

# 深空光通信链路特性分析及功率预算

詹伟达, 李洪祚, 王志坚, 唐雁峰, 刘仁成

(长春理工大学空间光电技术研究所, 吉林 长春 130022)

**摘要** 深空光通信链路距离非常远,要求功率预算非常严格。影响通信链路特性的因素很多,功率预算往往需要很复杂的折中考虑。重点分析了链路距离、光学天线直径、光束发散角、大气信道损耗、光学系统损耗、探测器灵敏度等因素对链路方程、探测器信噪比和通信误码率的影响。提出了结合链路方程、信噪比和误码率对发射功率进行预算的新方法。开展了7 km地面间光通信室外演示验证实验,对大气信道损耗、光学系统损耗等进行了测试;开展了光束发散角、探测器灵敏度的室内测试实验。实验结果和理论分析基本吻合,表明该预算方法具有应用于深空光通信的可行性。

**关键词** 深空光通信; 链路方程; 信噪比; 误码率; 功率预算

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2011.05.012

**中图分类号** TN929.13 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2011)05-0055-06

深空距离上进行光通信是十分困难的,光束随发射机和接收机之间的距离呈平方扩散;随着链路距离增加,光通信难度也呈二次方增长。光通信链路方程能够系统地反应大气信道特性和光学系统特性,采用链路方程可以开展较复杂的光功率预算。但对于深空光通信,需要对大气衰减、大气湍流、大气折射、光学系统损耗、瞄准损耗、背景噪声、探测器灵敏度等多方面因素进行综合分析和折中考虑。链路方程能够较好地反应激光从发射机传输到接收机的能力,但是不能反应链路特性和探测器信噪比及通信误码率之间关系。美国、日本、欧空局等先后在飞机与地面、卫星与地面、飞机与飞机、卫星与卫星等光通信方面开展了大量研究工作,但在只有对部分关键技术的少数报道,并没有公开完善的系统理论模型<sup>[1]</sup>。国内多个高等院校和科研单位在深空光通信方面取得了一些阶段性成果,但关于深空光通信链路方程、大气信道特性、信噪比和误码率等方面的详细报道很少。文献[2]对空间光通信链路进行了重点研究,分析了影响光通信链路的各方面因素,但是没有建立能够积极反应光通信链路特性的链路方程。文献[3]对空间光通信系统的探测器信噪比和误码率进行了重点研究,但是没有详细分析链路方程、信噪比和误码率的具体关系。本文结合国内外研究成果,具体分析了大气信道特性和光学系统特性,提出了对传统链路方程的修正方法,建立了一个具有实用和操作价值的链路方程,通过地面间光通信室外演示实验验证了该链路方程的合理性。此外,对探测器信噪比和通信误码率进行了具体分析,对光束发散角和探测器灵敏度进行了实验测试,验证了信噪比和误码率计算方法的准确性。在上述理论分析和实验基础上,建立了信噪比、误码率和链路方程三者之间的具体联系,分析了接收光功率对信噪比和误码率的影响,进一步提出了结合信噪比和误码率反推发射光功率的计算方法,并开展了深空光通信的链路距离和功率预算。

## 1 光通信链路分析

### 1.1 链路方程

\* 收稿日期:2010-10-12

基金项目:国家“863”计划资助项目(2008AA01Z225)

作者简介:詹伟达(1979-),男,吉林长春人,讲师,博士生,主要从事空间光通信研究。E-mail:zhanweida@cust.edu.cn

深空光通信中大气信道、光学系统等因素引起的功率损耗可以由链路方程描述<sup>[4]</sup>。激光在自由空间传播条件下,点光源在远点距离某点 $z$ 处产生的平面波场强度可描述为:

$$I(t, r) = \frac{G_t P_t(t)}{4\pi z^2} \quad (1)$$

式中: $G_t$ 为发射系统在 $z$ 方向的增益; $p_t(t)$ 为发射光功率变化函数,简记为 $p_t$ 。

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 $z$ 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 $\frac{\lambda z}{D_t} \gg 1$ ,光发射光束准直整形后理想平面光束发散角 $\theta_b$ ,结合式(2)可得到:

$$\theta_b \approx \tan \theta_b = \frac{D_z}{z} = \frac{\lambda}{D_t} \quad (3)$$

式中 $\lambda$ 为光波长。

设光发射光束准直整形后光场立体角为 $\Omega_s$ ,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,结合式(4)可得到发射天线有效增益为:

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

结合式(1),通信链路标准功率流方程为:

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

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:

$$G_r = \left(\frac{4\pi}{\lambda^2}\right) A = \left(\frac{4\pi}{\lambda^2}\right) \frac{\pi D_r^2}{4} = \frac{\pi^2 D_r^2}{\lambda^2} \quad (7)$$

式中 $D_r$ 为接收天线孔径(直径)。

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:

$$L_p = \left(\frac{\lambda}{4\pi z}\right)^2 \quad (8)$$

将式(5)、(7)、(8)带入式(6),可得到链路方程的一般表达式<sup>[5]</sup>为:

$$P_r = P_t G_t L_p G_r = P_t \frac{D_r^2}{z^2} \frac{1}{\theta_b^2} = P_t \frac{D_r^2 D_t^2}{\lambda^2 z^2} \quad (9)$$

在深空光通信中,考虑光学系统、大气信道特性等方面因素,链路方程式(9)可修正为:

$$P_r = P_t \eta_t \eta_a L_{tp} L_{atm} L_{pol} L_{rp} \frac{D_r^2 D_t^2}{\lambda^2 z^2} \eta_r \quad (10)$$

式中: $\eta_t$ 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。

## 1.2 光束发散角

激光光束远场发散角的测量可以采用焦斑法<sup>[6]</sup>。远场发散角可定义为:

$$\theta_b = \lambda / \pi \omega_0 = \omega_1 / f \quad (11)$$

式中: $\omega_0$ 为准直器出射光束光腰直径; $\omega_1$ 为透镜焦点处的光斑直径。

从式(11)可看出,远场发散角与透镜的焦距和光束在透镜焦点处的光斑直径有关。这种将光束通过聚焦透镜聚焦的方法有3个优点:①可以实现远场测量;②聚焦后光束漂移较小,给测量带来了方便;③降低了限制孔径引起的衍射效应对光束宽测量的影响。因此测量焦平面上的光斑直径是光束发散角测量的关键。

### 1.3 APD 探测器信噪比

探测器的信噪比可描述为<sup>[3]</sup>:

$$\frac{S}{N} = \frac{2M^2 (Pe\eta/h\nu)^2}{M^n [3e^2 (P + P_B)\eta B/h\nu] + 2e i_d B M^n + 4kT_e B/R_L} \quad (12)$$

式中: $M$ 为APD的增益因子; $P$ 为入射到APD的平均光功率; $P_B$ 为入射到APD的背景光功率; $e$ 为电子电荷; $\eta$ 为每一个入射光子使光阴极发射出来的平均电子数,即量子效率; $h$ 为普朗克常量; $\nu$ 为系统中心频率; $B$ 为系统带宽; $i_d$ 为平均暗电流; $k$ 为波尔兹曼常数; $T_e$ 为温度; $R_L$ 为阻抗。

### 1.4 通信误码率

通信误码率可以描述为<sup>[7,10]</sup>:

$$\text{BER} = \frac{1}{2} \int_0^\infty \text{erfc} \left[ \frac{P_r R_d}{\sqrt{2} \delta_0 [1 + (1 + \delta_{ss}^2)^{1/2}]} \right] u e^{-u^2/2} du \quad (13)$$

式中: $\text{erfc}(x)$ 为补误差函数; $\delta_{ss}^2$ 为有光信号时的量子噪声; $\delta_0^2$ 为没有光信号时的噪声。

式(13)中的量子噪声 $\delta_{ss}^2$ 可描述为:

$$\delta_{ss}^2 = \frac{2e^2 \eta P_r}{h\nu} F(M) M^2 B \quad (14)$$

式中: $F(M)$ 为APD的过噪声因子。可以描述为

$$F(M) = K_{\text{eff}} M + (1 - K_{\text{eff}}) (1 - 2/M) \quad (15)$$

式中 $K_{\text{eff}} = 0.001$ 为电离系数。

$\delta_0^2$ 可描述为:

$$\delta_0^2 = \delta_{\text{th}}^2 + \delta_{\text{dc}}^2 + \delta_{\text{bg}}^2 \quad (16)$$

式中: $\delta_{\text{th}}^2$ 为APD接收机热噪声; $\delta_{\text{dc}}^2$ 为APD接收机暗电流噪声; $\delta_{\text{bg}}^2$ 为APD接收机的背景噪声。

## 2 功率分析及预算方法

### 2.1 由链路方程预算光功率

由链路方程式(9)可看出:随着距离增加,接收光功率逐渐减少,接收光功率和通信距离的平方成反比;随着接收系统孔径增加,接收光功率增加。得到的发射光功率一定、 $z$ 为10 km、光束发散角 $\theta_0$ 、接收天线孔径 $D_r$ 和接收光功率 $P_r$ 的关系曲线见图1。从图1可看出:随着光束发散角减小、接收天线孔径增加,接收功率增加;接收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。

由式(9)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 $P_r$ 的关系曲线见图2。

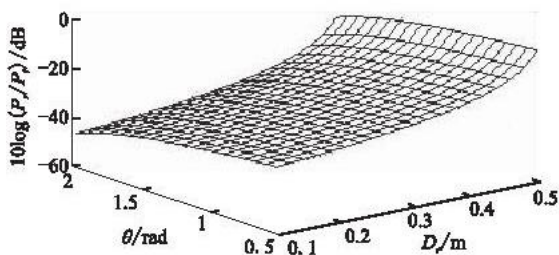


图1  $z = 10$  km 时,  $\theta_0$  和  $D_r$  与  $P_r$  的三维曲线

Fig. 1 3D curve of  $P_r$  versus  $\theta_0$  and  $D_r$ ,  $z = 10$  km

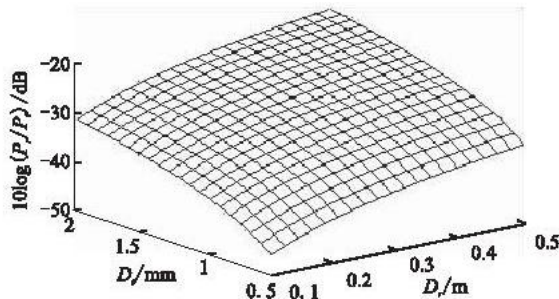


图2  $z = 10$  km 时,  $D_t$  和  $D_r$  与  $P_r$  的三维曲线

Fig. 2 3D curve of  $P_r$  versus  $D_t$  and  $D_r$ ,  $z = 10$  km

从图2可看出:随着发射天线孔径增加、接收天线孔径增加,接收功率增加;接收功率与发射天线孔径的平方成正比、与接收天线孔径的平方成正比。

通过上述分析,可通过链路方程得到发射和接收功率的关系,也可看出链路距离、光束发散角、天线孔径、光波长等参数对功率的影响。

## 2.2 由信噪比计算最小接收光功率

式(12)中 APD 噪声主要有 2 部分构成:热噪声即约翰逊噪声为:  $4kT_c\Delta\nu/R_L$ ; 散粒噪声为  $3e^2(P + P_B)\eta\Delta\nu/h\nu + 2eI_d\Delta\nu$ 。可看出,当  $M=1$  时,分母中的热噪声项比散粒噪声项大得多,所以信噪比  $S/N$  随  $M$  增大;当  $M$  增加到一定值时,散粒噪声项接近热噪声项,信噪比  $S/N$  随  $M$  增加反而减小;在选择  $M$  数值时,需要采取优化设计。

设  $M_0$  为选取的最佳  $M$  值,可以计算出最小的可探测功率(与  $S/N=1$  时对应的功率输入)为:

$$P_{rmin} = \frac{2h\nu}{M_0e\eta} \sqrt{\frac{kT_c\Delta\nu}{R_L}} \quad (17)$$

## 2.3 由信噪比和误码率预算发射功率

联立式(9)和(12),可通过信噪比和链路方程预算发射光功率:

$$P_t = \frac{\frac{2h\nu}{M_0e\eta} \sqrt{\frac{kT_c\Delta\nu}{R_L}}}{\eta_t\eta_aL_{tp}L_{atm}L_{pol}L_{rp} \frac{D_r^2 D_t^2}{\lambda^2 z^2} \eta_r} \quad (18)$$

从式(18)可看到,发射光功率与大气信道和探测器特性密切相关。结合式(9)和(13),可以通过迭代法得到误码率和发射功率的关系,并通过误码率反推得到发射功率。

## 3 实验研究与分析

深空光通信功率预算和地面间光通信室外演示验证实验都需要获得探测器灵敏度、光束发散角、光学系统透过率与大气信道透过率等参数,所以开展下面 4 个实验。理论计算需要的主要参数值有:  $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ;  $M = 200$ ;  $\nu = 3.75 \times 10^{14} \text{ Hz}$ ;  $B = 1 \text{ GHz}$ ;  $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ;  $\Delta\nu = 1 \text{ GHz}$ ;  $\eta = 0.8$ ;  $k = 1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ;  $T_c = 500 \text{ K}$ 。

### 3.1 探测器灵敏度测试实验

半导体激光器发射的激光依次经过衰减片和并行光管后送入探测器前置光学聚焦镜头,精密调节光学镜头的位置,使光斑聚焦到探测器光敏面上,逐渐降低激光器发射光功率,直至探测器后接光电系统工作在临界状态。此后移除探测器和光电系统,采用光功率计精密测量,从而得到探测器的灵敏度<sup>[6-7]</sup>。实际设计光接收机时,需要综合考虑光学天线的透过率和探测器后接光电系统精度,以保证对接收光信息进行解调。

通过上述方法,实验测得探测器的灵敏度为 135 nW,和实验室选用的探测器标称值 120 nW(查数据手册)基本吻合,表明该测量方法合理。

### 3.2 光束发散角测试实验

CCD 测量法原理见图 3。聚焦透镜焦距为光束直径尺寸 10 倍以上,分束板位于焦斑位置,光束经过分束板后得到相互垂直的 2 束光,分别入射到 2 个 CCD 探测器上,计算机通过数据处理,得到光束的光强分布,并计算出光强分布拟合曲线中光斑的尺寸数值<sup>[5-6]</sup>。

半导体激光器后接准直器的输出光束直径为 2.2 mm,光束发散角为 0.008 rad(见数据手册),理论计算的光束发射角为 0.008 5 rad,采用 CCD 测量法得到的平均光束发散角为 0.008 87 rad,理论计算发现光束发散角比数据手册标称值稍大 0.000 5 rad,理论计算和实验结果存在 4% 左右偏差,偏差在合理范围内,表明 1.2 节描述的计算方法较合理。

### 3.3 光学系统透过率测试实验

直接测量激光经过光学系统前后的光功率。为保证测量精度,可以在光路中插入衰减片,以检测低功率时光学系统的透过率,并采用多点测量取透过率的平均值<sup>[8-10]</sup>,实验结果见表 1。

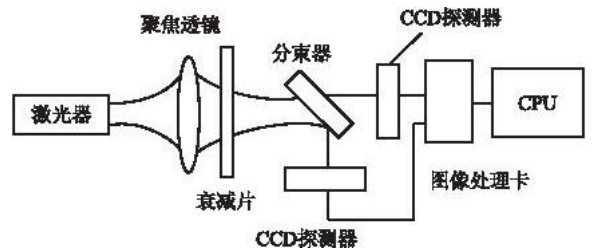


图3 CCD 测量原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of CCD measurement

表1 透过率测量结果

Tab.1 Results of transmittance test

|           |      |       |       |       |       |
|-----------|------|-------|-------|-------|-------|
| 接收功率/mW   | 4    | 10    | 50    | 100   | 300   |
| 出射功率 1/mW | -    | 7.31  | 37.4  | 75.1  | 226.4 |
| 透过率 1     | -    | 0.721 | 0.748 | 0.751 | 0.754 |
| 出射功率 2/mW | 3.3  | 8.2   | 41.2  | 83    | -     |
| 透过率 2     | 0.82 | 0.83  | 0.83  | 0.83  | -     |

实验表明:实验测试及计算得到光学发射光学系统透过率平均值为 0.79,接收光学系统透过率平均值为 0.83。

### 3.4 地面间光通信室外演示验证实验

本实验主要演示和验证深空光通信主要关键技术和相关理论分析。通过计算发射和接收光功率,以测试通信链路的总损耗,验证链路方程建立和功率损耗计算方法的合理性。

实验系统:A楼架设光发射系统,B楼架设光接收系统,楼间无遮挡。实验条件:市区内,冬天,晚22点,室外温度 $-15^{\circ}\text{C}$ ,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-2 W可调)、电光调制系统(外调制方式,调制速率最大500 Mbps)、光学发射和接收系统、光功率计、探测器、信号源和误码仪(配合使用)等。发射天线孔径10 cm,接收天线孔径38 cm;链路距离7.13 km(受实验条件限制);手动跟踪瞄准。实验结果见表2。

表2 发射功率、接收功率和预算功率测试结果

Tab.2 Results of transmit, receive and budget power test

|         |       |       |       |       |       |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 发射功率/mW | 150   | 250   | 350   | 450   | 550   |
| 接收功率/mW | 0.043 | 0.071 | 0.129 | 0.198 | 0.317 |
| 预算功率/mW | 0.057 | 0.091 | 0.172 | 0.247 | 0.413 |

实验表明:实测结果和预算结果存在一定偏差,主要由于大气信道条件和手动跟踪瞄准对偏差有影响,但总体偏差在合理范围内。当发射光功率较小时,误码仪无法正常提取时钟并出现极高的误码,甚至导致通信中断,主要受探测器灵敏度和自制光电系统限制。

## 4 链路距离及功率预算

通过上述分析和实验,发射和接收光学天线总透过率为0.66,大气透过率为0.9,探测器灵敏度为150 nW,光束发散角为0.008 87 rad,发射机发射光功率选择2.0 W时,结合2.1节和3.4节分析结果,设信噪比为53 dB,应用式(18),预算链路距离为27 185 m;设误码率为 $10^{-9}$ ,结合式(9)、(13),预算链路距离为33 437 m。在应用上述光学收发系统和保证上述探测灵敏度、信噪比和误码率的前提下,要实现40 000 m的光通信,需要发射光功率至少在3.0 W以上。

## 5 结束语

链路方程为深空光通信链路设计及分析提供了一种比较有效的手段,有利于采用计算机辅助分析建立能够反应所有链路参数的系统的理论模型。理论分析与实验证明:结合信噪比、误码率和链路方程开展链路距离及功率预算是比较安全可靠的,相关成果为深空光通信相关领域进一步研究奠定了理论基础。

### 参考文献

- [1] 张文涛. 自由空间光通信技术及国内外发展状况[J]. 量子电子学报, 2003, 20(3): 269-272.  
ZHANG Wentao. Technology and development of free-space laser communication[J]. Chinese journal of quantum electronics, 2003, 20(3): 269-272. (in Chinese)
- [2] 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.  
LIU Liren. Laser communications in space I optical link and terminal technology [J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(1): 3-20. (in Chinese)

- [3] 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.  
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. (in Chinese)
- [4] 邓代竹,荣健. 大气对近地面无线激光通信链路的影响[J]. 红外与激光工程, 2004, 33(3): 243 - 247.  
DENG Daizhu, Rong Jian. Atmospheric effects on the link near the earth of optical wireless communication [J]. Infrared and laser engineering, 2004, 33(3): 243 - 247. (in Chinese)
- [5] 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.  
Hamid, Hemmati. Deep space optical communications [M]. WANG Ping, SUN Wei, translated. Beijing: Tsinghua university press, 2005:68 - 87. (in Chinese)
- [6] 郭瑞, 杨华军, 胡渝. 光通信中激光发散小角度远场焦斑测量法[J]. 电子科技大学学报, 2006, 35(4): 437 - 439.  
GUO Rui, YANG Huajun, HU Yu. Far - field focus facular measurement method concerning small - angle of laser divergence in optical communication [J]. Journal of university of electronic science and technology of China, 2006, 35(4): 437 - 439. (in Chinese)
- [7] 周震,崔芳,孙雨南,等. 用于 LD 光束准直整形的 GRIN 透镜的设计[J]. 光子学报, 2000, 29(Z1): 237 - 241.  
ZHOU Zhen, CUI Fang, SUN Yunan, et al. Design of GRIN lens for LD beam collimation and shaping [J]. Acta photonica sinica, 2000, 29(Z1): 237 - 241. (in Chinese)
- [8] 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.  
ZHU Yong, SUN Xiaoxia. Simulation method of receiving signal in satellite - ground laser communication [J]. Acta optica sinica, 2008, 28(S2): 134 - 138. (in Chinese)
- [9] Rahman M A, Haxha S, Obayya S S A, et al. Design issues for high - speed electro - optic modulators [J]. Active and passive optical components for WDM communications III proc SPIE, 2003, 5246: 287 - 298.
- [10] MAURER Donald E, BOONE Bradley B. Conceptual design and algorithm evaluation for a very accurate imaging star tracker for deep - space optical communications [J]. SPIE, 2002, 4821: 237 - 247.

(编辑:徐楠楠)

## Link Identity Analysis and Power Budget for Deep Space Optical Communications

ZHAN Wei - da, LI Hong - zuo, WANG Zhi - jian, TANG Yan - feng, LIU Ren - cheng

(School of Opto - Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** The deep space optical communication links are very far away, so a very harsh power budget is required. Since there are many factors affecting the feature of communication link, a very complex trade - offs consideration is often given to the power budget. The paper emphatically analyzes the link distance, optical antenna diameter, beam divergence, atmospheric channel loss, optical system loss, detector sensitivity and other factors affecting the link equation, signal to noise ratio (SNR) of detector and bit error rate (BER) of communications. Simultaneously the paper proposes a new method of budgeting transmission power combining the link equation, SNR and BER. An outside demonstration experiment for the ground - ground optical communication of 7km, is carried out, the losses of the atmospheric channel and optical system are tested. Then again many experiments in indoor labs, test the beam divergence and detector sensitivity are performed. The experimental results and theory analysis show that the budget method is feasible in application to the deep space optical communications.

**Key words:** deep space optical communications; link equation; signal to noise ratio; bit error rate; power budget