes [1 & e^{j\mu_{y,k}} & \dots & e^{j\mu_{y,k}(N_y-1)}] \end{bmatrix} \right\} \quad (4)$$

در اين رابطه مقادير  $\mu_{x,k}$  و  $\mu_{y,k}$  به صورت روابط (۵) و (۶) تعريف مي‌شوند.

$$\begin{aligned} \mu_{x,k} &= \frac{2\pi}{\lambda} d_x \sin(\theta_k) \cos(\phi_k) \\ \mu_{y,k} &= \frac{2\pi}{\lambda} d_y \sin(\theta_k) \sin(\phi_k) \end{aligned} \quad (5) \text{ و } (6)$$

در اين روابط مقادير  $\lambda$ ،  $d_x$  و  $d_y$  بر ترتيب نشان‌دهندهي طول موج حامل استفاده شده براي ارسال اطلاعات، فاصلهي آنتن‌هاي آرايه در راستاي  $x$  و فاصلهي آنتن‌هاي آرايه در راستاي  $y$  هستند. فرکانس انتخابي در شبیه‌سازی‌های انجام شده در این مقاله 3GHz در نظر گرفته شده است. اما با توجه به اینکه در روابط این مقاله تأثیر تزویج بین آنتن‌ها و پاسخ فرکانسی آنتن‌ها وارد نشده است، به جز تلفات انتشار که تابعی از طول موج است، تغییر فرکانس کاری عملاً تأثیر بسزایی در نتایج نخواهد گذاشت. برای درک بهتر این پارامترها آرايه در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. آرايه‌ي آنتني ايستگاه‌پايه

در اين مقاله ارسال اطلاعات به صورت فراسو<sup>۴</sup> فرض شده‌است، يعني كاربران ارسال كنندهي اطلاعات و ايستگاه‌پايه دريافت كنندهي اطلاعات هستند. بر اين اساس رابطه‌ي ورودی-خروجی سیستم را مي‌توان به صورت رابطه‌ي (۱) نوشت:

$$y_k = \mathbf{w}_k^H \mathbf{h}_k \sqrt{p_k} s_k + \mathbf{n} \quad (1)$$

در اين رابطه  $y_k$  خروجی کلی آرايه‌ي ايستگاه‌پايه به ازاي زماني كه كاربر  $k$  در حال ارسال اطلاعات است،  $\mathbf{w}_k$  بردار شكل‌دهی پرتو<sup>۵</sup> براي كاربر  $k$ ،  $\mathbf{h}_k$  بردار كانال شكل گرفته بين ايستگاه‌پايه و كاربر  $k$ ،  $p_k$  توان رسالي توسط كاربر  $k$ ،  $s_k$  توان سمبل رسالي توسط كاربر  $k$  و  $\mathbf{n}$  بردار نويز گوسي اضافه شونده به ورودی آرايه‌ي ايستگاه‌پايه را نشان مي‌دهد كه به صورت  $\mathbf{n} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}_{N \times 1}, \sigma^2 \mathbf{I}_{N \times 1})$  تعريف شده و در آن  $\sigma^2$  توان نويز ورودی را نشان مي‌دهد.

در اين مقاله فرض شده است كه منابع تواني به طور مساوي بين همه‌ي كاربران تقسيم شده است. به عبارتي فرض شده است كه توان  $p_k$  همه‌ي كاربران برابر است.

همان‌طور كه اشاره شد، تعريف مختلفي براي كانال در سيستم-هاي چندورودی-چندخروجی وجود دارد [۱۰-۱۲]. در اينجا كانال شكل گرفته بين آرايه‌ي ايستگاه‌پايه و كاربر  $k$  به صورت رابطه‌ي (۲) تعريف مي‌شود [۱۱]:

$$\mathbf{h}_k = \sqrt{\frac{\alpha_k \sigma_k}{N}} \mathbf{G}_k \cdot \mathbf{a}_k \quad (2)$$

در اين رابطه درايه‌ي  $\lambda_m$  از بردار  $\mathbf{h}_k$  نشان‌دهنده‌ي كانال شكل گرفته بين آنتن  $m$  آرايه‌ي ايستگاه‌پايه و كاربر  $k$  است. همچنين در اين رابطه ضرايب  $\alpha_k$  و  $\sigma_k$  به ترتيب نشان‌دهندهي اثر تلفات انكسار و انتشار امواج است. در اين مقاله به دليل در نظر گرفتن مسير به صورت LoS، ضريب تلفات انتشار متناسب با فاصلهي كاربر با توان 2- و ضريب تلفات انكسار برابر با يك در نظر گرفته شده‌است.  $\mathbf{G}_k$  يك ماتريس  $N \times N$  قطري است كه عناصر روي قطر درواقع نشان‌دهندهي اندازه‌ي الكوي تشعشعي هر کدام از آنتن‌هاي آرايه‌ي ايستگاه‌پايه در جهت كاربر  $k$  است.  $\mathbf{G}_k$  به صورت رابطه‌ي (۳) تعريف مي‌شود [۱۳]:

$$\mathbf{G}_k = \begin{bmatrix} G_1(\theta_k, \phi_k) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & G_2(\theta_k, \phi_k) & & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & G_N(\theta_k, \phi_k) \end{bmatrix} \quad (3)$$

در رابطه‌ي (۳)  $G_1$  تا  $G_N$  نشان‌دهندهي الكوي تشعشعي هريك از آنتن‌هاي آرايه‌ي ايستگاه‌پايه و زوج‌هاي  $(\theta_k, \phi_k)$  نشان‌دهندهي جهت كاربر  $k$  نسبت به ايستگاه‌پايه است. در سيستم-هاي MIMO معمولی الكوي تشعشعي آنتن‌هاي آرايه را يکسان در نظر مي‌گيرند، اما در اين مقاله به علت استفاده از آنتن‌هاي با

<sup>4</sup> Uplink  
<sup>5</sup> Beamforming

نرخ تبادل اطلاعات برای هر یک از کاربران با توجه به اینکه از کدما الگوریتم شکل دهی پرتوی استفاده شود متفاوت خواهد بود. برای حالتی که بردار شکل دهی پرتو به صورت عام  $\mathbf{w}_k$  در نظر گرفته شود، بر اساس رابطه‌ی شانون-هارتلی ظرفیت کانال برای هر کاربر به صورت رابطه‌ی (۱۲) تعریف می‌شود [۱۴]:

$$R_k = E\{\log_2(1 + \text{SINR}_k)\} \quad (12)$$

در این رابطه، مقدار SINR به صورت زیر محاسبه خواهد شد:

$$\text{SINR}_k = \frac{\|(\mathbf{w}_k)^H \cdot \mathbf{h}_k\|^2}{\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^K \|(\mathbf{w}_k)^H \cdot \mathbf{h}_j\|^2 + \sigma^2} \quad (13)$$

بر اساس روابط (۱۲) و (۱۳) می‌توان نرخ ظرفیت هر کاربر را به صورت زیر نوشت:

$$R_k = E\left\{\log_2\left(1 + \frac{\|(\mathbf{w}_k)^H \cdot \mathbf{h}_k\|^2}{\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^K \|(\mathbf{w}_k)^H \cdot \mathbf{h}_j\|^2 + \sigma^2}\right)\right\} \quad (14)$$

در صورتی که از الگوریتم شکل دهی پرتو MRC<sup>۶</sup> استفاده شود ظرفیت به صورت زیر محاسبه خواهد شد [۱۵]:

$$R_k^{\text{MRC}} = E\left\{\log_2\left(1 + \frac{p_k \|\mathbf{h}_k\|^4}{p_k \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^K \|\mathbf{h}_k^H \cdot \mathbf{h}_j\|^2 + \|\mathbf{h}_k\|^2}\right)\right\} \quad (15)$$

ظرفیت مجموع برابر با مجموع ظرفیت همه‌ی کاربران است. با استفاده از روابط (۱۴) و (۱۵) می‌توان ظرفیت مجموع را برای  $K$  کاربر به صورت رابطه‌ی زیر محاسبه کرد:

$$R_{\text{Total}} = \sum_{j=1}^K R_j \quad (16)$$

### نوعی انتخاب حالت بهینه

#### تعریف مسئله‌ی بهینه‌سازی

با توجه به اینکه  $N$  آنتن با قابلیت پیکربندی مجدد موجود است و هر کدام می‌توانند  $q$  حالت مختلف داشته باشند، در مجموع  $N^q$  حالت مختلف برای آرایه وجود خواهد داشت. در این بخش یک مسئله‌ی بهینه‌سازی به نحوی طراحی می‌شود که بتوان از میان  $N^q$  حالت ممکن، بهترین حالت را طوری پیدا کرد که ظرفیت مجموع کاربران بیشینه شود. با توجه به تعاریف به دست آمده برای کانال در رابطه‌ی (۱۱)، روابط مربوط به ظرفیت

### تأثیر قابلیت پیکربندی مجدد در روابط

با فرض اینکه هر کدام از آنتن‌های با قابلیت پیکربندی مجدد دارای  $q$  الگوی تشعشعی متفاوت است که در هر لحظه می‌توان یکی را انتخاب کرد، در این بخش روش انتخاب الگوی تشعشعی برای هر آنتن مورد بررسی قرار گرفته و روابط مربوط به کانال با در نظر گرفتن این قابلیت آنتن‌ها بازنویسی می‌شوند.

#### تأثیر قابلیت پیکربندی مجدد در کانال

همان‌طور که در بخش پیش نیز اشاره شد، تأثیر الگوی تشعشعی آنتن‌های گیرنده و فرستنده در کانال مربوط به ماتریس  $\mathbf{G}_k$  است. با توجه به اینکه هر کدام از آنتن‌های آرایه‌ی ایستگاه پایه می‌توانند الگوی تشعشعی خود را از بین  $q$  الگوی تشعشعی متفاوت انتخاب کنند، به ازای کاربر  $k$ ام یک بردار  $\mathbf{g}_k$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathbf{g}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{g}_1(\theta_k, \phi_k) \\ \mathbf{g}_1(\theta_k, \phi_k) \\ \vdots \\ \mathbf{g}_q(\theta_k, \phi_k) \end{bmatrix}_{q \times 1} \quad (7)$$

درایه‌های بردار  $\mathbf{g}_k$  در حقیقت نشان دهنده‌ی اندازه‌ی الگوی تشعشعی در جهت کاربر  $k$ ام به ازای هر یک از  $q$  الگوی تشعشعی ممکن است. اکنون با تعریف یک ماتریس باینری  $\mathbf{X}_{N \times q}$  که در هر سطر یکی و تنها یکی 1 دارد، و ضرب آن در بردار  $\mathbf{g}_k$  می‌توان به یک بردار  $N$  بعدی رسید که الگوی تشعشعی انتخابی برای هریک از آنتن‌های آرایه را نشان می‌دهد. در ادامه با تبدیل این بردار به یک ماتریس قطری، ماتریس  $\mathbf{G}_k$  به دست خواهد آمد. بر این اساس می‌توان نوشت:

$$\mathbf{G}_k_{N \times N} = \text{diag}\left(\mathbf{X}_{N \times q} \cdot \mathbf{g}_k\right)_{q \times 1} \quad (8)$$

که در این رابطه  $\mathbf{X}_{N \times q}$  باید شرایط زیر را اقلان کند:

$$[\mathbf{X}]_{r,c} \in \{0,1\} \quad (9)$$

$$\forall r \in \{1,2,\dots,N\} : \sum_{c=1}^q [\mathbf{X}]_{r,c} = 1 \quad (10)$$

در حقیقت با انتخاب اینکه کدام یک از درایه‌های ماتریس  $\mathbf{X}$  برابر با یک باشد، مشخص می‌شود که هر کدام از آنتن‌ها در آرایه کدام الگوی تشعشعی را از میان  $q$  حالت ممکن خواهند داشت. براساس روابط (۷)، (۸)، (۹) و (۱۰) می‌توان تعریف کانال را برای کاربر  $k$ ام به صورت رابطه‌ی (۱۱) نوشت:

$$\mathbf{h}_k = \sqrt{\frac{\alpha_k \sigma_k}{N}} \text{diag}\left(\mathbf{X}_{N \times q} \cdot \mathbf{g}_k\right)_{q \times 1} \quad (11)$$

#### محاسبه‌ی ظرفیت سیستم

<sup>۶</sup> Maximum Ratio Combining

این مسئله در حقیقت ماتریس  $\mathbf{X}$  را طوری پیدا می‌کند که تحت محدودیت‌های ذکر شده، ظرفیت مجموع همه‌ی کاربران بیشینه شود. در این مسئله چگونگی انتخاب بردار شکل‌دهی پرتو، یعنی  $\mathbf{w}_k$  ها اهمیت دارد. می‌توان این بردارها را واحد در نظر گرفت و تأثیر شکل‌دهی پرتو را از صورت مسئله حذف کرد. همچنین در صورت استفاده از شکل‌دهی پرتو MRC مسئله به صورت رابطه‌ی (۱۸) خواهد شد:

$$\max_{\mathbf{X} \in (0,1)^{N \times q}} \sum_{j=1}^K \mathbb{E} \left\{ \log_2 \left( 1 + \frac{p_k \left\| \sqrt{\frac{\alpha_k \sigma_k}{N}} \text{diag} \left( \mathbf{X}_{N \times q} \cdot \mathbf{g}_k \right) \cdot \mathbf{a}_k \right\|^4}{p_k \sum_{j=1, j \neq k}^K \left\| \sqrt{\frac{\alpha_k \sigma_k}{N}} \text{diag} \left( \mathbf{X}_{N \times q} \cdot \mathbf{g}_k \right) \cdot \mathbf{a}_k \right\|^2 + \left\| \sqrt{\frac{\alpha_j \sigma_j}{N}} \text{diag} \left( \mathbf{X}_{N \times q} \cdot \mathbf{g}_j \right) \cdot \mathbf{a}_j \right\|^2 + \sigma^2} \right) \right\} \quad (18)$$

$$\text{s.t. } \forall r \in \{1, 2, \dots, N\} : \sum_{c=1}^q [\mathbf{X}]_{r,c} = 1$$

### نتایج شبیه سازی

#### الگوهای تشعشی انتخاب شده

برای شبیه‌سازی، در این مقاله فرض شده است که آنتن‌های موجود در آرایه‌ی ایستگاه پایه، توانایی تولید ۲ تا ۵ الگوی تشعشی مختلف را دارند. در ابتدا شبیه‌سازی به ازای حالتی که آنتن‌ها ساده هستند و قابلیت پیکربندی مجدد ندارند انجام شده است. سپس شبیه‌سازی به ترتیب برای حالت‌هایی که آنتن‌ها دو حالتی، سه حالتی، چهار حالتی و پنج حالتی هستند انجام شده و نتایج با یکدیگر مقایسه شده‌اند. الگوی تشعشی آنتن‌ها بر اساس استانداردهای موجود برای کاربردهای مخابراتی تعریف شده است [۱۸]. بر اساس استانداردهای موجود الگوی تشعشی آنتن‌ها بر اساس پهنای پرتوی نیم توان<sup>۱۰</sup> و سطح توان لوب‌های کناری<sup>۱۱</sup> تعریف شده است. بر اساس این تعاریف الگوی تشعشی به صورت روابط (۱۹) تا (۲۱) تعریف می‌شود.

$$G_{dB}(\theta, \varphi = 0^\circ) = -\min \left\{ 12 \left( \frac{\theta - 90^\circ}{\theta_{3dB}} \right)^2, SLL_V \right\} \quad (19)$$

$$G_{dB}(\theta = 90^\circ, \varphi) = -\min \left\{ 12 \left( \frac{\varphi}{\varphi_{3dB}} \right)^2, SLL_H \right\} \quad (20)$$

$$G_{dB}(\theta, \varphi) = -\min \left\{ \left( \frac{G_{dB}(\theta, \varphi = 0^\circ) + G_{dB}(\theta = 90^\circ, \varphi)}{2} \right), G_{max} \right\} \quad (21)$$

<sup>7</sup> Mesh Adaptive Direct Search (MADS)

<sup>8</sup> Non-Linear Optimization with the MADS Algorithm (NOMAD)

<sup>9</sup> Black Box Optimization

<sup>10</sup> Half Power Beam Width (HPBW)

<sup>11</sup> Side Lobe Level (SLL)

مجموع در، (۱۴) تا (۱۶) و همچنین شرایط مربوط به ماتریس  $\mathbf{X}$  در روابط (۹)، (۱۰) می‌توان مسئله‌ی بهینه‌سازی را به صورت رابطه‌ی (۱۷) طرح کرد:

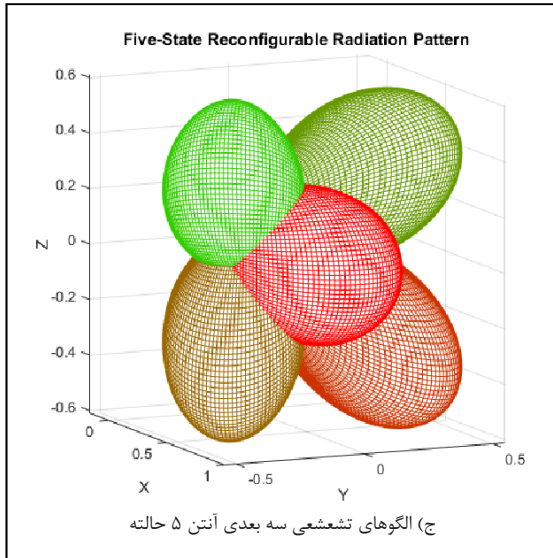
$$\max_{\mathbf{X} \in (0,1)^{N \times q}} \sum_{j=1}^K \mathbb{E} \left\{ \log_2 \left( 1 + \frac{\left\| \left( \mathbf{w}_k \right)^H \cdot \sqrt{\frac{\alpha_k \sigma_k}{N}} \text{diag} \left( \mathbf{X}_{N \times q} \cdot \mathbf{g}_k \right) \cdot \mathbf{a}_k \right\|^2}{\sum_{j=1, j \neq k}^K \left\| \left( \mathbf{w}_k \right)^H \cdot \sqrt{\frac{\alpha_j \sigma_j}{N}} \text{diag} \left( \mathbf{X}_{N \times q} \cdot \mathbf{g}_j \right) \cdot \mathbf{a}_j \right\|^2 + \sigma^2} \right) \right\}$$

$$\text{s.t. } \forall r \in \{1, 2, \dots, N\} : \sum_{c=1}^q [\mathbf{X}]_{r,c} = 1 \quad (17)$$

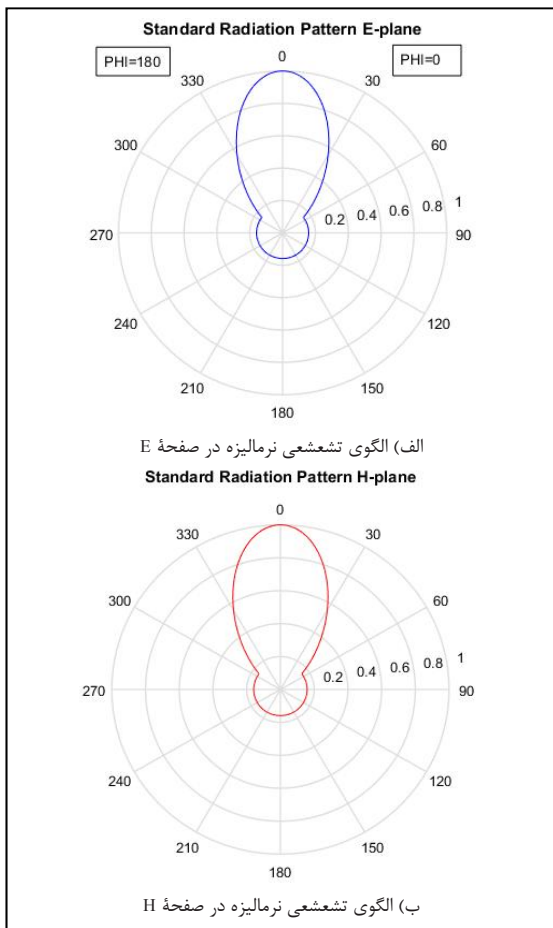
### روش حل مسئله‌ی بهینه‌سازی

مسئله‌ی بهینه‌سازی بدست آمده یک مسئله‌ی غیر خطی، با فضای اعداد صحیح است. یکی از الگوریتم‌های مناسب برای حل این مسئله، الگوریتم‌های شبکه‌های سازگار جستجوی مستقیم (MADS)<sup>۷</sup> می‌باشد. یک نرم‌افزار است که الگوریتم MADS را برای بهینه‌سازی جعبه‌سیاه<sup>۸</sup> تحت قیود غیرخطی پیاده‌سازی می‌کند. بهینه‌سازی جعبه‌سیاه برای بهینه‌سازی توابع پیچیده‌ای که اطلاعات مشتقی آن‌ها در دسترس نیست و یا تلاش برای پیدا کردن جهت پاسخ بهینه با شکست‌های پی در پی مواجه می‌شود، استفاده می‌شود [۱۶]. NOMAD با زبان‌های مختلفی مانند ++C یا Python به صورت جعبه‌ابزارهای آماده طراحی شده و می‌تواند در نرم‌افزارهای دیگر مورد استفاده قرار گیرد.

یکی از ابزارهای قدرتمند برای حل مسائل بهینه‌سازی جعبه‌ابزار Opti است که توانایی حل انواع مختلفی از مسائل بهینه‌سازی، خطی، غیر خطی، محدب و غیر محدب به وسیله‌ی الگوریتم‌های بهینه‌سازی مختلف را دارد [۱۷]. در این مقاله برای حل مسئله‌ی بهینه‌سازی از الگوریتم NOMAD در این جعبه‌ابزار که به نرم‌افزار MATLAB اضافه شده، استفاده شده است.



شکل ۳. نمایش سه بعدی الگوهای تشعشعی استفاده شده در برنامه

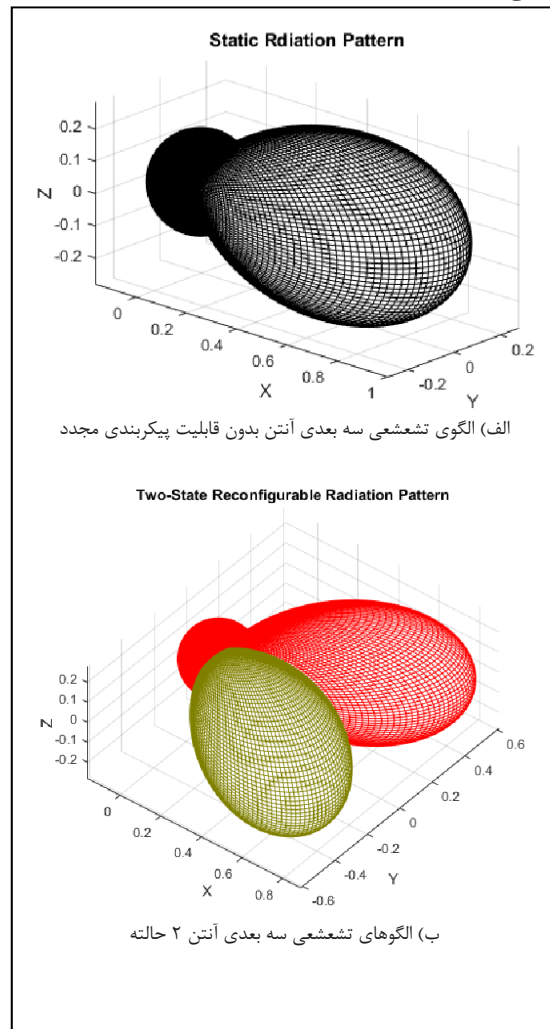


شکل ۴. نمودار قطبی الگوی تشعشعی آنتن استاندارد اصلی بدون قابلیت پیکربندی مجدد

که در این روابط مقادیر مربوط پارامترها به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} \phi_{3dB} &= 65^\circ, \phi \in [-180^\circ, 180^\circ] \\ \theta_{3dB} &= 65^\circ, \theta \in [0^\circ, 180^\circ] \\ SLL_H &= SLL_V = 30dB \\ G_{max} &= 8dB \end{aligned} \quad (22)$$

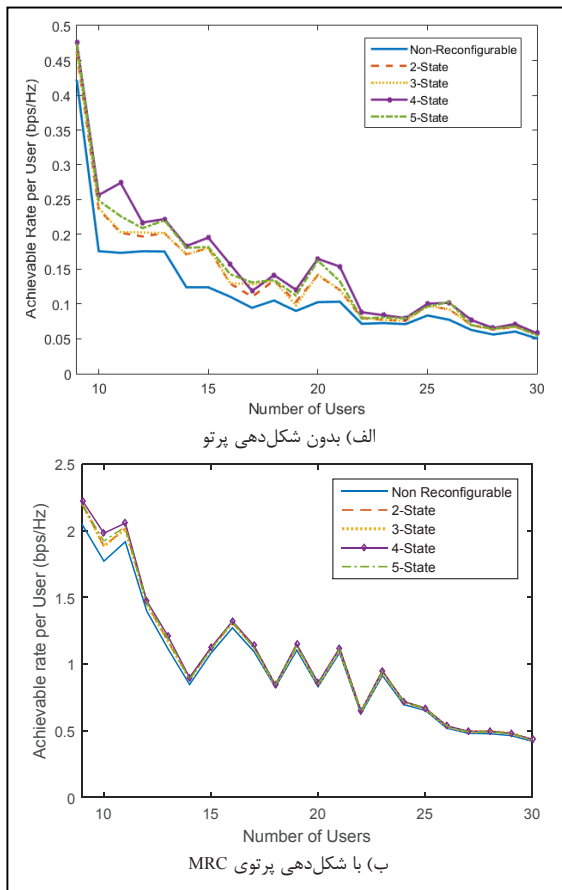
بر اساس این روابط الگوی تشعشعی استاندارد یک آنتن بدست می آید. برای مدل کردن آنتن های با قابلیت پیکربندی مجدد، در این مقاله فرض شده است که الگوهای تشعشعی مختلف مشابه هم بوده و تنها در جهت افزایش یا کاهش  $\theta$  یا  $\phi$  با گام مشخصی چرخیده اند. برای نمونه در شکل ۳ الگوی تشعشعی حالت های مختلف به صورت سه بعدی نشان داده شده است. همچنین در شکل ۴ نمودار قطبی الگوی تشعشعی استاندارد معرفی شده قابل مشاهده است.



الف) الگوی تشعشعی سه بعدی آنتن بدون قابلیت پیکربندی مجدد

ب) الگوهای تشعشعی سه بعدی آنتن ۲ حالتی

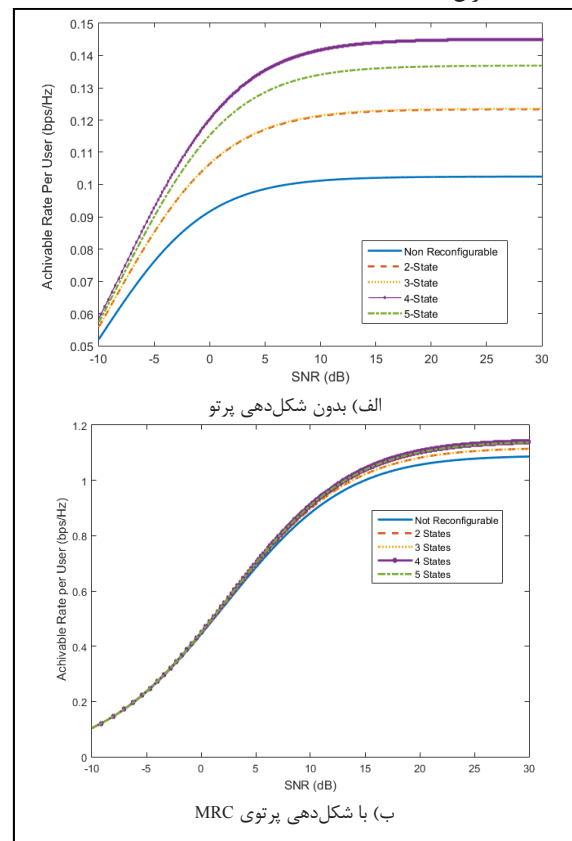
علاوه بر نمودارهای بررسی شده، بر اساس نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده، نمودار متوسط ظرفیت هر کاربر بر حسب تعداد کاربران برای یک ایستگاه پایه با آرایه ۵×۵ برای هر دو حالت با استفاده از شکل‌دهی پرتو MRC و بدون شکل‌دهی پرتو محاسبه و رسم شده است و در شکل ۶ قابل مشاهده است. بر اساس این نمودارها می‌توان این‌طور برداشت کرد که برای تعداد زیاد کاربران، قابلیت پیکربندی مجدد آنتن‌ها تفاوت چندانی در نتیجه ایجاد نخواهد کرد. اما با این حال هر دو نمودار نشان می‌دهند که هرچه تعداد کاربران کمتر باشد، استفاده از آنتن‌های با پیکربندی مجدد در افزایش نرخ داده مؤثرتر خواهد بود. در تمامی نمودارهای شکل ۵ و شکل ۶ برای اعمال تأثیر تصادفی بودن مکان کاربران، برای هر تعداد از کاربران، شبیه سازی به ازای ۱۰۰ آرایش متفاوت با توزیع پواسن انجام شده و از نتیجه این شبیه‌سازی‌ها میانگین گرفته شده است.



شکل ۶. نمودار متوسط نرخ دریافتی کاربر بر حسب تعداد کاربران به ازای SNR=30dB برای حالت‌های بدون شکل‌دهی پرتو (شکل الف) و با شکل‌دهی پرتو MRC (شکل ب) و مقایسه نتیجه پیکربندی مجدد در نتایج

### میزان بهبود ظرفیت مجموع

برای هر دو حالت با شکل دهی پرتو با الگوریتم MRC و بدون شکل دهی پرتو بر اساس نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌ها نمودارهای ظرفیت مجموع نرمالیزه بر حسب سیگنال به نویز به ازای ۲۰ کاربر تک آنتنی و یک ایستگاه پایه با آرایه ۵×۵ رسم شده و در شکل ۵ قابل مشاهده است. در این نمودارها میزان ظرفیت برای حالتی که آنتن‌ها قابلیت پیکربندی مجدد ندارند با حالتی که آنتن‌های دو حالت تا پنج حالت هستند مقایسه شده است. بر اساس این نتایج، میزان بهبود ظرفیت متوسط کاربران برای هر دو صورت با شکل دهی پرتو و بدون شکل دهی پرتو با استفاده از قابلیت پیکربندی مجدد افزایش یافته است و بیش‌ترین افزایش مربوط به حالتی است که آنتن‌ها چهار حالت است. همان‌طور که از نمودارها مشخص است، این افزایش برای حالت بدون شکل‌دهی پرتو و با شکل‌دهی پرتو به ترتیب از مقادیر سیگنال به نویز بیشتر از -5dB و 5dB شروع می‌شود. بیش‌ترین میزان بهبود ظرفیت نسبت به حالتی که آنتن‌های آرایه قابلیت پیکربندی مجدد ندارند برای حالت بدون شکل‌دهی پرتو برابر با ۴۰٪ (به میزان 0.045bps/Hz) و با شکل دهی پرتو MRC برابر با ۵٪ (به میزان 0.052 bps/Hz) است.



شکل ۵. نمودار متوسط نرخ دریافتی هر کاربر بر حسب سیگنال به نویز به ازای حالت بدون شکل‌دهی پرتو (شکل الف) و با شکل‌دهی پرتو MRC (شکل ب) و مقایسه قابلیت پیکربندی مجدد در نتایج

## نتیجه گیری و کارهای آینده

در این مقاله تأثیر استفاده از آنتن های با قابلیت پیکربندی مجدد که دارای چند الگوی تشعشی می باشند بر روابط ورودی-خروجی بررسی شد و طی مراحل یک مسئله بهینه سازی طرح شد که بتوان در هر لحظه بهترین حالت یا الگوی تشعشی را برای هر آنتن انتخاب کرد. با فرض استفاده از الگوهای تشعشی استاندارد، مسئله بهینه سازی پیشنهادی به کمک الگوریتم NOMAD حل شد. مطابق با شبیه سازی های انجام شده، استفاده از آنتن های با قابلیت پیکر بندی مجدد با ۵ الگوی تشعشی متفاوت، ظرفیت متوسط کاربران می تواند برای حالت بدون شکل دهی پرتو ۴۰٪ (به میزان 0.045bps/Hz) و با شکل دهی پرتو MRC ۵٪ (به میزان 0.052 bps/Hz) افزایش یابد. در این مقاله فرض شده است که از آرایه های مستطیلی استفاده شده و همچنین تأثیر اثرات تزویج بین آنتن ها دیده نشده است. تزویج بین آنتن ها وابسته به چیدمان آنتن ها در آرایه می باشد. می توان با وارد کردن اثرات تزویج بین آنتن ها در روابط ورودی-خروجی و بررسی تأثیر تغییر چیدمان در نتایج به یک چیدمان مناسب برای آنتن ها نیز دست یافت. بر اساس نتایج تحقیقات بر روی آنتن های آرایه ای، در آرایه های شش ضلعی و دایروی به دلیل داشتن تقارن در زوایای مختلف، تزویج بین آنتن ها کمتر است [۱۹]. همچنین باید توجه داشت که الگوی تشعشی آنتن ها در حالت واقعی با الگوی تشعشی استاندارد متفاوت بوده و هنگامی که آنتن در آرایه قرار می گیرد نیز الگوی تشعشی آنتن قدری تغییر می کند [۱۳]. نکته قابل توجه دیگر تخصیص توان به کاربران است که در این مقاله توان همه کاربران مشابه در نظر گرفته شد. مسئله تخصیص توان بین کاربران نیز می تواند تحت تأثیر تغییر الگوی تشعشی بهینه شود. هدف تحقیقات آتی این کار، طراحی یک آنتن با قابلیت پیکربندی مجدد با الگوهای تشعشی متفاوت و با چیدمان مناسب خواهد بود که بتوان مسئله بهینه سازی طرح شده در این مقاله را با استفاده از آنتن طراحی شده حل و نمونه های آزمایشی سیستم فرستنده گیرنده مربوطه را پیاده سازی کرد.

## مراجع

- [3] H. Li, B. K. Lau, and S. He, "Design of Closely Packed Pattern Reconfigurable Antenna Array for MIMO Terminals," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 9, pp. 4891-4896, 2017.
- [4] N. H. Chamok, M. H. Yilmaz, H. Arslan, and M. Ali, "High-Gain Pattern Reconfigurable MIMO Antenna Array for Wireless Handheld Terminals," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, no. 10, pp. 4306-4315, 2016.
- [5] W. Li and Y. Zhao, "A pattern reconfigurable patch antenna for wide-angle scanning phased array," in *Wireless Information Technology and Systems (ICWITS) and Applied Computational Electromagnetics (ACES), 2016 IEEE/ACES International Conference on*, 2016, pp. 1-2: IEEE.
- [6] J. G. Andrews *et al.*, "What will 5G be?," *IEEE Journal on selected areas in communications*, vol. 32, no. 6, pp. 1065-1082, 2014.
- [7] M. Agiwal, A. Roy, and N. Saxena, "Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 3, pp. 1617-1655, 2016.
- [8] E. G. Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson, and T. L. Marzetta, "Massive MIMO for next generation wireless systems," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 186-195, 2014.
- [9] L. Lu, G. Y. Li, A. L. Swindlehurst, A. Ashikhmin, and R. Zhang, "An Overview of Massive MIMO: Benefits and Challenges," (in English), *Ieee Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 8, no. 5, pp. 742-758, Oct 2014.
- [10] T. S. Rappaport, S. Sun, and M. Shafi, "Investigation and comparison of 3GPP and NYUSIM channel models for 5G wireless communications," *arXiv preprint arXiv:1707.00291*, 2017.
- [11] K. Zheng, S. Ou, and X. Yin, "Massive MIMO channel models: A survey," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2014, 2014.
- [12] J.-P. Kermaol, L. Schumacher, K. I. Pedersen, P. E. Mogensen, and F. Frederiksen, "A stochastic MIMO radio channel model with experimental validation," *IEEE Journal on selected areas in Communications*, vol. 20, no. 6, pp. 1211-1226, 2002.
- [1] R. Senanayake, P. J. Smith, P. A. Martin, and J. S. Evans, "Performance Analysis of Reconfigurable Antenna Arrays," *IEEE Transactions on Communications*, 2017.
- [2] W. Lin, H. Wong, and R. W. Ziolkowski, "Wideband Pattern-Reconfigurable Antenna With Switchable Broadside and Conical Beams," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 2638-2641, 2017.



- [13] C.-M. Chen, V. Volski, L. Van der Perre, G. A. E. Vandebosch, and S. Pollin, "Finite large antenna arrays for Massive MIMO: characterisation and system impact," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, pp. 1-1, 2017.
- [14] H. Shin and J. H. Lee, "Capacity of multiple-antenna fading channels: Spatial fading correlation, double scattering, and keyhole," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 49, no. 10, pp. 2636-2647, 2003.
- [15] 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.
- [16] S. Le Digabel, "Algorithm 909: NOMAD: Nonlinear optimization with the MADS algorithm," *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*, vol. 37, no. 4, p. 44, 2011.
- [17] Available: <https://www.inverseproblem.co.nz/OPTI/>
- [18] K. S. D. 742215V01. Available: <http://www.kathrein-scala.com/catalog/742215V01> 2015-12-15.pdf
- [19] P. J. Bevelacqua, *Antenna arrays: Performance limits and geometry optimization*. Arizona State University, 2008.

