

大气湍流及瞄准误差联合效应下自由空间光通信的性能

韩立强 游雅晖

(燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要 研究了 Gamma-Gamma 大气湍流信道下闪烁和瞄准误差联合效应对自由空间光通信的性能影响。假定自由空间光通信系统采用开关键控(OOK)强度调制直接探测(IM/DD), 推导得出了系统的误码率和中断概率闭合表达式, 分析了大气湍流、归一化波束宽度、平均发射功率、归一化的抖动标准差、信噪比等参数对系统性能的影响。基于推导的闭合表达式进行了数值模拟, 结果表明能够在给定发射功率下通过优化波束宽度使系统性能达到最优。

关键词 光通信; 自由空间光通信; 瞄准误差; 误码率; 中断概率; 双伽马分布

中图分类号 TN929.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1106005

Performance of Free space Optical Communication with Combined Effects from Atmospheric Turbulence and Pointing Errors

Han Liqiang You Yahui

(School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract The performance of free-space optical communication (FSO) with the combined effects from scintillation effect and pointing errors under Gamma-Gamma atmospheric turbulence is investigated. Assuming FSO system uses intensity-modulation/direct detection (IM/DD) with on-off keying (OOK), the novel closed-form expressions of bit error rate (BER) and outage probability for FSO system are derived. How the performance is affected by the atmospheric turbulence and other parameters such as the normalized beamwidth, the average transmitted optical power, the normalized jitter, signal-to-noise ratio is researched. Numerical simulation is further provided to verify the derived analytical expressions. The results show that optimizing the beamwidth can achieve the minimum BER for a given average transmitted optical power.

Key words optical communications; free space optical communication; pointing error; bit error rate; outage probability; Gamma-Gamma distribution

OCIS codes 060.2605; 060.4256; 010.1330

1 引 言

自由空间光通信(FSO)或称无线光通信是一种新兴的宽带接入方式,是光通信和无线通信结合的产物,指以激光光波为载体,在真空或大气中传递信息的通信技术。自由空间光通信结合了微波通信和光纤通信的特点,与其他接入技术相比具有频带宽、建设周期短、无需铺设光缆、成本低、部署快捷等优点。然而,当自由空间光通信系统的光信号通过大气信道进行传输时,大气湍流闪烁效应引起光信号

振幅和相位的随机变化,造成自由空间光通信系统通信质量无法得到保证^[1-3]。另外一方面,由于光束较窄,瞄准误差也对通信链路造成极大影响,这种误差通常是由发送端和接收端的固定平台的摇摆而产生的随机抖动引起的^[4]。

为了研究大气湍流对空间光通信链路的影响,Andrews等学者提出了各种大气湍流信道模型,如对数正态分布、指数分布、K分布、I-K分布、Gamma-Gamma分布等,许多实验结果表明 Gamma-Gamma

收稿日期: 2014-05-25; 收到修改稿日期: 2014-07-03

基金项目: 国家自然科学基金(61107039)

作者简介: 韩立强(1976—),男,博士,副教授,主要从事自由空间光通信方面的研究。E-mail: ysdxhlq@163.com

分布是一种比较合适描述大气湍流下光强衰减分布特性的模型。许多学者以 Gamma-Gamma 分布模型为基础,研究了大气湍流效应对自由空间光通信系统性能的影响,如 Tsiftsis^[5]研究了 Gamma-Gamma 大气湍流信道下自由空间光通信相干探测系统的误码率(BER)和中断概率;Nistazakis 等^[6]研究了 Gamma-Gamma 湍流信道下自由空间光通信的性能,推导得出了一种新颖的平均容量和中断概率闭合表达式;Uysal 等^[7]以 Gamma-Gamma 分布信道模型研究了自由空间光通信的误码率性能,本课题组之前推导得到了 Gamma-Gamma 湍流信道下自由空间光通信误码率的闭合表达式,简化了平均信道容量和中断概率的闭合表达式,分析了大气湍流对系统性能的影响^[3]。但这些研究均没有考虑瞄准误差对自由空间光通信的影响。

虽然许多学者研究了瞄准误差对光束衰减的影响机理,但 Arnon^[8]首先把大气湍流和瞄准误差结合起来进行了研究,并给出了相应的机理模型;Farid 等^[9]根据大气湍流与瞄准误差的联合效应机理模型建立了自由空间光通信系统性能指标闭合表达式,分析了波束到达接收端的波束宽度、随机抖动因子、探测器尺寸等参数对通信链路性能的影响,给出了最优的参数使系统性能达到最优,但仅给出了对数正态分布湍流信道下中断概率闭合表达式,并没有给出误码率以及信道容量的闭合表达式;Borah 等^[10]分析了两种不同的光束衰减概率分布特性下瞄准误差对自由空间光通信性能的影响,分析了通信链路信道容量和误码率,但没给出闭合形式的表达式;Liu 等^[11]建立了 Gamma-Gamma 大气湍流信道下瞄准误差的自由空间光通信的平均信道容量闭合表达式,分析了波束宽度、随机抖动因子等参量对系统性能的影响;Sandalidis 等^[12-13]以 K 分布大气湍流衰减信道为模型,得到了直接探测时系统的误码率闭合表达式,研究了自由空间光通信链路受到强湍流时瞄准误差对系统误码率的影响,后又以 Gamma-Gamma 大气湍流信道模型,推导得到了采用差分移相键控(DPSK)强度调制相干探测时的误码率闭合表达式,分析了波束宽度、随机抖动因子等参量对系统性能的影响。

本文主要研究以 Gamma-Gamma 大气湍流信道为基础,根据闪烁效应和瞄准误差联合效应机理模型,采用开关键控(OOK)强度调制直接探测(IM/DD)时,推导出自由空间光通信的误码率和中断概率闭合表达式,分析各个参数对通信链路的影响,给

出最优参数,使通信系统性能达到最优。

2 系统和信道模型

2.1 系统模型

假定自由空间光通信系统采用开关键控强度调制直接探测,信道具有加性高斯白噪声,独立同分布,无记忆平稳遍历,且信道状态信息在发射端和接收端都可以利用,则接收端得到的电信号 y 表示为^[9]

$$y = hRx + n, \quad (1)$$

式中 h 为信道状态, R 为光电转换效率, x 表示调制信号, $x \in \{0, 2P_t\}$, n 为方差为 σ_n^2 的零均值加性高斯白噪声, P_t 为平均发射功率,则系统信噪比 R_{SN} 为

$$R_{SN} = \frac{2P_t^2 R^2 h^2}{\sigma_n^2}. \quad (2)$$

在大气湍流与瞄准误差的联合效应下,信道状态 h 一般可表示为三个衰减因子的乘积,即可表示为

$$h = h_1 h_a h_p, \quad (3)$$

式中 h_1 为大气信道损耗, h_a 为大气湍流引起的光强随机衰减, h_p 表示瞄准误差引起的光强随机衰减。因为瞄准误差引起的随机抖动的相关时间(大约为几秒)远远大于大气湍流引起的闪烁的相关时间(大约为 10~100 ms),所以可认为 h_a 与 h_p 之间相互独立。

2.2 大气损耗

对于大气信道损耗,其服从 Beers-Lambert 法则,可描述为

$$h_1(z) = \exp(-\sigma z), \quad (4)$$

式中 $h_1(z)$ 为传输一定距离 z 后所引起的大气损耗, σ 为衰减系数,实验表明大气损耗一般为一个固定的常量。

2.3 大气湍流

大气湍流使光信号出现衰落,为了分析大气湍流对自由空间光通信系统性能的影响,必须建立光强信号随机衰落的数学模型。光束在大气湍流中传输时造成光强起伏(闪烁),大量实验研究证明,描述这种光强衰减的分布特性,Gamma-Gamma 分布是较为适合的模型,其概率密度为^[5-7]

$$f_{h_a}(h_a) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} h_a^{[\alpha+\beta/2]-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta h_a}), \quad (5)$$

式中 $K_\nu(\cdot)$ 为第二类修正贝塞尔函数, $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数,在平面波情况下,内尺度为零时, α 和 β 分别表示为^[5-7]

$$\alpha = \left\{ \exp \left[\frac{0.49\sigma_0^2}{(1 + 1.11\sigma_0^{12/5})^{7/6}} \right] - 1 \right\}^{-1}, \quad (6)$$

$$\beta = \left\{ \exp \left[\frac{0.51\sigma_0^2}{(1 + 0.69\sigma_0^{12/5})^{5/6}} \right] - 1 \right\}^{-1}, \quad (7)$$

式中 σ_0^2 为 Rytov 方差, 即 $\sigma_0^2 = 1.23C_n^2 K^{7/6} L^{11/6}$, k 为波数, L 为传输距离, C_n^2 为大气折射率结构常数。

2.4 瞄准误差

根据瞄准误差理论, 依据接收光功率的损耗因子表达式, 可得到 h_p 的概率密度函数为^[9]

$$f_{h_p}(h_p) = \frac{\gamma^2}{A_0^2} h_p^{\gamma^2-1}, \quad (8)$$

式中 $\gamma = \omega_{z_{\text{sep}}} / (2\sigma_s)$ 表示接收端处等效波束半径与瞄准误差偏移量标准差之间的比值, 其中 $\omega_{z_{\text{sep}}} =$

$\omega_z^2 \sqrt{\pi} \text{erf}(v) / [2v \exp(-v^2)]$, $v = \sqrt{\pi} r / (\sqrt{2} \omega_z)$, $A_0 = [\text{erf}(v)]^2$, r 表示探测器半径, $\omega_{z_{\text{sep}}}$ 表示等效波束宽度, ω_z 表示距离 z 处波束宽度, σ_s 表示接收端处瞄准误差偏移量标准差(抖动)。

2.5 联合效应模型

根据大气湍流闪烁效应和瞄准误差概率分布函数就可以得到联合效应下信道状态 $h = h_1 h_a h_p$ 的概率分布, 可表示为^[9]

$$f_h(h) = \int f_{h/h_a}(h/h_a) f_{h_a}(h_a) dh_a, \quad (9)$$

式中 $f_{h/h_a}(h/h_a)$ 是大气湍流衰减 h_a 存在下的条件概率密度函数, 其可表示为

$$f_{h/h_a}(h/h_a) = \frac{1}{h_a h_1} f_{h_p}\left(\frac{h}{h_a h_1}\right) = \frac{\gamma^2}{A_0^2 h_a h_1} \left(\frac{h}{h_a h_1}\right)^{\gamma^2-1}, \quad 0 \leq h \leq A_0 h_a h_1. \quad (10)$$

把(5)式和(8)式代入到(10)式, 得

$$f_h(h) = \frac{2\gamma^2 (\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{(A_0 h_1)^{\gamma^2} \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} h^{\gamma^2-1} \int_{h/(A_0 h_1)}^{\infty} h_a^{(\alpha+\beta)/2-1-\gamma^2} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta h_a}) dh_a. \quad (11)$$

为了得到闭合表达式, 利用文献[14]中的 Meijer G 公式, 可知 $K_v(\cdot)$ 的 Meijer G 函数形式为

$$K_v(z) = \frac{1}{2} G_{0,2}^{2,0} \left(\frac{z^2}{4} \middle| \frac{\cdot}{2}, -\frac{\cdot}{2} \right). \quad (12)$$

同时, 根据文献[14]中 Meijer G 函数的性质(07.34.21.0085.01), 即可得到联合效应下信道状态 $h = h_1 h_a h_p$ 的概率分布闭合表达式:

$$f_h(h) = \frac{\alpha\beta\gamma^2}{A_0 h_1 \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} \times G_{1,3}^{3,0} \left[\frac{\alpha\beta}{A_0 h_1} h \middle| \gamma^2 - 1, \alpha - 1, \beta - 1 \right]. \quad (13)$$

3 性能指标

3.1 平均误码率

系统采用 OOK 强度调制直接探测时, 其误码率可表示为

$$P_e = p(0)p(e/0) + p(1)p(e/1), \quad (14)$$

式中 $p(0)$ 和 $p(1)$ 分别是发送 1 和 0 的概率, $p(e/0)$ 和 $p(e/1)$ 分别是发送 0 和 1 时的条件概率, 其平均误码率为

$$P_b(e) = \int_0^{\infty} f_h(h) Q\left(\frac{\sqrt{2}P_t h}{\sigma_n}\right) dh, \quad (15)$$

式中 $Q(y)$ 为 Gaussian-Q 函数, 其满足 $\text{erfc}(x) = 2Q(\sqrt{2}x)$, $\text{erfc}(\cdot)$ 为误差补函数, 由文献[14]知其 Meijer G 函数形式为

$$\text{erfc}(\sqrt{z}) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} G_{1,2}^{2,0} (z \mid 1, 1/2). \quad (16)$$

把(13)式和(16)式代入(15)式得到

$$P_b(e) = \int_0^{\infty} \frac{\alpha\beta\gamma^2}{A_0 h_1 \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} \times G_{1,3}^{3,0} \left[\frac{\alpha\beta}{A_0 h_1} h \middle| \gamma^2 - 1, \alpha - 1, \beta - 1 \right] \times \frac{1}{2\sqrt{\pi}} G_{1,2}^{2,0} \left[\frac{P_t^2}{\sigma_n^2} h^2 \middle| 1, \frac{1}{2} \right] dh, \quad (17)$$

利用文献[14] Meijer G 函数性质(07. 34. 21. 0013. 01),可以得到

$$P_b(e) = \frac{2^{\alpha+\beta-4} \gamma^2}{\pi^{3/2} \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} G_{7,4}^{2,6} \left[\frac{16P_t^2 A_0^2 h_1^2}{\sigma_n^2 \alpha^2 \beta^2} \left| \begin{matrix} 1, \frac{1-\gamma^2}{2}, \frac{2-\gamma^2}{2}, \frac{1-\alpha}{2}, \frac{2-\alpha}{2}, \frac{1-\beta}{2}, \frac{2-\beta}{2} \\ 0, \frac{1}{2}, -\frac{\gamma^2}{2}, \frac{1-\gamma^2}{2} \end{matrix} \right. \right], \quad (18)$$

利用文献[14] Meijer G 函数性质(07. 34. 03. 0001. 01),进一步化简为

$$P_b(e) = \frac{2^{\alpha+\beta-4} \gamma^2}{\pi^{3/2} \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} G_{6,3}^{2,5} \left[\frac{16P_t^2 A_0^2 h_1^2}{\sigma_n^2 \alpha^2 \beta^2} \left| \begin{matrix} 1, \frac{2-\gamma^2}{2}, \frac{1-\alpha}{2}, \frac{2-\alpha}{2}, \frac{1-\beta}{2}, \frac{2-\beta}{2} \\ 0, \frac{1}{2}, -\frac{\gamma^2}{2} \end{matrix} \right. \right]. \quad (19)$$

3.2 中断概率

中断概率是一种保证通信可靠性传输的度量,中断概率为系统误码率大于某一目标误码率的概率,也就是系统信噪比低于某一目标信噪比门限值时的概率,而信噪比 R_{SN} 门限值 μ_0 的大小将对系统中断概率产生影响,则中断概率定义表达式为

$$P_{out} = \Pr(R_{SN} \leq \mu_0) = \Pr\left(\frac{2P_t R^2 h^2}{\sigma_n^2} \leq \mu_0\right), \quad (20)$$

式中 $\Pr(\cdot)$ 表示事件发生的概率。令 $h_0 = \sqrt{\frac{\mu_0 \sigma_n^2}{2P_t R^2}}$ 为归一化门限,则

$$P_{out} = \Pr\left(h \leq \sqrt{\frac{\mu_0 \sigma_n^2}{2P_t R^2}}\right) = \Pr(h \leq h_0) = \int_0^{h_0} f_h(h) dh. \quad (21)$$

把(13)式代入(21)式得中断概率表达式:

$$P_{out} = \int_0^{h_0} \frac{\alpha\beta\gamma^2}{A_0 h_1 \Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} \times G_{1,3}^{3,0} \left[\frac{\alpha\beta}{A_0 h_1} h \left| \begin{matrix} \gamma^2 \\ \gamma^2 - 1, \alpha - 1, \beta - 1 \end{matrix} \right. \right] dh. \quad (22)$$

利用文献[14] Meijer G 函数运算性质(07. 34. 21. 0084. 01),可得到中断概率闭合表达式:

$$P_{out} = \frac{\gamma^2}{\Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} \times G_{2,4}^{3,1} \left[\frac{\alpha\beta}{A_0 h_1} h_0 \left| \begin{matrix} 1, 1 + \gamma^2 \\ \gamma^2, \alpha, \beta, 0 \end{matrix} \right. \right]. \quad (23)$$

4 数值模拟

为了分析各个参数对自由空间光通信系统性能的影响,基于以上推导的闭合表达式进行仿真分析,根据实际情况各个参数取值如下,大气损耗 h_1 为一常量,这里取 $h_1 = 0.9$,波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$,传输距离 $L = 1000 \text{ m}$,噪声标准差 $\sigma_n = 10^{-7} \text{ A/Hz}$,光电转换效率值 R 简化为 1,实际大气湍流强度从弱到强变化时,大气折射率结构常数 C_n^2 取值变化范围为 $10^{-17} \sim 10^{-13}$ 数量级,对应 Rytov 方差 σ_0^2 的值取 0.4、1、4,分别代表大气条件为弱、中等、强湍流不同情况。

图 1 给出了不同湍流强度时,当归一化波束宽度 $w_z/r = 2$,归一化的抖动标准差 $\sigma_s/r = 2$ 时,平均误码率与发射功率 P_t 之间的关系,从图中可以看出,随着湍流强度的增大,平均误码率随之增大,通信系统性能恶化,但可通过增大发射功率,减小通信

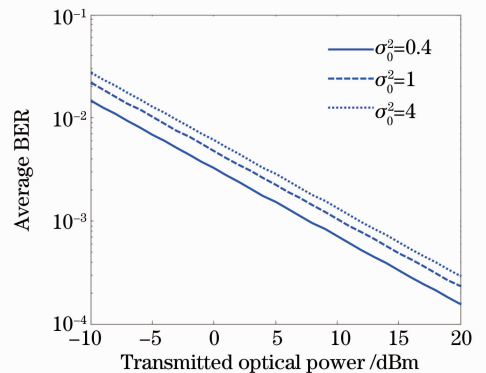


图 1 平均误码率与发射功率及湍流强度的关系
Fig. 1 Average BER versus the transmitted optical power and the turbulence strength

系统平均误码率,提高通信系统性能。当 Rytov 方差 $\sigma_0^2 = 1$,归一化波束宽度 $w_z/r = 6$ 时,图 2 可看出总体趋势随着归一化的抖动标准差的增大,平均误码率随之增大,特别当归一化的抖动标准差超过 5 时,

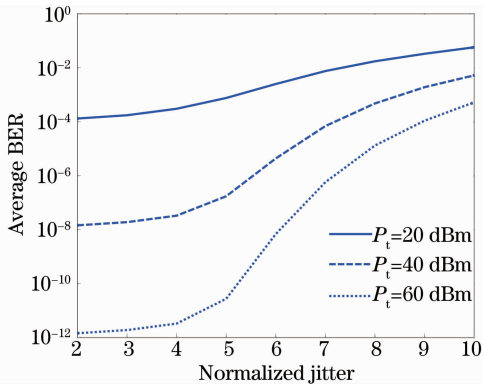


图2 平均误码率与归一化抖动标准差及发射功率的关系

Fig. 2 Average BER versus the normalized jitter and the transmitted optical power

曲线斜率突然增大,平均误码率显著增大。

图3给出了Rytov方差 $\sigma_0^2=1$,归一化的抖动标准差 $\sigma_s/r=2$,不同发射功率时,平均误码率与波束宽度的关系。从图可以看出,随着波束宽度增大,误码率随之减小,但波束宽度增大到一定程度时,随着波束宽度增大,误码率反而增加,也就是通过优化波束宽度值可以使系统误码率达到最小,系统性能达到最优。如图3所示,当发射功率为 $P_t=10$ dBm时,波束宽度最优值为6.8;当发射功率为 $P_t=20$ dBm时,波束宽度最优值为7.5;当发射功率为 $P_t=30$ dBm时,波束宽度最优值为8.0。

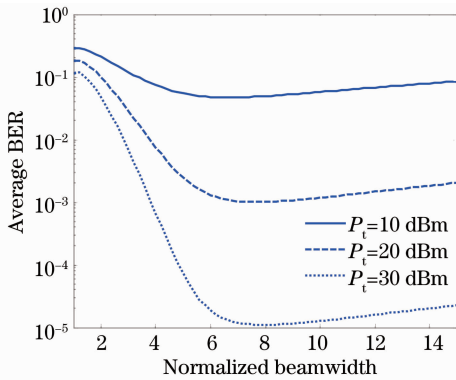


图3 平均误码率与归一化束宽及发射功率的关系

Fig. 3 Average BER versus the normalized beamwidth and the transmitted optical power

图4给出了不同湍流强度时,中断概率与归一化门限间的关系,仿真取归一化波束宽度 $w_z/r=2$,归一化抖动标准差 $\sigma_s/r=2$,可以看出,当归一化门限增大或者湍流强度的增大,都将导致中断概率增大,降低了通信系统的可靠性。图5中归一化波束宽度 $w_z/r=2$,Rytov方差 $\sigma_0^2=1$,从图可发现归一

化抖动标准差值为5时,中断概率近乎为1,对通信系统性能影响很大;随着归一化抖动标准差及归一化门限的增大,中断概率随之增大,严重影响通信系统的可靠性。

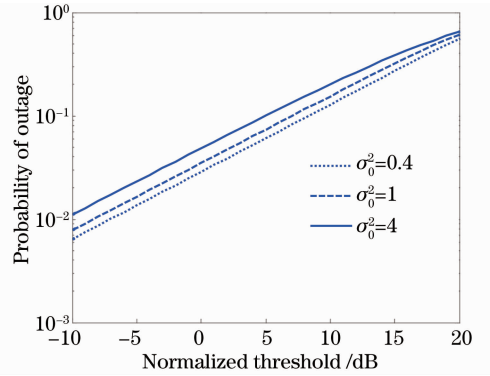


图4 中断概率与归一化门限及湍流强度的关系

Fig. 4 Probability of outage versus normalized threshold and the turbulence strength

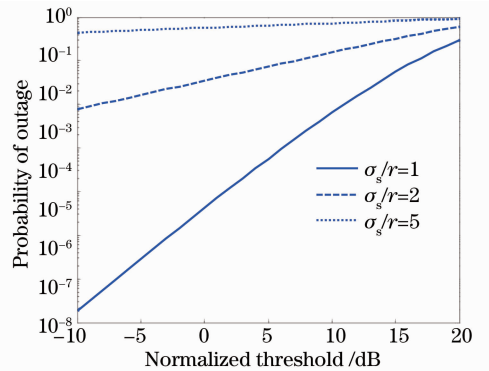


图5 中断概率与归一化门限及归一化抖动标准差的关系

Fig. 5 Probability of outage versus normalized threshold and the normalized jitter

图6给出了归一化抖动标准差 $\sigma_s/r=2$,Rytov方差 $\sigma_0^2=1$ 时,中断概率与归一化门限及归一化束宽间的关系,由图可知,当归一化门限值相同时,归

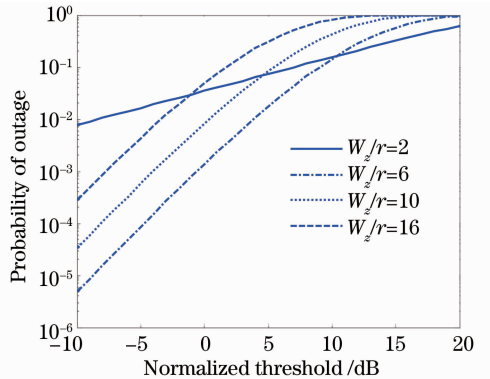


图6 中断概率与归一化门限及归一化束宽的关系

Fig. 6 Probability of outage versus normalized threshold and the normalized beamwidth

一化束宽对中断概率有较大的影响;归一化门限大于 10 dB,随着归一化束宽增大,系统中断概率随之减小;而归一化门限小于 10 dB 时,归一化束宽和中断概率不是线性变化的。也就是说归一化束宽和中断概率整体呈非线性关系,同平均误码率一样,通过优化束宽可使系统中断概率达到极小值。

5 结 论

研究了大气湍流闪烁和瞄准误差联合效应下对自由空间光通信链路的影响,基于联合效应机理模型推导得出了自由空间光通信的误码率和中断概率闭合表达式,通过仿真分析了归一化抖动标准差、发射功率、归一化波束宽度以及湍流强度等参数对通信链路性能的影响,得到了波束宽度的最优值使通信系统性能达到最优,这为自由空间光通信系统的研究和设计提供了理论依据,具有重要的参考价值。

参 考 文 献

- 1 Hu Qingsong, Huang Yuhua, Wang Junbo, *et al.*. Performance analysis of multi-hop free space optics over strong turbulence [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(9): 0906004.
胡庆松, 黄玉划, 王俊波, 等. 强湍流下多跳自由空间光通信的性能分析[J]. *光学学报*, 2013, 33(9): 0906004.
- 2 Zhai Chao, Wu Feng, Yang Qingbo, *et al.*. Simulation research of laser beam atmospheric propagation in free-space optical communication [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(5): 0505004.
翟超, 武凤, 杨清波, 等. 自由空间光通信中大气光束传输数值模拟研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(5): 0505004.
- 3 Han Liqiang, Wang Qi, Shida Katsunori. Performance 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.
- 4 H G Sandalidis. Optimization models for misalignment fading mitigation in optical wireless links [J]. *IEEE Communications Letters*, 2008, 12(5): 395-397.
- 5 T A Tsiftsis. Performance of heterodyne wireless optical communication systems over Gamma-Gamma atmospheric turbulence channels [J]. *Electron Lett*, 2008, 44(5): 372-373.
- 6 H E Nistazakis, T A Tsiftsis, G S Tombras. Performance analysis of free-space optical communication systems over atmospheric turbulence channels [J]. *IET Communications*, 2009, 3(8): 1402-1409.
- 7 M Uysal, J Li, M Yu. Error rate performance analysis of coded free-space optical links over Gamma-Gamma turbulence channels [J]. *IEEE Trans Wireless Commun*, 2006, 5(6): 1229-1233.
- 8 Shlomi Arnon. Effects of atmospheric turbulence and building sway on optical wireless-communication systems [J]. *Opt Lett*, 2003, 28(2): 129-131.
- 9 A A Farid, S Hranilovic. Outage capacity optimization for free-space optical links with pointing errors [J]. *J Lightwave Technol*, 2007, 25(7): 1702-1710.
- 10 D K Borah, D G Voelz. Pointing error effects on free-space optical communication links in the presence of atmospheric turbulence [J]. *J Lightwave Technol*, 2009, 27(18): 3965-3973.
- 11 Chao Liu, Yong Yao, Yunxu Sun, *et al.*. Analysis of average capacity for free-space optical links with pointing errors over Gamma-Gamma turbulence channels [J]. *Chin Opt Lett*, 2010, 8(6): 537-540.
- 12 H G Sandalidis, T A Tsiftsis, G K Karagiannidis, *et al.*. BER performance of FSO links over strong atmospheric turbulence channels with pointing errors [J]. *IEEE Communications Letters*, 2008, 12(1): 44-46.
- 13 H G Sandalidis, T A Tsiftsis, G K Karagiannidis. Optical wireless communications with heterodyne detection over turbulence channels with pointing errors [J]. *J Lightwave Technol*, 2009, 27(20): 4440-4445.
- 14 The Wolfram functions site [OL]. Meijer G function. <http://functions.wolfram.com>.

栏目编辑: 王晓琰