

## 利用星角距不变性标定星敏传感器内部参数\*

刘海波<sup>1</sup>, 王文学<sup>2</sup>, 陈圣义<sup>1</sup>, 苏昂<sup>1</sup>, 张小虎<sup>1</sup>  
(1. 国防科技大学 航天科学与工程学院, 湖南 长沙 410073;  
2. 中国人民解放军 63861 部队, 吉林 白城 137001)

**摘要:**提出了一种恒星角距不变的星敏传感器内部参数的地面标定方法。较常见的星角距的标定方法不同的是,该方法利用对在 $0^\circ$ 附近的角距变化较敏感的恒星角距的正弦值建立观测方程;采用两步法分别估计焦距、主点和高阶畸变系数,并采用迭代优化的方法,获得最优估计值。为了确保标定精度,对观测时刻的导航星进行了视位置的修正。实验结果表明,采用星角距的正弦值建立观测方程,估计精度较高,采用考虑高阶畸变的改进正弦法标定后的星角距误差的均方根值为 $2.2 \times 10^{-5}$  rad。

**关键词:**星敏传感器;标定;星角距;畸变;恒星视位置

中图分类号:V448.22 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2014)06-048-05

## Star tracker ground calibration based on the invariant of interstar angles

LIU Haibo<sup>1</sup>, WANG Wenxue<sup>2</sup>, CHEN Shengyi<sup>1</sup>, SU Ang<sup>1</sup>, ZHANG Xiaohu<sup>1</sup>

(1. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;  
2. The PLA Unit 63861, Baicheng 137001, China)

**Abstract:** A calibration approach based on the invariant of interstar angles was put forward for star trackers. Compared with common approaches, the sine of interstar angle which provides greater sensitivity for the angle changes closed to  $0^\circ$  was adopted to construct the observation equation instead of its cosine. In the calibration procedure, the two-step approach was proposed to estimate the principal point, focal length, and distortion parameters. The iterative optimization was also proposed to get the optimal estimations. In order to improve the accuracy of calibration, the apparent position of star at the observing time was modified. The experimental results indicate that the sine method is more accurate; and the deviation root-mean-square of the measured interstar angle is  $2.2 \times 10^{-5}$  rad after calibrated.

**Key words:** star tracker; calibration; interstar angle; distortions; apparent position of star

星敏传感器是卫星和航天器姿态控制系统中不可或缺的组成部分,是目前精度最高的光学姿态敏感器<sup>[1]</sup>。它利用对恒星方向矢量的测量,获得卫星和飞行器的姿态信息。在投入使用前,其光学镜头的焦距、主点和像面畸变等内部参数必须经过精确地测量,称为星敏传感器的标定,是星敏传感器研究和应用中的一项关键技术<sup>[2]</sup>。通常,获得星敏传感器地面校准数据的方法有两种:一种是在光学实验室利用星光模拟器进行数据采集和校准<sup>[3-4]</sup>;另一种是在大气扰动小的地点对晴朗夜空进行拍摄,以获得数据并进行标定<sup>[5-6]</sup>。目前,单星模拟器配合高精度二维转台,可以比较精确地测量星敏传感器镜头的内部参数。但是,星敏传感器地面观星测试和标定,仍然不可或缺。

国内外学者对星敏传感器地面观星标定的模型和方法进行了大量的研究。从公开发表的文献来分析,方法主要有两种:待定系数标定和内部参数标定。待定系数标定的具体方法为:将地球和精确时钟作为转台和刻度盘,进行数据采集,用多项式曲面方程拟合星点在惯性坐标系的位置和对应的像点坐标的关系<sup>[7]</sup>。该方法计算简单,但对于大视场星敏传感器,很难在全视场范围内由一个曲面逼近整个像面,标定精度受限,适合中等精度的星敏传感器。内部参数标定实际上是将星敏传感器看作小孔成像模型,估计其主点、角距和像面畸变。根据恒星角距正交变换不变的原理,Junkins领导的星敏传感器研究小组于2001年利用星角距余弦值建立观测方程,估计星敏传感器主点和角距等内

\* 收稿日期:2014-04-02

基金项目:航天支撑技术基金资助项目(HTZC-2012-NUDT-009);国家自然科学基金资助项目(11272347)

作者简介:刘海波(1983-),男,湖南益阳人,讲师,博士, E-mail:liuhaibo@nudt.edu.cn

部参数<sup>[8]</sup>,并陆续发表了多篇文献<sup>[9-10]</sup>。2009年,该小组又提出利用正弦法,把角距的正弦值代替余弦值建立观测方程<sup>[11]</sup>。目前,国内已有文献报道利用余弦法估计主点和角距,如文献[2,12]。其中,文献[2]为了减小畸变对角距估计的影响,仅采用主点位置附近的恒星角距建立观测方程以获得更准确的焦距标定结果。

根据恒星对间的星角距正交变换不变的特性,以采集到的星点的图像坐标和对应观测时刻的导航星视赤经、视赤纬作为输入,无须高精度标定设备,即可实现星敏传感器镜头参数的高精度估计。

### 1 标定模型

星光经星敏传感器光学镜头聚焦于探测器成像面上,形成投影,其成像模型可以看作小孔成像,如图1所示。

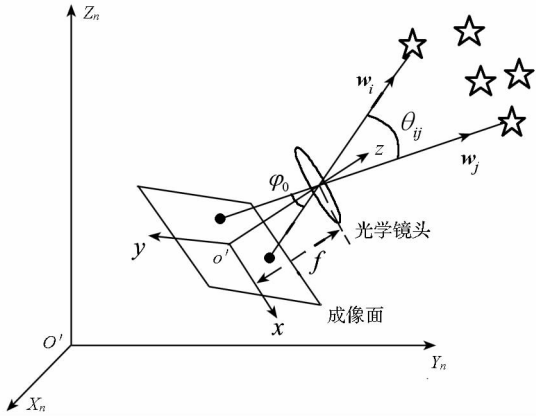


图1 星敏传感器成像模型

Fig. 1 Measurement model of star tracker

图1中, $O' - X_n Y_n Z_n$ 为天球坐标系, $o' - xyz$ 为星敏传感器坐标系。设 $v, w$ 分别为恒星在天球坐标系和星敏传感器坐标系中的方向矢量,则

$$v = \begin{bmatrix} \cos\alpha\cos\delta \\ \sin\alpha\cos\delta \\ \sin\delta \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$w = \frac{1}{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + f^2}} \begin{bmatrix} -(x-x_0) \\ -(y-y_0) \\ f \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, $(\alpha, \delta)$ 为恒星的赤经、赤纬; $(x, y)$ 、 $(x_0, y_0)$ 分别表示恒星在星敏传感器探测器上的投影坐标和主点坐标; $f$ 表示焦距。

根据星角距正交变换不变原理,在不考虑畸变和噪声的条件下,恒星 $i, j$ 在星敏传感器坐标系中的方向矢量 $w_i, w_j$ 的夹角与对应的天球坐标系中的位置矢量 $v_i, v_j$ 的夹角 $\theta_{ij}$ 相等<sup>[8]</sup>。根据这一特性,可以通过两个矢量夹角的余弦值或正弦值相等的特性,建立式(3)所描述的观测方程,估计星敏传感器内部参数。

$$\cos\theta_{ij} = v_i^T v_j = w_i^T w_j \quad (3a)$$

$$\sin\theta_{ij} = |v_i \times v_j| = |w_i \times w_j| \quad (3b)$$

通常,由于计算简单,星角距的余弦值被广泛应用于星敏传感器的在轨校准<sup>[8,13]</sup>。文献[11]提出利用星对角的正弦值,建立观测方程,标定星敏传感器的焦距和主点位置。研究表明,由于在小角度情况下,正弦值比余弦值对角度的变化更敏感,利用正弦值的方法具有更好的精度。

将式(2)代入式(3b),得

$$|v_i \times v_j| = F_{ij} = \frac{N_{ij}}{D_i D_j} \quad (4)$$

式(4)中

$$\begin{cases} N_{ij} = \sqrt{f^2(x_i - x_j)^2 + f^2(y_i - y_j)^2 + [(x_i - x_0)(y_j - y_0) - (x_j - x_0)(y_i - y_0)]^2} \\ D_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + f^2} \\ D_j = \sqrt{(x_j - x_0)^2 + (y_j - y_0)^2 + f^2} \end{cases} \quad (5)$$

上述星敏传感器的成像模型,是没有考虑误差的理想成像模型。然而,由于光学镜头加工、装配误差等因素,引起的焦距偏差、成像畸变、图像传

感器感光面的倾斜和旋转等,实测星斑质心位置与理想恒星投影位置并不重合,从而引起测量误差。若考虑到高阶畸变,式(5)应修正为

$$\begin{cases} N_{ij} = \sqrt{f^2(x_i - \delta x_i - x_j + \delta x_j)^2 + f^2(y_i - \delta y_i - y_j + \delta y_j)^2 + [(x_i - x_0 - \delta x_i)(y_j - y_0 - \delta y_j) - (x_j - x_0 - \delta x_j)(y_i - y_0 - \delta y_i)]^2} \\ D_i = \sqrt{(x_i - x_0 - \delta x_i)^2 + (y_i - y_0 - \delta y_i)^2 + f^2} \\ D_j = \sqrt{(x_j - x_0 - \delta x_j)^2 + (y_j - y_0 - \delta y_j)^2 + f^2} \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中, $(\delta x, \delta y)$ 为测量值 $(x, y)$ 对应的像面畸

变。根据Weng's模型, $(\delta x, \delta y)$ 可用公式表

述为<sup>[14]</sup>:

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (g_1 + g_3)u^2 + g_4uv + g_1v^2 + \kappa_1u(u^2 + v^2) + \kappa_2u(u^2 + v^2)^2 + \kappa_3u(u^2 + v^2)^3 \\ g_2u^2 + g_3uv + (g_2 + g_4)v^2 + \kappa_1v(u^2 + v^2) + \kappa_2v(u^2 + v^2)^2 + \kappa_3v(u^2 + v^2)^3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中,  $u = x - x_0, v = y - y_0$ ;  $g_1 = s_1 + p_1, g_2 = s_2 + p_2, g_3 = 2p_1, g_4 = 2p_2$ ;  $s_1, s_2$  为薄棱镜畸变系数;  $p_1, p_2$  为偏心畸变系数;  $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$  为径向畸变系数。

### 2 参数估计算法

提出一种改进的基于星角距正弦值的参数估计方法, 估计星敏感器镜头参数。与文献[11]忽略高阶畸变的方法不同的是, 该参数估计算法采用两步迭代优化的方法, 在估计焦距和主点的同时, 引入了对高阶畸变的估计。具体步骤为: 1) 令畸变系数  $g_1, g_2, g_3, g_4, \kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$  的值均为 0, 利用最小二乘星敏感器估计焦距  $f$  和主点  $(x_0, y_0)$ ; 2) 以步骤 1 获得的焦距  $f$  和主点  $(x_0, y_0)$  为给定的输入值, 利用最小二乘计算畸变系数  $g_1, g_2, g_3, g_4, \kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$ ; 3) 以步骤 2 获得的畸变系数为常值, 利用最小二乘优化焦距  $f$  和主点  $(x_0, y_0)$ 。对步骤 2 和步骤 3 进行若干次迭代, 获得稳定的星敏感器参数的估计值。

下面, 以焦距  $f$  和主点  $(x_0, y_0)$  为例, 说明具体的计算方法。

记  $(x_0, y_0, f)$  的估计值为  $(\hat{x}_0, \hat{y}_0, \hat{f})$ , 估计值与真值的误差记为  $(\Delta x_0, \Delta y_0, \Delta f)$ , 将式(4)线性化可得

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_{ij}}{\partial x_0} & \frac{\partial F_{ij}}{\partial y_0} & \frac{\partial F_{ij}}{\partial f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_0 \\ \Delta y_0 \\ \Delta f \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中  $R_{ij} = |v_i \times v_j| - F_{ij}(\hat{x}_0, \hat{y}_0, \hat{f}, g_1, g_2, g_3, g_4, \kappa_1, \kappa_2, \kappa_3)$ ;  $i = 1, \dots, n - 1$ ;  $j = i + 1, \dots, n$ ;  $n$  为星图中识别出的导航星数目。则

$$R = A [\Delta x_0 \quad \Delta y_0 \quad \Delta f]^T \quad (9)$$

式(9)中

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_{12}}{\partial x_0} & \frac{\partial F_{12}}{\partial y_0} & \frac{\partial F_{12}}{\partial f} \\ \frac{\partial F_{13}}{\partial x_0} & \frac{\partial F_{13}}{\partial y_0} & \frac{\partial F_{13}}{\partial f} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial F_{n-1n}}{\partial x_0} & \frac{\partial F_{n-1n}}{\partial y_0} & \frac{\partial F_{n-1n}}{\partial f} \end{bmatrix}; R = \begin{bmatrix} R_{12} \\ R_{13} \\ \vdots \\ R_{n-1n} \end{bmatrix} \quad (10)$$

考虑一张星图中识别的星数目有限, 在探测器上的分布相对比较稀疏, 为获得较高的估计精

度, 采用批处理的方法。假设拍摄的星图总数为  $m$ , 则有

$$\mathcal{R} = \mathbf{IA} [\Delta x_0 \quad \Delta y_0 \quad \Delta f]^T \quad (11)$$

式(11)中

$$\mathcal{R} = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_m \end{bmatrix}, \quad \mathbf{IA} = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_m \end{bmatrix} \quad (12)$$

因此,  $(x_0, y_0)$  和  $f$  最小二乘估计结果为

$$[x_0 \quad y_0 \quad f]^T = [\hat{x}_0 \quad \hat{y}_0 \quad \hat{f}]^T + [\mathbf{IA}^T \mathbf{IA}]^{-1} \mathbf{IA}^T \mathcal{R} \quad (13)$$

畸变系数的计算方法与之类似, 在此不再赘述。此外, 如果采用星角距余弦值建立等观测方程, 同样可以采用上述的迭代算法对星敏感器镜头参数进行估计。

### 3 恒星位置修正

通常, 标准星表中所列出的天体位置是星体在标准历元时刻的平位置。对于高精度的星敏感器校准, 需要转换成观测时刻的星体视位置, 具体过程是<sup>[15]</sup>: 标准历元平位置加上由标准历元到观测时刻的自行和岁差, 得到观测平位置; 观测平位置加上章动则得真位置; 由太阳质心换算到地球质心, 即加入光行差, 则得视位置。

假设恒星在标准星表中的赤经、赤纬的自行分别为  $(\mu_\alpha, \mu_\delta)$ , 考虑自行后的恒星平位置  $(\alpha_0, \delta_0)$  为

$$\begin{cases} \alpha_0 = \alpha'_0 + \mu_\alpha \tau \\ \delta_0 = \delta'_0 + \mu_\delta \tau \end{cases} \quad (14)$$

式(14)中,  $(\alpha'_0, \delta'_0)$  和  $\tau$  分别表示标准星表中的平位置和星表标准历元到观测时刻的时间间隔。

假设  $t$  表示起算起始历元 (J2000.0) 到终止历元之间的时间差, 单位是儒略世纪数。则恒星起始历元赤道坐标  $(\alpha_0, \delta_0)$  与终止历元赤道坐标  $(\alpha, \delta)$  的转换关系为

$$\begin{cases} A = \cos \delta_0 \sin(\alpha_0 + \zeta) \\ B = \cos \vartheta \cos \delta_0 \cos(\alpha_0 + \zeta) - \sin \vartheta \sin \delta_0 \\ C = \sin \vartheta \cos \delta_0 \cos(\alpha_0 + \zeta) + \cos \vartheta \sin \delta_0 \\ \tan(\alpha - z) = A/B \\ \sin \delta = C \end{cases} \quad (15)$$

式(15)中,  $\zeta, z$  和  $\vartheta$  的计算公式为:

$$\begin{cases} \zeta = 2\,306.218\,1''t + 0.301\,88''t^2 + 0.017\,998''t^3 \\ z = 2\,306.218\,1''t + 1.094\,68''t^2 + 0.018\,203''t^3 \\ \vartheta = 2\,004.310\,9''t - 0.426\,65''t^2 + 0.041\,833''t^3 \end{cases} \quad (16)$$

如果星体接近天极,应使用  $\sin\delta = C$  代替

$$\cos\delta = \sqrt{A^2 + B^2}.$$

$$\begin{cases} \Delta\alpha_1 = (\cos\varepsilon + \sin\varepsilon + \sin\alpha\tan\delta)\Delta\psi - (\cos\alpha\tan\delta)\Delta\varepsilon \\ \Delta\delta_1 = (\sin\varepsilon\cos\alpha)\Delta\psi + (\sin\alpha)\Delta\varepsilon \\ \Delta\alpha_2 = -\kappa \frac{\cos\alpha\cos\Theta\cos\varepsilon + \sin\alpha\sin\Theta}{\cos\delta} + e\kappa \frac{\cos\alpha\cos\Pi\cos\varepsilon + \sin\alpha\sin\Pi}{\cos\delta} \\ \Delta\delta_2 = -\kappa[\cos\Theta\cos\varepsilon(\tan\varepsilon\cos\delta - \sin\alpha\sin\delta) + \cos\alpha\sin\delta\sin\Theta] \\ \quad + e\kappa[\cos\Pi\cos\varepsilon(\tan\varepsilon\cos\delta - \sin\alpha\sin\delta) + \cos\alpha\sin\delta\sin\Pi] \end{cases} \quad (18)$$

其中,  $\varepsilon$  为黄赤交角,  $\Delta\psi$  为黄经章动,  $\Delta\varepsilon$  为交角章动,  $\kappa$  为光行差常数,  $\Theta$  为太阳真黄经,  $e$  为地球轨道的离心率,  $\Pi$  为轨道近日点经度。

在地面对位于大气层外的天体进行观测时,光线通过地球大气层时发生弯曲,造成观测到的星体位置比真实位置高。在天顶,大气折射效应的影响较小,越接近地平,折射越大。因此,在实验中,应尽可能使星敏传感器光轴指向天顶,以减小大气折射的影响。

## 4 标定实验及结果

### 4.1 实验及估计结果

进行了夜间观星,获得了标定所需的星图。为了实现星敏传感器的标定,首先,通过星图处理软件进行星点提取和星图匹配,获得所拍摄恒星在探测器上的投影位置和对应的赤经和赤纬信息;然后,利用第三节描述的算法,估计星敏传感器镜头参数。需要指出的是,在构建标定方程时,使用的是恒星在观测时刻的视赤经和视赤纬。

图2和图3给出了利用改进正弦法的校准结

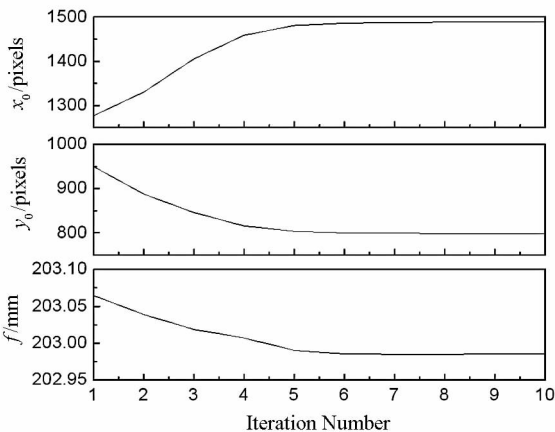


图2 主点位置和焦距估计结果

Fig.2 Estimated results of the principal point and focal length

考虑章动和光行差后,恒星观测时刻的视位置  $(\alpha_s, \delta_s)$  见式(17)。

$$\begin{cases} \alpha_s = \alpha_0 + \Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2 \\ \delta_s = \delta_0 + \Delta\delta_1 + \Delta\delta_2 \end{cases} \quad (17)$$

式(17)中,  $(\Delta\alpha_1, \Delta\delta_1)$  和  $(\Delta\alpha_2, \Delta\delta_2)$  分别表示章动和光行差的修正项,具体计算公式为

果。由图2和图3可知,在经历6次迭代后,输出获得了较稳定的估计结果。需要特别指出的是,初值的选择对迭代收敛的速度影响较大。由于中心视场的畸变相对较小,为了提高收敛的速度,在第一次估计主点和焦距时仅采用中心视场附近的数据。

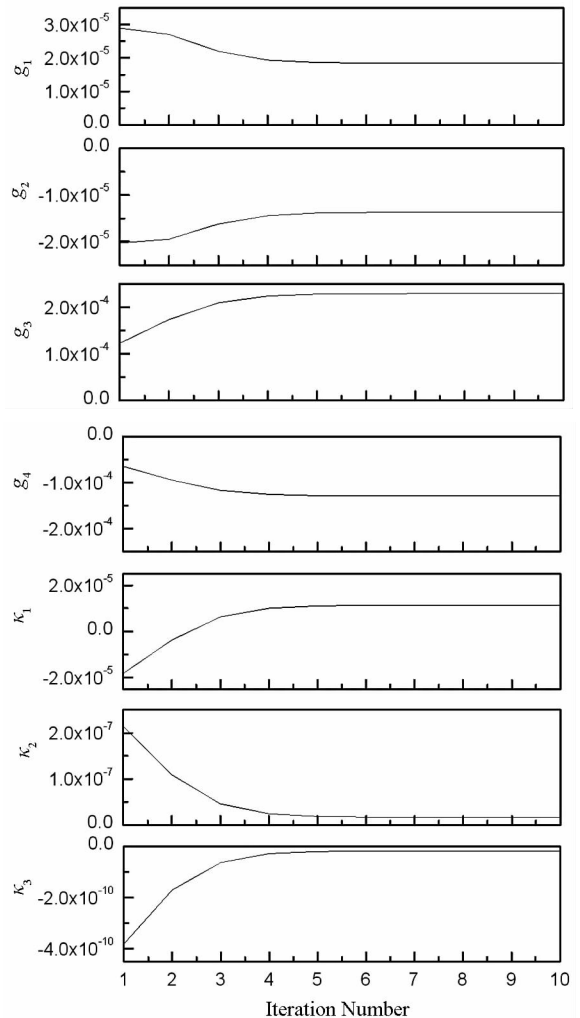


图3 畸变系数估计结果

Fig.3 Estimated results of the distortion parameters

## 4.2 分析

为了进一步验证校准的精度,表 1 列出了采用文献[11]中描述的批处理的余弦法、正弦法以及改进的迭代余弦法、正弦法对主点和焦距的校准结果,以及标定后的星对角误差的均方根值  $\Delta_{rms}$ 。由于文献[11]只对焦距和主点的位置偏差进行了估计,因此表 1 中余弦法和正弦法没有畸变系数的数据。

表 1 不同标定方法结果的比较

Tab.1 Result comparisons of different calibration methods

	余弦法	正弦法	改进 余弦法	改进 正弦法
$x_0$ (pixels)	1284.66	1277.41	1526.21	1489.42
$y_0$ (pixels)	931.18	949.47	804.90	798.54
$f$ (mm)	203.181	203.158	203.024	202.986
$g_1$	-	-	1.25E-5	1.84E-5
$g_2$	-	-	-8.31E-6	-1.36E-5
$g_3$	-	-	2.47E-4	2.30E-4
$g_4$	-	-	-1.22E-4	-1.29E-4
$\kappa_1$	-	-	1.02E-5	1.14E-5
$\kappa_2$	-	-	1.92E-8	1.72E-8
$\kappa_3$	-	-	-2.08E-11	-1.78E-11
$\Delta_{rms}$ (rad)	5.3E-5	5.1E-5	2.5E-5	2.2E-5

由表 1 的数据可知,采用正弦值建立观测方程,获得的估计参数精度较高,这与文献[11]的研究结论是一致的;引入对畸变进行估计的模型后,标定后的星对角误差的均方根值为  $2.2 \times 10^{-5}$  rad。

在  $0^\circ$  附近,正弦函数的一阶导数接近 1,而余弦函数的一阶导数接近 0,所以正弦值对接近  $0^\circ$  的小角度变化较余弦值更敏感。因此,利用正弦值建立观测方程,有利于提高标定的精度。表 1 中利用正弦法标定的结果,计算的星对角误差较余弦法的要小。但是,利用正弦值建立观测方程,需要计算恒星对方向矢量的叉乘,计算量比余弦法的矢量点乘计算量大。综上所述,上述两种方法各有特点,正弦法精度更高,但计算量相对要大,适合对计算能力和实时性没有要求的地面标定;而余弦法精度相对要低,但计算简单,适合于对实时性要求较高、处理能力受限的在轨标定。

## 5 结论

本文研究基于恒星角距不变性的星敏器地面观星标定方法,利用对小角度变化较敏感的正弦值建立观测方程,并采用两步法结合迭代优化的方

法,分别估计焦距、主点和高阶畸变。实际观星测试表明,采用正弦值建立观测方程,获得的估计参数精度较高,标定后的星对角误差的均方根值为  $2.2 \times 10^{-5}$  rad。该方法的标定过程不依赖精密转台等昂贵的外部辅助设备,具备更高的可操作性。

## 参考文献 (References)

- [1] Liebe C C. Star trackers for attitude determination[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 1995, 10(6): 10-16.
- [2] 钟红军,杨孟飞,卢欣. 星敏器标定方法研究[J]. 光学学报, 2010, 30(5): 1343-1348.  
ZHONG Hongjun, YANG Mengfei, LU Xin. Calibration method of star sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(5): 1343-1348. (in Chinese)
- [3] Liu H B, Li X J, Tan J C, et al. Novel approach for laboratory calibration of star tracker[J]. Optical Engineering, 2010, 49(7): 73601-73609.
- [4] Paulsen T E, Maresi L. Calibration and verification of the TERMA star tracker for the NEMO satellite[C]. AIAA Space 2000 Conference and Exposition, 2000.
- [5] 李学夔,李杰. 一种非设备方式对星敏器进行精度标定的新方法[J]. 电子器件, 2009, 32(1): 204-207.  
LI Xuekui, LI Jie. New method of star sensor's calibration without device[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2009, 32(1): 204-207. (in Chinese)
- [6] Klaus A, Bauer J, Karner K, et al. Camera calibration from a single night sky image[C]//Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2004, 1: 151-157.
- [7] 李春艳,李怀锋,孙才红. 高精度星敏器天文标定方法及观测分析[J]. 光学精密工程, 2006, 14(4): 558-563.  
LI Chunyan, LI Huifeng, SUN Caihong. Astronomical calibration method and observation analysis for high-accuracy star sensor[J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(4): 558-563. (in Chinese)
- [8] Samaan M A, Griffith T, Junkins J L. Autonomous on-orbit calibration of star trackers[C]//Proceedings of 2001 Core Technologies for Space Systems Conference, 2001.
- [9] Griffith D T, Singla P, Junkins J L. Autonomous on-orbit calibration approaches for star tracker cameras[C]//Proceedings of Spaceflight Mechanics, 2002.
- [10] Woodbury D P, Junkins J L. Improving camera intrinsic parameter estimates for star tracker applications[C]//Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 2009-6312.
- [11] 邢飞,董瑛,武延鹏,等. 星敏器参数分析与自主校正[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005, 45(11): 1484-1488.  
XING Fei, DONG Ying, WU Yanpeng, et al. Star tracker parametric analysis for autonomous calibration[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2005, 45(11): 1484-1488. (in Chinese)
- [12] Liu H B, Wang J Q, Tan J C, et al. Autonomous on-orbit calibration of a star tracker camera[J]. Optical Engineering, 2011, 50(2): 23604-23608.
- [13] Weng J Y, Cohen P R, Herniou M. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(10): 965-980.
- [14] Meeus J. Astronomical Algorithms[M]. Virginia: Willmann-Bell, Inc, 1991.
- [15] Smart W M. Textbook on Spherical Astronomy (6th edition)[M]. Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 1977.