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

王 翔,赵尚弘,李勇军,石 磊,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:在建立高空平台位置不稳定性模型的基础上,推导 PPM 调制的光链路误符号率,分析平台位置不稳定性的三种运动方式对平台间误符号率的影响。仿真结果表明:平台转动角度对于光链路的影响最大;平台间距离的变化对于链路的影响最小。并且增加发射功率能够在一定程度上缓解平台位置不稳定性对光链路的影响;较宽的光束发散角对于 HAP 的不稳定性具有很好的适应性。在仿真条件下,当发散角大于 20 μrad 时,误符号率的变化不是很明显。

关键词:高空平台; PPM 调制; 误符号率; 光束发散角

中图分类号:TN92 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-2276(2013)11-3122-05

Effect of high altitude platforms position instability on performance of PPM on inter-platforms optical links

Wang Xiang, Zhao Shanghong, Li Yongjun, Shi Lei, Zhao Guhao, Zhu Zihang

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

Abstract: Based on the model of high altitude platforms position instability, the symbol error probability of PPM on inter-platforms optical links was derived. Based on the symbol error probability, the effect of three moving modes due to high altitude platforms position instability on the performance of inter-platforms was analyzed. The simulation results show that platforms rotation has the greatest influence on inter-platforms optical links, and the changing of inter-platforms distance has the lowest influence on inter-platforms optical links. A wide optical beam waist has better adaptability in platform instability. But when beam waist is more than 20 μrad, the improvement of system performance is insignificant.

Key words: high altitude platform; PPM modulation; symbol error probability; optical beam waist

收稿日期:2013-03-10; **修订日期**:2013-04-15

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,博士生,主要从事激光空间信息技术方面的研究。Email: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。Email:zhaoshangh@yahoo.com.cn

0 引　言

高空平台(High Altitude Platform,HAP)主要是指停留在离地面 17~25 km 范围内的气球和飞艇。该平台具有布局灵活、应用广泛、成本低廉、安全可靠等优点,成为填补地面通信系统和卫星通信系统的有效载荷平台。在临近空间中,由于不存在云、雨、雾等大气现象,HAP 所处的空间环境是较为理想的激光传输信道。因此,临近空间光通信系统不仅具有临近空间和临近空间平台的优势, 还能实现激光通信中宽带宽,低功耗以及保密性好等特点,已经成为构建天基通信系统研究的热点问题[1-2]。然而,HAP 在空间环境中容易受到季风等因素的影响产生漂移和晃动,造成平台间光束的指向性误差,严重影响到高空平台光链路的性能。因此,平台位置不稳定对光链路的影响分析成为临近空间高空平台光通信亟需解决的问题。

在空间光通信中,有关通信终端不稳定的研究主要集中于卫星平台的振动和自由空间光通信终端摆动[3-5],并且研究工作均是在特定振动(或者摆动)模型的基础上结合大气湍流模型得到的误码率表达式。然而,临近空间高空平台位置的不稳定性的特殊性无法得到确定的振动模型[6]。另外,与空间激光通信其他调制方式相比, 脉冲位置调制(PPM)是趋向成熟的空间光通信技术,高能量效率是 PPM 的最大优势[7-9]。文中首先建立平台间光链路模型,给出大气湍流因子的表达式,并修正光束指向误差因子; 其次分析平台间光链路的差错性能, 得到 PPM 调制的光链路误符号率;最后根据误符号率表达式,仿真分析平台位置的三种不同运动方式对平台间光链路的影响。

1 高空平台间光链路系统模型

平台间采用 M-PPM 调制的强度调制/直接检测(IM/DD),假定发送信号 $\mathbf{X}$ 被分成 $\mathbf{m}$ 个时隙发送,即 $\mathbf{x}=(\mathbf{x}_1,\mathbf{x}_2,\mathbf{x}_3,\cdots,\mathbf{x}_m)$,则接收端收到信号 $\mathbf{y}=(\mathbf{y}_1,\mathbf{y}_2,\mathbf{y}_3,\cdots,\mathbf{y}_m)$可表示为:

$$\mathbf{y}_k=\mathbf{h}\mathbf{x}_k+\mathbf{n}_k \tag{1}$$

式中:$\mathbf{n}_k$ 为均值为 0、方差为 σ_n^2 的加性高斯白噪声;$\mathbf{h}=\mathbf{h}_g\mathbf{h}_p$ 表征平台间光通信信道的状态, 由大气湍流影响因子 $\mathbf{h}_g$ 以及平台间光链路指向误差因子 $\mathbf{h}_p$ 两个部分组成。

1.1 大气湍流影响因子(h_g)

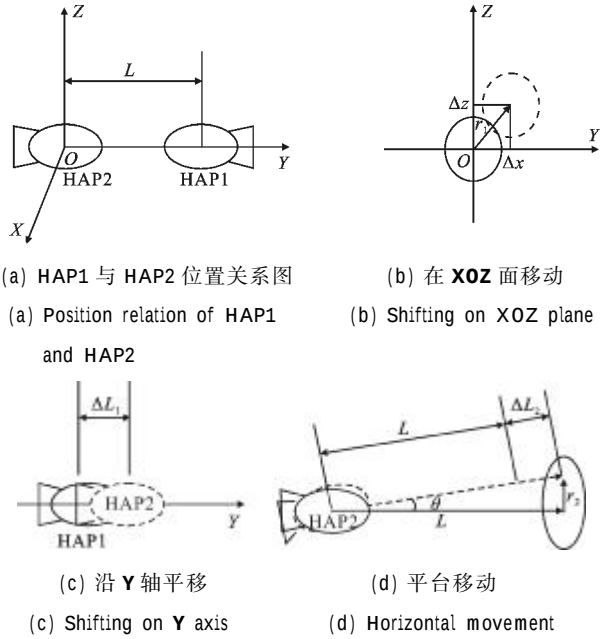
根据参考文献[10]中结论,针对中等强度大气湍流强度,选择 Gamma-Gamma 大气分布模型,则 $\mathbf{h}_g$ 的概率密度为[11]:

$$f_{h_g}(\mathbf{h}_g)=\frac{2\alpha\beta^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}(\mathbf{h}_g)^{[(\alpha+\beta)/2]-1}\mathbf{K}_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta(\mathbf{h}_g)}) \tag{2}$$

式中:$\alpha=\{\exp[0.49\sigma_0^2/(1+1.1\sigma_0^{12/5})^{7/6}]-1\}^{-1}$;$\beta=\{\exp[0.51\sigma_0^2/(1+0.69\sigma_0^{12/5})^{5/6}]-1\}^{-1}$;$\Gamma(\cdot)$为 Gamma 函数;$\mathbf{K}_v(\cdot)$是阶数为 $\alpha-\beta$ 的第二类修正贝塞耳函数,σ_0^2 为 Rytov 方差, 即 $\sigma_0^2=1.23\mathbf{C}_n^2\mathbf{k}^{7/6}\mathbf{L}^{11/6}$,$\mathbf{C}_n^2$ 为大气折射率结构常数,$\mathbf{k}$ 为波数,$\mathbf{L}$ 为平台间通信距离。

1.2 高空平台光束指向误差因子(h_p)

高空平台在临近空间中易受水平季风以及温度和气压的变化等因素的影响, 造成平台位置在空间六个自由度方向的变化, 同时也引起了平台间光束指向性的偏差[12]。高空平台位置不稳定模型如图 1所示。图 1(a)为 HAP1 与 HAP2 的位置关系。HAP2 中心与三维坐标原点 $\mathbf{O}$ 重合,HAP1 与 HAP2 相距 $\mathbf{L}$。图 1(b)~(d)分别表示 HAP2 位置的三种变化方式。



(a) HAP1 与 HAP2 位置关系图
(a) Position relation of HAP1 and HAP2

(b) 在 XOZ 面移动
(b) Shifting on XOZ plane

(c) 沿 Y 轴平移
(c) Shifting on Y axis

(d) 平台移动
(d) Horizontal movement

图 1 高空平台位置不稳定性模型

Fig.1 Model of HAP position instability

通过图 1 可知, 平台位置的不稳定性对于平台间光链路的影响主要分为平台间距离的变化以及光束的指向偏差两种。因此将参考文献[13]中的光链路指向误差因子 $\mathbf{h}_p$ 修改为:

$$h_p(r,z)=\iint_A \frac{2}{\pi\omega_z^2(z)}\exp\left(-\frac{2(x-r)^2+y^2}{\omega_z^2(z)}\right)dxdy \tag{3}$$

式中：$z=L+\Delta L_1+\Delta L_2=L+\Delta L_1+L(1/\cos(\theta)-1)$ 为 HAP1 与 HAP2 之间传输距离；$r=r_1+r_2=r_1+L\tan(\theta)$ 表示平台间光束指向偏移中心点 O 的距离；A 为接收端检测器的面积；$\omega_z(z)=\omega_0[1+\varepsilon(\lambda z/\pi\omega_0^2)^2]^{1/2}$ 表示光束半径，其中 $\omega_0=2\lambda/\Phi$ 为光束腰半径，Φ 为光束发散角，$\varepsilon=(1+2\omega_0^2/\rho_0^2(Z))$，$\rho_0(Z)=(0.55c_n^2K^2z)^{-3/5}$。考虑到光束和接收端探测器的对称性，$h_p$ 的计算结果只与探测器的半径 a 相关。因此，在对公式(3)积分计算时，假定接收端探测器为边长 $(\pi)^{1/2}a$ 的正方形，则可得到公式(3)的近似表达式：

$$h_p\approx\frac{\pi\omega_z^2}{4}\mathrm{erf}\left(\frac{\sqrt{\pi}\,a}{\sqrt{2}\,\omega_z}\right)\cdot\left[\mathrm{erf}\left(\frac{\sqrt{\pi}\,a+2r}{\sqrt{2}\,\omega_z}\right)+\mathrm{erf}\left(\frac{\sqrt{\pi}\,a+2r}{\sqrt{2}\,\omega_z}\right)\right] \tag{4}$$

2 差错性能分析

文中针对研究平台位置不稳定性对平台间光链路的误符号率(Symbol error probability，SEP)影响进行分析。当调制阶数 $M=2$ 时，大气湍流因子 h_g 条件下的 2-PPM 调制的误符号率 $p_{s\text{-}2PPM}(h_g)$ 如下所示[4]：

$$p_{s\text{-}2PPM}(h_g)=\frac{1}{2}\mathrm{erfc}\left(\frac{P_Th_gh_p}{\sigma_n}\right) \tag{5}$$

联合公式(2)和公式(5)，将误差互补函数 erfc(·)与第二类修正贝塞耳函数 $K_v(\cdot)$ 用 Meijer G 函数表示，并利用 Meijer G 函数的积分特性[13]，得到 2-PPM 的误符号率 P_{2PPM} 的表达式如下所示。

$$p_{2PPM}=\frac{2^{\alpha+\beta+1}}{\pi^{3/2}(\alpha\beta)\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}G_{5,2}^{2,4}\cdot\left(\frac{16(P_Th_p)^2}{(\alpha\beta\sigma_n)^2}\middle|\begin{matrix}\frac{1-\alpha}{2},\frac{-\alpha}{2},\frac{1-\beta}{2},\frac{\beta}{2},1\\0,1/2\end{matrix}\right) \tag{6}$$

当调制阶数 $M>2$ 时，大气湍流因子 h_g 条件下的 2-PPM 调制的误符号率 $P_{s\text{-}2PPM}(h_g)$ 如公式(7)所示[4]。

$$P_{s\text{-}MPPM}(h_g)=1-\frac{1}{\sqrt{\pi}}\int_{-\infty}^{\infty}\left[1-\frac{1}{2}\mathrm{erfc}(t)\right]^{M-1}e^{-\left(t-\frac{MP_Th_gh_p}{\sqrt{2}\sigma_n}\right)^2}dt \tag{7}$$

由于公式(7)中的积分表达式变量 t 取值范围为 $[-\infty,+\infty]$，文中选用 $\mathrm{erfc}(x)\approx e^{-x^2}$ 进行计算[4,15-16]。则 $P_{s\text{-}MPPM}(h_g)$ 的表达式为：

$$P_{s\text{-}MPPM}(h_g)=1-\frac{1}{\sqrt{\pi}}\int_{-\infty}^{\infty}\left[1-\frac{1}{2}e^{-t^2}\right]^{M-1}e^{-\left(t-\frac{MP_Th_gh_p}{\sqrt{2}\sigma_n}\right)^2}dt \tag{8}$$

将公式(8)中 $[1-1/2e^{-t^2}]^{M-1}$ 进行二项式展开，并利用公式以及 Meijer'G 函数积分特性[14]计算 M-PPM 的误符号率 P_{MPPM}：

$$P_{MPPM}=\sum_{k=0}^{M-1}\frac{(-1)^{k+1}}{2^k\sqrt{k+1}}\binom{M-1}{k}\frac{2^{\alpha+\beta}}{\pi\alpha\beta\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}G_{4,1}^{1,4}\left(\frac{4k(MP_Th_p)^2}{(\alpha\beta\sigma_n)^2(k+1)}\middle|\begin{matrix}\frac{1-\alpha}{2},\frac{-\alpha}{2},\frac{1-\beta}{2},\frac{-\beta}{2}\\0\end{matrix}\right) \tag{9}$$

3 仿真结果分析

根据 PPM 调制的误符号率公式(6)和(9)，重点研究 2-PPM 调制和 16-PPM 调制的平台间光链路，分析平台位置的光束偏移，平台间水平位移以及平台旋转三种运动方式对平台间光链路的误符号率的影响。系统仿真参数为：波长 $\lambda=1\,550$ nm，大气折射率结构常数 $C_n^2=1.0\times10^{-18}$，接收透镜半径 $a=10$ cm，平台间距离 $L=400$ km，光束发散角 $\Phi=10$ μrad。

图 2 和图 3 分别为在不同发射功率的条件下，

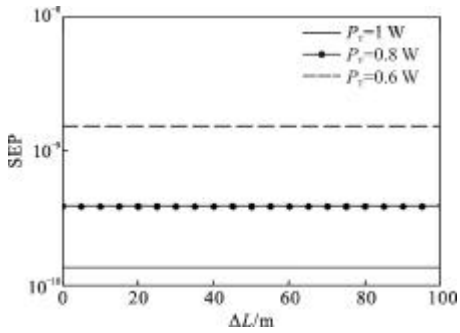


图 2 不同发射功率条件下平台沿 Y 轴水平位移 ΔL 对 2-PPM 调制光链路的影响

Fig.2 Effect of horizontal displacement ΔL on 2-PPM on inter-platforms optical links with different transmitted powers

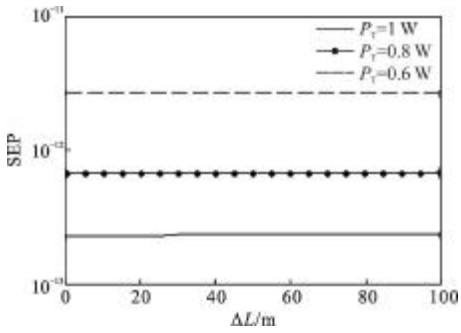


图 3 不同发射功率条件下平台沿 Y 轴水平位移 ΔL 对 16-PPM 调制光链路的影响

Fig.3 Effect of horizontal displacement ΔL on 16-PPM on inter-platforms optical links with different transmitted powers

平台沿 **Y** 轴水平位移 **ΔL** 与 2-PPM 和 16-PPM 调制的误符号率的关系。从图中可以发现,平台间水平位移在[0,100 m]范围内对平台间光链路的误符号率影响较小,可以忽略不计。

图 4 和图 5 分别为在不同发射功率的条件下,平台光束指向偏移距离 **r** 与 2-PPM 和 16-PPM 调制的误符号率的关系。从图 4 和图 5 可以看出,随着光束指向偏移距离 **r** 的增加,链路误符号率的值也

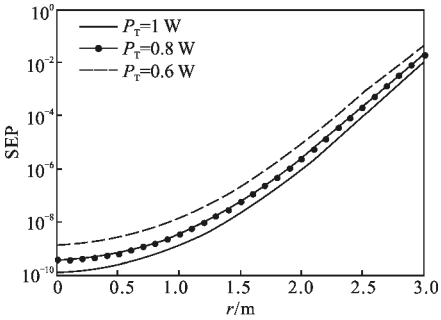


图 4 不同发射功率条件下光束指向偏移距离 r 对 2-PPM 调制光链路的影响

Fig.4 Effect of optical pointing displacement r on 2-PPM on inter-platforms optical links with different transmitted powers

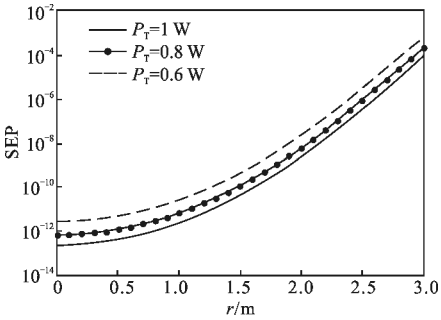


图 5 不同发射功率条件下光束指向偏移距离 r 对 16-PPM 调制光链路的影响

Fig.5 Effect of optical pointing displacement r on 16-PPM on inter-platforms optical links with different transmitted powers

在不断增加。当 **r** 值为 2 m,发射功率 $\mathbf{P_T}$=1 时,2-PPM 调制的误符号率为 10^{-6}, 而 16-PPM 调制的误符号率为 10^{-9} 左右。并且随着发射功率的减少,链路的误符号率逐渐增加。

图 6 和图 7 分别为在不同发射功率的条件下,平台旋转角度 θ 与 2-PPM 和 16-PPM 调制的误符号率的关系。从图中可以发现,随着平台偏转角度 θ 的增加,平台间光链路的误符号率也在增加。当发射功率 $\mathbf{P_T}$=1 W 时,2-PPM 调制的偏转角度 θ 为 5 μrad,16-PPM 调制的偏转角度为 6.5 μrad 时,链路的误符号率就已经达到 10^{-6}。因此,平台偏转角度对于平台间光链路的影响较大。

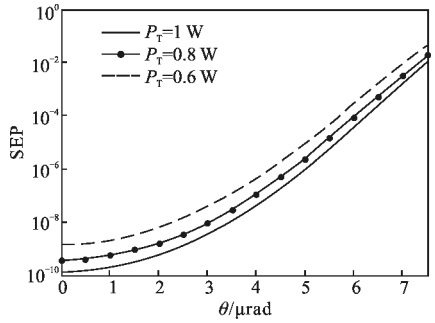


图 6 不同发射功率条件下平台偏转角度 θ 对 2-PPM 调制光链路的影响

Fig.6 Effect of rotating angle θ on the performance of 2-PPM on inter-platforms optical links with different transmitted powerd

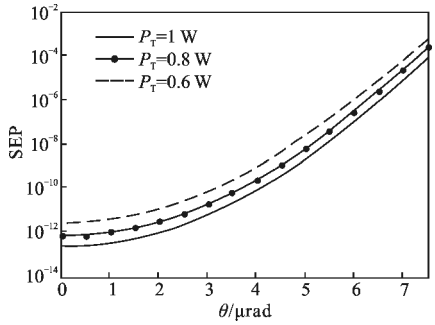


图 7 不同发射功率条件下平台偏转角度 θ 对 16-PPM 调制光链路的影响

Fig.7 Effect of rotating angle θ on 16-PPM on inter-platforms optical links with different transmitted powers

通过以上分析可知, 平台间距离的变化对于链路的误符号率的影响较小。因此在对光束发散角的分析中,在光束的指向偏差 **r** 的条件下进行分析。仿真中假定 **r**=2 m,发射功率 $\mathbf{P_T}$=1 W,通过仿真计算得到光束发散角 Φ 与链路误符号率的关系如图 8 和图9

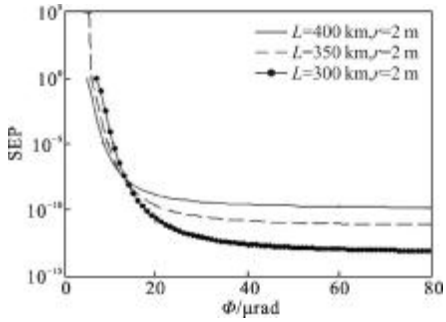


图 8 不同平台间距离条件下光束发散角 Φ 与 2-PPM 调制的误符号率关系($\mathbf{P_T}$=1 W)

Fig.8 Relation between optical beam waist Φ and 2-PPM SEP with different inter-platform distance($\mathbf{P_T}$=1 W)

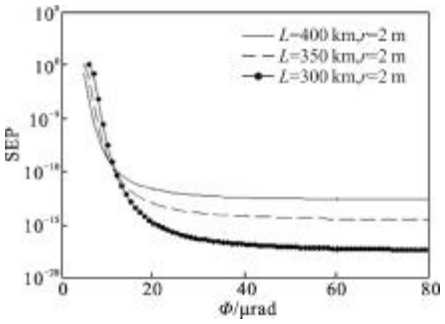


图 9 不同平台间距离条件下光束发散角 Φ 与 16-PPM 调制的误符号率关系(P_T=1 W)

Fig.9 Relation between optical beam waist Φ and 16-PPM SEP with different inter-platform distance(P_T=1 W)

所示。从图中发现,当光束发散角 Φ 小于20 μrad 时,链路的误符号率随着发散角 Φ 的增加而急剧下降。当发散角 Φ 大于 20 μrad 时, 发散角 Φ 的增加对于链路的误符号率的改善作用不是很明显。这是因为,当发散角度较小时, 较大的发散角能够有效改善平台不稳定性对光链路的影响。但是发散角度的增加会引起接收端接收到光功率的下降。因此,当发散角的进一步增加,达到 20 μrad 时,发散角的增加对于缓解平台间光链路的性能不是很明显。

4 结 论

在分析了高空平台位置不稳定性特点的基础上,结合 Gamma-Gamma 分布大气模型, 得到了高空平台间 PPM 调制的光链路的误符号表达式。在不同平台位置变化的条件下,通过对比 2-PPM 和 16-PPM 光链路误符号率。通过仿真结果可知在三种平台位置变化中,平台偏转对于光链路的影响最大,而平台间距离的变化几乎没有影响。16-PPM 调制光链路的误符号率优于 2-PPM 调制。增加发射功率以及增大光束发散角能够在一定程度上缓解平台位置不稳定性对于光链路的影响。

参考文献:

[1] Fidler F, Knapek M, Horwath J, et al. Optical communication for high-altitude platforms[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2010: 1-13.

[2] Giggenbach D, Purvinsks R, Wenner M, et al. Stratospheric optical inter-platform links for high altitude platforms[C]// The 20th AIAA International Communica tion Satellite Conference and Exhibit, 2002, 1910: 1-15.

[3] Sandalidis H G, Tsiftsis T A, Uysal M. BER performance of FSO links over strong atmospheric turbulence channels with pointing errors [J]. IEEE Communications Letters, 2008, 12(1): 44-46.

[4] Gappmair W, Hranilovic S, Leitgeb E. Performance of PPM on terrestrial FSO links with turbulence and poiting errors [J]. IEEE Communications Letters, 2010, 14(5): 468-470.

[5] Xiang Jinsong, Hu Yu. Influence of pointing error on laser satellite communication system with an optical preamplifier[J]. Chinese Journal of Lasers,2006,33(2): 225-229.(in Chinese)

[6] Liu Song, Niu Zhisheng, Wu Youshou. Impact of platform motion on soft handover in high altitude platform IMT-200 system[C]//The 57th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference, 2003: 1964-1968.

[7] Edwards B L, Townes S A, Bondurant R S. Overview of the mars laser communications demonstration project [C]//2003 Space Conference, 2003: 6417-6419.

[8] 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

[9] Hamkinsa J, Moisiona B. Selection of modulation and codes fo r deep space optical communications [C]//SPIE, 2004, 5338: 123-130.

[10] Florian David, Dirk Giggenbacn, Hennes Henniger, et al. Design considerations for optical inter-HAP links[C]//The 22nd AIAA international communications satellite systems conference & exhibit, 2004: 1-12.

[11] Han Liqiang, Wang Qi, Shida Katsunori. Performance of free space optical communication over gamma-gamma atmosphere turbulence[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(7): 1318-1322.(in Chinese)

[12] ITU, Recommendation ITU -R F. 1500, Referred characteristics of systems in the fixed service using high altitude platforms operating in the bands 47.2-47.5 GHz and 47.9-48.2 GHz, vol. ITU-R S.672, 2000.

[13] Farid A A, Hranilovic S. Outage capacity optimization for free-space optical links with pointing errors [J]. Journal of Lighwave Technology, 2007, 25(7): 1702 -1710.

[14] Wikipedia. Meijer G-function [EB/OL]. [200-10-01]. http://en.wikipedia.org/wiki/Meijer_G-function.

[15] Dyer J S, Dyer S A. Corrections to, Commnents on, an improved approximation for the Gaussian Q -function [J]. IEEE Communications Letters, 2008, 12(4): 231-231.

[16] Isukapalli Y, Rap B D. An analytically tractable approximation for the Gaussian Q -function [J]. IEEE Communications Letters, 2008, 12(9): 669-671.