

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.12.010

舰船地磁独立导航系统

赵国荣, 黄婧丽, 王希彬

(海军航空工程学院控制工程系, 山东 烟台 264001)

摘要: 针对常用地球主磁场模型误差较大的问题, 用描述小尺度区域下地壳异常场的矩谐模型代替, 设计一种舰船地磁独立导航系统。将水面舰船的运动方程与矩谐模型表示的观测方程结合起来, 构成独立导航系统。同时为了避免引入截断误差, 采用无迹卡尔曼滤波算法。仿真结果显示: 该导航系统有足够高的精度, 位置误差不超过 2 m, 可以作为一种独立的导航方式使用。

关键词: 矩谐模型; 地磁导航; 无迹卡尔曼滤波

中图分类号: TJ03 **文献标志码:** A

Ship Geomagnetic Independent Navigation System

Zhao Guorong, Huang Jingli, Wang Xibin

(Department of Control Engineering, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: For the big error of commonly used earths main magnetic field model, a ship geomagnetic independent navigation system is designed by the rectangular harmonic model instead which describes the crustal anomaly field in the small-scale area. Motion equation of surface ship combined with the observation equation of rectangular harmonic model constitutes an independent navigation system. Meanwhile, in order to avoid the truncation error, the unscented Kalman filter algorithm is adopted. The simulation results show that the navigation system has a high accuracy. The position error is less than 2m. It can be used as an independent navigation.

Key words: rectangular harmonic model; geomagnetic navigation; unscented Kalman filter

0 引言

随着大地测量技术的进步, 地磁导航逐渐成为一种新兴的导航方式。与惯导不同, 地磁导航不存在积累误差, 并且在极区使用也不受影响。作为一种自主导航方式, 地磁导航不需要地面基站, 安全性高。与地形导航相比, 地磁导航在遇到海洋、平原等平坦地带时仍可正常工作。这些特有的优势, 使地磁导航在军事武器装备研究中得到了越来越广泛的应用。

地磁场包括主磁场、地壳异常场、干扰磁场, 其中主磁场占 90% 以上。目前建立的主磁场模型已经能很好地反映全球磁场的变化趋势。地磁导航将地磁主磁场近似看成一个偶极子, 利用高斯球谐分析法建立^[1]。已有大部分文献^[2]采用了这种模型作为观测方程进行研究, 但是误差在 100~200 nT 之间, 精度偏低, 实际效果不理想。相比较而言, 地壳异常场空间变化丰富, 时间变化极小, 用它建立的模型精度更高, 更适合导航使用。虽然随着测量高度的增加异常场强度会减小, 当高度超过一定值时, 异常场将消失在背景场中^[5], 这使得它不适合在卫星等高空导航中使用, 但对于低空、海面运行的载体就不存在这种问题。笔者采用无迹卡尔曼滤

波算法作为观测方程, 选择矩谐模型来描述这种局部区域的地壳异常场, 并以水面舰船为背景, 构建独立导航系统。

1 舰船系统独立导航模型

1.1 坐标系之间的转换

矩谐分析通常是在直角坐标系下进行, 定义如下: 取图 1 所示的直角坐标系 XYZ, 通常以分析区域的中心作为坐标原点 O。X 在过 O 点的子午面, 向北为正, Y 切于地面, 向东为正, Z 垂直向下, 沿地球半径方向。

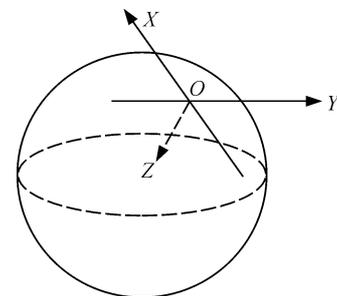


图 1 矩谐分析直角坐标系

令 $P(\theta_0, \lambda_0)$ 表示直角坐标系的原点。余纬度 $\theta_0 = 90^\circ - \phi_0$ 。 $Q(\theta, \lambda)$ 为地球面上任意一点的坐标。则利用式 (1)~(7) 即可将用余纬度 θ 和地理经度 λ

收稿日期: 2012-06-15; 修回日期: 2012-07-02

作者简介: 赵国荣(1964—), 男, 浙江人, 博士, 博士生导师, 从事导航、制导与控制研究。

表示的测点位置从地心坐标系变换到直角坐标系:

$$x = R_e \sin \varphi \cos \alpha \quad (1)$$

$$y = -R_e \sin \varphi \sin \alpha \quad (2)$$

$$z = R_e (1 - \cos \varphi) \quad (3)$$

$$\cos \varphi = \cos[\cos \theta_0 \cos \theta + \sin \theta_0 \sin \theta \cos(\lambda_0 - \lambda)] \quad (4)$$

$$\sin \varphi = (1 - \cos^2 \varphi)^{1/2} \quad (5)$$

$$\sin \alpha = \sin\left(\frac{\sin \theta \sin(\lambda_0 - \lambda)}{\sin \varphi}\right) \quad (6)$$

$$\cos \alpha = \pm(1 - \sin^2 \alpha)^{1/2} \quad (7)$$

其中, R_e 为地球的平均半径。而从惯导使用的东北天坐标系到地心坐标系的转换方法可参见文献[6]。

目前, 使用三轴磁强计测得的磁场三分量, 经过野值剔除和误差补偿后减去主磁场, 再进行日变处理就是地壳异常场测量值 X_R 、 Y_R 、 Z_R , 但它是在地心坐标系中测量的结果, 转换到直角坐标系中的 B_x 、 B_y 、 B_z , 可通过式 (8)~(13) 进行计算^[7]。

$$B_x = -\tilde{X} \cos \theta_0 \cos \lambda_0 - \tilde{Y} \cos \theta_0 \sin \lambda_0 + \tilde{Z} \sin \theta_0 \quad (8)$$

$$B_y = -\tilde{X} \sin \lambda_0 + \tilde{Y} \cos \lambda_0 \quad (9)$$

$$B_z = -\tilde{X} \sin \theta_0 \cos \lambda_0 - \tilde{Y} \sin \theta_0 \sin \lambda_0 - \tilde{Z} \cos \theta_0 \quad (10)$$

式中:

$$\tilde{X} = -X_R \cos \theta \cos \lambda - Y_R \sin \lambda - Z_R \sin \theta \cos \lambda \quad (11)$$

$$\tilde{Y} = -X_R \cos \theta \sin \lambda + Y_R \cos \lambda - Z_R \sin \theta \sin \lambda \quad (12)$$

$$\tilde{Z} = X_R \sin \theta - Z_R \cos \theta \quad (13)$$

1.2 导航模型

1.2.1 运动方程

以舰船在水面航行为背景, 构建载体运动模型。假设航速为 v , 航向角为 c , 采样间隔为 T , 则简化的运动模型为:

$$\begin{cases} \theta(k+1) = \theta(k) + T \cdot v \cdot \cos(c) \\ \lambda(k+1) = \lambda(k) + T \cdot v \cdot \sin(c) \end{cases} \quad (14)$$

选取状态向量为 $X = [\theta, \lambda]^T$, 令 $W = [w_\theta, w_\lambda]$,

则系统状态方程为

$$X(k+1) = f(X, k) + W(k) \quad (15)$$

1.2.2 观测方程

矩谱分析研究的对象是一个矩形区域, 在没有磁场源的空间, 磁位满足拉普拉斯方程, 根据此方程的解, 推导出磁场的三分量可表示成如下形式:

$$B_x = -\frac{\partial V}{\partial x} = -A + \sum_{q=0}^{N_{\max}} \sum_{r=q-t}^q Q_{tr}(x, y) e^{uz} \quad (16)$$

$$B_y = -\frac{\partial V}{\partial y} = -B + \sum_{q=0}^{N_{\max}} \sum_{r=q-t}^q R_{tr}(x, y) e^{uz} \quad (17)$$

$$B_z = -\frac{\partial V}{\partial z} = -C + \sum_{q=0}^{N_{\max}} \sum_{r=q-t}^q S_{tr}(x, y) e^{uz} \quad (18)$$

其中:

$$Q_{tr}(x, y) = tv(D_{tr} \sin(tv x) \cos(rwy) + E_{tr} \sin(tv x) \sin(rwy) - F_{tr} \cos(tv x) \cos(rwy) - G_{tr} \cos(tv x) \sin(rwy)) \quad (19)$$

$$R_{tr}(x, y) = rw(D_{tr} \cos(tv x) \sin(rwy) - E_{tr} \cos(tv x) \cos(rwy) + F_{tr} \sin(tv x) \sin(rwy) - G_{tr} \sin(tv x) \cos(rwy)) \quad (20)$$

$$S_{tr}(x, y) = -uP_{tr}(x, y) \quad (21)$$

总强度可表示为

$$F = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (22)$$

其中: $r = q - t$; $v = 2\pi / L_x$; $w = 2\pi / L_y$; $u = \sqrt{(tv)^2 + (rw)^2}$; L_x 、 L_y 为矩形区域的长度和宽度; A 、 B 、 C 、 D_{tr} 、 E_{tr} 、 F_{tr} 、 G_{tr} 为表达式中的待定系数; B_x 、 B_y 、 B_z 为已知矩形坐标系下地磁场观测异常值; N_{\max} 为级数的最大截断水平, 它的取值与所研究区域面积大小, 输入的数据量及所要反映的磁场信息有关。已知地磁场强度, 通过最小二乘法可得矩谱模型系数。

为了提高导航精度, 使用地磁场三分量矢量作为观测, 则

$$H = [B_x, B_y, B_z]^T \quad (23)$$

2 非线性滤波算法设计

由式 (16)~(22) 可知, 观测方程具有很强的非线性, 若要求取雅克比矩阵则会带来较大的线性化误差, 而采用无迹卡尔曼滤波(UKF)算法则可以避免该问题。

考虑如下非线性离散模型:

$$X_{k+1} = f(X_k, u_k, W_k) \quad (24)$$

$$Z_k = h(X_k, V_k) \quad (25)$$

式中: $X_k \in R^n$ 为系统状态; $f(\cdot)$ 为 n 维向量函数; $h(\cdot)$ 为 m 维向量函数; W_k 为 n 维系统过程噪声; V_k 为 m 维系统观测噪声。UKF 滤波器算法流程为:

1) 初始化。

$$\hat{X}_0 = E[X_0] \quad (26)$$

$$P_{X_0} = E[(X_0 - \hat{X}_0)(X_0 - \hat{X}_0)^T] \quad (27)$$

2) 参数计算。

$$\omega_0^{(m)} = \frac{\lambda}{n + \lambda} \quad (28)$$

$$\omega_0^{(c)} = \omega_0^{(m)} + (1 - \mu^2 + \beta) \quad (29)$$

$$\omega_i^{(c)} = \omega_i^{(m)} = \frac{1}{2(n + \lambda)} \quad (i=1, \dots, 2n) \quad (30)$$

其中: $\gamma = \sqrt{n + \lambda}$, $\lambda = \mu^2(n + \kappa) - n$, μ 通常取一个很小的数, 对于高斯先验分布的情形 $\beta=2$ 最优, κ 通常取 0。

3) 计算 k 时刻 Sigma 点。

$$\begin{cases} \xi_{k-1}^{(0)} = \hat{X}_{k-1} \\ \xi_{k-1}^{(i)} = \hat{X}_{k-1} + (\sqrt{(n + \lambda)P_{k-1}}) \quad (i=1, \dots, 2n) \\ \xi_{k-1}^{(i)} = \hat{X}_{k-1} - (\sqrt{(n + \lambda)P_{k-1}}) \quad (i=n+1, n+2, \dots, 2n) \end{cases} \quad (31)$$

4) 计算时间更新方程。

$$\xi_k^{(i)} = f(\xi_{k-1}^{(i)}) \quad (i=0, 1, \dots, 2n) \quad (32)$$

$$\hat{X}_{k,k-1} = \sum_{i=0}^{2n} \omega_i^{(m)} \xi_k^{(i)} \quad (33)$$

$$P_{k,k-1} = \sum_{i=0}^{2n} \omega_i^{(c)} (\xi_k^{(i)} - \hat{X}_{k,k-1})(\xi_k^{(i)} - \hat{X}_{k,k-1})^T + P_{k-1} \quad (34)$$

5) 计算观测更新方程。

$$\chi_{k,k-1} = h(\xi_{k,k-1}) \quad (35)$$

$$\hat{Z}_{k,k-1} = \sum_{i=0}^{2n} \omega_i^{(m)} \chi_{i,(k,k-1)} \quad (36)$$

$$P_{\hat{Z}_k} = \sum_{i=0}^{2n} \omega_i^{(c)} (\chi_{i,(k,k-1)} - \hat{Z}_{k,k-1})(\chi_{i,(k,k-1)} - \hat{Z}_{k,k-1})^T \quad (37)$$

$$P_{X_k, Z_k} = \sum_{i=0}^{2n} \omega_i^{(c)} (\chi_{i,(k,k-1)} - \hat{Z}_{k,k-1})(\xi_{i,(k,k-1)} - \hat{X}_{k,k-1})^T \quad (38)$$

6) 滤波更新。

$$K_k = P_{X_k, Z_k} P_{\hat{Z}_k}^{-1} \quad (39)$$

$$\hat{X}_k = \hat{X}_{k,k-1} + K_k (Z_k - \hat{Z}_{k,k-1}) \quad (40)$$

$$P_k = P_{k,k-1} - K_k P_{\hat{Z}_k} K_k^T \quad (41)$$

3 仿真与结果分析

设置仿真背景。采样间隔 T 为 1 s, 仿真时间为 100 s。船体航速 v 为 $4 \times 1853/3600$ (m/s), 航向角 $c = 60^\circ$ 。真实起始点坐标为 $X_0 = [45, 100]^T$, 带误差的起始点初始值 $X_0 = [48, 97]^T$ 。选取东北亚地区的地磁场模型数据。 $P_0 = [2, 2]^T$, $R = Q = 10$ 。则根据设置的条件, 可得到 UKF 滤波算法下的仿真结果如图 2~4 所示。

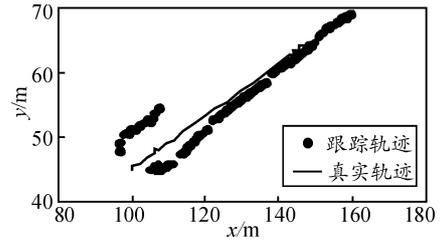


图 2 滤波跟踪轨迹

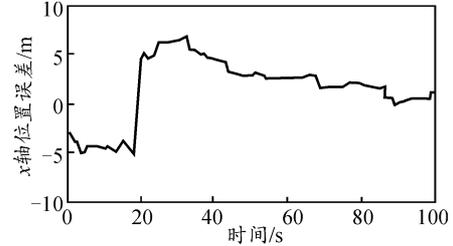


图 3 x 轴位置误差

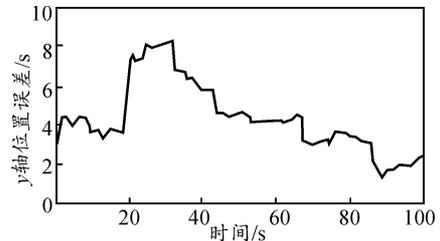


图 4 y 轴位置误差

4 结束语

笔者推导了矩谱模型表示的观测方程, 与水面舰船运动方程结合, 构成了地磁独立导航系统。UKF 滤波算法下的仿真结果表明: 该独立导航系统可以很好地跟踪真实轨迹, 位置误差不超过 2 m, 精度较高, 满足使用要求, 不必与其他导航方式结合。地磁导航作为一种新兴的导航方式, 由于其固有的隐蔽性与安全性, 必将随着精度的提高而在武器装备中得到越来越广泛的应用。

参考文献:

- [1] 周军, 葛致磊, 施桂国, 等. 地磁导航发展与关键技术[J]. 宇航学报, 2008, 29(5): 1467-1472.
- [2] 杨功流, 李士心, 姜朝宇. 地磁辅助惯性导航系统的数据融合算法[J]. 中国惯性技术学报, 2007, 15(1): 47-50.
- [3] 王向磊, 赵东明. UKF 在基于地磁场的自主导航中的应用分析[J]. 大地测量与地球动力, 2010, 30(6): 144-149.
- [4] 赵敏华, 石萌, 曾雨莲, 等. 基于地磁定轨和扩维卡尔曼滤波的导航算法[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(12): 1315-1318.
- [5] 徐文耀. 地磁学[M]. 北京: 地震出版社, 2003: 4.
- [6] 张友安, 林雪原, 徐胜红. 综合导航与制导系统[M]. 烟台: 海潮出版社, 2005: 8.
- [7] 王月华, 安振昌. 东亚地区地磁场的理论分析与矩谱模型[J]. 地球物理学报, 1999, 42(5): 640-647.