

引用本文:郭振锋,刘波,张昊,等.湍流环境中多口径发射空间激光通信系统误码率分析[J].光通信技术,2022,46(4):11-16.

湍流环境中多口径发射空间激光通信系统误码率分析

郭振锋^{1,2},刘波^{1,2,3*},张昊^{1,2},刘海锋^{1,2,3},林炜^{1,2,3},姚远^{1,2},陆泽辉^{1,2}

(1.南开大学 电子信息与光学工程学院,天津 300350;

2.南开大学 现代光学研究所,天津 300350; 3.南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海),广东 珠海 519000)

摘要:为提高多口径发射的自由空间光通信系统性能,以“海洋高速通信网络关键技术与验证”项目为背景,提出了平均误码率(BER)的解析表达式。通信系统采用典型的强度调制直接探测(IMDD),工作在由指数威布尔(EW)分布模型描述的湍流环境中。分析了系统在不同信道参数下的孔径平均效应,以及不同发射口径数和通信速率对平均BER的影响。仿真结果表明:低通信速率下多口径发射系统具有良好的湍流抑制能力,高通信速率下不同发射口径的到达时间差会增加通信系统的误码概率。

关键词:自由空间光通信;大气湍流;多口径发射;指数威布尔分布模型

中图分类号: TN914 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2022)04-0011-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.04.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Bit error rate analysis of multiple apertures transmitting space laser communication system in turbulent environment

GUO Zhenfeng^{1,2}, LIU Bo^{1,2,3*}, ZHANG Hao^{1,2}, LIU Haifeng^{1,2,3}, LIN Wei^{1,2,3}, YAO Yuan^{1,2}, LU Zehui^{1,2}

(1. College of Electronic Information and Optical Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China; 2. Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300350, China; 3. Southern Marine Science and Engineering Guangzhou Laboratory(Zhuhai), Zhuhai Guangdong 519000, China)

Abstract: In order to improve the performance of free space optical communication system with multiple apertures transmitting, based on the "Research and verification of key technologies of marine high speed communication network" project, an analytical expression of bit error rate (BER) is proposed. The communication system uses intensity-modulation with direct-detection (IMDD) and works in a turbulent environment described by exponentiated Weibull(EW) distribution model. The aperture averaging effect under different channel parameters and the impacts on the average BER with different transmitting aperture numbers and communication rates are analyzed. The simulation results show that the multiple apertures transmitting system has good turbulence suppression ability at low communication rate. The difference of arrival time caused by different transmitting apertures will increase the bit error probability of the communication system at high communication rate.

Key words: free space optical communication, turbulent atmosphere, multiple apertures transmitting, exponentiated Weibull distribution model

0 引言

随着近几年智能设备和网络流量需求的爆炸式

增长^[1],在实际应用中射频(RF)波段在容量和成本方面受到限制,RF 频谱资源日益紧缺。因此,一种更高传输速率的通信技术——自由空间光(FSO)通信技术逐渐进入了学术界和工业界的视野^[2]。虽然光纤通信仍是现有骨干网络的主要技术手段,但 FSO 通信因为其高保密性、大容量、宽频带、抗电磁干扰和易于部署等特点,在光纤难以企及的领域内正充分发挥着优势^[3]。作为“最后一千米”问题的有效解决方案,FSO 通信系统在终端用户和现有光纤基础设施之间架起了桥梁。基于新型光模块^[4]的使用,FSO 通信系统可提供高达 1.2 Tb/s 的大容量传输,在企业/校园连接、视频监控和

收稿日期:2021-09-06。

基金项目:国家自然科学基金重大科研仪器研制项目(2018YFB1802302;61727815)资助;天津市高层次创新创业团队项目资助;南开大学自制实验教学仪器设备项目资助。

作者简介:郭振锋(1998—),男,硕士生,现就读于南开大学电子信息与光学工程学院光学工程专业,主要研究方向为自由空间光通信和时频传递系统设计及关键技术,参与国家重点研发计划项目、国家自然科学基金重大科研仪器研制项目等共 6 项。

***通信作者:**刘波(1975—),男,博士,教授,研究方向为空间光通信技术、光纤生物医学感测技术等。



郭振锋,刘波,张昊,等:湍流环境中多口径发射空间激光通信系统误码率分析

灾难应急等领域发挥着重要的作用^[1,5]。然而,FSO 通信系统对链路状况的要求非常高,无线光通信的实施面临着大气湍流引起的闪烁、雨雪雾等恶劣天气条件的挑战,严重时甚至可能发生信号中断,这限制了其在远程通信中的应用。为了研究大气湍流对 FSO 通信的影响,研究人员对大气湍流信道建立了诸多接收机的辐照度概率分布函数(PDF)模型,如对数正态分布模型、负指数分布模型、K 分布模型和 Gamma-Gamma 分布模型等。其中,对数正态分布适用于弱湍流条件,负指数分布与 K 分布则在强湍流环境下拟合良好, Gamma-Gamma 分布适用范围最广,可以很好地覆盖不同强度的信道条件。但是,在中强湍流区,大口径接收机的辐照度闪烁并不符合 Gamma-Gamma 分布^[6],为了准确描述孔径平均效应,人们提出了一种新的辐照度 PDF,即指数威布尔(EW)分布模型^[7],在接收口径为 60 mm 的情况下,无论是模拟数据还是实验数据,EW 分布模型对湍流信道参数的估计都优于传统的 Gamma-Gamma 模型。

为了抑制大气湍流带来的光强闪烁,研究人员提出了空间分集技术,目前分集技术在 FSO 通信系统中被广泛采用。KHALIGHI M A 等人^[8]研究了孔径平均效应对平均误码率(BER)的改善,比较了单口径和多口径系统的信道衰落,并且考虑了相邻口径之间衰落不相关的情形。研究结果表明,在强湍流条件下使用多个口径时的通信性能优于单个大口径。2017 年, KHODADADI H R 等人^[9]研究了孔径平均、多输入/单输出(MISO)和 Bose - Chaudhuri - Hocquenghem 分组码 3 种湍流抑制技术的性能。2021 年, ANDROUTSOS N A 等人^[10]考虑了空间抖动和光强闪烁对单输入/多输出(SIMO)系统的综合影响,推导出了平均 BER 的解析表达式。本文基于以上研究成果,利用大气湍流的 EW 分布模型,研究大气衰减对 MISO 的 FSO 通信系统性能的影响。

1 单输入/单输出(SISO)系统

MISO 系统是以 SISO 系统为基础的,都属于单输出系统,因此本文首先考虑 SISO 系统的信道模型。假设光电探测器的噪声为与信号无关的加性高斯白噪声(AWGN),在接收机处测量到的信号表示为

$$y = Rhx + n \quad (1)$$

其中, R 为光电探测器的响应度; h 为信道衰减系数,它表征了接收口径平面的功率波动; x 是发射信号,信号采用 OOK 编码,取值为 0 或 $2P_t$, P_t 是发射机的平均

发射功率; n 是探测器的 AWGN 信号,其方差为 σ_n^2 ; y 是接收信号。 σ_n^2 ^[11]可表示为

$$\sigma_n^2 = \frac{4k_bTB}{R_0} \quad (2)$$

其中, k_b 是 Boltzmann 常数, T 是系统的绝对温度, B 是探测器的响应带宽, R_0 是负载电阻。

在接收机处测量的光功率 P_r 可表示为

$$P_r = RhP_t + n \quad (3)$$

在 EW 分布的湍流模型中,衰减系数 h 的 PDF 为^[12]

$$f_h(h) = \frac{\alpha\beta}{\eta} \left(\frac{h}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\frac{h}{\eta}\right] \times \left\{1 - \exp\left[-\left(\frac{h}{\eta}\right)^{\beta}\right]\right\}^{\alpha-1}, h \geq 0 \quad (4)$$

对应的累积分布函数(CDF)为

$$F_h(h) = \left\{1 - \exp\left[-\left(\frac{h}{\eta}\right)^{\beta}\right]\right\}^{\alpha} \quad (5)$$

其中, α 、 β 为形状参数, η 为规模参数^[13]。

FSO 通信系统采用 OOK 编码调制,光信号的误差概率^[11]可表示为

$$P_e(h) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{\operatorname{SNR}}{2}}\right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{RhP_t}{\sqrt{2}\sigma_n}\right) \quad (6)$$

其中,信噪比 $\operatorname{SNR} = \left(\frac{RhP_t}{\sigma_n}\right)^2$, $\operatorname{erfc}(x)$ 为互补误差函数, $\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} e^{-\eta^2} d\eta$ 。

平均 BER 的积分表达式为

$$\langle \operatorname{BER} \rangle = \int_0^{\infty} P_e(h) f_h(h) dh \quad (7)$$

利用分部积分,式(7)可表示为

$$\langle \operatorname{BER} \rangle = \int_0^{\infty} P'_e(h) F_h(h) dh \quad (8)$$

其中, $P'_e(h) = \frac{dP_e(h)}{dh} = -\frac{RP_t}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} \exp\left(-\frac{R^2h^2P_t^2}{2\sigma_n^2}\right)$ 。

广义 Gauss-Laguerre 积分定理^[15]将其改写成级数形式为

$$\langle \operatorname{BER} \rangle \approx \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sum_{k=0}^n W_k \times \left\{1 - \exp\left[-\left(\frac{\sqrt{2}\sigma_n}{RP_t\eta} \sqrt{z_k}\right)^{\beta}\right]\right\}^{\alpha} \quad (9)$$

其中,权重系数 $W_k = \frac{\Gamma(n+1/2)z_k}{n! (n+1)2 \left[L_{n+1}^{(-1/2)}(z_k)\right]^2}$ 。

2 MISO 系统

在 MISO 系统中,不同口径的发射光束在部分重叠的空间子信道传播,如图 1 所示。这些子信道的湍流状态不完全一样,因此会引起各光束的到达时间起伏。ANGUITA J A 等人^[16]发现多光束的空间相关性与口径间距 d 、传播距离 L 和湍流条件等因素有关,当 d 远大于大气相干长度时可以认为空间子信道之间是相互独立的。

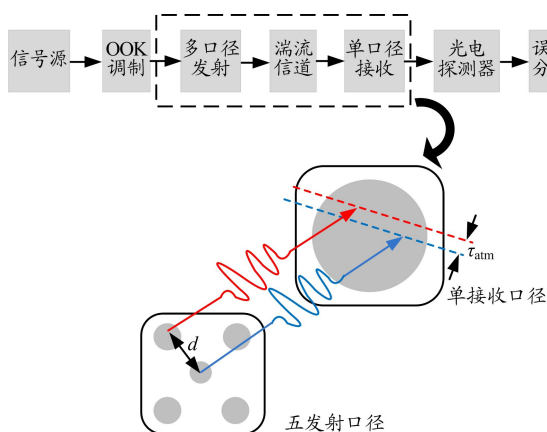


图 1 MISO 系统框图

文献[17]分析了不同信道的到达时间差 τ_{atm} ,当两信道相距为 d 时,到达时间差 τ_{atm} 的方差 $\sigma_{\tau_{\text{atm}}}^2$ 可表示为

$$\sigma_{\tau_{\text{atm}}}^2 = \frac{2\pi^2}{c^2} \int_0^L \int_0^\infty \kappa \Phi_n(\kappa, z) [1 - J_0(\kappa d(z))] d\kappa dz \quad (10)$$

其中, c 是光速, κ 是空间频率, z 表示光的传播方向。

大气折射率的功率谱模型 $\Phi_n(\kappa, z)$ 采用修正的 Von Karman 谱,表达式为

$$\Phi_n^{mK}(\kappa, z) = 0.033 C_n^2(z) \frac{\exp(-\kappa^2/\kappa_m^2)}{(\kappa^2 + \kappa_0^2)^{11/6}}, 0 \leq \kappa < \infty \quad (11)$$

其中, $\kappa_m = 5.92/l_0$, $\kappa_0 = 2\pi/L_0$, l_0 为湍流内尺度,毫米到厘米量级; L_0 为湍流外尺度,在实际的低空大气中,外尺度 L_0 只有 0.3~0.4 m。

对于 OOK 调制编码的 FSO 通信系统,可以认为当 $\tau_{\text{atm}} > T_{\text{pulse}}$ 时发生误码, $0 < \tau_{\text{atm}} < T_{\text{pulse}}$ 时不发生误码,其中, T_{pulse} 为单脉冲周期。那么,由于到达时间起伏引起的额外误码概率 $P_{\tau_{\text{atm}}}^2$ 可表示为

$$P_{\tau_{\text{atm}}}^2 = 2 \int_{T_{\text{pulse}}}^\infty \frac{1}{2\pi\sigma_{\tau_{\text{atm}}}} \exp\left(-\frac{\tau^2}{2\sigma_{\tau_{\text{atm}}}^2}\right) d\tau \times P_{0,1} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{T_{\text{pulse}}}{\sqrt{2}\sigma_{\tau_{\text{atm}}}}\right) \quad (12)$$

其中, $P_{0,1}$ 表示通信码流中 0、1 交替的概率,近似取值为 0.5。

3 数值仿真

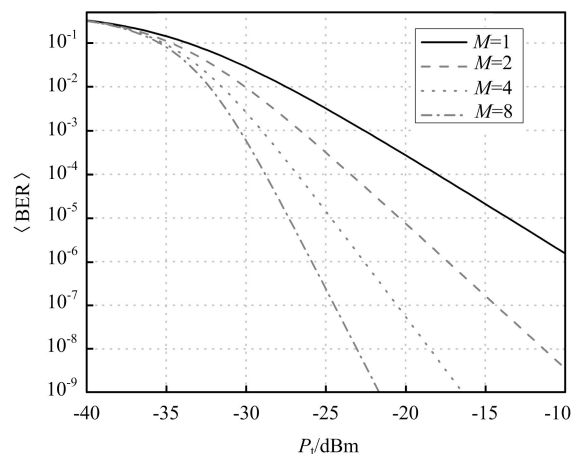
3.1 忽略 τ_{atm} 时的 BER 分析

在理想情况下,假设不同口径出射的光束同时到达接收口径面($\tau_{\text{atm}}=0$),并且各光束的光强起伏是相互独立的,此时,多口径发射系统的闪烁方差和单口径相比只差了系数 $1/M$ ^[14],即

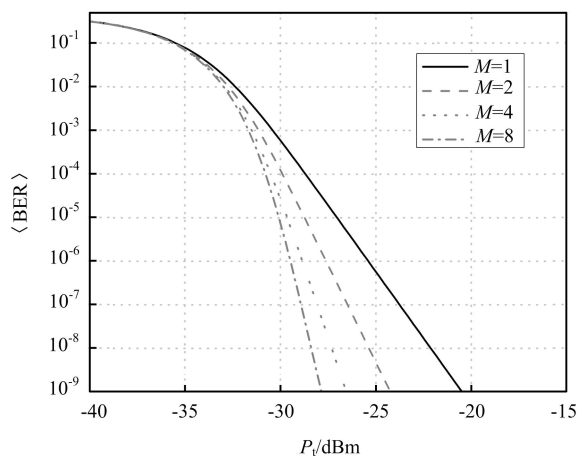
$$\sigma_{I,M}^2 = \frac{1}{M} \sigma_{I,1}^2 \quad (13)$$

其中, $\sigma_{I,M}^2$ 表示发射口径数为 M 时的闪烁方差。

由式(13)可以得到 M 发射口径系统的形状参数 $\beta_M = M^{6/11} \beta$ 。图 2 为中等湍流情况下,发射口径数不同时 $\langle \text{BER} \rangle$ 和发射功率 P_t 的关系曲线图,其中链路长度 $L=1225$ m, 大气相干长度 $\rho_0=9.27$ mm, Rytov 方差 $\sigma_r^2=1.35$, D 分别为 3 mm 和 60 mm, EW 分布湍流模型的相关参数(α , β 和 η)参照文献[13]。可以看出,在忽略



(a) $D=3$ mm



(b) $D=60$ mm

图 2 中等湍流情况下, $\langle \text{BER} \rangle$ 与发射功率 P_t 的关系曲线图

到达时间差 τ_{atm} 的情况下,随着发射口径数 M 的增加, $\langle \text{BER} \rangle$ 逐渐下降。 $D=3 \text{ mm}$ 时,每增加一倍发射口径数, $\langle \text{BER} \rangle$ 大约下降 2.5 个数量级; $D=60 \text{ mm}$ 时,同样增加一倍发射口径数, $\langle \text{BER} \rangle$ 大约下降 2 个数量级。仿真结果表明了接收口径越小,发射口径数对通信性能的改善越明显。另外,增加接收口径尺寸也可以减小 $\langle \text{BER} \rangle$ 。

3.2 考虑 τ_{atm} 时的 BER 分析

忽略传播链路上折射率结构常数 C_n^2 的数值起伏,仿真参数设定如表 1 所示。

表 1 仿真参数表

参数名称	参数值
大气折射率结构常数 $C_n^2/\text{m}^{-2/3}$	2.1×10^{-14}
湍流内尺度 l_0/mm	1
湍流外尺度 L_0/m	0.3
链路距离 L/m	1225
接收口径 D/mm	60

由式(10)计算出 $\sigma_{\tau_{\text{atm}}}$ 与发射口径间距 d 的关系如图 3 所示。可以看出,当发射口径间距 $d=0.25 \text{ m}$ 时,对应的 $\sigma_{\tau_{\text{atm}}}$ 已经趋于饱和。

对于 M 个发射口径,总误码概率为:

$$P_{e,\text{sum}} = P_e + (1 - P_e) \sum_{n=m}^M C_M^n (1 - P_{\tau_{\text{atm}}})^{M-n} P_{\tau_{\text{atm}}}^n \quad (14)$$

其中, m 为

$$m = \begin{cases} \frac{M+1}{2}, & M \text{ 是奇数} \\ \frac{M}{2} + 1, & M \text{ 是偶数} \end{cases} \quad (15)$$

当 $M=4$, $D=60 \text{ mm}$ 时,考虑到达时间差 τ_{atm} 时的平

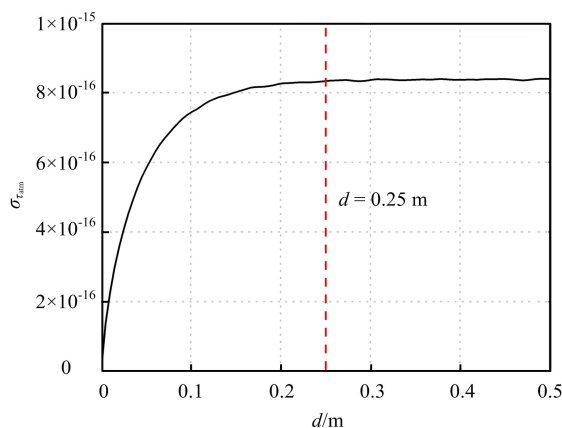


图 3 $\sigma_{\tau_{\text{atm}}}$ 与发射口径间距 d 的关系曲线图

均误码率 $\langle \text{BER} \rangle = \int_0^\infty P_{e,\text{sum}}(h) f_h(h) dh$; 忽略到达时间差

τ_{atm} 时的平均误码率 $\langle \text{BER} \rangle_0 = \int_0^\infty P_e(h) f_h(h) dh$ 。

图 4 为中等湍流情况下,不同 $T_{\text{pulse}}/\sigma_{\tau_{\text{atm}}}$ 时 $\langle \text{BER} \rangle$ 和发射功率 P_t 的关系曲线图。可以看出,当发射功率 P_t 较低时,大气湍流导致的误码率 $\langle \text{BER} \rangle_0$ 占总 $\langle \text{BER} \rangle$ 的主要部分,这时各光束的到达时间差对通信质量的影响可以忽略不计;当发射功率 P_t 逐渐增大, $\langle \text{BER} \rangle_0$ 减小得非常快,这时 τ_{atm} 引入的额外 $\langle \text{BER} \rangle$ 占主要部分,并且逐渐趋于一常数值;当发射功率 P_t 增大到某一阈值后,增加 P_t 并不能改善总体 $\langle \text{BER} \rangle$,其原因是 τ_{atm} 引入的额外 $\langle \text{BER} \rangle$ 并不依赖于发射功率的大小,它只与误码概率 $P_{\tau_{\text{atm}}}$ 和发射口径数 M 有关。

当 $T_{\text{pulse}}/\sigma_{\tau_{\text{atm}}} = 4$, $D=60 \text{ mm}$ 和发射路径数 M 不同时, $\langle \text{BER} \rangle$ 与发射功率 P_t 的关系图如图 5 所示。可以看出,当单脉冲宽度 T_{pulse} 与标准差 $\sigma_{\tau_{\text{atm}}}$ 在同一数量级时,多发射口径系统的 $\langle \text{BER} \rangle$ 可能低于单口径发射系统。

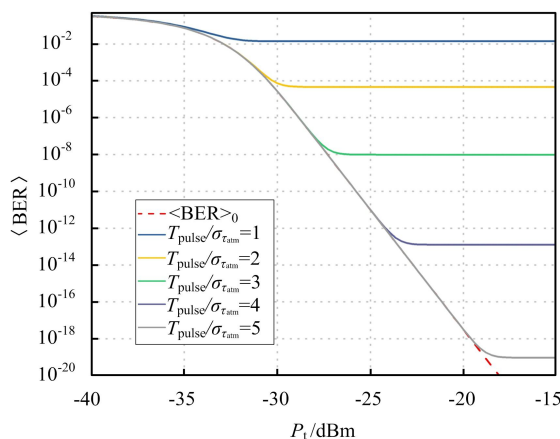


图 4 不同 $T_{\text{pulse}}/\sigma_{\tau_{\text{atm}}}$ 时, $\langle \text{BER} \rangle$ 与发射功率 P_t 的关系曲线图

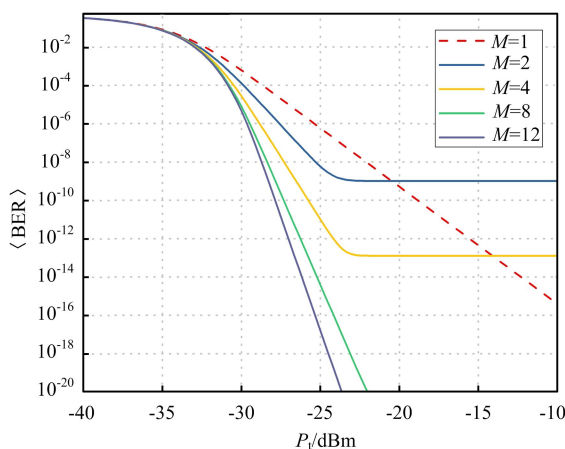


图 5 发射口径数 M 不同时, $\langle \text{BER} \rangle$ 与发射功率 P_t 的关系曲线图

假设一个链路长度为 180 km, 平均 C_n^2 为 $2 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$, 通信速率为 5 Tb/s 的超高速通信系统, 根据式(10)可以计算出标准差 $\sigma_{\tau_{\text{sum}}}$ 为 $4.8 \times 10^{-14} \text{ s}$, 则 $T_{\text{pulse}}/\sigma_{\tau_{\text{sum}}}$ 的值为 4.16, 此时图 5 的 $\langle \text{BER} \rangle$ 曲线可近似描述该系统的通信性能。

4 仿真分析

本文通过 Monte Carlo 仿真来验证数值模型计算的精度。在 $D=60 \text{ mm}$ 且中等湍流情况下, 生成符合式(4)的随机衰减系数 h , 每个 h 代表一个独立的湍流信道。为确定 h 的个数, 需预先估计 Monte Carlo 仿真的收敛速度。仿真得出的 $\langle \text{BER} \rangle$ 收敛曲线如图 6 所示。可以看出, $\langle \text{BER} \rangle$ 的期望值处在 2.09×10^{-8} 水平, 且随着随机数样本的增加, $\langle \text{BER} \rangle$ 逐渐趋近于期望值。为了同时兼顾收敛程度和计算量, 本文最终选择生成 10^5 个样本 h 。生成随机数的直方分布图如图 7 所示。

根据前文的数据, 本文仿真了 $T_{\text{pulse}}/\sigma_{\tau_{\text{sum}}}=4$, M 分别

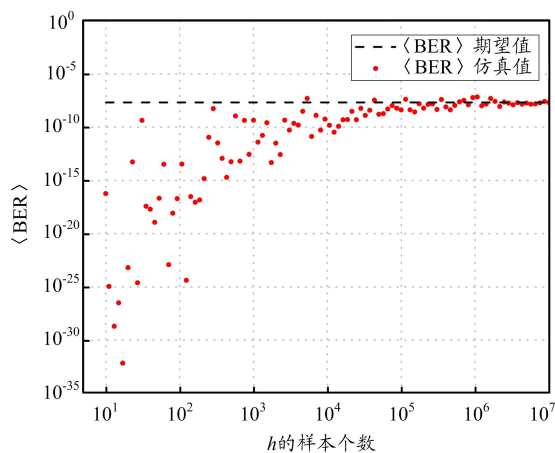


图 6 $\langle \text{BER} \rangle$ 收敛图

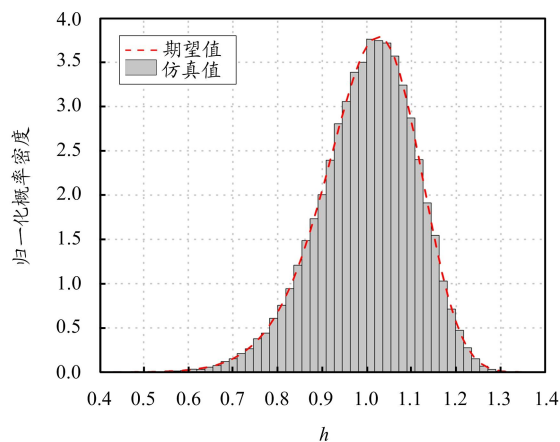


图 7 $M=4$ 时, 生成随机数 h 的直方分布图

为 2 和 4 时 $\langle \text{BER} \rangle$ 的性能, 仿真结果如图 8 所示。可以看出, Monte Carlo 的仿真结果与曲线模型十分接近, 因此 $\langle \text{BER} \rangle$ 数值模型的计算精度满足预期。

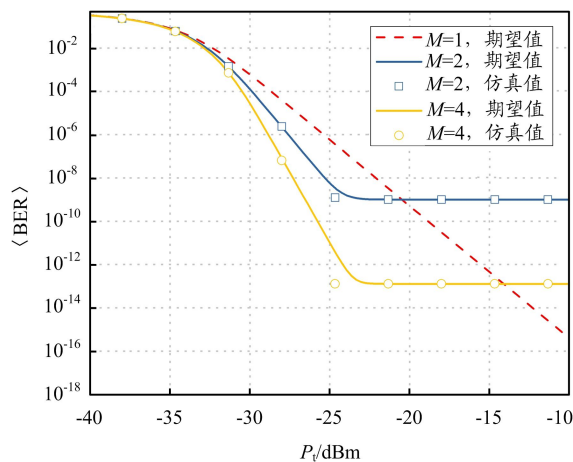


图 8 M 分别为 2 和 4 时, Monte Carlo 模拟的 $\langle \text{BER} \rangle$ 结果

5 结束语

针对多口径发射的空间激光通信系统, 本文提出了一种平均 BER 的解析表达式, 分析了发射口径数和通信速率对通信性能的影响。该系统采用 OOK 调制信号, 工作在由 EW 分布模型描述的湍流环境中。相比于传统的 Gamma-Gamma 模型, EW 分布模型能更好地描述孔径平均效应对平均 BER 的影响。数值模型计算结果表明: 低通信速率下多口径发射系统具有良好的湍流抑制能力, 超高通信速率下不同发射口径的到达时间起伏会增加系统的误码概率, 并且 Monte Carlo 仿真和数值模型计算结果具有较好的吻合性。因此, 在未来的超高速 FSO 通信系统中, 多口径发射系统带来的额外 BER 需要引起人们的关注。

参考文献:

- [1] KHALIGHI M A, UYSAL M J C S, IEEE T. Survey on free space optical communication: a communication theory perspective[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(4): 2231–2258.
- [2] ALHEADARY W G, KI-HONG P, NASIR A, et al. Free-space optical channel characterization and experimental validation in a coastal environment[J]. Optics Express, 2018, 26(6): 6614–6628.
- [3] SONG S, LIU Y, XU T, et al. Channel prediction for intelligent FSO transmission system[J]. Optics Express, 2021, 29(17): 27882–27899.
- [4] HOGAN H J A A. Data demands drive free-space optics [J]. Photon spectra, 2013, 2: 32–48.
- [5] 韩睿. 浅谈自由空间光通信技术及其应用 [J]. 中国新通信, 2018, 20(17): 120–120.
- [6] VETELINO F S, YOUNG C, ANDREWS L, et al. Aperture averaging

郭振锋, 刘波, 张昊, 等: 湍流环境中多口径发射空间激光通信系统误码率分析

effects on the probability density of irradiance fluctuations in moderate-to-strong turbulence [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(11): 2099–2108.

[7] BARRIOS R, DIOS F. Probability of fade and BER performance of FSO links over the exponentiated Weibull fading channel under aperture averaging [EB/OL]. (2012–10–09)[2021–09–06]. <https://doi.org/10.1117/12.974646>.

[8] KHALIGHI M A, SCHWARTZ N, AITAMER N, et al. Fading reduction by aperture averaging and spatial diversity in optical wireless systems [J]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 2009, 1(6): 580–593.

[9] KHODADADI H R, AYAGH M H G, MOTLAGH A C J I C. Analysis of link availability and capacity in MISO-BCH FSO systems under various turbulence conditions with pointing errors [J]. *IET Communications*, 2017, 11: 1305–1312.

[10] ANDROUTSOS N A, NISTAZAKIS H E, CHATZIKONTIS E V, et al. Spatial jitter influence on the average BLER performance of SIMO FSO links over atmospheric turbulence channels [J]. *Electronics*, 2021, 10(16): 2033–2044.

[11] BOUANNANE L, ABBOU M F, CHAATTIT F, et al. OOK-FSO com-

munication system performance in the presence of turbulence and fog [EB/OL]. [2021–09–06]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8723711>.

[12] YI X, LIU Z, YUE P J O L. Average BER of free-space optical systems in turbulent atmosphere with exponentiated Weibull distribution [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(24): 5142–5144.

[13] BARRIOS R, DIOS F J O E. Exponentiated weibull distribution family under aperture averaging for Gaussian beam waves [J]. *Optics Express*, 2012, 20(12): 13055–13064.

[14] ANDREWS L C, PHILLIPS R L. *Laser beam propagation through random media*[M]. Second Edition. Bellingham: SPIE PRESS, 2005.

[15] GRADSHTEYN I S, RYZHIK I M J M O C. Table of integrals, series, and products [J]. *Mathematics of Computation*, 2007, 20(96): 1157–1160.

[16] ANGUITA J A, NEIFELD M A, VASIC B V J A O. Spatial correlation and irradiance statistics in a multiple-beam terrestrial free-space optical communication link[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(26): 6561–6571.

[17] BELMONTE A, TAYLOR M T, HOLLBERG L, et al. Effect of atmospheric anisoplanatism on earth-to-satellite time transfer over laser communication links[J]. *Optics Express*, 2017, 25(14): 15676–15686.