

基于 Exponentiated Weibull 模型的 M-PPM 调制空间光链路误码性能

张 韵, 赵尚弘, 王 翔, 蒙 文, 赵 静, 丁西峰
(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 Exponentiated Weibull 大气湍流下光链路误码性能, 考虑大气湍流和指向误差对误码率的联合影响, 利用 Meijer's G 函数推导出误码率的闭合表达式。根据误码率闭合表达式进行了仿真, 分析了在不同大气湍流强度、PPM 调制阶数、抖动标准差和波束宽度条件下, 链路误码率随发射功率变化的关系。通过仿真分析证明: 不同调制阶数, 增大发射功率对链路误码性能的改善近乎相同; 随着湍流强度、抖动标准差和波束宽度的增加, 误码率增加。

关键词: 空间光通信; Exponentiated Weibull 分布; M-PPM; 指向误差; 误码率

中图分类号: TN929 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2018.01.005

BER performance of space optical links with M-PPM modulation based on Exponentiated Weibull Model

ZHANG Yun, ZHAO Shang-hong, WANG Xiang, MENG Wen, ZHAO Jing, DING Xi-feng
(Information and Navigation college, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: To study the effects of the Exponentiated Weibull atmosphere turbulence and pointing errors on the bit error rate (BER), BER performance of the optical communication link is investigated. The closed-form expression of BER is derived based on a Meijer's G function. The relationship between the BER performance and the transmitting optical power under different parameters such as the atmosphere turbulence, PPM modulation order, the normalized jitter standard deviation and the normalized beam-width are analyzed by simulation. Simulation results show that the improvement effect of different modulation orders and increasing transmitting power on BER is almost the same, and BER increases with the increase of turbulence intensity, the normalized jitter standard deviation and the normalized beam-width.

Key words: space optical communication; Exponentiated Weibull distribution; M-PPM; pointing error; bit error rate

1 引 言

近年来, 自由空间光通信 (free space optical, FSO) 以其高速率、抗干扰性强、成本低及带宽容量大等优点引起广泛关注^[1-2]。空间光通信的调制方式包括 OOK、BPSK、M-PPM、M-QAM 等, 其中多脉冲位置调制 (M-PPM) 是一种正交调制方式^[3-4], 其仅

需根据数据符号控制脉冲位置, 不需要进行极性和脉冲幅度的控制就能够以较低的复杂度和较小的发射功率实现传输信号的调制和解调。因此, 高频带利用率是 M-PPM 的最大优势^[5]。特别是随着自由空间光通信系统的带宽从数 Gbps 提高到数百 Gbps^[6], 具有高频带利用率特点的 M-PPM 调制在空间

激光通信系统中应用更加广泛。因此,与空间激光通信其他调制方式相比,M-PPM 调制的空间光通信可更好地适应未来超宽带通信系统的要求。目前,国内外很多研究团队对 M-PPM 调制方式的空光通信系统性能进行了相关研究。其中文献[7]和[8]分别基于 Gamma-Gamma 和 Lognormal 大气湍流衰减模型,得到 M-PPM 调制下光链路的平均误码率闭合表达式,并仿真分析了波长、调制阶数、湍流强度对误码率的影响;文献[9]中考虑 Gamma-Gamma 大气湍流分布的影响,使用雪崩光电二极管,得到 M-PPM 调制下误码率的上限。一般而言 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 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。因此,面向未来军事航空激光通信复杂的大气条件,本文基于 Exponentiated Weibull 分布大气湍流模型,分析联合指向误差下 M-PPM 调制方式通信系统性能及相关问题。

2 系统和大气湍流信道模型

2.1 系统模型

假设自由空间光通信系统采用强度调制/直接检测(IM/DD),信道具有加性高斯白噪声,独立同分布且无记忆平稳遍历,发送端及接收端均可利用信道状态信息,系统模型表达式如下^[7]:

$$y = RP_r x + n \quad (1)$$

式中, R 为光电转换效率; P_r 为平均接收光功率; n 为均值为0;方差为 σ_n^2 的加性高斯白噪声。

经过指向误差与大气湍流联合影响,接收端的平均光功率表达为:

$$P_r(h) = P_t \rho_t \rho_r G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi L} \right)^2 h \quad (2)$$

式中; P_t 为平均发送功率; ρ_t 和 ρ_r 为发送机及接收机效率; G_t 和 G_r 为发送机及接收机增益; λ 为波长; L 为发送机与接收机距离; $h = h_t h_p$,其中 h_t 为大气湍流衰减因子, h_p 为指向误差衰减因子。

为简化计算,假设发送机与接收机用同一光学天线,则发送端与接收端具有相同的天线增益:

$$G_t = G_r \approx (\pi D/\lambda)^2 \quad (3)$$

式中, D 为天线直径,从式(3)可知天线增益与 (λ/D) 的平方成反比。

将式(3)代入式(2)得:

$$P_r(h) = P_t \left(\frac{\rho_s}{\lambda L} \right)^2 h \quad (4)$$

式中,假设 $\rho_t = \rho_r = \rho$,发送端天线面积 $s = \pi D^2/4$ 。

2.2 大气湍流信道衰减模型

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。但是上述两种模型的适用范围不同。Lognormal 模型适用于弱湍流条件下, Gamma-Gamma 模型适用于中强湍流条件下。2012 年, Barrios R 和 Dios F 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^[10]:

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

其中, $\alpha > 0, \beta > 0; \eta$ 为与光强有关的参数,且 $\eta > 0$,通过曲线拟合的方法得到经验公式:

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

$$\beta \cong 1.012(\alpha\sigma_I^2)^{-13/25} + 0.142 \quad (7)$$

$$\eta = \frac{1}{\alpha\Gamma(1 + 1/\beta)g_1(\alpha, \beta)} \quad (8)$$

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

2.3 指向误差模型

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,由指向误差理论得光链路指向误差因子 h_p 的概率密度函数可表示为^[11-12]:

$$f_{h_p}(h_p) = \frac{\varepsilon^2}{A_0} h_p^{\varepsilon^2-1}, 0 \leq h_p \leq A_0 \quad (9)$$

式中, $v = \sqrt{\pi}r / (\sqrt{2}w_z)$, $w_{z,eq}^2 = w_z^2 \sqrt{\pi} \text{erf}(v) / [2v \exp(-v^2)]$ 。 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, $\varepsilon = w_{z,eq} / (2\sigma_s)$; $A_0 = [\text{erf}(v)]^2$; $w_{z,eq}$ 为接收端等效波束宽度; σ_s 为接收端处指向误差偏移量标准差(抖动); $\text{erf}(\cdot)$ 为误差函数; 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。

信道衰减因子 $h = h_t h_p$ 的联合概率密度函数可计算为^[11-12]:

$$f_h(h) = \int_{h/A_0}^{\infty} \frac{1}{h_t} f_{h_p}\left(\frac{h}{h_t}\right) f_{h_t}(h_t) dh_t \quad (10)$$

利用 Meijer G 函数的性质^[13] 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:

$$f_h(h) = \frac{\alpha \varepsilon^2 h^{\varepsilon^2-1}}{(\eta A_0)^{\varepsilon^2}} \cdot \sum_{j=0}^{\infty} \frac{(-1)^j}{j! \Gamma(\alpha-j)(1+j)^{1-\varepsilon^2/\beta}} G_{1,2}^{2,0} \left[\frac{(1+j)h^\beta}{(\eta A_0)^\beta} \middle| \begin{matrix} 1 \\ 0, 1-\frac{\varepsilon^2}{\beta} \end{matrix} \right] \quad (11)$$

3 误码性能

M-PPM 调制下系统误码率可表示为^[7]:

$$P_e(h) \approx \frac{M}{4} \operatorname{erfc} \left(R P_t(h) \frac{\sqrt{M \log_2 M}}{2 \sigma_n} \right) \quad (12)$$

其中, $\operatorname{erfc}(\cdot)$ 为误差补函数。

将式(2)代入式(12)得:

$$P_e(h) \approx \frac{M}{4} \operatorname{erfc} \left(R P_t \left(\frac{\rho s}{\lambda L} \right)^2 \frac{\sqrt{M \log_2 M}}{2 \sigma_n} h \right) \quad (13)$$

由于比特流持续时间远小于衰落相干时间,因此可由 $f_h(h)$ 与式(13)得到平均误码率表达式:

$$\overline{P_e} = \int_0^\infty P_e(h) f_h(h) dh \quad (14)$$

$\operatorname{erfc}(x)$ 由 Meijer G 函数表示为^[13]:

$$\operatorname{erfc}(z) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} G_{1,2}^{2,0} \left(z^2 \middle| \begin{matrix} 1 \\ 0, 1/2 \end{matrix} \right) \quad (15)$$

综合考虑大气湍流及指向误差对误码率的影响,将式(11)、(13)、(15)代入式(14),利用 Meijer G 函数的性质^[13],可推导出平均误码率闭合表达式为:

$$\overline{P_e} = \frac{M \alpha \varepsilon^2 k^{\frac{1}{2}-\frac{\varepsilon^2}{\beta}} l^{\frac{\varepsilon^2}{2}-1}}{8 \sqrt{\pi} (\eta A_0)^{\varepsilon^2} (2\pi)^{\frac{l+k-2}{2}}} \cdot \left(\left(\frac{R P_t}{2 \sigma_n} \right)^2 \left(\frac{\rho s}{\lambda L} \right)^4 M \log M \right)^{-\frac{\varepsilon^2}{2}} \cdot \sum_{j=0}^{\infty} \frac{(-1)^j \Gamma(\alpha)}{j! \Gamma(\alpha-j)(1+j)^{1-\varepsilon^2/\beta}} G_{k+2l, 2k+l}^{2k, 2l} \cdot \left(\frac{\left(\frac{1+j}{(\eta A_0)^\beta k} \right)^k}{\left(\left(\frac{R P_t}{2 \sigma_n} \right)^2 \left(\frac{\rho s}{\lambda L} \right)^4 M \log M \right)^l} \middle| \begin{matrix} \Delta(k, 1), \Delta(l, 1-\frac{\varepsilon^2}{2}), \Delta(l, \frac{1}{2}-\frac{\varepsilon^2}{2}) \\ \Delta(k, 0), \Delta(k, 1-\frac{\varepsilon^2}{\beta}), \Delta(l, -\frac{\varepsilon^2}{2}) \end{matrix} \right) \quad (16)$$

式(16)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。

4 仿真分析

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(16)进行仿真分析。表 1 为系统设置参数。

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameter

参数	值
波长(λ)/nm	1550
传输距离(L)/m	3000
玻尔兹曼常数(k_B)	1.38×10^{-23}
接收孔径(D)/cm	8
高斯白噪声标准差(σ_n)	5×10^{-7}
发射机及接收机效率(ρ)	0.8
光电转换效率(R)	0.5

图 1 为 $M=4$, 即采用 4-MPPM 调制方式, $\sigma_s/r=0.5$, $w_z/r=1$ 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, $P_t = -24$ dBm, $P_e = 0.1202$; $P_t = -20$ dBm, $P_e = 0.0078$; $P_t = 15$ dBm, $P_e = 0.0002373$ 。可知发射功率每增加 5 dBm, 误码率降低了一个数量级。在中湍流时, $P_t = -25$ dBm, $P_e = 0.03061$; $P_t = -20$ dBm, $P_e = 0.001289$; $P_t = -15$ dBm, $P_e = 3.549 \times 10^{-5}$ 。在强湍流时, $P_t = -25$ dBm, $P_e = 6.736 \times 10^{-3}$; $P_t = -20$ dBm, $P_e = 1.817 \times 10^{-5}$; $P_t = -15$ dBm, $P_e = 4.89 \times 10^{-5}$ 可知发射功率每增加 5 dBm, 误码率降低两个数量级。同一发射功率, 湍流越小, 系统性能越好。

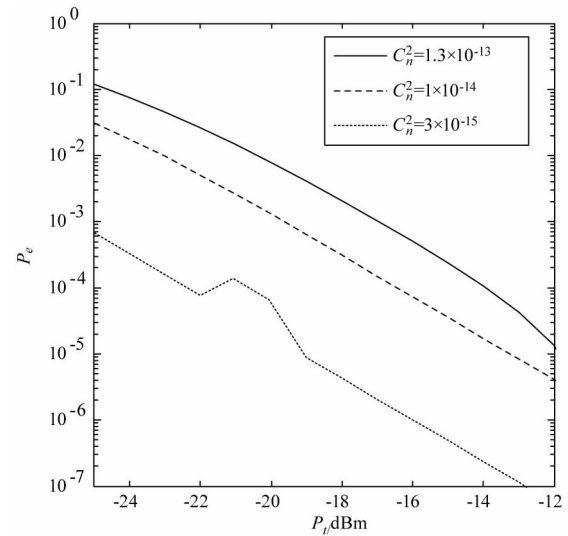


图 1 $M=4$, $\sigma_s/r=0.5$, $w_z/r=1$ 时, 不同大气湍流强度下, 误码率随发射功率的变化关系

Fig. 1 Average BER versus the transmitted power P_t for the different turbulence strengths when $M=4$, $\sigma_s/r=0.5$, $w_z/r=1$

图 2 仿真了中湍流强度 $C_n^2 = 1 \times 10^{-14}$, $\sigma_s/r=0.5$, $w_z/r=1$ 时, 不同调制阶数 $M=4, 16, 64$ 下, 误码率随发射功率的变化关系。同一调制阶数下, 误码率随着发射功率的增加而降低; 同一发射功率下, 误

码率随着调制阶数的减小而增加,链路采用不同调制阶数进行调制时,发射功率对链路误码率影响程度近似。 $M = 16$ 时, $P_t = -25$ dBm, $P_e = 7.238 \times 10^{-3}$; $P_t = -20$ dBm, $P_e = 2.015 \times 10^{-4}$; $P_t = -15$ dBm, $P_e = 5.415 \times 10^{-6}$; $P_t = -10$ dBm, $P_e = 1.454 \times 10^{-7}$ 。发射功率每增加 5 dBm, 误码率降低约 1 个量级。

图 3 为在中湍流强度 $C_n^2 = 1 \times 10^{-14}$, 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。 $w_z/r = 1, w_z/r = 1.5$ 条件下功率增大对误码率的影响效果近似相同。 $w_z/r = 0.8$ 时, $P_t = -20$ dBm, $P_e = 1.494 \times 10^{-4}$; $P_t = -15$ dBm, $P_e = 1.347 \times 10^{-6}$; $P_t = -10$ dBm, $P_e = 1.199 \times 10^{-8}$, 由数据可知, 发射功率增加对误码率改善效果显著, 每增加 5 dBm, 误码率性能改善两个量级。

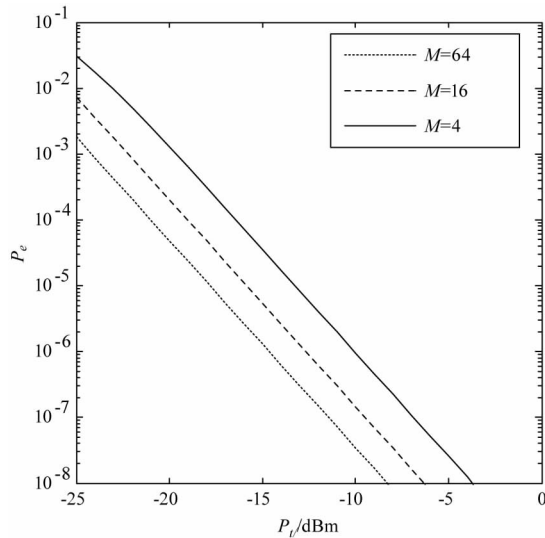


图 2 当 $C_n^2 = 1 \times 10^{-14}$, $\sigma_s/r = 0.5$, $w_z/r = 1$ 时, 不同 M-PPM 调制下的平均误码率与发射功率的关系

Fig. 2 Average BER versus the transmitted power P_t for the different modulation order when $C_n^2 = 1 \times 10^{-14}$, $\sigma_s/r = 0.5$, $w_z/r = 1$

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, 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 $P_t = -15$ dBm 的条件下, 当

$\sigma_s/r = 0.5$ 时, 链路的平均误码率为 3.549×10^{-5} , 当 $\sigma_s/r = 0.7$, $P_e = 4.548 \times 10^{-3}$ 增加了两个量级, 当 $\sigma_s/r = 1$, $P_e = 7.253 \times 10^{-2}$, 增加了一个量级。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 2 个量级。

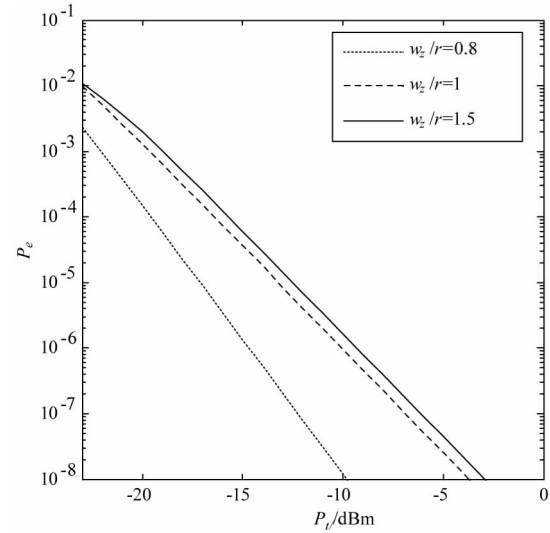


图 3 当 $C_n^2 = 1 \times 10^{-14}$, $M = 4$, $\sigma_s/r = 0.5$ 时, 不同 w_z/r 比值下的平均误码率与发射功率关系

Fig. 3 Average BER versus the transmitted power P_t for the different normalized beam width when M is 4 and the normalized jitter σ_s/r is 0.5, C_n^2 is 1×10^{-14}

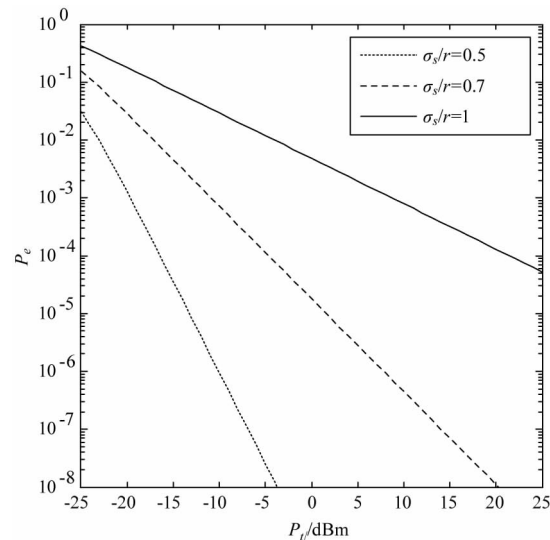


图 4 当 $C_n^2 = 1 \times 10^{-14}$, $M = 4$, $w_z/r = 1$ 时, 不同 σ_s/r 比值下的平均误码率与发射功率的关系

Fig. 4 Average BER versus the transmitted power P_t for the different normalized jitter when M is 4 and the normalized beam width w_z/r is 2, C_n^2 is 1×10^{-14}

5 结 论

本文基于 Exponentiated Weibull 分布大气湍流衰减模型,考虑联合指向误差及大气衰减因素,推导出 M-PPM 调制下链路平均误码率的闭合表达式,并根据表达式分别进行仿真分析了联合考虑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,随着湍流强度加强、PPM 调制阶数减小、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。在实际应用中,可以利用推导的闭合表达式对通信系统性能评估提供参考,进行参数优化,改善系统性能。为下一步研究链路多阶调制自适应多速率打下基础。

参考文献:

- [1] P Puri, P Garg, M Aggarwal. Outage and error rate analysis of network-coded coherent TWR-FSO systems [J]. IEEE Photonics Technol. Lett., 2014, 26: 1797 – 1800.
- [2] S Zvanovec, J Perez, Z Ghassemlooy, et al. Route diversity analysis for free-space optical wireless links within turbulent scenarios [J]. Opt. Express, 2013, 21: 7641 – 7650.
- [3] Biswas A, Vilnrotter V, Fan W, et al. Pulse position modulated (PPM) ground receiver design for optical communications from deep space [C]. SPIE, 2002, 4635: 224 – 235.
- [4] Edwards B L, Townes S A, Bondurant R S. Overview of the mars laser communications demonstration project [C]. 2003 Space Conference, 2003: 6417 – 6419.
- [5] HAO Ziqiang, LI Hongzuo, ZHAO Ting. Research of PPM modulation performance in laser communication system [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2014, 35(2): 321 – 324. (in Chinese)
- 郝子强, 李洪祚, 赵婷. 激光通信中 PPM 调制性能研究 [J]. 半导体光电, 2014, 35(2): 321 – 324.
- [6] Yi X, Liu Z, Yue P, et al. BER performance analysis for M-ary PPM over gamma-gamma atmospheric turbulence channels [C]. International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing, 2010: 1 – 4.
- [7] WANG Jia, YU Xin. Free space optical communication's current situation and development trend [J]. Optical Technique, 2005, 31(2): 260 – 262. (in Chinese)
王佳, 俞信. 自由空间光通信技术的研究现状和发展方向综述 [J]. 光学技术, 2005, 31(2): 260 – 262.
- [8] Gappmair W, Muhammad S S. Error performance of terrestrial FSO links modelled as PPM/Poisson channels in turbulent atmosphere [J]. Electronics Letters, 2007, 43(5): 302 – 304.
- [9] Kamran Kiasaleh. Performance of APD-Based, PPM Free-space optical communication systems in atmospheric turbulence [J]. IEEE Transactions on Communications, 2005, 53: 1455 – 1461.
- [10] Barris R, Dios F. Exponentiated Weibull distribution family under aperture averaging for Gaussian beam waves [J]. Opt. Express, 2012, 20(12): 719 – 721.
- [11] HAN Liqiang, YOU Yahui. Performance of free space optical communication with combined effects from atmospheric turbulence and pointing errors [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1 – 6. (in Chinese)
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): 1 – 6.
- [12] A A Farid, S Hranilovic. Outage capacity optimization for freespace optical links with pointing errors [J]. J Lightwave Technol, 2007, 25(7): 1702 – 1710.
- [13] Adamchik V S, Marichev O I. The algorithm for calculating integrals of hypergeometric type functions and its realization in reduce system [C]. International Conference on Symbolic and Algebraic Computation, 1990: 212 – 224.