

# 一种星敏传感器蒙气差修正的新方法

焦宏伟 潘 良 张同双

中国卫星海上测控部, 江苏 江阴 214431

**摘要** 为简化星敏传感器蒙气差修正步骤,提高星敏传感器自主姿态测量能力,提出了一种基于参考量修正的蒙气差修正新方法。该方法恒星视天顶距计算简单,不需要载体的姿态信息,蒙气差修正不需要求解二元非线性方程组,只需要简单加法即可完成。仿真分析与实验结果表明,利用参考量蒙气差修正方法得到的船体姿态解算结果与观测量蒙气差修正方法是一致的,二者偏差在 $0.1''$ 以内。对星敏传感器姿态测量的应用,基于参考量修正的蒙气差修正方法不需利用外部姿态信息,既计算简单,又不损失姿态测量精度。

**关键词** 测量; 星敏传感器; 观测量; 参考量; 蒙气差修正

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0901004

## A New Atmospheric Refraction Correction Method of Star Sensor

Jiao Hongwei Pan Liang Zhang Tongshuang

China Satellite Maritime Tracking and Control Department, Jiangyin, Jiangsu 214431, China

**Abstract** In order to simplify the atmospheric refraction correction process and improve the independent attitude measurement capability of star sensor, a new atmospheric refraction correction method based on reference quantity correction is proposed. The proposed method is simple in star apparent zenith distance calculation and it does not require the information of carrier attitude. The refraction correction doesn't need to solve the dual nonlinear equations, it only needs simple addition. Simulation and experimental results show that the results of attitude estimation using the reference quantity refraction correction method and are consistent with those of the observed quantity refraction correction method, and the relative error between them is within 0.1 arc seconds. For star sensor attitude measuring application, the proposed refraction correction method does not need external posture information. It is simple and has no loss of attitude measuring precision.

**Key words** measurement; star sensor; observed quantity; reference quantity; atmospheric refraction correction

**OCIS Codes** 010.1285; 010.1290; 040.1490; 040.1520

## 1 引 言

星敏传感器是一种以恒星为参照物进行姿态测量的敏感器件,其姿态信息来自于恒星星光的方向矢量在惯性参考坐标系的指向和恒星星光方向矢量在星敏传感器测量坐标系的指向,姿态测量精度可达角秒级<sup>[1-2]</sup>。星敏传感器在大气层内工作时,由于可见光穿越大气层时受大气折射的影响,得到的恒星视位置高度与真位置高度存在一定的偏差(该高度偏差称作蒙气差)。对于低海拔高度的测量,天顶距为 $45^\circ$ 时,蒙气差约为 $60''$ ,当天顶距为 $85^\circ$ 时,蒙气差则达到 $615''$ 左右<sup>[3-4]</sup>,因此需要对观测数据进行蒙气差修正。

现有蒙气差修正方法是观测量蒙气差修正方法,其原理为利用观测时刻的星敏传感器的位置和姿态信息计算天顶矢量在星敏传感器坐标系内的矢量坐标,进而计算星敏传感器观测得到的恒星视天顶距,根据视天顶距计算每颗恒星的蒙气差,根据蒙气差修正的几何原理建立二元非线性方程组,方程组的解即为修正后的真实星光投影点像平面坐标。这种方法需要求解二元非线性方程组,计算过程复杂。

针对上述问题,本文提出了一种基于参考量修正的蒙气差修正方法,该方法直接对参考量进行蒙气差修正,蒙气差修正过程恒星视天顶距计算简单,不需要求解二元非线性方程组,只需要简单加法即可完成。

收稿日期: 2015-04-01; 收到修改稿日期: 2015-05-05

作者简介: 焦宏伟(1982—),男,博士,工程师,主要从事航天测控及船姿船位测量技术方面的研究。E-mail: jhw23@aliyun.com

## 2 星敏感器测量模型

星敏感器通过光学系统和图像传感器拍摄天球上的恒星,通过图像处理和星图识别获取恒星的观测矢量  $w_i$  和参考矢量  $v_i$ ,进而确定星敏感器坐标系相对参考坐标系的转换矩阵。图像传感器常用的成像模型为中心透视投影模型<sup>[5]</sup>,图1表示了中心透视投影模型三个不同层次的坐标系:世界坐标系、摄像机坐标系、图像坐标系。图中  $O_c$  为相机光心,  $S'$  平面为反片位置,  $I$  平面为正片位置,也称为虚拟像平面。为了表达直观,一般都取正片做研究。

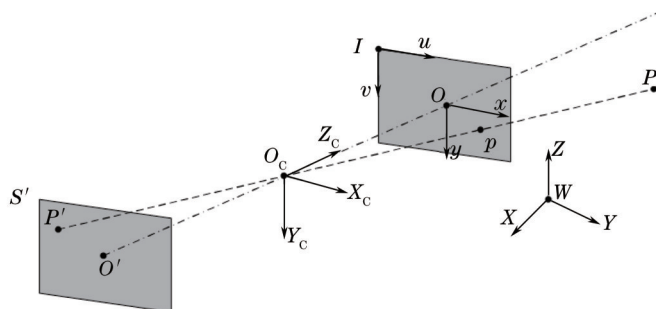


图1 中心透视投影成像关系

Fig.1 Centre perspective projection imaging relationship

对于具体的星敏感器成像系统,假设  $f$  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),第  $i$  颗恒星像中心像素坐标为  $(x_{ui}, y_{vi})$ ,图像传感器像元尺寸为  $D$ ,恒星在地心惯性坐标系( $i$ 系)下的赤经、赤纬分别为  $\alpha_i$  和  $\delta_i$ ,则地心惯性系到星敏感器坐标系( $s$ 系)的转换矩阵  $R_i^s$  计算模型为

$$W_{si} = R_i^s V_{ii}, \quad (1)$$

式中  $W_{si}$  为恒星在星敏感器坐标系下的观测矢量,  $V_{ii}$  为恒星在地心惯性坐标系下的参考矢量,其表达式分别为

$$W_{si} = \frac{[(x_{ui} - x_0)D \quad (y_{vi} - y_0)D \quad f]^T}{\sqrt{(x_{ui} - x_0)^2 D^2 + (y_{vi} - y_0)^2 D^2 + f^2}}, \quad (2)$$

$$V_{ii} = [\cos \alpha_i \cos \delta_i \quad \sin \alpha_i \cos \delta_i \quad \sin \delta_i]^T. \quad (3)$$

## 3 观测量蒙气差修正方法

由于大气折射,星敏感器观测到的恒星方向与真方向不同,这个方向差叫做蒙气差<sup>[6-8]</sup>。星敏感器在大气内以任意姿态观星,光轴会和天顶方向形成一定的夹角,如图2所示<sup>[9-10]</sup>。

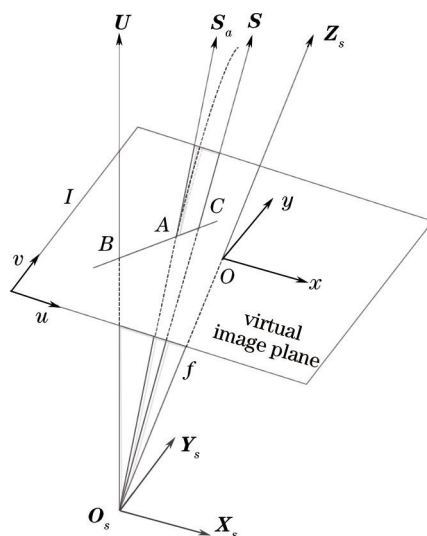


图2 蒙气差修正几何原理图

Fig.2 Geometric diagram of atmospheric refraction correction

在图2中,矢量  $U$  为天顶方向矢量,矢量  $Z_s$  为星传感器光轴方向矢量,图中虚线为实际星光在大气内的折射路径,弯向地心,在星传感器处的切线方向矢量  $S_a$  为恒星视方向矢量,矢量  $S$  为恒星真方向矢量,蒙气差  $\rho$  即为两者之间角度差,可表示为  $\angle S_a O_s S$  或  $\angle A O_s C$ 。 $O_s$  点为星传感器坐标系 ( $s$  系)  $O_s-X_s Y_s Z_s$  的原点,位于星传感器光学系统的光心。 $O$  点为 CCD 阵列平面坐标系  $O-xy$  原点,位于星传感器光轴在 CCD 阵面上的投影点。星光矢量在星传感器坐标系与 CCD 阵面坐标系之间的转换关系为

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} = \frac{\begin{bmatrix} x & y & f \end{bmatrix}^T}{\sqrt{x^2 + y^2 + f^2}} \quad (4)$$

$A$  点为矢量  $S_a$  在 CCD 面阵上的成像点,  $C$  点为矢量  $S$  的映射点,即蒙气差修正后的位置点,  $B$  点为  $U$  在 CCD 面阵上的映射点,用以计算视天顶距。 $f$  为相机焦距。

### 3.1 姿态转移矩阵

1) 星传感器固联安装在载体上,根据其安装矩阵可以得到载体坐标系 ( $b$  系) 到星传感器坐标系的姿态转移矩阵  $R_i^b$ 。

2) 如果载体配置了捷联惯导,可以通过三轴陀螺解算得到载体坐标系到当地地理坐标系 ( $g$  系) 下的姿态转移矩阵  $R_g^b$ 。

3)  $i$  系到  $g$  系的姿态转移矩阵可以由观测时刻和测量点的经纬度等信息计算得到<sup>[7]</sup>, 记为  $R_i^g$ 。

由此,观测时刻由地心惯性坐标系到星传感器坐标系的姿态转移矩阵为

$$R_i^s = R_i^b R_g^b R_i^g \quad (5)$$

观测时刻由当地地理坐标系到星传感器坐标系的姿态转移矩阵为

$$R_g^s = R_i^s R_i^b \quad (6)$$

### 3.2 视天顶距的确定

如图2所示,视天顶距  $z_a = \angle S_a O_s B$ , 为天顶方向矢量  $U$  和恒星视方向矢量  $S_a$  的夹角。通过观测地点的精确定位和定时,矢量  $U$  在  $i$  系下赤经、赤纬作为已知条件,矢量  $S_a$  在  $s$  系下的坐标表示观测结果。利用姿态转移矩阵  $R_i^s$  可以将  $i$  系下的天顶  $U_i$  矢量坐标转化为  $s$  系下的  $U_s$  矢量坐标,同理可将星传感器视场内恒星  $i$  系下方位矢量坐标映射为  $s$  系下的矢量坐标。设任意一颗恒星  $S$  的赤经、赤纬为  $\alpha_0$  和  $\delta_0$ , 则在  $i$  系下的矢量坐标为

$$\begin{cases} x_i = \cos \delta_0 \cos \alpha_0 \\ y_i = \cos \delta_0 \sin \alpha_0, \\ z_i = \sin \delta_0 \end{cases} \quad (7)$$

映射到  $s$  系下,矢量坐标为

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} = R_i^s \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} \quad (8)$$

天顶矢量  $U$  天顶在  $g$  系(北天东坐标系)下的矢量坐标为

$$U_g = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

则在任意时刻,其在星传感器坐标系下的矢量坐标为

$$U_s = \begin{bmatrix} x_{us} \\ y_{us} \\ z_{us} \end{bmatrix} = R_g^s U_g = R_g^s \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

星传感器星光成像  $A$  点的平面坐标为  $(x_a, y_a)$ , 则矢量  $S_a$  在  $s$  系内可表示为

$$S_a = \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ f \end{bmatrix} \quad (11)$$

在星传感器坐标系  $s$  系内,根据两矢量内积公式来确定视天顶距  $z_a$  为

$$z_a = \arccos\left(\frac{U_s \cdot S_a}{|S_a|}\right). \quad (12)$$

### 3.3 公式法求蒙气差

在实际应用中,不管是“大气折射表”还是利用公式,都是以视天顶距 $z_a$ 为引数,先查出或计算出平均大气折射率 $\rho_0$ ,再根据观测点当地的气温 $T$ 和海拔高度 $h$ ,利用经验公式得到订正参数,最后得到实际蒙气差 $\rho$ ,采用的公式为

$$\rho_0 = 60.2'' \tan z_a, \quad (13)$$

$$M = \frac{-0.00383T}{1 + 0.00367T}, \quad (14)$$

式中 $T$ 是观测时空气的摄氏温度,

$$N = \frac{H}{760} - 1, \quad (15)$$

式中 $H$ 是以Pa计的实气压,表示为

$$H = H'[1 - 0.00264 \cos 2\varphi - 0.000163(T' - T)], \quad (16)$$

式中 $H'$ 是读得的气压数值(观测时), $\varphi$ 是观测地纬度, $T'$ 是气压表内水银的温度。实际的蒙气差可表达为

$$\rho = \rho_0(1 + M + N). \quad (17)$$

### 3.4 蒙气差修正算法

经过蒙气差修正,可以提高CCD面阵上恒星映射点的坐标估计精度。大气折射弯向地心,视天顶距比真天顶距小,但不改变天体的方位角,因此,天顶矢量方向 $U$ 、恒星视方向 $S_a$ 和真方向 $S$ 共面于平面 $O,BC$ 。 $A$ 、 $B$ 、 $C$ 三点为上述三矢量在CCD阵面上的投影点,位于平面 $O,BC$ 和CCD阵列平面的交线上,如图2所示。

根据 $g$ 系天顶矢量 $U$ 及姿态转移矩阵 $R_g^s$ 求得 $B$ 点坐标 $(x_b, y_b)$ ,结合通过观测得到的 $A$ 点坐标 $(x_a, y_a)$ 可得直线 $AB$ 方程,再在 $\Delta AO_s C$ 及 $\Delta BO_s C$ 内利用余弦定理联立二元非线性方程组

$$\begin{cases} y_c - y_a - \left(\frac{y_b - y_a}{x_b - x_a}\right)(x_c - x_a) = 0 \\ \frac{O_s A^2 + O_s C^2 - AC^2}{2O_s A \cdot O_s C} - \cos \rho = 0 \\ \frac{O_s B^2 + O_s C^2 - BC^2}{2O_s B \cdot O_s C} - \cos(\rho + z_a) = 0 \end{cases}, \quad (18)$$

其中

$$\begin{cases} O_s A = \sqrt{x_a^2 + y_a^2 + f^2} \\ O_s B = \sqrt{x_b^2 + y_b^2 + f^2} \\ O_s C = \sqrt{x_c^2 + y_c^2 + f^2} \\ AC = \sqrt{(x_a - x_c)^2 + (y_a - y_c)^2} \\ BC = \sqrt{(x_b - x_c)^2 + (y_b - y_c)^2} \end{cases}. \quad (19)$$

根据(18)~(19)式即可求得真实星光投影点 $C$ 的坐标 $(x_c, y_c)$ ,完成蒙气差修正。

## 4 参考量蒙气差修正方法

前面给出了观测量蒙气差修正的方法,这里提出参考量蒙气差修正方法。

假设 $W_{si}$ 为恒星在星敏感器坐标系下的单位观测矢量, $V_{ii}$ 为恒星在地心惯性坐标系下的单位参考矢量,当星敏感器视场内识别恒星数目大于3颗时可根据(1)式 $W_{si} = R_i^s V_{ii}$ 求得地心惯性系到星敏感器坐标系的转换矩阵 $R_i^s$ 。

$V_{ii}$ 在 $g$ 系的矢量坐标可表达为

$$V_{gi} = R_i^g V_{ii}. \quad (20)$$

所以  $R_g^s$  满足

$$W_{si} = R_g^s V_{gi} \tag{21}$$

观测量蒙气差修正方法是通过观测进行蒙气差修正,得到修正后的观测矢量  $W_{si}'$ ,进而得到精确的  $R_g^s$  解算结果。参考量蒙气差修正方法的思路是:观测矢量  $W_{si}$  不变,对参考矢量  $V_{gi}$  进行蒙气差修正,得到修正后的参考矢量  $V_{gi}'$ ,再根据(21)式计算  $R_g^s$  的精确结果。

#### 4.1 真天顶距的确定

当地地理坐标系(北天东)下的参考矢量  $V_{gi}$  可用地平方位角  $\alpha_{gi}$  和俯仰角  $\delta_{gi}$  来表示,即

$$V_{gi} = [\cos \alpha_{gi} \cos \delta_{gi} \quad \sin \delta_{gi} \quad \sin \alpha_{gi} \cos \delta_{gi}]^T \tag{22}$$

已知  $V_{gi}$ , 即可根据(22)式计算出地平方位角  $\alpha_{gi}$  和俯仰角  $\delta_{gi}$ 。

根据  $V_{gi}$  解算得到的地平俯仰角  $\delta_{gi}$  计算恒星的真天顶距为

$$z_a = 90^\circ - \delta_{gi} \tag{23}$$

#### 4.2 蒙气差修正算法

根据(23)式得到的恒星的真天顶距和(17)式即可计算恒星的实际蒙气差  $\rho$  [实际上(17)式的引数是视天顶距,但在这里使用真天顶距代替视天顶距,二者计算得到的蒙气差有微小差异,在  $0.1''$  以内]。由于蒙气差只对俯仰角产生影响,所以只需对俯仰角  $\delta_{gi}$  进行修正得到修正后的俯仰角  $\delta_{gi}'$ ,其表达为

$$\delta_{gi}' = \delta_{gi} + \rho \tag{24}$$

蒙气差修正后的参考矢量  $V_{gi}'$  为

$$V_{gi}' = [\cos \alpha_{gi} \cos \delta_{gi}' \quad \sin \delta_{gi}' \quad \sin \alpha_{gi} \cos \delta_{gi}']^T \tag{25}$$

再根据(21)式即可得到精确的  $R_g^s$  解算结果。

### 5 仿真实验分析

传统的观测量蒙气差修正方法是通过观测进行蒙气差修正,得到修正后的观测矢量  $W_{si}'$ ,进而根据(21)式得到精确的  $R_g^s$  解算结果。参考量蒙气差修正方法的思路是观测矢量  $W_{si}$  不变,通过对参考矢量  $V_{gi}$  进行蒙气差修正,得到修正后的参考矢量  $V_{gi}'$ ,再根据(21)式计算  $R_g^s$  的精确结果。

下面对这两种修正方法进行仿真,证明这两种方法计算结果的一致性。

仿真星传感器参数如表1所示。仿真船体位置姿态信息如表2所示。仿真恒星赤经、赤纬信息如表3所示。观测时刻其他仿真参数如表4所示。星传感器安装角如表5所示。

表1 星传感器参数

Table 1 Parameters of star sensor

Pixel size /mm	Focal length /mm	Principal point (X,Y) /pixel
0.014	95	(512,497)

表2 船体位置姿态信息

Table 2 Ship position and attitude information

Longitude /( $^\circ$ )	Latitude /( $^\circ$ )	Yaw /( $^\circ$ )	Pitch /( $^\circ$ )	Roll /( $^\circ$ )
120.293107	31.945218	253.6	0.2	0.3

表3 恒星位置

Table 3 Position of stars

Number of stars	1	2	3	4	5
Right ascension /( $^\circ$ )	282.519989	284.256653	284.735840	285.003754	286.241241
Declination /( $^\circ$ )	33.362778	32.901390	32.689445	32.145557	31.744444

表 4 观测时刻相关参数

Table 4 Related parameters of observing time

Beijing time	Temperature / $^{\circ}\text{C}$	Pressure /hPa
2014/07/09 19:48:59.60	23.9	1006.7

表 5 星敏传感器安装角

Table 5 Star sensor installation angle

Yaw /( $^{\circ}$ )	Pitch /( $^{\circ}$ )	Roll /( $^{\circ}$ )
91.5	180.2	39.5

根据安装角计算载体坐标系到星敏传感器坐标系的姿态转移矩阵  $R_b^s$  为

$$R_b^s = \begin{bmatrix} 0.0262 & -0.0035 & -0.9997 \\ -0.6359 & -0.7716 & -0.014 \\ -0.7713 & 0.6361 & -0.0224 \end{bmatrix}. \quad (26)$$

根据前述仿真条件,可以计算出 5 颗恒星在理想情况和包含蒙气差影响情况下在星敏传感器像面上的成像位置,根据观测量蒙气差修正方法对像点进行修正,如表 6 所示。

表 6 恒星在图像上成像位置

Table 6 Imaging positions of stars in the image plane

Number of stars	1	2	3	4	5
Ideal image point coordinate $X$ /pixel	235.6149	235.1945	244.0265	296.6477	301.2075
Ideal image point coordinate $Y$ /pixel	173.3413	354.4091	407.6546	453.5867	586.7066
Atmospheric refraction $X$ /pixel	235.6892	235.2712	244.1015	296.7095	301.2695
Atmospheric refraction $Y$ /pixel	171.3418	352.3034	405.5160	451.4202	584.4516
Observed correction $X$ /pixel	235.6149	235.1945	244.0265	296.6477	301.2075
Observed correction $Y$ /pixel	173.3401	354.4078	407.6532	453.5852	586.7050

根据这里提出的参考量蒙气差修正方法对参考矢量进行修正,如表 7 所示。

表 7 当地地理坐标系(北天东)下恒星参考矢量

Table 7 Reference quantities of star in local geographic coordinate system

Number of stars	1	2	3	4	5
Theoretical reference quantity $X$	0.2312	0.2358	0.2359	0.2296	0.2321
Theoretical reference quantity $Y$	0.6690	0.6489	0.6430	0.6380	0.6228
Theoretical reference quantity $Z$	0.7063	0.7233	0.7285	0.7349	0.7471
Correctional reference quantity $X$	0.2312	0.2358	0.2358	0.2295	0.2320
Correctional reference quantity $Y$	0.6692	0.6492	0.6432	0.6382	0.6231
Correctional reference quantity $Z$	0.7061	0.7231	0.7283	0.7347	0.7469

两种蒙气差修正方法的船体姿态解算结果对比如表 8 所示。

表 8 两种方法船体姿态解算对比

Table 8 Ship attitudes comparison of two methods

	Yaw	Pitch	Roll
Theoretical ship attitude	253.6 $^{\circ}$	0.2 $^{\circ}$	0.3 $^{\circ}$
Observed correction ship attitude	253.5999 $^{\circ}$	0.2000 $^{\circ}$	0.2999 $^{\circ}$
Observed correction error	0.0188"	-0.0417"	0.0212"
Reference correction ship attitude	253.6000 $^{\circ}$	0.1999 $^{\circ}$	0.3000 $^{\circ}$
Reference correction error	-0.0001"	0.0000"	-0.0002"

利用船体码头系泊状态的实测星敏传感器数据,根据两种蒙气差修正方法解算的船体航向角对比如图 3 所示,纵摇角对比如图 4 所示,由于这两种方法计算结果极其接近,所以图中这两条曲线是基本完全重合的。



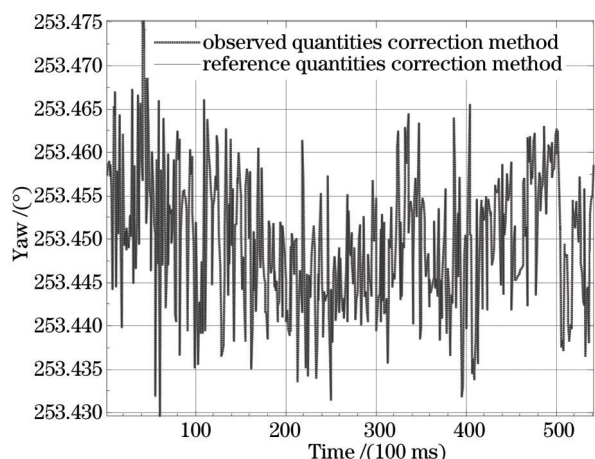


图3 两种方法解算船体航向角对比图

Fig.3 Comparison of yaw angle of two methods

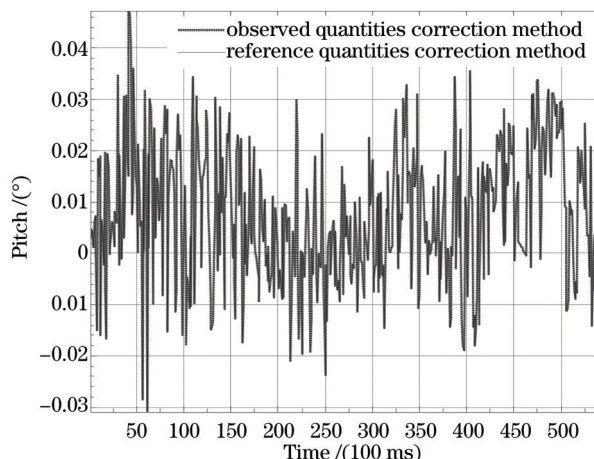


图4 两种方法解算船体纵摇角对比图

Fig.4 Comparison of pitch angle of two methods

两种蒙气差修正方法解算的船体姿态偏差如图5所示,两种方法解算的航向角、纵摇角和横摇角偏差均值分别为 $0.027''$ 、 $0.014''$ 和 $-0.089''$ 。

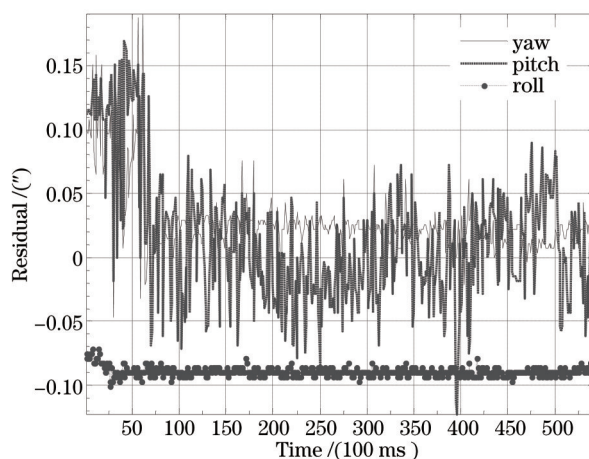


图5 两种方法解算船体姿态相对误差图

Fig.5 Comparison of ship attitude relative error of two methods

仿真和实验结果都表明利用这两种方法对蒙气差进行修正,所得船体姿态解算结果是一致的,二者误差在 $0.1''$ 以内,这对星敏感器测量精度的影响几乎是可以忽略的。

两种蒙气差修正方法的计算复杂度如表9所示。

表9 两种蒙气差修正方法对比

Table 9 Comparison of two atmospheric refraction correction methods

	$z_0$ calculation	Attitude information	Atmospheric refraction caculation	Atmospheric refraction correction	Attitude calculation results
Observed correction	Complicated	Need	Same	Nonlinear equations	Same
Reference correction	Simple	Not need	Same	Simple sums	Same

## 6 结 论

本文提出了一种基于参考量修正的蒙气差修正方法,与现有的基于观测量修正的蒙气差修正方法相比,参考量蒙气差修正方法恒星视天顶距计算简单,不需要载体的姿态信息,蒙气差修正不要求解二元非线性方程组,只需要简单加法即可完成。仿真分析与实验结果表明,利用两种蒙气差修正方法得到的船体姿态解算结果是一致的,二者偏差在 $0.1''$ 以内。对星敏感器姿态测量应用,基于参考量修正的蒙气差修正方

法既可以做到计算简单,又可以不损失姿态测量精度。

## 参 考 文 献

- 1 Ju G, Junkins J L. Overview of star tracker technology and its trends in research and development[J]. *Advances in the Astronautical Sciences*, 2003, 115: 461-477.
- 2 Fang Jiancheng, Ning Xiaolin. *The Theory and Application about Celestial Navigation*[M]. Beijing: BUAA Press, 2006.  
房建成, 宁晓琳. *天文导航原理及应用*[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.
- 3 Tong Shuai, Li Hui, Wang Anguo. Calculation and analysis of detection ability for shipboard star sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 1004003.  
佟 帅, 李 辉, 王安国. 船用星敏传感器探测灵敏度计算及分析[J]. *光学学报*, 2014, 34(10): 1004003.
- 4 Mao Wei, Li Binhua, Yang Lei, *et al.*. Determining the astronomical refraction and building the radio wave refractive delay model measured(I)-observation principle and feasibility[J]. *Astronomical Research & Technology*, 2005, 2(4): 240-245.  
冒 蔚, 李彬华, 杨 磊, 等. 测定天文大气折射和建立电磁波折射延迟实测模型(I)—观测原理和可行性[J]. *天文研究与技术*, 2005, 2(4): 240-245.
- 5 Ma Songde, Zhang Zhengyou. *Computer Vision: Compute Theory and Algorithms Foundation*[M]. Beijing: Science Press, 1998.  
马颂德, 张正友. *计算机视觉—计算理论与算法基础*[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- 6 Wu Yanxiong, Zhang Xin, Zhang Jizhen, *et al.*. Research on the autonomous star sensor based on indirectly sensing horizon and its optical design[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0222001.  
伍雁雄, 张 新, 张继真, 等. 星光折射自主导航星敏传感器及光学系统设计研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(2): 0222001.
- 7 Sun Ting, Xing Fei, You Zheng. Optical system error analysis of high accuracy star trackers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0323003.  
孙 婷, 邢 飞, 尤 政. 高精度星敏传感器光学系统误差分析[J]. *光学学报*, 2013, 33(3): 0323003.
- 8 Mao Yongxing, Zhang Tongshuang, Zhu Weikang, *et al.*. A real-time atmospheric refraction correction method for measurement data of ship-borne star sensors[J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*, 2012, 31(3): 50-53.  
茅永兴, 张同双, 朱伟康, 等. 船载星敏传感器测星数据蒙气差实时修正方法[J]. *飞行器测控学报*, 2012, 31(3): 50-53.
- 9 Wang Haiyong, Lin Haoyu, Zhou Wenrui. Technology of atmospheric refraction compensation in starlight observation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(11): 1101002.  
王海涌, 林浩宇, 周文睿. 星光观测蒙气差补偿技术[J]. *光学学报*, 2011, 31(11): 1101002.
- 10 Wang Haiyong, Jin Guangrui, Zhao Yanwu. Applicable probability distribution model of refracted star number in field of view of indirectly sensing horizon star sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12): 1201002.  
王海涌, 金光瑞, 赵彦武. 间接敏感地平星敏传感器视场内折射星数的概率分布适用模型[J]. *光学学报*, 2013, 33(12): 1201002.

栏目编辑: 何卓铭