

基于太阳矢量的点光源转台高精度标校建模研究

李瑞金^{1,2**}, 张黎明^{1*}, 徐伟伟¹, 司孝龙¹, 李佳伟¹, 胡运优^{1,2}, 王先华¹, 王戟翔¹

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

摘要 针对以凸面镜作为反射式点光源的系统建模不够完善, 限制其指向精度提高的问题, 提出以太阳矢量为参照基准的系统建模方法, 提高了系统指向精度。通过实验数据的线性度拟合确定拟合系数 R^2 在 0.999 以上, 确保了实验数据的可靠性, 以最小二乘法解算模型求解系统固有安置几何误差, 最后, 通过反解模型求解目标值方法和太阳图像质心比对法, 分别验证标校后模型的正确性。实验结果表明, 目标编码器角度与实际测量角度值基本一致, 俯仰角度误差标准偏差为 0.0043° , 方位角度误差标准偏差为 0.00299° , 误差范围保持在 0.04° 以内, 图像质心比对法像素差值在 2 pixel 左右, 对应的像素角分辨率误差在 0.036° 上下, 系统综合指向精度优于 0.1° , 验证了此种方法建模的正确性与可行性, 为实现多空间分辨率的高分辨率光学遥感卫星传感器高精度、高频次、业务化、全动态范围的在轨绝对辐射定标奠定了基础。

关键词 遥感; 在轨绝对辐射定标; 几何误差; 系统建模; 太阳矢量; 标校

中图分类号 TH744

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1128001

High-Precision Calibration Modeling of Point-Light-Source Turntable Based on Solar Vector

Li Ruijin^{1,2**}, Zhang Liming^{1*}, Xu Weiwei¹, Si Xiaolong¹, Li Jiawei¹, Hu Yunyou^{1,2}, Wang Xianhua¹, Wang Jixiang¹

¹Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

²University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract A system modeling method based on solar vector is proposed to improve the system modeling and pointing accuracy of convex mirrors which are used as reflective light sources. The fitting coefficient (R^2) of 0.999 or higher obtained by linearity fitting of experimental data ensures the reliability of our experimental data. The model is solved by the least-squares method, and inherent geometric errors of the system are obtained. Finally, the correctness of the calibrated model is verified by using the reverse model to solve the target value and comparing the centroid of the sun image. The experimental results show that the angle of the target encoder is essentially the same as that of the actual measurement. To summarize, the standard deviation of pitch angle error is 0.0043° , standard deviation of azimuth angle error is 0.00299° , error range is kept within 0.04° , difference of image centroid pixel is approximately 2 pixel, angular resolution error of pixel is approximately 0.036° , and comprehensive pointing accuracy of the system is better than 0.1° . Therefore, the validity and feasibility of this method are verified; this lays the foundation for the on-orbit absolute radiometric calibration of multi-spatial resolution optical remote-sensing satellite sensors with high accuracy, high frequency, and operational and full dynamic range.

Key words remote sensing; on-orbit absolute radiation calibration; geometric error; system modeling; solar vector; calibration

OCIS codes 280.4788; 150.1488; 120.4640

收稿日期: 2019-06-11; 修回日期: 2019-07-02; 录用日期: 2019-07-15

基金项目: 国家自然科学基金(41601388)

* E-mail: lmzhang@aiofm.ac.cn; ** E-mail: liruijinrona@163.com

1 引 言

遥感通过探测仪记录目标的电磁波特性,遥感信息经量化处理后可成为能利用的有效信息。随着遥感量化应用技术的深入发展,在轨辐射定标是遥感信息量化应用的关键技术之一。遥感卫星光学相机在发射前虽然进行了严格的实验室定标与检测,但成像仍与地面有所不同。调制传递函数(MTF)是光学相机成像质量的重要指标之一,可根据获取到的遥感影像来评估相机正确辨别地物的能力。为保证遥感数据的量化应用,需要对卫星运行器件的性能进行跟踪与 MTF 检测^[1-5]。

高分辨率卫星的反射式点光源以其轻量小型化及优异的光学特性在检测参照目标领域得到了快速发展,可以保证多空间分辨率的高分辨率光学遥感卫星传感器实现高精度、高频次、业务化、全动态范围的在轨绝对辐射定标。而根据太阳光 0.53° 的发散角及几何光学追迹分析估算值可知,采用凸面镜的反射式点源的光学卫星传感器接收到的反射光斑仅为镜面上很小的区域,一般在 cm 量级^[1-5]。同时采用凸面镜反射太阳光会使反射光斑发散,导致进入遥感器的能量效率降低,因此要实现全动态范围的在轨绝对辐射定标,确保反射光斑入射至卫星入瞳处,满足传感器不同能级需求及实现在轨 MTF 检测与辐射定标,在减小反射凸面镜发散角和曲率半径设计的情况下,对反射式点光源的指向精度提出了更高的要求。提高系统指向精度有利于将入射到凸面镜的太阳光束反射至高分辨率光学遥感卫星入瞳处,同时也可减小反射镜的体积与质量。因此,建立点光源转台高精度检校模型,解算系统固有安置误差,对提高系统指向精度具有非常重要的意义。

2016年,国外 Schiller 等^[6]在 IGTF 报告中提到了基于反射镜阵列辐射定标方法在 Landsat Sensors 上的应用,使用曲率半径为 10 m,口径为 18 inch(45.72 cm)的凸面镜,可获得较大的反射光斑,满足 Landsat 较大的地面采样间隔,保证反射光斑反射至卫星入瞳处,但是凸面镜的体积和质量较大,不便于外场试验的开展。中国科学院安徽光学精密机械研究所同样使用较大的反射镜作为反射式点源(反射镜采用平面镜),实现了中高轨卫星的在轨定标检测,其指向精度优于 0.1° ^[7]。本文主要对点光源转台进行高精度标校建模,解算系统固有几何误差,以提高系统指向精度。采用曲率半径较小的凸面镜作为反射式点源,减小反射镜的体积和质

量,便于工程实践和应用推广,实现对低轨及极轨卫星在轨 MTF 检测和绝对辐射定标。为更方便地完成在轨 MTF 检测和绝对辐射定标,研制了无人值守的自动点光源转台检测参照目标系统,转台系统设计指向精度优于 0.1° 。

2 标校原理

2.1 点光源转台系统组成

点光源转台系统主要由太阳敏感器组件、反射镜组件、姿态调控组件、电控系统组成。姿态调控组件主要包括方位和俯仰部分:方位部分采用转盘式结构,安装于底座支撑上,方位电机通过减速驱动方位涡轮带动转盘绕垂直轴旋转,由安置于底盘的方位编码器同步检测方位电机旋转角度,并实时反馈检测位置信号给微处理器,以形成方位轴向电机的闭环控制;俯仰部分转动支撑采用“U”形叉臂机构,两叉臂安装在方位转盘上随转盘转动。反射镜组件通过轴承安装在两叉臂形成的俯仰转动轴即水平轴上。太阳敏感器安装于反射镜顶端,与反射镜固连,俯仰电机通过减速驱动俯仰涡轮带动反射镜组件绕水平轴转动,同时由安置于左叉臂的俯仰编码器同步检测俯仰轴电机旋转角度,并实时反馈检测位置信号给微处理器,以形成俯仰轴向电机的闭环控制。电控部分主控板安置于底座和叉臂内。转台系统结构如图 1(b)所示。

整个点光源转台系统的运动控制过程主要为微控制器接收运动控制指令,利用天文算法对太阳运动轨迹的位置进行解算,并向俯仰方位伺服电机发送驱动指令,进而驱动姿态调控组件,并带动镜面反射率大于 80% 以上的组合反射镜运动,镜面反射率如图 1(c)所示。太阳光反射至卫星入瞳处,将编码器实时检测到的组合反射镜的位置信息反馈给控制器,以形成闭环控制。为方便检测俯仰方位的实际位置,转台系统采用绝对值光电编码器进行高精度全数字化输出,数据位为 14 位,脉冲当量为 0.022° 。

太阳敏感器组件通过连续跟踪太阳运动轨迹成像,然后将获取的太阳图像进行反射镜法向标校,实现点光源与卫星光路对准。太阳敏感器组件主要由滤光片与相机组成,如图 1(a)所示。相机由图像传感器与光学镜头组成,图像传感器选用 130 万像素的高分辨率数字 CMOS 图像传感器;光学镜头水平视场角为 23° ,垂直视场角为 17° ,对应的像素角分辨率分别为 0.018° 和 0.016° 。

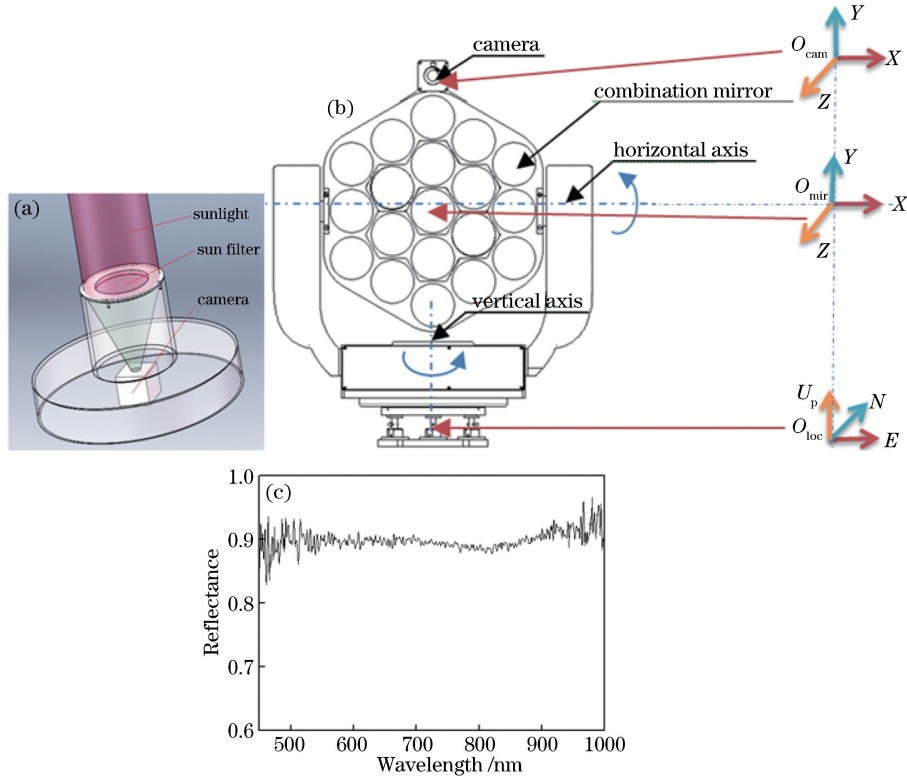


图 1 点光源转台系统组成。(a) 太阳传感器示意图; (b) 坐标系定义及结构示意图; (c) 镜面反射率
 Fig. 1 Composition of point light source turntable system. (a) Schematic of sun sensor; (b) coordinate system definition and structural diagram; (c) mirror reflectivity

太阳观测器平行于反射镜法线,并固定于其表面,借助太阳观测器,利用太阳矢量可建立相机坐标系与反射镜坐标系之间的关系。对准太阳时,对获取的太阳图像利用质心算法或边缘检测拟合法计算太阳在相机坐标系下的质心像素坐标值,然后利用此像素值完成对反射镜法向的自动标校。

2.2 相关坐标系及点光源初始位置定义

当地坐标系(即东北上坐标系)以点光源设备所在地球上某一点的位置建立坐标系,称为当地空间直角坐标系,用 loc 表示,描述为 $[E \ N \ U_p]$, E 为正东且为正方向, N 为正北且为正方向, U_p 为逆地心铅直向上方向且为正方向。反射镜坐标系安置于转台上,以反射镜中心光轴为 Z 轴构成右手空间直角坐标系,描述为 $[x_{mir} \ y_{mir} \ z_{mir}]$, x_{mir} 指向正东, y_{mir} 与 U_p 方向的指向一致, z_{mir} 指向正北,均为正方向。相机固联安装于反射镜平台上,相机视轴方向定义为 Z 轴,指向平行于目视方向,水平轴方向定义为 X 轴,向右为正方向, Y 轴按照右手直角坐标系定则确定,当视轴方法平行于当地坐标系下的 (E, N) 平面时, Y 轴垂直于水平面,相机坐标系描述为 $[x_{cam}$

$y_{cam} \ z_{cam}]$, x_{cam} 指向正东, y_{cam} 与 U_p 方向的指向一致, z_{cam} 指向正北,均为正方向。

点光源初始位置状态如图 1(b) 所示,初始位置定义为:俯仰转轴 X 向与 (E) 东向重合; Z 轴与 (N) 北向重合,与反射镜中心光轴平行; Y 轴按照右手直角坐标系定则确定,与 U_p 方向一致。

2.3 基于太阳矢量的标校原理

基于太阳矢量的转台坐标系检校原理为某一时刻利用太阳观测器或相机观测法将反射镜中心光轴 (Z 轴指向) 转动至与太阳矢量一致的方向,根据坐标旋转变换关系,利用编码器转角读数,确定方位、俯仰的初始位置对应的编码器角度。

假定转台水平放置,俯仰与方位转轴正交,点光源按照初始位置状态摆放,反射镜中心光轴指向 (N) 北方向,其在东北上坐标系下的坐标可表示为 $[0 \ 1 \ 0]^T$ 。若此刻太阳光线的入射方位角为 a_{zimuth} , 高度角为 a_{litude} , 则转台绕俯仰转轴 X 向与东向重合,再逆时针旋转 a_{litude} , 绕铅垂线顺时针旋转 a_{zimuth} , 反射镜中心光轴指向即可与太阳矢量方向重合,具体过程可用旋转矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} S_E \\ S_N \\ S_{U_p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos a_{\text{zimuth}} & \sin a_{\text{zimuth}} & 0 \\ -\sin a_{\text{zimuth}} & \cos a_{\text{zimuth}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos a_{\text{altitude}} & -\sin a_{\text{altitude}} \\ 0 & \sin a_{\text{altitude}} & \cos a_{\text{altitude}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin a_{\text{zimuth}} \cos a_{\text{altitude}} \\ \cos a_{\text{zimuth}} \cos a_{\text{altitude}} \\ \sin a_{\text{altitude}} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中： S_E 为太阳在当地坐标系下正东方向分量； S_N 为太阳在当地坐标系下正北方向分量； S_{U_p} 为太阳在当地坐标系下铅直向上方向分量； a_{altitude} 为高度角，以当地水平面为基准，是光线矢量在水平面的投影线与光线矢量的夹角； a_{zimuth} 为方位角，是指向光线在当地坐标系下地平面上的投影与正北方向之间的夹角，顺时针方向为正。

设此刻俯仰编码器读数为 β ，方位编码器读数为 α ，初始状态读数分别为 α_0, β_0 ，则有 $\alpha - \alpha_0 = a_{\text{zimuth}}, \beta - \beta_0 = a_{\text{altitude}}$ ，得 $\alpha_0 = \alpha - a_{\text{zimuth}}, \beta_0 = \beta - a_{\text{altitude}}$ ，太阳矢量对应的编码器读数为 $\alpha = \alpha_0 + a_{\text{zimuth}}, \beta = \beta_0 + a_{\text{altitude}}$ 。当方位、俯仰编码器读数值调整到 α, β 时，此时反射镜中心光轴平行于太阳矢量；当编码器读数值调整到 α_0, β_0 时，转台回到初始状态，即为系统零点位置。

3 转台标校建模

3.1 转台简化标校模型

转台简化标校中的反射镜初始状态为俯仰转轴 X 向与东向重合， Z 轴为反射镜中心光轴与北向重合，则反射镜中心光轴在东北上坐标系下的坐标表示为 $[0 \ 1 \ 0]^T$ ，此时已将反射镜中心光轴转换成东北上坐标系下的坐标，因此，可对反射镜中心光轴在东北上坐标系下进行坐标旋转。假定转台水平放置，俯仰转轴与方位转轴正交，则坐标旋转矩阵可设为

$$\mathbf{R}(a_{\text{zimuth}}, a_{\text{altitude}}) = \begin{bmatrix} \cos a_{\text{zimuth}} & \sin a_{\text{zimuth}} & 0 \\ -\sin a_{\text{zimuth}} & \cos a_{\text{zimuth}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos a_{\text{altitude}} & -\sin a_{\text{altitude}} \\ 0 & \sin a_{\text{altitude}} & \cos a_{\text{altitude}} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

根据坐标旋转矩阵与被操作矢量坐标之间的变换关系可得，反射镜中心光轴在东北上坐标系下的

坐标变换方向与太阳矢量方向一致，其关系式为

$$\begin{bmatrix} S_E \\ S_N \\ S_{U_p} \end{bmatrix} = \mathbf{R}(a_{\text{zimuth}}, a_{\text{altitude}}) \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

任意空间点在不同的坐标系下的坐标值 $[x \ y \ z]^T$ 是不同的，可用坐标变换旋转矩阵建立不同坐标系之间的联系。根据反射镜坐标系的定义，在反射镜坐标系下，反射镜中心光轴矢量可表示为 $[0 \ 0 \ 1]_{\text{mir}}^T$ ，如图 1(b) 所示，初始状态时其 X 轴与当地坐标系下的东向 E 轴重合，反射镜中心光轴与当地坐标系下的 N 轴重合，将反射镜坐标系绕 E 轴逆时针旋转 90° ，则该两个坐标系重合。此时坐标变换旋转矩阵可表示为

$$\mathbf{R}\left(\frac{\pi}{2}\right) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\pi/2) & -\sin(\pi/2) \\ 0 & \sin(\pi/2) & \cos(\pi/2) \end{bmatrix}. \quad (4)$$

根据坐标变换旋转矩阵 $\mathbf{R}\left(\frac{\pi}{2}\right)$ 与被操作坐标系之间的变换关系可得，反射镜坐标系与当地坐标系之间的变换关系为

$$\mathbf{R}\left(\frac{\pi}{2}\right) \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}_{\text{loc}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}_{\text{mir}}. \quad (5)$$

从(5)式可知，在当地坐标系下对反射镜坐标系逆时针旋转，即在反射镜坐标系下，对当地坐标系顺时针旋转，这种坐标变换关系在任意点均成立，表示为

$$\begin{bmatrix} x_{\text{loc}} \\ y_{\text{loc}} \\ z_{\text{loc}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{\text{mir}} \\ y_{\text{mir}} \\ z_{\text{mir}} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

由(3)式和(6)式可得转台简化标校模型为

$$\begin{bmatrix} x_{\text{loc}} \\ y_{\text{loc}} \\ z_{\text{loc}} \end{bmatrix} = \mathbf{R}(a_{\text{zimuth}}, a_{\text{altitude}}) \mathbf{R}^{-1}\left(\frac{\pi}{2}\right) \begin{bmatrix} x_{\text{mir}} \\ y_{\text{mir}} \\ z_{\text{mir}} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

特别地，当反射镜主光轴与太阳矢量一致时，太阳矢量在反射镜坐标系下的坐标为 $[0 \ 0 \ 1]_{\text{mir}}^T$ ，在当地坐标系下的单位矢量坐标为 $[S_E \ S_N \ S_{U_p}]^T$ 。据此利用太阳矢量，建立当地坐标系与反射镜坐标系之间的坐标变换关系，将上述参数代入(7)式，可得转台简化标校模型为

$$\begin{bmatrix} S_E \\ S_N \\ S_{U_p} \end{bmatrix} = \mathbf{R}(a_{\text{zimuth}}, a_{\text{altitude}}) \mathbf{R}^{-1}\left(\frac{\pi}{2}\right) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}_{\text{mir}}. \quad (8)$$

因此,利用太阳矢量建立反射镜坐标系与当地坐标系之间的关系,从而可将反射镜坐标系下的任意矢量通过坐标变换关系变换到当地坐标系下,实现转台系统在当地坐标系下指向太阳的运动控制。

3.2 转台高精度标校模型

转台简化标校模型是在假定转台水平放置,俯仰轴与方位轴正交的情况下建立的模型,这是理想的一种状态,实际上,转台的安置是否水平、俯仰转

轴与方位转轴是否垂直,以及水平度误差与垂直度误差都应该在高精度控制系统中加以考虑。因此,要实现转台的高精度控制,就必须建立转台的高精度标校模型,在简单检校基础上,要考虑到转台未水平安置以及俯仰转轴与方位转轴不垂直的问题。设转台未水平安置旋转矩阵为 \mathbf{R}^L ,俯仰转轴与方位转轴不垂直安置旋转矩阵为 \mathbf{R}^S ,则高精度标校模型表示为

$$\begin{bmatrix} S_E \\ S_N \\ S_{U_p} \end{bmatrix} = \mathbf{R}^L \begin{bmatrix} \cos(\alpha - \alpha_0) & \sin(\alpha - \alpha_0) & 0 \\ -\sin(\alpha - \alpha_0) & \cos(\alpha - \alpha_0) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{R}^S \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\beta - \beta_0) & -\sin(\beta - \beta_0) \\ 0 & \sin(\beta - \beta_0) & \cos(\beta - \beta_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

其中, $\begin{bmatrix} S_E \\ S_N \\ S_{U_p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin a_{\text{zimuth}} \cos a_{\text{latitude}} \\ \cos a_{\text{zimuth}} \cos a_{\text{latitude}} \\ \sin a_{\text{latitude}} \end{bmatrix}$, $\mathbf{R}^L = \mathbf{R}_X^L \mathbf{R}_Y^L \mathbf{R}_Z^L$, $\mathbf{R}^S = \mathbf{R}_X^S \mathbf{R}_Y^S \mathbf{R}_Z^S$ 。

对(9)式进行旋转矩阵和方向旋转同类合并,得转台高精度标校模型为

$$\begin{bmatrix} S_E \\ S_N \\ S_{U_p} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_X^L \mathbf{R}_Y^L \begin{bmatrix} \cos(\alpha - \alpha_0) & \sin(\alpha - \alpha_0) & 0 \\ -\sin(\alpha - \alpha_0) & \cos(\alpha - \alpha_0) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{R}_Y^S \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\beta - \beta_0) & -\sin(\beta - \beta_0) \\ 0 & \sin(\beta - \beta_0) & \cos(\beta - \beta_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中, \mathbf{R}_X^L 、 \mathbf{R}_Y^L 、 \mathbf{R}_Z^L 分别表示反射镜坐标系到当地坐标系统 X 、 Y 、 Z 轴的旋转矩阵, \mathbf{R}_X^S 、 \mathbf{R}_Y^S 、 \mathbf{R}_Z^S 分别表示俯仰轴坐标系到方位轴坐标系统 X 、 Y 、 Z 轴的旋转矩阵,则有

$$\mathbf{R}_X^L \mathbf{R}_Y^L = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \mu_0 & -\sin \mu_0 \\ 0 & \sin \mu_0 & \cos \mu_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \nu_0 & 0 & \sin \nu_0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \nu_0 & 0 & \cos \nu_0 \end{bmatrix}, \mathbf{R}_Y^S = \begin{bmatrix} \cos \omega_0 & 0 & \sin \omega_0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \omega_0 & 0 & \cos \omega_0 \end{bmatrix}。$$

建立转台高精度标校模型后,可通过(10)式建立多点检校观测方程,实现高精度检校,检校出系统固有安置误差 μ_0 、 ν_0 、 ω_0 ,从而实现转台系统在当地坐标系下的高精度指向控制。

4 模型的验证与解算

4.1 简化标校模型坐标变换关系验证

根据简化标校模型的推导可知,反射镜坐标系与当地坐标系之间的坐标变换关系为

$$\begin{bmatrix} x_{\text{loc}} \\ y_{\text{loc}} \\ z_{\text{loc}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha - \alpha_0) & \sin(\alpha - \alpha_0) & 0 \\ -\sin(\alpha - \alpha_0) & \cos(\alpha - \alpha_0) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\beta - \beta_0) & -\sin(\beta - \beta_0) \\ 0 & \sin(\beta - \beta_0) & \cos(\beta - \beta_0) \end{bmatrix} \mathbf{R}^{-1} \left(\frac{\pi}{2} \right) \begin{bmatrix} x_{\text{mir}} \\ y_{\text{mir}} \\ z_{\text{mir}} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

式中, $\mathbf{R}^{-1} \left(\frac{\pi}{2} \right) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$, $\alpha - \alpha_0 = a_{\text{zimuth}}$, $\beta - \beta_0 = a_{\text{latitude}}$ 。

$\mathbf{R}_{\text{mir}}^{\text{loc}}$ 为(11)式等号右边前三项之积,即为

$$\mathbf{R}_{\text{mir}}^{\text{loc}} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha - \alpha_0) & \sin(\alpha - \alpha_0) \sin(\beta - \beta_0) & \sin(\alpha - \alpha_0) \cos(\beta - \beta_0) \\ -\sin(\alpha - \alpha_0) & \cos(\alpha - \alpha_0) \sin(\beta - \beta_0) & \cos(\alpha - \alpha_0) \cos(\beta - \beta_0) \\ 0 & -\cos(\beta - \beta_0) & \sin(\beta - \beta_0) \end{bmatrix}。$$

(11)式可表示为

$$\begin{bmatrix} x_{\text{mir}} \\ y_{\text{mir}} \\ z_{\text{mir}} \end{bmatrix} = (\mathbf{R}_{\text{mir}}^{\text{loc}})^{-1} \begin{bmatrix} x_{\text{loc}} \\ y_{\text{loc}} \\ z_{\text{loc}} \end{bmatrix} \quad (12)$$

当反射镜主光轴对准太阳矢量时,有

$$\begin{bmatrix} x_{\text{loc}} \\ y_{\text{loc}} \\ z_{\text{loc}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_E \\ S_N \\ S_{U_p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin a_{\text{zimuth}} \cos a_{\text{titude}} \\ \cos a_{\text{zimuth}} \cos a_{\text{titude}} \\ \sin a_{\text{titude}} \end{bmatrix} \quad (13)$$

在反射镜坐标系下,反射镜中心光轴矢量表示为 $[0 \ 0 \ 1]_{\text{mir}}^T$,将(13)式参数代入(12)式,计算得

$$\begin{bmatrix} x_{\text{mir}} \\ y_{\text{mir}} \\ z_{\text{mir}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos a_{\text{zimuth}} & -\sin a_{\text{zimuth}} & 0 \\ \sin a_{\text{zimuth}} \sin a_{\text{titude}} & \cos a_{\text{zimuth}} \sin a_{\text{titude}} & -\cos a_{\text{titude}} \\ \sin a_{\text{zimuth}} \cos a_{\text{titude}} & \cos a_{\text{zimuth}} \cos a_{\text{titude}} & \sin a_{\text{titude}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{\text{loc}} \\ y_{\text{loc}} \\ z_{\text{loc}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

计算可知,在反射镜坐标系下反射镜中心光轴矢量也同为 $[0 \ 0 \ 1]_{\text{mir}}^T$,因此计算结果与预测结果相同,从而验证了反射镜坐标系与当地坐标系之间坐标变换关系的正确性。

4.2 模型的解算

从(10)式可知,待检校参数为5个 $(\mu_0, \nu_0, \omega_0, \alpha_0, \beta_0)$, μ_0, ν_0 分别为 X, Y 方向安置水平度偏置误差, ω_0 为俯仰转轴与方位转轴垂直度偏置误差, α_0 为方位编码器初始状态读数, β_0 为俯仰编码器初始状态读数。求解模型可知需要通过多点观测来增加观测方程数量,采用最小二乘法求解,求解算法过程如下。

设(10)式方程右边为计算的太阳矢量 $[\bar{S}_E \ \bar{S}_N \ \bar{S}_{U_p}]^T$,令

$$B = \cos \nu_0 [\cos(\alpha - \alpha_0) \sin \omega_0 \sin(\beta - \beta_0) + \sin(\alpha - \alpha_0) \cos(\beta - \beta_0)] + \sin \nu_0 \cos \omega_0 \sin(\beta - \beta_0),$$

$$C = \cos \mu_0 [-\sin(\alpha - \alpha_0) \sin \omega_0 \sin(\beta - \beta_0) + \cos(\alpha - \alpha_0) \cos(\beta - \beta_0)] - \sin \mu_0 \{ \cos \nu_0 \cos \omega_0 \cdot \sin(\beta - \beta_0) - \sin \nu_0 [\cos(\alpha - \alpha_0) \sin \omega_0 \sin(\beta - \beta_0) + \sin(\alpha - \alpha_0) \cos(\beta - \beta_0)] \},$$

$$D = \sin \mu_0 [-\sin(\alpha - \alpha_0) \sin \omega_0 \sin(\beta - \beta_0) + \cos(\alpha - \alpha_0) \cos(\beta - \beta_0)] + \cos \mu_0 \{ \cos \nu_0 \cos \omega_0 \sin(\beta - \beta_0) - \sin \nu_0 [\cos(\alpha - \alpha_0) \sin \omega_0 \sin(\beta - \beta_0) + \sin(\alpha - \alpha_0) \cos(\beta - \beta_0)] \},$$

则

$$\begin{bmatrix} \bar{S}_E \\ \bar{S}_N \\ \bar{S}_{U_p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B \\ C \\ D \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中, \bar{S}_E 为计算的太阳矢量在当地坐标系下正东方

向分量, \bar{S}_N 为计算的太阳矢量在当地坐标系下正北方向分量, \bar{S}_{U_p} 为计算的太阳矢量在当地坐标系下铅直向上方向分量。

对(14)式在初始值 $[\mu_0 \ \nu_0 \ \omega_0 \ \alpha_0 \ \beta_0]_i^T$ 处进行泰勒展开,线性化一阶近似表示为

$$\begin{bmatrix} \bar{S}_E \\ \bar{S}_N \\ \bar{S}_{U_p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{S}_E \\ \bar{S}_N \\ \bar{S}_{U_p} \end{bmatrix}^0 + \begin{bmatrix} \frac{\partial \bar{S}_E}{\partial \mu_0} \Delta \mu_0 + \dots + \frac{\partial \bar{S}_E}{\partial \beta_0} \Delta \beta_0 \\ \frac{\partial \bar{S}_N}{\partial \mu_0} \Delta \mu_0 + \dots + \frac{\partial \bar{S}_N}{\partial \beta_0} \Delta \beta_0 \\ \frac{\partial \bar{S}_{U_p}}{\partial \mu_0} \Delta \mu_0 + \dots + \frac{\partial \bar{S}_{U_p}}{\partial \beta_0} \Delta \beta_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{S}_E \\ \bar{S}_N \\ \bar{S}_{U_p} \end{bmatrix}^0 + \begin{bmatrix} \frac{\partial \bar{S}_E}{\partial \nu_0} & \dots & \frac{\partial \bar{S}_E}{\partial \beta_0} \\ \frac{\partial \bar{S}_N}{\partial \nu_0} & \dots & \frac{\partial \bar{S}_N}{\partial \beta_0} \\ \frac{\partial \bar{S}_{U_p}}{\partial \nu_0} & \dots & \frac{\partial \bar{S}_{U_p}}{\partial \beta_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mu_0 \\ \Delta \nu_0 \\ \Delta \omega_0 \\ \Delta \alpha_0 \\ \Delta \beta_0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中, $[\ :]^0$ 为一阶泰勒在展开点对各变量求偏导后的值, $\Delta \mu_0 = \mu_0 - \mu_{0i}, \Delta \nu_0 = \nu_0 - \nu_{0i}, \Delta \omega_0 = \omega_0 - \omega_{0i}, \Delta \alpha_0 = \alpha_0 - \alpha_{0i}, \Delta \beta_0 = \beta_0 - \beta_{0i}$ 。其中, $\mu_{0i}, \nu_{0i}, \omega_{0i}, \alpha_{0i}, \beta_{0i}$ 为一阶泰勒在第*i*次展开点的值, $i = 0, 1, 2, \dots, n, n$ 为循环的次数。

由(10)式得计算式与观测式相等,即

$$\begin{bmatrix} S_E \\ S_N \\ S_{U_p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin a_{\text{zimuth}} \cos a_{\text{titude}} \\ \cos a_{\text{zimuth}} \cos a_{\text{titude}} \\ \sin a_{\text{titude}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{S}_E \\ \bar{S}_N \\ \bar{S}_{U_p} \end{bmatrix} \quad (16)$$

通过(15)式和(16)式可以建立多点观测方程,得

$$\begin{bmatrix} \sin a_{\text{zimuth}} \cos a_{\text{latitude}} \\ \cos a_{\text{zimuth}} \cos a_{\text{latitude}} \\ \sin a_{\text{latitude}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{S}_E \\ \bar{S}_N \\ \bar{S}_{U_p} \end{bmatrix}^0 = \begin{bmatrix} \frac{\partial \bar{S}_E}{\partial \nu_0} & \cdots & \frac{\partial \bar{S}_E}{\partial \beta_0} \\ \frac{\partial \bar{S}_N}{\partial \nu_0} & \cdots & \frac{\partial \bar{S}_N}{\partial \beta_0} \\ \frac{\partial \bar{S}_{U_p}}{\partial \nu_0} & \cdots & \frac{\partial \bar{S}_{U_p}}{\partial \beta_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\mu_0 \\ \Delta\nu_0 \\ \Delta\omega_0 \\ \Delta\alpha_0 \\ \Delta\beta_0 \end{bmatrix}, \quad (17)$$

多点观测方程为

$$\mathbf{L}_1 = \begin{bmatrix} S_{E,1} \\ S_{N,1} \\ S_{U_p,1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{S}_{E,1} \\ \bar{S}_{N,1} \\ \bar{S}_{U_p,1} \end{bmatrix}^0, \mathbf{L}_n = \begin{bmatrix} S_{E,n} \\ S_{N,n} \\ S_{U_p,n} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{S}_{E,n} \\ \bar{S}_{N,n} \\ \bar{S}_{U_p,n} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{x}^0 = \begin{bmatrix} \Delta\mu_0 \\ \Delta\nu_0 \\ \Delta\omega_0 \\ \Delta\alpha_0 \\ \Delta\beta_0 \end{bmatrix}^i,$$

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} \frac{\partial \bar{S}_{E,1}}{\partial \nu_0} & \cdots & \frac{\partial \bar{S}_{E,1}}{\partial \beta_0} \\ \frac{\partial \bar{S}_{N,1}}{\partial \nu_0} & \cdots & \frac{\partial \bar{S}_{N,1}}{\partial \beta_0} \\ \frac{\partial \bar{S}_{U_p,1}}{\partial \nu_0} & \cdots & \frac{\partial \bar{S}_{U_p,1}}{\partial \beta_0} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A}_n = \begin{bmatrix} \frac{\partial \bar{S}_{E,n}}{\partial \nu_0} & \cdots & \frac{\partial \bar{S}_{E,n}}{\partial \beta_0} \\ \frac{\partial \bar{S}_{N,n}}{\partial \nu_0} & \cdots & \frac{\partial \bar{S}_{N,n}}{\partial \beta_0} \\ \frac{\partial \bar{S}_{U_p,n}}{\partial \nu_0} & \cdots & \frac{\partial \bar{S}_{U_p,n}}{\partial \beta_0} \end{bmatrix},$$

令

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{L}_n \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{A}_n \end{bmatrix},$$

式中, \mathbf{L}_1 为第 1 时刻观测太阳矢量与计算的太阳矢量之差矩阵, \mathbf{L}_n 为第 n 时刻观测太阳矢量与计算的太阳矢量之差矩阵, $S_{E,1}$ 为第 1 时刻观测在当地坐标系下正东方向太阳分量, $S_{E,n}$ 为第 n 时刻观测在当地坐标系下正东方向太阳分量, $S_{N,1}$ 为第 1 时刻观测在当地坐标系下正北方向太阳分量, $S_{N,n}$ 为第 n 时刻观测在当地坐标系下正北方向太阳分量,

$S_{U_p,1}$ 为第 1 时刻观测在当地坐标系下铅直向上方向太阳分量, $S_{U_p,n}$ 为第 n 时刻观测在当地坐标系下铅直向上方向太阳分量, $\bar{S}_{E,1}$ 为第 1 时刻计算的当地坐标系下正东方向太阳分量, $\bar{S}_{E,n}$ 为第 n 时刻计算的当地坐标系下正东方向太阳分量, $\bar{S}_{N,1}$ 为第 1 时刻计算的当地坐标系下正北方向太阳分量, $\bar{S}_{N,n}$ 为第 n 时刻计算的当地坐标系下正北方向太阳分量, $\bar{S}_{U_p,1}$ 为第 1 时刻计算的当地坐标系下铅直向上方向太阳分量, $\bar{S}_{U_p,n}$ 为第 n 时刻计算的当地坐标系下铅直向上方向太阳分量, \mathbf{x}^0 为各变量分别与 n 次展开点值之差的矩阵, \mathbf{A}_1 为第 1 时刻太阳矢量对各变量求偏导数矩阵, \mathbf{A}_n 为第 n 时刻太阳矢量对各变量求偏导数矩阵, \mathbf{L} 为所有观测太阳矢量与计算的太阳矢量之差的矩阵, \mathbf{A} 为所有太阳矢量对各变量求偏导数矩阵。

则有 $\mathbf{L} = \mathbf{A}\mathbf{x}^0$, 将该公式两边左乘以 \mathbf{A}^T , 得到方程 $\mathbf{A}^T\mathbf{L} = \mathbf{A}^T\mathbf{A}\mathbf{x}^0$, 由于 $\mathbf{A}^T\mathbf{A}$ 满秩, 待求解参数之间不相关, 所以求逆解得 $\mathbf{x}^0 = (\mathbf{A}^T\mathbf{A})^{-1}\mathbf{A}^T\mathbf{L}$, 将 \mathbf{x}^0 代入

$$\begin{bmatrix} \mu_0 & \nu_0 & \omega_0 & \alpha_0 & \beta_0 \end{bmatrix}_{i+1}^T = \begin{bmatrix} \mu_0 & \nu_0 & \omega_0 & \alpha_0 & \beta_0 \end{bmatrix}_i^T + \mathbf{x}^0, \quad (18)$$

式中, $[\mu_0 \ \nu_0 \ \omega_0 \ \alpha_0 \ \beta_0]_i^T$ 为第 0 次至第 i 次泰勒展开点值。

然后, 再将泰勒展开点移至更新点 $[\mu_0 \ \nu_0 \ \omega_0 \ \alpha_0 \ \beta_0]_{i+1}^T$, 再次求解 $[\Delta\mu_0 \ \Delta\nu_0 \ \Delta\omega_0 \ \Delta\alpha_0 \ \Delta\beta_0]_{i+1}^T$, 循环迭代求解, 直至精度满足要求。

5 实验结果与分析讨论

5.1 实验数据的可靠性分析

获取测试数据前, 首先将设备摆放于初始位置状态, 将仪器调整水平, 然后通过指南针初步确定正北方向, 使反射镜光轴方向指向正北。自动调控转台通过观察太阳传感器对准太阳, 此时记录太阳的高度角、方位角以及编码器的俯仰方位初始状态读数。编码器的初始状态读数为俯仰 $\beta_0 = \beta - a_{\text{latitude}}$, 考虑到方位编码器在实际旋转时存在过零点现象, 所以方位编码器初始状态读数为 $\alpha_0 = \alpha - (360 - a_{\text{zimuth}})$, 通过测量值计算确定 α_0, β_0 。采集 2 组数据对实验数据的可靠性进行分析, 设置 μ_0, ν_0, ω_0 为 0, 分别对计算值与理论值作拟合分析, 对比结果如图 2 和图 3 所示, 图中 S'_{U_p}, S'_E, S'_N 为利用采集的 2 组数据计算的太阳在向上、正东、正北方向的分量值。

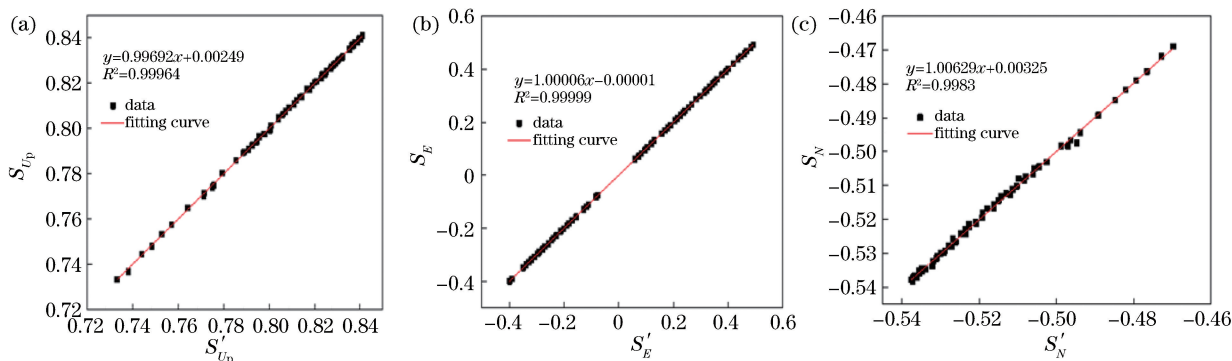


图 2 $\mu_0, \nu_0, \omega_0=0, \alpha_0, \beta_0$ 为初始值时,采用第 1 组数据计算得到的太阳矢量值与理论值的拟合。(a)太阳矢量 S_{U_p} 方向;
(b)太阳矢量 S_E 方向;(c)太阳矢量 S_N 方向

Fig. 2 Fitting of calculated solar vector value and theoretical value with first group of data when μ_0, ν_0 , and ω_0 are 0, and α_0 and β_0 are initial values. (a) S_{U_p} direction of solar vector; (b) S_E direction of solar vector; (c) S_N direction of solar vector

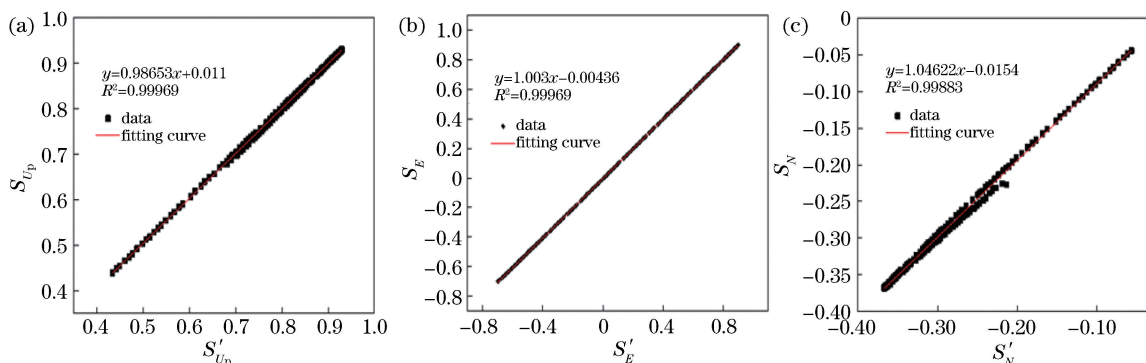


图 3 $\mu_0, \nu_0, \omega_0=0, \alpha_0, \beta_0$ 为初始值时,采用第 2 组数据计算得到的太阳矢量值与理论值的拟合。(a)太阳矢量 S_{U_p} 方向;
(b)太阳矢量 S_E 方向;(c)太阳矢量 S_N 方向

Fig. 3 Fitting of calculated solar vector value and theoretical value with the second group of data when μ_0, ν_0 , and ω_0 are 0, and α_0 and β_0 are initial values. (a) S_{U_p} direction of solar vector; (b) S_E direction of solar vector; (c) S_N direction of solar vector

通过 2 组数据的拟合趋势,可清晰地看到计算的实际值与理论值线性拟合后的确定系数 R^2 值比较理想。从图 2 中可以看出, S_E 方向和 S_{U_p} 方向的 R^2 值均在 0.999 以上,只有 S_N 方向为 0.99 以上,相比 S_E 方向和 S_{U_p} 方向拟合度较差些。这主要是因为 S_N 方向为俯仰轴旋转方向,俯仰角的变化是先增大后减小,两个方向的转动存在传动链齿轮回差或同轴度偏差,导致编码器计数值上的变化,此变化值属于设备原因,是正常的实验数据值, S_N 方向拟合度可在设备标校后得到很好的改善,不会影响模型的求解与验证。实验数据的线性度拟合分析验证了实验数据的可靠性,为验证模型做好进一步铺垫。

5.2 模型的实验验证分析

对数据进行模型求解与验证,实验数据如表 1 所示,第 1 行数据为利用太阳敏感器对准太阳时,太

阳在相机坐标系下的成像像素坐标值,此坐标值作为转台自动标校反射镜法线方向的质心坐标;第 2 行为通过 GPS 获取的当地时间、经纬度信息,利用天文算法计算太阳在当地坐标系下的高度角和方位角;第 3 行为对准太阳时,俯仰方位编码器测量的转角读数;第 4 行为俯仰方位编码器初始位置读数。

从采集的 98 组数据中抽取 60 组数据用于求解模型参数,限于篇幅,表 1 中只列出 60 组求解模型数据中的 8 组数据。求解模型参数 $\mu_0, \nu_0, \omega_0, \alpha_0, \beta_0$, 在初始值为 $[0 \ 0 \ 0 \ 1.06173 \ 2.90346]$ (单位为 rad) 时的系统参数为 $[0.00253 \ 0.00783 \ -0.004905 \ 1.04582 \ 2.90107]$ (单位为 rad)。

为验证模型求解参数的正确性,利用不同时刻重新采集的数据反解方程,再借助太阳观测器实际观测,验证模型求解的正确性,测试数据如表 2 所示。

表 1 反射镜光轴指向太阳时转台部分测试数据

Table 1 Partial test data of turntable when reflector optical axis points to sun

Sun centroid /pixel	x	597.623	598.108	595.344	595.612	596.112	595.264	595.785	595.980
	y	525.468	527.861	524.679	524.780	524.854	523.434	529.098	528.830
Sun position /($^{\circ}$)	Altitude	50.469	52.704	53.210	53.704	53.965	54.187	49.208	46.623
	Azimuth	141.022	147.820	148.951	150.703	151.689	152.562	222.086	227.280
Encoder angle value /($^{\circ}$)	Pitch	216.460	218.653	219.173	219.656	219.964	220.118	215.150	212.557
	Azimuth	279.436	272.655	271.506	269.764	268.775	267.830	198.259	193.104
Encoder original angle value /($^{\circ}$)	Pitch	165.937	165.937	165.937	165.937	165.937	165.937	165.937	165.937
	Azimuth	60.425	60.425	60.425	60.425	60.425	60.425	60.425	60.425

表 2 验证转台模型的部分测试数据

Table 2 Partial test data used to the verification of turntable model

Sun position /($^{\circ}$)	Altitude	45.050	44.670	44.310	43.780	43.090	42.610	42.110	41.520
	Azimuth	230.016	230.644	231.216	232.047	233.087	233.786	234.511	235.332
Measure encoder value /($^{\circ}$)	Pitch	46.121	45.616	45.308	44.979	44.341	43.375	42.869	42.430
	Azimuth	229.680	230.318	230.977	231.482	232.449	233.899	234.580	235.239
Calculated encoder value /($^{\circ}$)	Pitch	46.091	45.589	45.282	44.952	44.315	43.349	42.842	42.404
	Azimuth	229.649	230.288	230.944	231.455	232.417	233.871	234.552	235.212
Error calculated and measure /($^{\circ}$)	Pitch	0.030	0.027	0.026	0.027	0.026	0.026	0.027	0.026
	Azimuth	0.031	0.030	0.033	0.027	0.032	0.028	0.028	0.027

表 2 中的第 1 行数据为反射镜光轴对准太阳时太阳的高度角和方位角,第 2 行为编码器实际检测的转角值,第 3 行为考虑系统几何误差后通过模型计算的俯仰方位编码器角度值 β, α 与 β_0, α_0 之差的角度值。设备将第 3 行值作为目标角度值,并驱动俯仰方位电机旋转,同时,利用编码器实时检测转动角度值,并将其作为反馈信号,进一步保证转台旋转目标值与实际检测角度控制在编码器脉冲精度 0.022° 范围以内。由图 4 和图 5 可知,计算值与测量值误差在 $\pm 0.022^{\circ}$ 范围内波动,主要是因为设备本身选用的编码器的重复精度在 ± 2 位(14 位)变化,还可能是传动齿轮回差的影响,但是,此偏差不影响对系统模型参数的验证。通过俯仰、方位测试结果对比可知,标校后模型计算的俯仰方位编码器角度与实际编码器测量角度值基本一致,俯仰误差角度标准偏差为 0.0043° ,方位误差角度标准偏差为 0.00299° ,从图 4(c)、图 5(c)可以看出误差范围保持在 0.04° 以内。考虑到被测参数测量值的极限误差,取置信系数 $K=2$ 的 95.44% 的置信区间,则俯仰误差角度极限误差为 0.0086° ,方位误差角度极限误差为 0.00598° ,满足系统指向精度设计优于 0.1° 的要

求。可见,通过实验数据反解方程和利用太阳观测器实际观测进一步验证了所建模型的正确性与可行性。

为进一步验证模型及所建模型求解参数的正确性,选择与所建模型求解不相关的另一组数据验证,利用相机和太阳观测器采集不同时刻不同太阳位置反射镜光轴对准太阳时的数据,通过质心法得到太阳在像平面上的像素坐标,然后与标校后模型计算的值驱动电机旋转到相同时刻相同太阳位置时相机采集图像的质心像素坐标值比对,通过比对两组数据的一致性来验证模型的正确性,实验数据结果如图 6 所示。

由图 6 可得,标校后相机获取的太阳图像质心坐标与太阳观测器对准太阳时太阳图像质心坐标基本一致,像素差值在 2 pixel 左右,对应的像素角分辨率误差在 0.036° 上下,精度优于 0.1° ,满足系统指向精度设计要求。可见,利用相机和太阳观测器采集的太阳图像质心数据进一步验证了模型的正确性。

5.3 系统误差分析

系统标校几何安置误差后,综上分析可知,系统

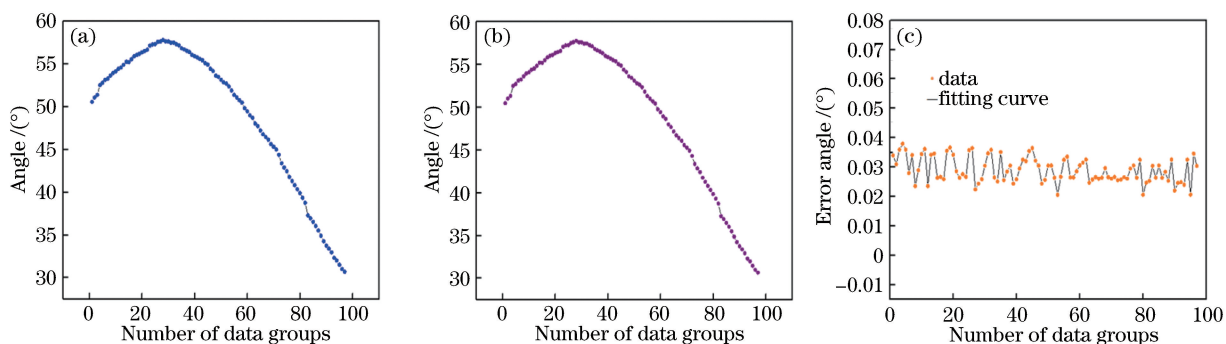


图 4 转台俯仰角测试结果比较。(a)俯仰编码器测量角度;(b)采用标校模型计算得到的俯仰编码器角度;
(c)计算值与测量值比较误差

Fig. 4 Comparison of test results of elevation angle of turntable. (a) Angle measured by pitch encoder;
(b) angle of pitch encoder calculated by calibrated model; (c) comparison of calculation and measurement values

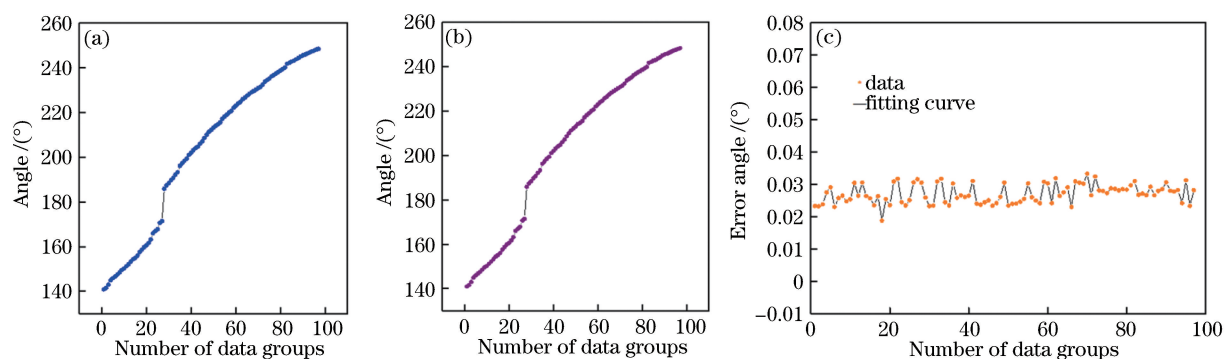


图 5 转台方位角测试结果比较。(a)方位编码器测量角度;(b)采用标校模型计算得到的方位编码器角度;
(c)计算值与测量值比较误差

Fig. 5 Comparison of azimuth measurement results of turntable. (a) Angle measured by azimuth encoder;
(b) angle of azimuth encoder calculated by calibrated model; (c) comparison of calculation and measurement values

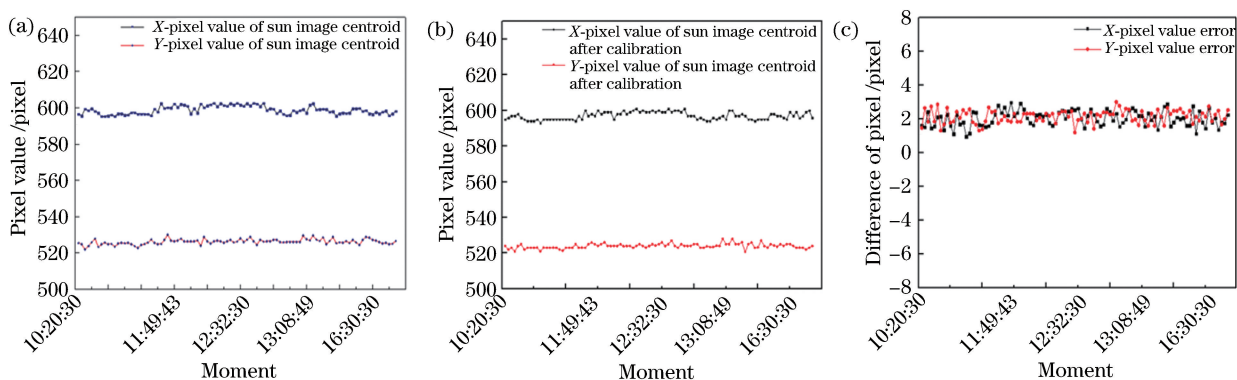


图 6 相机采集的不同时刻不同太阳位置的质心像素值。(a)太阳观测器对准太阳时的图像质心坐标;
(b)标校后相机获取的太阳图像质心坐标;(c)前后像素比较差值

Fig. 6 Centroid pixels collected by camera at different sun positions and at different times. (a) Image centroid coordinates
when sun observer is aligned with sun; (b) centroid coordinates of sun obtained by camera after calibration;
(c) difference of pre-calibration and post-calibration pixels

综合指向精度主要由利用天文算法计算得到的太阳运动轨迹误差、太阳敏感器的加工误差、光电编码器检测精度误差、电机驱动器控制精度、相机角分辨率精度等因素决定。通过查阅相关文献可知,计算太

阳运动轨迹误差为 0.0003。考虑到太阳敏感器的加工及其与反射镜平面的安装误差等,估算利用太阳敏感器对反射镜法向的标校误差优于 0.03° , 光电编码器检测误差由编码器的重复精度 ± 2 位的变化精

度决定,误差优于 0.04° ,电机驱动器控制精度优于 0.00001° ,对应误差像素相机角分辨率优于 0.036° 。因此,计算得系统综合指向精度优于 0.0616° 。在系统已经标校几何误差的基础上,要进一步提高系统综合指向精度,应尽量减少控制误差的来源,因此,需要提高编码器的检测精度和相机图像质心提取精度,选用更高精度的光电编码器或将图像质心提取精度控制在亚像素级,可更进一步提升系统综合指向精度^[8-18]。

6 结 论

提出一种基于太阳矢量的点光源转台系统高精度标校建模方法,从标校建模原理出发,建立了简化的标校模型和高精度标校模型。同时,给出模型解算方法,并且进行了模型的验证,提高了系统的指向精度,精度优于 0.1° ,解决了一直以来用凸面镜作为反射式点源的点光源系统建模不够完善,限制其指向精度进一步提高的缺点,进一步克服了由太阳光的发散角和凸面镜的发散特性引起的反射光斑在高空能量较低的现象,从而有利于系统搭载体积小、质量轻的凸面镜,便于工程实现与应用推广,为多空间分辨率的高分辨率光学遥感卫星传感器实现高精度、高频次、业务化、全动态范围的在轨 MTF 检测和绝对辐射定标打下坚实的基础,此系统建模方法同时也可作为太阳能光伏发电设备的仪器标校、跟踪太阳等应用提供一定的理论基础。

参 考 文 献

- [1] Xu W W, Zhang L M, Chen H Y, *et al.* In-flight radiometric calibration of high resolution optical satellite sensor using reflected point sources[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(3): 0328001.
徐伟伟, 张黎明, 陈洪耀, 等. 基于反射点源的高分辨率光学卫星传感器在轨辐射定标方法[J]. *光学学报*, 2017, 37(3): 0328001.
- [2] Gu X F, Tian G L, Yu T, *et al.* Principle and method of radiometric calibration for aerospace optical remote sensor [M]. Beijing: Science Press, 2013: 1-68.
顾行发, 田国良, 余涛, 等. 航天光学传感器辐射定标原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 1-68.
- [3] Zhang Z L, Zhou W H, Lao D B, *et al.* Research and development of the laser tracker measurement system [J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8759: 87593Z.
- [4] Czaplá-Myers J S, Thome K J, Leisso N P. Radiometric calibration of earth-observing sensors using an automated test site at Railroad Valley, Nevada [J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2010, 36(5): 474-487.
- [5] Xu W W, Zhang L M, Si X L, *et al.* On-orbit modulation transfer function detection of high resolution optical satellite sensor based on reflected point sources[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(7): 0728001.
徐伟伟, 张黎明, 司孝龙, 等. 基于反射点源的高分辨率光学卫星传感器在轨调制传递函数检测[J]. *光学学报*, 2017, 37(7): 0728001.
- [6] Schiller S J. Application of the specular array radiometric calibration (SPARC) method for the vicarious calibration of landsat sensors [C]// *Proceedings of ASPRS 2016 Annual Conference and co-located JACIE Workshop*, April 12-14, 2016, USA. USA: USGS, 2016, 581: 2-3.
- [7] Feng H, Zhang L M, Li J W, *et al.* High-precision pointing technology with reflected point light source based on CCD camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(5): 0528004.
冯浩, 张黎明, 李佳伟, 等. 基于 CCD 相机的反射式点光源高精度指向技术[J]. *光学学报*, 2018, 38(5): 0528004.
- [8] Schiller S J, Silny J. The Specular Array Radiometric Calibration (SPARC) method: a new approach for absolute vicarious calibration in the solar reflective spectrum [J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7813: 78130E.
- [9] Sun H J. Structural design and error analysis of the large vacuum testing table [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013: 20-40.
孙慧洁. 大型真空调试平台的设计及其误差建模分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013: 20-40.
- [10] Xue L T, Chen T, Xu T, *et al.* High-precision calculation for attitude angles of fast steering mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(8): 2000-2009.
薛乐堂, 陈涛, 徐涛, 等. 快速反射镜姿态角的高精度解算[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(8): 2000-2009.
- [11] Liu Y B, Jin G, He H Y. Research on model of pointing error of a three-axis simulation turntable[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2005, 37(5): 701-704.
刘延斌, 金光, 何惠阳. 轴仿真转台指向误差的建模研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2005, 37(5): 701-704.
- [12] Blanco-Muriel M, Alarcón-Padilla D C, López-Moratalla T, *et al.* Computing the solar vector[J].

- Solar Energy, 2001, 70(5): 431-441.
- [13] Xu W W, Zhang L M, Yang B Y, *et al.* On-orbit radiometric calibration based on gray-scale tarps[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(2): 0212007.
徐伟伟, 张黎明, 杨本永, 等. 基于多灰阶靶标的在轨辐射定标方法研究[J]. 光学学报, 2012, 32(2): 0212007.
- [14] Kerola D X, Bruegge C J, Gross H N, *et al.* On-orbit calibration of the EO-1 hyperion and advanced land imager (ALI) sensors using the LED Spectrometer (LSpec) automated facility[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(4): 1244-1255.
- [15] Yoshida M, Murakami H, Mitomi Y, *et al.* Vicarious calibration of GLI by ground observation data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43(10): 2167-2176.
- [16] Bowen H S. Absolute radiometric calibration of the IKONOS sensor using radio-metrically characterized stellar sources [J]. International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Science, 2002, 34(1): 7-13.
- [17] Kohm K. Modulation transfer function measurement method and results for the orbview-3 high resolution imaging satellite [C]//Proceedings of ISPRS 2004, July 12-23, 2004, Istanbul, Turkey. New York: ISPRS, 2004: 12-23.
- [18] Robinet F, Leger D, Cerbelaud H, *et al.* Obtaining the MTF of a CCD imaging system using an array of point sources: evaluation of performances [C]// [Proceedings] IGARSS'91 Remote Sensing: Global Monitoring for Earth Management, June 3-6, 1991, Espoo, Finland. New York: IEEE, 1991: 1357-1361.
- [19] Li X B, Jiang X G, Tang L L. On-orbit MTF estimation methods for satellite sensors [J]. Asia-Pacific Space Outlook, 2007, 2: 38-43.
- [20] Thorne K, Markham B, Barker P S, *et al.* Radiometric calibration of landsat [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1997, 63(7): 853-858.
- [21] Yuan X X, Yu J P. Calibration of constant angular error for high resolution remotely sensed imagery[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2008, 37(1): 36-41.
袁修孝, 余俊鹏. 高分辨率卫星遥感影像的姿态角常差检校[J]. 测绘学报, 2008, 37(1): 36-41.
- [22] Tu X R, Xu M Z, Liu L. The geometric calibration of airborne three-line-scanner ADS40 [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2011, 40(1): 78-83.
涂辛茹, 许妙忠, 刘丽. 机载三线阵传感器 ADS40的几何检校[J]. 测绘学报, 2011, 40(1): 78-83.