

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.05.003

M-QAM 调制下高空平台 OFDM 光链路误码性能*

丁西峰¹ 赵尚弘¹ 王翔¹ 郑永兴^{1,2} 温泉¹ 林涛¹ 盖美庆³

(1. 空军工程大学信息与导航学院 西安 710077;

2. 重庆通信学院 重庆 400035; 3. 94326 部队通信修理所 济南 250023)

摘要:针对 Gamma-Gamma 分布大气湍流效应、几何传播损耗和指向误差联合效应对空间激光链路性能的影响,研究了高空平台 OFDM 光链路通信模型的误码性能。建立了基于 M-QAM 调制的高空平台 OFDM 光链路通信模型,获得了 OFDM 光链路的载波噪声比,推导出总平均误码率的闭合表达式。仿真分析了在不同大气湍流强度、QAM 调制阶数、抖动标准差和波束宽度等参数条件下,链路误码率与发射功率的关系。研究表明,在弱湍流条件或归一化抖动标准差小于 0.6 时,增大发射功率对链路误码率性能的改善程度较为缓慢;不同 QAM 调制阶数或归一化波束宽度条件下,增大发射功率对链路误码率性能的改善程度不明显。

关键词:光通信;高空平台;正交频分复用;Gamma-Gamma 分布模型;指向误差;误码率

中图分类号: TN92 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.20

BER performance for HAP OFDM optical link with M-QAM

Ding Xifeng¹ Zhao Shanghong¹ Wang Xiang¹ Zheng Yongxing^{1,2}

Wen Quan¹ Lin Tao¹ Gai Meiqing³

(1. Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;

2. Chongqing Communication Institute, Chongqing 400035, China;

3. Communication Workshop, Unit 94188 of PLA, Ji'nan 250023, China)

Abstract: Aiming at the combined effects of the Gamma-Gamma atmosphere turbulence, geometric spread and pointing errors on space optical links, the bit error rate (BER) performance of the high altitude platform (HAP) OFDM optical communication link is investigated. The HAP OFDM optical communication link model based on M-QAM is built, and the electrical carrier to noise ratio for OFDM optical communication link is obtained. The closed form mathematical expression for the total average BER performance is theoretically derived. 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 obviously improved by increasing the transmitted optical power when the atmosphere turbulence condition is weak, or when the normalized jitter standard deviation is less than 0.6. On the other hand, no obvious improvement of the BER performance is obtained by increasing the transmitted optical power under different M-QAM or normalized beam width.

Keywords: optical communication; high altitude platform; orthogonal frequency division multiplexing; Gamma-Gamma distribution model; pointing error; bit error rate

1 引言

高空平台 (high altitude platform, HAP) 主要位于普

通航空飞机的飞行空间和航天器轨道间,离地面约 17 ~ 25 km,具有载荷大、造价低、对地面准静止、布设机动灵活、滞留时间长等优点^[1-3],成为构建垂直分层多域的空间信息网络节点的重要组成部分。在临近空间中,HAP

所处的空间环境因不存在云、雨、雾等大气现象,可作为激光信号理想的传输信道^[4-5]。利用激光链路,基于高空平台在信息获取、传输、处理和分发领域的得天独厚优势,构建空天地一体信息网络,成为空间信息领域研究的热点。集高空平台和激光通信双重特点的临近空间光通信,具有数据速率高、功率需求低、无需频谱许可证和安全性高等优势^[6-8]。然而,在临近空间中,HAP 易受到因平台振动带来的接收端光束指向误差、以及大气湍流效应导致的接收端光强起伏等影响。正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)是一种多载波调制方式,子载波可采用多种不同的调制方式,通常为相移键控(phase shift keying, PSK)或正交幅度调制(quadrature amplitude modulation, QAM),具有抗湍流性能好、抗窄带干扰能力强、数据速率高和频谱效率高等优势,广泛应用于宽带无线通信系统中^[9-11]。

目前,文献[12-17]分别对空间光通信的 OFDM 系统性能进行了研究。其中,文献[12]在自由空间光通信中引入 OFDM 方案,针对 Gamma-Gamma 大气湍流分布模型,采用 M-QAM 调制方式,对 FSO-OFDM 系统的误码率及中断概率进行了分析;文献[13]采用对数正态分布的弱大气湍流模型,在 OOK 调制方式下对非对称限幅光 OFDM 系统误码性能进行了研究;文献[14]研究了 QAM 调制方式下,大气散射效应对 FSO-OFDM 系统误码性能的影响;文献[15]针对 Gamma-Gamma 分布模型和负指数分布模型,对比分析了 K-PSK 和 M-QAM 调制方式下 FSO-OFDM 系统的误码性能。然而文献[12-15]仅考虑不同分布模型下大气湍流效应的影响,未考虑平台振动引起的指向误差因素对 OFDM 光链路的影响。文献[16-17]分别针对负指数分布模型、Gamma-Gamma 分布模型下的大气湍流效应和指向误差的联合影响,研究了 K-PSK 调制方式下 FSO-OFDM 系统的误码性能。但在大气湍流效应和指向误差的联合影响下,还未针对采用 M-QAM 调制方式的 OFDM 系统性能进行分析。

本文将 OFDM 技术应用于临近空间高空平台光通信,考虑 Gamma-Gamma 分布模型下的大气湍流效应、几何传播损耗和指向误差等因素对高空平台 OFDM 光链路的影响,采用 M-QAM 调制方式,定义了 OFDM 光链路的载波噪声比,理论推导出 OFDM 链路总平均误码率的闭合表达式,研究了不同大气湍流强度、QAM 调制阶数、抖动标准差、波束宽度等参数下,高空平台 OFDM 光链路总平均误码率与发射功率的关系。

2 OFDM 链路模型

OFDM 技术,通过将信道分成若干相互正交子信道,利用串/并转换将串行高速数据流转换为并行较低速率

的子数据流,将其调制到每个子信道上进行传输。发送端处利用快速傅里叶逆变换(IFFT)产生多个相互正交的子载波,接收端处利用快速傅里叶变换(FFT)从正交信号中恢复处原信号,从而减少子信道间的相互干扰^[18-19]。假定 OFDM 信号包含 N 个子载波,通过上变换将其调制到载波频率 f_c 上,可表示为^[12,15-17]:

$$s_{\text{OFDM}}(t) = \sum_{n=0}^{N-1} s_n(t) = \sum_{n=0}^{N-1} X_n e^{i(\omega_n + 2\pi f_c t)} \quad 0 \leq t \leq T_s \quad (1)$$

式中: $\{\omega_n = 2\pi n/T_s, n = 0, \dots, N-1\}$ 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 个子载波的复数据符号, a_n 和 b_n 分别为同相和正交调制符号,根据不同的调制方式(PSK 或 QAM)而进行相应的映射。发送端处,OFDM 信号 $s_{\text{OFDM}}(t)$ 对激光二极管(LD)的光强度直接调制,不考虑激光二极管的非线性影响,发送光功率 $P(t)$ 可表示为^[12,15-17]:

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

式中: P_i 为平均发送光功率, m_n 为第 n 个子载波的光调制系数,总的光调制系数 m_{total} 可表示为^[12,15-17]:

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

经过大气损耗、大气湍流效应和指向误差等因素的影响,接收端处的接收光功率可表示为^[12,15-17]:

$$P_r(t) = P(t) L_{at} h + n(t) \quad (4)$$

式中: L_{at} 为大气损耗,实验表明其值一般为固定常量^[18]; $n(t)$ 为信道加性高斯白噪声; h 为信道衰减因子,表征平台间光通信信道的状态,由大气湍流影响因子 h_i 和平台间光链路指向误差因子 h_p 两部分组成^[3],即:

$$h = h_i h_p \quad (5)$$

接收端处,光电检测器输出光电流 $i(t, h)$ 表示为^[12,15-17]:

$$i(t, h) = I_0 \left[1 + \sum_{n=0}^{N-1} m_n s_n(t) \right] + n_{\text{opt}}(t) \quad (6)$$

式中: $I_0 = RL_{at} h P_i$, R 为光电检测器的响应度; $n_{\text{opt}}(t)$ 是双边功率谱密度为 $N_0/2$ 的加性高斯白噪声,包含热噪声、散粒噪声、激光器的相对强度噪声 RIN 三部分,可表示为^[12,15-17]:

$$N_0 = \frac{4K_B T}{R_L} + 2qI_0 + (RIN) I_0^2 \quad (7)$$

式中: K_B 为玻尔兹曼常量, R_L 为负载阻抗, T 为噪声绝对温度, q 为电子电荷量。

对于 OFDM 信号的每个子载波,定义光电检测器输出端的载波噪声比(CNR)为每一载波信号光功率与噪声功率的比值^[12,15-17]:

$$CNR_n(h) = \frac{1}{2} \frac{m_n^2 I_0^2}{N_0/T_s} = \frac{m_n^2 R^2 L_{at}^2 P_t^2 h^2}{2(N_0/T_s)} \quad (8)$$

为简化计算, OFDM 信号的载波噪声功率比可近似为^[12,15-17]:

$$CNR_n(h) \approx \frac{m_n^2 R^2 L_{at}^2 P_t^2 h^2}{2([N_0/T_s]_{av})} \quad (9)$$

式中: $[\cdot]_{av}$ 为对 N_0/T_s 求均值。

3 信道模型

在空间光通信中,对光链路的分析主要考虑大气湍流效应带来的影响。目前,对于大气湍流强度引起光强闪烁的描述提出了很多不同统计模型,如负指数分布、对数正态分布、Gamma-Gamma 分布等,不同的模型均有一定的适用范围。Gamma-Gamma 分布模型利用双参数紧扣大气湍流的物理特性,能较准确地描述大气湍流引起光信号的强度起伏特性。符合 Gamma-Gamma 分布模型的大气湍流影响因子 h_t 的概率密度函数为^[20]:

$$f_{h_t}(h_t) = \frac{2(\alpha\beta)^{\alpha+\beta/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} (h_t)^{(\alpha+\beta/2)-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta h_t}) \quad (10)$$

式中:

$$\alpha = \left\{ \exp\left[\frac{0.49\sigma_0^2}{(1+1.1\sigma_0^{12/5})^{7/6}} \right] - 1 \right\}^{-1} \quad (11)$$

$$\beta = \left\{ \exp\left[\frac{0.51\sigma_0^2}{(1+0.69\sigma_0^{12/5})^{5/6}} \right] - 1 \right\}^{-1} \quad (12)$$

$K_{\alpha-\beta}(\cdot)$ 是阶数为 $\alpha-\beta$ 的第 2 类修正贝塞尔函数; $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数; σ_0^2 为 Rytov 方差,即 $\sigma_0^2 = 1.23C^2 K^{7/6} z^{11/6}$, C_n^2 为大气折射率结构常数, K 为平面波数, $K = 2\pi/\lambda$, λ 为链路工作波长, z 为光束传播距离。

影响接收光信号强度起伏的因素除大气湍流之外,还有平台间光链路指向误差。根据指向误差理论,平台间光链路指向误差因子 h_p 的概率密度函数可表示为^[20-21]:

$$f_{h_p}(h_p) = \frac{\xi^2}{A_0 \xi^2} h_p^{\xi-1} \quad 0 \leq h_p \leq A_0 \quad (13)$$

式中:

$$v = \sqrt{\pi}r/(\sqrt{2}w_z) \quad (14)$$

$$w_{z,eq}^2 = w_z^2 \sqrt{\pi} \operatorname{erfc}(v) / [2v \exp(-v^2)] \quad (15)$$

ξ 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, $\xi = w_{z,eq}/(2\sigma_s)$, $A_0 = [\operatorname{erfc}(v)]^2$, $w_{z,eq}$ 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); $\operatorname{erfc}(\cdot)$ 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^[20-21]:

$$f_h(h) = \int_{h/A}^{\infty} \frac{1}{h_t} f_{h_t}\left(\frac{h}{h_t}\right) f_{h_t}(h_t) dh_t \quad (16)$$

将式(10)和(13)代入式(16)中,得:

$$f_h(h) = \frac{2\xi^2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2} h^{\xi-1}}{A_0 \xi^2 \Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \times \int_{h/A}^{\infty} (h_t)^{(\alpha+\beta)/2-1-\xi} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta h_t}) dh_t \quad (17)$$

根据文献[22],将式(17)中的 $K_\nu(\cdot)$ 用 Meijer G 函数表示为:

$$K_\nu(z) = \frac{1}{2} G_{0,2}^{2,0} \left(\frac{z^2}{4} \middle| \begin{matrix} - \\ +, -+ \end{matrix} \right) \quad (18)$$

联立式(18)代入式(17)中,利用文献[22]中 Meijer G 函数的运算性质,可推导出信道衰减因子 h 的联合概率密度函数的闭合表达式为:

$$f_h(h) = \frac{\alpha\beta\xi^2}{A_0 \Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{1,3}^{3,0} \left(\frac{\alpha\beta h}{A_0} \middle| \begin{matrix} \xi^2 \\ \xi^2-1, \alpha-1, \beta-1 \end{matrix} \right) \quad (19)$$

4 误码率模型

假定 OFDM 信号包含 N 个子载波,每一子载波的数据均采用 M-QAM 调制方式,则 OFDM 链路总误码率 P_e 为^[12,15-17]:

$$P_e = \frac{2(1-\sqrt{M}^{-1})}{N \log_2(M)} \sum_{n=0}^{N-1} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{3CNR_n(h)}{2(M-1)}} \right) \quad (20)$$

式中: $M = 2^k$, k 是偶数, $\operatorname{erfc}(\cdot)$ 为误差补函数。

根据上述推导出的信道衰减因子 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:

$$P_{e,av} = \frac{2(1-\sqrt{M}^{-1})}{N \log_2(M)} \times \sum_{n=0}^{N-1} \int_0^{\infty} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{3CNR_n(h)}{2(M-1)}} \right) f_h(h) dh \quad (21)$$

根据文献[22],将式(21)中的 $\operatorname{erfc}(\cdot)$ 用 Meijer G 函数表示为:

$$\operatorname{erfc}(\sqrt{z}) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} G_{1,2}^{2,0} (z | \begin{matrix} 1 \\ 0, 1/2 \end{matrix}) \quad (22)$$

将式(19)和(22)代入式(21),得:

$$P_{e,av} = \frac{2\pi^{\frac{+}{-}}(1-\sqrt{M}^{-1})\alpha\beta\xi^2}{N \log_2(M) A_0 \Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \times \sum_{n=0}^{N-1} \int_0^{\infty} G_{1,0}^{3,0} \left(\frac{\alpha\beta h}{A_0} \middle| \begin{matrix} \xi^2 \\ \xi^2-1, \alpha-1, \beta-1 \end{matrix} \right) G_{1,0}^{2,0} \left(\frac{3CNR_n(h)}{2(M-1)} \middle| \begin{matrix} 0 \\ 0, 1/2 \end{matrix} \right) dh \quad (23)$$

利用文献[22]中 Meijer G 函数的积分性质,可推导出总平均误码率 $P_{e,av}$ 闭合表达式为:

$$P_{e,av} = \frac{2(\alpha+\beta)\pi^{\frac{+}{-}}(1-\sqrt{M}^{-1})\xi^2}{N \log_2(M) \Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \times$$

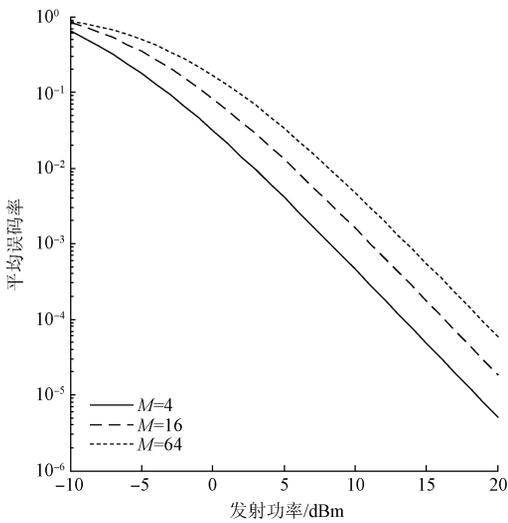


图2 当 $\sigma_0^2 = 1.4, \sigma_s/r = 0.5, w_z/r = 2$ 时, M -QAM 调制下的平均误码率与发射功率的关系

Fig. 2 The relationship of the average BER and the transmitted power P_t in M -QAM modulation when $\sigma_0^2 = 1.4, \sigma_s/r = 0.5, w_z/r = 2$

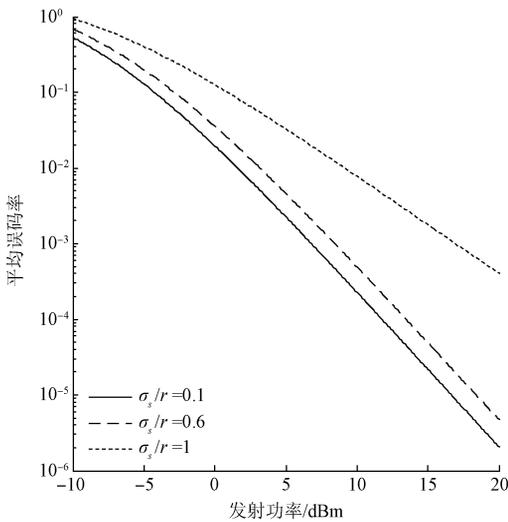


图3 当 $\sigma_0^2 = 1.4, M = 4, w_z/r = 2$ 时,不同归一化抖动标准差下的平均误码率与发射功率的关系

Fig. 3 The relationship of the average BER and the transmitted power P_t in the different normalized jitter when $\sigma_0^2 = 1.4, M = 4, w_z/r = 2$

下,OFDM 链路总平均误码率与发射功率 P_t 的关系曲线。从图3可以看出,随着归一化抖动标准差的增大,即指向误差对4-QAM-OFDM 链路的影响越强,链路平均误码率越高。发射功率 $P_t = 15$ dBm 条件下, $\sigma_s/r = 1.1$ 时,OFDM 链路平均误码率为 4.663×10^{-3} ; $\sigma_s/r = 0.6$ 时,平均误码率为 4.876×10^{-5} ,降低了两个量级;而 $\sigma_s/r = 0.1$

时,平均误码率为 2.177×10^{-5} ,降低量微乎其微。由此可见,通过采取一定的措施减小指向误差,降低指向误差对OFDM 链路的影响,可改善链路通信性能,但当归一化抖动标准差减小至0.6以下时,减小指向误差对于链路通信性能的改善程度较为缓慢。另一方面,当归一化抖动标准差小于0.6时,增加发射功率对于降低链路平均误码率较为明显,但当归一化抖动标准差大于0.6时,发射功率的增大对于链路平均误码率降低呈现更缓慢。为达到链路基准误码率,归一化抖动标准差从0.1增加至0.6时,发射功率 P_t 从6.7增至8.4 dBm,即仅需增加1.7 dBm;但归一化抖动标准差从0.6增加至1时,发射功率 P_t 从8.4增至16.9 dBm,即增加了8.5 dBm,才能满足链路基准误码率的要求。

图4所示为子载波采用4-QAM 调制,中湍流强度 $\sigma_0^2 = 1.4, \sigma_s/r = 0.5$ 时,不同归一化波束宽度 w_z/r 条件下,OFDM 链路平均误码率与发射功率 P_t 的关系曲线。从图4可以看出,随着归一化波束宽度的增大,即几何传播损耗对OFDM 链路性能的影响越大,OFDM 链路平均误码性能不断恶化;可通过增大发射功率,补偿几何传播损耗对OFDM 链路性能的影响,降低链路平均误码率;不同程度几何传播损耗的影响下,增大发射功率对几何传播损耗的补偿程度近似相同。为达到链路基准误码率要求,归一化波束宽度 $w_z/r = 1$ 时,发射功率 P_t 最低只要5.4 dBm; $w_z/r = 2$ 时,最低发射功率 P_t 需7.7 dBm,增加了2.3 dBm; $w_z/r = 3$ 时,发射功率 P_t 至少为10.1 dBm,仅增加了2.4 dBm。

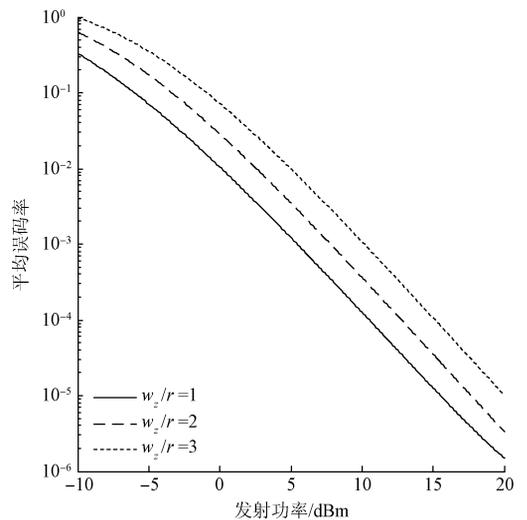


图4 当 $\sigma_0^2 = 1.4, M = 4, \sigma_s/r = 0.5$ 时,不同归一化波束宽度下的平均误码率与发射功率的关系

Fig. 4 The relationship of the average BER and the transmitted power P_t in different normalized beam width when $\sigma_0^2 = 1.4, M = 4, \sigma_s/r = 0.5$

6 结 论

在 Gamma-Gamma 分布大气湍流效应、几何传播损耗和指向误差的影响下,建立基于 M -QAM 调制的高空平台 OFDM 光链路通信模型。仿真分析了在不同大气湍流强度、QAM 调制阶数、抖动标准差和波束宽度等参数条件下,高空平台 OFDM 光链路误码率与发射功率的关系。结果表明,随着湍流强度加强、QAM 调制阶数 M 升高、归一化抖动标准差上升、归一化波束宽度增大,高空平台 OFDM 光链路性能不断恶化;在中强大气湍流、归一化抖动标准差大于 0.6 时,增大发射功率对链路误码率性能的改善程度较为缓慢;在弱大气湍流、归一化抖动标准差小于 0.6 时,增大发射功率对链路误码率性能的改善较为明显;不同 QAM 调制阶数 M 、不同归一化波束宽度条件下,增大发射功率对链路误码率性能的改善程度不明显。这为临近空间高空平台 OFDM 光链路的参数优化以及性能评估提供了参考。实际上,本文只考虑较为简单的高空平台 OFDM 光链路,对于采取前向纠错编码、增加保护间隔,还要做进一步深入研究。

参考文献

- [1] FIDLER F, KNAPEK M, HORWATH J, et al. Optical communication for high-altitude platforms (invited paper) [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2010, 16(5):1-13.
- [2] KASSA S R, BARMAN K, KOSALE D. A most promising HAPs technology for next generation wireless communication systems [C]. Proceedings of the 4th National Conference, 2010:1-6.
- [3] 吴翔宇, 金山, 倪淑燕. 环形小区在高空平台通信系统中的应用 [J]. 电子测量技术, 2016, 39(2): 138-141.
- WU X Y, JIN SH, NI SH Y. Application of ring-shaped cells in HAP communication system [J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(2): 138-141.
- [4] 王翔, 赵尚弘, 石磊, 等. 基于 Hoyt 光束指向模型的高空平台间光链路性能仿真 [J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1005002-1-1005002-7.
- WANG X, ZHAO SH H, SHI L, et al. Performance analysis of inter-high altitude platform optical links with pointing errors modeled by Hoyt distributions [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(10): 1005002-1-1005002-7.
- [5] 王翔, 赵尚弘, 李勇军, 等. 高空平台位置不稳定性对平台间 PPM 调制光链路性能的影响 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(11):3122-3126.
- WANG X, ZHAO SH H, LI Y J, et al. Effect of high altitude platforms position instability on performance of PPM on inter-platforms optical links [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(11):3122-3126.
- [6] 刘彦飞, 代永红, 单欣, 等. 高帧频 CMOS 相机对光通信精跟踪系统影响分析 [J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(6):1319-1325.
- LIU Y F, DAI Y H, SHAN X, et al. Analysis of the impact of high frame frequency CMOS camera on optical communication fine tracking system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(6): 1319-1325.
- [7] 施龙, 张文豹, 于萍, 等. 水平式激光发射系统激光指向远场检测研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(8):1183-1189.
- SHI L, ZHANG W B, YU P, et al. Study on the remote testing method of the laser pointing error for the level mounting laser transmitter system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(8):1183-1189.
- [8] 卫红, 曹一鸣, 王小辉, 等. 光通信滤波片外观特性及缺陷的视觉检测 [J]. 中国测试, 2014, 40(4): 30-32.
- WEI H, CAO Y M, WANG X H, et al. Visual test system of optical communication filter's appearance characteristic and defects [J]. China Measurement & Test, 2014, 40(4): 30-32.
- [9] 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]. 激光与光电子进展, 2012, 49(11):1-5.
- WANG H, ZHANG T, LI SH. BER performance of FSO-OFDM modulation system over Gamma-Gamma atmosphere turbulence [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(11): 1-5.
- [10] 陈锦妮, 柯熙政. 基于副载波外差检测的副载波-正交频分复用系统误码性能研究 [J]. 光学学报, 2016, 36(2): 0206001-1-0206001-9.
- CHEN J N, KE X ZH. Bit error rate investigation on subcarrier modulation-orthogonal frequency division multiplexing system based on subcarrier heterodyne detection [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(2): 0206001-1-0206001-9.
- [11] 陈宜文, 许斌, 郝建华, 等. 基于 OFDM 技术的电力线通信系统建模与仿真 [J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(2):21-26.
- CHEN Y W, XU B, HAO J H, et al. Modeling and simulation of power line communication system based on OFDM technology [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2015, 34(2):21-26.

- [12] 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, 3(2):509-520.
- [13] 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.
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.
- [14] 赵黎, 雷志勇, 柯熙政, 等. 基于 QAM 的 FSO-OFDM 系统性能分析[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(7): 1323-1327.
ZHAO L, LEI ZH Y, KE X ZH, et al. Performance of FSO-OFDM based on QAM [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 1323-1327.
- [15] NISTAZAKIS H E, STASSINAKIS A N, MUHAMMAD S S. et al. BER estimation for multi hop RoFSO QAM or PSK OFDM communication systems over Gamma-Gamma or exponentially modeled turbulence channels [J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, (64):106-112.
- [16] NINOSITOL M P, NISTAZAKIS H E, STASSINAKIS A N, et al. Estimation of BER for a PSK OFDM RoFSO link with relays over exponentially modeled turbulence channels with pointing errors [C]. 3rd Pan-Hellenic Conference on Electronics and Telecommunications, 2015.
- [17] NINOS M P, NISTAZAKIS H E, STASSINAKIS A N, et al. BER estimation for a PSK OFDM RoFSO serially relayed link with pointing errors over gamma gamma turbulence channels [C]. 2nd International Conference on Electrical Engineering and Applications, 2015.
- [18] 柯熙政, 雷思琛, 李蓓蕾. 无线光正交频分复用系统的实验研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(12): 1205003-1-1205003-9.
KE X ZH, LEI S CH, LI B L. Experimental study on free space optical orthogonal frequency division multiplexing system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(12): 1205003-1-1205003-9.
- [19] MOSTAFA A, HRANILOVIC S. In-field demonstration of OFDM-over-FSO [J]. *IEEE Photonics Technology*

Letters, 2012, 24(8):709-711.

- [20] 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
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):1-6.
- [21] FARID A A, Hranilovic S. Outage capacity optimization for freespace optical links with pointing errors [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, 25 (7): 1702-1710.
- [22] 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.

作者简介



丁西峰, 1992 年出生, 2015 年于山东大学获得学士学位, 现为空军工程大学信息与导航学院硕士研究生。主要研究方向为空间光通信。

E-mail: ding_xifeng@126.com

Ding Xifeng was born in 1992. He received B. Sc. from Shandong University in 2015. He is currently a M. Sc. candidate in Information and Navigation College, Air Force Engineering University. His research interest includes space optical communication.



赵尚弘, 1964 年出生, 分别在 1984 年、1989 年于兰州大学获得学士、硕士学位, 1998 年于中科院西安光学精密机械研究所获得博士学位, 现为空军工程大学教授、博士生导师。主要研究方向为激光技术、卫星光通信和组网技术。

E-mail: zhaoshangh@aliyun.com

Zhao Shanghong was born in 1964. He received B. Sc. and M. Sc. from Lanzhou University, and Ph. D. from Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS in 1984, 1989 and 1998, respectively. Currently, he is a professor in Information and Navigation College, Air Force Engineering University. His research interests include laser technology, optical satellite communications and networking.