

指数韦伯信道下带瞄准误差的相干光通信系统中断概率分析

周凌林¹, 郟建平¹, 杨海峰², 梁赫西¹, 石倩芸¹, 代永红^{1*}

¹武汉大学电子信息学院, 湖北 武汉 430072;

²中国电子科技集团第十研究所, 四川 成都 610000

摘要 为了研究在大气湍流闪烁效应以及瞄准误差共同作用下空间相干光通信系统的中断概率, 基于指数韦伯大气湍流衰减信道, 建立了基于平衡探测的相干光通信系统模型, 给出了系统受大气湍流闪烁效应和瞄准误差影响下信道衰减的概率密度函数, 并推导了系统中断概率的闭合表达式。通过数值仿真, 分析了湍流强度、波束宽度、抖动偏差对系统中断概率的影响。结果表明: 系统中断概率会随着湍流强度的增强和归一化信噪比的降低而增大; 当归一化信噪比大于 14 dB 时, 可以通过增大波束宽度降低系统中断概率; 当抖动偏差大于 2 时, 增大归一化信噪比并不能有效降低系统中断概率。由基于此模型的仿真分析结论可知, 选取合适的波束宽度和抖动偏差能降低系统的中断概率, 并提高系统的稳定性。

关键词 光通信; 中断概率; 指数韦伯分布; 平衡探测; 瞄准误差

中图分类号 TN929.1 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.110602

Outage Probability Analysis of Coherent Optical Communication System with Pointing Error in Exponentiated Weibull Channel

Zhou Linglin¹, Yun Jianping¹, Yang Haifeng², Liang Hexi¹, Shi Qianyun¹, Dai Yonghong¹

¹ School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China;

² The 10th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu, Sichuan 610000, China

Abstract In order to study the outage probability of spatial coherent optical communication system under the combined effect of atmospheric turbulence scintillation effect and pointing error, a coherent optical communication system model based on balanced detection is established based on the exponentiated Weibull atmospheric turbulence fading channel. A probability density function of channel attenuation of the system under the combined effect of atmospheric turbulence scintillation effect and pointing error is given, and closed expressions of the system outage probability are derived. The effects of turbulence intensity, beam width and jitter deviation on the system outage probability are analyzed through the numerical simulation. The results show that the system outage probability increases with the increasing of the turbulence intensity and the decreasing of the normalized signal-to-noise ratio. The system outage probability can be decreased through increasing the beam width when the normalized signal-to-noise ratio is greater than 14 dB. In addition, the increase of the normalized signal-to-noise ratio cannot effectively reduce the outage probability of the system when the jitter deviation is greater than 2. Based on the simulation results of the proposed model, it is concluded that the appropriate beam width and jitter deviation can reduce the outage probability and improve the stability of the system.

Key words optical communications; outage probability; exponentiated Weibull distribution; balanced detection; pointing error

收稿日期: 2017-05-08; 收到修改稿日期: 2017-06-08

基金项目: 中国西南电子技术研究所技术创新基金(H15017)

作者简介: 周凌林(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事空间相干光通信方面的研究。E-mail: linglin969722243@163.com

导师简介: 郟建平(1960—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事表面形貌测量等方面的研究。E-mail: yjp@whu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: yhdai@whu.edu.cn

OCIS codes 060.1660; 030.1640; 030.1670; 030.7060

1 引言

空间相干光通信具有通信容量大、灵敏度高、功耗低^[1-2]等优点,是实现空间高速信息传输的首选方案。在大气通信链路中,大气吸收与散射带来的路径损耗、平台随机抖动造成的跟瞄误差及大气湍流效应都是影响系统通信性能的重要因素,因此国内外科研工作者对此进行了深入研究^[3-9]。

2006年,Kiasaleh^[3]利用K分布模型分析了强湍流下基于差分相移键控(DPSK)调制方式的自由空间光通信系统的性能;2008年,Sandalidis等^[4]利用K分布模型研究了基于二进制启闭键控(OOK)调制方式下强湍流和瞄准误差联合效应下自由空间光通信系统的性能;2009年,Popoola等^[5]利用Gamma-Gamma信道衰落模型分析了二进制相移键控(BPSK)调制方式下自由空间光通信系统的性能,并且分析了系统误码率与湍流强度的关系;2011年,韩立强等^[6]基于Gamma-Gamma大气湍流的衰减模型,研究了大气折射率结构常数、传输距离、信噪比与自由空间光通信系统性能的关系,并且推导出了系统性能的闭合表达式;2012年,Niu^[7]等对比了Gamma-Gamma信道下基于BPSK、多进制数字相位调制以及DPSK调制方式下的相干光通信的系统中断概率和误码率特性,研究了湍流强度对通信性能的影响,但在大气信道的分析中并没有考虑瞄准误差带来的影响;2013年,Nistazakis^[8]研究了强湍流条件下由负指数分布模型描述的时间分集系统的性能,并且给出了中断概率闭合表达式的近似解;2016年,吴君鹏等^[9]利用K模型推导出了基于OOK调制方式下强湍流和瞄准误差联合影响下系统中中断概率的闭合表达式,并进行了相关分析。

在孔径平均效应出现时,Gamma-Gamma分布并不能很好地描述光强分布;K分布模型主要针对中强湍流,并不适用于弱湍流。Barrios等^[10-11]将指数韦伯(EW)信道引入无线光通信系统中,并给出了基于EW统计分布模型下的信道状态概率密度函数,此模型能够描述任意强度的湍流以及任意接收孔径下的光强分布,优于现有的分布模型。然而,目前对于EW信道的研究还处于起步阶段。2013年,Barrios^[12]研究了基于EW分布模型下自由空间光通信系统的性能;2014年,Cheng等^[13]研究了基于EW信道下带跟瞄误差的系统性能,并且利用Meijer G函数推导了综合影响下概率密度函数与信道平均通信容量的闭合表达式,讨论了湍流强度、跟瞄误差以及接收孔径对通信容量的影响;2015年,Wang等^[14]以EW分布作为大气湍流的分布模型,并且推导了在大气湍流及瞄准误差综合影响下基于二进制脉冲位置调制方式的自由空间光通信系统的联合概率密度函数的闭合表达式,进一步研究了影响系统中中断概率的因素。这些研究主要集中在直接探测领域,而针对EW大气湍流信道模型下基于平衡探测的相干光通信系统性能的研究较少。

本文以空间相干光通信为背景,建立了基于平衡探测方式下相干光通信系统的模型,以EW大气湍流信道模型为基础,分析了大气湍流和瞄准误差综合作用下系统的概率密度分布,并推导出了联合效应下系统中中断概率的闭合表达式,最后通过数值仿真分析了系统中中断概率与大气湍流强度、波束宽度以及抖动偏差之间的关系。

2 相干光通信系统模型及信道模型

2.1 相干光通信系统

空间光通信系统一般由激光发射器、大气信道和接收机三部分组成。传输链路按照其接收端的探测解调方式可以分为相干探测和非相干探测两类。与强度调制直接探测的调制解调方式相比,相干探测光接收机的灵敏度可以达到量子噪声极限,系统的接收灵敏度得到极大地提升,接收灵敏度约为20 dB^[15-17]。空间相干光通信系统的原理图如图1所示。

假设光束传输所经历的信道噪声为加性高斯白噪声,信道是无记忆、平稳可遍历的,信道的状态信息在发射端和接收端都可以被利用,则接收端光电探测器输出的电流为^[18]

$$I(t) = R \sqrt{P_s P_L} \cos(\omega_{IF} t + \Delta\varphi) + n(t), \quad (1)$$

式中 R 为光电探测器的响应度; P_s 、 P_L 分别为信号光与本振光的光强; $\omega_{IF} = \omega_s - \omega_L$ 为信号光与本振光的差频, ω_s 为信号光频率, ω_L 为本振光频率; $\Delta\varphi = \varphi_s - \varphi_L$ 为信号光与本振光之间的相位差, φ_s 为信号光相位, φ_L 为本振光相位; $n(t)$ 为均值为0、方差为 $N_0/2$ 的高斯白噪声。大气信道对光信号的衰减作用表现为

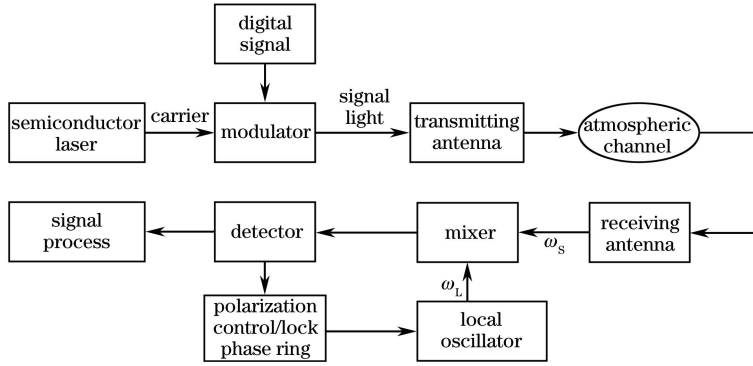


图1 空间相干光通信系统原理图

Fig. 1 Schematic of space coherent optical communication system

信号光的强度衰减和相位畸变。为简单起见,假设大气湍流造成的信号光波前相位畸变可以全部由 Zernike 多项式进行补偿,只需要考虑信号光在强度上的衰减^[19]。当光束通过大气信道并由探测器接收时,探测器的输出电流可以表示为

$$I(t) = R \sqrt{h P_s P_L} \cos(\omega_{IF} t + \Delta\varphi) + n(t), \quad (2)$$

式中 h 为大气信道的衰减系数,主要包括大气吸收与色散引起的路径损耗 h_1 、大气湍流引起的损耗 h_a 以及光束扩展与跟瞄误差引起的损耗 h_p ^[20],因此 h 可以表示为

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

在只考虑平衡探测中散弹噪声的理想情况下,平衡探测器的信噪比可表示为^[18]

$$\gamma_0 = \frac{2RP_s}{eB}, \quad (4)$$

式中 e 为电子电量, B 为通信带宽。考虑到大气信道的衰减影响,(4)式可以修正为

$$\gamma = h\gamma_0 = \frac{2hRP_s}{eB}. \quad (5)$$

2.2 大气损耗

大气信道中存在着固体颗粒及液态物质等具有吸附和散射特性的物质,会造成光信号能量的损失。通常情况下,大气损耗服从比尔-朗伯定律,即

$$h_1 = \exp[-\sigma(\lambda)z], \quad (6)$$

式中 $\sigma(\lambda)$ 为大气衰减系数, z 为信号光传输的距离。实验表明大气损耗通常为一个固定的常量。

2.3 大气湍流

大气湍流会造成信道中传输的光束产生闪烁现象,这会使得接收端光电探测器上接收到的光信号发生随机起伏,从而大大增加系统通信的误码率和中断概率。因此,建立合适的大气湍流分布模型对系统通信性能进行仿真分析是极其重要的。

EW 统计模型适用于弱、中、强三种湍流类型,其概率密度函数可表示为^[10]

$$f_{h_a}(h_a) = \frac{\alpha\beta}{\eta} \left(\frac{h_a}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{h_a}{\eta}\right)^\beta\right] \left\{1 - \exp\left[-\left(\frac{h_a}{\eta}\right)^\beta\right]\right\}^{\alpha-1}, h_a \geq 0, \quad (7)$$

式中 β 为与闪烁系数有关的参数, $\beta > 0$; η 为与 β 和光强平均值有关的参数, $\eta > 0$; α 为与平均光强和接收孔径有关的参数, $\alpha > 0$ 。根据统计学的相关知识,EW 分布下光强的 n 阶统计平均值为

$$\langle I^n \rangle = \alpha\eta^n \Gamma\left(1 + \frac{n}{\beta}\right) g_n(\alpha, \beta), \quad (8)$$

式中 $g_n(\alpha, \beta) = \sum_{i=0}^{\infty} \{ [(-1)^i \Gamma(\alpha)] / [i! (i+1)^{(1+n/\beta)} \Gamma(\alpha-i)] \}$, $\Gamma(\cdot)$ 为伽玛函数。 $g_n(\alpha, \beta)$ 易于计算,因为其级数收敛得很快,展开项通常不超过 10 项即可得到很好地收敛。由(8)式及光强闪烁系数的定义可以求得 EW 分布下的光强散射系数为

$$\sigma_1^2 = \frac{\Gamma(1 + 2/\beta) g_2(\alpha, \beta)}{\alpha [\Gamma(1 + 1/\beta) g_1(\alpha, \beta)]^2} - 1. \quad (9)$$

EW 分布的参数 α, β, η 与散射系数 σ_1^2 的关系^[10-11] 为

$$\alpha = \frac{7.220\sigma_1^{2/3}}{\Gamma(2.487\sigma_1^{2/6} - 0.104)}, \quad (10)$$

$$\beta = 1.012 (\alpha\sigma_1^2)^{-13/25} + 0.142, \quad (11)$$

$$\eta = \frac{1}{\alpha \Gamma(1 + 1/\beta) g_1(\alpha, \beta)}. \quad (12)$$

当大气折射率的功率谱函数满足 Kolmogorov 谱时,有限孔径下光强散射系数的表达式为

$$\sigma_1^2(D) = \exp[\sigma_{\ln X}^2(D) + \sigma_{\ln Y}^2(D)] - 1, \quad (13)$$

式中 D 为接收端孔径; $\sigma_{\ln X}^2$ 和 $\sigma_{\ln Y}^2$ 分别为大尺度湍流和小尺度湍流下光强对数方差的表达式,平面波入射时二者可以分别表示为

$$\begin{cases} \sigma_{\ln X}^2(D) = \frac{0.49\sigma_R^2}{(1 + 0.65d^2 + 1.11\sigma_R^{12/5})^{7/6}} \\ \sigma_{\ln Y}^2(D) = \frac{0.51\sigma_R^2(1 + 0.69\sigma_R^{12/5})^{-5/6}}{(1 + 0.90d^2 + 0.62d^2\sigma_R^{12/5})^{5/6}} \end{cases}, \quad (14)$$

式中 $d = (D/2)\sqrt{k/L}$; σ_R^2 为平面波的 Rytov 方差,可以表示为

$$\sigma_R^2 = 1.23C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}, \quad (15)$$

式中 C_n^2 为大气折射率结构常数, k 为光束的波数, L 为光束的传输距离。

2.4 瞄准误差

通信系统中发射端和接收端的高精度对准是保证系统正常通信的前提,光学平台的振动及光学器件内部的热噪声等都会造成随机的瞄准误差,从而使得系统的误码率及中断概率增加,因此理论分析通信链路的性能时必须考虑瞄准误差。瞄准误差的概率密度函数可表示为^[20]

$$f_{h_p}(h_p) = \frac{\xi^2}{A_0^{\xi^2}} h_p^{\xi^2-1}, \quad 0 \leq h_p \leq A_0, \quad (16)$$

式中 $\xi = \omega_{z_{\text{eq}}} / (2\sigma_s)$ 为接收端等效光束半径与瞄准误差偏移量标准偏差的比值, σ_s 为接收端瞄准误差偏移量的标准差; $\omega_{z_{\text{eq}}} = \omega_z \sqrt{\pi \operatorname{erf}(v)} / [2v \exp(-v^2)]$ 为等效波束宽度,其中 ω_z 为距离 z 处的波束宽度, $v = \sqrt{\pi} r / \sqrt{2} \omega_z$, r 为探测器半径; $A_0 = [\operatorname{erf}(v)]^2$ 。

2.5 综合效应下的系统模型

由以上分析可知,大气湍流与瞄准误差综合影响下的通信系统信道的衰减系数 $h = h_1 h_a h_p$, 其概率密度函数可表示为

$$f_h(h) = \int f_{h|h_a}(h|h_a) f_{h_a}(h_a) dh_a, \quad (17)$$

式中 $f_{h|h_a}(h|h_a)$ 为在大气湍流存在的条件下,大气衰减发生的概率密度函数,可以表示为

$$f_{h|h_a}(h|h_a) = \frac{1}{h_a h_1} f_{h_p}\left(\frac{h}{h_a h_1}\right), \quad 0 \leq h \leq A_0 h_a h_1. \quad (18)$$

将(13)、(15)式代入(14)式,利用伽玛函数的 Meijer G 公式形式可得

$$\Gamma(a, z) = G_{1,2}^{2,0} \left[z \left| \begin{matrix} 1 \\ 0, a \end{matrix} \right. \right]. \quad (19)$$

大气信道概率密度函数的闭合表达式为

$$f_h(h) = \frac{\xi^2 \alpha}{A_0 h_1 \eta} \left(\frac{h}{A_0 h_1 \eta} \right)^{\xi^2-1} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(-1)^i \Gamma(\alpha)}{i! \Gamma(\alpha - i) (1+i)^{1-(\xi^2/\beta)}} \times G_{1,2}^{2,0} \left[(1+i) \left(\frac{h}{A_0 h_1 \eta} \right)^\beta \left| \begin{matrix} 1 \\ 0, \left(1 - \frac{\xi^2}{\beta}\right) \end{matrix} \right. \right]. \quad (20)$$

3 系统中断概率

通信双方要进行正常的通信,通信链路的可靠性非常重要,而系统中断概率常作为可靠性的重要衡量指标。系统中断概率的定义为系统误码率大于某一门限误码率的概率,等同于系统的信噪比小于某一阈值的概率,因此,系统中断概率的数学表达式为^[6]

$$P_{\text{out}}(\gamma_{\text{th}}) = P_r[\gamma(h) \leq \gamma_{\text{th}}] = P_r\left(\frac{2hRP_s}{eB} \leq \gamma_{\text{th}}\right), \quad (21)$$

式中 γ_{th} 为保证系统能够进行可靠通信的信噪比阈值, $P_r(\cdot)$ 为某事件发生的概率。令 $h_{\text{th}} = \gamma_{\text{th}} eB / (2RP_s)$ 为信道衰减的归一化门限,则可以将(21)式表示为

$$P_{\text{out}}(\gamma_{\text{th}}) = P_r(h \leq h_{\text{th}}) = \int_0^{h_{\text{th}}} f_h(h) dh. \quad (22)$$

将(20)式代入(22)式可得

$$P_{\text{out}}(h_{\text{th}}) = \int_0^{h_{\text{th}}} \frac{\xi^2 \alpha}{A_0 h_1 \eta} \left(\frac{h}{A_0 h_1 \eta}\right)^{\xi^2 - 1} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(-1)^i \Gamma(\alpha)}{i! \Gamma(\alpha - i) (1+i)^{1 - (\xi^2/\beta)}} \times G_{1,2}^{2,0} \left[(1+i) \left(\frac{h}{A_0 h_1 \eta}\right)^\beta \middle| 0, \left(1 - \frac{\xi^2}{\beta}\right) \right] dh. \quad (23)$$

利用 Meiger G 函数的运算性质^[21],可得到系统中断概率的闭合表达式为

$$P_{\text{out}}(h_{\text{th}}) = \frac{\xi^2 \alpha}{\beta} \left(\frac{1/h_{\text{th}}}{A_0 h_1 \eta}\right)^{\xi^2} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(-1)^i \Gamma(\alpha)}{i! \Gamma(\alpha - i) (1+i)^{1 - \xi^2/\beta}} \times G_{2,3}^{2,1} \left[(1+i) \left(\frac{1/h_{\text{th}}}{A_0 h_1 \eta}\right)^\beta \middle| 1 - \frac{\xi^2}{\beta}, 1 \right]_{0, 1 - \frac{\xi^2}{\beta}, -\frac{\xi^2}{\beta}}. \quad (24)$$

式中 $1/h_{\text{th}}$ 为归一化平均电信噪比。由(24)式及第 2.3、2.4 节的相关公式可知,系统中断概率与 EW 信道特性、波束宽度 ω_z 以及跟踪瞄准偏差 σ_s 都有关。

4 数值仿真与结果分析

为了分析 EW 模型下带瞄准误差的自由空间光通信系统性能,利用推导出的系统中断概率的闭合表达式进行了数值模拟。仿真时功率谱函数满足 Kolmogorov 谱,即闪烁系数满足(13)式,文中的仿真参数选取如下:波长 $\lambda = 1550 \text{ nm}$,通信距离 $L = 1000 \text{ m}$,路径损失因子 $h_L = 0.9$ 。

图 2 为系统中断概率与归一化信噪比及湍流强度的关系。仿真时归一化波束宽度 $\omega_z/r = 2$,归一化抖动偏差 $\sigma_s/r = 2$,大气结构常数 C_n^2 选取 4.9×10^{-14} , 1.0×10^{-15} , $7.2 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$,分别对应强、中、弱湍流情况。由图 2 可见,在相同的归一化信噪比下,湍流强度越大,系统中断概率就越大;归一化信噪比逐渐增大时,系统中断概率随之降低,且湍流强度产生的影响也逐渐减小。当归一化信噪比达到 40 dB 时,系统中断概率小于 0.1。

图 3 为系统中断概率与归一化信噪比及归一化波束宽度的关系。仿真时归一化抖动标准差 $\sigma_s/r = 2$,大气结构常数 $C_n^2 = 1.0 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$,归一化波束宽度取值分别为 1, 2, 5。从图 3 中可以看出:当归一化信噪比大于 14 dB 时,随着归一化波束宽度的增加,系统中断概率随之减小;但当归一化信噪比小于 14 dB 时,归一化波束宽度与系统中断概率之间呈非线性关系;当归一化信噪比达到 40 dB 时,不同归一化波束宽度下的系统中断概率相差 3 个数量级。由此可知,在设计系统时可以根据实际的信噪比来选取归一化波束宽度,以降低系统中断概率。

图 4 为系统中断概率与归一化信噪比及归一化抖动偏差的关系。仿真时 $\omega_z/r = 2$,大气结构常数 $C_n^2 = 1.0 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$,归一化抖动偏差分别取为 1, 2, 5。从图 4 中可以看出:在相同的归一化信噪比下,归一化抖动偏差越大,系统的中断概率越大;归一化信噪比增大时,系统中断概率随之减小;当归一化抖动偏差

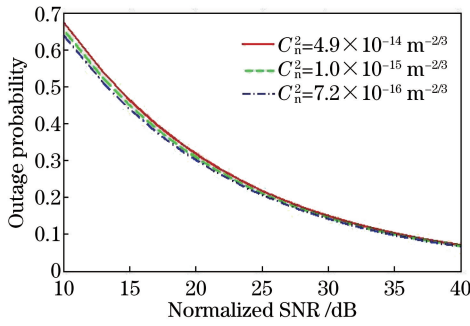


图2 系统中断概率与归一化信噪比(SNR)及湍流强度的关系

Fig. 2 Relationship among system outage probability, normalized SNR and turbulence intensity

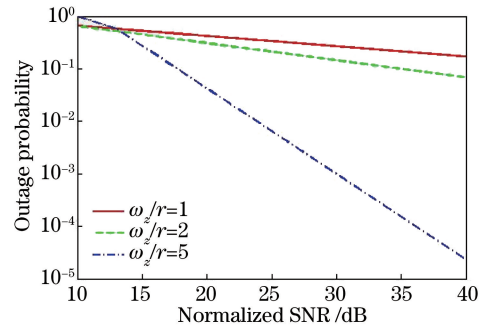


图3 系统中断概率与归一化信噪比及归一化波束宽度的关系

Fig. 3 Relationship among system outage probability, normalized SNR and normalized beam width

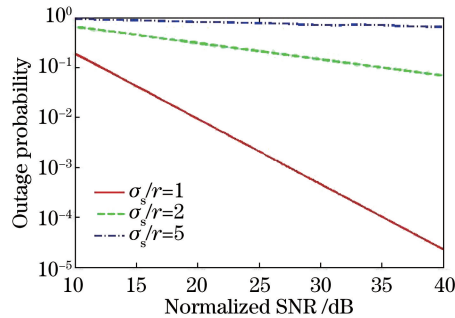


图4 系统中断概率与归一化信噪比及归一化抖动偏差的关系

Fig. 4 Relationship among system outage probability, normalized SNR and normalized jitter deviation

过大时,例如 $\sigma_s/r=5$,则系统的归一化信噪比增大,系统中断概率几乎保持在 0.8,由此可知,瞄准误差对于相干光通信系统性能的影响非常大。

5 结 论

以 EW 模型作为大气湍流信道模型,分析了瞄准误差和大气湍流对空间相干光通信系统性能的影响,并给出了信道衰减的概率密度函数。推导了平衡探测方式下系统中断概率的闭合表达式,利用 Meiger G 函数性质对其进行化简。仿真分析了大气湍流强度、归一化波束宽度、归一化抖动偏差以及归一化信噪比对系统中断概率的影响。仿真结果表明:系统中断概率随着湍流强度的增加而不断增大;归一化波束宽度对系统中断概率的影响较为复杂,只有当归一化信噪比大于 14 dB 时,系统中断概率才随着归一化波束宽度的增加而降低,这对实际设计系统时归一化波束宽度的选取具有一定的理论指导意义。瞄准误差对系统中断概率的影响也非常明显,当归一化信噪比为 40 dB、归一化抖动偏差为 5 时,系统中断概率稳定在 0.8 附近,增大信噪比未得到明显的改善;当归一化抖动偏差为 1 时,中断概率已经相差 4 个数量级。为了使系统性能达到最优,必须综合考虑大气湍流及瞄准误差的影响,同时需要考虑波束宽度和抖动偏差对系统性能的影响。

参 考 文 献

- [1] Hanzo L, Haas H, Imre S, *et al.* Wireless myths, realities, and futures: From 3G/4G to optical and quantum wireless [J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100: 1853-1888.
- [2] Liu Q C, Qiao C M, Mitchell G, *et al.* Optical wireless communication networks for first- and last-mile broadband access[J]. Journal of Optical Networking, 2005, 4(12): 807-828.
- [3] Kiasaleh K. Performance of coherent DPSK free-space optical communication systems in K-distributed turbulence[J]. IEEE Transactions on Communications, 2006, 54(4): 604-607.
- [4] Sandalidis H G, Tsiftsis T A, Karagiannidis G K, *et al.* BER performance of FSO links over strong atmospheric turbulence channels with pointing errors[J]. IEEE Communications Letters, 2008, 12(1): 44-46.

- [5] Popoola W O, Ghassemlooy Z. BPSK subcarrier intensity modulated free-space optical communications in atmospheric turbulence[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(8): 967-973.
- [6] 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.
- [7] Niu M B, Song X G, Cheng J L, *et al.* Performance analysis of coherent wireless optical communications with atmospheric turbulence[J]. *Optics Express*, 2012, 20(6): 6515-6520.
- [8] Nistazakis H E. A time-diversity scheme for wireless optical links over exponentially modeled turbulence channels[J]. *Optik*, 2013, 124(13): 1386-1391.
- [9] Wu Junpeng, Song Lu. Outage probability analysis in optical communication with pointing errors in strong turbulence channel[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(10): 103-108.
吴君鹏, 宋路. 强湍流信道中含有瞄准误差的空间光通信中断概率分析[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(10): 103-108.
- [10] Barrios R, Dios F. Exponentiated Weibull distribution family under aperture averaging for Gaussian beam waves[J]. *Optics Express*, 2012, 20(12): 13055-13064.
- [11] Barrios R, Dios F. Exponentiated Weibull model for the irradiance probability density function of a laser beam propagating through atmospheric turbulence[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 45: 13-20.
- [12] Barrios R. Exponentiated Weibull fading channel model in free-space optical communications under atmospheric turbulence[D]. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2013.
- [13] Cheng M J, Zhang Y X, Gao J, *et al.* Average capacity for optical wireless communication systems over exponentiated Weibull distribution non-Kolmogorov turbulent channels[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(18): 4011-4017.
- [14] Wang P, Zhang J, Guo L X, *et al.* Performance analysis for relay-aided multihop BPPM FSO communication system over exponentiated Weibull fading channels with pointing error impairments[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(4): 15250213.
- [15] Painchaud Y, Poulin M, Morin M, *et al.* Performance of balanced detection in a coherent receiver[J]. *Optics Express*, 2009, 17(5): 3659-3672.
- [16] Barry J R, Lee E A. Performance of coherent optical receivers[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1990, 78(8): 1369-1394.
- [17] Xu Nan, Liu Liren, Liu Dean, *et al.* Technologies and recent progress of coherent optical communications in free space [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, 44(8): 44-51.
许楠, 刘立人, 刘德安, 等. 自由空间相干光通信技术及其发展[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, 44(8): 44-51.
- [18] Dai Yonghong, Ai Yong, Xiao Wei, *et al.* The research of balance detector for high-speed coherence optical communications[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(1): 0125002.
代永红, 艾勇, 肖伟, 等. 高速相干光通信平衡探测器研究[J]. *光子学报*, 2015, 44(1): 0125002.
- [19] Sandalidis H G, Tsiftsis T A, Karagiannidis G K. Optical wireless communications with heterodyne detection over turbulence channels with pointing errors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(20): 4440-4445.
- [20] Farid A A, Hranilovic S. Outage capacity optimization for free-space optical links with pointing errors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, 25(7): 1702-1710.
- [21] Adamchik V S, Marichev O I. The algorithm for calculating integrals of hypergeometric type functions and its realization in reduce system[C]. *Proceedings of the International Symposium on Symbolic and Algebraic Computation*, 1990: 212-224.