

圆偏振调制激光通信系统设计

杨 鹏^{1,2} 艾 华¹

(¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)
²中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 为了降低大气湍流和通信终端相对运动对通信系统性能造成的影响,对采用了圆偏振调制原理的通信系统进行了研究。激光的圆偏振特性在大气传输中变化很小,且圆偏振光具有旋转对称性,系统的性能不受两通信终端相对运动的影响,降低了技术的实现难度,具有很高的可靠性,特别适用于移动通信终端。介绍了两种圆偏振调制方式,推导了线偏振态与圆偏振态之间的转换过程,为圆偏振编解码提供理论基础。针对这两种调制方式,提出了具体的实现方案,并设计出了圆偏振调制激光通信系统,在该系统中可验证两种编码方式,且结构简单、实现方便,可作为星载通信终端。并进行了简单的圆偏振编码通信实验,实现了数据发射和接收,证明了圆偏振调制的可行性。

关键词 光通信;圆偏振键控;圆偏振复用;1/4 波片

中图分类号 TN929.12 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0916002

Design of Laser Communication System with Circular Polarization Modulation

Yang Peng^{1,2} Ai Hua¹

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In order to reduce the impact of atmosphere disturbance and communication terminal relative motion to the performance of communication system, the circular polarization modulation is adopted. The circular polarization modulation has high reliability since the polarization properties of laser change relatively small while propagating through the atmosphere. Because of the rotational symmetry of circular polarization, the system performance is unaffected by the relative motion of the two terminals, and is especially suitable for mobile communications terminal. Two kinds of circular polarization modulation method are introduced, i. e., circular polarization shift keying (CPolSK) and circular polarization division multiplexing (CPolDM). The conversion process between the linear polarization and circular polarization provides a theoretical basis for the circular polarization encoding and decoding. In view of these two kinds of modulation modes, the implementation is put forward, and the laser communication system of circular polarization modulation is designed. Two modulation schemes can be verified in the same system. The laser communication system is very simple and convenient, which could be used in space borne communication terminal. The communication system is verified with simple experiments, completing the transmitting and receiving of data to prove the feasibility of circular polarization modulation.

Key words optical communications; circular polarization shift keying; circular polarization division multiplexing; quarter wave plate

OCIS codes 060.4510; 010.1290; 010.1320

收稿日期: 2012-04-19; **收到修改稿日期**: 2012-05-09

基金项目: 国家自然科学基金(20030534)资助课题。

作者简介: 杨 鹏(1981—),男,博士研究生,主要从事光电位移测量和激光信息载波技术等方面的研究。

E-mail: rociomp@163.com

导师简介: 艾 华(1961—),男,研究员,博士生导师,主要从事微纳米位移测量和激光信息载波技术等方面的研究。

E-mail: aih@ciomp.ac.cn(通信联系人)

1 引 言

自由空间光通信(FSO)具有传输速率高、通信容量大、可用频带宽及保密性好等优点,成为未来大容量保密通信的发展方向之一,因而受到世界各国的重视^[1,2]。FSO光信号在大气信道中受到大气湍流及随机运动等因素的影响,降低了通信系统的性能,限制了FSO技术的进一步发展应用^[3]。为了提高FSO系统的可靠性,研究人员提出了许多改进方案,如相干发射接收、自适应光学技术、纠错冗余编码等^[4~7]。但这些方案都存在一些问题,例如系统过于复杂难以实际应用,因为冗余而导致成本倍增等。因此,低成本、高可靠性及简单易实现的通信方案成为光通信领域的研究热点。

目前FSO系统大多采用最常用的数字强度调制——开关键控(OOK)调制,该调制方式简单易行,但调制功率效率低,易受大气湍流和背景光的影响,信噪比较低,因而无法确保通信的可靠性和工作的全天候。为此人们又提出偏振键控(PolSK)调制^[8],该调制方式利用光的偏振矢量特性,对偏振态进行编码调制,可同时适用于二进制和多进制数据传输,并能有效地提高系统的灵敏度和误码性能^[9]。基于线偏振的PolSK调制需要发射端和接收端偏振坐标系对正,由于运动的随机不确定性,对搭载于运动平台上的通信终端系统而言,系统的通信性能是很难保证的。在此基础上,赵新辉等^[10,11]提出了圆偏振位移键控(CPolSK)调制方法,利用两种圆偏振态进行组合编码调制,提高通信系统性能。由于圆偏振态在大气传输中变化很小^[12],同时圆偏振态具有旋转对称特性,特别是在相对运动的平台上,圆偏振调制系统可正常工作,因此该调制方式可靠性高,非常适合用于移动平台上的通信终端。CPolSK系统利用两个圆偏振态组合编码,单通道传递信息。基于圆偏振态在大气传输中的优势,同时为提高通信量,本文在偏振复用的基础上^[13],提出了圆偏振复用(CPolDM)调制,不仅保证了通信的可靠性,又成倍地提高了系统容量。

此外,相关研究人员虽然提出了CPolSK概念和圆偏振调制的结构模型^[11,14],但并没有设计出具有体的圆偏振通信系统,且通信模型需要外调制器,结构复杂、实现困难。本文提出了两种圆偏振编码的具体实现方案,并设计了简单的通信验证系统,验证了圆偏振编码通信的可行性。

2 圆偏振调制原理

图1是圆偏振调制时序图。如图1(b)所示,CPolSK用两个圆偏振态来表征数据二进制“0”和“1”,在整个调制过程中脉冲强度没有发生改变,只是脉冲的偏振态发生了改变,右旋表示“0”,左旋表示“1”。如图1(c)所示,CPolDM利用两种圆偏振态作为复用信道进行调制编码,可加载两路信息,与OOK调制相似,以圆偏振态的“通-断”来表征“0”和“1”。CPolDM同时利用两通道传输信息,提高了信道利用率,使系统容量增加了1倍,可满足现代光通信提高通信容量的要求。

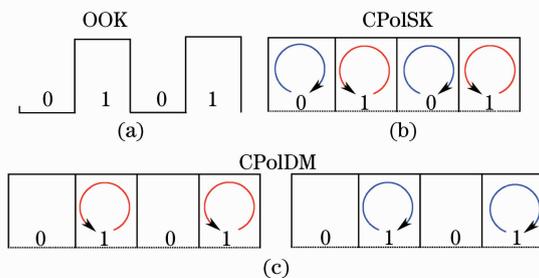


图1 圆偏振调制时序图

Fig. 1 Sequence chart of circular polarization modulation

如图2所示,激光通过偏振分光棱镜(PBS)分为两束正交线偏振光,即s光和p光,然后分别对这两束光进行信号调制,将调制器后的信号通过偏振合束器(PBC)复合到同一光路中,再经过一个1/4波片(QWP),调整QWP的快(慢)轴与两路线偏振光的传播方向的夹角为某一值,使经过QWP后的两束光分别变成左、右旋圆偏振光;最后经过天线发射出去。

如图3所示,假设从激光器分出的两束正交线偏振光分别为 E_1 和 E_2 ,幅值都为1,且分别与坐标系的Y、X轴重合,QWP的快轴与X轴的夹角为 θ ,则 E_1 、 E_2 的琼斯矩阵可表示为^[15]

$$E_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad E_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

QWP的琼斯矩阵 G 可以表示为

$$G = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 - i \cos 2\theta & -i \sin 2\theta \\ i \sin 2\theta & 1 + i \cos 2\theta \end{bmatrix}. \quad (2)$$

E_1 、 E_2 经过QWP后,转换为新的偏振光 E'_1 、 E'_2 ,其琼斯矩阵可表示为

$$E'_1 = GE_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} -i \sin 2\theta \\ 1 + i \cos 2\theta \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$E'_2 = GE_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 - i \sin 2\theta \\ -i \cos 2\theta \end{bmatrix}. \quad (4)$$

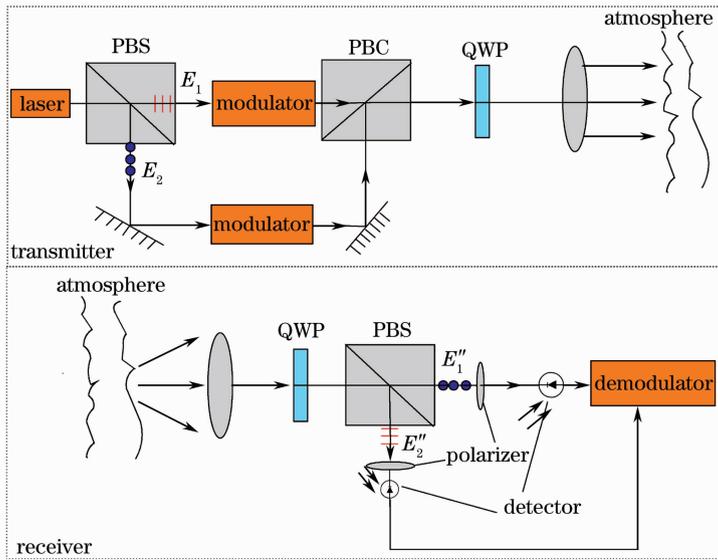


图 2 圆偏振复用示意图

Fig. 2 Schematic diagram of CPolDM

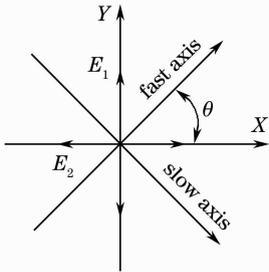


图 3 E_1 、 E_2 和 QWP 的关系图

Fig. 3 Diagram of coordinate systems of

E_1 , E_2 and QWP

由圆偏振光的琼斯矩阵可知,若使 E_1' 、 E_2' 为圆偏振光,就必须满足以下条件:

$$\sin 2\theta = 1, \cos 2\theta = 0, \quad (5)$$

即 θ 为 $\pi/4$ 的整数倍,才能保证出射光为圆偏振光。若 $\theta \neq \pi/4$,则 E_1' 、 E_2' 为椭圆偏振光,而非圆偏振光。为了运算的简便,这里取 $\theta = \pi/4$,则 E_1' 、 E_2' 和波片的琼斯矩阵可以表示为

$$E_1' = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix}, E_2' = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$G = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

线偏振光 E_1 、 E_2 经过 QWP 分别变为左、右旋圆偏振光 E_1' 、 E_2' ,如图 4 所示。

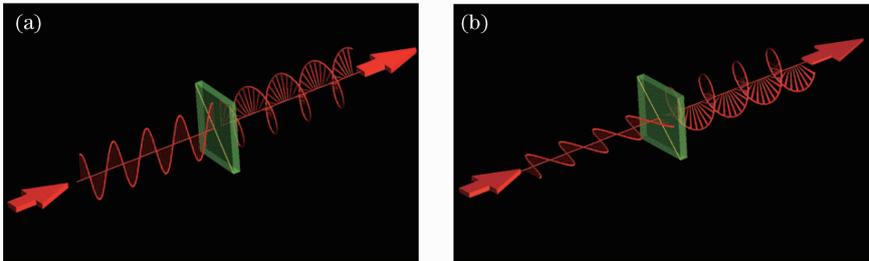


图 4 线偏振光经过 QWP 时偏振态变化示意图

Fig. 4 Diagram of polarization state change when linear polarization passing through QWP

接收端接收到经过大气信道传输后的圆偏振光,如何把圆偏振光信息解调出来才是最重要的。如图 2 所示,由光路转换可逆原理,通常是再加一 QWP,把圆偏振光转换为线偏振光。左、右旋圆偏振光 E_1' 、 E_2' 经过 QWP 后,分别转变为线偏振光 E_1'' 、 E_2'' ,同理可推导出其琼斯矩阵为

$$E_1'' = G E_1' = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, E_2'' = G E_2' = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

如图 5 所示,左、右旋圆偏振光 E_1' 、 E_2' 经过 QWP,分别变为线偏振光 E_1'' 、 E_2'' ,且两者正交垂直。经 PBS 棱镜分出线偏振光 E_1'' 、 E_2'' ,通过探测器分别检测出两路光信号,就完成了圆偏振复用通信过程。通过(1)式与(8)式对比可知,初始线偏振光两次经

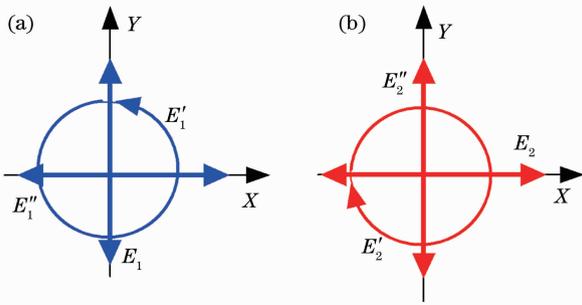


图 5 偏振态转化示意图

Fig. 5 Diagram of polarization state change

过 QWP 后, E_1 和 E_1'' 的偏振态并不一致, 前后发生

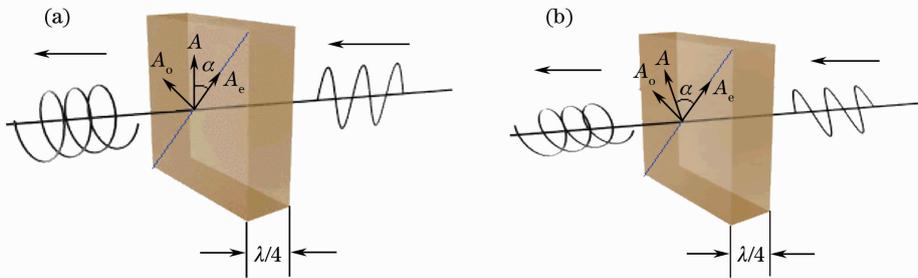


图 6 波片光轴和线偏振光振动方向不同夹角示意图。(a) $\theta=45^\circ$; (b) $\theta \neq 45^\circ$

Fig. 6 Schematic diagram of polarization state changing with different angles. (a) $\theta=45^\circ$; (b) $\theta \neq 45^\circ$

对于圆偏振光不能直接进行检测, 一般先转换为线偏振光再进行接收检测。在接收端, 同样采用 QWP, 将左、右旋圆偏振光分别转换成对应的两束线偏振光。线偏振光的偏振方向只与 QWP 的光轴方向有关, 如果确定了波片的光轴方向, 就可知线偏振光的偏振方向, 通过检偏器和光电探测器, 就可实现信息的接收、检测和转换。圆偏振调制技术无需得知发射端的确切运动, 系统的性能不受两通信终端相对运动的影响, 只需保证接收端 QWP 的光轴方向和检偏器方向之间的相对位置, 这大大降低了技术的实现难度。因此, 圆偏振调制技术特别适用于移动终端之间的激光通信, 尤其对于存在相对复杂运动的卫星之间的激光通信, 该技术优势非常明显。

3 圆偏振调制激光通信系统设计

如图 7 所示, 根据 CPolSK 调制原理, 提出了 CPolSK 调制的实现方案。发射端采用信号源分时控制选通两路激光器, 一路控制选通 P 激光器, 表征“0”信号, 一路选通控制 S 激光器, 表征“1”信号, 两路信号光经过 PBC 复合到同一光路中, 再经由天线发射到大气信道中。其中 p、s 偏振光经过 QWP 后, 分别变为右、左旋圆偏振光。在接收端经过 QWP 相位延迟后, 再通过 PBS 棱镜把光信号分解

了改变。因为两次经过 QWP 后, 引入了 π 相位差, 相当于偏振态发生翻转, 初始的 p 光在接收端转换 s 光, s 光转换为 p 光。

如图 6 所示, 在发射端必须要保证线偏振光的传播方向和 QWP 快慢轴的夹角 θ 为 45° , 才能确保线偏振光经过 QWP 时转变为圆偏振光, 若 $\theta \neq 45^\circ$ 则出射光为椭圆偏振光, 所以在光机装调时必须要注意这一点。圆偏振光经过 QWP 时, 不管波片快(慢)轴与光轴夹角为多少, 圆偏振光都转变成线偏振光, 所以在接收端可以不必确保波片的快(慢)轴与光轴的夹角为固定值。

为正交的两路线偏振光, 用两个探测器分别接收并实现光电转换, 将转换后的电信号做差值, 然后利用判定规则, 对数据进行判定, 即可获得传输信息。

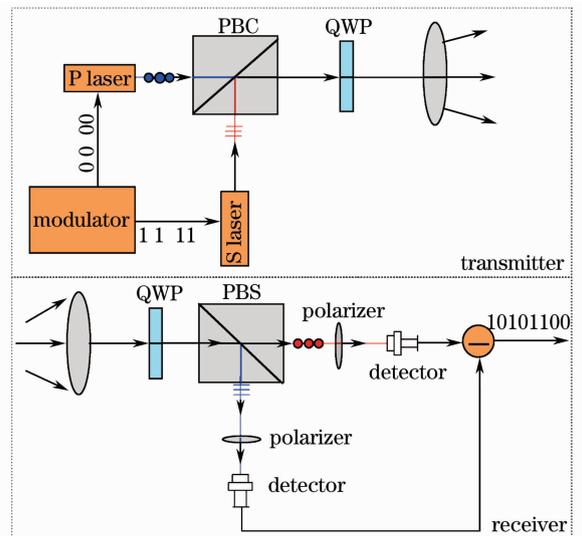


图 7 CPolSK 编码通信原理图

Fig. 7 Schematic diagram of CPolSK system

如图 8 所示, CPolDM 调制的实现方案与 CPolSK 调制相似, 不同之处在于, 信号控制器同时调控两路线偏振激光。在接收端, 分通道接收检测经过转换后的两路线偏振光, 即可得到初始信息。相比于 CPolSK, CPolDM 使系统通信容量增加了 1 倍。

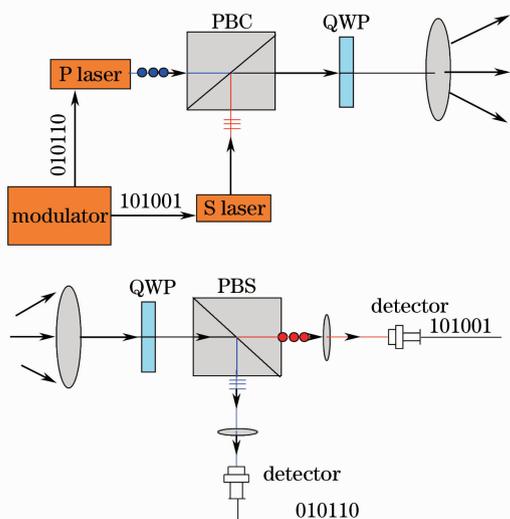


图 8 CPolDM 编码通信原理图

Fig. 8 Schematic diagram of CPolDM system

为了验证圆偏振编码原理,需同时满足 CPolSK 和 CPolDM 两种调制方式的要求,设计了圆偏振调制激光通信系统。因为是实验验证阶段,采用开普勒型光学天线,单向发射单向接收、直接检

测接收的方式。可同时验证两种调制方式,系统发射端的光路图如图 9 所示。为了在同一实验系统中验证两种调制方式,在发射端采用双激光器,保证这两个激光器的偏振方向相互垂直,一路表示 p 偏振态,一路表示 s 偏振态,来替代激光器通过 PBS 棱镜分出的两束正交线偏振光。这样既方便对每路激光器单独调制,又保证了系统的发射功率。

在发射端采用双胶合透镜对半导体激光束进行光束准直,并通过在光路焦平面上设置光阑对光束进行整形。在接收端,同样设置光阑遮挡进入系统的杂散光,并通过安装窄带滤波片(NBF)来降低背景噪声,提高系统灵敏度。该系统光学元件少、结构简单,通过信号源直接调控激光输出信号,采用光学元件就可直接实现偏振态的编码调制,省去了复杂昂贵的外调制器(如声光或电光调制器),既简化结构又易于实现,有利于通信终端的轻小化,同时又可提高通信容量和系统的可靠性,非常适合作为星载的光通信终端。

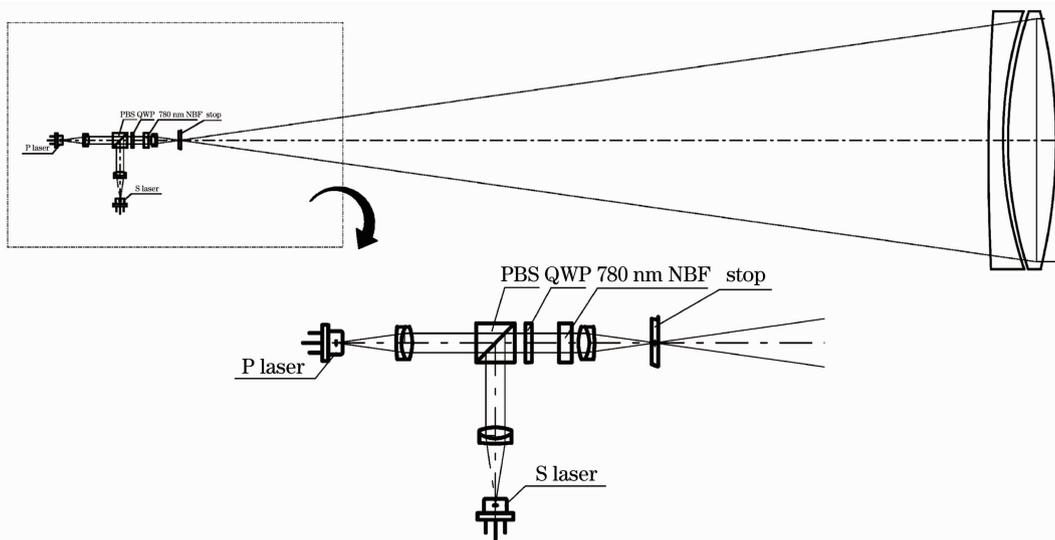


图 9 圆偏振调制系统发射端光路图

Fig. 9 Optical path of transmitting terminal of circular polarization modulation system

4 圆偏振调制系统性能分析

根据圆偏振激光通信的编码原理,设计了激光通信的光机结构,并对系统进行了装调。圆偏振激光通信系统的装配图和实物图如图 10 所示。

对圆偏振调制系统进行了简单的实验验证,为了分析 CPolSK 及 CPolDM 调制方式的性能,与 OOK 调制方式进行对比。在本系统中去掉 PBS 棱镜和 QWP,对单路激光调制,即可实现 OOK 调制。

在发射端发送如图 11(a)所示的电信号,接收端 OOK、CPolDM 和 CPolSK 的信号波形图分别如图 11(b)~(d)所示。由图 11 可知,CPolDM 和 OOK 方式的信号电流值都为正值,并加载了一定随机扰动,而 CPolSK 调制方式的信号电流值在 $\pm 60 \mu\text{A}$ 之间变化。由于 CPolDM 与 OOK 系统采用单路接收,所以信号波形相似,而 CPolSK 调制系统采用差分方式接收,所以信号幅值是上述二者的

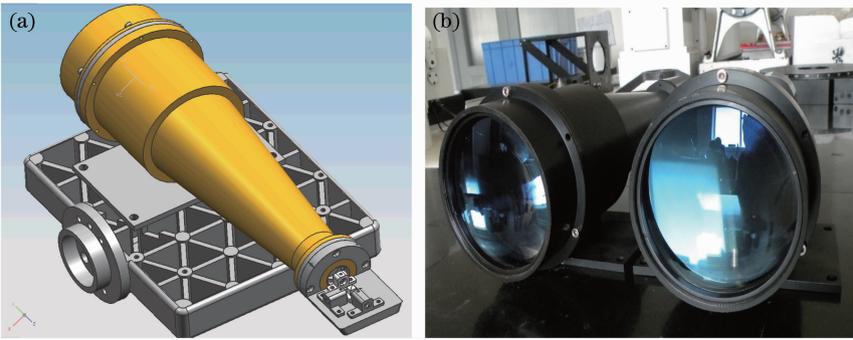


图 10 圆偏振调制通信系统。(a)装配图;(b)实物图

Fig. 10 Communication system of circular polarization modulation. (a) Assembly drawing; (b) physical map

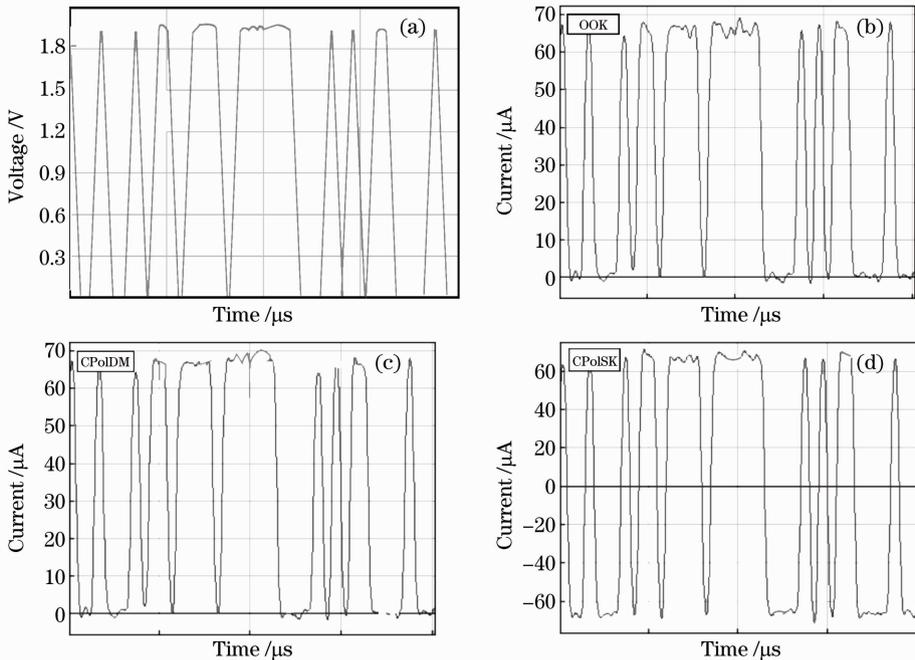


图 11 信号波形示意图。(a)发射端电信号;(b)OOK 接收信号;(c)CPolDM 接收信号;(d)CPolSK 接收信号

Fig. 11 Diagram of signal waveform. (a) Electrical signal at the transmitting terminal; received signals with (b) OOK, (c) CPolDM and (d) CPolSK modulation

二倍。从图 11 中可以看出,CPolDM 和 OOK 系统的信号电平高低区分很明显,通过设定合理的判定比较值,可将发送的信息从接收到的信号波形图中提取出来;CPolSK 调制系统信号电流在正负值之间起伏,可以将 0 作为阈值比较电平,正负电平分别表征信号“1”和“0”,这样就可把加载的数字信息恢复出来。

通过简单的实验验证,实现了数据的发射接收,证明了圆偏振编码的可行性。有待于进行多条件、复杂环境中的光通信实验验证,在实际应用中继续分析和检验性能,尤其是在复杂天气环境中(如雨、雾、霾)对圆偏振态以及通信性能的影响,并把圆偏振编码技术推向实际应用。

5 结 论

本文针对现有无线光通信系统调制可靠性较低的问题,利用圆偏振编码调制技术改善系统性能。从理论上推导线偏振态和圆偏振态之间的转换过程,为圆偏振调制的编码解码和检测接收提供了理论基础;提出了两种圆偏振调制实现方案,设计了相应的圆偏振激光通信系统,在同一套系统中同时验证两种调制方式。通过简单的实验验证,说明了圆偏振调制的可行性,特别是 CPolSK 采用差分接收,信号幅值是 CPolDM 的 2 倍,CPolDM 可两路信道同时传送信息,通信容量是 CPolSK 的 2 倍。大气对圆偏振态影响很小,圆偏振态同时具有旋转对称性,特别适合用于移动平台上的通信终端,具有很高

的可靠性。设计的圆偏振调制通信系统功能完备,可同时验证两种调制方式;同时该系统结构简单,实现方便。实验系统中采用开普勒型光学天线,轴向尺寸较大,若采用天线优化技术,很容易实现系统轻量化,特别适合作星载通信终端^[16]。圆偏振调制技术可降低系统成本、提高系统可靠性,有着非常重要的应用价值,在未来的激光通信领域中有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- Zhang Tieying, Wang Hongxing, Cheng Gang *et al.*. A novel fixed length digital pulse interval modulation for optical wireless communication [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34** (12): 1655~1659
张铁英, 王红星, 程刚等. 无线光通信中的定长数字脉冲间隔调制[J]. *中国激光*, 2007, **34**(12): 1655~1659
- Vincent W. S. Chan. Free-space optical communications[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(12): 4750~4762
- Chen Jing, Xue Haizhong, Liu Xuewen *et al.*. Low-power laser jamming techniques to free space optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0106005
陈静, 薛海中, 刘学文等. 无线激光通信系统弱光干扰技术[J]. *光学学报*, 2012, **32**(1): 0106005
- Ke Xizheng, Song Peng, Pei Guoqiang. Research on multi-aperture reception in wireless laser communication [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(12): 1201003
柯熙政, 宋鹏, 裴国强. 无线激光通信中的多孔径接收技术研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(12): 1201003
- 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
- Ma Dongtang, Wei Jibo, Zhuang Zhaowen. Performance evaluation and channel modeling of multiple beam propagation for atmosphere in laser communication [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1020~1024
马东堂, 魏急波, 庄钊文. 大气激光通信中多光束传输性能分析和信道建模[J]. *光学学报*, 2004, **24**(8): 1020~1024
- Wang Yong, Cao Jianian. Performance analysis of atmospheric laser communication system basing on asymmetrically clipped optical orthogonal frequency division multiplexing intensity

- modulation and lower density parity check code[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(12): 3031~3036
王勇, 曹家年. 基于低密度奇偶校验码和非对称限幅光正交频分复用技术的大气激光通信系统性能[J]. *中国激光*, 2010, **37**(12): 3031~3036
- S. Benedetto, P. Poggiolini. Theory of polarization shift keying modulation[J]. *IEEE Trans. Commun.*, 1992, **40**(4): 708~721
 - S. Trisno, C. C. Davis. Performance of free space optical communication systems using polarization shift keying modulation [C]. *SPIE*, 2006, **6304**: 63040V
 - Zhao Xinhui, Yao Yong, Sun Yunxu *et al.*. A new modulation method in free space optical communication: circle polarization shift keying[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s2): 223~226
赵新辉, 姚勇, 孙云旭等. 一种新的自由空间光通信调制方式——圆偏振位移键控[J]. *光学学报*, 2008, **28**(s2): 223~226
 - Lin Rizhao, Fu Zhongqian, Li Yongliang *et al.*. Research of bit error rate for satellite-to-ground laser communication using circle polarization shift keying modulation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(11): 1105007
林日钊, 傅忠谦, 李永亮等. 圆偏振位移键控的星地激光通信误码率研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(11): 1105007
 - Chen Yanru, Wang Jiawang. Analysis and comparison of scattering property between linearly and circularly polarized light [J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 1997, **14**(6): 551~557
陈延如, 王家旺. 圆偏振光和线偏振光散射特性分析与比较[J]. *量子电子学报*, 1997, **14**(6): 551~557
 - Sun Yang, Xi Lixia, Zhang Xiaoguang *et al.*. Theoretic model and elimination scheme of crosstalk in polarization division multiplexing system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(2): 0206006
孙洋, 席丽霞, 张晓光等. 偏分复用系统信道串扰的理论模型及消除方案[J]. *光学学报*, 2012, **32**(2): 0206006
 - Zhao Xinhui. Study on the Circle Polarization Shift Keying and the Theory of Polarization Propagation in Wireless Optical Communication [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. 22~45
赵新辉. 无线光通信中旋光调制技术及偏振传输理论的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010. 22~45
 - D. S. Kliger, J. W. Lewis, C. E. Randall. Polarized Light in Optics and Spectroscopy[M]. San Diego: Academic Press, 1990
 - Yu Jianjie, Tan Liying, Liu Jianfeng *et al.*. Alignment for center distance of optical telescope in satellite optical communication terminal[J]. *Optics & Precision Engineering*, 2009, **17**(9): 2091~2097
俞建杰, 谭立英, 刘剑峰等. 卫星光通信光学天线轴间距的精确调试[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(9): 2091~2097