

星间光通信链路双向光束稳定跟踪约束条件分析

武凤¹ 于思源² 周洁^{2*} 马晶² 谭立英²

(¹ 哈尔滨工业大学理学院物理系, 黑龙江 哈尔滨 150001
² 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 分析了星间激光通信双向跟踪过程中,影响链路稳定性的主要因素。通过对终端跟踪误差角度的面阵探测建模,综合考虑接收端信噪比影响,分析了双向光束跟踪过程中的迭代收敛过程,推导出了更接近链路实际情况的稳定跟踪约束条件理论公式。通过仿真验证对理论分析结果进行了优化,并通过地面模拟实验,验证了结论的准确性。上述工作对今后的卫星光通信链路系统优化设计具有重要参考意义。

关键词 光通信;双向链路;稳定跟踪;瞄准角度误差;约束条件

中图分类号 TN929.13 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1105003

Analysis of the Stability of Bidirectional Beam Tracking in Inter-Satellite Optical Communication

Wu Feng¹ Yu Siyuan² Zhou Jie² Ma Jing² Tan Liying²

(¹ Department of Physics, College of Science, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China
² National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract The main factors affecting the stability of the process of bidirectional beam tracking in inter-satellite optical communication are investigated. The iteration convergence process of the bidirectional beam tracking is analyzed by building the model of aiming error angle which images in the array detector in the receiving terminal, with considering the influence of signal noise ratio. Steady tracking constraint conditions theoretical formula which is closer to the actual situation is deduced. The theoretical result is verified and modified by simulation and the simulation experiments on the ground with optical terminal. The above work has important significance to modify a satellite communication system.

Key words optical communications; bidirectional link; steady tracking; aiming error angle; constraint condition

OCIS codes 060.4510; 200.2605; 100.4999

1 引言

目前,激光通信链路的稳定性是影响星间光通信技术向工程化发展的关键因素之一。在 TerraSAR-X 和 NFIRE 卫星间进行的相距 4900 km (LEO-LEO) 的双向光通信实验平均链路时间保持在 50~650 s 之间,累计实验时间为 16000 s^[1-3]。在日本航天局(JAXA)和欧空局(ESA)合作进行的 OICETS 和 ARTEMIS 卫星最大相对距离小于

45000 km 的双向光束跟踪实验中,由于卫星间相对运动速度在通信过程中只有 100 $\mu\text{rad/s}$,链路保持时间可稳定保持在 600 s^[4]。建立稳定、高数据率的星间光通信组网是未来光通信的发展趋势。所以,进一步研究双向跟踪过程的稳定特性,明确双向光束稳定跟踪的约束条件,对提高通信链路稳定性、延长通信时间具有重要意义。

对于跟踪过程稳定特性的研究,主要集中在提高

收稿日期: 2013-04-23; 收到修改稿日期: 2013-06-18

作者简介: 武凤(1973—),女,博士,讲师,主要从事卫星光通信系统瞄准捕获跟踪技术和图像处理技术等方面的研究。

E-mail: wufenghit@hit.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: zhoujie3186@126.com

通信终端控制系统的控制精度,旨在提高通信终端对扰动的抑制能力。由粗跟踪系统和精跟踪系统组成的复合轴系统完成了大范围、高精度跟踪任务。文献[5]给出了粗、精跟踪系统的带宽设计,在中高频扰动下,系统的跟踪误差小于 $1 \mu\text{rad}$ 。对于跟踪控制算法,目前普遍使用的有比例积分微分(PID)控制、 H_∞ 控制等。文献[6]采用前馈补偿控制,与只使用反馈控制相比,可以显著提高系统的跟踪瞄准性能。文献[7]使用自适应前馈复合控制比经典 PID 反馈算法精度提高了 5 倍,比自适应前馈算法精度提高了 1 倍。在对扰动因素的研究中,由于通信距离远,卫星间存在相对运动,卫星上的瞄准装置必须考虑到在光束弛豫时间内卫星所发生的附加移动,采用提前瞄准的方法,可以有效抑制其对跟踪过程产生的影响。对由于卫星间距离造成的时间延迟进行补偿,通过对卫星的微振动预测及补偿,达到提高跟踪精度的效果。

在星间光通信中,采用双向跟踪策略的跟踪过程与单向跟踪相比有不同的稳定特性,目前文献针对双向跟踪过程的研究还较少。文献[8]在量子极限和噪声极限情况下,求得了在双向跟踪过程中,每一端可以承受的最大跟踪方差。在信标光中心与噪声的信噪比 R_{SN0} 超过对应阈值的情况下,环路跟踪将收敛到一个稳定值。对于量子极限情况下的测量误差,文献[9]已做了深入研究。本文以面阵探测器 CCD 测量瞄准角度误差,对双向跟踪的迭代收敛过程建模,得出了双向光束稳定跟踪的约束条件。

2 CCD 测角误差的数学描述

图 1 为星间光通信瞄准角度误差的示意图,其中坐标系 (X_A, O_A, Y_A) 和 (X_B, O_B, Y_B) 分别代表通信终端 A, B。 Φ_A 为以 A 作为接收端,与从 B 发出的光束的瞬时瞄准角度误差。 Φ_B 是以 B 为接收端,与从 A 发出的光束的瞬时瞄准角度误差。瞄准角度误差包括方位角和俯仰角,由于本文不涉及方位

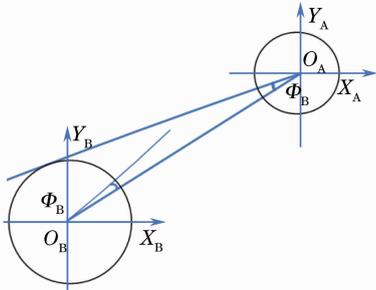


图 1 跟踪误差示意图

Fig. 1 Sketch of tracking error

角与俯仰角的区别,以下均用 Φ_A, Φ_B 表示。

在跟踪过程中,终端 A 和 B 发出的信标光,分别在对面终端的探测器上成像。不同的人射角度,在 CCD 上成像的位置也不同。通过计算光斑的位置,确定 Φ_A, Φ_B 的大小。角度信息传递给控制系统,调节天线的方位,减小两个终端之间的角度差,从而达到对准的目的。准确测量 Φ_A 和 Φ_B 的值,将瞄准角度误差控制在发散角半宽度内,可以保证跟踪过程的稳定。通过确定 CCD 光斑的质心,可确定瞄准角度误差为

$$\Phi = \arctan \left[\frac{\sqrt{(\hat{x}^2 + \hat{y}^2)}}{f} \right], \quad (1)$$

式中 f 为终端等效透镜焦距, (\hat{x}, \hat{y}) 为光斑的质心坐标。通过比较发现,质心法可以简单高效地确定光斑的位置^[10]。设 G_i 为像元的灰度值,由信标光和噪声的灰度值 S_i, N_i 组成,设 $G_i = S_i + N_i$, 则 CCD 上光斑的质心坐标为

$$\hat{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i (S_i + N_i)}{\sum_{i=1}^n (S_i + N_i)} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i S_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n N_i}{\sum_{i=1}^n (S_i + N_i)} \right] + \frac{\sum_{i=1}^n x_i N_i}{\sum_{i=1}^n (S_i + N_i)}. \quad (2)$$

设信噪比为 $R_{\text{SN}} = \sum_{i=1}^n S_i / \sum_{i=1}^n N_i$, 则 CCD 测得的质心坐标误差为

$$\begin{cases} \Delta x = \frac{1}{1 + R_{\text{SN}}} (\bar{x} - \bar{x}') \\ \Delta y = \frac{1}{1 + R_{\text{SN}}} (\bar{y} - \bar{y}') \end{cases}, \quad (3)$$

式中 \bar{x} 为没有噪声的情况下信标光的质心坐标。 \bar{x}' 为噪声信号的质心坐标,表达式分别为

$$\bar{x}' = \frac{\sum_{i=1}^n x_i N_i}{\sum_{i=1}^n N_i}, \quad \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i S_i}{\sum_{i=1}^n S_i}. \quad (4)$$

对于 CCD 视域内的背景杂散光, CCD 产生的暗电流和恒星等噪声,通过中值滤波、阈值分割等方法对成像进行图像处理,可以有效地消除这些噪声对光斑位置测量准确性的影响^[11], 从而背景噪声的质心可以近似为 0。将(3)式换成角度关系为

$$\Delta \Phi = \frac{1}{1 + R_{\text{SN0}} G(\Phi)}. \quad (5)$$

下面讨论由于对面终端瞄准角度误差 Φ 变化, 造成的测角误差 $\Delta\Phi$ 的关系。其中 $G(\Phi)$ 为光功率损失函数, $G(\Phi) = R_{\text{SN0}} \exp(-8\Phi^2/\theta_b^2)$, θ_b 为光束的发散角。则 CCD 测角误差与瞄准角度误差的关系为

$$\Delta\Phi = \frac{1}{1 + R_{\text{SN0}} \exp(-8\Phi^2/\theta_b^2)} \Phi. \quad (6)$$

当光束发散角一定时, R_{SN0} 取值不同, 测角误差和瞄准角度误差的关系如图 2 所示, 当信噪比越大时, 瞄准角度误差对测角误差的影响越小。当信噪比一定时, 对应不同的光束发散角, 测角误差与瞄准角度误差的关系如图 3 所示, 光束发散角越小, 瞄准角度误差对测角误差的影响越小。

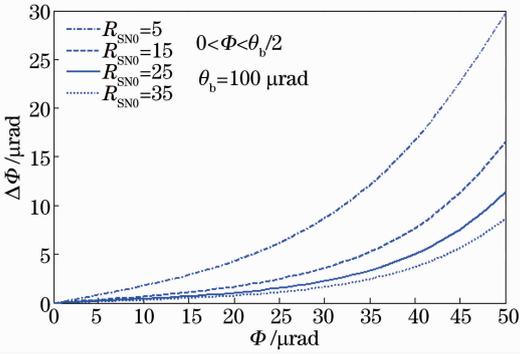


图 2 不同信噪比时, 瞄准角度误差与测角误差之间的关系
Fig. 2 Relationship of aim angle error and CCD measuring error with different R_{SN0}

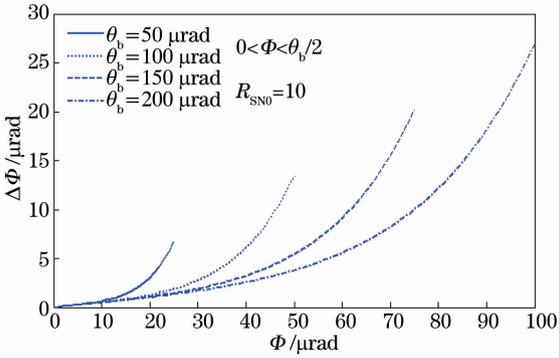


图 3 光束发散角不同时, 瞄准角度误差与测角误差之间的关系

Fig. 3 Relationship of aim angle error and CCD measuring error with different θ_b

3 瞄准角度误差对双向跟踪稳定性的影响

双向光束跟踪时, 两个光通信终端同时对来自另一个终端的光束进行跟踪, 卫星光通信系统一端的瞄准精度将影响另一端的误差。因此, 两个终端

上的瞄准角度误差相互影响。文献[8]给出的在双向跟踪时, 每一端上可以承受的最大跟踪均方差为

$$\sigma \leq \frac{\theta_b}{4\sqrt{2q}}, \quad (7)$$

式中 θ_b 为光束的发散角, 在量子极限跟踪时 $q = 1$, 在背景极限运动时 $q = 2$, q 依赖于功率电平, 功率电平与 R_{SN0} 有关, 通常 q 的取值为 1.5。文献中没有给出不同情况对应的 q 值以及信噪比不同时系统稳定跟踪的约束条件。上文分析了光束稳定跟踪的最大瞄准角度误差的约束条件不仅和 θ_b 有关, 还与 R_{SN0} 有关。下面结合(6)式讨论能够保证跟踪过程稳定的均方差大小。

在跟踪过程中, 两个终端通过控制瞄准角度误差的大小, 从而保持跟踪过程的稳定。系统的控制器对 CCD 测得的瞄准角度误差进行补偿。用 η 表示系统对瞄准角度误差的补偿效果: $\eta = 1 - \Phi_{\text{in}}/\Phi_{\text{out}}$, $0 < \eta < 1$, η 越接近 1 补偿效果越好。

对于双向跟踪过程, 两个终端同时进行跟踪, 瞄准角度误差相互影响。对于收发同轴的光通信终端, 光阑角度调整了 $\Delta\Phi$, 则终端发出的信标光的角度也改变了 $\Delta\Phi$ 。对应的终端 B 光阑接收到的信号瞄准角度误差也同样发生了改变。双向跟踪过程为一个不断对瞄准角度误差进行迭代收敛的过程。双向跟踪过程的理论模型为

$$\begin{cases} \Phi_A(t) = (1 - \eta)[\Phi_B(t - T) + \Phi_A(t)] \\ \Phi_B(t) = (1 - \eta)[\Phi_A(t - T) + \Phi_B(t)] \end{cases} \quad (8)$$

为保证光束稳定跟踪, 考虑 CCD 测角误差, 瞄准角度误差的约束条件为

$$\Phi_{A,B} < \left\{ \frac{1}{8} \ln \left[R_{\text{SN0}} \cdot \left(\frac{\eta^2}{1 - 2\eta^2} \right) \right] \right\}^{1/2} \cdot \theta_b, \quad (9)$$

最大瞄准角度误差与发散角的关系为 $\omega = \Phi/\theta_b$, ω 的表达式为

$$\omega = \left\{ \frac{1}{8} \ln \left[R_{\text{SN0}} \cdot \left(\frac{\eta^2}{1 - 2\eta^2} \right) \right] \right\}^{1/2}. \quad (10)$$

由于系统对瞄准角度误差的补偿是一个逐渐收敛的过程, 系统的参数影响补偿过程所需要的时间。当存在一个瞄准角度 Φ 时, 系统补偿这个误差到系统跟踪精度 ξ 所需要的时间为

$$T = \log_{k(1-\eta)} \left(\frac{\xi}{\Phi} \right) \cdot t_{\text{total}}, \quad (11)$$

式中 k 为 CCD 测得的角度与实际瞄准角度误差的比值, 并将补偿因子与瞄准角度误差近似为一个等比关系。可以根据(6)式确定 $1 < k < 1.5257$ 。为了方便计算, (11) 式中的 k 取中间值。其中, $t_{\text{total}} = t_{\text{CCD}} + t_{\text{process}} + t_{\text{controller}}$ 。令 $\mu = \lceil \log_{k(1-\eta)} (\xi/\Phi) \rceil$, $\xi =$

1 μrad 。光束稳定跟踪方差的约束条件为

$$\sigma \leq \Phi \cdot \left[\frac{1}{\mu} \frac{1}{1-\eta^2} - \frac{1}{\mu^2} \frac{1}{(1-\eta)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

图4为与(12)式对应的曲线,表示在不同的发散角和信噪比条件下光束稳定跟踪的约束条件。在推导过程中,由于 k 值进行了近似并简化了迭代收敛的过程,预计会导致理论值与实际情况存在一定的差异。

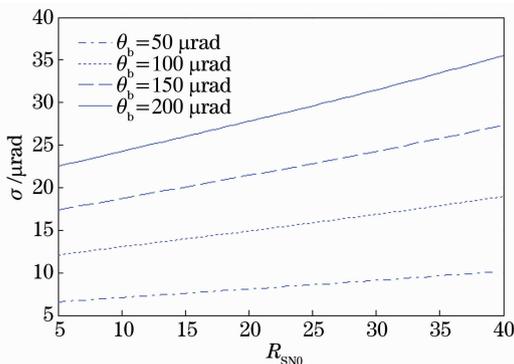


图4 R_{SNO} 、 θ_b 最大稳态跟踪均方差的关系曲线
Fig.4 Relationship of R_{SNO} , θ_b and maximal σ

4 系统仿真及分析

模拟用户卫星与中继卫星之间进行光通信的跟踪过程,建立仿真模型,使用Matlab/Simulink对系

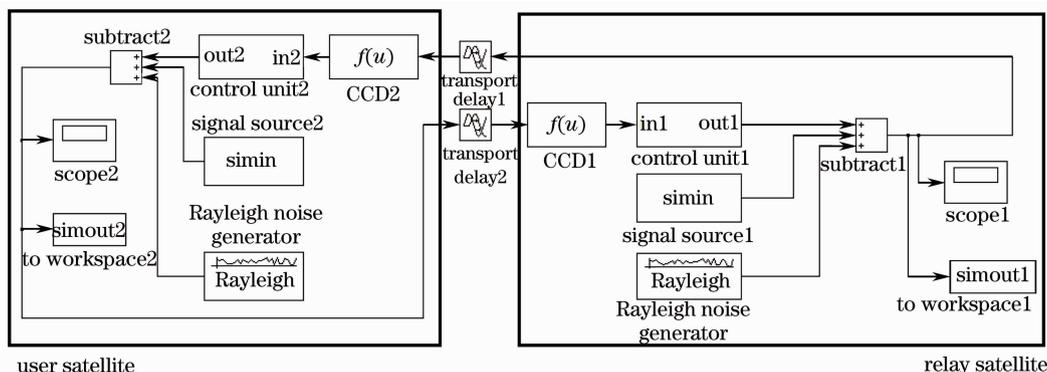


图5 跟踪系统整体结构框图

Fig.5 Overall block diagram of tracking system

跟踪过程开始时,用户卫星与中继卫星之间同时开始对存在的瞄准角度误差进行补偿,使两终端之间的瞄准角度误差保持在系统允许的范围内。在仿真过程中,分别取 θ_b 为50 μrad 和100 μrad 。表1为光束稳定跟踪状态下系统允许的最大瞄准角度误差的仿真结果。其中,最大瞄准角度误差取文献[7]中得到的理论结果 $\Phi < 0.43 \theta_b$ 。图6为保证跟踪过程稳定的最大均方差的仿真结果与理论值的对

统进行仿真。通信距离在35000~45000 km。在仿真系统中,提前瞄准有效地抑制了卫星间相对运动产生的瞄准角度误差。系统主要包括信号发生模块、CCD探测器模块、控制模块、时间延迟模块和噪声模块。

1) 信号源模块:两终端的瞄准角度误差作为信号源模块的输出量。由于瞄准角度误差的大小主要与两卫星间的相对运动速度有关,因此可根据不同的相对运动速度设置信号源模块输出值。

2) CCD探测器模块:CCD计算两终端的瞄准角度误差。由于信噪比、系统补偿效果等原因,导致CCD在测量过程中存在测角误差,因此在探测器模块中加入不同条件下对应的误差值。

3) 控制模块:控制器对CCD测得的瞄准角度误差进行补偿。对于不同的系统性能、卫星间的相对运动速度以及卫星微振动的振幅和频率,控制模块对瞄准角度误差的补偿效果 η 不同。

4) 时间延迟模块:由于光束传播距离较远,用户卫星与中继卫星之间存在0.12~0.15 s的时间延迟。

5) 噪声模块:使用噪声模块表示卫星微振动对跟踪系统的影响。微振动的幅值随着频率的增加而降低,对光通信链路影响较大的振动频率低于100 Hz。

比。仿真实验中系统保持稳定的均方差基本在理论值的范围内。

在图6中,理论值与仿真值的变化趋势基本一致,但是仿真值均小于理论值。这是由于在跟踪过程中,由(6)式可知,存在瞄准角度误差 $\Delta\Phi$,导致CCD测得的瞄准角度误差偏大,当测得的瞄准角度误差大于 $0.5 \theta_b$ 时会导致跟踪过程中断。角度误差与 η 和 R_{SNO} 的关系如表1所示。

表 1 ω 与 η 和 R_{SN0} 的关系Table 1 Relationship of the maximum aiming angle error, η and R_{SN0}

η	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6
$R_{SN0}=5$	—	—	—	0.14	0.25	0.33	0.38	0.38
$R_{SN0}=10$	—	0.10	0.24	0.32	0.39	0.41	0.41	0.41
$R_{SN0}=20$	0.21	0.31	0.38	0.42	0.43	0.43	0.43	0.43
$R_{SN0}=40$	0.36	0.43	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45

Note: “—” denotes arbitrarily small aiming angle error, which cannot make tracking process steady.

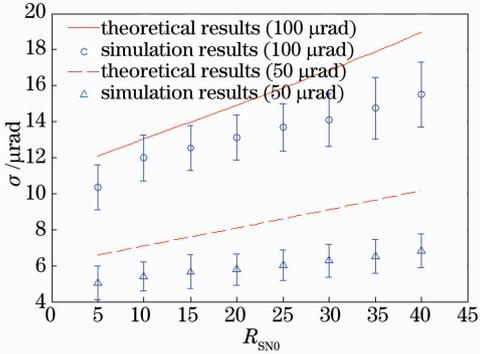


图 6 不同条件下仿真结果与理论值的比较

Fig. 6 Compare the theoretical results with the simulation results in different conditions

根据表 1 对最大瞄准角度误差进行修正,以 100 μrad 为例,修正后的结果如图 7 所示。

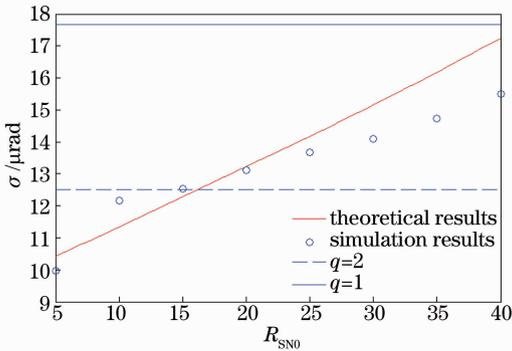


图 7 修正后的理论值与仿真值的比较

Fig. 7 Comparison of the modified theoretical results with the simulation results

图 7 中 $q=1, q=2$ 的曲线为文献[7]中的结果,可以看出两条曲线表示的光束稳定跟踪的约束条件范围比较宽泛,没有反映出跟踪过程的稳定特性与信噪比的具体关系。修正后的理论值和仿真结果比较接近,基本介于文献中两种极限之间。在实验中,如果按照文献中的理论结果设计跟踪策略,有可能导致系统的跟踪方差过大,超过系统允许的最大方差,会导致跟踪过程发散,使通信链路中断。图 8 为按照文献中的约束条件和本文得到的约束条件分别进行的链路仿真实验,从图中可以看出,当 $0.3 < \eta < 0.6$ 时,

本文的链路保持时间明显优于文献中的结果。补偿效果很差 ($\eta < 0.3$) 时,系统难以保证链路的稳定状态。当 $\eta > 0.6$ 时,系统对瞄准角度误差具有很好的补偿效果,系统可以保持长时间的稳定状态。

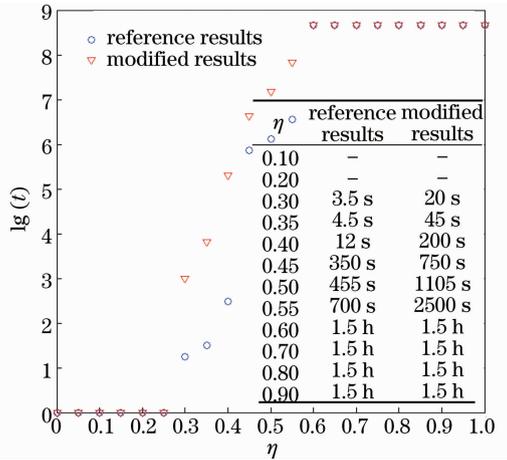


图 8 链路保持时间的比较

Fig. 8 Comparison of the maintain time of link

5 地面模拟实验

为了模拟星间光通信双向跟踪过程,需要两个激光通信终端;模拟卫星运动的轨道、姿态模拟装置;输入参数和输出实验数据的计算机等。实验室的跟踪性能测试平台可以模拟其中一台激光通信终端 A,测试平台的链路模拟装置可以模拟轨道、姿态的变化。另一激光终端 B 由平行光管输出近平行光模拟激光通信终端。实验系统如图 9 所示。

实验中激光束散角为 1.5 μrad ,分别改变信噪比和相对运动参数进行实验。通过改变 CCD 探测器的曝光时间,可以改变接收端成像光斑的信噪比。实验中信噪比分别为 25,30,35,40。通过计算中继卫星与用户卫星的运行周期和轨道参数,可确定两星间的相对运动速度为 0.1~0.4 $\mu\text{rad/s}$ 。系统的补偿效果 η 在实验中可以测得。通过对实验数据的处理,得到了保持系统稳定的最大跟踪误差均方差,所得结果为多次实验后得到的均值,保证了实验结论的准确性。实验结果与理论结果的对比如图 10 所示。

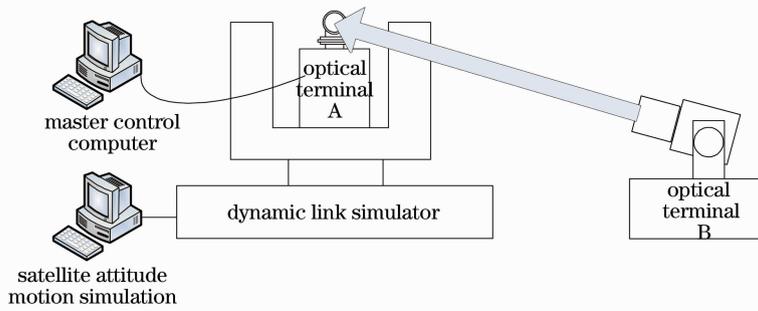


图 9 跟踪模拟实验示意图

Fig.9 Sketch of tracking test

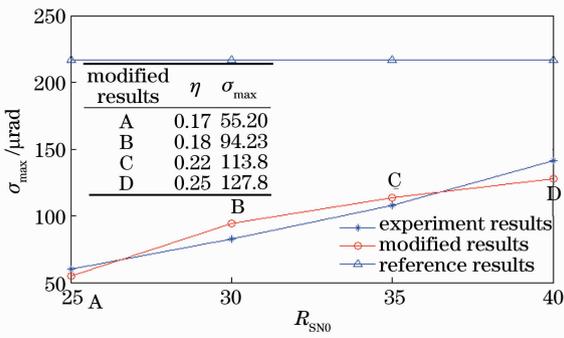


图 10 不同信噪比时 σ_{\max} 的比较

Fig. 10 Comparison of the σ_{\max} in different R_{S/N_0}

图 10 中的参考值为(7)式中 $\theta_b = 1500 \mu\text{rad}$ 、 $q = 1.5$ 时对应的曲线，理论曲线和实验曲线变化趋势一致，当信噪比越大时，系统保持稳定跟踪允许的均方差越大，提高信噪比可提高系统的稳定性，并且理论值与实验值基本相同。可见本文得到的约束条件较好的修正了文献[7]中的 σ_{\max} ，综合考虑光束的信噪比和补偿效果后，更符合实际星间光通信跟踪过程的规律。

6 结 论

研究了在星间光通信的跟踪过程中，瞄准角度误差对 CCD 测角误差的影响，推导出了两者的关系式，测角误差的大小与信噪比、光束发散角和系统对瞄准角度误差的补偿效果有关。进一步根据瞄准角度误差的约束条件，推导出了光束稳定跟踪方差的约束条件。

在进行星间双向光束跟踪时，由于系统对瞄准角度误差的补偿效果会根据星间的相对运动速度等原因而改变，不能保证在 $\Phi < 0.43 \theta_b$ 的情况下就可以保证稳定跟踪。本文综合考虑了信噪比和系统的补偿效果，给出了 $\Phi < \omega \cdot \theta_b$ ($0 < \omega < 0.50$)。当确定光束信噪比及系统的补偿效果时， ω 的大小可以由文中给出的瞄准角度误差的约束条件确定。根据

最大瞄准角度误差的约束条件确定了在不同信噪比的情况下，系统可承受的最大稳定跟踪均方差。按照本文得到的约束条件，对比已有文献中的结论，在一定的补偿效果中可以使仿真实验中的链路保持时间延长数倍。通过地面模拟星间双向跟踪实验，将实验结果与本文得到的约束条件进行了比较，验证了本文得到的稳定跟踪约束条件的准确性。文中研究的光束跟踪稳定约束条件，综合考虑了系统参数和光束信噪比的变化对跟踪过程的影响，得到了比文献中的结论更符合实际跟踪情况的约束条件，为星间光通信系统优化提供了设计参考。

参 考 文 献

- Zoran Sodnik, Hanspeter Lutz, Bernhard Furch, *et al.*. Optical satellite communications in Europe [C]. SPIE, 2010, 7587: 758705.
- Mark Gregory, Frank Heine, Hartmut K Mpfner, *et al.*. Commercial optical inter-satellite communication at high data rates[J]. Opt Eng, 2012, 51(3): 031202.
- Knut Böhmer, Mark Gregory, Frank Heine, *et al.*. Laser communication terminals for the European data relay system[J]. SPIE, 2012, 8246: 82460D.
- Jiang Huilin, Hu Yuan, Ding Ying, *et al.*. Optical principle research of space laser communication network[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1006003.
姜会林, 胡源, 丁莹, 等. 空间激光通信组网光学原理研究[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1006003.
- Liu Ximin, Liu Liren, Sun Jianfeng, *et al.*. Bandwidth design of composite axis system in satellite laser communication[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(1): 101-106.
刘锡民, 刘立人, 孙建锋, 等. 星间激光通信中复合轴系统的带宽设计研究[J]. 光学学报, 2006, 26(1): 101-106.
- Tao Tang, Jiaguang Ma, Ge Ren, *et al.*. Compensating for some errors related to time delay in charge-coupled-device-based fast steering mirror control system using a feedforward loop[J]. Opt Eng, 2010, 49(7): 073005.
- Ding Ke, Huang Yongmei, Ma Jiaguang, *et al.*. Error adaptive feedforward composite control of fast-steering-mirror[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(7): 0705007.
丁科, 黄永梅, 马佳光, 等. 快速反射镜的误差自适应前馈复合控制[J]. 中国激光, 2011, 38(7): 0705007.
- Robert M, Ganliardi, Sherman Karp. Optical Telecommunications [M]. Chen Genxiang, Qin Yuwen, Zhao Yucheng, *et al.* Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1998.

221—224.

Robert M, Ganliardi, Sherman Karp. 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.

- 9 Wu Jili, Zhao Shanghong, Li Yongjun, *et al.*. Quantum limits of far-field beam pointing accuracy in space[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(1): 0106004.

吴继礼, 赵尚弘, 李勇军, 等. 空间远场光束对准精度的量子极限[J]. *光学学报*, 2011, 31(1): 0106004.

- 10 Wang Hongtao, Luo Changzhou, Wang Yu, *et al.*. An improved

centroid algorithm for star point [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(7): 55—59.

王洪涛, 罗长洲, 王 渝, 等. 一种改进的星点质心算法[J]. *光电工程*, 2009, 36(7): 55—59.

- 11 Chen Xinglin, Zheng Yanhong, Wang Yan. Influence of spot noise in inter-satellite optical communications and suppression algorithm[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(3): 743—747.

陈兴林, 郑燕红, 王 岩. 光斑噪声对星间光通信的影响及抑制算法[J]. *中国激光*, 2010, 37(3): 743—747.

栏目编辑: 王晓球