文章编号: 1004–924X(2016)03–0609–07

船载高精度星敏感器安装角的标定

郭敬明[1,2*], 赵金宇[1], 何 昕[1], 刘 冰[2], 张同双[2], 潘 良[2]
(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春, 130033;
2. 中国卫星海上测控部 江苏 江阴, 214431)

摘要: 星敏感器测量船体姿态精度与星敏感器与甲板之间的安装角标定精度密切相关。本文介绍了船载星敏感器的相关坐标系及安装角的定义, 建立了船载星敏感器蒙气差修正模型, 提出了一种船载高精度星敏感器安装角标定方法。船进坞坐墩时, 船载经纬仪通过拍摄方位标确定航向, 星敏感器通过星图识别获得视场内星点的赤经、赤纬, 构成地心惯性系参考矢量, 经岁差、章动、极移、船位等修正, 得到各恒星在惯导地平系下的参考矢量。然后, 根据蒙气差模型对星点逐个修正俯仰角, 重构惯导地平系下的参考矢量。最后, 依据姿态确定算法原理, 解算星敏感器安装矩阵, 求解安装角。实验表明, 使用该方法可使方位角、俯仰角的标定精度达10"以内。该方法有效发挥了星敏感器指向精度高的优点, 改善了程序自动化程度, 提高了船体姿态测量精度。

关 键 词: 星敏感器; 船体姿态; 安装角; 标定
中图分类号: V448.222; U674.8 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162403.0609

Calibration of installation angle for high accuracy shipboard star sensor

GUO Jing-ming[1, 2*], ZHAO Jin-yu[1], HE Xin[1], LIU Bing[2], ZHANG Tong-shuang[2], Pan Liang[2]

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics*, *Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *China Satellite Maritime Tracking and Controlling Department*, *Jiangyin* 214431, China)
* *Corresponding author*, *E-mail: gjm441@163.com*

Abstract: Ship attitude measurement accuracy based on star sensors is relative to the calibration accuracy of the installation angle between star sensor and ship desk. This paper introduces the coordinate system of the shipboard star sensor and the definition of installation angle. Then, it establishes a model to correct the atmospheric refraction of the sensor and proposes a calibration method for installation angle of the high accuracy shipboard star sensor. When the space TT&Cship docks in shipyard, shipboard theodolite determines the course of the ship by shooting the azimuth mark, and star sensor obtains the ascension and declination of the stars in the field of view by star recognition to construct the star reference vectors with respect to inertial space. After correction of precession, nutation, pole shift and ship position, the star reference vectors with respect to Inertial Navigation System(INS) horizontal coordinate system are obtained. According to the atmospheric refraction correction model, each star in the field of view corrects its pitch angle and reconstructs its star reference vector with respect to INS horizontal coordinate system. Finally, star sensor installation matrix is calculated based on the principle of attitude determination algorithm, and then three installation angles are solved. Experiment results show that the calibration

收稿日期: 2015-04-29; **修订日期:** 2015-06-11
基金项目: 航空科学基金资助项目(No. 2011-JS-000675); 国家自然科学基金资助项目(No. 60878052)

accuracy of azimuth and pitch using proposed method reach less than 10″. The proposed method is based on the higher pointing accuracy of the star sensor and improves automatic programming and measuring accuracy of ship attitudes.

Key words: star sensor; ship attitude; installation angle; calibration

1 引 言

航天测量船是为了适应导弹、航天器试验的发展而在海上设置的测控站，其测控设备以船舶为平台。由于测量是在动态条件下进行的，即设备的位置、姿态在不停地变化，故测量精度不仅取决于外测设备本身，还取决于船姿船位系统的测量精度。航天测量船上配备有较高精度的船姿船位测量系统，包括惯性导航、卫星导航、变形、经纬仪等设备[1]。如国防科大研制的激光陀螺惯导的航向角精度优于20″，水平姿态精度优于10″；中船717所研制的某组合导航系统(含可见光/射电天文导航、惯性导航及卫星导航)的航向精度为1′，水平精度为33″。这些设备各有优缺点，但仍不能完全满足航天测量船优于10″的高精度船体姿态测量需求。究其原因可知，现有集中式船姿船位测量系统存在中间环节多、精度难以进一步提高等缺点。基于上述分析，随着大视场高精度星敏感器技术的成熟，有学者提出在外测设备底座固联星敏感器与捷联惯导组合测量系统，构建分布式船姿船位测量系统，以提高外测设备测量精度[2]。

星敏感器是一种以恒星为参考基准的高精度姿态敏感器，其能够给出相对惯性空间的高精度姿态信息，且不随时间漂移，在航天器上已获得广泛应用[3-4]。星敏感器的姿态测量精度可达10″以内，而星敏感器的安装误差可达角分级，严重影响了船姿船位的测量精度。因此，利用星敏感器进行船体姿态测量前，必须对其安装角进行精确标定。现阶段多采用经纬仪激光测量光学棱镜夹角方法标定安装角，但本论文所涉及的船载星敏感器位于雷达天线底座内，受安装空间的限制，无法观测到甲板方位角及俯仰角零位基准，故只能通过标定光轴相对棱镜夹角，得出两光轴的夹角，无法标定星敏感器相对甲板坐标系的夹角。针对上述问题，本文提出了一种船载高精度星敏感器的安装角标定方法。该方法通过星图识别方法获取视场内各恒星的赤经、赤纬，构建各恒星在地心惯性坐标系下的参考矢量，经过坐标变换得到地平系下的姿态角，然后，根据蒙气差模型对各恒星地平系俯仰角逐个进行修正，重构惯导地平系下参考矢量。依据姿态确定算法原理，解算星敏感器安装矩阵，求解安装角。

2 船载星敏感器相关坐标系

船载星敏感器安装示意图如图1所示，O_b-$X_bY_bZ_b$为甲板坐标系，坐标原点O_b位于惯导三轴中心，X_b轴沿艏艉线指向船艏，Y_b轴垂直甲板向上，Z_b轴与X_b轴、Y_b轴成右手定则，指向右舷。如图2所示，本文定义O_s-$X_sY_sZ_s$为船载星敏感器的像空间坐标系，坐标原点O_s为投影中心，与航天飞行器安装的星敏感器的定义不同，为更好地标定船载星敏感器与甲板坐标系的不重合关系，定义X_s沿光轴方向指向观测目标，Y_s轴平行于像平面坐标系Y轴，沿图像传感器场扫描方向向上，Z_s轴与

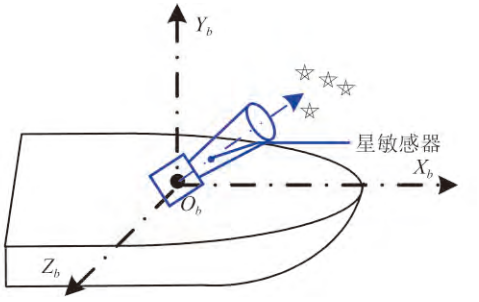


图 1 船载星敏感器安装示意图

Fig. 1 Installation shematic of shipboard star sensor

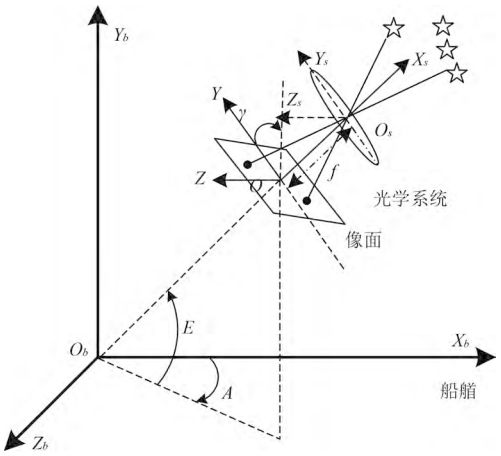


图 2 船载星敏感器相关坐标系

Fig. 2 Coordinate system of shipboard star sensor

X_s轴、Y_s轴成右手定则，沿图像传感器行扫描方向向右。

因此，标定安装角，即标定甲板坐标系与星敏感器像空间坐标系之间的旋转角，如式(1)所示：

$$\begin{bmatrix} X_j \\ Y_j \\ Z_j \end{bmatrix} = \boldsymbol{R}_s^b \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix}, \tag{1}$$

式中：(X_j, Y_j, Z_j)为甲板坐标系向量，(X_i, Y_i, Z_i)为星敏感器像空间坐标系向量，$\boldsymbol{R}_s^b$为安装矩阵，可由下式计算：

$$\boldsymbol{R}_s^b = \boldsymbol{R}_y(A)\boldsymbol{R}_z(-E)\boldsymbol{R}_x(-\gamma), \tag{2}$$

其中：(A, E, γ)分别为星敏感器安装方位角、俯仰角及滚动角。$\boldsymbol{R}_x(\theta), \boldsymbol{R}_y(\theta), \boldsymbol{R}_z(\theta)$分别表示绕$X$、$Y$和$Z$轴逆时针旋转$\theta$角后形成的欧拉角旋转矩阵。

3　安装角标定方法

测量船航行时，船体姿态和位置在不停变化，因此只有在船进坞坐墩的条件下，才能精确标定船载星敏感器的安装角。船载标校经纬仪通过拍方位标确定船体航向真值K_0，利用高精度水平仪标定全船水平基准相对当地水平面的不水平度$(\psi_0、\theta_0)$，由此得到船体姿态矩阵真值：

$$\boldsymbol{R}_{DP}^b = \boldsymbol{R}_y(K_0)\boldsymbol{R}_z(-\Psi_0)\boldsymbol{R}_x(-\theta_0) \tag{3}$$

如图2所示，船载星敏感器先拍摄星图，再通过星图提取和星图识别[5]获取各恒星的观测矢量$\boldsymbol{W}_i$和参考矢量$\boldsymbol{V}_i$：

$$\boldsymbol{W}_i = \frac{\begin{bmatrix} f & -(y_{ci}-y_0)D & (z_{ci}-z_0)D \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}}{\sqrt{f^2 + (y_{ci}-y_0)^2D^2 + (z_{ci}-z_0)^2D^2}}, \tag{4}$$

$$\boldsymbol{V}_i = \begin{bmatrix} \cos\alpha_i\cos\beta_i & \sin\alpha_i\cos\beta_i & \sin\beta_i \end{bmatrix}^T, \tag{5}$$

式中：f为星敏感器焦距，(x_0, y_0)为图像传感器的主点位置(像元数)，(y_{ci}, z_{ci})为第i颗恒星像点坐标，图像传感器的像元尺寸为D，各识别恒星在J2000.0坐标系下的赤经、赤纬分别为α_i和δ_i。

为了避免恒星自行带来的影响，本文建立导航星库时选择自行较小的恒星作为导航星，因此，恒星光行差仅与观测者接收到光线时它的瞬时速度有关，其由3部分组成：由地球自转造成的恒星光行差的分量称为周日光行差；由地球公转以及太阳质心运动一起造成的分量称为周年光行差；由整个太阳系运动造成的分量称为长期光行差。本文在船进坞坐墩的条件下，精确标定星敏感器安装角，星敏感器处于静止状态，未考虑周年光行差对恒星位置的影响，仅考虑了地球自转造成的影响。长期光行差因为周期太长，一般不作考虑。文献[6]给出了J2000.0坐标系下的各恒星的参考矢量$\boldsymbol{V}_i$经岁差、章动、极移、地球自转等变换转换到惯导地平系$\boldsymbol{V}_{DPi}$的过程如图3所示。具有：

$$\boldsymbol{V}_{DPi} = \boldsymbol{R}_{CIS}^{DP} V_i, \tag{6}$$

式中，$\boldsymbol{R}_{CIS}^{DP}$为地心惯性系到惯导地平系的姿态转换矩阵，可由下式计算：

$$\boldsymbol{R}_{CIS}^{DP} = \boldsymbol{R}_{CTS}^{DP}\boldsymbol{R}_{ET}^{CTS}\boldsymbol{R}_{CT}^{ET}\boldsymbol{R}_{MT}^{CT}\boldsymbol{R}_{CIS}^{MT}, \tag{7}$$

其中：$\boldsymbol{R}_{CIS}^{MT}$为地心惯性坐标系到瞬时平赤道地心系之间的转换矩阵，$\boldsymbol{R}_{MT}^{CT}$为瞬时平赤道地心到瞬时真赤道地心系的转换矩阵，$\boldsymbol{R}_{CT}^{ET}$为瞬时真赤道地心系到准地固坐标系的转换矩阵，$\boldsymbol{R}_{ET}^{CTS}$为准地固坐标系到地固坐标系的姿态转换矩阵，$\boldsymbol{R}_{CTS}^{DP}$为地固坐标系到惯导地平系之间的姿态转换矩阵。

船载星敏感器工作于大气层内，观测恒星时受大气折射的影响，其测量的视位置角度与恒星的真位置角度存在一定偏差，如图4所示。偏差量ΔE为恒星地平系俯仰角观测值与真实值之差，即为蒙气差ρ。

由观测矢量$\boldsymbol{V}_{DPi}$可计算出惯导地平系下的各恒星方位角A_{DPi}、俯仰角E_{DPi}。



图 3 坐标变换

Fig. 3　Coordinate transformation

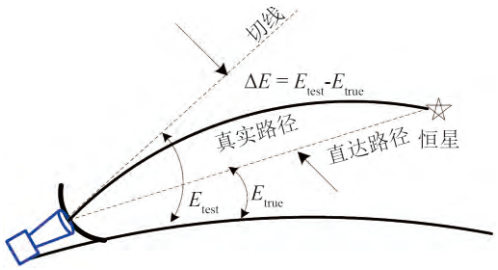


图 4 船载星敏感器蒙气差修正

Fig. 4 Atmospheric refraction correction for shipboard star sensor

根据蒙气差修正模型[7]进行修正：

$$E'_{DPi} = E_{DPi} - \rho_i, \tag{8}$$

式中：E'_{DPi}为修正后的地平俯仰角，ρ_i为各恒星对应的蒙气差。

当$14^\circ \le E_{DPi} \le 45^\circ$时，蒙气差$\rho_i$采用中国天文年历中蒙气差模型：

$$\rho_i = (1 + \alpha_t A_t + B)\rho_0, \tag{9}$$

式中ρ_0可直接利用下式计算：

$$\begin{aligned}\rho_0 = {} & 60.097\ 246\ 8'' \tan Z + +0.010\ 933\ 2 \tan^2 Z - \\ & 0.072\ 900\ 2 \tan^3 Z + 0.001\ 832\ 7 \tan^4 Z - \\ & 0.000\ 010\ 7 \tan^5 Z\end{aligned} \tag{10}$$

其中Z为天顶距，$Z = 90^\circ - E_{DPi}$。α_t为气温变差乘数修订系数，可由下式计算：

$$\begin{aligned}\alpha_t = {} & 1.0 - 0.007\ 202\ 7 \tan Z + 0.013\ 365\ 1 \tan^2 Z - \\ & 0.007\ 341\ 7 \tan^3 Z + 0.001\ 870\ 0 \tan^4 Z - \\ & -0.000\ 170\ 0 \tan^5 Z\end{aligned} \tag{11}$$

气温变差乘数为A_t，与温度t有关；气压变差乘数为B，与测量站附近气压P有关：

$$A_t = \frac{-0.003\ 83 \times t}{1 + 0.003\ 67 \times t}, \quad B = \frac{P}{1\ 013.247\ 2} - 1 \tag{12}$$

当$E_{DPi} > 45^\circ$时，仍采用中国天文年历中的蒙气差模型，其中$\alpha_t = 1$。

当$5^\circ \le E_{DPi} \le 14^\circ$时，蒙气差$\rho_i$采用Polkovo蒙气差模型：

$$\rho_i = \frac{P}{1\ 013.25} \times \frac{273.15}{273.15 + t}\rho_0, \tag{13}$$

式中ρ_0可直接利用下式计算：

$$\begin{aligned}\rho_0 = {} & 60.229\ 3'' \tan Z - 0.065\ 60'' \tan^3 Z + \\ & 0.000\ 161\ 13'' \tan^5 Z - 2.87'' \times \tan^7 Z\end{aligned} \tag{14}$$

将E'_{DPi}作为修正后的地平系俯仰角，重构各恒星地平系参考矢量$\boldsymbol{V}'_{DPi}$：

$$\boldsymbol{V}'_{DPi} = \left[\cos A_{DPi} \cos E'_{DPi} \ \sin A_{DPi} \cos E'_{DPi} \ \sin E'_{DPi}\right]^{\mathrm{T}}, \tag{15}$$

根据姿态确定原理[8]，采用Quest-Newton法计算惯导地平系下的星敏感器姿态矩阵$\boldsymbol{R}^s_{DP}$：

$$\boldsymbol{W}_i = \boldsymbol{R}^s_{DP}\boldsymbol{V}'_{DPi}. \tag{16}$$

考虑到船体姿态矩阵真值为$\boldsymbol{R}^b_{DP}$，星敏感器的安装矩阵$\boldsymbol{R}^b_s$为：

$$\boldsymbol{R}^b_s = \boldsymbol{R}^b_{DP}(\boldsymbol{R}^s_{DP})^{-1}. \tag{17}$$

船载星敏感器安装矩阵的表达式如(2)所示，因此，安装角的计算公式为：

$$\begin{cases} K = \arctan\left(\boldsymbol{R}^b_s(3,1)/\boldsymbol{R}^b_s(1,1)\right) \\ \psi = \arcsin\left(\boldsymbol{R}^b_s(2,1)\right) \\ \theta = \arctan\left(\boldsymbol{R}^b_s(2,3)/\boldsymbol{R}^b_s(2,2)\right) \end{cases}. \tag{18}$$

4 试验结果与分析

为了验证上述船载星敏感器安装角标定方法的有效性，本文编制了相应的程序包，包括坐标变换、蒙气差修正、姿态确定算法(Quest-Newton)及



图 5 船载星敏感器安装角标定试验

Fig. 5 Calibration experiment of installation angle for shipboard star sensor

表 1 船载星敏感器参数

Tab. 1 Parameters of shipboard star sensor

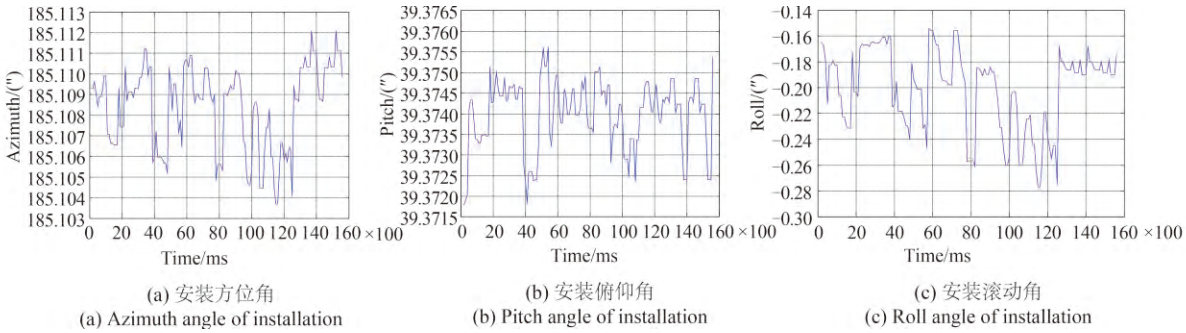
	A_1	A_2
FOV	8°×8°	8°×8°
Pixel number	1 024×1 024	1 024×1 024
Focal length/mm	94.938	94.948
Main point/pixel	(512.556, 497.985)	(508.235, 460.915)

安装角计算等。试验设备：星敏感器、光纤传输系统、时统终端及GPS、串口通信卡、CPU Intel E2180 3.00 GHz及2 GB内存的PC机；软件开发工具：Windows XP操作系统，MATLAB R2010b，Visual C++ 6.0。

图5为船载星敏感器安装角坞内标定试验图。为了避免星敏感器滚动角测量精度低对船体姿态横摇测量精度的影响，文献[7]提出了基于双星敏感器的船体姿态测量系统，星敏感器A_1指向船艉，星敏感器A_2指向左舷，成投影正交，俯仰角分别近似为35°和40°。

船载星敏感器安装前，须对其主点、焦距等进行精确标定，结果如表1所示。

图6(a) ~ 图6(c)是2013年3月15日坞内标校时船艉方向星敏感器A_1标定的安装角曲线。船体姿态真值由船载标校经纬仪测量获得，航向为46°28′28.51″，水平姿态为0°(标定过程中以0计算)。气象参数由船载气象仪测量，温度为11.10℃，气压为1 021.70 hPa(标定过程中气象参数的变化可以忽略不计)。为了提高测量精度，采用多次测量求平均值，安装角统计结果见表2。其设计的方位角约为185°、俯仰角为40°，与表2结果基本吻合，均方差在10″以内。



(a) 安装方位角 (a) Azimuth angle of installation　(b) 安装俯仰角 (b) Pitch angle of installation　(c) 安装滚动角 (c) Roll angle of installation

图 6 船载星敏感器A_1安装角标定结果

Fig. 6　Calibration results of installation angle for shipboard star sensor A_1

表 2　星敏感器A_1安装角统计结果

Tab. 2　Statistical results of shipboard star sensor A_1

Parameter	Azimuth	Pitch	Roll
Mean/(°)	185.109 3	39.373 4	–0.226 2
Std/(″)	9.183 5	5.893 1	63.552

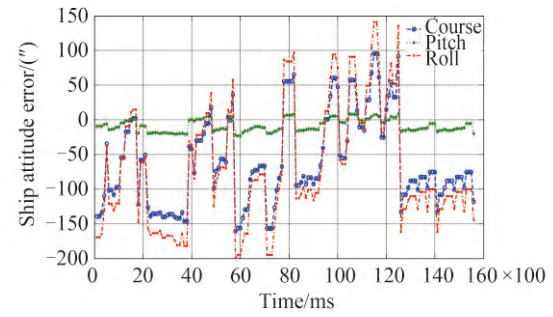


图 7 星敏感器A_1测量船体姿态误差

Fig. 7　Ship attitude error measurement based on star sensor A_1

由于无法获取星敏感器的安装角真值，本文利用已标定的安装角再拍星进行船体姿态解算，并与船体姿态真值进行比较，来验证方法的精度，其中船体姿态真值通过公式(3)计算得到。利用星敏感器A_1安装角的标定结果计算船体姿态与真值之间的误差结果如图7所示。经过多次统计测量(曲线

表 3　星敏感器A_2安装角统计结果

Tab. 3　Statistical results of shipboard star sensor A_2

Parameter	Azimuth	Pitch	Roll
Mean/(°)	274.9246	35.1031	0.0789
Std/(″)	6.0629	3.1015	54.622

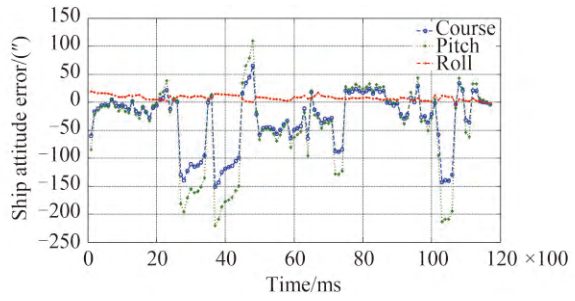


图 8 星敏感器A_2测量船体姿态误差

Fig. 8　Ship attitude error measurement based on star sensor A_2

的X轴单元刻度为每帧100 ms，统计数据接近16 s)，得到航向、纵摇及横摇的测量精度分别为45.622 0″、5.981 2″及67.372 5″。星敏感器A_1沿方位船艏艉线布置，因此纵摇精度高，而航向、横摇的均方根误差大，且曲线变化一致，这是因为星敏感器横滚角测量误差较大，影响了航向测量精度。

同样，利用左舷方向星敏感器A_2安装角的统计结果见表3，标定结果分别为274.924 6°、35.103 1°及0.078 9°，该方向的设计安装角为方位275°、俯仰35°，与表3 结果基本吻合，均方差在10″以内。

利用星敏感器A_2安装角的标定结果计算船体姿态与真值之间的误差，结果如图8所示，经过多次统计测量(曲线的X轴单元刻度为每帧100 ms，统计数据接近12 s)，得到的航向、纵摇及横摇测量精度分别为50.376 0″、74.122 2″及4.416 6″，星敏感器A_2沿方位左舷布置，因此横摇精度高，同样，星敏感器横滚角测量误差较大，也影响了航向测量精度，导致航向、纵摇均方根误差大，且曲线变化一致。

由试验可以看出，星敏感器A_2沿船艏线安装，可保证船体姿态的纵摇精度，采用上述方法与真值比较可得纵摇精度为5.981 2″；星敏感器A_2指向左舷，可保证船体姿态的横摇精度，采用上述方法与真值比较可得横摇精度为4.416 6″，达到10″以内。而解算的船体姿态与真值之间的系统误差可以修正，不是本文所提及的标定方法精度。高精度水平仪精度和精测过程产生的误差属于随机误差，即不确定性误差，包含在船体姿态计算值和真值之间的误差中(统计在均方差内)。星敏感器横滚角测量误差大会影响航向测量精度，可以通过双星敏感器组合测量提高另外两个方向的船体姿态测量精度，目前他们的精度均达到10″以内，见文献[7][9]。

此外，蒙气差的修正也会带来一定的测量误差。文献[9]根据星敏感器地心惯性系姿态转换到地平系，进行一次蒙气差修正，即将星敏感器视场内恒星均按视轴中心指向角度对应的蒙气差进行修正，而本文采用的是大视场星敏感器，视场达8°×8°，星点分布范围大，地平系角度差达到几度，若统一采用视轴中心指向对应的角度修正蒙气差，误差较大。因此，本文根据各恒星在地平系下的参考矢量，对逐个星点修正蒙气差，精度与文献[9]相比有较大提高，以星敏感器A_2为例，先解算安装角再利用安装角解算船体姿态，再与真值比较，精度结果见表4。

表 4 不同蒙气差修正方法结果对比

Tab. 4 Performance of two methods for atmospheric refraction correction

Parameter	Azimuth	Pitch	Roll
Method in [9]	73.6231″	102.6173″	7.8259″
Proposed Method	50.3760″	74.1222″	4.4166″

5 结 论

本文介绍了船载星敏感器的相关坐标系及安装角的定义，建立了船载星敏感器蒙气差修正模型，提出了一种船载高精度星敏感器安装角标定方法。利用该方法无需在星敏感器上和甲板安装棱镜等辅助测量元件，从而提高了测量的可靠性，实现了程序自动化测量。同时，对星敏感器各恒星地平系参考矢量逐个进行蒙气差修正，提高了安装角标定的精度。外场试验数据表明，本文设计的标定方法方位角、俯仰角精度均优于10″，有效发挥了星敏感器指向精度高的优点，也使双星敏感器组合测量的船体姿态精度提高到10″以内。下一步工作将对星敏感器海上测量船体姿态时，考虑周年光行差的修正。

参考文献:

[1] 江文达，陈道桂. 航天测量船[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.

JIANG W D, CHEN D G. *Space TT & C* (*Tracking, Telemetry and Command*)[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. (in Chinese)

[2] 茅永兴，张同双，朱伟康，等. 基于星惯组合的分布式船姿船位测量体制研究[J]. 飞行器测控学报, 2013, 32(1): 23-26.

MAO Y X, ZHANG T SH, ZHU W K, *et al*.. Research on measurement system for distributed ship-pose and ship-location based on SS/INS integrated navigation systems[J].

Journal of Spacecraft TT & C Technology, 2013, 32(1): 23-26. (in Chinese)

[3] 张磊，何昕，魏仲慧，等. 基于千兆网接口的星敏感器图像显示与存储[J]. 液晶与显示, 2015, 30(1): 114-119.
ZHANG L, HE X, WEI ZH H, *et al*.. Image display and storage of star sensor based on Gigabit Ethernet[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(1): 114-119. (in Chinese)

[4] 魏新国，王清龙，李健，等.星敏感器和遥感相机主光轴交联角的在轨检校[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(2): 274-280.
WEI X G, WANG Q L, LI J, *et al*.. On-orbit calibration of cross-angle between optical axis of star sensor and remote sensing camera[J]. *Opt. Precision Eng*, 2013, 21(2): 274-280. (in Chinese)

[5] 张磊，何昕，魏仲慧，等. 三角形星图识别算法的改进[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(2): 458-463.
ZHANG L, HE X, WEI ZH H, *et al*.. Modification of triangle identification algorithm[J]. *Opt. Precision Eng*., 2010, 18(2): 458-463. (in Chinese)

[6] 郭敬明. 基于星敏感器的船姿测量方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
GUO J M. *Study on ship attitude measurement based on star sensor*[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)

[7] 郭敬明，何昕，魏仲慧，等. 基于双星敏感器的船体姿态测量系统设计[J]. 光电子技术, 2014, 34(1): 1-7.
GUO J M, HE X, WEI ZH H, *et al*.. The design of a ship attitude measurement system based on dual star sensors[J]. *Optoelectronic Technology*, 2014, 34(1): 1-7. (in Chinese)

[8] LIEBE C C. Star trackers for attitude determination [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System*, 1995, 10(6): 10-16.

[9] 刘冰，朱伟康，张同双，等. 基于双星敏感器的船体姿态确定[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(3): 569-575.
LIU B, ZHU W K, ZHANG T SH, *et al*.. Ship attitude determination based on dual star sensors[J]. *Opt. Precision Eng*., 2014, 22(3): 569-575.

作者简介：



郭敬明 (1985–)，男，湖北荆州人，博士，助理研究员，主要从事星敏感器、数字图像处理等方面的研究。
E-mail: gjm441@163.com。

导师简介：



何　昕 (1966–)，男，吉林长春人，研究员，博士生导师，主要从事图像处理、光电测量等方面的研究。
E-mail: hexin6627@sohu.com。