

文章编号:1007-5321(2020)06-0027-09

DOI:10.13190/j.jbupt.2020-198

OAM-MIMO 通信系统的信道容量研究

唐 杰¹, 李 凯¹, 林楚婷¹, 宋 彦¹, 周恩丞²

(1. 华南理工大学 电子与信息学院, 广州 510641; 2. 中国科学院大学 经济与管理学院, 北京 100190)

摘要: 轨道角动量(OAM)具有独特的模分复用(MDM)方式,可以大大提高传输容量. 为了提高系统的信道容量和频谱利用率,提出了一种结合 OAM 和多输入多输出(MIMO)技术的 OAM-MIMO 复用通信系统,可以在不增加带宽和天线发射功率的情况下提高信道容量和频谱利用率. 采用巴特勒矩阵作为相移器,馈送信号给均匀圆形阵列天线(UCA),使得每个 UCA 可以同时并且独立地生成携带多种不同 OAM 模态信号的载波,从而显著提高系统的信道容量. 实验结果表明,OAM-MIMO 复用通信系统的信道容量和频谱利用率在宏小区、微小区环境下得到了很大提高.

关 键 词: 轨道角动量; 轨道角动量多输入多输出系统; 信道容量; 模分复用; 均匀圆形阵列

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

The Research on Channel Capacity of OAM-MIMO System

TANG Jie¹, LI Kai¹, LIN Chu-ting¹, SONG Yan¹, ZHOU En-cheng²

(1. School of Electronics and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

2. School of Economics and Management, Chinese Academy of Sciences University, Beijing 100190, China)

Abstract: The proposal of orbital angular momentum(OAM)provides a feasible solution for the carrier required by the next-generation mobile communication technology. Its unique modular division multiplexing(MDM)method greatly increases the transmission capacity. However, with the diversification of the next-generation communication technology services, people have put forward higher requirements for bandwidth and spectrum utilization. In order to effectively improve the channel capacity and spectrum utilization of the system, an orbital angular momentum-multiple input multiple output(OAM-MIMO)multiplexing communication system combining OAM and multiple input multiple output(MIMO)technology is proposed. The OAM-MIMO system can improve channel capacity and spectrum utilization without increasing bandwidth and antenna transmit power. The system uses the Butler matrix as a phase shifter to feed the signal to a uniform circular array antenna(UCA), so that each UCA can simultaneously and independently generate a carrier wave carrying a variety of different OAM modal signal, thereby significantly improving the channel capacity of the system. The experimental results show that the channel capacity and spectrum utilization rate of the OAM-MIMO communication system are greatly improved in the macro cell and micro cell environment.

Key words: orbital angular momentum; orbital angular momentum-multiple input multiple output system; channel capacity; mode division multiplexing; uniform circular array

收稿日期:2020-10-07

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFB1804100)

作者简介:唐 杰(1986—),男,教授,博士生导师.

通信作者:周恩丞(1989—),男,博士后, E-mail:zhouencheng@ucas.ac.cn.

目前,第 5 代移动通信系统(5G,the fifth generation of mobile communications system)的移动基站已开始大规模部署. 为了增加信道容量,提高频谱利用率,满足人们日益增长的高通信速率的需求,下一代移动通信网络已开始提上议事日程. 下一代移动通信网络将使用太赫兹频段^[1]. 该频段的频谱资源极为丰富,被认为是具有重要学术价值和广阔应用前景的频率窗口,其通信速率将达到 1 Tbit/s. 第 6 代移动通信系统(6G,the sixth generation of mobile communications system)的核心是将智能引入通信并通过智能提高容量^[2]. 研究人员对下一代无线通信系统中携带轨道角动量(OAM, orbital angular momentum)波束进行了研究. 根据经典的电动力学理论,OAM 在传播方向上具有螺旋相位分布,不同模式的 OAM 波束之间相互正交,互不影响且模式理论上可以取任意整数. 正是由于 OAM 的这种特性,轨道角动量多输入多输出天线(OAM-MIMO, orbital angular momentum-multiple input multiple output)系统在理论上具有无限的传输容量^[3].

研究人员研究出了很多产生 OAM 电磁波的方法,例如螺旋相位板、螺旋抛物面反射天线等^[4],但是它们都有不足之处. 例如,螺旋相位板一旦制作完成,它只能发射固定模式的涡旋电磁波且方向性很差;螺旋抛物面反射天线体积很大,很难产生大模式的涡旋电磁波. 相反,均匀圆形阵列天线(UCA, uniform circular array)在理论上可以产生任何模式的轨道角动量电磁波,因此 UCA 是实现 OAM 模式复用的理想装置. 如果通过巴特勒相移矩阵给单圈 UCA 等幅馈电以生成 OAM 波束,则单圈 UCA 可以同时且独立地生成不同模式叠加的涡旋电磁波,极大地提高了传输速度^[5].

Sasaki 等^[6]提出了一种 OAM-MIMO 多路复用无线传输系统,有效地结合了 OAM 和多输入多输出天线(MIMO, multiple input multiple output)的优势,实现了在 28 GHz 频段的无线传输. Saito 等^[7]提出了一种使用串行干扰消除的方法进一步提高基于 UCA 的 OAM-MIMO 系统的信道容量及性能. Jing 等^[8]的研究与有关 UCA 的大多数研究不同,多数都是针对发送和接收 UCA 相互对准(同轴)的情形,而笔者研究了当 UCA 不是同轴时,即 UCA 收发器是平行的,但是非同轴情况下的通信. Basar 等^[9]使用索引调制激活 OAM 模式本身以携带其他信息. Yuan 等^[10]对基于 OAM 复用通信系统的容量进行

了深入研究,并与不同设置下传统 MIMO 的容量进行了比较. Jiang 等^[11]分析了远距离非正交 OAM 涡旋电磁波传输的信道容量. Palacin 等^[5]介绍了由巴特勒矩阵作为相移器馈送信号的 UCA 结构. 通过将 UCA 的八根天线连接到巴特勒矩阵,它可以在相同的频率和极化条件下同时独立地生成 8 种不同模式的 OAM 波束.

为了有效提高系统的信道容量和频谱利用率,建立了一个 OAM-MIMO 复用通信系统,该系统可以在具有加性高斯白噪声的场景下传输涡旋电磁波. 首先详细介绍了系统的组成和各部分的工作原理,其次介绍了 OAM-MIMO 系统的信道容量计算公式,最后比较了在不同场景下 OAM-MIMO 系统与 MIMO 系统的优缺点. 主要的贡献总结如下.

1) 构建了一个 OAM-MIMO 复用通信系统,该系统的一个关键组成部分是由巴特勒矩阵馈送信号的均匀圆形阵列天线组成的 OAM 信号发送与接收子系统. 对该 OAM-MIMO 系统进行了数学建模,实现轨道角动量生成、调制、传输、接收和解调的整个过程,并且实现了通信.

2) 通过改变天线功率,比较了天线功率对系统通信信道容量的影响.

3) 通过观察频谱利用率的仿真图,可以有效比较在宏小区、微小区、室内等不同场景下 OAM-MIMO 系统与 MIMO 系统的频谱利用率性能,并得出 2 种系统的应用场景.

4) 在宏小区和微小区的场景下,OAM-MIMO 系统与传统 MIMO 相比,信道容量有了很大的提高.

1 OAM-MIMO 系统模型

OAM-MIMO 复用通信系统由分离器、QPSK 调制器、上变频、功率分配器、移相器、均匀圆形阵列天线、信道、下变频、解调等模块组成,该系统可以实现轨道角动量信号的产生、发送、接收、解调等功能,并最终得到所需信号.

OAM-MIMO 复用通信系统将使用正交相移键控(QPSK, quadrature phase shift keying)调制,即对一串数字基带信号进行 QPSK 调制,使用四进制数字基带信号来控制正弦载波的相位. 基带信号 $S_i(t)$ 可以表示为

$$S_i(t) = A \cos(\omega_c t + \theta_i) \quad (1)$$

其中: A 为基带信号的幅度, ω_c 为初始载波角频率, θ_i 为初始相位.

在提出的 OAM-MIMO 通信系统中,将使用更高的太赫兹频段进行传输,有必要将 10 MHz 的 QPSK 信号调制为 140 GHz 的太赫兹频段,以满足发射要求. 因此,首先将 QPSK 信号加载到高频载波信号以得到高频信号,通过下式得到:

$$S_i(t) \cos(\omega_0 t) = A \cos(\omega_c t + \theta_i) \cos(\omega_0 t) = \frac{A \{ \cos[(\omega_c + \omega_0)t + \theta_i] + \cos[(\omega_c - \omega_0)t + \theta_i] \}}{2} \quad (2)$$

其中 ω_0 为高频载波信号角频率.

将该信号通过低通滤波器以获得上变频信号 $S_n(t)$,得到的信号为

$$S_n(t) = \frac{A}{2} \cos[(\omega_c + \omega_0)t + \theta_i] \quad (3)$$

为了产生模态数为 l 的轨道角动量涡旋电磁波,必须将相同的输入信号馈送到不同的 UCA 天线元件,只是两根相邻天线之间存在一定的相位差. 因此,应在每根天线单元之前增加相移器,此时 UCA 的每根天线可以接收相同的信息,仅相位不同. 在发射机处增加的移相器以矩阵形式表示为

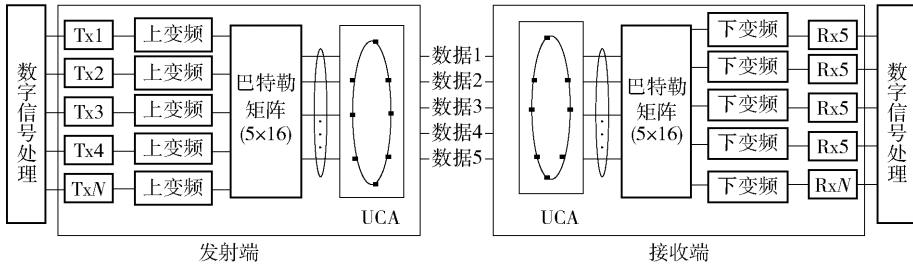


图1 巴特勒矩阵连接到均匀圆形阵列子系统

对于信道建模,首先仅考虑接收天线和发射天线只有一圈 UCA 的情况,如图 2 所示.

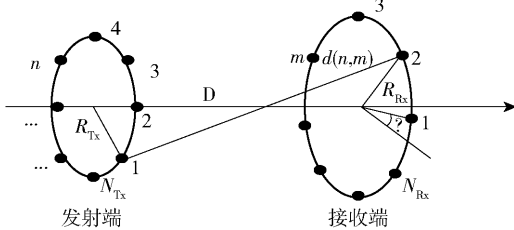


图2 单圈 UCA 的结构

假设发射端与接收端的圆环中心之间的距离为 D ,发送端总的天线个数为 N_{Tx} ,发送端的半径为 R_{Tx} ,接收端总的天线个数为 N_{Rx} ,接收端的半径为 R_{Rx} . 一对收发器天线之间的信道冲激响应 $h(d_{ik})$ 可以表示为

$$\mathbf{t}_{Tx}^l = [e^{j\phi_{Tx,1}^l}, \dots, e^{j\phi_{Tx,N}^l}] \quad (4)$$

其中: $\phi_{Tx}^l = \frac{2\pi l_n(u-1)}{N_{Tx}}$ ($u=1, 2, \dots, N$), N_{Tx} 为发射端总的天线个数, u 代表每一根 UCA 的天线的标号, l_n 为第 n 种模态, 相邻两天线的相位差 φ_n 为

$$\varphi_n = \frac{2\pi l_n}{N_{Tx}} \quad (5)$$

因此,由 N 根叠加的发射天线 UCA 发射的总信号可表示为

$$S_t = \sum_{n=1}^N S_n \mathbf{t}_{Tx}^l \quad (6)$$

其中 S_n 为上变频获得的信号.

为了使 UCA 能够以不同的模态传输多个 OAM 波束,采用以巴特勒相移矩阵馈送信号的 UCA,并构建了 OAM-MIMO 系统. 该系统考虑平行且共轴传输的 2 个具有相同半径的均匀圆形阵列,即它们通过将巴特勒矩阵与 N_{Tx} 根均匀环形阵列天线连接以形成一个子系统,如图 1 所示,该系统可以同时且独立地生成 5 个具有相同频率和极化方式的不同轨道角动量电磁波.

$$h(d_{ik}) = \beta \frac{\lambda}{4\pi l_{ik}} e^{-j2\pi \frac{d_{ik}}{\lambda}} \quad (7)$$

其中:发射天线和接收天线之间的距离为 d 时,电磁波波长为 λ ,衰减常数为 β . 建立基于 LOS 的自由空间传输信道. 当 2 个阵列之间的距离较大时, β 仅与轴向增益有关,因此可以近似为 $\sqrt{G_T G_R}$, 其中 G_T 和 G_R 是天线增益. 对应的发射天线和接收天线之间的信道响应 H 可以写成

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1N_T} \\ h_{21} & h_{22} & \cdots & h_{2N_T} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_R1} & h_{N_R2} & \cdots & h_{N_R N_T} \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中 h_{ik} 为第 i 根发射天线和第 k 根接收天线之间的信道响应.

信道响应函数是与发送天线和接收天线之间与距离有关的函数,可以通过如下公式获得:

$$h_{ik} = h(d_{ik}) \quad (9)$$

其中 d_{ik} 为第 i 根发射天线和第 k 根接收天线之间的距离。

$$d_{ik} = d(\theta_{ik}) = \sqrt{D^2 + R_{Tx}^2 + R_{Rx}^2 - 2R_{Tx}R_{Rx}\cos\theta_{ik}} \quad (10)$$

其中 θ_{ik} 为两天线投影到同一平面所形成的夹角。

构建多圈 UCA 发送和多圈 UCA 接收的 OAM-MIMO 系统,如图 3 所示。

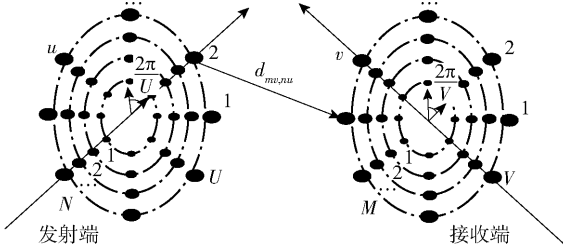


图3 多圈多模态 OAM-MIMO 复用系统示意图

发射天线和接收天线具有多圈 UCA,它们的中心轴相同,仅半径不同。假设发射天线和接收天线分别具有 N_T 和 N_R 圈 UCA,每圈发射 UCA 具有 u 根阵列天线,每圈接收 UCA 具有 v 根阵列天线。发射端每圈相邻 UCA 阵列天线之间的角度为 δ ,接收端每圈相邻 UCA 阵列天线之间的角度为 α 。第 n 圈发送 UCA 和第 m 圈接收 UCA 的半径为 R_n 和 R_m 。

第 m 圈接收 UCA 的第 v 根阵列天线和第 n 圈发送 UCA 的第 u 根阵列天线之间的信道冲激响应为

$$h_{mv,nu} = \frac{1}{\sqrt{D^2 + R_m^2 + R_n^2 - 2R_mR_n\cos(\phi_u + n\delta - \psi_v - m\alpha)}} \quad (11)$$

发射端 UCA 中两圈阵列天线的旋转角度之间的最小间隔 ϕ_u 为

$$\phi_u = \frac{2\pi(u-1)}{U} \quad (12)$$

其中 U 为发射端一圈 UCA 总的天线数。

接收端 UCA 中两圈阵列天线的旋转角度之间的最小间隔 ψ_v 为

$$\psi_v = \frac{2\pi(v-1)}{V} \quad (13)$$

其中 V 为接收端一圈 UCA 总的天线数。

发射端和接收端的两根天线之间的距离为

$$d_{vm,un} = \sqrt{D^2 + R_m^2 + R_n^2 - 2R_mR_n\cos(\phi_u + n\delta - \psi_v - m\alpha)} \quad (14)$$

进一步简化得到

$$d_{mv,nu} = d(\theta_{mv,nu}) = \sqrt{D^2 + R_m^2 + R_n^2 - 2R_mR_n\cos(\Delta\phi_{mv,nu})} \quad (15)$$

其中 $\Delta\phi_{mv,nu} = \frac{2\pi(v-1)}{V} - \frac{2\pi(u-1)}{U} + \phi_0$ 。 ϕ_0 为当在发射和接收 UCA 中的第 1 根天线未对准时接收端和发射端的方位角。如果对齐,则方位角为 0,得到

$$d_{mv,nu} = d(\theta_{mv,nu}) = \sqrt{D^2 + R_m^2 + R_n^2 - 2R_mR_n\cos(\psi_v - \phi_u)} \quad (16)$$

对于相同的模态,单圈 UCA 中的每根天线都发送相同的信号,因此在计算信道容量的过程中需要使用每个模态之间的信道响应。因此,有必要计算第 n 圈发送端 UCA 和第 m 圈接收端 UCA 之间的信道响应。

定义 $h_{mv,n,l}$ 为第 m 圈接收 UCA 的第 v 根接收天线接收到的第 n 圈发射 UCA 的信道增益,并将第 n 圈 UCA 中的所有天线信号叠加,涡旋电磁波信号为

$$h_{mv,n,l} = \sum_{u=1}^U \frac{\beta\lambda e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{D^2 + R_n^2 + R_m^2}}}{4\pi D \sqrt{U}} e^{jl_n(\theta + \phi_u)} \times \exp\left[\frac{j2\pi R_n R_m}{\lambda \sqrt{D^2 + R_n^2 + R_m^2}} \cos(\theta + \phi_u)\right] \quad (17)$$

使用贝塞尔函数的表达式,可以将包含发送端天线数的原始公式(17)简化为包含接收端天线数的因子的形式,为

$$h_{mv,n,l} = \sum_{u=1}^U \frac{\beta\lambda e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{D^2 + R_n^2 + R_m^2}}}{4\pi D \sqrt{U}} e^{jl_n(\theta + \phi_u)} \times \exp\left[\frac{j2\pi R_n R_m}{\lambda \sqrt{D^2 + R_n^2 + R_m^2}} \cos(\theta + \phi_u)\right] = \frac{U}{j^l} \sum_{u=1}^U \frac{\beta\lambda e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{D^2 + R_n^2 + R_m^2}}}{4\pi D \sqrt{U}} e^{jl_n\phi_u} e^{jl_n\theta} \times \exp\left[\frac{j2\pi R_n R_m}{\lambda \sqrt{D^2 + R_n^2 + R_m^2}} \cos(\theta + \phi_u)\right] = \frac{\beta\lambda e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{D^2 + R_n^2 + R_m^2}}}{4\pi D \sqrt{U}} \frac{U}{j^l} \sum_{u=1}^U e^{jl_n\theta} \times \exp\left[\frac{j2\pi R_n R_m}{\lambda \sqrt{D^2 + R_n^2 + R_m^2}} \cos(\theta + \phi_u)\right] \approx$$

$$\frac{\beta\lambda e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{D^2+R_n^2+R_m^2}}e^{j l_n \phi_u}}{4\pi D \sqrt{U}} \frac{U}{j^l} \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{j l_n \theta} \times \\ \exp \left[\frac{j 2\pi R_n R_m}{\lambda \sqrt{D^2+R_n^2+R_m^2}} \cos(\theta + \phi_u) \right] d\theta \approx \\ \frac{\beta\lambda \sqrt{U} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{D^2+R_n^2+R_m^2}}e^{j l_n \phi_u}}{4\pi D_j^l} J_l \left(\frac{2\pi R_n R_m}{\lambda \sqrt{D^2+R_n^2+R_m^2}} \right) \quad (18)$$

其中 J_l 表示贝塞尔函数。

定义不带相位因子 $e^{j l_n \phi_u}$ 的通道增益 $h_{mn,l}$, $h_{mn,l}$ 可表示为

$$h_{mn,l} = \frac{\beta\lambda \sqrt{U} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{D^2+R_n^2+R_m^2}}}{4\pi D_j^l} J_l \left(\frac{2\pi R_n R_m}{\lambda \sqrt{D^2+R_n^2+R_m^2}} \right) \quad (19)$$

此时的信道矩阵不考虑由 H_{OAMI} 表示的小尺度衰落。

接收端的第 m 圈 UCA 的第 v 根天线接收发射端的信号, 该信号来自发射端第 n 圈 UCA, 有

$$S_{mv} = \sum_{n=1}^N \sum_{u=1}^U \frac{1}{\sqrt{U}} S_{n,l_n}(t) e^{j l_n \phi_u} \sum_{n=1}^N h_{mv,n,l} S_{n,l_n}(t) \quad (20)$$

其中: $S_{n,l_n}(t)$ 为第 n 种模态的电磁波通过上变频获得的信号, $h_{mv,n,l}$ 为接收端与发射端的通道增益, 接收端为第 m 圈 UCA 的第 v 根天线, 发射端为第 n 圈 UCA。

将表达式(17)的通道增益代入式(20)以获得接收信号 y_{mv} , 表达式为

$$y_{mv} = \sum_{n=1}^N h_{mn,l} S_{n,l_n}(t) e^{j l_n \phi_u} + N_{mv} \quad (21)$$

其中: $h_{mn,l}$ 为通道增益, N_{mv} 为噪声信号。

对接收到的 N 种模态的 OAM 光束进行解复用。与发射端 UCA 中的天线相似, 在接收端 UCA 的接收天线接收的信号加上与发射端模态相对应的反向相移。接收 UCA 和解调信号的模态为 l_m , 可以用以下公式表示:

$$y_{mv,l_m} = y_{mv} e^{-j l_m \phi_v} = \\ \sum_{n=1}^N h_{mn,l} S_{n,l_n}(t) e^{j \phi_u(l_n - l_m)} + \\ \sum_{n=1}^N h_{mn,l} S_{n,l_m}(t) + N_{mv} e^{-j \phi_u l_m} \quad (22)$$

根据式(22)可知, 在相应模态的逆相移之后, 接收天线接收到的所有发射信号可以分为发射信号

模态和接收模态不同的信号、发射信号模态和接收信号模态相同的信号、信道噪声信号。发射信号模态和接收模态不同的信号特征为

$$\sum_{v=1}^V e^{j \frac{2\pi}{V}(l_m - l_n)(v-1)} = \frac{1 - e^{-j \frac{2\pi}{V}(l_m - l_n)V}}{1 - e^{-j \frac{2\pi}{V}(l_m - l_n)}} = \begin{cases} V, & l_m = l_n \\ 0, & l_m \neq l_n \end{cases} \quad (23)$$

进一步可以将具有不同发送信号模式和接收模式的信号简化为 0, 并且可以获得对应的解复用模式的信号。第 m 圈接收 UCA 解调的模态为 l_z 的平面波信号可以显示为

$$y_{m,l_z} = \sum_{v=1}^V y_{mv,l_z} = \sum_{n=1}^N V h_{mn,l_z} S_{n,l_z}(t) + N_{m,l_z} \quad (24)$$

其中: $S_{n,l_m}(t)$ 为第 z 种模态的电磁波通过上变频获得的信号, h_{mn,l_z} 为通道增益, N_{m,l_z} 为噪声信号。

对获得的平面波信号进行下变频转换, 最后通过 QPSK 解调获得数字信号, 并将这 4 路数字信号合成一路, 完成整个流程。

2 OAM-MIMO 系统容量分析

根据上述构建的 OAM-MIMO 系统, 展开相应的容量分析。在计算 OAM-MIMO 系统的容量时, 需将整圈 UCA 圆环看成一个整体。如果每圈 UCA 只发送、接收一个模态, 那么一个 4 模态发送、4 模态接收的 OAM-MIMO 系统所使用的信道矩阵为一个 4×4 的矩阵, 可表示为

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & h_{14} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & h_{24} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} & h_{34} \\ h_{41} & h_{42} & h_{43} & h_{44} \end{bmatrix} \quad (25)$$

其中 h_{ik} 代表第 i 根发射天线和第 k 根接收天线之间的信道响应。

每一个信道响应的表达式为

$$h_{mn,l} = \frac{\beta\lambda \sqrt{U} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{D^2+R_n^2+R_m^2}}}{4\pi D_j^l} J_l \left(\frac{2\pi R_n R_m}{\lambda \sqrt{D^2+R_n^2+R_m^2}} \right) \quad (26)$$

考虑小尺度衰落信道, 并考虑小尺度衰落的信道为服从莱斯分布的衰落信道 $\mathbf{H}_{\text{OAM},1}$ 。信道矩阵通过 Matlab 程序随机生成一个对应维度的均值为 0, 方差为 1 的复高斯分布矩阵 \mathbf{H}_1 。因此 OAM-MIMO 通信系统矩阵可表示为

$$\mathbf{H}_{\text{OAM}} = \mathbf{H}_{\text{OAM},1} \mathbf{H}_1 \quad (27)$$

由此得到 OAM-MIMO 系统的信道容量为

$$C_{\text{OAM}} = B \sum_{n=1}^N \sum_{l=-\frac{N_T}{2}}^{\frac{N_T}{2}} \text{lb} \left(1 + \frac{P_{n,l} \lambda_{n,l}^2}{\sigma^2} \right) \quad (28)$$

其中: B 为信道带宽, $\lambda_{n,l}^2$ 为第 n 圈第 l 模态信道的奇异值, σ^2 表示噪声方差, $P_{n,l}$ 表示第 n 圈第 l 模态发射功率. OAM 波束良好的正交性, 即不同模态 OAM 涡旋电磁波相互正交互不影响, 因此在发射端功率分配时无需考虑信道相关性因素, 也无需考虑 MIMO 系统中注水定理对信道容量的影响.

3 仿真结果及分析

使用 Matlab 进行仿真, 在宏小区、微小区以及室内场景下, 对 OAM-MIMO 系统与传统 MIMO 系统的信道容量进行了比较. 本次仿真实验中, 采用频率为 140 GHz 的电磁波作为传输信号的载波、带宽为 2 GHz、天线间隔为半波长、小尺度衰落中的莱斯因子取 10 dB, 其中 9 根天线 OAM-MIMO 系统由 2 圈天线个数为 4 的 UCA 和一根在圆心处的天线构成, 可发射 11 个模态的 OAM 波束. 同理, 21 根可发送 21 个模态的 OAM 波束, 37 根可发送 31 个模态的 OAM 波束.

3.1 宏小区的场景容量分析

在宏小区场景下, 信号的传播距离为 500 ~ 2 000 m, 信道衰落因子 n 取 3.5, 固定发射功率为 10 W, 发射天线与接收天线增益选取 7 dBi, 噪声功率选取 -166 dBm, 进而求得系统容量. OAM-MIMO 与 MIMO 系统容量仿真结果如图 4 所示.

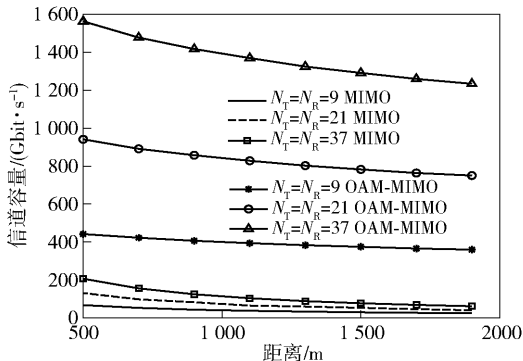


图 4 固定发射功率(2 W)宏小区容量仿真结果

从图 4 可以看出, 无论 OAM-MIMO 系统还是 MIMO 系统, 其信道容量都随距离的增大而减小, 但

在相同天线数且传输同等距离的情况下, OAM-MIMO 系统的信道容量比传统 MIMO 系统要大. 在宏小区场景下, 对于 OAM-MIMO 系统, 天线角度扩展较小, 信道相关性较强, 且天线数越多, 该系统可发射的模态数目越多, 其信道容量也越大. 因此, 在宏小区场景下, OAM-MIMO 系统在信道容量方面相较于 MIMO 系统性能更优越.

3.2 微小区的场景容量分析

在微小区场景下, 设置信号传播距离为 20 ~ 160 m, 信道衰落因子 n 取 2.6, 固定发射功率为 2 W, 发射天线与接收天线增益选取 1 dBi, 噪声功率选取 -166 dBm, 对应的 OAM-MIMO 与 MIMO 系统容量仿真结果如图 5 所示.

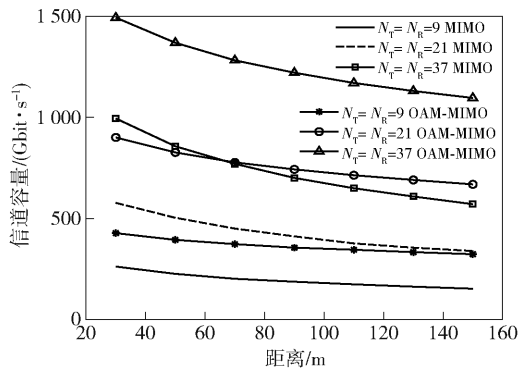


图 5 固定发射功率(2 W)微小区容量仿真结果

从图 5 可以看出, 在微小区场景下 OAM-MIMO 系统与 MIMO 系统的信道容量都随距离的增大而减小, 但在天线数相同且传输同等距离的情况下, 由于天线角度扩展较小、信道相关性较强, 且 OAM-MIMO 系统可发射多种不同模态的 OAM 波束携带信息, 此时可得出与宏小区场景下相同的结论, OAM-MIMO 系统的信道容量大于 MIMO 系统的信道容量.

3.3 室内场景容量分析

在室内场景下, 设置信号传播距离为 1 ~ 10 m, 信道衰落因子 n 取 2, 固定发射功率为 100 mW, 发射天线与接收天线增益选取 1 dBi, 噪声功率选取 -80 dBm, 对应的 OAM-MIMO 与 MIMO 系统容量仿真结果如图 6 所示.

可以看出, 在室内场景下, OAM-MIMO 系统还是 MIMO 系统, 其信道容量都随距离的增大而减小, 但在相同天线数传输同等距离的情况下, 由于天线角度扩展较大, 信道相关性较弱, 此时 MIMO 系统的

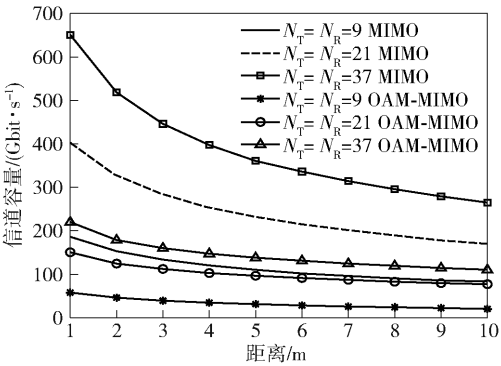


图 6 固定发射功率(2 W)室内容量的仿真结果

容量比 OAM-MIMO 系统的信道容量要大. 所以, MIMO 系统比 OAM-MIMO 系统更适合室内场景.

通过仿真结果可知 MIMO 系统更适合室内等角度扩展较大、信道相关性较弱的场景. OAM-MIMO 系统更适合宏小区、微小区等角度扩展较小、信道相关性较强、发射功率较小的传输场景.

3.4 功率对系统信道容量的影响

发射天线的发射功率对系统的信道容量有很大影响. 图 7 ~ 图 9 所示分别为宏小区、微小区和室内环境下系统的信道容量随功率变化的仿真结果.

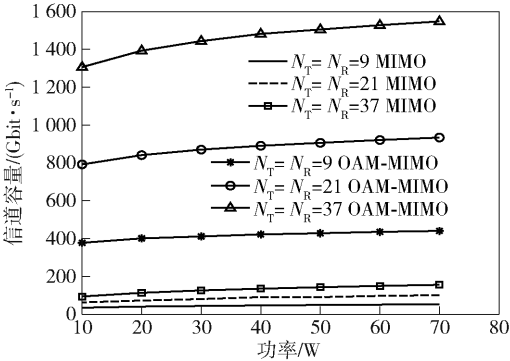


图 7 宏小区环境中(距离 1 km 处)的系统容量随功率变化的仿真结果

无论是宏小区、微小区还是室内场景, OAM-MIMO 系统和传统 MIMO 系统的信道容量都随发射功率的增大而增大. 在宏小区场景下, 同等天线数和同样的功率情况时, OAM-MIMO 系统所能提供的信道容量远大于 MIMO 系统提供的信道容量; OAM-MIMO 系统相较于 MIMO 系统在提升同样功率的情况下, 其信道容量变化更大, 效果更明显. 在微小区场景下, 可以得出与宏小区场景相同的结论. 而在室内场景, 在同等天线数与同样的功率情况下, MIMO 系统所能提供的信道容量大于 OAM-MIMO 系

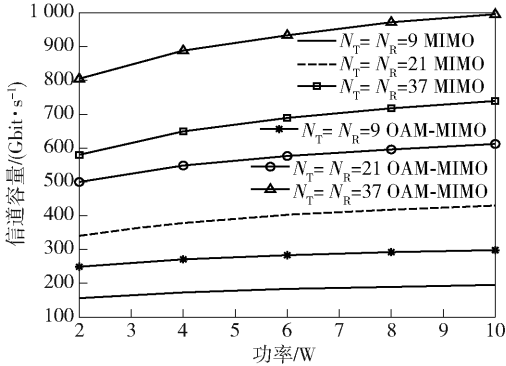


图 8 微小区环境中的(距离 500 m 处)系统容量随功率变化的仿真结果

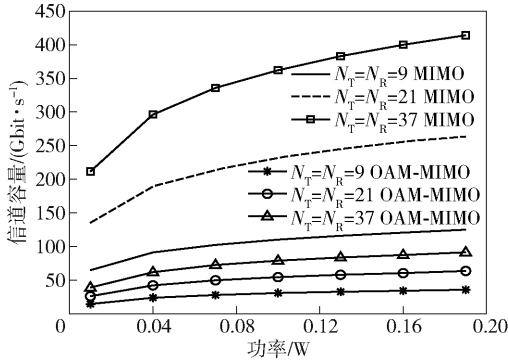


图 9 室内环境中的(距离 5 m 处)系统容量随功率变化的仿真结果

统提供的信道容量, 且效果更明显.

3.5 2 种系统在不同场景下的频谱利用率

频谱利用率是衡量一个通信系统性能的主要考察指标之一, 在 3.1、3.2、3.3 节所示的条件下 OAM-MIMO 与 MIMO 系统的频谱利用率仿真结果如图 10 ~ 图 12 所示.

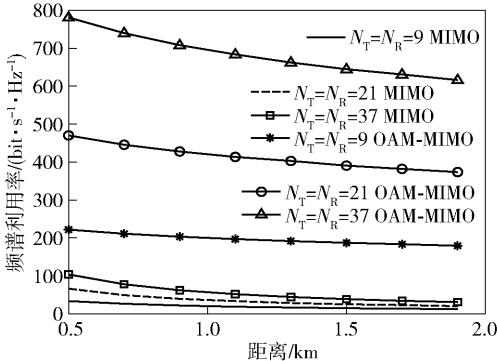


图 10 宏小区场景中频谱利用率的仿真结果

分别观察图 10 ~ 图 12 可以得出结论, 无论宏小区、微小区、室内场景, OAM-MIMO 系统和传统的

MIMO 系统的频谱利用率都随传输距离的增大而减小. 在同等传输距离且天线数相同的情况下, 在宏小区、微小区场景下 OAM-MIMO 系统的频谱利用率明显高于 MIMO 系统, 而在室内场景, MIMO 系统的频谱利用率则高于 OAM-MIMO 系统. 表明 OAM-MIMO 系统在宏小区、微小区场景下效果更好, MIMO 系统更适合室内场景.

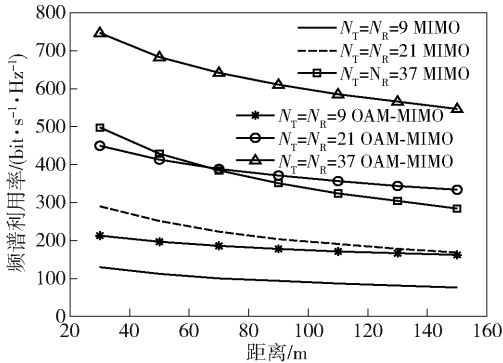


图 11 微小区场景的频谱利用率仿真结果

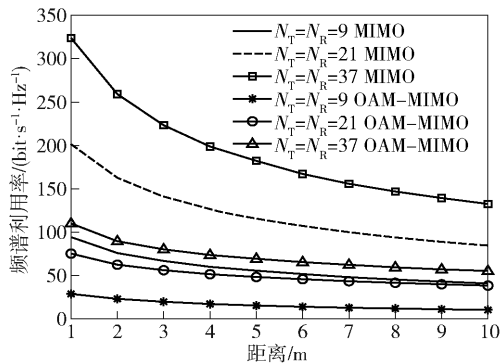


图 12 室内场景的频谱利用率仿真结果

4 结束语

根据 OAM 涡旋电磁波不同模态之间相互正交互不影响特性, 利用其模分复用的特点传输信息, 对 OAM-MIMO 系统进行了容量分析, 考虑了功率对系统信道容量的影响, 简单分析了系统在不同场景下的频谱利用率, 并与传统的 MIMO 系统进行了比较, 研究结果如下:

1) 设计了 OAM-MIMO 通信系统, 并对 OAM-MIMO 系统进行了数学建模, 推导了轨道角动量从生成、调制、传输、接收和解调的整个过程, 实现了系统的收发信息;

2) 在相同条件下, MIMO 系统在室内等角度扩展较大、信道相关性较弱的场景中, 其信道容量比

OAM-MIMO 系统更大; 在相同条件下, OAM-MIMO 系统在宏小区、微小区等角度扩展较小、信道相关性较强、发射功率较小的传输场景中, 其信道容量比 MIMO 系统更大;

3) 考虑到功率对系统信道容量的影响和不同场景下 2 种系统的频谱利用率都可得出相同的结论, OAM-MIMO 系统在宏小区、微小区等场景下的性能更好, 而 MIMO 系统更适合室内等场景.

在今后的 OAM-MIMO 系统发展中, 一方面, 可以考虑在发射机在信道状态信息未知的情况下, 研究信道容量的变化, 进一步探究频谱效率; 另一方面, 在未来的研究中, 可以尝试考虑不同 OAM 模态相对于夹角信道幅度增益 θ 和 ϕ 对信道容量的影响.

参考文献:

- [1] Wikström G, Peisa J, Rugeland P, et al. Challenges and technologies for 6G[C] // 2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT). Oulu: University of Oulu, 2020: 1-5.
- [2] Strinati E C, Barbarossa S, Gonzalez-Jimenez J L, et al. 6G; the next frontier: from holographic messaging to artificial intelligence using subterahertz and visible light communication[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2019, 14(3): 42-50.
- [3] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C, et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. Physical Review A, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [4] Mahmoudi F E, Walker S D. 4-Gbps uncompressed video transmission over a 60-GHz orbital angular momentum wireless channel[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2013, 2(2): 223-226.
- [5] Palacin B, Sharshavina K, Nguyen K, et al. An 8 × 8 Butler matrix for generation of waves carrying orbital angular momentum (OAM)[C] // 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014). Hague: IEEE, 2014: 2814-2818.
- [6] Sasaki H, Lee D, Fukumoto H, et al. Experiment on over-100-Gbps wireless transmission with OAM-MIMO multiplexing system in 28-GHz band[C] // 2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Abu Dhabi: IEEE, 2018: 1-6.
- [7] Saito S, Suganuma H, Ogawa K, et al. Performance analysis of OAM-MIMO using SIC in the presence of misalignment of beam axis[C] // 2019 IEEE International

- Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Shanghai: IEEE, 2019: 1-6.
- [8] Jing Haiyue, Cheng Wenchu, Zhang Wei, et al. OAM based wireless communications with non-Coaxial UCA transceiver [C] // 2019 IEEE 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). Istanbul: IEEE, 2019: 1-6.
- [9] Basar E. Orbital angular momentum with index modulation [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(3): 2029-2037.
- [10] Yuan Yuqing, Zhang Zhaoyang, Cang Ji, et al. Capacity analysis of UCA-based OAM multiplexing communication system [C] // 2015 International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP). Nanjing: IEEE, 2015: 1-5.
- [11] Jiang Xuefeng, Zhao Yufei, Zhang Chao. Capacity evaluation on the long-distance orbital angular momentum non-orthogonal transmission [C] // 2018 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS). Chengdu: IEEE, 2018: 1-4.
-
- (上接第26页)
- [19] 黄韬, 霍如, 刘江, 等. 未来网络发展趋势与展望 [J]. 中国科学: 信息科学, 2019, 49(8): 941-948.
Huang Tao, Huo Ru, Liu Jiang, et al. Development trends and prospects of future networks [J]. Scientia Sinica Informationis, 2019, 49(8): 941-948.
- [20] 运行监测协调局. 2020年上半年通信业主要指标完成情况(二) [EB/OL]. 北京: 中华人民共和国工业和信息化部, 2020 (2020-07-05) [2020-08-16]. https://www.miit.gov.cn/gxsj/tjfx/txy/art/2020/art_fd801837105c4b418a89c99b5ca5e625.html.
- [21] KDDI. Sustainability report [M]. Tokyo: KDDI, 2019: 1-58.
- [22] AT&T. 2019/2020 corporate responsibility summary [M]. San Antonio: AT&T, 2020: 1-40.
- [23] ISO. Sustainable cities and communities - indicators for city services and quality of life [S]. Switzerland: [s. n.], 2018: 3-19.
- [24] ITU-T. Supplement for eco-specifications and rating criteria for mobile phones eco-rating programmes: series L-supplement 32-2016 [S]. Switzerland: [s. n.], 2016: 5-7.
- [25] ITU-T. Electromagnetic field considerations in smart sustainable cities: series K-supplement 4-2018 [S]. Switzerland: [s. n.], 2018: 3-15.
- [26] Saad W, Bennis M, Chen M. A vision of 6G wireless systems: applications, trends, technologies, and open research problems [J]. IEEE Network, 2020, 34(3): 134-142.
- [27] Chen S, Liang Y C, Sun S, et al. Vision, requirements, and technology trend of 6G: how to tackle the challenges of system coverage, capacity, user data-rate and movement speed [J]. IEEE Wireless Communications, 2020, 27(2): 218-228.