

一种新的自由空间光通信调制方式 ——圆偏振位移键控

赵新辉 姚 勇 孙云旭 刘 超

(哈尔滨工业大学深圳研究生院激光信息技术研究中心, 广东 深圳 518055)

摘要 自由空间光通信(FSO)在开放的大气链路中传输光信号,不可避免地会受到大气扰动和背景光噪声的影响,导致系统的可靠性降低。为了抑制大气扰动等对 FSO 系统造成的不利影响,提出一种新的光信号调制方式——圆偏振位移键控(CPOLSK)。该调制方式利用圆偏振光的两种旋光状态进行数据的传送,接收端结合差分方法进行光信号接收。给出了 CPOLSK 的装置模型,并对其性能进行了分析。与目前广泛采用的开关键控(OOK)、脉冲位置调制(PPM)方式相比,CPOLSK 很好地抑制了背景光噪声的影响,同时对光电探测器内部噪声也有一定的抑制效果。

关键词 光通信;自由空间光通信;大气扰动信道;偏振位移键控;误码率

中图分类号 TN929.12 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS200828s2.0223

A New Modulation Method in Free Space Optical Communication: Circle Polarization Shift Keying

Zhao Xinhui Yao Yong Sun Yunxu Liu Chao

(*Laser Information Technology Research Center, Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology,*
Shenzhen, Guangdong 518055, China)

Abstract In free space optical communication (FSO), optical signals transmit in the open air link. Inevitably, received signals are influenced by atmosphere disturbance and background noise, so the reliability of FSO system is reduced. In order to restrain adverse effects of atmosphere disturbance, a new modulation method of optical signal in FSO, which is named as circle polarization shift keying (CPOLSK), is proposed in this paper. In this modulation, two rotation states of circle polarization are used to denote "0" and "1" data, respectively, then the information transmission accomplished by transmitting rotation state time series. In the receiver, the signal is detected with difference method. The setting of CPOLSK is presented and the performance is analyzed. Compared with on-off-keying(OOK) and pulse position modulation(PPM) modulation methods, which are widely used in wireless communication systems, the CPOLSK modulation has more excellent capability in background noise suppressing and photodetector inherent noise limiting.

Key words optical communication; free space optical communication; atmosphere disturbing channel; polarization shift keying; bit error rate (BER)

1 引 言

自由空间光通信(FSO)具有带宽高、功耗低、保密性好、抗电磁干扰、链路部署快捷、无需申请许可、装置可重复利用等优点^[1~3],成为未来无线联网的优选方案,其相关技术也成为备受关注的研究领

域^[4]。FSO 中光信号通过大气链路传输,不可避免地受到大气湍流及背景光等因素的影响,这导致了整个通信系统性能的降低,限制了 FSO 技术的推广应用。为了提高 FSO 系统的可靠性,世界各国的研究者提出了许多方案,如相干发射接收、结合自适应

作者简介: 赵新辉(1980—),男,博士研究生,主要从事自由空间光通信方面的研究。E-mail: zhaoxinhui@sina.com

导师简介: 姚 勇(1964—),男,教授,博士,主要从事光通信、光学检测、生物光学等方面的研究。

E-mail: yaoyong@hit.edu.cn(通信联系人)。

光学技术、时间空间分集、纠错码编码、微波系统冗余备份等^[5~11]。但是这些方案都存在一些问题,或者系统过于复杂难以应用,或者因为冗余而导致成本成倍提高。因此,低成本、高可靠性的方案成为研究的热点。

目前的 FSO 系统大多采用强度调制/直接探测(IM/DD)方式,大气湍流等引起的光强闪烁直接影响到探测结果的正确性。偏振位移键控(POLSK)调制利用光的矢量特性,对光的偏振态进行编码调制,同时适用于二进制和多电平的传输。在大气传输中,光信号的偏振态几乎不受大气扰动的影响。因此,采用对光信号偏振态的调制可以有效地提高 FSO 系统的抗大气扰动能力。2006 年,美国 Maryland 大学的研究人员将 POLSK 调制方法应用于 FSO 领域,采用两正交线偏振态进行调制,并在弱湍流条件下与开关键控(OOK)调制的性能进行了比较,发现采取 POLSK 调制对系统有 3dB 的性能提高^[12]。

基于线偏振态的 POLSK 调制需要发送端和接收端偏振坐标系的对准,这对装载于移动物体上的 FSO 系统而言,是很难保证的。因此我们提出了圆偏振位移键控(CPOLSK)的调制方法,利用圆偏振光的两种旋光状态进行调制。该方法无需偏振坐标轴对准,而且实现结构简单,本文对其实现装置结构进行了介绍,并分析了其性能。

2 CPOLSK 调制系统模型

CPOLSK 通信系统的原理框图如图 1 所示,整个通信系统由发射端和接收端两部分组成(LD 为激光器,R-M 为旋光调制器,E-A 为发射天线,CODER 为编码器,QW 为 $\lambda/4$ 波片,PBS 为偏振分束棱镜,D0,D1 为两个光电探测器)。发射端用以产生和发射左旋(右旋)圆偏光,包括激光器、旋光调制器、编码器和发射天线四部分。激光器作为光源,提供线偏振光;旋光调制器用来将线偏振光转换为需要传递的旋光状态;编码器用来将传递信息转换为旋光编码器的控制信号;发射天线将信号光扩束,发射到大气链路中。接收端用以实现旋光信息的提取和检测,主要由波片、偏振分束棱镜、探测器和差分接收电路组成。由于光电探测器只能对光强进行检测,因此需要将旋光信息转换为光强的信息。在此利用 $\lambda/4$ 波片和偏振分束棱镜将旋光信息转变为空间上的光强分布,当右旋时只有探测器 D1 处有光信号,当左旋时只有探测器 D0 处有光强信息。

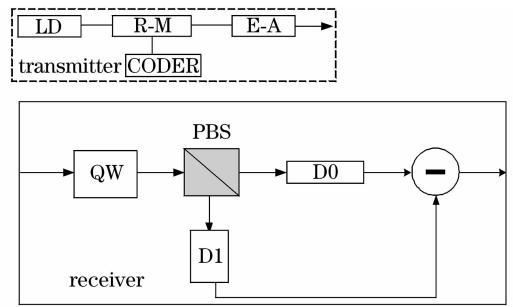


图 1 CPOLSK 通信系统模型框图

Fig. 1 Diagram of CPOLSK communication system

由基本的偏振光学原理可知,无论发射端和接收端偏振轴的夹角 θ 如何变化,经过 $\lambda/4$ 波片后,右旋圆偏振光均转化为偏振方向沿接收坐标系二、四象限角平分线的线偏振光。经过偏振分束棱镜作用,该线偏振光被全部反射到 D1 探测器上,此时输出差分信号 $i = i_1 - i_0 > 0$,代表“1”信号。同样,当发射端发出左旋圆偏振光时,在接收机的 $\lambda/4$ 波片后也转化成线偏振光,其偏振方向位于一、三象限角平分线上。经过偏振分束棱镜时,该线偏振光完全透射到 D0 探测器上,此时输出差分信号 $i = i_1 - i_0 < 0$,代表“0”信号。

可见,由于采用两种圆偏振态进行二进制偏振键控调制,系统不再要求发送端和接收端偏振坐标系的对正,更加方便了实际应用。

3 性能分析

目前无线光通信领域主要应用的调制方式有 OOK 和脉冲位置调制(PPM),OOK 包含非归零码(NRZ)和归零码(RZ)两种编码形式,本文选择 NRZ 方式进行说明;PPM 调制将信息以帧为单位进行调制,若一帧内包含的时隙数目 $S = 2^M$,则该 PPM 调制称为 S-PPM。根据各自特点,给出了三种调制方式的脉冲时序图,并对三者的误码率(BER)特性进行了比较。

3.1 信号脉冲时序图

三种调制方式分别传送三组 4bits 组成的二进制信息,其脉冲时序波形如图 2 所示。其中 PPM 调制选择 16-PPM,使每帧传送 4bits 信息;CPOLSK 调制的脉冲强度始终不变,只是其中的旋光方向发生变化,左旋表示“0”,右旋表示“1”。

3.2 误码率分析

设接收机接收到的光信号功率为

$$P_R = P_S + P_n, \quad (1)$$

式中 P_S 为接收到的信号光功率; P_n 为进入接收机

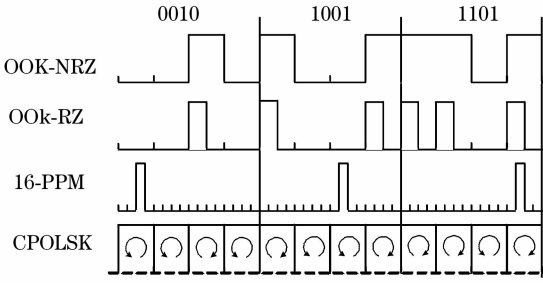


图2 四种调制方式的脉冲时序图

Fig. 2 Sequence charts of four modulations

的背景光功率,可近似为白噪声。在弱湍流的大气扰动下, P_s 的光强闪烁可以近似为对数正态分布,其概率密度函数为

$$p_I(i) = \frac{1}{i\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2} \times \left[\ln\left(\frac{i}{\langle I(r_1, L) \rangle}\right) + \frac{1}{2}\sigma^2\right]^2\right\}, \quad (2)$$

式中 σ^2 为归一化强度扰动方差, $\langle I(r_1, L) \rangle$ 为接收机输出的信号光强度的均值。

对于 OOK 调制,其探测信号为

$$i_{\text{OOK}} = \begin{cases} i_s + i_{\text{nb}} + i_{\text{nd}} & \text{symbol "1"} \\ i_{\text{nb}} + i_{\text{nd}} & \text{symbol "0"} \end{cases}, \quad (3)$$

式中 $i_s = \eta P_s$ 为接收到的信号光产生的光电流; $i_{\text{nb}} = \eta P_n$ 为背景光产生的噪声电流,符合 $N(\xi_b, \sigma_b^2)$ 分布, $\xi_b = \langle i_{\text{nb}} \rangle$; i_{nd} 为光电探测器产生的噪声电流,符合 $N(\xi_d, \sigma_d^2)$ 分布, $\xi_d = \langle i_{\text{nd}} \rangle$ 。

故在不考虑大气湍流引起的光强闪烁时,符号“1”的探测信号 i_{OOK} 符合 $N(i_s + \xi_b + \xi_d, \sigma_b^2 + \sigma_d^2)$ 分布;符号“0”的探测信号符合 $N(\xi_b + \xi_d, \sigma_b^2 + \sigma_d^2)$ 分布。假设判定阈值定为 $i_{\text{th}} = \frac{i_s}{2} + \xi_b + \xi_d$,且发送“0”和“1”符号的概率相等,则此时的误判概率为

$$Pe_{\text{OOK}}(i_s) = \frac{1}{2}p(e|0) + \frac{1}{2}p(e|1) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{i_s}{2\sqrt{2(\sigma_b^2 + \sigma_d^2)}}\right). \quad (4)$$

在大气扰动存在时,信号光强会发生闪烁,此时 OOK 调制的平均误码率为联合分布

$$\langle \text{BER}_{\text{OOK}} \rangle = \int_0^\infty p_I(S) Pe_{\text{OOK}}(S) dS. \quad (5)$$

PPM 调制的误码率通常用帧误码率来表示,即计算每一帧的误判概率。在 PPM 的一个帧的时间内,其输出信号可以表示为

$$i_{\text{PPM}} = \begin{cases} i_s + i_{\text{nb}} + i_{\text{nd}} & \text{pluse exist} \\ i_{\text{nb}} + i_{\text{nd}} & \text{nopluse} \end{cases} \quad (6)$$

式中各参数如前所述。PPM 的一帧信元组成了 S 维的矢量 $\vec{X} = (x_0, x_1 \dots x_{S-1})$,由矢量 \vec{X} 判断在哪个时隙中发送了信号脉冲,一般采用硬判决方法,即选择具有最大观察值的时隙作为脉冲存在的时隙。因此,其误判概率即为无脉冲时隙的观察量大于有脉冲时隙观察量的概率

$$Pe_{S\text{-PPM}} = \frac{2^{k-1}}{2^k - 1} \left\{ 1 - \int_{-\infty}^\infty p_{s+n}(x) \left[\int_{-\infty}^x p_n(y) dy \right]^{S-1} dx \right\}, \quad (7)$$

式中 $p_{s+n}(x) \sim N(i_s + \xi_b + \xi_d, \sigma_b^2 + \sigma_d^2)$ 为有脉冲时隙观察量的概率分布函数, $p_n(y) \sim N(\xi_b + \xi_d, \sigma_b^2 + \sigma_d^2)$ 为总噪声的概率分布函数。

在弱湍流扰动情况下,其总的误码率为

$$\langle \text{BER}_{S\text{-PPM}} \rangle = \int_0^\infty p_I(S) Pe_{S\text{-PPM}} dS. \quad (8)$$

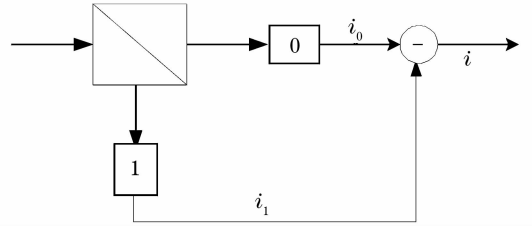


图3 CPOLSK 探测信号差分接收图

Fig. 3 Diagram of difference receiving in CPOLSK

CPOLSK 是一种无阈值的调制方式,通常结合差分接收方法进行信号检测,其原理框图如图 3 所示。接收到的光信号经 $\lambda/4$ 波片和 PBS 后被分为两束,分别由探测器 D0 和 D1 接收,输出总信号为两探测器的差分信号,图中各信号表达式为

$$i_0 = i_L + i_{\text{nb},0} + i_{\text{nd},0}, \quad (9)$$

$$i_1 = i_R + i_{\text{nb},1} + i_{\text{nd},1}, \quad (10)$$

式中, i_L, i_R 分别为信号光的左旋、右旋分量产生的光电流; $i_{\text{nb},0}, i_{\text{nb},1}$ 分别为背景光在两探测器上产生的噪声电流,符合 $N(\frac{\xi_b}{2}, \sigma_b^2)$ 分布; $i_{\text{nd},0}, i_{\text{nd},1}$ 分别为两光电探测器内部产生的噪声电流,符合 $N(\xi_d, \sigma_d^2)$ 分布。

背景光可以看作非偏振光,经 $\lambda/4$ 波片和 PBS 作用后,分在 D0 和 D1 探测器上的光功率是相同的,因此有

$$i_{\text{nb},0} = i_{\text{nb},1} = \frac{1}{2} \eta P_n, \quad (11)$$

故总输出电流

$$i = i_1 - i_0 = i_R - i_L + i_{\text{nd},1} - i_{\text{nd},0}. \quad (12)$$

通常情况下,大气湍流等造成的信号光的退偏振效应是很弱的,可以被忽略。因此,CPOLSK 调

制的误判概率为

$$P_{e_{\text{CPOL}}}(i_s) = \frac{1}{2}p(e|0) + \frac{1}{2}p(e|1) = \frac{1}{2}\text{erfc}\left(\frac{i_s}{2\sigma_d}\right). \quad (13)$$

在弱湍流扰动下,总的系统误码率可表示为

$$\langle \text{BER}_{\text{CPOL}} \rangle = \int_0^\infty p_I(S) P_{e_{\text{CPOL}}} dS. \quad (14)$$

以上为对三种调制方式的分析,由结果可以看出,本文中所提出的 CPOLSK 调制相对于 OOK 和 PPM 调制,可以很好地抑制背景光等干扰因素的影响,误码率大大降低。图 4 中给出了 $S = 16$ 时具体实例的计算结果,随信噪比(SNR)的增大,三种调制的误码率均呈降低趋势。在相同 SNR 下,CPOLSK 调制的误码率比其他两种调制低 5 个数量级。

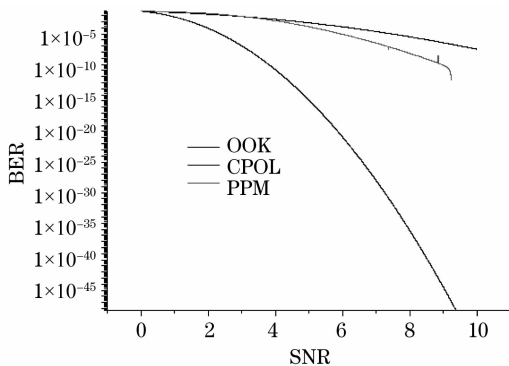


图 4 三种调制方式的误码率比较

Fig. 4 Differences of bit error rate between three modulations

4 结 论

提出了一种基于偏振态的调制方式——圆偏振位移键控调制。该调制方法利用圆偏振光的两种旋光状态来实现数据的传输,结合差分接收方法,可以很好地抑制背景光噪声等因素的影响。分析结果表明,与 OOK 和 16-PPM 相比,CPOLSK 调制可以将误码率降低 5 个数量级以上。

参 考 文 献

- Vincent W. S. Chan. Space coherent optical communication systems- an introduction [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1987, **5**(5): 633~637
- Vincent W. S. Chan. Free- space optical communications[J]. *J. Lightw. Technol.*, 2006, **24**(12): 4750~4862
- Li Xilai, Xu Jun, Cao Fuyun *et al.*. Free-space laser communication and its key technology [J]. *Optical Communication Technology*, 2006,(9):58~61
李喜来, 徐 军, 曹付允 等. 自由空间激光通信关键技术研究 [J]. 光通信技术, 2006,(9):58~61
- Han Xudong, Chen Dingan, Li Xiaojuan *et al.*. Wireless laser communication technology[J]. *Journal of Electron Devices*, 2006,(2):602~604
韩旭东, 陈定安, 李小娟 等. 无线激光通信技术[J]. 电子器件, 2006,(2):602~604
- Wang Ja, Yu Xin. Free-space optical communication's current situation and development trend[J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(2):259~262
王 佳, 俞 信. 自由空间光通信技术的研究现状和发展方向综述[J]. 光学技术, 2005,**31**(2):259~262
- Rao Changhui, Jiang Wenhan, Ling Ning *et al.*. Temporal correction effectiveness of adaptive optical system for light wave atmospheric propagation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001,**21**(8): 933~938
饶长辉, 姜文汉, 凌 宁 等. 自适应光学系统对实际大气湍流波前的时域校正效果[J]. 光学学报, 2001,**21**(8):933~938
- Zhu Xiaoming, Joseph M. Kahn. Free-space optical communication through atmospheric turbulence channels[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2002,**50**(8):1293~1299
- Xie Weiliang, Tang Junxiong. Analysis on characterization of atmospheric optical wireless communication system based on turbo code[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003,**30**(9):835~838
谢伟良, 汤俊雄. 基于 turbo 码的大气无线光通信系统特性分析[J]. 中国激光, 2003,**30**(9):835~838
- Chen Jun, Huang Dexiu, Yuan Xiuhua. Analysis of free space optics system based on twofold turbo code [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(11): 1532~1536.
陈 俊, 黄德修, 元秀华. 基于双模 turbo 码的自由空间光通信系统特性分析[J]. 中国激光, 2006, **33**(11): 1532~1536
- Djordjevic I. B. LDPC-coded MIMO optical communication over the atmospheric turbulence channel using Q-ary pulse-position modulation[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(16): 10026~10032
- I. I. Kim, E. J. Korevaar. Availability of free-space optics (FSO) and hybrid FSO/RF systems [J]. *Optical Wireless Communications*, 2001, **4530**:84~95
- S. Trisno, C. C. Davis. Performance of free space optical communication systems using polarization shift keying modulation [C]. *Free-Space Laser Communications VI*. San Diego, Ca, USA, 2006, 63040V~63049