

一种大气激光通信系统抗干扰调制/解调技术

刘 丹¹ 刘 智² 王璞瑶² 姜会林³

¹ 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022
² 长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022
³ 长春理工大学空间光电技术研究所, 吉林 长春 130022

摘要 空间光通信以大气为介质进行信息传输时,不可避免地受到大气散射、大气湍流及背景光等因素的影响。针对大气信道对通信质量的影响,提出了基于激光偏振态参数的调制与解调技术,设计了一种基于偏振移位键控(PolSK)的大气激光通信系统并对其原理进行了简要分析。该通信系统采用偏振移位键控的调制方式,即利用圆偏振光的两种旋态(左旋和右旋)进行编码、调制从而实现数据的传输,接收端采用平衡探测方法进行光信号解调。对系统性能进行仿真分析,结果表明,基于激光偏振态参数的调制与解调技术在抗大气环境干扰、提高数据传输速率和降低误码率等方面具有优越性,在未来的空间激光通信领域有广阔的发展空间和应用前景。

关键词 光通信;偏振移位键控;平衡探测;误码率

中图分类号 TN91;TN92 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0705004

Anti-Jamming Modulation/Demodulation Technology of Atmospheric Laser Communication System

Liu Dan¹ Liu Zhi² Wang Puyao² Jiang Huilin³

¹ College of Photo-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

² College of Electronic Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

³ Institute of Space Photo-Electronic Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract When free space optical communication system uses the atmosphere as a medium for information transmission, received signals are inevitably influenced by the atmospheric environment, atmospheric turbulence, background light factors, and so on. Considering that the atmosphere channel has a great influence on the laser atmosphere communication quality, a modulation/demodulation technology based on polarization parameters is proposed, and an atmospheric laser communication system based on polarization shift keying (PolSK) is designed. This system uses polarization shift keying modulation. In this modulation, two rotation states of circle polarization (left and right) are used for information transmission. In the receiver, the optical signal is detected with balance detection method. At the same time, the performance of the system is simulated. The results show that the modulation/demodulation techniques based on polarization parameters have unique advantages, such as anti-atmospheric interference, high data rate and low bit error rate. It will have broad prospects for development and application in future space laser communication.

Key words optical communications; polarization shift keying; balance detection; bit error rate

OCIS codes 060.4510; 010.1300; 250.4110; 250.0040

收稿日期: 2011-12-13; **收到修改稿日期**: 2012-04-16

基金项目: 国家自然科学基金(60677009)面上项目资助课题。

作者简介: 刘 丹(1986—),女,博士研究生,主要从事电子科学与技术、激光通信技术等方面的研究。

E-mail: liudancust@126.com

导师简介: 姜会林(1945—),男,博士,教授,主要从事光学系统设计、激光通信技术等方面的研究。

E-mail: hljiang@public.cc.jl.cn

1 引 言

空间激光通信兼具微波通信和光纤通信的优点,同时还具备通信容量大、保密性好和架设简单的优点,已成为未来通信领域的发展趋势。激光信号在大气信道传输过程中,由于受到大气湍流及背景光噪声等因素的影响^[1,2],导致通信效率大大降低,极大地限制了自由空间光通信技术的推广及应用。

对于在大气中传播的激光束来说,偏振态(SOP)是其最稳定的一个属性^[3]。相对于其他几种调制方式如开关键控(OOK)、频率移位键控(FSK)和相移键控(PSK),采用偏振移位键控(PolSK)调制方式的光通信系统具有通信过程中调制信号功率恒定、受光源相位噪声影响小的优点,可以很好地适应峰值功率受限的通信系统^[3,4]。因此,充分利用激光信号在大气信道中稳定的偏振特性,可有效提高大气激光通信系统的抗干扰能力^[5]。

本文对激光信号的偏振态参数在随机大气信道中的变化情况进行了分析和计算机数字仿真,在大气激光通信系统中采用 PolSK 的调制方式以提高大气激光通信系统的性能,有效降低通信误码率(BER)。

2 偏振移位键控技术

2.1 偏振光描述

光波幅度沿 x, y 方向的投影如下^[6]：

$$x = E_x \cos(\omega t - kz), \quad (1)$$

$$y = E_y \cos(\omega t - kz + \varphi). \quad (2)$$

由(1),(2)式可构成椭圆特征参数方程：

$$\frac{x^2}{E_x^2} + \frac{y^2}{E_y^2} - \frac{2xy}{E_x E_y} \cos \varphi = \sin^2 \varphi, \quad (3)$$

其中存在 3 个独立变量与椭圆的形状相关,即 E_x 、 E_y 和 φ 。在 (u, v) 坐标系中椭圆方程式为

$$\frac{u^2}{a^2} + \frac{v^2}{b^2} = 1, \quad (4)$$

式中 (a, b) 分别为椭圆的长轴和短轴。

光波的偏振态取决于椭圆的形状,即偏振椭圆的参数 ζ 和 η , 其中方位角即椭圆长轴与水平方向的夹角。椭圆率 ζ 定义为

$$\zeta = \tan \beta = b/a, \quad (5)$$

式中 β 表示椭圆角。

2.2 偏振态表征

斯托克斯参量能够描述光波的强度和偏振态,包含 4 个元素,可完全表征光波的偏振特性。归一化的斯托克斯矢量表示为

$$\mathbf{S} = \{S_0 \ S_1 \ S_2 \ S_3\}, \quad (6)$$

式中 S_0 为全部光强, S_1 为线偏振元素在水平和垂直方向上的强度差, S_2 为 $\pm 45^\circ$ 线偏振元素的强度差, S_3 为右旋圆和左旋圆元素的强度差。

激光的偏振态可表征为^[7]

$$\sin 2\beta = S_3 / \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}, \quad (7)$$

$$\tan 2\eta = S_2 / S_1. \quad (8)$$

1) $\zeta=0$ 时,待测光为线偏振态;

2) $\zeta=\pm \frac{\pi}{4}$ 时,待测光为圆偏振态;

3) ζ 取其他值时,待测光为椭圆偏振态。

2.3 偏振移位键控技术分析

较为常见的几种数字调制方式有幅度移位键控(ASK)、频率移位键控(FSK)、PSK 和差分相位移位键控(DPSK)。OOK 是最简单、最常见的 ASK,通过光信号的有无表示信号“1”和“0”。PolSK^[8~10] 技术作为光通信领域新兴的标准数字调制技术,不同于强度调制,而是利用光波的矢量特性,将数字信息编码到发射光信号的偏振态上,用不同偏振态来表示逻辑信号“0”和“1”,实现编码通信过程。PolSK 不受光源相位噪声和量子限噪声的影响,且能抑制光纤非线性效应,适用于多电平调制,可实现高码率传输,因此备受关注。实验中采用左、右旋圆偏振态分别表示逻辑信号“0”和“1”,即圆偏振移位键控(CPolSK)。

3 基于 PolSK 的大气激光通信系统

3.1 基于 PolSK 的调制系统

基于 PolSK 的大气激光通信系统分为发射端和接收端两部分。图 1 为基于 PolSK 的光通信系统发射端原理图。发射端主要包括激光器、码型发生器、偏振调制器及发射光学系统四部分^[9]。其工作过程如下:连续(CW)激光器作为光源提供线偏振光;码型发生器产生所需不归零(NRZ)码,作用

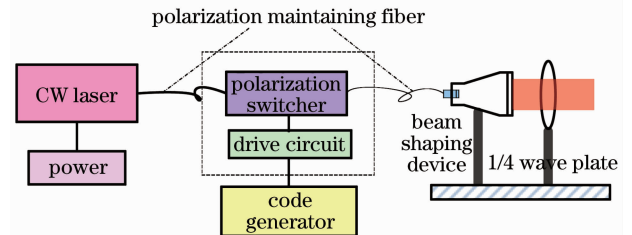


图 1 基于 PolSK 的光通信系统发射端原理图

Fig. 1 Schematic diagram of optical communication system transmitter based on PolSK

于偏振调制器,对激光束进行偏振态调制,使得偏振调制器输出光束为相互交替的正交线偏振光,该光束再经由发射光学系统扩束、整形为平行光束,然后经 1/4 波片将该线偏振光转换为圆偏振光,即采用圆偏振光的旋光状态(左旋/右旋)来表示码型发生器所产生的码型信息。然后光信号被发射到大气链路中,实现光信号调制过程。

3.2 平衡探测接收解调系统

图 2 为基于 PolSK 的光通信系统接收端原理图,接收端实现对激光信号的探测和识别,主要由 1/4 波片、偏振分光棱镜、光电探测器和差分电路组

成。在通信系统接收端,光信号首先经过 1/4 波片将经过大气链路传输后的光信息由正交的圆偏振光转变为正交线偏振光,然后经过偏振分光棱镜,使得接收光信号偏振态与分束后光信号偏振态有如下关系:当接收光为左旋圆偏振光时,只有探测器 D_0 处可探测到光强信息,或者只有 D_0 处可探测较强的光强信息;相反,即在右旋圆偏振光时则可在 D_1 处探测到相应的光强信息。然后利用两路光电探测器分别进行探测,将光信号转换为电信号,再进行差分放大,进而实现信号解调过程。

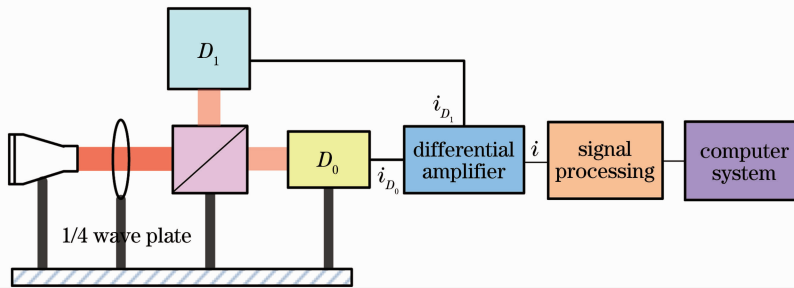


图 2 基于 PolSK 的光通信系统接收端原理图

Fig. 2 Schematic diagram of optical communication system receiver based on PolSK

4 抗干扰性能分析与仿真

4.1 偏振调制抗干扰性能分析

在空间光通信系统中,可供编码的基本光参量包括强度、相位、频率及偏振态 4 个,目前许多研究工作都集中在前 3 个参量的调制方面,但到高速光通信领域都出现了某些难于克服的问题,如在大气激光通信系统中采用传统的强度调制方式时,激光信号存在严重的功率波动问题,大大降低了系统的非线性效应,同时激光受大气湍流及背景光噪声影响较严重,导致接收信号信噪比降低,误码率提高。于是学者们开始把注意力转移到偏振编码,即 PolSK^[11]。

在采用 NRZ 编码的光通信系统中,实验中将 OOK 和 CPolSK 的信号脉冲序列进行比较,可以看出采用 OOK 调制方式的信号序列在传输过程中脉冲强度高低起伏变化,而采用 CPolSK 调制方式的信号序列在整个传输过程中信号强度比较恒定,只有圆偏振旋向发生改变^[3]。OOK 与 CPolSK 信号脉冲时序示意图如图 3 所示。

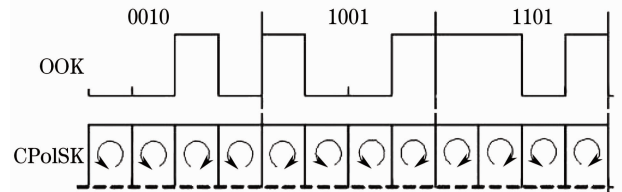


图 3 OOK 与 CPolSK 信号脉冲时序图

Fig. 3 Timing diagram of OOK and CPolSK signal pulses

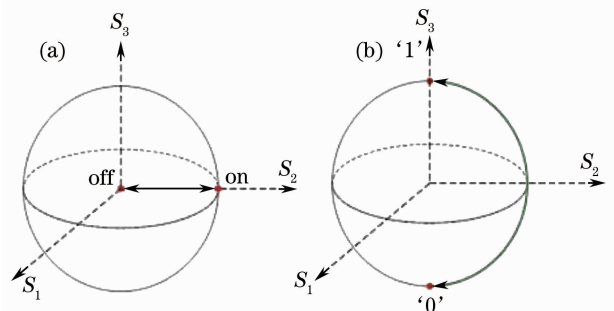


图 4 Stokes 空间(a) OOK 和(b) CPolSK 调制方式比较

Fig. 4 Comparison between (a) OOK and (b) CPolSK modulation modes in Stokes space

斯托克斯参量和庞加莱球都可以实现对光波偏振态的表示。如图 4 所示(彩图见电子版),在庞加莱球上,每个逻辑状态(“0”或“1”)用一个点来表示,

而逻辑状态间的变化由绿色箭头来表示。在 OOK 系统中,逻辑状态间的变化由庞加莱球的半径来表示,而在 CPolSK 系统中,逻辑状态间的变化由庞加

莱球的半个圆弧来表示。由此可知,CPolSK 系统中逻辑信号“0”和“1”的几何距离为 OOK 系统中的 2 倍。庞加莱球中几何距离的增加可以直接改善通信系统的功率利用效率。

作者在国家自然科学基金(60677009)相关项目中的研究表明,圆偏振光在大气中传输,受大气影响其偏振度发生轻微变化(小于等于 10%)^[11],而偏振态(左旋或右旋)不发生改变。实验中所介绍的大气激光通信系统正是利用圆偏振光这一特性,采用 PolSK 技术进行激光通信,提高激光弱信号探测信噪比,同时可实现保密激光信息传输。

4.2 平衡接收解调抗干扰性能分析与仿真

采用 Optiwave 公司的专业光通信软件包 Optisystem 对传输速率 R 为 2.5 Gb/s 的基于

PolSK 的大气激光通信系统中平衡探测方法解调过程进行了模拟仿真。图 5 为整个激光通信系统的仿真图。针对整个系统在通信过程中可能受到的干扰和影响进行了模拟仿真和数值分析^[9]。

结合实际激光通信系统,仿真系统参数设置如下^[12,13]:激光器发射功率设为 27.9 dBm(623.4 mW),大气损耗设为 1.1 dB/km(天气状况为轻霾,能见度小于 10 km^[11]),掺铒光纤放大器(EDFA)增益为 14.5 dB,结果表明,信号经低通贝塞尔滤波器(LPBF)后差分处理,最小误码率为 2.20234×10^{-7} ,眼图如图 6(a)所示;当发射功率增大至 28.78 dBm(756.74 mW)时最小误码率达到 3.90082×10^{-10} ,眼图如图 6(b)所示。

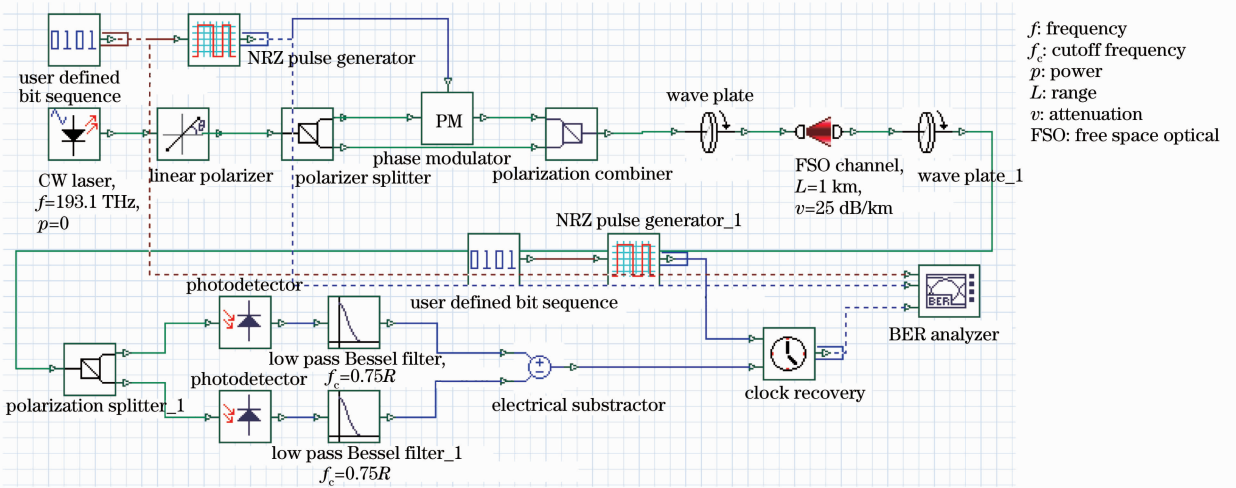


图 5 2.5 Gb/s、20 km CPolSK 通信系统仿真图

Fig. 5 CPolSK simulation diagram of optical communication system at the rate of 2.5 Gb/s and transmission distance of 20 km

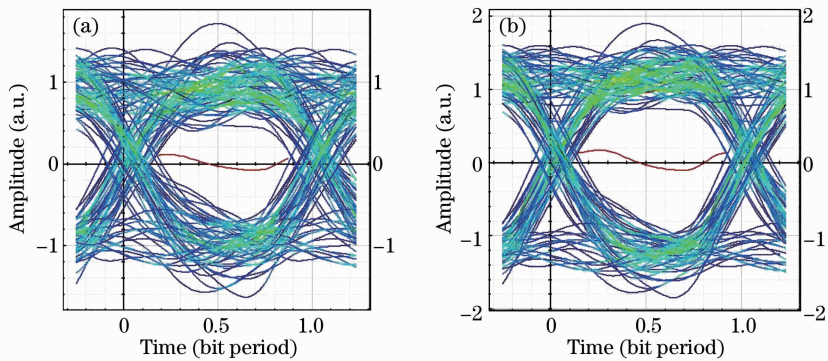


图 6 大气通信系统仿真眼图测试

Fig. 6 Eye diagram test of air communication system

在整个通信过程中,信号从发射端射出,经过大气信道传输,然后在接收端进行接收解调,主要考虑大气信道中大气湍流效应对激光偏振态的影响。下

面主要对接收端解调过程进行仿真、分析。

图 7 为整个通信过程中激光偏振态变化结构示意图。在理想条件下,系统中激光信号在传输过程

中其偏振态变化规律如下：①处为发射端偏振调制器处交替输出的正交线偏振光(±45°)；②处分别表示在大气信道中传输前后的正交圆偏振光(左旋/右旋)；③处为接收光经过波片转换后的线偏振光(±45°)。

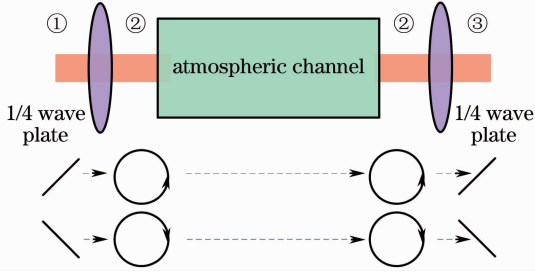


图7 通信系统中激光偏振态变化结构示意图
Fig.7 Schematic diagram of laser polarization state changes

偏振分光棱镜可将输入光偏振态分解成两个正交的线偏振态并分别输出^[14]。由图2所示基于PolSK的光通信系统接收端原理图可知，理想情况下，当接收端接收到的光信号为右旋圆偏振态时，经过1/4波片后转换为-45°线偏振光，该线偏振光再经过正确放置的偏振分光棱镜后，则D₁支路有光信号输出，而D₀支路无光信号输出。但在实际通信系统中，激光信号不可避免地会受到光学器件、大气湍流等各方面因素的影响(这里考虑假设激光信号经过大气湍流后，其偏振态发生了微小的变化)，使得图7中③处接收到的一45°线偏振光不再是标准的线偏振光，其椭圆率和方位角都发生了改变(方位角 $\theta = 1 - \sqrt{1 - (b^2 - a^2/b^2)}$)。经过偏振分光棱镜分解后结果如下。

此处，通信系统仿真图8~10仅表示通信过程中激光偏振态的变化过程。观察图8~10中偏振光总能量信息S₀，可知激光光束经过偏振分光棱镜后虽然没有达到理想的分光效果，但是当传输逻辑信

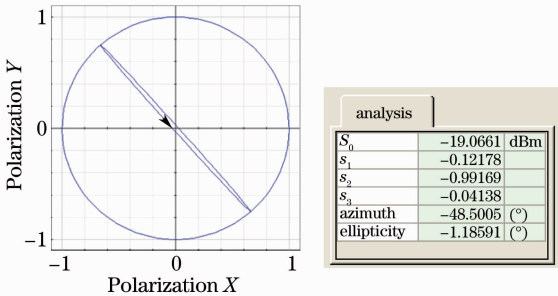


图8 ③处接收到的线偏振光
Fig.8 State of polarization of received optical signal at ③

号为“1”时，D₀支路上的光能量相对D₁支路来说非常小，相反，传输逻辑信号为“0”时，D₁支路上的光能量相对D₀支路来说非常小，不影响后续电路对信号的探测、解码。

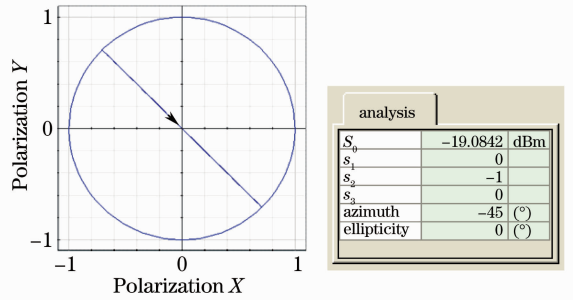


图9 经过偏振分光棱镜后D₁支路偏振光
Fig.9 Polarized light of D₁ branch after passing through the polarization beam splitter prism

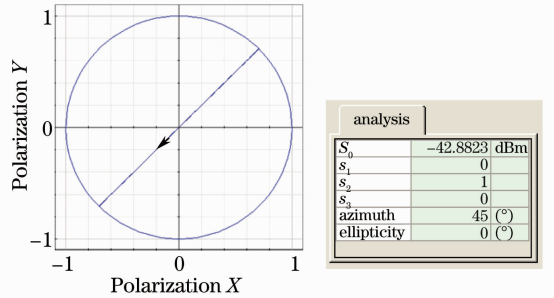


图10 经过偏振分光棱镜后D₀支路偏振光
Fig.10 Polarized light of D₀ branch after passing through the polarization beam splitter prism

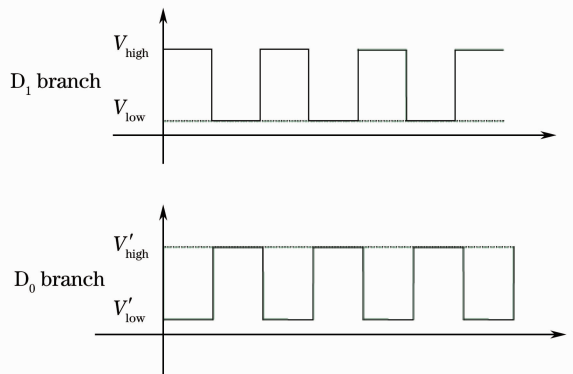


图11 D₀与D₁支路探测结果
Fig.11 Detection results of the D₀ and D₁ branches

其原理如图11所示。图11表示在以上假设(激光在传输过程中偏振态发生变化)情况下，平衡探测器中D₁、D₀支路输出信号形式。其中激光在通信系统中以右旋圆偏振态传输时，由于受大气湍流等因素的影响，激光偏振态有所改变，使得平衡探测器中D₁支路信号为高电平V_{high}，D₀支路信号为低电平V'_{low}，经过差分电路后，输出电信号为单路(D₁或D₀支路)

信号的两倍。

由图 12 可以看出,实验中所采用的通信方式在接收端接收解调过程中,由于将两路互补信号进行差分放大,使得输出信号峰峰值为原信号峰峰值的两倍(也是非平衡接收解调方式输出信号峰峰值的两倍),同时还有效地抑制了共模噪声,有效地提高了系统的通信性能。

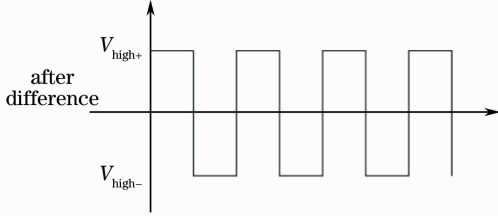


图 12 探测信号经过差分电路输出结果

Fig. 12 Output results of detection signal after differential circuit

4.3 系统误码率性能分析

对于 OOK 调制方式,学者们已经进行过深入的研究。在此,主要对 CPolSK 调制方式下的系统误码率性能进行分析,并对两种调制方式性能进行比较。仅在中、弱湍流情况下,信号的强度起伏概率分布函数可表示为^[15,16]

$$p_1(u) = \frac{1}{u\sigma_{in} \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma_{in}^2} \left(\ln u + \frac{1}{2}\sigma_{in}^2\right)^2\right], \quad (9)$$

式中 σ_{in}^2 表示归一化强度扰动方差。

对于直接探测的 OOK 调制系统,其误判概率表示为

$$P_{e_OOK}(u) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{u\langle R_{SN} \rangle}{2\sqrt{2}}\right), \quad (10)$$

此处 $\operatorname{erfc}(\cdot)$ 为误差补偿函数,其中信噪比的平均值 $\langle R_{SN} \rangle$ 定义为

$$\langle R_{SN} \rangle = \frac{\langle i_s \rangle}{\sigma_{in}}. \quad (11)$$

由于大气湍流会引起信号的强度起伏,此时 OOK 调制系统的平均误码率表示为

$$\langle R_{BE_OOK} \rangle = \int_0^{\infty} p_1(u) P_{e_OOK}(u) du. \quad (12)$$

对于图 1、2 所介绍的平衡探测接收的 CPolSK 光通信系统调制系统,图中符号可以表示为如下形式:

$$i = i_{D_1} - i_{D_0} = \begin{cases} \epsilon i_s + i_n, & \text{"1"} \\ -\epsilon i_s + i_n, & \text{"0"} \end{cases}, \quad (13)$$

式中 $\epsilon = 2P(z) - 1$ 是由部分偏振光引入的系数,

$i_s = i_L - i_R$ 表示接收到的光信号产生的光电流,其中 i_L 和 i_R 表示接收光信号的左、右旋分量产生的光电流。 $i_n = i_{n1} - i_{n0}$, 其中 i_{n0} 和 i_{n1} 是探测内部噪声电流,且 $i_n \sim N(0, 2\sigma_{in}^2)$ 。假设系统发射“0”和“1”符号的概率相等,则 CPolSK 通信系统的误判概率为

$$P_{e_CPol}(i_s) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\epsilon i_s}{2\sigma_{in}}\right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\epsilon u \langle R_{SN} \rangle}{2\sigma_{in}}\right). \quad (14)$$

在考虑大气湍流的情况下,CPolSK 系统平均误码率可表示为

$$\langle R_{BE_CPol} \rangle = \int_0^{\infty} p_1(u) P_{e_CPol}(u) du. \quad (15)$$

(12)式和(15)式分别表示 OOK 和 CPolSK 系统在弱湍流情况下的通信误码率性能。这里选取不同强度起伏的 3 组数值进行分析、比较,如图 13 所示。结果表明,强度起伏大小直接影响系统的误码率值,同时,随着信噪比的增大系统误码率减小。在系统误码率性能要求一致的情况下,CPolSK 系统所需探测信号信噪比值要比 OOK 系统低 3 dB 左右^[17,18]。

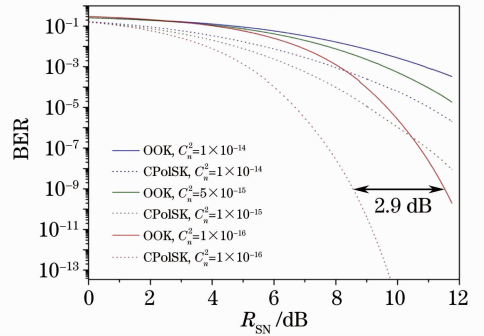


图 13 OOK 调制与 CPolSK 调制光通信系统误码率性能比较

Fig. 13 Performances of OOK and CPolSK modulated optical communication systems

通过以上分析可知,激光束在大气信道中传输,受大气湍流及背景光噪声等因素影响,其偏振态发生轻微的变化^[8]。在实验中所介绍的基于 PolSK 的大气激光通信系统当中,这些变化并不会影响接收端对传输光信号的探测、解码(在探测信号功率满足接收系统最小可探测功率要求的情况下),这样可以有效地提高接收端的信噪比,从而降低激光通信系统的误码率。

5 结 论

介绍了 PolSK 技术和平衡接收解调技术在大

气激光通信系统中具有的优势,对基于 PolSK 的大气激光通信系统中的偏振调制过程和平衡接收解调过程进行了理论分析与模拟仿真,讨论了大气信道对 PolSK 脉冲信号的影响,在此基础上,分析了采用 PolSK 调制技术的大气激光通信系统的性能。计算机数字仿真结果表明,基于激光偏振态参数的调制与解调技术在抗大气环境干扰、提高数据传输速率和降低误码率等方面具有优越性。此外,在中、弱湍流条件下,与 OOK 系统相比,采用 PolSK 调制技术的光通信系统接收端所需探测的信号信噪比降低 3 dB 左右,有效地提高了激光通信系统性能,在未来的空间激光通信领域有广阔的发展空间和应用前景。

参 考 文 献

- Jiang Huilin, Tong Shoufeng, Zhang Lizhong *et al.*. The Technologies and Systems of Space Laser Communication[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010. 47~50
姜会林, 佟守峰, 张立中等. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010. 47~50
- Liu Botao. The attenuation of laser in the atmosphere[J]. *J. Light Scattering*, 2007, **19**(1): 43~48
刘波涛. 大气对激光传输的影响[J]. 光散射学报, 2007, **19**(1): 43~48
- 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
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
- 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
- Ke Xizheng, Yin Zhiyun, Yang Lihong. Light polarization modulation with PPM and its key technique in atmospheric laser communication[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2007, **28**(4): 553~556
柯熙政, 殷致云, 杨利红. 大气激光通信中光 PPM 偏振调制方案及其关键技术[J]. 半导体光电, 2007, **28**(4): 553~556
- Li Zhengyong. High-Speed Polarization Control in Optical Fiber and Polarization Encoding Communication[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008
李政勇. 光纤偏振态的高速控制与偏振编码通信[D]. 北京: 北京交通大学, 2008
- Fan Jiayu, Huang Zhaoming, Wang Lutang. Research and application on polarization shift keying technology[C]. The Third China Optical Communication Technology and Market Seminar, 2004. 116~124
范嘉煜, 黄肇明, 王陆唐. 偏振移位键控(PolSK)技术的研究与应用[C]. 第三届中国光通信技术与市场研讨会, 2004. 116~124
- Wang Ying, Wang Lutang, Fang Nian *et al.*. Simulation and analysis of dual-channel optical transmissions using SOA-based all-optical polarization modulations[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(12): 3203~3208
王颖, 王陆唐, 方捻等. 基于 SOA 全光偏振调制的双信道光传输系统的仿真与分析[J]. 光子学报, 2009, **38**(12): 3203~3208
- Jasmin Grosinger. Investigation of Polarization Modulation in Optical Free Space Communications through the Atmosphere[D]. Vienna: Technical University of Vienna, 2008
- Zhao Xinhui, Yao Yong, Sun Yunxu *et al.*. Circle polarization shift keying with direct detection for free-space optical communication[J]. *J. Opt. Commun. Netw.*, 2009, **1**(4): 307~312
- Sergio Benedetto. Theory of polarization shift keying modulation [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 1992, **40**(4): 708~721
- Maha Achour. Simulating atmospheric free-space optical propagation, part II: haze, fog and low cloud attenuation[C]. *SPIE*, 2002, **4873**: 1~12
- Gao Yan, Wu Min, Du Weifeng. Performance research of modulation for optical wireless communication system [J]. *Journal of Networks*, 2011, **6**(8): 1099~1105
- Chen Dan, Ke Xizheng, Qu Fei. Research on homomorphism filtering technology of wireless optical communication based on four frequency shift keying modulation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 0205001
陈丹, 柯熙政, 屈菲. 基于四进制频移键控调制的无线光通信同态滤波器技术研究[J]. 中国激光, 2011, **38**(2): 0205001
- 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. 圆偏振移位键控的星地激光通信误码率研究[J]. 中国激光, 2011, **38**(11): 1105007
- Mayukh Lahiri, Emil Wolf. Theory of optical coherence in the space-time and in the space-frequency domains[C]. *Frontiers in Optics*, 2010, FTuE1
- X. Tang, Z. Ghassemlooy, S. Rajbhandari *et al.*. Differential circular polarization shift keying with heterodyne detection for free space optical links with turbulence channel [C]. 16th European Networks and Optical Communications Conference, 2011. 149~152
- Chen Zhengkai. A Novel Differential Polarization-Shift Keying Scheme for Fiber-Optic Communication System[D]. Hamilton: McMaster University, 2010

栏目编辑: 王晓琰