

文章编号 1004-924X(2016)增-0103-06

强湍流信道中含有瞄准误差的 空间光通信中断概率分析

吴君鹏^{1,2*}, 宋 路¹

- (1. 长春理工大学 电子信息工程学院, 吉林 长春 130022;
2. 东北电力大学 电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 大气湍流中的光强闪烁和瞄准偏差是影响光通信性能的两个重要因素。本文根据强湍流大气信道环境下的 K 分布模型和瞄准偏差分布模型, 采用强度调制直接探测(IM/DD)开关键控(OOK)通信方式, 利用 MeijerG 函数导出了通信系统的中断概率解析表达式。通过数值计算, 分析了大气湍流程度、波束宽度、抖动偏差对系统中断概率的影响。结果表明在强湍流大气信道中, 波束宽度的减小可以降低系统的中断概率, 同时通信终端设备的抖动偏差会导致中断概率增加。在归一化波束宽度为 1 时, 系统的中断概率降低到 0.12。因此, 在实际通信信道中维持可靠的通信链路, 需要进一步优化波束宽度。

关键词: 激光通信; 光强闪烁; 开关键控; 中断概率; 波束宽度; 抖动偏差

中图分类号: TN929.1; TN929.12 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162413.0103

Outage probability analysis in optical communication with pointing errors in strong turbulence channel

WU Jun-peng^{1,2*}, SONG Lu¹

- (1. School of Electronic Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
 2. School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)
- * Corresponding author, E-mail: cust2006@126.com

Abstract: Light intensity scintillation and pointing error in atmosphere turbulence are the key factors influencing the optical communication performance. According to the K-distribution model and pointing errors distribution model, the analytical expression for outage probability of the communication system was derived by using the MeijerG function under the intensity modulation/direct detection (IM/DD) with on-off keying(OOK) modes. Through numerical calculation, the impact of atmosphere turbulence, beam width and jitter deviation on the system outage probability was analyzed. It indicates that in the strong atmosphere turbulence channel, decrease of beam width can lower the system outage probability, while the jitter deviation of the communication terminal equipment will increase the outage probability. When the beam width is normalized to be 1, the system outage probability de-

收稿日期: 2016-05-31; 修订日期: 2016-06-11.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(No. 41076060); 吉林省自然科学基金资助项目(No. 20130101056JC)

clined to 0.12. Hence, it is necessary to further optimize the beam width in order to maintain reliable communication link in the actual communication channel.

Key words: laser communication; scintillation; on-off keying(OOK); outage probability; beam width; jitter deviation

1 引言

空间激光通信作为一种新型的宽带通信方式得到了广泛的关注与研究。激光通信和射频通信(RF)相比具有众多优点,如数据传输速率高、保密性强、通信链路铺设快捷、无电磁干扰等。然而,当通信终端在大气信道环境中通信时,由于大气中的固体和液体微粒对光束产生吸收和散射作用,使得激光信号在传输时产生能量衰减,严重影响了大气激光通信系统的性能。此外,由于大气中温度和气压的不均匀性引起的湍流效应,使光束在大气中传输时产生光强闪烁,从而导致光电探测器上接收到的光强信号在强度和相位上发生随机变化,最终导致激光通信链路性能的恶化^[1]。

除了大气衰减和大气湍流对光通信系统性能造成的影响,发射机和接收机之间的瞄准误差也会造成通信链路性能的改变。一般情况下,用于光通信的光束一般较窄。瞄准偏差通常由接收端和发射端的固定平台的随机振动所引起,因此当发射机和接收机之间存在瞄准偏差时,接收机所接收到的光强信号会产生随机变化,从而导致通信系统链路可靠性的降低^[2-5]。因此,为了有效地保证激光通信系统链路性能的稳定与可靠,考虑大气衰减、大气湍流和瞄准误差三个因素下的系统性能具有重要的实际意义。

无线光通信系统的性能受大气信道环境的影响非常显著,所以各国学者关于大气湍流的产生机理及其对空间光通信系统性能的影响进行了深入的研究,并提出了有关光强随机起伏的多种统计分布模型,用以描述大气湍流所引起的光强闪烁现象。目前,在大气无线光通信系统中广泛采用对数正态分布、负指数分布、Gamma-Gamma分布等模型^[6]。根据相关研究,在大气信道湍流环境中常常根据光强的起伏方差描述大气闪烁效应的强弱。在弱起伏的大气湍流环境下,广泛采

用对数正态分布模型来描述光通信中光强信号的随机起伏。Zhu Xiaoming 和 Joseph M. Kahn 采用对数正态分布对大气湍流中的光强起伏建模,并利用最大似然检测技术来降低分集接收光通信系统的误码率^[7]。随着大气湍流程度的加剧,光强的闪烁效应由弱起伏逐步过渡到强起伏,对数正态分布此时已不再适用,这时通常采用 Gamma-Gamma 分布来描述大气信道中光强信号的起伏分布。Gappmair W 等分析了采用编码方式的空间光通信系统在 Gamma-Gamma 分布大气信道的通信系统性能^[8]。韩立强等分析了激光通信系统在 Gamma-Gamma 大气信道中的误码率、中断概率和平均信道容量,并分析了大气折射率结构常数、传输距离及信噪比对系统性能的影响^[9]。Kiasaleh K 利用 K 分布统计模型对强湍流大气信道光强起伏建模,同时分析了采用 DPSK 调制方式的光通信系统的误码率^[10]。

瞄准误差对自由空间光通信系统性能的影响同样得到了广泛地研究。Farid AA 等从信息论的角度,分析了大气湍流和瞄准偏差的复合效应对激光通信系统的性能影响,提出了一种考虑光束宽度、瞄准偏差、探测器尺寸的统计模型,并在此模型的基础上给出了通信系统中断概率的解析表达式^[2]。Sandalidis H G 等分析了采用直接探测和外差探测方式下大气信道环境下的误码率,并对光波宽度、随机抖动等因素对系统误码率性能的影响进行了分析^[3-4]。Borah D K 等分析了大气信道中湍流闪烁和失准衰落联合效应下光通信系统的误码率,并通过仿真验证了解析表达式^[5]。

本文以强湍流大气信道环境为背景,利用 K 分布模型描述大气湍流对光强的起伏,分析了在大气湍流效应和瞄准误差联合效应下光通信系统的中断概率,并推导在上述联合效应下中断概率的解析表达式,最后通过数值仿真分析了大气湍流强度、波束宽度以及抖动标准差对光通信系统中断概率的影响。

2 湍流信道的系统模型

2.1 通信系统模型

空间光通信系统一般由激光发射机、大气信道和接收机三部分组成。目前,在空间光通信系统中广泛采用强度调制/直接探测(IM/DD)方式。假设光束在具有加性高斯白噪声(AWGN)的大气湍流信道中水平传输,并且信道是无记忆、可遍历的。发射机和接收机都可以获得信道的状态信息(CSI),激光信号在大气信道中传输后通过光学接收天线汇聚到光电探测器上,接收信号的模型为^[1]:

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

其中: y 是接收机接收的信号; x 是发送的二进制调制信息, $x \in [0, 2P_t]$, P_t 是发射光束的平均功率; h 是信道的状态信息, R 是探测器的光电转换效率; n 是均值为 0、方差是 $N_0/2$ 的高斯白噪声。系统的信噪比可以表示为:

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

考虑大气信道的天气环境、大气湍流及瞄准偏差的信道状态,得到:

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

式中: h_l 是激光信号在大气中传输时的路径损耗, h_a 是大气湍流造成的光强信号的随机衰减, h_p 是光束的几何扩展和瞄准偏差^[5]。

2.2 大气湍流模型

由于大气湍流是一种动态变化的介质,光束在大气中传输时会产生光强信号的闪烁现象,导致接收机端光电探测器上所探测的信号发生随机起伏,从而引起系统误码率的增高和中断概率的增大。因此,对光强信号的随机变化建立合适的统计分布模型对于从理论上分析大气激光通信的性能是极其重要的。

相关实验表明,湍流的强弱程度可以根据大气折射率的结构常数 C_n^2 进行划分,一般情况下 C_n^2 在 $10^{-17} \sim 10^{-13}$ 。 C_n^2 的数值越大湍流程度越强,反之湍流程度越弱。本文利用 K 分布统计模型分析强湍流大气所导致的光强闪烁的概率分布,其概率密度表达式为^[10]:

$$f_{h_a}(h_a) = \frac{2\alpha^{(\alpha+1)/2}}{\Gamma(\alpha)} h_a^{(\alpha-1)/2} K_{\alpha-1}(2\sqrt{\alpha h_a}), \quad (4)$$

式中: $\Gamma(\cdot)$ 是伽马函数, $K_\alpha(\cdot)$ 是 γ 阶第二类修正贝塞尔函数, α 是与闪烁指数有关的信道参数。闪烁指数的定义为:

$$\alpha_{\text{si}}^2 = \frac{E[h_a^2]}{E[h_a]^2} - 1, \quad (5)$$

其中 $E[\cdot]$ 表示取期望值。参数 α 和闪烁指数的关系为:

$$\alpha = \frac{2}{\alpha_{\text{si}}^2 - 1}. \quad (6)$$

在 K 分布的大气湍流模型中, α_{si}^2 的取值为 $2 < \alpha_{\text{si}}^2 < 3$ 。随着 α 的增加,闪烁指数减小,湍流强度由强变弱。

2.3 大气损耗

作为一种吸收介质,大气会对光波信号产生散射和吸收,从而导致光波信号的能量损失。通常,大气损耗服从 Beers-Lamber 定律:

$$h_l = e^{-\sigma z}, \quad (7)$$

式中:参数 σ 是和光束波长以及大气能见度有关的衰减系数, z 是大气激光通信的链路长度。实验表明,在较长的时间段内大气损耗保持为一个固定的常数^[11]。

2.4 瞄准偏差

光通信系统中光学平台的振动、平台之间的相对运动、系统内部的噪声的影响等,都会使光通信终端之间存在随机的瞄准误差,使得光束不能可靠地入射到接收端,从而造成接收端的光强信号的损失,使通信链路性能下降。因此,在实际的光通信系统中,接收机和发射机天线之间的高精度对准是决定通信链路性能可靠性的重要前提。瞄准误差的概率密度可以表示为^[5]:

$$f_{h_p}(h_p) = \frac{v^2}{A_0^{v^2}} h_p^{v^2-1}, 0 \leq h_p \leq A_0, \quad (8)$$

式中: $v = w_{z_{\text{eq}}}/2\sigma_n$, 表示接收端处等效波束宽度与瞄准误差偏移量标准差之间的比值;波束的等效宽度 $w_{z_{\text{eq}}} = \sqrt{\frac{w_z^2 \sqrt{\pi} \text{erf}(v)}{2v \exp(-v^2)}}$, w_z 表示距离 z 处的波束宽度, $v = \sqrt{\pi} r / \sqrt{2} w_z$, r 表示探测器的半径; $A_0 = [\text{erf}(v)]^2$, 令 σ_s 为接收机瞄准偏差的标准差。

2.5 大气湍流和瞄准偏差联合效应下的信道衰落

在大气湍流和瞄准误差联合效应下的信道状态 h 的复合概率密度可表示为:

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

式中 $f_{h|h_a}(h|h_a)$ 是给定 h_a 状态下的条件概率, 可表示为:

$$f_{h|h_a}(h|h_a) = \frac{\gamma^2}{A_0^2 h_l h_a} \left(\frac{h}{h_l h_a} \right)^{\gamma^2 - 1}. \quad (10)$$

把式(4)和式(10)带入式(9), 并利用 Meijer 函数公式:

$$K_\nu(z) = \frac{1}{2} G_{0,2}^{3,0} \left[\begin{matrix} - \\ \frac{z^2}{4} \end{matrix} \middle| \frac{z}{2}, -\frac{z}{2} \right]. \quad (11)$$

根据 Meijer 函数的性质^[12-13], 可得到在大气湍流和瞄准偏差联合效应下信道状态的概率密度表达式:

$$f_h(h) = \frac{\alpha \gamma^2}{A_0 h_l \Gamma(\alpha)} G_{1,3}^{3,0} \left[\begin{matrix} \frac{\alpha h}{A_0 h_l} \\ \gamma^2 - 1, \alpha - 1, 0 \end{matrix} \right]. \quad (12)$$

3 中断概率分析

中断概率通常可以作为衡量通信链路可靠性的一个重要指标, 因此分析湍流大气信道中无线光通信系统的中断概率具有重要的实际意义。中断概率的定义描述的是系统的信噪比低于某一目标信噪比阈值时的概率, 中断概率的表达式为:

$$P_{\text{outage}} = \Pr(\text{SNR} \leq \mu_0), \quad (13)$$

式中, \Pr 表示概率, μ_0 是信噪比阈值, 将式(2)代入上式得到:

$$P_{\text{outage}} = \Pr(2P_t^2 R^2 h^2 \leq \mu_0 \sigma_n^2). \quad (14)$$

令 $h_0 = \sqrt{\mu_0 \sigma_n^2 / (2P_t^2 R^2)}$, 则式(14)可以进一步表示为:

$$P_{\text{outage}} = \Pr(h \leq h_0) = \int_0^{h_0} f_h(h) dh. \quad (15)$$

将式(12)代入式(15)并利用 MeijerG 函数的性质得到中断概率的解析表达式为:

$$P_{\text{outage}} = \frac{\gamma^2}{\Gamma(\alpha)} G_{2,4}^{3,1} \left[\begin{matrix} \frac{\alpha h_0}{A_0 h_l} \\ \gamma^2, \alpha, 1, 0 \end{matrix} \right]. \quad (16)$$

定义平均电信噪比 $\mu = 2R^2 P_t^2 / \sigma_n^2$, 则式(16)可以表示为:

$$P_{\text{outage}} = \frac{\gamma^2}{\Gamma(\alpha)} G_{2,4}^{3,1} \left[\begin{matrix} \frac{\alpha}{A_0 h_l} \sqrt{\frac{\mu_0}{\mu}} \\ \gamma^2, \alpha, 1, 0 \end{matrix} \right]. \quad (17)$$

这里 μ/μ_0 是归一化的平均电信噪比。从式(17)中可以看出系统的中断概率和信道参数、光束宽度以及抖动偏差有关。

4 数值仿真与分析

通过上节推导的强湍流信道中断概率解析表达式, 对大气湍流和瞄准误差联合效应下光通信系统的中断概率进行数值仿真。主要分析大气湍流强度、光束宽度、抖动偏差对通信系统中断概率的影响, 仿真参数设置如表 1 所示:

表 1 中断概率仿真参数

Tab. 1 Parameters in outage probability simulation		
参数	符号	取值
路径损失因子	h_l	0.9
波长/nm	λ	1 550
传输距离/km	L	3.5
噪声标准差/(A · Hz ⁻¹)	σ_n	10 ⁻⁷
大气折射率结构常数/m ^{3/2}	C_n^2	1.7 × 10 ⁻¹⁴

图 1 中给出了在不同湍流强度下中断概率和信噪比之间的关系。从图中可以看到, 在强湍流信道中, 系统的中断概率随信噪比的增加而降低, 但在信噪比为 40 dB 时, 中断概率仍高于 0.1。

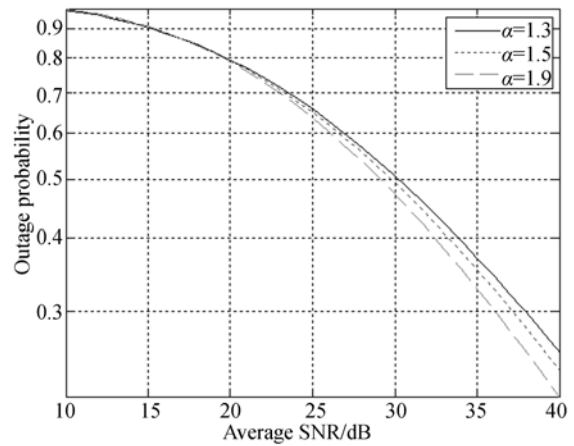


图 1 不同信道参数条件下, 系统中断概率和归一化平均信噪比的关系曲线

Fig. 1 Relation curves between outage probability and average SNR with different channel parameters

图 2 给出了在相同大气湍流环境下, 归一化光束宽度对中断概率的影响。在图 2 中可以看到在相同信噪比的条件下, 当归一化光束宽度增大时, 系统的中断概率随之增加, 反之则系统的中断

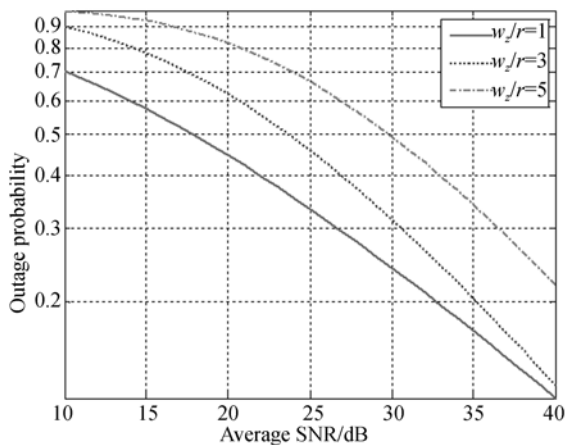


图 2 不同归一化束宽下中断概率和归一化平均信噪比的关系曲线

Fig. 2 Relation curves between outage probability and average SNR with different normalized beam widths

概率降低。当归一化束宽为 1、SNR 为 40 dB 时,系统的中断概率可降低到 0.12,这表明可以通过减小光束的尺寸来达到降低系统中断概率的目的。

图 3 表明抖动偏差对系统中断概率的影响。从图中可以看到,抖动偏差较大时,系统的中断概率接近 1。随着抖动偏差的减小,中断概率大幅度降低。因此,有效控制抖动偏差可提升通信系统的稳定性。

5 结 论

本文分析了在 K 分布大气湍流环境下,大气

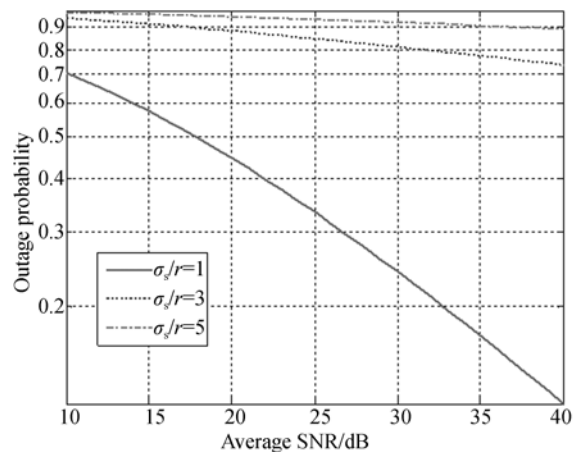


图 3 归一化抖动偏差分别为 1、3 和 5 时,中断概率和归一化平均信噪比的关系曲线

Fig. 3 Relation curves between outage probability and average SNR with normalized jitter derivation of 1, 3 and 5 respectively

的湍流闪烁效应和瞄准误差对空间光通信系统中断概率这一性能指标的影响。通过 MeijerG 函数给出了中断概率的闭合表达式,并通过数值仿真结果分析了大气湍流、波束宽度和抖动偏差对中断概率的影响。仿真结果表明在强湍流信道环境下,大气信道湍流的强弱程度严重影响着系统的中断概率,同时随着波束宽度和抖动偏差的增加,系统的中断概率不断升高;在归一化波束宽度为 1 时,系统的中断概率降低到 0.12。为了减轻瞄准误差所带来的影响,需要综合考虑波束宽度和抖动偏差带来的影响从而提升通信链路性能。

参考文献:

- [1] ANDREWS L C, PHILIPS R L, HOPEN C Y, et al.. *Laser Beam Scintillation with Applications* [M]. SPIE Press, 2001.
- [2] 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.
- [3] SANDALIDIS H G, TSIFTSIS T A, KARAGIAN-NIDIS 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.
- [4] SANDALIDIS H G, TSIFTSIS T, KARAGIAN-NIDIS G K. Optical wireless communications with heterodyne detection over turbulence channels with pointing errors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(20): 4440-4445.
- [5] BORAH D K, VOELZ D G. Pointing error effects on free-space optical communication links in the presence of atmospheric turbulence[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(18): 3965-3973.
- [6] ALHABASH M A, ANDREWS L C, PHILLIPS R L, et al.. Mathematical model for the irradiance probability density function of a laser beam propaga-

- ting through turbulent media[J]. *Optical Engineering*, 2001, 40(8): 1554-1562.
- [7] ZHU X, KAHN J M. Free-space optical communication through atmospheric turbulence channels[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2002, 50(8): 1293-1300.
- [8] GAPPMAIR W, FLOHBERGER M. Error performance of coded FSO links in turbulent atmosphere modeled by gamma-gamma distributions[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(5): 2209-2213.
- [9] 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, 07: 1318-1322.
- HAN L Q, WANG Q, SHIDA K. Performance of free space optical communication over gamma-gamma atmospheric turbulence[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 1318-1322. (in Chinese)
- [10] KIASALEH K. Performance of coherent DPSK free space optical communication systems in K-distributed turbulence[J]. *IEEE Transactions on Communication*, 2006, 54(4): 604-607.
- [11] KIM I I, MCARTHUR B, KOREVAAR E J. Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications[C]. *Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering*, Boston MA, America, 2001, 4214: 26-37.
- [12] 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*, Tokyo, Japan, 1990: 212-224.
- [13] GRADSHTEYN I S, RYZHIK I M. *Table of Integrals, Series, and Products*[M]. 7th ed. . New York: Academic Press, 2007.
- [14] 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): 82-87.
- HAN L Q, YOU Y H. Performance of free space optical communication with combined effects from atmospheric turbulence and pointing errors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(11): 82-87. (in Chinese)

作者简介:



吴君鹏(1980—),男,吉林长春人,讲师,博士研究生,2006年于长春理工大学获得硕士学位,主要从事无线光通信及通信信号处理的研究。E-mail: cust2006@126.com

导师简介:



宋路(1952—),女,吉林长春人,教授,博士生导师,主要从事大气激光通信、通信与信息处理技术的研究。E-mail: usong@126.com