

## 基于信号检测的光无线轨道角动量复用系统研究

王洋 崔健\* 廖希 曾彦志 张杰

(重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)

(移动通信教育部工程研究中心 重庆 400065)

(移动通信技术重庆市重点实验室 重庆 400065)

**摘要:** 基于轨道角动量(OAM)的光无线复用通信技术在理想传输条件下能够大幅度提升通信系统性能,然而现实中大气湍流、孔径失配等因素会造成OAM模态间串扰导致误码率(BER)上升。为了降低光无线OAM复用系统在复杂环境中的误码率,该文首先建立了大气湍流、孔径失配场景下基于垂直分层空时码准则(VBLAST)的OAM复用通信系统(VBLAST-OAM),之后分析对比基于排序干扰连续消除检测算法(OSIC)、基于马尔科夫随机场置信度传播算法(MRF-BP)、基于OAM串扰特性的排序干扰连续消除算法(OAM-OSIC)应用于上述系统时的性能。结果表明:所提信号检测算法均能有效降低OAM复用系统在复杂环境中的误码率,其中,基于MRF-BP算法的系统性能最好;OAM-OSIC虽然属于次优算法,但在算法的运行开销方面具有较大优势。

**关键词:** 光无线通信; 大气湍流; 轨道角动量; 信号检测; 孔径失配; 误码率

中图分类号: TN929.12

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)11-3156-10

DOI: 10.11999/JEIT200955

## Research on Optical Wireless Orbital Angular Momentum Multiplexing System Based on Signal Detection

WANG Yang CUI Jian LIAO Xi ZENG Yanzhi ZHANG Jie

(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

(Engineering Research Center of Mobile Communications of the Ministry of Education, Chongqing 400065, China)

(Chongqing Key Laboratory of Mobile Communications Technology, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** The wireless communication technology based on Orbital Angular Momentum (OAM) can greatly improve the performance of the communication system under ideal transmission conditions. However, in the actual environment, atmospheric turbulence and aperture mismatch can cause crosstalk between OAM modes and increase the Bit Error Rate (BER). In order to reduce the BER of the optical wireless OAM multiplexing system in a complex environment, an OAM multiplexing communication system based on the Vertical Bell LAYered Space Time (VBLAST-OAM) code criterion under the scenario of atmospheric turbulence and the aperture mismatch of the transceiver is established firstly. Then, the system performance are analyzed based on the Ordered Successive Interference Cancellation (OSIC), the Markov Random Field Belief Propagation (MRF-BP) algorithm and the algorithm OAM-OSIC. Simulation results show that the algorithm proposed in this paper can reduce the BER of OAM systems effectively in complex environment and the MRF-BP has the best performance. Although OAM-OSIC is a suboptimal algorithm, it has a great advantage in the running cost.

**Key words:** Optical wireless communication; Atmospheric turbulence; Orbital Angular Momentum (OAM); Signal detection; Aperture mismatch; Bit Error Rate (BER)

收稿日期: 2020-11-06; 改回日期: 2021-04-04; 网络出版: 2021-04-25

\*通信作者: 崔健 cui1684@foxmail.com

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFE0118900), 国家自然科学基金(61801062), 重庆市自然科学基金(cstc2019jcyj-msxmX0288), 中国博士后基金(2019M653826XB)

Foundation Items: The National Key R&D Program of China (2017YFE0118900), The National Natural Science Foundation of China (61801062), The Natural Science Foundation of Chongqing (cstc2019jcyj-msxmX0288), China Postdoctoral Science Foundation (2019M653826XB)

## 1 引言

轨道角动量(Orbital Angular Momentum, OAM)作为量子力学及经典力学中的基本物理量,是独立于光的波长、偏振、相位、振幅外的一个空间维度<sup>[1]</sup>。近年来,将OAM作为新的通信自由度应用到通信领域得到了人们广泛的关注。

1992年, Allen等人<sup>[2]</sup>证实拉盖尔高斯(Laguerre-Gaussian, LG)光束除了拥有自旋角动量(Spin Angular Momentum, SAM),还携带OAM,且不同模式的OAM光束空间中彼此正交。2004年, Gibson等人<sup>[3]</sup>将携带OAM的波束作为通信载波,首次实现单模态OAM通信。2011年, Wang等人<sup>[4]</sup>首次完成了多模态OAM复用光通信,实现了4个模态OAM复用通信传输实验。2013年, Huang等人<sup>[5]</sup>完成了32路独立OAM复用通信传输,达到了2.56 Tbit/s的传输速率。2014年, Wang等人<sup>[6]</sup>将OAM模式与光的偏振结合,达到了230 bit/(s·Hz)的频谱效率。

上述研究表明, OAM应用于光无线通信领域可以提升频谱利用率、信息传输速率。然而现实中大气湍流、多径效应、孔径失配等因素均降低OAM通信系统的性能<sup>[7]</sup>。为了推进光无线OAM通信系统在实际场景中的应用,部分学者对大气湍流场景下的OAM通信系统性能展开了广泛的研究。2015年, 邹丽等人<sup>[8,9]</sup>利用GS(Gerchberg-Saxton)算法对OAM波束进行相位校正,降低2~3个数量级的系统误码率。2016年, Zou等人<sup>[10]</sup>将OAM模式串扰等效为多用户间的相关信息,借鉴多用户检测的解相关技术,有效地降低了大气湍流对OAM通信系统的影响。同年, Zhao等人<sup>[11]</sup>联合信道编码技术与波前校正技术,提升了OAM系统在大气湍流下的性能。2017年, Zou等人<sup>[12]</sup>基于分集思想,发送端采用多孔径进行数据传输,接收端采用等增益合并技术,提升了OAM在大气湍流中的性能。同年, Zhang等人<sup>[13]</sup>基于空时编码准则,建立大气湍流场景下的OAM复用通信系统,对比分析垂直分层空时码(Vertical Bell Layered Space Time, VBLAST)及空时分组码(Space Time Block Code, STBC)方案对OAM系统性能的提升效果。2018年, Yousif等人<sup>[14]</sup>将MIMO均衡的思想应用于OAM通信系统,降低数据间的串扰,系统性能得到明显提升。2018年, Wang的等人<sup>[15]</sup>将恒模均衡算法与模态选择策略相结合,降低模态串扰对OAM复用系统的影响。2019年, Dedo等人<sup>[16]</sup>通过改变随机相位屏的个数、湍流强度等条件,分析GS算法下OAM波束修复的极限。同年, Amhoud等人<sup>[17]</sup>根

据OAM不同模态间的串扰差异性,采取OAM模态选择结合STBC编码的方案,提升了大气湍流下OAM通信性能。2020年, Song等人<sup>[18]</sup>根据OAM串扰信道信息,对OAM光束进行预处理和后处理,在一定程度上降低了OAM模态间的串扰,提升了OAM通信系统在大气湍流中的性能。

综上所述,光无线OAM通信系统主要从光学自适应及数字信号处理两个角度应对大气湍流。光学自适应虽然有良好的波形修复效果,但采用该方式时需要考虑设备的复杂性及成本;数字信号处理多数是借鉴多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)通信中的均衡、分集及一些改进的技术,在应对大气湍流时同样有不俗的表现。然而,通信系统中的数字信号处理包含了预编码、均衡及信号检测等多个方面技术,以往研究很少从信号检测的角度分析复杂场景下的光无线OAM复用系统。另外,目前多数光无线OAM复用系统默认收发端孔径适配,然而实际中激光通信很容易出现孔径失配。针对于以上两个方面,本文建立了大气湍流、孔径失配场景下,基于VBLAST编码准则的OAM(VBLAST-OAM)复用通信系统,从信号检测的角度对所建系统进行分析。主要的研究工作如下:

(1) 建立了大气湍流、孔径失配场景下基于VBLAST准则的OAM复用通信系统,并进行相应的理论推导。

(2) 基于(1)中所建系统,首先分析了大气湍流、孔径失配场景下OAM的模态串扰的特征;之后,将排序连续干扰消除(Ordered Successive Interference Cancellation, OSIC)、马尔科夫随机场置信度传播算法(Markov Random Field Belief Propagation, MRF-BP)应用于VBLAST-OAM复用通信系统;此外,根据OAM模态间的串扰差异性,给出了基于轨道角动量的排序连续干扰消除算法(Orbital Angular Momentum with Ordered Successive Interference Cancellation, OAM-OSIC)。最后,对比了文中所给算法的性能,分析各个算法的优缺点。

## 2 OAM空间传播理论及复杂场景下OAM复用系统理论推导

光束在大气湍流中传播时,会被附加随机相位因子,导致接收到的波形出现失真。除了大气湍流外,孔径失配也会造成波形失真,孔径失配通常包含孔径偏离、角向倾斜两种情况,前者多数是设备抖动引起的;后者是光束长距离传播后,波束传播轴与接收系统参考轴的非重合现象。本文主要分析

OAM的角向倾斜情形, 图1是大气湍流、孔径失配场景下的VBLAST-OAM复用系统模型。首先通过串并变换操作将串行数据转变为 $N$ 路并行数据, 并将其送入信号调制器, 随后将调制过的数据送入空时编码器, 将编码后的数据加载到 $N$ 列高斯光束, 利用OAM转换器将高斯光束转换成一系列不同模式的OAM光束, 最后利用单孔径望远镜将复用的光束发射到空间。假设接收孔径将复用的OAM光束接收后, 首先利用OAM解复用器将复用的OAM光束分别检测出来, 之后采用OAM转换器将OAM光束转为高斯光束, 最后对每一列高斯光束上面的信息进行译码和解调。图1中, 接收孔径位置的 $\eta$ 代表光轴的偏离方位,  $\gamma$ 代表角向倾斜的角度。文献[19,20]表明, 光束的横向矢量远远小于纵向矢量的条件下, 当出现孔径失配中的角向倾斜, 相当于光束穿过一个相位楔, 表示为

$$U(r, \phi, z) = E(r, \phi, z) \exp(jk \sin(\gamma)r \cos(\phi - \eta)) \quad (1)$$

其中,  $E(r, \phi, z)$ 表示在空间传输后的波束,  $U(r, \phi, z)$ 表示接收孔径探测到的波束。

## 2.1 轨道角动量及光束在大气湍流中的传播理论

### 2.1.1 轨道角动量基本理论

根据经典电动力学理论可知, 电磁场具备能量与动量且满足电磁守恒。其中, 动量主要包括线动量与角动量, 线动量通常与平动或者力的作用有关; 角动量可以分为SAM和OAM, SAM与电磁波的极化相联系, OAM与电磁波的相位波前分布有关。粒子态OAM沿着传播方向的量子算符可以写成 $\hat{L}_z = -j\hbar\partial/\partial\phi$ , 本征值方程为 $\hat{L}_z |l\rangle = L |l\rangle$ , 其

中 $|l\rangle$ 在基坐标方位角 $\phi$ 表象下, 可以写作 $\langle\phi|l\rangle = 1/\sqrt{2\pi} \exp(jl\phi)$ , 表示具有 $l$ 重螺旋相位[21]。

LG光束在旁轴近似条件下的亥姆霍兹方程表示为[22]

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial r} \left( \rho \frac{\partial E}{\partial r} \right) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 E}{\partial \phi^2} + 2jk \frac{\partial E}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

通过对式(2)求解, 可以得到沿着 $z$ 轴传播的光场

$$E_p^l(r, \phi, z) = \sqrt{\frac{2p!}{\pi(p+|l|)!}} \times \frac{1}{\omega(z)} \times L_p^l \left[ \frac{2r^2}{\omega^2(z)} \right] \times \left[ \frac{\sqrt{2}r}{\omega(z)} \right]^{|l|} \times \exp \left[ -\frac{r^2}{\omega^2(z)} \right] \times \exp \left[ -\frac{jk r^2 z}{2(z^2 + Z_R^2)} \right] \times \exp \left[ -j(2p + |l| + 1) \arctan^{-1} \left( \frac{z}{Z_R} \right) \right] \times \exp(jl\phi) \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \omega(z) &= \omega_0 \sqrt{1 + \left( \frac{z}{Z_R} \right)^2} \\ Z_R &= \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中,  $r$ 是径向距离,  $\phi$ 为方位角,  $z$ 为传输距离,  $\omega_0$ 代表束腰半径,  $\omega(z)$ 是距离 $z$ 处的光斑半径,  $Z_R$ 是瑞利距离,  $L_p^l$ 是广义拉盖尔多项式,  $\exp \left[ -j(2p + |l| + 1) \arctan^{-1} \left( \frac{z}{Z_R} \right) \right] \times \exp(jl\phi)$ 代表LG光束相位,  $\exp(jl\phi)$ 体现了LG的旋转相位特性。

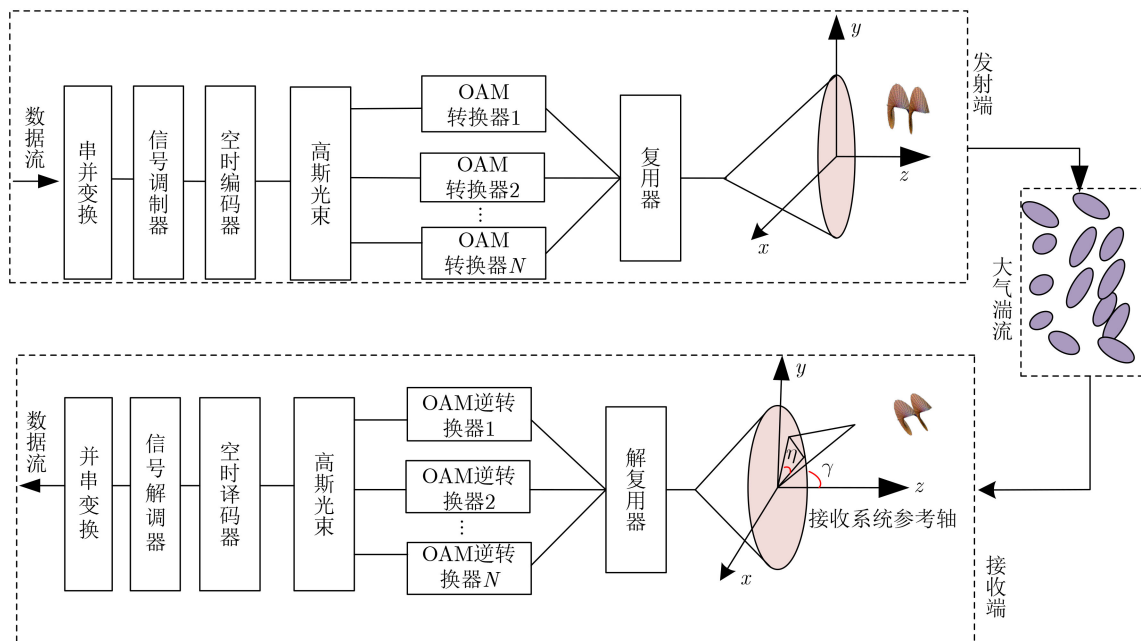


图1 大气湍流、孔径失配场景下的VBLAST-OAM复用系统

### 2.1.2 OAM在大气湍流中的传播理论

为了能够将OAM光束更好地应用于光无线通信领域, OAM光束在大气湍流中的传播特性分析至关重要。实验室条件下, 常采用功率谱反演法及Zernike多项式法等数值仿真方法产生随机相位屏来模拟大气湍流。本文基于修正的冯卡曼折射率功率谱, 采用功率谱反演法模拟大气湍流, 折射率功率谱模型表示为<sup>[23]</sup>

$$\Phi_n(k) = 0.033C_n^2 k^{-11/3} \exp\left(-\frac{k^2}{k_m^2}\right) (k^2 + k_0^2)^{-11/6},$$

$$0 \leq k < \infty \quad (5)$$

其中,  $C_n^2$ 表示折射率结构系数, 可以衡量湍流的强度,  $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ ,  $k_x$ 与 $k_y$ 代表空间频率,  $k_0 = 2\pi/L_0$ ,  $k_m = 5.92/l_0$ ,  $l_0$ 与 $L_0$ 分别代表湍流涡旋的内、外尺寸。根据折射率功率谱可以得到大气湍流相位功率谱

$$\Phi_\varphi(k) = 2\pi k^2 \Delta z \Phi_n(k) \quad (6)$$

其中,  $\Delta z$ 代表两个随机相位屏之间的距离,  $\Phi_n(k)$ 是大气湍流折射率功率谱。功率谱反演法的基本思想: 首先构造一个 $N$ 维的0均值、单位方差的复高斯随机矩阵 $h(k_x, k_y)$ , 随后用大气湍流相位功率谱对 $h(k_x, k_y)$ 滤波, 最后对滤波后的函数做傅里叶逆变换, 可得到大气随机相位

$$\varphi(x, y) = \sum_{k_x} \sum_{k_y} h(k_x, k_y) \sqrt{\Phi_\varphi(k)} \times \exp(j(k_x x + k_y y)) \Delta k_x \Delta k_y \quad (7)$$

其中,  $\Delta k_x, \Delta k_y$ 代表在空间频率间隔。LG光束 $E(r, \phi, z)$ 在大气湍流中的传播过程, 可以等效为光束在真空与随机相位屏之间的迭代, 具体过程如表1所示。

### 2.2 基于VBLAST-OAM复用通信系统理论分析

本文采用VBLAST方案对发送数据进行编码, 将编码后的数据加载到 $N$ 列OAM光束, 那么一个周期内的数据信息表示为

$$\mathbf{X}_{\text{VBLAST}} = \begin{bmatrix} x_{1,1}^{l_1} & x_{1,2}^{l_1} & \cdots & x_{1,M}^{l_1} \\ x_{2,1}^{l_2} & x_{2,2}^{l_2} & \cdots & x_{2,M}^{l_2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N,1}^{l_N} & x_{N,2}^{l_N} & \cdots & x_{N,M}^{l_N} \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中,  $x_{N,M}^{l_N}$ 表示经过VBLAST编码后的数据, 上标 $l_N$ 表示第 $N$ 列OAM光束, 下标 $(N, M)$ 代表第 $M$ 时刻在第 $N$ 列OAM光束上加载的数据。为讨论方便, 只取某一个时刻进行讨论。 $N$ 列OAM光束复用表示为

表1 OAM在大气湍流中的传播过程

初始化: 源端光场 $E(r, \phi, z)$ , 空间传输函数 $H$ , 相位屏个数 $N$ , 相位 $\varphi(x, y)$
(1) For $j = 1 : N$
(2) 傅里叶变换: $U(K, z) = \text{FFT}(E(r, \phi, z))$
(3) 真空传播: $U'(K, z) = \text{IFFT}(U(K, z) \times H)$
(4) 穿过随机相位屏: $E(r, \phi, z) = U'(K, z) \times \exp(j \times \varphi(x, y))$
(5) End For

$$U_{\text{MUX}} = \sum_{n=1}^N x_{n,T}^{l_n} \times E_n(r, \phi, z) \quad (9)$$

接收孔径得到的光束表示为

$$U'_{\text{MUX}} = \sum_{n=1}^N x_{n,T}^{l_n} \times E'_n(r, \phi, z) \quad (10)$$

接收端通常利用OAM的正交特性对复用的光束进行分离。当OAM的正交性受到破坏后, 此时从第 $k$ 列OAM上得到的信息为

$$\begin{aligned} y_k &= \langle U'_{\text{MUX}}(r, \phi, z), E_k(r, \phi, z) \rangle \\ &= \iint U'_{\text{MUX}}(r, \phi, z) \times E_k^*(r, \phi, z) r dr d\phi \\ &= \iint \sum_{n=1}^N x_{n,T}^{l_n} \times E'_n(r, \phi, z) \times E_k^*(r, \phi, z) r dr d\phi \\ &= x_{k,T}^{l_k} \times \iint E'_k(r, \phi, z) \times E_k^*(r, \phi, z) r dr d\phi \\ &\quad + \sum_{n=1, n \neq k}^N x_{n,T}^{l_n} \iint E'_n(r, \phi, z) \times E_k^*(r, \phi, z) r dr d\phi \end{aligned} \quad (11)$$

其中,  $(\cdot)^*$ 表示共轭。根据式(11)可以看出, 当复用的OAM光束受外界影响后, 会出现信号间串扰。式(11)推导最后一步, 首项代表模态 $k$ 的期望信号, 第2项代表除模态 $k$ 外, 其他模态串扰到模态 $k$ 上的信号。将式(11)写成矩阵形式

$$\mathbf{Y}_{N \times 1} = \mathbf{A}_{N \times N} \times \mathbf{X}_{N \times 1} \quad (12)$$

其中,  $\mathbf{Y}$ 代表接收到的信号,  $\mathbf{A}$ 代表OAM模态串扰矩阵,  $\mathbf{X}$ 是发送信号。将式(12)展开

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \cdots & a_{1,N} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \cdots & a_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N,1} & a_{N,2} & \cdots & a_{N,N} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_{1,T}^{l_1} \\ x_{2,T}^{l_2} \\ \vdots \\ x_{N,T}^{l_N} \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中, 矩阵 $\mathbf{A}$ 的对角线元素 $a_{N,N}$ 对应式(11)推导中的第1项, 非对角元素对应式(11)推导中的第2项。

根据文献[24]可知,任意模态的OAM光束均可以展开成谐波函数 $\exp(im\phi)$ 的线性叠加

$$E_n(r, \phi, z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{m=-\infty}^{\infty} a_{m,n}(r, z) \exp(jm\phi) \quad (14)$$

利用傅里叶变换可以求得 $a_{m,n}$

$$\left. \begin{aligned} a_{m,n}(r, z) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{2\pi} E_n(r, \phi, z) \exp(-jm\phi) \\ C_{m,n} &= \int_0^{\infty} |a_{m,n}(r, z)|^2 r dr \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

其中,  $C_{m,n}$ 代表模态为 $n$ 的OAM在模态 $m$ 上的谐波功率, 模态 $n$ 的OAM的纯度表示为

$$p_{n,n} = \frac{C_{n,n}}{\sum_{q=-\infty}^{\infty} C_{q,n}} \quad (16)$$

### 3 基于信号检测算法的VBLAST-OAM复用通信系统

#### 3.1 基于OSIC的VBLAST-OAM复用系统

对基于空时分层编码方案的通信系统进行数据恢复时,通常采用分层处理方式。具体来说,就是将所要处理的数据层作为期望数据,那么除了期望层外的其他层数据均视为干扰,该方式需要生成加权矢量对干扰进行抑制,利用加权矢量可以将所需数据提取出来。当数据层间的差异性较大时,随机地对数据层进行检测,最终的检测效果可能会不理想。因此有人提出了连续干扰消除的方法,这种方法是每检测完一层就将该层数据从接收数据中消除,避免了高信噪比数据层对低信噪比数据层造成的干扰。

根据文献[17]可知,同等大气湍流强度下,不同模态的OAM串扰具有明显的差异性。OAM的模态绝对值越小,主模态功率就保留得越多。那么串扰到相邻模态的功率就越少;反之模态绝对值越大,主功率就越低。因此,可以认为低模态数据层信噪比就越大。本文基于不同模态OAM间的能量串扰特点,优化了传统OSIC算法中的数据层排序步骤,给出一种低阶模态数据层优先检测的OS-IC算法。

抑制干扰的加权矢量可以基于迫零、最小均方误差准则获取,因此将OSIC算法分为基于迫零准则的排序连续干扰消除(Zero Forcing criterion with Ordered Successive Interference Cancellation, ZF-OSIC)和基于最小均方误差准则的排序连续干扰消除(Minimum Mean Squared Error criterion with Ordered Successive Interference Cancellation, MMSE-OSIC);而本文OAM-OSIC算法同样可以分为基于迫零准则的排序连续干扰消除

(Orbital Angular Momentum with Zero Forcing criterion with Ordered Successive Interference Cancellation, OAM-ZF-OSIC)和基于最小均方误差准则排序连续干扰消除(Orbital Angular Momentum with Minimum Mean Squared Error criterion with Ordered Successive Interference Cancellation, OAM-MMSE-OSIC)算法。

以ZF-OSIC为例,假设接收到的信号 $\mathbf{r}$ ,产生一个对第 $k$ 层对应的加权向量 $\mathbf{W}_k$ ,将 $\mathbf{W}_k$ 与 $\mathbf{r}$ 相乘

$$\mathbf{W}_k \mathbf{r} = \mathbf{W}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{W}_k \mathbf{n} \quad (17)$$

其中,  $X_k$ 对应第 $k$ 层的发送数据,  $\mathbf{n}$ 是高斯白噪声。此时第 $k$ 层检测后信噪比表示为

$$\text{SNR}_k = \frac{\langle |\mathbf{X}_k|^2 \rangle}{\sigma^2 \|\mathbf{W}_k\|^2} \quad (18)$$

其中,分子表示第 $k$ 层符号的发射功率,分母表示噪声功率与加权矢量范数平方的乘积。从式(18)可以看出,每一层检测信噪比与行范数成反比,因此可以从范数小的数据层开始检测,降低大信噪比数据层对其他数据层的干扰。虽然MMSE-OSIC算法通常根据信干噪比进行顺序检测,为了便于分析,本文采用行范数排序规则。

表2给出了OSIC算法在VBLAST-OAM系统中的实施步骤。

#### 3.2 基于MRF-BP的VBLAST-OAM复用系统

图2是基于马尔科夫随机场的概率图模型。可以看出,马尔科夫随机场中存在许多相互连接的节点,节点又可以分为观察节点和隐藏节点。如果将上述模型与OAM复用系统相对应,那么图中任意观察节点对应从任意模态的OAM上解调信息 $y_i$ ,

表2 OSIC算法

初始化: 复用的OAM数目 $N_t$ , 串扰信道 $H$ , 接收到的信号 $\mathbf{r}$ , 噪声方差 $\sigma^2$
(1) For $j = 1 : N_t$
(2) 加权矢量 $\mathbf{W}$ : 基于ZF/MMSE准则: $\mathbf{W} = \text{pinv}(H) / \text{pinv}(H^H + \sigma^2 \times I_{N_t - j + 1}) \times H^H$
(3) 首先对 $\mathbf{W}$ 的每一行求范数,并对范数排序,选取最小范数行 $k$ (OSIC)
(4) 省略步骤(3)(OAM-OSIC)
(5) $y(k) = \mathbf{W}(k, :) \times \mathbf{r}$ 判决统计量(优化前)
(6) $y(k) = \mathbf{W}(1, :) \times \mathbf{r}$ 判决统计量(优化后)
(7) 根据数据判决得到 $x(k)$
(8) $\mathbf{r} = \mathbf{r} - x(k) \times H$ 消除前一次检测的数据
(9) $H(:, k) = []$ 将信道矩阵的第 $k$ 列清除(优化前) $H(:, 1) = []$ 将信道矩阵的第1列清除(优化后)
(10) 重复步骤(2),更新 $\mathbf{W}$
(11) End For

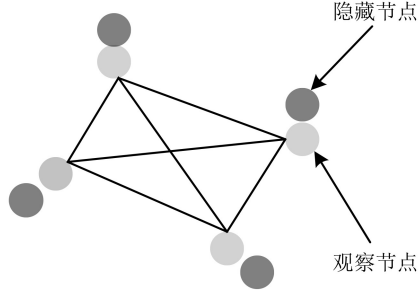


图2 基于MRF的BP信号检测模型

隐藏节点对应任意模态OAM上加载的信息 $x_i$ 。此外，观察节点与隐藏节点的关系可以用相容函数 $\phi_i(x_i)$ 描述，同样将相邻隐藏节点的关系用势函数 $\psi_{i,j}(x_i, x_j)$ 描述。MRF-BP算法就是利用置信度传播(Belief Propagation, BP)算法对马尔科夫随机场中的各个节点的状态信息不断更新，当算法达到收敛时，即可估计出隐藏节点的状态信息概率。光无线OAM复用系统中，场内隐藏节点的联合概率<sup>[25]</sup>

$$p(x) = \frac{1}{Z} \prod_i \phi_i(x_i, y_i) \prod_{i,j} \psi_{i,j}(x_i, x_j) \quad (19)$$

其中， $Z$ 称配分函数，保证分布函数标准化。利用BP算法可以将实现信息在场内节点相互传递，从而更新MRF中各个节点状态。将节点 $j$ 传递到节点 $i$ 的信息表示为 $m_{j,i}(x_i)$ ，节点 $i$ 的置信度用 $b_i(x_i)$ ，那么 $b_i(x_i)$ 可以表示为

$$b_i(x_i) \propto \phi_i(x_i) \prod_{j \in N(i)} m_{j,i}(x_i) \quad (20)$$

$N(i)$ 表示节点 $i$ 的相邻节点集合，从节点 $j$ 到节点 $i$ 的传递信息近似表示

$$m_{j,i}(x_i) \propto \sum_{x_j} \phi_j(x_j) \psi_{i,j}(x_i, x_j) \prod_{k \in N(j) \setminus i} m_{k,j}(x_j) \quad (21)$$

利用势函数及相容函数，可以将信息的传递与更新构建成一个迭代过程。由于多模态OAM在复杂环境传播后会出现模态间的相互串扰，因此基于OAM的马尔科夫随机场是全连接图，此时算法的收敛性较差，最终得到的信息存在较大误差。本文采用信息阻尼的方式加速算法收敛，具体操作就是把上一次迭代得到的估计值与新的估计值各自分配一个加权系数，每次得到的估计值是新旧估计值的加权组合。 $m_{i,j}^t(x_j)$ 是 $t$ 次迭代时，节点 $i$ 到 $j$ 的新信息，那么更新的信息为<sup>[26]</sup>

$$\begin{aligned} \bar{m}_{i,j}^t(x_j) &\propto \sum_{x_i} \phi_i(x_i) \psi_{i,j}(x_i, x_j) \left\{ \prod_{k \in N(i) \setminus j} m_{k,i}^{t-1}(x_i) \right\} \\ m_{i,j}^t(x_j) &= a_m m_{i,j}^{t-1}(x_j) + \{(1 - a_m) \bar{m}_{i,j}^t(x_j)\} \end{aligned} \quad (22)$$

其中， $\alpha_m \in [0, 1]$ 是信息阻尼因子，取0.2。基于马尔科夫随机场模型的VBLAST-OAM系统信息后验概率表示为

$$p(x|y, \mathbf{H}) = \left( \prod_{i \neq j} \exp(-x_i \Re(R_{i,j}) x_j) \right) \times \left( \prod_i \exp(x_i \Re(z_i) + \ln p(x_i)) \right) \quad (23)$$

其中， $R = (1/\delta^2) \mathbf{H}^H \mathbf{H}$ ， $z = (1/\delta^2) \mathbf{H}^H y$ 。将式(19)与式(23)比较，可以得到两者的关系

$$\psi_{i,j}(x_i, x_j) = \exp(-x_i \Re(R_{i,j}) x_j) \quad (24)$$

$$\phi_i(x_i) = \exp(x_i \Re(z_i) + \ln p(x_i)) \quad (25)$$

将MRF-BP算法应用于VBLAST-OAM系统，详细的实施步骤如表3所示。

表3 MRF-BP算法

初始化: $m_{i,j}^0 = b_i^0$ , $z, R, p(x_i = 1) = p(x_i = -1), \forall i, j \in (1, 2, \dots, N)$ , $M$ 是信息迭代次数
(1) For $i = 1 : N$ 势函数
(2) For $j = 1 : N$ $i \neq j$
(3) 根据式(24)计算 $\psi_{i,j}$ ;
(4) End For
(5) End For
(6) For $i = 1 : N$ 相容函数
(7) 根据式(25)计算 $\phi_i$ ;
(8) End For
(9) For $t = 1 : M$ 迭代更新
(10) For $i = 1 : N$
(11) For $j = 1 : N$ $i \neq j$
(12) 第 $t$ 次迭代得到更新的信息 $\bar{m}_{i,j}^t$ ，利用信息阻尼方式得到新信息 $m_{i,j}^t$ ;
(13) End For
(14) End For
(15) End For
(16) For $i = 1 : N$ 置信度计算
(17) 根据式(20)计算置信度 $b_i$ ;
(18) End For

#### 4 仿真参数设置及结果分析

仿真参数：光束波长 $\lambda = 1.55 \times 10^{-6}$  m，传播距离 $z = 1$  km， $l_0 = 0.001$  m， $L_0 = 50$  m，栅格数为300，调制方式为二进制相移键控(Binary Phase Shift Keying, BPSK)。

#### 4.1 大气湍流、孔径失配场景下的OAM模式谱分析

本节首先对复杂场景下OAM的模式纯度进行分析,之后分析多模式OAM之间的串扰特征。

图3是大气湍流、孔径失配条件下的OAM模式纯度3D图。仿真选择模式为3的OAM,从图中可以看出,随着倾斜角、湍流强度的增大,接收端检测到的OAM模式纯度逐渐降低。表明OAM模式纯度会受到多种外界条件的影响,大气湍流、孔径失配均会对OAM的模式纯度带来一定程度的影响。

为了直观地描述式(11)中的模式串扰,图4给出了单模式OAM及多模式OAM的能量串扰分布图谱。仿真参数:折射率结构常数 $C_n^2 = 1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ ,角向倾斜角 $\gamma = 5 \times 10^{-5} \text{ rad}$ 。图4(a)是 $l = 1$ 的OAM模式串扰分布图谱,虽然仅发送了 $l = 1$ 的OAM,但检测时,却得到了除 $l = 1$ 外其他模式的能量。图4(b)是与图4(a)同等仿真条件下, $l = 3$ 的OAM的模式串扰图谱,两个模式的OAM具有类似的串扰规律,唯一不同的是 $l = 3$ 的OAM主模式能量低于 $l = 1$ 的主模式能量,可以看出,OAM模式值越大,发散性越严重。图4(c)是 $l = 1$ 与 $l = 3$ 的OAM复用后的串扰图谱,结合图4(a)及图4(b)可以看出 $l = 1$ 和 $l = 3$ 的OAM复用后主模式能量明显高于单模式条件下的能量,由于不同OAM间的能量

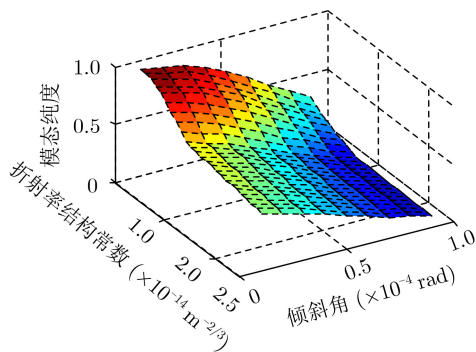


图3 不同大气湍流、倾斜角条件下的模式纯度

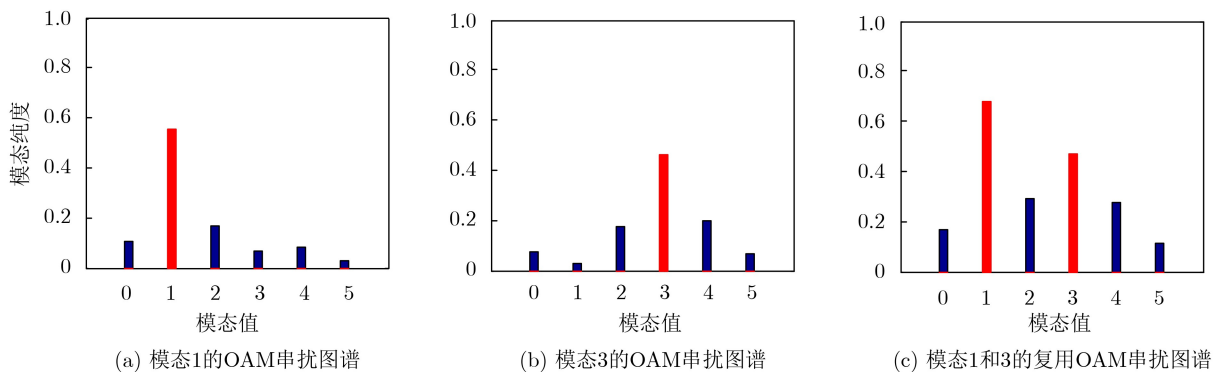


图4 单值OAM及复用OAM串扰图谱

发生了串扰。接下来,分析模式串扰对多模OAM通信系统带来的影响,并从信号检测的角度降低复杂环境下OAM通信系统误码率。

#### 4.2 基于信号检测的VBLAST-OAM性能分析

图5是VBLAST-OAM通信系统的误码率随着信噪比变化曲线。仿真参数:角向倾斜角 $\gamma = 5 \times 10^{-5} \text{ rad}$ ,折射率结构常数 $C_n^2 = 1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ ,选择模式 $l = 1$ 和 $l = 3$ 的OAM。从图中可以看出,未采用本文算法时,随着信噪比的增加,系统误码率下降非常微弱,且信噪比达到一定数值,误码率几乎不再下降;而采用本文算法后的系统误码率呈现快速下降趋势,在很大程度上改善了原有系统性能。例如,在信噪比为18 dB时,基于MRF-BP的系统相较采用本文算法前的系统,误码率大约下降了2.2个数量级;而OAM-OSIC算法与传统的OSIC算法性能几乎保持一致,系统误码率大约下降了1.6~1.9个数量级。另外,根据表2中OSIC算法可知,OAM-OSIC算法省去传统OSIC算法中的求解加权矩阵行范数及范数排序两个步骤,结合图5及图6可知,OAM-OSIC算法在保证性能不变的前提下,能够降低程序运行的计算开销。虽然基于MRF-BP的系统表现出最佳的性能,但程序的运行开销较大;而OAM-OSIC虽然属于次优类算法,却在算法计算开销方面有明显优势。

图7是角向倾斜角 $\gamma = 5 \times 10^{-5} \text{ rad}$ 时,系统误码率随着折射率结构常数的变化曲线。仿真参数:OAM模式选择1和3,信噪比为18 dB。从图中可以看出,随着折射率结构常数的增加,虽然系统误码率处于不断上升状态,但采用本文算法的系统性能得到了明显改善。例如,折射率结构常数 $C_n^2 = 1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 时,基于MRF-BP的系统误码率相对采用本文算法前,大约降低了2个数量级;而基于OSIC的系统误码率下降了1.4~1.8个数量级。虽然本文算法可以在一定程度上改善系统性能,但是随着湍流强度的增大,系统的性能依旧在不断下降。

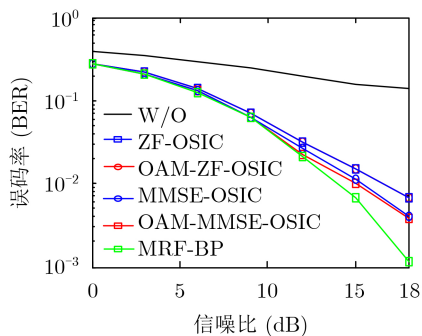


图 5 不同信噪比下的系统误码率变化曲线

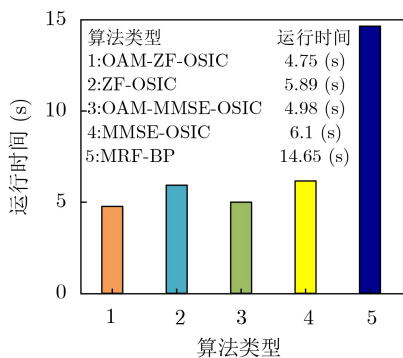


图 6 算法运行时间对比

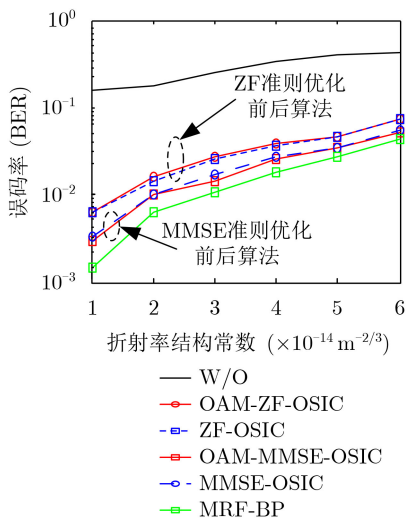


图 7 不同湍流强度下的系统误码率曲线

图8是折射率结构常数为 $C_n^2 = 1 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 时，系统误码率随着角向倾斜角的变化曲线。仿真参数：OAM模态选择1和3，信噪比为18 dB。从图中可以看出，随着倾斜角的增大，系统误码率在逐渐上升，表明孔径失配带给OAM通信系统不可忽视的影响。此外，孔径失配条件下，基于OAM-OSIC的系统误码率依旧能够与传统的OSIC算法性能保持一致。可以推断出，孔径失配造成的模态串扰现象与大气湍流造成的串扰现象类似，基于大气湍流特性的OAM-OSIC算法同样适应于孔径失配角向

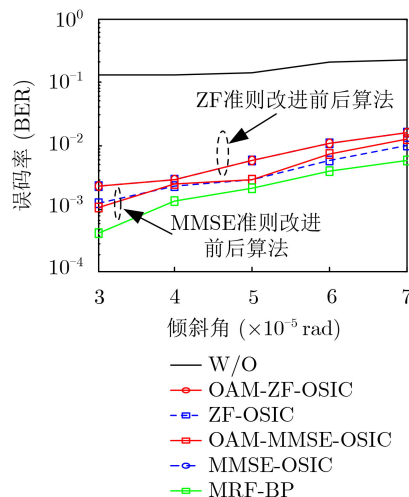


图 8 不同倾斜角下的系统误码率曲线

倾斜的OAM系统。由图8看出，基于MRF-BP算法的系统依旧保持最佳的性能，而OAM-OSIC仍然属于次优算法。例如，在倾斜角 $\gamma = 3 \times 10^{-5} \text{ rad}$ 时，基于MRF-BP的系统相对未采用本文算法的系统，误码率下降了2.6个数量级；而基于OAM-ZF-OSIC和OAM-MMSE-OSIC的系统误码率分别降低了1.7个和2个数量级。

### 5 结论

本文首先建立了大气湍流、孔径失配场景下的VBLAST-OAM复用通信系统，并对该系统进行相应的理论推导；之后，分析了OAM在复杂环境下模态纯度变化特征；最后，对比分析了OSIC, OAM-OSIC, MRF-BP应用于VBLAST-OAM系统中的性能。结果表明，OAM的模态纯度受多个外界条件的影响，且本文所提算法均能提升VBLAST-OAM系统在复杂场景的性能。当系统开销没有受到严格限制时，MRF-BP算法可以作为一个可靠的应用方案；OAM-OSIC虽然属于次优算法，但在系统开销受限的条件下，可以作为一个优秀的备选方案。

### 参考文献

[1] 郭忠义, 龚超凡, 刘洪郡, 等. OAM光通信技术研究进展[J]. 光电工程, 2020, 47(3): 190593. doi: 10.12086/OEE.2020.190593.  
 GUO Zhongyi, GONG Chaofan, LIU Hongjun, et al. Research advances of orbital angular momentum based optical communication technology[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(3): 190593. doi: 10.12086/OEE.2020.190593.

[2] 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. doi: [10.1103/PHYSREVA.45.8185](https://doi.org/10.1103/PHYSREVA.45.8185).
- [3] GIBSON G, COURTIAL J, PADGETT M J, *et al.* Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum[J]. *Optics Express*, 2004, 12(22): 5448–5456. doi: [10.1364/OPEX.12.005448](https://doi.org/10.1364/OPEX.12.005448).
- [4] WANG Jian, YANG J Y, FAZAL I M, *et al.* Demonstration of 12.8-bit/s/Hz spectral efficiency using 16-QAM signals over multiple orbital-angular-momentum modes[C]. 2011 37th European Conference and Exhibition on Optical Communication, Geneva, Switzerland, 2011: 1–3.
- [5] HUANG Hao, REN Yongxiong, YAN Yan, *et al.* Performance analysis of spectrally efficient free-space data link using spatially multiplexed orbital angular momentum beams[C]. SPIE 8647, Next-Generation Optical Communication: Components, Sub-Systems, and Systems II, San Francisco, USA, 2013: 864706.
- [6] WANG Jian, LI Shuhui, LI Chao, *et al.* Ultra-high 230-bit/s/Hz spectral efficiency using OFDM/OQAM 64-QAM signals over Pol-Muxed 22 orbital angular momentum (OAM) modes[C]. OFC 2014, San Francisco, USA, 2014: 1–3.
- [7] CHEN Rui, ZHOU Hong, MORETTI M, *et al.* Orbital angular momentum waves: Generation, detection, and emerging applications[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2020, 22(2): 840–868. doi: [10.1109/COMST.2019.2952453](https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2952453).
- [8] 廖希, 周晨虹, 王洋, 等. 面向无线通信的轨道角动量关键技术研究进展[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(7): 1666–1677. doi: [10.11999/JEIT190372](https://doi.org/10.11999/JEIT190372).  
LIAO Xi, ZHOU Chenhong, WANG Yang, *et al.* A survey of orbital angular momentum in wireless communication[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(7): 1666–1677. doi: [10.11999/JEIT190372](https://doi.org/10.11999/JEIT190372).
- [9] 邹丽, 王乐, 张士兵, 等. 基于波前校正的轨道角动量复用通信系统抗干扰研究[J]. 通信学报, 2015, 36(10): 76–84. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2015264](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2015264).  
ZOU Li, WANG Le, ZHANG Shibing, *et al.* Compensation of orbital-angular-momentum multiplexed communication system with wavefront correction[J]. *Journal on Communications*, 2015, 36(10): 76–84. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2015264](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2015264).
- [10] ZOU Li, WANG Le, ZHAO Shengmei, *et al.* Turbulence mitigation scheme based on multiple-user detection in an orbital-angular-momentum multiplexed system[J]. *Chinese Physics B*, 2016, 25(11): 114215. doi: [10.1088/1674-1056/25/11/114215](https://doi.org/10.1088/1674-1056/25/11/114215).
- [11] ZHAO Shengmei, WANG Le, ZOU Li, *et al.* Both channel coding and wavefront correction on the turbulence mitigation of optical communications using orbital angular momentum multiplexing[J]. *Optics Communications*, 2016, 376: 92–98. doi: [10.1016/J.OPTCOM.2016.04.075](https://doi.org/10.1016/J.OPTCOM.2016.04.075).
- [12] ZOU Li, WANG Le, and ZHAO Shengmei. Turbulence mitigation scheme based on spatial diversity in orbital-angular-momentum multiplexed system[J]. *Optics Communications*, 2017, 400: 123–127. doi: [10.1016/J.OPTCOM.2017.05.022](https://doi.org/10.1016/J.OPTCOM.2017.05.022).
- [13] ZHANG Yan, WANG Ping, GUO Lixin, *et al.* Performance analysis of an OAM multiplexing-based MIMO FSO system over atmospheric turbulence using space-time coding with channel estimation[J]. *Optics Express*, 2017, 25(17): 19995–20011. doi: [10.1364/OE.25.019995](https://doi.org/10.1364/OE.25.019995).
- [14] YOUSIF B B and ELSAYED E E. Performance enhancement of an orbital-angular-momentum-multiplexed free-space optical link under atmospheric turbulence effects using spatial-mode multiplexing and hybrid diversity based on adaptive MIMO equalization[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 84401–84412. doi: [10.1109/ACCESS.2019.2924531](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2924531).
- [15] WANG Lei, JIANG Fa, CHEN Mingkai, *et al.* Interference mitigation based on optimal modes selection strategy and CMA-MIMO equalization for OAM-MIMO communications[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 69850–69859. doi: [10.1109/ACCESS.2018.2880988](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2880988).
- [16] DEDO M I, WANG Zikun, GUO Kai, *et al.* Retrieving performances of vortex beams with GS algorithm after transmitting in different types of turbulences[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(11): 2269. doi: [10.3390/app9112269](https://doi.org/10.3390/app9112269).
- [17] AMHOUD E M, TRICHILI A, OOI B S, *et al.* OAM mode selection and space-time coding for atmospheric turbulence mitigation in FSO communication[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 88049–88057. doi: [10.1109/ACCESS.2019.2925680](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2925680).
- [18] SONG Haoqian, SONG Hao, ZHANG Runzhou, *et al.* Experimental mitigation of atmospheric turbulence effect using pre-signal combining for Uni- and Bi-directional free-space optical links with two 100-Gbit/s OAM-multiplexed channels[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(1): 82–89. doi: [10.1109/JLT.2019.2933460](https://doi.org/10.1109/JLT.2019.2933460).
- [19] VASNETSOV M V, PAS'KO V A, and SOSKIN M S. Analysis of orbital angular momentum of a misaligned optical beam[J]. *New Journal of Physics*, 2005, 7(1): 46. doi: [10.1088/1367-2630/7/1/046](https://doi.org/10.1088/1367-2630/7/1/046).
- [20] 黎芳, 江月松, 唐华, 等. 光束偏移对轨道角动量信息传输系统的影响[J]. 物理学报, 2009, 58(9): 6202–6209. doi: [10.7498/APS.58.6202](https://doi.org/10.7498/APS.58.6202).  
LI Fang, JIANG Yuesong, TANG Hua, *et al.* Influences of misaligned optical beam carrying orbital angular momentum

- on the information transfer[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(9): 6202–6209. doi: [10.7498/APS.58.6202](https://doi.org/10.7498/APS.58.6202).
- [21] KHALIGHI M A and UYSAL M. Survey on free space optical communication: A communication theory perspective[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2014, 16(4): 2231–2258. doi: [10.1109/COMST.2014.2329501](https://doi.org/10.1109/COMST.2014.2329501).
- [22] 张明明. 离轴涡旋光束的传输特性研究[D]. [硕士论文], 南京理工大学, 2014. doi: [10.7666/d.Y2520561](https://doi.org/10.7666/d.Y2520561).  
ZHANG Mingming. Study on the propagation characteristics of off-axis vortex beams[D]. [Master dissertation] Nanjing University of Science and Technology, 2014. doi: [10.7666/d.Y2520561](https://doi.org/10.7666/d.Y2520561).
- [23] BRIANTCEV D, TRICHILI A, OOI B S, *et al.* Crosstalk suppression in structured light free-space optical communication[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2020, 1: 1623–1631. doi: [10.1109/OJCOMS.2020.3029116](https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2020.3029116).
- [24] LOU Hanqiong, GE Xiaohu, and LI Qiang. The new purity and capacity models for the OAM-mmWave communication systems under atmospheric turbulence[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 129988–129996. doi: [10.1109/ACCESS.2019.2940691](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2940691).
- [25] HAZAN T and SHASHUA A. Norm-product belief propagation: Primal-dual message-passing for approximate inference[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2010, 56(12): 6294–6316. doi: [10.1109/TIT.2010.2079014](https://doi.org/10.1109/TIT.2010.2079014).
- [26] WEISS Y, YANOVER C, and MELTZER T. MAP estimation, linear programming and belief propagation with convex free energies[J]. arXiv: 1206.5286, 2012.
- 王洋：男，1986年生，副教授，硕士生导师，研究方向为轨道角动量无线通信、信道建模、智能信息调制表面等。
- 崔健：男，1995年生，硕士生，研究方向为轨道角动量产生与传播。
- 廖希：女，1988年生，讲师，博士，研究方向为电波传播、射频与微波电子学、信道建模等。
- 曾彦志：男，1996年生，硕士生，研究方向为电磁涡旋雷达成像。
- 张杰：男，1967年生，教授，博士，研究方向为涡旋电磁波、毫米波通信、智能环境建模与设计等。

责任编辑：余蓉