

文章编号 1004-924X(2012)02-0270-07

潜望镜式卫星光通信终端的 CCD 粗跟踪

谭立英, 吴世臣*, 韩琦琦, 马 晶

(哈尔滨工业大学 可调谐(气体)激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150086)

摘要: 由于轻小型卫星光通信系统中潜望镜的光学结构随粗瞄机构姿态变化而发生改变, 使得相应的跟踪算法变得较为复杂, 本文对潜望镜式星间激光通信终端粗跟踪算法进行研究以提高粗瞄机构的跟踪精度。利用矩阵光学方法, 建立了潜望镜式光通信终端中光学器件的矩阵模型, 在获得 CCD 测角模型后, 推导了基于 CCD 测角的粗瞄装置自动跟踪算法模型, 实现了潜望镜式光通信终端粗瞄装置对目标光束的快速跟踪, 并对模型进行了相应的实验验证。实验结果表明, 该 CCD 测角跟踪模型正确地反映了实际终端中的光学传递关系, 能够正确地对 CCD 图像位置信号进行处理并获得稳定跟踪角度, 平均跟踪精度优于 $10 \mu\text{rad}$, 满足卫星激光通信中稳定可靠、高精度粗跟踪的要求。本文提出的方法对类似的光学系统具有借鉴意义。

关键词: 卫星光通信; 潜望镜; 电荷耦合器件(CCD); 测角算法; 瞄准、捕获、跟踪(PAT)系统

中图分类号: TN929.13 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122002.0270

Coarse tracking of periscope-type satellite optical communication terminals

TAN Li-ying, WU Shi-chen*, HAN Qi-qi, MA Jing

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150086, China)

* Corresponding author, E-mail: wushichen5092@yahoo.com.cn

Abstract: Many small aperture satellite optical communication terminals utilize a periscope as the Coarse Pointing Appliance(CPA), however, the model of coarse tracking arithmetic becomes much complex since the optic structure of the periscope-type CPA varies with the angle of attitude in the CPA. To improve the tracking accuracy of the CPA, this paper researches coarse tracking arithmetic of periscope-type satellite optical communication terminals. Based on the optical matrix method, a matrix model with geometric optics for tracking in the periscope-type inter-satellite optical communication terminals was established. After obtaining the CCD-based angle measuring model, an automatic tracking model of the CPA was derived to implement the fast tracking for the target beams. A test was performed to testify the arithmetic. The test results prove that the tracking arithmetic can express the configuration of optical system exactly, and can process the information of locality from CCD accurately. The average tracking accuracy is less than $10 \mu\text{rad}$. The test results also show that the tracking model can meet the requirements of the satellite optical communication. The method pro-

收稿日期: 2011-07-20; 修订日期: 2011-09-28.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 10904026)

posed in this paper would supply some helps for similar optical study.

Key words: inter-satellite optical communication; periscope; Charge Coupled Device (CCD); angle detection algorithm; pointing, acquisition, tracking (PAT) system

1 引言

卫星激光通信技术以激光作为信息载体可以在星间、星地之间建立高速、大容量的数据通信链路,具有广阔的应用前景^[1]。相比于微波通信,卫星光通信技术具有信息量大、传输速率高、隐蔽性好,抗干扰能力强等特点^[2-6],能够实现卫星间的直接高速通信,是实现高数据率空间信息保密通信的最优方案之一。对于卫星激光通信技术,通信光束的瞄准、捕获、跟踪 (Pointing, Acquisition and Tracking, PAT) 技术是实现长距离空间光通信的关键技术,它关系到是否能成功建立空间光通信链路以及通信质量的好坏^[7-8]。

潜望镜式卫星光通信终端具有重量轻,转动惯量小等特点,常用于小口径轻型卫星激光通信终端。与经纬仪式粗瞄机构不同^[9],在潜望镜式激光通信终端中,粗瞄机构是通过旋转安装在两个正交轴上的 45° 平面镜实现三维空间扫描的,这就使得粗瞄机构中两个 45° 平面镜及图像采集 CCD 的相对位置不断变化,从而造成潜望镜式光通信终端光学传递关系不断变化,使得终端跟踪异常复杂。目前,针对光通信系统粗跟踪过程所见的报道,主要集中在系统的硬件开发及硬件实现上,对于系统的软件控制算法及其优化的研究还未见报道,本文从建立光学系统传输矩阵开始,提出一种潜望镜式粗跟踪算法,并利用实验验证了算法。实验结果表明,本文研究的基于潜望镜式光通信终端的 CCD 测角终端粗跟踪算法正确,可以实现潜望镜式光通信终端对目标的高速粗跟踪。该算法的推导和建立方法对相似光学系统问题的处理提供了一定的借鉴意义。

2 潜望镜式光通信终端的组成

卫星光通信激光链路以激光作为通信信息的载体,其通信束散角很小,要在通信过程中实现精确瞄准、跟踪是十分困难的。现有的小口径轻型卫星光通信终端大多采用了潜望镜式的粗瞄装

置,具体结构如图 1 所示。

在终端 PAT 系统中,粗瞄装置的跟踪方案是:入射光束进入终端光学系统后,通过透镜聚焦在 CCD 上,形成光斑;利用 CCD 摄取激光光斑图像视频信号,对其进行处理和数字化后送入计算机进行图像处理获得光斑的位置信息,计算出系统光轴与入射光束指向的角度偏差量,控制修正粗瞄机构瞄准轴的指向,从而实现通信终端的自动跟踪^[10-11]。这就需要将图像探测 CCD 上的光斑信息与终端粗瞄机构运动的角度关联起来,即 CCD 跟踪算法。

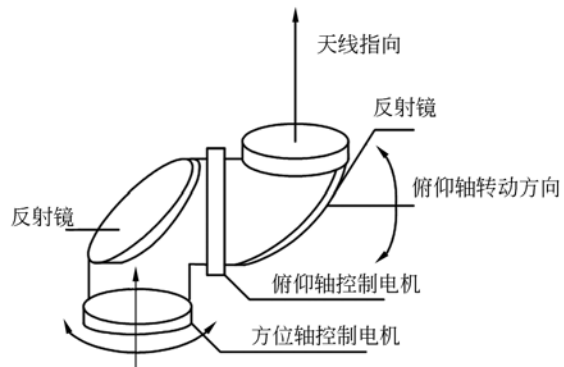


图 1 粗瞄机构的基本结构
Fig. 1 Basic structure of CPA

3 光束接收传输矩阵建模

在建立光学器件传输矩阵之前,需要对相关坐标系进行定义。

3.1 粗瞄机构坐标系

首先需要建立粗瞄机构基本坐标系。如图 2 所示,当粗瞄机构的两个 45° 平面镜处于平行状态,且由平面镜 2 中心指向平面镜 1 镜面中心的矢量与分数片 2 指向 CCD 中心矢量同向且平行时,令平面镜 2 中心指向平面镜 1 中心的矢量方向 $T_2 T_1$ 为粗瞄机构坐标系 x 轴,令沿望远镜主轴方向为粗瞄机构坐标系 z 轴,粗瞄机构坐标系 y 轴成右手系方向。如图 2 所示,入射光线经过粗瞄机构后,经望远镜,分光镜 1,分光镜 2,经聚焦透镜 1 将光斑聚焦于探测单元 CCD 接收面上。

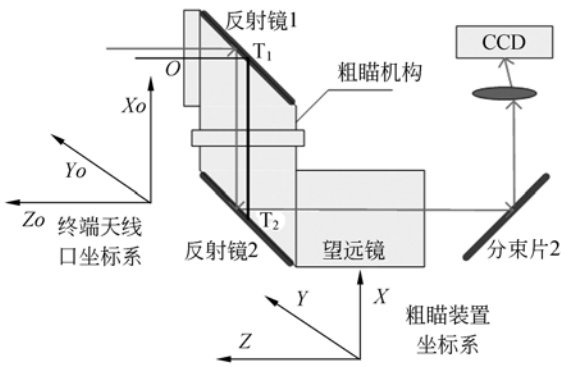
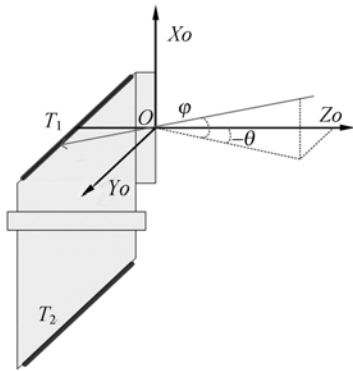


图 2 CCD 测角子系统工作原理图

Fig. 2 Principle block diagram of CCD subsystem of experimental terminal

3.2 天线口坐标系

对于探测单元 CCD 而言,测量得到的光斑位置信息反映的是入射光束矢量相对于粗瞄机构天线口法线方向的夹角,这里需要对终端天线口处的坐标系进行说明。如图 2 所示,终端天线口法线出光方向为天线口坐标系 Z_0 轴正方向,平面镜 2 中心指向平面镜 1 中心的矢量方向为天线口坐标系 X_0 轴正方向, Y_0 轴成右手系方向。使用 θ 和 φ 两个角度参量描述终端天线口处存在的入射光束 \mathbf{A}_0 时,如图 3 所示。

图 3 天线口处入射光束矢量
Fig. 3 Vector of incident beam

3.3 入射光路传输矩阵

如图 3 所示,入射光的矢量在天线口坐标系下的表达如下:

$$\mathbf{A}_0 = [-\sin \varphi \quad \cos \varphi \cdot \sin \theta \quad -\cos \varphi \cdot \cos \theta]^T, \quad (1)$$

在粗瞄机构坐标系中,入射的光束矢量为 \mathbf{A}_0 ,根据在通信终端内部接收光路,在 CCD 上成

像光斑位置得到的入射光束矢量为 \mathbf{A}_{CCD} :

$$\mathbf{A}_{\text{CCD}} = \mathbf{T} \cdot \mathbf{A}_0, \quad (2)$$

其中, \mathbf{T} 为终端测角子系统的光束传输矩阵。根据如图 2 所示的卫星光通信终端采用双反射镜式潜望镜结构,所以测角系统光束传输矩阵 \mathbf{T} 为:

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}_{2f} \cdot \mathbf{T}_{\text{wyj}} \cdot \mathbf{T}_2 \cdot \mathbf{T}_1, \quad (3)$$

这里, \mathbf{T}_{2f} 为分光镜 2 的作用矩阵; \mathbf{T}_{wyj} 为光学望远镜的作用矩阵; \mathbf{T}_1 、 \mathbf{T}_2 为 1 号、2 号反射镜的作用矩阵。

当光线入射到终端粗瞄机构中,经过俯仰轴反射镜、方位轴反射镜反射至终端主体光学主体中,经过望远镜,分束片 2,聚焦透镜后入射到探测单元 CCD 的焦平面上,由式(3)得到理想情况下,CCD 焦平面前的入射光线 \mathbf{A}_{CCD} 为:

$$\mathbf{A}_{\text{CCD}} = \mathbf{T} \cdot \mathbf{A}_{\text{in}} = \begin{bmatrix} 1 \\ -(\sin(\theta_{\text{Az}} - \theta_{\text{El}}) \cdot \theta - \cos(\theta_{\text{Az}} - \theta_{\text{El}}) \cdot \varphi) \cdot n \\ (\cos(\theta_{\text{Az}} - \theta_{\text{El}}) \cdot \theta + \sin(\theta_{\text{Az}} - \theta_{\text{El}}) \cdot \varphi) \cdot n \end{bmatrix}, \quad (4)$$

这里 θ_{Az} 、 θ_{El} 分别是粗瞄机构方位轴,俯仰轴相对于粗瞄机构坐标系转动的角度(方位角,俯仰角); n 为终端望远镜径向放大倍数。在 CCD 焦平面上获得的光斑在基准坐标系中相对于 CCD 视域中心的位置为 (Y, Z) ,这里假定 CCD 前的聚焦透镜的焦距为 f ,则在基准坐标系中,CCD 前入射的光束矢量可以表示为:

$$\mathbf{A}_{\text{CCD}'} = [1 \quad Y/f \quad Z/f]^T. \quad (5)$$

已知式(4)表示了经过粗瞄机构、望远镜等器件后入射到 CCD 前的光束矢量表达形式,则可建立如下方程:

$$\mathbf{A}_{\text{CCD}'} = \mathbf{A}_{\text{CCD}} \begin{bmatrix} 1 \\ Y/f \\ Z/f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ -(\sin(\theta_{\text{Az}} - \theta_{\text{El}}) \cdot \theta - \cos(\theta_{\text{Az}} - \theta_{\text{El}}) \cdot \varphi) \cdot n \\ (\cos(\theta_{\text{Az}} - \theta_{\text{El}}) \cdot \theta + \sin(\theta_{\text{Az}} - \theta_{\text{El}}) \cdot \varphi) \cdot n \end{bmatrix}, \quad (6)$$

分别以 φ 、 θ 为未知量,解方程(6)得到:

$$\begin{cases} \theta = -\alpha \sin(\theta_{\text{Az}} - \theta_{\text{El}}) + \beta \cos(\theta_{\text{Az}} - \theta_{\text{El}}) \\ \varphi = \alpha \cos(\theta_{\text{Az}} - \theta_{\text{El}}) + \beta \sin(\theta_{\text{Az}} - \theta_{\text{El}}) \end{cases}, \quad (7)$$

其中, $\alpha = Y/nf$, $\beta = Z/nf$; Y 、 Z 为 CCD 探测器接收面上所得光斑的形心坐标, f 为 CCD 测角子系统聚焦透镜组的等效焦距; n 为望远镜放大倍数。

式(7)为潜望式光通信终端中,探测单元 CCD 焦平面上光斑位置与终端入射光束偏角关系。由式(7)可知,入射信标光束相对于天线口法线方向的夹角可以通过 CCD 光斑重心坐标位置来表示,且是终端粗瞄机构的姿态参量的函数。

4 建立光束跟踪控制模型

通过前面的推导可以知道,在光学通信终端粗瞄机构的姿态一定的情况下,通过读取 CCD 测

$$\mathbf{S}_p(\Omega_{Az}) = \begin{bmatrix} \cos \Omega_{Az} & -\sin \Omega_{Az} \cdot \cos \theta_{E1} & \sin \Omega_{Az} \cdot \sin \theta_{E1} \\ \sin \Omega_{Az} \cdot \cos \theta_{E1} & \cos \Omega_{Az} + 2\sin^2 \frac{\Omega_{Az}}{2} \cdot \sin^2 \theta_{E1} & 2\sin^2 \frac{\Omega_{Az}}{2} \cdot \sin \theta_{E1} \cos \theta_{E1} \\ -\sin \Omega_{Az} \cdot \sin \theta_{E1} & 2\sin^2 \frac{\Omega_{Az}}{2} \cdot \sin \theta_{E1} \cos \theta_{E1} & \cos \Omega_{Az} + 2\sin^2 \frac{\Omega_{Az}}{2} \cdot \cos^2 \theta_{E1} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\mathbf{S}_x(\Omega_{E1}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \Omega_{E1} & -\sin \Omega_{E1} \\ 0 & \sin \Omega_{E1} & \cos \Omega_{E1} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

其中, $\mathbf{S}_x(\Omega_{E1})$ 为俯仰轴运动矩阵, $\mathbf{S}_p(\Omega_{Az})$ 为方位

轴运动矩阵。而在终端天线口坐标系中,经过方位轴、俯仰轴旋转的出光口法线应与入射光束所在方向一致,于是有方程:

在潜望式光通信终端的实际工作中,终端粗瞄机构分别通过对方位轴和俯仰轴转动来实现对通信光束的跟踪,这里绕两个转轴的旋转矩阵为:

轴运动矩阵。而在终端天线口坐标系中,经过方位轴、俯仰轴旋转的出光口法线应与入射光束所在方向一致,于是有方程:

$$\mathbf{A}_{out}' = \mathbf{S}_x(\Omega_{E1})^{-1} \cdot \mathbf{S}_p(\Omega_{Az})^{-1} \cdot \mathbf{A}_{out} \Rightarrow \begin{bmatrix} \sin \Omega_{Az} \sin(\theta_{E1} + \Omega_{E1}) \\ -\sin \Omega_{E1} \cos \Omega_{Az} - \sin \Omega_{E1} (1 - \cos \Omega_{Az}) \cdot \sin^2 \theta_{E1} + (1 - \cos \Omega_{Az}) \cdot \sin \theta_{E1} \cos \theta_{E1} \cos \Omega_{E1} \\ -\sin \Omega_{E1} (1 - \cos \Omega_{Az}) \cdot \sin \theta_{E1} \cos \theta_{E1} + \cos \Omega_{Az} \cos \Omega_{E1} + (1 - \cos \Omega_{Az}) \cdot \cos^2 \theta_{E1} \cos \Omega_{E1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \varphi \\ -\cos \varphi \cdot \sin \theta \\ \cos \varphi \cdot \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (10)$$

解上式可以得到如下关系:

$$\begin{cases} \sin \Omega_{Az} \sin(\theta_{E1} + \Omega_{E1}) = \sin \varphi \\ \cos \Omega_{Az} \cdot \sin(\theta_{E1} + \Omega_{E1}) = \cos \varphi \cdot \sin(\theta_{E1} + \theta) \end{cases}, \quad (11)$$

将式(7)与式(11)联立可以获得如下关系:

$$\Omega_{Az} = \arctan \left(\frac{\alpha \cos(\theta_{Az} - \theta_{E1}) + \beta \sin(\theta_{Az} - \theta_{E1})}{\sin \theta_{E1} - \alpha \sin(\theta_{Az} - \theta_{E1}) \cos \theta_{E1} + \beta \cos(\theta_{Az} - \theta_{E1}) \cos \theta_{E1}} \right)$$

$$\Omega_{E1} = \frac{1 - \cos \Omega_{Az}}{\cos \Omega_{Az}} \tan \theta_{E1} + \frac{-\alpha \sin(\theta_{Az} - \theta_{E1}) + \beta \cos(\theta_{Az} - \theta_{E1})}{\cos \Omega_{Az}}, \quad (12)$$

式(12)即为潜望镜式光通信终端用于 CCD 测角的跟踪模型。在通信终端实际工作过程中,通过电机码盘的反馈可以获得相对于粗瞄机构基

准坐标的粗瞄机构的方位轴角度 θ_{Az} 及俯仰轴角度 θ_{E1} ; 同时通过探测单元 CCD 可以实时获得入射光束的光斑相对于 CCD 视域中心的位置参量 α 和 β , 将以上的 4 个变量带入式(12)中, 即可计算得到为了实现跟踪目标而需要的控制系统的角度参量, 完成激光通信过程中的精确跟踪。

5 粗跟踪算法实验验证

为验证潜望式光通信终端 CCD 测角粗瞄跟踪算法的正确性, 在实验室条件下搭建了光路, 并测试了该算法的跟踪计算精度。

如图 4 所示, 在实验过程中, 首先通过调整, 使得发射平行光管的光束入射到通信终端接收 CCD 的焦平面视域中心; 记录当前的 CCD 上的

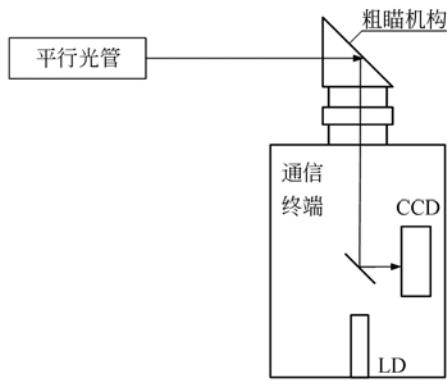


图 4 实验示意图
Fig. 4 Sketch map of experiment

光斑位置,粗瞄机构姿态数据;控制通信终端粗瞄机构的方位轴或俯仰轴小角度转动,每次转动的角度间隔为 0.01° ,转动范围为 $\pm 0.05^\circ$ 。通信终端粗瞄机构姿态变化后,入射到接收端 CCD 平面上的光斑坐标将相应的发生偏移。记录每一次通信终端方位轴和俯仰轴相对于终端粗瞄机构坐标系的姿态角度 (θ_{Az}, θ_{El}) 以及相应的 CCD 平面上的光斑坐标 (α, β);将 CCD 上的光斑位置以及接收终端的姿态参量带入(12)式,得到的计算结果与每次接收终端偏离角度进行对比。

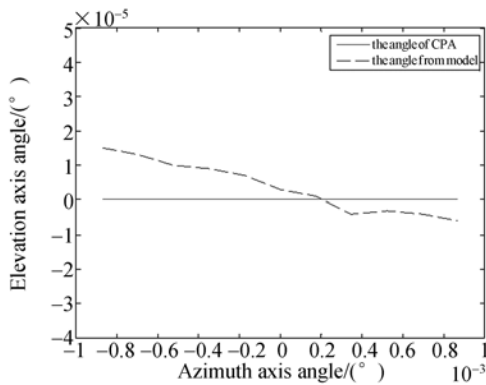


图 5 仅方位轴转动时计算精度
Fig. 5 Accuracy of only azimuth-axis changed

图 5 所示为通信终端俯仰轴不变仅方位轴发生偏转情况下的实际跟踪曲线与计算曲线。

图 6 所示为通信终端方位轴不变,仅俯仰轴发生偏转情况下的实际跟踪曲线与计算曲线。

图 7 所示为通信终端方位轴、俯仰轴同时发生偏转情况下的实际跟踪曲线与计算曲线。

通过测试数据可知:在给定接收端 CCD 平面接收到入射光斑坐标信息以及接收端方位轴、俯

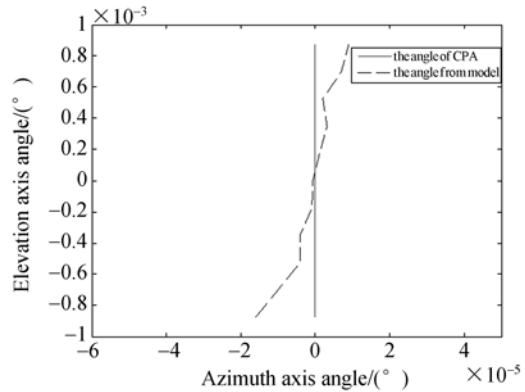


图 6 仅俯仰轴转动时计算精度
Fig. 6 Accuracy of only horizontal-axis changed

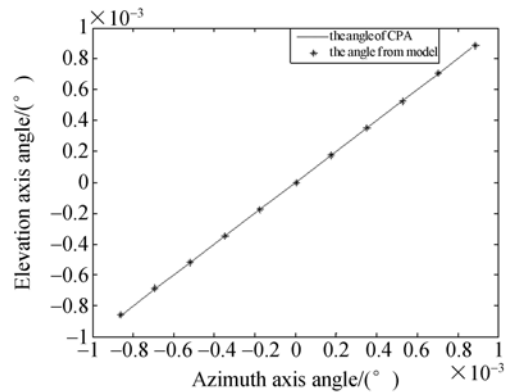


图 7 方位轴,俯仰轴同时偏转的计算精度
Fig. 7 Accuracy of both axes changed

仰轴姿态参量后,可以通过跟踪算法迅速准确地得到系统跟踪光斑所需的粗瞄装置的控制角度参量,精度优于 $20 \mu\text{rad}$,且瞄准偏差随光斑靠近 CCD 视域中心迅速降低,如表 1。

表 1 静态跟踪精度测量结果

Tab. 1 Results of static tracking measurement

序号	轨迹	最大偏差 / μrad	均方根误差 / μrad	计算曲线斜率	角度偏差 /rad
1	水平	15.503 3	8.442 4	-0.012 7	-0.012 699 3
2	垂直	16.015 5	7.323 3	76.655 2	-0.013 04
3	45° 方向	17.852 9	9.501 6	0.976 3	-0.011 99

6 结 论

在卫星光通信系统中,快速、稳定地对通信光束进行跟踪是实现高速光通信的重要保障。对于

潜望镜式卫星光通信终端,由于光学结构的变化,使得跟踪问题更为复杂。本文针对潜望镜式光通信终端粗瞄机构的跟踪问题,由光学系统的矩阵模型出发,分析了潜望镜式光通信终端的光学特性,基于通信终端中光学器件模型,建立了应用于潜望镜式卫星光通信终端的 CCD 测角粗瞄跟踪

算法,并通过实验验证了该算法的正确性。实验数据表明,该算法的光通信终端在 $\pm 0.05^\circ$ 的视域内,计算获得的控制精度误差最大值小于 $18 \mu\text{rad}$,误差最小值小于 $1 \mu\text{rad}$,平均值优于 $10 \mu\text{rad}$,基本满足潜望镜式光通信终端粗瞄机构跟踪的要求。

参考文献:

- [1] CHAN V W S. Optical space communications[J]. *IEEE J. Quantum Electron*, 2002,6: 959-975.
- [2] 侯睿,赵尚弘,胥杰,等. 空间环境对卫星光通信系统性能的影响分析[J]. *光学技术*, 2008,34: 223-226.
- HOU R, ZHAO SH H, XU J, *et al.*. Analysis of space environmental effects on the performance of satellite optical communication system[J]. *Optical Technique*, 2008,34: 223-226. (in Chinese)
- [3] 侯睿,赵尚弘,李勇军,等. 空间环境对卫星光通信系统光学器件的影响[J]. *半导体光电*, 2010, 31: 771-777.
- HOU R, ZHAO SH H, LI Y J, *et al.*. Effects of space environment on optical equipments in satellite optical communication system [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2010,31:771-777. (in Chinese)
- [4] YAMAKAW S, HANAD T, KOHAT H. JAXA's efforts toward next generation space data-relay satellite using optical inter-orbit communication technology[J]. *SPIE*, 2010, 7587:75870P.
- [5] SMUTNY B, KAEMPFNER H, MUEHLNIKEL G, *et al.*. 5.6Gbps optical intersatellite communication link[C]. *SPIE*, 2009, 7199:719906.
- [6] 刘静江,黄永梅,傅承毓. 空间光通信 ATP 系统中的跟瞄技术[J]. *光电工程*, 2003,30:4-7.
- LIU J J, HUANG Y M, FU CH Y. Tracking and pointing techniques used to ATP system for space optical communication [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2003, 30: 4-7. (in Chinese)
- [7] JAMES L. Deep space optical communications development program[J]. *SPIE*, 1987, 756:8-11.
- [8] 韩琦琦,于思源,马晶,等. 耦合运动对星间激光链路瞄准过程影响及补偿方法研究[J]. *宇航学报*, 2005,26:405-409.
- HAN Q Q, YU S Y, MA J, *et al.*. Impact analysis of coupled motions of the optical communication terminal and the satellite platform on optical tracking progress[J]. *Journal of Astronautics*, 2005, 26: 405-409. (in Chinese)
- [9] 薛向尧,高云国,韩光宇,等. 水平式经纬仪指向误差的统一补偿技术[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(7):1524-1529.
- XUE X Y, GAO Y G, HAN G Y, *et al.*. Total correction method of pointing error for level mounting theodolite[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(7):1524-1529. (in Chinese)
- [10] 俞建杰,谭立英,刘剑峰,等. 卫星光通信光学天线轴间距的精确调试[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(9):2091-2096.
- YU J J, TAN L Y, LIU J F, *et al.*. Alignment for center distance of optical telescope in satellite optical communication terminal[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(9):2091-2096. (in Chinese)
- [11] ROSHEIM M E, SAUTER G F. Free-space optical communications system pointer [J]. *SPIE Proc*, 2003,497:126-133.

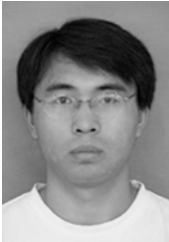
作者简介:



谭立英(1956—),女,黑龙江佳木斯人,博士,教授,博士生导师,主要从事卫星光通信技术的研究。E-mail: tanliying@hit.edu.cn



韩琦琦(1976—),男,北京人,博士,副教授,2001年、2004年于哈尔滨工业大学分别获得硕士、博士学位,主要从事卫星光通信光学设计的研究。E-mail: hanqiqi@hit.edu.cn



吴世臣(1982—),男,黑龙江伊春人,博士研究生,2005年、2007年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事卫星光通信 PAT 技术的研究。E-mail: wushichen5092@yahoo.com.cn



马晶(1956—),男,黑龙江佳木斯人,博士,教授,博士生导师,主要从事卫星光通信技术的研究。E-mail: majing@hit.edu.cn

● 下期预告

离轴三反 TDICCD 相机内方位元素和畸变的标定方法

吴国栋

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

内方位元素和畸变是测绘相机的关键几何参数,这两个几何参数的标定精度决定了立体测绘精度。本文介绍了一种离轴三反 TDICCD 相机内方位元素和畸变的标定方法。通过对离轴 TDICCD 相机光学系统和像面的介绍,明确了离轴 TDICCD 相机内方位元素和畸变的含义。建立了标定系统及相应的数学模型,应用最小二乘回归方法求得内方位元素和畸变的表达式,并对标定误差进行了分析。标定结果表明:该方法对主点的标定精度可以达到 $1.0 \mu\text{m}(1\sigma)$,对主距的标定精度可以达到 $2.0 \mu\text{m}(1\sigma)$,对畸变的标定精度可以达到 $2.3 \mu\text{m}(1\sigma)$ 。该方法是一种快捷有效的离轴三反 TDICCD 相机内方位元素和畸变标定方法。