

自由空间光通信中相干圆偏振调制系统性能研究

王 怡^{1,2}, 李 源², 马 晶¹, 谭立英¹

(1. 哈尔滨工业大学 可调谐激光器国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 中国计量学院 信息工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 自由空间光通信(FSO)具有高带宽、不需要铺设光纤、部署迅速、低功率损耗等优点,得到了广泛的关注。在 Gamma-Gamma 大气湍流信道下,分别考虑弱、中、强三种大气湍流强度,结合相位噪声,研究了相干探测的圆偏振调制系统的性能,推导出了误码率和中断概率的闭合表达式。在不同的大气湍流强度和相位噪声的情况下,仿真分析了相干探测的圆偏振调制系统的性能,并与直接探测系统的误码性能进行比较,结果表明,采用相干探测系统的误码性能优于直接探测系统。因此,在圆偏振调制系统中,采用相干探测方式可减小大气湍流的影响,大大降低了误码率,提高了系统的通信性能。

关键词: 自由空间光通信; 圆偏振位移键控; 相干探测; 误码率

中图分类号: TN929.12 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0822004

Study on performance of circle polarization modulation system with coherent detection in free space optical communication

Wang Yi^{1,2}, Li Yuan², Ma Jing¹, Tan Liying¹

(1. National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. College of Information Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Free space optical communication (FSO) has the advantages of high bandwidth, no need to lay fiber, low power loss, so it has attracted attention. In Gamma-Gamma atmospheric turbulence channel model, weak, medium and strong three atmospheric turbulence intensity were respectively considered, and combined with the phase noise, the performance of circular polarization modulation system with coherent detection was studied, and the closed form expression of the bit error rate(BER) and outage probability were derived. In the different atmospheric turbulence intensity and phase noise, the performance of the circular polarization modulation system with the coherent detection was simulated and analyzed. Compared with the error performance of the direct detection system, the results show that the error performance of the coherent detection system is better than that of the direct detection system. Therefore, in the circular polarization modulation system, employing the coherent detection method can reduce the effect of the atmospheric turbulence and greatly reduce the BER, and improve the performance of the communication system.

Key words: free space optical communication(FSO); circular polarization shift keying(CPolSK); coherent detection; bit error rate(BER)

收稿日期:2015-12-05; 修订日期:2016-01-13

基金项目:海洋工程国家重点实验室(上海交通大学)(1213);中国博士后科学基金(2013M540290);国家自然科学基金(51404223)

作者简介:王怡(1980-),女,副教授,博士,主要从事自由空间激光通信和星地光通信方面的研究。Email:wcy16@cjlu.edu.cn

0 引言

自由空间光通信(FSO)是指利用激光作为载波在空间直接进行信息双向传输的通信技术,具有高带宽、不需要铺设光纤、部署迅速、低功率损耗等优点^[1]。由于光信号是在大气中进行传输,易受大气湍流的影响,大气折射率会随着大气中温度、压力等因素的改变而改变,引起光强闪烁,从而产生光强起伏和相位噪声,进而降低了系统的接收性能。自由空间光通信中常见的调制方式有幅度键控(ASK)、频率键控(FSK)、相位键控(PSK)等,因为光的偏振态受大气湍流的影响较小,从而人们提出了采用偏振调制方式。线偏振位移键控是偏振调制技术的一种,它利用光的偏振态来承载信息,对光的偏振态进行编码调制。线偏振调制需要收发端的偏振坐标系对齐,这对搭载于运动平台上的自由空间光系统而言,是很难保证的。进而,赵新辉等提出了圆偏振位移键控(CPolSK)调制,利用光的左、右旋两种圆偏振态进行组合编码调制,由于圆偏振态旋转对称特性,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^[2]。

圆偏振调制系统的探测方式有两种,直接探测方式和相干探测方式。直接探测方式是用探测器直接探测光信号,系统结构简单,但是信噪比较低,噪声对系统性能的影响较大^[3]。相干探测方式是将接收的光信号与本振信号进行相干,相干后的信号强度变大,能够提高接收灵敏度。与直接探测相比,相干探测具有探测能力强、信噪比高、滤波性好、可靠性高等优点^[4-5]。

为了研究大气湍流对圆偏振调制系统性能造成的影响,提出了对数正分布、负指数分布、K-分布、Gamma-Gamma 分布等大气湍流信道模型^[6]。目前只有英国的 Xuan Tang 等人研究了偏振调制的相干探测系统,2010 年研究了在 Gamma-Gamma 大气信道中考虑由大气湍流引起的光强闪烁的线偏振调制系统的性能^[4],2011 年又研究了在弱湍流下的对数正态分布信道中考虑由大气湍流引起的光强闪烁的圆偏振调制系统的性能^[5]。文中采用 Gamma-Gamma 大气信道模型,不仅考虑了由大气湍流引起的光强闪烁,而且较全面地考虑了弱、中、强各种湍流条件下由大气湍流所引起的相位噪声,研究了相干探测

的圆偏振调制系统的性能,推导了系统误码率的闭合表达式,仿真分析了相干探测的圆偏振调制系统的误码性能,并与直接探测的圆偏振调制系统的误码性能进行比较,结果表明,采用相干探测方式的圆偏振调制系统的误码性能优于直接探测方式。

1 系统模型

1.1 大气信道模型

圆偏振调制系统是以偏振光作为信息传输的载体,大气作为信息传递的信道,光偏振态的改变会直接影响到系统的通信性能。因此,需要对引起偏振特性改变的因素进行分析,尤其是圆偏振态在大气中传输时所受到的影响。

在光通信传输过程中,大气湍流对通信系统性能的影响最为显著。光波在大气湍流中传输时由于折射率的改变使其强度会随之改变,而弱中强湍流下的光强起伏概率分布模型均符合 Gamma-Gamma 分布,其概率密度函数为:

$$f(I) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I^{(\alpha+\beta-2)/2} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta I}), I > 0 \quad (1)$$

式中: $\Gamma(\cdot)$ 为 gamma 函数; $K_\nu(\cdot)$ 为第二类修正贝塞尔函数; α 和 β 分别代表大尺度和小尺度湍流的光强起伏。假设光波是平面波, α 和 β 表示为:

$$\alpha = \{\exp[0.49\delta_L^2 / (1 + 1.11\delta_L^{12/5})^{7/6}] - 1\}^{-1} \quad (2)$$

$$\beta = \{\exp[0.51\delta_L^2 / (1 + 0.69\delta_L^{12/5})^{5/6}] - 1\}^{-1} \quad (3)$$

式中: $\delta_L^2 = 1.23C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$ 为 Rytov 方差; C_n^2 为大气折射率常数; $k = 2\pi/\lambda$ 为波数; L 为传输距离。根据 α 和 β ,闪烁测量指数(SI)定义为^[2]:

$$SI = \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} + \frac{1}{\alpha\beta} \quad (4)$$

由于湍流的随机,大气湍流产生的相位噪声也是随机的,而相位噪声的概率密度函数可以被描述为均值为 0 的高斯分布,而且激光器线宽引起的相位噪声也满足高斯分布,于是相位噪声 φ 的分布可以表示为:

$$f\varphi(\varphi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta} e^{-\varphi^2/2\delta^2} \quad (5)$$

式中: δ^2 为相位噪声的方差。

1.2 系统模型

基于 Gamma-Gamma 湍流信道、采用相干探测

的圆偏振调制系统的示意图如图 1 所示,发射端由发射激光、偏振控制器、偏振分束器(PBS)、马赫-曾德尔干涉仪、偏振合束器(PBC)和 1/4 波片(QWP)组成。经天线发射出去的光已经转换成了左、右旋圆偏振光。把光信号的输出光场定义为:

$$\vec{E}_s(t) = \sqrt{\frac{p_s}{2}} e^{j[\omega_s t + \varphi_s(t)]} \{ e^{j\Delta\phi/2} \cdot \hat{x} + e^{-j\Delta\phi/2} \cdot \hat{y} \} \quad (6)$$

式中: p_s, w_s, φ_s 分别为传输光载波的功率、角频率和相位噪声,通过改变 $\Delta\phi = \pi/2$ 和 $-\pi/2$, 经过一个 1/4 波片,调整 QWP 的快、慢轴与两路线偏振光的传播方向的夹角为 $\pi/4$ ^[7],从而使经过 1/4 波片的相位延迟为 $\pi/2$ 或 $-\pi/2$ 产生右旋圆、左旋圆^[8]。

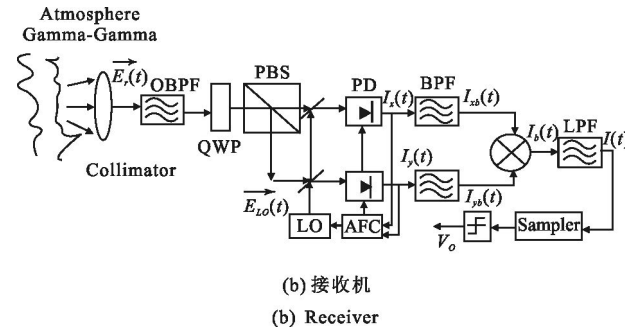
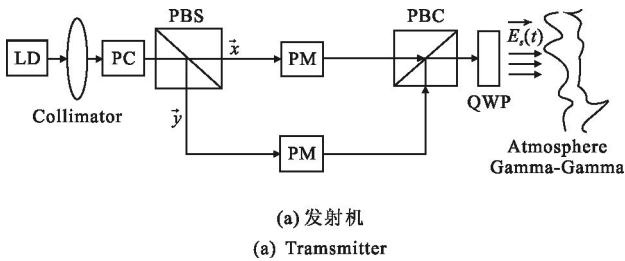


图 1 相干检测的 CPolSK 通信系统框图

Fig.1 Block diagram of the CPolSK system with coherent detection

在接收端,接收光场 $\vec{E}_r(t)$ 和表示为:

$$\vec{E}_r(t) = s_r(t) \sqrt{\frac{p_s}{2}} e^{j[\omega_s t + \varphi_s(t)]} \{ e^{j\Delta\phi/2} \cdot \hat{x} + e^{-j\Delta\phi/2} \cdot \hat{y} \} \quad (7)$$

式中: $s_r(t)$ 为光强信号受大气湍流影响而产生的闪烁量,不失一般性, $s_r^2 = I(t)$; $\varphi_r(t)$ 是光载波在大气湍流中传输的相位噪声,满足均值为 0 的高斯分布。接收到的光信号通过光学带通滤波器能够消除背景噪声而不引入任何失真。然后通过 1/4 波片使圆偏振光转化为线偏振光,又通过偏振分束器分成 \hat{x} 和 \hat{y} 方向光束,与本振信号混合成两束光 $\vec{E}_x(t)$ 和 $\vec{E}_y(t)$, 其光场分别为:

$$\vec{E}_x(t) = \sqrt{p_{lo}}/2 \cdot e^{j[\omega_{lo} t + \varphi_{lo}(t)]} \{ \hat{x} + \hat{y} \} \quad (8)$$

$$\vec{E}_x(t) = \{ S_x \cdot \sqrt{\frac{p_s}{2}} \cdot e^{j(\omega_s t + \Delta\phi/2 + \varphi_s(t))} - \sqrt{p_{lo}}/2 \cdot e^{j[\omega_{lo} t + \varphi_{lo}(t)]} \} \hat{x}$$

$$\vec{E}_y(t) = \{ S_x \cdot \sqrt{\frac{p_s}{2}} \cdot e^{j(\omega_s t - \Delta\phi/2 + \varphi_s(t))} + \sqrt{p_{lo}}/2 \cdot e^{j[\omega_{lo} t + \varphi_{lo}(t)]} \} \hat{y} \quad (9)$$

式中: $p_{lo}, w_{lo}, \varphi_{lo}$ 分别是本振信号的功率、角频率和相位噪声。

而后两方向上的光束分量分别通过光电探测器,使光信号转化为电信号,又通过理想的带通滤波器,得到 $I_{xb}(t)$ 和 $I_{yb}(t)$ 。通过相乘器和低通滤波器恢复出调制信号,得到信号 $I_b(t)$ 。

$$I_{xb}(t) = \sqrt{\frac{R^2 I_p p_{lo}}{2}} \cos[\omega_{IF} t + \varphi_{IF} + \Delta\phi/2 + \pi/4] + n_x(t)$$

$$I_{yb}(t) = \sqrt{\frac{R^2 I_p p_{lo}}{2}} \cos[\omega_{IF} t + \varphi_{IF}(t) - \Delta\phi/2 - \pi/4] + n_y \quad (10)$$

式中: R 为探测器的灵敏度; $\varphi_{IF} = \omega_0 - \omega_{lo}$ 和 $\varphi_{IF} = \varphi_r(t) - \varphi_{lo}(t)$ 分别为中间信号的频率和相位噪声。 $n_x(t)$ 和 $n_y(t)$ 相互正交独立且均满足 $(0, \delta_n^2)$ 的静态高斯过程。该噪声可表示为:

$$n(t) = n^I(t) \cos[\omega_{IF} t + \varphi_{IF}(t)] - n^O(t) \sin[\omega_{IF} t + \varphi_{IF}(t)] \quad (11)$$

$$I_b(t) = \frac{R^2 I_p p_{lo}}{4} \cos(\Delta\phi + \pi/2) + \sqrt{\frac{R^2 I_p p_{lo}}{8}} \times \{ [n_x^I(t) + n_y^I(t)] \cos(\Delta\phi/2 + \pi/4) + [n_y^O(t) - n_x^O(t)] \sin(\Delta\phi/2 + \pi/4) \} \quad (12)$$

式中: n^I 和 n^O 分别为噪声的同步分量和正交分量。于是,由 $I_b(t)$ 即可恢复出传输信号,即, $\cos(\Delta\phi/2 + \pi/4) = 1$ 时输出左旋圆偏振信号代表“1”信号; $\sin(\Delta\phi/2 + \pi/4) = -1$ 时输出右旋圆偏振信号代表“0”信号。这就实现了二进制数据的传输,完成了相干探测的圆偏振调制系统的调制和解调过程。

2 性能分析

在大气扰动存在的情况下,信号光强闪烁会产生强度起伏和相位噪声,为了计算简单,定义平均电信噪比 $-\gamma = R^2 p_r p_{lo} / (2N_0 B)$, 因此,相干探测的圆偏振调制系统的平均误码率的表达式为^[9]:

$$P_{e, \text{cpolks}} = \int_0^\infty f(I) P_{ec}(I) dI \quad (13)$$

式中: $P_{ec}(I) = \frac{1}{2} \text{erfc} \sqrt{\frac{I\gamma}{2\delta^2}}$ 表示光信号在高斯信道中传输的即时误码率^[4], $\text{erfc}(x)$ 是互补误差函数。利用

Merger-G 函数进一步简化, $\text{erfc}(\sqrt{x}) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \times G_{1,2}^{2,0} [x]_{0,2}^1$

和 $K_\nu(x) = \frac{1}{2} \times G_{1,2}^{2,0} \left[\frac{x^2}{4} \right]_{\nu/2, -\nu/2}^1$, 平均误码率的闭合表达式为:

$$P_{e, \text{cpolsk}} = \frac{2^{\alpha+\beta-3}}{\pi^{3/2} \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} \times G_{5,2}^{2,4} \left[\frac{8\gamma}{(\alpha\beta)^2 \delta^2} \middle| \frac{1-\alpha}{2}, \frac{2-\alpha}{2}, \frac{1-\beta}{2}, \frac{2-\beta}{2}, 1 \right]_{0, \frac{1}{2}} \quad (14)$$

中断概率是衡量通信性能的一个重要指标, 是系统误码率大于某一目标误码率的概率, 即系统信噪比 γ 低于某一目标信噪比门限值时的概率^[10]。大气信噪比为 $\gamma = \frac{R^2 P_r P_{l0} \delta^2}{2N_0 B}$, 而信噪比 μ_0 的大小会影响系统的中断概率, 中断概率的表达式为:

$$P_{\text{out}} = P_r(\gamma \leq \mu_0) = P_r \left(\frac{R^2 P_r P_{l0} \delta^2}{2N_0 B} \leq \mu_0 \right) = P_r \left(I \leq \frac{\sqrt{2\mu_0 N_0 B} / \delta}{R \sqrt{P_r P_{l0}}} \right) = \int_0^{\frac{\sqrt{2\mu_0 N_0 B} / \delta}{R \sqrt{P_r P_{l0}}}} f(I) dI \quad (15)$$

令 $v = \sqrt{\mu_0 N_0 B} / R \sqrt{P_r P_{l0}}$ 为归一化门限, 利用 Merger-G 函数进一步简化:

$$P_{\text{out}} = \frac{(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} \times \left(\frac{\sqrt{2} v}{\delta} \right) \times G_{1,3}^{2,1} \left[\frac{\sqrt{2} \alpha \beta v}{\delta} \middle| \frac{2-\alpha+\beta}{2}, \frac{\alpha-\beta}{2}, \frac{-\alpha-\beta}{2} \right] \quad (16)$$

3 仿真结果

根据误码率的闭合表达式来仿真验证不同大气湍流强度和相位误差对采用相干探测方式的圆偏振调制系统性能的影响。文中选取波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, 弱中强湍流强度下的光强起伏参数为 $\{\alpha = 6.05, \beta = 4.47, \text{SI} = 0.43\}$, $\{\alpha = 4.19, \beta = 2.26, \text{SI} = 0.79\}$, $\{\alpha = 4.34, \beta = 1.31, \text{SI} = 1.17\}$ 。此外, 不同相位噪声对系统性能的影响均不相同, 相位起伏参数分别取为 0.08π 、 0.125π 、 0.25π 。传输数据速率为 16 Gb/s。

图 2 为在不同的湍流强度下, 结合相位噪声, 采用两种探测方式的圆偏振调制系统的误码率与信噪比的关系。由图 2 可以看出, 系统的误码率随着湍流强度的增强而增加, 但是总体来说, 相干探测的误码率比直接探测的要低。特别地, 随着相位噪声的增大, 在同一湍流下, 相同误码率对应的信噪比也

会随之增大。在强湍流下, 随着相位噪声的增强, 采用相干探测对 BER 性能的影响较小。在相同的湍流 ($\text{SI} = 0.43$) 和相位噪声 ($\delta^2 = 0.08\pi$) 的条件下, 系统要达到 10^{-8} 的误码率, 相干探测对信噪比的要求是 42 dB, 而直接探测所需要的信噪比为 48 dB, 比相干探测方式高了 6 dB。结果表明, 在相同情况下, 采用相干探测方式可减小大气湍流的影响, 大大降低了误码率, 提高了系统的通信性能。

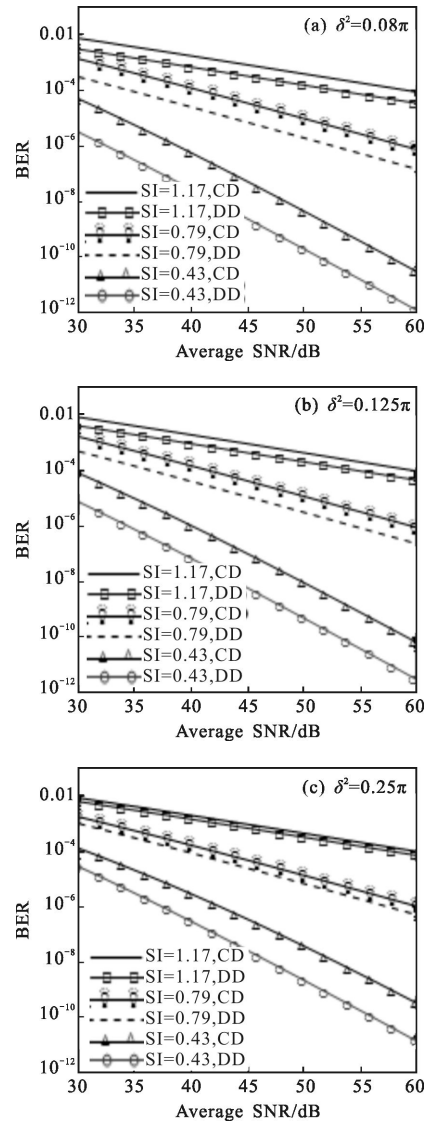


图 2 16 Gb/s 传输速率下不同湍流强度和相位噪声时, 分别采用相干探测和直接探测的圆偏振调制系统的信噪比与误码率的关系

Fig.2 BER performance of circle polarization modulation system with coherent detection and direct detection as a function of average SNR for different turbulence intensity and phase noise at the transmission rate of 16 Gb/s

图 3 为在不同的湍流强度和相位噪声下,采用相干探测方式的圆偏振调制系统归一化门限与中断概率的关系。由图 3 可知,考虑相位噪声,结合图(a)、(b)、(c)各种湍流情况,降低归一化门限值可以减小中断概率,中断概率会随着大气湍流强度的增强而增大。例如,相位噪声同为 $\delta^2=0.125\pi$ 时,当归

别地,分别在弱、中、强湍流情况下,当归一化门限值分别大于 6 dB、7 dB、9 dB 时,系统中断发生的概率几乎为 1。因此,进一步研究中断概率十分必要。

4 结 论

文中研究圆偏振调制系统的 BER 性能,通过与直接探测系统的比较,验证了采用相干探测方式能够有效地抑制大气湍流的影响,大大降低了误码率,提高了系统的通信性能。在相同的湍流(SI=0.43)和相位噪声($\delta^2=0.08\pi$)的条件下,系统要达到 10^{-8} 的误码率,相干探测对信噪比的要求是 42 dB,而直接探测所需要的信噪比为 48 dB,比相干探测方式高了 6 dB,有效地提高了系统的误码性能。而且,在弱、中、强湍流下,相位噪声对相干探测的圆偏振调制系统的误码率的影响较小。总体而言,采用圆偏振调制的相干探测系统的误码性能比要优于直接探测系统。此外,从通信中断的角度分析了归一化门限值和偏振控制误差对系统中断概率性能的影响,当归一化门限值在弱、中、强湍流情况下分别大于6 dB、7 dB、9 dB 时,系统中断发生的概率几乎为 1。通过系统设计优化归一化门限值有助于降低系统中断的概率,增加系统的可靠性。

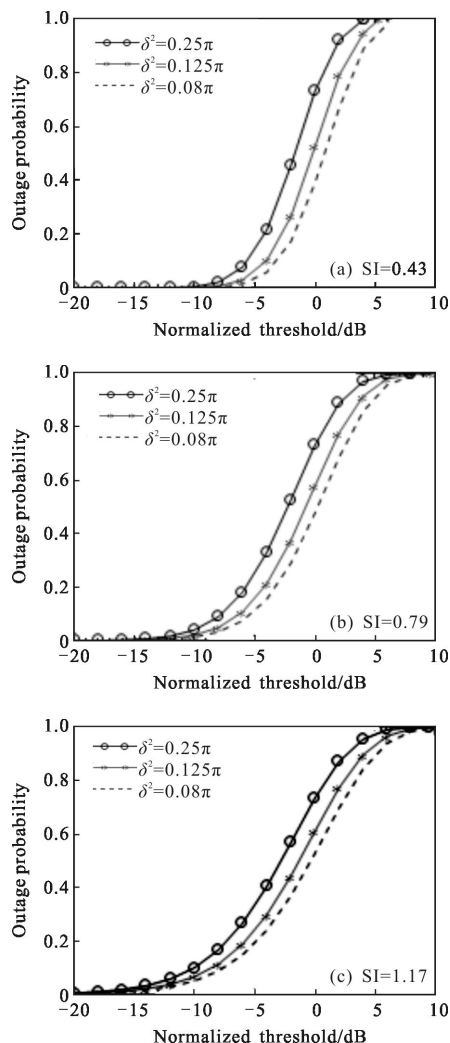


图 3 16 Gb/s 传输速率下不同湍流强度和相位噪声时,采用相干探测的圆偏振调制系统的归一化门限与中断概率的关系

Fig.3 Outage probability of circle polarization modulation system with coherent detection as a function of normalized threshold for different turbulence intensity and phase noise at the transmission rate of 16 Gb/s

一化门限由-20 dB 上升到-5 dB 时,对应的弱湍流情况中断概率上升了 0.025,中湍流情况和强湍流情况下中断概率较快地上升了 0.16 和 0.23。而且不难看出,相位噪声的增大也会导致中断概率的增大。特

参考文献:

- [1] Gappmair W, Flohberger M. Error performance of coded FSO links in turbulent atmosphere modeled by Gamma-Gamma distribution[J]. *IEEE Trans Wireless Communication*, 2009, 8(5): 2209-2213.
- [2] 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. (in Chinese)
赵新辉, 姚勇, 孙允旭, 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.
- [3] Zhao Xinhui, Yao Yong, Sun Yunxu. Circle polarization shift keying with direct detection for free space optical communication [J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2009, 1(4): 307-312.
- [4] Tang X, Ghassemlooy Z, Rajbhandari S, et al. Free-space optical communication employing polarization shift keying coherent modulation in atmospheric turbulence channel [C]// CSNDS, 2010: 615-621.

- [5] Tang X, Ghassemlooy Z, Rajbhandari S, et al. Differential circular polarization shift keying with heterodyne detection for free space optical links with turbulence channel [C]// Networks and Optical Communications, 2011, OCG-4: 149-152.
- [6] Han Liqiang, Wang Qi, Shida Katusunori. Performance of free space optical communication over Gamma-Gamma atmosphere turbulence [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 1318-1322. (in Chinese)
韩立强, 王祁, 信太克归. Gamma-gamma 大气湍流下自由空间光通信的性能 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(7): 1318-1322.
- [7] Yang Peng, Ai Hua. Design of laser communication system with circular polarization modulation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(9): 0916002-1-0916002-7. (in Chinese)
杨鹏, 艾华. 圆偏振调制激光通信系统设计 [J]. 中国激光, 2012, 39(9): 0916002-1-0916002-7.
- [8] 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 Journal of Lasers*, 2011, 38 (11): 1105001. (in Chinese)
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): 1105001.
- [9] Tang Xuan, Xu Zhengyuan. Coherent polarization modulation transmission through MIMO atmospheric optical turbulence channel [J]. *IEEE Journals & Magazines*, 2013, 31 (20): 3221-3228.
- [10] Han Liqiang, Wang Qi, Shida Katsunori. Outage probability of free space optical communication over atmospheric turbulence [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(4): 660-663. (in Chinese)
韩立强, 王祁, 信太克归. 大气湍流下自由空间光通信中断概率分析 [J]. 红外与激光工程, 2010, 39(4): 660-663.