

自由空间无线光接入系统中 2 种 OFDM 信号的应用研究

周俊毅, 邵宇丰, 王建军, 汪志锋, 李长祥, 周 越, 季幸平

(上海第二工业大学计算机与信息工程学院, 上海 201209)

摘 要: 自由空间光通信 (Free Space Optical, FSO) 是未来极具发展前景的一种宽带无线接入技术, 但实际应用中必须考虑复杂天气条件对 FSO 通信系统收发信号的影响。通过仿真搭建了自由空间无线光接入系统, 研究了采用十六进制正交振幅 (Sixteen Hexadecimal Quadrature Amplitude, 16QAM) 以及十六进制相移键控 (Sixteen Hexadecimal Phase Shift Keying, 16PSK) 映射生成的正交频分复用 (OFDM) 信号在 5 种天气条件 (晴天、小雨、中雨、雪、雾) 下传输 100 m 及 300 m 的收发特性。通过分析接收信号的光谱图、星座图和误码特性证明: 晴天条件下, 接收信号映射的星座点收敛特征较好, 误码率低至 2.5×10^{-6} ; 雨天条件下, 接收信号质量受雨衰的影响被劣化; 雪或雾天气下, 上述仿真系统仍能在短距离内维持通过程序; 在自由空间无线光接入系统中, 16QAM-OFDM 信号的通信性能优于 16PSK-OFDM 信号。

关键词: 自由空间光通信; 复杂天气; 正交频分复用; 星座图; 误码率

中图分类号: TN 929.1

文献标志码: A

0 引言

自由空间光通信 (Free Space Optical, FSO) 是以激光束作为载波, 在自由空间中实现点到点、点到多点宽带信息无线传输的一种技术。它与传统的射频无线传输技术相比, 具有通信容量大、传输保密性好、抗干扰能力强、无需申请频谱资源等优点, 并为快速便捷地部署“最后一公里”接入问题提供了一种灵活的解决方案, 近年来获得研究人员的广泛关注^[1]。然而, 光信号在大气中的传输会受到天气条件的影响^[2-3], 尤其是大气湍流的影响。大气湍流的影响包括光束漂移、光强闪烁和光束扩展等: 光束漂移使得收发系统视距通信的对准难度提升; 光强闪烁是指光信号受到外部环境的随机影响, 是影响误码率的重要因素; 光束扩展过程将导致系统接收光功率下降。在多种复杂天气条件下, 悬浮于大气中各种形态的粒子 (雨、雾、雪、霾等) 也将导致传输光波被不断散射和吸收。此外, 无线光信号在自由空间信道中传输存在的多径衰落现象也是限制 FSO 系统收发信号质量的主要因素之一。

由于正交频分复用 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) 技术对动态资源分配的灵活性和对空间多径衰落影响的鲁棒性, 在第 4 代/第 5 代 (4G/5G) 无线接入系统中, 已成为领先的候选通信方案^[4-7]。本文搭建了基于 16QAM-OFDM 和 16PSK-OFDM 信号的自由空间无线光接入系统, 并在多种天气条件下进行了仿真实验探究 (其中光载波信号所受的吸收和散射影响将通过自由空间信道衰减系数来反应^[8-9]), 对比分析了 2 种 OFDM 信号的传输性能。仿真实验结果虽然证明了 16QAM-OFDM 信号的收发性能优于 16PSK-OFDM 信号, 但 16PSK-OFDM 信号的调制解调过程更为简单, 能减少 DSP 处理复杂度和系统收发机成本耗费, 因此在实际应用中可以根据具体情况进行灵活选择。

1 OFDM-FSO 通信系统

如图 1 所示, 该 OFDM-FSO 光接入系统可分为发射端、传输信道和接收端 3 部分。发射端部分主要由 OFDM 调制模块、电/光转换模块等组成; 传输

收稿日期: 2017-05-04

通信作者: 邵宇丰 (1977-), 男, 湖南长沙人, 副教授, 博士后, 主要研究方向为光纤通信、无线通信。

E-mail: yfshao@sspu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金 (6117064), 上海市教委科研创新项目 (15ZZ101), 上海第二工业大学校重点学科 (XXKZD1605), 上海第二工业大学内涵建设项目 (A11NH170301), 上海第二工业大学研究生项目 (A01GY17F022) 资助

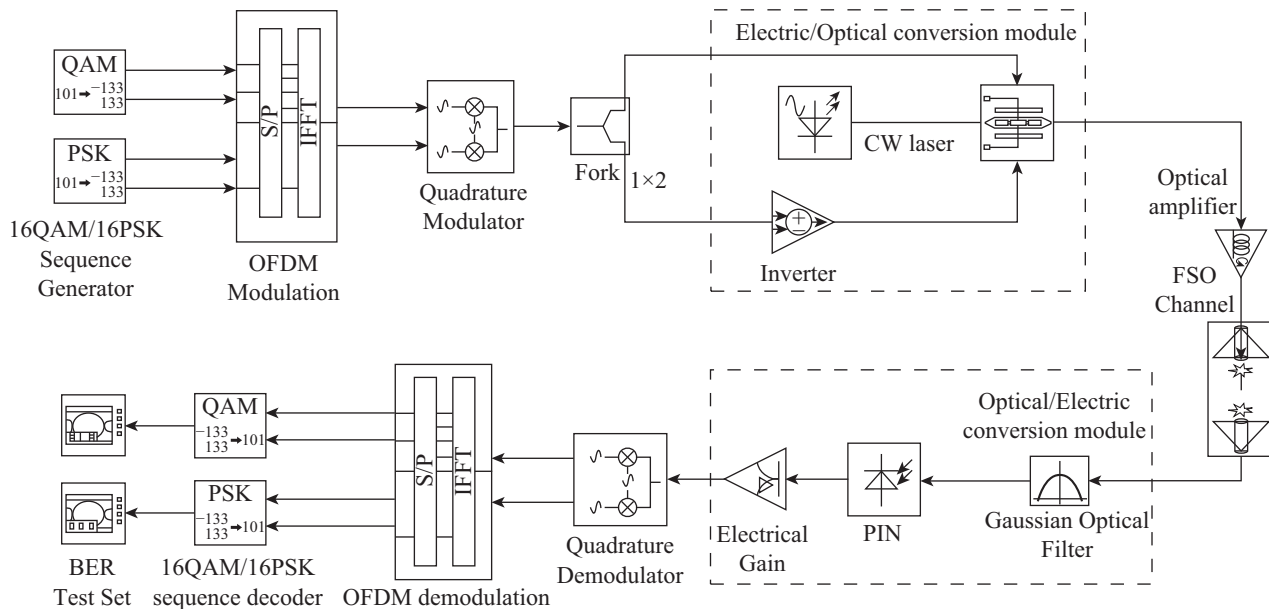


图 1 OFDM-FSO 系统配置框图

Fig. 1 System configuration diagram of OFDM-FSO

信道为自由空间传输信道;接收端部分主要由光/电转换模块、OFDM 解调模块等组成。

首先,原始二进制数据进行 16QAM 或 16PSK 星座映射,经过串/并变换(S/P)后映射到 N 个并行的子信道中。不同调制模式的数据进行傅里叶反变换(IFFT)后被分配至不同的子载波中,本系统使用的子载波数为 256, 16QAM 和 16PSK 映射形成的信号各占 128 个子载波。上述数据经过并串转换(P/S)后,输入数/模转换器(DAC)生成 OFDM 电信号。在电/光转换模块处,OFDM 电信号的同相分量和正交分量通过低通滤波器(Low Pass Filter, LPF)后分别与正弦波和余弦波混频,再通过马赫曾德尔调制器(Mach-Zehnder Modulator, MZM)进行电光转换^[10-15],最终形成 OFDM 光信号在大气仿真信道中进行传输。其中,激光器的工作频率为 193.1 THz,线宽为 0.1 MHz,发射功率为 10 dBm,信号的工作速率为 40 Gbit/s。

上述系统为点对点的自由空间无线光接入系统,激光在不同天气情况下通过大气信道时,会受到空气中固体、液体和气体悬浮颗粒物的干扰,如尘埃、水、雪、雾、霾等。此外,大气湍流会造成信号光功率的随机起伏,随着阴、雨、雾、霾的天气变化,给信号带来不同程度的振幅及相位噪声。本信道模型重点考虑天气对于光强的噪声影响。假定信号为 $s(t)$, 预计迭加波形的形式为 $s(t)m(t) + n(t)$ 。其中 $n(t)$ 为加性高斯白噪声(AWGN),这是叠加在信号

上的一种噪声,无论有无信号,噪声 $n(t)$ 都是始终存在的。它对接收功率的衰减主要取决于以下 3 个参数:大气衰减、几何损耗、发射和接收光学装置之间的传输距离。接收功率与发射功率之间的关系可表示为:

$$P_{\text{received}} = P_{\text{transmitted}} \frac{d_r^2}{(d_t + \theta R)^2} 10^{-\alpha \frac{R}{10}} \quad (1)$$

式中: d_r 表示接收孔径直径(m); d_t 表示发射孔径直径(m); θ 表示光束发散角(rad); R 表示距离(km); α 表示大气衰减(dB/km)。晴天、多云、小雨、雪天、雾霾天气情况下对应的衰减值区间以及仿真时采用的测试值如表 1 所示。

表 1 天气条件与 FSO 信道衰减系数

Tab. 1 Weather condition and attenuation coefficient of FSO

天气	衰减系数/(dB·km ⁻¹)	α 测试值/(dB·km ⁻¹)
晴天	3~7	5
大雨	7~15	10
中雨	25~40	30
雪天	100~150	125
雾天	200~300	250

此外,基于 Gamma-Gamma 模型来模拟乘性噪声 $m(t)$ 对信号的影响。Gamma-Gamma 描述了包括内尺度和外尺度下的大气起伏现象,它将辐照度分解为 2 个独立随机过程的乘积。因此,光强 I 波动

的概率密度函数为:

$$P(I) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I^{(\alpha+\beta)/2-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta}I) \quad (2)$$

$$I > 0$$

式中: I 为信号强度; α 和 β 为概率密度函数的参数; $\Gamma(\cdot)$ 是伽玛函数; $K_{\alpha-\beta}(\cdot)$ 是改进型巴塞尔函数的第2种形式。考虑在零内尺度情况下, 利用平面波来预测闪烁的概率密度函数的参数 α 和 β 可以表示为:

$$\alpha = \exp\left[\frac{0.49\sigma_R^2}{(1 + 1.11\sigma_R^{12/5})^{5/6}}\right] - 1$$

$$\beta = \exp\left[\frac{0.51\sigma_R^2}{(1 + 0.69\sigma_R^{12/5})^{5/6}}\right] - 1 \quad (3)$$

式中: $\sigma_R^2 = 1.23C_n^2 k^{7/6} R^{11/6}$, 为 C_n^2 折射率结构常数; 波数 $k = 2\pi/\lambda$; λ 为波长; R 表示距离。

在光/电转换模块处, 接收光信号先经过高斯滤波器进行滤波, 随后由光电二极管 (PIN) 探测并转化为电信号。电信号通过电增益后分为两路分别与正弦波和余弦波混频, 由此恢复了原始的 IQ 分量。其中, PIN 光电检测器中的暗电流为 10 nA, 灵敏度为 1 A/W, 电放大器的增益为 16 dB。最后, 电信号进入 OFDM 解调模块, 经过 OFDM 调制相反的过程,

最终恢复出原始二进制数据。

2 仿真实验结果分析

依据表 1 中典型的户外天气条件, 采用 5 种对应的大气衰减值 α , 在不同的传输距离下进行了多次仿真测试, 对测得的数据进行统计后, 得到了 2 种 OFDM 光信号经多种天气条件影响后的接收光谱图、星座图和误码率曲线。接收光谱如图 2 和图 3 所示 (其中横坐标中的 T 表示 10 的 12 次方), 自由空间无线光接入信号受多种天气条件的影响而出现不同程度的边带功率衰减: 当传输距离为 100 m 时, 光谱中边带功率从 -22 dBm(晴天条件) 下降至 -42 dBm(雾霾条件); 当传输距离为 300 m 时, 光谱中边带功率从 -20 dBm(晴天条件) 下降至 -93 dBm(雾霾条件)。

各种天气下 16QAM-OFDM 和 16PSK-OFDM 光信号经大气仿真信道传输 100 m、300 m 后的接收误码率曲线和星座图如图 4 所示。当传输距离为 300 m 时, 通过误码率分析仪得到 16QAM-OFDM 和 16PSK-OFDM 信号的具体数据如下: 晴天时大气衰减值为 5 dB/km, 此时误码率最低, 2 种 OFDM 信

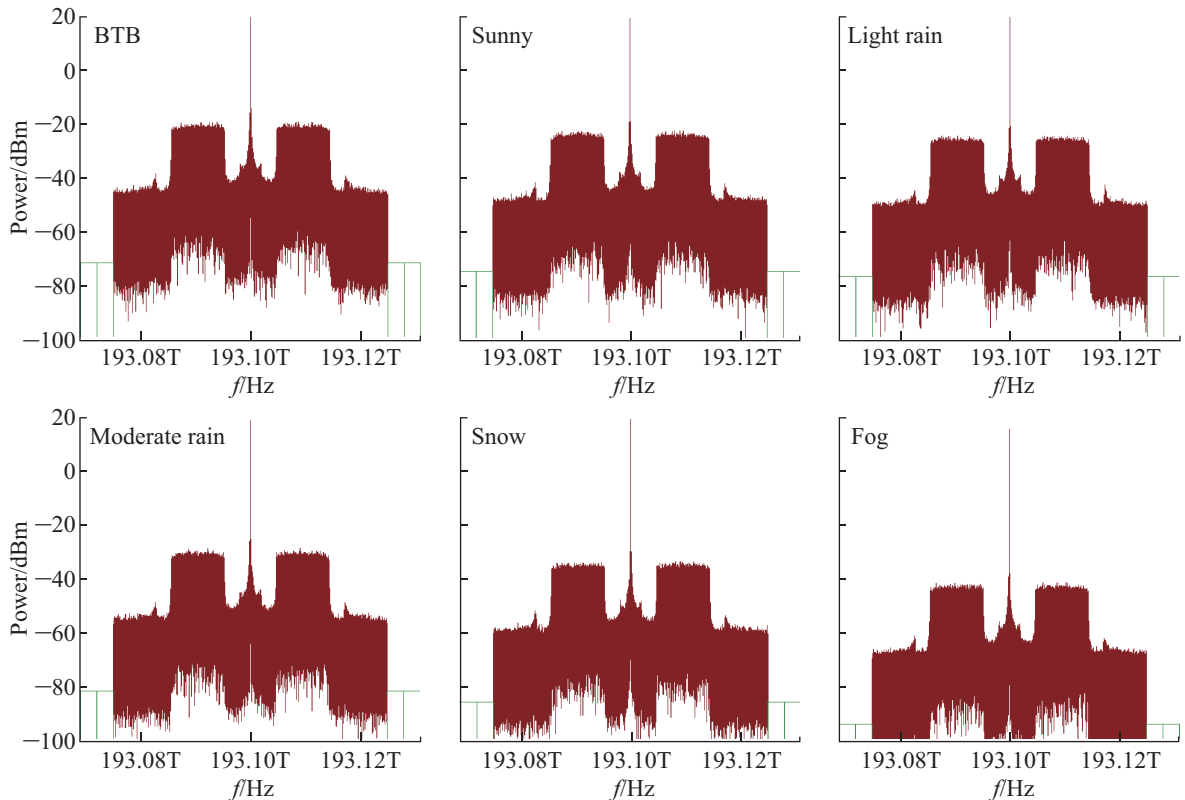


图2 信号在不同大气衰减值下传输 100 m 后的接收光谱 (第 1 张为发送信号光谱)

Fig. 2 The received optical spectrum of the signal after 100 m transmission under different atmospheric attenuation condition (The first graph is the optical spectrum of the transmitted signal)

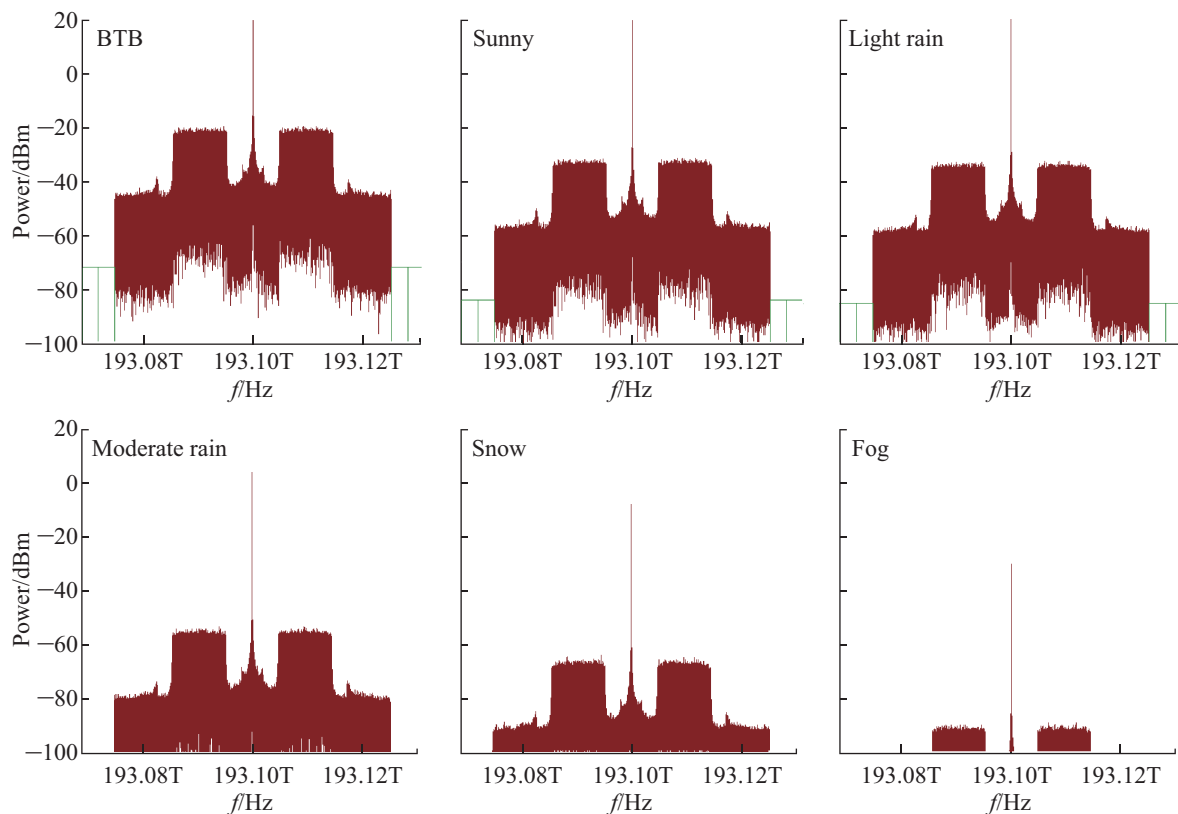


图3 信号在不同大气衰减值下传输 300 m 后的接收光谱 (第 1 张为发送信号光谱)

Fig. 3 The received optical spectrum of the signal after 300m transmission under different atmospheric attenuation condition (The first graph is the optical spectrum of the transmitted signal)

号的误码率分别为 1.9×10^{-4} 和 2.5×10^{-4} ; 小雨时大气衰减值为 10 dB/km, 此时误码率分别为 2.5×10^{-4} 和 3.2×10^{-4} ; 中雨时大气衰减值为 30 dB/km, 此时误码率分别为 5.0×10^{-4} 和 7.9×10^{-4} ; 雾霾天气下大气衰减值为 250 dB/km, 此时误码率最高, 2 种 OFDM 信号的误码率分别 6.3×10^{-2} 和 0.31。通过分析和比较, 证明了 16QAM-OFDM 信号的误码率始终低于 16PSK-OFDM 信号。

大气湍流和散射对接收信号星座图的恶化影响具体表现为矢量点弥漫、扭曲、变形等。如图 4(a) 所示, 晴天对传输质量的影响最小, 多云、小雨、雪天、雾霾对传输质量的影响依次变大。晴天时信道衰耗值很小, 星座点在 2 维空间内整齐分布为 16 点矩形阵列和 16 点圆形阵列, 星座点无混叠, 且分布集中清晰。雨天空气中水雾、雨滴密度较大, 令一些光束的能量向四周散开, 中雨对光信号的相位、幅

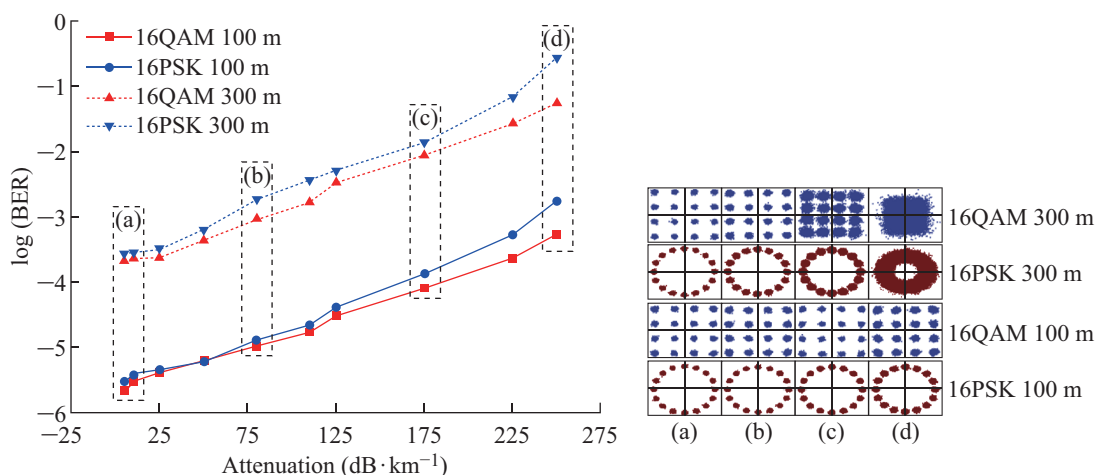


图4 距离为 100 m 和 300 m 时多种大气衰减值与误码率的关系

Fig. 4 Relationship between different atmospheric attenuation values and bit error rate with 100 m and 300 m distances

度信息的衰减影响比小雨更强,如图4(b~c)所示。图4(d)为雾霾时星座图,雾霾对光信号的衰减影响极其严重,当传输距离较远时,星座图上各矢量点分布弥散,星座图表现为明显的块状和环状,不能分辨出相位及振幅信息。观察比较图4中16QAM-OFDM和16PSK-OFDM光信号的星座图发现:前者的星座图接收质量整体优于后者,这与接收信号误码率的分析结果一致。

3 结 语

本文通过仿真搭建了一种传输速率为40 Gbit/s的自由空间无线光接入系统,采用了16QAM-OFDM和16PSK-OFDM 2种调制信号,在5种不同天气条件下实现了上述信号100 m和300 m的自由空间收发和传输。通过比较上述2种OFDM信号的光谱图、星座图和误码性能,证明了在该自由空间无线光接入系统中,16QAM-OFDM信号的通信性能优于16PSK-OFDM信号,在未来的FSO通信系统中,16QAM-OFDM信号可作为优先考虑;然而,16PSK-OFDM信号的调制解调过程更为简单,这一特点能减少数字信号处理(DSP)的复杂度和系统收发机的成本耗费,在实际应用中应根据具体情况来灵活选择。上述研究结果也为将来高谱效率、适应复杂天气的自由空间无线光接入系统的实际应用提供了仿真测试依据。

参考文献:

- [1] 陈丹, 柯熙政, 张拓, 等. 基于16PSK调制的副载波无线光通信实验研究[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0105005-1-0105005-8.
- [2] 赵黎, 柯熙政, 孙林丽. 降低FSO-OFDM系统峰值平均功率比研究[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(9): 1749-1753.
- [3] 邵宇丰, 方安乐, 龚玉梅, 等. 上行八进制相移键控信号的零差相干探测光接入新方案[J]. 上海第二工业大学学报, 2015, 32(2): 120-125.
- [4] 房晓飞, 刘毓, 梁猛. 16QAM相干光检测OFDM系统性能研究[J]. 电子设计工程, 2015, 23(7): 189-192.
- [5] 柯熙政, 雷思琛, 李蓓蕾. 无线光正交频分复用系统的实验研究[J]. 中国激光, 2015, 42(12): 1205003-1-1205003-9.
- [6] 何金池. 光OFDM系统及其关键技术的研究[D]. 陕西: 西安邮电大学, 2011.
- [7] 于刚. 大气湍流对空间相干光通信系统性能影响的研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2012.
- [8] 张拓. 副载波16PSK调制的无线光通信系统实验[D]. 陕西: 西安理工大学, 2014.
- [9] 陈丹, 柯熙政. 大气弱湍流信道无线光副载波调制识别研究[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(7): 070601-1-070601-7.
- [10] DENG L, LIU D, PANG X, et al. 42.13 Gbit/s 16qam-OFDM photonics-wireless transmission in 75-110 GHz band[J]. Progress in Electromagnetics Research, 2012, 126: 449-461.
- [11] SHAO Y F, WANG Y J, CHI N. 60-GHz RoF system with low PAPR 16QAM-OFDM downlink using PTS segmentation[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(9): 855-858.
- [12] SHAO Y F, CHI N, FAN J Y, et al. Generation of 16-QAM-OFDM signals using selected mapping method and its application in optical millimeter-wave access system[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(15): 1301-1303.
- [13] BOUZIANE R, SCHMOGROW R, HILLERKUSS D, et al. Generation and transmission of 85.4 Gb/s real-time 16QAM coherent optical OFDM signals over 400 km SSMF with preamble-less reception[J]. Optics Express, 2012, 20(19): 21612-21617.
- [14] SHAO Y F. PAPR reduction and receiver sensitivity improvement in 16QAM-OFDM RoF system using DMT modulation and BTN-PS technique[J]. Optics & Laser Technology, 2016, 77: 59-63.
- [15] CAI X M. Effect of atmosphere on laser communication system[J]. 光子学报, 2014, 43(1): 0101002-1-0101002-4.

Application Research of Two Kinds of OFDM Signals in Free Space Wireless Optical Access Systems

ZHOU Junyi, SHAO Yufeng, WANG Jianjun, WANG Zhifeng

LI Changxiang, ZHOU Yue, JI Xingping

(School of Computer and Information Engineering, Shanghai Polytechnic University, Shanghai 201209, China)

Abstract: Free space optical (FSO) is a kind of broadband wireless access technology with great development prospects. However, the influence of complex weather conditions on FSO communication system should be considered in practical application. A free space wireless optical access system was built by simulation. The orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) signals which were generated by using sixteen hexadecimal quadrature amplitude mapping (16QAM) and sixteen hexadecimal phase shift keying (16PSK) mapping transmitted with 100m and 300m distance under five weather conditions (sunny, light rain, moderate rain, snow, fog). By analyzing optical spectrum diagrams, constellation diagrams and bit error rate (BER) characteristics of the received signal, it was proved that under sunny weather conditions, the convergence characteristics of constellation diagram was better, and the BER was as low as 2.5×10^{-6} . On the rainy day, the system receiver performance was deteriorated by the influence of rain attenuation. Under snow or foggy weather conditions, the simulation system could still maintain short distance communication. In free space wireless optical access systems, the communication performance of 16QAM-OFDM signals was better than 16PSK-OFDM signals.

Keywords: free space optical (FSO) communication; complex weather; orthogonal frequency division multiplexing (OFDM); constellation diagram; bit error rate (BER)

简 讯

上海第二工业大学获得上海市“助推计划”项目资助

近日, 2017 年度“助推计划——高校成果转化专项”资助项目经专家评选、主办方及上级单位审核, 上海市共有 9 所高校的 24 个项目入选。工学部李学磊主持的“新型减噪汽车门锁模具研发”、何成主持的“全球锁装配工艺优化设计开发”、秦琴主持的“基于视觉引导的太阳能电池自动化焊接技术”3 个项目获得资助, 涉及合同金额总计 161.96 万元, 合作企业收到资助共计 10.6 万元。

“助推计划——高校成果转化专项”项目是在上海创建具有全球影响力科创中心的新形势下, 为加快高校科技成果转化、产业化, 让科研成果走出研究室, 促进企业科技创新、转型发展, 由上海科技成果转化促进会和市教委科技发展中心联合推出的。经过高校成果申报筛选、校企对接、合同签订、专家评审、主办方审核等环节, 最终确定入选资助项目。