

# 高空平台多跳光链路可变增益中继性能分析

王翔 赵尚弘 石磊 李勇军 楚兴春 赵顾颢 朱子行

(空军工程大学信息与导航学院, 陕西 西安 710077)

**摘要** 针对可变增益中继策略, 推导高空平台多跳光链路中断概率的下限表达式, 分析大气湍流、跟瞄误差以及中继节点位置对平台间多跳光链路性能的影响。仿真结果表明, 高空平台特有的大气湍流特性对于平台光链路性能的影响较小, 而跟瞄误差对链路的影响很大; 中继节点位置对多跳光链路的影响, 与跟瞄误差相关。跟瞄误差越大, 中继节点位置对于光链路的影响越大; 通过增加平均每跳信噪比能够有效降低中继平台位置对链路的影响的同时, 还能改善链路性能。以跟瞄误差为 20 m, 2 次中继为例, 平均每跳信噪比增加 1 dB, 链路中断概率降低约 2.2 dB。

**关键词** 光通信; 高空平台; 可变增益中继; 中断概率

**中图分类号** TN92 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1005002

## Performance Analysis of High Altitude Platform Multi-Hop Optical Communication with Variable Gain Relay

Wang Xiang Zhao Shanghong Shi Lei Li Yongjun Chu Xingchun  
Zhao Guhao Zhu Zihang

(School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China)

**Abstract** Based on variable gain relays, the expression of outage probability lower bound for high altitude platform multi-hop optical communication is given. The effect of the factors, including atmospheric turbulence, tracking error and relay node position, on the performance of multi-hop optical links is analyzed. The simulation results show that the influence of atmospheric turbulence on optical links is lower than pointing error. The influence of relay node position on multi-hop optical links is related with tracking error. The bigger tracking error is, the stronger is the dependence of the position of relay node on optical links. The influence of relay node position on inter-high altitude platform (HAP) optical link will worsen and the performance of multi-hop optical links can be improved by the improvement of signal noise ration (SNR). Taking relay number of 2 and tracking error of 20 m as an example, outage probability of links reduces approximately by 2.2 dB while the average SNR per hop increases by 1 dB.

**Key words** optical communications; high altitude platform; variable gain relay; outage probability

**OCIS codes** 200.2605; 200.2610; 060.2605; 060.4510

## 1 引言

临近空间高空平台(HAP)因其具有布局灵活、应用广泛、成本低廉、安全可靠、对地准静止等优点, 成为填补地面通信系统和卫星通信系统的有效载荷平台。因此, 结合高空平台和激光通信优势的临近空间光通信系统已经成为天基通信系统建设研究的热点问题<sup>[1-2]</sup>。然而, 高空平台在空间环境中容易受大气湍流以及季风等因素的影响, 导致接收端(RX)

光强的起伏, 严重影响到高空平台光链路的性能。因此, 平台位置不稳定以及大气湍流效应对光链路的影响成为临近空间高空平台光通信亟需解决的问题。

多跳通信技术可在无需增加发送功率前提下增加通信可靠性、扩大覆盖面和提高系统速率, 已获得越来越多的关注<sup>[3]</sup>。通过激光通信链路构建高空平台光网络, 实现全天时、大区域稳定的通信覆盖和海量数据中继<sup>[4-5]</sup>。放大转发(AF)中继由于无需解

**收稿日期**: 2013-03-11; **收到修改稿日期**: 2013-05-15

**基金项目**: 国家自然科学基金(61108068)、空军工程大学教研新星培养计划基金

**作者简介**: 王翔(1984-), 男, 博士研究生, 主要从事激光空间信息技术方面的研究。

E-mail: wangxiang\_626@hotmail.com

**导师简介**: 赵尚弘(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光空间信息技术方面的研究。E-mail: zhaoshangh@126.com(中国光学学会会员号: 7100044)

码,信号处理的复杂度较低,被广泛采用<sup>[6]</sup>。AF 中继又可根据信号处理方式分为可变增益中继和固定增益中继。Safari 等<sup>[7-8]</sup>针对自由空间多跳光链路模型,在对数正态分布大气模型条件下,对比分析不同放大中继策略对光通信链路的影响,并指出可变增益中继策略要优于固定增益中继策略。Karimi 等<sup>[9-10]</sup>针对 Gamma-gamma 大气分布模型,分析放大中继光链路性能。然而上述文章只考虑大气湍流效应,没有考虑通信终端跟瞄误差对光链路的影响。

本文在已有高空平台点对点光链路研究基础上,针对高空平台多跳光链路,结合 Gamma-gamma 大气分布模型以及理想光束跟瞄误差模型,分析高空平台多跳光链路可变增益中继策略的链路性能。



图 1 高空平台多跳光链路模型

Fig. 1 Model of multi-hop HAP optical links

Gamma-gamma 光强闪烁分布模型通过双参数直接与大气湍流的物理特性紧密相连,能够较准确地预测接收光信号的强度起伏特性<sup>[11-12]</sup>。在 Gamma-gamma 大气分布模型以及理想的光束跟瞄误差模型条件下,第  $i$  跳链路的衰减因子  $h_i$  的概率密度函数为<sup>[13-14]</sup>

$$f(h_i) = \frac{\alpha_i \beta_i \eta_i^2}{A_{0,i} \Gamma(\alpha_i) \Gamma(\beta_i)} G_{3,0} \left[ \frac{\alpha_i \beta_i h_i}{A_{0,i}} \left| \begin{matrix} \eta_i^2 \\ \eta_i^2 - 1, \alpha_i - 1, \beta_i - 1 \end{matrix} \right. \right], \quad (2)$$

式中

$$\alpha_i = \left\{ \exp \left[ \frac{0.49 \sigma_{0,i}^2}{(1 + 1.1 \sigma_{0,i}^{12/5})^{7/6}} \right] - 1 \right\}^{-1}, \quad (3)$$

$$\beta_i = \left\{ \exp \left[ \frac{0.51 \sigma_{0,i}^2}{(1 + 0.69 \sigma_{0,i}^{12/5})^{5/6}} \right] - 1 \right\}^{-1}, \quad (4)$$

式中  $G$  为 Meijer  $G$  函数。 $\sigma_{0,i}^2$  为 Rytov 方差,即  $\sigma_{0,i}^2 = 1.23 C_n^2 K^{7/6} L_i^{11/6}$ ,  $C_n^2$  为大气折射率结构常数,  $K = 2\pi/\lambda$  为波数,  $\lambda$  为波长。其中,  $A$  为接收端检测器的面积,半径为  $R$ ; 光束半径  $\omega_i(i) = \omega_0 [1 + \varepsilon(\lambda L_i / \pi \omega_0^2)^2]^{1/2}$ ,  $\omega_0$  为光束腰半径,与光束发散角  $\Phi$  的关系为:  $\omega_0 = 2\lambda / \pi \Phi$ ,  $\varepsilon = [1 + 2\omega_0^2 / \rho_0^2(L_i)]$ ,  $\rho_0(L_i) = (0.55 C_n^2 K^2 L_i)^{-3/5}$ ,  $\nu_i = [(\pi \alpha^2) / (2\omega_i^2)]^{0.5}$ ,  $A_{0,i} = [\text{erf}(\nu_i)]^2$ ,  $\omega_{e,i} = \omega_i(i)^2 (\pi A_{0,i})^{0.5} / [2\nu_i \exp(-\nu_i^2)]$ ,  $\eta_i = \omega_e / (2\sigma_i)$ ,  $\sigma_i$  为每跳光链路的跟瞄误差的均值。根据(2)式可得每跳光链路衰减因子  $h_i$  的均方差值为

$$\Omega_i = \frac{\alpha_i \beta_i \eta_i^2}{A_{0,i} \Gamma(\alpha_i) \Gamma(\beta_i)} \frac{\Gamma(\eta_i^2 + 2) \Gamma(\alpha_i + 2) \Gamma(\beta_i + 2)}{\Gamma(3 + \eta_i^2)} \left( \frac{\alpha_i \beta_i}{A_{0,i}} \right)^{-3} = \frac{\eta_i^2 A_{0,i}^2 (\alpha_i + 1) (\beta_i + 1)}{\alpha_i \beta_i (\eta_i^2 + 2)}, \quad (5)$$

采用文献[15]中(2.3)式,可得光链路瞬时信噪比,  $\gamma_i$  的概率密度函数为

$$f(\gamma_i) = \frac{2^{\alpha_i + \beta_i - 3} \alpha_i^2 \beta_i^2 \eta_i^2 \Omega_i}{16\pi A_{0,i}^2 \Gamma(\alpha_i) \Gamma(\beta_i)} \frac{1}{\bar{\gamma}_i} \times G_{2,6} \left[ \frac{\alpha_i^2 \beta_i^2 \Omega_i}{16 A_{0,i}^2} \frac{\gamma_i}{\bar{\gamma}_i} \left| \begin{matrix} (\eta_i^2 - 1)/2, (\eta_i^2)/2 \\ (\eta_i^2 - 2)/2, (\eta_i^2 - 1)/2, (\alpha_i - 2)/2, (\alpha_i - 1)/2, (\beta_i - 2)/2, (\beta_i - 1)/2 \end{matrix} \right. \right]. \quad (6)$$

式中  $\bar{\gamma}_i$  为每跳平均信噪比。

### 3 可变增益中继性能分析

可变增益中继的增益因子  $G_i = 1/h_i^2$ , 则根据(1)式,得出多跳中继链路的端到端即时信噪比为<sup>[9-10]</sup>

## 2 系统模型

高空平台多跳光链路模型如图 1 所示。图中  $S$  为源节点平台,  $R_i$  为第  $i$  个中继平台,  $D$  为目的节点平台,  $L_i$  为每跳光链路的通信距离。假定每平台均采用开关键控(OOK)调制的强度调制/直接检测(IM/DD), 则  $N$  跳光链路中继传输后, 目的节点平台  $D$  接收到的信息  $y_N$  为<sup>[10]</sup>

$$y_N = \prod_{i=1}^N h_{i-1} G_i x + \sum_{i=1}^N n_i \prod_{t=i+1}^N h_{t-1} G_t, \quad h_0 = 1 \quad (1)$$

式中  $x$  为源节点平台发送的信息,  $n_i$  为每跳光链路接收端噪声功率,  $G_i$  为每跳光链路接收端的放大增益, 衰减因子  $h_i = h_{g,i} h_{p,i}$  表征平台间每跳光链路的信道状态,  $h_i$  由每跳大气湍流影响因子  $h_{g,i}$  以及每跳平台间光链路指向误差因子  $h_{p,i}$  两个部分组成。

$$\gamma_{\text{var}} = \left( \sum_{i=1}^N \frac{1}{\gamma_i} \right)^{-1}, \quad (7)$$

利用调和几何平均不等式,得到(7)式的信噪比上界分别为

$$\gamma_{\text{var}} \leq \frac{1}{N} \prod_{i=1}^N \gamma_i^{1/N}, \quad (8)$$

(8)式当且仅当  $\gamma_1 = \gamma_2 = \dots = \gamma_N$  时等号成立。

矩母函数的定义如(9)式所示,将(9)式中的指数函数  $\exp(\cdot)$  函数进行 Meijer G 函数变换,根据 Meijer G 函数积分特性<sup>[16]</sup>,并结合(6)式,进行  $N$  次迭代积分运算得到信噪比  $\gamma_{\text{var}}$  的矩母函数  $M_{\text{var}}(s)$  如(10)式所示:

$$M_{\text{var}}(-s) = \int_0^{\infty} \dots \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{s}{N} \prod_{i=1}^N \gamma_i^{1/N}\right) \left[ \prod_{i=1}^N f(\gamma_i) \right] d\gamma_1 \dots d\gamma_N, \quad (9)$$

$$M_{\text{var}}(-s) = \frac{\sqrt{N}}{(2\pi)^{(N-1)/2}} \left[ \prod_{i=1}^N \frac{2^{\alpha_i+\beta_i} \eta_i^2}{8\pi\Gamma(\alpha_i)\Gamma(\beta_i)} \right] G_{6N, 6N}^{N, 6N} \left[ \left(\frac{s}{N^2}\right)^N \prod_{i=1}^N \left(\frac{\alpha_i^2 \beta_i^2 \Omega_i}{16A_{0,i}^2 \bar{\gamma}_i}\right)^{-1} \middle| \begin{matrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{C}, \mathbf{B} \end{matrix} \right], \quad (10)$$

式中

$$\mathbf{A} = [(-d_1), (-d_2), \dots, (-d_N)],$$

$$\mathbf{B} = [(-c_1), (-c_2), \dots, (-c_N)],$$

$$\mathbf{C} = [0, 1/N, \dots, (N-1)/N],$$

$$c_i = [(\eta_i^2 - 1)/2, \eta_i^2/2],$$

$$d_i = [(\eta_i^2 - 2)/2, (\eta_i^2 - 1)/2, (\alpha_i - 2)/2, (\alpha_i - 1)/2, (\beta_i - 2)/2, (\beta_i - 1)/2].$$

利用文献[17]中(3.40.1.1)式,将(10)式的 Meijer G 函数进行反拉普拉斯变换,得到概率密度函数  $f_{\text{var}}(\gamma)$  为

$$f_{\text{var}}(\gamma) = \mathcal{L}^{-1}[M_{\text{var}}(-s)] = N\gamma^{-1} \left\{ \prod_{i=1}^N \frac{2^{\alpha_i+\beta_i} \eta_i^2}{8\pi\Gamma(\alpha_i)\Gamma(\beta_i)} \right\} G_{2N, 6N}^{6N, 0} \left( \omega\gamma^N \middle| \begin{matrix} \mathbf{a}'_1, & \mathbf{a}'_2, \dots, & \mathbf{a}'_N \\ \mathbf{b}'_1, & \mathbf{b}'_2, \dots, & \mathbf{b}'_N \end{matrix} \right), \quad (11)$$

式中

$$\omega = N \prod_{i=1}^N \left( \frac{\alpha_i^2 \beta_i^2 \Omega_i}{16A_{0,i}^2 \bar{\gamma}_i} \right)^{1/N},$$

$$\mathbf{a}'_i = [(\eta_i^2 + 1)/2, (\eta_i^2 + 2)/2],$$

$$\mathbf{b}'_i = [\eta_i^2/2, (\eta_i^2 + 1)/2, \alpha_i/2, (\alpha_i + 1)/2, \beta_i/2, (\beta_i + 1)/2].$$

则根据(11)式,可以得出端到端多跳链路中断概率  $P_{\text{var}}$  的表达式为

$$P_{\text{var}} \geq \int_0^{\gamma_{\text{th}}} f_{\text{var}}(\gamma) d\gamma = N \times \left\{ \prod_{i=1}^N \frac{2^{\alpha_i+\beta_i} \eta_i^2}{8\pi\Gamma(\alpha_i)\Gamma(\beta_i)} \right\} G_{2N+1, 6N+1}^{6N, 1} \left( \omega\gamma_{\text{th}} \middle| \begin{matrix} 1, & \mathbf{a}'_1, & \mathbf{a}'_2, \dots, & \mathbf{a}'_N \\ \mathbf{b}'_1, & \mathbf{b}'_2, \dots, & \mathbf{b}'_N, & 0 \end{matrix} \right), \quad (12)$$

式中  $\gamma_{\text{th}}$  为接收信噪比门限。另外,对(12)式在  $0 \sim +\infty$  范围内进行积分运算得出积分值为 1。验证公式推导正确。

## 4 数值仿真

仿真假定每跳光链路的大气信道条件以及光束跟瞄误差均相同,并且每跳接收端接收平均信噪比  $\gamma_i$  均相同。依据文献[18]中结论,大气折射率结构常数  $C_n^2$  分别为  $10 \times 10^{-18}$ ,  $20 \times 10^{-18}$ ,  $30 \times 10^{-18}$ 。跟瞄误差  $\sigma_i$  分别为 10 m, 20 m。仿真其他性能参数如表 1 所示。

表 1 性能仿真参数

Table 1 Simulation parameters

Parameter	Symbol	Value
HAP altitude /km	$H$	20
Wavelength /nm	$\lambda$	1550
Divergence angle / $\mu$ rad	$\Phi$	200
Link distance per hop /km	$L_i$	300
RX aperture of radius /cm	$R$	10
SNR threshold /dB	$\gamma_{\text{th}}$	0

针对可变增益中继策略,根据(9)式对比分析不同大气湍流强度和跟瞄误差对光链路性能的影响,得到仿真结果如图 2(a)和(b)所示。从图 2(a)和

(b)中可以得到:当跟瞄误差  $\sigma_i = 10$  m 时,如图 2(a)所示,随着每跳平均信噪比的增大,大气湍流强度对于端到端光链路的中断概率影响在增加。并且随着大气湍流强度的增加,在相同信噪比条件下,多跳光链路的中断概率增大。而当跟瞄误差  $\sigma_i$  增大为 20 m 时,如图 2(b)所示,不同大气湍流强度的中断概率曲线重合;对比图 2(a)和(b)可知,在相同的信

噪比条件下,跟瞄误差  $\sigma_i$  为 20 m 时的中断概率要高于跟瞄误差  $\sigma_i$  为 10 m 的中断概率。并且随着信噪比的增加,两种情况下的中断概率均降减小,以跟瞄误差  $\sigma_i$  为 20 m 为例,在  $N=3$  条件下,每跳平均信噪比增益 1 dB,中断概率减少约 2.2 dB。另外,在相同接收信噪比的条件下,随着  $N$  的增加,端到端光链路的中断概率越大。

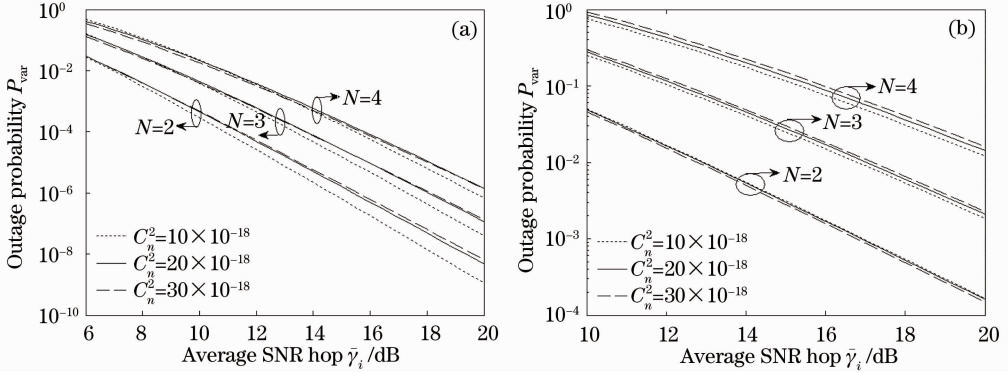


图 2 可变增益中继条件下 HAP 多跳光链路中断概率变化曲线。(a)  $\sigma_i = 10$  m; (b)  $\sigma_i = 20$  m

Fig. 2 Outage probability bounds for HAP multi-hop link with variable gain relays. (a)  $\sigma_i = 10$  m; (b)  $\sigma_i = 20$  m

以 3 个高空平台节点为例( $N=3$ ),利用(9)式分析中继节点位置对于多跳高空平台光链路性能的影响,得到仿真结果如图 3(a)和(b)所示。图 3(a)可以发现,当跟瞄误差  $\sigma_i = 10$  m 时,接收端中断概率也是随着每跳平均信噪比增加而减小;中继节点在 200~400 km 范围内,接收端中断概率变化不大。随着每跳平均信噪比的增大(如图为 15 dB 和 20 dB),中继节点位置从 150 km 扩展到 450 km 时,对链路性能的影响也不大。另一方面,大气湍流

对于中继节点最优位置选取的影响不大;当跟瞄误差  $\sigma_i$  为 20 m,如图 3(b)所示,在相同每跳平均信噪比时,不同大气湍流强度的中断概率曲线重合,并且接收端中断概率也是随着每跳平均信噪比增加而减小。但与图 3(a)相比,在较大跟瞄误差条件下,所需的每跳平均信噪比增大。该结论与图 2 的仿真结果一致。并且与图 3(a)相比,中继节点位置对链路中断概率的影响在增大。另外,从图 3(b)可知中继节点位于 300 km 时链路性能最优。

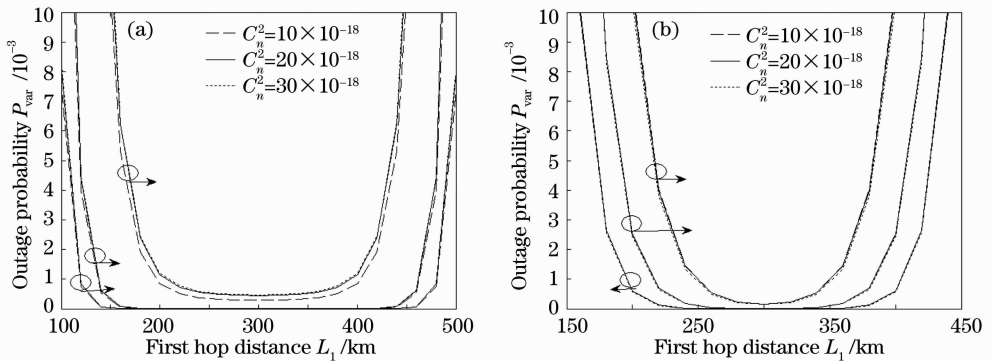


图 3 源节点到中继节点的第一跳距离  $L_1$  与目的节点中断概率  $P_{var}$  变化曲线。(a)  $\sigma_i = 10$  m; (b)  $\sigma_i = 20$  m

Fig. 3 Outage probability bounds for the first hop distance between source node and relay node.

(a)  $\sigma_i = 10$  m; (b)  $\sigma_i = 20$  m

## 5 结 论

通过以上分析可知,大气湍流效应对于高空平台多跳光链路的影响非常小。因此,在临近空间高空平

台多跳光链路的设计中,应重点考虑跟瞄误差以及中继节点位置的影响。在跟瞄误差小时,中继节点位置对多跳光链路的影响不大。而当跟瞄误差较大时,高

空平台多跳光链路的性能下降的同时,中继节点位置对于多跳光链路的影响也在逐渐增大。但是可以采用增加每跳平均信噪比改善链路性能的同时,降低中继节点位置对链路的影响。另外,中继节点应该尽可能布设在本次中继收发两端的中心位置。

### 参 考 文 献

- 1 Franz Fidler, Markus Knapek, Joachim Horwath, *et al.*. Optical communication for high-altitude platforms (invited paper)[J]. IEEE J Selected Topics in Quantum Electronics, 2010, 16(5): 1-13.
- 2 Sankit R Kassa, Koushik Barman, Deman Kosale. A most promising HAPs technology for next generation wireless communication systems[C]. Proceedings of the 4th National Conference, 2010. 1-6.
- 3 J N Laneman, D N C Tse, G W Wornell. Cooperative diversity in wireless networks; efficient protocols and outage behavior[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, 50(12): 3062-3080.
- 4 Wang Xiang, Zhao Shanghong, Li Yongjun, *et al.*. Design of optical transport network architecture in near space[J]. Optical Communication Technology, 2012, 36(3): 14-16.  
王翔,赵尚弘,李勇军,等. 临近空间光传输网络结构设计[J]. 光通信技术, 2012, 36(3): 14-16.
- 5 Mihael Mohorcic, Andrej Vihar, Matteo Berioli, *et al.*. Optical transport network based on a meshed HAP system with inter-platform links[C]. ASMS Conference, 2006. 1-7.
- 6 Chunguo Li, Xiang Wang, Luxi Yang, *et al.*. A joint source and relay power allocation scheme for a class of MIMO relay systems [J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 2009, 57(12): 4852-4860.
- 7 Majid Safari, Murat Uysal. Relay-assisted free-space optical communication [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(12): 5441-5449.
- 8 M Karimi, M Nasiri-Kenari. Outage analysis of relay-assisted free-space optical communications [J]. IET Communications, 2010, 4(12): 1423-1432.
- 9 Mehdi Karimi, Masoumeh Nasiri-Kenari. Free space optical communications via optical amplify-and-forward relaying [J]. J Lightwave Technol, 2011, 29(2): 242-248.
- 10 Christos K Datsikas, Kostas P Peppas, Nikos C Sagiass, *et al.*. Serial free-space optical relaying communications over gamma-gamma atmospheric turbulence channels [J]. J Opt Commun New, 2010, 2(8): 576-586.
- 11 Wang Han, Zhang Tao, Li Sha. Bit-error-rate analysis of FSO-OFDM modulation system over gamma-gamma atmospheric turbulence [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 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, 2013, 49(11): 110102.
- 12 Shou Qin, Zhang Tao, Wang Han. 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.
- 13 Wang Xiang, Zhao Shanghong, Shi Lei, *et al.*. Performance analysis of inter-high altitude platform optical links with pointing errors modeled by Hoyt distributions [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(10): 1005002.  
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.
- 14 Wang Xiang, Zhao Shanghong, Shi Lei, *et al.*. Performance analysis of inter-platforms laser links in presence of high altitude platform instability [J]. J Optoelectronics • Laser, 2012, 23(11): 2126-2131.  
王翔,赵尚弘,石磊,等. 近空间平台位置不稳定条件下的激光链路性能分析[J]. 光电子 • 激光, 2012, 23(11): 2126-2131.
- 15 Marvin K Simon, Mobamed-Slim Alouini. Digital Communication over Fading Channels[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2000.
- 16 Wikipedia. Meijer G-Function[EB/OL]. [2013-07-22]. [http://en.wikipedia.org/wiki/Meijer\\_G-function](http://en.wikipedia.org/wiki/Meijer_G-function).
- 17 A P Prudnikov, Yu A Brychkov, O I Marichev. Integrals and Series Volume 4: Direct Laplace Transforms[M]. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1992.
- 18 Florian David, Dirk Giggenbaen, Hennes Henniger, *et al.*. Design considerations for optical inter-HAP links[C]. The 22nd AIAA International Communications Satellite Systems Conference & Exhibit, 2004. 1-12.

栏目编辑：王晓球