

文章编号: 1002-1582(2010)01-0010-04

空间目标相对运动角参数的 天基光学测量精度分析*

程军, 张伟, 丛明煜, 曹移明, 潘海斌

(哈尔滨工业大学 空间光学工程研究中心, 哈尔滨 150001)

摘 要: 利用在轨光学相机对空间目标进行跟踪测量, 目标相对运动角参数的测量精度决定了空间目标的定轨精度。建立目标相对运动角参数测量计算数学模型, 推导出相对运动角参数测量误差传递公式。通过对仿真计算结果的分析, 确定出影响目标相对运动角参数测量精度的主要误差源: 目标成像焦面坐标提取误差、光学相机视轴转动欧拉角测量误差与测量卫星姿态惯性角测量误差。其中, 光学相机视轴转动欧拉角测量误差对相对运动角参数的测量误差影响最大, 约占总误差的 80%。观测条件对测量精度也有很大的影响, 尤其在目标过顶时, 相对运动角参数的测量误差显著增大。

关 键 词: 空间目标; 天基光学测量; 相对运动角参数; 测量精度分析

中图分类号: TH74 文献标识码: A

Measure precision analysis of relative movement angles for space object based on spaceborne electron-optical sensor

CHENG Jun, ZHANG Wei, CONG Ming-yu, CAO Yi-ming, PAN Hai-bin

(Research Center for Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology, Haerbin 150001, China)

Abstract: Measure precision of relative movement angles for space object determines the orbit determination precision of Space Non-Cooperative Object, which tracked and measured by spaceborne electron-optical sensor. The measure and calculation model is established and measure error transformation formula of relative movement angles is deduced. According to the result of simulation based on the measure error model of relative movement angles, it is concluded that focal plane coordinates extraction error for space object, measure error of pointing angle of optical axis, and satellite inertial attitude angles measure error, are the main disturbance factors which influence the measure precision of relative movement angles. Measure error of pointing angle of optical axis is the key among the error factors above-mentioned, which occupied about 80%. In addition, measure condition influences the measure precision of relative movement angles for space object and severe varying of pointing angle especially the space object locating above the measure satellite.

Key words: space object; space-based optical measure; relative movement angle parameters; measure precision analysis

0 引 言

利用在轨光学测量相机对空间目标进行跟踪测

量, 获取目标序列图像, 通过检测、提取目标在相机焦面上的位置坐标, 借助于测量相机视轴指向信息和测量卫星本体姿态信息, 将相机焦平面上探测到

* 收稿日期: 2008-03-02; 收到修改稿日期: 2008-06-08

E-mail: chengjun@hit.edu.cn.

基金项目: 国家 863 计划项目

作者简介: 程军(1973-), 男, 哈尔滨工业大学博士研究生, 从事天基光学测量、空间目标光学特性研究。

的目标相对运动轨迹变换成空间的两个角观测量序列: 赤经和赤纬^[1]。根据测量得到的空间目标相对运动角参数序列(相对视线在惯性空间的方向角序列)以及测量卫星的轨道数据,利用轨道确定理论精确获取目标的轨道参数,进行轨道维持及星目更新^[2];或者利用多平台光学交汇定位方法,对空间目标进行精确定位以及轨迹预报。空间目标轨道估计与预报精度不仅与定轨方法相关,而且与测量卫星平台的定轨精度以及在轨光学测量相机对空间目标相对视线惯性方向角(赤经与赤纬)的测量精度相关,由于测量卫星为合作目标,其定轨精度能够达到米级,所以目标相对运动角参数测量精度决定了空间目标的测轨精度。

因此,分析在轨光学测量相机对空间目标相对运动角参数测量精度以及影响测量精度的主要因素,对于优化在轨光学测量相机设计、合理规划空间目标天基光学测量任务以提高空间非合作目标的轨道测量精度,具有十分重要的意义。

1 空间目标相对运动角参数测量精度分析模型

1.1 坐标系与坐标变换

(1)地心惯性坐标系 $O\text{-}XYZ$

采用 J2000 地球平赤道平春分点坐标系(Earth Mean Equator and Equinox of Date, EME2000)。

(2)卫星本体坐标系 $o\text{-}x_b y_b z_b$

坐标原点位于测量卫星质心, oz_b 轴位于卫星主对称面内指向地心, ox_b 轴在卫星主对称面内垂直于 oz_b 轴且指向卫星运动方向, oy_b 轴垂直于主对称面构成右手坐标系。在理想情况下,卫星主对称面与轨道面重合, oy_b 轴指向轨道面负法线方向;若卫星为圆轨道,则本体坐标系与卫星速度坐标系重合。

(3)相机测量坐标系 $o\text{-}xyz$

坐标原点位于相机光学系统入瞳中心, ox 轴与相机光轴重合, oz 轴位于相机主对称面内垂直于 ox 轴且指向地心, oy 轴与 ox 、 oz 轴构成右手坐标系。

(4)焦平面坐标系 $o'\text{-}y'z'$

坐标原点在焦平面中心, $o'y'$ 轴与相机测量坐标系中 oy 轴重合, $o'z'$ 轴与 oz 轴重合。

(5)地心惯性系至卫星本体系的坐标变换

卫星本体相对于地心惯性系的姿态欧拉角为 $(\Psi(t), \gamma(t), \vartheta(t))$, 其旋转顺序为编航 - 旋转 - 俯仰, 则地心惯性系至本体坐标系的转移矩阵 M_{BG}

为^[5]

$$M_{BG} = ROT_y[\vartheta]ROT_x[\gamma]ROT_z[\Psi] \quad (1)$$

(6)卫星本体系至相机测量系的坐标变换

测量相机相对卫星本体的欧拉旋转次序为偏航-俯仰, 欧拉角分别为 $(\varphi(t), \theta(t))$, 则本体坐标系至测量坐标系的转移矩阵为^[5]

$$M_{OB} = ROT_y[\theta(t)]ROT_x[\varphi(t)] \quad (2)$$

1.2 空间目标相对运动角参数测量原理

在通常情况下,空间目标在相机焦平面上所成像为点状分布。相机的探测背景为深空与恒星背景,且恒星数量巨大,目标点淹没在其中。因此,需要对探测图像序列进行处理,克服背景恒星以及噪声的影响,检测出目标并提取其在焦平面坐标系中的位置。根据相机成像几何投影模型,得到目标相对视线方向矢量,将该方向矢量从测量坐标系变换到地心惯性坐标系,即可求出目标相对运动角参数。

1.3 空间目标相对运动角参数测量模型

假设目标在相机焦平面上成像坐标为 (y', z') , 相机光学系统焦距为 f , 则目标相对视线单位矢量 s° 在相机测量坐标系中的投影坐标为

$$(x^\circ, y^\circ, z^\circ) = (f/l, -y'/l, -z'/l) \quad (3)$$

其中 $l = (f^2 + y'^2 + z'^2)^{1/2}$ 。

将 s° 投影到地心惯性系,各坐标系之间的转换关系见图 1。

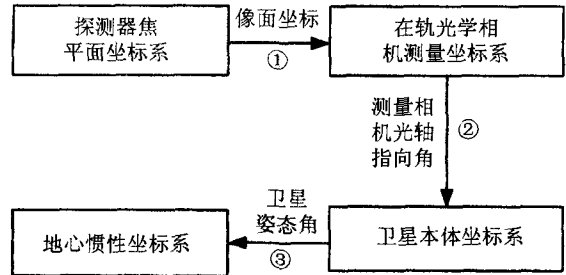


图 1 坐标系转换流程

则有

$$(X^\circ, Y^\circ, Z^\circ)^T = (M_{OB} \cdot M_{BG})^T \cdot (x^\circ, y^\circ, z^\circ)^T \quad (4)$$

空间目标相对视线的赤经 α 、赤纬 δ 为

$$\begin{cases} \alpha = \text{tg}^{(-1)}(Y^\circ/X^\circ) \\ \delta = \text{sin}^{(-1)}(Z^\circ) \end{cases} \quad (5)$$

将(1)–(4)式代入(5)式,可得

$$\begin{cases} \alpha = f_\alpha(y', z', \varphi, \theta, \vartheta, \gamma, \Psi) \\ \delta = f_\delta(y', z', \varphi, \theta, \vartheta, \gamma, \Psi) \end{cases} \quad (6)$$

由上式可知,目标相对视线惯性角参数的测量精度不仅与相机焦平面目标成像坐标提取精度有关,而且与测量卫星平台姿态角测量精度、相机视轴指向角测量精度相关。因此,需要分析三种测量误差对目标相对运动角参数测量精度的影响。

1.4 相对运动角参数测量精度分析模型

假设卫星姿态角、相机视线转角以及焦平面像点坐标测量误差服从零均值正态分布,则空间目标相对运动角参数测量误差也服从零均值正态分布^[3],因此,赤经 α 、赤纬 δ 的测量误差可表示为

$$\begin{cases} \Delta\alpha = \sum_{i=1}^7 \left(\frac{\partial f_{\alpha}}{\partial \theta_i} \cdot \Delta\theta_i \right) \\ \Delta\delta = \sum_{i=1}^7 \left(\frac{\partial f_{\delta}}{\partial \theta_i} \cdot \Delta\theta_i \right) \end{cases} \quad (7)$$

其中 $\{\theta_i, i=1, \dots, 7\} = (y', z', \varphi, \theta, \vartheta, \gamma, \varphi)$ 。

赤经 α 、赤纬 δ 的测量精度为

$$\begin{cases} \sigma_{\alpha}^2 = \sum_{i=1}^7 \left(\frac{\partial f_{\alpha}}{\partial \theta_i} \right)^2 \sigma_i^2 \\ \sigma_{\delta}^2 = \sum_{i=1}^7 \left(\frac{\partial f_{\delta}}{\partial \theta_i} \right)^2 \sigma_i^2 \end{cases} \quad (8)$$

式中 $(\sigma_{\varphi}, \sigma_{\gamma}, \sigma_{\vartheta})$ 为卫星姿态测量精度; $(\sigma_{\theta}, \sigma_{\varphi})$ 为测量相机指向角测量精度; $(\sigma_{y'}, \sigma_{z'})$ 为焦平面像点坐标提取精度。

因此,赤经、赤纬的测量精度不仅与卫星姿态角、相机视线转角以及焦平面像点坐标测量精度相关,而且受各分量系数的影响

1.5 目标焦平面像点坐标提取精度分析

对于理想光学系统,远距离探测时,目标在 CCD 焦平面上成像占据一个像素。但在实际成像时,由于受光学系统圆孔衍射的影响,导致目标在焦面的成像由点成像弥散为多像元。弥散像元数的多少与目标成像信号强度、相机有效探测波段范围以及像元尺寸有关^[4]。

在这种情况下,目标成像焦平面坐标由其灰度中心所在的位置确定,有多种方法可用于求取灰度中心的位置。其中,以 4 连通域质心定位算法(也称为质心法、矩心法)最简单,实际应用效果也较理想,像点定位精度可达到 1/10 个像元尺寸。

1.6 相机视线转角测量精度分析

相机视线转角测量精度通常是与由驱动装置中测量元件的测量分辨率和精度相关的。测量分辨率通常与最小机械分辨率是同一个数量级,它决定了系统分辨能力。测量精度是在测量分辨率的基础上,考虑了系统误差的综合误差。对于空间双轴驱动装置,系统误差是一个小量,因而在精度分析中可将测量元件的最低分辨率作为测量误差^[6]。

1.7 卫星姿态测量精度分析

卫星姿态测量精度取决于姿态敏感器硬件精度和姿态确定算法精度。

常用的姿态确定系统包括陀螺、GPS、磁强计、

太阳敏感器、地球敏感器和星敏感器。随着微/小卫星的发展以及航天任务对姿态确定系统质量、功耗要求的提高,单独采用星跟踪器作为航天器姿态确定系统成为研究热点^[7]。

星敏感器的工作原理是以恒星为参照物,利用 CCD 摄像机实拍到的星图,经过恒星检测、星图识别和姿态确定,计算出星敏感器瞄准线在惯性空间的瞬时指向,从而确定运载体的三轴姿态。因此,通过星敏感器得到的卫星姿态为惯性姿态^[8]。

2 仿真计算实例分析

测量卫星与空间目标的轨道参数见表 1,利用 STK 仿真计算卫星与目标的轨道与姿态;相机参数见表 2,最大探测距离 5000km,采用目标跟踪方式测量,因此,目标成像在焦平面中心附近;测量卫星的姿态测量传感器采用星敏感器,姿态角测量精度为 $10''(1\sigma)$,相机视轴方向角测量采用 16 位光电编码器,测量精度为 $20''(1\sigma)$,目标成像焦面坐标提取精度为 1/10 像元 (1σ) 。

表 1 测量卫星与空间目标轨道参数

参数	测量卫星	空间目标
轨道类型	太阳同步圆轨道	圆轨道
轨道高度/km	600	1000
升交点赤经/(°)	250.3	289.7
轨道倾角/(°)	97.8	45
临近点角	0.0	0.0
偏心率	0.0	0.0
姿控方式	三轴稳定,主对称面与轨道面重合	
测量起止时间	1 Jun 2004 14:54:20.3(UTCG)~ 1 Jun 2004 15:08:25.3(UTCG)	

表 2 测量相机主要参数

工作波段/ μm	0.3~0.9	探测器尺寸/pixel	420×420
像元尺寸/ μm	27×27	探测视场/(°)	1.4×1.4
孔径/mm	150	焦距/mm	450
IFOV	12.1(arcsec/pixel)=60(μrad)		

仿真结果见图 2—图 6(图 2 中 ∇ 为采样点数据)。由图 2 和图 3 可知,目标相对运动角参数测量精度大约为 $25''(1\sigma)$;但随着相对距离的缩短,目标相对运动角参数的测量误差显著增大,这是因为在测量卫星接近目标的过程中,相机视轴转动角变化剧烈,尤其是目标过顶(见图 4);因此测量条件的变化对目标相对运动角参数的测量精度有很大的影响。

通过图 5 和图 6 可知,在轨测量相机视轴转动角测量误差对相对轨迹的测量误差影响最大,占总误差的 80%,所以改进相机视轴转动角测量精度对

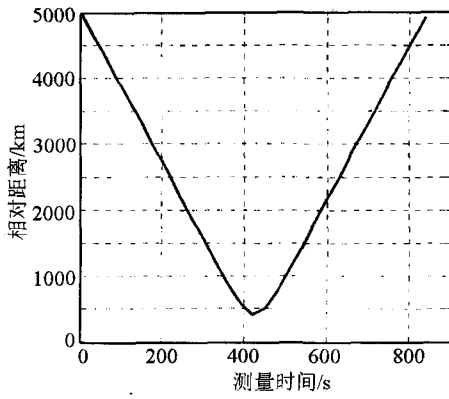


图 2 测量过程中目标相对距离变化曲线

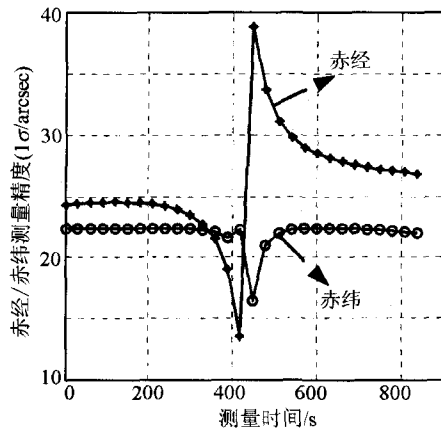


图 3 赤经/赤纬测量精度

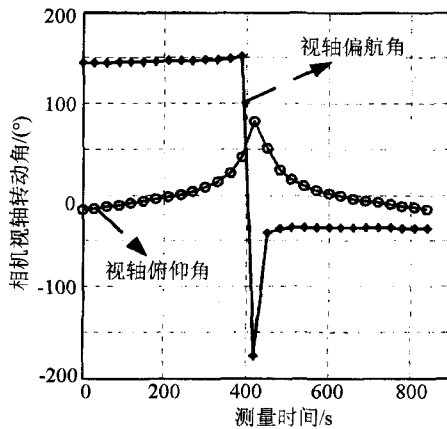


图 4 相机光轴旋转欧拉角

于提高目标相对运动角参数测量精度效果明显。

3 结 论

(1) 利用在轨光学相机跟踪测量空间非合作目标轨道, 目标相对运动角参数(相对视线的赤经、赤纬)的测量精度决定了空间目标的定轨精度。利用欧拉坐标变换方法测量目标相对运动角参数, 其精度能达到 $25''$ (1σ)。

(2) 影响目标相对运动角参数测量精度的因素包括目标成像焦面坐标提取精度、光学相机视轴转

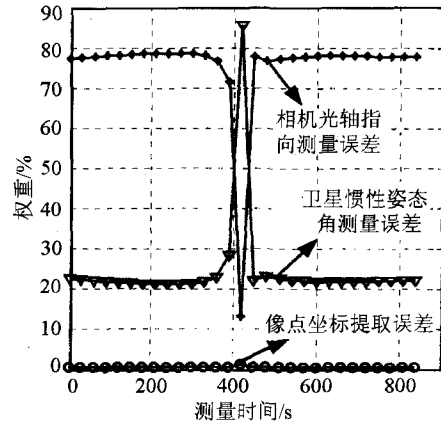


图 5 各误差项在赤经测量误差中的权重

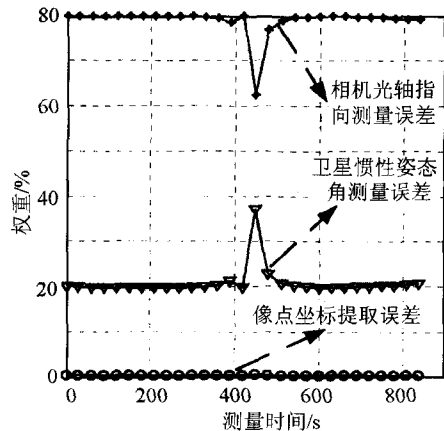


图 6 各误差项在赤纬测量误差中的权重

动欧拉角测量精度以及测量卫星姿态角测量精度。其中, 光学相机视轴转动欧拉角测量误差对相对运动角参数的测量误差影响较大, 约占总误差的 80%。因此, 改进相机视轴转动角测量精度对于提高目标相对运动角参数测量精度效果明显。

(3) 观测条件对测量精度也有很大的影响, 尤其在目标过顶时, 相对运动角参数的测量误差显著增大。因此, 在规划空间目标天基测量任务时, 应避免过顶测量。

参考文献:

- [1] Stokes G H, von Braun C, Sridharan R, et al. The space-based visible program[J]. Lincoln Laboratory Journal, 1998, 11(2): 205-238.
- [2] 甘庆波, 马静远, 陆本魁, 等. 一种基于星间方向观测的初轨计算方法[J]. 宇航学报, 2007, 28(3): 619-622.
- [3] 张萍, 易东云, 吴翊, 等. 空间预警系统的视线测量误差特性研究[J]. 中国空间科学技术, 2004(12): 48-53.
- [4] 张健, 周晓东, 张春华. 空间目标运动轨迹提取算法研究[J]. 红外技术, 2007, 29(8): 459-462.
- [5] 谭伟明. 星敏感器恒星检测若干问题研究[J]. 光学与光电技术, 2004, 2(1): 8-10.
- [6] 孙京, 马兴瑞, 于登云. 星载天线双轴定位机构指向精度分析[J]. 宇航学报, 2007, 28(3): 545-550.
- [7] 张晨. 基于星跟踪器的航天器姿态确定方法研究[D]. 华中理工大学, 2000(10).
- [8] 李立宏, 曹泉, 张福恩, 林涛. 基于 CCD 星跟踪器的飞行器姿态估计算法研究[J]. 光电工程, 2000, 27(1): 20-24.