

地球重磁位场辅助水下潜艇导航仿真研究

郑 晖^{1,2} 王 勇¹ 王虎彪¹ 武 凜¹

(1 中国科学院测量与地球物理研究所大地测量与地球动力学国家重点实验室,武汉市徐东大街 340 号,430077)
(2 中国科学院大学地球科学学院,北京市玉泉路甲 19 号,100049)

摘 要:根据卫星测高反演的重力异常和全球地磁异常格网,构造了西太平洋海域 $2' \times 2'$ 重力异常和磁场异常数据作为基准信息,结合 SITAN 滤波算法在该海域上的两块特征区域上,对比了重力和地磁辅助导航的效果。仿真结果表明,重力和地磁辅助导航的结果与潜艇航线上的重力和磁力信息丰富程度密切相关,两块区域上的两种辅助导航算法的精度都在 2 n mile 左右。
关键词:地磁辅助导航;惯性导航系统;SITAN;EMAG2;IGRF
中图法分类号:P229.2

潜艇作为重要的水下战略威慑性武器,其导航必须具有“高精度、长时间、自主性、无源性”的特点。目前潜艇使用的导航方式多为惯性导航系统。受惯性技术的限制,惯导系统的误差随时间积累,因此,无法长时间保持高精度导航。为了提高其导航精度,通常使用外部信息定期对惯导系统导航误差进行修正。通常采用卫星信号、无线电信号、海底地形、重力场、地磁场等与惯导系统组合的方式提高纯惯导系统的精度^[1]。为了提高潜艇隐蔽性和突防能力,潜艇最好只能利用地球固有的场源信息实施无源导航。重力场和地磁场是地球的固有资源,它们都具有无源、无辐射、全天时、全天候、全地域、低能耗等特征。因此,利用重力场和地磁场来辅助潜艇导航成为水下潜艇无源导航技术研究的焦点。

地球重力场和地磁场为导航提供天然的坐标系。地球附近空间内任意一点的重力矢量和地磁矢量都具有唯一性,且与该点的经纬度一一对应,理论上可以通过重力矢量或地磁矢量实现全球定位^[2]。文献[3-4]对国内外利用重力场和地磁场辅助导航进行了研究,但在重磁位场特征相似的区域,容易出现错误辅助的问题^[5]。因此,有必要比较和分析潜艇利用重力和磁力辅助导航的效果,为下一步联合重力和地磁信息辅助潜艇导航打下基础。

本文采用基于多模型自适应(multiple model adaptive estimation, MMAE)的 SITAN 方法,在西太平洋海域选择两块重磁特征突出的特殊区域,分别进行重力和地磁滤波辅助导航仿真。然后对重磁辅助导航的结果进行了对比分析。

1 地球重磁位场辅助导航原理

目前,重力场辅助导航可以使用的重力特征量主要有重力异常、重力梯度以及垂线偏差。地磁辅助导航中可以利用的地磁特征量主要有总磁场强度(F)、水平磁场强度(H)、东向分量(Y)、北向分量(X)、垂直分量(Z)、磁偏角(D)、磁倾角(I)等 7 个地磁要素以及地磁强度异常、磁场梯度等。地磁场各分量示意图如图 1 所示。受传感器和观测技术的限制,相比重力场而言,地磁场辅助导航可供使用的特征量更加丰富。

重磁位场辅助导航主要分为重磁位场匹配和重磁位场滤波两种方法^[6]。重磁辅助导航主要由惯性导航系统、重磁数据基准图、重磁传感器、辅助导航计算机等部分组成^[7]。其中重磁数据基准图是重磁辅助导航系统的基础,其分辨率和精度将直接影响辅助导航的精度。重磁辅助导航算法是整套系统的核心。重磁辅助导航工作原理如图 2 所示。

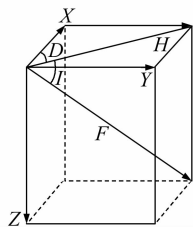


图 1 地磁场各分量示意图

Fig. 1 Components of Geomagnetic Field

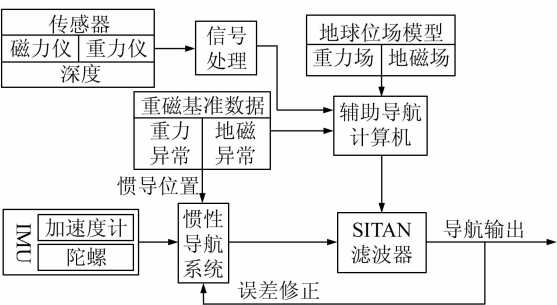


图 2 重磁辅助导航系统

Fig. 2 Gravity and Geomagnetic Aided Navigation System

2 重磁位场辅助基准图

重力场是可以用来描述地球形状以及地球内部物质分布和构造相关的物理量,由于其变化较小,因而是一个可以长期利用的稳定场源。海洋上的重力观测通常是利用海洋重力仪的船测结果综合的,这样提供的海洋重力数据通常是区域的、局部的。随着卫星测高技术的发展,目前已经可以获得高精度、高分辨率的全球海洋重力异常数据和大地水准面数据,这就为重力场的水下载体的辅助定位提供了重要的基准数据。

地磁场主要由地核场、岩石圈磁场、干扰场组成。其中地核场是由处于地幔之下、地核外层的高温液态铁镍环流引起的。它随时间缓慢变化,幅值约为每年几十 nT。地核场是地磁场的主要场,约占地球磁场的 95% 以上。岩石圈磁场是由源于地壳中居里点温度以下矿产,岩石的剩余磁化和感应,这部分也称为异常场,约占地球磁场的 4% 以上。异常场很稳定,几乎不随时间变化,通常只在近地空间存在。由电离层电流、环电流和磁顶层电流产生的磁场称为干扰场,它受多种因素如太阳活动、磁暴等影响而不断变化。

目前,全球地球磁场模型主要采用球谐函数展开的方式对地磁场进行建模。国际上使用的地磁场模型主要有 WMM 和 IGRF 两种。这两种

地球主磁场模型球谐展开阶数都很低,它们只能反映地球磁场信息的长波部分,其精度不足以满足地磁导航的要求。2009-03 美国 National Geographic Data Center(NGDC)发布了最新的地磁异常格网 Earth Magnetic Anomaly Grid (EMAG2)。EMAG2 是由卫星磁测、海洋船磁测以及航空磁测数据融合后形成的高度为 4 km、空间分辨率为 2 弧分的总地磁强度异常格网数据^[8]。EMAG2 的空间分辨率与当前卫星测高反演的重力场相当,并且由于地壳磁异常具有空间分布极其复杂,但在时间上却非常稳定的特性,因此,可以将其作为地磁导航的基准图。

本文选取西太平洋海域(100°E~140°E,0°N~40°N)的重力异常和地磁异常格网数据分别作为重力和地磁导航的基准图,如图 3 所示。为了对重力和地磁辅助导航的结果进行比较,分别在这两张基准图上选取两块特殊的区域,如图 3 中 A、B 所示。

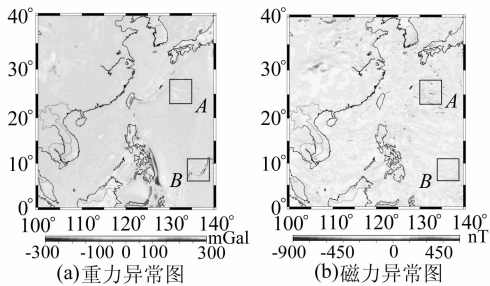


图 3 西太平洋海域 2'×2'重力异常图与磁力异常图

Fig. 3 2 Arc-Minute Resolution Gravity Anomaly Map and Geomagnetic Anomaly Map in Western Pacific Ocean

3 SITAN 重磁导航算法

在重磁辅助导航中,结合惯导系统指示的概略位置信息和有效定位半径进行滤波,确定最优匹配位置^[9]。

SITAN 算法进行地磁辅助导航的实施包含两个阶段^[10]:搜索阶段和跟踪阶段。搜索阶段是指以惯导系统给出的指示位置为中心,根据惯导系统的标称精度确定不同时刻真实位置的置信区间。置信区间的示意图如图 4 所示。

置信区间所定义的区域根据惯导圆概率误差和瑞利分布原则,确定载体置信度为 99% 的真实位置可能区间半径。以惯导指示位置为中心格网点,在置信区域内构造一组并行的卡尔曼滤波器,这些滤波器是排列有序的格网,其间隔与磁场异

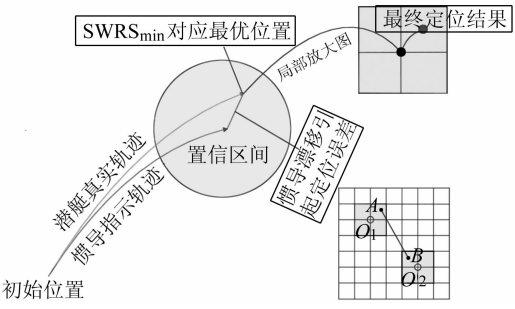


图 4 置信区间和最终定位结果示意图
Fig. 4 Schematic Diagram of Confidence Interval and the Last Location Result

常格网间隔一致。在地磁传感器采样时刻,根据各滤波器的位置分布,可以从总地磁异常场基准图中提取各滤波器相应位置上的地磁异常值 $g_b(\lambda_i, \varphi_i)$, i 为滤波器的个数。在跟踪阶段,三轴捷联磁场计用来获取载体当前位置的总磁场强度,然后经过野值剔除和误差补偿等预处理,再经过日变校正和延拓处理,最后减去地磁场模型给出的正常位场信号,这样可以得到地磁异常的测量值 $g_m(\lambda, \varphi)$ 。然后将两者的差异 $Z_i = g_m(\lambda, \varphi) - g_b(\lambda_i, \varphi_i)$ 作为滤波器的量测值,该差异反映了惯导定位误差。同时各个滤波器将地磁异常偏差的真值作为状态量,形成状态方程和量测方程:

$$\begin{bmatrix} X_k^a \\ X_k^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{k-1}^a \\ X_{k-1}^b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_{k-1}^a \\ W_{k-1}^b \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$\begin{bmatrix} Z_k^a \\ Z_k^b \end{bmatrix} = H_k \begin{bmatrix} X_k^a \\ X_k^b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_k^a \\ V_k^b \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中, X_k^a 和 X_k^b 分别表示重力异常和磁场异常偏差的真值; W_k^a 和 W_k^b 表示状态噪声; V_k^a 和 V_k^b 表示观测噪声。这里可认为各种噪声均为不相关的零均值的高斯白噪声。卡尔曼滤波解算过程参见文献[10]。滤波解算后可以获取沿航迹实际的总地磁强度异常和位置偏差。计算时采用多个卡尔曼滤波器,在每一个计算时刻,每个滤波器各自根据自己的数据进行递归计算,然后从所有的滤波器中选取最优滤波器,以它的估计值作为状态向量的最优估计值。采用 Heli/SITAN 算法,观测值与推算估计值的差最能体现模型的拟合度,残差表示为:

$$\begin{bmatrix} \delta_{k+1}^a \\ \delta_{k+1}^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{k+1}^a - X_{k+1,k}^a \\ Z_{k+1}^b - X_{k+1,k}^b \end{bmatrix} \tag{3}$$

残差 $\delta_k^{a/b}$ 具有以下统计特性: $E(\delta_k^{a/b}) = 0$, $E[(\delta_k^{a/b})^2] = P_{a/b,k}^- + R^{a/b}$ 。从残差出发, Jeff Hol-lowell 建立了一个能反映多次滤波效果的值:

$$\begin{bmatrix} WRS_{k+1}^a \\ WRS_{k+1}^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\delta_{k+1}^a)^2 / (P_{k+1,k}^a + R^a) \\ (\delta_{k+1}^b)^2 / (P_{k+1,k}^b + R^b) \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$\begin{bmatrix} SWRS_{k+1}^a \\ SWRS_{k+1}^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha \cdot WRS_{k+1}^a + (1 - \alpha) SWRS_k^a \\ \alpha \cdot WRS_{k+1}^b + (1 - \alpha) SWRS_k^b \end{bmatrix} \tag{5}$$

式中, $SWRS_0 = 1.0$, α 为平滑加权因子,且满足 $0 < \alpha < 1.0$ 。设 p 表示惯导的漂移率, $\alpha = 1.938p$ 。SWRS 为平滑加权因子。SWRS 值越小,则匹配效果越好,因而认为置信区域内的多个 SWRS 值中, SWRS 最小值 $SWRS_{min}$ 的滤波器对应的位置为最优匹配位置。但是这个最优匹配位置是否可靠,这里用一个判断准则来对该最优匹配位置进行可信程度评判:

$$H = \frac{SWRS_{min}^* - SWRS_{a/b}^{min}}{SWRS_{a/b}^{min}} > H_t \tag{6}$$

式中, $SWRS_{min}^*$ 是以 $SWRS_{min}$ 为中心的一定范围以外的 SWRS 的最小值; H 为判断准则参数; H_t 为判断阈值。 H 值越大,表明 $SWRS_{min}$ 与不相邻它的滤波器 $SWRS_{min}^*$ 有显著的差异,进而 $SWRS_{min}$ 所对应的位置特征越明显,那么 $SWRS_{min}$ 滤波器作为最优估计滤波器成立,从而判断 $SWRS_{min}$ 滤波器所对应的最佳匹配位置为有效定位。

考虑到上述匹配算法只能匹配到格网点,这样即使是最佳格网位置选择正确也可能导致最大一个格网的位置误差,因此,算法以 $SWRS_{min}$ 滤波器所对应的位置为中心,将周围 8 个格网点与最佳匹配格网点组合,如图 4 右上角所示。通过加权平均计算得到最终的最优匹配位置,提高辅助导航的精度。具体计算方法如下:

$$\begin{cases} \lambda_a = \sum_{i=1}^9 (W_a^i \cdot \lambda_a^i) \\ \varphi_a = \sum_{i=1}^9 (W_a^i \cdot \varphi_a^i) \end{cases}, \begin{cases} \lambda_b = \sum_{i=1}^9 (W_b^i \cdot \lambda_b^i) \\ \varphi_b = \sum_{i=1}^9 (W_b^i \cdot \varphi_b^i) \end{cases} \tag{7}$$

$$\begin{cases} W_a^i = \frac{\exp(-0.5 \times N_a^i)}{\sum_{i=1}^9 \exp(-0.5 \times N_a^i)}, N_a^i = \frac{SWRS_a^i}{SWRS_{a,b}^{min}}, \\ 1 \leq i \leq 9 \\ W_b^i = \frac{\exp(-0.5 \times N_b^i)}{\sum_{i=1}^9 \exp(-0.5 \times N_b^i)}, N_b^i = \frac{SWRS_b^i}{SWRS_b^{min}}, \\ 1 \leq i \leq 9 \end{cases} \tag{8}$$

式中, (λ_a, φ_a) 和 (λ_b, φ_b) 分别表示最终的重力和地磁辅助导航位置,分别如图 4 右下角的 A、B 点所示。

4 仿真计算

受地磁参考模型 WMM2010 或 IGRF11 的精

度和磁力计测量精度的影响,通过地面磁力计测量的总地磁强度数据和地磁参考模型计算的总强度的差值作为地磁异常场的精度无法满足直接使用地面磁测数据辅助导航的要求。由于 EMAG2 分辨率达到 2 弧分,能够作为辅助导航的基准图。仿真计算时采用在该基准图中添加噪声的方式模拟使用磁场计和地磁场模型地磁强度差值作为总地磁强度异常的观测值,然后使用 SITAN 算法进行地磁导航仿真计算。由重力异常数据时空特性可知,重力辅助惯性导航不存在类似的问题。

仿真计算时按照图 3 在西太平洋海域两块特征区域分别规划一条潜艇航行线路如图 5 所示,然后根据惯导标称精度,仿真出惯导的指示轨迹。潜艇航行线路采样时刻各点处的重磁异常数据可分别从重力异常格网数据和 EMAG2 数据中通过双线性内插提取得到。设定仿真过程中潜艇每航行 2 n mile 进行一次重磁辅助导航仿真计算,

与基准图格网间距保持一致。为了便于对重力和磁力辅助导航结果进行比较,设重力和地磁辅助导航具有相同的误差参数。两条航线上的仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation Parameters	
参数	取值
初始北向误差/(°)	0.003
初始东向误差/(°)	0.003
INS 北向漂移/(°/h)	0.48
INS 东向漂移/(°/h)	0.64
重力测量噪声/(mGal)	10
磁力测量噪声/(nT)	10
潜艇航向速度/(n mile/h)	20
平滑因子	0.969
H_t	0.4

仿真计算结果如下图 5 和图 6 所示,重磁辅助导航的结果如表 2 所示。

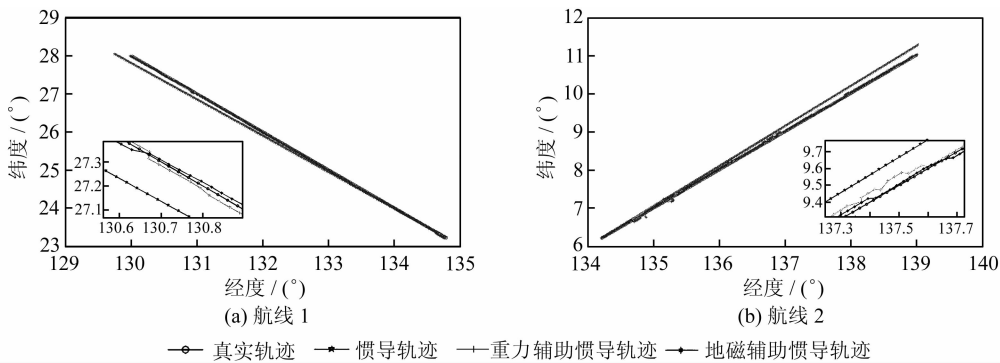


图 5 航线 1 和航线 2 上的真实轨迹、重力辅助导航轨迹以及地磁辅助导航轨迹

Fig. 5 True, INS, Gravity, Geomagnetic Aided Navigation Trajectories in Simulation Line 1 and Line 2

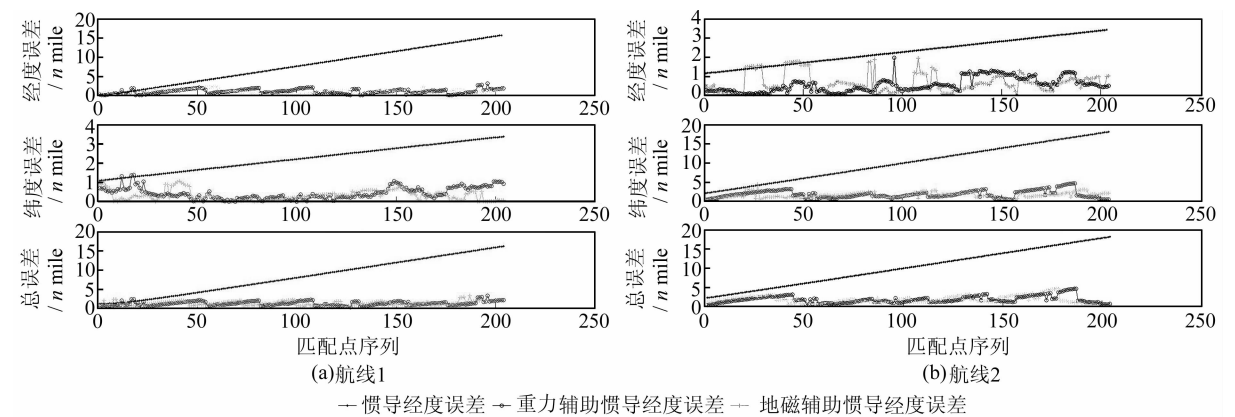


图 6 航线 1 和航线 2 上纯惯导、重力辅助和地磁辅助导航的误差

Fig. 6 Longitude, Latitude and Total Navigation Errors of INS, Gravity and Geomagnetic Aided Navigation Errors in Line 1 and Line 2

图 5 表明潜艇经过长时间的航行,重力和地磁导航给出的潜艇航迹与潜艇的真实航迹比较接近,惯性导航给出的航迹与真实航迹相差甚远,说

明重力和地磁导航算法用来辅助潜艇导航是可行的。图 3、图 5~图 6 和表 2 表明,A 区域的航线 1 上,磁力信息较重力信息丰富,磁力辅助导航

的精度和效率较高;B 区域的航线 2 上,重力信息较磁力信息丰富,重力辅助导航的精度和效率较高。各种辅助导航方案的定位误差均在 2 n mile 以内。

表 2 重磁辅助导航结果比较

Tab. 2 Simulation Results of Gravity and Geomagnetic Aided Navigation System

		Gravity	Geomagnetic
航线 1	测量次数	213	213
	有效定位次数	168	188
	有效定位率	78. 87%	88. 26%
	均值	1. 93	1. 64
	误差/ (n mile)	标准差	2. 35
		方差	3. 04
航线 2	测量次数	213	213
	有效定位次数	196	185
	有效定位率	92. 02%	86. 85%
	均值	1. 02	1. 56
	误差/ (n mile)	标准差	0. 54
		方差	1. 15

参 考 文 献

[1] 许大欣. 利用重力异常匹配技术实现潜艇导航[J]. 地球物理学报, 2005, 48(4): 812-816

[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, 5(1): 46-49

[3] 朱庄生, 袁春柱, 周朋. 无源导航定位技术研究现状

及发展趋势[J]. 地球物理学进展, 2011, 36(4): 1 473-1 477

[4] 郭才发, 胡正东, 张士峰, 等. 地磁导航综述[J]. 宇航学报, 2009, 30(4): 1 314-1 318

[5] 赵建虎, 王胜平, 王爱学. 基于地磁共生矩阵的水下地磁导航适配区选择[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(4): 446-449

[6] 蔡洪, 郭才发, 胡正东. 惯性/地磁组合导航算法[J]. 中国惯性技术学报, 2009, 17(3): 334-335

[7] 赵建虎, 王胜平, 王爱学. 一种改进型 TERCOM 水下地磁匹配导航算法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(11): 1 320-1 323

[8] Maus S, Barckhausen U, Bournas N, et al. EMAG2: A 2-arc Min Resolution Earth Magnetic Anomaly Grid Compiled from Satellite, Airborne, and Marine Magnetic Measurements[J]. Geochemistry Geophysics Geosystems, 2009, 10(8): 1-12

[9] 戴全发, 许厚泽, 许大欣, 等. 基于卫星测高数据的重力匹配导航仿真[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008, 33(2): 203-207

[10] 王虎彪. 基于重力异常和重力梯度的水下辅助导航技术研究[D]. 武汉: 中国科学院测量与地球物理研究所, 2010

第一作者简介: 郑晖, 博士生. 现从事重力地磁辅助导航研究.
E-mail: zhenghui2915@163. com

Simulation Research of Earth’s Gravity and Geomagnetism
Potential Field Aided Underwater Navigation

ZHENG Hui^{1, 2} WANG Yong¹ WANG Hubiao¹ WU Lin¹

(1 State Key Laboratory of Geodesy and Earth’s Dynamics, Institute of Geodesy and Geophysics of CAS,
340 Xudong Street, Wuhan 430077, China)

(2 College of Earth Science, University of Chinese Academy of Sciences, A 19 Yuquan Road, Beijing 100049, China)

Abstract: Inertial navigation system (INS) is the primary navigation methods for submarine. In order to attain passive navigation, in this paper gravity anomaly and geomagnetic intensity anomaly grid data are used to correct the drifting error of the INS. The gravity anomaly grid data is derived from satellite altimetry inversion. The geomagnetic anomaly grid data is extracted from Earth Magnetic Anomaly (EMAG2). The two grid data are both with the resolution of 2 arc-minute. In western Pacific Ocean two special regions with distinct gravity and geomagnetic features are selected to carry out the simulation test on gravity and geomagnetic aided navigation with SITAN algorithm separately. The simulation result indicates that there is a close relationship between the gravity and geomagnetic feature along the trajectory and the result of aided navigation. The navigation precision attain 2 n mile under various circumstances.

Key words: geomagnetic aided navigation system; INS; SITAN; EMAG2; IGRF