

基于 16PSK 调制的副载波无线光通信实验研究

陈 丹 柯熙政 张 拓 代 鲁

西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048

摘要 大气湍流和天气条件势必影响无线光通信所传输的光信号质量,增加系统误码率,减小通信距离。实验基于现场可编程门阵列(FPGA)和AD9788设计了无线光副载波16进制相移键控(16PSK)调制模块,搭建了基于副载波调制的无线光通信系统,并在4种不同天气条件(阴、小雨、中雨、小雪)下进行了通信实验。对比分析了接收端信号的星座图、误码率、眼图和功率谱,其中阴天星座图相位信息聚敛性明显,误码率约为 2.9×10^{-3} ,而雪天相位信息弥散;四种天气下功率谱曲线在载频处功率均最大,且阴天和小雨功率谱曲线抖动小、更光滑。实验结果验证了所设计的16PSK副载波调制无线光通信系统实现点对点通信的可行性。

关键词 光通信;无线光通信;16PSK调制;不同天气;星座图;误码率

中图分类号 TN929.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0105005

Experimental Research on Wireless Optical Communication Based on 16PSK Subcarrier Modulation

Chen Dan Ke Xizheng Zhang Tuo Dai Lu

*College of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology,
Xi'an, Shaanxi 710048, China*

Abstract Atmospheric turbulence and the weather conditions are bound to affect the quality of optical signal in wireless optical communication, increase the system error rate and reduce the communication distance. 16 binary phase shift keying (16PSK) subcarrier modulation block in wireless optical communication system is designed based field programmable gate array (FPGA) and AD9788. Subcarrier modulated wireless optical communication system is established, and communication experiments are performed under four weather conditions (cloudy, sunny, rainy, snowy). The constellation diagram, error rate, eye diagram and the power spectrum on different weathers are analyzed and contrasted at the receiver. The phase convergent information in cloudy is better than other weathers, and the bit error rate is about 2.9×10^{-3} , while phase information is dispersive in snowy. Power spectrum curve has the largest power at the carrier frequency under four kinds of weather, and the spectrum curves under cloudy and light rain weathers are smoother and less jitter. The experimental results prove that the wireless optical communication on subcarrier 16PSK modulation is feasible to realize point to point communication.

Key words optical communications; wireless optical communication; 16PSK modulation; different weathers; constellation; error rate

OCIS codes 060.2605; 060.4510; 060.4080

收稿日期: 2014-07-01; 收到修改稿日期: 2014-08-21

基金项目: 国家自然科学基金(61377080)、陕西省自然科学基金(2012JQ8004)、西安市科技计划项目基金(CXY1341(5))、陕西省教育厅科学研究计划(14JK1542)、西安理工大学大学生科技创新基金(2013CX014)、西安理工大学高层次人才基金(105-211202)

作者简介: 陈 丹(1975—),女,博士,讲师,主要从事大气激光通信及信号处理等方面的研究。E-mail: chdh@xaut.edu.cn

1 引 言

无线光通信系统成本低、体积小、安装灵活,同时还具有大容量与保密性好的优点,是一种具有广泛应用前景的通信技术^[1]。它是大气随机信道为传输媒介,势必会受到大气湍流和天气条件的严重影响^[2]。大气湍流导致激光信号在传输过程中产生光强起伏现象,恶劣天气使载有信息的光信号产生散射和衰减,这些都会严重造成功率衰减和误码,甚至接收瞬时中断^[3-5]。无线激光通信普遍采用强度调制/直接探测(IM/DD)系统,开关键控(OOK)作为主要调制方案,受光强起伏影响较大,副载波强度调制是一种能有效地抑制大气湍流的调制方法^[6-7],其性能优于OOK调制。目前,国内外无线光副载波调制性能的研究大都基于低阶调制进行,2012年,Song等^[8-9]在大气湍流K分布和负指数分布信道模型下对副载波二进制相移键控(BPSK)和差分相移键控(DPSK)调制误码率进行了理论推导,2008年,温强等^[10]基于BPSK调制进行了无线光通信实验研究,2010年,Ijaz等^[11]在大气湍流信道下对无线光OOK和BPSK调制方式进行了实验研究,通过眼图和功率谱分析了大气湍流光强起伏对信号传输的影响。高阶调制可以增大信息传输速率,提高频带利用率,因此本文设计了基于16进制相移键控(16PSK)副载波强度调制的无线光通信系统,并在不同天气条件下进行了实验研究,通过大量实验数据分析了不同天气条件对通信性能的影响,验证了所设计通信系统的可行性。

2 16PSK副载波调制无线光通信系统

2.1 副载波16PSK调制

多进制相移键控(MPSK)调制是利用载波的M种不同相位来表征输入的数字信息。16PSK调制把二进制数字序列中每4个比特分成一组,共有16种组合,即载波的16种不同相位,每种相位对应4比特信息,为一个码字。实验中16PSK解调采用相干解调方法,对调制信号用两路正交的相干载波解调分离出两路正交信号后,再经过并串转换成为串行数据输出。16PSK调制/解调系统原理框图如图1所示。

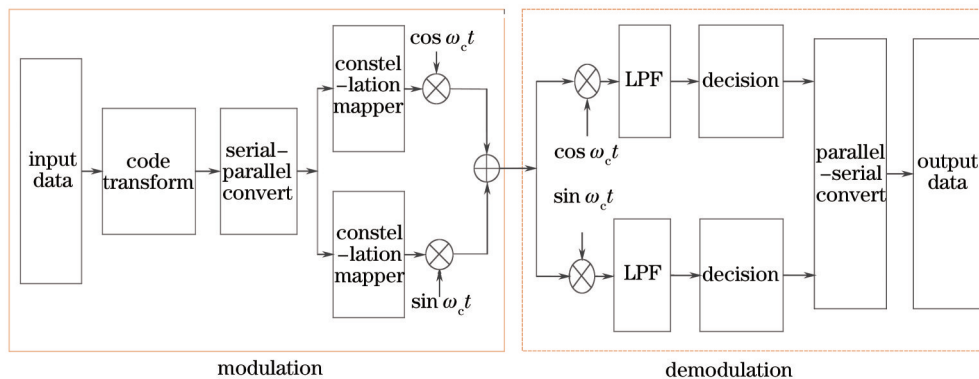


图1 16PSK调制/解调系统框图

Fig.1 Block diagram of 16PSK modulation and demodulation system

16PSK调制基于现场可编程门阵列(FPGA)实现。在FPGA中产生固定循环的二进制序列码流,然后进行码元转换,把连续的4个比特转换为一个码元,再对每个码元进行星座图映射,其中每一组码元转换为正交支路Q和同相支路I,根据Q路数据和I路数据映射到相应的16个相位 φ_n ,可计算出Q路输出值和I路输

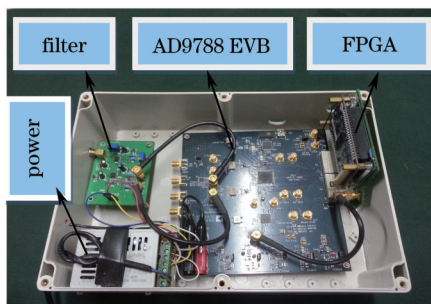


图2 发射端副载波调制模块

Fig.2 Subcarrier modulation module on transmitting terminal

出值。发射端模块采用ADI公司的AD9788 EVB实现调制信号的数/模(D/A)转换。AD9788具有I、Q调制功能,数据振荡器(NCO)可以提供两路正交载波,这两路正交载波与外部输入数据(I路、Q路数据)分别相乘后经过求和输出模拟调制信号,最后再经过低通滤波器(LPF)驱动激光器发光。发射端调制部分硬件如图2所示。

2.2 实验系统

实验系统含发射和接收两部分。发射端主要包括:FPGA(型号:Altera Cyclone EP4CE)模块、数模转换模块(型号:AD9788 EVB)、滤波模块、模拟激光器(型号:LQA850)、信标激光器及发射望远镜。接收端主要包括:一段耦合光纤、光电探测器、接收望远镜及计算机。在系统发射端,对需要传输的二进制码流预先进行16PSK调制,调制后的电信号经过D/A转换后经过成型滤波再驱动激光器,使激光器输出光波,通过发射天线将光信号发射出去。在接收端,通过接收望远镜将光信号耦合到光纤中,再通过光电探测器转化为电信号,计算机中数据采集卡采集数据进行处理。实验原理见图3所示,实验系统实物见图4所示。

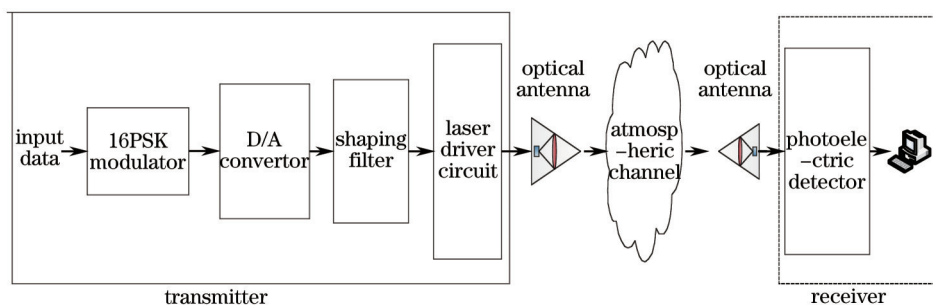


图3 系统实验原理图

Fig.3 Principle diagram of system experiment

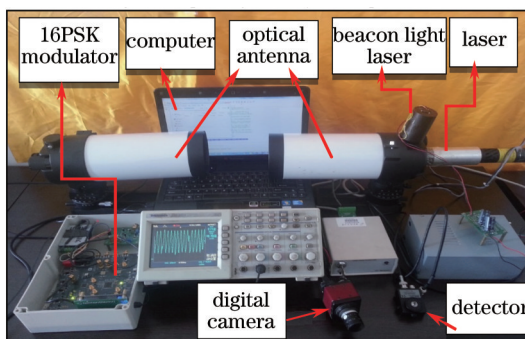


图4 16PSK调制无线光通信系统实物图

Fig.4 Diagram of 16PSK modulated communication system

3 外场测试

外场实验中系统发射端、接收端分别位于西安理工大学金花校区教五楼621和教六楼820之间,通信链路长度大约为70 m,链路之间无明显遮蔽物。其中16PSK调制信号载波频率为1.5625 MHz,码元传输速率为0.3906 MHz,接收端系统采样频率为40 MHz,每次采集118800样本点。外场环境与实验装置见图5所示。

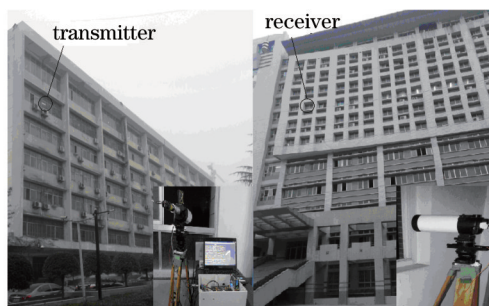


图5 系统外场测试图

Fig.5 Diagram of field testing system

4 不同天气对无线光通信的影响

雨、雪、雾、云等各种天气环境都会影响其通信质量,缩短通信距离,甚至导致通信中断,很多研究人员从理论上开展了天气对光信号传输影响的研究^[12-13]。大气对激光信号的散射作用与微粒的数目和大小有关,微粒越多,散射越严重,衰耗越大。在无线激光通信波段,大气分子的散射影响非常小,大气中的气溶胶粒子尺寸远大于激光波长,气溶胶粒子尺寸只要分布在0.1~10 μm之间,气溶胶粒子引起的散射就与天气情况(雾、雨、雪等)密切相关,不同的天气情况下,气溶胶粒子引起的散射衰减也不同。

激光通过大气信道时会受到信道中尘埃、烟、雾、水等多种固体、液体和气体悬浮颗粒物。在雨、雾、雪等各种复杂气象环境中,会大量吸收光束的能量,使光强度降低,同时气象条件的不稳定性也会导致通信系统极不稳定,传输光信号的光强发生起伏,甚至引起通信中断。一般用比尔-朗伯定律表示激光受到的大气衰减:

$$\tau(r) = P(r)/P(0) = \exp(-\sigma r), \tag{1}$$

式中 $\tau(r)$ 为传输距离 r 后的大气透射率, $P(r)$ 为传输距离 r 后的激光功率, $P(0)$ 为传输距离 r 前的激光功率, σ 为传输单位距离的大气衰减系数。实验中,激光波长落在大气吸收频谱范围内的传输窗口中,所以散射对激光的影响比吸收对激光的影响大得多。由文献[2]知道,在阴天、小雨、中雨、雪天情况下,衰耗值分别为5~15、20~35、35~50、50~150 dB/km,其中雪天衰减最大,对光通信性能影响最大。

5 实验结果分析

采用所搭建的16PSK副载波调制无线光通信系统进行了长期外场实验,从大量不同天气下的实验数据中选出4种典型天气下的数据,对接收端误码率、星座图、眼图及信号功率谱进行了对比分析。表1为实验结果分析中所采用实验数据测试日期、时间、天气情况。

表1 实验数据测试时间与天气情况

Table 1 Time and weather conditions of collecting data

Time	Amount of precipitation in snowfall /mm	Weather
2013-8-26 T 17:40	0	Cloudy
2013-7-28 T 08:30	8.2	Light rain
2013-7-22 T 14:30	24.7	Moderate rain
2014-1-16 T 13:20	2.2	Light snow

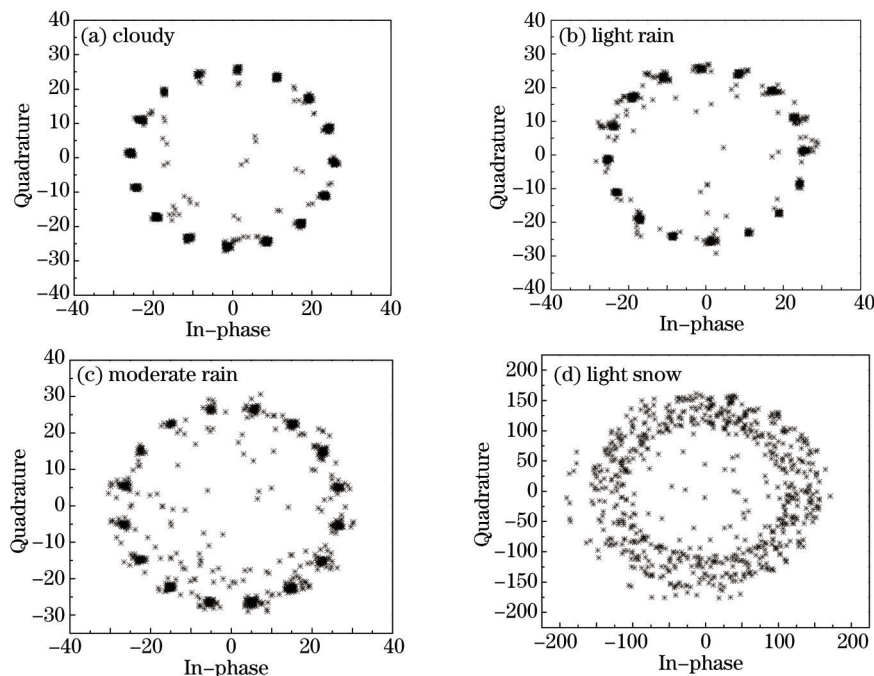


图6 不同天气条件下信号星座图

Fig.6 Signal constellation diagrams under different weather conditions

5.1 不同天气下星座图、眼图与误码率

大气信道是一种有记忆的时变信道,大气散射和大气湍流对调制信号星座图影响较大,所造成的相位模糊、偏移以及多普勒频移给星座图检测带来巨大困难,尤其是不同天气对光信号传输的影响也不一样,在接收端信号的星座图中表现为矢量点弥散、旋转、变形等。图6为在不同天气条件下经大气信道后接收端16PSK信号星座图。信号在不同天气条件下所受到的衰减程度不同,阴天对传输质量的影响最小,小雨、中雨、小雪传输质量影响依次变大。阴天时大气信道较稳定,光信号会主要受大气中悬浮颗粒的散射、分子的吸收、大气湍流作用,而受大气衰减影响较小,大部分矢量点分布比较集中,如图6(a)所示。雨天空气中雾滴、雨滴密度较大,闪烁对光信号的影响几乎没有,光信号主要受大气散射衰减的影响,雨滴、雾滴阻挡了

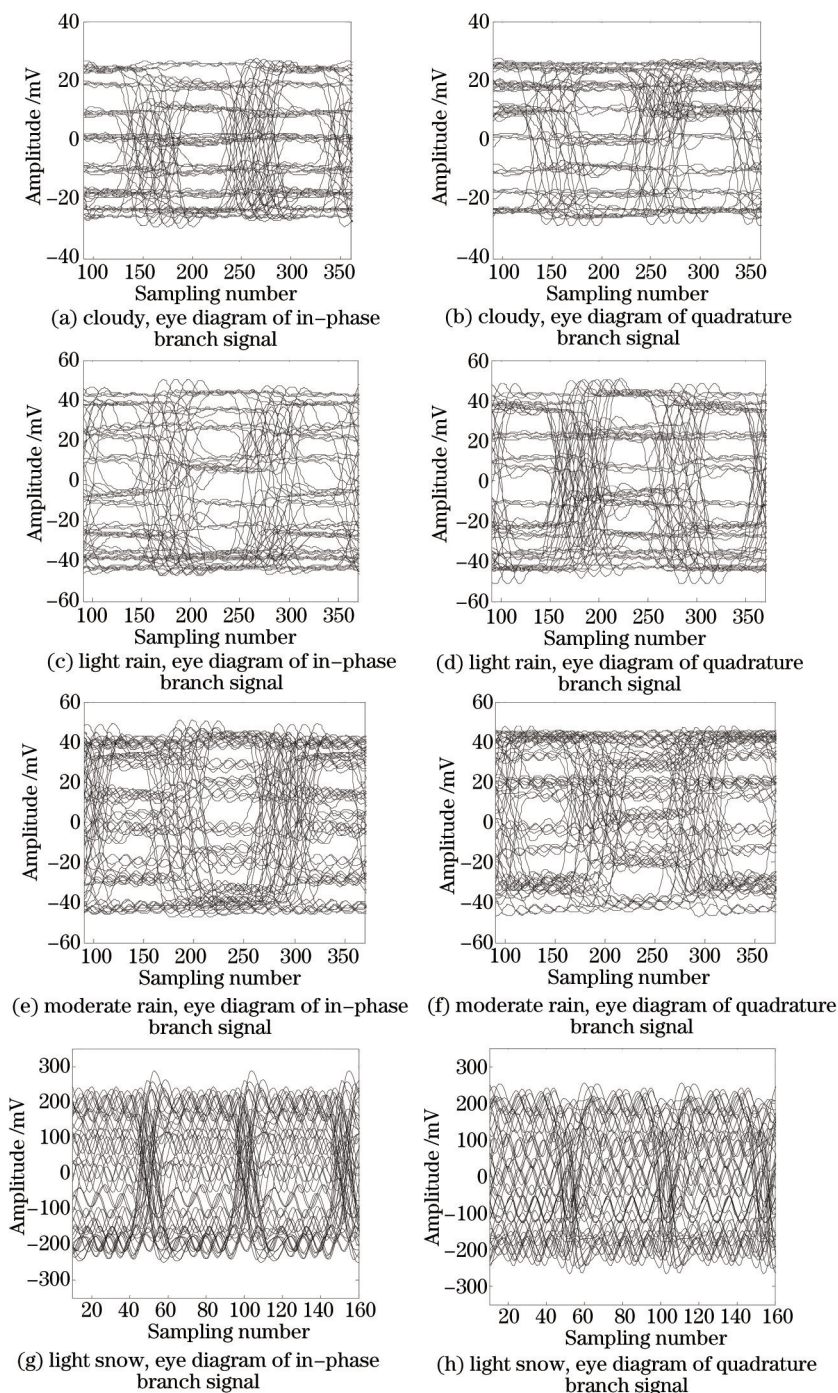


图7 不同天气条件下的眼图

Fig.7 Eye diagrams under different weather conditions

光束的传播,使一部分光能量向四面八方散开,形成了散射效应^[14]。大气的散射作用与微粒的数目和大小有关,微粒越多,散射越严重,衰耗也就越大,所以小雨对光信号的幅度、相位信息的衰减影响小于中雨,如图6(b)和(c)所示。图6(d)为小雪时星座图,星座图上各矢量点分布弥散,星座图出现明显的两个环状,不能分辨出相位信息,因此雪天对光信号的衰减影响比阴天和雨天更大。

眼图包含丰富的信息,体现了数字信号整体的特征,从眼图上可以观察码间串扰和噪声的影响。“眼睛”张的越大,眼图越端正,码间串扰越小;反之码间串扰越大。图7是在不同天气条件下对系统接收端实测数据经过数据采集卡采集后,再利用仿真软件所绘制的眼图。由图7可以看出,阴天时眼图“眼睛”开启最大,眼图的线迹比较清晰,此时系统受到码间串扰影响最小;雨天系统会受到雨滴散射的影响,中雨时的散射强度大于小雨散射强度,所以小雨、中雨时眼图“眼睛”都会变小,而且中雨时眼图的线迹比小雨时的线迹更加模糊不清。雪天时眼图“眼睛”已经基本闭合,且眼图的线迹最模糊,此时通信系统受到的散射、噪声影响最大。

对采集到的实验数据还进行了误码率分析,误码率如图8所示。由图8可知,不同天气对系统性能的影响和星座图分析结果是一致的,其中,雪天时误码率是最大的,达到 2.92×10^{-2} ,而阴天时误码率最小,为 2.9×10^{-3} 。小雨和中雨误码率分别为 3.5×10^{-3} 、 4.8×10^{-3} 。实验链路不同天气下误码率都较高,与系统收发没有严格同步有关,同时,接收端接收到的光信号不仅包括了信号光,而且还引入了背景光噪声以及探测器本底噪声,在误码率分析中未对该类噪声进行滤波也是导致误码率较高的原因。

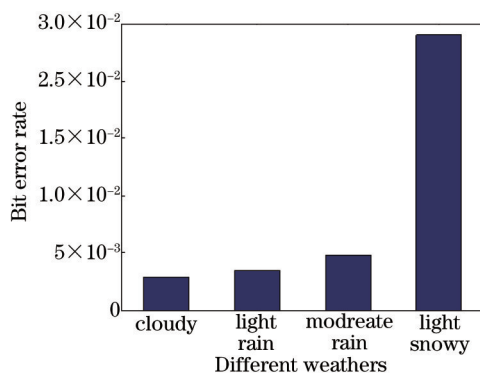


图8 不同天气条件下误码率直方图

Fig.8 Bit error rates under different weather conditions

5.2 信号功率谱密度(PSD)分析

对实验数据采用 Welch 法做功率谱分析, Welch 法是采用信号分段重叠、加窗及快速傅里叶变换(FFT)进行的功率谱估计,其功率谱密度函数为

$$P(f) = \frac{1}{ML} \sum_{i=1}^L \left| \sum_{n=0}^{M-1} x_i(n) d(n) \exp(-j2\pi fn) \right|^2 \quad (2)$$

把实验数据 $x(n)$ 分为 L 段数据 $x_i(n)$, 对每段数据乘以窗函数 $d(n)$ 后作 FFT, 最后对每段数据的频谱幅值平方加和平均得到 $x(n)$ 的功率谱密度。将 4 种不同天气条件(阴天、小雨、中雨、小雪)下的数据各取 8192 个点。每次选取 8192 个点进行 FFT, 采用海明窗 1000 点, 分段混叠点数为 500 点对数据进行谱估计。

图9为不同天气条件下接收信号功率谱估计图,可以看出,在阴天、小雨、中雨时,信号功率谱曲线较平稳,而雪天由于信号光会受到较强的衰减影响,到达探测器接收面上的光强变化较大,功率会发生较强的抖动,表现为谱线不光滑。4种天气下功率谱最高能量分布都在载波频率 1.5625 MHz 附近,载波频率处的谱线受天气影响展宽,其中阴天功率达到 11.45 dB,小雨为 10.83 dB,中雨为 9.06 dB,而小雪天时衰减到 4.94 dB,从图9还可以看出不同天气条件下噪声都有不同程度的能量分布,在 4.9 MHz(箭头处)附近为一固定频率噪声能量分布,该噪声在不同天气下都存在,为实验系统引入的固有噪声。

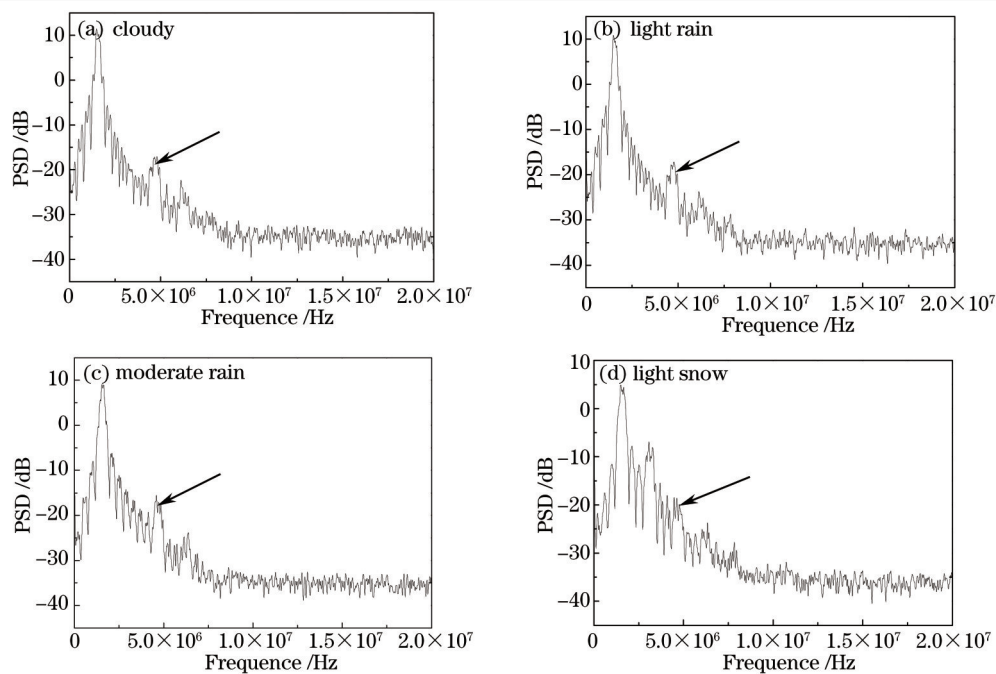


图9 不同天气条件下的功率谱估计图

Fig.9 Diagrams of spectral estimation under different weather conditions

6 结 论

基于FPGA设计了激光器16PSK调制模块,搭建了副载波16PSK无线光通信系统,在各种不同天气条件下进行了短距离通信链路实验。针对不同典型天气条件,在系统接收端进行了信号星座图、眼图、误码率和功率谱性能分析。随着天气条件从阴、雨到雪的恶化,通信系统性能也随之下落,星座图弥散程度加重且16PSK相位信息模糊,接收端信号功率从阴天到雪天衰减约6 dB。实验结果初步验证了16PSK无线激光通信系统的可行性,为今后无线光高阶副载波调制实现远距离、高速率通信的研究奠定了基础。对于实验系统误码率较高的问题,今后工作将进一步开展在系统中加入均衡滤波模块以及实时解调模块,实现收发严格同步,从而降低系统误码率,提高通信距离。

参 考 文 献

- 1 Ma Ning, Li Xiaoyi, Yang Gang, *et al.*. A novel dual-amplitude fixed length digital pulse interval modulation scheme[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(9): 090602.
马 宁, 李晓毅, 杨 刚, 等. 一种新型的双幅度定长脉冲间隔调制方式[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(9): 090602.
- 2 Wang Tingyao. *Optical Wireless Access Technology and Application*[M]. Beijing: Science Press, 2009. 21-29.
王廷尧. *无线光接入技术和应用*[M]. 北京: 科学出版社, 2009. 21-29.
- 3 Arnon S. *Optical Wireless Communication*[M]. New York: Marcel Dekker, 2003. 18-26.
- 4 Fu Qiang, Jiang Huilin, Zeng Zongyong, *et al.*. Research on influence of atmospheric turbulence for laser communication at high data rate by simulation experiments[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(s1): s105007.
付 强, 姜会林, 曾宗泳, 等. 大气湍流对高速激光通信影响模拟实验研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(s1): s105007.
- 5 Wu Xiaojun, Wang Hongxing, Liu Min. Affect analysis of receiving aperture on bit-error rate performance in free space optical communication system under different visibilities[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33 (10): 1006003.
吴晓军, 王红星, 刘 敏. 不同能见度下接收孔径对无线光通信误码率性能影响分析[J]. *光学学报*, 2013, 33(10): 1006003.
- 6 Q Lu, Q Liu, G S Mitchell. Performance analysis for optical wireless communication systems using sub-carrier PSK intensity modulation through turbulent atmospheric channel[C]. *Global Telecommunications Conference*, 2004, 3: 1872-1875.
- 7 Ma Xiaoping, Sun Jianfeng, Zhi Yanan, *et al.*. Research on DPSK modulation and self-differential homodyne coherent detection technology to overcome atmospheric turbulence effect in the satellite-to-ground laser communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013,

- 33(7): 0706017.
 马小平, 孙建锋, 职亚楠, 等. DPSK 调制/自差动零差相干探测技术克服星地激光通信中大气湍流效应的研究[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0706017.
- 8 Song X, Niu M, Cheng J. Error rate of subcarrier intensity modulations for wireless optical communications[C]. Commun Lett, 2012, 16(4): 540-543.
- 9 Song X, Cheng J. Optical communication using subcarrier intensity modulation in strong atmospheric turbulence[J]. J Lightwave Technol, 2012, 30(22): 3484-3493.
- 10 Wen Qiang, Zhi Guoning, Lu Bo. Optical wireless communication based on BPSK[J]. Optics & Opt-Electrical Technology, 2006, 4(5): 49-51.
 温 强, 智国宁, 卢 波. 基于 BPSK 的无线光通信实验研究[J]. 光学与光电技术, 2006, 4(5): 49-51.
- 11 M Ijaz, Z Ghassemlooy, S Ansari, *et al.*. Experimental investigation of the performance of different modulation techniques under controlled FSO turbulence channel[C]. 5th International Symposium on Tele- Communications, 2010. 59-64.
- 12 Cai xinmei. Effect of atmosphere on laser communication system[J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(1): 1-4.
 蔡新梅. 大气环境对激光通信系统的影响[J]. 光子学报, 2013, 42(1): 1-4.
- 13 Guo Jing, Zhang He, Wang Xiaofeng. Attenuation and transmission of laser radiation at 532 nm and 1064 nm through rain[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(1): 0101004.
 郭 婧, 张 合, 王晓锋. 降雨对 532 nm 和 1064 nm 激光传输的衰减特性研究[J]. 光学学报, 2011, 31(1): 0101004.
- 14 Andrews L C, Phillips R L. Laser Beam Propagation through Random Media[M]. Bell Ingham: SPIE Optical Engineering Press, 2005.

栏目编辑: 王晓琰