

大气湍流对激光通信系统性能的影响研究

陈 牧,柯熙政

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 大气湍流引起的光强起伏是影响激光通信系统接收信噪比和误码率的主要因素。文中旨在研究大气湍流状态对无线通信系统性能的影响。首先利用对数正态分布和 Gamma-Gamma 分布分别对信道进行建模,分析表明前者不适用于中强湍流下的光强起伏行为,而后者具有更广的应用范围。在此基础上,研究相位噪声对系统接收信噪比和误码率的影响。文中最后在不同信道条件下进行仿真实验,观察光强起伏方差引起的星座图变化和误码率恶化情况。实验结果表明,当光强起伏方差逐渐增大时,星座图相位角度和误码率均随之变大。文中的分析与讨论对提高激光通信质量具有一定的参考价值。

关键词: 激光通信; 大气湍流; 光强起伏; 相位噪声; 误码率

中图分类号: TN929.12 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0822009

Effect of atmospheric turbulence on the performance of laser communication system

Chen Mu, Ke Xizheng

(School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The irradiance fluctuation induced by atmospheric turbulence is a major factor to degrade the Signal-to-Noise Ratio (SNR) and bit error rate (BER) of laser communication systems. This paper aims to explore the effect of atmospheric turbulence state on the performance of wireless communication systems. Firstly, the channel was modeled by the logarithmic normal distribution and Gamma-Gamma distribution, respectively. Analysis showed lights on that the former model was not fit for irradiance fluctuation behavior in moderate or strong turbulent conditions, while the latter had wider applications. On this basis, the SNR and BER resulting from the phase noise introduced by irradiance were studied. Simulations were conducted for different channel models, which displayed the change of planisphere and degradation of BER along with irradiance variance. Results illustrates that the phase angle of planisphere and BER increase when the irradiance variance becomes larger. Up to a point, these discussions are valuable for real optical communication applications.

Key words: laser communication; atmospheric turbulence; irradiance fluctuation; phase noise; bit error rate

收稿日期:2015-12-05; 修订日期:2016-01-08

基金项目:国家自然科学基金(60977054);陕西省“13115”科技统筹计划(2011KTCQ01-31);

陕西省教育厅产业化培育基金(2010JC17);

作者简介:陈牧(1989-),男,博士生,主要从事相干光通信中噪声模型研究。Email:chenmuaj@163.com

导师简介:柯熙政(1962-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事无线光通信方面的研究。Email:xzke@263.net

0 引言

无线激光通信利用激光束作为信息载体,以大气为信道进行信息传递,是目前新兴的通信手段。然而,受到大气湍流效应的影响,传输过程中的激光强度、频率和相位通常在空间与时间维度随机起伏。光束界面将出现光束弯曲、漂移与扩展,强度起伏及相干性退化等现象。其中,光束漂移主要影响自由空间光(Free Space Optical, FSO)系统的对准,光束扩展会影响接收光功率,强度起伏则是影响接收信噪比、误码率的主要因素。研究大气湍流状态对激光通信可靠性和稳定性的影响能够为工程应用提供理论基础,具有重要的参考意义^[1-2]。

近年来,围绕大气湍流对光通信系统误码率展开了众多研究。参考文献[3-4]指出,当激光信号通过大气信道时,信号本身在传输中会受到大气湍流等因素的影响,从而对整个通信系统产生较大的误码率。不同大小的湍流尺度会引起不同的光强闪烁和相位噪声,由此引入不同程度的误码率^[5]。为了量化两者之间的关系,参考文献[6]将闪烁指数(Rytov 方差)作为衡量信道湍流强度的指标,并给出了闪烁指数与开关键控(On-Off Keying, OOK)系统误码率的关系。由于信道的随机性,研究者对大气信道进行统计建模,利用统计量对信道参数进行更直观地表达。参考文献[7]采用对数正态信道衰落模型,推导了混合噪声模型的二进制振幅键控调制方式下的误码率计算方式。参考文献[8]基于高斯模型讨论了各类噪声的影响,但未考虑不同湍流情况。参考文献[9]说明了大气闪烁变化情况以及大气对激光传输的影响,利用实验数据讨论了光强起伏的分布情况。

为了更进一步地探究不同湍流情况的信道参数,文中主要研究在不同信道分布的光强起伏对光通信系统误码率的影响。其中分别讨论了对数正态分布和 Gamma-Gamma 分布模型下的光强起伏方差,理论推导光强起伏引入的相位噪声对误码率的影响。并通过数值仿真说明了星座图相位角度和误

码率的变化情况,其结果与实际情况基本一致。

1 大气湍流对激光通信系统的影响

大气湍流是由于大气温度和大气压强的微小变化引起的大气折射率在时间上和空间上随机变化。由此造成的光信号幅度和相位变化,将严重干扰接收端信号,影响无线光通信系统的正常性能表现。

目前,由 Rytov 提出的对数正态分布模型被普遍应用于描述大气弱起伏湍流效应模型^[9]。根据 Rytov 近似,大气湍流引起的对数振幅起伏 χ 可以表示多个湍流漩涡独立贡献的叠加,由中心极限定理可知光强闪烁满足对数正态分布。对数振幅起伏 χ 的概率密度函数可表示为:

$$P(\chi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_\chi} \exp\left\{-\frac{[\chi - E(\chi)]^2}{2\sigma_\chi^2}\right\} \quad (1)$$

式中: $P(\chi)$ 为 χ 的概率密度; $E(\chi)$ 为 χ 的均值; σ_χ^2 为对数振幅起伏方差。

已知大气湍流中的光波振幅为 A , 则光波的光强可写为 $I=A^2$ 。自由空间(无湍流)中的光强 $I_0=A_0^2$, 其中 A_0 表示没有湍流情况下接收端的光波振幅。则对数光强为:

$$l = \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = \ln\left(\frac{A^2}{A_0^2}\right) = 2\chi \quad (2)$$

因此, $I = I_0 \exp(2\chi)$ 。经过概率变换可得:

$$P(I) = P\left(\chi = \frac{1}{2} \ln \frac{I}{I_0}\right) \left| \frac{d\chi}{dI} \right| \quad (3)$$

因此,光强 I 的概率密度函数表示为:

$$P(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_I} \exp\left\{-\frac{[\ln I/I_0 - E(I)]^2}{2\sigma_I^2}\right\}, (I \geq 0) \quad (4)$$

式中:对数光强起伏方差 $\sigma_I^2 = 4\sigma_\chi^2$, $E(I) = 2E(\chi)$ 。

一般地,大气湍流引起的光强起伏强弱可用闪烁指数(光强起伏的归一化方差) σ_I^2 来表征, σ_I^2 与 σ_I^2 的关系如下:

$$\sigma_I^2 = \exp(\sigma_I^2) - 1 \quad (5)$$

对数光强方差 σ_I^2 的表达式可具体展开为:

$$\sigma_I^2 = \exp\left[\frac{0.49\sigma_R^2}{(1+0.18L^2+0.56\sigma_R^{12/5})^{7/6}} + \frac{0.51\sigma_R^2}{(1+0.9L^2+0.62\sigma_R^{12/5})^{5/6}}\right] - 1 \quad (6)$$

式中： $L = \sqrt{kD^2/4s}$ ， D 为接收孔径的直径； σ_R^2 为 Rytov 方差。

当 $\sigma_i^2 \ll 1$ 时， $\sigma_i^2 \approx \sigma_i^2$ 。 σ_i^2 越大，光强闪烁越严重，一般 $\sigma_i^2 < 0.2:0.5$ 。Rytov 提出的对数正态分布模型仅适用于大气湍流较弱的情况，在弱湍流情况下，闪烁指数 σ_i^2 会随着 σ_i^2 的增大而增大。一旦 σ_i^2 大于临界值，湍流强度超过弱湍流强度时，对数正态分布模型的统计值与实验值相差很大^[10]。

对数正态分布光强起伏概率密度曲线在不同的 σ_i^2 下分布如图 1 所示，其中平均光强为 1。由图 1 可以看出， σ_i^2 越大，对数正态分布光强起伏曲线偏离光强均值越远，且拖尾更长，因此对数正态分布模型不适合描述中强湍流下的光强起伏行为^[12]。

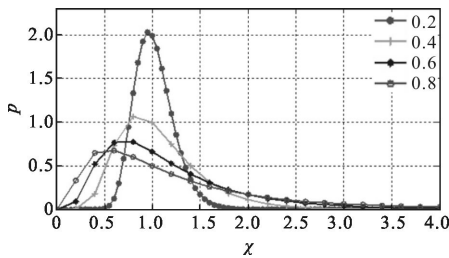


图 1 光强对数正态分布概率密度函数曲线

Fig.1 Probability density function curve of lognormal distribution intensity fluctuation

相对于对数正态分布模型，Gamma-Gamma 光强起伏概率分布是一个双参数模型，其参数与大气湍流物理特性紧密相关。Gamma-Gamma 光强起伏概率分布能相对准确的描述中强起伏区域的光强起伏特性^[13]，因而该分布得到了广泛的应用。

在服从 Gamma-Gamma 光强起伏分布的信道模型中，接收端的光强用一个乘积来表示： $I=xy$ 。式中， x 表示大尺度散射系数， y 表示小尺度散射系数， x 和 y 分别服从 Gamma 分布。假设 x 和 y 均为独立随机过程，则接收光强的二阶矩为：

$$E(I^2) = E(x^2)E(y^2) = (1 + \sigma_x^2)(1 + \sigma_y^2) \quad (7)$$

式中： σ_x^2 和 σ_y^2 分别是 x 和 y 的方差。为方便计算假设 Gamma-Gamma 分布取光强均值 $E(I)=1$ 。由公式(5)可得对应的闪烁指数为：

$$\sigma_I^2 = (1 + \sigma_x^2)(1 + \sigma_y^2) - 1 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_x^2 \sigma_y^2 \quad (8)$$

x 和 y 的分布形式分别如下：

$$P_x(x) = \frac{\alpha(\alpha x)^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} \exp(-\alpha x), (x > 0, \alpha > 0) \quad (9)$$

$$P_y(y) = \frac{\beta(\beta y)^{\beta-1}}{\Gamma(\beta)} \exp(-\beta y), (y > 0, \beta > 0) \quad (10)$$

式中： $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数。由 $y=I/x$ ，可以得出条件分布函数为：

$$P_{I/x}(I/x) = \frac{\beta(\beta I/x)^{\beta-1}}{x\Gamma(\beta)} \exp(-\beta I/x) \quad (11)$$

根据全概率公式得到 Gamma 模型概率分布函数

$$P(I) = \int_0^{+\infty} P_y(I/x)P_x(x)dx = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I^{(\alpha+\beta)/2-1} K_{\alpha-\beta}[2(\alpha\beta I)^{1/2}], (I > 0) \quad (12)$$

式中： $K_{\alpha-\beta}(\cdot)$ 为阶数 $(\alpha-\beta)$ 的第二类修正贝塞尔函数。因此，可以定义闪烁系数 α 和 β 如下：

$$\alpha = \frac{1}{\sigma_x^2}, \beta = \frac{1}{\sigma_y^2} \quad (13)$$

由于 $E(I)=1$ ，所以得到总的闪烁指数为：

$$\sigma_I^2 = \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} + \frac{1}{\alpha\beta} \quad (14)$$

式中： α 和 β 与波束模型有关，对于平面波而言，

$$\alpha = \left\{ \exp \left[\frac{0.49\sigma_R^2}{(1+1.11\sigma_R^{12/5})^{7/6}} \right] - 1 \right\}^{-1} \quad (15)$$

$$\beta = \left\{ \exp \left[\frac{0.51\sigma_R^2}{(1+0.69\sigma_R^{12/5})^{5/6}} \right] - 1 \right\}^{-1} \quad (16)$$

式中： σ_R^2 为激光闪烁方差，它的大小决定了大气湍流的强弱，取值越大，湍流强度越强。

与对数正态分布模型相比，Gamma-Gamma 光强起伏概率分布使用范围更广，能较为准确的描述弱、中及强起伏区的光强起伏统计特征，而且在概率分布的尾端部分与数值模型及实验结果更为吻合，Gamma-Gamma 分布概率密度函数如图 2 所示^[11]。

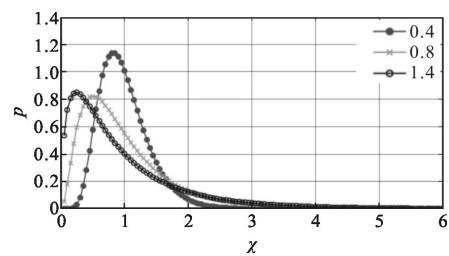


图 2 光强 Gamma-Gamma 分布概率密度函数图

Fig.2 Probability density function curve of intensity Gamma-Gamma distribution

激光束在大气信道中传输过程中, 激光束在大气湍流传输波动方程为^[14]:

$$u(\bar{r})=A(\bar{r}) \cdot \exp[i\phi(\bar{r})]=u_0(\bar{r})\exp(\phi_1) \quad (17)$$

式中: $u_0(\bar{r})$ 为不考虑湍流效应时的光波的振幅; ϕ_1 为微扰因子。

$$u_0(\bar{r})=A_0(\bar{r}) \cdot \exp[i\phi_0(\bar{r})] \quad (18)$$

公式(17)指数部分微扰因子的表达式为:

$$\phi_1=\ln\left[\frac{A(\bar{r})}{A_0(\bar{r})}\right]+i[\phi(\bar{r})-\phi_0(\bar{r})]=x+i\zeta \quad (19)$$

式中: x 和 ζ 为大气湍流引起光波对数振幅和相位起伏, 光波振幅和相位的起伏影响激光通信系统的信噪比和误码率。

假设在湍流强度均匀的情况下, 平面波的对数强度起伏可以表示为^[14]:

$$\sigma_{\ln R}^2=1.23C_n^2 K^{7/6} \bar{L}^{11/6} \quad (20)$$

式中: 波数 $k=2\pi/\lambda$; \bar{L} 为激光的传输距离。

对于通信系统而言, 信噪比和误码率通常被用来评价系统的通信质量。误码率与平均接收功率、闪烁强度和接收机噪声有关。文中仅考虑大气湍流引起的相位噪声, 忽略其他噪声来源, 对数振幅的表达式为^[15]:

$$x=\ln\left[\frac{A(\bar{r})}{A_0(\bar{r})}\right]=\ln\left[\frac{A(\bar{r})+A_i(\bar{r})}{A_0(\bar{r})}\right]=\ln(1+\varepsilon) \quad (21)$$

式中: $A_i(\bar{r})$ 为噪声振幅; $\varepsilon=A_i(\bar{r})/A_0(\bar{r})$ 为噪声与信号的振幅比。

在弱湍流(折射率结构常数 $C_n^2 \leq 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$)时, ε 为小量, $x=\ln(1+\varepsilon) \approx \varepsilon$ 。对平面波 $\varepsilon^2=x^2=0.31C_n^2 k^{7/6} \bar{L}^{11/6}$, 系统的信噪比为:

$$\text{SNR}=\frac{I_0}{I_i}=\frac{A_0^2(\bar{r})}{A_i^2(\bar{r})}=\frac{1}{\varepsilon^2}=(0.31C_n^2 k^{7/6} \bar{L}^{11/6})^{-1} \quad (22)$$

式中: I_0 为信号的强度; I_i 为噪声强度的总平均。

发射端输出的激光信号经过光学系准直后, 可当平面波处理。光接收机接收激光信号时, 系统误码率为:

$$\text{BER}=\frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \approx \frac{\exp(-Q/2)}{Q\sqrt{2\pi}} \quad (23)$$

式中: erfc 为余误差函数。 Q 定义为:

$$Q=\frac{A_1-A_0}{\sigma_1+\sigma_0} \quad (24)$$

式中: A_1, σ_1 分别为接收机接收到的比特是“1”时的信号与噪声; A_0, σ_0 分别为接收机接收到的比特是“0”时的信号和噪声。对自由空间光通信系统, $A_0=0, A_1=A_0(\bar{r}), \sigma_1+\sigma_0=A_i(\bar{r})$, 由此信噪比的表达式为:

$$\text{SNR}=\frac{A_1^2}{\sigma_1+\sigma_0} = Q^2 \quad (25)$$

因此, 信噪比和误码率存在一定的关系, 可表示为:

$$\text{BER}=\frac{\exp(-\text{SNR}/2)}{\sqrt{2\pi\text{SNR}}} \quad (26)$$

当折射率结构常数 $C_n^2 \geq 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 时, 大气湍流不再为弱湍流, ε 不再为小量, $x=\ln(1+\varepsilon) \Rightarrow \varepsilon=e^x-1$, 利用泰勒级数对 $f(x)=e^x-1$ 进行展开, 并作适当简化处理可得到信噪比与对数振幅起伏的关系为:

$$\text{SNR}=\frac{1}{\langle x^2+x^3+L \rangle} \approx \frac{1}{a\langle x^2 \rangle}, (1 \leq a \leq 2) \quad (27)$$

式中: $\langle \cdot \rangle$ 为系综平均值; a 为闪烁强度因子。

2 仿真结果分析

文中基于上述理论模型, 数值仿真大气湍流中相位噪声对激光通信系统误码率和信噪比的影响。通过对比调制信号经过不同的大气湍流信道前后的副载波 QPSK 星座图来分析相位噪声对系统的影响。发送端以 QPSK 副载波调制作为输入信号, 大气湍流信道分别采用对数正态分布信道模型与 Gamma-Gamma 信道模型, 其中, 数据采样率为 40 MHz, 加性信噪比为 0 dB。

(1) 不同大气信道模型下的星座图分析

图 3 表示 QPSK 在无噪声情况下的信号星座图。QPSK 相位为 $\pi/4, 3\pi/4, 5\pi/4, 7\pi/4$ 。

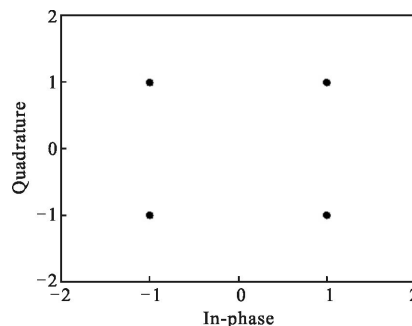


图 3 QPSK 在无噪声情况下的信号星座图

Fig.3 QPSK signal constellation under no noise

在对数分布信道模型中，光强起伏方差分别取 $a=0.2$ 、 $a=0.4$ 、 $a=0.6$ 和 $a=1.0$ 。图 4 表示 QPSK 副载波调制信号通过对数正态分布信道后的星座图比较，其光强起伏方差分别取 $a=0.2$ 、 $a=0.4$ 、 $a=0.6$ 和 $a=1.0$ 。仿真结果显示，光强起伏方差越强，QPSK 信号的星座图弥散程度越大，信号散布越随机，并且呈径向偏离判决中心，大气湍流对 QPSK 信号引起的乘性噪声越大。因此，相位噪声的对系统的影响越来越大。

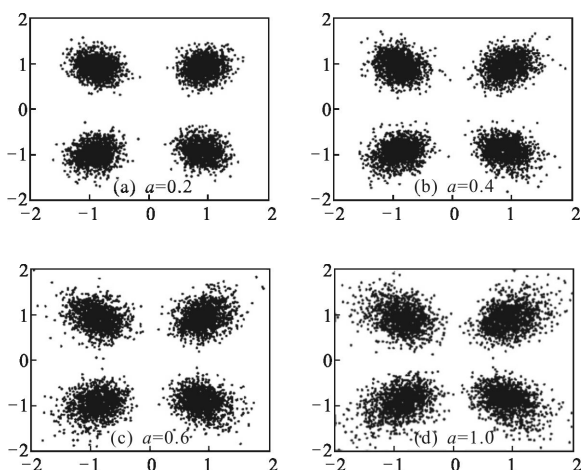


图 4 对数正态信道中不同光强起伏方差在 QPSK 调制信号星座图对比

Fig.4 Logarithmic normal channel in different light intensity fluctuation variance in QPSK modulation signal constellation

在 Gamma-Gamma 信道模型中的光强起伏方差分别取 $a=0.2$ 、 $a=0.6$ 、 $a=2.0$ 和 $a=4.0$ 。

图 5 表示 QPSK 副载波调制信号通过 Gamma-Gamma 信道后的星座图比较，其光强起伏方差分别取 $a=0.2$ 、 $a=0.6$ 、 $a=2.0$ 和 $a=4.0$ 。仿真结果显示，光强起伏方差越强，QPSK 信号的星座图弥散程度越大，信号散布越随机，判决点表现出径向发散，大气湍流对 QPSK 信号引起的乘性噪声越大。因此，相位噪声的对系统的影响越来越大。

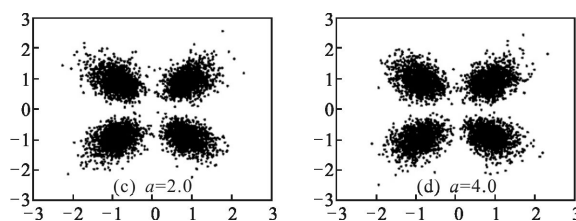
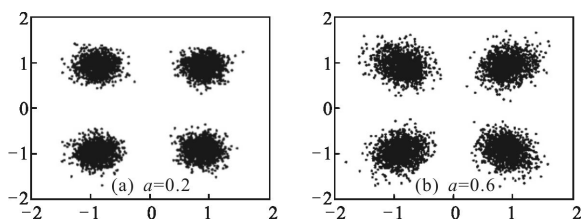


图 5 Gamma-Gamma 信道不同光强起伏方差下 QPSK 调制信号星座图对比

Fig.5 Gamma-Gamma channel in different light intensity fluctuation variance in QPSK modulation signal constellation

(2) 不同大气信道模型下的误码率分析

以 QPSK 调制方式为例，假设调制信号经过不同的大气信道后引入的相位噪声是非相关的，且具有正态分布，进行了不同变量参数条件下的相位噪声对 QPSK 接收系统误码率影响的仿真，结果如图 6 所示。

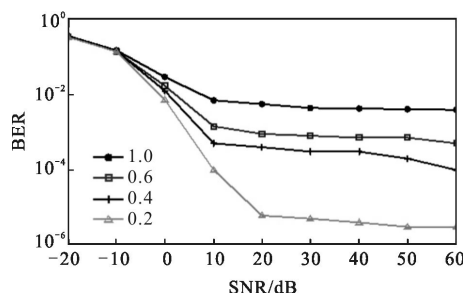


图 6 对数正态分布信道不同光强起伏方差下的误码率曲线

Fig.6 BER curves of different intensity fluctuation variance under lognormal distribution channel

由图 6 可以看出，在对数正态分布信道，即弱湍流情况下，随着光强起伏方差的增大，系统的误码率增大。当对数起伏方差取值为 $a=1.0$ ，此时信噪比的增大到一定程度，平均误码率将不再减小，而是呈现平稳趋势。

由图 7 可以看出，在 Gamma-Gamma 信道中，即中强湍流下，随着光强起伏方差的增大，系统的误码率增大。当光强起伏方差取值为 $a=1.0$ ，此时信噪比增大到一定程度，平均误码率将不再减小，变化趋于平稳。这是由于信噪比增大到一定程度时候，传输信号中的电噪声在不断减小，以至于可忽略不计。而此时，主要影响通信系统的噪声转变为 Gamma-Gamma 中的信道噪声。因此对平均误码率的影响趋

势变缓和。从上面两个的仿真结果中可以看出,由大气信道引入的相位噪声会造成接收信号幅度随机变化和一定的相位偏移,从而使得接收端信号的信噪比降低,最终导致了系统误码率性能的恶化。在相同信噪比条件下,随着相位噪声方差的增大,系统平均误码率<BER>也随之升高,即相位噪声越大,系统的误码率越大;同时,当误码率一定时,随着相位噪声的增大,对系统信噪比也提出了更高的要求。

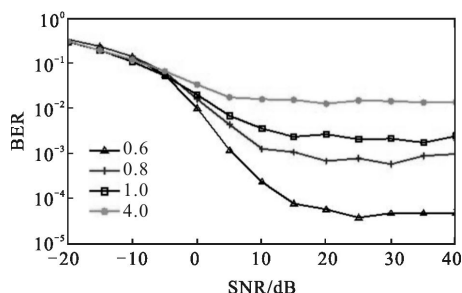


图 7 Gamma-Gamma 信道不同光强起伏方差下的误码率曲线
Fig.7 BER curves of different intensity fluctuation variance under Gamma-Gamma distribution channels

QPSK 调制在理想情况下,调制符号的星座图由均匀分布在单位圆上的 4 个点构成,如图 1 所示。但是,实际中却没有那么的理想。由于混合噪声的影响使得信号随机散布在理想判决点的周围,呈椭圆状分布,如图 8 所示。

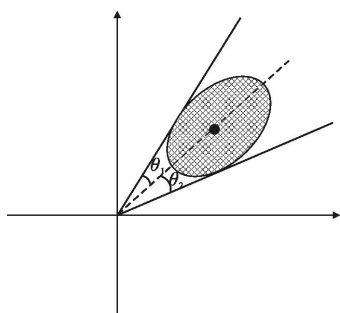


图 8 星座图分布形状
Fig.8 Constellation diagram distribution shape

对星座图沿着边界做两条切线,其中 θ_1 表示星座图的上切线与理想判决点的夹角, θ_2 表示星座图的下切线与理想判决点的夹角。在弱湍流情况下,光强起伏方差取不同的值得到 θ_1 和 θ_2 角的变化情况如表 1 所示。在中强湍流下,光强起伏方差取不同的值得到 θ_1 和 θ_2 角的变化情况如表 2 所示。

表 1 对数正态分布信道下 θ_1 和 θ_2 的变化情况

Tab.1 Changes of the θ_1 and θ_2 under the lognormal distribution channel

σ_R^2	0.01	0.2	0.4	0.6	1.0	2.0	4.0
θ_1	16.5892	18.2609	20.8624	21.0546	28.3041	31.3023	36.9471
θ_2	24.1234	25.8346	30.0722	32.9173	36.6866	38.6818	40.8881

表 2 Gamma-Gamma 信道下 θ_1 和 θ_2 的变化情况

Tab.2 Changes of the θ_1 and θ_2 under the Gamma-Gamma distribution channel

σ_R^2	0.2	0.6	1.0	2.0	4.0	6.0	10.0
θ_1	19.2365	23.4101	28.4381	30.1396	30.2015	32.5859	31.4562
θ_2	20.9055	23.8952	25.8906	31.0688	31.9330	28.6656	32.4928

由表 1 和 2 可以看出,随着光强起伏方差的增大, θ_1 角和 θ_2 角呈递增趋势变化,即椭圆状星座图分布越来越大。也即光强起伏方差越大,调制信号离理想判决点的角度越大,相位噪声对 QPSK 系统的影响越严重。

3 结论

大气激光通信通信容量大又不需要铺设光纤,且受大气信道和物理障碍物的影响。针对此特点,文中介绍激光在传输过程中会受到大气信道的影响,给出了大气信道基本模型。并通过仿真实验,分别在对数分布信道和 Gamma-Gamma 信道下,分析了不同光强起伏方差下星座图的变化情况,对比分析了相位噪声方差对系统误码性能的影响。因此,以误码率为衡量指标,能更准确的反应系统的有效通信距离,具有一定的价值。

参考文献:

[1] Yu Jiping, Qi Wenzong, Guo Chunfeng, et al. Numerical simulation of laser propagation through atmospheric turbulence[J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(6): 523-527. (in Chinese)
于继平, 齐文宗, 郭春风, 等. 激光大气传输特性的数值模

- 拟[J]. 激光与红外, 2008, 38(6): 523-527.
- [2] Yuan Xiuhua, Zhao Ming, Zhao Yanli. Analysis and resolution for wireless optical communication in turbulent atmosphere [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 416-422. (in Chinese)
元秀华, 赵茗, 赵彦立. 湍流大气对无线光通信影响分析及解决方案[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(2): 416-422.
- [3] Ricklin J C, Hammel S M, Eataon F D, et al. Atmospheric channel effects on free-space laser communication [J]. *J Opt Fiber Commun*, 2006, 3(2): 111-158.
- [4] Majumdar A K. Free-space laser communication performance in the atmospheric channel[J]. *J Opt Fiber Commun*, 2005, 2(4): 345-396.
- [5] Wang Yi, Zhang Ao, Ma Jing, et al. Effects of phase fluctuation and intensity scintillation caused by weak atmospheric turbulence to BER employing distributed antenna array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 758-763. (in Chinese)
- [6] Li Fei, Wu Yi, Hou Zaihong. Analysis and experimental research on bit error rate for free-space optical communication systems through turbulent atmosphere [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(6): 0606002-1-6. (in Chinese)
李菲, 吴毅, 侯再红. 湍流大气光通信系统误码率分析与实验研究[J]. 光学学报, 2012, 32(6): 0606002-1-6.
- [7] Tu yanju, Zhou Xiaolin, Zhang Huijun, et al. Performance analysis of free space optical communication based on hybrid noise modle [J]. *Information and Electronic Engineering*, 2012, 10(6): 650-653. (in Chinese)
屠艳菊, 周小林, 张惠俊, 等. 基于混合噪声模型的自由空间光通信性能[J]. 信息与电子工程, 2012, 10(6): 650-653.
- [8] Fang X, Khalighi M, Bourennane S. Impact of different noise sources on the performance of PIN-and APD-based FSO receivers[C]//Proceedings of the 2011 11th International Conference on Telecommunications, 2011: 211-218.
- [9] Andrews L C, Philips R L, Hopen C Y. Theory of optical scintillation[J]. *Opt Soc Am A*, 1999, 16(6): 1417-1429.
- [10] Jiang Huilin, Tong Shoufeng. The Technology and System of Space Laser Communication [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010. (in Chinese)
姜会林, 佟首峰. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [11] Li J, Uysal M. Optical wireless communications: system model, capacity and coding [C]//IEEE 58th Vehicular Technology Conference, 2003, 1: 168-172.
- [12] Li Bo, Wang Tingfeng, Wang Dinan, et al. Simulation of laser beam propagation through turbulence [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(3): 290-295. (in Chinese)
李波, 王挺峰, 王弟男, 等. 激光大气传输湍流扰动仿真技术[J]. 中国光学, 2012, 5(3): 290-295.
- [13] Vitasek J, Latal J, Hejduk S, et al. Atmospheric turbulences in free space optics channel [C]//International Conference on Telecommunications and Signal Processing(TSP), 2011: 104-107.
- [14] Wang Defei, Chu Zhenfeng, Ren Zhenglei, et al. Influence of atmospheric turbulence on BER of laser communication system [J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(4): 91-393. (in Chinese)
王德飞, 楚振峰, 任正雷, 等. 大气湍流对激光通信系统误码率影响的研究[J]. 激光与红外, 2011, 41(4): 91-393.
- [15] Xie Mengqi, Ke Xizheng. Effect of atmospheric turbulence on signal-to-noise ratio of free space optical system [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2013, 50(11): 65-71. (in Chinese)
解孟其, 柯熙政. 大气湍流对无线光通信系统信噪比的影响研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(11): 65-71.