

مدل سازی کانال سیستم مخابراتی مبتنی بر OAM در حضور انعکاس

وحیده وحیدی^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ محمود آتشبار^۲، استادیار؛ شهرام حسینزاده^۳، دانشیار

۱- گروه مهندسی برق - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه شهید مدنی آذربایجان - تبریز - ایران - v.vahidinia@azaruniv.ac.ir

۲- گروه مهندسی برق - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه شهید مدنی آذربایجان - تبریز - ایران - atashbar@azaruniv.ac.ir

۳- گروه مهندسی برق - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه شهید مدنی آذربایجان - تبریز - ایران - s.hosseinzadeh@azaruniv.ac.ir

چکیده: تکنولوژی جدیدی که اخیراً جهت افزایش ظرفیت کانال سیستم‌های مخابراتی مورد بررسی قرار گرفته شده، ممان زاویه‌ای مداری (OAM) می باشد. در سیستم OAM، آرایه دایروی یکنواخت (UCA) بدلیل سهولت پیاده‌سازی تعامد مودهای OAM، استفاده زیادی داشته است در اکثر تحقیقات انجام گرفته در این زمینه فرض شده است آرایه‌های آنتنی فرستنده و گیرنده روبروی هم در محیط بدون هیچ نوع انعکاسی قرار گرفته‌اند. اثر انعکاس تنها در حالات ارسال تک آنتنه و آرایه خطی یکنواخت (ULA) بررسی شده است که با توجه به تفاوت زیاد مدل کانال سیستم OAM مبتنی بر UCA با مدل کانال سیستم OAM مبتنی بر ULA، نتایج حاصله در تحقیقات مورد اشاره را نمی‌توان برای سیستم OAM مبتنی بر UCA استفاده نمود. در این مقاله کانال سیستم OAM مبتنی بر UCA را در حضور انعکاس آینه‌ای مدل‌سازی می‌شود. بدین منظور اثر انعکاس را با استفاده از UCA فرستنده مجازی مدل می‌شود. همچنین در حالات حدی، مدل تقریبی ساده شده را برای کانال محاسبه شده و ظرفیت کانال را بر اساس مدل های حاصله محاسبه می‌شود. نشان می‌دهیم که در حالت وجود انعکاس، تعامد بین مودهای OAM در حالت آرایه دایروی از بین رفته که منجر به کاهش ظرفیت کانال می‌گردد. در نتیجه جهت جلوگیری از کاهش ظرفیت، نیاز به پیش کدینگ مناسب می‌باشد. با استفاده از نتایج شبیه‌سازی صحت ادعای خود را نشان می‌دهیم.

واژه‌های کلیدی: آرایه دایروی یکنواخت، انعکاس، سیستم مخابراتی، کانال، ممان چرخشی مداری.

Channel Modeling of the OMA-based Communication System in the Presence of the Reflection

V. Vahidinia¹, MSc Student; M. Atashbar², Assistant Professor; S. Hosseinzadeh³, Associate Professor

1- Department of Electrical Engineering, Azarbaijan Shahid Masdani University, Tabriz, Iran, Email: v.vahidinia@azaruniv.ac.ir

2- Department of Electrical Engineering, Azarbaijan Shahid Masdani University, Tabriz, Iran, Email: atashbar@azaruniv.ac.ir

3- Department of Electrical Engineering, Azarbaijan Shahid Masdani University, Tabriz, Iran, Email: s.hosseinzadeh@azaruniv.ac.ir

Abstract: Orbit Angular Momentum is a novel technology which has been used recently for increasing the channel capacity of communication systems. In the OAM system, the Uniform Circular Array (UCA) has been widely used due to its capability in easy implement of the OAM modes orthogonality. In most of the researches, it is assumed that the transmitter and receiver antenna arrays are aligned with each other in the channel without any reflection. The effect of channel reflection is investigated only on single antenna and Uniform Linear Array (ULA) cases, which according to many difference between the UCA and ULA based OAM systems, the obtained results cannot be used for UCA based OAM system. In this paper, the channel modeling of the UCA based OAM system in presence of the reflection is done. For this purpose, the reflection effect is modeled by a virtual transmitter UCA. Also, the channel matrix in extreme cases is approximated, and the channel capacity using the obtained model is computed. We show that, in the presence of channel reflection, the orthogonality of OAM modes are corrupted, which leads to decreasing the channel capacity. Consequently, a proper pre-coding is needed to prevent capacity loss. We evaluated the obtained results by the simulations.

Keywords: UCA, Channel, Communication system, Reflection, Orbit angular momentum.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۰۶/۰۳

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۰۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۰۸

نام نویسنده مسئول: محمود آتشبار

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تبریز - جاده تبریز به مراغه - دانشگاه شهید مدنی آذربایجان - دانشکده فنی و مهندسی - گروه مهندسی برق.

۱- مقدمه

چندگانه فضایی در [۳] و [۱۴] و با سیستم OFDM^۴ در [۱۵] به منظور رسیدن به نرخ ارسال حداکثری تلفیق شده است.

برخی از تحقیقات انجام شده روی OAM مربوط به استفاده از آرایه خطی یکنواخت (ULA^۵) در فرستنده و گیرنده می‌باشد که از جمله می‌توان به محاسبه ظرفیت سیستم مبتنی بر ULA [۱۶] و استفاده از OAM در کنار سایر درجات آزادی از قبیل دامنه و فاز به منظور افزایش امنیت لایه فیزیکی [۱۷] اشاره نمود. از طرف دیگر استفاده از آرایه دایروی یکنواخت (UCA^۶) در OAM منجر به ساده شدن پیاده سازی و تحلیل سیستم OAM گردیده است. از تحقیقات انجام شده روی سیستم OAM مبتنی بر UCA می‌توان به محاسبه ظرفیت سیستم [۲]، ترکیب مودها [۱۸] و مدولاسیون اندیس‌های مبتنی بر سیستم OAM [۳] اشاره نمود.

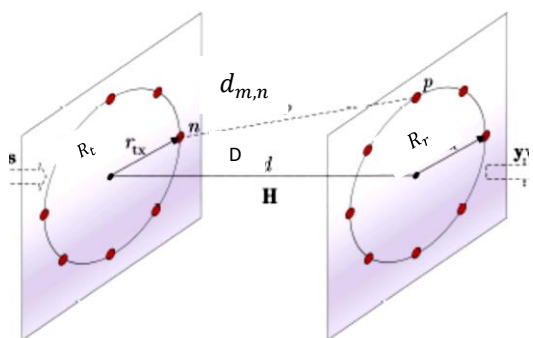
در صورت استفاده از UCA با N آنتن در فرستنده و گیرنده سیستم OAM، تعداد N مود متعامد تولید می‌گردد در نتیجه می‌توان اطلاعات را بطور همزمان در N مود ارسال نمود. یکی از شرایط اساسی ایجاد تعامد مودها، هم‌تراز بودن آرایه آنتن فرستنده و گیرنده با یکدیگر می‌باشد. بنابراین مطالعه مشکل عدم هم‌ترازی آرایه آنتن فرستنده و گیرنده، یکی از موضوعات کلیدی در سیستم‌های بی‌سیم مبتنی بر OAM می‌باشد [۱۹]. در [۲۰] آشکارسازی محور پرتو و هم‌ترازی فرستنده و گیرنده تحت شرایط بدون نویز تحلیل شده است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که خطای ناشی از عدم هم‌ترازی آرایه‌های فرستنده و گیرنده منجر به نرخ خطای بیت بالاتر در گیرنده سیستم مخابراتی مبتنی بر OAM می‌گردد. نویسندگان در [۲۱] در مورد مساله تشخیص مود با استفاده از آزمون چند فرضیه بحث نموده و کار خود را در مورد وجود زاویه انحراف آرایه آنتنی مورد آزمایش قرار داده‌اند. تاثیر زاویه انحراف بر ظرفیت کانال سیستم OAM مبتنی بر UCA بررسی شده است [۴]. در [۲۲] نویسندگان روشی را برای بهبود عملکرد سیستم برای آرایه آنتنی UCA در صورت وجود زاویه انحراف، ارائه کرده‌اند.

در تحقیقات ذکر شده در بالا فرض شده است که آرایه فرستنده و گیرنده در محیط بدون انعکاس قرار گرفته‌اند. اما در کاربردهای واقعی تر اثرات انعکاس‌های موجود در کانال را نمی‌توان نادیده گرفت. بر این اساس بررسی سیستم‌های مخابراتی مبتنی بر OAM در کانال با حضور انعکاس ضروری می‌باشد تا کاربردهای آن در حالت بی‌سیم گسترده‌تر گردد. در [۲۳] نویسندگان سیستم OAM تک آنتنی را در حالت وجود انعکاس تحلیل نمودند. در روشی دیگر، عملکرد سیستم OAM مبتنی بر آرایه ULA در حضور انعکاس کانال بررسی شده است [۵]. در روش فوق، با فرض آرایه ULA در فرستنده و گیرنده، اثر انعکاس آینه‌ای در کانال تحلیل شده است. نشان داده شده است می‌توان اثر انعکاس کانال را با تعبیه چندین آنتن مجازی با چیدمان خطی، در کنار ULA مدل نمود. به عبارت دیگر چه در حضور انعکاس کانال و چه در حالت بدون انعکاس، آرایه فرستنده بصورت آرایه خطی مدل می‌شود و تفاوت دو حالت در تعداد آنتن‌های فرستنده می‌باشد. این پدیده در سیستم OAM مبتنی بر

با رشد سریع سیستم‌های مخابراتی بی‌سیم، بهبود ظرفیت بی‌سیم به یکی از اهداف اصلی در سیستم‌های ارتباطی نسل آینده تبدیل شده است [۱]. طرح‌های دستیابی چندگانه مختلف، از جمله دستیابی چندگانه تقسیم زمان، دستیابی چندگانه تقسیم فرکانس و دستیابی چندگانه تقسیم فضایی به طور گسترده برای بهبود ظرفیت بی‌سیم در سیستم‌های ارتباطی بی‌سیم فعلی به کار گرفته شده‌اند. تکنولوژی جدیدی که اخیراً در زمینه دسترسی چندگانه برای افزایش ظرفیت کانال مورد بررسی قرار گرفته است ممان زاویه ای مداری (OAM^۱) می‌باشد [۲]. ممان‌های خطی امواج الکترومغناطیس به دو نوع SAM^۲ و OAM تقسیم می‌شوند. SAM دو مقدار ± 1 دارد بنابراین دو پایه متعامد دارد که دو پلاریزاسیون چپ‌گرد و راست‌گرد دایروی ایجاد می‌کنند. در مقابل OAM به صورت بی‌ممانی است که فاز $e^{jl\phi}$ داشته باشد که l شماره مود OAM نام دارد [۳]. از سال ۱۹۹۲ که بیم با فاز مارپیچی با المان زاویه ای فضایی کشف شد بیشترین مطالعات روی OAM صورت می‌گیرد. آزمایش مشهور venic نشان داد که OAM می‌تواند در امواج رادیویی انتقال داده شود [۴]. مود OAM می‌تواند مقادیر صحیحی داشته باشد که در این حالت به تعداد مودها پایه‌های متعامد ایجاد می‌گردد. در نتیجه در این حالت می‌توان از یک فرکانس به تعداد مودها مرتبه بازاستفاده نمود که این امر منجر به افزایش راندمان طیفی و سرعت اطلاعات می‌شود [۵]. به عبارت دیگر فن‌آوری OAM قادر به ارائه درجه آزادی جدیدی برای سیستم‌های ارتباطی بی‌سیم است [۳]. برخلاف الگوهای متعارف انتشار امواج الکترومغناطیسی، انرژی امواج OAM در یک ناحیه دایروی حول محور پرتو متمرکز است که منجر به گین‌های انتشار مختلف در داخل و خارج از ناحیه دایروی می‌شود [۲].

مدل‌سازی دقیق ظرفیت سیستم‌های ارتباطی بی‌سیم مبتنی بر OAM با در نظر گرفتن ویژگی‌های دستیابی به گین انتشار یکی از موضوعات کلیدی برای استفاده از فن‌آوری OAM برای سیستم‌های ارتباطی بی‌سیم 5G می‌باشد [۲].

اگرچه نویسندگان [۶] نشان دادند که سیستم مخابراتی بی‌سیم OAM زیرمجموعه‌ای از سیستم‌های MIMO^۳ سنتی است و دستاوردهای دیگری را برای ظرفیت اضافی فراهم نمی‌کند، اما نتایج تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که سیستم‌های بی‌سیم مبتنی بر OAM مزایای متعددی از قبیل: راندمان طیفی بالا [۷]، دسترسی بیشتر کاربران [۱۰]، قابلیت اطمینان بالا برای anti-jamming [۸]، و تشخیص آسانتر [۷] و [۹] را دارا می‌باشد. بر این اساس اخیراً تعداد زیادی از محققان شروع به کار بر روی سیستم‌های مخابراتی بی‌سیم مبتنی بر OAM کردند. به عنوان نمونه، انتقال ظرفیت بالا مبتنی بر OAM در ۶۰ گیگاهرتز انجام شده است [۱۱]. نویسندگان [۱۲] تسهیم OAM را در سیستم ارتباطی موج میلیمتری ارائه کردند. دسترسی چندگانه مبتنی بر OAM با دسترسی



شکل ۱. دو UCA فرستنده و گیرنده هم تراز

فاصله بین مراکز دو UCA مقدار D و شعاع آرایه های فرستنده و گیرنده به ترتیب R_r و R_t است. در این حالت تعداد کل مدهای OAM ممکن N می باشد. در این حالت، مقدار شیف فاز متناظر با مود l -ام برای آنتن n -ام بصورت $e^{-j2\pi\frac{nl}{N}}$ می باشد. اگر سیگنال ارسالی متناظر با مود l -ام باشد سیگنال اعمال شده به آنتن n -ام به صورت زیر خواهد بود [۶]:

$$s_n = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{l=1}^N p_l x_l e^{-j2\pi\frac{nl}{N}}, \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

که در آن p_l ضریب توان می باشد. در حالت برداری سیگنال فرستنده را می توان به صورت زیر نشان داد [۸]:

$$\mathbf{s} = \mathbf{W}\mathbf{P}\mathbf{x} \quad (2)$$

در رابطه (۲)، $\mathbf{P} = \text{diag}[p_0 \ p_1 \ \dots \ p_{N-1}]$ ماتریس تخصیص توان، \mathbf{W} ماتریس تبدیل فوریه گسسته (DFT) و $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_N]^T$ بردار سیگنال های ارسالی می باشد.

سیگنال دریافتی در آنتن m -ام UCA گیرنده در حالت هم تراز آرایه-های فرستنده و گیرنده بصورت زیر می باشد:

$$y_m^{LOS} = \sum_{n=1}^N h_{m,n} s_n + n_m \quad (3)$$

و در حالت برداری بصورت زیر قابل بیان می باشد:

$$\mathbf{y}^{LOS} = \mathbf{H}^{LOS}\mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (4)$$

که \mathbf{H}^{LOS} ماتریس کانال در حالت هم تراز آرایه فرستنده و گیرنده است که عنصر مربوط به درایه سطر m -ام و ستون n -ام \mathbf{H}^{LOS} از رابطه زیر بدست می آید:

$$h_{m,n}^{LOS} = \beta \frac{\lambda}{2\pi d_{m,n}} e^{-jk d_{m,n}} \quad (5)$$

در این رابطه $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ و $d_{m,n}$ فاصله بین آنتن فرستنده و گیرنده می باشد که به صورت زیر قابل بیان می باشد [۹]:

$$d_{m,n} = \sqrt{D^2 + R_t^2 + R_r^2 - 2R_t R_r \cos(\psi_m - \phi_n)} \quad (6)$$

UCA رخ نمی دهد در نتیجه نمی توان نتایج حاصله در [۵] را برای سیستم OAM مبتنی بر UCA استفاده نمود.

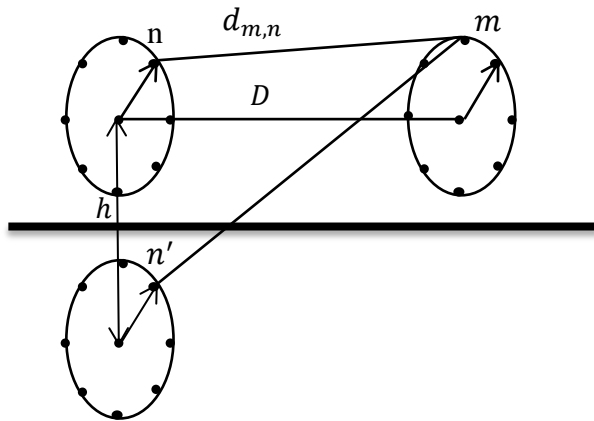
با توجه به مزایای زیاد استفاده از آرایه UCA در سیستم OAM، تحلیل سیستم OAM مبتنی بر آرایه UCA در حضور اثر انعکاس کانال ضروری می باشد. از طرف دیگر نتایج حاصل از روش ارائه شده برای تحلیل سیستم OAM مبتنی بر آرایه ULA را نمی توان برای حالت آرایه UCA استفاده نمود. دلیل این امر تفاوت زیاد مدل کانال سیستم OAM در دو حالت آرایه UCA و ULA می باشد. در نتیجه نیاز به تحلیل اثر انعکاس در سیستم OAM مبتنی بر آرایه UCA ضروری می باشد. بر این اساس در این مقاله با فرض آرایه آنتنی UCA برای فرستنده و گیرنده، مدلسازی کانال سیستم مخابراتی مبتنی بر OAM در حضور انعکاس را انجام می دهیم. بدین منظور بر اساس مدل آینه ای، فرض می کنیم سیگنال های خروجی UCA فرستنده از دو مسیر دید مستقیم و مسیر انعکاسی به UCA گیرنده می رسند که مسیر انعکاسی را با استفاده از آرایه UCA فرستنده مجازی مدل می کنیم. کانال مسیر انعکاسی را با استفاده از مدل آرایه های غیرهم تراز سیستم OAM مدلسازی می کنیم. با جمع کانال مسیر مستقیم و انعکاسی، مدلسازی کانال در حضور انعکاس صورت می گیرد. در پیشنهادی دیگر، مدل کانال در حضور انعکاس را در حالات حدی، تقریب زده و ظرفیت کانال را محاسبه می نماییم. نشان می دهیم در حضور انعکاس کانال، تعامد بین مدهای OAM مخدوش می شود که منجر به کاهش ظرفیت کانال می گردد.

بطور خلاصه نوآوری های مقاله بصورت زیر بیان می گردد

- ۱- ماتریس کانال سیستم OAM مبتنی بر UCA در حضور انعکاس محاسبه شده است.
 - ۲- مقادیر تقریبی ماتریس کانال سیستم OAM مبتنی بر UCA در حالات حدی محاسبه شده است.
 - ۳- اثر انعکاس کانال در از بین رفتن تعامد بین سیگنال های مدهای مختلف OAM نشان داده شده است. نتیجه آن کاهش ظرفیت کانال نسبت به حالت بدون انعکاس می باشد.
- در ادامه در بخش دوم، مدلسازی سیستم انجام گرفته و در بخش سوم، روش پیشنهادی برای مدلسازی کانال OAM مبتنی بر UCA در حضور انعکاس ارائه شده است. در بخش فوق، مدل تقریبی کانال در حالات حدی و تحلیل های مربوطه نیز بیان شده است. در بخش چهارم نتایج شبیه سازی های انجام گرفته بیان شده است و در نهایت در بخش پنجم جمع بندی مقاله صورت گرفته است.

۲- مدلسازی سیستم

دو UCA فرستنده و گیرنده موازی هم هر کدام متشکل از N آنتن را در نظر می گیریم که دقیقاً بصورت هم تراز روبروی یکدیگر قرار گرفته اند را مطابق شکل (۱) در نظر بگیرید.



شکل ۲. مدل انعکاس آینه‌ای سیستم OAM مبتنی بر UCA

با توجه به نظریه انعکاس آینه‌ای، می‌توان اثر انعکاس آینه‌ای را با جایگزین نمودن منعکس کننده با UCA مجازی در طرف دیگر منعکس کننده مدل نمود. به عبارت دیگر، امواج منعکس شده بصورت امواج منتشر شده از آنتن های مجازی مدل می‌گردند. بر این اساس، سیگنال دریافتی در حضور اثر انعکاس کانال را می‌توان بصورت مجموع دو سیگنال های مسیر مستقیم و مسیر انعکاسی در نظر گرفت. در این حالت سیگنال های مسیر مستقیم معادل سیگنال دریافتی در سیستم OAM با آرایه های UCA دقیقاً همتراز هستند که عناصر ماتریس های کانال برای این حالت بصورت روابط (۵) و (۶) می باشد.

سیگنال های دریافتی از مسیر انعکاسی بصورت سیگنال های منتشر شده از UCA فرستنده مجازی و دریافت شده در UCA گیرنده مدل می‌شوند. بنابراین کانال مربوط به مسیر انعکاسی معادل کانالی است که در آن دو فرستنده (مجازی) و گیرنده موازی هم قرار گرفته اند اما یک جابجایی در محور عمودی به وجود آمده است. به حالت به وجود آمده، حالت عدم هم تراز UCA های فرستنده و گیرنده گفته می‌شود.

تفاوت مدل کانال سیستم OAM در حالت هم تراز (معادل مسیر دید مستقیم) و حالت عدم هم تراز (معادل مسیر انعکاسی) UCA های فرستنده و گیرنده در رابطه محاسبه فاصله آنتن ها از یکدیگر متفاوت می‌باشد. اگرچه مقدار $d_{m,n}$ در مسیر دید مستقیم معادل رابطه (۶) می‌باشد ولی در حالت مسیر انعکاسی رابطه فوق صحیح نمی‌باشد که دلیل این امر عدم هم تراز آرایه های فرستنده مجازی و گیرنده در مسیر انعکاسی می‌باشد. بنابراین باید رابطه فاصله آنتن های فرستنده و گیرنده را در حالت عدم هم تراز آرایه های فرستنده و گیرنده استفاده نمود. در [۲۲]، رابطه کلی برای فاصله آنتن گیرنده از فرستنده سیستم OAM در حالت عدم هم تراز آرایه های فرستنده و گیرنده استخراج شده است. با جایگذاری مقادیر در رابطه کلی بیان شده در [۲۲] فاصله مورد نظر بصورت زیر حاصل می‌گردد:

که زاویه محل قرارگیری آنتن n -ام UCA فرستنده و ψ_m زاویه محل قرارگیری آنتن m -ام UCA گیرنده بصورت زیر می‌باشد:

$$\psi_m = \frac{2\pi(m-1)}{N} \quad (7)$$

$$\phi_n = \frac{2\pi(n-1)}{N} \quad (8)$$

در گیرنده، شبکه شیفت فاز، سیگنال های ارسال شده در مودهای مختلف OAM را بصورت زیر بازسازی می‌کند:

$$\tilde{y}_l^{LOS} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{m=1}^N y_m^{LOS} e^{j2\pi \frac{ml}{N}} \quad (9)$$

که بصورت برداری بصورت زیر قابل بیان می‌باشد.

$$\tilde{\mathbf{y}}^{LOS} = \mathbf{W}^H \mathbf{y}^{LOS} = \mathbf{W}^H \mathbf{H}^{LOS} \mathbf{s} + \mathbf{W}^H \mathbf{n} \quad (10)$$

در این حالت، رابطه ورودی-خروجی سیستم OAM را می‌توان بصورت زیر بازنویسی نمود.

$$\tilde{\mathbf{y}}^{LOS} = \mathbf{G}^{LOS} \mathbf{x} + \tilde{\mathbf{n}} \quad (11)$$

که $\mathbf{G}^{LOS} = \mathbf{W}^H \mathbf{H}^{LOS} \mathbf{W}$ یک ماتریس قطری است. دلیل این امر خاصیت چرخشی ماتریس کانال \mathbf{H}^{LOS} بر اساس روابط (۵) و (۶) می‌باشد. در نتیجه $\tilde{y}_l^{LOS} = g_{l,l}^{LOS} x_l + \tilde{n}_l$ که $g_{l,l}^{LOS}$ عنصر l -ام ماتریس \mathbf{G}^{LOS} می‌باشد. بنابراین در حالت هم تراز دقیق UCA موجود در فرستنده و گیرنده سیستم OAM، تداخل بین سیگنال های مودهای مختلف OAM ایجاد نمی‌گردد. با این حال، آشکارساز ML باید جستجوی را بر روی سیگنال های ممکن انجام دهد [۶].

۳- مدل سازی کانال OAM مبتنی بر UCA در حضور انعکاس کانال

در کاربرد های عملی، انتشار چند مسیری به علت وجود انعکاس، تفرق و پراکندگی غیر قابل اجتناب است. بنابراین بررسی سیستم های OAM مبتنی بر UCA در کانال با حضور انعکاس ضروری می‌باشد تا کاربردهای آن در حالت بی سیم گسترده تر شود. در این بخش با فرض حضور یک منعکس کننده آینه‌ای در کانال، مدل پیشنهادی کانال سیستم OAM مبتنی بر UCA را استخراج می‌کنیم.

شکل (۲) سیستم OAM با مدل انعکاس آینه‌ای را نشان می‌دهد. سیستم نشان داده شده شامل دو آنتن UCA است که آنتن های آن با فواصل مساوی روی دایره پخش شده اند. یک منعکس کننده ایده آل عمود بر UCA ها و در فاصله $\frac{h}{2}$ از مرکز UCA ها قرار دارد. در این حالت، سیگنال ارسال شده از UCA فرستنده، علاوه بر مسیر مستقیم از مسیر انعکاس یافته نیز منتشر می‌شود و به گیرنده می‌رسد. مسیر انعکاس یافته یک مسیر دید غیر مستقیم را توصیف می‌نماید.

\mathbf{H}^{NLOS} می‌باشد. با اعمال شیفت فازها در گیرنده سیگنال زیر حاصل می‌گردد:

$$\tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{W}^H \mathbf{y} = \mathbf{W}^H \mathbf{H} \mathbf{s} + \mathbf{W}^H \mathbf{n} \quad (19)$$

که بصورت زیر قابل بیان می‌باشد:

$$\tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{G} \mathbf{x} + \tilde{\mathbf{n}} \quad (20)$$

در این رابطه $\mathbf{G} = \mathbf{W}^H \mathbf{H} \mathbf{W} \mathbf{P}$ می‌باشد.

عنصر سطر m -ام و ستون n -ام ماتریس \mathbf{H} بصورت

$$h_{m,n} = h_{m,n}^{LOS} + h_{m,n}^{NLOS} \quad (21)$$

$$= \frac{\beta \lambda}{2\pi} \left(\frac{e^{-jkd_{m,n}}}{d'_{m,n}} + \frac{e^{-jkd_{m,n}}}{d_{m,n}} \right)$$

می‌باشد. با اینکه بر اساس رابطه (۶) $d_{m,n} = d_{m+1,n+1}$ که منجر به چرخشی شدن ماتریس \mathbf{H}^{LOS} می‌گردد ولی با توجه به (۱۴)، مقدار $d'_{m,n}$ با مقدار $d'_{m+1,n+1}$ لزوماً برابر نمی‌باشد در نتیجه ماتریس \mathbf{H} یک ماتریس چرخشی نمی‌باشد که منجر به غیر قطری شدن ماتریس \mathbf{G} می‌گردد. در نتیجه سیگنال ارسالی در مودهای متفاوت OAM متعامد نمی‌باشند و روی یکدیگر تداخل ایجاد می‌کنند. منشا این تداخل اثر انعکاس کانال در سیستم OAM می‌باشد و منجر به کاهش ظرفیت سیستم می‌گردد. برای محاسبه ظرفیت، از رابطه معرفی شده در [۱۶] برای ظرفیت سیستم OAM در حالت وجود تداخل استفاده می‌نماییم که بصورت زیر می‌باشد،

$$C = \sum_{i=1}^N \log_2 \left(1 + \frac{|g_{i,i}|^2 p_i}{\sigma_i^2 + \sum_{u=1, u \neq i}^N |g_{i,u}|^2 p_u} \right) \quad (22)$$

که $g_{i,u}$ عنصر سطر i -ام و ستون u -ام ماتریس \mathbf{G} و σ_i^2 واریانس نویز موجود در مود i -ام می‌باشد. در رابطه فوق جمله $\sum_{u=1, u \neq i}^N |g_{i,u}|^2 p_u$ تداخل مودها روی مود i -ام می‌باشد. براین اساس ظرفیت سیستم OAM مبتنی بر UCA در حضور انعکاس کانال، با جایگذاری مقادیر ماتریس \mathbf{G} در رابطه (۲۲) محاسبه می‌گردد. انتظار می‌رود ظرفیت نسبت به حالت کانال بدون انعکاس کمتر گردد که دلیل این امر وجود تداخل بین مودها در حالت وجود انعکاس کانال می‌باشد.

۳-۱. تقریب ماتریس کانال در حالات حدی:

در این بخش مدل تقریبی برای حالات حدی ماتریس کانال در حضور انعکاس را پیشنهاد می‌دهیم. حالات حدی در نظر گرفته شده، حالت فاصله بسیار دور و حالت فاصله بسیار نزدیک منعکس کننده از آرایه-های فرستنده و گیرنده می‌باشد.

$$d'_{m,n} = \sqrt{(B_x - R_t \cos \phi_n)^2 + (B_y - R_t \sin \phi_n)^2 + B_z^2} \quad (12)$$

که در آن $d'_{m,n}$ فاصله آنتن m -ام UCA گیرنده از آنتن مجازی متناظر با آنتن n -ام UCA فرستنده می‌باشد و

$$\begin{aligned} B_x &= d \sin \theta + R_r \cos \psi_m \\ B_y &= R_r \sin \psi_m \\ B_z &= d \cos \theta \end{aligned} \quad (13)$$

و d فاصله بین مرکز UCA مجازی فرستنده از مرکز UCA گیرنده می‌باشد که مقدار آن بصورت $d = \sqrt{D^2 + h^2}$ می‌باشد. در نهایت θ زاویه بین خط واصل بین مراکز UCA مجازی فرستنده و UCA گیرنده با محور افق است بصورت $\theta = \tan^{-1} \left(\frac{h}{D} \right)$ قابل بیان می‌باشد. با جایگذاری (۱۳) در (۱۲) و ساده سازی، $d'_{m,n}$ بصورت زیر حاصل می‌شود.

$$d'^2_{m,n} = D^2 + h^2 + R_t^2 + R_r^2 - 2R_t R_r \cos(\phi_n - \psi_m) - 2R_t h \cos(\phi_n) + 2R_r h \cos(\psi_m) \quad (14)$$

با فرض ضریب انعکاس واحد، پاسخ کانال بین آنتن m -ام آرایه گیرنده و آنتن n' -ام آرایه مجازی فرستنده که معادل پاسخ کانال مسیر انعکاسی بین آنتن m -ام آرایه گیرنده و آنتن n -ام آرایه فرستنده می‌باشد بصورت زیر می‌باشد:

$$h_{m,n}^{NLOS} = \beta \frac{\lambda}{2\pi d'_{m,n}} e^{-jkd'_{m,n}} \quad (15)$$

سیگنال ناشی از این کانال مولفه دید غیر مستقیم سیگنال دریافتی در گیرنده را تشکیل می‌دهد که رابطه آن به شکل زیر می‌باشد:

$$\mathbf{y}_m^{NLOS} = \sum_{n=1}^N h_{m,n}^{NLOS} \mathbf{s}_n + \mathbf{n}_m \quad (16)$$

سیگنال دریافتی در هر یک از آنتن‌ها، مجموع سیگنال ناشی از مسیر مستقیم و مسیر انعکاسی می‌باشد که بصورت زیر قابل بیان می‌باشد:

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_m &= \mathbf{y}_m^{LOS} + \mathbf{y}_m^{NLOS} \\ &= \sum_{n=1}^N (h_{m,n}^{LOS} + h_{m,n}^{NLOS}) \mathbf{s}_n + \mathbf{n}_m \end{aligned} \quad (17)$$

که در حالت برداری بصورت زیر می‌باشد:

$$\begin{aligned} \mathbf{y} &= (\mathbf{H}^{LOS} + \mathbf{H}^{NLOS}) \mathbf{s} + \mathbf{n} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{H} \mathbf{s} + \mathbf{n} \end{aligned} \quad (18)$$

در این رابطه عنصر سطر m -ام و ستون n -ام ماتریس \mathbf{H}^{NLOS} که ناشی از مسیر انعکاس می‌باشد برابر با $h_{m,n}^{NLOS}$ و $\mathbf{H} = \mathbf{H}^{LOS} +$

$$d'_{m,n} \approx \frac{\sqrt{D^2 + h^2 + R_t^2 + R_r^2}}{R_t R_r \cos(\psi_m - \phi_n) + R_t h \cos(\phi_n) - R_r h \cos(\psi_m)} \\ = D - \frac{R_t R_r \cos(\psi_m - \phi_n)}{D} + \frac{R_r \cos(\psi_m) - R_t \cos(\phi_n)}{D} h \quad (25)$$

در نتیجه

$$d'_{m,n} - d_{m,n} = \frac{R_r \cos(\psi_m) - R_t \cos(\phi_n)}{D} h \quad (26)$$

با فرض $R_t = R_r = R$ داریم

$$d'_{m,n} - d_{m,n} = \frac{2Rh}{D} \sin\left(\frac{\phi_n - \psi_m}{2}\right) \sin\left(\frac{\psi_m + \phi_n}{2}\right) \\ = \frac{2Rh}{D} \sin\left(\frac{\pi(n-m)}{N}\right) \sin\left(\frac{\pi(m+n-2)}{N}\right) \quad (27)$$

که ساده سازی آخری با توجه به روابط (۷) و (۸) می باشد.

از طرف دیگر

$$\frac{\sin(kd'_{m,n}) + \sin(kd_{m,n})}{\cos(kd'_{m,n}) + \cos(kd_{m,n})} = \\ \tan\left(\frac{k}{2}(d'_{m,n} + d_{m,n})\right) \tan\left(\frac{k}{2}(d'_{m,n} - d_{m,n})\right) \\ = \tan\left(\frac{k}{2}(d'_{m,n} - d_{m,n})\right) \cdot \tan\left(\frac{k}{2}(2d_{m,n} + d'_{m,n} - d_{m,n})\right) \quad (28)$$

در نهایت رابطه (۲۳) بصورت زیر تبدیل می گردد که عناصر مدل تقریبی را بیان می کند.

(۲۹)

$$h_{m,n} \approx \frac{\beta\lambda}{\pi d_{m,n}} \left| \cos\left(\frac{Rkh}{D} \sin\left(\frac{\pi(n-m)}{N}\right) \sin\left(\frac{\pi(m+n-2)}{N}\right)\right) \right| \\ \cdot \exp\left\{-j \tan^{-1}\left[\tan\left(\frac{Rkh}{D} \sin\left(\frac{\pi(n-m)}{N}\right) \sin\left(\frac{\pi(m+n-2)}{N}\right)\right)\right]\right\} \\ \cdot \tan\left(kd_{m,n} + \frac{Rkh}{D} \sin\left(\frac{\pi(n-m)}{N}\right) \sin\left(\frac{\pi(m+n-2)}{N}\right)\right) \quad (29)$$

با توجه به نتیجه حاصله، مشاهده می شود که مقدار $h_{m+1,n+1}$ با $h_{m,n}$ برابر نمی باشد در نتیجه H ماتریس چرخشی نمی باشد که بیانگر غیر متعامد بودن سیگنال های ارسالی در مودهای مختلف OAM می باشد که منجر به کاهش ظرفیت سیستم می گردد. برای رفع مشکل می توان براساس مدل حاصله، مشابه [۲۲] با اعمال پیش کدینگ مناسب در

در حالت حدی اول فرض می کنیم فاصله صفحه منعکس کننده از آرایه ها نسبت به فاصله آرایه فرستنده از آرایه گیرنده خیلی بزرگتر باشد در این حالت $D \ll h$ که منجر به $d'_{m,n} \gg d_{m,n}$ می شود، در نتیجه انرژی مسیر انعکاسی نسبت به مسیر دید مستقیم کمتر می باشد و می توان از مسیر انعکاس در مقابل مسیر دید مستقیم صرف نظر نموده و مدل کانال کلی را بصورت تقریبی برابر با مدل مسیر دید مستقیم در نظر گرفت. در مقابل در حالتی که فاصله منعکس کننده از آرایه ها نسبت به فاصله آرایه فرستنده از آرایه گیرنده خیلی کمتر باشد ($D \gg h$) مقادیر $d'_{m,n}$ و $d_{m,n}$ اختلاف ناچیز خواهند داشت که این اختلاف خیلی کم در مقدار دامنه پاسخ کانال قابل صرف نظر می باشد ولی در فاز پاسخ کانال نمی توان از این اختلاف صرف نظر نمود. در این حالت $h_{m,n}$ بصورت رابطه زیر بیان می شود:

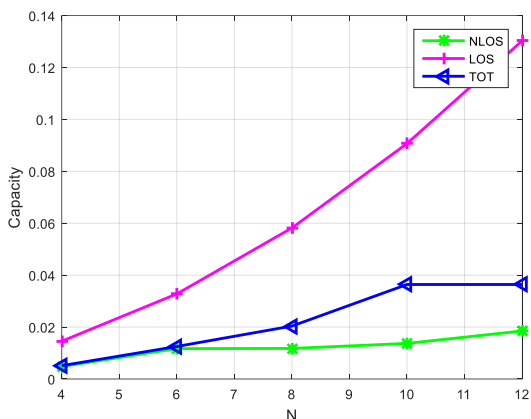
$$h_{m,n} \approx \frac{\beta\lambda}{2\pi d_{m,n}} (\cos(kd'_{m,n}) - j \sin(kd'_{m,n})) \\ + \cos(kd_{m,n}) - j \sin(kd_{m,n}) \\ = \frac{\beta\lambda}{\sqrt{2}\pi d_{m,n}} \sqrt{1 + \cos(kd'_{m,n} - kd_{m,n})} \\ \cdot e^{-j \tan^{-1}\left(\frac{\sin(kd'_{m,n}) + \sin(kd_{m,n})}{\cos(kd'_{m,n}) + \cos(kd_{m,n})}\right)} \\ \cdot \frac{\beta\lambda}{\pi d_{m,n}} \left| \cos\left(\frac{k}{2}(d'_{m,n} - d_{m,n})\right) \right| \\ \cdot e^{-j \tan^{-1}\left(\frac{\sin(kd'_{m,n}) + \sin(kd_{m,n})}{\cos(kd'_{m,n}) + \cos(kd_{m,n})}\right)} \quad (23)$$

برای ساده سازی بیشتر با فرض اینکه R_t و R_r و $D \gg R_t$ ، می توان $d_{m,n}$ را بصورت تقریبی به صورت رابطه زیر بیان نمود.

$$d_{m,n} = \sqrt{D^2 + R_t^2 + R_r^2 - 2R_t R_r \cos(\psi_m - \phi_n)} \quad (24) \\ \approx \sqrt{D^2 + R_t^2 + R_r^2} - \frac{R_t R_r \cos(\psi_m - \phi_n)}{\sqrt{D^2 + R_t^2 + R_r^2}} \\ \approx D - \frac{R_t R_r \cos(\psi_m - \phi_n)}{D}$$

که در آن از تقریب $\sqrt{a^2 - 2b} = a - \frac{b}{a}$ به ازای $b \ll a$ استفاده شده است. که $a = \sqrt{D^2 + R_t^2 + R_r^2}$ و $b = R_t R_r \cos \phi_{mn}$ فرض شده است.

با روش مشابه برای $d'_{m,n}$ رابطه (۲۵) حاصل می گردد.

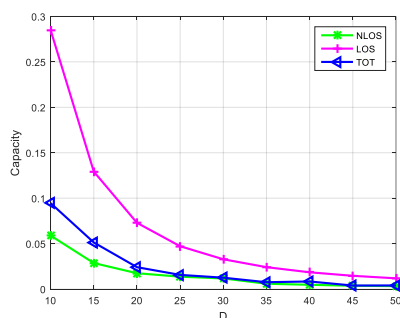


شکل ۴. مقایسه ظرفیت کانال ها بر حسب تغییرات تعداد آنتن آرایه ها

در آزمایش سوم اثر تغییرات فاصله بین مراکز آرایه های فرستنده و گیرنده در ظرفیت بررسی می گردد. بدین منظور SNR برابر با 10dB و تعداد آنتن های هر آرایه برابر با ۶ فرض شده است. نتایج حاصل شده در شکل (۵) نشان می دهد با افزایش فاصله بین فرستنده و گیرنده، ظرفیت هر سه کانال کاهش می یابد و عملکرد کانال انعکاسی مابین عملکرد کانال دید مستقیم و دید غیر مستقیم می باشد. دلیل این امر افزایش افت مسیر ناشی از افزایش طول کانال می باشد که منجر به کاهش مقدار SNR واقعی می گردد.

۴-۱. تحلیل نتایج

چنانکه از نتایج شبیه سازی مشاهده می گردد سیستم OAM بدون انعکاس نسبت به دو سیستم دیگر بیشترین ظرفیت را دارد که دلیل این امر متعامد بودن سیگنال های مودهای مختلف OAM در این سیستم می باشد. در دیگر سیستم ها، بدلیل برهم خوردن تعامد بین مودها، ظرفیت کاهش یافته است. در سیستم کلی که سیستم OAM مبتنی بر UCA در حضور انعکاس می باشد ظرفیت نسبت به حالت انعکاس حاصل بیشتر می باشد که دلیل این امر وجود تعامد جزئی بین مودهای مختلف OAM در این سیستم می باشد.



شکل ۵. مقایسه ظرفیت کانال ها بر حسب فاصله بین فرستنده و گیرنده

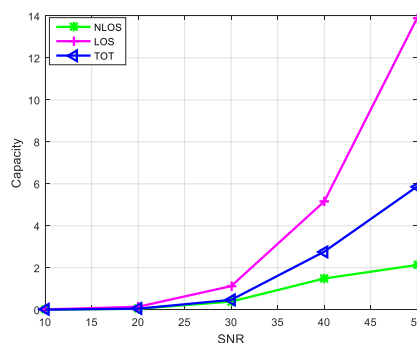
فرستنده و پس کدینگ مناسب در گیرنده، مشکل غیر چرخشی بودن ماتریس H را در حالات حدی رفع نمود و تعامد مودهای OAM در حضور انعکاس کانال را تضمین نمود که منجر به افزایش ظرفیت کانال می گردد.

۴-۲. نتایج شبیه سازی

در این بخش نتایج شبیه سازی های انجام گرفته برای بررسی اثر انعکاس در سیستم OAM مبتنی بر UCA ارائه می گردد. در شبیه سازی ها مقادیر ظرفیت کانال در سه حالت کانال سیستم OAM در حالت بدون انعکاس، کانال سیستم OAM فقط با دید غیرمستقیم و کانال کلی سیستم OAM شامل مسیر دید مستقیم و مسیر انعکاسی که به ترتیب با «LOS»، «NLOS» و «TOT» نمایش داده می شود را با یکدیگر مقایسه می نماییم. در شبیه سازی ها فرکانس کاری 9GHz، شعاع آرایه های UCA فرستنده و گیرنده برابر با ۶۰ سانتی متر، مقدار h برابر با ۱۰ سانتی متر و B برابر با ۱۰۰ در نظر گرفته شده است. همچنین واریانس نویز برابر با عکس SNR فرض شده است.

شکل ۳، تغییرات ظرفیت سیستم های OAM مبتنی بر UCA، نسبت به SNR برای مقادیر SNR برابر با 10dB, 20dB, 30dB, 40dB, 50dB را نشان می دهد. نتایج برای حالتی که هر آرایه شامل ۴ آنتن و فاصله مراکز آرایه های فرستنده و گیرنده ۳۰ متر است بدست آمده است. نتایج گویای برتری کانال دید مستقیم نسبت به کانال دید غیر مستقیم و کانال انعکاسی کلی می باشد. ظرفیت کانال کلی از ظرفیت کانال بدون انعکاس کمتر و از ظرفیت کانال دید غیرمستقیم بیشتر می باشد. بدلیل اینکه کانال انعکاسی کلی ترکیبی از کانال دید مستقیم و کانال دید غیر مستقیم می باشد نتایجی که حاصل شده منطقی می باشد. در هر سه کانال، با افزایش مقدار SNR، مقدار ظرفیت افزایش می یابد.

در آزمایش دوم اثر تغییرات تعداد آنتن های هر آرایه بر ظرفیت بررسی می گردد. برای این حالت SNR برابر با 10dB و فاصله مراکز آرایه های فرستنده و گیرنده ۳۰ متر فرض شده است. نتایج حاصل که در شکل (۴) نشان داده می شود حاکی از اینست که با افزایش تعداد آنتن های آرایه ها، ظرفیت هر سه کانال افزایش می یابد.



شکل ۳. مقایسه ظرفیت کانال ها بر حسب تغییرات SNR

- Communications Letters*, vol. 7, no. 4, pp. 582–585, Aug. 2018.
- [5] S. Zheng, R. Dong, Z. Zhang, X. Yu, X. Jin, H. Chi, Z. N. Chen, X. Zhang, "Non-Line-of-Sight Channel Performance of Plane Spiral Orbital Angular Momentum MIMO Systems", *IEEE Access*, vol. 05, pp. 25377–25384, Oct 2017.
- [6] O. Edfors and A. J. Johansson, "Is orbital angular momentum (OAM) based radio communication an unexploited area?" *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 60, no. 2, pp. 1126–1131, Feb. 2012.
- [7] W. Zhang et al., "Mode division multiplexing communication using microwave orbital angular momentum: An experimental study," *IEEE Trans. Wireless Communication.*, vol. 16, no. 2, pp. 1308–1318, Feb. 2017.
- [8] W. Cheng, W. Zhang, H. Jing, S. Gao, H. Zhang, "Orbital angular momentum for wireless communications", *IEEE Wireless Communication*, vol. 26, pp. 100–107, Feb. 2019.
- [9] E. Basar, "Orbital angular momentum with index modulation", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 17, no. 3, pp. 2029–2037, Mar. 2018.
- [10] K. A. Opare, Y. Kuang, J. J. Kponyo, K. S. Nwizege, and Z. Enzhan, "The degrees of freedom in wireless line-of-sight OAM multiplexing systems using a circular array of receiving antennas," in *Proc. 5th Int. Conf. Adv. Comput. Communication. Technol.*, pp. 608–613, Feb. 2015.
- [11] F. E. Mahmoudi and S. D. Walker, "4-Gb/s Uncompressed Video Transmission over a 60-GHz Orbital Angular Momentum Wireless Channel", *IEEE Wireless Communication. Lett.*, vol. 2, no. 2, pp. 223–226, Apr. 2013.
- [12] Y. Yan et al., "32-Gb/s 60-GHz Millimeter-Wave Wireless Communication Using Orbital Angular Momentum and Polarization Multiplexing," *Proc. 2016 IEEE ICC*, pp. 1–6, May 2016.
- [13] Y. Ren et al., "Line-of-Sight Millimeter-Wave Communications Using Orbital Angular Momentum Multiplexing Combined with Conventional Spatial Multiplexing", *IEEE Trans. Wireless Communication.*, vol. 16, no. 5, pp. 3151–61, May. 2017.
- [14] W. Cheng et al., "Orbital-Angular-Momentum Embedded Massive MIMO: Achieving Multiplicative Spectrum-Efficiency for mmWave Communications," *IEEE Access*, vol. 6, , pp. 2732–45, Feb. 2018.
- [15] Y. Yan et al., "OFDM over mm-Wave OAM Channels in a Multipath Environment with Intersymbol Interference," *Proc. 2016 IEEE GLOBECOM*, pp. 1–6 Dec. 2016.
- [16] A. Zhang, S. Zheng, Y. Chen, X. Jin, H. Chi, X. Zhang, "The capacity gain of orbital angular momentum based multiple-input-multiple-output system", *Sci. Rep.*, vol. 6, pp. 25418, May 2016.
- [17] I. B. Djrdjevic, "Multidimensional OAM-based secure high-speed wireless communications", *IEEE Access*, vol. 5, pp. 16416–16428, Sep. 2017.
- [18] K. A. Opare, Y. Kuang, and J. J. Kponyo, "Mode combination in an ideal wireless OAM-MIMO multiplexing system," *IEEE Wireless Communication. Lett.*, vol. 4, no. 4, pp. 449–452, Aug. 2015.
- [19] H. Tian, Z. Liu, W. Xi, G. Nie, L. Liu, and H. Jiang, "Beam axis detection and alignment for uniform

نتایج شکل ۴ نشان می‌دهد که کانال‌های دید غیرمستقیم و کلی بعد از افزایش اولیه ظرفیت و رسیدن به مقدار ظرفیت مشخص، با افزایش تعداد آنتن‌ها ظرفیت افزایشی ندارد. دلیل این امر اینست که در دو کانال فوق ماتریس کانال چرخشی نمی‌باشد در نتیجه تعامدهای OAM برقرار نمی‌شود و با افزایش بیش از حد تعداد آنتن‌ها، اثرات مخرب مودها روی دیگر مودها منجر به جلوگیری از افزایش ظرفیت می‌گردد.

همچنین در برخی شکل‌ها از جمله شکل (۴) شکستگی منحنی مربوط به ظرفیت کانال کلی و انعکاسی دیده می‌شود. دلیل این امر مربوط به اثرات متفاوت انعکاس در حالت تعداد مختلف آنتن‌ها می‌باشد. به عبارت دیگر با توجه به اینکه در مدل کانال سیستم در حضور انعکاس، اثر مسیر انعکاسی نیز حضور دارد، در ظرفیت کلی محاسبه شده برآیند مسیر دید مستقیم با مسیر انعکاسی وارد شده است که در برخی حالات برآیند دو مسیر در جهت افزایش ظرفیت کانال عمل می‌کند و در حالات دیگر برآیند مسیرها در جهت کاهش ظرفیت کانال می‌باشد حتی این اتفاق می‌تواند برای مسیر انعکاسی خالص نیز رخ دهد که در این حالت اثرات متقابل مودهای مختلف، در مقابله مختلف تعداد آنتن‌ها متفاوت می‌باشد.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله مدلسازی کانال سیستم OAM مبتنی بر آرایه دایروی یکساخت در حضور انعکاس کانال انجام شد. در حالات حدی، مدل تقریبی ساده شده برای کانال محاسبه شده و ظرفیت کانال را بر اساس مدل‌های حاصله محاسبه کردیم. نشان دادیم که در حالت وجود انعکاس کانال، ماتریس کانال خاصیت چرخشی خود را از دست می‌دهد در نتیجه تعامد بین مودهای مختلف OAM از بین رفته و ظرفیت کانال نسبت به حالت عدم وجود انعکاس کاهش می‌یابد. در نتیجه جهت جلوگیری از کاهش ظرفیت، نیاز به پیش‌کدینگ مناسب می‌باشد.

مراجع

- [1] P. Yang, Y. Xiao, M. Xiao, and Sh. Li. "6G Wireless Communications: Vision and Potential Techniques." *IEEE Network* 33, no. 4, pp. 70–75, Jul. 2019.
- [2] L. Wang, X. Ge, R. Zi, C.-X. Wang, "Capacity analysis of orbital angular momentum wireless channels", *IEEE Access*, vol. 5, pp. 23069–23077, Oct. 2017.
- [3] Y. Yuan, Z. Zhang, J. Cang, H. Wu, and C. Zhong, "Capacity analysis of UCA-based OAM multiplexing communication system," in *Proc. Int. Conf. Wireless Communication. Signal Process. (WCSP)*, Nanjing, China, pp. 1–5, Oct. 2015.
- [4] R. Chen, H. Xu, M. Moretti, and J. Li, "Beam steering for the misalignment in UCA-based OAM communication systems," *IEEE Wireless*

- [22] W. Cheng, H. Jing, W. Zhang, Z. Li, and H. Zhang. "Achieving Practical OAM Based Wireless Communications with Misaligned Transceiver", in *ICC 2019-2019 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 1-6, Jul. 2019.
- [23] Y. Yan et al., "Multipath effects in millimetre-wave wireless communication using orbital angular momentum multiplexing", *Sci. Rep.*, vol. 6, Sep. 2016.
- circular array-based orbital angular momentum wireless communication", *IET Communication n.*, vol. 10, no. 1, pp. 44–49, Feb. 2016.
- [20] E. Cano, B. Allen, Q. Bai, and A. Tennant, "Generation and detection of OAM signals for radio communications," in *2014 Loughborough Antennas and Propagation Conference (LAPC)*, pp. 637– 640, Nov. 2014.
- [21] A. Haskou, P. Mary, and M. Helard, "Error probability on the orbital angular momentum detection", in *Proc. IEEE 25th Ann. Int. Symp. Pers., Indoor, Mobile Radio Communication. (PIMRC)*, Washington, DC, USA, pp. 302–307, Sep. 2014.

زیر نویس‌ها

¹ Orbit Angular Momentum

² Spin Angular Momentum

³ Multiple-Input Multiple-Output

⁴ Orthogonal Frequency Division Multiplexing

⁵ Uniform Linear Array

⁶ Uniform Circular Array