

Simulation of Transmission System Based on Orbital Angular Momentum

Honglin Jiang^{1,2}, Wenxing Wang², Jingjing Yang², Ming Huang²

¹Honghe State Radio Management Office, Mengzi Yunnan

²Key Laboratory for Spectrum Sensing and Borderlands Radio Safety of High Education in Yunnan Province, Kunming Yunnan

Email: huangming@ynu.edu.cn

Received: May 23rd, 2018; accepted: Jun. 12th, 2018; published: Jun. 19th, 2018

Abstract

As a novel, safe and high efficient spectrum utilization technology, orbital angular momentum (OAM) has attracted a great deal of attention in scientific community. Based on Matlab toolbox, OAM transmission system using FSK modulation is established. The effect of OAM mode number and multiple M-ary frequency-shift keying on bit error rate is analyzed. A simulation model of OAM multiplexing transmission system was established, and the error performance of the multiplexing transmission system was studied. The orthogonality of different OAM modes and the principle of efficient use of spectrum are verified by simulation. A multi-path OAM transmission system model is established, and the relationship between the bit error rate and the signal-to-noise ratio of the transmission system when using different baseband modulation and demodulation methods is studied. Finally, a Matlab-based GUI interface was designed to display the electric field intensity, energy density, phase change, multiplex transmission, coding and decoding process in OAM transmission system, and the security of OAM transmission was discussed.

Keywords

Wireless Communication, Radio Spectrum, Orbital Angular Momentum, Transmission System Model, Matlab

基于轨道角动量的传输系统仿真

蒋洪林^{1,2}, 王文星², 杨晶晶², 黄 铭²

¹红河州无线电管理办公室, 云南 蒙自

²云南省高校谱传感与边疆无线电安全重点实验室, 云南 昆明

Email: huangming@ynu.edu.cn

收稿日期: 2018年5月23日; 录用日期: 2018年6月12日; 发布日期: 2018年6月19日

摘要

轨道角动量作为一种新的、高效利用无线电频谱的安全复用传输方式引起了科学界的关注。基于Matlab工具箱,建立了采用FSK调制方式的轨道角动量传输系统仿真模型,研究了OAM模式数和多进制频移键控M-FSK进制数M对误码率的影响;建立了OAM复用传输系统仿真模型,研究了复用传输系统的误码性能,验证了不同OAM模式的正交性,以及高效利用频谱的原理;建立了多径OAM传输系统模型,研究了采用不同的基带调制解调方式时,传输系统误码率与信噪比的关系。最后,设计了基于Matlab的GUI界面,进行了OAM传输系统中电场强度、能量密度、相位变化、复用传输和编解码过程的展示,讨论了OAM传输的安全性。

关键词

无线通信, 无线电频谱, 轨道角动量, 传输系统模型, Matlab

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

由于光具有波粒二象性,光量子具有纠缠性,因此光轨道角动量矩(OAM: Orbital Angular Momentum)在量子信息处理和光通信领域有广泛的应用[1] [2] [3]。然而, OAM 在无线电频段的应用非常少。2012年, Tamburini 等[4]采用螺旋抛物面天线产生 OAM, 并首次实现了相同频率下的无线 OAM 多路复用传输, 随后无线电频段的 OAM 传输成为研究的热点[5] [6] [7] [8] [9]。与传统的时分复用、频分复用、码分复用和空分复用方式不同, OAM 传输模式具有正交性, 模式数 l 可取负无穷到正无穷之间的任意整数, 因此从理论上讲 OAM 复用的频率利用率可趋于无限大, 有望彻底解决无线电频谱稀缺的问题[10]。

2014年, Demeter 等人[11]建立了基于 OAM 的自由空间通信仿真模型, 研究了 FSK、PSK、QAM 基带调制的传输系统性能, 结果证明在 OAM 信道保持正交的前提下, 系统误码率接近标准加性高斯白噪声(AWGN: Additive White Gaussian Noise)信道下的通信系统性能。最近, Li 等人[12]提出并论证了一种基于机器学习, 用于改善湍流信道下 OAM 无线光传输系统性能的 m 序列自适应解调器, 在接收端无额外空间光调制器和数字信号处理器的情况下, 采用卷积神经网络构建的自适应解调器能有效的将不同 OAM 模式的强度序列转换为初始信号。Wang 等人[13]提出了一种基于 OAM 的 MIMO (OAM-based MIMO: OAM-based multiple-input multiple-output)信道模型, 并进行了理论和仿真研究, 结果表明, 当传输距离大于特定值时, OAM-based MIMO 通信系统的容量优于传统的 MIMO 通信系统。Basar [14]提出了一种具有指数调制的轨道角动量(OAM-IM: OAM with index modulation)复用传输方案, 通过仿真证明, 在相同的检测复杂性的前提下, OAM-IM 复用传输系统的误码性能优于基于 OAM 的模分复用(OAM-based MDM: OAM-based mode division multiplexing)传输方式。Chen 等[5]提出了一种宽带 OAM-OFDM 无线通信系统架构, 结果表明, 与现存的射频模拟相移器产生和接收 OAM 的通信架构相比, 采用基带数字 2-D-FFT 通信架构可以减少能量消耗和硬件价格。

受上述思想的启发, 本文分别建立了 AWGN 信道和多径信道下 OAM 传输系统模型; 设计了基于 Matlab 的 GUI 界面, 进行了 OAM 传输系统中电场强度、能量密度、相位变化、复用传输和编解码过程

的展示。通过仿真得到了 OAM 复用传输系统的性能，验证了 OAM 模式的正交性、安全性，以及高效利用频谱的原理。这对探索新的复用传输技术，改善复用传输系统性能和频谱利用率具有重要意义。

2. 基于 FSK 调制的 OAM 传输系统仿真

2.1. 仿真模型

基于 FSK 调制的 OAM 传输系统仿真模型如图 1 所示。模型由 Bernoulli 二进制序列信号发生器、2-FSK 基带调制器、OAM 编码器、AWGN 信道模块、OAM 解码器、2-FSK 基带解调器和误码率计算等模块组成。仿真时，信号发生器每帧采样数为 100，2-FSK 基带调制和解调模块每帧采样数为 10，OAM 编解码模块采样数为 1000。

误码率计算是分析系统性能的关键，MATLAB 本身自带了误码率计算工具，可以在命令窗口中输入 bertool 调用。使用时，需要设置 AWGN 的信道参数，Mode 项选择 Signal to noise ratio(E_b/N_0)，设置参数为 E_bN_0 。Error Rate Calculation 模块需要勾选 Stop simulation，并设置两个参数为 maxNumErrs 和 maxNumBits。由于该工具需要接收工作区的数据，所以要将 Error Rate Calculation 模块添加到 To Workspace 模块，并设置参数 E_bN_0 。最后需要将三个参数初始化($E_bN_0 = 0$; maxNumErrs = 100; maxNumBits = 1e8)，并保存在工作区。设置好误码率计算工具后，在不同的 OAM 模式数下，即可得到误码率与信噪比的关系曲线。

2.2. 结果与讨论

首先，仿真了调制方式为 2-FSK 时，OAM 模式数对误码率的影响，结果见图 2 所示。从图中可以看出 OAM 模式数 l 为分别为 1、2、3 时，在相同的信噪比(E_b/N_0)下，模式数越多，误码率(BER)越高；在相同的误码率下，模式数越多，传输的信息量越大，需要的信噪比越高。

其次，仿真了 OAM 模式数 l 为 2 时，多进制频移键控(M-FSK)调制方式中不同 M 值下信噪比与误码率的关系，见图 3 所示。结果表明，信噪比相同的情况下，M 越小，误码率越小，也就是说调制效果也越好；在相同的误码率下，M 越大，传输的信息量越大，需要的信噪比越高。以上结论与通信原理中

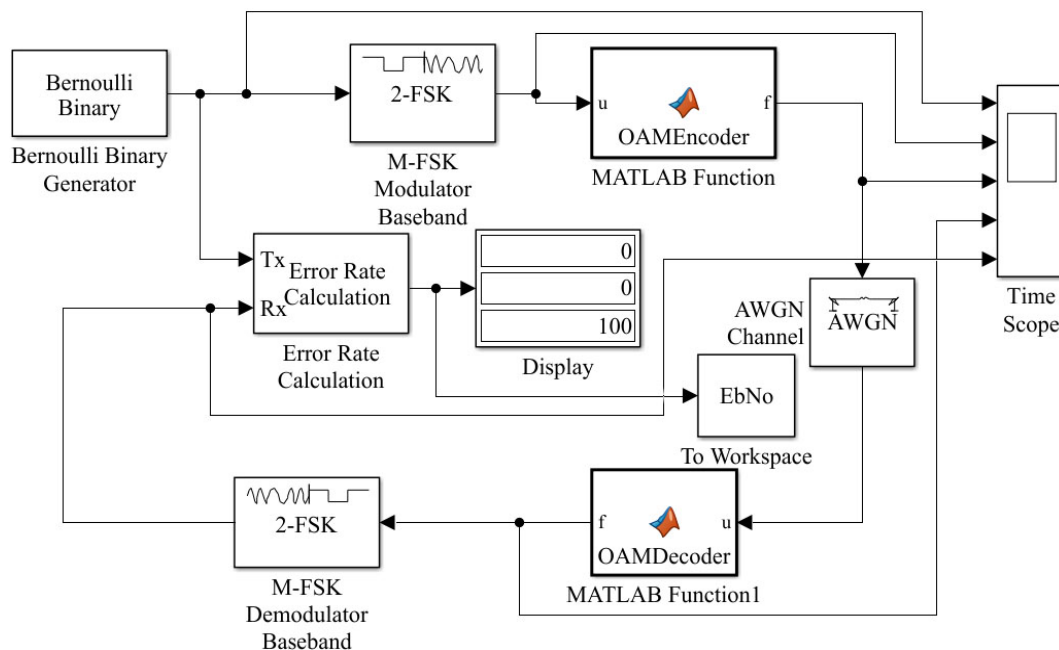


Figure 1. Simulation model of OAM transmission system based on FSK modulation

图 1. 基于 FSK 调制的 OAM 传输系统仿真模型

多进制调制系统的性能结论相同[15]。

3. OAM 复用传输系统仿真

3.1. 仿真模型

基于 OAM 模式的正交性, 可实现 OAM 复用传输, 图 4 演示了模式的正交性。图中, 信道左侧为四个不同模式数 l 的 OAM 发射端, 右侧为 OAM 接收系统。仿真结果表明, 右侧接收系统只能接收与左侧 OAM 模式数相同的发射信号。基于此, 设计了图 5 所示的四通道 OAM 复用传输系统模型。图中, 信道

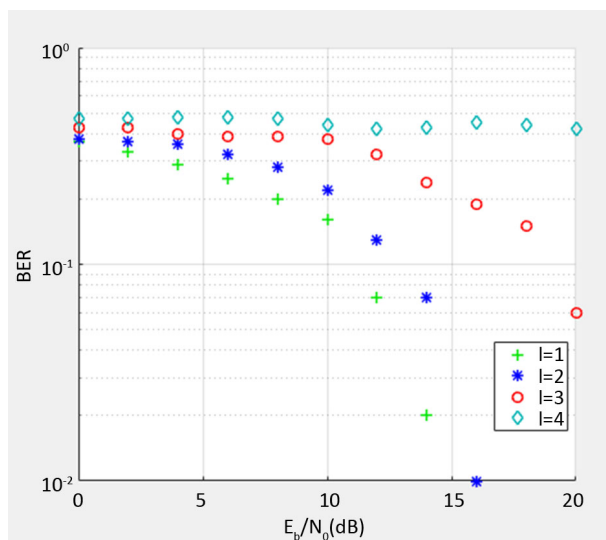


Figure 2. The relationship between bit error rate and signal-to-noise ratio of different OAM modes under 2-FSK modulation

图 2. 2-FSK 调制下, 不同 OAM 模式数的误码率与信噪比的关系

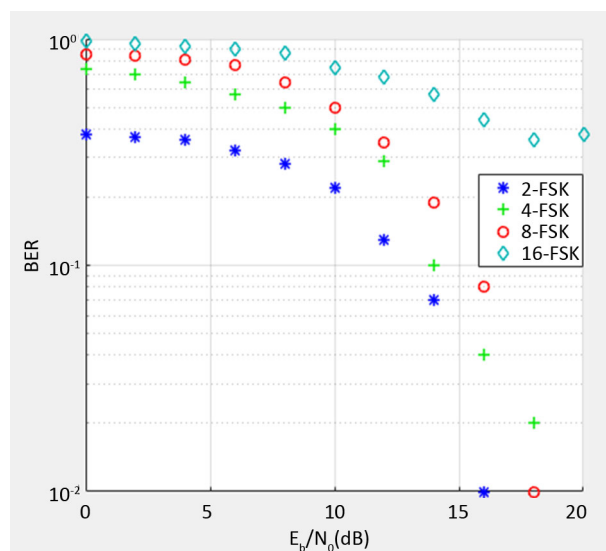


Figure 3. The relation between error rate and signal to noise ratio for different M and $l = 2$

图 3. $l = 2$, M 值不同时误码率与信噪比的关系

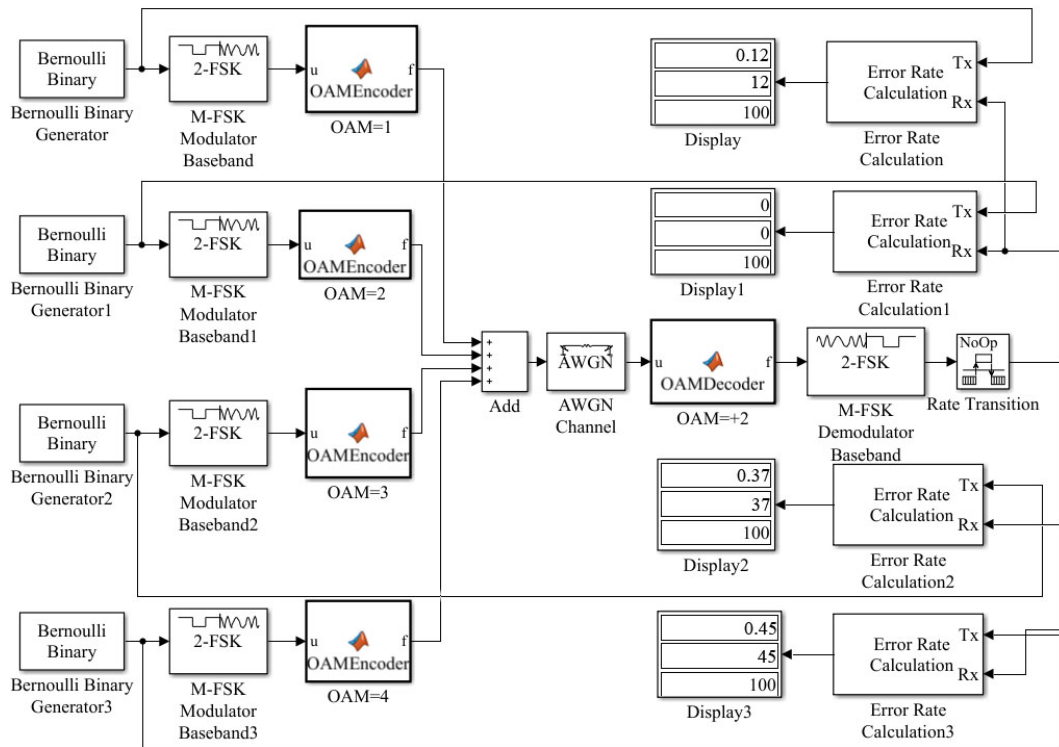


Figure 4. Verification model for OAM orthogonality
图 4. OAM 模式正交性验证模型

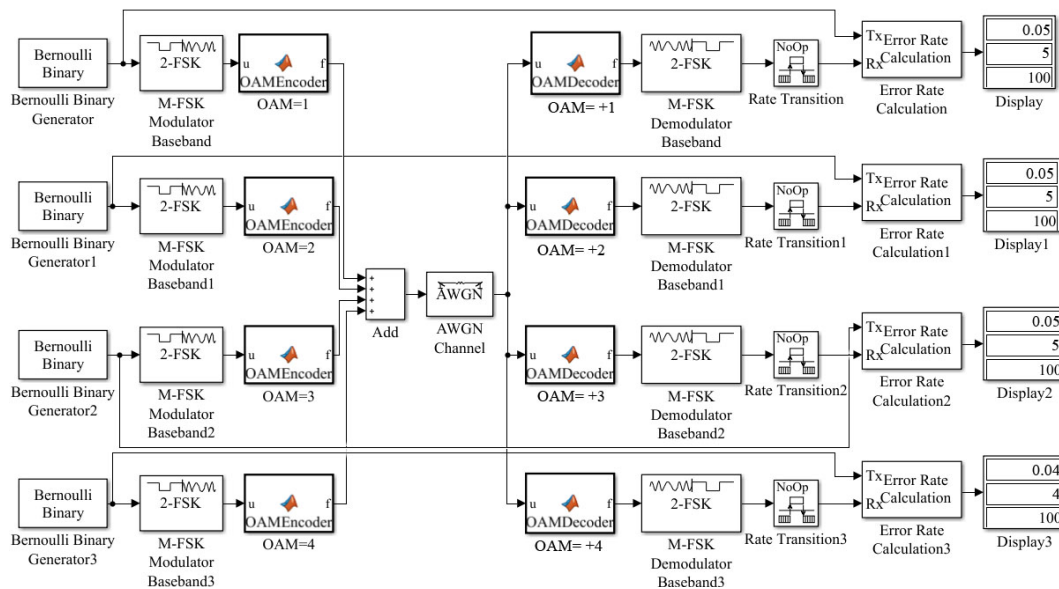


Figure 5. Four-channel OAM multiplexing transmission system model
图 5. 四通道 OAM 复用传输系统模型

左侧为四个不同模式数 l 的发射端，右侧为相应 OAM 模式数的四个接收系统。

3.2. 结果与讨论

在图 4 所示的 OAM 模式正交性验证模型中，发射端的模式数分别为 1、2、3 和 4，仿真结果表明，

接收端模式数为 2 时, 可以完美的接收到左侧 OAM 模式数为 2 的发射机传输过来的信息, 而左侧其它模式数的发射机传输的信号是不能接收到的, 这证明了 OAM 的模式正交性。

在图 5 所示的四通道 OAM 复用传输系统模型中, 左侧的发射端 OAM 模式数分别为 1、2、3 和 4, 右侧配备了相应模式数的 OAM 接收系统。仿真结果表明, 右侧接收系统可以完美的接收到左侧对应四个通道发送的信号, 不同 OAM 模式数下的接收误码率与信噪比的关系与图 2 相同。由于 OAM 的模式具有正交性, 并且模式数 l 可取任意正或负整数, 因此采用 OAM 复用传输系统从理论上可以无限的提高无线电频谱的利用率。

4. 多径 OAM 传输系统仿真

4.1. 仿真模型

为了研究信道特性对传输系统的影响, 建立了图 6 所示的多径 OAM 传输系统模型。图中, 在 AWGN 信道的右侧增加了多径 Rician Fading 信道, 以比较多径信道对传输的影响。

4.2. 结果与讨论

在图 6 所示的多径 OAM 传输系统模型中, 通过参数设置和仿真可以得到图 7(a)所示的在不同 OAM 模式数下信噪比与误码率的关系。由图可见, 在相同的信噪比(E_b/N_0)下, 模式数越多, 误码率(BER)越高; 在相同的误码率下, 模式数越多, 传输的信息量越大, 但需要的信噪比越高。与图 2 所示的没有多径效应影响情况比较可见, 在相同的信噪比下, 由于多径效应的影响, OAM 传输系统误码率增加, 传输可靠性降低。

为了研究不同基带调制方式对 OAM 传输系统性能的影响, 将图 6 中 FSK 调制解调模块替换为 BPSK 模块, 并进行仿真, 结果见图 7(b)所示。由图可以看出, 在相同的信噪比下, BPSK 调制方式误码率更高, 这说明相移调制更容易受到多径效应的影响, 这是因为 OAM 的模式数是由相位来区分的, 而多径传输是由于不同传输路径的延时造成的, 因此对相移调制敏感。如何克服多径衰落的影响, 提高 OAM 传输系统的性能是下一阶段研究的主要目标。

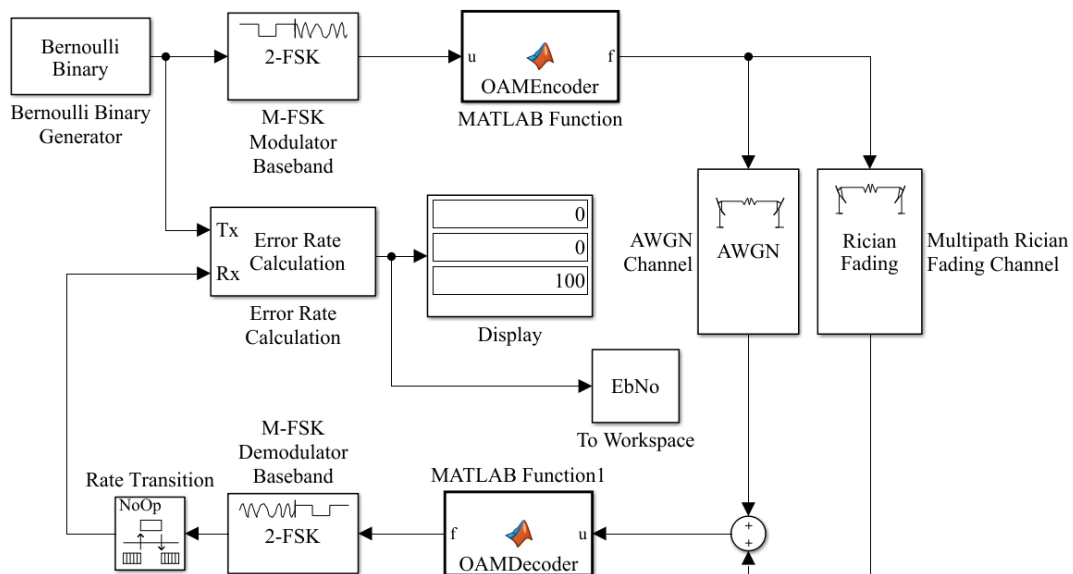


Figure 6. Multipath OAM transmission system model

图 6. 多径 OAM 传输系统模型

5. OAM 传输系统展示

为了演示 OAM 传输系统的性能, 本文设计了基于 Matlab 的 GUI 界面并进行了复用传输展示。图 8 给出了模式数为 2 的 OAM 波形及其编解码过程, 图中第一排从左到右分别表示 OAM 传输过程三维波形、电场强度、能量密度、相位波前示意图和近场相位平面图。与圆极化不同, OAM 能量分布是中空的, 即螺旋波束的中间区域场强最小。

图 9 展示了 OAM 模式数分别为 1、2、3 的复用传输过程, 图中第一排从左到右分别表示模式数为 3 的 OAM 传输过程三维波形、电场强度、能量密度、相位波前示意图和近场相位平面图。图中第二排左图为模式数为 1 的三维电场分布图; 中间为模式数为 2 的三维空间电场分布图; 右图为前两种模式的叠加。可见, 由于 OAM 传输模式复杂, 因此只有相应模式的接收机才能接收解调 OAM 发射波形, 这保证了 OAM 传输的安全性。

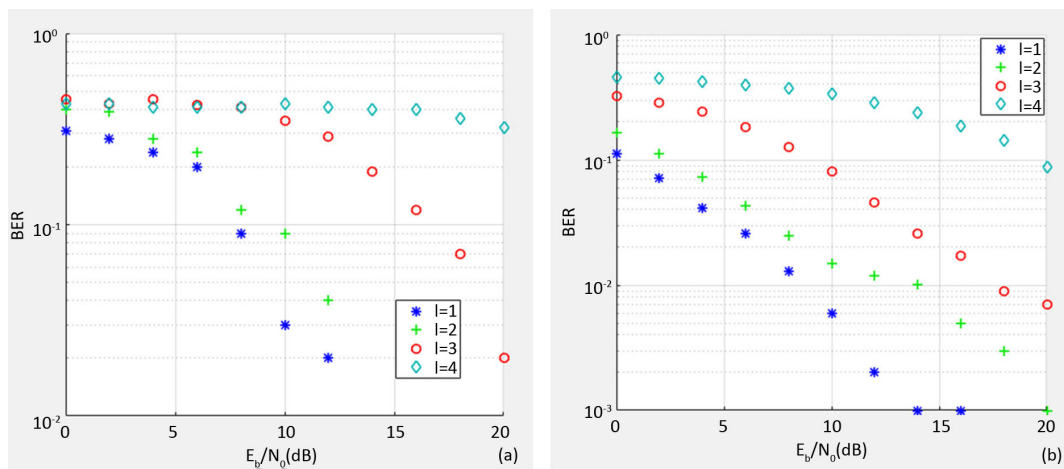


Figure 7. The relationship between error rate and signal to noise ratio in multipath OAM transmission system. (a) 2FSK; (b) BPSK

图 7. 多径 OAM 传输系统误码率与信噪比的关系。(a) 2FSK; (b) BPSK

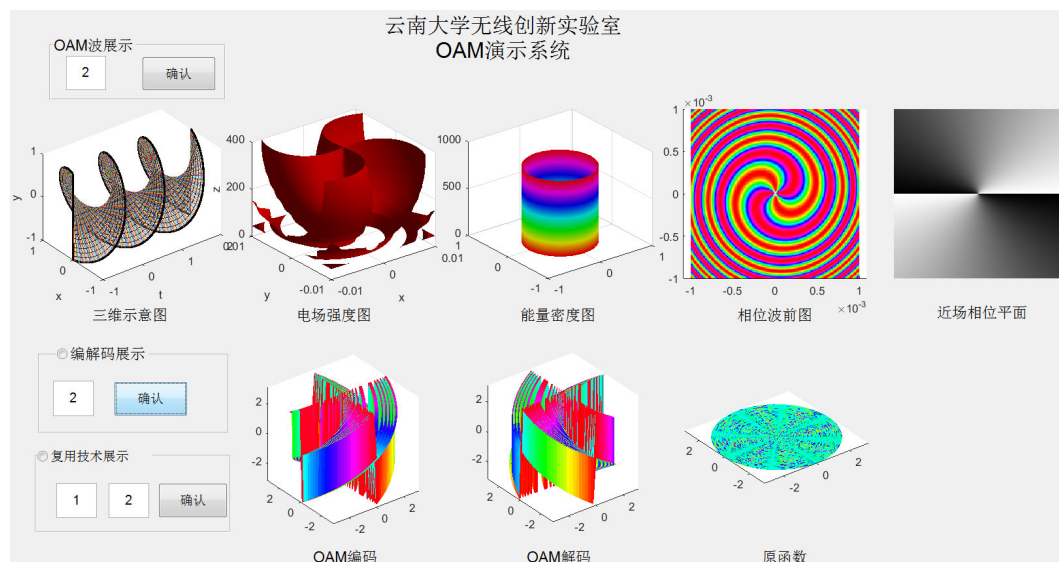


Figure 8. OAM mode and coding & decoding

图 8. OAM 模式及编解码

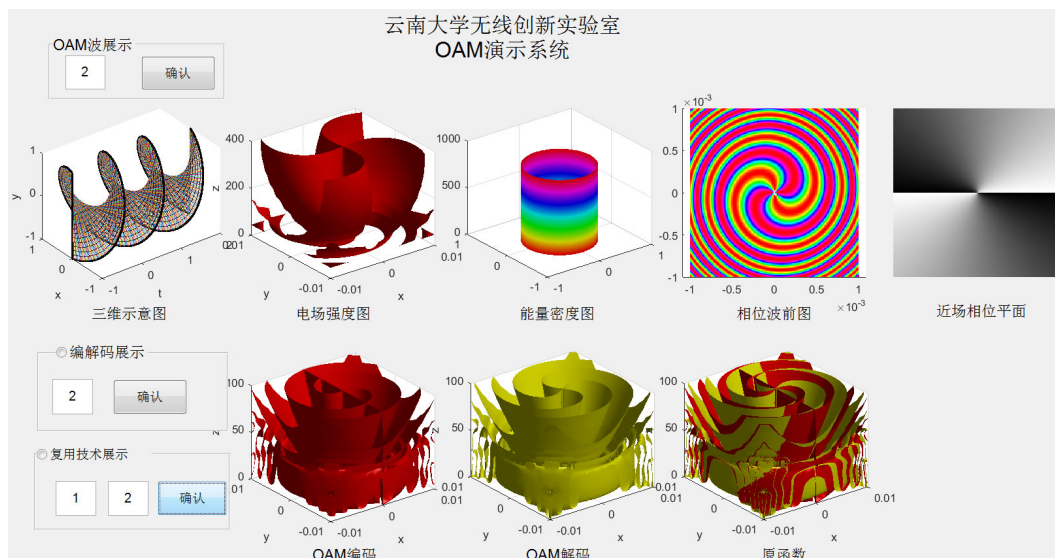


Figure 9. OAM mode and multiplexing technology

图 9. OAM 模式及复用技术

6. 结论

OAM 模式具有正交性, 理论上频率利用率可趋于无限大, 并具有传输安全性, 因而成为近年来研究的热点。本文建立了 OAM 传输复用系统模型, 研究了 OAM 模式数和多进制频移键控 M-FSK 进制数 M 对误码率的影响, 验证了不同 OAM 模式具有正交性, 以及高效利用频谱的原理; 研究了多径信道下采用不同的基带调制解调方式时传输系统误码率与信噪比的关系; 演示了 OAM 传输系统中电场强度、能量密度、相位变化、复用传输和编解码过程, 并讨论了 OAM 传输的安全性。

基金项目

作者感谢国家自然科学基金项目(编号: 61461052)的资助, 以及云南省高校谱传感与边疆无线电安全重点实验室的支持。

参考文献

- [1] Wang, J., Paesani, S., Ding, Y., Santagati, R., Skrzypczyk, P., *et al.* (2018) Multidimensional Quantum Entanglement with Large-Scale Integrated Optics. *Science*, **360**, 285-291. <https://doi.org/10.1126/science.aar7053>
- [2] Bozinovic, N., Yue, Y., Ren, Y., Tur, M., Kristensen, P., *et al.* (2013) Terabit-Scale Orbital Angular Momentum Mode Division Multiplexing in Fibers. *Science*, **340**, 1545-1548. <https://doi.org/10.1126/science.1237861>
- [3] Lavery, M.P.J., Peuntinger, C., Günthner, K., Banzer, P. and Elser, D. (2017) Free-Space Propagation of High-Dimensional Structured Optical Fields in an Urban Environment. *Science Advances*, **3**, e1700552. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700552>
- [4] Tamburini, F., Mari, E., Sponselli, A., Thide, B., Bianchini, A. and Romanato, F. (2012) Encoding Many Channels on the Same Frequency through Radio Vorticity: First Experimental Test. *New Journal of Physics*, **14**, 033001. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/14/3/033001>
- [5] Chen, R., Yang, W., Xu, H. and Li, J. A 2-D FFT-Based Transceiver Architecture for OAM-OFDM Systems with UCA Antennas. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. <https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2817230>
- [6] Xu, J. (2017) Degrees of Freedom of OAM-Based Line-of-Sight Radio Systems. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **65**, 1996-2008. <https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2671430>
- [7] Djordjevic, I.B. (2017) Multidimensional OAM-Based Secure High-Speed Wireless Communications. *IEEE Access*, **5**, 16416-16428. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2735994>

- [8] Zhang, Z., Zheng, S., Zhang, W., Jin, X., Chi, H. and Zhang, X. (2017) Experimental Demonstration of the Capacity Gain of Plane Spiral OAM-Based MIMO System. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, **27**, 757-759. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2017.2723719>
- [9] Chen, J.J., Lu, Q.N., Dong, F.F., Yang, J.J. and Huang, M. (2016) Wireless OAM Transmission System Based on Elliptical Microstrip Patch Antenna. *Optics Express*, **24**, 11531-11538. <https://doi.org/10.1364/OE.24.011531>
- [10] 黄铭, 毛福春, 曾佳, 曹慧露, 冯云. 轨道角动量复用技术[J]. 中国无线电, 2013(5): 34-36.
- [11] Demeter, Á. and Kertész, C.Z. (2014) Simulation of Free-Space Communication Using the Orbital Angular Momentum of Radio Waves. 2014 *International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*, Bran, 846-851. <https://doi.org/10.1109/OPTIM.2014.6850968>
- [12] Li, J., Zhang, M. and Wang, D. (2017) Adaptive Demodulator Using Machine Learning for Orbital Angular Momentum Shift Keying. *IEEE Photonics Technology Letters*, **29**, 1455-1458. <https://doi.org/10.1109/LPT.2017.2726139>
- [13] Wang, L., Ge, X., Zi, R. and Wang, C.X. (2017) Capacity Analysis of Orbital Angular Momentum Wireless Channels. *IEEE Access*, **5**, 23069-23077. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2763679>
- [14] Basar, E. (2018) Orbital Angular Momentum with Index Modulation. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, **17**, 2029-2037. <https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2787992>
- [15] 樊昌信, 曹丽娜. 通信原理[M]. 第7版. 北京: 国防工业出版社, 2012: 220-223.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2327-0853, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: oics@hanspub.org