

舰船航海中的高精度天体高度获取方法

宁晓琳 王龙华

(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 惯性技术重点实验室, 新型惯性仪表与导航系统技术国防重点学科实验室, 北京 100191)

摘要 天体高度的获取精度是目前制约舰船自主天文定位精度的主要技术瓶颈, 针对这一问题, 提出了一种新颖的利用星光折射角和大气折射模型间接获取天体高度的方法。该方法通过两个星敏感器分别拍摄直射星图和折射星图, 利用星图匹配与识别方法得到星光折射角; 基于大气折射模型, 根据测量得到的折射角精确获取天体高度值。仿真结果表明, 当折射角测量精度为 $1''$, 观测高度约为 6° 的天体时, 其天体高度的获取精度可达 $37''$, 相应的平均舰船定位精度约为 23 m。对折射角测量精度、观测天体的高度和大气折射模型精度等因素对定位精度的影响进行了分析。

关键词 大气光学; 天体高度; 星光折射; 天文航海; 舰船

中图分类号 V249.32⁺3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0301003

Method of High Accuracy Celestial Altitude Obtainment in Vessel Navigation

Ning Xiaolin Wang Longhua

(*Science and Technology on Inertial Laboratory, Fundamental Science on Novel Inertial Instrument and Navigation System Technology Laboratory, School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China*)

Abstract Positioning accuracy of vessel celestial navigation is limited by the low measurement accuracy of celestial altitude. For solving this problem, a novel method of celestial altitude determination is proposed. Refraction angles are obtained by two star sensors using a star pattern recognition method; the celestial altitudes are calculated accurately from the refraction angles according to the atmospheric refraction model. Simulation results show that the final vessel positioning accuracy can be better than 23 m under the conditions that the star sensor accuracy is $1''$ and the observation altitude is about 6° . The effect of measurement accuracy of refraction angle, observation celestial heights and atmospheric refraction model accuracy on positioning accuracy is analyzed.

Key words atmospheric optics; celestial altitude; stellar refraction; celestial navigation; vessel

OCIS codes 010.1290; 010.1300; 010.4030

1 引 言

天文导航是最古老、最基本的海上定位方式, 在舰船导航中占有重要地位, 至今已有六、七百年的历史^[1]。天文导航具有隐蔽性好、安全可靠、自主性强的优点, 这种古老而实用的导航方法, 目前仍是现代舰船重要导航手段之一, 例如俄罗斯“德尔塔”级弹道导弹核潜艇、法国“胜利”级弹道导弹核潜艇、德

国 212 型潜艇、美国和俄罗斯的远洋测量船和航空母舰上都装备有天文导航系统。1925 年左右, 无线电导航技术开始应用于航海, 但由于其作用距离有限、存在服务盲区、易受人为或电磁波的干扰, 使其应用和发展受到局限。随着核动力潜艇的发展, 惯性导航系统作为一种可自主获得航向、位置等信息的导航方式获得了广泛应用, 但其缺点是定位误差

收稿日期: 2012-09-18; **收到修改稿日期**: 2012-11-08

基金项目: 国家 973 计划 (2009CB724000)、新世纪优秀人才支持计划 (NCET-11-0771)、航天科技创新基金 (10300002012117003) 和国防基础科研资助课题。

作者简介: 宁晓琳 (1979—), 女, 博士, 副教授, 主要从事天文自主导航技术方面的研究。

E-mail: ningxiaolin@buaa.edu.cn

会随时间积累。目前,全球导航卫星系统(GNSS)以其能全天时、全天候提供高精度位置和速度信息且误差不随时间积累的优势成为现代导航的主要方式,但也有易受干扰且可靠性不高的不足。如何不依赖 GNSS 实现高精度自主导航仍然是当前的研究热点和航海导航的要求^[2]。

天文航海技术是通过获取天体高度来进行舰船定位的,传统方法是利用航海六分仪等观测仪器测量天体高度,即确定天体观测瞄准线与当地水平基准之间的夹角。在海上一般以水天线作为水平基准,但是由于客观原因,舰船在海上航行必然会摇摆,导致船平面和水天线产生摇角,这样会带来很大的天体高度观测误差。目前针对这一问题有两种解决方法:1)利用图像处理技术和边缘检测技术对图像进行有效的加工,从而检测出水天线^[3~5],然后求出舰船的摇角,用来修正天体高度观测值;2)在舰船上安装由陀螺、传感器、随动(伺服)控制系统等设备构成的惯性稳定平台,隔离舰船的摇摆^[6],从而为天体高度的观测提供准确的当地水平基准。方法 1) 由于采用了复杂的图像处理技术如小波变换^[7,8]或 Hough 变换^[9]等,使计算量大大增加,不利于工程应用。方法 2) 由于陀螺的漂移会导致水平基准的误差随时间积累,而且这种稳定平台通常体积较大,技术也较复杂,要提高稳定平台的精度,往往要付出较大的代价。

此外,以任何方式观测得到的天体高度都需要进行修正,除了针对观测仪器设备进行标度因数修正外^[10],由于存在空气折射的影响,还需修正地平俯角误差和大气折射误差等^[11~13]。

综上所述,传统观测天体高度的方法由于不易得到准确的当地水平基准且观测值需要各种误差修

正,导致不易获取高精度的天体高度测量值,而天体高度的精度直接决定了舰船的定位精度。本文针对如何提高天体高度的获取精度进而提高舰船的定位精度,提出了一种新颖的利用折射原理间接获取天体高度的方法,该方法与水平基准无关,且无需折射修正。文中还进行了基于该方法的舰船自主天文定位计算机仿真验证与分析。

2 基于星光折射的天体高度获取方法

由于地球大气密度不均匀,当天体光线的入射角小于 90° 时会发生折射,从而使舰船上观测到的天体视位置要比其实际位置高,即天体高度的观测值 H 。大于其真实高度值 H_0 ,如图 1 所示。 H_0 与 H 之差即为折射角 R ,折射角 R 与天体高度 H 之间存在一定的函数关系^[14],且随着 H 降低 R 逐渐增大,在标准大气条件下,当 H 为 90° 时 R 为 $0'$,当 H 为 5° 时 R 达到 $9.9'$,当 H 为 0° 时 R 达到 $34'$ ^[15]。

间接获取天体高度 H 的方法就是建立在 H 与 R 之间函数关系的基础上,具体实现流程如图 2 所

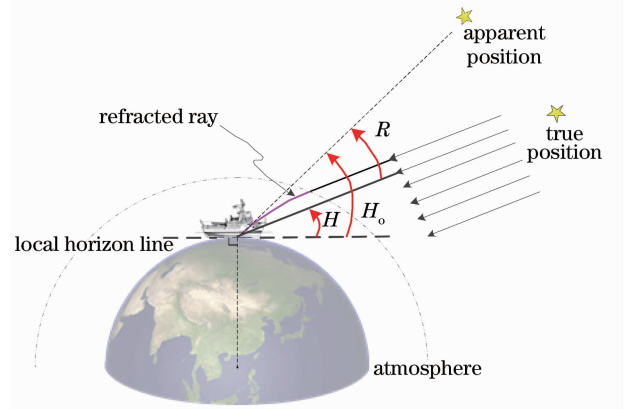


图 1 星光折射原理图

Fig. 1 Principle of stellar refraction

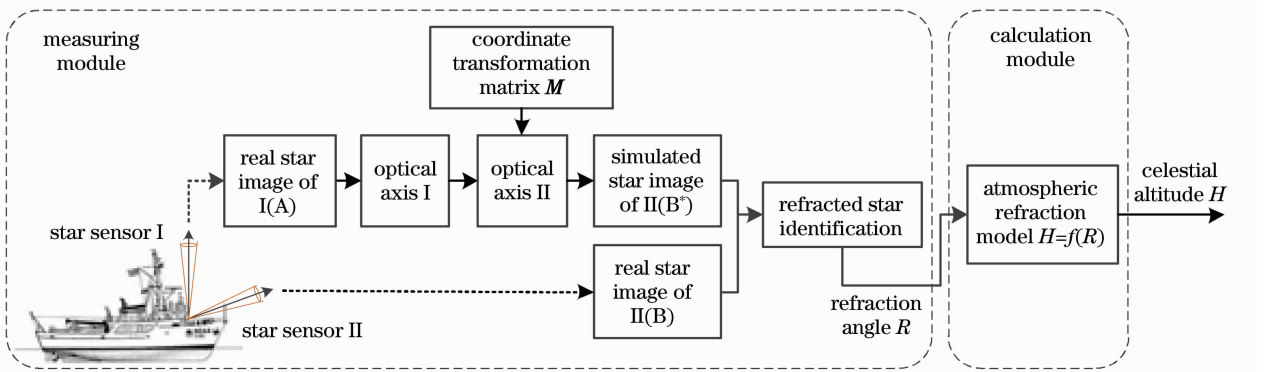


图 2 间接获取天体高度流程图

Fig. 2 Flow chart of indirectly obtaining celestial altitude

示,主要由测量模块和计算模块两部分组成,测量模块的功能是识别出折射星并准确获得其折射角 R ,计算模块则通过 R 和大气折射模型计算得到精确的天体高度值 H 。

2.1 折射星识别和折射角获取

获取折射角 R 的前提是准确识别出折射星,考虑到星光经过大气折射后的成像位置偏差会给传统星图识别方法带来困难,提出一种利用双星敏感器识别折射星并获取折射角的方法,如图 2 所示,其中星敏感器 I 光轴指向天顶,使其天体观测高度接近 90° ,保证其拍摄到的是直射星图;星敏感器 II 光轴相对星敏感器 I 光轴偏转一角度 θ ,使其偏向水平方向安装,指向星光发生折射的恒星,传统方法中为了减弱折射的影响,一般将天体观测高度设置为 $20^\circ \sim 70^\circ$,而本文所提方法恰恰需要利用大气折射,因此令星敏感器 II 光轴指向天体高度约为 6° 的天体,即

星敏感器 I、II 光轴之间的夹角 θ 为 84° ,则两个星敏感器之间的坐标转移矩阵为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1045 & 0.9945 \\ 0 & -0.9945 & 0.1045 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

2.1.1 确定星敏感器 I 的光轴指向 \mathbf{Z}_{c1}

假设在某一时刻 t ,星敏感器 I 拍摄的直射星图(A)如图 3(a)所示,通过传统星图识别方法可得到星敏感器 I 光轴在地心惯性坐标系下的指向方向矢量 \mathbf{Z}_{c1} 为

$$\mathbf{Z}_{c1} = [-0.4130 \quad 0.6699 \quad 0.6170]^T. \quad (2)$$

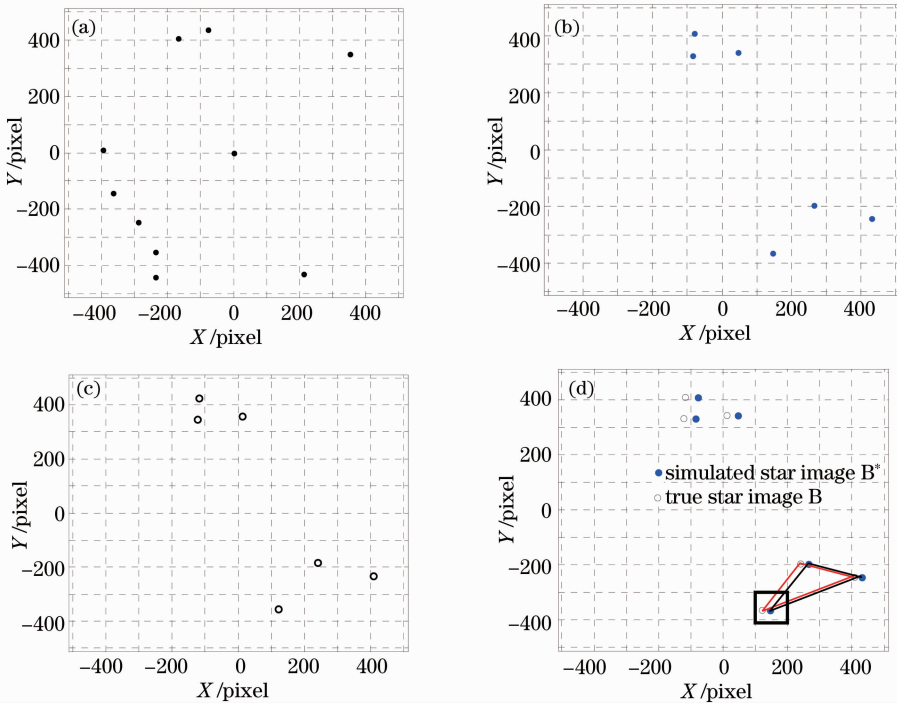


图 3 (a) 星敏感器 I 拍摄星图(A); (b) 星敏感器 II 模拟直射星图(B^*); (c) 星敏感器 II 拍摄星图(B); (d) 星敏感器 II 拍摄星图(B)与模拟星图(B^*)对比

Fig. 3 (a) Real image of star sensor I (A); (b) simulated star image of star sensor II (B^*); (c) real star image of star sensor II (B); (d) contrast of star image (B) and (B^*)

2.1.2 生成星敏感器 II 视场内的模拟直射星图

根据 \mathbf{Z}_{c1} 和星敏感器 I、II 之间的转移矩阵 \mathbf{M} ,可以推算得到星敏感器 II 光轴指向 \mathbf{Z}_{c2} 为

$$\mathbf{Z}_{c2} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{Z}_{c1} = [0.2788 \quad -0.4523 \quad 0.8472]^T, \quad (3)$$

然后利用标准导航星表(如 Tycho2),根据 \mathbf{Z}_{c2} 可生成

当前时刻星敏感器 II 视场内的模拟直射星图(B^*),如图 3(b)所示。

2.1.3 识别折射星

图 3(c)为星敏感器 II 在 t 时刻拍摄的折射星图(B),图 3(d)为图 3(b)和图 3(c)的对比,从中可看出由于受到大气折射影响,星敏感器 II 拍摄星图

(B)和其对应的模拟直射星图(B*)中的星像点位置存在偏差,天体高度不同,偏差也有差异。由于使用的星敏感器视场较小($5^\circ \times 5^\circ$),视场内导航星的天体高度相近,其各自折射角也相近,因此星图(B*)和(B)中星像点的几何形状基本保持不变。利用三角形星图匹配识别算法^[16]可以得到星图(B*)和(B)中的匹配星像点。图3(d)中方框内即为一对匹配星像点,该星的直射与折射像点位置坐标(P_{x1}, P_{y1})、(P_{x2}, P_{y2})分别为(146.6663 pixel, -365.8723 pixel), (121.2365 pixel, -355.1300 pixel)。

2.1.4 计算折射角 R

根据(P_{x1}, P_{y1})和(P_{x2}, P_{y2}),利用星敏感器成像原理可以得到该星的真实位置和视位置在星敏感

器坐标系下的单位矢量 \mathbf{S}_{c1} 和 \mathbf{S}_{c2} :

$$\mathbf{S}_{ci} = \frac{1}{\sqrt{P_{xi}^2 + P_{yi}^2 + f^2}} \begin{bmatrix} -P_{xi} \\ -P_{yi} \\ f \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2 \quad (4)$$

式中 f 为星敏感器的焦距。

\mathbf{S}_{c1} 和 \mathbf{S}_{c2} 之间的夹角即为该折射星在当前时刻的折射角 R , 为

$$R = \arccos(\mathbf{S}_{c1} \cdot \mathbf{S}_{c2}). \quad (5)$$

2.2 大气折射模型与天体高度的获取

文献[17]给出标准大气状况下计算普尔科沃大气折射表值的近似公式

$$R = 60.30'' \tan z_o - 6.6987'' \times 10^{-2} \tan z_o \sec^2 z_o + 2.131 \times 10^{-4} \tan z_o \sec^4 z_o - 1.369 \times 10^{-6} \tan z_o \sec^6 z_o + 0.978 \times 10^{-8} \tan z_o \sec^8 z_o - 0.888 \times 10^{-10} \tan z_o \sec^{10} z_o + 0.961 \times 10^{-12} \tan z_o \sec^{12} z_o, \quad (6)$$

式中 z_o 为视天顶距, $z_o = 90^\circ - H_o$, $H_o = H + R$ 。

本文所提方法是要通过 R 计算 H , 即得到数学模型 $H = f(R)$, 根据(6)式和 R, z_o, H_o 及 H 之间的关系可得到真实天体高度 H 与折射角 R 之间的映射(R_i, H_i), 然后采用曲线拟合方法^[18] 依据映射(R_i, H_i) 得到大气折射模型为

$$H(R) = \exp \left[\sum_{j=0}^{20} c_j \varphi_j(R) \right], \quad (7)$$

式中 c_j 为多项式系数, 其表达式为

$$c_j = \frac{\sum_{i=0}^{90} H_i \varphi_j(R_i)}{\sum_{i=0}^{90} \varphi_j^2(R_i)}, \quad j = 0, 1, \dots, 20, \quad (8)$$

式中 $\varphi_j(R)$ 为 j 次多项式, 由下列递推公式构造^[18] :

$$\begin{cases} \varphi_0(R) = 0 \\ \varphi_1(R) = R - \alpha_0 \\ \varphi_{j+1}(R) = (R - \alpha_j) \varphi_j(R) - \beta_j \varphi_{j-1}(R), \quad j = 1, 2, \dots, 19 \end{cases}, \quad (9)$$

系数 α_j 和 β_j 可表示为

$$\alpha_j = \frac{\sum_{i=0}^m R_i \varphi_j^2(R_i)}{\sum_{i=0}^m \varphi_j^2(R_i)}, \quad j = 0, 1, \dots, 19, \quad (10)$$

$$\beta_j = \frac{\sum_{i=0}^m \varphi_j^2(R_i)}{\sum_{i=0}^m \varphi_{j-1}^2(R_i)}, \quad j = 1, 2, \dots, 19. \quad (11)$$

根据(6)式构造的映射(R_i, H_i)拟合得到的 α_j, β_j 和 c_j 的具体数值如表1所示。

图4给出了当折射角 R 为 $0' \sim 34'$ 时, 由(7)式计算得到的天体高度 H 的变化曲线。通过(7)式, 根据测得的 R 可得到对应的 H , 例如当 R 为 $6'$ 时, 算得 H 为 8.996° , 如图4中插图所示。

3 基于星光折射的舰船定位方法

3.1 舰船定位基本原理

从舰船上获取到的某个天体的天体高度是舰船的经纬度和该天体投影点的赤纬和格林时角的函数, 为^[14]

表 1 拟合曲线的相关系数
Table 1 Coefficient of the fitting curve

Coefficient	Value	Coefficient	Value	Coefficient	Value	Coefficient	Value	Coefficient	Value	Coefficient	Value
α_0	1.52	α_{10}	4.50	β_1	2.92	β_{11}	5.07	c_1	-3.73×10^{-1}	c_{11}	5.65×10^{-10}
α_1	4.87	α_{11}	4.50	β_2	5.81	β_{12}	5.05	c_2	4.33×10^{-2}	c_{12}	5.97×10^{-9}
α_2	4.58	α_{12}	4.49	β_3	5.33	β_{13}	5.03	c_3	-5.18×10^{-3}	c_{13}	-2.70×10^{-9}
α_3	4.57	α_{13}	4.48	β_4	5.25	β_{14}	5.01	c_4	3.78×10^{-4}	c_{14}	8.45×10^{-10}
α_4	4.55	α_{14}	4.47	β_5	5.20	β_{15}	4.99	c_5	8.90×10^{-5}	c_{15}	-2.08×10^{-10}
α_5	4.54	α_{15}	4.46	β_6	5.17	β_{16}	4.96	c_6	-4.74×10^{-5}	c_{16}	4.00×10^{-11}
α_6	4.53	α_{16}	4.45	β_7	5.15	β_{17}	4.94	c_7	1.54×10^{-5}	c_{17}	-4.60×10^{-12}
α_7	4.52	α_{17}	4.44	β_8	5.13	β_{18}	4.91	c_8	-3.79×10^{-6}	c_{18}	-5.63×10^{-13}
α_8	4.52	α_{18}	4.42	β_9	5.11	β_{19}	4.89	c_9	7.39×10^{-7}	c_{19}	5.72×10^{-13}
α_9	4.51	α_{19}	4.41	β_{10}	5.09	c_0	3.69	c_{10}	-1.05×10^{-7}	c_{20}	-2.30×10^{-13}

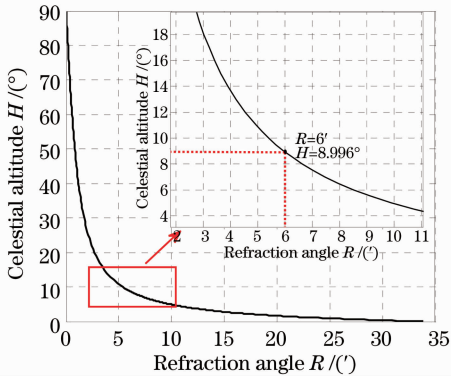


图 4 天体高度 H 与折射角 R 之间函数关系
Fig. 4 Relationship between H and R

$$\begin{cases} H = \arcsin(\sin \varphi \sin \Delta + \cos \varphi \cos \Delta \cos t_{LHA}), \\ t_{LHA} = t_{GHA} + \lambda \end{cases}, \quad (12)$$

式中 λ 和 φ 分别为舰船的经度和纬度, Δ 和 t_{GHA} 分别为天体的赤纬和格林时角, 天体的地方时角 t_{LHA} 为格林时角 t_{GHA} 和舰船经度 λ 之和, 且经度为东经, λ 取正, 经度为西经, λ 取负. Δ 和 t_{GHA} 可通过观测时间从恒星行星星历表中获得.

通过获取多颗天体的天体高度值, 可得到一组方程, 传统方法是利用解析高度差等方法解算得到舰船的位置. 但是间接获取天体高度的过程中会受到星敏传感器测量误差和大气折射模型的模型误差的影响, 从而导致舰船定位精度下降, 因此可以采用卡尔曼滤波(UKF)方法结合舰船的运动模型来降低上述误差的影响, 提高定位精度.

3.2 舰船自主定位滤波方法及系统数学模型

基于星光折射间接获取天体高度的舰船自主定位工作流程如图 5 所示, 由测量模块、系统模型模块和滤波解算模块三部分组成, 通过第 2 节介绍的方法得到天体高度值, 然后利用 UKF 算法将天体高度值与舰船运动模型(系统状态模型)和测量模型有效结合, 最终解算得到舰船的位置信息.

以静止的舰船为例进行研究, 其状态模型为

$$\begin{bmatrix} \dot{\lambda} \\ -\dot{\varphi} \end{bmatrix} = 0. \quad (13)$$

使用天体高度 H 作为观测量, 则系统的测量模型由(12)式得到为

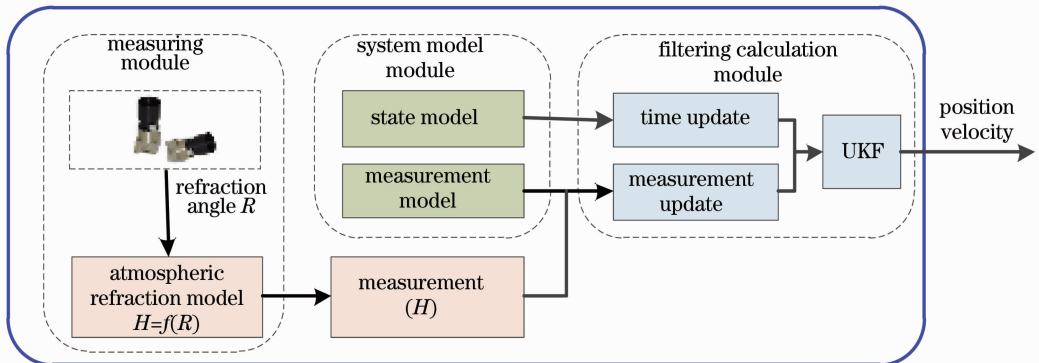


图 5 基于星光折射的舰船定位工作流程
Fig. 5 Flow chart of vessel positioning based on stellar refraction

$$Z = H = \arcsin[\sin \varphi \sin \Delta + \cos \varphi \cos \Delta \cos(t_{\text{GHA}} + \lambda)] + v_{\text{H}}, \quad (14)$$

式中 v_{H} 为天体高度测量误差。

由于(14)式看出,测量模型为非线性,因此采用UKF方法^[19]进行导航解算。

4 计算机仿真与分析

4.1 仿真条件

仿真中,静态舰船真实位置为 $\lambda_0 = 121^\circ 39' 17'' \text{E}$, $\varphi_0 = 38^\circ 5' 44'' \text{N}$ 。星敏感器 I、II 视场均为 $5^\circ \times 5^\circ$,精度

为 $1''$,采样频率为 5 Hz。令星敏感器 II 观测天体高度约为 6° ,标准导航星表采用 Tycho2 星表。

4.2 仿真结果

利用 UKF 方法对舰船位置进行估计,图 6(a)为舰船估计轨迹,图 6(b)为舰船经纬度的估计误差,图 6(c)为最终定位误差。从图 6(b)、(c)可以看出,滤波收敛后,纬度平均估计误差为 $0.4300''$ (13.2962 m),经度平均估计误差为 $0.7414''$ (18.0428 m),平均定位误差约为 23 m,最大定位误差小于 80 m。

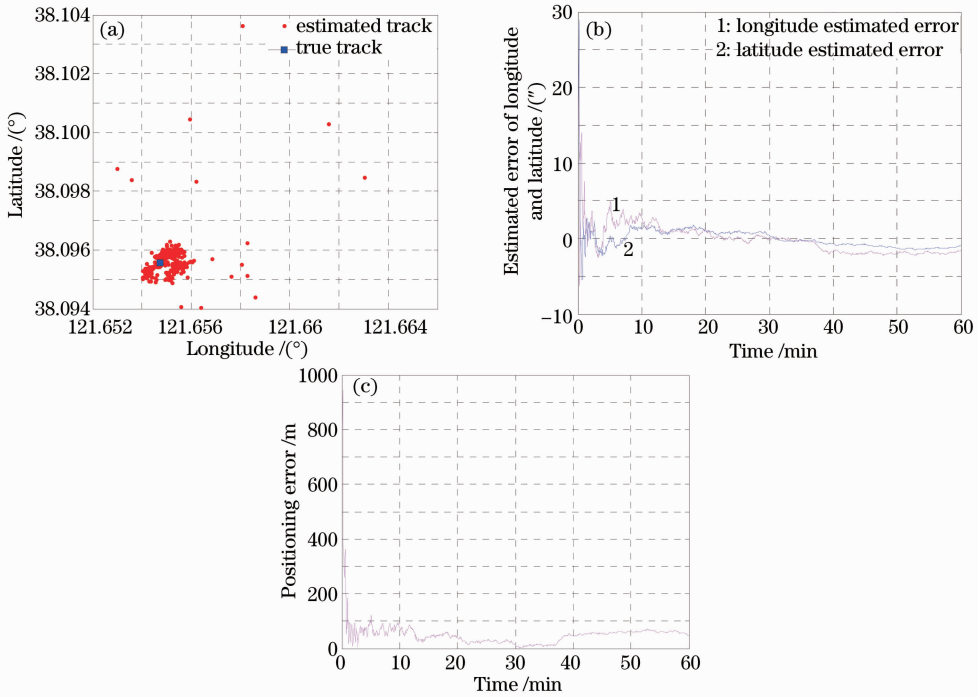


图 6 (a)舰船估计轨迹;(b)经纬度估计误差;(c)最终定位误差

Fig. 6 (a) Vessel estimated track; (b) estimated error of longitude and latitude; (c) positioning error

4.3 折射角测量精度对定位精度的影响

由(7)式可知,天体高度 H 的获取精度直接依赖于折射角 R 的测量精度,因此有必要分析 R 的测量精度对舰船定位精度的影响。图 7 和表 2 给出了当 R 的测量精度在 $1'' \sim 7''$ 时的舰船定位结果。从仿真结果可知,折射角 R 的测量精度对舰船定位精度影响非常显著。

4.4 天体高度对定位精度的影响

本文方法是利用获取折射角来计算天体高度,所以侧重选取高度较低、折射较大的天体,因此有必要分析不同观测天体高度条件下该方法的导航性能。选取一组不同天体高度的导航星进行仿真,表 3 和图 8(a)给出了在 4.1 节仿真条件下,当星敏感器 II 观测高度为 $6^\circ \sim 16^\circ$ 时的仿真结果,图 8(b)给

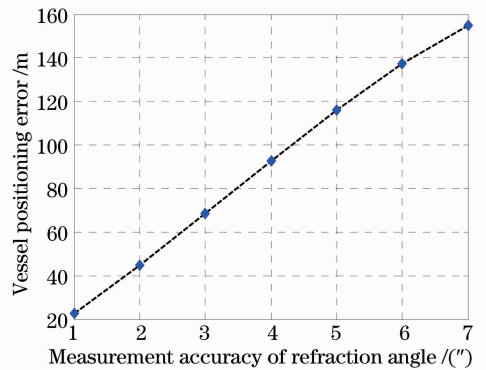


图 7 R 的测量精度对舰船定位精度的影响

Fig. 7 Impact of accuracy of R on vessel positioning accuracy

出了 $1''$ 折射角测量误差在不同天体高度上引起的 H 计算误差。

表 2 不同 R 测量精度条件下的舰船定位仿真结果
Table 2 Simulation results under different measurement accuracies of R

Measurement accuracy of $R / (")$	Calculation error of $H / (")$	Estimated error of latitude $(")$	Estimated error of longitude $(")$	Average positioning error / m
1	36.7580	0.4300	0.7414	22.6808
2	73.6240	0.8105	1.5068	44.9226
3	110.6703	1.2800	2.2539	68.4306
4	147.9800	1.8199	2.9568	92.4796
5	185.6568	2.4004	3.5789	115.9944
6	223.8373	2.9795	4.0771	137.4580
7	262.7058	3.4997	4.4324	154.9756

表 3 不同天体高度条件下的仿真结果
Table 3 Simulation results under different H

$H / (^\circ)$	Calculation error of $H / (")$	Estimated error of latitude $(")$	Estimated error of longitude $(")$	Average positioning error / m
6	36.7580	0.4300	0.7414	22.6808
8	77.8558	0.3222	0.9389	25.6589
10	116.8727	0.8885	0.6794	33.5271
12	161.9367	1.4477	0.7976	51.2543
14	214.1105	2.0227	0.7765	66.9791
16	276.2325	2.9877	4.4531	155.6663

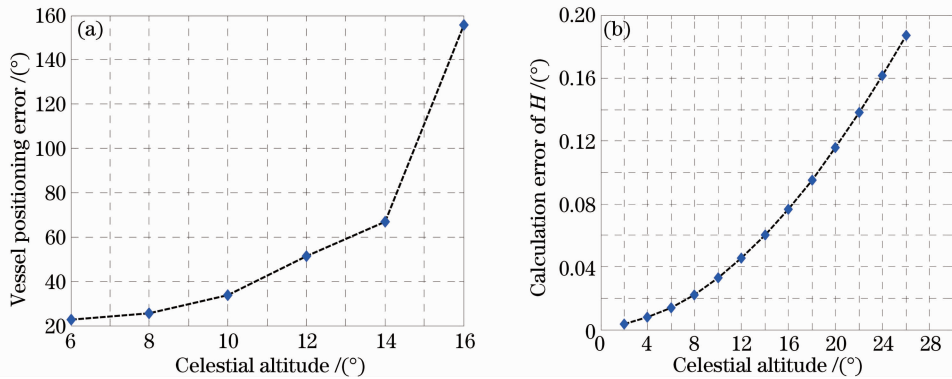


图 8 (a)天体高度对舰船定位精度的影响；(b)不同天体高度的计算误差

Fig. 8 (a) Influence of celestial altitude on vessel positioning accuracy; (b) variation of celestial altitude calculation error with altitude

从表 3 和图 8(a)可以看出,在相同折射角测量误差条件下,观测导航星的天体高度越高,舰船定位误差越大,这是由折射角和天体高度之间的非线性关系导致,如图 4 所示。随着天体高度的递增,相同折射角误差引起的天体高度计算误差也在非线性递增,如图 8(b)所示。

4.5 大气折射模型精度对定位精度的影响

本文所提方法是基于(7)式根据测量得到的折射角 R 计算天体高度 H ,而(7)式是在大气折射模

型基础上得到的,因此大气折射模型的精度直接影响 H 的获取精度,进而影响舰船定位精度,简单分析大气折射模型精度对导航定位精度的影响。因为模型误差可以等效为天体高度的计算误差,分析不同 H 计算误差对定位精度的影响,表 4 给出了在 4.1 节仿真条件下, H 计算误差分别为 $1'' \sim 7''$ 时的仿真结果。从仿真结果可知,当 H 计算误差为 $5''$ 时,舰船定位误差超出 100 m,因此在实际应用中,大气折射模型的精度应该保持在 $4''$ 以内。

表 4 折射模型精度对定位精度的影响
Table 4 Simulation results under different H

Calculation error of $H / (")$	Estimated error of latitude $/(")$	Estimated error of longitude $/(")$	Average positioning error /m
1	0.7890	0.4179	26.4316
2	1.4200	0.8642	48.6865
3	2.0510	1.3106	70.9900
4	2.6821	1.7569	93.3073
5	3.3131	2.2033	115.6303
6	3.9441	2.6497	137.9563
7	4.5751	3.0960	160.2841

5 结 论

针对如何提高天体高度的获取精度进而提高舰船的定位精度,提出一种利用折射角间接获取天体高度值的新方法,计算机仿真结果表明在折射角测量精度为 $1''$,观测天体高度约为 6° 时,其天体高度值的获取精度可达 $37''$,舰船平均定位精度约为 23 m ,是一种可行的舰船自主定位方法。

利用折射角 R 以及 R 与天体高度 H 之间的大气折射模型来间接计算得到天体高度 H ,因此天体高度值 H 的获取精度取决于折射角 R 的测量精度和大气模型的精度。仿真分析结果表明 R 的测量精度对 H 的获取精度以及舰船定位精度有非常显著的影响。实际应用中折射角 R 的测量精度依赖于星敏感器的精度、星敏器安装精度以及星图识别的精度,目前这三项技术都能达到较高的精度, Ball 公司于 2004 年推出的 HAST 星敏器精度可达 $0.2''(1\sigma)$,星敏器安装误差估计精度也可达到角秒级^[20],文献^[21]的研究成果能达到 99.93% 的星图识别成功率。因此可以认为折射角的测量精度应该可以满足未来导航定位的要求。

天体高度和折射角之间的数学模型,即大气折射模型是另一个重要的影响因素,该模型受环境如温度、压力和大气密度等影响较大。虽然很多关于大气折射模型的研究^[22~24]已极大提高了大气折射模型的精度,如文献^[22]利用探空气球的资料验证其公式精度在天体高度角为 5° 时能达到 $1''$,但是所有基于探空层结计算折射角的方案都是基于球面分层大气的,如果在水平方向大气非均匀,那么还会有相当大的误差。此外,目前的研究主要是利用观测的视高度(或视顶距)修正折射角,反过来,利用折射角修正高度究竟能达到何等精度仍需要深入研究。

参 考 文 献

1 Wang Anguo. Modern celestial navigation and the key techniques

- [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, **35**(12): 2347~2353
 王安国. 现代天文导航及其关键技术[J]. *电子学报*, 2007, **35**(12): 2347~2353
- 2 R. Hugh, M. Louis, A. Robert *et al.*. Next generation marine precision navigation system [J]. *IEEE Position Location and Navigation Symposium*, 2000. 200~206
- 3 M. Faraklioti, M. Petrou. Multiresolution versus single resolution horizon picking in 2D seismic images [C]. *SPIE*, 2004, **5238**: 50~61
- 4 Zeng Wenjing, Wan Lei, Zhang Tiedong *et al.*. Fast detection of sea line based on the visible characteristics of marine image [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0111001
 曾文静, 万磊, 张铁栋等. 基于海面可见光图像的海界线快速检测 [J]. *光学学报*, 2012, **32**(1): 0111001
- 5 Tang Hongyu, Liu Weiting. Investigation of water-sky-line signal processing in astronomic navigation system [J]. *J. Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2006, **20**(1): 61~64
 唐红雨, 刘维亭. 天文导航用水天线图像处理的技术研究 [J]. *江苏科技大学学报(自然科学版)*, 2006, **20**(1): 61~64
- 6 Xu Bo. High-Precision Fiber-Groscope Inertial Navigatoion System Technique for Warship [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010. 44~78
 徐博. 舰船高精度光纤捷联惯性导航系统技术研究 [D]. 哈尔滨工程大学, 2010. 44~78
- 7 Han Yanli, Ren Jiancun, Lu Gang. The Border between sky and sea extracting based on wavelet transform [J]. *J. Naval Aeronautical Engineering Institute*, 2005, **20**(3): 338~340
 韩艳丽, 任建存, 卢刚. 一种基于小波变换的天水线提取算法 [J]. *海军航空工程学院学报*, 2005, **20**(3): 338~340
- 8 Yang Chuping, Liu Yan, Li Hai. Radial distortion distribution in optical imaging measured by wavelet phase analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(9): 0912001
 杨初平, 刘岩, 李海. 小波相位分析测量成像径向畸变 [J]. *光学学报*, 2012, **32**(9): 0912001
- 9 Huang Yingdong, Fan Ningjun, Li Jie. A method of ship position based on sea-sky-line detection [J]. *J. Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2008, **28**(5): 286~288
 黄英东, 范宁军, 李杰. 一种基于海天线检测的舰船定位方法 [J]. *弹箭与制导学报*, 2008, **28**(5): 286~288
- 10 Dai Dongkai, Wang Shengshu, Hu Chunsheng *et al.*. Calibration and attitude measurement technology based on astronomical observation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(3): 0312005
 戴东凯, 王省书, 胡春生等. 基于天文观测的相机标定及姿态测量技术研究 [J]. *光学学报*, 2012, **32**(3): 0312005
- 11 Li Yunbo, Fang Zheng, Zhang Yonggang *et al.*. Refraction effects on electro-optical target characteristic in near sea surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0401001
 李云波, 方正, 张永刚等. 近海面异常折射对光电探测目标特征的影响分析 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(4): 0401001

- 12 Zhang Hongyi, Liu Jingmin. Error-correction method of atmospheric refraction on elevation angle [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2008, **23**(4): 25~27
张宏艺, 刘敬民. 俯仰角大气折射误差修正方法[J]. *光电技术应用*, 2008, **23**(4): 25~27
- 13 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
- 14 Fang Jiancheng, Ning Xiaolin. The Principles and Applications of Celestial Navigation [M]. Beijing: Beihang University Press, 2006. 69~103
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. 69~103
- 15 M. E. Thomas, R. I. Joseph. Astronomical refraction [J]. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 1996, **17**(3): 279~284
- 16 Hai Feng, Yuan Jiahu, Mao Yuguo. Research on rapid star map matching algorithm [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1998, **25**(6): 70~74
海峰, 袁家虎, 毛羽国. 快速星图匹配算法的研究[J]. *光电工程*, 1998, **25**(6): 70~74
- 17 Mao Wei, Tie Qiongxian, Yang Lei. Astronomical Atmospheric Refraction [M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2004
冒蔚, 铁琼仙, 杨磊. 天文大气折射[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2004
- 18 Yan Qingjin. Numerical Analysis [M]. Beijing: Beihang University Press, 2006. 135~141
颜庆津. 数值分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006. 135~141
- 19 S. Julier, J. Uhlmann, H. F. Durrant-Whyte. A new method for the nonlinear transformation of means and covariances in filters and estimators [J]. *IEEE. Trans. Automatic Control*, 2000, **45**(3): 477~482
- 20 Zhao Changshan, Qin Yongyuan, Xia Jiahe. Improving online autonomous calibration of SINS/star sensor integrated system [J]. *J. Northwestern Polytechnical University*, 2008, **26**(5): 631~635
赵长山, 秦永元, 夏家和. SINS/星敏感器组合导航方案研究[J]. *西北工业大学学报*, 2008, **26**(5): 631~635
- 21 Jia Hui. Star Centroid Estimation and Star Identification of High Accuracy Star Tracker [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010. 111~114
贾辉. 高精度星敏感器星点提取与星图识别研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010. 111~114
- 22 Yan Haojian. Improvement of astronomical refraction by the mapping function [J]. *Acta Astronomica Sinica*, 1998, **39**(2): 113~121
严豪健. 映射函数对天文大气折射的改进[J]. *天文学报*, 1998, **39**(2): 113~121
- 23 Mao Wei, Yang Lei, Tie Qiongxian. Atmospheric refraction and building a local observational model [J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2009, **50**(2): 180~188
冒蔚, 杨磊, 铁琼仙. 测定瞬时天文大气折射值和建立本地实测模型[J]. *天文学报*, 2009, **50**(2): 180~188
- 24 Zhang Hanwei, Ding Anmin, Lei Weiwei. Series expansion of astronomical atmospheric refraction [J]. *J. Geodesy and Geodynamics*, 2011, **31**(4): 60~63
张捍卫, 丁安民, 雷伟伟. 天文大气折射的级数展开式[J]. *大地测量与地球动力学*, 2011, **31**(4): 60~63

栏目编辑: 王晓琰