

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0198-06

# 空间光通信链路方程修正方法及功率预算

詹伟达<sup>1,2</sup> 李洪祚<sup>1,2</sup> 王志坚<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> 长春理工大学空间光电技术研究所, 吉林 长春 130022; <sup>2</sup> 长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022  
<sup>3</sup> 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

**摘要** 空间光通信需要苛刻的功率预算, 由于实际大气信道特性非常复杂, 采用一般链路方程对大气信道功率进行预算往往会引进较大误差。通过对大气衰减效应、湍流效应、折射效应等影响大气信道特性的因素进行综合分析, 结合大量的理论推导和计算, 提出了一种对链路方程的修正方法, 得到了一个能够积极反应信道特性的链路方程。采用修正后的链路方程, 在通信距离为 6 km, 误码率优于  $10^{-8}$  的光通信实验中进行了功率预算。实验与分析表明, 该链路方程修正方法具有合理性, 功率预算和实验结果基本相符, 近地光通信对星地光通信具有等效验证性。

**关键词** 空间光通信; 链路方程; 功率预算; 大气信道; 等效验证

中图分类号 TN929.13 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201037s1.0198

## Link Equation Correction Method and Power Budget for Space Optical Communication

Zhan Weida<sup>1,2</sup> Li Hongzuo<sup>1,2</sup> Wang Zhijian<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Institute of Space Photonics, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China  
<sup>2</sup> School of Electronic Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China  
<sup>3</sup> School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

**Abstract** Space optical communication demands harsh power budgets. Since the actual channel characteristics of the atmosphere is very complex, the channel power budgets tends to introduce large deviation with the general link equation. By the comprehensive analysis of the factors of effecting characteristics of atmospheric channel, such as atmospheric attenuation, turbulence effects and refraction, etc. Combined with a large number of the derivation and calculation, a correction method of the link equation is put forward to get a link equation that positively responds to the channel characteristics. By this equation, budgets optical power for the actual ground optical communications with the link distance of about 6 km and the bit error better than  $10^{-8}$ . Experiments and analysis show that the link equation correction method is reasonable, the power budget is consistent with experimental results, and the near ground optical communication is equivalent demonstration to satellite-ground optical communication.

**Key words** space optical communications; link equation; power budget; atmospheric channel; equivalent demonstration

## 1 引 言

空间光通信链路设计是一个涉及多学科交叉的复杂工作。链路方程能够很好地反映光从发射系统通过大气信道传送到接收系统的能力, 借助链路方

程可以进行比较复杂的光功率预算, 对于远距离的临近空间和深空光通信需要进行更加复杂的折衷考虑。空间光通信中功率预算需要考虑光学系统效率和大气信道特性等多种因素, 光学系统效率可以通

收稿日期: 2010-04-16; 收到修改稿日期: 2010-06-20

基金项目: 国家 863 计划(2008AA01Z225)资助课题。

作者简介: 詹伟达(1979—), 男, 讲师, 博士研究生, 主要从事空间光通信方面的研究。E-mail: zhanweida@cust.edu.cn

导师简介: 李洪祚(1953—), 男, 教授, 主要从事空间光通信及光电检测方面的研究。E-mail: lihongzuo@sohu.com

过实验方法测算,大气信道特性需要实际测量或建立理论模型进行仿真分析。然而,近地面、对流层、平流层、自由空间等大气信道特性差异较大,一般链路方程不能普遍适用于各种信道,根据大气信道特性对链路方程进行合理修正及比较准确地预算功率成为研究热点<sup>[1]</sup>。美国、日本和欧空局等先后在飞机与地面、卫星与地面、飞机与飞机和卫星与卫星等光通信链路方面开展了大量的研究工作,但现在还没有公开完善的系统理论模型<sup>[2]</sup>。国内多个科研单位在近地光通信及信道方面取得了一些阶段性成果<sup>[3,4]</sup>,但关于光通信链路方程、大气信道特性等方面的详细报道很少。本文在已有国内外研究成果的基础上,综合考虑不同信道特性提出了一种对光通信链路方程的修正方法,建立了大气信道模型和链路方程的关系,通过实验证明了修正后链路方程的合理性,分析了地面光通信和星地光通信中不同大气信道特性差异及影响。

## 2 链路方程

### 2.1 理论推导

激光在自由空间传播条件下,点光源在远点距离某点  $Q$  处产生的平面波光场强度可描述为

$$I(t, r) = G_t \frac{\left| a\left(t - \frac{r}{c}\right) \right|^2}{4\pi \cdot r^2}, \quad (1)$$

式中  $G_t$  为发射系统在  $Q$  方向的增益;  $a(t - r/c)$  为发射光功率变化函数;  $c$  为真空中光速;  $r$  为点光源距离  $Q$  点的传播路径长度;  $r/c$  为光源传输到接收天线上  $Q$  点处的传输时延。

平面光束传输情况可描述为

$$d_z^2 - d_t^2 = \left(\frac{\lambda z}{d_t}\right)^2, \quad (2)$$

式中  $d_z$  为距发射天线面距离  $z$  处接收光斑直径;  $d_t$  为发射天线有效孔径(直径)。

在远场条件下  $\lambda z/d_t^2 \gg 1$ , 结合(2)式可得到发射光束准直整形后理想平面光束发散角  $\theta_b$  为

$$\theta_b \approx \tan \theta_b = \frac{d_z}{z} = \frac{\lambda}{d_t}, \quad (3)$$

式中  $\lambda$  为工作光波长。

设发射光束准直整形后的光场立体角为  $\Omega_s$ , 则

$$\Omega_s = 2\pi \left(1 - \cos \frac{\theta_b}{2}\right) \approx \frac{\pi}{4} \theta_b^2. \quad (4)$$

根据天线理论,结合(4)式可得到发射天线有效增益为

$$G_t = \frac{4\pi}{\Omega_s} \approx \frac{16}{\theta_b^2}. \quad (5)$$

设点光源功率变化函数  $p_t(t) = a(t)^2$ , 结合(1)式,光场强密度可表示为

$$I(t, r) = \frac{G_t \cdot P_t}{4\pi \cdot z^2}. \quad (6)$$

结合(6)式,通信链路标准功率流方程为

$$P_r = I(t, r) \cdot A = \frac{G_t \cdot P_t}{4\pi \cdot z^2} \cdot A, \quad (7)$$

式中  $A$  为接收天线面积,  $P_r$  为面积  $A$  内所接收到的光功率。

定义接收天线增益为  $G_r$ , 则

$$G_r = \left(\frac{4\pi}{\lambda^2}\right) \cdot A = \left(\frac{4\pi}{\lambda^2}\right) \cdot \frac{\pi}{4} d_r^2 = \frac{\pi^2 \cdot d_r^2}{\lambda^2}. \quad (8)$$

定义  $L_p$  为光波传输距离为  $z$  的过程中产生的功率损耗, 即

$$L_p = \left(\frac{\lambda}{4\pi z}\right)^2. \quad (9)$$

将(5), (8), (9)式代入(7)式, 可得到链路方程的一般表达式为

$$P_r = P_t \cdot G_t \cdot L_p \cdot G_r = P_t \frac{16}{\theta_b^2} \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi z}\right)^2 \cdot \frac{\pi^2 \cdot d_r^2}{\lambda^2} = P_t \cdot \frac{d_r^2}{z^2} \cdot \frac{1}{\theta_b^2}. \quad (10)$$

链路方程(10)是发射光源假定为点光源时的理想分析结果, 不能直观地反应出发射天线孔径对接收光功率的影响。对于近距离光通信, 需要考虑发射天线有效孔径, 所以将(5)式修正为

$$G_t = \left(\frac{4\pi}{\lambda^2}\right) \cdot A = \left(\frac{4\pi}{\lambda^2}\right) \cdot \frac{\pi}{4} d_t^2 = \frac{\pi^2 \cdot d_t^2}{\lambda^2}. \quad (11)$$

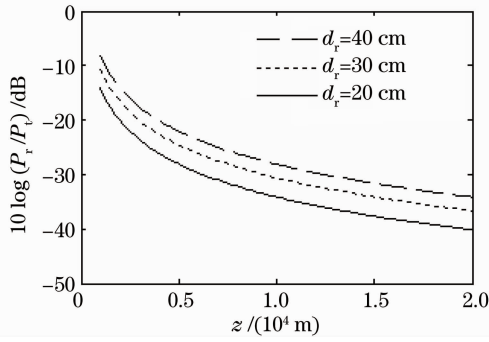
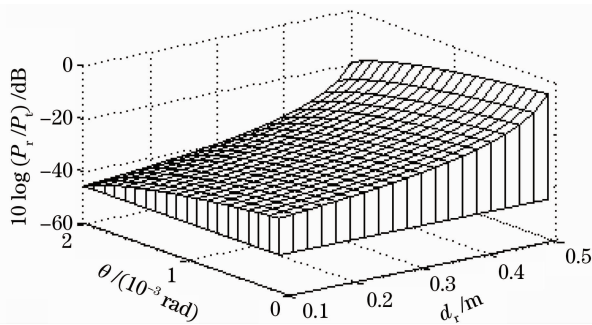
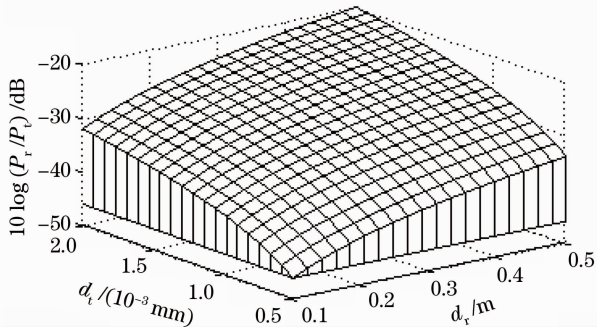
将(11)式代入(10)式, 得到近距离光通信一般链路方程<sup>[5]</sup>为

$$P_r = P_t \cdot \frac{\pi^2 \cdot d_t^2}{\lambda^2} \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi z}\right)^2 \cdot \frac{\pi^2 \cdot d_r^2}{\lambda^2} = \frac{\pi^2}{16} \cdot P_t \cdot \frac{d_r^2 \cdot d_t^2}{\lambda^2 \cdot z^2}. \quad (12)$$

### 2.2 仿真实验

通过上述链路方程(10), (12)得到图1~3, 可直观地看出链路方程描述的一些参数之间的关系, 并能够计算出理想情况下的接收光功率<sup>[6]</sup>。

图1是由链路方程(12)得到的发射光功率一定, 波长为  $0.8 \mu\text{m}$ 、在接收系统天线孔径  $d_r$  变化时, 光束传输距离  $z$  和接收光功率  $P_r$  的关系。从图1可看出, 随着距离增加, 接收光功率逐渐减少, 接收光功率和传输距离的平方成反比; 随着接收天线孔径的增加, 接收光功率逐渐增加; 光束传输距离为  $10 \text{ km}$  时

图 1  $z$  与  $P_r$  的二维曲线Fig. 1 2D curve of  $P_r$  versus  $z$ 图 2  $z=10$  km 时,  $\theta_b$  和  $d_r$  与  $P_r$  的三维曲线Fig. 2 3D curve of  $P_r$  versus  $\theta_b$  and  $d_r$  at  $z=10$  km图 3  $z=10$  km 时,  $d_t$  和  $d_r$  与  $P_r$  的三维曲线Fig. 3 3D curve of  $P_r$  versus  $d_t$  and  $d_r$  at  $z=10$  km

接收光功率仅为发射光功率的 0.01%~0.1%。

图 2 是由链路方程(10)得到的发射光功率一定,  $z$  为 10 km, 光束发散角  $\theta_b$ , 接收天线孔径  $d_r$  和接收光功率  $P_r$  的关系。从图 2 可看出, 随着光束发散角减小, 接收天线孔径增加, 接收光功率逐渐增加; 接收光功率与光束发散角平方成反比, 与接收天线孔径平方成正比。

图 3 是由链路方程(12)得到的发射光功率一定,  $z$  为 10 km, 发射天线孔径  $d_t$ , 接收天线孔径  $d_r$  和接收光功率  $P_r$  的关系。从图 3 可看出, 随着发射天线孔径增加和接收天线孔径增加, 接收光功率逐渐增加; 接收光功率与发射天线有效孔径的平方成正比, 与接收天线孔径的平方成正比。

### 3 链路方程修正

图 1~3 验证了一般链路方程的合理性。在空间光通信中, 链路方程(12)考虑光学系统、大气信道特性等因素<sup>[4]</sup>可修正为

$$P_r = K \cdot P_t \cdot \eta_t \cdot \eta_a \cdot L_{tp} \cdot L_{atm} \cdot L_{pol} \cdot L_{rp} \cdot \frac{d_r^2 \cdot d_t^2}{\lambda^2 \cdot z^2} \cdot \eta_r \quad (13)$$

式中  $K$  为天线增益修正系数,  $\eta_t$  为发射光学系统效率,  $\eta_a$  为发射天线孔径照射效率,  $L_{tp}$  为光发射系统瞄准损失,  $L_{atm}$  为信道导致的功率损失,  $L_{pol}$  为光发射和接收天线模式失配导致的功率损失,  $L_{rp}$  为光接收系统瞄准损失,  $\eta_r$  为接收光学系统收集效率。

由链路方程(14)可知, 要提高接收光功率可采用增加发射光功率、增加发射天线孔径、降低工作波长、增加接收天线孔径、提高瞄准和捕获效率、减少发射和接收系统的光学损失、减少偏振失配损失等方法。链路方程式中  $L_{atm}$  受大气衰减效应、湍流效应和折射效应的影响最严重, 可以通过选择较好的工作时段、工作地点、天气情况和编解码方法等尽量减少。

大气信道特性导致的光功率损失  $L_{atm}$  可表示为

$$L_{atm} = L_{atn} \cdot L_{tue} \cdot L_{ren} \quad (14)$$

式中  $L_{atn}$  为大气衰减效应导致的功率损失,  $L_{tue}$  为大气湍流效应导致的功率损失,  $L_{ren}$  为大气折射效应导致的功率损失。

#### 3.1 大气衰减

大气衰减效应是指大气组分对光波的吸收和散射导致的光功率损失<sup>[4,7]</sup>, 衰减效应导致的功率损失  $L_{atn}$  通过透射率  $T_L$  计算, 透射率  $T_L$  为

$$T_L = \exp\left[-\int_0^r \gamma(\rho) d\rho\right] \quad (15)$$

式中  $\gamma$  为大气衰减系数,  $\rho$  为积分变量。

大气衰减系数可表示为大气中气体分子和悬浮粒子造成的光吸收和散射的组合, 即

$$\gamma = \alpha_m + \beta_m + \alpha_a + \beta_a \quad (16)$$

式中  $\alpha_m$  和  $\alpha_a$  分别为气体分子和悬浮粒子的吸收系数,  $\beta_m$  和  $\beta_a$  分别为气体分子和悬浮粒子的散射系数。

气体分子的吸收系数  $\alpha_m$  可表示为

$$\alpha_m = \frac{S}{\pi} \cdot \frac{(2\pi k_b T_0 m)^{-0.5} r_s^2 \cdot P \cdot \left(\frac{T_0}{T}\right)^{1/2}}{(k_b - k_z)^2 + \nu_L^2} \quad (17)$$

式中  $k_b$  为传输光束的波数 ( $\text{cm}^{-1}$ ), 对于波长, 其定义为  $2\pi/\lambda$ ;  $k_z$  为激光谱线的中心波数,  $S$  为谱线的

积分强度( $\text{cm}^{-2}$ ),  $\gamma_L = (2\pi k_b T_0 m)^{-0.5} r_s^2 \cdot P_0$  为洛伦兹线半宽度,  $m$  为分子质量,  $r_s$  为有效碰撞半径,  $T$  为绝对温度,  $P$  为大气压强,  $T_0$  为 273 K;  $P_0$  为标准大气压强 101325 Pa。

气体分子的瑞利散射系数  $\beta_m$  可表示为

$$\beta_m = 2.677 \times 10^{-17} \frac{Pk^4}{T}. \quad (18)$$

悬浮粒子的吸收系数  $\alpha_a$  可表示为

$$\alpha_a = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot n_i, \quad (19)$$

式中  $n_i$  为悬浮粒子复数折射率的虚部,  $\lambda$  单位为微米。

悬浮粒子的米氏散射系数  $\beta_a$  可表示为

$$\beta_a = \frac{3.91}{V} \left( \frac{\lambda}{0.55} \right)^{-\delta}, \quad (20)$$

式中常数  $\delta$  同能见度  $V$  有关, 在 1.0~1.6 之间变化。

通过(17)~(20)式, 可计算大气衰减系数为 0.437, 大气透射率为 0.646。

### 3.2 大气湍流

大气湍流效应是指大气的湍流运动状态使大气折射率具有随机起伏特性, 光波的强度和相位在时间和空间上都呈现随机起伏, 从而产生光束弯曲、闪烁、漂移、畸变及光损失现象<sup>[4,8]</sup>, 湍流效应导致的功率损失  $L_{tue}$  可表示为

$$L_{tue} = \left( \frac{r_0}{d_t} \right)^2, \quad (21)$$

式中  $r_0$  为 Fried 参数, 和大气折射率结构函数  $C_n^2$  有关, 一般由 H-V 模型确定。

$$r_0 = 1.67 \left[ \sec(\theta) k^2 \int_{h_0}^H C_n^2 dh \right]^{-3/5}, \quad (22)$$

式中  $\theta$  表示观测者的天顶角。

结构函数  $C_n^2$  是高度的函数, 可由 H-V 模型给出

$$C_n^2(h) = 8.2 \times 10^{-16} W^2 \left( \frac{h}{10} \right)^{10} \exp(-h) + 2.7 \times 10^{-16} \exp\left(\frac{-h}{1.5}\right), \quad (23)$$

式中  $W^2$  为地面上空 5~20 km 的均方根风速, 具体为

$$W^2 = \left( \frac{1}{15} \right) \cdot \int_5^{20} V^2(h) dh, \quad (24)$$

式中  $V(h)$  为风速, 可由 Bufton 风模型给出

$$V(h) = v_g + 30 \exp\left[-\left(\frac{h-9400}{4800}\right)^2\right], \quad (25)$$

式中  $v_g$  为地面风速, 一般情况下, 风速分为十三级, 每增加一级, 风速增加 1.3~4.1 m/s, 三级风速为 3.4~5.4 m/s, 五级风速为 8~10.7 m/s。

### 3.3 大气折射

大气折射效应是指大气折射率具有随海拔高度增加而变化的特性<sup>[9]</sup>, 折射效应导致的功率损失  $L_{ren}$  可由实际光程计算

$$r = \int_0^h \frac{dh}{\sqrt{1 - \left(1 - \frac{h}{r_p} - \frac{kh}{n_t} - \frac{kh^2}{n_t r_p}\right)^{-2}}}, \quad (26)$$

式中  $h$  为距离地面的高度,  $k$  为光路曲率,  $r_p$  为地球半径,  $n_t$  为近地面大气折射率。

$$k = 1.163 - 0.00968 \cos(2\varphi) - 0.00104T + 0.00001435P, \quad (27)$$

式中  $\varphi$  为激光传输分析点对地心的张角, 大气压强  $P$  为

$$P = P_0 \exp\left(-\frac{gM}{ET} \cdot h\right), \quad (28)$$

式中  $E$  为常数,  $g$  为重力加速度,  $M$  为气体的分子量。

一般情况下, 在海拔不高时, 大约每升高 10 m, 大气压减小 100 Pa。

$$T = 300 - hT_{\nabla}, \quad (29)$$

式中  $T_{\nabla}$  为常数。

## 4 实验与分析

### 4.1 实验验证

楼 A 架设光发射系统, 楼 B 架设光接收系统, 楼间无遮挡。实验条件: 市区内, 冬天, 晚 22 点, 室外温度 -15 ℃, 微风 3 级, 晴朗, 高度为 250 m。主要实验仪器有: 半导体激光器(100 mW~1.5 W 可调)、电光调制系统(外调制方式, 调制速率最大 300 Mb/s)、光学发射和接收系统、光功率计、探测器(灵敏度 250 nW)、信号源和误码仪(配合使用)等。准直器输出光斑直径为 0.98 mm, 发散角为 0.31 mrad, 发射天线孔径 10 cm, 接收天线孔径 38 cm, 光学系统总效率 37%, 链路距离 6 km(受实验条件限制); 手动跟踪瞄准。发射光功率分别为 250, 350, 450 和 550 mW, 接收光功率(多时点均值)分别为 0.074, 0.135, 0.213 和 0.337 mW, 误码率优于  $10^{-8}$ 。通过链路方程得到的接收光功率预算值为 0.1616, 0.2427, 0.3383 和 0.4312 mW。实测结果和预算结果存在 1.1~3.4 dB 误差, 光学系统性能测算和手动跟踪瞄准对误差都有影响, 但总体

误差在合理范围内。当发射光功率较小时,误码仪无法正常提取时钟并且出现极高的误码,甚至导致通信中断(受探测器灵敏度限制)。

#### 4.2 分析讨论

通过高度对 Fried 参数的影响可得到大气湍流产生的光功率损耗。由于风速  $V(h)$  和均方根风速  $W^2$  都是高度  $h$  的函数,所以大气折射率结构函数  $C_n^2$  是高度  $h$  的函数,通过(23)~(25)式得到图 4。将结构函数  $C_n^2$  表达(23)式代入 Fried 参数(22)式,可得到图 5。

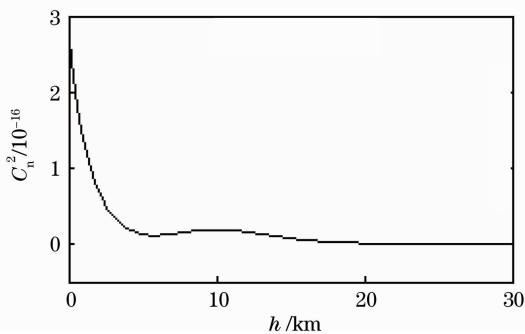


图 4 结构函数  $C_n^2$  与高度  $h$  的二维曲线

Fig. 4 2D curve of structure function  $C_n^2$  versus height  $h$

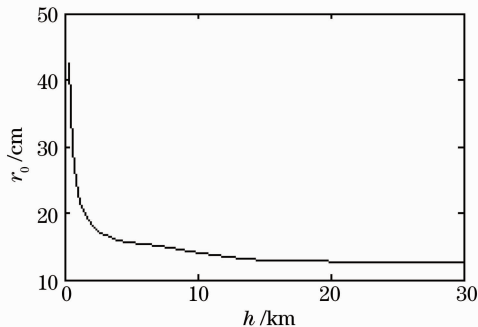


图 5 Fried 参数  $r_0$  与高度  $h$  的二维曲线

Fig. 5 2D curve of Fried parameters  $r_0$  versus height  $h$

从图 4,5 可看出,结构函数  $C_n^2$  在 10 km 处达到局部最大值,高度大于 10 km 时,Fried 参数  $r_0$  逐渐变小并趋于平坦,在高度小于 10 km 时,大气湍流效应对光通信的影响较大。

将(26)式代入链路方程(10)或(12)中,可得到光程变化对功率的影响。设定  $n=1.0028$ ,地球半径 6371 km, $R=8.51$ , $g$  为重力加速度 10, $M$  为 29, $T_{\text{v}}$  一般取 6~7 K。在仿真时,将(26)式中积分下限修改为“2”(否则积分出现复数),可以得到光路曲率  $k$ ,实际光程和理论光程(发射和接收系统的直线距离)之间的光程差  $\Delta r$  与高度  $h$  的关系,如图 6 所示。

从图 4,5 可看出,在高度为 28 km 左右时,光

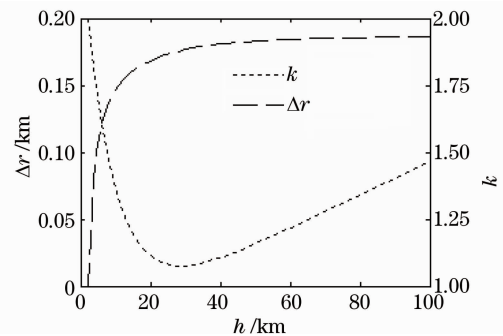


图 6 光路曲率  $k$ ,光程差  $\Delta r$  与高度  $h$  的二维曲线

Fig. 6 2D curve of optical path curvature  $k$  versus actual optical path  $r$  and height  $h$

路曲率出现最小值;高度小于 28 km 时,光程差变化较大,说明大气状态对大气折射效应影响较大;随着高度大于 28 km 时,光程差略有增加,说明高空大气稀薄,对大气折射效应影响越来越小。

## 5 结 论

在空间光通信研究中,推导了一个光通信链路方程,并根据大气信道特性对链路方程进行了修正,实验与分析证明链路方程和修正方法具有合理性,有关湍流、折射等大气信道特性的统计规律及模型参数需要根据当地大气信道特性进行准确测算,以进一步提高链路方程和功率预算的合理性。

近地光通信中大气衰减、湍流和折射效应的影响较大,甚至出现链路中断现象。随着海拔高度的增加,由于高空气体分子和悬浮微粒密度减少,大气衰减、湍流和折射效应逐渐减弱。在距离小于 10 km 的链路中,克服了大气衰减和湍流效应的近地光通信系统可适用于同等距离的星地光通信中。海拔高度大于 28 km 时,大气折射效应的影响逐渐减小,能够实现近地光通信的光通信系统可用于同等距离的星地光通信中。

总体上看,将近地短距离的光通信系统应用于更远距离的星地光通信中,需要考虑大气信道特性的影响,可以通过增加发射光功率密度<sup>[10]</sup>、增加光接收天线孔径<sup>[11]</sup>、采用自适应光学设计等方法改善通信质量<sup>[12]</sup>,并注意海拔高度对光通信链路和功率预算的影响。链路方程和光学收发系统效率、跟踪瞄准误差、信噪比、编码形式等方面的关系将在后续研究中深入开展。

## 参 考 文 献

- Li Rui, Zhao Hongli, Zeng Dexian. Free-space laser communication and its key technology[J]. *J. Applied Optics*,

- 2006, **27**(2): 152~154  
李睿, 赵洪利, 曾德贤. 空间激光通信及其关键技术[J]. 应用光学, 2006, **27**(2): 152~154
- 2 Liu Liren. Laser communications in space I: optical link and terminal technology [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 3~20  
刘立人. 卫星激光通信 I: 链路和终端技术[J]. 中国激光, 2007, **34**(1): 3~20
- 3 Liu Liren. Laser communications in spaceII: test and verification techniques on the ground[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 147~155  
刘立人. 卫星激光通信 II: 地面检测和验证技术[J]. 中国激光, 2007, **34**(2): 147~155
- 4 Li Xiaofeng, Hu Yu. Research of the design method and some important concepts for space-to-ground optical communication [J]. *J. Applied Optics*, 2005, **26**(6): 57~62  
李晓峰, 胡渝. 空-地激光通信链路总体设计思路及重要概念研究[J]. 应用光学, 2005, **26**(6): 57~62
- 5 Hamid, Hemmati. Deep Space Optical Communications [M]. Wang Ping, Sun Wei Transl.. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. 68~87  
Hamid, Hemmati. 深空光通信[M]. 王平, 孙威译. 北京: 清华大学出版社, 2005. 68~87
- 6 Zhu Yong, Sun Xiaoxia. Simulation method of receiving signal in satellite-ground laser communication [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s2): 134~138  
朱勇, 孙晓霞. 星地激光通信中接收光信号的仿真方法[J]. 光学学报, 2008, **28**(s2): 134~138
- 7 Yuan Zongheng, Zhang Wentao. Analysis of the laser beam through random atmosphere channel [J]. *Chinese J. Quantum Electron.*, 2006, **23**(5): 696~700  
袁纵横, 张文涛. 随机大气信道对激光信号传输影响的分析[J]. 量子电子学报, 2006, **23**(5): 696~700
- 8 Xing Jianbin, Xu Guoliang, Zhang Xuping *et al.*. Effect of the atmospheric turbulence on laser communication system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(12): 1850~1852  
邢建斌, 许国良, 张旭苹等. 大气湍流对激光通信系统的影响[J]. 光子学报, 2005, **34**(12): 1850~1852
- 9 Yi Xiuxiong, Guo Lixin, Wu Zhensen. Study on the optical scintillation for Gaussian beam propagation in the slant path through the atmospheric turbulence [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(4): 433~438  
易修雄, 郭立新, 吴振森. 高斯波束在湍流大气斜程传输中的闪烁问题研究[J]. 光学学报, 2005, **25**(4): 433~438
- 10 Yu Jianjie, Tan Liying, Ma Jing *et al.*. A novel method to improve the emission efficiency of satellite optical communication terminal[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 581~586  
俞建杰, 谭立英, 马晶等. 一种提高卫星光通信终端发射效率的新方法[J]. 中国激光, 2009, **36**(3): 581~586
- 11 Liu Zhiying, Hu Yuan, Zhang Lei *et al.*. Power calculation and communication distance equivalent demonstration for optical communication [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s2): 188~190  
刘智颖, 胡源, 张磊等. 光通信中的功率计算与通信距离等效验证[J]. 光学学报, 2008, **28**(s2): 188~190
- 12 Yang Huizhen, Cai Dongmei, Chen Bo *et al.*. Analysis of adaptive optics techniques without a wave-front sensor and its application in atmospheric laser communications [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 680~684  
杨慧珍, 蔡冬梅, 陈波等. 无波前传感自适应光学技术及其在大气光通信中的应用[J]. 中国激光, 2008, **35**(5): 680~684