

# 圆偏振移位键控的星地激光通信误码率研究

林日钊<sup>1</sup> 傅忠谦<sup>1</sup> 李永亮<sup>2</sup> 张 虎<sup>1</sup> 王剑亭<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学技术大学信息科学技术学院, 安徽 合肥 230027)  
(<sup>2</sup> 中山职业技术学院计算机工程系, 广东 中山 528404)

**摘要** 光束的偏振特性在大气传输中变化比较小,因而偏振移位键控调制具有较高的可靠性。以星地激光通信为背景,研究星地激光通信链路的圆偏振移位键控调制的误码率性能。考虑到大气湍流的影响,采用 Hufnagle-Valley 大气折射结构常数模型,在 Rytov 方差分别为 0.082,1.11 这两种弱、强湍流起伏条件下,通过对比圆偏振移位键控调制和直接检测开-关键控调制的误码率,得到了同等湍流起伏条件下前者误码率性能比后者突出的结论。特别是 Rytov 方差为 0.082 时,要达到  $10^{-7}$  的误码率,它们对信噪比的要求分别是 21.65 dB 和 30 dB,圆偏振移位键控调制对信噪比的要求降低了 8.35 dB。此外,还分析了近地面折射结构常数、天顶角和地面风速这 3 个因素对误码率的影响,仿真结果表明圆偏振移位键控调制的误码率比直接检测开-关键控调制最少降低 2 个数量级。因此,圆偏振移位键控调制在未来星地激光通信中有着广阔的发展前景。

**关键词** 光通信;星地激光通信;圆偏振移位键控;大气湍流;误码率

**中图分类号** TN929.12 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.1105007

## Research of Bit Error Rate for Satellite-to-Ground Laser Communication Using Circle Polarization Shift Keying Modulation

Lin Rizhao<sup>1</sup> Fu Zhongqian<sup>1</sup> Li Yongliang<sup>2</sup> Zhang Hu<sup>1</sup> Wang Jianting<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Information Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230027, China

<sup>2</sup> Department of Computer Engineering, Zhongshan Polytechnic, Zhongshan, Guangdong 528404, China

**Abstract** The polarization shift keying modulation has high reliability since the polarization properties of beam light change relatively small while propagating through the atmosphere. The bit error rate (BER) performance of the circle polarization shift keying modulation in the satellite-to-ground laser communication is studied. Considering the effects of the atmospheric turbulence, the Hufnagle-Valley refractive index structure constant mode is adopted. By comparing the BER performance of the circle polarization shift keying modulation and the on-off keying (OOK) modulation under the weak and strong turbulence fluctuation, with the values of the Rytov variance are 0.082 and 1.11, it comes to a conclusion that the former is superior to the latter on the BER performance. Especially when the BER of  $10^{-7}$ , is to be achieved, their signal to noise ratio are 21.65 dB and 30 dB, the circle polarization shift keying modulation reduces 8.35 dB of the signal to noise ratio under the Rytov variance is 0.082. In addition, the effects on the BER of three factors, which are the near-surface refraction structure constant, the zenith angle and the ground wind speed are analyzed. The simulation results show that the BER of the circle polarization shift keying modulation is lower than the OOK modulation at least two magnitudes. Therefore, it has broad prospect in the satellite-to-ground laser communication in future.

**Key words** optical communications; satellite-to-ground laser communication; circle polarization shift keying modulation; atmospheric turbulence; bit error rate

**OCIS codes** 060.4510; 010.1290; 010.1320

收稿日期: 2011-06-27; 收到修改稿日期: 2011-08-05

基金项目: 中国科学院知识创新工程三期项目(KGCX3-SYW-407-03-10)资助课题。

作者简介: 林日钊(1986—),男,硕士研究生,主要从事计算机仿真方面的研究。E-mail: rzhaolin@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 傅忠谦(1959—),男,副教授,主要从事计算机仿真、复杂系统与复杂网络等方面的研究。

E-mail: zqfu@ustc.edu.cn(通信联系人)

# 1 引 言

星地激光通信具有通信容量大、终端体积小、重量轻、抗电磁干扰和保密性好等优点<sup>[1]</sup>,已成为今后星地间大容量保密通信最具竞争力的可选方案之一<sup>[2]</sup>,因而受到世界各国的重视。相对于星地激光通信中最常用的数字强度调制方式之一的开-关键控(OOK)调制<sup>[3]</sup>,偏振移位键控(PolSK)调制是一种比较新的调制方式,国内外对 PolSK 的研究主要在光纤通信、自由空间光通信领域<sup>[4~11]</sup>。2006年, Sugianto Trisno 等<sup>[6]</sup>将偏振移位键控调制技术应用于自由空间光通信领域,他们的实验结果表明 PolSK 比 OOK 调制对系统有 3 dB 灵敏度的提高。近几年来,其他学者也对 PolSK 在自由空间光通信中的性能做了研究。他们的研究结果表明,PolSK 可以提高系统的误码率(BER)性能<sup>[7~11]</sup>。如果将 PolSK 调制应用到星地激光通信中,它的优势更为突出,因为大气湍流主要存在于从地面到离地高度为 20~25 km 这段区间内<sup>[12]</sup>,并且湍流强度随着离地高度的增加而减弱;而文献<sup>[6~11]</sup>研究的是 PolSK 在自由空间水平链路上的性能,其发射端和接收端通常离地面很近,整条链路上湍流强度是定值,因而相同链路长度上受到的湍流影响要比星地激光通信链路严重。因此,研究 PolSK 调制在星地激光通信中的 BER 是十分有意义的。由于圆偏振移位键控(CPolSK)调制利用圆偏振光来实现信息的调制,不要求发射端和接收端偏振坐标对齐<sup>[9,13]</sup>,所以本文考虑大气湍流的影响,研究星地激光通信上行链路的圆偏振移位键控调制的 BER 性能。

## 2 圆偏振移位键控调制的系统模型

### 2.1 发射端模型

根据文献<sup>[13]</sup>,本文对文献<sup>[11]</sup>的发射结构进行改进得到发射端原理框图,如图 1 所示。发射端由激光器(LD)、偏振控制器(PC)、偏振分束器(PBS)、相位调制器(PM)、λ/4 波片(QW)(快轴在 y 轴)、发射天线(EA)组成。

调制原理为:激光器产生的激光束经过偏振控

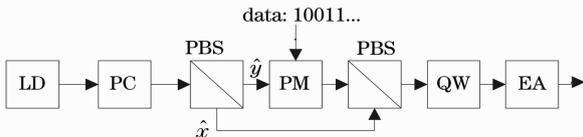


图 1 圆偏振移位键控调制系统的发射端原理框图

Fig. 1 Block diagram of circle PolSK transmitter

制器输出 45°线偏振光,该线偏振光被偏振分束器分成沿 x,y 偏振方向的偏振分量。沿 x 偏振方向分量直接进入偏振分束器,y 偏振方向分量进入相位调制器。如果传输的是信息“0”,相位调制器不改变 y 偏振方向分量的相位,其与 x 偏振方向分量在偏振分束器合束输出偏振分量相位差  $\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = 0$  的线偏振光。经过快轴在 y 轴的 λ/4 波片延迟相位 π/2 之后,  $\Delta\phi = -\pi/2$ ,所以该线偏振光转化为左旋圆偏振光;如果传输的是信息“1”,相位调制器使 y 偏振方向分量的相位改变 π,偏振分束器合束输出偏振分量相位差  $\Delta\phi = \pi$  的线偏振光,经过 λ/4 波片之后转化为右旋圆偏振光。发射天线将右旋或左旋圆偏振光发送到大气信道进行传输。

为了便于分析圆偏振光的接收和解调,下面对传输的圆偏振光进行描述。因为实际激光链路的光束多数为高斯光束,本文采用基模单位振幅高斯光来表示通信光束<sup>[14]</sup>。根据文献<sup>[6]</sup>给出的出射高斯偏振光表达式,可将圆偏振基膜高斯偏振光的空间分布描述为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(x, y, z) &= \left[ \frac{\sqrt{2}}{2} \vec{e}_x + \frac{\sqrt{2}}{2} \exp(j\phi) \vec{e}_y \right] \times \\ E(x, y, z) &= \left[ \frac{\sqrt{2}}{2} \vec{e}_x + \frac{\sqrt{2}}{2} \exp(j\phi) \vec{e}_y \right] \times \\ &\left\{ E_0 \frac{\omega_0}{\omega_z} \exp \left[ -j(kz - \theta) - (x^2 + y^2) \left( \frac{1}{\omega_z^2} + \frac{jk}{2R_z} \right) \right] \right\}, \end{aligned} \quad (1)$$

式中  $\omega_0$  是激光束腰半径,  $\omega_z$  是激光传输了距离 z 的光斑半径,  $\theta$  是附加相位,  $R_z$  是激光传输了距离 z 的波前曲率半径。  $\phi = \pi/2$  时,偏振光为右旋圆偏振光;  $\phi = -\pi/2$  时,为左旋圆偏振光。

单色光的 t 时刻处的光场表达方式与其空间分布形式具有以下关系<sup>[15]</sup>:

$$\mathbf{E}(x, y, z; t) = \text{Re}[\mathbf{E}(x, y, z) \exp(-j\omega t)], \quad (2)$$

式中 Re 表示取实部,  $\omega_s$  是光源的角频率。因此,出射的圆偏振光的光场表达式可以描述为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(x, y, z; t) &= \text{Re} \left\{ \left[ \frac{\sqrt{2}}{2} \vec{e}_x + \frac{\sqrt{2}}{2} \exp(j\phi) \vec{e}_y \right] \times \right. \\ &\left. E(x, y, z) \exp(-j\omega_s t) \right\}, \end{aligned} \quad (3)$$

### 2.2 接收端模型

对于二进制的圆偏振移位键控调制,只需要在接收端检测斯托克斯参量的  $S_3$  即可。因此,本文参考文献<sup>[16]</sup>,并对文献<sup>[11]</sup>中的接收端结构进行改进得到圆偏振移位键控调制系统的接收端,其原理框图如图 2 所示。接收端主要包括偏振分束器

(PBS)、本振激光(LO)、光电探测器、带通滤波器(BPF)、 $\pi/2$  相位延迟器、低通滤波器(LPF)、采样器

和限幅器组成。

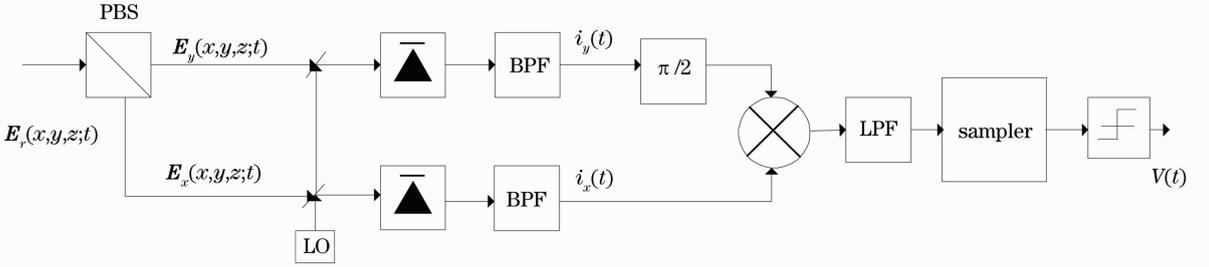


图2 圆偏振移位键控调制系统的接收端原理框图

Fig. 2 Block diagram of circle PolSK receiver

在接收端, 信号光被偏振分束器分成两束沿  $x$ 、 $y$  轴方向的偏振分量光, 并与本振激光耦合之后得到

$$\begin{cases} E_x(x, y, z; t) = \text{Re}\{E_r(x, y, z) \exp\{-j[\omega t - (\varphi_x + \Delta\varphi_x) - \phi_s(t)]\}\} e_x + \sqrt{P_{lo}/2} \cos[\omega_{lo} t + \phi_{lo}(t)] e_x \\ E_y(x, y, z; t) = \text{Re}\{E_r(x, y, z) \exp\{-j[\omega t - (\varphi_y + \Delta\varphi_y) - \phi_s(t)]\}\} e_y + \sqrt{P_{lo}/2} \cos[\omega_{lo} t + \phi_{lo}(t)] e_y \end{cases} \quad (4)$$

式中  $\varphi_x, \varphi_y$  分别是偏振分量的原始相位;  $\Delta\varphi_x, \Delta\varphi_y$  是大气引起的偏振角变化和发射端与接收端偏振轴之间的角度偏差之和,  $\omega_{lo}$  为本振激光的角频率。假设大气是各向同性的, 则  $\Delta\varphi_x = \Delta\varphi_y$ 。令  $\Delta\varphi_x = \Delta\varphi$ , 带通滤波器输出电流为

$$\begin{cases} i_x(t) = 2R \sqrt{P_s P_{lo}/2} \cos[\omega_{IF} t + \phi(t) + \varphi_x + \Delta\varphi_x] + n_x(t) \\ i_y(t) = 2R \sqrt{P_s P_{lo}/2} \cos[\omega_{IF} t + \phi(t) + \varphi_y + \Delta\varphi_y] + n_y(t) \end{cases} \quad (5)$$

式中  $R$  是光电二极管的响应度,  $P_s$  是沿  $x$  或  $y$  轴偏振方向的接收信号功率,  $P_{lo}$  是本振激光功率; 中频信号的角频率  $\omega_{IF} = \omega - \omega_{lo}$ ,  $\phi(t) = \phi_s(t) - \phi_{lo}(t)$ ,  $n_x(t), n_y(t)$  分别是服从  $N(0, \sigma^2)$  分布的高斯噪声<sup>[11, 17]</sup>,  $\sigma^2 = \frac{qR P_{lo}}{2T}$ ,  $q$  是单位电子电量, 其值为  $1.6 \times 10^{-19}$  C,  $T$  是单位比特周期。

由于接收天线孔径远远小于到达接收端的激光光斑半径, 因此可以认为是点接收。如果不考虑激光的退偏, 则接收端的信号总接收功率  $P_r$  为

$$P_r = P_t \eta_t \eta_f \eta_p \eta_a \left( \frac{D}{2W_{LT}} \right)^2, \quad (6)$$

式中  $P_t$  是发射功率,  $\eta_t, \eta_f$  分别是发射端、接收端的光

电效率;  $\eta_p$  是指向误差造成的衰减,  $\eta_p = \exp[-8(\varphi_v^2 + \varphi_h^2)/\theta_{div}^2]$ ,  $\varphi_v, \varphi_h$  分别是俯仰、方位方向上的瞄准误差,  $\theta_{div}$  是发散角;  $\eta_a$  是大气透射率, 可以由 PcModWin3.7 软件计算得到;  $D$  是接收天线孔径;  $W_{LT}$  是湍流影响下到达接收端的光束半径。则不考虑激光的退偏时,  $x$  或  $y$  偏振方向的信号功率为  $P_s = P_r/2$ 。完全偏振光穿过大气层的退偏度的一个经验值为<sup>[18]</sup>  $d = 0.23\%$ , 所以  $x$  或  $y$  偏振方向的信号功率修改为

$$P_s = \frac{1}{2}(1 - d)P_r. \quad (7)$$

由于噪声  $n_x(t), n_y(t)$  可由相位分量  $\{n_{xi}(t), n_{yi}(t)\}$  和正交分量  $\{n_{xy}(t), n_{yx}(t)\}$  表示, 即<sup>[11, 17]</sup>

$$\begin{cases} n_x(t) = n_{xi}(t) \cos[\omega_{IF} t + \phi(t)] + n_{xy}(t) \sin[\omega_{IF} t + \phi(t)] \\ n_y(t) = n_{yi}(t) \cos[\omega_{IF} t + \phi(t)] + n_{yx}(t) \sin[\omega_{IF} t + \phi(t)] \end{cases} \quad (8)$$

式中  $\{n_{xi}(t), n_{yi}(t)\}, \{n_{xy}(t), n_{yx}(t)\}$  分别服从  $N(0, \sigma_n^2)$  高斯分布,  $\sigma_n^2 = \sigma^2/2$ 。由此, 可以推出输出电压  $V(t)$ :

$$V(t) = R \sqrt{P_s P_{lo}/2} [2R \sqrt{P_s P_{lo}/2} \cos(\varphi_y - \varphi_x - \pi/2) + n'_{xi} \cos(\varphi_y + \Delta\varphi) + n'_{yi} \cos(\varphi_x + \Delta\varphi)], \quad (9)$$

式中  $n'_{xi}$  和  $n'_{yi}$  分别是服从  $N(0, \sigma_n^2)$  分布的高斯噪声。

若采用左旋圆偏振光传输信息“0”, 输出电压  $V(t)$  为

$$V(t) = R \sqrt{P_s P_{lo}/2} (-2R \sqrt{P_s P_{lo}/2} - n'_{xi} \sin \Delta\varphi + n'_{yi} \cos \Delta\varphi). \quad (10)$$

按照两个高斯随机过程的相加减的概念, 知道(10) 式中 $(-n'_{xi} \sin \Delta\varphi + n'_{yi} \cos \Delta\varphi) \sim N(0, \sigma_n^2)$ 。同理, 若采用右旋圆偏振光传输信息“1”, 则输出电压  $V(t)$  为

$$V(t) = R \sqrt{P_s P_{lo}/2} (2R \sqrt{P_s P_{lo}/2} + n'_{xi} \sin \Delta\varphi + n'_{yi} \cos \Delta\varphi), \quad (11)$$

式中 $(n'_{xi} \sin \Delta\varphi + n'_{yi} \cos \Delta\varphi) \sim N(0, \sigma_n^2)$ 。

由(10), (11)式可知, 当传输的是信息“1”时, 则输出电压  $V > 0$ ; 当传输的是信息“0”时, 则输出电压  $V < 0$ 。因此, 当输出电压大于 0 时, 判决器判断传输的是信息“1”; 反之, 判决器判断传输的是信息“0”, 从而实现信息的解调。

### 3 BER 函数模型

由于接收功率和到达接收端的光强有关, 而大气湍流会造成光强闪烁效应, 因此接收功率也是随机起伏的。如果不考虑接收功率的随机起伏, 传输信息“0”时, 令  $v = -2R \sqrt{\langle P_s \rangle P_{lo}/2} - n'_{xi} \sin \Delta\varphi + n'_{yi} \cos \Delta\varphi$ ,  $\langle \cdot \rangle$  表示均值, 则  $v \sim N(-2R \sqrt{\langle P_s \rangle P_{lo}/2}, \sigma_n^2)$ , 信噪比  $\langle f_{SNR}(P_s) \rangle = 2R^2 \langle P_s \rangle P_{lo}/\sigma_n^2$ 。设定最佳判断阈值为  $V_T$ , 有  $p_{e0}(V_T | P_s) = p_{e1}(V_T | P_s)$ , 则信息“0”被误判为“1”的 BER 为

$$p_{e0}(V_T | P_s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_n} V_T} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{(v + 2R \sqrt{\langle P_s \rangle P_{lo}/2})^2}{2\sigma_n^2}\right] dv = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left[\frac{V_T + 2R \sqrt{\langle P_s \rangle P_{lo}/2}}{\sqrt{2}\sigma_n}\right], \quad (12)$$

信息“1”被误判为“0”的 BER 为

$$p_{e1}(V_T | P_s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_n}} \int_{-\infty}^{V_T} \exp\left[-\frac{(v - 2R \sqrt{\langle P_s \rangle P_{lo}/2})^2}{2\sigma_n^2}\right] dv = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left[\frac{V_T - 2R \sqrt{\langle P_s \rangle P_{lo}/2}}{\sqrt{2}\sigma_n}\right], \quad (13)$$

则链路的总 BER 为  $p_e(V_T | P_s) = \frac{1}{2}[p_{e0}(V_T | P_s) + p_{e1}(V_T | P_s)]$ 。为了求得最佳阈值  $V_T$ , 令  $\frac{\partial p_e}{\partial V_T} = 0$ , 得到  $V_T = 0$ 。所以不考虑接收功率的随机起伏时, 链路的总 BER 为

$$p_e(V_T | P_s) = p_{e0}(V_T | P_s) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left[\sqrt{\frac{\langle f_{SNR}(P_s) \rangle}{2}}\right]. \quad (14)$$

由于大气湍流会造成光强闪烁效应, 所以接收功率是随机起伏的。Gamma-Gamma 光强闪烁分布通过参数  $\alpha, \beta$  能比较准确地描述光强的闪烁效应<sup>[19]</sup>。而接收功率概率密度函数  $p(P_r)$  可以通过 Gamma-Gamma 光强闪烁分布模型来推导, 具体表达式为<sup>[20]</sup>

$$p(P_r) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} P_r \left(\frac{P_r}{\langle P_r \rangle}\right)^{(\alpha+\beta)/2} \times K_{\alpha-\beta}\left(2\sqrt{\frac{\alpha\beta P_r}{\langle P_r \rangle}}\right) \quad P_r > 0, \quad (15)$$

式中  $\Gamma(\cdot)$  是 Gamma 函数,  $K_n(\cdot)$  是修正 K 函数,  $\langle P_r \rangle$  表示接收功率均值。本文对上行链路跟踪高斯光束进行分析,  $\alpha, \beta$  的表达式分别为<sup>[21]</sup>

$$\begin{cases} \alpha = \frac{1}{34.29[\Lambda L/(kr_0^2)]^{5/6} (\sigma_{p_e, T_C}/W)^2 + \exp(\sigma_{\ln X}^2) - 1} \\ \beta = \frac{1}{\exp(\sigma_{\ln Y}^2) - 1} \end{cases}, \quad (16)$$

式中  $\Lambda = \Lambda_0/(\Theta_0^2 + \Lambda_0^2)$ ,  $\Lambda_0 = 2L/(kW_0^2)$ ,  $\Theta_0 = 1 - L/F_0$ ,  $L$  是链路长度,  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  是激光波长,  $W_0, F_0$  分别是发射端的光束半径和波前曲率半径。  $W$  是不考虑湍流影响到达接收端的激光光束半径,  $r_0, \sigma_{\ln X}, \sigma_{\ln Y}$  的计算公式分别为

$$\begin{cases} r_0 \approx \left[0.423k^2 \sec \zeta \int_{h_0}^H C_n^2(h) dh\right]^{-3/5}, \quad H \gg 20 \text{ km} \\ \sigma_{\ln X}^2 = \frac{0.49\sigma_{\text{Bu}}^2}{[1 + (1 + \Theta)0.56\sigma_{\text{Bu}}^{12/5}]^{7/6}} \\ \sigma_{\ln Y}^2 = \frac{0.51\sigma_{\text{Bu}}^2}{(1 + 0.69\sigma_{\text{Bu}}^{12/5})^{5/6}} \end{cases}, \quad (17)$$

对于准直光, 跟踪情况下的指向误差方差  $\sigma_{p_e, T_C}$ 、光束漂移方差  $\langle r_c^2 \rangle$  和两轴 Zernike 倾斜方差  $T_z^2$  的计算公式为

$$\begin{aligned} \sigma_{p_e, T_C} &= (\sqrt{\langle r_c^2 \rangle} - T_z L)^2 \left[1 - \left(\frac{\pi^2 W_0^2/r_0^2}{1 + \pi^2 W_0^2/r_0^2}\right)^{1/6}\right] \\ \langle r_c^2 \rangle &\approx 0.54L^2 \left(\frac{\lambda}{2W_0}\right)^2 \left(\frac{2W_0}{r_0}\right)^{5/3}, \quad H \gg 20 \text{ km} \end{aligned}$$

$$T_z^2 = 0.32 \left( \frac{\lambda}{2W_0} \right)^2 \left( \frac{2W_0}{r_0} \right)^{5/3}, \quad (18)$$

(17)式中,  $\zeta$  是天顶角,  $H$  是卫星高度,  $h_0$  是地面站离地高度,  $\sigma_{\text{Bu}}^2$  是上行链路跟踪高斯光的 Rytov 方差, 其表达式为

$$\sigma_{\text{Bu}}^2 = 8.70 \mu_{u_1} k^{7/6} (H - h_0)^{5/6} \sec^{11/6}(\zeta), \quad (19)$$

$$\mu_{u_1} = \text{Re} \int_{h_0}^H C_n^2(h) \{ \xi^{5/6} [\Delta \xi + i(1 - \overline{\Theta} \xi)]^{5/6} - \Lambda^{5/6} \xi^{5/3} \} dh, \quad (20)$$

式中  $\xi = 1 - (h - h_0)/(H_0 - h)$ ,  $C_n^2(h)$  是大气折射率结构常数, 常采用 Hufnagle-Valley 模型<sup>[22]</sup>:

$$C_n^2(h) = 0.00594(\omega/27)^2 (10^{-5}h)^{10} \exp(-h/1000) + 2.7 \times 10^{-16} \exp(-h/1500) + A \exp(-h/100), \quad (21)$$

式中  $A$  为近地面折射率结构常数,  $\omega$  的计算公式为

$$\omega = \left\{ \frac{1}{15 \times 10^3} \int_{5 \times 10^3}^{20 \times 10^3} \times \left\{ \omega_s h + V_g + 30 \exp \left[ - \frac{(h - 9400)^2}{4800} \right] \right\}^2 dh \right\}^{1/2}, \quad (22)$$

式中  $\omega_s$  是卫星相对于地面站的转动角速度,  $V_g$  是地面风速。

对于高斯光, 大气湍流起伏强弱可以用 Rytov 方差  $\sigma_{\text{Bu}}^2$  和  $\Lambda$  来表示。当满足

$$\begin{cases} \sigma_{\text{Bu}}^2 < 1 \\ \sigma_{\text{Bu}}^2 \Lambda^{5/6} < 1 \end{cases} \quad (23)$$

条件时, 为弱起伏<sup>[22]</sup>; 当不满足(23)式任何条件之一时, 为强起伏。

因此, 考虑大气湍流造成的接收功率随机起伏时, 链路总 BER 为

$$p_e(V_T | P_s) = \int_0^\infty p(P_s) p_e(V_T | P_s) dP_s = \int_0^\infty p(P_s) \frac{1}{2} \text{erfc} \left[ \sqrt{\frac{P_s}{\langle P_s \rangle} \cdot \frac{\langle f_{\text{SNR}}(P_s) \rangle}{2}} \right] dP_s. \quad (24)$$

## 4 数值仿真

### 4.1 数值仿真条件

数值仿真条件包括链路参数和主要大气条件。链路参数如表 1 所示, 大气透射率与大气条件有关, 本文使用 PcModWin3.7 来计算大气透射率  $\eta_a$ , 主要大气条件如表 2 所示。

### 4.2 实验结果及分析

OOK 调制是星地激光通信中常用的调制方式之一, 为了表现圆偏振移位键控调制的 BER 性能,

表 1 链路参数

Table 1 Link parameters

Parameter	Value	Parameter	Value
$\lambda$ / nm	1550	$H$ / km	800
$\theta_{\text{div}}$ / $\mu\text{rad}$	30	$h_0$ / m	3
$W_0$ / m	0.0329	$D$ / m	0.2
$P_t$ / W	0.5	$P_{\text{lo}}$ / mW	1
$\zeta$ / ( $^\circ$ )	30	$\mathcal{R}$ / (A/W)	0.9
$\varphi_h$ / $\mu\text{rad}$	0.5	$R_b$ / (Gb/s)	2
$\varphi_v$ / $\mu\text{rad}$	0.5	$A$ / $\text{m}^{-2/3}$	$1.7 \times 10^{-14}$
$\eta_t$	0.5	$\omega_s$ / (rad/s)	0.0069
$\eta_r$	0.7	$V_g$ / (m/s)	5

表 2 主要大气条件

Table 2 Main atmosphere condition

Parameter	Value
Model atmosphere	Midlatitude summer
CO <sub>2</sub> mixing ratio	$385 \times 10^{-6}$
Aerosol model used	Rural-VIS=23 km
Upper atmosphere aerosols	Background stratospheric
Use cloud / rain aerosol extensions	No clouds or rain
Ground altitude above sea level	1.5 km

本文对这两种调制的 BER 性能进行比较。OOK 调制的 BER 计算公式为

$$p_e(V_T | P_r) = \int_0^\infty p(P_r) p_e(V_T | P_r) dP_r = \int_0^\infty p(P_r) \cdot \frac{1}{2} \text{erfc} \left[ \frac{P_r}{\langle P_r \rangle} \cdot \sqrt{\frac{\langle f_{\text{SNR}}(P_r) \rangle}{2}} \right] dP_r, \quad (25)$$

式中  $\langle f_{\text{SNR}}(P_r) \rangle$  是信噪比<sup>[23]</sup>,  $\langle f_{\text{SNR}}(P_r) \rangle = \mathcal{R}^2 G^2 \langle P_r \rangle^2 / (\sigma_0 + \sigma_1)^2$ ,  $\mathcal{R}$  是光电探测器的响应度,  $G$  是放大器的增益,  $\sigma_0, \sigma_1$  分别是检测信息“0”, “1”时的噪声方差。

#### 4.2.1 不同湍流起伏下的 BER 对比

如图 3 所示, 相同信噪比条件下, 不同湍流起伏对 BER 的影响是不一样的。根据(23)式选取了任意一组强、弱湍流起伏的参数, 分别是  $\sigma_{\text{Bu}}^2 = 1.11$ ,  $\sigma_{\text{Bu}}^2 = 0.082$  ( $\Lambda = 0.108$ )。可以看出相同湍流起伏条件下, CPloSK 调制的 BER 要比 OOK 调制的低。当信噪比较小, 两者的 BER 性能相差不多; 但随着信噪比增大, CPloSK 调制的 BER 优势逐渐表现出来。特别是  $\sigma_{\text{Bu}}^2 = 0.082$  的弱湍流起伏下, CPloSK 调制的 BER 性能明显优于 OOK 调制。要达到  $10^{-7}$  的 BER, CPloSK 调制对信噪比的要求是 21.65 dB, 而 OOK 调制则需要 30 dB, CPloSK 对信噪比的要求降低了 8.35 dB。不过  $\sigma_{\text{Bu}}^2 = 1.11$

的强湍流起伏条件下,前者 BER 性能优势有所下降。综上所述,CPolSK 调制的 BER 性能优于 OOK 调制。

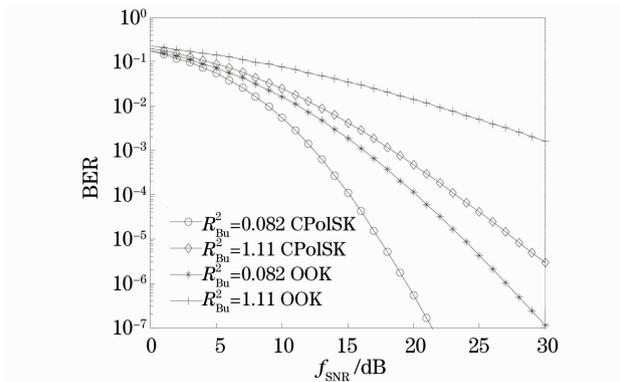


图 3 不同湍流起伏下的 CPolSK 和 OOK 调制的 BER 比较

Fig. 3 BER for the CPolSK and OOK modulation under deferent turbulence fluctuations

#### 4.2.2 湍流强度对链路 BER 的影响

大气湍流造成接收功率的起伏,因此大气湍流影响通信系统的 BER。Hufnagle-Valley 大气折射率结构常数模型所描述的大气湍流与近地面折射率结构常数 A、天顶角和地面风速有着紧密联系。因此,下面讨论这 3 个因素对通信系统 BER 的影响。

1) 当近地面折射率结构常数 A 增大时,大气湍流随之增强,因而激光束受到大气湍流的影响程度也会增强,由此产生的 BER 必然会增大。如图 4 所示,近地面折射率结构常数 A 变大时,BER 确实随之增大。特别是近地面折射率结构常数 A 大于  $5 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$  时,BER 迅速上升。相同近地面折射率结构常数条件下,CPolSK 调制的 BER 要比 OOK 调制的 BER 低。

2) 当天顶角增大时,激光束在湍流大气中传输

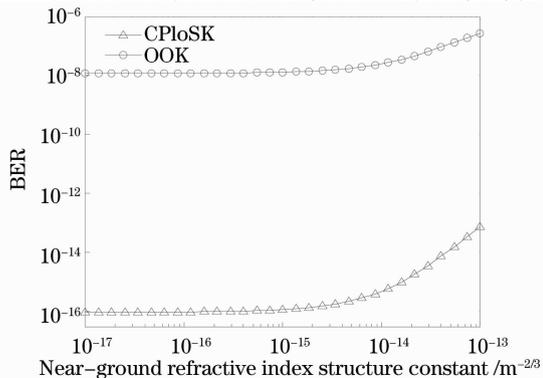


图 4 近地面折射率结构常数对链路 BER 的影响  
Fig. 4 Impact for BER of the near-ground refractive index structure constant

的路径随之变长,因而它受到大气湍流影响增强。如图 5 所示,天顶角增大时,特别是天顶角大于  $30^\circ$  时,BER 迅速上升;同等天顶角条件下,CPolSK 调制的 BER 要比 OOK 调制的 BER 至少低 2 个数量级。另外需要注意的是,大天顶角前提下,如果天顶角继续增大,CPolSK 和 OOK 调制在 BER 上的差异迅速减小。

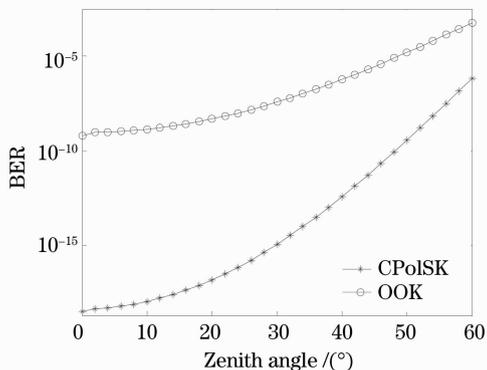


图 5 天顶角对链路 BER 的影响

Fig. 5 Impact for BER of the zenith angle

3) 当地面风速增大时,大气湍流也在增强,因而在湍流大气中传输的激光束受到大气湍流的影响也在增强,由此产生的 BER 必然会上升。通过图 6,可以看到地面风速增大时,BER 呈上升趋势。当地面风速比较大时,BER 上升程度随地面风速增加而加剧。同等地面风速条件下,CPolSK 调制的 BER 性能比 OOK 调制的 BER 性能好。

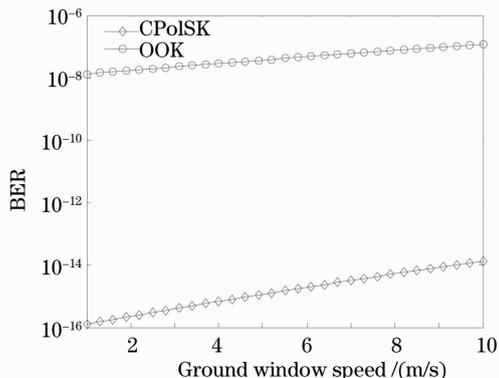


图 6 地面风速对链路 BER 的影响

Fig. 6 Impact for BER of the ground window speed

## 5 结 论

对星地激光通信上行链路的圆偏振移位键控调制的误码率性能进行了研究。在发射端分别使用左旋圆偏振光调制信息“0”,右旋圆偏振光调制信息“1”,在接收端通过检测斯托克斯参量的  $S_3$  解调出所传输的信息。通过对比 Rytov 方差分别为

0.082, 1.11 这两种弱、强湍流起伏下 CPlSK 与 OOK 调制的 BER, 发现前者 BER 性能优于后者。特别是 Rytov 方差为 0.082 时的弱湍流起伏下, 要达到  $10^{-7}$  的 BER, CPlSK 调制对信噪比的要求为 21.65 dB, 比 OOK 调制降低了 8.35 dB。此外, 还研究了近地面折射率结构常数、天顶角和地面风速这 3 个因素对 BER 的影响, 发现同等条件下 CPlSK 比 OOK 调制的 BER 至少低 2 个数量级。因此, CPlSK 在未来星地激光通信中有着广阔的发展前景。

### 参 考 文 献

- Ma Jing, Pan Feng, Tan Liying. Optimum ratio of beam divergence angle to pointing error for satellite-ground laser link [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(8): 1233~1238  
马晶, 潘锋, 谭立英. 星地激光链路中光束发散角与跟踪误差的最佳比值 [J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(8): 1233~1238
- Li Xiaofeng. The Principle and Technology of the Satellite-to-Ground Laser Communication Link [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. 1  
李晓峰. 星地激光通信链路原理与技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007. 1
- Hamid Hemmati. Deep Space Optical Communication [M]. Wang Ping, Sun Wei Transl. Beijing: Tsinghua University Press, 2009. 184  
赫马提. 深空光通信 [M]. 王平, 孙威译. 北京: 清华大学出版社, 2009. 184
- Wang Lutang, Fang Nian, Wang Ying *et al.*. Dual-channel PolSK optical transmissions using SOA-based all-optical polarization modulations [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 138~144  
王陆唐, 方捻, 王颖等. 基于 SOA 全光偏振调制的双信道 PolSK 光传输系统 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 138~144
- Zhang Chao, Wang Lutang, Fang Nian *et al.*. Simple structure dual-channel PolSK optical communication system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(4): 739~742  
张超, 王陆唐, 方捻等. 结构简单的双信道偏振移位键控光通信系统 [J]. *红外与激光工程*, 2011, **40**(4): 739~742
- Sugianto Trisno, Christopher C. Davis. Performance of free space optical communication systems using polarization shift keying modulation [C]. *SPIE*, 2006, **6304**: 63040V
- Chao Liu, Yunxu Sun, Yong Yao *et al.*. Analysis of direct detection and coherent detection in wireless optical communication with polarization shift keying [C]. Proc. Lasers & Electro Optics & The Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO/PACIFIC RIM), 2009: 1~2
- F. Fidler, J. Grosinger, W. R. Leeb. Sensitivity of balanced receivers for polarization shift keying in free-space optical communications [C]. Eur. Conf. Opt. Commun (ECOC), 2009: 1~2
- X. Zhao, Y. Yao, Y. Sun *et al.*. Circle polarization shift keying with direct detection for free-space optical communication [J]. *J. Opt. Commun. Netw.*, 2009, **1**(4): 307~312
- Xinhui Zhao, Yong Yao, Yunxu Sun *et al.*. Condition of keeping polarization property unchanged in the circle polarization shift keying system [J]. *J. Opt. Commun. Netw.*, 2010, **2**(8): 570~575
- X. Tang, Z. Ghassemlooy, S. Rajbhandari *et al.*. Free-space optical communication employing polarization shift keying coherent modulation in atmospheric turbulence channel [C]. Proc. Communication Systems Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP), 2010: 615~620
- Yusuf E. Yenice, Barry G. Evans. Adaptive beam-size control scheme for ground-to-satellite optical communications [J]. *Opt. Engng.*, 1999, **38**(11): 1889~1895
- Zhu Jun, Zhang Shulian. Circularly polarized light polarization multiplexing laser communication system [J]. *Laser & Infrared*, 2005, **35**(2): 78~79, 90  
朱钧, 张书练. 圆偏振光偏振复用激光通讯系统 [J]. *激光与红外*, 2005, **35**(2): 78~79, 90
- Larry C. Andrews, Ronald L. Phillips, Richard J. Sasiela *et al.*. Strehl ratio and scintillation theory for uplink Gaussian-beam waves: beam wander effects [J]. *Opt. Engng.*, 2006, **45**(7): 076001~076012
- Lü Naiguang. Fourier Optics [M]. 2nd Edition. Beijing: China Machine Press, 2006. 66  
吕乃光. 傅里叶光学 [M]. (第二版) 北京: 机械工业出版社, 2006. 66
- S. Benedetto, R. Gaudino, P. Poggiolini. Performance of coherent optical polarization shift keying modulation in the presence of phase noise [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 1995, **43**(234): 1603~1612
- Ichiro Seto, Tomoaki Ohtsuki, Hiroyuki Yshima *et al.*. Coherent optical polarization-shift-keying (POLSK) homodyne system using phase-diversity receivers [C]. Global Telecommunication Conference (GLOBECOM), 1991, **3**: 1601~1605
- J. Grosinger. Investigation of Polarization Modulation in Optical Free Space Communications through the Atmosphere [D]. Vienna: Technical University of Vienna, 2008. 45
- Jaime A. Anguita, Ivan B. Djordjevic, Mark A. Neifeld *et al.*. High-rate error-correction codes for the optical atmospheric channel [C]. *SPIE*, 2005, **5892**: 58920V
- Li Yongliang, Wang Jianyu, Xu Rui *et al.*. Effect of atmospheric turbulence on maximal zenith angle of satellite-to-ground laser communication links [J]. *J. Applied Sciences*, 2011, **29**(1): 22~26  
李永亮, 王建宇, 徐睿等. 大气湍流对星地激光下行链路最大天顶角的影响 [J]. *应用科学学报*, 2011, **29**(1): 22~26
- Larry C. Andrews, Ronald L. Phillips, Richard J. Sasiela *et al.*. PDF models for uplink to space in the presence of beam wander [C]. *SPIE*, 2007, **6551**: 655109
- Larry C. Andrews, Ronald L. Phillips. Laser Beam Propagation through Random Media [M]. 2nd edition. Bellingham: SPIE, 2005, 481; 248, 140
- Zhao Shanghong. Introduction to Laser Satellite Communications [M]. Xi'an: Xi Dian University Press, 2005. 95  
赵尚弘. 卫星光通信导论 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005. 95

栏目编辑: 谢婧