

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

نصیرالدین نجات بخش^۱، محسن غفاری میاب^۲، نادر مکاری یامچی^۳

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد برق مخابرات میدان، دانشگاه تربیت مدرس

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

^۳استادیار 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

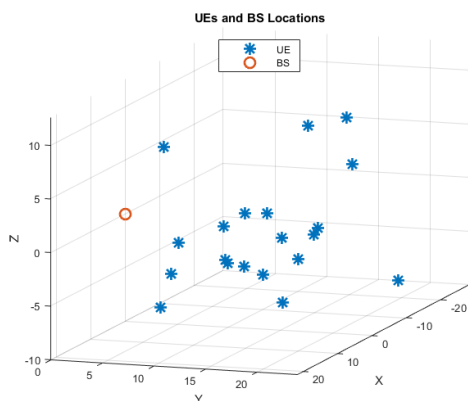
تا کنون تکنیک‌های متفاوتی برای تغییر توزیع جریان در سطح آنتن و در نتیجه آن تغییر الگوی تشعشعی به کار گرفته شده است. به عنوان نمونه در [۴] یک آنتن Yagi-Uda با المان‌های پارازیتی قابل پیکربندی مجدد طراحی شده است. در این طراحی المان‌های پارازیتی به کمک میکروسوئیچ‌هایی که در مرکز آن‌ها قرار داده شده‌است می‌توانند در الگوی تشعشعی آنتن تغییر ایجاد کنند. همچنین در [۵] یک آنتن مایکرواستریپ با قابلیت پیکربندی 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 پیکربندی 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^۲ 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 در نظر گرفته شده است. در شکل ۱ آرایش مکانی کاربران و ایستگاه پایه در نظر گرفته شده 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 پراکنده‌سازی وجود نداشته و به همین دلیل تنها لینک‌های LoS^۳ 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 آنتن های 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 مسئله‌ی 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^۱ 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 نحوه‌ی انتخاب حالت هر یک از آنتن‌ها با تعریف یک مسئله‌ی بهینه‌سازی برای دو حالت استفاده از شکل‌دهی پرتو بدون شکل‌دهی پرتو ارائه می‌شود. در این بخش همچنین نحوه‌ی حل مسئله‌ی 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 ارائه‌ی 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 نشان‌دهنده‌ی ماتریس‌ها و بردارها می‌باشند و تمامی حروف معمولی نشان‌دهنده‌ی کمیت‌ها و اعداد اسکالر هستند. ترانواده‌ی هرمیتی، ترانواده و معکوس ماتریس به ترتیب با بالانویس حروف H , T و -1 نشان داده شده است. $\mathbb{I}_{K \times K}$ نشان دهنده‌ی ماتریس همانی $K \times K$ است. علامت \otimes نشان دهنده‌ی ضرب کرنر دو ماتریس، $\det(\cdot)$ نشان دهنده‌ی دترمینان یک ماتریس، علامت $\text{vec}(\cdot)$ نشان دهنده‌ی برداری کردن یک ماتریس به شکل ستونی، $\text{diag}(\cdot)$ تبدیل‌کننده‌ی یک بردار به یک ماتریس قطری مربعی و $\mathbb{E}\{\cdot\}$ نشان دهنده‌ی امید ریاضی می‌باشد. همچنین $[A]_{i,j}$ نشان‌دهنده‌ی واقع در سطر i ام و ستون j ام در

¹ Notation
² Isotropic
³ Line of Sight

قابلیت پیکربندی مجدد، الگوی تشعشی هر آنتن نسبت به آنتن‌های دیگر متفاوت خواهد بود، لذا لازم است برای هر کدام از آنتن‌ها الگوی تشعشی متفاوتی در نظر گرفت که با تعریف ماتریس \mathbf{G}_k بررسی تأثیر این مسئله ممکن می‌شود. با استفاده از این نوع نمایش همچنین می‌توان تأثیر تغییرات الگوی تشعشی آنتن‌ها زمانی که در آرایه قرار می‌گیرند مورد بررسی قرار گیرد که در [۱۳] به آن اشاره شده است.

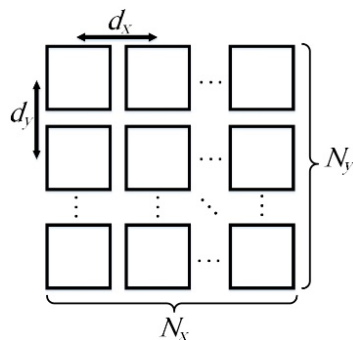
با فرض اینکه فاصله‌ی کاربرها تا ایستگاه پایه به اندازه‌ی کافی زیاد باشد به طوری که موج ارسال شده توسط کاربر k در نهایت به صورت یک موج صفحه‌ای با جبهه‌ی موج تخت به آرایه‌ی آنتنی مسطح مستطیلی برخورد کند، بردار \mathbf{a}_k نشان‌دهنده‌ی اختلاف فاز موج دریافتی در هر یک از آنتن‌های آرایه می‌باشد. ماتریس \mathbf{a}_k به صورت رابطه‌ی (۴) تعریف می‌شود:

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

در این رابطه مقادیر $\mu_{x,k}$ و $\mu_{y,k}$ به صورت روابط (۵) و (۶) تعریف می‌شوند.

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

در این روابط مقادیر λ ، d_x و d_y بر ترتیب نشان‌دهنده‌ی طول موج حامل استفاده شده برای ارسال اطلاعات، فاصله‌ی آنتن‌های آرایه در راستای x و فاصله‌ی آنتن‌های آرایه در راستای y هستند. فرکانس انتخابی 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 آرایه در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. شکل آرایه‌ی آنتنی ایستگاه پایه

در این مقاله ارسال اطلاعات به صورت فراسو^۴ فرض شده است، یعنی کاربران ارسال کننده‌ی اطلاعات و ایستگاه پایه دریافت کننده‌ی اطلاعات هستند. بر این اساس رابطه‌ی ورودی-خروجی سیستم را می‌توان به صورت رابطه‌ی (۱) نوشت:

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

در این رابطه y_k خروجی کلی آرایه‌ی ایستگاه پایه به ازای زمانی که کاربر k در حال ارسال اطلاعات است، \mathbf{w}_k بردار شکل‌دهی پرتو^۵ برای کاربر k ، \mathbf{h}_k بردار کانال شکل گرفته بین ایستگاه پایه و کاربر k ، p_k توان ارسالی توسط کاربر k ، s_k توان سمبل ارسالی توسط کاربر k و \mathbf{n} بردار نویز گوسی اضافه شونده به ورودی آرایه‌ی ایستگاه پایه را نشان می‌دهد که به صورت $\mathbf{n} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}_{N \times 1}, \sigma^2 \mathbf{I}_{N \times 1})$ تعریف شده و در آن σ^2 توان نویز ورودی را نشان می‌دهد.

در این مقاله فرض شده است که منابع توانی به طور مساوی بین همه‌ی کاربران تقسیم شده است. به عبارتی فرض شده است که توان p_k همه‌ی کاربران برابر است.

همان‌طور که اشاره شد، تعاریف مختلفی برای کانال در سیستم-های چندورودی-چندخروجی وجود دارد [۱۰-۱۲]. در اینجا کانال شکل گرفته بین آرایه‌ی ایستگاه پایه و کاربر k به صورت رابطه‌ی (۲) تعریف می‌شود [۱۱]:

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

در این رابطه درایه‌ی λ_m از بردار \mathbf{h}_k نشان‌دهنده‌ی کانال شکل گرفته بین آنتن λ_m آرایه‌ی ایستگاه پایه و کاربر k است. همچنین در این رابطه ضرایب α_k و σ_k به ترتیب نشان‌دهنده‌ی اثر تلفات انکسار و انتشار امواج است. در این مقاله به دلیل در نظر گرفتن مسیر به صورت LoS، ضریب تلفات انتشار متناسب با فاصله‌ی کاربر با توان 2- و ضریب تلفات انکسار برابر با یک در نظر گرفته شده است. \mathbf{G}_k یک ماتریس $N \times N$ قطری است که عناصر روی قطر در واقع نشان‌دهنده‌ی اندازه‌ی الگوی تشعشی هر کدام از آنتن‌های آرایه‌ی ایستگاه پایه در جهت کاربر k است. \mathbf{G}_k به صورت رابطه‌ی (۳) تعریف می‌شود [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 رابطه‌ی (۳) G_1 تا G_N نشان‌دهنده‌ی الگوی تشعشی هر یک از آنتن‌های آرایه‌ی ایستگاه پایه و زوج‌های (θ_k, ϕ_k) نشان‌دهنده‌ی جهت کاربر k نسبت به ایستگاه پایه است. در سیستم-های MIMO معمولی الگوی تشعشی آنتن‌های آرایه را یکسان در نظر می‌گیرند، اما در این مقاله به علت استفاده از آنتن‌های با

^۴ Uplink
^۵ Beamforming

تأثیر قابلیت پیکربندی مجدد در روابط

با فرض اینکه هر کدام از آنتن های با قابلیت پیکربندی مجدد دارای q الگوی تشعشعی متفاوت است که در هر لحظه می توان 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 آنتن ها بازنویسی می شوند.

تأثیر قابلیت پیکربندی مجدد در کانال

همان طور که در بخش پیش نیز اشاره شد، تأثیر الگوی تشعشعی آنتن های گیرنده و فرستنده در کانال مربوط به ماتریس \mathbf{G}_k است. با توجه به اینکه هر کدام از آنتن های آرایه ای ایستگاه پایه می توانند 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 می شود:

$$\mathbf{g}_k = \begin{bmatrix} g_1(\theta_k, \phi_k) \\ g_1(\theta_k, \phi_k) \\ \vdots \\ g_q(\theta_k, \phi_k) \end{bmatrix}_{q \times 1} \quad (7)$$

درایه های بردار \mathbf{g}_k در حقیقت نشان دهنده ی اندازه ی 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 می توان به یک بردار N بعدی رسید که الگوی تشعشعی انتخابی برای هریک از آنتن های آرایه را نشان می دهد. در ادامه با تبدیل این بردار به یک ماتریس قطری، ماتریس \mathbf{G}_k به دست خواهد آمد. بر این اساس می توان نوشت:

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

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 درایه های ماتریس \mathbf{X} برابر با یک باشد، مشخص می شود که هر کدام از آنتن ها در آرایه کدام الگوی تشعشعی را از میان q حالت ممکن خواهند داشت. براساس روابط (7)، (8)، (9) و (10) می توان تعریف کانال را برای کاربر k ام به صورت رابطه ی (11) نوشت:

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

محاسبه ی ظرفیت سیستم

نرخ تبادل اطلاعات برای هر یک از کاربران با توجه به اینکه از کدام 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 رابطه ی شانون-هارتلی ظرفیت کانال برای هر کاربر به صورت رابطه ی (12) تعریف می شود [14]:

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

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 (12) و (13) می توان 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 MRC⁶ استفاده شود ظرفیت به صورت زیر محاسبه خواهد شد [15]:

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

ظرفیت مجموع برابر با مجموع ظرفیت همه ی کاربران است. با استفاده از روابط (14) و (15) می توان ظرفیت مجموع را برای K کاربر به صورت رابطه ی زیر محاسبه کرد:

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

نوعی انتخاب حالت بهینه

تعریف مسئله ی بهینه سازی

با توجه به اینکه N آنتن با قابلیت پیکربندی مجدد موجود است و هر کدام می توانند q حالت مختلف داشته باشند، در مجموع N^q حالت مختلف برای آرایه وجود خواهد داشت. در این بخش یک مسئله ی بهینه سازی به نحوی طراحی می شود 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 رابطه ی (11)، روابط مربوط به ظرفیت

⁶ 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:

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

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

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^{۱۰} و سطح توان لوب‌های کناری^{۱۱} تعریف شده است. بر اساس این تعاریف الگوی تشعشی به صورت روابط (۱۹) تا (۲۱) تعریف می‌شود.

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

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

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

⁷ Mesh Adaptive Direct Search (MADS)

⁸ Non-Linear Optimization with the MADS Algorithm (NOMAD)

⁹ Black Box Optimization

¹⁰ Half Power Beam Width (HPBW)

¹¹ 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:

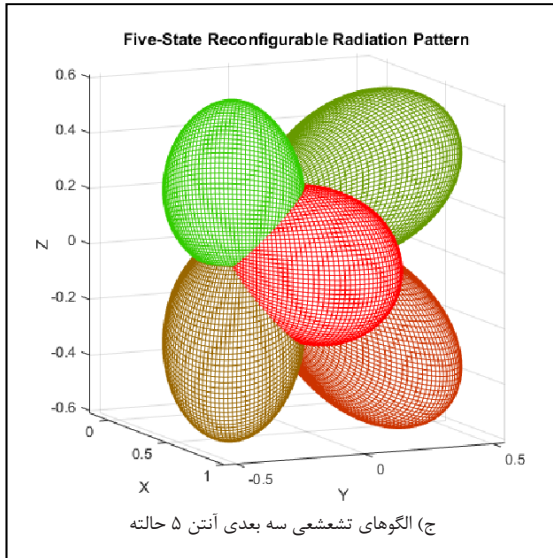
$$\max_{\mathbf{X} \in (0,1)^{N \times q}} \sum_{j=1}^K \mathbb{E} \left\{ \log_2 \left(1 + \frac{\left\| \left(\mathbf{w}_k \right)^H \cdot \sqrt{\frac{\alpha_k \sigma_k}{N}} \text{diag} \left(\mathbf{X}_{N \times q} \cdot \mathbf{g}_k \right) \cdot \mathbf{a}_k \right\|^2}{\sum_{j=1, j \neq k}^K \left\|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

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

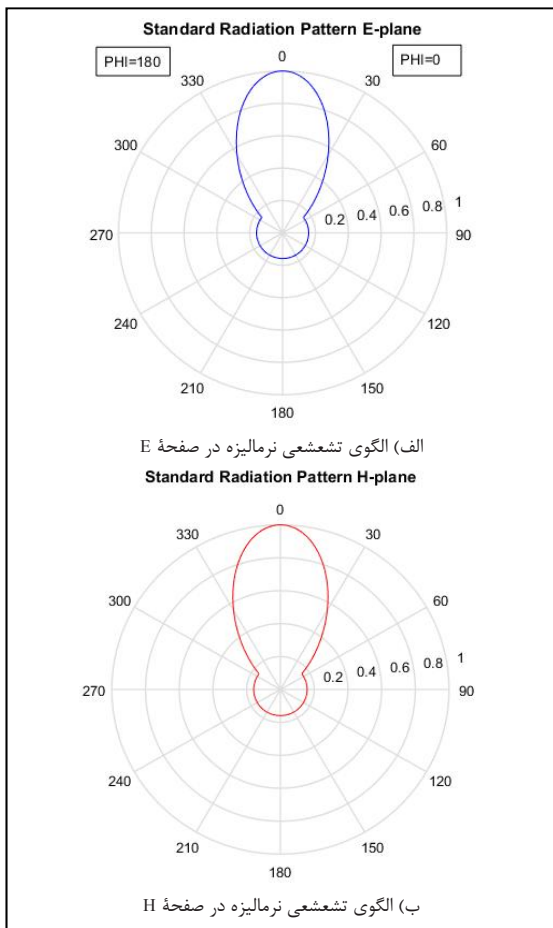
روش حل مسئله‌ی بهینه‌سازی

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)^۷ می‌باشد. یک نرم‌افزار است که الگوریتم MADS را برای بهینه‌سازی جعبه‌سیاه^۸ تحت قيود 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

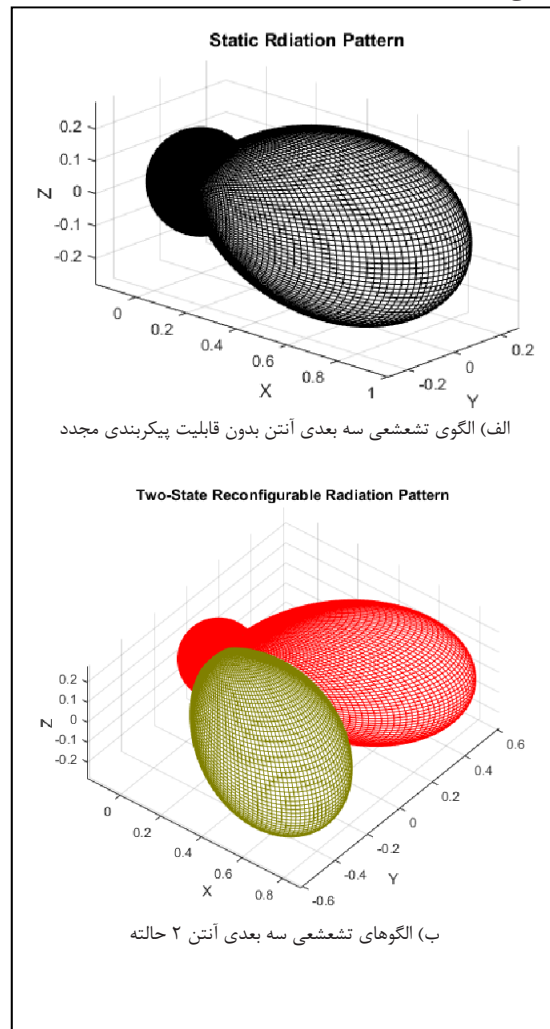


شکل ۴. نمودار قطبی الگوی تشعشعی آنتن استاندارد اصلی بدون قابلیت پیکربندی مجدد

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

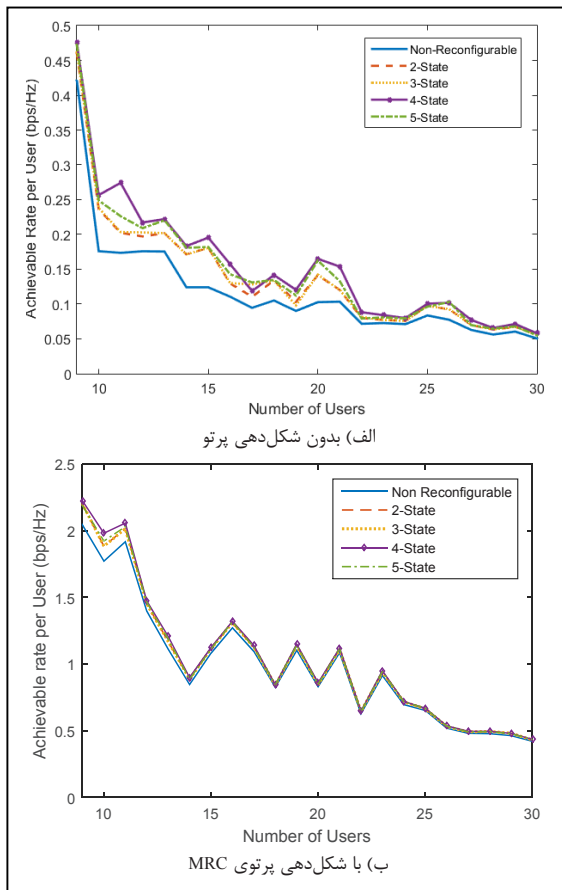
$$\begin{aligned} \phi_{3dB} &= 65^\circ, \phi \in [-180^\circ, 180^\circ] \\ \theta_{3dB} &= 65^\circ, \theta \in [0^\circ, 180^\circ] \\ SLL_H &= SLL_V = 30dB \\ G_{max} &= 8dB \end{aligned} \quad (22)$$

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 θ یا ϕ 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.



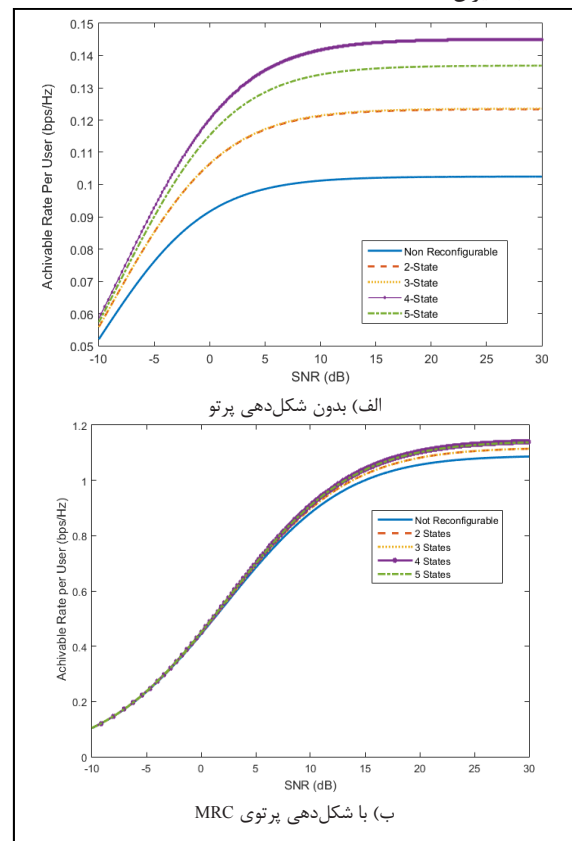
میزان بهبود ظرفیت مجموع

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 پرتوی MRC (شکل ب) و مقایسه نتیجه پیکربندی مجدد در نتایج

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 هستند. 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 پرتوی 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. Kermoal, 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. Vandenbosch, 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.

