



DOI: 10.12086/oe.2018.170540

Exponentiated Weibull 大气湍流下 PSK-OFDM 机载光链路性能分析

张 韵, 王 翔, 赵尚弘*, 蒙 文, 赵 静

空军工程大学信息与导航学院, 陕西 西安 710077

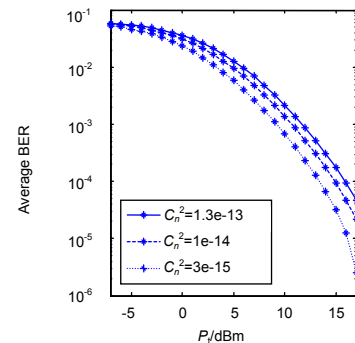
摘要: 本文研究了指向误差、气动光学效应及 Exponentiated Weibull 大气湍流联合效应对 OFDM 光链路通信性能的影响。其中 OFDM 链路采用 PSK 调制, 应用 Meijer G 函数推导得到多载波条件下总平均误码率的闭合表达式。根据平均误码率闭合表达式进行了仿真, 分析了不同大气湍流强度、PSK 调制阶数、抖动标准差和波束宽度对误码率的影响。通过仿真分析证明基于 Exponentiated Weibull 大气湍流模型, 在不同湍流强度条件下误码率随着发射功率的增加改善近似。当抖动标准差小于 0.7 及调制阶数小于 4 时, 增大发射功率对改善链路误码率效果明显。

关键词: 误码率; Exponentiated Weibull 分布; 指向误差; 正交频分复用; PSK

中图分类号: TN929.1

文献标志码: A

引用格式: 张韵, 王翔, 赵尚弘, 等. Exponentiated Weibull 大气湍流下 PSK-OFDM 机载光链路性能分析[J]. 光电工程, 2018, 45(2): 170540



BER performance for PSK-OFDM optical link over Exponentiated Weibull atmospheric turbulence

Zhang Yun, Wang Xiang, Zhao Shanghong*, Meng Wen, Zhao Jing

Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China

Abstract: Aiming at the combined effects of the Exponentiated Weibull atmosphere turbulence, aero-optical effects and pointing errors on space optical links, the bit error rate (BER) performance of the orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) optical communication link is investigated. OFDM links adopted PSK modulation. The closed-form expression for average bit error rate is derived based on a Meijer's G function. The relationship between the BER performance and the transmitted optical power under different parameters such as the atmosphere turbulence, the normalized jitter standard deviation and the normalized beam-width is analyzed by simulation. The results show that the BER performance is similarly improved in different intensity turbulence by increasing the transmitted optical power. The BER performance is obviously improved by increasing the transmitted optical power when the normalized jitter standard deviation is less than 0.7 and the modulation order is less than 4.

Keywords: Exponentiated Weibull distribution; pointing error; orthogonal frequency division multiplexing; PSK

Citation: Zhang Y, Wang X, Zhao S H, et al. BER performance for PSK-OFDM optical link over Exponentiated Weibull atmospheric turbulence[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(2): 170540

收稿日期: 2017-09-18; 收到修改稿日期: 2017-12-28

作者简介: 张韵(1995-), 女, 硕士, 主要从事航空光通信的研究。E-mail: rhyme0115@126.com

通信作者: 赵尚弘(1964-), 男, 博士, 教授, 主要从事激光空间信息技术的研究。E-mail: zhaoshangh@aliyun.com

1 引言

激光通信具有带宽宽、速率高、部署快速简便、频带免费等优点，与传统射频通信相比具有更广泛的应用前景^[1-2]。然而在航空激光通信中，飞机一般飞行高度为 7 km~10 km，航空激光链路极易受到大气湍流的影响导致接收端光强的起伏变化，同时，飞机周围的大气附面层产生的气动光学效应也会对激光信号的传输造成不良影响^[3-4]。

正交频分复用(Orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)是一种多载波调制方式，将多个独立的数据流通过频率不同的多个副载波进行调制，具有良好的抗频率选择性衰落，抗窄带干扰及信道利用率高的特点^[5]。OFDM 副载波可以采用多种不同的调制方式，其中两种主要的调制方式为多电平正交幅度调制(multiple quadrature amplitude modulation, MQAM)和多进制相移键控调制(multiple phase shift keying, MPSK)。正交幅度调制(quadrature amplitude modulation, QAM)解调器需同时正确检测相位和幅度，而相移键控(phase shift keying, PSK)解调只需检测相位^[6]。因此，本文讨论副载波采用 PSK 的 OFDM 调制方式。基于 Gamma-Gamma 大气湍流分布模型，文献^[7]和文献^[8]分别分析了仅大气湍流条件和联合大气湍流及指向误差条件下，M-QAM 调制下 OFDM 链路的平均误码率；文献^[9]基于 Lognormal 分布的弱大气湍流模型，研究了非对称限幅光 OFDM 系统在开关键控(on off keying, OOK)调制方式下的误码性能。以上研究中大气湍流模型采用适用范围受限的 Lognormal 分布模型或者 Gamma-Gamma 分布模型。2012 年，Barrios R 和 Dios F 首次提出了适用于弱到强湍流及孔径平均条件下的新型 Exponentiated Weibull 大气湍流模型^[10-11]。因此本文针对航空激光通信特点，基于 Exponentiated Weibull 分布大气湍流模型，联合指向误差对采取 PSK 调制方式的 OFDM 系统性能进行研究。

本文首先给出 Exponentiated Weibull 分布大气湍流衰减模型及 OFDM 链路模型，考虑大气湍流和指向误差对误码率的影响，利用 Meijer G 函数推导出 OFDM 链路平均误码率的闭合表达式，最后通过闭合表达式进行仿真，分析了不同参数与误码率的关系。

2 理论推导

OFDM 是一种多载波调制的高速数据传输方式，将高速的串行数据流划分为并行的低速数据流通过若

干窄带副载波进行传输。发送端及接收端通过快速逆傅里叶变换(inverse fast Fourier transform, IFFT)和傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)产生相互正交的副载波及恢复原信号^[5, 8]。

假设 OFDM 信号包含 N 个副载波，通过上变换至载波频率 f_c ，公式表达为^[5, 8]：

$$S_{\text{OFDM}}(t) = \sum_{n=0}^{N-1} S_n(t) = \sum_{n=0}^{N-1} X_n \exp[i(\omega_n + 2\pi f_c t)], 0 \leq t \leq T_s, \quad (1)$$

式中： $\{\omega_n = 2\pi n/T_s, n=0, 1, \dots, N-1\}$ 为一组正交载波频率， T_s 为 OFDM 符号持续时间， $X_n = a_n + ib_n$ 为第 n 个副载波的复数据信号。 $S_{\text{OFDM}}(t)$ 信号用来调制 LD 的光强度，忽略 LD 的非线性因素，LD 的光功率输出 $P(t)$ 公式表示为^[5, 8]

$$P(t) = P_t \left[1 + \sum_{n=0}^{N-1} m_n S_n(t) \right], \quad (2)$$

式中： P_t 为平均发送光功率； m_n 为第 n 个子载波的光调制系数，总光调制系数 m_{total} 表示为^[5, 8]

$$m_{\text{total}} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{n=0}^{N-1} m_n^2}. \quad (3)$$

为简化运算假设所有副载波的调制系数相同^[5, 8]：

$$m_n = \frac{m_{\text{total}}}{\sqrt{N}}. \quad (4)$$

副载波在频率为 ω_n 的信号功率为^[5, 8]

$$C = \frac{1}{2} m_n^2 I_0^2. \quad (5)$$

接收端每一个副载波的载波噪声比(CNR_n ，用 R_{CNR_n} 表示)定义如下^[6]：

$$R_{CNR_n}(h) = \frac{C(h)}{\langle \sigma_n^2 \rangle}, \quad (6)$$

其中： σ_n^2 为每个子载波高斯白噪声的平均功率， $C(h) = \frac{1}{2} m_n^2 I^2(h)$ ， $I(h) = Rh$ 为光电流强度， R 为光电转换系数。

3 信道模型

3.1 气动光学效应影响模型

靠近机身几厘米处一般为高速飞行的航空节点周围的附面层，可通过薄相位屏进行建模，利用折射率结构函数的 Kolmogorov 谱模型和折射率结构常量 $C_{n,\text{acro}}^2$ 对相位屏进行描述。

本文考虑基模 TEM₀₀ 高斯光束，在气动光学效应下，长期光束半径可表示为^[10]

$$W_{LT} = W \sqrt{1 + 1.33\sigma_R^2 A^{5/6} + T_{aero}} \\ = W \sqrt{1 + 1.33\sigma_R^2 A^{5/6} + 1.93\sigma_{R,aero}^2 A^{5/6}}, \quad (7)$$

其中： W 定义为无扰动条件下仅考虑衍射效应的光斑半径； $T_{aero} = 1.93\sigma_{R,aero}^2 A^{5/6}$ ， A 为接收端衍射光束参数；参数 $\sigma_{R,aero}^2$ 是仅考虑附面层影响的修正 Rytov 方差，有 $\sigma_{R,aero}^2 = 1.23C_{n,aero}^2 k^{7/6} L^{11/6}$ ， $C_{n,aero}^2$ 是气动光学影响折射率结构常量，本文设 $C_{n,aero}^2 = 2 \times 10^{-16} \text{m}^{-2/3}$ 。参数 $\sigma_{R,aero}^2$ 是 Rytov 指数时，对应于弱起伏条件下的归一化光强起伏方差， C_n^2 是大气湍流折射率结构参数。

根据 Rytov 理论及 Kolmogorov 激光湍流功率谱模型，可得沿光轴方向上接收端高斯光束的闪烁指数^[10]：

$$\sigma_B = 3.86\sigma_R^2 \text{Re} \left[i^{5/6} {}_2F_1 \left(-\frac{5}{6}, \frac{11}{6}; \frac{17}{6}; 1 - \Theta + iL \right) \right] \\ - 2.64\sigma_R^2 A^{5/6}, \quad (8)$$

式中： Re 代表函数的实部， ${}_2F_1(a, b; c; x)$ 为广义超几何函数。

在气动光学效应影响下，上式可表示为^[11]

$$\sigma_B = \sigma_{aero}^2(L) + 3.86\sigma_R^2 \text{Re} \left[i^{5/6} {}_2F_1 \left(-\frac{5}{6}, \frac{11}{6}; \frac{17}{6}; 1 - \Theta + iL \right) \right] \\ - 2.64\sigma_R^2 A^{5/6}, \quad (9)$$

$$\sigma_{aero}^2(L) = 3.87\sigma_{R,aero}^2 \left\{ (\Theta^2 + A^2)^{5/12} \times \cos \left[\frac{5}{6} \arctan \left(\frac{\Theta}{A} \right) \right] - A^{5/6} \right\}. \quad (10)$$

当接收端孔径为一固定长度 D ，则接收端焦平面上相应的总闪烁指数为

$$\sigma_{\ln X}(0, L, D) = \exp[\sigma_{\ln X}^2(D) + \sigma_{\ln Y}^2(D)] - 1, \quad (11)$$

其中： $\sigma_{\ln X}^2(D)$ 、 $\sigma_{\ln Y}^2(D)$ 分别为大尺度和小尺度对数光强方差，为了简化式子，设 $\zeta = \frac{1}{3} - \frac{1}{2}\bar{\theta} + \frac{1}{5}\bar{\theta}^2$ ，

$\nu = 1 + \bar{\theta}$ ， $\rho = 2 - \bar{\theta}$ ，具有以下形式：

$$\sigma_{\ln X}^2(D) = \frac{0.49 \left(\frac{\Omega - A}{\Omega + A} \right)^2 \sigma_B^2}{\left[1 + \frac{0.4\rho}{(\Omega + A)\zeta^{\frac{6}{7}}} \left(\frac{\sigma_B}{\sigma_R} \right)^{\frac{12}{7}} + 0.56 \cdot \nu \cdot \sigma_B^{\frac{12}{5}} \right]^{\frac{7}{6}}}, \quad (12)$$

$$\sigma_{\ln Y}^2(D) = \frac{0.51\sigma_B^2}{\left(1 + 0.69\sigma_B^{\frac{12}{5}} \right)^{5/6} \left[1 + \frac{1.20(\sigma_R/\sigma_B)^{12/5} + 0.83\sigma_B^{12/5}}{\Omega + A} \right]}, \quad (13)$$

其中 $\Omega = \frac{16L}{kD^2}$ 。

3.2 Exponentiated Weibull 分布模型

现有的激光链路的大气湍流模型大多基于 Lognormal 分布模型和 Gamma-gamma 分布模型。但上述两种模型的适用范围不同，Lognormal 模型适用于弱湍流条件，Gamma-Gamma 模型适用于中强湍流条件。2012 年，Barrios R 和 Dios F 首次提出了全新的适用于弱到强湍流及孔径平均下的 Exponentiated Weibull 分布模型，故本文采用 Exponentiated Weibull 分布模型^[12]。

$$f_{h_t}(h_t) = \frac{\alpha\beta}{\eta} \left(\frac{h_t}{\eta} \right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{h_t}{\eta} \right)^\beta \right] \\ \times \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{h_t}{\eta} \right)^\beta \right] \right\}^{\alpha-1}, \quad (14)$$

其中： h_t 为信道衰减因子， $\alpha > 0$ ， $\beta > 0$ ； η 为与光强有关参数，且 $\eta > 0$ ，通过曲线拟合的方法得到经验公式：

$$\alpha \cong \frac{7.220\sigma_1^{2/3}}{\Gamma \cdot (2.487\sigma_1^{2/6} - 0.104)}, \quad (15)$$

$$\beta \cong 1.012(\alpha\sigma_1^2)^{-13/25} + 0.142, \quad (16)$$

$$\eta = \frac{1}{\alpha \cdot \Gamma(1 + 1/\beta) \cdot g_1(\alpha, \beta)}, \quad (17)$$

其中 $g_n = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(-1)^i \Gamma(\alpha)}{i!(i+1)^{1+n/\beta} \Gamma(\alpha-i)}$ 。

3.3 指向误差

系统中大气湍流与链路指向误差共同影响接收光信号的强度，由指向误差理论可知光链路指向误差因子 h_p 的概率密度函数可表示为^[14]

$$f_{h_p}(h_p) = \frac{\varepsilon^2}{A_0 \varepsilon^2} h_p^{\varepsilon^2-1}, \quad 0 \leq h_p \leq A_0, \quad (18)$$

$$\nu = \frac{\sqrt{\pi}r}{\sqrt{2}w_z}, \quad (19)$$

$$w_{z,eq}^2 = \frac{w_z^2 \sqrt{\pi} \cdot \text{erf}(\nu)}{2\nu \cdot \exp(-\nu^2)}, \quad (20)$$

其中： ε 为接收端处等效光束半径与指向误差偏移量标准差之间的比值， $\varepsilon = w_{z,eq}/(2\sigma_s)$ ， $A_0 = [\text{erf}(\nu)]^2$ ， $w_{z,eq}$ 为接收端等效波束宽度， $\text{erf}(\cdot)$ 为误差函数， σ_s 为接收端处指向误差偏移量标准差(抖动)， w_z 为距离 z 处波束宽度， $w_z = \theta z$ ； θ 为光束发散角； r 为接收机半径。

3.4 联合效应模型

信道衰减因子 $h = h_t h_p$ 的联合概率密度函数可计算为^[14]

$$f_h(h) = \int_{h/A_0}^{\infty} \frac{1}{h_t} f_{h_p} \left(\frac{h}{h_t} \right) f_{h_t}(h_t) dh_t. \quad (21)$$

利用 Meijer G 函数的性质^[16]推导得信道衰减因子 h 的联合概率密度函数的闭合表达式为

$$f_h(h) = \frac{\alpha \cdot \varepsilon^2 \cdot h^{\varepsilon^2-1}}{(\eta \cdot A_0)^{\varepsilon^2}} \cdot \sum_{j=0}^{\infty} \frac{(-1)^j}{j! \Gamma(\alpha-j)(\kappa)} G_{1,2}^{2,0} \left(\frac{\kappa \cdot h^\beta}{(\eta A_0)^\beta} \middle| 0, 1 - \frac{\varepsilon^2}{\beta} \right). \quad (22)$$

其中： $\kappa=1+j$ 。

4 链路性能

OFDM 信号包含 N 个副载波，采用 M-PSK 调制方式，每个副载波误码率表示为 $P_{e,n}$ ，公式表示为^[5-6,15]

$$P_{e,n} = 2Q \left[\sqrt{2K \cdot R_{CNn}(h)} \sin \frac{\pi}{M} \right], \quad (23)$$

式中： M 为调制阶数， $M=2^K$ ， K 是偶数。

当副载波数量很大时，OFDM 链路的总平均误码率为^[5-6,15]

$$P_{e,n} = \frac{2}{N \log_2 M} \sum_{n=0}^{N-1} Q \left[\sqrt{2KR_{CNn}(h)} \sin \frac{\pi}{M} \right]. \quad (24)$$

根据信道衰减因子 h 的联合概率密度函数，OFDM 链路总平均误码率 $P_{e,av}$ 可计算为^[5-6,15]：

$$P_{e,av} = \frac{2}{N \log_2 M} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} \int_0^{\infty} f(h) Q \left[\sqrt{2K \cdot R_{CNn}(h)} \sin \frac{\pi}{M} \right] dh, \quad (25)$$

式中 Q 函数与互补误差函数的关系为

$$2Q(\sqrt{2}Z) = \text{erfc}(Z). \quad (26)$$

$\text{erfc}(\cdot)$ 用 Meijer G 函数表达为^[16]

$$\text{erfc}(\sqrt{Z}) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} G_{1,2}^{2,0} \left(Z \middle| 0, 1/2 \right). \quad (27)$$

综合考虑大气湍流及指向误差对误码率的影响，将式(6)、式(22)代入式(25)，结合式(26)、式(27)，利用 Meijer G 函数的性质^[14]，可推导出总平均误码率 P_e 闭合表达式为式(28)。式中： $\Delta(K,A)=A/K, (A+1)/K, \dots, (A+K-1)/K$ ， l 和 k 为满足 $l/k=\beta/2$ 的整数。

5 结论

为了研究不同参数对系统平均误码率的影响，根据推导的闭合表达式(21)进行仿真分析。表 1 为系统设置参数。文中取 OFDM 信号副载波数 $N=1000$ ，每一副载波调制系数均为 $m_n=0.002$ 。

$$P_e = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{(-1)^j \alpha \varepsilon^2 k^{\frac{1}{2} - \frac{\varepsilon^2}{\beta}} l^{\frac{\varepsilon^2}{2} - 1}}{2M \log_2(M) j! \sqrt{\pi} (\eta A_0)^{\varepsilon^2} \Gamma(\alpha-j)(1+j)^{1 - \frac{\varepsilon^2}{\beta}}} \left(\frac{K m_n^2 R^2 \sin^2 \frac{\pi}{M}}{2\sigma_n^2} \right)^{\frac{\varepsilon^2}{2}} \cdot G_{k+2l, 2k+l}^{2k, 2l} \left(\frac{(1+j)^k}{(\eta A_0)^{\beta k} k^k} \middle| \Delta(k,1) \Delta(l,1-0.5\varepsilon^2) \Delta(l,0.5-0.5\varepsilon^2) \right. \\ \left. \left(\frac{K m_n^2 R^2 \sin^2 \frac{\pi}{M}}{2\sigma_n^2 l} \right)^l \middle| \Delta(k,0) \Delta(k,0.5) \Delta(l,-0.5\varepsilon^2) \right). \quad (28)$$

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameter

参数	值
波长(λ)/nm	1550
OFDM 信号持续时间(T_s)/ms	1
接收孔径/cm	10
PD 负载阻抗(R_L)/ Ω	50
PD 响应度(ρ)/(R/A/W)	0.8

图 1 为在中湍流强度 $C_n^2=1\times 10^{-14}$, 副载波采用 4-PSK 调制方式, $\sigma_s/r=0.5$, $w_z/r=1$ 时, 不同传输距离下, 误码率随发射功率的变化关系。由图可知, 同一发射功率下, 误码率随着传输距离的增加而增加, 在同一传输距离条件下, 误码率随着信噪比的增加而降低。 $P_t=0$ dBm 时, $L=50$ km, 60 km, 70 km 误码率分别为 $P_e=3.073\times 10^{-2}$, $P_e=3.679\times 10^{-2}$, $P_e=4.456\times 10^{-2}$ 。 $P_t=5$ dBm 时, $P_e=9.56\times 10^{-3}$, $P_e=1.375\times 10^{-2}$, $P_e=2.114\times 10^{-2}$ 。发射功率增加 5 dBm, 误码率降低约一个量级。

图 2 为 $L=50$ km, $M=4$, $\sigma_s/r=0.5$, $w_z/r=1$ 时, 不同大气湍流强度下, 误码率随发射功率的变化关系。由图可知, 在弱湍流时, $P_t=0$ dBm, $P_e=2.343\times 10^{-2}$; $P_t=5$ dBm, $P_e=5.788\times 10^{-3}$; $P_t=10$ dBm, $P_e=6.691\times 10^{-4}$ 。在中湍流时, $P_t=0$ dBm, $P_e=3.073\times 10^{-2}$; $P_t=5$ dBm, $P_e=9.56\times 10^{-3}$; $P_t=10$ dBm, $P_e=1.38\times 10^{-3}$ 。在强湍流时, $P_t=0$ dBm, $P_e=3.56\times 10^{-2}$; $P_t=5$ dBm, $P_e=1.284\times 10^{-2}$; $P_t=10$ dBm, $P_e=2.156\times 10^{-3}$ 。可知发射功率每增加 5 dBm, 误码率约降低一个数量级。基于 Exponentiated Weibull 大气湍流模型, 在弱中强湍流强度下, 随发射功率增加误码率改善近似。同一发射功率湍流越小, 系统性能越好。

图 3 仿真了中湍流强度 $L=50$ km, $C_n^2=1\times 10^{-14}$,

$\sigma_s/r=0.5$, $w_z/r=1$ 时, 不同调制阶数 $M=2,4,8$ 下, 误码率随发射功率的变化关系。由图可知, 同一调制阶数下, 误码率随着发射功率的增加而降低。在 $P_t=5$ dBm 的条件下, $M=2$ 时, $P_e=5.428\times 10^{-3}$; $M=4$, $P_e=9.56\times 10^{-3}$; $M=8$, $P_e=1.625\times 10^{-2}$, 即同一发射功率下, 误码率随着调制阶数的减小而降低。发射功率每增加 5 dBm, 误码率约降低 1 个量级。

图 4 为在中湍流强度 $C_n^2=1\times 10^{-14}$, 调制阶数 $M=4$, 接收端处波束宽度与接收机半径比值为 $w_z/r=1$ 时, 在不同接收端处抖动标准差与接收机半径的比值 σ_s/r 条件下, OFDM 链路平均误码率与发射功率的关系。从图中可以看出, 随着接收端处抖动标准差与接收机半径的比值 σ_s/r 增大, 误码率增大, 这是由于 σ_s/r 的增大表明指向误差对链路的影响越强, 故误码率越大。在 $P_t=5$ dBm 的条件下, 当 $\sigma_s/r=0.5$ 时, 链路的平均误码率为 1.38×10^{-3} , 当 $\sigma_s/r=0.7$, $P_e=4.096\times 10^{-3}$ 增加了约 0.5 个量级; 当 $\sigma_s/r=1$, $P_e=9.701\times 10^{-3}$, 增加了约 0.5 个量级。所以采取一定的措施减少指向误差对链路的影响, 可提高系统的通信性能。由图可知, 同一 σ_s/r 值下, 误码率随着发射功率的增大而减小。当 $\sigma_s/r=0.5$ 时增大发射功率对降低链路平均误码率较为明显, 发射功率每增加 5 dBm, 误码率降低 1.5 个量级。

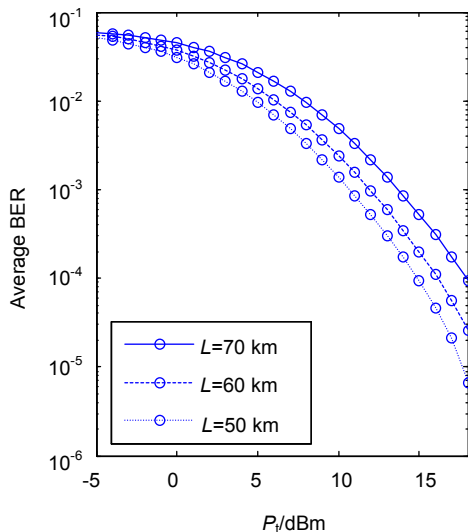


图 1 当 $C_n^2=1\times 10^{-14}$, $M=4$, $\sigma_s/r=0.5$, $w_z/r=1$ 时, 不同传输距离下平均误码率与发射功率的关系

Fig. 1 Average BER versus the transmitted power P_t for the different propagation distance when M is 4, $C_n^2=1\times 10^{-14}$, the normalized jitter σ_s/r is 0.5 and the normalized beam width w_z/r is 1

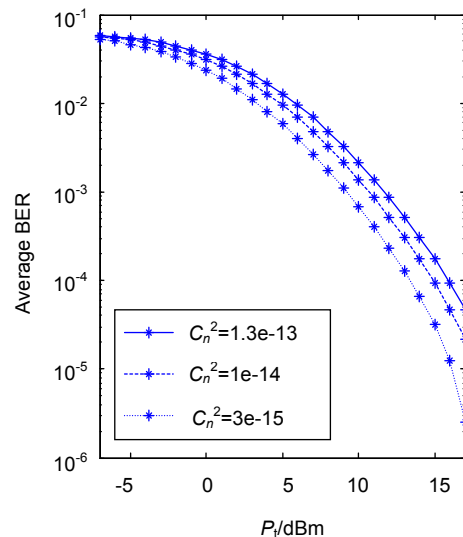


图 2 当 $L=50$ km, $M=4$, $\sigma_s/r=0.5$, $w_z/r=1$ 时, 不同湍流强度下的平均误码率与发射功率的关系

Fig. 2 Average BER versus the transmitted power P_t for the different turbulence strengths when L is 50 km, M is 4, the normalized jitter σ_s/r is 0.5 and the normalized beam width w_z/r is 1

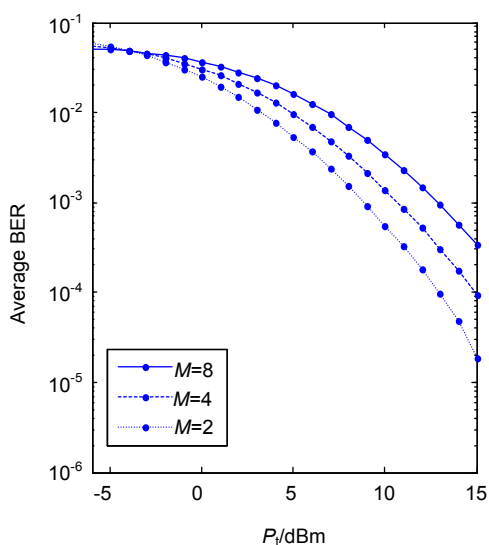


图 3 当 $L=50$ km, $C_n^2=1\times 10^{-14}$, $\sigma_s/r=0.5$, $w_z/r=1$ 时, 副载波不同 M-PSK 调制下的平均误码率与发射功率关系
Fig. 3 Average BER versus the transmitted power P_t for M-PSK when L is 50 km, the normalized jitter σ_s/r is 0.5 and the normalized beam width w_z/r is 1, C_n^2 is 1×10^{-14}

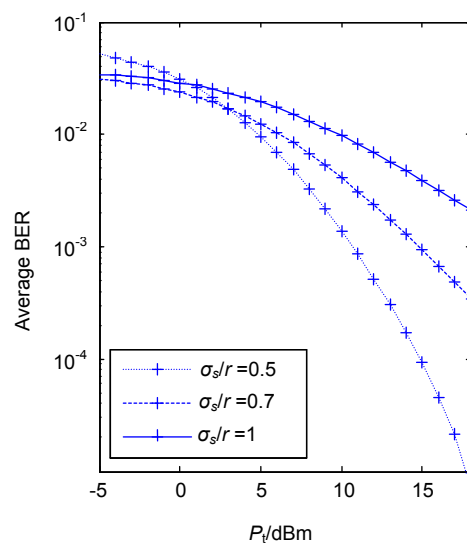


图 4 当 $L=50$ km, $C_n^2=1\times 10^{-14}$, $M=4$, $w_z/r=1$ 时, 不同 σ_s/r 比值下的平均误码率与发射功率的关系
Fig. 4 Average BER versus the transmitted power P_t for the different normalized jitter when L is 50 km, M is 4 and the normalized beam width w_z/r is 2, C_n^2 is 1×10^{-14}

图 5 为在中湍流强度 $L=50$ km, $C_n^2=1\times 10^{-14}$, 调制阶数 $M=4$, $\sigma_s/r=0.5$ 条件下, 不同接收端处波束宽度与接收机比值 w_z/r 时 OFDM 链路平均误码率与发射功率的关系。由图可知, 随着 w_z/r 增大即几何传播损耗

增大, 链路误码率增加。增大发射功率可以补偿几何传播损耗对链路性能造成的影响, 降低链路平均误码率。 $P_t < 12$ dBm 时, $w_z/r=1$, $w_z/r=1.2$, $w_z/r=1.5$ 时, 功率增大对误码率的影响效果近似相同。

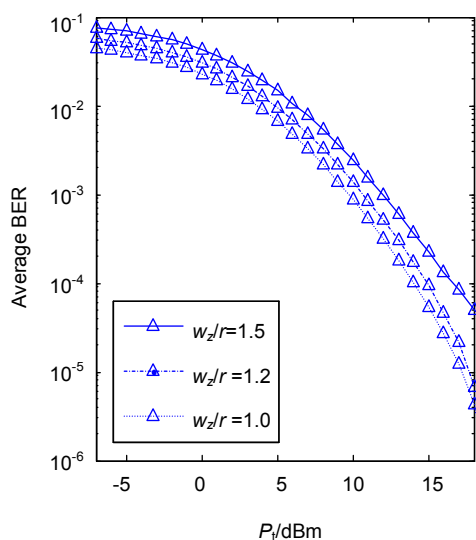


图 5 当 $L=50$ km, $C_n^2=1\times 10^{-14}$, $M=4$, $\sigma_s/r=0.5$ 时, 不同 w_z/r 比值下的平均误码率与发射功率的关系
Fig. 5 Average BER versus the transmitted power P_t for the different normalized beam width when L is 50 km, M is 4 and the normalized jitter σ_s/r is 0.5, C_n^2 is 1×10^{-14}

6 结 论

本文以 Exponentiated Weibull 分布为大气湍流衰减模型, 联合指向误差及大气衰减因素推导出 M-PSK 调制下 OFDM 链路的平均误码率的闭合表达式, 并根据表达式进行仿真, 分析了联合大气湍流及指向误差影响下不同性能参数对误码率的影响。由仿真分析可知, 随着距离增加, 湍流强度加强、PSK 调制阶数增大、接收端处波束宽度与接收机半径比值上升、接收端处波束宽度与接收机比值的增加, 误码率随之增加, 系统性能不断恶化, 指向误差对系统性能恶化作用明显。在实际应用中, 可以利用推导的平均误码率闭合表达式, 估计系统性能, 为航空激光通信系统的设计提供参考。

参考文献

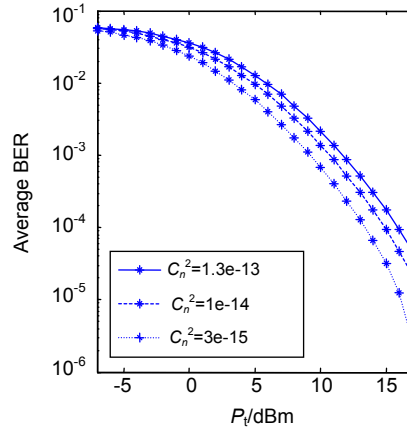
- [1] Puri P, Garg P, Aggarwal M. Outage and error rate analysis of network-coded coherent TWR-FSO systems[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(18): 1797-1800.
- [2] Zvanovec S, Perez J, Ghassemlooy Z, et al. Route diversity analyses for free-space optical wireless links within turbulent

- scenarios[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(6): 7641–7650.
- [3] Vetelino F S, Young C, Andrews L. Fade statistics and aperture averaging for Gaussian beam waves in moderate-to-strong turbulence[J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(18): 3780–3790.
- [4] Perlot N, Fritzsche D. Aperture averaging: theory and measurements[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, **5338**: 233–242.
- [5] Mostafa A, Hranilovic S. In-field demonstration of OFDM-Over-FSO[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, **24**(8): 709–711.
- [6] Shou Q, Zhang T, Wang H. Analysis of BER performance in free-space optical MIMO-OFDM communication systems over the Gamma-Gamma atmospheric turbulence[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, **50**(2): 020602.
寿钦, 张涛, 王涵. Gamma-Gamma 大气湍流下自由空间光通信 MIMO-OFDM 系统误比特率分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, **50**(2): 020602.
- [7] Bekkali A, Naila C B, Kazaura K, et al. Transmission analysis of OFDM-based wireless services over turbulent Radio-on-FSO links modeled by Gamma-Gamma distribution[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2010, **2**(3): 510–520.
- [8] Ding X F, Zhao S H, Wang X, et al. BER performance for HAP OFDM optical link with M-QAM[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2017, **31**(5): 669–675.
丁西峰, 赵尚弘, 王翔, 等. M-QAM 调制下高空平台 OFDM 光链路误码性能[J]. *电子测量与仪器学报*, 2017, **31**(5): 669–675.
- [9] Wang Y, Cao J N. Performance analysis of atmospheric laser communication system based on asymmetrically clipped optical orthogonal frequency division multiplexing intensity modulation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(1): 36–40.
王勇, 曹家年. 大气激光通信非对称限幅光正交频分复用技术[J]. *光子学报*, 2011, **40**(1): 36–40.
- [10] Andrews L C, Phillips R L. *Laser beam propagation through random media*[M]. 2nd ed. Bellingham: SPIE Press, 2005.
- [11] Phillips R L, Andrews L C. FSO communications: atmospheric effects for an airborne backbone[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, **6951**: 695102.
- [12] Barrios R, Dios F. Exponentiated Weibull distribution family under aperture averaging for Gaussian beam waves[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(12): 13055–13064.
- [13] 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**: 12–20.
- [14] 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): 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.
- [15] Wang H, Zhang T, Li S. Bit-error-rate analysis of FSO-OFDM modulation system over Gamma-Gamma atmospheric turbulence[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(11): 110102.
王涵, 张涛, 李莎. Gamma-Gamma 大气湍流下 FSO-OFDM 调制系统误码率分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(11): 110102.
- [16] 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.
- [17] 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.

BER performance for PSK-OFDM optical link over Exponentiated Weibull atmospheric turbulence

Zhang Yun, Wang Xiang, Zhao Shanghong*, Meng Wen, Zhao Jing

Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China



Average BER versus the transmitted power P_t for the different turbulence strengths when L is 50 km, M is 4, the normalized jitter σ_s/r is 0.5 and the normalized beam width w_z/r is 1.

Overview: Laser communication has many advantages, such as large bandwidth, high speed, fast and simple deployment and free band. Compared with traditional radio communication, it has a wider application prospect in civilian and military applications. However, in aviation laser communication, aircraft flight at an altitude of 7 km~10 km, airborne laser link is extremely easy to be influenced by the atmospheric turbulence intensity fluctuation in the receiving end, at the same time, the atmospheric boundary layer around the plane generated by the aero optical effects on the laser signal transmission will be affected. Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) is a multi carrier modulation mode, which modulates multiple independent data streams through multiple subcarriers with different frequencies. It has good anti frequency selective fading, narrow band interference and high channel utilization. OFDM subcarrier can use many different modulation modes. The two main modulation modes are multilevel quadrature amplitude modulation (MQAM) and multiple phase-shift keying modulation (MPSK). The quadrature amplitude modulation (QAM) demodulator needs to detect the phase and amplitude at the same time, and phase shift keying (PSK) demodulation only needs to detect the phase. In 2012, Barrios R and Dios F first proposed the Exponentiated Weibull atmospheric turbulence model for the weak to strong turbulence and the average aperture. Therefore, aiming at the characteristics of Aeronautical laser communication, based on the Exponentiated Weibull distribution atmospheric turbulence model, the joint pointing error is used to study the performance of OFDM system with PSK modulation mode. Aiming at the combined effects of the Exponentiated Weibull atmosphere turbulence, aero-optical effects and pointing errors on space optical links, the bit error rate (BER) performance of the OFDM optical communication link is investigated. OFDM links adopted PSK modulation. The closed-form expression for average bit error rate is derived based on a Meijer's G function. The relationship between the BER performance and the transmitted optical power under different parameters such as the atmosphere turbulence, the normalized jitter standard deviation and the normalized beam-width is analyzed by simulation. The results show that the BER performance is similarly improved in different intensity turbulence by increasing the transmitted optical power. The BER performance is obviously improved by increasing the transmitted optical power when the normalized jitter standard deviation is less than 0.7 and the modulation order is less than 4. In practical application, the derived average error rate closed expression can be used to estimate the performance of the system and provide reference for the design of the aviation laser communication system.

Citation: Zhang Y, Wang X, Zhao S H, *et al.* BER performance for PSK-OFDM optical link over Exponentiated Weibull atmospheric turbulence[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(2): 170540

* E-mail: rhyme0115@126.com