

星地激光通信链路中的极化码性能研究*

李佳欣, 李岩[✉], 贾晓硕, 伍剑, 邱吉芳, 郭宏翔
(北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室 北京 100876)

摘要: 在星地激光通信链路中, 激光在大气信道中传输时容易受湍流作用, 导致信号功率衰落。考虑到极化码在短码下的优良性能和较低的实现复杂度, 将其应用于星地激光通信系统中来对抗大气湍流引起的信号衰落。基于对湍流信道的分析, 搭建了星地激光通信系统仿真平台, 并在其中引入了极化码。实验结果表明在中等湍流和强湍流下, 极化码分别降低了 13% 和 25% 的通信中断概率, 极大地改善了星地激光通信系统的性能。

关键词: 星地激光通信; 极化码; 湍流效应

中图分类号: TN929.11;V443+.1 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2022)04-0009-06

DOI: 10.12347/j.ycyk.20220120001

引用格式: 李佳欣, 李岩, 贾晓硕, 等. 星地激光通信链路中的极化码性能研究[J]. 遥测遥控, 2022, 43(4): 9-14.

Performance investigation of Polar Code for satellite-ground laser communication link

LI Jiaxin, LI Yan[✉], JIA Xiaoshuo, WU Jian, QIU Jifang, GUO Hongxiang
(State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications,
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: In satellite-ground laser communication link, the laser is easily affected by turbulence effect when transmitting in the atmosphere channel, resulting in signal power fading. Considering the excellent performance and low implementation complexity of Polar Code in short code, it is utilized to satellite-ground laser communication system to combat signal fading induced by atmospheric turbulence. Based on the analysis of turbulence channel, a Polar Code aided simulation platform of satellite-ground laser communication system is established, in which Polar Code is introduced. The results show that under moderate turbulence and strong turbulence, Polar Code reduces the probability of communication interruption by 13% and 25% respectively, which greatly improves the performance of satellite-ground laser communication system.

Key words: Satellite-ground laser communication; Polar Code; Turbulence effect

DOI: 10.12347/j.ycyk.20220120001

Citation: LI Jiaxin, LI Yan, JIA Xiaoshuo, et al. Performance investigation of Polar Code for satellite-ground laser communication link[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(4): 9-14.

引 言

卫星通信作为一种已经投入使用且发展迅速的通信技术, 目前已经成为无线电通信的重要方式之一。近年来, 卫星通信在数据传输质量、通信容量以及通信速率等方面的需求不断增长, 传统的以微波为载体的通信方式已难以满足需求。相较于微波通信方式, 卫星激光通信作为自由空间光通信 FSO(Free Space Optical) 的一种形式, 具有更高的数据速率、无需频谱认证、更好的保密性和抗电磁干扰能力强等优势^[1]。因此, 自由空间光通信技术成为了卫星通信领域的研究热点。

星地激光技术作为卫星光通信的关键环节, 是连接卫星组网与地面光纤组网的桥梁, 也是本文的研究重点。在实际的星地激光链路中, 激光束容易受到大气中多种因素的影响, 主要表现为大气吸收、散

*基金项目: 国家自然科学基金(62021005, 61875019)

[✉]通信作者: 李岩(liyan1980@bupt.edu.cn)

收稿日期: 2022-01-20

射和大气湍流三种效应^[2-4]。大气吸收和散射表现为信号功率的衰落, 大气湍流则会导致大气折射率的随机起伏变化, 表现为接收信号幅度和相位的随机波动。这些效应严重影响了星地激光通信链路的传输性能。为了改善大气信道带来的高误码率, 一些比较直接的方法是提高信号的发射功率、增大接收端光学天线尺寸以及中继补偿等, 但是这些方法大大增加了系统复杂性和成本。在此背景下, 本文对基于数字信号处理 DSP (Digital Signal Processing) 的前向纠错 FEC (Forward Error Correction) 技术展开研究。

目前, RS 码、Turbo 码和低密度奇偶校验码 LDPC (Low Density Parity Check) 都是 FSO 系统中常用的几种 FEC 方案。2003 年, Uysal 等人对不同湍流强度下的 FSO 信道进行建模与仿真, 提出了一种自适应 Turbo 编码方案, 其在强湍流下对于逼近香农信道容量非常有效^[5]。2005 年, Anguita 等人从信息论的角度分析了 FSO 信道的香农容量, 并在其中引入了 LDPC 码, 在不同的湍流条件下实现了较大的净编码增益。然而相对于其他编码方案, FSO 信道中的极化码研究还比较少^[6]。2018 年, 上海交通大学团队提出了一种用于极化码解码算法的信道状态信息估计方法, 并搭建了带有湍流腔的强度调制-直接检测 FSO 实验平台, 验证了该方案对抗大气湍流的有效性^[7], 但由于其未对相干光通信开展研究而相干光在湍流信道中具有更好的性能, 同时考虑到极化码在短码下的优良性能和较低的实现复杂度, 本文将极化码用于星地激光通信链路, 并搭建了相干光通信仿真平台进行研究。

1 CRC 辅助的 SCL 译码算法

极化码 (Polar Code) 自 2009 年被 Arikan 教授提出以来, 便凭借着超低的编码、译码复杂度以及信道容量严格“可达”等优势, 引起了学术界和工业界的广泛关注, 已被 3GPP (the 3rd Generation Partnership Project) 确认为第五代移动通信技术 5G (5th-Generation Mobile Communication Technology) 标准的信道编码方案, 极化码从理论变成了现实应用^[8,9]。同时, 在连续消除列表 SCL (Successive Cancellation List) 的辅助下, 可以避免连续消除 SC (Successive Cancellation) 解码中固有的误差传播问题^[10]。此外, 带有循环冗余校验 CRC (Cyclic Redundancy Check) 的极化码在短码下的性能优于 LDPC 码。因此, 本文选择 CRC 辅助的极化码作为编译码方案。

CRC 辅助的极化码的编译码过程如图 1 所示。用户数据经过 CRC 检验后得到长度为 K 的信息比特, 并作为信息位参与极化码的编码。本文采用高斯近似法构造极化码, 使极化后的子信道容量趋向高、低两个极端。将已知的 $(N-K)$ 个冻结比特分配给信道容量低的差信道, 将信息比特分配给信道容量好的信道得到序列 U_N , 这个过程称为比特混合。极化码生成矩阵 G_N 定义为:

$$G_N = B_N \cdot F^{\otimes n}, \quad n = \log_2 N \quad (1)$$

其中, B_N 表示比特翻转矩阵, 基矩阵 $F = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$, N 表示极化码码长。极化码编码后的码字序列 X_N 可以表示为:

$$X_N = U_N \cdot G_N \quad (2)$$

在解码端, 要先计算软信息。在本文的 QPSK 系统中, Polar 解码器中的 LLR 可以表示为^[11]:

$$\text{LLR}(b_i) = \ln \frac{P(b_i = 0 | y)}{P(b_i = 1 | y)}, \quad i = [1, 2] \quad (3)$$

其中, y 是接收到的受噪声干扰的信号, b_i 为 QPSK 调制前的比特。考虑到传输 0、1 比特等概传输, 即

$$P(b_i = 1) = P(b_i = 0) = \frac{1}{2} \quad (4)$$

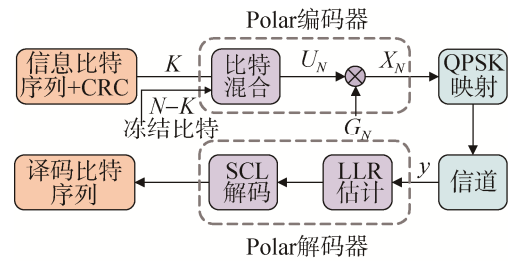


图 1 CRC 辅助的极化码框图

Fig. 1 Block diagram of CRC-aided Polar Code

那么式 (3) 可以表示为:

$$LLR(b_i) = \ln \frac{\sum_{n=1}^2 \exp(-\frac{(y - s_n^{i,0})^2}{2\sigma^2})}{\sum_{n=1}^2 \exp(-\frac{(y - s_n^{i,1})^2}{2\sigma^2})} \quad (5)$$

其中 s 代表标准的 QPSK 信号。

解码器利用估计的 LLR 作为译码蝶形图的输入,根据蝶形运算结的信息传递方向完成中间节点 LLR 的计算,最后根据最后一层的 LLR 值做判决。本文采用了搜索宽度为 2 的 SCL 解码算法, CRC 序列的长度为 24,在解码过程中选取能通过 CRC 校验且路径度量值 PM (Path Metric) 最小的码字作为译码结果,进一步提升了极化码的纠错能力。

2 仿真结果分析与讨论

2.1 仿真平台搭建

星地链路中的激光光束在大气中传输时,不同尺度的湍流元共同作用导致了大气信道中各区域的折射率发生随机起伏。这严重影响了星地激光通信系统的性能,使得系统误码率恶化甚至引起通信中断^[12]。因此,大气湍流对光传播的影响是星地激光通信系统设计中必须考虑的重要因素。因此本文搭建了基于 MATLAB 的仿真平台,对星地链路中的大气湍流效应进行模拟,如图 2 所示。首先产生一段长度为 $K - 24$ 的随机序列,将 24 位的 CRC 比特放置在信息比特的尾端送入 Polar 编码器。编码后的序列每 2 bit 一组以格雷映射的方式映射到 QPSK 星座点上。调制信号经过滤波成型、电光转换得到光信号,再送入大气湍流信道中进行传输。信号的传输速率为 25-GBaud,发端功率 10 W,激光器的波长为 1 550 nm。在接收端,对提取到的信号做一系列的算法补偿及恢复,包括正交不平衡补偿、时钟恢复、频偏恢复、载波相位恢复等技术。最后将补偿后的信号送入 Polar 解码器,得到最终的译码比特序列。

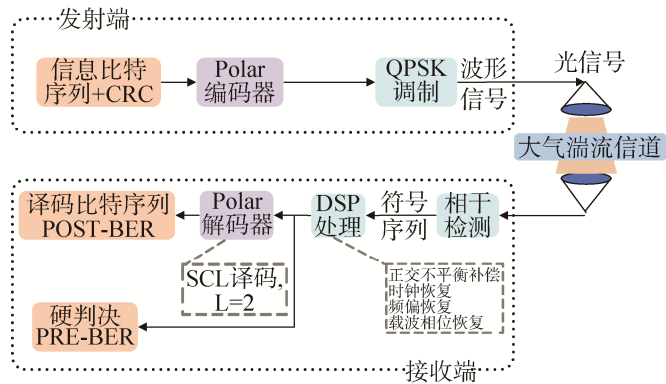


图 2 基于极化码的星地激光通信系统的仿真原理图
Fig. 2 Simulation schematic of satellite-ground laser communication system based on Polar Code

2.2 大气湍流信道模型的仿真

大气湍流信道是星地激光通信系统的关键特征,因此在研究星地激光通信系统的性能之前,要对大气湍流信道进行仿真评估。本实验基于 Kolmogorov 湍流模型和 Taylor 湍流冻结理论^[13,14],首先由谱反演法生成大尺寸相位屏,再通过旋转获取的方式得到 100 幅具备相关性的小相位屏用来模拟大气湍流信道。本实验分别产生了弱、中、强三种强度的湍流信道。

图 3 展示了动态湍流情况下的光纤耦合效率的分布情况。横坐标表示接收端的耦合效率,纵坐标表示该耦合效率下的湍流相位屏数目。由图 3 可以看出,随着湍流强度的增加,光纤的耦合效率逐渐变差。这种变化反映到接收信号上就是损耗变大,星地激光通信系统稳定性变差。分别在这三种强度的湍流信道中引入极化码,分析其对抗信道衰落性能。

2.3 极化码在大气湍流信道中的仿真

分别对码长 256,码率为 1/2、2/3、4/5 的三种极化码在湍流信道下的性能进行仿真分析,译码算法选择搜索路径宽度为 2 的 CRC-SCL。为了保证误码率统计的公平性,对于不同码率的极化码均选取 180 000 个信息比特进行统计,即对于 100 幅湍流相位屏下的三种码率,分别传输 1 731, 1 233, 1 000 帧极化码。

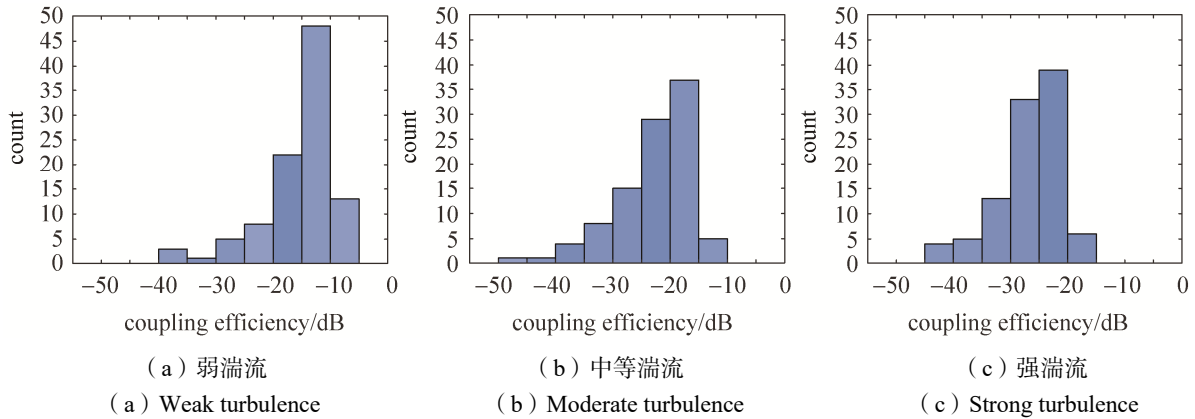


图 3 动态湍流下光纤的耦合效率直方图

Fig. 3 The histograms of fiber coupling efficiency under dynamic turbulence

图 4 展示了码长 256、码率 1/2 的 Polar Code 在不同湍流强度下的性能, 图 4 (a)~图 4 (c) 分别对应湍流强度为弱、中等、强。横坐标表示误码率所在量级, 纵坐标表示误码率小于或等于该量级的湍流数所占的累积百分比。可以看出, 在弱湍流下, 由于信道质量较好, Polar Code 的引入几乎可以将误码率降低到 1×10^{-7} 量级。在图 4 (b)~图 4 (c) 中, 随着湍流的增大, 系统纠前误码率不断增大, 纠前误码率和纠后误码率的差距也越来越显著。在中等湍流和强湍流下, Polar Code 虽然没有完全将纠后误码率降到 1×10^{-7} 量级, 但是在 1×10^{-7} 量级的湍流相位屏数目达到 92%和 86%, 极大地改善了 FSO 系统的性能。

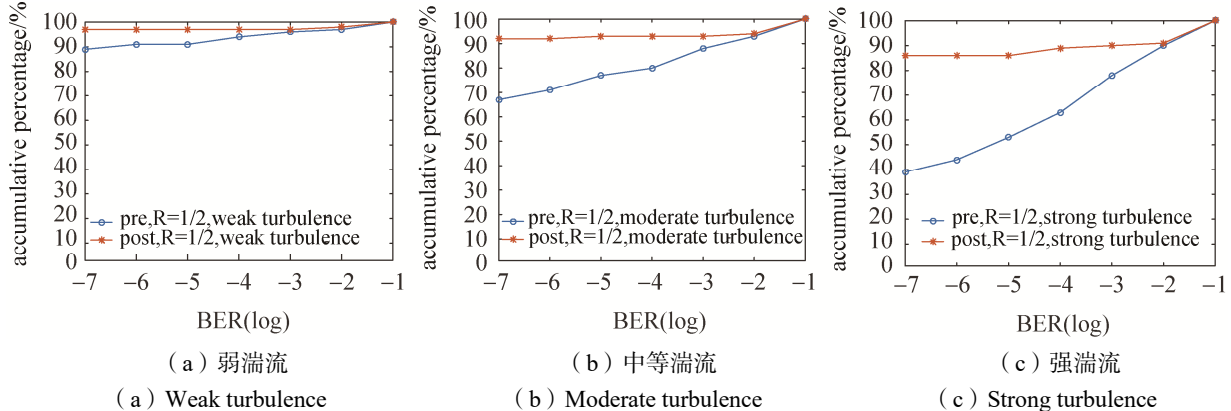


图 4 码长 256 码率 1/2 的极化码在动态湍流下的性能

Fig. 4 The performance of Polar Code with 256 code length and 1/2 code rate under dynamic turbulence

接下来, 仿真了不同码率的 Polar Code。图 5 是码长 256 不同码率的 Polar Code 在不同湍流强度下的性能对比图。横坐标依然是误码率所在量级, 纵坐标表示误码率小于或等于该量级的湍流数所占的累积百分比。可以得到, 在相同的码长和湍流强度下, Polar Code 的性能随着码率的增加而变差, 且这个差距随着湍流强度的增大而增大。因此信道编码中的码率要根据具体的通信决定。对于信道质量差的系统, 要选择低码率的 Polar Code 以提升系统性能。反之要选择高码率, 避免过多的降低系统的吞吐量。

由前文的仿真和分析可知, 星地链路中的湍流效应降低了星地链路中激光通信的质量, 使得系统误码率恶化。为了更好地评估 Polar Code 在星地激光链路中的性能, 仿真了不同湍流强度下, 码率为 1/2 时的通信中断概率。本文将误码率大于 1×10^{-3} 的情况视为通信中断。如图 6 所示, 横坐标和纵坐标分别是发端功率和通信中断概率。随着湍流的增大, 同等发射功率下的 Polar Code 对系统中断概率的改善也越明显。在发端功率为 10 W 时, Polar Code 的引入分别将弱湍流、中等湍流、强湍流下的通信中断概率降低了 3%、13%、25%。

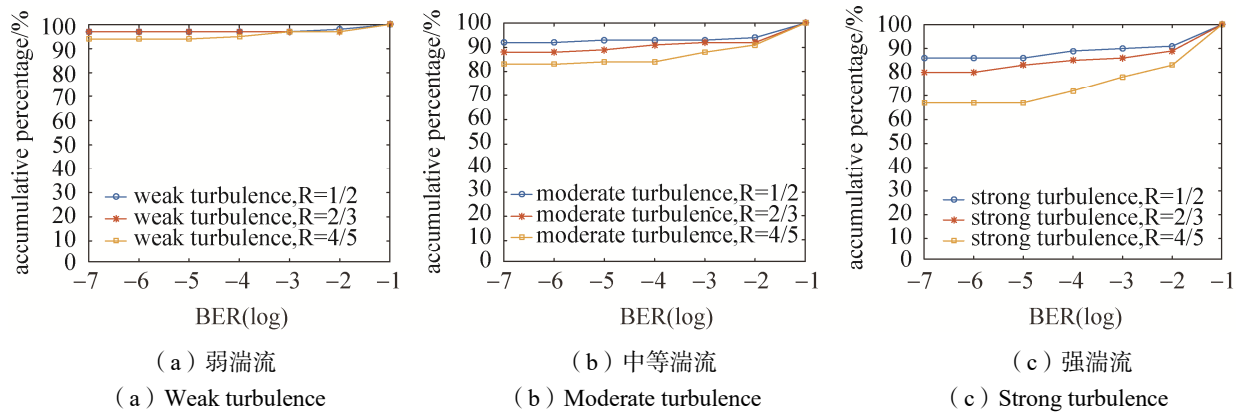


图5 码长 256 不同码率的极化码在动态湍流下的性能

Fig. 5 The performance of Polar Code with 256 code length and different code rates under dynamic turbulence

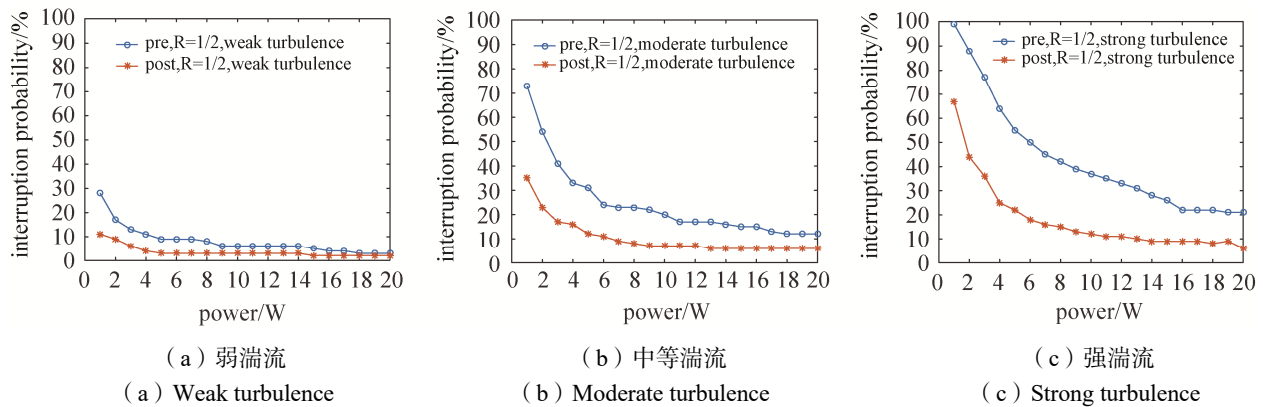


图6 码长 256 码率 1/2 的极化码在动态湍流下的通信中断概率

Fig. 6 The communication interruption probability of Polar Code with 256 code length and 1/2 code rate under dynamic turbulence

3 结束语

本文研究了基于 QPSK 调制格式的极化码在星地激光链路中的性能。通过仿真表明,使用极化码可以显著地改善湍流作用下的系统误码率,在弱湍流条件下,极化码可以避免绝大多数的误码。在中等湍流和强湍流下,极化码分别降低了 13% 和 25% 的通信中断概率。比较了不同码率的极化码在给定湍流强度下的性能,并指出了湍流信道中极化码码率的选择原则。

参考文献

- [1] 韩睿. 浅谈自由空间光通信技术及其应用[J]. 中国新通信, 2018, 20(17): 120.
- [2] 郑东吴. 大气空间光通信系统理论与实验研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2020.
- [3] ALHEADARY W G, KI-HONG P, NASIR A, et al. Free-space optical channel characterization and experimental validation in a coastal environment[J]. Optics Express, 2018, 26(6): 6614–6628.
- [4] DAKAR E, GOLBRAIKH E, KOPEIKA N, et al. Effect of the zenith angle on optical wave propagation in anisotropic non-Kolmogorov atmospheric turbulence: a new experiment-based model[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(8): 6287–6295.
- [5] LI Jing, UYSAL M. Optical wireless communications: system model, capacity and coding[C]// IEEE Vehicular Technology Conference, 2003: 168–172.
- [6] ANGUITA J A, DJORDJEVIC I B, NEIFELD M A, et al. Shannon capacities and error-correction codes for optical atmospheric turbulent channels[J]. Journal of Optical Networking, 2005, 24(9): 586–601.
- [7] FANG J, BI M, XIAO S, et al. Performance investigation of the Polar Coded FSO communication system over turbulence

- channel[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(25): 7378–7384.
- [8] 刘彦君. 自由空间光通信中的并行化极化码译码算法[D]. 北京: 北京邮电大学, 2021.
- [9] BIOGLIO V, CONDO C, LAND I. Design of Polar Codes in 5G new radio[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2021, 23(1): 29-40.
- [10] HASHEMI S A, CONDO C, GROSS W J. Partitioned successive-cancellation list decoding of Polar Codes[C]//2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW), 2017.
- [11] ZHOU H, LI Y, DONG T, et al. Improved polar decoding for optical PAM transmission via non-identical Gaussian distribution based LLR estimation[J]. *Optics Express*, 2020, 28(26): 38456–38464.
- [12] 都文和, 李林军. 大气湍流对星地激光通信影响的分析[J]. *交通科技与经济*, 2008, 10(4): 83–84, 121.
DU Wenhe, LI Linjun. The analysis of the effect of atmospheric turbulence on satellite-ground laser communications[J]. *Technology & Economy in Areas of Communications*, 2008, 10(4): 83–84, 121.
- [13] VALI Z, GHOLAMI A, GHASSEMLOOY Z, et al. Modeling turbulence in underwater wireless optical communications based on Monte Carlo simulation[J]. *Journal of the Optical Society of America A - Optics & Image Science & Vision*, 2017, 34(7): 1187–1193.
- [14] UYSAL M, LI J, YU M. Error rate performance analysis of coded free-space optical links over gamma-gamma atmospheric turbulence channels[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2006, 5(6): 1229–1233.

[作者简介]

李佳欣 1998 年生, 硕士研究生, 主要研究方向为光通信的极化码。

李 岩 1980 年生, 博士, 研究员, 主要研究方向为高速光传输和空间光通信。

贾晓硕 1998 年生, 博士研究生, 主要研究方向为高速光通信中的信道编解码技术。

伍 剑 1971 年生, 博士, 教授, 主要研究方向为光时分复用技术及超高速光传输系统。

邱吉芳 1982 年生, 博士, 副教授, 主要研究方向为人工智能与微纳光子学、高速光子 ADC。

郭宏翔 1978 年生, 博士, 教授, 主要研究方向为智能网络及先进计算。

(本文编辑: 杨秀丽)