

UCCA-OAM 通信系统中的双模块干扰消除方案

李汀* 沈铭宇 张春洁 解培中

(南京邮电大学通信与信息工程学院, 南京, 210003)

摘要: 轨道角动量 (Orbital angular momentum, OAM) 是一种能够提供额外自由度以提高无线通信频谱效率的技术。然而, 将轨道角动量应用于无线通信时, 为了能够利用模式之间正交性, 必须保证发射天线和接收天线的完美对准。本文将均匀圆形阵列天线 (Uniform circular array, UCA) 产生的 OAM 复用与多输入多输出 (Multiple-input multiple-output, MIMO) 技术相结合, 构成均匀同心圆阵列轨道角动量 (Uniform concentric circular array orbital angular momentum, UCCA-OAM) 通信系统。针对 UCA 天线收发端未对齐产生的模式干扰和 MIMO 同心圆阵列之间的阵列干扰问题, 提出了基于递进式分块矩阵逆运算的双模块干扰消除方案。实验结果表明, 本文提出的双模块干扰消除方案, 对模式干扰和阵列干扰都得到了很好的抑制, 提高了 UCCA-OAM 系统的通信性能。

关键字: 轨道角动量; 多输入多输出系统; 模式干扰消除; 阵列干扰消除; 分块矩阵逆运算

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

Dual-Module Interference Cancellation Scheme for UCCA-OAM Communication System

LI Ting, SHEN Mingyu, ZHANG Chunjie, XIE Peizhong

(School of Communication and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: Orbital angular momentum (OAM) is a technique that provides an additional degree of freedom to enhance the spectral efficiency of wireless communications. However, when applying OAM to wireless communication, the orthogonality between modes can only be utilized if the transmitting and receiving antennas are perfectly aligned. This paper combines the OAM multiplexing generated by uniform circular array (UCA) antennas with multiple-input multiple-output (MIMO) technology to form a uniform concentric circular array orbital angular momentum (UCCA-OAM) communication system. To address the modal interference caused by misalignment of the transmitting and receiving UCA antennas and the array interference between concentric circular arrays in the MIMO system, a dual-module interference cancellation scheme based on progressive block matrix inversion is proposed. Experimental results demonstrate that the proposed dual-module interference cancellation scheme effectively suppresses both modal and array interference, thereby improving the communication performance of the UCCA-OAM system.

Key words: Orbital angular momentum; Multiple input and multiple output system; Modal interference cancellation; Array interference cancellation; block matrix inversion

基金项目: 国家自然科学基金 (62271265)。

收稿日期: ; 修订日期:

引 言

无线数据流量的爆炸性增长不断要求应用于各种场景的无线通信传输技术具有更高的容量和更准确的信息传输以及更高的传输速率。到目前为止，第五代移动通信技术（5th generation mobile communication technology, 5G）已投入使用并蓬勃发展，而第六代移动通信技术（6th generation mobile communication technology, 6G）的未来发展和技术方向也备受关注[1-3]。轨道角动量（Orbital angular momentum, OAM）是电磁波的一种物理性质[4]，不同的模态之间具有严格的正交性，正是这一特性使得无线通信系统有望在频域、时域等之外提供额外的自由度——OAM 模态域来提高频谱效率[5-6]，从而极大地提升无线通信系统的容量[7-9]，这使得轨道角动量在无线通信领域的应用成为未来 6G 无线通信技术的一个非常具有潜力的研究方向。

通信领域对于轨道角动量的应用最初集中于光通信领域。1992 年 Allen 等人发现了具有 OAM 模态的涡旋电磁波[10]，与通信领域中常见的平面电磁波或球面电磁波不同的是，该涡旋电磁波具有螺旋相位的波前相位，并且不同整数模态之间具有严格的正交性。基于此，大量研究开始着重于在同一频率的信道中复用一组相互正交的 OAM 模态来提高信息传输的速率以及信道容量[11]。OAM 波束的生成具有多种方法，常用均匀圆形天线阵列（Uniform circular array, UCA）来生成。2009 年，文献[5]验证了 UCA 可以用来产生携带轨道角动量的波束，但不同模态之间的正交性依赖于收发端 UCA 天线的严格对齐。为了研究导致性能下降的因素，文献[12]对收发端 UCA 非平行和离轴两种非理想情况建立信道模型，并对 OAM 系统在不同斜角和轴偏差下的容量进行了分析和比较，发现 OAM 传输对发射机和接收机之间的失准非常敏感，基于此，该团队持续开展相关研究。文献[13]定量地研究了收发端 UCA 天线未对齐的情况下对射频 OAM 信道容量的影响，针对这种情况建立信道模型并提出了发射/接收波束控制方法，以避免非理想情况下的性能恶化，这为射频 OAM 在实践中的应用铺平了道路。文献[14]进一步研究，提出了一种 UCA 的多载波多模态 OAM 通信的总方案，针对所考虑的基于 UCA 的视距轨道角动量（Line-of-sight orbital angular momentum, LoS-OAM）通信系统提出一种到达角（Angle of arrival, AoA）估计方法以及一种 OAM 接收方案，包括利用估计的 AoA 进行波束控制和利用估计的距离进行幅度检测，所提出的 OAM 接收方案可以消除实际 OAM 信道因 UCA 未对准而产生的模态间干扰的影响，并接近理想对准 OAM 信道。类似地，文献[15]对更加符合实际传输场景的毫米波非理想 OAM 通信系统性能进行研究，评估了多径效应和非对齐效应带来的性能损失并提出一种平均相位补偿与迭代功率分配的联合优化方案来消除非对齐和多径效应造成的相位偏差，提升系统信道容量。随着技术的进步和发展，关于如何消除收发端 UCA 未对准情况下产生模态间干扰的问题研究又得到了进一步的发展。文献[16]中针对收发端 UCA 未对准模型利用一种轻量级神经网络建立训练模型，设计了一种 OAM 相位信息和倾斜角度的检测方案，倾斜度的准确

性检测模型良好，精度达到 0.91。文献[17]和文献[18]基于大角度未对准太赫兹 OAM 系统中提出一种新的基于微机电系统的混合机械电子波束控制方案，从而实现发射 OAM 波束和接收 OAM 波束之间的精确对准，有效避免了系统性能退化。至此，收发端天线阵列均为单环 UCA 的情况下，针对 UCA 不对齐而引起的模态间正交性被破坏的问题的解决方案已较为完备，例如波束控制、相位补偿以及混合机械电子波束控制方案等。

为了提高 OAM 复用的容量，将 OAM 与多天线技术相结合是一种可行的思路。文献[19]研究了 OAM 复用的通信系统与多输入多输出 (Multiple-input multiple-output, MIMO) 系统在不同设置下的容量对比。文献[20]演示了在 1.8 米的短链路距离上使用 OAM 复用与传统空间复用相结合的 16Gbit/s 毫米波链路，验证了 OAM 复用和传统的空间复用可以同时使用，并且二者的结合可能会增强系统容量。文献[21]验证了具有 M 个接收天线的理想视距轨道角动量-多输入多输出 (Line-of-sight orbital angular momentum-multiple input multiple output, LOS OAM-MIMO) 复用系统中，如果任意两个发射模态之间的绝对差等于 0，则可获得正交子信道，此外，如果它们的绝对差是 M 的倍数，则这些模式是等效的，还表明作为多信道系统轨道角动量-多输入多输出 (Orbital angular momentum-multiple input multiple output, OAM-MIMO) 复用系统符合与传统 MIMO 复用系统相关的理论。文献**错误!未找到引用源**。提出的 OAM-MIMO 复用传输系统有效地结合了 OAM 复用的优点和 MIMO 的数字信号处理的优点。

2024 年，文献[22]分析了基于 UCA 的 OAM-MIMO 无线传输系统的物理层模型，借助与各发射天线关联的参考坐标系及与各 OAM 载波相关的累积相位构建相应的信道模型。同年，文献[24]研究了 Talbot 效应生成 OAM 波束，该效应使得收发器天线不必完全对准，可以减轻 OAM 波束的空心发散，并提出了使用 UCA 的基于 Talbot 效应的分形 OAM 生成和检测方案，显著提高了未对准 OAM 传输的信道容量和误码率 (Bit Error Ratio, BER) 性能。

对于 UCA 天线阵列，如果收发端的对准不准确，会导致模态干扰，模态干扰是指当发射端和接收端之间的对准偏移导致辐射模式的不匹配，从而影响信号的传输和接收质量。这种干扰可能会导致信号功率下降、接收信噪比降低和误码率增加。对于 MIMO 同心圆阵列，阵列间干扰也是一个常见的问题。当同心圆阵列之间的距离过近或阵列的指向性不当时，阵列间会发生相互干扰，这种干扰称为阵列干扰，阵列干扰会降低 MIMO 系统的容量，增加误码率，甚至导致系统不可靠。解决该问题有多种方案，包括使用可调节天线减小模态干扰，改善信号的传输和接收性能；对于 MIMO 系统可以利用信道估计和预编码技术来抵消阵列干扰。通过采取上述方法，可以降低因收发端对准不准确或 MIMO 同心圆阵列间干扰而引起的模态干扰和阵列干扰，从而提高无线通信系统的性能。

为了进一步提高 OAM 通信系统的性能，本文提出了一种未对齐情况下的均匀同心圆阵列轨道角动量 (Uniform concentric circular array orbital angular momentum, UCCA-OAM) 复用传输系统，该系统使用多个同心圆 UCA 作为发射端和接收端，同时利用 OAM 复用的优

势，通过离散傅里叶变换处理实现信号复用。在基于未对准的 UCCA-OAM 通信系统中，传输 OAM 波束时不仅存在单环 UCA 的模态间干扰，还存在多环 UCA 阵列间干扰。基于此，本文提出了一种双模块干扰消除方案以近似消除模态干扰和阵列干扰。首先通过基于相位补偿的波束控制方案近似消除由于单环 UCA 未对准导致的模态干扰，然后根据四分块矩阵逆运算[25]，提出一种递进式分块矩阵逆运算对多环 UCA 导致的阵列干扰做消除处理，从而完成基于递进式分块矩阵逆运算的双模块干扰消除方案。

1 UCCA-OAM 通信系统

OAM 波的传输要求收发端天线阵列完全对齐，但是这种理想情况在实际中难以实现。基于此，本文考虑非视距（Non-Line-of-Sight, NLoS）场景下由同心圆 UCA 产生 OAM 波束的无线通信系统。为了简便起见，先以发射端和接收端均为单环 UCA 天线阵列为例介绍信道模型，其中 OAM 波由发射端的 N 个天线阵列元件组成的 UCA 阵列生成，经过自由空间信道后由接收端的 N 个天线阵列元件组成的 UCA 阵列接收。非理想情况下发射端 UCA 阵列和接收端 UCA 阵列的几何模型如图 1 所示，其中偏离的角度包括绕 X 轴旋转形成的仰角 α 和绕 Z 轴旋转导致的偏离方位角 φ 。

1.1 空间域信道模型

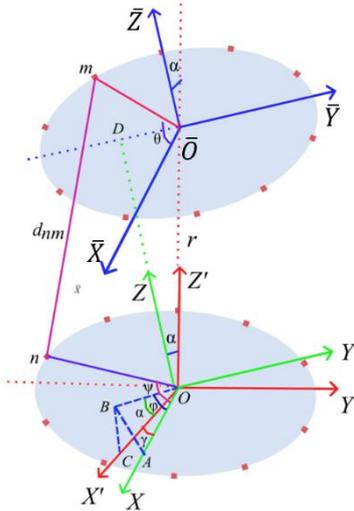


图 1 非理想情况下发射端 UCA 和接收端 UCA 几何模型图

Fig.1 Geometrical Model of Transmitting UCA and Receiving UCA under Non-Ideal Conditions

在自由空间传输信道模型中，由于信号通过电磁波传输，所以会导致发射信号的衰减和相位旋转。在自由空间通信系统中，一对发射和接收天线元件之间的传递函数可以表示为公

式(1)，其值取决于发射和接收天线上的天线阵列元件之间的距离 d_{mn} ：

$$h(d_{mn}) = \beta \frac{\lambda}{4\pi d_{mn}} \exp\left(-j \frac{2\pi d_{mn}}{\lambda}\right) \quad (1)$$

其中 d_{mn} 为发射端 UCA 上第 n 个天线阵列元件到接收端 UCA 上第 m 个天线阵列元件的距离， λ 为波长， β 表示与天线元件及其方向图有关的所有常数， $\frac{\lambda}{4\pi d_{mn}}$ 表示振幅衰落，复指数项 $j \frac{2\pi d_{mn}}{\lambda}$ 是由于传播距离引起的相位差。

非理想情况下发射端 UCA 阵列和接收端 UCA 阵列的几何模型如图 1 所示， $Z'-X'OY'$ 为发射端坐标系， $\bar{Z}-\bar{X}\bar{O}\bar{Y}$ 为接收端坐标系。其中，发射端坐标系 $Z'-X'OY'$ 是以发射 UCA 平面为 $X'OY'$ 平面，且以通过发射 UCA 原点 O 并垂直于发射 UCA 平面的直线作为 Z 轴建立的。而接收端坐标系 $\bar{Z}-\bar{X}\bar{O}\bar{Y}$ 则是以接收端 UCA 平面为 $\bar{X}\bar{O}\bar{Y}$ 平面，且以通过接收 UCA 原点并垂直于接收 UCA 平面的直线作为 \bar{Z} 轴建立的。非平行未对准情况下的发射端 UCA 阵列和接收端 UCA 阵列可看作是中心原点在一条直线上的两个平面，发射端 UCA 中心原点到接收端 UCA 中心原点之间的距离记作 r 。因此，接收端 UCA 中心原点在发射端坐标系 $Z'-X'OY'$ 中可表示为 $\bar{O}(r, 0, 0)$ 。 D 点为 O 点在 $\bar{X}\bar{O}\bar{Y}$ 平面上的投影，在 $Z'-X'OY'$ 坐标系中， OD 与 Z 轴之间的角度称为仰角，设为 α 。 D 点在 $X'OY'$ 平面上的投影与 X' 轴的夹角称为方位角，设为 φ 。故 D 点在 $Z'-X'OY'$ 坐标系中的坐标表示为 $D(r, \varphi, \alpha)$ 。定义仰角 α 和偏离方位角 φ 为 OAM 波束的 AoA。坐标轴 $Z-XOY$ 为接收端坐标轴 $\bar{Z}-\bar{X}\bar{O}\bar{Y}$ 沿着 $O\bar{O}$ 平移到发射端坐标轴直至原点 \bar{O} 与原点 O 重合而成的，如图 1 所示。由于 \bar{Z} 轴与 Z' 轴之间的夹角为 α ，故 Z 轴与 Z' 轴之间的夹角也为 α 。设 C 点位于 X' 轴上任意一点， B 点为 C 点在 XOY 平面上的投影， A 点是 B 点在 X 轴上的投影。由几何位置关系可知， $\angle BOC = \alpha$ 。由于 OB 平行于 $\bar{O}D$ ， X 轴与 \bar{X} 轴平行，故 $\angle AOB = \varphi$ 。 X 轴与 X' 轴之间的夹角记作 γ ，由几何关系可得：

$$\gamma = \angle AOC = \arccos\left(\frac{AO \cdot BO}{BO \cdot OC}\right) = \arccos(\cos \angle AOB \cos \angle BOC) = \arccos(\cos \alpha \cos \varphi) \quad (2)$$

设发射端 UCA 天线阵列和接收端 UCA 天线阵列的阵列元件个数均为 N 个，根据图 1 的几何关系计算发射端 UCA 中第 $n(1 \leq n \leq N)$ 个天线阵列元件到接收端 UCA 第 $m(1 \leq m \leq N)$ 个天线阵列元件之间的距离 d_{mn} ：

$$d_{mn} = [R_i^2 + R_r^2 + r^2 - 2rR_r \cos \theta \cos \varphi \cos \alpha - 2R_i R_r (\cos \psi \cos \theta \cos \gamma + \sin \psi \sin \theta \cos \varphi) - 2R_i R_r (\sin \psi \cos \theta \sin \varphi - \cos \psi \sin \theta \sin \varphi \cos \alpha) + 2rR_r \sin \theta \sin \varphi \sin \alpha]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

其中, R_t 为发射端 UCA 天线阵列的半径, R_r 为接收端 UCA 天线阵列的半径, r 为坐标系 $Z'-X'OY'$ 原点与坐标系 $\bar{Z}-\bar{X}\bar{O}\bar{Y}$ 原点之间的距离, $\psi = \frac{2\pi(n-1)}{N}$ 为发射端方位角, $\theta = \frac{2\pi(m-1)}{N}$ 为接收端方位角, 此时分别假设两个 UCA 天线阵列中的第一个天线阵列元件对应的初始角度均为 0。

综上, 根据公式(1)和公式(3), 基于 UCA 的自由空间 OAM 信道矩阵可表示为 $\mathbf{H} = [h(d_{mn})]_{N \times N}$, 当仰角 α 和偏离方位角 φ 均为零时, 即 $\alpha = 0$ 、 $\varphi = 0$ 时, 信道矩阵 \mathbf{H} 为循环矩阵。根据循环矩阵性质, \mathbf{H} 可以经过离散傅里叶变换分解为 $\mathbf{H} = \mathbf{F}_N^H \mathbf{\Lambda} \mathbf{F}_N$, $\mathbf{\Lambda}$ 是一个对角线元素为 \mathbf{H} 的特征值的对角线矩阵, \mathbf{F}_N 为离散傅里叶变换矩阵, \mathbf{F}_N^H 为离散傅里叶变换的逆变换矩阵。

1.2 OAM 模态域系统模型

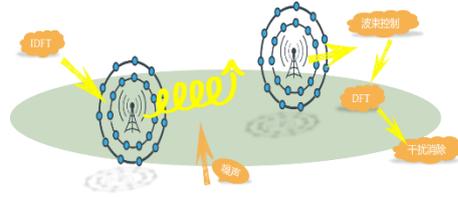


图 2 双模块干扰处理接收系统模型图

Fig.2 System Model of Dual-Module Interference Processing in Reception

由于 UCA 天线阵列生成的 OAM 波束是通过向其天线元件馈送相同的输入信号而产生的, 即从一个阵列元件到另一个阵列元件具有的连续相移, 因此, 在遍历完 UCA 天线阵列的一整圈之后, 相位的增量为 $2\pi l$, 其中 l 表示 OAM 模态数[10]的整数, 其中 l 的取值范围为: $\left[-\left\lfloor \frac{N-1}{2} \right\rfloor, \left\lfloor \frac{N-1}{2} \right\rfloor\right]$ 。

本文考虑非平行未对准情况下, 收发端均为具有多个同心圆 UCA 组成的天线阵列来生成 OAM 波束和接收 OAM 波束, 如图 2 所示, 发射端和接收端为 k 个 UCA 组成的同心圆天线阵列, 每个 UCA 上有 N 个天线阵列元件。

当收发端均为单环 UCA 时, 在自由空间信道 \mathbf{H} 中传输 N 个模态复用的 OAM 波束时, 接收到的信号向量 \mathbf{y} 采用公式(4)的形式表示:

$$\mathbf{y} = \mathbf{F}_N \left(\mathbf{H} \mathbf{F}_N^H \mathbf{x} + \mathbf{n} \right) \quad (4)$$

其中, $\mathbf{x} = [x(1), x(2), \dots, x(N)]^T$ 为发送信号, $\mathbf{y} = [y(1), y(2), \dots, y(N)]^T$ 为接收信号。其中, $x(l)$ 和 $y(l)$ 分别表示 l 模态 OAM 波束的发送信号和接收信号, \mathbf{H} 表示由公式(1)组成的自由

空间信道矩阵, 即 $\mathbf{H} = [h(d_{mm})]_{N \times N}$, \mathbf{F}_N 为离散傅里叶变换矩阵, \mathbf{F}_N^H 为离散傅里叶逆变换矩阵, \mathbf{n} 是具有零均值和协方差矩阵 $\sigma_n^2 \mathbf{I}_N$ 的复高斯噪声向量。

当发射端 UCA 天线阵列和接收端 UCA 天线阵列完全对准时, 根据循环矩阵的性质, 公式(4)可以简化为:

$$\mathbf{y} = \Lambda \mathbf{x} + \mathbf{F}_N \mathbf{n} \quad (5)$$

此时, 接收端 UCA 接收到的信号是相互正交的信号, 信号之间不存在干扰。然而, OAM 波束的正交性仅仅成立于收发端 UCA 完全对齐的情况下, 一旦收发端 UCA 有偏离角, OAM 波束之间的正交性会发生急剧恶化。因此保证收发端 UCA 的严格对齐成为 OAM 无线通信的重中之重。但实际传输过程中收发天线之间是难以达到完全对齐的理想状态的, 收发端 UCA 之间有非常小的偏离角也会导致 OAM 通信性能的急剧恶化, 主要原因是偏离角导致信道矩阵 \mathbf{H} 不再是循环矩阵, 进而导致不能通过两次傅里叶变换分解为一个对角线矩阵。

当收发端均为具有 K 个 UCA 组成的同心圆天线阵列时, 如图 2 所示, 每个 UCA 上有 N 个天线阵列元件, 此时接收端第 j 个 UCA 上接收到的信号向量 \mathbf{y}_j 表示为公式(6):

$$\mathbf{y}_j = \mathbf{F}_N \left(\mathbf{H}_{i,j} \mathbf{F}_N^H \mathbf{x}_i + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^K \mathbf{H}_{k,j} \mathbf{F}_N^H \mathbf{x}_k + \mathbf{n} \right) \quad (6)$$

其中, $\mathbf{H}_{i,j} \mathbf{F}_N^H \mathbf{x}_i$ 表示发射端第 i 个 UCA 到接收端第 j 个 UCA 的信号向量, $\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^K \mathbf{H}_{k,j} \mathbf{F}_N^H \mathbf{x}_k$ 表示发射端多环 UCA 导致的阵列干扰向量, $\mathbf{H}_{i,j}$ 表示发射端第 i 个 UCA 到接收端第 j 个 UCA 的自由空间信道矩阵, \mathbf{n} 是具有零均值和协方差矩阵 $\sigma_n^2 \mathbf{I}_N$ 的复高斯噪声向量。

2 双模块干扰消除方案

考虑到本文所提出的未对齐情况下的 UCCA-OAM 传输系统中不仅会存在单环 UCA 未对齐导致的模态干扰, 还会存在因多环同心圆 UCA 导致的阵列干扰, 因此本文设计了一种双模块干扰消除方案来处理模态干扰和阵列干扰, 以下将对本文所提出的双模块干扰消除方案做介绍。

2.1 单环 UCA 模态干扰处理方案

由同心圆 UCA 的收发关系可知, 同心圆 UCA 在做信道估计时, 对偏离角等关键参数的估计与单 UCA 时一样。为了简便起见, 做同心圆 UCA 的信道估计时, 可以通过对单 UCA 做信道估计来代替, 几何模型图如图 1 所示。由于信道矩阵 \mathbf{H} 主要取决于发射天线阵列元件与接收天线阵列元件之间的距离 d_{mm} , 由公式(3)可知, d_{mm} 与仰角 α 和偏离方位角 φ 以及

两个 UCA 原点之间的距离 r 有关。因此针对这三个参数的估计方案参考文献[14]中的 2D-ESPRIT 算法。下面简述该算法：首先对接收端接收到的信号做近似处理，如公式(7)所示，然后根据矩阵的旋转不变性分别使用两次 ESPRIT 算法对距离 r 和角度 γ 做参数估计，其次根据贝塞尔函数特性估计出角度 α ，最后利用公式(2)中 α 、 γ 与 φ 的关系估计角度 φ 。

$$\begin{aligned}
y(l) &= \sum_{m=1}^N h_m f^H(l) x(l) + z(l) \\
&= \frac{\beta}{2k} \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \frac{e^{ik|d_{mn}|}}{|d_{mn}|} e^{il\varphi_n} x(l) + z(l) \\
&\approx \frac{\beta}{2k} \sum_{m=1}^N e^{ik \cdot r_m} \left[\frac{e^{ikr}}{r} \sum_{n=1}^N e^{-i(k \cdot r_n - l\varphi_n)} \right] x(l) + z(l) \\
&\approx \frac{\beta \lambda N^{\frac{3}{2}}}{4\pi} \frac{e^{ikr} e^{il\gamma}}{r} i^l J_l(kR_t \sin \alpha) J_0(kR_r \sin \alpha) x(l) + z(l)
\end{aligned} \tag{7}$$

其中 $y(l)$ 为接收端 UCA 天线阵列接收到的 l 模态的接收信号， $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 。如文献[14]所提出的信道估计方案，首先对接收信号做近似处理转换为仅与距离 r 以及角度 γ 有关的公式(7)，然后依据矩阵的旋转不变性使用 2D-ESPRIT 算法以及根据贝塞尔函数的特性估计出所需的参数：距离 r 、角度 α 和角度 γ ，最后根据公式(2)中 3 个角度之间的关系求得角度 φ ，从而完成 AoA 估计。

估计出距离 r 以及角度 α 和角度 φ 之后，根据相位补偿方案对非平行未对准的 UCA 产生的 OAM 波束做波束控制。当发射端 UCA 与接收端 UCA 完全对准时，发射端第 n 个天线阵列元件到接收端第 m 个天线阵列元件之间的直线距离 d_{LoS} 可以表示为：

$$d_{LoS,mn} = \sqrt{R_t^2 + R_r^2 + r^2 - 2R_t R_r (\cos \psi \cos \theta + \sin \psi \sin \theta)} \tag{8}$$

由于当 $a \gg b$ 时，有 $\sqrt{a^2 - 2b} \approx a - \frac{b}{a}$ 。代入公式(8)，当 r 远大于 R_t 和 R_r 时，直线距离 d_{LoS} 可近似化做公式(9)：

$$d_{LoS,mn} \approx r - \frac{R_t R_r}{r} (\cos \psi \cos \theta + \sin \psi \sin \theta) \tag{9}$$

同理对公式(3)做类似近似处理得：

$$\begin{aligned}
d_{mn} &\approx r - \frac{R_t R_r}{r} (\cos \psi \cos \theta \cos \gamma + \sin \psi \sin \theta \cos \varphi + \sin \psi \cos \theta \sin \varphi \\
&\quad - \cos \psi \sin \theta \sin \varphi \cos \alpha) - R_r (\cos \theta \cos \varphi \sin \alpha - \sin \theta \sin \varphi \sin \alpha)
\end{aligned} \tag{10}$$

基于相位补偿算法以及结合 $r \gg R_t$ 条件对 $d_{LoS,mn}$ 以及 d_{mn} 做差值，可得波束控制矩阵如公式(11)所示：

$$\mathbf{a} = [1, e^{-jW_2}, e^{-jW_3}, \dots, e^{-jW_N}] \tag{11}$$

$$W_n = \frac{2\pi R_r}{\lambda} (\sin \theta \sin \varphi \sin \alpha - \cos \theta \cos \varphi \sin \alpha) \tag{12}$$

经过波束控制矩阵处理后的单圆环 UCA 产生的 OAM 信道矩阵转换为公式(13), 此时的 OAM 信道矩阵已处理为近似收发端天线严格对齐时的对角阵, 其中 \square 表示哈达玛乘积, $()^H$ 表示矩阵转置。

$$\mathbf{H}'_{OAM} = (\mathbf{F}_N \square \mathbf{a}) \mathbf{H} \mathbf{F}_N^H \quad (13)$$

将收发端均为非平行未对准时的单圆环 UCA 产生的 OAM 信道的波束控制方案推广至收发端均为 N 个同心圆 UCA 组成的天线阵列, 其产生的 OAM 信道经过波束控制算法处理后得到的 UCCA-OAM 信道矩阵如公式(14)所示, 其中 \square 表示哈达玛乘积。

$$\mathbf{H}_{UCCA-OAM} = \left\{ \left(\mathbf{F}_N \square \begin{bmatrix} a^{1,1} & a^{1,2} & a^{1,3} & \dots & \dots & a^{1,N} \\ a^{2,1} & a^{2,2} & a^{2,3} & \dots & \dots & a^{2,N} \\ a^{3,1} & a^{3,2} & a^{3,3} & \dots & \dots & a^{3,N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a^{N,1} & a^{N,2} & a^{N,3} & \dots & \dots & a^{N,N} \end{bmatrix} \right) \square \left[\begin{array}{cccccc} \mathbf{H}^{1,1} & \mathbf{H}^{1,2} & \mathbf{H}^{1,3} & \dots & \dots & \mathbf{H}^{1,N} \\ \mathbf{H}^{2,1} & \mathbf{H}^{2,2} & \mathbf{H}^{2,3} & \dots & \dots & \mathbf{H}^{2,N} \\ \mathbf{H}^{3,1} & \mathbf{H}^{3,2} & \mathbf{H}^{3,3} & \dots & \dots & \mathbf{H}^{3,N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{H}^{N,1} & \mathbf{H}^{N,2} & \mathbf{H}^{N,3} & \dots & \dots & \mathbf{H}^{N,N} \end{array} \right] \mathbf{F}_N^H \right\} \\ = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{UCCA,OAM}^{1,1} & \mathbf{H}_{UCCA,OAM}^{1,2} & \dots & \dots & \mathbf{H}_{UCCA,OAM}^{1,N} \\ \mathbf{H}_{UCCA,OAM}^{2,1} & \mathbf{H}_{UCCA,OAM}^{2,2} & \dots & \dots & \mathbf{H}_{UCCA,OAM}^{2,N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{H}_{UCCA,OAM}^{N,1} & \mathbf{H}_{UCCA,OAM}^{N,2} & \dots & \dots & \mathbf{H}_{UCCA,OAM}^{N,N} \end{bmatrix} \quad (14)$$

此时, 信道矩阵 $\mathbf{H}_{UCCA-OAM}$ 中的每个元素 $\mathbf{H}_{UCCA,OAM}^{i,j}$ 均为对角矩阵, 因此得到的 UCCA-OAM 信道矩阵是一个存在主对角线和多条副对角线的矩阵, 而非对角阵, 也就是说这是一个具有多环 UCA 导致的阵列间干扰的信道矩阵。

2.2 同心圆 UCA 阵列干扰消除方案

本文将在接收端接收前结合分块矩阵运算对公式(14)表示的 UCCA-OAM 信道做处理, 在接收端对接收信号 \mathbf{y} 哈达玛乘以一个 \mathbf{M} 矩阵, 从而消除多环 UCA 导致的阵列干扰。对 UCCA-OAM 信道的处理操作如公式(15)。

$$\begin{aligned} \mathbf{y}' &= \mathbf{M} \square \mathbf{y} \\ &= \mathbf{M} \square (\mathbf{F}_N \square \mathbf{A} \mathbf{H} \mathbf{F}_N^H \mathbf{x} + \mathbf{F}_N \square \mathbf{a} \mathbf{n}) \\ &= \mathbf{M} \square \mathbf{H}_{UCCA-OAM} \mathbf{x} + \mathbf{n}' \end{aligned} \quad (15)$$

其中,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a^{1,1} & a^{1,2} & a^{1,3} & \dots & \dots & a^{1,N} \\ a^{2,1} & a^{2,2} & a^{2,3} & \dots & \dots & a^{2,N} \\ a^{3,1} & a^{3,2} & a^{3,3} & \dots & \dots & a^{3,N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a^{N,1} & a^{N,2} & a^{N,3} & \dots & \dots & a^{N,N} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}^{1,1} & \mathbf{H}^{1,2} & \mathbf{H}^{1,3} & \dots & \dots & \mathbf{H}^{1,N} \\ \mathbf{H}^{2,1} & \mathbf{H}^{2,2} & \mathbf{H}^{2,3} & \dots & \dots & \mathbf{H}^{2,N} \\ \mathbf{H}^{3,1} & \mathbf{H}^{3,2} & \mathbf{H}^{3,3} & \dots & \dots & \mathbf{H}^{3,N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{H}^{N,1} & \mathbf{H}^{N,2} & \mathbf{H}^{N,3} & \dots & \dots & \mathbf{H}^{N,N} \end{bmatrix},$$

矩阵 \mathbf{M} 为本文提出的同心圆 UCA 间干扰消除方案的处理矩阵，接下来将对 \mathbf{M} 矩阵的推导做介绍。

由于得到的 UCCA-OAM 信道矩阵是一个存在 UCA 间阵列干扰的信道矩阵，即存在一条主对角线和多条副对角线的矩阵，而非对角阵，本文提出一种结合递进式分块矩阵逆运算的阵列干扰消除方案来将具有阵列干扰的 UCCA-OAM 信道处理为近似无模态间干扰的对角阵。下面以收发端天线阵列均为 4 个同心圆 UCA 为例，假设每个 UCA 上均具有 3 个天线阵列元件，结合递进式分块矩阵逆运算方案，将 $\mathbf{H}_{UCCA-OAM}$ 矩阵做 4×4 分块处理为 16 个 3×3 的小矩阵块，如公式(16)：

$$\mathbf{H}_{UCCA-OAM} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{1,1}^{1,1} \\ h_{2,2}^{1,1} \\ h_{3,3}^{1,1} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} h_{1,1}^{1,2} \\ h_{2,2}^{1,2} \\ h_{3,3}^{1,2} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} h_{1,1}^{1,3} \\ h_{2,2}^{1,3} \\ h_{3,3}^{1,3} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} h_{1,1}^{1,4} \\ h_{2,2}^{1,4} \\ h_{3,3}^{1,4} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} h_{1,1}^{2,1} \\ h_{2,2}^{2,1} \\ h_{3,3}^{2,1} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} h_{1,1}^{2,2} \\ h_{2,2}^{2,2} \\ h_{3,3}^{2,2} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} h_{1,1}^{2,3} \\ h_{2,2}^{2,3} \\ h_{3,3}^{2,3} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} h_{1,1}^{2,4} \\ h_{2,2}^{2,4} \\ h_{3,3}^{2,4} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} h_{1,1}^{3,1} \\ h_{2,2}^{3,1} \\ h_{3,3}^{3,1} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} h_{1,1}^{3,2} \\ h_{2,2}^{3,2} \\ h_{3,3}^{3,2} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} h_{1,1}^{3,3} \\ h_{2,2}^{3,3} \\ h_{3,3}^{3,3} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} h_{1,1}^{3,4} \\ h_{2,2}^{3,4} \\ h_{3,3}^{3,4} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} h_{1,1}^{4,1} \\ h_{2,2}^{4,1} \\ h_{3,3}^{4,1} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} h_{1,1}^{4,2} \\ h_{2,2}^{4,2} \\ h_{3,3}^{4,2} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} h_{1,1}^{4,3} \\ h_{2,2}^{4,3} \\ h_{3,3}^{4,3} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} h_{1,1}^{4,4} \\ h_{2,2}^{4,4} \\ h_{3,3}^{4,4} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (16)$$

根据四分块矩阵求逆公式，若矩阵 \mathbf{A} 为 $m \times m$ 可逆矩阵，矩阵 \mathbf{B} 为 $m \times n$ 矩阵，矩阵 \mathbf{C} 为 $n \times m$ 矩阵，矩阵 \mathbf{D} 为 $n \times n$ 矩阵，且 $\mathbf{D} - \mathbf{C}\mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}$ 为 $n \times n$ 可逆矩阵，则有：

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^{-1} + \mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}(\mathbf{D} - \mathbf{C}\mathbf{A}^{-1}\mathbf{B})^{-1}\mathbf{C}\mathbf{A}^{-1} & -\mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}(\mathbf{D} - \mathbf{C}\mathbf{A}^{-1}\mathbf{B})^{-1} \\ -(\mathbf{D} - \mathbf{C}\mathbf{A}^{-1}\mathbf{B})^{-1}\mathbf{C}\mathbf{A}^{-1} & (\mathbf{D} - \mathbf{C}\mathbf{A}^{-1}\mathbf{B})^{-1} \end{bmatrix} \quad (17)$$

以下将对公式(16)表示的 $\mathbf{H}_{UCCA-OAM}$ 信道做处理。首先将 $\mathbf{H}_{UCCA-OAM}$ 矩阵分解为四分块，如公式(18)所示。其中 \mathbf{A} 矩阵为左上角 3×3 的可逆矩阵， \mathbf{B} 矩阵为右上角 3×1 的矩阵， \mathbf{C} 矩阵为左下角 1×3 的矩阵， \mathbf{D} 矩阵为右下角 1×1 的矩阵，经计算验证 $\mathbf{D} - \mathbf{C}\mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}$ 为 1×1 的可逆

矩阵，条件符合公式(17)需要满足的条件。

$$\mathbf{H}_{UCCA-OAM} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{1,1}^{1,1} \\ h_{2,2}^{1,1} \\ h_{3,3}^{1,1} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} h_{1,1}^{1,2} \\ h_{2,2}^{1,2} \\ h_{3,3}^{1,2} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} h_{1,1}^{1,3} \\ h_{2,2}^{1,3} \\ h_{3,3}^{1,3} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} h_{1,1}^{1,4} \\ h_{2,2}^{1,4} \\ h_{3,3}^{1,4} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} h_{1,1}^{2,1} \\ h_{2,2}^{2,1} \\ h_{3,3}^{2,1} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} h_{1,1}^{2,2} \\ h_{2,2}^{2,2} \\ h_{3,3}^{2,2} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} h_{1,1}^{2,3} \\ h_{2,2}^{2,3} \\ h_{3,3}^{2,3} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} h_{1,1}^{2,4} \\ h_{2,2}^{2,4} \\ h_{3,3}^{2,4} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} h_{1,1}^{3,1} \\ h_{2,2}^{3,1} \\ h_{3,3}^{3,1} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} h_{1,1}^{3,2} \\ h_{2,2}^{3,2} \\ h_{3,3}^{3,2} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} h_{1,1}^{3,3} \\ h_{2,2}^{3,3} \\ h_{3,3}^{3,3} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} h_{1,1}^{3,4} \\ h_{2,2}^{3,4} \\ h_{3,3}^{3,4} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} h_{1,1}^{4,1} \\ h_{2,2}^{4,1} \\ h_{3,3}^{4,1} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} h_{1,1}^{4,2} \\ h_{2,2}^{4,2} \\ h_{3,3}^{4,2} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} h_{1,1}^{4,3} \\ h_{2,2}^{4,3} \\ h_{3,3}^{4,3} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} h_{1,1}^{4,4} \\ h_{2,2}^{4,4} \\ h_{3,3}^{4,4} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (18)$$

根据公式(17)对 $\mathbf{H}_{UCCA-OAM}$ 矩阵求逆得：

$$\mathbf{H}_{UCCA-OAM}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^{-1} + \mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}(\mathbf{D} - \mathbf{C}\mathbf{A}^{-1}\mathbf{B})^{-1}\mathbf{C}\mathbf{A}^{-1} & -\mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}(\mathbf{D} - \mathbf{C}\mathbf{A}^{-1}\mathbf{B})^{-1} \\ -(\mathbf{D} - \mathbf{C}\mathbf{A}^{-1}\mathbf{B})^{-1}\mathbf{C}\mathbf{A}^{-1} & (\mathbf{D} - \mathbf{C}\mathbf{A}^{-1}\mathbf{B})^{-1} \end{bmatrix} \quad (19)$$

观察公式(19)可知，要求得 $\mathbf{H}_{UCCA-OAM}^{-1}$ 只要求出 \mathbf{A}^{-1} 、 $(\mathbf{D} - \mathbf{C}\mathbf{A}^{-1}\mathbf{B})^{-1}$ 即可。首先对矩阵 \mathbf{A} 做求逆处理，根据公式(17)，将矩阵 \mathbf{A} 分解为四分块矩阵，如公式(20)所示。此时设矩阵 \mathbf{A}_1 为左上角 2×2 的可逆矩阵， \mathbf{B}_1 为右上角 2×1 矩阵， \mathbf{C}_1 为左下角 1×2 的矩阵， \mathbf{D}_1 为右下角 1×1 的矩阵，且经过计算验证，矩阵 $(\mathbf{D}_1 - \mathbf{C}_1\mathbf{A}_1^{-1}\mathbf{B}_1)$ 为 1×1 的可逆矩阵。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{1,1}^{1,1} \\ h_{2,2}^{1,1} \\ h_{3,3}^{1,1} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} h_{1,1}^{1,2} \\ h_{2,2}^{1,2} \\ h_{3,3}^{1,2} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} h_{1,1}^{1,3} \\ h_{2,2}^{1,3} \\ h_{3,3}^{1,3} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} h_{1,1}^{2,1} \\ h_{2,2}^{2,1} \\ h_{3,3}^{2,1} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} h_{1,1}^{2,2} \\ h_{2,2}^{2,2} \\ h_{3,3}^{2,2} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} h_{1,1}^{2,3} \\ h_{2,2}^{2,3} \\ h_{3,3}^{2,3} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} h_{1,1}^{3,1} \\ h_{2,2}^{3,1} \\ h_{3,3}^{3,1} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} h_{1,1}^{3,2} \\ h_{2,2}^{3,2} \\ h_{3,3}^{3,2} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} h_{1,1}^{3,3} \\ h_{2,2}^{3,3} \\ h_{3,3}^{3,3} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (20)$$

代入公式(17)对矩阵 \mathbf{A} 求逆：

$$\mathbf{A}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & \mathbf{B}_1 \\ \mathbf{C}_1 & \mathbf{D}_1 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1^{-1} + \mathbf{A}_1^{-1}\mathbf{B}_1(\mathbf{D}_1 - \mathbf{C}_1\mathbf{A}_1^{-1}\mathbf{B}_1)^{-1}\mathbf{C}_1\mathbf{A}_1^{-1} & -\mathbf{A}_1^{-1}\mathbf{B}_1(\mathbf{D}_1 - \mathbf{C}_1\mathbf{A}_1^{-1}\mathbf{B}_1)^{-1} \\ -(\mathbf{D}_1 - \mathbf{C}_1\mathbf{A}_1^{-1}\mathbf{B}_1)^{-1}\mathbf{C}_1\mathbf{A}_1^{-1} & (\mathbf{D}_1 - \mathbf{C}_1\mathbf{A}_1^{-1}\mathbf{B}_1)^{-1} \end{bmatrix}$$

(21)

观察公式(21)可得, 依然是只要求出矩阵 \mathbf{A}_1^{-1} 和 $(\mathbf{D}_1 - \mathbf{C}_1 \mathbf{A}_1^{-1} \mathbf{B}_1)^{-1}$ 即可求得矩阵 \mathbf{A} 的逆矩阵。因此再次对矩阵 \mathbf{A}_1 做四分块处理, 如公式(22)所示。此时 4 个分块矩阵均为 1×1 的对角矩阵, 依次记作 \mathbf{A}_2 、 \mathbf{B}_2 、 \mathbf{C}_2 和 \mathbf{D}_2 , 其中矩阵 \mathbf{A}_2 和 $(\mathbf{D}_2 - \mathbf{C}_2 \mathbf{A}_2^{-1} \mathbf{B}_2)$ 均可逆。

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} \left[\begin{array}{c|c} h_{1,1}^{1,1} & \\ \hline & h_{2,2}^{1,1} \\ & & h_{3,3}^{1,1} \end{array} \right] & \left[\begin{array}{c|c} h_{1,1}^{1,2} & \\ \hline & h_{2,2}^{1,2} \\ & & h_{3,3}^{1,2} \end{array} \right] \\ \left[\begin{array}{c|c} h_{1,1}^{2,1} & \\ \hline & h_{2,2}^{2,1} \\ & & h_{3,3}^{2,1} \end{array} \right] & \left[\begin{array}{c|c} h_{1,1}^{2,2} & \\ \hline & h_{2,2}^{2,2} \\ & & h_{3,3}^{2,2} \end{array} \right] \end{bmatrix} \quad (22)$$

再次将公式(22)代入公式(17)中的四分块矩阵对矩阵 \mathbf{A}_1 求逆:

$$\mathbf{A}_1^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_2 & \mathbf{B}_2 \\ \mathbf{C}_2 & \mathbf{D}_2 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_2^{-1} + \mathbf{A}_2^{-1} \mathbf{B}_2 (\mathbf{D}_2 - \mathbf{C}_2 \mathbf{A}_2^{-1} \mathbf{B}_2)^{-1} \mathbf{C}_2 \mathbf{A}_2^{-1} & -\mathbf{A}_2^{-1} \mathbf{B}_2 (\mathbf{D}_2 - \mathbf{C}_2 \mathbf{A}_2^{-1} \mathbf{B}_2)^{-1} \\ -(\mathbf{D}_2 - \mathbf{C}_2 \mathbf{A}_2^{-1} \mathbf{B}_2)^{-1} \mathbf{C}_2 \mathbf{A}_2^{-1} & (\mathbf{D}_2 - \mathbf{C}_2 \mathbf{A}_2^{-1} \mathbf{B}_2)^{-1} \end{bmatrix} \quad (23)$$

由于 \mathbf{A}_2 、 \mathbf{B}_2 、 \mathbf{C}_2 和 \mathbf{D}_2 均为对角阵, 故 \mathbf{A}_2^{-1} 、 $(\mathbf{D}_2 - \mathbf{C}_2 \mathbf{A}_2^{-1} \mathbf{B}_2)^{-1}$ 也均为对角阵, 因此可非常容易求得其逆矩阵, 将其逆矩阵带入到公式(24)中即可求得 \mathbf{A}_1 的逆。

$$\mathbf{A}_1^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_2 & \mathbf{B}_2 \\ \mathbf{C}_2 & \mathbf{D}_2 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_2^{-1} + \mathbf{A}_2^{-1} \mathbf{B}_2 (\mathbf{D}_2 - \mathbf{C}_2 \mathbf{A}_2^{-1} \mathbf{B}_2)^{-1} \mathbf{C}_2 \mathbf{A}_2^{-1} & -\mathbf{A}_2^{-1} \mathbf{B}_2 (\mathbf{D}_2 - \mathbf{C}_2 \mathbf{A}_2^{-1} \mathbf{B}_2)^{-1} \\ -(\mathbf{D}_2 - \mathbf{C}_2 \mathbf{A}_2^{-1} \mathbf{B}_2)^{-1} \mathbf{C}_2 \mathbf{A}_2^{-1} & (\mathbf{D}_2 - \mathbf{C}_2 \mathbf{A}_2^{-1} \mathbf{B}_2)^{-1} \end{bmatrix} \quad (24)$$

通过公式(24)得到 \mathbf{A}_1^{-1} 后代入到公式(21)中, 从而容易求得 \mathbf{A}^{-1} 。同理, 再将公式(21)求得的 \mathbf{A}^{-1} 代入到公式(19)中, 即可求得 UCCA-OAM 信道矩阵的逆矩阵。

由于每个步骤的 $(\mathbf{D}_i - \mathbf{C}_i \mathbf{A}_i^{-1} \mathbf{B}_i)$ 均为 1×1 的对角矩阵, 所以只要求得每步的 \mathbf{A}_i^{-1} 即可求出 $(\mathbf{D}_i - \mathbf{C}_i \mathbf{A}_i^{-1} \mathbf{B}_i)$, 不需要再对 $(\mathbf{D}_i - \mathbf{C}_i \mathbf{A}_i^{-1} \mathbf{B}_i)$ 做四分块求逆。

经过上述步骤, 即完成了收发端天线阵列均为 4 个同心圆 UCA, 且每个 UCA 上均具有 3 个天线阵列元件的分块矩阵求逆方法, 由此即可得到矩阵 \mathbf{M} 。

下面对 $N \times N$ 维的 UCCA-OAM 信道矩阵阵列干扰消除算法做总结, 即发射端和接收端均为 N 个同心圆 UCA 组成的天线阵列, 每个 UCA 上由 N 个天线阵列元件组成, 注意这里的 N 可为任意大于等于 2 的整数, 递进分块至 1×1 子矩阵即终止。

步骤 1: 将 \mathbf{H} 矩阵分为 4 块: 分别记为 \mathbf{A}_1 、 \mathbf{B}_1 、 \mathbf{C}_1 、 \mathbf{D}_1 块矩阵。其中 \mathbf{A}_1 和 $(\mathbf{D}_1 - \mathbf{C}_1 \mathbf{A}_1^{-1} \mathbf{B}_1)$ 矩阵均可逆, 四分块矩阵的维度分别为: \mathbf{A}_1 为 $(N-1) \times (N-1)$ 维度的矩阵, \mathbf{B}_1 为 $(N-1) \times 1$ 维度的矩阵, \mathbf{C}_1 为 $1 \times (N-1)$ 维度的矩阵, \mathbf{D}_1 为 1×1 维度的矩阵。将公式(17)的四分块矩阵

求逆公式代入公式(19):

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & \mathbf{B}_1 \\ \mathbf{C}_1 & \mathbf{D}_1 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1^{-1} + \mathbf{A}_1^{-1} \mathbf{B}_1 (\mathbf{D}_1 - \mathbf{C}_1 \mathbf{A}_1^{-1} \mathbf{B}_1)^{-1} \mathbf{C}_1 \mathbf{A}_1^{-1} & -\mathbf{A}_1^{-1} \mathbf{B}_1 (\mathbf{D}_1 - \mathbf{C}_1 \mathbf{A}_1^{-1} \mathbf{B}_1)^{-1} \\ -(\mathbf{D}_1 - \mathbf{C}_1 \mathbf{A}_1^{-1} \mathbf{B}_1)^{-1} \mathbf{C}_1 \mathbf{A}_1^{-1} & (\mathbf{D}_1 - \mathbf{C}_1 \mathbf{A}_1^{-1} \mathbf{B}_1)^{-1} \end{bmatrix} \quad (25)$$

步骤 2: 观察公式(25)可知, 要求得 \mathbf{M} 矩阵, 关键是求得 \mathbf{A}_1 矩阵的逆, 于是再对 \mathbf{A}_1 矩阵求逆, 重复步骤 1 过程。将 \mathbf{A}_1 矩阵分为 4 块: 分别记为 \mathbf{A}_2 、 \mathbf{B}_2 、 \mathbf{C}_2 、 \mathbf{D}_2 块矩阵。其中 \mathbf{A}_2 和 $(\mathbf{D}_2 - \mathbf{C}_2 \mathbf{A}_2^{-1} \mathbf{B}_2)$ 矩阵均可逆, 如公式(26)所示。此时 4 分块矩阵的维度分别为: \mathbf{A}_2 为 $(N-2) \times (N-2)$ 维度的矩阵, \mathbf{B}_2 为 $(N-2) \times 1$ 维度的矩阵, \mathbf{C}_2 为 $1 \times (N-2)$ 维度的矩阵, \mathbf{D}_2 为 1×1 维度的矩阵。

$$\mathbf{A}_1^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_2 & \mathbf{B}_2 \\ \mathbf{C}_2 & \mathbf{D}_2 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_2^{-1} + \mathbf{A}_2^{-1} \mathbf{B}_2 (\mathbf{D}_2 - \mathbf{C}_2 \mathbf{A}_2^{-1} \mathbf{B}_2)^{-1} \mathbf{C}_2 \mathbf{A}_2^{-1} & -\mathbf{A}_2^{-1} \mathbf{B}_2 (\mathbf{D}_2 - \mathbf{C}_2 \mathbf{A}_2^{-1} \mathbf{B}_2)^{-1} \\ -(\mathbf{D}_2 - \mathbf{C}_2 \mathbf{A}_2^{-1} \mathbf{B}_2)^{-1} \mathbf{C}_2 \mathbf{A}_2^{-1} & (\mathbf{D}_2 - \mathbf{C}_2 \mathbf{A}_2^{-1} \mathbf{B}_2)^{-1} \end{bmatrix} \quad (26)$$

步骤 3: 继续观察可知, 要求得 \mathbf{A}_1 的逆矩阵, 关键是求得 \mathbf{A}_2 矩阵的逆, 于是再对 \mathbf{A}_2 矩阵求逆, 重复步骤 1 过程再继续根据公式(17)对 \mathbf{A}_2 矩阵做 4 分块求逆操作。

步骤 4: 重复上述步骤, 将 \mathbf{A}_i 矩阵继续做 4 分块求逆, 直至 $i = N-1$ 结束。

步骤 5: 由于当 $i = N-1$ 时, 矩阵 \mathbf{A}_{N-1} 、 \mathbf{B}_{N-1} 、 \mathbf{C}_{N-1} 、 \mathbf{D}_{N-1} 均为对角矩阵, 故此时 \mathbf{A}_i^{-1} 可通过将对角元素取倒数直接求逆, 再代入 $(\mathbf{D}_{i-1} - \mathbf{C}_{i-1} \mathbf{A}_{i-1}^{-1} \mathbf{B}_{i-1})$ 中, 其元素取倒数直接求得 $(\mathbf{D}_{i-1} - \mathbf{C}_{i-1} \mathbf{A}_{i-1}^{-1} \mathbf{B}_{i-1})^{-1}$ (也是对角阵), 由此即可求得 \mathbf{A}_{i+1}^{-1} 。

步骤 6: 重复代入上一级矩阵求逆, 直至 $i=1$, 此时已求得 \mathbf{A}_1^{-1} 、 $(\mathbf{D}_1 - \mathbf{C}_1 \mathbf{A}_1^{-1} \mathbf{B}_1)^{-1}$ 。代入第一级信道矩阵, 即公式(25)中可得:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & \mathbf{B}_1 \\ \mathbf{C}_1 & \mathbf{D}_1 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1^{-1} + \mathbf{A}_1^{-1} \mathbf{B}_1 (\mathbf{D}_1 - \mathbf{C}_1 \mathbf{A}_1^{-1} \mathbf{B}_1)^{-1} \mathbf{C}_1 \mathbf{A}_1^{-1} & -\mathbf{A}_1^{-1} \mathbf{B}_1 (\mathbf{D}_1 - \mathbf{C}_1 \mathbf{A}_1^{-1} \mathbf{B}_1)^{-1} \\ -(\mathbf{D}_1 - \mathbf{C}_1 \mathbf{A}_1^{-1} \mathbf{B}_1)^{-1} \mathbf{C}_1 \mathbf{A}_1^{-1} & (\mathbf{D}_1 - \mathbf{C}_1 \mathbf{A}_1^{-1} \mathbf{B}_1)^{-1} \end{bmatrix} \quad (27)$$

此时信道矩阵 \mathbf{M} 矩阵求解完毕。

3 计算复杂度分析

本节重点分析本文所提的 UCCA-OAM 信道矩阵阵列干扰消除算法的计算复杂度, 因为本文算法是在接收端对接收信号进行处理, 因此对处理后的接收信号进行分析。在对接收信号进行处理之后的表达式, 即公式(15)中, 存在哈达玛乘积 \square , 两个矩阵作哈达玛乘积意指两个矩阵作逐元素乘法, 以公式(15)为例, 其中 \mathbf{y} 和 \mathbf{M} 均为 $N \times N$ 的矩阵 (N 为任意大于等于 2 的整数), 对于哈达玛乘积的计算, 矩阵中每个元素的计算是独立的, 计算复杂度只与

矩阵的维度有关，因为需要对 N^2 个矩阵元素作逐元素乘法，因此计算复杂度为 $O(N^2)$ 。

在大规模 MIMO 和多环 UCA 情况下，此时阵列规模会显著增大，即 N 的数值很大，此时哈达玛乘积的计算复杂度也会随着阵列规模的增大而急剧提高。具体来说，在多环 UCA 系统中，阵列规模会随着 UCA 的环数和每个 UCA 上天线数的增加而显著增大，此时系统的计算复杂度会很高，在这种情况下就更加体现出本文所提的分块矩阵计算方式的价值，它会将矩阵 \mathbf{y} 和矩阵 \mathbf{M} 分为若干子矩阵，逐块计算哈达玛乘积，通过并行计算，降低计算时间，提升计算速度。

具体来说，将矩阵 \mathbf{y} 和矩阵 \mathbf{M} 分别划分为 $k \times k$ 个子矩阵，每个子矩阵大小为 $\frac{N}{k} \times \frac{N}{k}$ ，

分块后的矩阵分别表示为：

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_{11} & \mathbf{y}_{12} & \cdots & \mathbf{y}_{1k} \\ \mathbf{y}_{21} & \mathbf{y}_{k2} & \cdots & \mathbf{y}_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{y}_{k1} & \mathbf{y}_{k2} & \cdots & \mathbf{y}_{kk} \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{11} & \mathbf{M}_{12} & \cdots & \mathbf{M}_{1k} \\ \mathbf{M}_{21} & \mathbf{M}_{k2} & \cdots & \mathbf{M}_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{M}_{k1} & \mathbf{M}_{k2} & \cdots & \mathbf{M}_{kk} \end{bmatrix} \quad (29)$$

其中 \mathbf{y}_{ij} 和 \mathbf{M}_{ij} 是大小为 $\frac{N}{k} \times \frac{N}{k}$ 的子矩阵，每个子矩阵 \mathbf{y}_{ij} 和下标对应的子矩阵 \mathbf{M}_{ij} 进行哈达玛乘积的运算，经过矩阵分块后接收信号表示为：

$$\mathbf{y}' = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_{11}\mathbf{M}_{11} & \mathbf{y}_{12}\mathbf{M}_{12} & \cdots & \mathbf{y}_{1k}\mathbf{M}_{1k} \\ \mathbf{y}_{21}\mathbf{M}_{21} & \mathbf{y}_{22}\mathbf{M}_{22} & \cdots & \mathbf{y}_{2k}\mathbf{M}_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{y}_{k1}\mathbf{M}_{k1} & \mathbf{y}_{k2}\mathbf{M}_{k2} & \cdots & \mathbf{y}_{kk}\mathbf{M}_{kk} \end{bmatrix} \quad (30)$$

未分块时的计算复杂度为 $O(N^2)$ ，分块之后每个子矩阵的计算复杂度为 $O(\frac{N^2}{k^2})$ ，而子矩阵有 k^2 个，因此分块后的总计算量不变，仍为 $O(N^2)$ ，但本文所采用的分块计算操作，其优势在于每个子矩阵的计算是独立的，可以并行计算，所以能够显著减少计算时间，提升计算效率。

4 仿真分析

在本节中，我们首先通过仿真模拟了 UCCA-OAM 系统在接收端经过双模块干扰消除方案的处理之后，随着发射端和接收端同心圆 UCA 个数的增加信道容量的变化，然后比较了发射端和接收端同心圆 UCA 个数的变化对误码率的影响，最后对不同信噪比下接收端不进

行预处理的误码率与经过模态间干扰消除的预处理操作的误码率进行比较。其中信噪比（Signal-to-Noise Ratio, SNR）定义为接收端原始信号功率与噪声功率之比，同心圆间距设为 $\lambda/2$ 以规避近场耦合效应。

在图 3 中，分别比较了发射端和接收端均为单环 UCA、5 个同心圆 UCA、10 个同心圆 UCA 和 15 个同心圆 UCA 情况下在不同 SNR 下的信道容量，分别为曲线 capacity1、capacity2、capacity3 和 capacity4，每个 UCA 上包含 8 个天线阵列元件。由图 3 可以看出，当 $SNR \leq 15dB$ 时，四种情况下的信道容量差别较小，但是当 $SNR > 15dB$ 时，多个同心圆 UCA 作为发射端和接收端的优势开始显现出来，此时同心圆 UCA 之间的信道容量关系可以表示为 $C_{15 \times 15} > C_{10 \times 10} > C_{5 \times 5}$ ，并且多个同心圆 UCA 作为收发端天线时的信道容量均大于单环 UCA 时的信道容量。由此可见，在接收端经过模态间干扰消除之后的 UCCA-OAM 通信系统能够提供更大的信道容量。

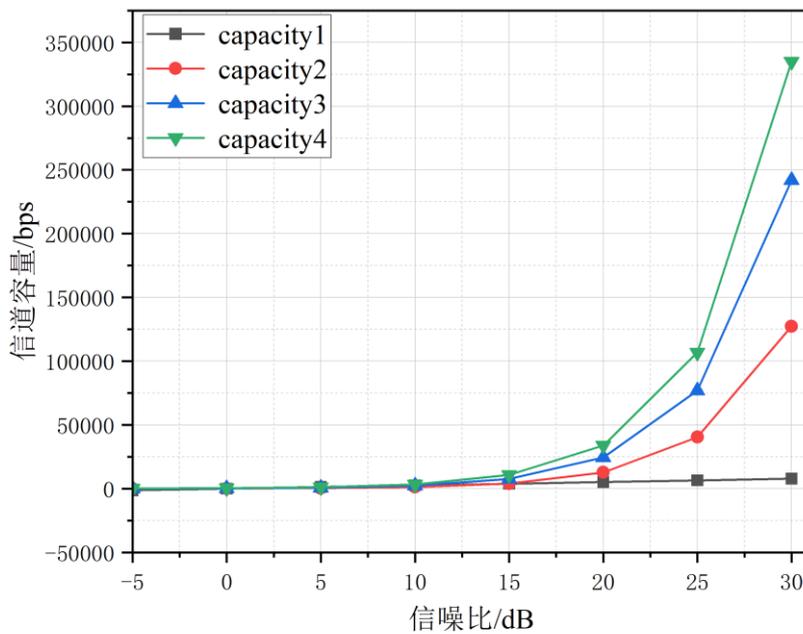


图 3 不同 UCA 个数的信道容量比较图

Fig.3 Channel Capacity Comparison for Different Numbers of UCAs

图 4 比较了 UCCA-OAM 通信系统的误码率，此时我们设置 UCCA-OAM 系统的收发端分别具备 5 个同心圆 UCA 每个 UCA 上有 5 个天线阵列元件、10 个同心圆 UCA 每个 UCA 上有 10 个天线阵列元件以及 15 个同心圆 UCA 每个 UCA 上有 15 个天线阵列元件来生成和接收 OAM 波束。由图 4 中的误码率曲线可以看到，接收端经过双模块干扰消除后误码率较低，并且在 SNR 较小时，三种情况下的误码率性能并没有明显差异，但当 $SNR \geq 14dB$ 时，UCA 个数的增加会导致误码率性能的降低，表现为 $BER_{15 \times 15} > BER_{10 \times 10} > BER_{5 \times 5}$ 。尽管如此，

经过双模块干扰消除，同心圆UCA作为生成和接收OAM波束的发射和接收阵列在接收端误码率方面依然表现出了较为优越的性能，误码率达到 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ ，这也显示出了我们所提出算法的优越性。

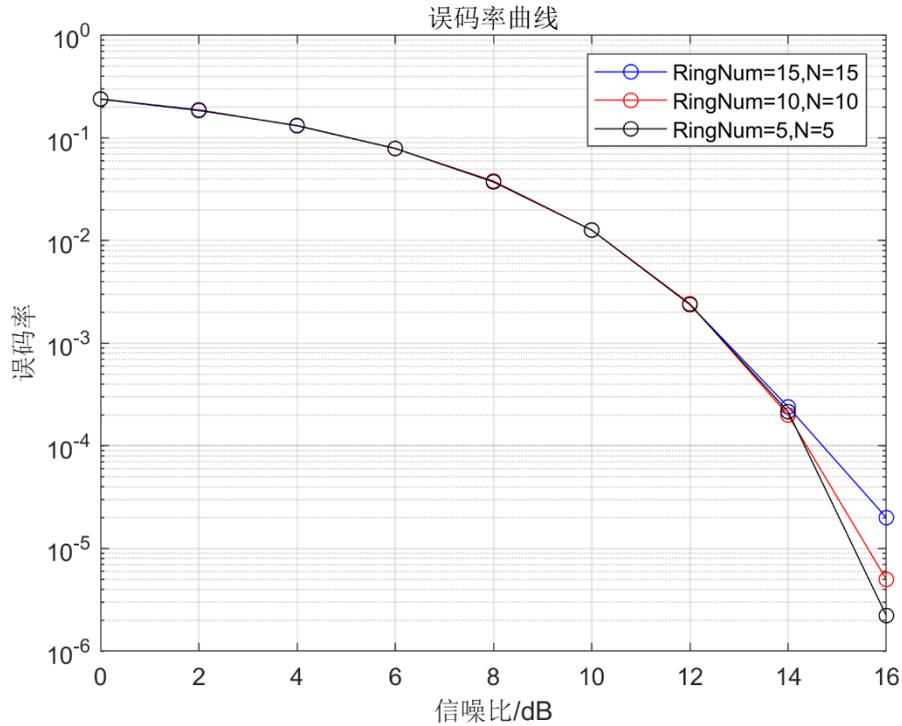


图4 不同UCA数量的误码率比较图

Fig.4 Bit Error Rate Comparison for Different Numbers of UCAs

图5比较了经过双模块干扰消除方案处理和未经过该方案处理的信道容量的差异，其中发射端和接收端设置了两组不同的参数：比较了收发端设置为5个不同半径的UCA组成的同心圆UCA阵列，每个UCA上设置5个天线阵列因子和10个不同半径的UCA组成的同心圆UCA阵列，每个UCA上设置10个天线阵列因子的对比。由图5可见，两组参数的仿真结果均存在如下现象：在低信噪比时，经过双模块干扰消除的信道容量与未经过处理的信道容量差异不大。当 $SNR = 15dB$ 时，经过本文提出的双模块干扰消除方案处理后的信道容量开始具备优势，当 $SNR > 15dB$ 后，经过双模块干扰消除方案处理后的信道容量一直保持大于未经过干扰消除处理的信道容量，并且随着UCA个数和UCA上天线阵列因子数目的增加，双模块干扰消除方案的有效性更为显著。我们分析产生上述实验结果的主要原因是：在 SNR 较低（ $SNR < 15dB$ ）时，主要是噪声对信号影响较大，而非模态干扰和阵列干扰；而当 $SNR \geq 15dB$ 时，噪声影响减弱，此时对信号影响较大的干扰因素主要是OAM模态干扰和UCA阵列干扰，因此在 $SNR \geq 15dB$ 后，经过双模块干扰消除方案处理后的信道容量保持大于未经过干扰消除处理的信道容量。这表明本文所提出的双模块干扰消除方案能够有效消除因UCA未对准导致的模态干扰和多同心圆UCA导致的阵列干扰，体现了本文所提出的模

态干扰消除方案的有效性。

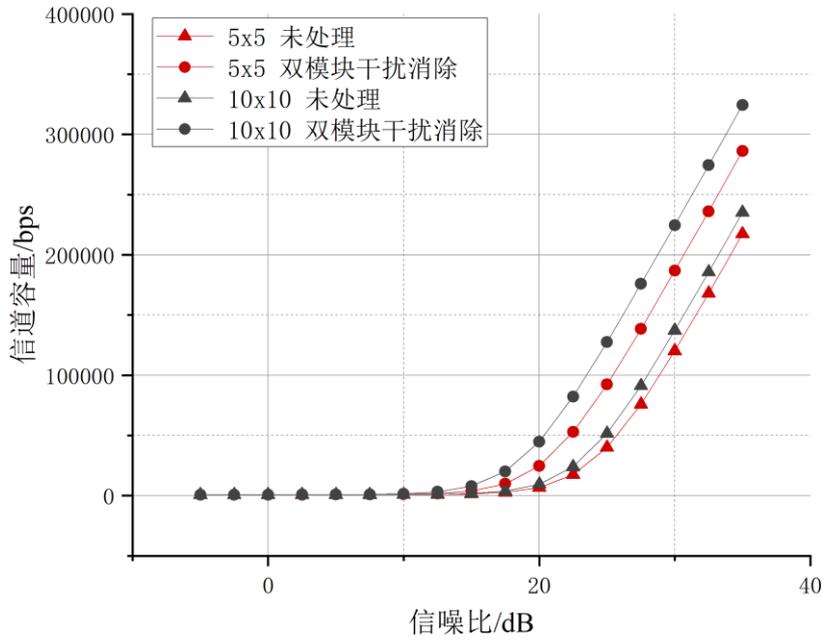


图 5 双模块干扰消除方案处理与未处理的信道容量比较图

Fig.5 Channel Capacity Comparison Between Dual-Module Interference Cancellation Scheme and Untreated Scenario

图 6 展示了 UCCA-OAM 通信系统经过本文所提出的模态间干扰消除算法预处理和未经过算法处理的误码率性能比较，其中“ringNum=5, N=5”以及“ringNum=10, N=10”表示发射端和接收端分别设置为 5×5 的多 UCA 同心圆天线阵列以及 10×10 的多 UCA 同心圆天线阵列，这两条为经过预处理的误码率曲线，而“ringNum=5, N=5（未处理）”以及“ringNum=10, N=10（未处理）”为未经过预处理的具有模态间干扰的误码率曲线。由图 6 可知，多同心圆 UCA 作为生成和接收 OAM 波束装置时会产生严重的模态间干扰，误码率性能急剧恶化，从而使得通信系统的传输性能大大降低，而本文所提出的双模块干扰消除方案具有良好的有效性。由图 6 中“ringNum=5, N=5”以及“ringNum=10, N=10”两条误码率曲线可以看到，经过处理的 UCCA-OAM 通信系统的误码率与未处理的误码率相比较大大降低，精度达到 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ ，验证了所提出的模态间干扰消除方案的有效性。

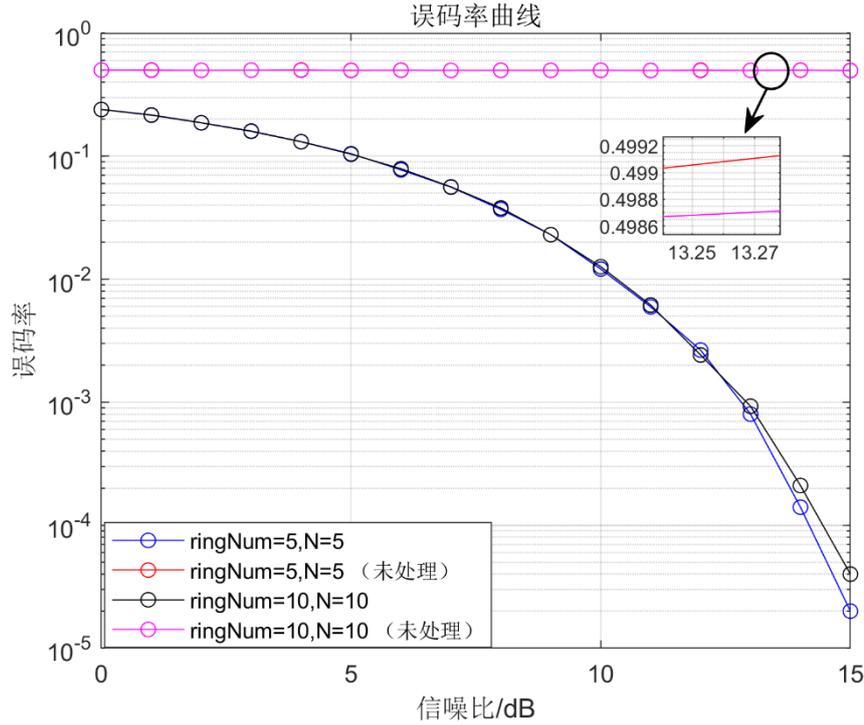


图6 双模块干扰消除方案处理与未处理的误码率比较图

Fig.6 Bit Error Rate Comparison Between Dual-Module Interference Cancellation Scheme and Untreated Scenario

4 结束语

本文提出了一种针对发射端与接收端未对准情况下的 UCCA-OAM 通信系统模型的双模块干扰消除方案，考虑到利用未对准的同心圆UCA来生成和接收OAM波束时不仅存在因单环UCA未对准产生的模态干扰，同心圆中不同的UCA间也会存在阵列干扰的问题，本文提出了一种基于递进式矩阵逆运算的双模块干扰消除方案。仿真结果表明：本文所提出的双模块干扰消除方案在信道容量和误码率方面均具备明显的优越性。

参考文献

- [1] 虞湘宾,钱盼盼,蔡鸿飞.面向6G无线通信的可移动天线技术研究综述[J].南京航空航天大学学报,2024,56(5):773-783.
- [2] 彭坤,梁彦,李飞. IRS 辅助大规模 MIMO 系统中抑制残余硬件损伤的 AQBFO 无源波束赋形方案[J].数据采集与处理,2024,39(2):433-444.
- [3] 慕欣茹,傅海军,戴继生.基于稀疏贝叶斯学习的混合 mMIMO 系统波达方向估计[J].数据采集与处理,2024,39(5):1260-1270.
- [4] Thid éB, Tamburini F, Then H, et al. The physics of angular momentum radio[J]. arXiv preprint arXiv:1410.4268, 2014.
- [5] Mohammadi S M, Daldorff L K S, Bergman J E S, et al. Orbital angular momentum in radio—A system study[J]. IEEE transactions on Antennas and Propagation, 2009, 58(2): 565-572.
- [6] Edfors O, Johansson A J. Is orbital angular momentum (OAM) based radio communication an unexploited area?[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2011, 60(2): 1126-1131.
- [7] 赵林军, 张海林, 刘乃安. 涡旋电磁波无线通信技术的研究进展[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(11): 3075-3085.

- [8] Liuli Hantang. Is OAM a better transmission method than MIMO scheme?[C]//2020 5th International Conference on Communication, Image and Signal Processing (CCISP). IEEE, 2020: 10-14.
- [9] Ponte S, Farina A, Timmoneri L. Orbital Angular Momentum (OAM) Waves for Microwave Remote Sensing: Potentialities and Applications[C]//2023 IEEE 10th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace). IEEE, 2023: 407-412.
- [10] 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.
- [11] Yan Yan, Xie Guodong, Lavery M P J, et al. High-capacity millimetre-wave communications with orbital angular momentum multiplexing[J]. Nature communications, 2014, 5(1): 4876.
- [12] Chen Rui, Xu Hai, Li Jiandong, et al. Misalignment-robust receiving scheme for UCA-based OAM communication systems[C]//2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring). IEEE, 2017: 1-5.
- [13] Chen Rui, Xu Hai, Moretti M, et al. Beam steering for the misalignment in UCA-based OAM communication systems[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2018, 7(4): 582-585.
- [14] Chen Rui, Long Wenxuan, Wang Xiaodong, et al. Multi-mode OAM radio waves: Generation, angle of arrival estimation and reception with UCAs[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(10): 6932-6947.
- [15] 王洋, 修艳磊, 胡韬, 等. 基于相位补偿的非理想无线轨道角动量复用通信系统研究[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(9): 3212-3219.
- [16] Zhang Gaoji, Cheng Yifei, Lu Yi, et al. OAM Beam Tilt Angle Detection Based on Uniform Circular Antenna Array[C]//2023 19th International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (ICNC-FSKD). IEEE, 2023: 1-5.
- [17] Chen Rui, Tian Zhenyang, Long Wenxuan, et al. Hybrid mechanical and electronic beam steering for maximizing OAM channel capacity[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 22(1): 534-549.
- [18] Long Wenxuan, Tian Zhenyang, Chen Rui, et al. MEMS-Based Hybrid Mechanical-Electronic Beam Steering for THz OAM Communication Chips[C]//2023 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). IEEE, 2023: 356-360.
- [19] 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). IEEE, 2015: 1-5.
- [20] Ren Yongxiong, Li Long, Xie Guodong, et al. Line-of-sight millimeter-wave communications using orbital angular momentum multiplexing combined with conventional spatial multiplexing[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(5): 3151-3161.
- [21] Opare K A, Kuang Y, Kponyo J J. Mode combination in an ideal wireless OAM-MIMO multiplexing system[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2015, 4(4): 449-452.
- [22] Sasaki H, Yagi Y, Fukumoto H, et al. OAM-MIMO multiplexing transmission system for high-capacity wireless communications on millimeter-wave band[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023, 23(5): 3990-4003.
- [23] Mao Fuchun, Yang Chengfu, Yuan Gang, et al. UCA-based OAM-MIMO scheme for high-capacity wireless transmission[C]//2024 4th International Conference on Neural Networks, Information and Communication (NNICE). IEEE, 2024: 345-349.
- [24] Lyu Runyu, Cheng Wenchi, Wang Muyao, et al. Fractal OAM Generation and Detection Schemes[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2024.
- [25] 王连成. 四分块矩阵的求逆公式和行列式值的计算[J]. 太原理工大学学报, 1998, 29(5): 539-542.

作者简介：



李汀（1979-），通信作者，男，副教授，研究方向为 6G 无线通信技术，量子计算，量子机器学习。

E-mail: lit@njupt.edu.cn



沈铭宇（1999-），男，硕士生，研究方向为通信感知一体化、OAM-MIMO 无线通信技术。



张春洁（1998-），女，硕士生，研究方向为 OAM-MIMO 无线通信技术。



解培中（1968-），女，副教授，研究方向为 MIMO 预编码技术，干扰对齐，定位技术。