

文章编号: 0258-7025(2004)Supplement-0418-03

卫星光通信中光束跟瞄技术研究

于思源, 马晶, 谭立英, 韩琦琦, 陈云亮

(哈尔滨工业大学 可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 卫星光通信中,两个光通信终端同时对来自对面终端的光束进行跟踪,跟踪误差为时间和统计上的联合随机变量。讨论了跟踪误差对光功率接收的影响,对双向跟踪的稳态条件进行了估计。最后,以开关键控脉冲调制和直接检测方式的卫星光通信为例,通过仿真分析了跟瞄误差对光通信的影响。

关键词 卫星光通信; 跟瞄; 稳态条件; 误码率

中图分类号 TN929.13 文献标识码 A

Beam Tracking Technology in Intersatellite Optical Communications

YU Si-yuan, MA Jing, TAN Li-ying, HAN Qi-qi, CHEN Yun-liang

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract Two terminals in intersatellite optical communications (IOC) track each other, the tracking errors should be joint random variables in time and statistics. The influences of the tracking errors on the optical receiving are analyzed, and the stability state condition is estimated. At last, for on-off keying modulation and direct detection in IOC, the influences of the tracking errors on the optical communication are simulated.

Key words intersatellite optical communications; tracking; stability state condition; bit error rate

1 引言

与无线电波通信相比,采用光波段进行卫星通信具有数据率高、设备体积小、抗干扰和保密性好等显著的优点。近年来,美国、欧洲和日本已相继开展了卫星光通信空间试验^[1-3]。从试验结果可以看出,在瞄准捕获和跟踪技术中还存在着许多急需解决的问题。除了提高系统的硬件性能外,瞄准捕获和跟踪实施方案的优化问题也非常重要。

由于卫星光通信中激光光束的束宽很窄(微弧度量级),对光束的跟踪和瞄准技术提出了较高的要求。不精确的光束跟瞄将导致接收端信号大量丢失和系统通信性能的严重下降。本文首先分析瞄准误差对光功率接收的影响,讨论双向跟瞄过程中的稳态条件问题。最后,通过数值仿真分析跟瞄对光通信的影响问题。

2 瞄准误差影响分析

图1所示为卫星光通信中跟瞄阶段的某一时刻,卫星II上光通信终端接收卫星I终端发射信标

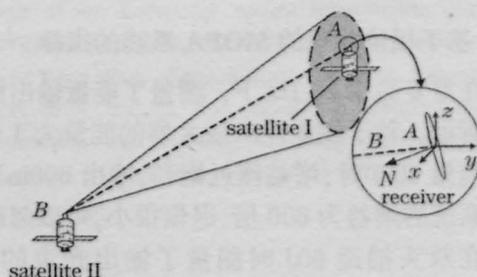


图1 光束瞄准示意图

Fig. 1 Diagram of beam pointing

光的情况。点A和B分别为卫星I和II上光通信终端接收(发射)天线光阑的中心,BN为卫星II终端接收天线光阑平面的法线。

以点A为中心建立星上直角坐标系xyz,Az指向地心,Ax在卫星轨道平面内,垂直于Az轴,指向卫星运动方向。设 $r_{BA}(\theta_v, \theta_h, t)$ 为点B到A连线的角方向矢量, $r_B(\theta_v, \theta_h, t)$ 为法线BN向终端外的角方向矢量。卫星I终端的瞄准角度误差为

$$\phi(\theta_v, \theta_h, t) = r_B(\theta_v, \theta_h, t) - r_{BA}(\theta_v, \theta_h, t) \quad (1)$$

同样也可得出卫星II终端的瞄准角度误差,设为 $\psi(\theta_v, \theta_h, t)$ 。为了简化分析过程,引入径向角度误

差, 定义为 $\phi_e^2 = \phi_v^2 + \phi_h^2$, $\psi_e^2 = \psi_v^2 + \psi_h^2$ 。对于高斯光束, 传输横截面内的光强分布函数为

$$I(x, y, z) = \frac{C_0}{w^2(z)} \exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{w^2(z)}\right] \quad (2)$$

式中 C_0 为常数因子, $w(z)$ 是与传播轴线相交与 z 点的高斯光束等相位面上的光斑半径。终端 1 信号接收端天线接收到的光功率可表示为

$$P_r = \int_{A_r} I(\psi_v, \psi_h, \rho) d\theta_v d\theta_h \quad (3)$$

积分区域 $A_r \approx A_0 \cos(\phi_e)$ 为信号接收端的有效接收面积, A_0 为接收天线口径的面积。由于卫星间光通信的链路距离较远, 信号接收端光斑半径内的面积远大于接收面积, 即 $\pi w^2(z) A_r$, 可认为在积分面积 A_r 内 $I(\psi_v, \psi_h, \rho)$ 大小不变。可得

$$P_r \approx \frac{4C_0 A_0}{\rho^2 \theta_b^2} \cos(\phi_e) \exp\left(-\frac{8\psi_e^2}{\theta_b^2}\right) \quad (4)$$

可见, 功率接收除了与发射端和接收端的瞄准误差有关外, 还与信号光发射功率、接收天线口径、传输距离及束散角等系统参量有关。定义功率损失函数

$$G'(\phi_e) = \frac{P_r}{P_r|_{\phi_e=0}} = \cos(\phi_e) \quad (5)$$

$$G(\psi_e) = \frac{P_r}{P_r|_{\psi_e=0}} = \exp\left(-\frac{8\psi_e^2}{\theta_b^2}\right) \quad (6)$$

图 2 为发射端和接收端的瞄准误差与功率损失函数的关系曲线。随着发射端瞄准误差的增加, 接收功率比率呈现出了明显的变化。当 $\psi_e > \theta_b/2$ 时, 功率损耗高达 90%。在光信号探测视阈角度范围内, 接收端瞄准误差对功率接收的影响非常小, 可以忽略不计。此外, 增大光束的束散角, 可以明显降低跟瞄误差对功率接收的影响。

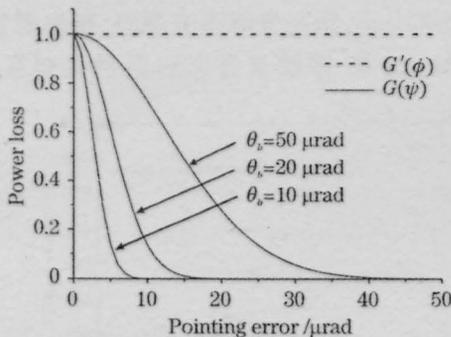


图 2 瞄准误差对功率接收的影响

Fig.2 Influences of tracking errors on power receiving

3 跟瞄稳态条件

跟踪过程中, 卫星光通信系统的两端都将产生瞄准角度误差且相互影响。因此, 瞄准角度误差为

时间和统计上的联合随机变量。

以终端 1 为例分析跟踪误差的统计特性。假定跟踪环路为具有高斯型噪声、线性化, 同时在俯仰角和方位角上无耦合情况。取 $x = \psi_e(t - t_d)$, $y = \phi_e(t)$, t_d 为光束传输时延。t 时刻终端 1 上由噪声引起的跟踪误差的条件方差为

$$\sigma_e^2 | x = \sigma_n^2 G^{-q}(x) \quad (7)$$

指数 q 位于 1 和 2 之间, 分别表示接收探测器量子极限和噪声情况。 σ_n^2 为终端 2 在 $t - t_d$ 时刻准确瞄准时的终端 1 跟踪方差。假设终端 1 上的瞄准误差振幅 $\psi_e(t)$ 应为条件瑞利分布, 概率密度为

$$p(y|x) = \frac{y}{\sigma_n^2 G^{-q}(x)} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_n^2 G^{-q}(x)}\right] \quad (8)$$

误差振幅变量 x 和 y 的联合概率密度可表示为 $p(x, y) = p(y|x)p(x)$ 。 $p(x)$ 可以通过假定终端 2 上的瞄准误差在 $t - t_d$ 时刻之前已达到稳态来进行近似。通过分析跟踪误差方差的变化, 可以对稳态条件进行估计。如果达到稳态, 则在一个循环中方差不再增加。取迭代的间隔为 t_d , 在 $(i+1)$ 时刻的方差应为时刻方差的平均值

$$\sigma_{i+1}^2 = \int_0^{\infty} (\sigma_n^2 | x) p_i(x) dx = \sigma_0^2 \int_0^{\infty} G^{-q}(x) p_i(x) dx \quad (9)$$

$p_i(x)$ 为 $x = \phi_e(it_d)$ 的概率密度, 取为瑞利分布

$$p_i(x) = (x/\sigma_i^2) \exp(-x^2/2\sigma_i^2).$$

对于束宽为 θ_b 的激光束, 功率损失函数

$$G(x) = \exp(-8x^2/\theta_b^2),$$

将 $p_i(x)$ 和 $G(x)$ 代入(9)式, 经过推导可得稳态跟踪方差的条件表达式

$$\sigma_{ss}^2 = \frac{\theta_b^2 - \theta_b \sqrt{\theta_b^2 - 64q\sigma_n^2}}{32q} \leq \frac{\theta_b^2}{32q} \quad (10)$$

可以看出, 增大跟踪光束的束宽和探测信噪比, 可直接提高双向跟踪的稳定性能。引入 σ_{ss} 后, 可得跟踪过程中误差振幅变量 x 和 y 的联合概率密度

$$p(x, y) = \frac{xy}{\sigma_n^2 \sigma_{ss}^2} \exp\left(-\frac{8qx^2}{\theta_b^2}\right) \times \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_n^2} \exp\left(-\frac{8qx^2}{\theta_b^2}\right) - \frac{x^2}{2\sigma_{ss}^2}\right] \quad (11)$$

可见 σ_n^2 , σ_{ss}^2 , θ_b 和 q 等参量决定了跟踪误差振幅的分布情况。

4 数值仿真

设在卫星间光通信中, 通过开关键控(OOK)方式对通信信号进行脉冲调制, 探测方式为直接检测。在每个比特时间内, 通过在光电探测器输出端进行

积分并判定积分电流是否超过某一阈值来实现解码。设光信号发射端的跟踪误差振幅为 x , 接收端的跟踪误差振幅为 y , 并且假设在一个数字脉冲积分时间 T_b 内 x 和 y 为常数。由于跟踪误差为随机变量, 卫星光通信系统的平均误码率为

$$\text{BER}_E = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} Q[\sqrt{\text{SNR}_0 G^q(x)}] p(x, y) dx dy \quad (12)$$

其中 SNR_0 为跟踪误差为零时的信噪比。代入(11)式可得

$$\begin{aligned} \text{BER}_E = & \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} Q\left[\sqrt{\text{SNR}_0} \exp\left(-\frac{8qx^2}{\theta_b^2}\right)\right] \times \\ & \frac{xy}{\sigma_x^2 \sigma_y^2} \exp\left(-\frac{8qx^2}{\theta_b^2}\right) \times \\ & \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2} \exp\left(-\frac{8qx^2}{\theta_b^2}\right) - \frac{x^2}{2\sigma_x^2}\right] dx dy \quad (13) \end{aligned}$$

考虑到式(13)无法得出解析解, 利用 Matlab 进行数值积分求解。其中, 取 $\sigma_{ss} = \theta_b / \sqrt{32q}$, $\sigma_n = 2 \mu\text{rad}$, $q =$

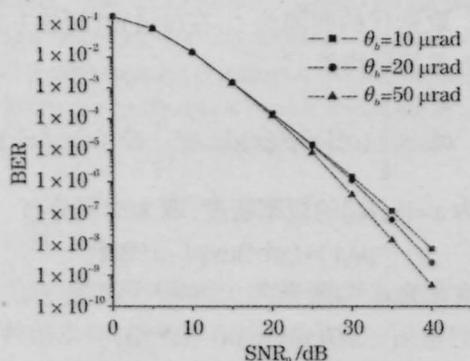


图3 跟瞄光束发散角不同的误码率曲线

Fig 3 Curves of BER with different divergence angles

$1.5, \theta_b = 10 \mu\text{rad}, 20 \mu\text{rad}, 50 \mu\text{rad}$ 。图3为仿真得到的误码率变化曲线。在 SNR_0 较小时, 误码率较大, 改变束散角对光通信的误码率影响不明显; 在 SNR_0 较大时, 误码率较小, 增大激光束散角, 即提高最大跟瞄稳态方差, 可以明显减小光通信误码率。

5 结 论

本文对卫星光通信中的跟瞄技术进行了研究。对于瞄准过程, 在光信号探测视阈角度范围内, 接收端瞄准误差对功率接收的影响非常小, 可以忽略不计, 而增大发射激光的束散角将有利于光功率的接收。在两个链路光通信终端相互跟瞄的过程中, 存在一个与激光束散角和功率接收质量有关的跟瞄稳态方差。满足这一方差条件, 可以避免双向跟瞄出现发散现象。对于以开关键控脉冲调制和直接检测方式的卫星光通信, 当误码率较小时 ($\leq 10^{-6}$), 增大激光束散角和提高探测信噪比, 即提高最大跟瞄稳态方差, 可以明显减小光通信误码率。

参 考 文 献

- 1 I. I. Kim, B. Riley, N. M. Wong. Lessons learned from the STRV-2 satellite-to-ground lasercom experiment [C]. *SPIE*, 2001, **4272**: 1~15
- 2 Toni Tolker-Nielsen, Gotthard Opperhaeuser. In orbit test result of an operational optical intersatellite link between ARTEMIS and SPOT4, SILEX [C]. *SPIE*, 2002, **4635**: 1~15
- 3 Morio Toyoshima, Kenichi Araki. In-orbit measurements of short term attitude and vibrational environment on the engineering test satellite VI using laser communication equipment [J]. *Opt. Eng.*, 2001, **40**(5): 827~832