

大气湍流和瞄准误差下差分相移键控光通信系统的性能分析

张慧颖^{1,2} 李洪祚¹ 肖冬亚¹ 蔡超¹

¹长春理工大学空间光通信研究所, 长春 吉林 130000

²吉林化工学院信息与控制工程学院, 吉林 吉林 132022

摘要 详细研究了 Gamma-Gamma 湍流信道大气闪烁、信道衰落及瞄准误差对差分相移键控(DPSK)相干光通信系统误码性能、信道容量和中断概率等指标的影响。自由空间光通信(FSO)系统采用基于马赫-曾德尔调制器(MZM)和马赫-曾德尔干涉仪(MZI)的 DPSK 调制/解调结构,通过广义超几何方法分析推导出有关平均误码率、平均信道容量和中断概率的闭合表达式并简化分析。在 Matlab 平台下进行模拟仿真,实验结果表明,系统的平均误码率和平均信道容量随湍流程度的增强而减弱;信道容量的提升可以通过增加带宽或减小抖动方差实现;当瞄准误差过大时导致中断概率增大,严重影响系统的通信性能。

关键词 光通信; Gamma-Gamma 湍流信道; 瞄准误差; 误码性能; 信道容量; Meijer-G

中图分类号 TN929.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1005004

Analysis of Differential Phase Shift Keying in Free-Space Optical Communication System over Atmospheric Turbulence and Pointing Errors

Zhang Huiying^{1,2} Li Hongzuo¹ Xiao Dongya¹ Cai Chao¹

¹*Institute of Space Optical Communication, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130000, China*

²*College of Information and Control Engineering, Jilin Institute of Chemical Technology, Jilin, Jilin 132022, China*

Abstract Under Gamma-Gamma atmospheric turbulence, the influence of atmospheric scintillation, channel loss and pointing error on the performance of differential phase shift keying (DPSK) coherent optical communication system such as the bit error rate (BER), channel capacity and outage probability is studied in detail. Free space optical communication (FSO) system is based on the Mach-Zehnder modulator (MZM) and Mach-Zehnder interferometer (MZI) DPSK modulation/demodulation structure. The closed-form expression of average BER, average channel capacity and interruption probability is derived by the generalized hypergeometric method and the simplified analysis. The simulation is taken place under the Matlab platform. Numerical results show that the average BER and channel capacity are decreased with the atmospheric turbulence increased, the channel capacity can be promoted by increased the bandwidth or reduced the jitter variance, and the communication performance of the system is seriously affected by the increasing outage probability owing to the overlarge pointing error.

Key words optical communications; Gamma-Gamma turbulence channel; pointing errors; bit error rate; channel capacity; Meijer-G

OCIS codes 060.4510; 060.5060; 060.2605

收稿日期: 2015-05-06; 收到修改稿日期: 2015-06-11

基金项目: 国家自然科学基金(60977052)、国家 863 计划(2011AA7117046)

作者简介: 张慧颖(1982—), 女, 博士研究生, 讲师, 主要从事空间激光通信等方面研究。E-mail: funnyjlu@163.com

导师简介: 李洪祚(1953—), 男, 本科, 教授, 主要从事空间激光通信技术方面的研究。

E-mail: LiHongzuo@sohu.com(通信联系人)

1 引 言

随着科技信息发展,射频通信已经不能满足数据传输性能的要求,自由空间光通信(FSO)由于其更高载频及高数据传输率受到越来越多学者的关注。FSO以激光束作为载体媒介在大气信道中传输数据,因而不可避免地受到大气湍流及大气衰减等因素影响;由于激光光束较窄,发射机和接收机之间由于未校准产生的瞄准误差同样会影响通信性能,因此大气湍流和瞄准误差是制约自由空间光通信发展的重要因素^[1]。近年来,大量的国内外学者均开展了有关大气扰动对通信性能影响等相关研究。

大气湍流会引起光学折射率的随机起伏,导致光波的相位和振幅产生随机变化。Chernov和Tatarskii求解了无限平面波和球面波在大气湍流中传输的波动方程;Andrews等^[3]提出了弱起伏和强起伏区的二阶和四阶统计模型,并提出了对数正态分布模型、K分布模型和Gamma-Gamma分布模型;Tsiftsis等^[4]研究了在Gamma-Gamma信道下自由空间光通信相干探测的误码率(BER)和中断概率;Uysal等^[5]研究了Gamma-Gamma信道下自由空间光通信的误码性能;长春理工大学的陈纯毅等^[6]较为系统地总结了各种大气湍流效应对光通信性能的影响。除了理论研究,各国也开展了大量实验验证。以往大部分研究都是采用开关键控(OOK)强度调制/直接探测(IM/DD)方式,随着光学器件的发展,相干光通信引起了各国学者的注意。Gagliardi等^[7]分析了大气湍流对相干和非相干探测的信噪比(SNR)的影响;Kiasaleh^[8]分析了在大气影响下差分相移键控(DPSK)光通信系统的误码率,通过对比研究发现,与IM/DD调制相比,DPSK调制相干探测具有更好的灵敏度,充分利用相位信息,由武云云等^[9]开展的大气湍流效应对零差二进制相移键控相干通信研究和马小平等^[10]开展的DPSK调制/自动零差相干探测技术研究可以知道,DPSK调制技术可以很好地抑制大气湍流而且可以避免倒相现象发生。因此,DPSK调制方式更加适合大气信道。国内外大量学者开展了关于大气湍流或相位波动对DPSK光通信系统影响的研究,但是并未综合考虑大气湍流和瞄准误差及链路损耗的影响;国内学者韩立强等^[11-12]研究了信道综合效应下基于OOK调制IM/DD空间光通信的影响。本文采用马赫-曾德尔调制器(MZM)的DPSK调制和马赫-曾德尔干涉仪(MZI)解调方式构建相干光通信系统,在Gamma-Gamma大气信道下综合考虑大气湍流、链路损耗和瞄准误差等对光通信系统的性能影响;通过广义超几何中的Meijer-G公式推导出系统的平均误码率、信道容量和中断概率闭合表达式;在Matlab软件平台下仿真并分析大气湍流和瞄准误差对自由空间光通信的性能指标影响,为即将开展的实验提供理论依据。

2 系统模型

待发送的数据信息经过光相位调制器调制后加载到光波上,携带信息的光波扩展到一定口径后通过发送望远镜发射至大气湍流信道,在接收端经过一定距离传输后采用接收望远镜进行接收。系统中,相位调制采用MZM设计,解调部分采用MZI结构的相干解调方式;探测部分采用双PIN二极管构成平衡探测。典型的DPSK相干空间光通信结构图如图1所示。

调制后的发射信号在大气中传输时受到大气信道中湍流现象、路径损耗或接收机和发射机之间由于未

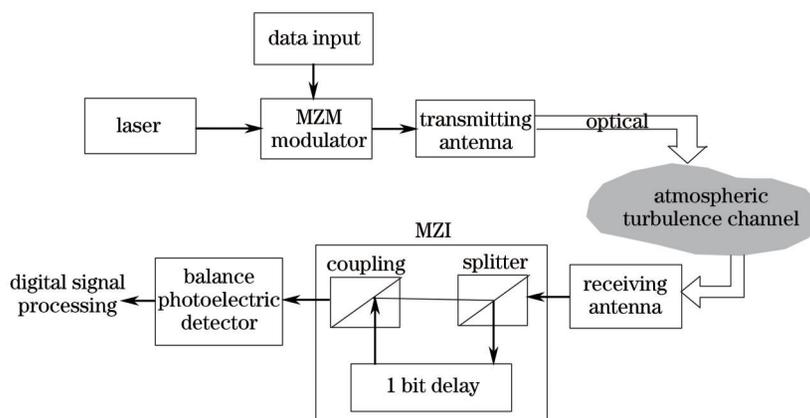


图1 DPSK相干空间光通信框图

Fig.1 Block diagram of DPSK coherent space optical communication

校准而产生的瞄准误差影响,则会对发送信号产生一定程度的衰减。因此在接收端经过光电探测器(PD)后得到的信号表示为 $y = hx + n = \eta Ix + n$ ^[11]。式中, η 表示光电转换效率, x 表示发送的信号, I 为接收机辐照度, n 表示方差为 $\sigma_n^2 = N_0/2$ 的加性高斯白噪声(AWGN)。在接收端接收到的光辐照度可以表示为 $I = I_1 I_s I_p$, 其中, I_1 表示由于路径损耗和光束消光引起的衰落系数; I_s 为大气湍流导致的衰减; I_p 表示瞄准误差引起的衰减是由于发射光辐照度归一化造成的。 I_s 和 I_p 间相互独立。

3 FSO 系统信道模型

信号在大气信道中传输时会受到大气湍流带来的影响导致系统性能降低。由于湍流状态是一种随机变化过程,根据 Rytov 近似理论,光波场被看作是大范围和小范围大气效应的扰动,通常采用 Gamma-Gamma 模型来描述光强起伏(闪烁)的可能概率密度(PDF),即

$$f_{I_\alpha}(I_\alpha) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I_\alpha^{\left(\frac{\alpha+\beta}{2}-1\right)} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta I_\alpha}), \quad (1)$$

式中 I_α 表示与闪烁参数有关的辐照度, $K_{(\alpha-\beta)}(\cdot)$ 表示修正的第 2 类贝塞尔函数, $\Gamma(\cdot)$ 代表 Gamma 公式,根据大气环境,闪烁参数 α 和 β 可以定义为

$$\alpha = \left\{ \exp\left[\frac{0.49\sigma_R^2}{(1+1.11\sigma_R^{12/5})^{7/6}}\right] - 1 \right\}^{-1}, \quad \beta = \left\{ \exp\left[\frac{0.51\sigma_R^2}{(1+0.69\sigma_R^{12/5})^{5/6}}\right] - 1 \right\}^{-1}, \quad (2)$$

式中 $\sigma_R^2 = 1.23C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$ 表示 Rytov 方差, C_n^2 表示折射率结构参数, $k = 2\pi/\lambda$ 表示波数, L 表示发射机和接收机间的通信距离^[13-14]。根据 Hufnagel - Vally(H-V)湍流模型,折射率结构参数 C_n^2 由风速 w 和海拔高度 h 决定。 $\sigma_R^2 < 1$ 表示弱湍流光强波动; $\sigma_R^2 \cong 1$ 表示中湍流光强波动; $\sigma_R^2 > 1$ 代表强湍流光强波动。

信号在大气中传输时会产生信道损耗,根据 Beers Lambert 定律,光信号传输一定距离 z 后经过大气损耗后的光强可以表示为 $I_1(z) = \exp(-\sigma z)$ 。式中, σ 表示衰减系数,大气损耗一般是一个常量。此外,光信号在大气中传输由于发射机和接收机之间未校准也会造成系统性能下降。根据瞄准误差假设理论可知 I_p 的可能概率分布密度函数为

$$f_{I_p}(I_p) = \frac{\delta^2}{A_0^{\delta^2}} I_p^{\delta^2-1}, \quad (3)$$

式中 $\delta = \frac{W_{z_{\text{req}}}}{2\sigma_s}$ 表示接收端等效光束半径和接收端的瞄准误差偏移量标准偏差比值, $W_{z_{\text{req}}}$ 表示等效光束宽度,

其表达式为 $W_{z_{\text{req}}} = W_z \left[\frac{\sqrt{\pi} \text{erf}(v)}{2v \exp(-v^2)} \right]^2$, 而 W_z 表示距离 z 处的光束宽度, $v = \frac{\sqrt{\pi} R}{\sqrt{2} W_z}$ (R 表示探测器半径), σ_s 表示接收端处的抖动方差; A_0 表示在径向距离为 0($R=0$)处的部分收集功率, $A_0 = [\text{erf}(v)]^2$ ^[12]。

综合考虑大气湍流的概率密度分布函数(PDF)和未校准衰落及路径损耗分布函数下的信道状态,PDF 表示为

$$f_I(I) = \int f_{I_\alpha}(II_\alpha) f_{I_p}(I_\alpha) dI_\alpha, \quad (4)$$

式中 $f_{I_\alpha}(II_\alpha)$ 表示在给定 I_α 下的条件概率密度函数,表达式为

$$f_{I_\alpha}(II_\alpha) = \frac{1}{I_\alpha I_1} f_{I/I_1} \left(\frac{I}{I_\alpha I_1} \right) = \frac{\delta^2}{A_0^{\delta^2} I_\alpha I_1} \left(\frac{I}{I_\alpha I_1} \right)^{\delta^2-1}, \quad 0 \leq I \leq A_0 I_\alpha I_1. \quad (5)$$

由文献[12]可知,信道状态的概率分布闭合表达式表示为

$$f_I(I) = \frac{\alpha\beta\delta^2}{A_0 I_1 \Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \times G_{1,3}^{3,0} \left[\frac{\alpha\beta I}{A_0 I_1} \middle| \delta^2 - 1, \alpha - 1, \beta - 1 \right], \quad (6)$$

式中 $G_{p,q}^{m,n}(\cdot)$ 表示广义超几何中 Meijer-G 公式, I_1 表示由于路径损耗和光束消光引起的衰落系数。

4 DPSK 相干系统性能推导

4.1 平均误码率理论模型

系统采用 DPSK 调制, 在接收端采用基于 MZI 的相干解调方式, 光电探测管采用 PIN 管, 则 MZI-DPSK 的

SNR 可以表示为 $R_{\text{SN}} = \frac{\eta^2 A^4 I^2}{2q(RA^2 I + 2i_d)\Delta f + 2\sigma_T^2}$, 其中 q 表示电子电荷量, i_d 表示暗电流, $2\sigma_T^2$ 表示热噪声。若忽

略光电管的暗电流和热噪声, 则化简后 $R_{\text{SN}} = \frac{\eta A^2 I}{2q\Delta f} = \gamma I$, 定义 $\gamma = \frac{\eta A^2}{2q\Delta f}$ (Δf 表示光电管的带宽)。此时, 系统

的 BER 可以表示为 $p_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{R_{\text{SN}}}}{\sqrt{2}}\right)$ ^[15]。考虑到大气湍流和瞄准误差综合效应, 相干 DPSK 光通信系统的平

均误码率表示为 $P = \int_0^\infty f(I) p_e(I) dI$ 。

由文献[16]可知, $\operatorname{erfc}(\cdot)$ 的 Meijer-G 函数形式为 $\operatorname{erfc}(\sqrt{x}) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} G_{2,0}^{2,0}\left[x \mid 1, \frac{1}{2}\right]$, 将其和(6)式代入平均误码率

式中, 利用 Meijer-G 函数性质(07.34.21.0011.01)推导出系统的平均误码率闭合表达式为

$$P = \int_0^\infty \frac{1}{2\sqrt{\pi}} G_{2,0}^{2,0}\left[\frac{\gamma I}{2} \mid 1, \frac{1}{2}\right] \times \frac{\alpha\beta\delta^2}{A_0 I_1 \Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \times G_{1,3}^{3,0}\left[\frac{\alpha\beta I}{A_0 I_1} \mid \delta^2 - 1, \alpha - 1, \beta - 1\right] dI =$$

$$\frac{\delta^2}{2\sqrt{\pi} \Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \times G_{4,3}^{2,3}\left[\frac{A_0 I_1}{2\alpha\beta} \mid 1 - \delta^2, 1 - \alpha, 1 - \beta, 1 \mid 0, \frac{1}{2}, -\delta^2\right]$$
 (7)

4.2 平均容量理论模型

信道容量表示在非确定性的衰落信道中出错概率最小时可能的信息携带, 因此信道容量也是衡量 FSO 系统的重要指标^[17]。根据定义可知, 在 Gamma-Gamma 信道下平均信道容量可以表示为

$\langle C \rangle = \int_0^\infty B \times \ln[1 + R_{\text{SN}}(I)] f_1(I) dI$ 。式中, $\langle C \rangle$ 表示期望, B 表示信号传输的带宽。由 Meijer-G 公式可知

$$\ln(1+x) = G_{2,2}^{1,2}\left[x \mid 1, 1 \mid 1, 0\right],$$
 (8)

将(8)式代入平均信道容量表达式并化简可得到平均容量的闭合表达式为

$$\langle C \rangle = \frac{B}{\ln 2} \int_0^\infty \ln(1 + R_{\text{SN}}) \times f_1(I) dI = \frac{B}{\ln 2} \int_0^\infty G_{2,2}^{1,2}\left[\gamma I \mid 1, 1 \mid 1, 0\right] \times \frac{\alpha\beta\delta^2}{A_0 I_1 \Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \times$$

$$G_{1,3}^{3,0}\left[\frac{\alpha\beta I}{A_0 I_1} \mid \delta^2 - 1, \alpha - 1, \beta - 1\right] dI = \frac{B\delta^2}{\ln 2 \Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{5,3}^{1,5}\left[\frac{\gamma A_0 I_1}{\alpha\beta} \mid 1, 1, 1 - \delta^2, 1 - \alpha, 1 - \beta \mid 1, -\delta^2, 0\right]$$
 (9)

4.3 中断概率理论模型

在慢衰落信道模型中, 振幅和相位发生改变时, 输出的 SNR 衰落小于特定门限信噪比的可能发生概率称之为中断概率, 阈值信噪比是在系统可靠传输下的最小信噪比^[18]。基于 DPSK 调制的 FSO 慢衰落系统的中断概率表示为 $P_{\text{out}} = P_r[R_{\text{SN}}(I) \leq \chi_{\text{th}}]$, 式中 χ_{th} 表示信噪比门限值, 也就是说在接收端的信噪比低于门限信噪比的概率, 即 χ_{th} 的大小将会影响中断概率。

$$P_{\text{out}} = P_r[R_{\text{SN}}(I) \leq \chi_{\text{th}}] = P_r\left[I \leq \frac{\chi_{\text{th}}}{\gamma}\right] = P_r(I \leq I_0) = \int_0^{I_0} f_1(I) dI,$$
 (10)

将(6)式代入(10)式并依据文献[12] Meijer-G 的函数性质(07.34.21.0084.01)对其化简得

$$P_{\text{out}} = \frac{\delta^2}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{2,4}^{3,1}\left[\frac{\alpha\beta}{A_0 I_1} \mid 1, 1 + \delta^2 \mid \delta^2, \alpha, \beta, 0\right]$$
 (11)

5 系统仿真及结果分析

基于第 4 节有关大气湍流和瞄准误差对相干 DPSK 光通信系统的平均误码率、信道容量和中断概率的分

析,本节在 Matlab 软件平台下对系统进行仿真。仿真参数如下:选取激光器波长为 $\lambda = 1550 \text{ nm}$,传输距离 $L=1 \text{ km}$,大气损耗为 0.9,光电探测器响应度为 $\eta = 0.5 \text{ A/W}$, $\Delta f = 200 \text{ MHz}$,归一化光束带宽 $W_s/R = 10$ 并且归一化抖动方差 $\sigma_s/R = 0.1$,噪声标准偏差 $\sigma_n \cong 10^{-7} \text{ A/Hz}$ 。分别选取 $\sigma_R^2 = 0.5(\alpha = 7.69, \beta = 4.55)$, $\sigma_R^2 = 1(\alpha = 2.5, \beta = 2.63)$, $\sigma_R^2 = 2(\alpha = 4, \beta = 1.72)$ 表示弱湍流、中湍流和强湍流,当湍流强度变化时平均 BER 和 SNR 关系仿真曲线如图 2(a)所示。当固定信噪比不变时,改变大尺度参数 α 和小尺度参数 β ,平均误码率随 α 和 β 变化的 3 维(3D)曲线图如图 2(b)所示。

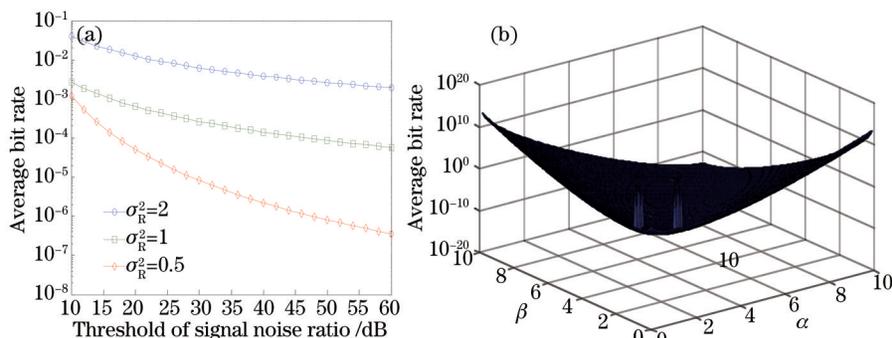


图 2 (a) 平均误码率与信噪比曲线; (b) 平均误码率与 α 和 β 的 3D 关系曲线

Fig.2 (a) Curves of average BER and SNR; (b) 3D plot for average BER against the parameters α and β

由图 2(a)可知,当大气湍流增大时,系统平均 BER 随之增大,系统通信性能降低;当信噪比逐渐增大时,可以抑制大气湍流对平均误码率影响。在弱湍流情况下,当信噪比超过 20 dB 时,系统性能由于平均误码率的增加而得到明显提高。由图 2(b)可知,当信噪比为常数时,平均误码率随着参数 α 和 β 的增大而增大,可以看出大气湍流严重影响系统的通信质量。假设系统处于强湍流信道,改变归一化抖动方差,则平均误码率与信噪比的仿真曲线如图 3 所示。

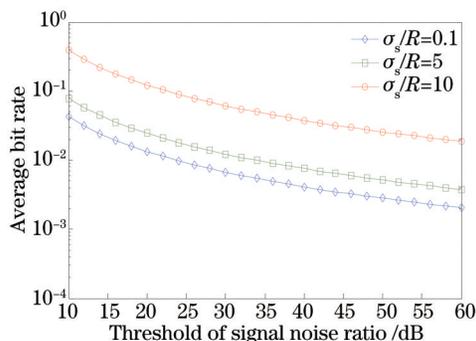


图 3 平均误码率与归一化抖动方差关系

Fig.3 Relationship between average BER and normalized jitter

由图 3 可知,当归一化抖动方差增大时,系统平均误码率也随之增大,因此瞄准误差也是影响系统误码率的主要因素。保持归一化光束带宽和归一化抖动方差不变时,改变 β 时信道容量随信噪比变化曲线如图 4(a)所示;当 $\alpha = 4, \beta = 1.4$ 时且保持归一化光束带宽 $W_s/R = 10$ 不变,改变抖动方差则信道容量与信噪比之间的关系曲线如图 4(b)所示;当在弱湍流下 ($\alpha = 4, \beta = 1.72$) 保持归一化光束带宽和归一化抖动方差不变,改变信号传输带宽时信道容量的仿真曲线如图 4(c)所示。

由图 4 可知,大气闪烁指数发生改变时信道容量也随之发生改变,在 $\alpha = 4, \beta = 2$ 时信道容量得到较大提升,且系统 SNR 增加时导致信道容量随之线性增大;当抖动方差逐渐增大时会导致系统平均信道容量减小,也就是说即使 SNR 为常数,瞄准误差也会影响系统的信道容量;当 SNR 恒定时,增加信号传输带宽可以加快信息传输速率。在强湍流下,保持归一化光束带宽和归一化抖动方差不变,当光强波动发生改变时中断概率随门限 SNR 变化曲线如图 5(a)所示;保持 Rytov 方差和归一化光束宽度不变,当系统环境中抖动方差发生改变时,归一化门限与中断概率关系曲线如图 5(b)所示。

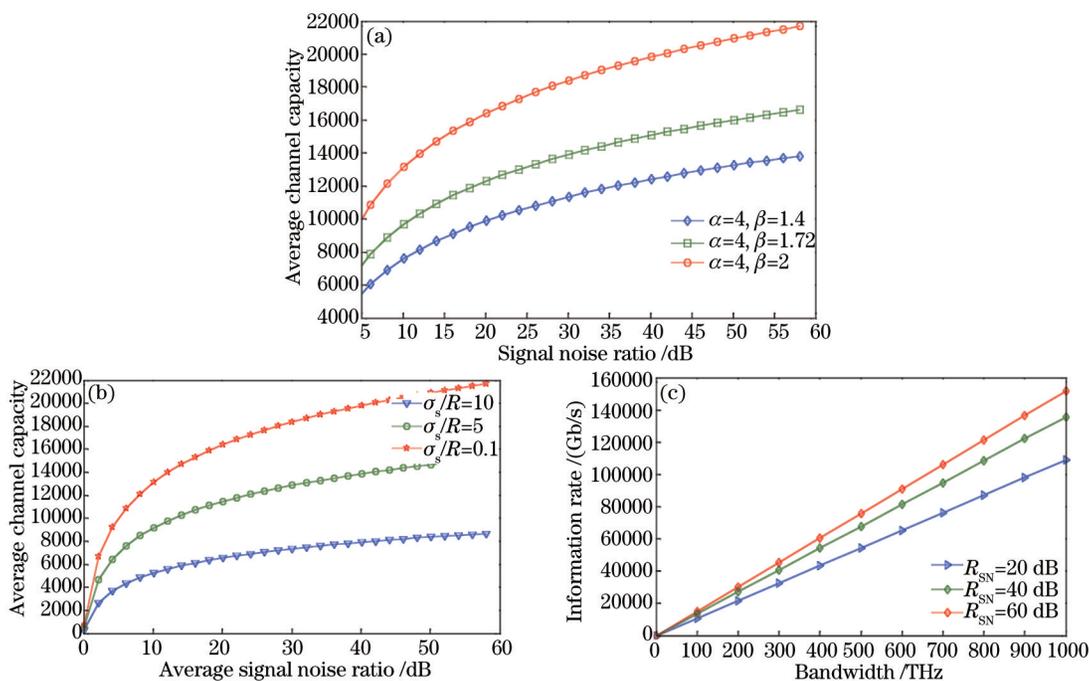


图4 (a) 信道容量与SNR关系曲线; (b) 抖动方差改变时信道容量与SNR的关系曲线; (c) 信道容量与带宽的关系曲线

Fig.4 (a) Average channel capacity against SNR; (b) average channel capacity against SNR with normalized jitter variation; (c) average channel capacity against bandwidth

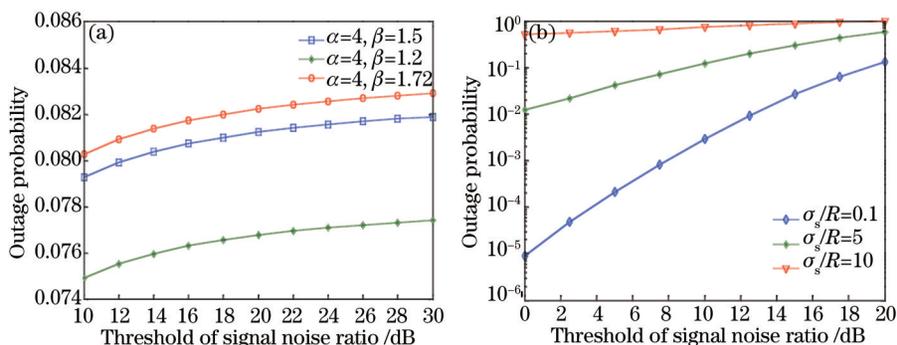


图5 中断概率与 (a) 门限信噪比和(b) 归一化门限的关系曲线

Fig.5 Relationship between outage probability, (a) threshold SNR and (b) normalized threshold

由图5(a)可知中断概率随门限SNR增大而呈现增加趋势,且湍流增大时导致中断概率的增大;当门限SNR较低时接收机接收到相对较弱的信号,因此可以在接收端减小信号中断的可能概率;从图5(b)可以看出当归一化抖动方差较大时,中断概率随之增大;当归一化门限大于16 dB时,中断概率近似为1。由此说明抖动方差和归一化门限对系统有很大的影响,当其增大时导致系统可靠性的降低。

6 结 论

研究了 Gamma-Gamma 大气信道下大气湍流、链路损耗和瞄准误差对 DPSK 空间光通信系统的影响。采用广义超几何的方法得到了有关系统平均误码率、平均信道容量和中断概率等闭合表达式,仿真分析了大气湍流、归一化抖动方差及带宽等参数对系统性能指标的影响。实验结果表明增大系统信噪比或减小抖动方差都可以降低平均误码率;而且当发射功率或带宽增加时可以提高系统的信道容量;即使系统信噪比固定时,瞄准误差也是影响信道容量的重要因素;当抖动方差增大时中断概率增大,尤其是当归一化门限大于16 dB时,导致中断概率近似为1,严重影响系统通信性能。但是当探测器的门限信噪比较小时可以获取相对较弱的信号,因此可以减小中断概率。此次研究为 DPSK 自由空间光通信实验提供了理论依据。

- 1 Jiang Huilin. The Technologies and Systems of Space Laser Communication[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2010: 35–52.
姜会林. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 35–52.
- 2 Li Fei. Clear Air Turbulence Effects and Correction Technology in Free-Space Optical Communication[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013.
李 菲. 晴空大气湍流对自由空间光通信影响及校正研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013.
- 3 Andrews L C, Philips R L, Hopen C Y, *et al.*. Theory of optical scintillation[J]. J Opt Soc Am A, 1999, 16(6): 1417–1429.
- 4 Tsiftsis T A. Performance of heterodyne wireless optical communication systems over Gamma-Gamma atmospheric turbulence channels[J]. Electron Lett, 2008, 44(5): 373–375.
- 5 Uysal M, Li J, Yu M. Error rate performance analysis of coded free-space optical links over Gamma-Gamma atmospheric turbulence channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communcation, 2006, 5(6): 1229–1233.
- 6 Chen Chunyi, Yang Huamin, Jiang Huilin, *et al.*. Research progress of mitigation technologies of turbulence effects in atmospheric optical communication[J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(6): 779–791.
陈纯毅, 杨华民, 姜会林, 等. 大气光通信中大气湍流影响抑制技术研究进展[J]. 兵工学报, 30(6): 779–791.
- 7 Gagliardi R M, Karp S. Optical Communication Technology and Application[M]. Chen Genxiang, Qin Yuwen, Zhao Yucheng, *et al.*. Trans, Beijing: Electronic Industry Press, 1995: 2–191.
Gagliardi R M, Karp S. 光通信技术与应用[M]. 陈根祥, 秦玉文, 赵玉成, 等. 译, 北京: 电子工业出版社, 1995: 2–191.
- 8 Kamran Kiasaleh. Performance of coherent DPSK free-space optical communication systems in K-distributed turbulence[J]. IEEE Transactions on Communications, 2006, 54(4): 604–607.
- 9 Wu Yunyun, Li Xinyang, Rao Changhui. Effect of atmospheric turbulent aberration on the bit-error performance of homodyne binary phase shift keying coherent optical communication[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0606002.
武云云, 李新阳, 饶长辉. 大气湍流像差对空间零差二进制相移键控相干光通信误码性能的影响[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0606002.
- 10 Ma Xiaoping, Sun Jianfeng, Zhi Yanan, *et al.*. Research of DPSK modulation and self-differential homodyne coherent detection technology to overcome atmospheric turbulence effect in the satellite-to-ground laser communication[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706017.
马小平, 孙建锋, 职亚楠, 等. DPSK 调制/自动零差相干探测技术克服星地激光通信中大气湍流效应的研究[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0706017.
- 11 Han Liqiang, Wang Qi, Shida Katsunori. Performace of free space optical communication over Gamma-Gamma atmosphere turbulence [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(7): 1318–1322.
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.
- 12 Han Liqiang, You Yahui. Performance of free space optical communication with combined effects from atmospheric turbulence and pointing errors[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1106005.
韩立强, 游雅晖. 大气湍流及瞄准误差联合效应下自由空间光通信的性能[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1106005.
- 13 K Prabu, Sumanta Bose, D Sriam Kumar. BPSK based subcarrier intensity modulated free space optical system in combined strong atmospheric turbulence[J]. Opt Commun, 2013, 305: 185–189.
- 14 Junyu Shang, Zuoyong Nan, Siqi Liu, *et al.*. Performance analysis of QPSK in free-space optical communication systems over combined channel with phase compensation error[J]. Opt Quant Electron, 2015: 1–9.
- 15 Wansu Lim, Changho Yun, Kiseon Kim. BER performance analysis of radio over free-space optical systems considering laser phase noise under Gamma-Gamma turbulence channels[J]. Opt Express, 2009, 17(6): 4479–4484.
- 16 The Wolfram functions site[OL]. Meijer G function. <http://functions.wolfram.com>.
- 17 C Liu, Y Yao, Y Sun, *et al.*. Average capacity for heterodyne FSO communication systems over Gamma-Gamma turbulence channels with pointing errors[J]. Electron Lett, 2010, 46(12): 851–853.
- 18 K Prabu, D Sriam Kumar, T Srinivas. Performance analysis of FSO links under strong atmospheric turbulence conditions using various modulation schemes[J]. Optik, 2014, 125(9): 5573–5581.

栏目编辑: 王晓琰