

基于惯性系重力的高精度水平姿态确定方法

林萌萌¹, 于滨凯¹, 关 劲², 王秋滢¹, 程正生³

(1. 哈尔滨工程大学 自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 海军装备部, 北京 100036;

3. 中国船舶重工集团第 707 研究所, 江西 九江 332000)

摘 要:针对舰载星敏感器定位需依赖外部提供的水平姿态基准, 提出了一种基于惯性系重力的高精度水平姿态确定方法。该方法利用星敏感器输出的载体系相对于惯性系的姿态转换矩阵, 将加速度计的测量信息投影转换至惯性坐标系, 设计自适应滤波器对加速度计投影后信息进行滤波, 最大限度地对风浪和加速度计的噪声等外部干扰信息进行剔除, 根据提取出的较纯净的重力矢量信息解算高精度的水平姿态, 把这一高精度水平姿态作为星敏感器定位所需外部水平基准。仿真结果表明, 该方法能有效剔除舰船海上航行时的各种扰动信息, 水平姿态精度较高且误差不随时间积累, 进而提高了星敏感器的定位精度, 满足舰船长时间海上航行对于导航精度的要求。

关键词:星敏感器; 水平基准; 自适应滤波器; 加速度计; 重力矢量

中图分类号: TN29; U666. 11 **文献标识码:** A

A Method of High-precision Horizontal Attitudes Based on the Gravity in the Inertial Coordinate System

LIN Mengmeng¹, YU Binkai¹, GUAN Jin², WANG Qiuying¹, CHENG Zhengsheng³

(1. College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. Armament Department of the Navy, Beijing 100036, China;

3. China Shipping Heavy-duty Machine Group Co. 707 Research Institute, Jiujiang 332000, China)

Abstract: Aimed at the positioning dependence of shipboard star sensor on external horizontal attitudes, a method of high-precision horizontal attitudes based on the features of gravity in the Inertial coordinate system was put forward. Making use of the output of star sensor, the attitude transformation matrix in the carrier coordinate system was related to the one in Inertial coordinate system. The measurement information projection of the accelerometer, filtering by adaptive filter, was then converted in the Inertial coordinate system, which could eliminate external interference like the noise of wind and the waves or the accelerometer. At last the more pure gravity information was utilized to calculate high-precision horizontal attitudes, which would be the external horizontal standard needed for star sensor positioning. The simulation results showed that this method could calculate the horizontal disturbance information of the ship effectively. The horizontal precision was high without error accumulation. This method increased the location precision of the star sensor, which could well meet the requirements of navigation precision of ship for long-time sailing on the sea.

Key words: star sensor; horizontal reference; adaptive filter; accelerometer; gravity vector

0 引言

星敏感器(星跟踪器)是一个电荷耦合器件(CCD)的传感器,其工作原理是以天球上的恒星作为参照物,利用星相机实时拍摄星图,经过质心提取、星图识别和姿态确定等一系列计算,确定出星敏

感器光轴在惯性空间的瞬时指向,不需任何外部信息即可确定星敏感器相对惯性空间的姿态^[1]。

舰载星敏感器可实时输出载体系相对于惯性系的姿态,在已知舰船实时水平姿态的条件下,可确定舰船的地理位置,即实现了星敏感器的定位过程,这

收稿日期:2014-06-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51379042);中央高校基本科研业务基金资助项目(IIEUCFQ1404)

作者简介:林萌萌(1990-),女,黑龙江哈尔滨人,硕士生,主要从事惯性测量单元/星敏感器的组合导航技术的研究。E-mail: 973311494@qq.com。关劲(1962-),男,高级工程师,主要从事惯性技术研究和管理工作。E-mail: LJS19672003@163.com。

一外部水平姿态基准信息一般由惯性导航系统提供,进而星敏感器的定位精度严重依赖于惯性导航系统水平基准信息的精度^[2]。惯性导航系统由于惯性元件误差的存在使其提供的姿态精度不能满足舰载星敏感器对高精度定位的需求,姿态误差将引入星敏感器输出的位置信息中,所以获得高精度水平姿态基准对提高天文导航的定位精度有重要意义,如何提高外部水平基准的精度是本文的重点研究内容。

1 基于惯性系重力的高精度水平姿态确定方法

基于惯性系重力的高精度水平姿态确定方法:首先根据重力矢量在惯性空间的三轴投影信息确定地理坐标系相对于惯性坐标系的姿态转换矩阵,然后结合星敏感器输出的载体坐标系相对于惯性系的姿态转换矩阵,从而确定舰船的实时水平姿态信息即星敏感器定位所需的高精度水平姿态基准。图1为本文水平姿态确定方法的原理示意图。

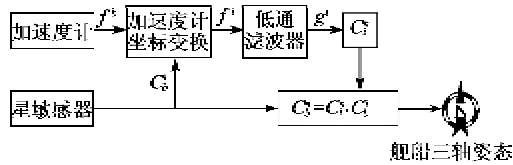


图1 基于惯性系重力的水平姿态测量原理图

假定某一时刻载体静止且忽略加速度计的噪声,此时加速度计测量的比力即为重力加速度。根据星敏感器输出的载体坐标系相对于惯性坐标系的姿态转换矩阵 C_b^i ,将加速度计采集的重力矢量信息 f^b 投影转换至惯性坐标系,即

$$f^i = C_b^i f^b \quad (1)$$

已知重力矢量在惯性系下具有“缓慢漂移”的特性,即惯性系下的重力矢量运动确定了一个主轴与地球旋转轴一致的锥体^[3]。重力矢量在赤道平面的漂移角 α 和重力矢量与赤道平面的夹角 β 的示意图如图2所示。根据重力矢量在惯性空间的三轴投影确定出 α 和 β ,进而根据 α 和 β 可得地理坐标系与惯性坐标系之间的转换矩阵 C_i^g 为

$$C_i^g = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin \beta & \cos \beta \\ 0 & -\cos \beta & \sin \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\alpha = \tan^{-1}(g_x^i / g_y^i) \quad (3)$$

$$\beta = \tan^{-1}[g_z^i / \sqrt{(g_x^i)^2 + (g_y^i)^2}] \quad (4)$$

式中 g_x^i, g_y^i, g_z^i 分别为重力加速度在惯性系的 x, y 和 z 轴投影。根据星敏感器输出的载体坐标系相对于 C_b^i 可得舰船的实时姿态转换矩阵 C_b^i 为

$$C_b^i = C_i^a C_b^a \quad (5)$$

根据 C_b^i 中的元素确定出舰船的实时水平姿态信息,即

$$\begin{cases} \theta = \arcsin c_{32} \\ \gamma = \arctan(-c_{31} / c_{33}) \end{cases} \quad (6)$$

式中: θ 和 γ 分别为舰船的实时纵摇角和横摇角; c_{ij} 为 C_b^i 的第 i 行和第 j 列。

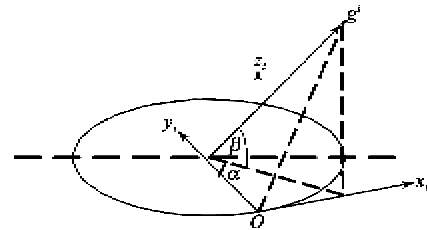


图2 惯性空间内重力慢漂运动

通过对本文提出的基于惯性系重力的高精度水平姿态确定方法分析可看出,该方法需假设载体当前时刻静止且忽略加速度计的噪声等影响,然而实际中舰船海上航行受风浪等影响产生扰动加速度,同时加速度计的噪声也会于扰动加速度计的输出生成各种干扰信息。因此,如何有效地分离加速度计测量的比力中存在的扰动加速度^[4],实现对重力矢量的准确获取成为本文提出的高精度姿态确定方法得以实现的关键。

2 重力矢量的获取

2.1 引入自适应滤波器的必要性

舰船系泊或者匀速航行时,受风浪和人为因素干扰,加速度计测量的比力信息除重力矢量外,还有干扰加速度等其他信息。将捷联安装于舰船上的加速度计采集到的信息,利用星敏感器输出的 C_b^i 转换至惯性坐标系为

$$f^i = g^i + a^i + \Delta^i \quad (7)$$

式中: g^i 为重力矢量在惯性系的投影; a^i 为扰动加速度; Δ^i 为加速度计误差,包括零偏偏差和测量随机噪声等。

引入一种处理工具对加速度计输出信息进行处理非常必要,一般方法是利用数字低通滤波器对加速度计输出进行滤波,滤掉高频的干扰加速度,但舰

船实际航行中会遇到各种不确定性干扰,很多扰动预测难且随时间在不断变化,同时,加速度计测量噪声属于全频带信号,所以仅使用固定频率的低通滤波器或陷波滤波器不能将干扰信息最大限度地剔除,而不纯净的重力矢量信息必然会导致较大的水平姿态误差,进而影响星敏感器的定位精度。

本文选择自适应滤波器作为提取重力信息的处理工具,在输入信号统计信息未知或输入信号统计特性时变的情况下,自适应滤波器均可得到较好的滤波效果,且可自动迭代和调节自身的参数,满足某种设定准则的要求,进而实现最优滤波,使输出信号更接近于希望得到的期望信号^[5]。图 3 为自适应滤波器的结构图。

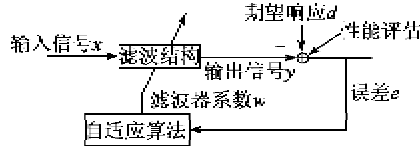


图 3 自适应滤波器的基本构成

由图 3 可看出,自适应滤波器一般由滤波器结构部分和算法部分构成。滤波器结构多采用有限脉冲响应滤波器(FIR)横向结构,而算法一般是根据某种准则或某种代价函数来决定如何修改调节滤波器自身的系数,常用的算法有最小均方算法(LMS)、最小高阶均方算法(LMF)等。由于 LMS 算法具有计算量小,易实现,不依赖模型和性能稳健等优点而被广泛采用,本文采用 LMS 算法利用 Matlab 实现自适应滤波器^[6]。LMS 算法流程如下:

已知滤波器的阶数为 M , 给定 n 时刻的抽头输入向量 $x(n)=[x(n), x(n-1), \dots, x(n-M+1)]^T$, n 时刻的期望响应 $d(n)$ 。则

- 1) 滤波器的输出响应 $y(n)=w^T(n)x(n)$ 。
- 2) 误差估计 $e(n)=d(n)-y(n)$ 。
- 3) 估计误差自动调节滤波器参数 $w(n+1)=w(n)+\beta(n)e(n)x(n)$ 。

根据实际需要,本文的步长初值设为 $\beta = 0.0001$, 权值初值设为 0, $x(n)$ 为自适应滤波器的输入信号,本文中其为加速度计的测量输出, $d(n)$ 为期望响应,即理想重力矢量信息, $y(n)$ 为自适应滤波器的输出信号,认为其为相对纯净的重力矢量信息。利用滤波后信息根据上述基于惯性系重力的高精度水平姿态确定方法确定出星敏感器定位所依

赖的水平姿态基准。

3 基于惯性系重力的高精度水平姿态确定方法仿真试验分析

船舶匀速直航状态下,对基于惯性系重力的高精度水平姿态确定方法进行仿真,仿真总时间为 2.5 h;地球半径 $R_e=6\ 378\ 393\ \text{m}$;重力加速度 $g_0=9.780\ 49\ \text{m/s}^2$;三轴加速度计零偏为 $1 \times 10^{-4} g_0$;三轴加速度计测量噪声认为是零均值白噪声;纬度为 $45.779\ 6^\circ$;经度为 $126.670\ 5^\circ$;速度为 $10\ \text{m/s}$ 。

载体作三轴摇摆运动的运动模型为

$$\theta = \theta_m (\sin \omega_p t + \phi_p) + \theta_k \quad (8)$$

$$\gamma = \gamma_m (\sin \omega_r t + \phi_r) + \gamma_k \quad (9)$$

式中: θ_m, γ_m 分别为摇摆纵摇和横摇的幅值,均为 5° ; ω_p, ω_r 分别为摇摆角频率、摇摆周期, $\omega_p = 10\ \text{s}$, $\omega_r = 8\ \text{s}$; ϕ_p, ϕ_r 为初始相位; θ_k, γ_k 分别为纵、横摇初值,均设为 0° 。

载体 3 个方向的振荡运动假设为正弦运动,其运动模型分别为

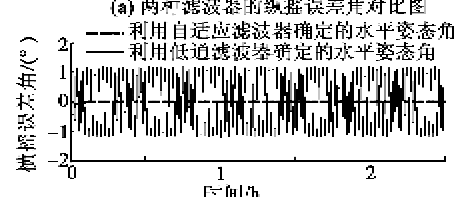
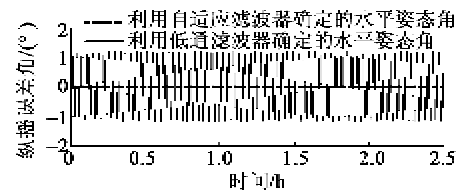
$$a_E = a_{Em} (\sin \omega_E t + \phi_E) \quad (10)$$

$$a_N = a_{Nm} (\sin \omega_N t + \phi_N) \quad (11)$$

$$a_U = a_{Um} (\sin \omega_U t + \phi_U) \quad (12)$$

式中: a_{Em}, a_{Nm}, a_{Um} 分别为东向、北向和天向的振荡幅值,这里设为 $0.2\ \text{m}$; $\omega_E, \omega_N, \omega_U$ 分别为振荡角频率,这里的振荡周期分别设为 $10\ \text{s}, 8\ \text{s}$ 和 $6\ \text{s}$; ϕ_E, ϕ_N 和 ϕ_U 分别为初始相位,这里设定为随机值。

本文作者分别利用低通滤波器和自适应滤波器对重力信息进行提取,其确定的水平姿态误差对比曲线如图 4 所示。图 5 为利用自适应滤波器确定的水平姿态误差角局部放大图。



(a) 两种滤波器的纵摇误差角对比图
(b) 两种滤波器的横摇误差角对比图
图 4 水平姿态误差对比图

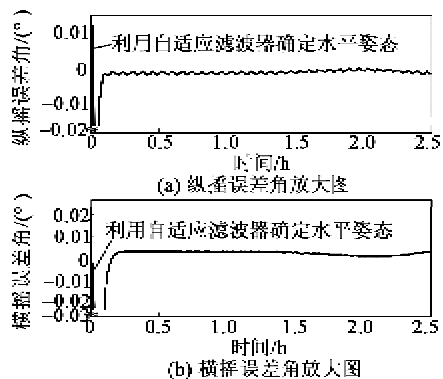


图5 利用自适应滤波器确定水平姿态误差放大图

由图4可看出,利用低通滤波器处理信号产生较大的水平姿态误差,误差约为 1° 。利用自适应滤波器对加速度计输出信息进行过滤后确定的姿态,误差约为 0.005° 。通过对比发现,数字低通滤波器不能对重力信息进行有效提取,有干扰的重力信息会带来较大的水平姿态误差,而自适应滤波器能对干扰加速度和加速度计测量噪声产生较大的抑制作用,从而得到更“纯净”的重力信息,满足了舰载星敏感器长时航行的导航需求。

4 结论

本文提出了基于惯性系重力的高精度水平姿态确定方法,该方法根据船舶海上航行的所遇到的实际情况采用自适应滤波器对加速度计输出信号进行处理。仿真结果表明,自适应滤波器很好地从加速度计的测量信息中获取重力信息,与低通滤波器相比,其对各种干扰和白噪声等起到了较大的抑制作用。然而从仿真图也看出利用自适应滤波器作为提取重力信息的工具有以下两个问题:

1) 由于滤波器步长的选取同时决定滤波器的收敛速度和稳态误差,二者具有矛盾关系,所以在适

应船舶海上航行的情况下如何获得更快地收敛速度及较小的稳态误差是以后研究的问题之一。

2) 由图5可看出,姿态误差存在小幅度振荡。对于LMS算法,在权值迭代到最佳值后,其校正值不为0继续随机起伏,从而权值在最优解的一个小范围内继续随机浮动,即使LMS算法收敛后仍存在一定的稳态误差。因而在保证导航精度的前提下,如何能获得更小的失调,将是后续研究的重点之一。

参考文献:

- [1] 朱长征. 基于星敏感器的星模式识别算法及空间飞行器姿态确定技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2004.
- [2] 何炬. 国外天文导航技术发展综述[J]. 舰船科学技术, 2005, 27(5): 91-96.
HE Ju. Survey of overseas celestial navigation technology development[J]. Ship Science and Technology, 2005, 27(5): 91-96.
- [3] GAIFFE T, COTTREAU Y, FAUSSOT N, et al. Highly compact fiber optic gyrocompass for applications at depths up to 3000 meters[C]//Tokyo: Underwater Technology, 2000. UT 00. Proceedings of the 2000 International Symposium on, IEEE, 2000: 155-160.
- [4] 孙伟, 孙枫. 重力矢量在SINS快速系泊对准中的应用研究[J]. 压电与声光, 2013, 35(3): 368-371.
SUN Wei, SUN Feng. Research on the fast mooring self-alignment for SINS based on gravity[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2013, 35(3): 368-371.
- [5] 李宁. LMS自适应滤波算法的收敛性能研究与应用[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2009.
- [6] 夏晓. 自适应滤波器中LMS算法的研究及应用[D]. 北京:北京邮电大学, 2013.

(上接第208页)

- [3] 张实华, 张远威. 一种计算屏蔽微带线的近似方法[J]. 四川轻化工学院学报, 2002, 15(1): 54-57.
ZHANG Shihua, ZHANG Yuanwei. A approximate method to calculate the shielded microstrip line[J]. Journal of Sichuan Institute of Light Industry and Chemical Technology, 2002, 15(1): 54-57.
- [4] 雷振亚, 明正峰, 李磊, 等. 微波工程导论[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 60-65.
- [5] 路宏敏, 吴保义, 姚志成, 等. 微带线直角弯曲最佳斜

切率研究[J]. 西安电子科技大学学报, 2009, 36(5): 885-889.

- LU Hongmin, WU Baoyi, YAO Zhicheng, et al. Research on the optimal percentage miter of the microstrip right angle bend[J]. Journal of Xidian University, 2009, 36(5): 885-889.
- [6] CHADHA R, GUPTA K C. Compensation of discontinuities in planar transmission lines [J]. Microwave Theory and Techniques, 1982, 30(12): 2151-2156.