

重力辅助惯性导航中延时误差补偿算法研究

姜鑫¹,周广涛¹,石惠文¹,程正生²

(1. 哈尔滨工程大学 自动化学院,黑龙江 哈尔滨 150001;2. 中船重工第七〇七研究所,江西 九江 332000)

摘 要:在重力辅助惯性导航系统中,由于重力仪的输出存在时间延迟,造成了观测信息滞后,采用常规扩展卡尔曼滤波算法难以保证滤波的精度。因此,该文首先建立了适应扩展卡尔曼滤波的数学模型,将重力仪实测重力异常与惯导系统指示位置的地图重力异常值之差作为量测信息;然后利用厄特弗斯效应计算重力仪的延迟时间;在此基础上,提出了一种延迟误差补偿算法,将其应用到重力辅助惯性导航系统中。仿真结果表明,该算法能有效地降低时间延迟给系统造成的不利影响,从而提高重力辅助惯性导航系统的定位精度。

关键词:惯性导航系统;重力仪;扩展卡尔曼滤波;厄特弗斯效应;时间延迟补偿

中图分类号:TN967.1;TM921.52;P223

文献标识码:A

Research on Time Delay Compensation Algorithm for Gravity Aided Inertial Navigation System

JIANG Xin¹, ZHOU Guangtao¹, SHI Huiwen¹, CHENG Zhengsheng²

(1. College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. CSIC 707 Research Institute, Jiujiang 332000, China)

Abstract: In the gravity aided inertial navigation system, the observing information exists lag due to the gravimeter output delay, conventional EKF algorithm is difficult to ensure the accuracy of filtering. To solve this problem, the mathematical model for EKF is established, in which measurement information is the difference between gravity anomaly measured by gravimeter and the values in the gravity anomaly map according to INS. The delay time of gravimeter is calculated by using of Eötvös effect. Based on which, an algorithm of time delay compensation is proposed and applied to the gravity aided inertial navigation system. The simulation results show that the algorithm can effectively reduce adversely affect by the time delay and improve the position accuracy of gravity aided inertial navigation system.

Key words: inertial navigation system(INS); gravimeter; extended Kalman filter(EKF); Eötvös effect; time delay compensation

0 引言

惯性导航系统是目前水下运载器普遍采用的导航系统,可满足水下运载器自主、长期、精确的导航要求。但惯性导航系统最大的缺点是误差随时间积累,这就需要其他导航方法对惯性导航系统(INS)进行定期修正。常用无线电导航和天文导航又无法在水下使用,而重力辅助导航是利用地球固有的地理信息,不需要接近水面向外界发出信号,是理想的水下辅助惯性导航方法。目前,重力辅助导航常用的方法之一是利用水下运载体上安装的重力仪,实时获取重力异常数据,并与已知重力异常图进行匹配,利用扩展卡尔曼滤波(EKF)实时估计载体位置。研究证明,该方法可有效地提高水下导航的精

度^[1-2]。

目前,使用的海洋重力仪存在时间延迟问题,即当前获取的重力异常值是一段之前载体所处位置的重力异常值,在重力辅助惯性导航系统中,多数情况下都未考虑时间延迟问题^[3-5]。根据实际测试,重力仪的延迟时间通常可达几十秒甚至上百秒^[6],因此,这段时间不能忽略。如何对这些延迟时间进行处理,对提高重力辅助导航的精度具有重要的意义。针对上述存在的时间延迟问题,本文首先研究了重力异常辅助惯性导航的 EKF 算法;然后对 Chekan-AM 型海洋重力仪的延迟时间进行分析;最后针对重力辅助导航中时间延迟问题提出了一种补偿方案,并对该方法进行了仿真研究。

收稿日期:2014-04-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51379042)

作者简介:姜鑫(1989-),男,山东临沂人,硕士生,主要从事惯性测量,组合导航技术的研究。通信作者:周广涛(1981-),男,黑龙江鹤岗人,讲师,博士生,主要从事惯性测量,组合导航技术的研究。

1 重力异常辅助惯性导航原理

1.1 基本原理

重力异常辅助惯性导航是利用地球重力场特征获取载体位置信息的导航技术。重力异常辅助惯性导航系统通常由 INS、重力仪和重力异常基准图组成。在载体水下航行时对经过海域利用重力仪实时获取海底重力异常数据,然后采用滤波算法估计出载体的最佳位置,即利用从事先储存的重力异常基准图获取的数据和重力仪实测的数据之差作为观测差值,估计 INS 的误差。系统的基本原理图如图 1 所示。

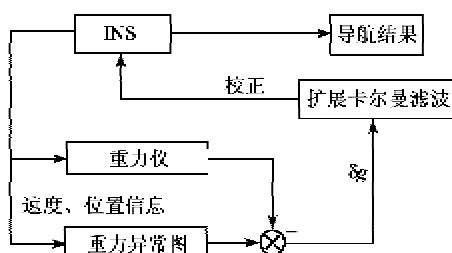


图1 重力异常辅助惯性导航基本原理

图 1 中, Δg 为在重力异常图上读取当前位置的重力异常值和重力仪的观测值的差。重力仪利用 INS 输出的速度和位置信息进行厄特弗斯校正、水平加速度校正和海洋布格修正,获取高精度的重力异常值。研究证明,INS 系统输出信息的精度完全能满足重力仪误差校正的精度要求^[7]。

1.2 状态方程与量测方程

这里选取惯导系统给的误差量作为滤波器的状态向量。状态变量由导航系统误差构成,它包含导航误差和惯性器件误差。在该模型中,取惯性/重力匹配组合导航系统的状态向量为

$$\mathbf{X} = [\delta\varphi \quad \delta\lambda \quad \delta v_N \quad \delta v_E \quad \alpha \quad \beta \quad \gamma \quad \nabla_x \quad \nabla_y \quad \epsilon_x \quad \epsilon_y \quad \epsilon_z]^T \quad (1)$$

式中: $\delta\lambda, \delta\varphi$ 分别为经度和纬度误差; $\delta v_E, \delta v_N$ 分别为东向和北向速度误差; α, β, γ 为初始的姿态误差角; $\nabla = [\nabla_x \quad \nabla_y]^T$ 为加速度计零偏; $\epsilon = [\epsilon_x \quad \epsilon_y \quad \epsilon_z]^T$ 为 3 个轴的陀螺常值漂移。系统的状态方程为^[8]

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{F}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{W}(t) \quad (2)$$

式中: $\mathbf{F}(t)$ 为状态转移矩阵; $\mathbf{X}(t)$ 为导航系统的状态向量; $\mathbf{B}(t)$ 为系统的噪声驱动矩阵; $\mathbf{W}(t)$ 为协方差矩阵 $\mathbf{Q}(t)$ 的零均值白噪声。

根据 INS 输出的位置,在重力异常图上读取当前位置的重力异常,利用两个重力异常的差值作为 EKF 的观测值。重力观测方程为

$$Z(t) = g(\lambda, \varphi) - g_m(\lambda_i, \varphi_i) = \mathbf{H}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{V}(t) \quad (3)$$

式中: $g(\lambda, \varphi)$ 为水下运载体在真实位置 (λ, φ) 处重力异常测量值,由重力仪测量得到; $g_m(\lambda_i, \varphi_i)$ 为根据 INS 得到的位置 (λ_i, φ_i) 从重力图上读出的重力值; $\mathbf{V}(t)$ 为观测噪声,包括重力仪测量误差、重力异常图制作误差和线性化误差等; $\mathbf{H}(t)$ 为重力观测矩阵。由于重力异常是位置的非线性函数,因此采用 EKF 技术进行滤波时,首先要建立重力异常与状态位置的线性化关系

$$Z(t) = \left(\frac{\partial \Delta g}{\partial \varphi} \right) \delta\varphi + \left(\frac{\partial \Delta g}{\partial \lambda} \right) \delta\lambda + \epsilon_1 \quad (4)$$

式中: $\partial \Delta g / \partial \varphi$ 和 $\partial \Delta g / \partial \lambda$ 为线性化系数,可用全平面拟合法计算得到^[9]; ϵ_1 为线性化误差。

2 Chekan-AM 海洋重力仪延迟时间分析

目前高精度的海洋重力仪为了抑制垂直加速度和高频噪声的影响,采用了强阻尼加滤波的方法。这就导致当前获取的重力异常值并不是运载体所处位置的重力异常,而是一段时间前所处位置的重力异常值。因此,对重力异常辅助惯性导航系统进行延迟时间补偿前,需测得重力仪的延迟时间。

本文利用实测重力值和厄特弗斯校正值之间的关系^[6],来确定 Chekan-AM 型海洋重力仪的延迟时间。载体在自转地球表面运动时,离心力和科氏力对安装在载体上的重力仪所产生的影响称为厄特弗斯效应。当载体作机动转向或变速运动时,厄特弗斯效应对重力仪输出的影响就会变大。我们可通过 INS 输出的纬度和速度来计算厄特弗斯校正值,这里得到的厄特弗斯校正值不存在延迟。假设航速为 10 km/h,厄特弗斯修正值随纬度 L 和航向 A 的变化如图 2 所示,可见在重力变化不是很明显的地区,厄特弗斯效应对重力测量的影响很大。因此,可通过计算实测重力值和厄特弗斯校正值峰值之间的时间差来确定重力仪的延迟时间。

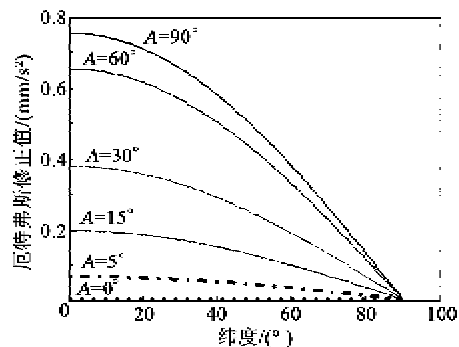


图2 厄特弗斯修正值随纬度和航向的变化

根据江上实验得到的 INS 和重力仪实测数据,验证了以上方法是可行的。图 3 为 Chekan-AM 型海洋重力仪的江上实验数据,从厄特弗斯修正值和

重力观测值的剖面上可看出厄特弗斯修正值和重力值发生变化时的时间差。利用重力观测值发生变化的时间减去厄特弗斯修正值发生变化的时间,就是重力仪的延迟时间。

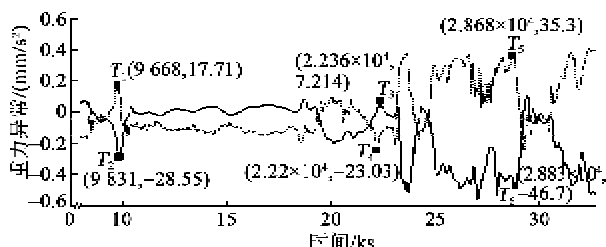


图3 Chekan-AM型海洋重力仪延迟时间分析

根据图3可知,在厄特弗斯修正值和重力观测值的剖面上的 T_1 点上,由于载体作机动运动,导致厄特弗斯修正值上升到 $17.71 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,重力读数由于厄特弗斯效应在 T_2 点降到 $28.55 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,由图可看出, T_1 和 T_2 的时间分别为9 668 s和9 831 s,两个点的时间差为163 s;相似地 T_3 、 T_4 点重力读数的时间差为160 s, T_5 和 T_6 的时间差为150 s。这个重力读数和厄特弗斯修正值之间的时间差就是重力仪的延迟时间。进行多次测量,则有

$$T_{\text{总}} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta t_i}{n} \quad (5)$$

式中: $T_{\text{总}} \approx 156 \text{ s}$ 为滞后时间; Δt_i 为第 i 次阻尼延迟时间; n 为测量次数。

3 重力辅助惯性导航系统延迟误差补偿

在滤波系统中,常用的处理测量数据延迟的一个直观方法是等延迟的测量数据到达数据处理单元后再从发生延迟的时刻到当前时刻重新进行滤波,即是重复滤波法。这样的方法可得到无量测延迟情况下相同的结果,但当测量数据延迟较大时会给系统带来极大的计算压力和数据存储的空间压力,最终会严重影响系统的实时性^[10]。在实际应用中最好的处理方法是直接使用延迟量测更新当前时刻的状态估计,使其能达到或逼近无量测延迟情况下的滤波精度。

常规一个滤波周期内的Kalman滤波可分为时间更新和量测更新两个信息更新过程。在无量测信息输出时,只进行时间更新;而在量测信息输出的时刻,同时进行卡尔曼滤波器的时间更新和量测更新。由于重力仪提供的重力信号是延迟时间 T_d 时刻前的重力值,在当前时刻前的 T_d 这段时间内,是没有实时的重力异常值进行量测更新的,因此,这段时间只进行时间更新。

设当前时刻为 m ,延迟时间长为 d 。为了得到

当前时刻的INS输出,需将滤波后的结果 $\delta \dot{x}_{m-d}(t)$ 通过Kalman滤波的状态转移矩阵 $\Phi_{m,m-d}$ 递推到当前时刻,得到 $\delta \dot{x}_m(t)$,再对当前时刻的INS输出进行误差补偿。在 d 这段时间内,相应的Kalman滤波器的时间更新方程为

$$X_{k(m)}|k(m-1) = \Phi_{k(m),k(m-1)} X_{k(m-1)} \quad (6)$$

$$P_{k(m)} = \Phi_{k(m),k(m-1)} P_{k(m-1)} \Phi_{k(m),k(m-1)}^T + \Gamma_{k(m-1)} Q_{k(m-1)} \Gamma_{k(m-1)}^T \quad (7)$$

在 d 这段时间前,使用本文第2节介绍的EKF来进行滤波,并对INS进行误差校正;当无量测信息输出时,可在每一个时刻点到来时,利用系统状态转移矩阵只进行卡尔曼滤波器的时间更新^[11]。整个计算流程如图4所示。图中, x_k 为当前时刻的导航系统状态向量, x_{k-d} 为 d 时刻前的导航系统状态向量, g_{k-d} 为 d 时刻前的重力仪观测值, $\delta \dot{x}_k(t)$ 为当前时刻的导航系统的误差量, $\delta \dot{x}_{k-d}(t)$ 为 d 时刻前的导航系统的误差量。

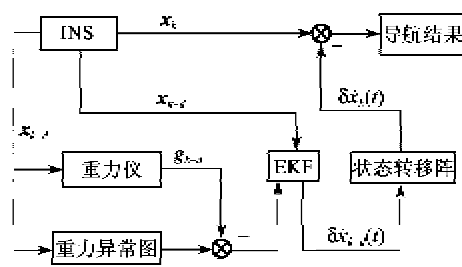


图4 延时误差补偿原理图

4 仿真分析

在理论分析的基础上,我们对重力辅助惯性导航系统进行了仿真计算,比较了未考虑时间延迟情况下与进行时间补偿后的导航精度,验证了本文所述算法的可行性。在仿真中,重力异常基准图来自EGM2008,分辨率为 $2.0' \times 2.0'$ 。仿真区域如图5所示,将模拟的真实航迹读取的重力异常作为重力仪的输出值。

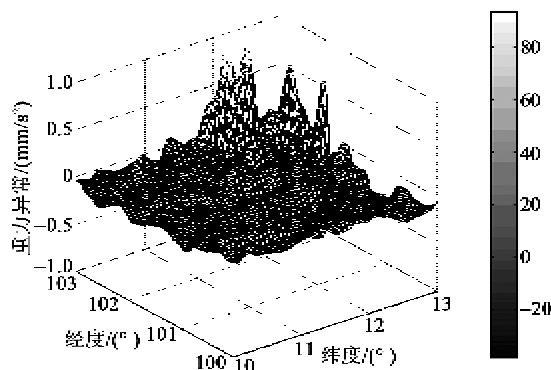


图5 仿真区域重力异常分布图

仿真的主要参数为载体以 18 520 m/h 的速度作匀速直线运动;航向为 45° , 初始位置为北纬 11.5° 、东经 101.5° , 系统初始定位误差东向 100 m、北向 100 m, 陀螺常值漂移 $0.01^\circ/\text{h}$, 加速度计零漂移 $10^{-4}g$ (g 为重力加速度), 滤波周期为 240 s, 重力仪的延迟时间为 155 s, 仿真时间为 3 h。

根据以上仿真条件, 分别得到 INS 和时间延迟补偿前、后的经纬度误差。分析可知, 虽然滤波结果最后都趋于平稳, 但不进行时间补偿时, 会出现虚假的定位点而影响导航精度。假设重力仪存的延迟时间为 160 s, 如果在重力异常变化不是很明显的区域, 这段时间内重力异常变化不大, 时间补偿的效果就不明显; 如果在载体航速较快时且正好处于重力异常变化较明显的区域, 在这段时间的重力异常变化可达几毫伽, 如果不进行延时误差补偿, 造成了量测信息不准确, 使滤波的精度下降。

图 6 为重力辅助惯性导航系统经度误差。图 7 为重力辅助惯性导航系统纬度误差。由图 6, 7 可知, 在进行延时误差补偿后, 滤波精度要高于常规的 EKF 的滤波精度。仿真结果表明, 该补偿算法能有效解决重力异常信号延迟引起的滤波不稳定的问题, 将定位误差控制在一个较小的范围内。

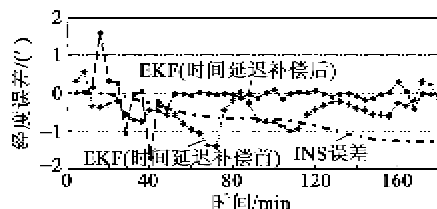


图 6 重力辅助惯性导航系统经度误差

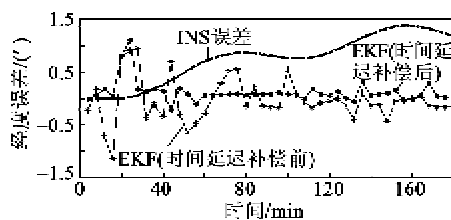


图 7 重力辅助惯性导航系统纬度误差

5 结束语

本文以重力异常辅助惯性导航为背景, 针对重力仪输出延迟而导致的组合导航系统量测滞后问题, 提出了一种补偿方法, 并利用厄特弗斯效应计算了 Chekan-AM 型海洋重力仪的延迟时间。在重力仪输出重力异常的相应时间点, 采用扩展卡尔曼滤波器将重力异常信息和 INS 参数进行滤波, 再将滤波结果递推到当前时刻, 从而获得当前时刻系统状态的最优估计。通过仿真研究, 证明本文设计的延时误差补偿算法性能良好, 可在原有滤波的精度上

提高滤波的稳定性, 有效地抑制 INS 的位置误差, 减少 INS 的重调周期。

参考文献:

- [1] 李姗姗. 水下重力辅助惯性导航的理论与方法研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2010.
- [2] 于才, 唐伟. 一种提高船舶导航雷达远距离探测能力的方法[J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2012, 24(3): 335-338.
YU Cai, TANG wei. A method for improving the remote detecting capability of marine navigation radar[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications: Natural Science Edition, 2012, 24(3): 335-338.
- [3] 徐遵义, 晏磊, 赵亮. 基于滤波技术的重力辅助导航仿真研究[J]. 舰船科学技术, 2010, 32(1): 125.
XU Zunyi, YAN Lei, ZHAO Liang. Simulation research on gravity-aided navigation based on filter theory[J]. Ship Science and Technology, 2010, 32(1): 125.
- [4] LIU Fanming, LI Yan, HOU Huijuan, et al. Application of Kalman filter algorithm in gravity-aided navigation system[J]. Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2010, 8: 2322-2326.
- [5] WU Lin, MA Jie, TIAN Jinwen. A self-adaptive unscented Kaiman filtering for underwater gravity aided navigation[J]. IEEE Position Location and Navigation Symposium, 2010: 42-45.
- [6] 付永涛, 王先超, 谢天峰. KSS31M 型海洋重力仪动态性能的分析[J]. 海洋科学, 2007, 31(6): 29-33.
FU Yongtao, WANG Xiachao, XIE Tianfeng. Analysis on dynamic performance of KSS31M marine gravimeter[J]. Marine Sciences, 2007, 31(6): 29-33.
- [7] 赵立业, 李宏生, 周百令, 等. 高精度海洋重力测量中厄特弗斯改正误差分析[J]. 中国惯性技术学报, 2008, 1(6): 462-465.
ZHAO Liye, LI Hongsheng, ZHOU Bailing, et al. Analysis on correction errors in marine gravimetry[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2008, 1(6): 462-465.
- [8] 唐李军. Cubature 卡尔曼滤波及其在导航中的应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- [9] 辛廷慧. 水下地形辅助导航方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2004.
- [10] SMITH S, SEILER P. Estimation with lossy measurements: Jump estimators for jump system[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2003, 48(12): 2163-2171.
- [11] 钱山, 李鹏奎, 张士峰, 等. MIMU/GPS 组合导航建模及 GPS 时间延迟补偿算法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(6): 1432-1435.