

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

无线光通信类脉冲位置调制技术研究进展

柯熙政, 梁静远, 许东升, 王佳帆

引用本文:

柯熙政, 梁静远, 许东升, 等. 无线光通信类脉冲位置调制技术研究进展[J]. 光电工程, 2022, 49(3): 210387.

Ke X Z, Liang J Y, Xu D S, et al. Research progress of pulse position modulation technology in optical wireless communication[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, 49(3): 210387.

<https://doi.org/10.12086/oe.2022.210387>

收稿日期: 2021-11-30; 修改日期: 2022-01-21

相关论文

无线光通信系统捕获、瞄准和跟踪研究进展

梁静远, 陈瑞东, 姚海峰, 白勃, 曹明华, 赵黎, 王怡, 邓佳新
光电工程 2022, 49(8): 210439 doi: [10.12086/oe.2022.210439](https://doi.org/10.12086/oe.2022.210439)

OAM光通信技术研究进展

郭忠义, 龚超凡, 刘洪郡, 李晶晶, 王子坤, 杨阳, 宫玉彬
光电工程 2020, 47(3): 190593 doi: [10.12086/oe.2020.190593](https://doi.org/10.12086/oe.2020.190593)

逆向调制无线光通信空间分集分析

王珂, 徐智勇, 李雪松, 汪井源, 李建华, 赵继勇, 韦毅梅, 吴传信
光电工程 2020, 47(3): 190701 doi: [10.12086/oe.2020.190701](https://doi.org/10.12086/oe.2020.190701)

水下无线光通信链路构成与性能优化进展

张雨凡, 李鑫, 吕伟超, 陈家旺, 郑旻辉, 徐敬
光电工程 2020, 47(9): 190734 doi: [10.12086/oe.2020.190734](https://doi.org/10.12086/oe.2020.190734)

更多相关论文见光电期刊集群网站 



光电工程
Opto-Electronic Engineering

<http://cn.ojournal.org/oe>



OE_Journal



Website

DOI: 10.12086/oe.2022.210387

无线光通信类脉冲位置调制技术研究进展

柯熙政^{1,2,3*}, 梁静远¹, 许东升¹, 王佳帆¹¹西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;²陕西省智能协同网络军民共建重点实验室, 陕西 西安 710048;³陕西理工大学物理与电信工程学院, 陕西 汉中 723001

摘要: 调制解调是提高无线光通信传输效率的关键技术, 不同的调制方式其性能也有所不同。类脉冲位置调制是指脉冲位置调制 (PPM)、差分脉冲位置调制 (DPPM) 及其组合以及由此演变而成的各种脉冲位置调制方式。本文总结了国内外类脉冲位置调制的研究进展, 同时介绍了西安理工大学在类脉冲位置调制方面所做的工作, 主要对开关键控、脉冲位置调制、多脉冲位置调制、差分脉冲位置调制、重叠脉冲位置调制、双宽脉冲位置调制、双幅度脉冲位置调制、数字脉冲间隔调制、双头脉冲间隔调制、双脉冲间隔调制、双幅度脉冲间隔调制、定长数字脉冲间隔调制、定长双幅度脉冲间隔调制、缩短脉冲位置调制和分离双脉冲位置调制等调制方式在符号结构、带宽需求、平均发射功率、误时隙率和平均信道容量等方面的性能做了分析比较。最后展望了无线光通信的发展方向。

关键词: 无线光通信; 调制解调; 平均信道容量; 带宽需求; 误码率

中图分类号: TN929.1

文献标志码: A

柯熙政, 梁静远, 许东升, 等. 无线光通信类脉冲位置调制技术研究进展 [J]. 光电工程, 2022, 49(3): 210387

Ke X Z, Liang J Y, Xu D S, et al. Research progress of pulse position modulation technology in optical wireless communication[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, 49(3): 210387

Research progress of pulse position modulation technology in optical wireless communication

Ke Xizheng^{1,2,3*}, Liang Jingyuan¹, Xu Dongsheng¹, Wang Jiafan¹¹Xi'an University of Technology, School of Automation and Information Engineering, Xi'an, Shaanxi 710048, China;²Shaanxi Civil-Military Integration Key Laboratory of Intelligence Collaborative Networks, Xi'an, Shaanxi 710048, China;³Shaanxi University of Technology, School of Physics and Telecommunications Engineering, Hanzhong, Shaanxi 723001, China

Abstract: Modulation and demodulation are key technologies to improve the transmission efficiency of optical wireless communication. Different modulation methods have different performances. This paper summarizes the research progress of various types of pulse position modulation at home and abroad, and then introduces the research from the Xi'an University of Technology in the area of pulse position modulation. For on-off keying, pulse position modulation, multiple pulse position modulation, differential pulse position modulation, overlapping pulse position modulation, dual duration position modulation, dual-amplitude pulse position modulation, digital pulse interval modulation, double-headed pulse interval modulation, dual-pulse interval modulation, dual-amplitude pulse

收稿日期: 2021-11-30; 收到修改稿日期: 2022-01-21

基金项目: 陕西省科研计划项目 (18JK0341); 陕西省重点产业创新项目 (2017ZDCXL-GY-06-01); 西安市科技计划项目 (2020KJRC0083)

*通信作者: 柯熙政, xzke@263.net.

版权所有©2022 中国科学院光电技术研究所

interval modulation, fixed-length digital pulse interval modulation, fixed-length dual-amplitude pulse interval modulation, shorten pulse position modulation and separated double pulse position modulation, the performance of the symbol structure, bandwidth requirement, average transmit power, time slot error rate and average channel capacity are analyzed and compared. Finally, the development direction of pulse-like position modulation is prospected.

Keywords: optical wireless communication; modulation and demodulation; average channel capacity; bandwidth requirement; bit error rate

1 引言

无线光通信是利用光载波进行信息传输的一种通信方式, 具有传输速率高、抗电磁干扰、可靠性高等优点, 在解决“最后一公里”问题、应急通信、卫星(星地)通信等方面具有良好的应用前景。

在无线光通信中主要有两种调制解调方式: 相干调制/外差检测和强度调制/直接检测(intensity modulation/direct detection, IM/DD), 前者较后者有很好的灵敏度但实现起来比较复杂, 所以一般都采用强度调制/直接检测系统。应用于无线光通信 IM/DD 系统最早、最普遍和最简单的调制方式是开关键控(on-off keying, OOK), 只需控制光源闪烁就可完成编码调制, 但是 OOK 频谱效率比较低, 抗干扰能力差, 易受背景光的影响, 降低了该调制方式通信的可靠性, 并且通信数据传输速率很难提高, 不能发挥光通信的频宽优势。

类脉冲位置调制是指脉冲位置调制(pulse position modulation, PPM)、差分脉冲位置调制(differential pulse position modulation, DPPM)及其组合以及由此演变而成的各种脉冲位置调制方式。但是激光光束经过大气信道传输时, 由于大气衰减以及大气湍流等各种因素会使光通信系统的差错控制性能变差。为了提高通信的效率, 人们研究了一系列调制技术。选择先进的调制格式以及相应的解调技术以保证高效率传输和低误码率, 降低大气环境对通信系统干扰。因此, 对调制方式的研究是无线光通信领域的重要课题之一。

2 国外研究进展

PPM 最早是 1978 年由 Pierce 提出并应用于空间通信, 在激光通信中, 采用这种调制方式可以在给定的激光脉冲重复频率下, 用最小的光平均功率达到最高的数据传输率, 当然 PPM 也存在一定的缺点, 比

如提高抗干扰能力的同时, 付出的代价是增加对带宽的需求。经过几十年的发展, 国外研究学者在 PPM 的基础上研究了多种类脉冲位置调制, 不同的调制方式在不同的应用情况下性能也是不同的。

1978 年美国喷气推进实验室 Pierce 提出了 PPM 并将其应用于无线光通信^[3]。

1982 年, Prati 等将 PPM 编码扩展为包括多个 PPM 帧上的块脉冲编码, 针对散粒噪声和热噪声的光接收机模型, 提出了最大似然解调方法^[4]。

1983 年, Prati 等对 PPM 调制的激光脉冲扩展进行了研究, 探讨了几种抑制脉冲扩展的方法, 包括脉冲均衡、扩展脉冲积分和脉冲形状匹配^[5]。

1983 年, Garrett 等使用匹配滤波方法分析了脉冲位置调制传输系统的接收灵敏度, 结果表明使用直接检测也可以使接收灵敏度得到提高^[6]。

1986 年, Gardner 等分析了锁相同步 PPM 系统的误码率性能, 并与完全同步 PPM 系统的误码率性能进行了比较。结果表明当环路带宽小于时隙频率的 0.1% 时, 补偿不完全同步所需的信号功率增加很小^[7]。

1987 年, Georgiades 等通过对随机调制数据的噪声观测, 推导出了在有时隙同步的情况下 PPM 符号同步的最大似然估计, 该随机调制数据通过 M 符号宽的窗口观测^[8]。

1988 年, Davidson 等构建了使用 PPM 信号的 25 Mbit/s 直接检测光通信系统, 并在实验室条件下测量了其性能^[9-10]。

1988 年, Zwillinger 等使用 DPPM 脉冲位置调制的替代编码方案, 结果表明在某些情况下对于无噪声带宽受限和平均功率受限的光信道中, DPPM 比 PPM 具有更高的通信速率^[11]。

1989 年, Sugiyama 等研究了多脉冲位置调制在相同的传输效率情况下, 将 PPM 所需的传输带宽减少到一半左右, 从而提高了频带利用率^[12]。

1994 年, Barry 等提出了在使用数字脉冲位置调

制时对符号间干扰和加性高斯白噪声的检测方法。分析了递归均衡方案的性能, 结果表明均衡器在缓解符号间干扰 (inter symbol interference, ISI) 方面是有效的^[13]。

1996 年, Malik 等在 ISI 信道上评估了 PPM 的性能。分析了未均衡系统的误码率性能, 并讨论了 PPM 最大似然序列检测 (maximum likelihood sequence detection, MLSD) 在具有加性高斯白噪声的 ISI 性能。当采用 MLSD 时, 16-PPM 具有最佳的平均功率效率^[14]。

1997 年, David 等分析了采用 PPM 的网格码在室内无线信道上的性能, 证明了最大似然序列检测 (MLSD) 在抑制多径现象方面的有效性, 并对多径信道上速率为 2/3 编码的 8-PPM 和速率为 3/4 编码的 16-PPM 的 MLSD 性能进行了评估^[15]。

1998 年, Park 等提出了一种采用多脉冲位置调制 (multiple pulse position modulation, MPPM) 的网格码, 与采用 PPM 的网格码相比该编码对多径现象的敏感度较低, 并且在期望比特率大于信道带宽时能提供更好的功率效率^[16]。

1999 年, Kahn 等给出了存在高斯白噪声的情况下, DPPM 的错误概率和功率谱密度的表达式^[17]。

2001 年, Nikolai 等研究了采用混沌脉冲位置调制 (chaotic pulse position modulation, CPPM) 将二进制信息通过脉冲位置调制到载波上, 讨论了混沌脉冲发生器的基本设计原则、同步以及存在信道噪声的情况下混沌脉冲通信方案的性能^[18]。

2002 年, Aldibbiat 等研究了双头脉冲间隔调制 (double headed pulse interval modulation, DHPIM) 方案在室内多径光环境中的性能。结果表明 DHPIM、PPM 与数字脉冲间隔调制 (digital pulse interval modulation, DPIM) 相比需要稍高的光功率^[19]。

2005 年, Moision 等提出了串行级联脉冲位置调制 (serial cascaded pulse position modulation, SCPPM), 它由外部卷积码、交织器、位累加器和 PPM 的串行级联组成, 通过移位寄存器操作和查表完成编码^[20]。

2005 年, Kiasaleh 等分析了用雪崩光电二极管 (avalanche photo diode, APD) 探测器探测光场时, 脉冲位置调制自由空间光通信 (free space optical communications, FSO) 系统的误码率表达式及其上限值^[21]。

2005 年, Wilson 等研究了多个激光发射机与多

个光电探测器组合的方法。采用 Q 元脉冲位置调制的调制方式, 针对瑞利衰落和对数正态衰落信道模型, 采用多输入/多输出传输以抑制湍流信道上的衰落效应^[22]。

2006 年, Ivan 等提出了一种用于多输入/多输出传输的 Q 元脉冲位置调制。由多级编码和低密度奇偶校验码作为组成码, 该方案在强湍流条件下可获得良好的编码增益^[23]。

2007 年, Maged 等研究并比较了两种基于 PPM 的深空光通信迭代编码调制技术。第一种编码由串行级联 SCPPM 表示, 是外部卷积码、交织器、位累加器和 PPM 的串行级联组成。第二种也是串行级联码, 其中组成码由低密度偶校验 (low density even parity check, LDPC) 码和 PPM 串行级联组成的 LDPC-PPM 码^[24]。

2008 年, Sethakaset 等提出了硬判决检测和软判决检测的级联码译码算法。结果表明当信道为非色散信道时, 级联码提供的编码增益约为 4 dB。在色散信道上, 当延迟扩展与比特持续时间之比不高时, 编码系统的性能优于非编码系统^[25]。

2009 年, Bourennane 等分析了在接收机中使用经典二进制卷积码、迭代软解调和信道解码。研究了比特符号映射对迭代接收机性能的影响, 并提出了 MPPM 映射设计规则^[26]。

2012 年, Wasiu 等研究了一种将空间移位键控 (spatial shift keying, SSK) 和 PPM 相结合的调制方案, 缩短脉冲位置调制 (shorten pulse position modulation, SPPM) 是一种将 SSK 的简单性和频谱效率与 PPM 调制技术的能量效率相融合的多发射机方案^[27]。

2016 年, Correia 等对光码分多址 (optical code division multiple access, OCDMA) 系统中 OOK、脉冲振幅调制 (pulse amplitude modulation, PAM) 和 PPM 调制方式的短脉冲和字的编码、解码以及传播性能进行了数值模拟研究^[28]。

2017 年, Zohaib 等讨论了双二进制脉冲位置调制 (duobinary pulse position modulation, DuoPPM) 编码方案的实现及其在可见光通信系统中的应用。在 14 Mbit/s 数据速率下实现的实验结果表明误码率小于 10^{-9} , 并分析 DuoPPM 的实用性、鲁棒性和局限性^[29]。

2020 年, Sharma 等研究了采用脉冲位置调制-二进制相移键控-副载波强度调制混合调制技术的自由

空间光通信系统, 将对数正态和双伽玛概率密度函数作为弱、中、强湍流下的信道衰落统计。推导了该混合调制方案的平均误码率和闭合表达式^[30]。

2020年, Zaiton等研究了适用于可见光通信(visible light communication, VLC)的两种单载波调制方案, 即OOK和PPM的性能。结果表明PPM在传输距离和路径损耗方面优于OOK, 而OOK是实现最高数据速率的最佳选择^[31]。

类脉冲位置调制的研究从1978年开始至今, 研究重点从最初的对单一PPM、DPPM调制的性能分析^[4-7]到将PPM与其他编码方式相级联的方法^[24-27]来提高通信质量。研究的内容也从理论推导、仿真模拟^[3-5]到实践应用^[9-10]发展。通信系统由单输入/单输出(single-input single-output, SISO)通信系统^[18-20]向多输入/多输出(multiple-input multiple-output, MIMO)通信系统^[22-23]发展, MIMO可以减少湍流信道上的衰落效应。对误码率性能^[7,21]、接收灵敏度^[6]、频带利用率^[12,17]、符号间干扰^[13-14]等方面的性能进行了分析。

3 国内研究进展

1998年, 王福昌等研究了用数字锁相环实现PPM的时隙同步器, 该方法进行环路滤波时, 时隙同步器的抗噪性能要优于采用均值法、三点法和筛选法, 在其它性能指标保持不变的情况下, 该算法能使整个同步系统在更强的背景噪声下可靠地工作^[32]。

1999年, 黄本雄等设计了一种PPM调制器。使用可编程逻辑器件实现了计数、锁存、控制等数字电路, 大大简化了硬件电路^[33]。

2000年, 张森等对脉冲位置调制的时隙同步、字同步和帧同步中的字同步技术提出了一种新的采用数字逻辑设计的解决方案^[34]。

2000年, 邹传云等从平均光功率和频带利用率两方面比较了PPM、OOK和PAM调制方式。表明PPM调制是能量利用率较高的调制方式, 但它是以提高频带带宽为代价的^[35]。

2000年, 张正线等对PPM、DPPM、MPPM进行了分析并将其与OOK进行比较, 分析了它们的优缺点^[36]。

2002年, 庞志勇等对用于无线光通信中的OOK、PPM、DPPM和DPIM的功率利用率、频带利用率、传输容量以及抗码间干扰的性能进行了分析和比较^[37]。

2005年, 汤俊雄等研究了数字脉冲间隔调制

(DPIM)的差错性能, 分析了符号结构、发射功率、带宽需求等问题, 并与OOK和PPM进行了比较^[38]。

2006年, 张江鑫等在研究PPM调制技术的基础上, 设计了基于现场可编程逻辑门阵列(field programmable gate array, FPGA)的PPM调制无线光通信系统^[39]。

2007年, 王红星等在OOK、PPM和DPIM的调制结构的基础上, 结合无线光信道特点, 分析比较了这三种调制方式的带宽需求、传输容量、功率需求和差错性能^[40]。

2010年, 沙学军等将LDPC码作为信道编码, 结合简化的软件信息提取方法, 在大气湍流信道中对LDPC编码的PPM系统进行了仿真。仿真结果表明该方案能够满足无线光通信系统的要求^[41]。

2010年, 程刚等给出了双脉冲间隔调制(dual pulse pulse interval modulation, DPPIM)的符号结构, 分析了带宽需求、传输容量和平均发射功率, 推导出了弱湍流信道下的误包率模型, 与PPM、DPIM、定长数字脉冲间隔调制(fixed length digital pulse interval modulation, FDPIM)和OOK等方法进行了比较^[42-43]。

2016年, 向劲松等提出一种将SCPPM译码输出的软信息转换为PPM各时隙期望值的方法。由SCPPM译码输出先进行硬判决再通过累加模块获得累加器状态, 根据该状态选择下一个PPM映射方式进而获得各PPM时隙的概率及期望, 通过预测时钟偏差而获得最佳采样点^[44-45]。

2019年, 刘宏展等对采用混合脉冲位置调制-二进制相移键控-副载波强度调制(PPM-BPSK-SIM)方案的端到端RF-FSO混合系统进行了研究。射频(radio frequency, RF)链路服从瑞利分布, FSO链路服从双伽玛分布。在考虑大气湍流影响和指向误差条件的情况下, 推导了各种PPM-BPSK-SIM方案的平均误码率并讨论了系统的中断概率和平均信道容量^[46]。

2020年, 秦岭等分析比较基于OOK、PPM和DPIM等调制方式的可见光通信系统性能。对OOK、PPM和DPIM三种调制方式的编码结构、带宽需求、平均发射功率进行了比较^[48]。

类脉冲位置调制的研究从对PPM性能的研究^[32-34]向多种调制性能^[35-38]相互比较发展, 各种调制方式之间都相互有联系, 每一种调制方式的提出都是基于已有调制方式存在的缺点, 同时这种调制方式本身也会有一些缺点。到目前为止, 类脉冲位置调制共有近二

十种, 这二十种调制方式都还存在一些没能解决的问题, 在以后对大气激光通信系统的研究中还会有更多的调制方式被提出来改善通信系统的性能。

4 西安理工大学无线光通信系统类脉冲位置调制技术的研究进展

西安理工大学柯熙政教授等从 2000 年起开始研究无线光通信技术, 并在信号调制、编码、天线和自动跟踪瞄准等多方面技术中都取得了很好的进展^[1]。成功开发了包括串口、并口和以太网接口等常用数字接口的大气激光通信系统^[2]。设计 PPM 调制解调系统, 解调时的时隙同步与帧同步分别采用锁相环技术和 Gold 码来实现, 发明了一种时隙同步技术^[87]。柯熙政教授团队对十几种调制方式的性能做了综合的分析比较, 得出在某一个性能上的最佳的调制方式, 针对不同的信道选择与之匹配的调制方式, 同时找出这些调制方式的不足, 为在不同场合选用合适的调制方式提供理论依据。

为了选择出合适的调制方式, 西安理工大学柯熙政课题组对类脉冲位置调制进行了系统的分析。2005 年, 丁德强^[49]等分析了 PPM 的性能并通过硬件进行了实现; 2006 年, 赵黎^[69]研究了 DPPM 并对其性能进行了分析。2007 年, 秦岭^[50]等对 MPPM 的符号结构、星座图进行了研究, 并通过硬件实现了 MPPM; 2007 年, 黄蕾^[70]分析了 OPPM 产生的基本原理及其性能。2010 年, 马丽娜^[68]将 PPM 和偏振态调制有机结合, 提出一种新的大气激光通信调制技术^[88]; 2011 年, 孙长梅^[71]对双幅度脉冲位置调制 (dual amplitude pulse position modulation, DAPPM) 的符号结构、功率谱密度、带宽需求等进行了分析。2011 年, 贾超^[72]对 DHPIM 的性能进行了分析; 2013 年, 柳美平^[73]对类脉冲位置调制的符号结构、功率谱密度、误码率等进行了系统研究。2016 年, 石碧瑶^[74]研究了正交幅度调制 (quadrature amplitude modulation, QAM) 解调程序并对结果进行了分析, 2015 年, 田晓超^[75]讨论了自适应阈值检测模型并分析了其性能; 2012 年, 裴国强^[76]研究了多光束发射和多孔径接收两种抑制湍流改善通信性能的方法; 2019 年, 刘昭辉^[77]研究了半导体激光器和光电探测器的响应特性并进行优化, 提高了通信系统的调制速率。

4.1 各种调制方式的符号结构分析

强度调制/直接检测系统主要的调制方式有 OOK、

PPM、DPIM、DHPIM 等, 这些调制方式都是以激光作为信息的载体来进行信息传输, 信息的接收端以光脉冲在等间隔的一段时间中的位置来确定传输的信息, 可以统称为类脉冲位置调制。

以调制比特数 $M=4$ 为例, 各调制方式的符号结构图如图 1 所示^[67]。

图 1 中, α 表示脉宽参数, β 表示幅度参数。在以上各种码字中, 定长数字脉冲间隔调制 (FDPIM) 的符号长度最长, 其次是定长双幅度脉冲间隔调制 (fixed length dual-amplitude pulse interval modulation, FDAPIM), 接着是 PPM; 最短的是 OOK, 其次是双幅度脉冲间隔调制 (dual-amplitude pulse interval modulation, DAPIM)。

4.2 调制方式的性能分析

在无线光通信系统中, 强度调制/直接检测系统最早用的是 OOK 调制, 但其各方面的性能如抗干扰能力、功率利用率等不好。为了提高这些性能就提出了 PPM^[49]、DPIM^[72]、DHPIM^[72] 等调制方式。接下来讨论这些调制方式的一些基本性能, 如平均符号长度、带宽需求和平均发射功率等。

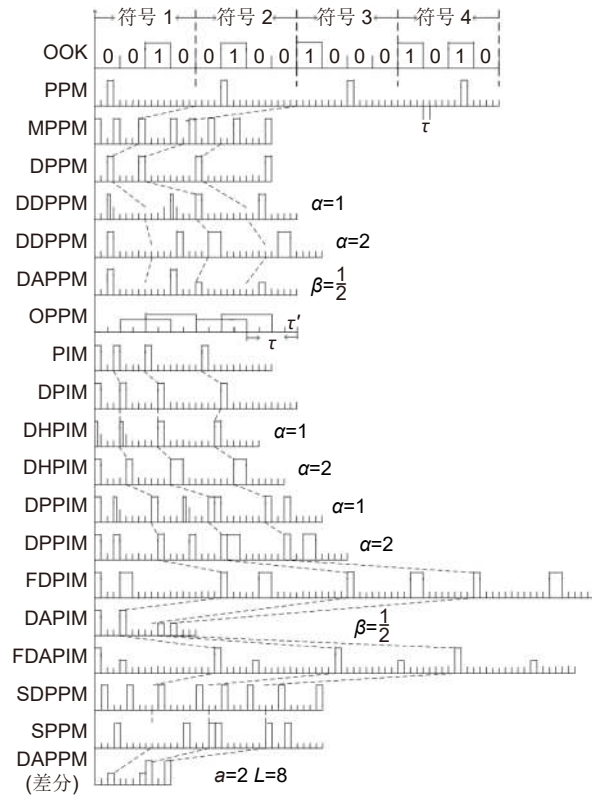
4.2.1 平均符号长度

图 2 表示的是各种调制方式的平均符号长度, 为了能在图上清晰地地区分不同调制方式的平均符号长度曲线, 脉宽参数 α 取为 $10^{[1]}$ 。从图中可以看出, 当调制阶数 M 很小时, 这几种调制方式的平均符号长度差别不大, 随着 M 的增长, FDPIM、定长双幅度脉冲间隔调制 (fixed length dual-amplitude pulse interval modulation, FDAPIM) 和 PPM 的平均符号长度增长最快, 比其他的调制方式都长, 且三者的符号长度很接近。对于带宽参数的调制方式来说, 平均符号长度是随着参数的增大而增大。利用 MATLAB 做数值仿真得到不同调制方式的平均符号长度的比较如图 2 所示。

4.2.2 带宽需求和带宽利用率

大气激光通信系统传输信息需要一定的带宽, 而且这个带宽是越小越好。

图 3 和图 4 显示的是各调制方式的带宽需求和带宽利用率的比较, 脉宽参数 α 取为 2, 信息比特率为 1。从图 3 中可以看出各调制方式的带宽需求随着调制比特数的增大而增大, 并且脉宽有变化的调制方式的带宽需求随着参数 α 的增大而减小。从图 4 可以看出各调制方式的带宽利用率是随着调制比特数的增大

图 1 各调制方式的符号结构^[73]Fig. 1 The symbol structure of different modulation schemes^[73]

而减小^[2]。

DAPPM 和 OPPM 这两种调制方式与前面提到的那些不同。DAPPM 的带宽需求和符号长度之间的关系如图 5 所示。DAPPM 的带宽需求随着符号长度的增加而增加, 随着脉冲幅度的增大而减小。OPPM 的带宽需求与重叠系数的关系如图 6 所示。OPPM 带宽需求随重叠系数的增大而减小, 随调制阶数的增大而增大^[57]。

4.2.3 平均发射功率

在大气激光通信系统中, 类脉冲位置调制方式可认为是等概率地发送“0”、“1”序列, 发“0”序列时不需要功率, 发“1”序列时需要峰值功率 P_c , 因此对于给定的峰值发射功率 P_c , 平均发射功率可简单地确定为发“1”的概率乘以该功率, 即 $P_{ave} = P_1 * P_c$ 。图 7 是在峰值发射功率一定时平均发射功率与调制阶数的关系, 脉宽参数 α 取为 1, 幅度参数 β 取为 2^[1]。

4.2.4 性能分析

对各种调制方式的平均符号长度、带宽需求和平均发射功率如表 1 所示。从这些调制方式的符号结构和平均符号长度可以看出, 最主要的调制方式是 PPM 和 DPIM, 前者是通过光脉冲在时隙中的位置来

表示传递的信息, 后者是通过相邻脉冲间的空时隙数来表示传递的信息。其它的调制方式都是在这两种调制方式的基础上通过改变符号的长度、脉冲的幅度、宽度及个数演变而得到的。从这些调制方式的带宽需求分析可以看出, 不同调制方式的带宽需求随各自的平均符号长度的增大而增大, 随脉冲宽度的增大而减小^[73]。

4.3 误时隙率分析

在无线光通信系统中, 信源发出的信息经编码调制后转换成了一组由多个时隙组成的信息序列, 每个时隙根据光脉冲的有无取值为“1”或“0”, 然后加载到激光器经光学天线发射出去。由于激光在大气中传输会受到湍流、背景光噪声和路径损耗等因素的影响使得信息失真或丢失, 接收端接收到错误的信息。误时隙率是指每符号信息中时隙发生错误的概率, 即发“1”收“0”的概率与发“0”收“1”的概率的和。下面分析各种调制方式的误时隙率性能^[57]。

4.3.1 高斯信道模型下的误时隙率分析

图 8 显示的是不考虑湍流影响时各调制方式在不同调制比特数下的误时隙率比较, 其中涉及到的脉宽

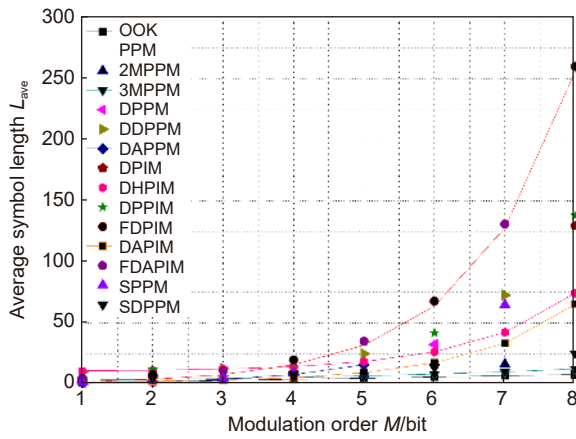
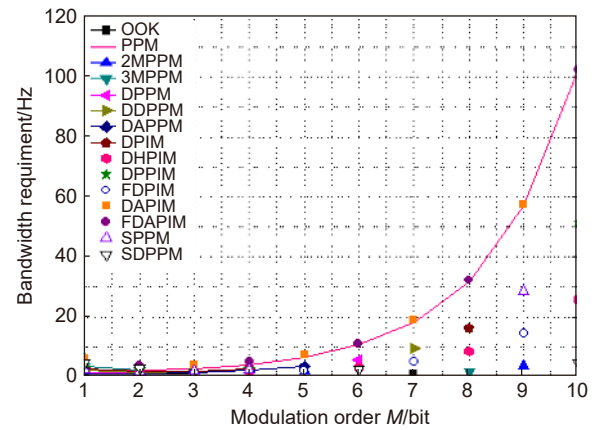
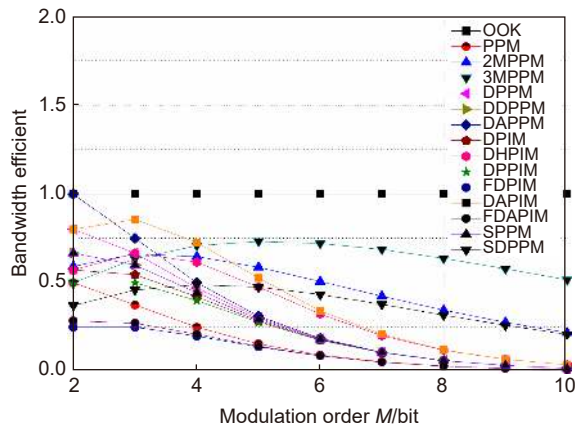
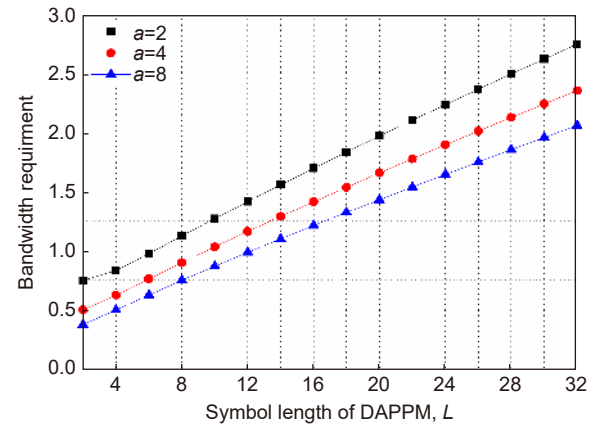
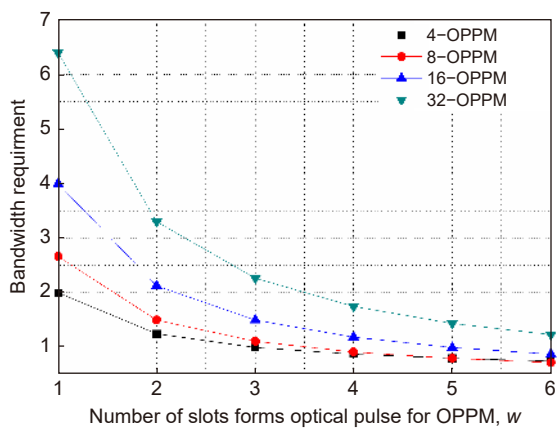
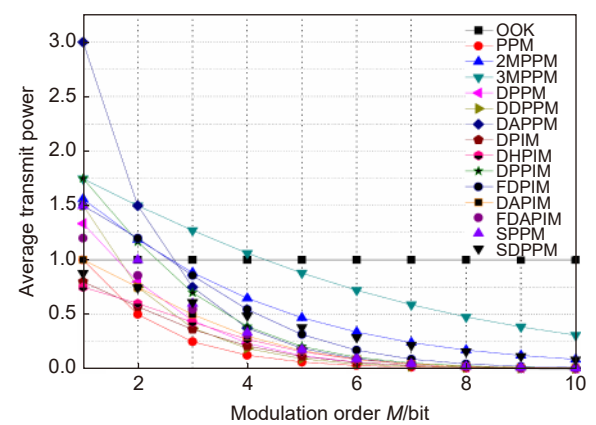
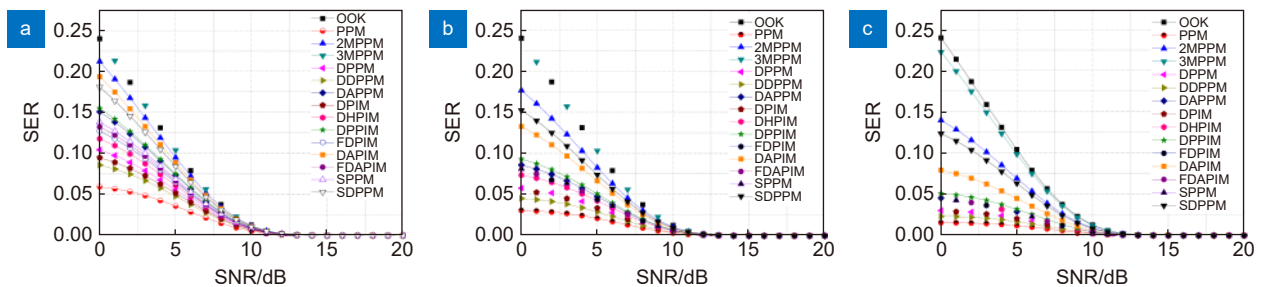
图2 各调制方式平均符号长度^[67]Fig. 2 The average symbol length of different modulation schemes^[67]图3 不同调制方式的带宽需求^[67]Fig. 3 The bandwidth requirement of different modulation schemes^[67]图4 不同调制方式的带宽利用率^[67]Fig. 4 The bandwidth efficiency of different modulation schemes^[67]图5 DAPPM(差分幅度脉冲位置调制)的带宽需求^[71]Fig. 5 The bandwidth requirement of DAPPM^[71]图6 OPPM调制的带宽需求^[61]Fig. 6 The bandwidth requirement of OPPM^[61]图7 不同调制方式的平均发射功率^[67]Fig. 7 The average transmit power of different modulation schemes^[67]

表 1 各调制方式的平均符号长度、带宽需求、平均发射功率

Table 1 The average symbol length, bandwidth requirement and average transmit power

调制方式	平均符号长度	带宽需求	平均发射功率
OOK	M	R_b	$\frac{P_c}{2}$
PPM	2^M	$\frac{2^M R_b}{M}$	$\frac{P_c}{2^M}$
MPPM	n (含 p 个脉冲)	$\frac{n R_b}{M}$	$\frac{p P_c}{n}$
DPPM	$\frac{2^M + 1}{2}$	$\frac{2^M + 1}{2M} R_b$	$\frac{2}{2^M + 1} P_c$
DDPPM	$2^{M-1} + \alpha - 1$	$\frac{2^M + 2\alpha - 2}{\alpha M} R_b$	$\frac{3\alpha}{2^{M+1} + 4\alpha - 4} P_c$
DAPPM	2^{M-1}	$\frac{2^{M-1}}{M} R_b$	$\frac{1+\beta}{2^M} P_c$
PIM	$\frac{2^M + 1}{2}$	$\frac{2^M + 1}{2M} R_b$	$\frac{2}{2^M + 1} P_c$
DPIM	$\frac{2^M + 3}{2}$	$\frac{2^M + 3}{2M} R_b$	$\frac{2}{2^M + 3} P_c$
DHPIM	$\frac{2^{M-1} + 2\alpha + 1}{2}$	$\frac{2^{M-1} + 2\alpha + 1}{\alpha M} R_b$	$\frac{3\alpha}{2^M + 4\alpha + 2} P_c$
DPPIM	$2^{M-1} + \alpha$	$\frac{2^M + 2\alpha}{\alpha M} R_b$	$\frac{4 + 3\alpha}{2^{M+1} + 4\alpha} P_c$
DAPIM	$\frac{2^{M-1} + 3}{2}$	$\frac{2^{M-1} + 3}{2M} R_b$	$\frac{1+\beta}{2^{M-1} + 3} P_c$
FDPIIM	$2^M + 4$	$\frac{2^M + 4}{M} R_b$	$\frac{3}{2^M + 4} P_t$
FDAPIM	$2^M + 3$	$\frac{2^M + 3}{M} R_b$	$\frac{1+\beta}{2^M + 3} P_c$
SPPM	$1 + 2^{M-1}$	$\frac{2^{M-1} + 1}{M} R_b$	$\frac{3}{2^M + 2} P_c$
SDPPM	n_s	$n_s R_b / M$	$2 P_c / n_s$

图 8 高斯信道下各调制方式的误时隙率^[73]。(a) $M=4$ bit; (b) $M=5$ bit; (c) $M=6$ bitFig. 8 The SER of different modulation schemes under AWGN channel^[73]

参数取为 1, 幅度参数取为 2。从 3 个图中可以看出, OOK 调制方式的误时隙率与调制阶数 M 无关; 信噪比越大, 各调制方式的误时隙率越小; 信噪比不变时, M 值越大, 误时隙率越小; M 值一定时, OOK 的误时隙率最大, PPM 的误时隙率最小; 而且随着 M 的增大, 各种调制方式的误时隙率之间的差距变大了^[1]。

4.3.2 弱湍流信道模型下的平均误时隙率

不同调制方式在弱湍流下的平均误时隙率的比较

如图 9 所示, 3 个子图给出了弱湍流情况下不同传输距离、不同调制比特数下的不同调制方式的平均误时隙率的比较。

4.3.3 中强湍流信道模型下的平均误时隙率

图 10 显示的是中强湍流情况下不同传输距离、不同调制比特数下的各调制方式的误时隙率比较。从三个子图可以看出, 各种调制方式在相应条件下的变化趋势和弱湍流时的一致, 不同的是在中强湍流下双

幅度脉冲间隔调制 (dual-amplitude pulse interval modulation, DAPIM) 与 2MPPM 和分离双脉冲位置调制 (separated double pulse position modulation, SDPPM) 的差距要大一些, 与弱湍流时的情况相比, 中强湍流情况下的平均误时隙率要大^[67]。

4.3.4 强湍流信道模型下的平均误时隙率

图 11 所示为强湍流情况下不同信道参数 a 值、不同调制比特数下的不同调制方式的平均误时隙率比

较。从三个子图可以看出随着 a 值和 M 值的变化, 上述各调制方式的大小顺序没有改变, a 值一定时, 各个调制方式的平均误时隙率随调制比特数 M 的增大而减小, M 值一定时, 各个调制方式的平均误时隙率随 a 的增大而减小, 3 个图中的平均误时隙率为 $10^{-4} \sim 10^{-5}$, 比中强湍流时的平均误时隙率要大。

对弱、中、强三种湍流情况下光强分别服从对数正态分布、Gamma-Gamma 分布和 K 分布时的不同调

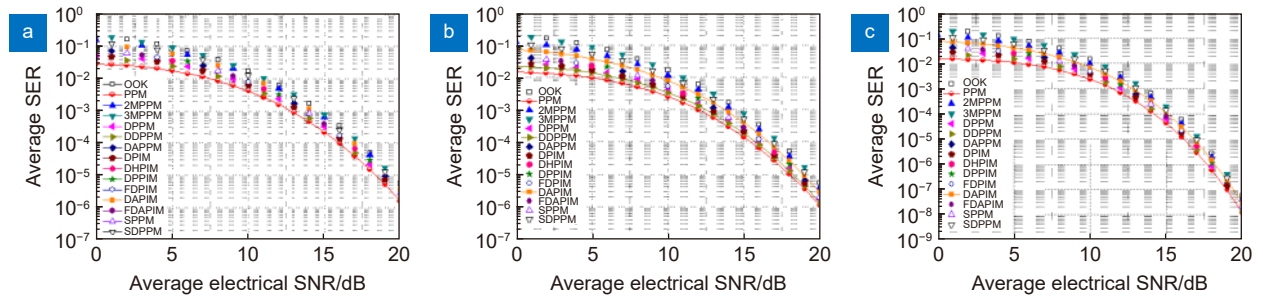


图 9 弱湍流信道下各调制方式的平均误时隙率^[73]。

- (a) $L=5$ km, $M=5$ bit, $C_n^2=1 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$; (b) $L=5$ km, $M=6$ bit, $C_n^2=1 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$;
(c) $L=3$ km, $M=6$ bit, $C_n^2=1 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$

Fig. 9 The average SER of different modulation schemes under weak turbulence channel^[73]

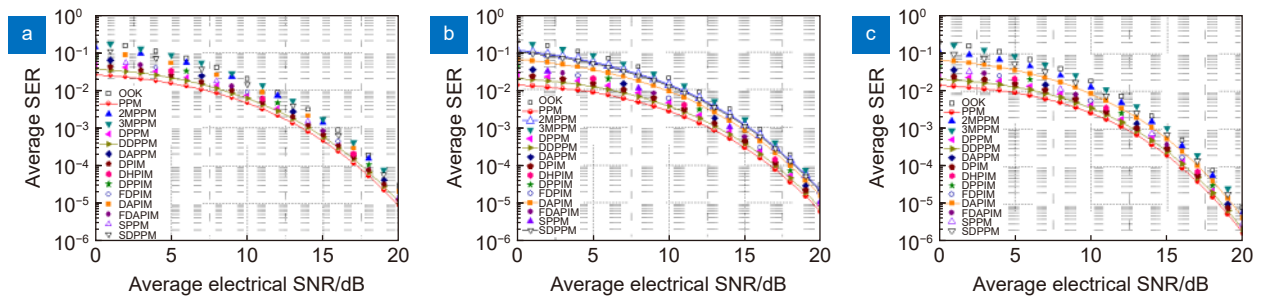


图 10 中强湍流信道下各调制方式的平均误时隙率^[73]。

- (a) $L=5$ km, $M=5$ bit, $C_n^2=9 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$; (b) $L=5$ km, $M=6$ bit, $C_n^2=9 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$;
(c) $L=3$ km, $M=6$ bit, $C_n^2=9 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$

Fig. 10 The average SER of different modulation schemes under moderate turbulence channel^[73]

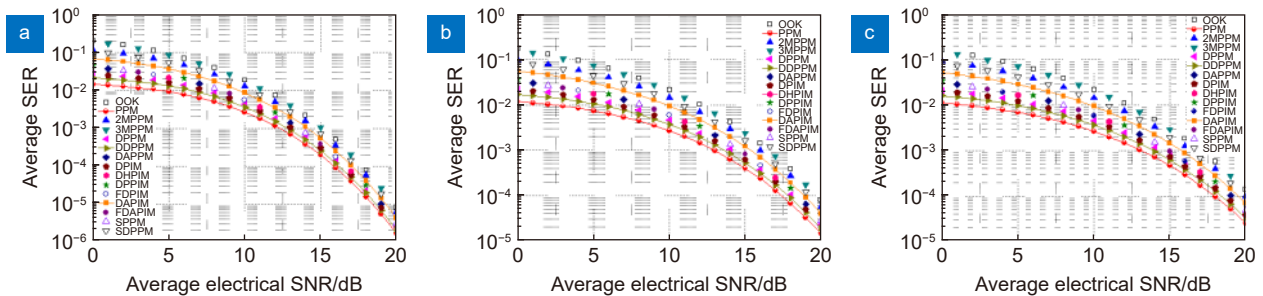


图 11 强湍流信道下各调制方式的平均误时隙率^[73]。

- (a) $a=4$, $M=5$ bit; (b) $a=4$, $M=6$ bit; (c) $a=2$, $M=6$ bit

Fig. 11 The average SER of different modulation schemes under strong turbulence channel^[73]

制方式的平均误时隙率性能的分析, 通过数学推导得出了三种湍流情况下各调制方式的平均误时隙率计算公式并对这些公式进行了数值仿真。从分析过程和数值仿真结果可以看出, OOK 调制方式的误时隙率与调制阶数 M 无关; 信噪比越大, 各调制方式的误时隙率减小, 信噪比一定时, 随着 M 值增大误时隙率减小; 三种湍流情况下的平均误时隙率的变化趋势是一致的, OOK 的误时隙率最大, PPM 的误时隙率最小, 随着湍流强度的增大平均误时隙率在增大, 在同一湍流信道下采用同一调制方式, 通过增大调制比特数 M , 减小信息传送距离 L 或增大信道参数 a 值能有效地提高调制方式的平均误时隙率性能^[57]。

4.4 信道容量

信道容量是指信道能够传输的最大平均信息速率。接下来主要分析了各种调制方式的传输容量和湍流信道下不同调制方式的平均信道容量。

4.4.1 传输容量

图 12 显示的是对不同调制方式传输容量的比较。

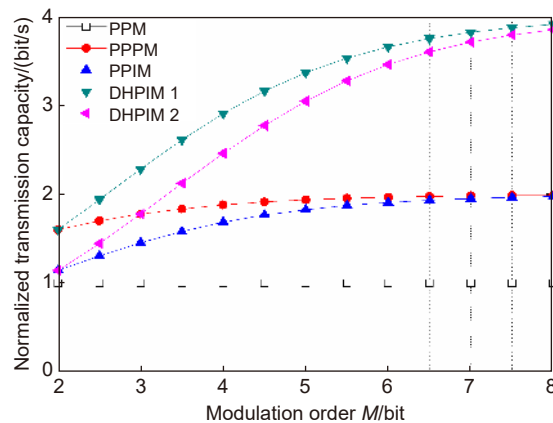


图 12 各种调制方式的归一化传输容量^[60]

Fig. 12 The normalized transmission capacity of different modulation schemes^[60]

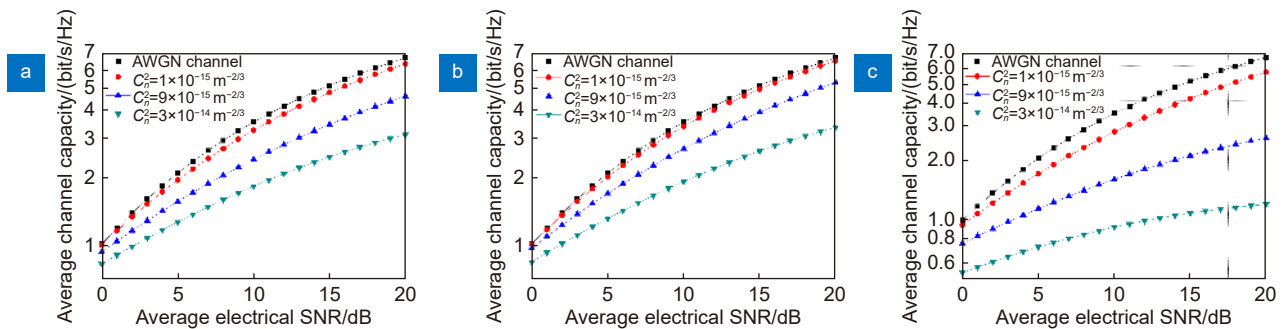


图 13 高斯分布湍流信道下的平均信道容量^[60]

(a) $L=3$ km, $\lambda=850$ nm; (b) $L=3$ km, $\lambda=1550$ nm; (c) $L=5$ km, $\lambda=850$ nm

Fig. 13 The average channel capacity under turbulence channel with Gaussian distribution^[60]

从图中可以看出各调制方式的传输容量是随着调制比特数的增加呈对数形式上升, DHPIM 的传输容量最大, 趋近于 4 bit/s, 其次是 PPM 和 DPIM, 这两种调制方式的传输容量趋近于 2 bit/s, 最小的是 PPM。对于脉宽参数有变化的调制方式来说, 其传输容量是随着脉宽参数的增大而减小的。

4.4.2 湍流信道下的平均信道容量

图 13 显示的是湍流信道下不同传输距离、不同光波长时的平均信道容量的比较, 中强湍流和强湍流信道都用 Gamma-Gamma 分布模型来模拟, 用不同的大气折射率常数区分。

图 14 显示的是强湍流情况下光强服从 K 分布时的平均信道容量的比较。从图中可以看出, 平均信道容量是随着信噪比的增大而增大, 随着信道参数 a 的增大而增大。

4.4.3 不同调制方式不同湍流强度的平均信道容量

图 15 显示的是在弱湍流情况下不同调制方式在不同传输距离、不同调制比特数时的平均信道容量比较。从图中可以看出, 平均信道容量是随着峰值发射

功率的增大而增大, 随传输距离的增大而减小, 随调制比特数的增大而减小, OOK 的平均信道容量最大, PPM 的最小^[49]。

图 16 显示的是中强湍流情况下不同传输距离、不同调制比特数时各种调制方式的平均信道容量比较。

从这三个子图可以看出相同条件下平均信道容量的变化趋势与弱湍流时的一致。

图 17 显示的是强湍流情况下不同传输距离、不同调制比特数和不同 α 值时的各调制方式的平均信道容量的比较。从 4 个子图可以看出传输距离和调制比

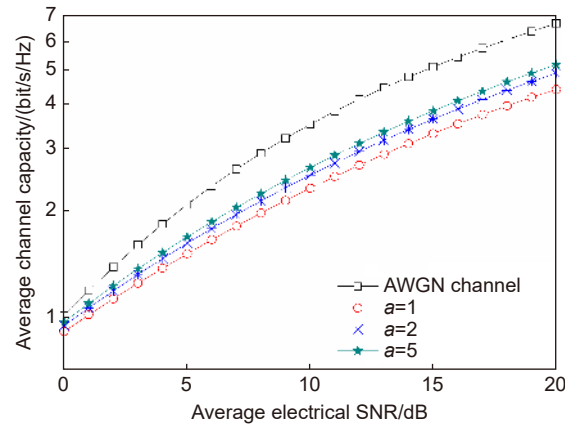


图 14 强湍流信道下 K 分布时的平均信道容量^[75]

Fig. 14 The average channel capacity with K distribution in strongly turbulent channels^[75]

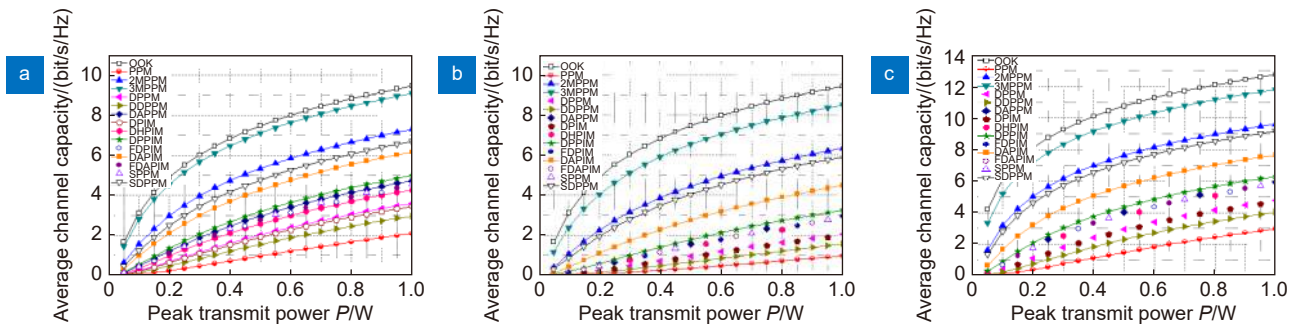


图 15 弱湍流信道下各调制方式的平均信道容量^[73]

(a) $L=5$ km, $M=5$ bit, $C_n^2=1 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$; (b) $L=5$ km, $M=6$ bit, $C_n^2=1 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$;
(c) $L=3$ km, $M=6$ bit, $C_n^2=1 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$

Fig. 15 The average channel capacity of different modulation schemes under weak turbulence^[73]

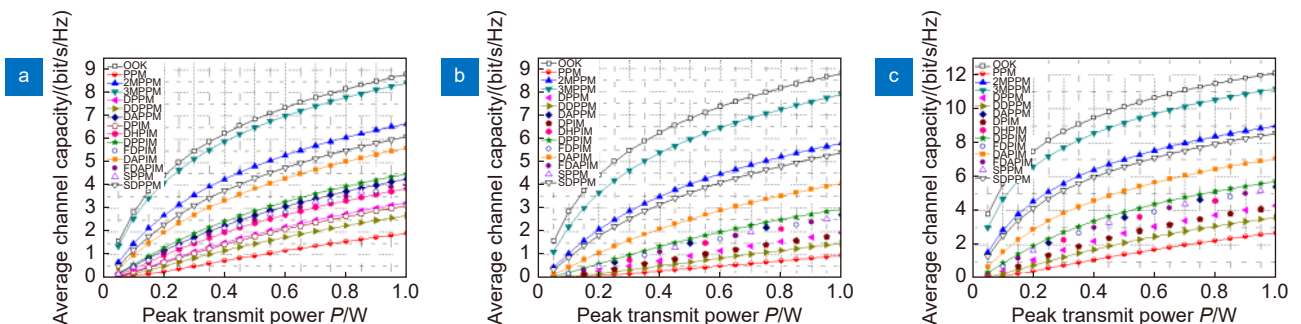
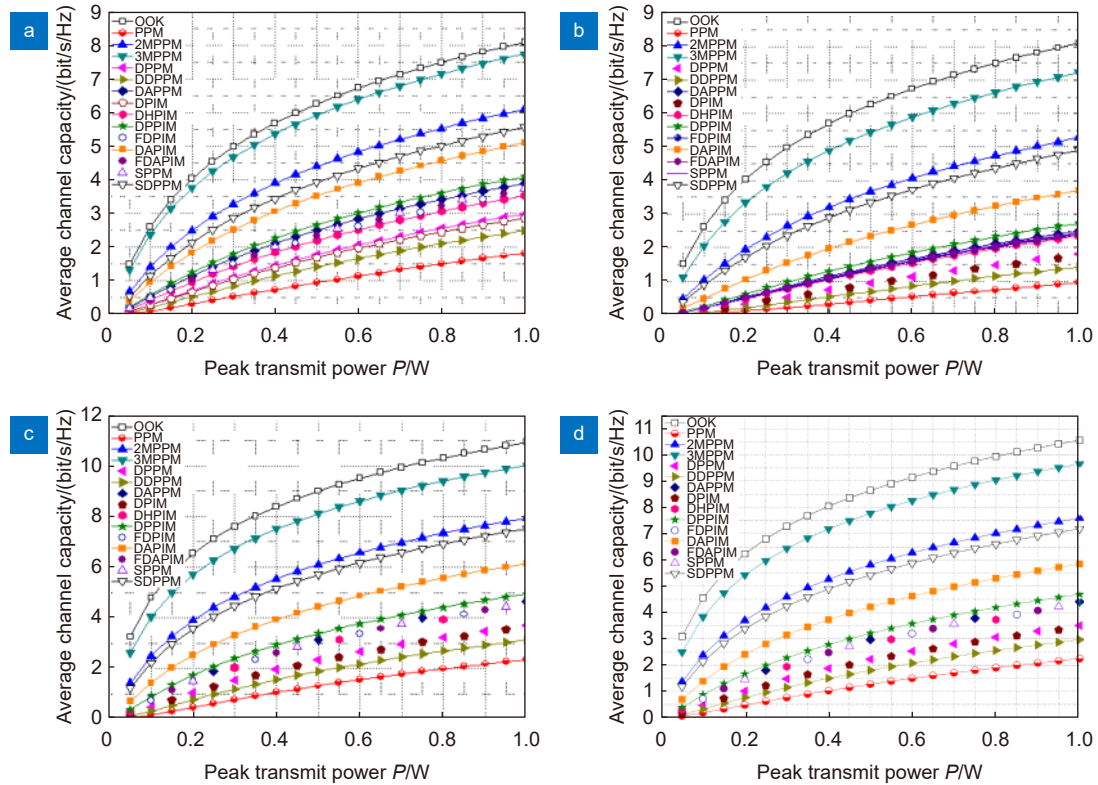


图 16 中强湍流信道下各调制方式的平均信道容量^[73]

(a) $L=5$ km, $M=5$ bit, $C_n^2=9 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$; (b) $L=5$ km, $M=6$ bit, $C_n^2=9 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$;
(c) $L=3$ km, $M=5$ bit, $C_n^2=9 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$

Fig. 16 The average channel capacity of different modulation schemes under moderate turbulence^[73]

图 17 强湍流情况下各调制方式的平均信道容量^[73]。

(a) $L=5$ km, $M=5$ bit, $a=4$; (b) $L=5$ km, $M=6$ bit, $a=4$; (c) $L=3$ km, $M=6$ bit, $a=4$; (d) $L=3$ km, $M=6$ bit, $a=2$

Fig. 17 The average channel capacity of different modulation schemes under strong turbulence^[73]

特数对各调制方式的平均信道容量的影响与弱湍流及中强湍流时的一样, 信道参数 a 值越大, 平均信道容量越大, 但差距不是很明显。与中强湍流情况时相比, 同等条件下强湍流时的平均信道容量要小 1 bit/s/Hz 左右。

本节主要分析了弱、中、强三种湍流信道下各调制方式的平均信道容量, 得到了三种湍流信道下的平均信道容量, 仿真结果表明 OOK 调制的平均信道容量最大且与传输信息比特数无关, 其次是 3MPPM、2MPPM、SDPPM, 然后是 DAPIM、DPPIM、DAPPM、SPPM、FDAPIM、FDPIM、DHPIM、DPPM、DPIM 和双宽脉冲位置调制 (dual duration pulse position modulation, DDPPM), 最小的是 PPM; 传输距离与调制比特数一定时, 湍流强度越强, 平均信道容量越小。且弱湍流时的平均信道容量与中强湍流时的很接近, 前者比后者高出大约 0.5 bit/s/Hz, 中强湍流时平均信道容量比强湍流时高出大约 1 bit/s/Hz; 传输距离越大平均信道容量越小。传输距离为 3 km 时的平均信道容量比 5 km 时高出大约 3 bit/s/Hz; 传输的信息比特数越大平均信道容量越小。调制比特数

为 4 时的平均信道容量比调制比特数为 5 时要高出 (1~2) bit/s/Hz。所以就平均信道容量而言, 最好的调制方式是 MPPM。可以通过减小传输距离, 增大峰值发射功率来提高平均信道容量。

4.5 自适应阈值检测

图 18 给出了误码率随信噪比变化的仿真结果。图中虚线表示的是固定阈值探测方法, 实线表示的是当采样数 m 分别为 8, 16, 32, 64 时的自适应阈值检测方法。

图 18 为固定阈值检测方法和自适应阈值检测方法下, 误码率随信噪比的变化曲线。可以看出, 相同信噪比时自适应阈值检测的误码率明显比固定阈值检测方法的误码率低。图 19 是采用三孔径接收时, 当分别采用 8-PPM、16-PPM 和 256-PPM 信号传输时的信噪比与误码率关系曲线, 可以看出当 PPM 信号的时隙数增加时, 接收信号的误码率也明显下降。

图 20~图 22 分别为大雨、中雨和小雨天气时, 实测数据采样数为 8, 16, 32, 64 的情况下, 误码率随信噪比的变化曲线。实测数据采样数由 8 增加到 64 时, 从图中可以看出在信噪比相同的情况下, 采样数

越大系统误码率越低, 自适应检测的方法性能改善越明显, 当采样数达到 32 以上时, 性能的提升会趋于

平缓。

图 23 是采样数为 64, 大雨, 中雨和小雨天气实

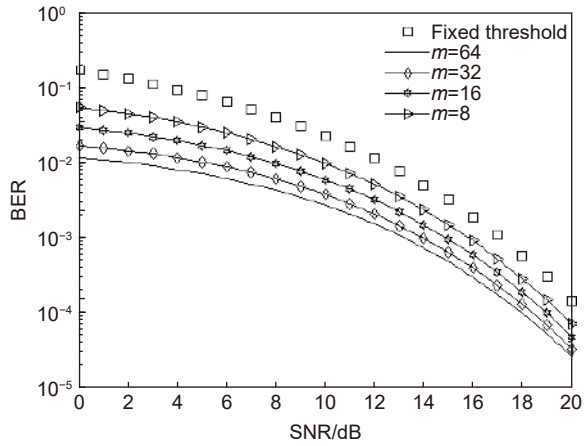


图 18 误码率随信噪比的变化曲线^[75]

Fig. 18 Error rate curve along with the change of signal to noise ratio^[75]

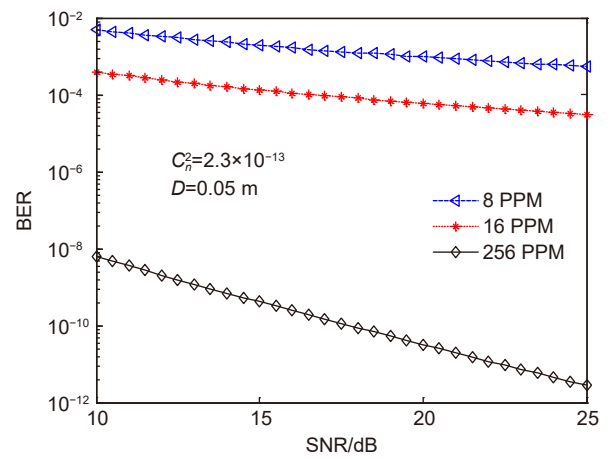


图 19 接收端的误码率曲线^[76]

Fig. 19 BER curve at receiver^[76]

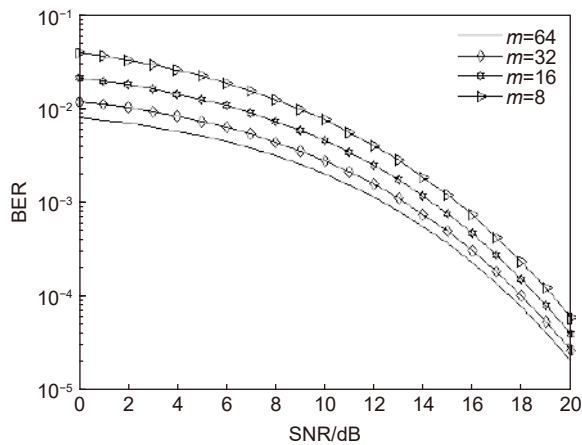


图 20 大雨天气误码率随信噪比变化曲线^[75]

Fig. 20 The heavy rain weather SER changing with SNR curve^[75]

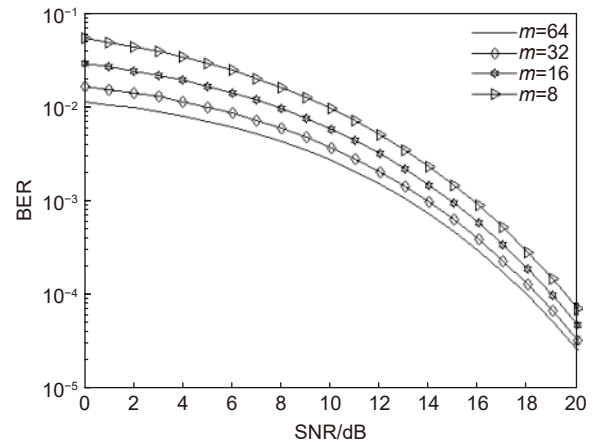


图 21 中雨天气误码率随信噪比变化曲线^[75]

Fig. 21 Moderate rain weather SER changing with SNR curve^[75]

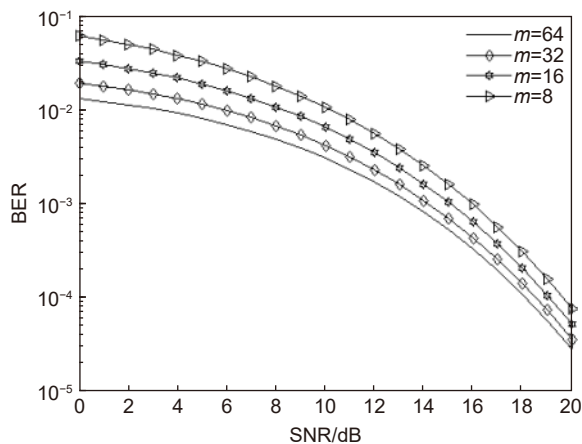


图 22 小雨天气误码率随信噪比变化曲线^[75]

Fig. 22 Light rain weather SER changing with SNR curve^[75]

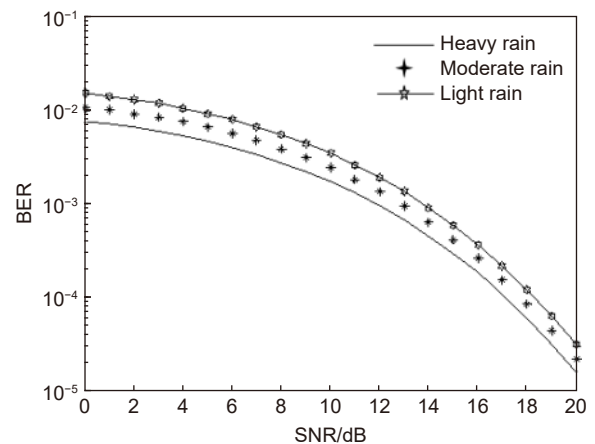


图 23 不同天气误码率随信噪比的变化曲线^[75]

Fig. 23 Different weather BER curve along with the change of SNR^[75]

测接收信号误码率随信噪比的变化曲线。可以看出在码元采样数不变的情况下信噪比相同时,大雨天气接收信号的误码率比中、小雨要小并且对接收信号质量的改善明显,中雨、小雨天气误码率变大。

4.6 影响激光器调制速率的因素

高调制速率是无线光通信的重要指标,我们分析了影响无线光调制的主要因素。从图 24 可以看出,当偏置电流 I_0 从 40 mA~70 mA 变化时,弛豫振荡谐振峰右移,弛豫振荡频率 f_0 从 6.1 GHz 增大到 12.5 GHz。由此可见,通过增加偏置电流 I_0 ,可以提高弛

豫振荡频率 f_0 。因此,为了提高激光器的调制频率,可以通过增大偏置电流 I_0 来增大稳态光子密度 S_0 ,进而提高弛豫振荡频率 f_0 来实现。从图 25 可以看出,偏置电流 I_0 从 40 mA~70 mA 变化时,输出光功率 P 从 13.5 mW 增大到 27 mW。增大偏置电流 I_0 可以增大弛豫振荡频率,减小弛豫振荡幅值使弛豫振荡过程缩短。因此,为了抑制脉冲波形失真现象,可以通过增大稳态光子密度 S_0 (偏置电流 I_0) 来实现。通过增加电流偏置提高激光器的调制频率存在一定困难,目前还难以克服。

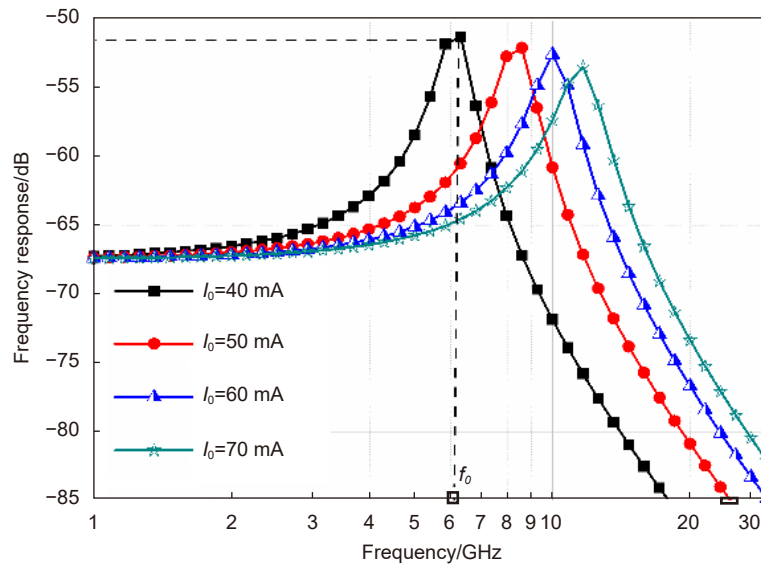


图 24 不同偏置电流 I_0 下的频率响应曲线^[77]

Fig. 24 Frequency response curves at different bias currents I_0 ^[77]

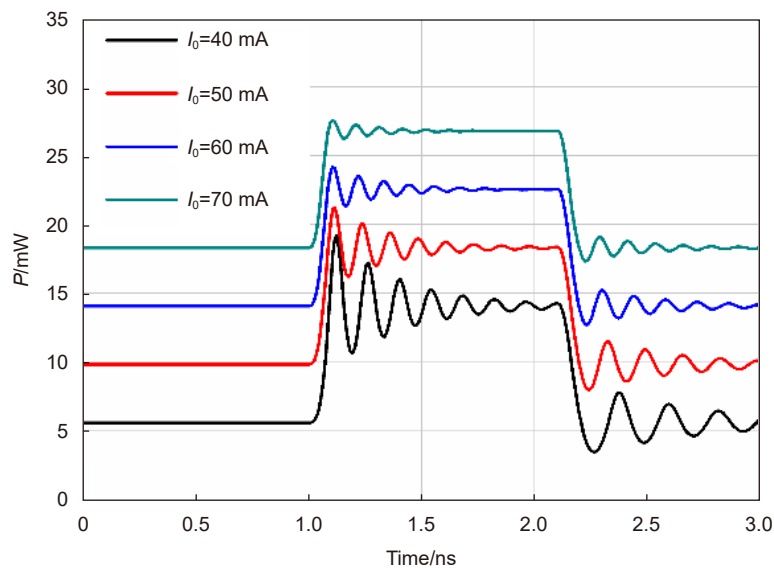


图 25 不同偏置电流 I_0 下的脉冲响应曲线^[77]

Fig. 25 Pulse response curves at different bias currents I_0 ^[77]

5 无线光通信发展展望

类脉冲位置调制包括 PPM, DPPM 等与此有关及由此演变而成的一种调制方式。类脉冲位置调制的优点是调制方式简单, 硬件电路实现方便, 但信道对其通信性能的影响不可忽视。人们正在以下几个方面对无线光通信进行努力。

1) 采用多发射/多接收技术, 增大通信容量, 抑制信道噪声^[78]。

2) 采用更长波长的激光传递信号, 规避各种天气因素如雨、雾、沙尘暴等对通信性能的影响^[79]。

3) 采用新的调制方式, 如逆向调制^[80], 以满足特殊场合的需求。

4) 研究新型编码技术, 如极化码^[87], 采用纠错码抑制大气湍流等信道噪声干扰, 提高无线光通信的抗干扰能力。

5) 研究光空间调制 (optical spatial modulation, OSM) 等新型的光多输入多输出 (optical multiple in multiple out, OMIMO) 技术^[82], 利用空间域激光器索引号额外携带信息, 有效地提高了系统的传输速率和能量效率。

6) 研究相干检测技术, 补偿大气湍流引起的波前畸变, 提高抑制大气湍流的能力^[83-84]。

7) 探索大气湍流对光信号传输的影响机制, 根据大气湍流的强弱自适应改变光通信编码调制方式, 以逼近信道容量极限^[85-86]。

类脉冲位置调制毕竟是一种脉冲调制, 其频带占有率要大于正弦调制, 这是其不利的一面, 目前还很难克服。无线光通信关键技术的不断解决, 为其产业化及应用创造了契机, 而该技术的不断完善, 必将推动我国无线光通信理论与技术的发展与应用。

利益冲突: 所有作者声明无利益冲突

参考文献

- [1] Ke X Z, Yin Z Y. *Coding Theory in Wireless Laser Communication System*[M]. Beijing: Science Press, 2009: 8–10. 柯熙政, 殷致云. 无线激光通信系统中的编码理论[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 8–10.
- [2] Ke X Z, Deng L J. *Wireless Optical Communication*[M]. Beijing: Science Press, 2016: 10–13. 柯熙政, 邓莉君. 无线光通信[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 10–13.
- [3] Pierce J R. Optical channels: practical limits with photon counting[J]. *IEEE Trans Commun*, 1978, **26**(12): 1819–1821.
- [4] Prati G, Gagliardi R. Block encoding and decoding for the optical PPM channel (Corresp.)[J]. *IEEE Trans Inf Theory*, 1982, **28**(1): 100–105.
- [5] Prati G, Gagliardi R. Decoding with stretched pulses in laser PPM communications[J]. *IEEE Trans Commun*, 1983, **31**(9): 1037–1045.
- [6] Garrett I. Pulse-position modulation for transmission over optical fibers with direct or heterodyne detection[J]. *IEEE Trans Commun*, 1983, **31**(4): 518–527.
- [7] Chen C C, Gardner C. Performance of PLL synchronized optical PPM communication systems[J]. *IEEE Trans Commun*, 1986, **34**(10): 988–994.
- [8] Georgiades C. Optimum joint slot and symbol synchronization for the optical PPM channel[J]. *IEEE Trans Commun*, 1987, **35**(6): 632–636.
- [9] Davidson F M, Sun X L. Gaussian approximation versus nearly exact performance analysis of optical communication systems with PPM signaling and APD receivers[J]. *IEEE Trans Commun*, 1988, **36**(11): 1185–1192.
- [10] Davidson F M, Sun X. Slot clock recovery in optical PPM communication systems with avalanche photodiode photodetectors[J]. *IEEE Trans Commun*, 1989, **37**(11): 1164–1172.
- [11] Zwillinger D. Differential PPM has a higher throughput than PPM for the band-limited and average-power-limited optical channel[J]. *IEEE Trans Inf Theory*, 1988, **34**(5): 1269–1273.
- [12] Sugiyama H, Nosu K. MPPM: a method for improving the band-utilization efficiency in optical PPM[J]. *J Lightw Technol*, 1989, **7**(3): 465–472.
- [13] Barry J R. Sequence detection and equalization for pulse-position modulation[C]//*Proceedings of 1994 International Conference on Communications*, 1994: 1561–1565.
- [14] Audeh M D, Kahn J M, Barry J R. Performance of pulse-position modulation on measured non-directed indoor infrared channels[J]. *IEEE Trans Commun*, 1996, **44**(6): 654–659.
- [15] Lee D C M, Kahn J M, Audeh M D. Trellis-coded pulse-position modulation for indoor wireless infrared communications[J]. *IEEE Trans Commun*, 1997, **45**(9): 1080–1087.
- [16] Park H, Barry J R. Trellis-coded multiple-pulse position modulation for wireless infrared communications[C]//*Proceedings of IEEE GLOBECOM 1998*, 1998.
- [17] Shiu D S, Kahn J M. Differential pulse-position modulation for power-efficient optical communication[J]. *IEEE Trans Commun*, 1999, **47**(8): 1201–1210.
- [18] Rulkov N F, Sushchik M M, Tsimring L S, et al. Digital communication using chaotic-pulse-position modulation[J]. *IEEE Trans Circuits Syst I Fundam Theory Appl*, 2001, **48**(12): 1436–1444.
- [19] Aldibbiat N M, Ghassemlooy Z, McLaughlin R. Dual header pulse interval modulation for dispersive indoor optical wireless communication systems[J]. *IEE Proc Circuits Dev Syst*, 2002, **149**(3): 187–192.
- [20] Moision B, Hamkins J. Coded Modulation for the Deep-Space Optical Channel: Serially Concatenated Pulse-Position Modulation[J]. *Dev Biol*, 2005, **4**(5): 1–25.
- [21] Kiasaleh K. Performance of APD-based, PPM free-space optical communication systems in atmospheric turbulence[J]. *IEEE Trans Commun*, 2005, **53**(9): 1455–1461.
- [22] Wilson S G, Brandt-Pearce M, Cao Q L, et al. Free-space optical MIMO transmission with Q-ary PPM[J]. *IEEE Trans Commun*, 2005, **53**(8): 1402–1412.
- [23] Djordjevic I B, Vasic B, Neifeld M A. Multilevel coding in free-space optical MIMO transmission with Q-ary PPM over the

- atmospheric turbulence channel[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2006, **18**(14): 1491–1493.
- [24] Barsoum M F, Moision B, Fitz M, et al. Iterative coded pulse-position-modulation for deep-space optical communications[C]// *Proceedings of 2007 IEEE Information Theory Workshop*, 2007.
- [25] Sethakaset U, Gulliver T A. Performance of differential pulse-position modulation (DPPM) with concatenated coding over optical wireless communications[J]. *IET Commun*, 2008, **2**(1): 45–52.
- [26] Xu F, Khalighi M A, Bourennane S. Coded PPM and multipulse PPM and iterative detection for free-space optical links[J]. *J Opt Commun Network*, 2009, **1**(5): 404–415.
- [27] Popoola W O, Poves E, Haas H. Spatial pulse position modulation for optical communications[J]. *J Lightw Technol*, 2012, **30**(18): 2948–2954.
- [28] Correia D G, Sales J C, Pinto P V F, et al. Analysis of the performance of a PAM/PPM/OOK system operating with OCDMA, under nonlinear optical effects in optical fiber propagation[J]. *J Opt Commun*, 2016, **37**(2): 233–246.
- [29] Farhat Z A, Ahfayd M H, Mather P J, et al. Practical implementation of duobinary pulse position modulation using FPGA and visible light communication[C]// *Proceedings of the 2017 IEEE 15th Student Conference on Research and Development*, 2017.
- [30] Sharma K, Grewal S K. Performance assessment of hybrid PPM-BPSK-SIM based FSO communication system using time and wavelength diversity under variant atmospheric turbulence[J]. *Opt Quant Electron*, 2020, **52**(10): 430.
- [31] Zaiton A M, Eng C H, Jasman F. Pulse position modulation characterization for indoor visible light communication system[J]. *J Phys Conf Ser*, 2020, **1502**: 012005.
- [32] Yin B L, Wang F C. Relational digital phase lock loop slot synchronizer for PPM laser communication system[J]. *Opt Commun Technol*, 1998, **22**(3): 211–215.
尹冰琳, 王福昌. PPM光通信相关式数字锁相环时隙同步器[J]. *光通信技术*, 1998, **22**(3): 211–215.
- [33] Su Y, Yao W C, Huang B X, et al. Design and implementation of PPM modulator using EPLD[J]. *Opt Commun Technol*, 1999, **23**(4): 272–277.
苏勇, 姚武川, 黄本雄, 等. 用EPLD设计与实现PPM调制器[J]. *光通信技术*, 1999, **23**(4): 272–277.
- [34] Zhang M, Qiu K, Qiu Q, et al. Word synchronization of pulse position modulation[J]. *J Univ Electron Sci Technol China*, 2000, **29**(4): 381–383.
张森, 邱昆, 邱琪, 等. 脉冲位置调制的字同步技术[J]. *电子科技大学学报*, 2000, **29**(4): 381–383.
- [35] Du Y, Zou C Y. The circuit design for PPM encoder and decoder[J]. *J Guilin Instit Electron Technol*, 2000, **20**(3): 5–10.
杜瑜, 邹传云. 红外无线PPM的调制解调电路设计[J]. *桂林电子工业学院学报*, 2000, **20**(3): 5–10.
- [36] Wang J Y, Zhang Z X. PPM in wireless infrared communication[J]. *Telecommun Eng*, 2000, **40**(5): 81–84.
汪井源, 张正线. 无线光通信中的PPM调制[J]. *电讯技术*, 2000, **40**(5): 81–84.
- [37] Pang Z Y, Piao D Z, Zou C Y. Performance comparisons of several modulation schemes for optical wireless communication[J]. *J Guilin Instit Electron Technol*, 2002, **22**(5): 1–4.
庞志勇, 朴大志, 邹传云. 光通信中几种调制方式的性能比较[J]. *桂林电子工业学院学报*, 2002, **22**(5): 1–4.
- [38] Hu Z M, Tang J X. Digital pulse interval modulation for atmospheric optical wireless communications[J]. *J Commun*, 2005, **26**(3): 75–79.
胡宗敏, 汤俊雄. 大气无线光通信系统中数字脉冲间隔调制研究[J]. *通信学报*, 2005, **26**(3): 75–79.
- [39] Zhu L J, Zhang J X. Design of PPM system in optical wireless communication based on FPGA[J]. *Opt Commun Technol*, 2006, **30**(12): 57–59.
朱乐君, 张江鑫. 基于FPGA的无线光通信PPM调制系统的设计[J]. *光通信技术*, 2006, **30**(12): 57–59.
- [40] Cheng G, Wang H X, Wu L G, et al. Performance analysis of modulation scheme for atmospheric optical wireless communications[J]. *J China Acad Electron Inf Technol*, 2007, **2**(5): 485–489.
程刚, 王红星, 吴龙刚, 等. 大气无线光通信调制方式性能分析[J]. *中国电子科学研究院学报*, 2007, **2**(5): 485–489.
- [41] Dou Z, Sha X J, Wang Y, et al. LDPC-coded optical PPM communication system over the atmosphere turbulence channels[C]// *Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Information and Automation*, 2010.
- [42] Cheng G, Wang H X, Sun X M, et al. A new modulation scheme of optical wireless communications[J]. *Chin Lasers*, 2008, **35**(12): 1914–1918.
程刚, 王红星, 孙晓明, 等. 一种新型的无线光通信调制方法[J]. *中国激光*, 2008, **35**(12): 1914–1918.
- [43] Cheng G, Wang H X, Sun X M, et al. Dual pulse-pulse interval modulation for optical wireless communications[J]. *Chin J Lasers*, 2010, **37**(7): 1750–1755.
程刚, 王红星, 孙晓明, 等. 无线光通信双脉冲间隔调制方法[J]. *中国激光*, 2010, **37**(7): 1750–1755.
- [44] Xiang J S, Wu T, Huang S, et al. Slot synchronization aided by serial concatenated pulse position modulation code system[J]. *Acta Opt Sin*, 2016, **36**(8): 0806006.
向劲松, 吴涛, 黄胜, 等. 串行级联脉冲位置调制码辅助的时隙同步技术[J]. *光学学报*, 2016, **36**(8): 0806006.
- [45] Xiang J S, Chen X L, Zhang P, et al. Clock synchronization technology for pulse position modulation with guard time at sampling frequency of 1 slot[J]. *Chin J Lasers*, 2018, **45**(10): 226–234.
向劲松, 陈雪莉, 张培, 等. 基于保护时隙的一倍时隙频率采样光PPM时钟同步技术[J]. *中国激光*, 2018, **45**(10): 226–234.
- [46] Jiang T, Zhao L, Liu H Z, et al. Performance improvement for mixed RF-FSO communication system by adopting hybrid subcarrier intensity modulation[J]. *Appl Sci*, 2019, **9**(18): 3724.
- [47] Zhang K. Dual-amplitude pulse interval modulation for optical wireless communications and optical ETC prototype[D]. Beijing: Tsinghua University, 2004.
张凯. 无线光通信双幅度脉冲间隔调制研究及其在光波ETC中的应用[D]. 北京: 清华大学, 2004.
- [48] Xu Y H, Guo Y, Qin L. Performance analysis of visible light communication system based on DPIM modulation[J]. *China New Telecommun*, 2020, **22**(17): 27–28.
徐艳红, 郭瑛, 秦岭. 基于DPIM调制可见光通信系统性能分析[J]. *中国新通信*, 2020, **22**(17): 27–28.
- [49] Ding D Q. Design of PPM for laser communication in atmosphere[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2005.
丁德强. 大气激光通信PPM调制解调系统设计[D]. 西安: 西安理工大学, 2005.
- [50] Qin L. Design of MPPM in atmospheric laser communication[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007.
秦岭. 大气激光通信中多脉冲调制系统的设计[D]. 西安: 西安理工大学, 2007.
- [51] Du A Y, Ke X Z. Study on atmosphere channel that influencing on laser PPM signal[J]. *Laser J*, 2006, **27**(1): 73–74.

- 杜安源, 柯熙政. 大气信道对激光PPM信号的影响的研究[J]. 激光杂志, 2006, 27(1): 73-74.
- [52] Wang L L, Ke X Z, Xi X L. Analyze and calculate for laser transmit through rain[J]. *Chin J Light Scatt*, 2005, 17(2): 148-153.
- 王丽黎, 柯熙政, 席晓莉. 激光在雨中传输的分析与计算[J]. 光散射学报, 2005, 17(2): 148-153.
- [53] Ke X Z, Zhao L, Yin Z Y, et al. Experimental research on the error control of wireless laser communication[J]. *J Electron Meas Instrum*, 2009, 23(6): 18-23.
- 柯熙政, 赵黎, 殷致云, 等. 无线激光通信中差错控制实验研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(6): 18-23.
- [54] Wang L L, Ke X Z, Chen L X. The testing system for optical power through atmosphere[J]. *Chin J Light Scatt*, 2005, 17(4): 378-383.
- 王丽黎, 柯熙政, 陈丽新. 基于大气激光通信系统的实验测量研究[J]. 光散射学报, 2005, 17(4): 378-383.
- [55] Liu C C, Ke X Z. Simulation about PSD facular position in space optical communication[J]. *Opt Commun Technol*, 2004, 28(6): 16-17.
- 刘长城, 柯熙政. 空间光通信中PSD光斑的位置特性仿真研究[J]. 光通信技术, 2004, 28(6): 16-17.
- [56] Ding D Q, Ke X Z. Design of PPM for laser communication in atmosphere[J]. *Opt Commun Technol*, 2005, 29(1): 50-52.
- 丁德强, 柯熙政. 大气激光通信PPM调制解调系统设计与仿真研究[J]. 光通信技术, 2005, 29(1): 50-52.
- [57] Ke X Z, Zhao L, Ding D Q. The achievement of time-slot and frame synchronization in atmosphere laser communication[J]. *Semicond Optoelectron*, 2007, 28(5): 721-724.
- 柯熙政, 赵黎, 丁德强. 一种大气激光通信中时隙同步和帧同步的实现[J]. 半导体光电, 2007, 28(5): 721-724.
- [58] Yin Z Y, Ke X Z, Zhang B. Research on error-correcting code in wireless laser communications over GF(3)[J]. *J Electron Meas Inst*, 2009, 23(7): 23-28.
- 殷致云, 柯熙政, 张波. 无线激光通信中GF(3)域上的纠错编码研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(7): 23-28.
- [59] Qin L, Ke X Z. A study of mapping scheme for dual-pulse MPPM[J]. *J Xi'an Univ Technol*, 2007, 23(3): 269-272.
- 秦岭, 柯熙政. 一种二脉冲的MPPM编码映射方法研究[J]. 西安理工大学学报, 2007, 23(3): 269-272.
- [60] Qin L, Ke X Z. Analysis of optical MPPM channel capacity without background noise[J]. *Opto-Electron Eng*, 2007, 34(7): 107-110.
- 秦岭, 柯熙政. 无背景噪声下的光MPPM信道容量分析[J]. 光电工程, 2007, 34(7): 107-110.
- [61] Huang L, Ke X Z, Wu P F. Design and simulation of OPPM-oriented TCM system[J]. *Study Opt Commun*, 2008(5): 13-15, 70.
- 黄蕾, 柯熙政, 吴鹏飞. 面向OPPM的TCM系统设计与仿真[J]. 光通信研究, 2008(5): 13-15, 70.
- [62] Zhao L, Ke X Z, Liu J. Research on differential pulse-position modulation in optical wireless communication[J]. *Laser J*, 2007, 28(2): 63-64.
- 赵黎, 柯熙政, 刘健. OWC中DPPM调制解调技术研究[J]. 激光杂志, 2007, 28(2): 63-64.
- [63] Ke X Z, Yin Z Y, Yang L H. Light polarization modulation with PPM and its key technique in atmospheric laser communication[J]. *Semicond Optoelectron*, 2007, 28(4): 553-555, 560.
- 柯熙政, 殷致云, 杨利红. 大气激光通信中光PPM偏振调制方案及其关键技术[J]. 半导体光电, 2007, 28(4): 553-555, 560.
- [64] Yang L H, Ke X Z, Ma D D. Depolarization characteristics of the polarized laser in atmosphere[J]. *Opto-Electron Eng*, 2008, 35(11): 62-67.
- 杨利红, 柯熙政, 马冬冬. 偏振激光在大气传输中的退偏研究[J]. 光电工程, 2008, 35(11): 62-67.
- [65] Yang L H, Ke X Z. BER of polarization PPM based on atmospheric optical communication[J]. *Chin J Sci Inst*, 2010, 31(7): 1664-1668.
- 杨利红, 柯熙政. 基于大气光通信偏振PPM的误码率研究[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(7): 1664-1668.
- [66] Ke X Z, Xie M Q, Gao H T, et al. Free space optical communication based on space-time trellis coding[J]. *Infrared Laser Eng*, 2012, 41(4): 1022-1027.
- 柯熙政, 解孟其, 高海涛, 等. 自由空间光通信中的空时网格码[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 1022-1027.
- [67] Ke X Z, Chen J N. Performance comparison of various pulse position modulation in wireless laser communication[J]. *Laser Technol*, 2012, 36(1): 67-76.
- 柯熙政, 陈锦妮. 无线激光通信类脉冲位置调制性能比较[J]. 激光技术, 2012, 36(1): 67-76.
- [68] Ma L N. PPM polarization modulation in atmosphere laser communication and experiment research[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2009.
- 马丽娜. 大气激光通信中PPM偏振调制及其实验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2009.
- [69] Zhao L. Research of DPPM for laser communication in atmosphere[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2006: 13-28.
- 赵黎. 大气激光通信DPPM调制解调技术研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2006: 13-28.
- [70] Huang L. The application of TCM in atmosphere laser communication system[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007.
- 黄蕾. TCM技术在大气激光通信系统中的应用研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2007.
- [71] Sun C M. Simulation and research of DAPPM system for laser communication in atmosphere[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2011: 9-20.
- 孙长梅. 大气激光通信DAPPM调制解调系统仿真研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2011: 9-20.
- [72] Jia C. Research on DHPIM modulation and demodulation for atmospheric laser communication[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2011: 14-30.
- 贾超. 大气激光通信DHPIM调制解调技术研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2011: 14-30.
- [73] Liu M P. Performances analysis of PPMS' in wireless optical communication[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2013: 13-33.
- 柳美平. 无线光通信中类脉冲位置调制性能分析[D]. 西安: 西安理工大学, 2013: 13-33.
- [74] Shi B Y. Experimental of 64-QAM modulation in wireless optical communication system[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2016.
- 石碧瑶. 无线光通信系统中64-QAM调制实验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2016.
- [75] Tian X C. Adaptive signal processing to receive the strong turbulence atmosphere laser communication[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2015.
- 田晓超. 强湍流下大气激光通信接收信号的自适应处理[D]. 西安: 西安理工大学, 2015.
- [76] Pei G Q. Performance research on multi-beam transmission and multi-aperture reception in turbulent atmosphere[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2012.
- 裴国强. 湍流大气中多光束发射/多孔径接收技术的性能研究[D].

- 西安: 西安理工大学, 2012.
- [77] Liu Z H. Research on response characteristics of semiconductor lasers and photodetectors[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
刘昭辉. 半导体激光器和光电探测器响应特性的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- [78] Zhang Y, Gao Y, Ke X Z. Analysis of spatial correlation of precoding indoor MIMO visible light communication system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2020, 47(3): 190666.
张颖, 高悦, 柯熙政. 预编码室内MIMO可见光通信系统空间相关性分析[J]. *光电工程*, 2020, 47(3): 190666.
- [79] Lin P, Wang T S, Ma W Z, et al. Propagation characteristics of 2.07 μm fiber laser in weak turbulence condition[J]. *Opto-Electron Eng*, 2020, 47(3): 190588.
林鹏, 王天枢, 马万卓, 等. 2.07 μm 光纤激光在弱湍流条件下的传输特性研究[J]. *光电工程*, 2020, 47(3): 190588.
- [80] Wang K, Xu Z Y, Li X S, et al. Analysis of space diversity method in modulating retro-reflector optical communication[J]. *Opto-Electron Eng*, 2020, 47(3): 190701.
王珂, 徐智勇, 李雪松, 等. 逆向调制无线光通信空间分集分析[J]. *光电工程*, 2020, 47(3): 190701.
- [81] Wu Y, Liu H Z, He Y, et al. Development and prospect of fountain codes in optical wireless communication[J]. *Opto-Electron Eng*, 2020, 47(3): 190623.
吴一, 刘宏展, 郝源, 等. 无线光通信中喷泉码的发展现状与展望[J]. *光电工程*, 2020, 47(3): 190623.
- [82] Mao Y C, Wang H Q, Zhang Y, et al. Research status and development of optical spatial modulation technology[J]. *Opto-Electron Eng*, 2020, 47(3): 190712.
毛一聪, 王惠琴, 张悦, 等. 光空间调制技术的研究进展[J]. *光电工程*, 2020, 47(3): 190712.
- [83] Ke X Z, Wu J L. *Principle and Application of Wireless Optical Coherent Communication*[M]. Beijing: Science Press, 2019.
柯熙政, 吴加丽. 无线光相干通信原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [84] Ke X Z, Yang S J, Wu J L, et al. Research progress of adaptive optics in wireless optical communication system for Xi'an University of Technology[J]. *High Power Laser Part Beams*, 2021, 33(8): 081003.
柯熙政, 杨尚君, 吴加丽, 等. 西安理工大学无线光通信系统自适应光学技术研究进展[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33(8): 081003.
- [85] Ke X Z, Wu J L, Yang S J. Research progress and prospect of atmospheric turbulence for wireless optical communication[J]. *Chin J Radio Sci*, 2021, 36(3): 323-339.
柯熙政, 吴加丽, 杨尚君. 面向无线光通信的大气湍流研究进展与展望[J]. *电波科学学报*, 2021, 36(3): 323-339.
- [86] Ke X Z, Yin Z Y. *Coding Theory in Wireless Laser Communication System*[M]. Beijing: Science Press, 2009.
柯熙政, 殷致云. 无线激光通信系统中的编码理论[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [87] Ke X Z, Ding D Q. A PPM synchronizer for atmospheric laser communication: CN201066849Y[P]. 2008-05-28.
柯熙政, 丁德强. 一种大气激光通信 PPM 同步器: CN201066849Y[P]. 2008-05-28.
- [88] Ke X Z, Liu J. Wireless laser communication PPM polarization modulation and demodulation method: CN101110649A[P]. 2008-01-23.
柯熙政, 刘健. 无线激光通信 PPM 偏振调制解调方法: CN101110649A[P]. 2008-01-23.

作者简介



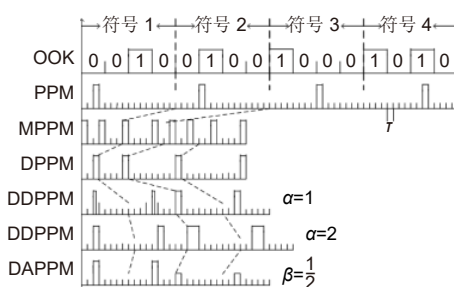
【通信作者】柯熙政 (1962-), 男, 理学博士, 二级教授。陕西省教学名师, 中国电子学会会士。主要研究方向为无线光通信理论与技术。2000 年以来获得省部级科技奖励 17 项, 在科学出版社出版专著 10 部。论文引用 H 指数 39, G 指数 63。已经培养博士研究生 30 多名。
E-mail: xzke@263.net



梁静远, 女, 硕士, 助理工程师, 主要从事无线光通信系统调制解调技术的研究。
E-mail: ljy@xaut.edu.cn

Research progress of pulse position modulation technology in optical wireless communication

Ke Xizheng^{1,2,3*}, Liang Jingyuan¹, Xu Dongsheng¹, Wang Jiafan¹



Overview: Optical wireless communication is using an optical carrier for information transmission. It has the advantages of high transmission rate, anti-electromagnetic interference, and high reliability. It has a good application prospect in solving the "last kilometer" problem, emergency communication, and satellite (satellite ground) communication. Quasi pulse position modulation refers to PPM, DPPM, their combinations and various pulse position modulation modes evolved from them. However, when the laser beam propagates through the atmospheric channel, the error control performance of the optical communication system will become worse due to various factors such as atmospheric attenuation and turbulence. In order to improve the efficiency of communication, a series of modulation technologies have been studied. Advanced modulation format and corresponding demodulation technology are selected to ensure high-efficiency transmission and low bit error rate, so as to reduce the interference of the atmospheric environment to the communication system. Therefore, the research on modulation is one of the important topics in the field of wireless optical communication. In order to select the appropriate modulation mode, Ke Xizheng made a systematic analysis of quasi pulse position modulation. Ding Deqiang analyzed the performance of PPM and realized it through hardware. Zhao Li studied DPPM and analyzed its performance. Qin Ling studied the symbol structure and constellation of MPPM and realized MPPM through hardware. Huang Lei analyzed the basic principle and performance of OPPM. Ma Lina organically combined PPM and polarization modulation. Sun Changmei analyzed the symbol structure, power spectral density and bandwidth requirements of DAPPM. Jia Chao analyzed the performance of DHPI. Liu Meiping systematically studied the symbol structure, power spectral density and bit error rate of pulse-like position modulation. Shi Biyao studied the quadrature amplitude modulation and demodulation program and analyzed the results. Tian Xiaochao discussed the adaptive threshold detection model and analyzed its performance. Pei Guoqiang studied multi-beam emission and multi-aperture reception methods to suppress turbulence and improve communication performance. Liu Zhaohui studied and optimized the response characteristics of semiconductor lasers and photodetectors to improve the modulation rate of the communication system. This paper makes a comprehensive analysis and comparison of the performance of more than ten modulation modes, obtains the best modulation mode in a certain performance, selects the matching modulation mode for different channels, and finds out the shortcomings of these modulation modes, so as to provide a theoretical basis for selecting the appropriate modulation mode in different occasions.

Ke X Z, Liang J Y, Xu D S, et al. Research progress of pulse position modulation technology in optical wireless communication[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, 49(3): 210387; DOI: [10.12086/oee.2022.210387](https://doi.org/10.12086/oee.2022.210387)

Foundation item: Shaanxi Provincial Scientific Research Program (18JK0341), Key Industrial Innovation Project of Shaanxi Province (2017ZDCXL-GY-06-01), and Xi'an Science and Technology Planning Project (2020KJRC0083)

¹Xi'an University of Technology, School of Automation and Information Engineering, Xi'an, Shaanxi 710048, China; ²Shaanxi Civil-Military Integration Key Laboratory of Intelligence Collaborative Networks, Xi'an, Shaanxi 710048, China; ³Shaanxi University of Technology, School of Physics and Telecommunications Engineering, Hanzhong, Shaanxi 723001, China

* E-mail: xzke@263.net