

星间光通信链路稳定保持时间估算

于思源 闫 坤 谭立英 马 晶

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 针对目前星间光通信链路信号传输有效时间较短的问题,提出了双向激光链路跟踪稳定性的概念,分析了多种因素对跟踪稳定性的影响。综合接收信噪比、相对运动角速度和链路性能要求等因素,建立了链路稳定时间的期望公式。利用Simulink建立了双向激光通信链路跟踪仿真模型,通过仿真验证了理论公式的正确性。为实现星间光通信链路保持长时间稳定,提出在不同星间相对运动速度下采用不同控制参数的方法,实现了星间光通信终端控制策略优化,对今后卫星光通信航天工程化应用具有一定的意义。

关键词 光通信;双向链路;跟踪稳定性;链路稳定时间

中图分类号 TN929.13

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1105004

Time Estimation of the Link Stability in Inter-Satellite Optical Communications

Yu Siyuan Yan Shen Tan Liying Ma Jing

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

Abstract The concept of the bidirectional laser link tracking stability in inter-satellite optical communication is proposed for the problem of short effective time of the signal transmission in the current and the influence of various factors on the tracking stability is analyzed. Considering receiving signal-to-noise ratio(SNR), relative motion velocity, link performance requirements and other factors, expectation formulas of tracking stability time are established. A relatively complete simulation model of bidirectional laser link tracking in inter-satellite communication with Simulink is established, which can prove the correctness of the theory formula. To maintain inter-satellite optical communication link stability for a long time, a method utilizing different control parameters at different velocities between the satellites is proposed, and the control strategy in inter-satellite optical communication terminal is optimized. The results of this paper are significant for the aerospace engineering of satellite optical communications.

Key words optical communications; bidirectional link; tracking stability; link stability time

OCIS codes 060.4510; 200.2605; 100.4999

1 引 言

卫星光通信特别是全光链路组网具有传输速率高、保密性好、地面基站要求少等特点,已成为各国争相发展的重要战略技术^[1-2]。随着“海洋2号”卫星光通信链路实验的成功,我国已走入卫星光通信技术发展的前列,其捕获概率、捕获时间等性能指标已明显优于国外^[3]。瞄准、捕获和跟踪(PAT)技术作为卫星光通信的关键技术,保证了在通信距离远、空间环境复杂、光束发散角小等条件下,光通信链路的快速建立和稳定运行^[4]。

目前,卫星光通信中PAT系统的设计,普遍采用复合轴控制方法^[5]。国际上较为成功的星间光通信实验有SILEX计划(平均通信时间为12.5 min)、OICETS与ARTEMIS链路实验(平均通信时间为10 min)以及NFIRE

收稿日期: 2015-06-29; 收到修改稿日期: 2015-08-17

作者简介: 于思源(1974—),男,博士,教授,主要从事卫星光通信瞄准、捕获和跟踪系统方面的研究。

E-mail: yusiyuan@hit.edu.cn

与 Terra SAR-X 链路实验(最长通信时间 516 s)^[6-8]。从实验结果看出,通信实验链路时间不能满足当下通信对时间的要求,故急需对星间光通信链路跟踪稳定性进行研究。文献[9]中得到了在双向跟踪时,满足链路收敛条件、通信各端的最大跟踪方差约束条件。文献[10]对文献[9]进行了修正,提出了跟踪中存在 CCD 测角误差的理论,并得到了在不同的信噪比(SNR)下,双向链路稳定跟踪收敛约束条件。

随着卫星光通信技术的发展,对跟踪精度的要求越来越高,尤其是在光通信中使用光纤耦合技术,使得对跟踪精度的要求进一步提高。然而文献[9-10]中得到的光通信链路收敛的稳定约束条件过于宽泛,已经不能满足当下对跟踪精度的要求。这就使得仅仅满足跟踪链路收敛并不能使跟踪稳定。针对上述问题,本文研究了链路稳定保持时间与终端设计关键参数的关系,给出的估算方法对今后的全光链路组网应用具有一定的参考意义。

2 稳定时间估算公式

将一段时间 τ 内的断路视为独立事件,若求得其断路概率 P ,则时间 $N\tau$ 内的断路可视为 N 次独立重复实验, $N\tau$ 内的断路概率服从几何分布。事件发生时实验次数 X 期望为

$$E(X) = \frac{1}{P}, \quad (1)$$

断路时间期望为

$$E(T) = \frac{\tau}{P}, \quad (2)$$

式中 τ 可以取 CCD 的探测周期, CCD 的探测周期为 1 ms。

卫星光通信的跟踪过程中,对随机产生的跟踪误差不断进行补偿。本文认为跟踪误差角超出 CCD 跟踪视域时,跟踪链路断路。当某几种噪声相互叠加,产生较大的跟踪误差角,该误差角不能被 CCD 及时采样补偿,超出跟踪视域时,断路发生。分析跟踪误差角产生的原因,主要有卫星平台角振动、卫星相对运动、CCD 测角误差以及粗、精跟踪误差等。

由文献[11]可知卫星平台振动功率谱密度为

$$S(f) = \frac{160}{1+f^2}, \quad (3)$$

对其进行时域可还原得到振动序列。

图 1 为卫星平台振动时域序列,利用精跟踪系统可以对该振动进行补偿。跟踪角的绝对位置与振动时域序列之差可认为是跟踪误差角。对于跟踪误差角的补偿,本文认为精跟踪系统带宽大于 CCD 探测到误差角的谱宽,故跟踪系统在 1 个 CCD 探测周期内可以完全补偿误差角。在实际情况中,由于脱靶量运算时间以及电控时间等的影响,对 CCD 探测到的脱靶量进行补偿需要延时 1 个探测周期。

由图 2 可知,跟踪角在对平台角振动进行跟踪的过程中,在振动角附近产生了较大的震荡,这是由于上述延时造成的。 t_2 到 t_3 时刻跟踪角绝对位置上升而非下降,是因为 t_3 时刻响应了 2 个 CCD 探测周期前 t_1 时刻探测到的 Φ_1 ,由此产生了较大的震荡。为减小该震荡,可采用对跟踪误差角乘以某一控制参数 p 的跟踪策略。

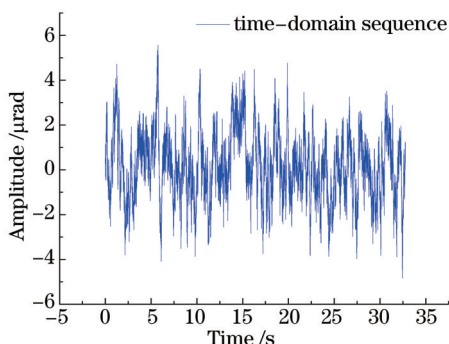


图 1 卫星平台角振动时域序列

Fig.1 Satellite platform angular vibration time-domain sequence

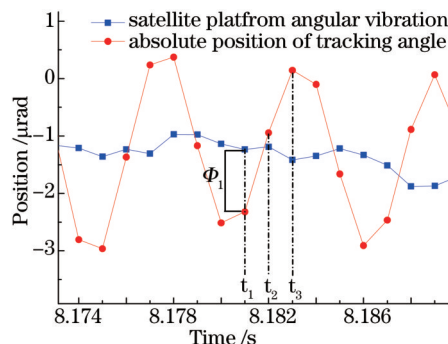


图 2 卫星平台角振动与跟踪角绝对位置变化

Fig.2 Variation of satellite platform angular vibration and absolute position of tracking angle

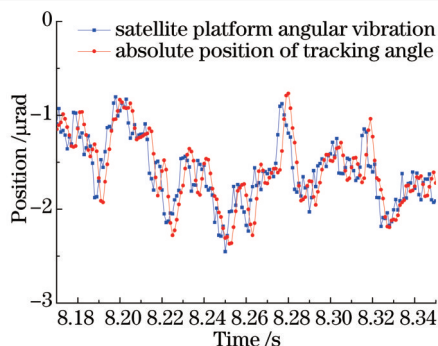


图3 控制参数 $p=0.5$ 时跟踪角绝对位置变化
Fig.3 Variation of tracking angular absolute position (control parameter $p=0.5$)

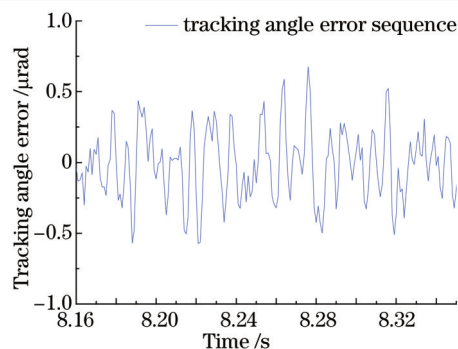


图4 卫星平台角振动引起的跟踪误差序列
Fig.4 Tracking error sequence caused by satellite platform angular vibration

图3为控制系数 $p=0.5$ 时,跟踪角的绝对位置分布,对比图2可看出此时跟踪角的震荡大大减小,由角振动与跟踪角绝对位置之差可得跟踪误差序列,如图4所示。

图4中跟踪误差序列满足高斯分布,在 CCD 二维平面上由上述原因引起的误差分布为该高斯分布在 X, Y 轴相互独立的联合分布,可表示为

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_v^2} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x^2 + y^2}{\sigma_v^2}\right)\right], \quad (4)$$

式中 $\sigma_v = 0.2579$, 表示平台振动引起误差的方差。

卫星相对运动会带来较大误差,文献[12]指出,卫星间在轨相对运动角速度为 $0.8 \sim 6.4$ mrad/s。这使 CCD 探测到的跟踪误差角在每个探测周期增加一个平移量 $|V_d|$, 其最大值为 $6.4 \mu\text{rad}$ 。考虑到控制参数 p , 使概率分布产生如下平移:

$$\frac{V_d}{p} = \left(\frac{x_d}{p}, \frac{y_d}{p}\right), \quad (5)$$

式中 $|V_d|_{\max} = 6.4$ 。

光通信终端的复合跟踪(粗跟踪、精跟踪)系统具有宽跟踪带宽、强稳健性等特点^[13-14]。在一个 CCD 探测周期内,近似认为复合跟踪可完全达到预定位置^[15],其影响仅为引入了方差为 σ_i 的高斯噪声。对于 σ_i 的取值,应考虑到粗、精跟踪的跟踪带宽与 CCD 的探测周期。由于电控延时的原因,粗精跟踪的误差会被放大,放大系数与控制参数 p 有关,可表示为 $c(p)$ 。其噪声满足如下高斯分布:

$$f(x_i, y_i) = \frac{1}{2\pi c(p)^2 \sigma_i^2} \exp\left\{-\frac{1}{2} \left[\frac{x_i^2 + y_i^2}{c(p)^2 \sigma_i^2}\right]\right\}. \quad (6)$$

根据延迟的跟踪策略可得控制参数与放大系数的关系,如图5所示。

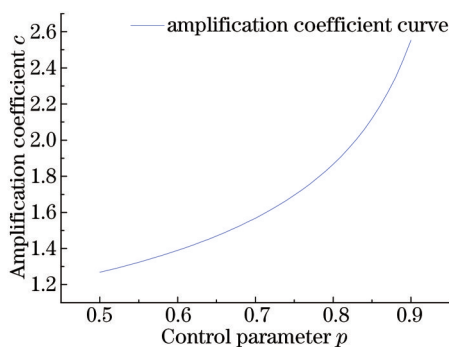


图5 放大系数与控制参数的关系

Fig.5 Relationship between amplification coefficient and control parameter

文献[10]中提出了 CCD 测角误差的概念,使得 CCD 测量脱靶量产生误差,可表示为

$$\begin{cases} \Delta\Phi_A = \mu(\Phi_B)\Phi_A \\ \Delta\Phi_B = \mu(\Phi_A)\Phi_B \end{cases}, \quad (7)$$

式中 $\mu(\Phi) = 1 / \left\{ 1 + R_{sno} \exp \left[-\frac{8\Phi(t - T_r)^2}{\theta_b^2} \right] \right\}$, Φ_A 和 Φ_B 分别为通信终端 A 和 B 的跟踪误差角, T_r 为光两终端光传播的弛豫时间, θ_b 为光束发散角, R_{sno} 为光斑中心信噪比。

CCD 测角误差使测得的脱靶量偏小, 相当于 CCD 上一探测时刻得到的脱靶量的缩小, 其分布为

$$f(x_{CCD}, y_{CCD}) = \frac{1}{2\pi\sigma_{CCD}^2} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{[x_{CCD} - \mu(\Phi_B)x_d/p]^2 + [y_{CCD} - \mu(\Phi_B)y_d/p]^2}{\sigma_{CCD}^2} \right] \right\}, \quad (8)$$

式中 $\sigma_{CCD} = \mu(\Phi_B) \sqrt{c(p)^2 \sigma_i^2 + \sigma_v^2}$ 。

星间光通信中跟踪误差概率分布为(4)、(5)、(6)、(8)式几种误差分布的和分布, 即

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi[\sigma_v^2 + c(p)^2 \sigma_i^2 + \sigma_{CCD}^2]} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{\left[x - \frac{\mu(\Phi)x_d + x_d}{p} \right]^2 + \left[y - \frac{\mu(\Phi)y_d + y_d}{p} \right]^2}{\sigma_v^2 + c(p)^2 \sigma_i^2 + \sigma_{CCD}^2} \right] \right\}. \quad (9)$$

极坐标系下断路的概率为

$$P = \int_0^{2\pi} \int_r^{+\infty} \frac{1}{2\pi[\sigma_v^2 + c(p)^2 \sigma_i^2 + \sigma_{CCD}^2]} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{r^2 + (\mu + 1)^2 |V_d/p|^2 - 2r(\mu + 1) |V_d/p| \cos \theta}{\sigma_v^2 + c(p)^2 \sigma_i^2 + \sigma_{CCD}^2} \right] \right\} r dr d\theta. \quad (10)$$

根据(2)式得到链路稳定期望时间 T 为

$$T = \frac{\tau}{P}. \quad (11)$$

认为跟踪误差角大于 $10 \mu\text{rad}$ 时, 链路断路。表 1 为利用(11)式得到的理论期望时间。

表 1 链路跟踪时间 $\lg T$ 与星间相对角速度(mrad/s)和控制参数 p 的关系

Table 1 Relationship between link tracking time $\lg T$ and relative angular velocity (mrad/s) and control parameter p

$ V $	6.4	5.9	5.4	4.9	4.4	3.9	3.4	2.9	2.4	1.9	1.4	0.9	0.4
$p=0.9$	-0.914	-0.19	0.65	1.62	2.38	3.67	4.81	6.22	7.43	10.0	11.0	13.1	15.4
$p=0.8$	-1.27	-0.22	1.12	2.76	4.56	7.17	8.81	12.4	15.3	17.3	22.7	26.5	30.2
$p=0.7$	-2.41	-1.57	-0.22	1.67	4.15	7.04	10.5	14.6	19.2	25.5	30.7	37.5	44.8
$p=0.6$	-3.00	-2.83	-2.21	-0.82	1.47	4.89	9.25	13.9	20.8	27.9	34.4	45.1	55.4
$p=0.5$	-3.00	-3.00	-3.00	-2.83	-1.85	0.54	4.32	10.0	17.6	26.2	36.1	49.8	62.3

表 1 表示在不同星间相对角速度 $|V|$ 及不同的控制参数 p 下, 星间光通信链路保持稳定的期望时间, 其中光束发散角 $\theta_b=200 \mu\text{rad}$, 光斑中心信噪比 $R_{sno}=20$ 。由表 1 可知, 在不同的相对角速度下, 通过采用不同的

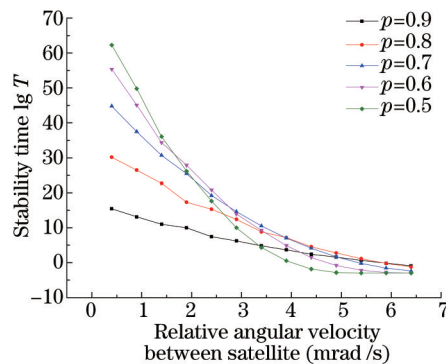


图 6 理论跟踪链路稳定时间随星间相对角速度变化

Fig.6 Variation of theoretical tracking link stability time with relative angular velocity between satellites

控制参数 p , 可使稳定时间达到最大。由表 1 作图得到对数链路跟踪时间随星间相对角速度的变化, 如图 6 所示, 可在不同的相对角速度下采用最佳的控制参数, 使跟踪稳定时间最大。

3 系统仿真及分析

利用 Matlab/Simulink 对星间光通信系统双端链路进行仿真, 验证理论公式的准确性。Simulink 仿真模型结构如图 7 所示。

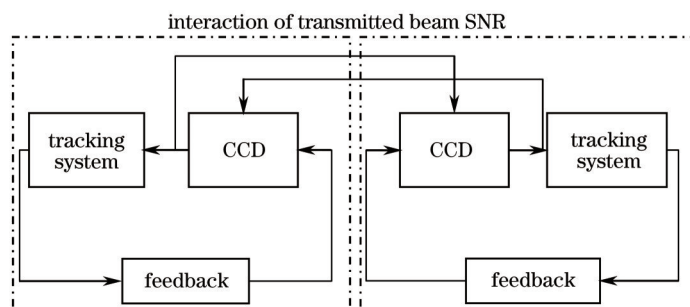


图 7 仿真结构示意图

Fig.7 Simulation schematic diagram

如图 7 所示, 星间光通信跟踪过程为两个终端对各自跟踪偏差角的补偿。对于卫星光通信单个终端而言, 其跟踪过程为双闭环控制模型。双闭环中的外闭环由 CCD 探测器、跟踪系统、反馈(码盘、微位移传感器)组成, 内闭环为跟踪系统中的伺服闭环负载驱动。上述结构为双向跟踪 Simulink 仿真模型。

仿真可模拟星间光通信中, 不同星间相对运动速度、不同控制参数、不同信号信噪比, 跟踪链路保持时

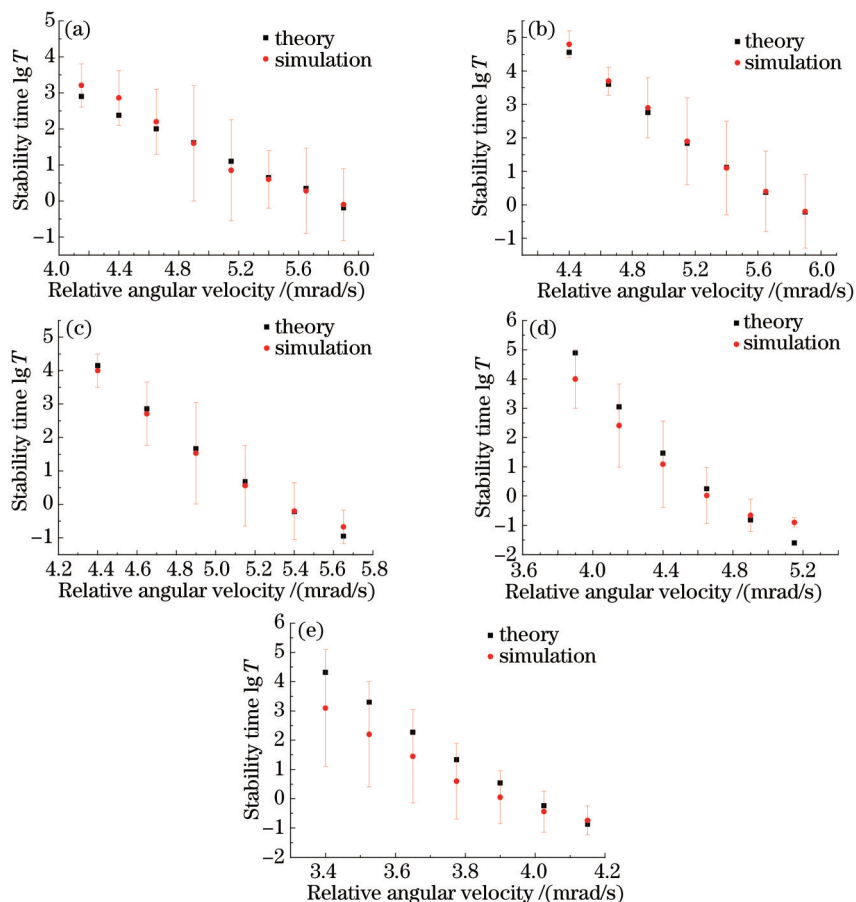


图 8 不同控制参数下仿真与理论结果对比图。(a) $p=0.9$; (b) $p=0.8$; (c) $p=0.7$; (d) $p=0.6$; (e) $p=0.5$

Fig.8 Comparison of simulation and theoretical results under different control parameters.

(a) $p=0.9$; (b) $p=0.8$; (c) $p=0.7$; (d) $p=0.6$; (e) $p=0.5$

间的变化。为了与理论结果进行对比,模型中设置光束发散角 $\theta_b=200 \mu\text{rad}$,光斑中心信噪比 $R_{\text{SN0}}=20$ 。对该模型中 CCD 跟踪误差角进行记录,当误差角大于 $10 \mu\text{rad}$ 时,认为链路中断,记录链路中断时间点。在一种参数条件下,多次实验得到平均链路保持时间,与图 6 中的理论结果进行对比得到图 8 所示结果。

由图 8 可知理论与仿真结果匹配较好。在星间光通信中,对于不同的相对运动速度,应采用不同的控制参数,故可利用(11)式确定相应的跟踪策略。

表 2 链路稳定时间 $\lg T$ 与光斑中心信噪比 R_{SN0} 的关系

Table 2 Relationship between link stability time $\lg T$ and spot center R_{SN0}

R_{SN0}	10	15	20	25	30	35	40
Simulation	5.62	6.55	7.04	7.33	7.53	7.67	7.77
Theory	6.05	6.76	7.14	7.38	7.54	7.65	7.75

表 2 给出了文献[10]中关心的光斑中心信噪比对链路稳定时间的影响,其中星间相对运动角速度为 3.9 mrad/s ,控制参数为 0.7。

由上分析可知,在本文讨论的链路跟踪稳定条件下,光斑中心信噪比对跟踪稳定性的影响远没有星间相对角速度的影响大。

4 结 论

在星间光通信跟踪过程高精度和高稳定性要求下,给出了星间光通信跟踪稳定性的定义。分析了影响跟踪稳定性的因素,得出了星间光通信稳定跟踪时间期望公式。通过较为完整的通信链路仿真模型,验证了理论公式的正确性,得到了不同条件下的链路稳定时间。提出了在不同星间相对运动下采用不同控制参数的跟踪策略。

跟踪参数对链路的稳定影响是非常大的,必须在地面进行充分的实验和优化。在相对运动较小(0.8 mrad/s)的情况下,为减小跟踪误差角方差,应选择较小的控制参数($p=0.5$);在相对运动较大(6.4 mrad/s)的情况下,为了补偿跟踪误差角,应选择较大的控制参数($p=0.9$)。对于现有文献中关于光斑中心信噪比对跟踪稳定性的影响,本文做出了简要分析,发现与链路相对角速度变化相比,一定范围内的信噪比变化对跟踪稳定性影响不大。本文提出的公式对光通信链路噪声因素的涵盖较为完整,同时考虑了对控制参数的优化分析,对今后光通信技术航天工程化应用具有一定的参考作用。

参 考 文 献

- 1 Chan V W S. Optical space communications[J]. IEEE J Quantum Elect, 2000, 6(6): 959-975.
- 2 Zheng Yang, Fu Yuegang, Hu Yuan, *et al.*. Research on four-mirror dynamic alignment based on space laser communication link networks [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0105001.
郑 阳, 付跃刚, 胡 源, 等. 基于空间激光通信组网四反射镜动态对准研究[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0105001.
- 3 Wu Feng, Yu Siyuan, Ma Zhongtian, *et al.*. Correction of pointing angle deviation and in-orbit validation in satellite-ground laser communication links[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0605008.
武 凤, 于思源, 马仲甜, 等. 星地激光通信链路瞄准角度偏差修正及在轨验证[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0605008.
- 4 Katsumasa Miyatake, Yuta Fujii, Masaki Haruna, *et al.*. Development of acquisition and tracking sensor for next-generation optical inter-satellite communication[C]. International Conference on Space Optical Systems and Applications, 2011: 132-135.
- 5 Yu Siyuan, Gao Huide, Wang Lisong, *et al.*. Multiple-axis pointing control in intersatellite optical communication[J]. Laser Technology, 2002, 26(2): 114-116.
于思源, 高惠德, 王立松, 等. 卫星光通信复合轴跟踪控制方法研究[J]. 激光技术, 2002, 26(2): 114-116.
- 6 Toni Tolker-Nielsen, Gotthard Oppenhaeuser. In orbit test result of an operational optical intersatellite link between ARTEMIS and ground stations[C]. SPIE, 2010, 7587: 75870D.
- 7 Takashi jono, Yoshihisa Takayama, Nobuhire Kura, *et al.*. OICETS on-orbit laser communication experiments[C]. SPIE, 2006, 6105: 610503.
- 8 Fields R, Lunde C, Wong R, *et al.*. NFIRE-to-TerraSAR-X laser communication results: Satellite pointing, disturbances, and other attributes consistent with successful performance [C]. SPIE, 2009, 7330: 73300Q.

- 9 Robert M Gagliardi, Sherman Karp. Optical Telecommunications Technology and Application [M]. Chen Genxiang, Qin Yuwen, Zhao Yucheng, et al.. Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1998: 221-224.
加利亚尔迪, 卡 普. 光通信技术与应用[M]. 陈根祥, 秦玉文, 赵玉成, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 1998: 221-224.
- 10 Wu Feng, Yu Siyuan, Zhou Jie, *et al.*. Analysis of the stability of bidirectional beam tracking in inter-satellite optical communication [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1105003.
武 凤, 于思源, 周 洁, 等. 星间光通信链路双向光束稳定跟踪约束条件分析[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1105003.
- 11 Lee S, Alexander J W, Jeganathan M. Pointing and tracking subsystem design for optical communications link between the international space station and ground[C]. SPIE, 2000, 3932: 150-157.
- 12 Zhou Jie. Study on the Stability Constraint Condition of Bidirectional Beam Tracking in Inter-Satellite Optical Communication[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013: 38-39.
周 洁. 星间光链路双向光束稳定跟踪约束条件研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013: 38-39.
- 13 Zheng Yanhong, Wang Yan, Chen Xinglin. H_{∞} control applied for APT system of inter-satellite laser communications[J]. Acta Aeronautica & Astronautica Sinica, 2008, 29(6): 1619-1625.
郑燕红, 王 岩, 陈兴林. 卫星光通信 APT 控制系统 H_{∞} 设计[J]. 航空学报, 2008, 29(6): 1619-1625.
- 14 Zheng Yanhong, Wang Yan, Chen Xinglin. Robust non-fragile H_{∞} control for coarse pointing system of inter-satellite optical communication terminals[J]. Acta Aeronautica & Astronautica Sinica, 2009, 30(10): 1954-1960.
郑燕红, 王 岩, 陈兴林. 星间光通信终端粗瞄系统鲁棒非脆弱 H_{∞} 控制[J]. 航空学报, 2009, 30(10): 1954-1960.
- 15 Shao Bing. Research on Key Technology of Fine Pointing Micro-Positioning System for Laser Intersatellite Communication Terminal [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006: 64-84.
邵 兵. 激光星间通信终端精瞄微定位系统关键技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006: 64-84.

栏目编辑: 王晓琰