文章编号:1001-5078(2020)11-1379-05

· 光电技术与系统 ·

空间光 DPSK 发射与自相干接收系统实验

张慧颖,陈玲玲,丁旭辉,于海越 (吉林化工学院信息与控制工程学院,吉林吉林132022)

摘 要:搭建通信速率为10 Gbps的光 DPSK 调制发射、自相干接收单元实验测试平台。采用 光相位调制和自相干接收技术实现光 DPSK 系统设计。为稳定输出信号解决相位漂移,发射 单元设计出自适应增益控制单元和交叉点自适应控制单元。在系统测试平台上,完成差分编 码模块、发射单元和自相干接收单元及系统性能测试。实验室环境条件下,测得系统接收单元 灵敏度为-48 dBm,通信系统误码率优于1×10⁻⁷;误差矢量幅度为7%,通信性能较好,满足 系统设计指标要求。

关键词:光 DPSK 调制;发射;自相干接收;测试平台 中图分类号:TN929.11 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2020.11.015

Experiment of space optical DPSK transmitting and self-coherent receiving system

ZHANG Hui-ying, YU Hai-yue, DING Xu-hui, CHENG Ling-ling

(College of Information and Control Engineering, Jilin Institute of Chemical Technology, Jilin 132022, China)

Abstract: An experimental test platform for 10Gbps optical DPSK modulation-emission and auto-coherent receiver unit is constructed. The optical DPSK system is designed using optical phase modulation and self-coherent receiving technology. In order to stabilize the output signal and solve the phase drift, the adaptive gain control unit and the adaptive control unit are designed. On the system test platform, the differential coding module, transmitter unit, self-coherent receiver unit and system performance test are completed. The sensitivity of receiving unit is -48 dBm, the bit error rate of the communication system is better than 1×10^{-7} , the EVM(error vector amplitude) is 7% and the communication performance is better.

Keywords: optical DPSK modulation; transmit; self-coherent receiving; test platform

1 引 言

自由空间光通信(Free Space Optical Communication,FSO)利用激光器发出的光波在大气中进行 通信。与传统通信方式相比,FSO 的通信介质无需 光纤或电缆,通信速率可达 Gbps 及以上,传输距离 可从几十米到几万公里,而且具有通信容量大、光束 方向性好、无频率限制、保密性强等优点,成为当今 光通信领域的研究热点之一^[1-3]。由于激光束在大 气信道中传输时,受到衰减效应和相位波动影响导 致 FSO 系统性能下降,基于相位调制/相干检测的 相干光通信系统具有优秀的抑制背景噪声能力,可 减轻湍流信道的损伤且频谱效率得到提高。2002 年,美国贝尔实验室^[4]采用差分相移键控(Differential Phase Shift Keying, DPSK)调制方式实现了40

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(No. 20180101336JC); 吉林化工学院重大科研项目; 吉林化工学院博士启动项目 资助。

作者简介:张慧颖(1982 -),女,博士,副教授,主要研究方向为空间光通信发射及接收技术。E-mail:yingzi1313@163.com 收稿日期:2019-12-11;修订日期:2020-01-16 Gbps的密集波分复用信号传输,通信距离可达4000 公里;2005年,日本东京大学研究组实现了光相干 接收对正交相移键控(Quadrature Phase Shift Keying,QPSK)信号的接收,采用数字信号处理技术完 成了信息的采样恢复,相干接收技术重新回到研究 热点;2006年,美国推出了2.5G和10G的外差相干 光接收机,通信误码率可达10^{-9[5-7]}。因此,基于 DPSK调制/相干光通信系统得到学者们的关注。 本文完成通信速率为10Gbps的光 DPSK调制发射、 自相干接收单元实验测试平台搭建,为抑制相位漂 移现象,发射单元采用带有自适应增益控制单元和 交叉点自适应控制单元结构,在实验条件下完成相 关单元功能测试,为光 DPSK 相干光通信系统实用 化研究提供参考价值。

2 实验平台设计

光 DPSK 调制/自相干接收系统设计关键如下: (1) 铌酸锂相位调制器受外界环境影响、输入射频 信号不稳定及半波电压随温度变化等因素,导致调 制后的信号发生相位漂移。因此,增益点电压和眼 图交叉点电压实时控制是发射端的关键技术。(2) 系统受相位噪声影响较大,而激光器线宽直接决定 相位噪声大小,光源超窄带宽技术也是发射端的关 键技术。(3)相比于零差探测和外差探测技术,自 相干探测无需本地载波和锁相环同步等问题,解调 结构简单^[7]。如何实现自相干延迟探测是接收端 的关键技术。基于以上分析,设计时采用激光器发 出的信号作为载波,输入的伪随机码经过差分编码 后和射频放大后加载到相位调制器上,通过改变调 制器的控制电压实现光 DPSK 信号调制。调制后的 信号经过光学天线完成信号的发送。接收端,采用 差分自相干解调结构实现相位信息到强度信息的转 换,利用 PIN 管完成光电转换后进行信号处理,解调 出原始信号^[8-10]。为了稳定调制后的信号,增加射 频放大器增益点电压控制单元和眼图交叉点电压控 制单元。实验室条件下,未考虑光信号在传输过程 中的损耗及光纤损耗,10 Gbps 光 DPSK 发射/接收 系统实验测试平台如图1所示。

实验平台由发射单元和接收单元构成。发射单元包括 Teraxion 公司的窄带宽激光器作为光源、电光相位调制器 MPZ - LN - 20、差分相移键控编码模块 13751DE、高性能射频驱动放大器 DR - DG - 12

- MO、信号发生器、ZX85-12G-S+型电平转换模 块、交叉点和增益点控制单元等几部分。接收单元 由 PIN 管、Optoplex 公司的 Colorless DPSK 解调器、 LNA-150 型光纤放大器、F-P 滤波器几部分构成。 待发送信息由脉冲码型发生器(Pulse Code Generator, PPG)或任意波形发射器(Arbitrary Waveform Generator, AWG)产生,由于差分编码后的信号非常 微弱,因此需要射频放大后驱动相位调制器,完成光 DPSK 信号调制。接收到的光信号采用掺铒光纤放 大器(Erbium Doped Fiber Application Amplifier, ED-FA)放大后送入马赫增德尔延时干涉仪(Mach Zehnder Time Delay Interferometer, MZDI),完成 DPSK 信号1 bit 延迟后与 DPSK 信号本身相异或相乘,然 后采用平衡探测结构完成信号解调^[11-12]。

光DPSK 卒帯 激光器 日位 RF词制器	▶ 信道	前置 放大器 ▶ 滤波器	→延时干涉仪
信号源 ◆ 差分 编码器 ◆ 放大器			PIN 探測器
增益点 控制单元 空叉点 控制单元		接收部分	处理单元

图1 DPSK 传输系统实验测试平台

Fig. 1 DPSK transmission system experimental test platform

调制后的信号由于温度、输入信号不稳定及环 境因素将产生相位漂移现象。通过研究铌酸锂相位 调制器内部结构可知,光相位变化量可以表示为:

$$\Delta \phi = \pi \frac{V_x}{V_{\pi}} \tag{1}$$

式中, V_x 和 V_{π} 分别表示调制信号和相位调制器的 半波电压。因此,要保证射频输出与半波电压相等, 才能实现光 DPSK 调制。通过研究射频增益放大器 内部结构可知,放大器的增益可表示为控制电压 V_e 的函数,且增益与控制电压存在线性关系。设计时, 将调制后的信号采用 99 :1 的功分器取出 1 % 的信 号,经过峰值检波器检测出载波信号的峰值,通过无 模型自适应控制算法根据每次的测量值实时调整控 制电压 V_e ,从而实现射频放大器的增益调整,确保 输出信号与半波电压实时相等,完成增益点电压实 时控制。

眼图交叉点电压实时控制是通过改变过零点电 平实现。采用 95:5 的分光器分得出 5% 的光 DPSK 信号,经过 MZDI、光电探测及信号处理后送 入自适应 PID 控制器,实现过零点电路中数控直流 电平的控制。此时调制后的输出信号为: $E_o = E_{in} \exp[j\omega_0 t + \phi + j\pi G U_m \cos(\omega_m t) / V_\pi] + V$ (2)

式中, V 表示过零点电平控制电路中的直流分量的 大小。通过改变控制电压,则可控制加入的直流分 量大小,从而实现眼图交叉点位置的改变。

3 发射单元性能测试

3.1 差分编码模块测试

信号源发出 10 G 的伪随机码作为差分编码模 块的输入信号,数据端输出电压 500 mV,差分编码 模块的时钟和数据均由信号源产生,时钟端输出电 压幅值为 400 mV,采用单端时钟驱动。设输入数据 信号是 00110100,经过差分编码后输出的信号如图 2 所示。





Fig. 2 Experimental results of differential coding

由图2看出,信号的初始码是1码,经过差分编码器后输出结果为11011000,说明编码结果的正确性,该设计具有可行性。但是输出结果上大约有1bit的延迟。

3.2 调制单元性能测试

按照图 1 左侧部分搭建调制系统实验平台。 激光器波长为 1550.52 nm,考虑到通信链路上有 3dB 的插入损耗,激光器光功率设置为 10 dBm,将 输出的光信号加载到相位调制器上,驱动放大器 的输出信号与射频输入接口相连,为了抑制调制 端的相位漂移现象,系统加入增益点自适应控制 环路和眼图交叉点调整环路,以确保输出稳定的 光 DPSK 调制信号。采用光复谱分析仪和调制分 析仪进行测试。

10 Gbps 光 DPSK 调制单元测试步骤:(1)设 置信号源输出幅度为 300 mV,时钟功率为 0 dBm, Clock 频率为 10 Gbps。由于光复谱分析仪限制, 输出信号不能是伪随机码,因此,设置发送数据为 固定的 8 位二进制码 00011001,在进行差分编码 时,首位码为 1。(2)将驱动器设置在最佳工作点 *V*_{xp} = 0.9 V 和 *V*_{amp} = 0.5 V 处,输出信号幅值约为 6~7 V。

激光器输入光功率为10 dBm,由于相位调制器 存在3 dB 插入损耗,调制后,测得输出光功率为 7 dBm,与理论分析一致。通过示波器上测得输出 波形为一条直线,这说明调制后的光信号在强度上 无改变,符合相位调制原理。采用光谱分析仪测得 调制后的 DPSK 光谱如图3 所示。



图 3 调制后的 DPSK 光谱图 Fig. 3 Spectrum of modulated DPSK

由图 3 看出,中心波长为 1550.5235 nm,调制 后的频谱得到展宽,载波分量虽得到抑制但效果不 太理想。而且相位调制器调制深度较低,导致输出 有用信号功率较小,造成光谱上存在尖脉冲。测得 调制后的光功率为 - 6.92 dBm。采用光复谱分析 仪测得调制后的相位图如图 4 所示。



图 4 DPSK 调制后的波形图 Fig. 4 Waveform of modulated DPSK

图 4 中,箭头所示曲线表示调制后的相位曲线 图。由于差分编码器的输出信号为 11101110,相位 变化与理论分析结果一致,则调制单元可实现 DPSK 信号调制,调制效果较好。调制分析仪可实 现信号简单解调,并可测出解调后的眼图。调制后 的 DPSK 眼图如图 5 所示。



图 5 调制后的信号眼图 Fig. 5 Eye diagram after modulation

由图 5 得到调制速率 10 Gbps 的眼图交叉百分 比的值约为 49.4 %,虽然与理想眼图交叉百分比之 间存在误差,但误差不大,眼图张开效果较好,说明 系统可实现正常通信且通信质量良好。器件间干扰 及内部因素影响对调制单元影响不大。

通过实验测得 DPSK 光调制单元具有可行性。

4 自相干接收单元测试

按照图 1 右侧搭建光 DPSK 接收单元测试平 台。设置信号源发送长度为 2¹⁵ - 1 的二进制伪随 机码,发送速率为为 10 Gbps;选取线宽为 10 kHz、 波长为 1550 nm 的窄带激光器;射频放大器的输入 信号为 300 mV 的差分编码信号,放大后的输出信 号可达 7 V,加入增益自适应控制和交叉点自动调 整环路。调制后的光信号沿着光纤进行传输,接收 到的光信号经过光衰减器、LNA - 220 型光前置放 大器实现放大,经由 MZDI 完成解调,采用平衡探测 完成信号的探测。经过光前置放大但未滤波的输出 眼图如图 6 所示。



图6 前置放大器输出的眼图(未滤波) Fig.6 Eye diagram of pre-amplifier output(unfiltered) 由图6看出,输出的眼图较模糊,而且眼图内部 有明显干扰,上下眼皮张开程度也不理想,这是由于 码间串扰影响较大,为了有效减小噪声影响,加入可 调谐滤波器,测得输出眼图如图7所示。



图 7 加入滤波器的前置放大器输出的眼图 Fig. 7 Eye diagram of pre-amplifier output with filter

由图 7 看出,当加入光滤波器后眼图变得非常 理想,内部干扰明显减少,眼图张开程度增大,通信 质量较为理想。图 8 为解调后输出的眼图和相 位图。



 (a) 输出眼图
 (b) 输出相位图

 图 8 解调后的输出眼图和相位图

 Fig. 8 Eye and phase diagram of demodulated signal

由眼图 8(a) 看出:解调后的眼图质量较好,眼 图内部无明显干扰,眼图张开角度较好。由图 8(b) 看出,系统输出相位稳定,相位差刚好为 180°,相位 漂移较小,由此说明系统可以很好的实现调制和解 调功能。采用误差矢量幅度(Error Vector Magnitude,EVM)测得系统误差矢量幅度为 7%,低于 LTE系统值。在实验室环境下,接收后的信号经过 衰减器功率可达 – 48 dBm,符合系统指标设计要 求;由误码分析仪测得系统误码率为 1 × 10⁻⁷,说明 系通信质量较好。

5 结 论

通过对发射和接收单元测试表明,本文研制的 光 DPSK 调制和解调设计结构合理,可实现实验室 内无湍流条件下,通信速率为10 Gbps 的空间光通 信,具有较理想的通信性能。该系统具有可行性。 符合设计要求,达到预期结果。但是系统在调制、解 调以及传输过程中,由于器件间干扰,环境因素以及 损耗等因素影响了通信质量,将为后续工作中继续 深入研究找到解决办法。

参考文献:

- [1] Jiang Huilin. The technologies and system of space laser communication [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010. (in Chinese)
 姜会林. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京:国防工业出版社,2010.
- [2] Ren Jianying, Sun Huayan, Zhang Laixian, et al. Development status of space laser communication and new method of networking [J]. Laser & Infrared, 2019, 49 (2):17 24. (in Chinese)

任建迎,孙华燕,张来线,等.空间激光通信发展现状 及组网新方法[J].激光与红外,2019,49(2):17-24.

1383

- [3] Hasting L. Free-space optical communications: a review
 [J]. Trends in Optoelectro & Optical Communication, 2015,5(20),38-42.
- [4] A H Gnauck, G Raybon, S Chandrasekhar, et al. 2. 5 Tb/s (64 × 42. 7 Gb/s) transmission over 40 × 100 km NZDSF using RZ-DPSK formatand all-Raman-amplified spans
 [C]//Optical Fiber Communication Conference and Exhibit. IEEE Xplore, 2002: FC2 1 FC2 3.
- [5] Tsukamoto S, Ly-Gagnon D, Katoh K, et al. Coherent demodulation of 40-Gbit/s polarization-multiplexed QPSK signals with 16-GHz spacing after 200-km transmission
 [C]. Optical Fiber Communication Conference, Technical Digest. OFC/NFOEC, IEEE, 2005, 3(5):34 - 37.
- [6] Ly-Gagnon D S, Tsukamoto S, Katoh K, et al. Coherent detection of optical quadrature phase-shift keying signals with carrier phase estimation [J]. Journal of Lightwave Technology,2006,24(1):12-21.
- [7] Lu Jing. Research on high speed laser communication experiment system based on DPSK/Self-Homodying detection[D]. Harbin:Harbin University of Science and Technology, 2018. (in Chinese) 卢晶. 基于 DPSK/自差探测的高速激光通信实验系统

研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2018.

Bai Shuai, Wang Jianyu, Zhang Liang, et al. Development progress and trend of space optical communications [J].
 Laser & Optoelectronics Progress, 2015, (7):1-14. (in Chinese)

白帅,王建宇,张亮,等.空间光通信发展历程及趋势 [J].激光与光电子学进展,2015,(7):1-14.

 [9] Wang Shengkui, Liu Xin. Design and implementation of DPSK signal modulation and demodulation based on FP-GA[J]. Electronic Test, 2019, 414(9):77,84 - 85. (in Chinese)
 王胜奎,刘鑫. 基于 FPGA 的 DPSK 信号的调制解调设

计实现[J]. 电子测试,2019,414(9):77,84-85.

- [10] Ding Liang. Research on wireless laser communication system based on DPSK modulation and self-differential balance detection[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese) 丁良. 基于 DPSK 调制与自差平衡探测的无线激光通 信系统研究[D]. 长春:中国科学院大学, 2019.
- [11] Diao Hongxiang, Chang Limin, Tang Yanfeng. Design and performance simulation test of optical communication high rate modulation system [J]. Laser & Infrared, 2018, 48 (2):227-233. (in Chinese)
 刁红翔,常丽敏,唐雁峰. 光通信高速率调制系统设计 及性能仿真测试[J]. 激光与红外, 2018, 48 (2):227-233.
- [12] Wang Yi. Research on DPSK demodulation technology in coherent optical communication system[D]. Xi'an:Xi'an University of Technology, 2019. (in Chinese)
 王义. 相干光通信系统中 DPSK 解调技术的研究[D]. 西安:西安理工大学, 2019.