

# 基于 Hoyt 光束指向模型的高空平台间光链路性能仿真

王翔 赵尚弘 石磊 李勇军 赵顾颢 朱子行 赵卫虎

(空军工程大学信息与导航学院, 陕西 西安 710077)

**摘要** 针对高空平台(HAP)位置不稳定特性模型,建立更符合实际的 Hoyt 指向误差分布模型,与理想条件下的 Rayleigh 指向误差分布模型比较,分析平台间光链路的差错性能。仿真结果表明,在发散角逐渐增大的条件下,Hoyt 分布模型与 Rayleigh 分布模型的误码率(BER)曲线具有相同的变化规律;在相同发散角条件下,Hoyt 分布模型的误码率低于 Rayleigh 分布模型;在最优化发散角条件下,Hoyt 分布模型误码率与 Rayleigh 分布模型误码率差值最大,以均方差比值因子取 0.2 为例,与 Rayleigh 分布模型相比,Hoyt 分布模型的误码率减小 9 dB 左右。

**关键词** 光通信;高空平台;指向误差;Hoyt 分布模型;Rayleigh 分布模型

**中图分类号** TN92 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1005002

## Performance Analysis of Inter-High Altitude Platform Optical Links with Pointing Errors Modeled by Hoyt Distributions

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

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

**Abstract** Based on the model of high altitude platforms (HAP) position instability, the factual Hoyt distribution model which is brought by optical pointing error is constructed. Compared with the ideal Rayleigh distribution model, performance of inter-platforms is analyzed. The simulation results show that there is a similar rule between the factual model and the ideal model with the increase of divergence angle. Under the condition of the same divergence angle, the bit error rate (BER) of Hoyt distribution model is lower than that of Rayleigh distribution model. When the divergence angle is optimized, the difference between factual and ideal distribution model is the biggest. Take 0.2 of root mean square (RMS) ratio as an example, compared with the Rayleigh distribution model, the BER of Hoyt distribution model reduces approximately by 9 dB.

**Key words** optical communication; high altitude platform; pointing error; Hoyt distribution model; Rayleigh distribution model

**OCIS codes** 010.1300; 010.1330; 010.3310; 060.4510

## 1 引言

高空平台(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,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,HAP 在空间环境中容易受大气湍流

**收稿日期**: 2012-04-25; **收到修改稿日期**: 2012-07-09

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

**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,主要从事激光空间信息技术方面的研究。E-mail: zhaoshangh@yahoo.com.cn

(中国光学学会会员号:7100044)

以及季风等因素的影响,导致接收端光强的起伏,严重影响 HAP 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 HAP 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均是假定通信终端间光束指向误差服从理想的分布模型——Rayleigh 分布,即通信终端在水平和垂直方向服从同参的高斯分布<sup>[3~7]</sup>。在实际条件下,临近空间 HAP 不稳定性与临近空间环境相关。临近空间水平季风造成 HAP 水平面位置的变化;平流层温度和气压的改变引起 HAP 垂直高度的变化<sup>[8]</sup>。其中水平季风的影响要远远大于温度和气压改变对平台位置的影响,易导致光束跟踪残差的均方差值(振幅)在水平和垂直两个方向可能不同。由此可知 Rayleigh 模型并不能总是符合平台不稳定特性引起的平台间光束指向误差。本文在分析临近空间 HAP 振动特性的基础上,建立更符合实际的光束指向误差分布模型,结合 Gamma-gamma 大气模型,得到平台间光链路误码率(BER)数学表达式,对比分析不同分布模型条件下的高空平台间光链路差错性能。

## 2 临近空间平台间光链路模型

假定平台间采用开关键控(OOK)调制的强度

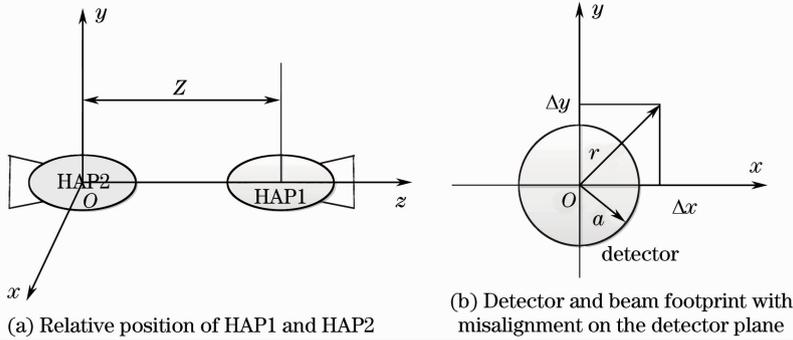


图 1 高空平台间激光通信链路结构模型

Fig. 1 Model of inter-HAPs laser communication link

令  $\Omega = \sigma_x/\sigma_y$  为均方差比值因子,并将(3)式进行极坐标变换,即  $x = r\cos\theta, y = r\sin\theta$ , 可得

$$f_{r,\theta}(r,\theta) = \frac{1}{2\pi\Omega\sigma_x^2} \exp[-r^2\xi(\theta)/(2\sigma_x^2)], \quad (4)$$

式中  $\xi(\theta) = \frac{1 - (1 - \Omega^2)\cos^2\theta}{\Omega^2}$ 。对(4)式中角度变量  $\theta$  积分,积分限为  $[0, 2\pi]$ 。光束指向的径向误差  $r$  的概率密度函数为

$$f_r(r) =$$

调制(IM)/直接检测(DD),发送信号  $x$  被分成  $m$  个时隙发送,即  $x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_m)$ , 则接收端收到信号  $y = (y_1, y_2, y_3, \dots, y_m)$  可表示为

$$y_k = hR_0x_k + n_k, \quad (1)$$

式中  $R_0 = e\eta/(Hf)$  为光电探测器的响应,其中  $\eta$  为量子效率,  $e$  为单位电荷电量,  $f$  为接收信号的频率,  $H$  为普朗克常数;  $n_k$  表示均值为 0, 方差为  $\sigma_n^2$  的加性高斯白噪声; 衰减因子  $h$  表征平台间光通信信道的状态,由大气湍流影响因子( $h_g$ ) 和平台间光链路指向误差因子( $h_p$ ) 组成为

$$h = h_g h_p. \quad (2)$$

### 2.1 高空平台光束指向误差因子

临近空间 HAP1 与 HAP2 间位置关系如图 1(a) 所示。平台 HAP2 位于坐标系原点,平台 HAP1 距离原点距离为  $Z$ , 平台间光链路沿  $z$  轴方向传输。根据文献[9]结论,忽略  $z$  轴方向平台间距离的变化,只考虑平台间光束径向指向误差  $r$ 。如图 1(b) 所示,光束径向指向误差可以分解为水平方向( $x$  轴)和垂直方向( $y$  轴),  $a$  为接收端检测器的半径。假定平台间光束指向误差在  $x$  轴和  $y$  轴分别服从均值为零的高斯分布,其均方差分别为  $\sigma_x$  和  $\sigma_y$ 。则光束指向误差的概率密度分布为

$$f(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x^2\sigma_y^2} \exp\left[-\left(\frac{x^2}{2\sigma_x^2} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)\right]. \quad (3)$$

$$\frac{r}{\Omega\sigma_x^2} \exp\left[-\frac{(1+\Omega^2)r^2}{4\Omega^2\sigma_x^2}\right] I_0\left[\frac{(1-\Omega^2)r^2}{4\Omega^2\sigma_x^2}\right], \quad (5)$$

式中,  $I_0(\cdot)$  为第一类 0 阶修正贝塞尔函数。通过(5)式可以发现,光束指向的径向误差服从 Hoyt 分布。而 Rayleigh 分布是(5)式中  $\Omega = 1$  时的特殊情况。

通过分析,将文献[10]中的光链路指向误差因子  $h_p$  修改为

$$h_p(r,z) =$$

$$\iint_A \frac{2}{\pi \omega_z^2(z)} \exp\left[-\frac{2(x-r)^2 + y^2}{\omega_z^2(z)}\right] dy dx, \quad (6)$$

式中  $A$  为接收端检测器的面积；光束半径  $\omega_z(z) = \omega_0 \{1 + \epsilon[\lambda z / (\pi \omega_0^2)]^2\}^{1/2}$ ， $\omega_0$  为光束腰半径，与光束发散角  $\Phi$  的关系为  $\omega_0 = 2\lambda / (\pi \Phi)$ ； $\epsilon = [1 + 2\omega_0^2 / \rho_0^2(Z)]$ ， $\rho_0(Z) = (0.55 C_n^2 K^2 Z)^{-3/5}$ ， $C_n^2$  为大气折射率结构常数， $K$  为波数。假定接收端探测器为边长  $\sqrt{\pi}a$  的正方形，则可得到光束指向误差因子  $h_p$  的近似表达式为

$$h_p(r) \approx \frac{\pi \omega_z^2}{4} \operatorname{erf}\left[\frac{\sqrt{\pi}a}{\sqrt{2}\omega_z}\right] \left[ \operatorname{erf}\left[\frac{\sqrt{\pi}a + 2r}{\sqrt{2}\omega_z}\right] + \operatorname{erf}\left[\frac{\sqrt{\pi}a - 2r}{\sqrt{2}\omega_z}\right] \right], \quad (7)$$

根据(5)式和(7)式得到光束指向误差因子的概率密度函数为

$$f_p(h_p) = \frac{\eta^2}{A_0 \Omega} \left(\frac{h_p}{A_0}\right)^{\frac{\eta^2(1+\Omega^2)}{2\Omega^2}-1} \times I_0\left[\frac{\eta^2(1-\Omega^2)}{2\Omega^2} \ln \frac{h_p}{A_0}\right]. \quad (8)$$

## 2.2 大气湍流影响因子

在空间光通信中，大气对光链路的影响主要分为由于大气分子的吸收与散射及大气气溶胶的散射引起的大气衰减和大气湍流引起的湍流效应等。大气衰减主要影响无线光通信系统的通信距离，而湍流效应会使光波参量在传输过程中随机改变，影响系统的通信质量，因此在分析中主要考虑湍流效应带来的影响<sup>[11]</sup>。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。服从 Gamma-gamma 分布的大气湍流影响因子  $h_g$  的概率密度为<sup>[12]</sup>

$$f_{h_g}(h_g) = \frac{2(q\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} (h_g)^{(\alpha+\beta)/2-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{q\beta h_g}), \quad (9)$$

式中

$$\alpha = \left\{ \exp\left[\frac{0.49\sigma_0^2}{(1+1.1\sigma_0^{12/5})^{7/6}}\right] - 1 \right\}^{-1}, \quad (10)$$

$$\beta = \left\{ \exp\left[\frac{0.51\sigma_0^2}{(1+0.69\sigma_0^{12/5})^{5/6}}\right] - 1 \right\}^{-1}, \quad (11)$$

$\Gamma(\cdot)$  为 gamma 函数， $K_{\alpha-\beta}(\cdot)$  是阶数为  $\alpha-\beta$  的第二类修正贝塞尔函数， $\sigma_0^2$  为 Rytov 方差，即  $\sigma_0^2 = 1.23 C_n^2 K^{7/6} Z^{11/6}$ 。

## 2.3 衰减因子

衰减因子  $h$  的概率密度函数可计算为<sup>[10]</sup>

$$f_h(h) = \int_{h/A_0}^{\infty} \frac{1}{h_g} f_{h_p}(h/h_p) f_{h_g}(h_g) dh_g. \quad (12)$$

将(8)、(9)式中的第一类和第二类贝塞尔函数转换为 Meijer G 函数的性质，并代入(12)式，利用 Meijer G 函数的积分性质<sup>[13]</sup>，可得衰减因子  $h$  的概率密度函数为

$$f_h(h) = \frac{(q\beta)\eta^2}{2\pi\Omega A_0 \Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \times \int_{-\pi}^{\pi} G_{1:3}^{3:0} \left[ \begin{matrix} \eta^2 \xi(\theta) \\ \eta^2 \xi(\theta) - 1, \alpha - 1, \beta - 1 \end{matrix} \middle| \frac{q\beta h}{A_0} \right] d\theta. \quad (13)$$

## 3 高空平台间激光通信链路差错性能

假定采用 OOK 调制方式，接收端采用雪崩光电二极管 (APD) 探测器，则衰减因子  $h$  条件下的误码率表达式为

$$p(e|h) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{P_T G R_0 h}{\sigma_N}\right), \quad (14)$$

式中  $P_T$  为发射功率， $G$  为 APD 放大增益， $\sigma_N^2 = \sigma_S^2 + \sigma_D^2 + \sigma_T^2$  为接收机的噪声，其中， $\sigma_S^2$  为背景光和信号光引起的散粒噪声， $\sigma_D^2$  为暗电流噪声， $\sigma_T^2$  为热噪声。三种噪声的表达式为<sup>[14]</sup>

$$\begin{cases} \sigma_S^2 = 2eG^2 FBR_0(P_T + P_B), \\ \sigma_D^2 = 2eG^2 FBI_D, \\ \sigma_T^2 = \frac{4k_B TBF}{R_L}. \end{cases} \quad (15)$$

式中  $e = 1.6 \times 10^{-19}$  为电子电量； $F = EM + (2 - 1/M)(1 - E)$  为 APD 的过剩噪声指数， $E$  为有效电离比； $P_T$  和  $P_B$  分别为接收端信号光功率和背景光功率； $I_D$  为暗电流； $k_B = 1.38 \times 10^{-23}$  为玻尔兹曼常数； $B$  为系统带宽； $T$  为噪声温度； $R_L$  为负载电阻。

联合(13)式与(14)式，利用 Meijer G 函数的积分特性<sup>[13]</sup>，得到误码率  $P_e$  的表达式为

$$P_e = \frac{2^{\alpha+\beta} \eta^2}{32\pi^{5/2} \Omega \Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \int_{-\pi}^{\pi} G_{6:3}^{2:5} \left[ \begin{matrix} 8A_0^2 \left(\frac{P_T G R_0}{\sigma_N}\right)^2 \\ \alpha^2 \beta^2 \end{matrix} \middle| \begin{matrix} \frac{2 - \eta^2 \xi(\theta)}{2}, \frac{1-\alpha}{2}, \frac{2-\alpha}{2}, \frac{1-\beta}{2}, \frac{2-\beta}{2}, 1 \\ 0, \frac{1}{2}, \frac{-\eta^2 \xi(\theta)}{2} \end{matrix} \right] d\theta. \quad (16)$$

## 4 仿真结果

文献[6]针对高度为 20 km 的 HAP 间光链路分析,结论表明在平台间距离为 300 km 条件下,考虑平台不稳定性以及大气湍流对链路的影响,发射功率为 13 dBm,得到接收端功率的均值为 -37.08 dBm。因此参照该仿真场景,并将该值作为接收端信号光功率计算散粒噪声。性能仿真其他参数如表 1 所示。

表 1 性能仿真参数

Table 1 Simulation parameter

Parameter	Value
Transmit power $P_T$ /dBm	13
Wavelength $\lambda$ /nm	1550
Quantum efficiency $\eta$	0.8
Dark current $I_D$ /nA	2
APD gain $G$	50
Load resistance $R_L/\Omega$	100
Nosie temperature $T$ /K	300
Ionization factor $E$	0.028
Background light $P_B$ /pW	100
Aperture of radius $a$ /cm	10
System bandwidth $B$ /(Gbit $\cdot$ s $^{-1}$ )	0.5

图 2 为大气湍流强度  $C_n^2$  为  $3.5 \times 10^{-18}$ , 光束水平指向均方差  $\sigma_x$  为 15 时,误码率与发散角的关系曲线。从图中可以发现,随着发散角的改变,Hoyt 分布模型与 Rayleigh 分布模型( $\Omega=1$ )的误码率曲线具有相同的变化规律;在相同发散角条件下,Hoyt 分布模型的差错性能优于 Rayleigh 分布模型。

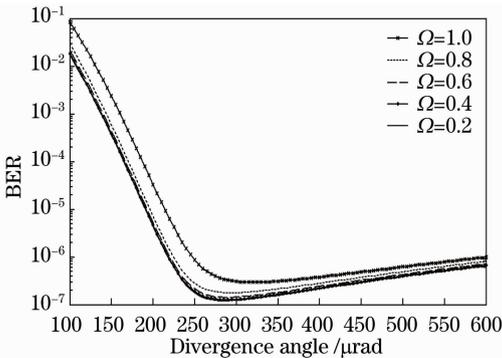


图 2 误码率和发散角关系

Fig.2 BER versus the divergence angle

图 3~6 为不同大气湍流  $C_n^2$  和水平指向均方差  $\sigma_x$  条件下,发散角与误码率归一化比值的的关系。其中误码率归一化比值是指在相同的发散角条件下,Rayleigh 分布( $\Omega=1$ )模型条件下的误码率与 Hoyt 分布模型的误码率的比值。

从图 3~6 可以发现,误码率归一化比值曲线具有相同变化规律。即在  $C_n^2$  和  $\sigma_x$  取值相同的条件

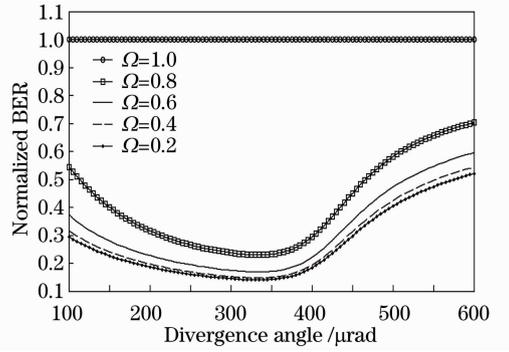


图 3 当  $C_n^2=3.5 \times 10^{-18}$ ,  $\sigma_x=25$  时,发散角与误码率归一化比值关系

Fig.3 Divergence angle versus normalized BER when  $C_n^2$  is  $3.5 \times 10^{-18}$  and  $\sigma_x$  is 25

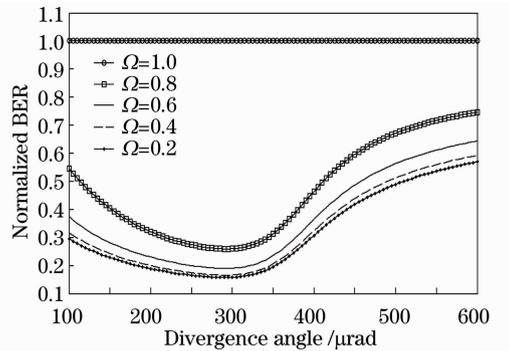


图 4 当  $C_n^2=7.5 \times 10^{-18}$ ,  $\sigma_x=25$  时,发散角与误码率归一化比值关系

Fig.4 Divergence angle versus normalized BER when  $C_n^2$  is  $7.5 \times 10^{-18}$  and  $\sigma_x$  is 25

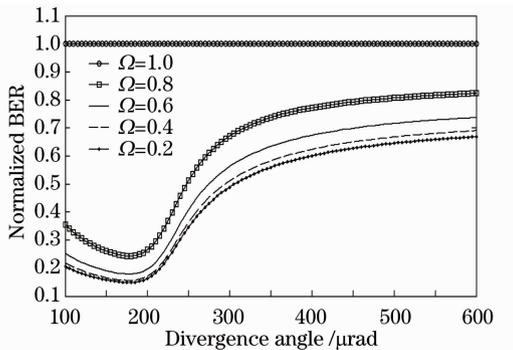


图 5 当  $C_n^2=7.5 \times 10^{-18}$ ,  $\sigma_x=15$  时,发散角与误码率归一化比值的的关系

Fig.5 Divergence angle versus normalized BER when  $C_n^2$  is  $7.5 \times 10^{-18}$  and  $\sigma_x$  is 15

下, $\Omega$  分别为 0.2 和 0.4 时误码率归一化比值变化不是很大。随着  $\Omega$  取值的进一步增加,误码率归一化比值逐渐增大,且增大的幅度也逐渐增加。以图 2 为例,当发散角为 200  $\mu$ rad 时, $\Omega=0.2$  时,误码率归一化比值为 0.1865; $\Omega=0.4$  时,误码率归一化比值为 0.1973,增幅约为 6%;当  $\Omega$  分别为 0.6 和

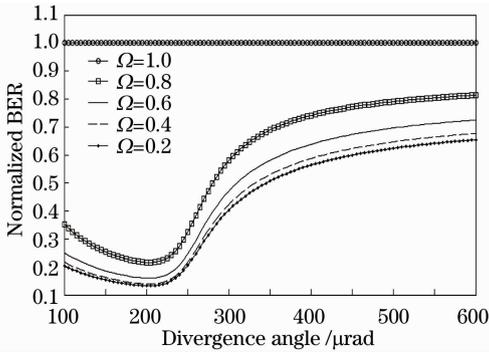


图6 当  $C_n^2 = 3.5 \times 10^{-18}$ ,  $\sigma_x = 15$  时, 发散角与误码率归一化比值的关系

Fig. 6 Divergence angle versus normalized BER when  $C_n^2$  is  $3.5 \times 10^{-18}$  and  $\sigma_x$  is 15

0.8 时, 误码率归一化比值的增幅分别约为 22% 和 69%。这是因为在水平光束指向均方差不变条件下,  $\Omega$  取值的增加意味着垂直指向均方差  $\sigma_y$  增大, 进而导致光束径向指向误差  $r$  的增大, 最终使得 Hoyt 分布模型的误码率增加, 其数值也越接近 Rayleigh 分布模型的误码率。

Hoyt 分布模型的误码率归一化比值具有相同的变化规律, 即随着发散角的增加, 误码率归一化比值先减小到最小值后逐渐增大。并且在相同大气湍流强度和水平指向均方差条件下, 误码率归一化比值的最小值对应的发散角相同, 与  $\Omega$  的取值无关。从图 2 到图 5, 最小误码率归一化比值对应的发散角分别为: 335、290、205、175  $\mu\text{rad}$ 。以  $\Omega = 0.2$  为例, 误码率归一化比值分别为 0.1409、0.1572、0.1331、0.1489, 也就是说与 Rayleigh 分布模型相比, Hoyt 分布模型的误码率变化达到 9 dB 左右。对比图 3 和图 4(或者图 5 和图 6) 可以发现, 在相同的水平光束指向均方差条件下, 湍流强度的增大, 误码率归一化比值的最小值对应的发散角减小; 对比图 3 和图 6(或者图 4 和图 5) 可以发现, 在相同的大气湍流强度条件下, 水平光束指向均方差值的增大, 最小误码率归一化比值对应的发散角越大, 并且误码率归一化比值曲线趋于平缓。通过以上分析可以发现, Hoyt 分布模型误码率归一化比值存在一个最优发散角。在最优发散角条件下, Hoyt 分布模型误码率与 Rayleigh 分布模型误码率差异最大。并且最优发散角与大气湍流强度  $C_n^2$  和水平光束指向均方差值  $\sigma_x$  相关, 而与均方差比值因子  $\Omega$  无关。

## 5 结 论

建立了更符合实际条件的 Hoyt 光束指向误差

分布模型, 并与理想条件下的 Rayleigh 分布模型对比, 分析临近空间高空平台光链路的差错性能。结果表明, 随着发散角的改变, Hoyt 分布模型与 Rayleigh 分布模型的误码率曲线具有相同的变化规律; 在相同发散角条件下, Hoyt 分布模型的差错性能优于 Rayleigh 分布模型, 并且随着均方差比值因子  $\Omega$  取值的减小, Hoyt 分布模型的误码率逐渐减小, 但减小幅度越来越小; 在最优发散角条件下, Hoyt 分布模型误码率与 Rayleigh 分布模型误码率差异最大。在均方差比值因子  $\Omega$  为 0.2 条件下, 两个分布模型的误码率差值能够达到 9 dB 左右。通过分析可知, 两个正交方向的光束指向均方差差异越大(即均方差比值因子  $\Omega$  越小), 通信链路的误码率改变越大。而在高空平台通信过程中, 空间环境的改变极易造成均方差值差异不同。因此在高空平台光链路设计中, 需要充分考虑两个正交方向光束指向误差的不同, 避免由此带来的误码率的起伏。

## 参 考 文 献

- 1 F. Franz, K. Markus, H. Joachim *et al.*. Optical communication for high-altitude platforms[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. (Invited Paper)*, 2010, **16**(5): 1058~1070
- 2 R. K. Sankit, B. Koushik, K. Deman. A most promising HAPs technology for next generation wireless communication systems [C]. Proceedings of the 4th National Conference, 2010. 1~6
- 3 G. Wilfried, H. Steve, L. Erich. Performance of PPM on terrestrial FSO links with turbulence and pointing errors[J]. *IEEE Commun. Lett.*, 2010, **14**(5): 468~470
- 4 W. Q. Xie, L. Y. Tan, J. Ma. Mutual alignment errors analysis based on wavelet due to antenna deformations in inter-satellite laser communications [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2012, **44**: 198~203
- 5 G. Drik, P. Robert, W. Markus *et al.*. Stratospheric optical inter-platform links for high altitude platforms [C]. The 20th AIAA International Communication Satellite Conference and Exhibit, 2002, **1910**: 1~15
- 6 D. Florian, G. Dirk, H. Hennes *et al.*. Design considerations for optical inter-HAP links [C]. The 22nd AIAA International Communications Satellite Systems Conference & Exhibit, 2004. 1~12
- 7 Zhao Shanghong, Wu Jili, Li Yongjun *et al.*. Present status and developing trends of satellite laser communication [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(9): 092801  
赵尚弘, 吴继礼, 李勇军等. 卫星激光通信现状与发展趋势 [J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(9): 092801
- 8 Liang Dong, Li Yong. Modeling and stability analysis for a stratospheric airship in position-altitude keeping mode [J]. *Spacecraft Engineering*, 2007, **16**(4): 108~113  
梁 栋, 李 勇. 平流层飞艇定点保持模式的建模与稳定性分析 [J]. *航天器工程*, 2007, **16**(4): 108~113
- 9 Wang Jun, Tian Bin, Yi Kechu *et al.*. Influence suppression of platforms instability on the performance of inter-HAPs optical communication system [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2010, **21**(4): 551~554  
汪 俊, 田 斌, 易克初等. 高空平台不稳定对平台间光通信性能的影响及抑制 [J]. *光电子·激光*, 2010, **21**(4): 551~554

- 10 A. F. Ahmed, H. Steve. Outage capacity optimization for free-space optical links with pointing errors [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(7): 1702~1710
- 11 Chen Dan, Ke Xizheng. Analysis on error rate of wireless optical communication using subcarrier modulation on turbo code[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2859~2863  
陈丹, 柯熙政. 基于turbo码的无线光通信副载波误码性能分析[J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 2859~2863
- 12 J. Park, E. Lee, G. Yoon. Average bit-error rate of the alamouti scheme in gamma-gamma fading channels[J]. *IEEE Phot. Technol. Lett.*, 2011, **23**(4): 269~271
- 13 Wikipedia. Meijer G-function[EB/OL]. [200-10-01]. [http://en.wikipedia.org/wiki/Meijer\\_G-function](http://en.wikipedia.org/wiki/Meijer_G-function)
- 14 Liu Yunqing, Jiang Huilin, Tong Shoufeng. Study on stabilizational tracking technology for atmospheric laser communication system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0505005  
刘云清, 姜会林, 佟首峰. 大气激光通信中稳定跟踪器件及算法研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(5): 0505005

栏目编辑: 王晓琰