

doi: 10. 11720/wtyht. 2023. 1265

凌姐丫, 金煌煌, 庄志洪, 等. 基于矢量测量的在线载体磁补偿方法[J]. 物探与化探, 2023, 47(2): 401–409. [http://doi.org/10. 11720/wtyht. 2023. 1265](http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1265)

Ling J Y, Jin H H, Zhuang Z H, et al. An online magnetic compensation method for carriers based on vector measurement[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(2): 401–409. [http://doi.org/10. 11720/wtyht. 2023. 1265](http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1265)

基于矢量测量的在线载体磁补偿方法

凌姐丫¹, 金煌煌², 庄志洪¹, 王宏波¹, 董笙雅¹

(1. 南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094, 2. 黄山学院, 安徽 黄山 245041)

摘 要: 针对传统载体磁补偿求解系数存在病态性的问题, 本文研究了磁干扰的主要来源, 忽略了涡流场的影响, 在原有的模型基础上进行了简化, 建立了三分量磁补偿模型, 由此提出了磁场分量的在线载体补偿方法。通过与传统方法进行对比仿真, 本文方法有效提高了约 1.14 nT 的补偿精度。同时利用现场可编程逻辑门阵列 (field programmable gate array, FPGA) 的高层次综合工具 (high-level synthesis, HLS) 对该方法进行了嵌入式硬件仿真, 验证了方法在硬件系统的实时性和补偿精度。

关键词: 磁干扰; 高层次综合工具; 矢量; 在线补偿

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2023)02-0401-09

0 引言

磁异常探测是通过相关磁信号检测设备对引起异常的磁性目标进行探测和定位^[1], 其中应用较为广泛的航空磁探测技术是通过安装在飞机上的磁探测装置来勘探磁场强度, 从而寻找与磁性相关的物质。二战初期该技术首次在军事领域发挥作用^[2], 后来逐步应用于勘探矿产资源、研究基础地质^[3]等方面。在航磁测量过程中, 为了提高测量磁场数据的质量, 需要提高磁传感器和干扰补偿的水平^[4]。航磁测量时, 由于机动载体多由钢铁等磁性物质组成, 铁磁性物质被地球磁场磁化后具有磁性, 对磁探测造成一定的影响。载体的磁干扰主要包括硬磁材料的固有磁场和软磁材料产生的感应磁场以及由穿过载体的磁通量变化率产生的涡流磁场, 并且感应磁场的大小和方向会随着载体的位置、姿态的变化而变化^[5]。载体干扰是无法避免的误差因素, 干扰磁场的存在导致磁场测量值存在较大误差, 从而不能正确地探测地域做出正确的磁异常评估, 降低了测量效率, 所以载体磁补偿技术是磁异常探测领域的关键技术之一。

1950 年 Tolles 和 Lawson 通过分析得出飞机载体平台的磁干扰与载体的运动有关, 并且将干扰表示成恒定场、感应场以及涡流场 3 种场强之和, 并建立相关的数学模型——T-L 模型^[6-7], 用于计算载体干扰, 实现载体补偿。影响载体补偿效果的不只是载体自身的干扰, 在实际长时间、长距离的高精度飞行探测过程中, 由于地磁梯度的存在, 地磁场是随位置变化的, 且其变化没有显著的规律性。地磁梯度不仅会影响感应场、涡流场的计算和补偿, 也会直接作为一种动态信号叠加到总场信号中^[8]对载体补偿精度产生影响。文献[9]采用改善比^[10] (补偿前后信号的标准差之比) 的方式, 分别对考虑地磁梯度影响和不考虑地磁梯度影响的补偿效果进行评估, 计算得到考虑地磁场梯度时的改善比为 13.536 5, 不考虑地磁场梯度时的改善比为 8.761 5, 地磁梯度引起的磁场计算误差使改善比降低了 35.3%, 可见地磁梯度对载体补偿精度的影响较大。但是该方法仅适用于飞机载体在 0°、90°、180°、270°这 4 个特定航向上进行小幅度机动飞行。此外, 磁日变^[11]是受到太阳活动的影响, 地磁矢量场的强度和方向随着时间会呈现出一种没有规律性的连续变化。Williams 提出用神经网络增加时间序列作为网络输入

收稿日期: 2022-05-26; 修回日期: 2022-10-17

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“空间多尺度条件下的多磁偶极子目标定位和识别反演方法”(61871229)

第一作者: 凌姐丫 (1997-), 男, 硕士, 主要研究方向为磁异常探测、信号处理。Email: 3045270881@qq.com

节点以实现对地磁场日变项的拟合^[11-12],该方法只能实现在特定时间内的高精度补偿,而不具备长时间探测过程中的参数泛化能力。由于本文方法是基于实时性的在线载体补偿,可以有效降低该影响。近年来国内外许多学者对载体补偿求解系数存在病态性问题和地磁梯度对补偿精度的影响进行了研究,文献[13]提出了一种基于岭回归的方法求解补偿系数,克服了变量之间的共线性,但是岭参数的数值不好选取;文献[14]研究了影响磁干扰补偿精度的各种因素,并分析了地磁场垂直梯度对磁干扰补偿精度的影响,却忽略了地磁场水平梯度的影响;文献[15]利用遗传算法来实现补偿系数的求解,但是存在计算效率相对较低的问题。

基于总场模型的载体补偿大部分是建立在地磁场恒定的前提假设下,存在求解系数的病态性问题和忽略了地磁梯度的影响。本文提出了基于矢量测量的在线载体磁补偿优化方法,将磁总场补偿转化到对分量的补偿。通过改变飞机载体的运动状态,从而达到简化模型的效果,改善了求解补偿系数的病态性问题,并与传统方法进行对比仿真,验证了该方法的可行性;由于本文方法是在线载体补偿,通过仿真验证了可以有效降低地磁梯度的影响;最后利用 HLS 工具验证了在线载体磁补偿方法在硬件系统上的实时性和补偿精度的有效性。

1 基本 T-L 载体补偿模型

根据 T-L 载体补偿模型,恒定场相对于载体是静止不变的磁场;感应场是由载体自身的软磁性材料磁化所形成的磁场;涡流场由穿过载体的磁通量变化率所产生^[16]。由恒定场、感应场及涡流场磁场矢量叠加形成了飞机载体平台的磁干扰,如式(1)所示。

$$\vec{H}_i = \vec{H}_{per} + \vec{H}_{inc} + \vec{H}_{edd}, \quad (1)$$

其中: H_{per} 、 H_{inc} 、 H_{edd} 分别为恒定场、感应场和涡流场在地磁场方向上的投影。恒定场相对于飞机载体是恒定不变的,与地磁场大小及飞机机动无关,故可以直接将恒定场沿着载体坐标系三轴方向上进行分解,恒定场在地磁场方向上的投影如式(2)所示:

$$\vec{H}_{per} = (H_{px}, H_{py}, H_{pz}) \begin{pmatrix} \cos\alpha \\ \cos\theta \\ \cos\varphi \end{pmatrix}, \quad (2)$$

其中: $\cos\alpha$ 、 $\cos\theta$ 、 $\cos\varphi$ 分别为在载体坐标系的磁场三分量与地磁场夹角的余弦值; H_{px} 、 H_{py} 、 H_{pz} 则

是恒定场在载体坐标系三轴的投影。

感应场是载体自身的部分软磁性材料受到地磁场的磁化而形成,且与地磁场的强度呈正比关系,并不与地磁场的方向一致。因此可以将感应场表示为载体软磁性材料沿着载体坐标系三轴方向磁化所产生的感应磁场之和,如式(3)所示:

$$\vec{H}_{inc} = (\cos\alpha, \cos\theta, \cos\varphi) \begin{pmatrix} a_{11}H_e(t) & a_{12}H_e(t) & a_{13}H_e(t) \\ a_{21}H_e(t) & a_{22}H_e(t) & a_{23}H_e(t) \\ a_{31}H_e(t) & a_{32}H_e(t) & a_{33}H_e(t) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\alpha \\ \cos\theta \\ \cos\varphi \end{pmatrix}, \quad (3)$$

其中: H_e 表示地磁场大小。

涡流场是由穿过载体的地磁场磁通量变化所形成的,且涡流场的大小与地磁场强度的变化率呈正比关系。涡流场可以表示为地磁场在载体坐标系三轴方向的磁通量变化所产生的涡流磁场之和,如式(4)所示:

$$H_{edd} = (\cos\alpha, \cos\theta, \cos\varphi) \begin{pmatrix} b_{11}H_e(t) & b_{12}H_e(t) & b_{13}H_e(t) \\ b_{21}H_e(t) & b_{22}H_e(t) & b_{23}H_e(t) \\ b_{31}H_e(t) & b_{32}H_e(t) & b_{33}H_e(t) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\alpha \\ \cos\theta \\ \cos\varphi \end{pmatrix}, \quad (4)$$

将上述的公式进行整合,可以得到式(5):

$$\begin{aligned} \vec{H}_i &= \vec{H}_{per} + \vec{H}_{inc} + \vec{H}_{edd} \\ &= p_1u_1 + p_2u_2 + p_3u_3 + \\ &\quad a'_{11}u_1^2 + 2a'_{12}u_1u_2 + 2a'_{13}u_1u_3 + a'_{22}u_2^2 + 2a'_{23}u_2u_3 + \\ &\quad a'_{33}u_3^2 + b'_{11}u_1u_1' + b'_{12}u_1u_2' + b'_{13}u_1u_3' + b'_{21}u_2u_1' + \\ &\quad b'_{22}u_2u_2' + b'_{23}u_2u_3' + b'_{31}u_3u_1' + b'_{32}u_3u_2' + b'_{33}u_3u_3' \end{aligned} \quad (5)$$

其中: $u_1 = \cos\alpha$, $u_2 = \cos\theta$, $u_3 = \cos\varphi$; u_1' 、 u_2' 、 u_3' 分别是 u_1 、 u_2 、 u_3 的导数; $a'_{ij} = a_{ij}H_e(t)$, $i = 1, 2, 3, j = 1, 2, 3$; $b'_{ij} = b_{ij}H_e(t)$, $i = 1, 2, 3, j = 1, 2, 3$ 。

由式(5)可知,该方程包含 18 个未知变量,且变量之间存在严重的相关性,进而产生了病态性。而且对于矢量磁强计的载体补偿来说,其中部分系数无法进行合并,实际要求解的系数更多。此外,为了能够更准确地估计补偿系数,需要设计复杂的飞行方式,包含 4 个完全正交的航向,在每个航向上,飞机需要进行 3 种不同类型的机动动作,如图 1 所示。

2 基于矢量测量的在线载体磁补偿优化模型

针对传统的载体补偿均是基于总场测量的 18

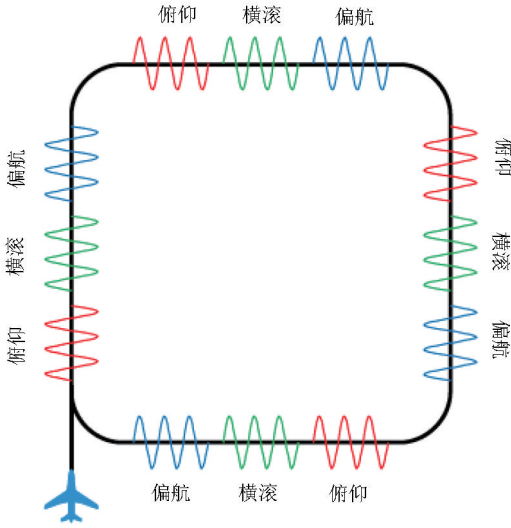


图 1 总场校准飞行示意

Fig. 1 Schematic diagram of total field calibration flight
项补偿系数模型,求解系数存在病态性问题,本文提出了基于矢量测量的在线载体补偿优化模型。文献[14]研究发现恒定场和感应场是由在载体上的铁磁性物质所引起的,相较于涡流场,它们的强度大得多。载体外 1 m 处的涡流磁场强度最大值不足地磁

$$\begin{cases} H_{mx} = H_{px} + H_e(1 + a_{11}) \cdot \cos\alpha + H_e a_{21} \cdot \cos\theta + H_e a_{31} \cdot \cos\varphi \\ H_{my} = H_{py} + H_e a_{12} \cdot \cos\alpha + H_e(1 + a_{22}) \cdot \cos\theta + H_e a_{32} \cdot \cos\varphi \\ H_{mz} = H_{pz} + H_e a_{13} \cdot \cos\alpha + H_e a_{23} \cdot \cos\theta + H_e(1 + a_{33}) \cdot \cos\varphi \end{cases}, \quad (9)$$

由式(9)可以看出,在该矢量载体磁补偿模型中,每个测量分量存在 4 个独立的补偿系数,以 x 轴为例,4 个独立的补偿系数分别为 H_{px} 、 $H_e(1 + a_{11})$ 、 $H_e a_{21}$ 、 $H_e a_{31}$,且测量值 H_{mx} 与补偿系数呈现的是线性关系,考虑到白噪声的存在,可以简单的运用最小二乘法求得补偿系数。在进行动态载体磁补偿过程中,若载体保持近似匀速直线运动以及对载体的无磁化改装,可以有效忽略涡流场的影响,对补偿模型进行简化,由于补偿飞行机动方式的简化以及补偿模型的简化,使得在线载体磁补偿成为可能。在进行载体磁补偿的过程中,需要实时获取地磁场矢量方向在载体坐标系下的 3 个方向余弦 $\cos\alpha$ 、 $\cos\theta$ 、 $\cos\varphi$,传统的载体磁补偿方法利用矢量磁强计的测量数据 H_{mx} 、 H_{my} 、 H_{mz} 进行近似求解,即

$$\cos\alpha = \frac{H_{mx}}{\sqrt{H_{mx}^2 + H_{my}^2 + H_{mz}^2}}, \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} \cos\beta \times \cos\gamma & \cos\beta \times \sin\gamma & -\sin\beta \\ \sin\alpha \times \sin\beta \times \cos\gamma - \cos\alpha \times \sin\gamma & \sin\alpha \times \sin\beta \times \sin\gamma + \cos\alpha \times \cos\gamma & \sin\alpha \times \cos\beta \\ \cos\alpha \times \sin\beta \times \cos\gamma + \sin\alpha \times \sin\gamma & \cos\alpha \times \sin\beta \times \sin\gamma - \sin\alpha \times \cos\gamma & \cos\alpha \times \cos\beta \end{bmatrix}, \quad (14)$$

其中: α 表示载体绕载体坐标系 x 轴的旋转角度; β

场的 0.04%^[17],且通过对飞机载体进行无磁化改装,利用无磁性材料替换机体中大面积块状金属导电材料削弱涡流磁场,可有效规避涡流磁场干扰^[18]。此外,在进行在线载体磁补偿过程中,若载体保持近似匀速直线运动,这样穿过载体的磁通变化率减小,进一步降低了涡流场的影响,同时也简化了补偿飞行时的机动方式,此时载体磁补偿模型简化为:

$$\vec{H}_i = \vec{H}_{per} + \vec{H}_{inc}, \quad (6)$$

无磁异常目标的情况下,矢量磁强计的测量值为地磁场矢量和载体磁干扰矢量的叠加:

$$\vec{H}_m = \vec{H} + \vec{H}_{per} + \vec{H}_{inc} + \vec{H}_e, \quad (7)$$

结合式(2)和式(3)将上式展开成分量形式:

$$\begin{cases} H_{mx} = H_{px} + H_{ex} \cdot a_{11} + H_{ey} \cdot a_{21} + H_{ez} \cdot a_{31} + H_{ex} \\ H_{my} = H_{py} + H_{ex} \cdot a_{12} + H_{ey} \cdot a_{22} + H_{ez} \cdot a_{32} + H_{ey} \\ H_{mz} = H_{pz} + H_{ex} \cdot a_{13} + H_{ey} \cdot a_{23} + H_{ez} \cdot a_{33} + H_{ez} \end{cases}, \quad (8)$$

其中: H_{ex} 、 H_{ey} 、 H_{ez} 为地磁场在载体坐标系三轴上的投影,此时式(8)展开为:

$$\cos\theta = \frac{H_{my}}{\sqrt{H_{mx}^2 + H_{my}^2 + H_{mz}^2}}, \quad (11)$$

$$\cos\varphi = \frac{H_{mz}}{\sqrt{H_{mx}^2 + H_{my}^2 + H_{mz}^2}}. \quad (12)$$

由于载体磁干扰的存在,上述求解方法存在一定的误差。可以在载体起飞之前进行静态补偿以获取精确的初始方向余弦,再利用惯导(惯导的精度问题是根据我们仪器的数据手册提供的,仿真时根据其精度来创建数据的)实时测得的姿态角数据进行旋转变换后可以获取飞行过程中的实时方向余弦值,即

$$\vec{D}_t = R \vec{D}_0, \quad (13)$$

其中: $\vec{D}_t$ 和 $\vec{D}_0$ 分别为实时和初始的方向余弦向量; R 为绕载体坐标系 3 个轴的旋转矩阵的乘积,可由式(14)求得^[19-20]。

表示绕 y 轴的旋转角度; γ 表示绕 z 轴的旋转角度。

综上所述,基于矢量测量的动态载体磁补偿优化方法步骤如下:

1) 载体起飞前对载体进行静态磁校准。根据椭球假设理论^[21],将载体与磁强计作为一个整体,以某一点为球心做覆盖球面的旋转运动,持续 10 s 时间,完成对磁强计误差的校准,用校准后的磁场数据获取初始的方向余弦向量;

2) 载体上升到巡航高度后,尽量保持匀速直线运动且姿态变化尽可能小,以确保可以忽略涡流场的影响;

3) 根据式(9)及式(13),4 个独立补偿系数的求解只需较少的采样点即可完成,由于日变项和地磁梯度的存在,每隔一段飞行距离需要实时计算一组新的补偿系数。

3 仿真试验与实测结果

为了验证本文提出的基于矢量测量的在线载体磁补偿优化方法,将本文方法、传统总场方法分别在考虑地磁梯度和不考虑地磁梯度的情况下进行对比仿真;本文方法、传统总场方法的病态性问题对比仿真;本文方法对于三分量、姿态角求方向余弦的补偿结果对比仿真。对于补偿结果的优劣有 3 种补偿指标^[10]:

1) 品质因数(FOM),为补偿结果中的 12 个机动动作区间内的峰峰值之和;

2) 标准差(STD),为补偿后测量结果的标准差;

3) 改善比(IR),为补偿前后信号的标准差之比;

本文选择标准差来评估补偿结果。

3.1 仿真条件

本次仿真试验利用 MATLAB 软件,并通过 regress 函数求解补偿系数。设地磁场初始值为 50 000 nT,载体速度为 10 m/s,采样率为 10 Hz,并沿着北向分量 x 直线匀速飞行,在该航线上分别作俯仰角、横滚角、偏航角分别为 $\pm 10^\circ$ 、 $\pm 10^\circ$ 、 $\pm 10^\circ$ 范围内的正弦机动。根据 Mag-03 三分量磁强计的噪声标准差为 6 pT,故试验中三分量各加入了均值为 0,标准差为 18 pT 的高斯白噪声来模拟随机噪声,最后矢量叠加成总场形式再与传统总场方法对比,传统总场方法的总场测量值则加入同等幅度的高斯白噪声。

3.2 地磁场梯度对载体补偿的影响

为了验证地磁梯度对本文方法的影响,分别将本文方法和传统总场方法在不考虑地磁场梯度、考

虑地磁场梯度(不考虑地磁梯度的仿真条件是地磁场值不变,考虑地磁梯度则是地磁场值随着位置改变)的情况下进行对比仿真试验。仿真试验除了满足 3.1 小节的试验条件外,还要设置地磁场的梯度变化。文献[19]研究发现在中国 $18^\circ\text{N} \sim 54^\circ\text{N}$ 和 $73^\circ\text{E} \sim 136^\circ\text{E}$ 地区范围内的 0~10 km 高空中,地磁场北向分量 x 、东向分量 y 、垂直分量 z 和总场 F 的磁场梯度近似呈线性变化,分别为 -4.694 nT/km 、 0.168 nT/km 、 -15.717 nT/km 和 -16.583 nT/km 。根据文献[19]的地磁场梯度、载体运动速度和采样率,通过计算得出在分量 x 、分量 y 、分量 z 和总场的磁场变化率分别为 -0.004694 nT/s 、 0.000168 nT/s 、 -0.015717 nT/s 和 -0.016583 nT/s 。通过计算后平均每个采样点在分量 x 、分量 y 、分量 z 和总场的磁场梯度分别为 -0.004694 nT 、 0.000168 nT 、 -0.015717 nT 和 -0.016583 nT 。传统总场方法在考虑地磁梯度、不考虑地磁梯度的情况下分别有 1 000 组数据,利用前 500 组数据进行补偿系数求解,后 500 组数据验证补偿效果,补偿结果如图 2 所示。本文方法在考虑地磁梯度、不考虑地磁梯度的情况下分别有 550 组数据。由于本文方法是在线补偿,平均 50 组数据更新一次补偿系数。其中前 50 组数据用于求解补偿系数,后 50 组数据验证补偿效果,补偿结果如图 3 所示。表 1 表示 4 种情况补偿结果的标准差。综上可得,本文方法对比传统总场方法可以有效降低地磁梯度误差带来的影响,提高了补偿精度。

由于地磁梯度是线性变化,传统总场方法的补偿结果也呈现线性变化的趋势,且随着测试时间越长,补偿结果越差。

由于本文方法是在线补偿,平均每 50 个样本点更新一次补偿系数,短时间内地磁梯度变化很小,以此来减小了地磁梯度的影响,且补偿结果始终稳定

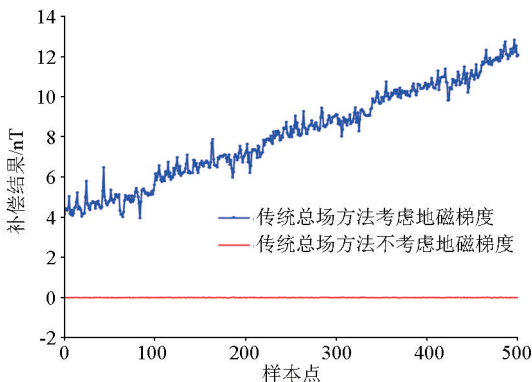


图 2 地磁梯度对传统总场方法补偿结果的影响

Fig. 2 Influence of geomagnetic gradient on the compensation result of traditional total field method

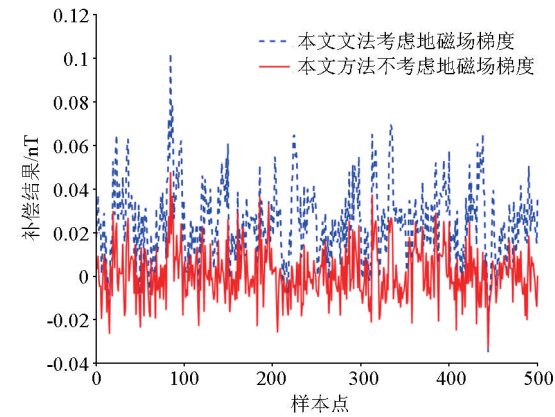


图3 地磁梯度对本文方法补偿结果的影响
Fig. 3 Influence of geomagnetic gradient on the compensation results of this method

表1 考虑地磁梯度和不考虑地磁梯度的标准差
Table 1 Standard deviations with and without geomagnetic gradients

	传统总场方法考虑地磁梯度	传统总场方法不考虑地磁梯度	本文方法考虑地磁梯度	本文方法不考虑地磁梯度
标准差/nT	2.3631	0.0105	0.0170	0.0107

在一定范围内。

在不考虑地磁梯度的情况下,本文方法和传统总场方法补偿精度差别不大,但是考虑地磁梯度的影响后,传统总场方法比较本文方法的补偿精度误差较大。

3.3 传统总场方法的病态性问题

针对传统总场方法存在病态性的问题,补偿效果较差。为此,与本文方法进行对比仿真。常用的病态性判断方法包括特征分析法、条件数、方差膨胀因子法。条件数的判断指标是如果条件数小于100,则设计阵列向量的病态性较弱;如果条件数大于100,则设计阵列向量的病态性较强;如果条件数大于1 000,则计阵列向量的病态性很严重^[20]。本次仿真试验通过条件数来评估数据矩阵的病态性。仿真条件如3.1小节所描述,分别有550组数据,前50组数据用于求解补偿系数和条件数为一样本组,后50组数据验证补偿效果。图4是本文方法和传统总场方法的条件数变化情况,图5给出了两者的补偿结果。分别计算补偿结果的标准差和条件数的平均值,如表2所示。综上所述,与传统总场方法相比,本文方法极大地改善了传统总场方法求解系数时的病态性问题,从而提高了补偿精度。

由于传统总场方法存在病态性问题,其条件数远大于1 000,相比本文方法的条件数不到100。

由图4可知,由于传统总场方法存在病态性问

题,求解的补偿系数误差较大,导致补偿结果较差。

在不考虑地磁梯度的情况下,传统总场方法表1和表2补偿结果的标准差差别较大,是因为仿真3.2小节求解补偿系数的数据为500组,3.3小节每次只有50组。为了验证是否因为数据量过大,导致3.2小节的补偿结果出现过拟合的情况,补偿系数不具有泛化能力。将3.2小节传统总场方法和本文方法求解的补偿系数分别对另一机动校准圈数据中500组数据进行补偿,得到传统总场方法标准差为0.772 1 nT,本文方法为0.011 9 nT。其中传统总场方法和本文方法*x*分量求解的补偿系数如表3、表4所示,对比可以看出传统总场方法的误差较大,该方法求解的系数并不具有泛化能力。

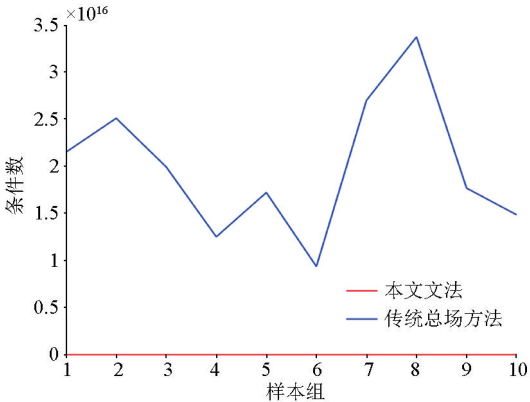


图4 本文方法与传统模型条件数对比仿真
Fig. 4 Comparison and simulation of the condition number between the method in this paper and the traditional model

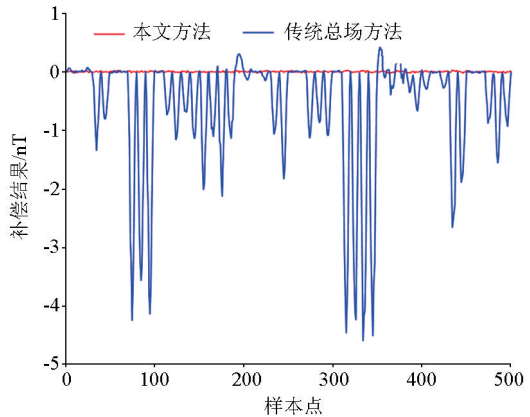


图5 本文方法与传统模型补偿结果对比仿真
Fig. 5 Comparison and simulation of the compensation results between the method in this paper and the traditional model

表2 标准差和条件数对比
Table 2 Comparison of standard deviation and condition number

	条件数	标准差/nT
本文方法	59.8869	0.0108
传统总场方法	1.76e+16	1.1589

表 3 传统总场方法求解补偿系数

Table 3 Compensation coefficients calculated by traditional total field method

补偿系数真实值	传统总场方法
10	25.57
30	55.40
50	81.44
0.6	-23.47
0.6	-4.22
0.6	-5.05
0.6	-28.12
0.6	-8.78
0.6	-32.34
0.3	-4.81
0.3	-3.01
0.3	-9.50
0.3	-2.54
0.3	-0.43
0.3	2.09
0.3	6.18
0.3	2.84
0.3	4.89

表 4 本文方法 x 分量求解补偿系数

Table 4 The method of this paper to solve the compensation coefficient of x component

补偿系数真实值	本文方法
100	99.96
39180	39180.00
-250	-249.96
-950	-949.98

3.4 磁场三分量与姿态角求方向余弦方法的补偿结果对比仿真

针对磁场三分量求方向余弦方法存在干扰误差的问题,为此,与姿态角求方向余弦方法的补偿结果进行对比仿真。本次仿真试验条件如 3.1 小节所描述,由于三分量求方向余弦方法的误差来源于载体干扰,则三分量分别有恒定场和感应场干扰在各分量上投影的误差。试验数据共有 550 组,前 50 组数据求解补偿系数,后 50 组数据验证补偿效果。

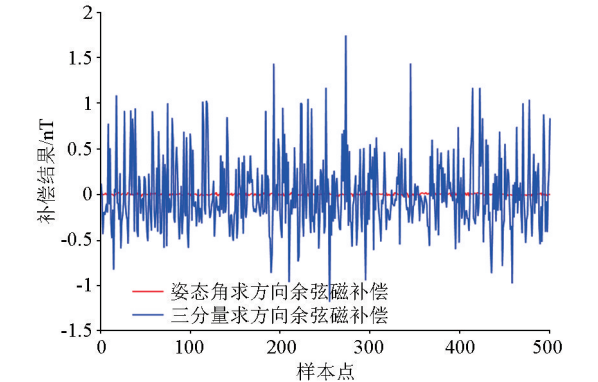


图 6 姿态角与三分量求解方向余弦补偿效果仿真对比
Fig.6 Simulation comparison of attitude angle and three-component solution direction cosine compensation effect

图 6 给出了姿态角、三分量求方向余弦的补偿结果,对其求标准差如表 5 所示。综上可得,与三分量求方向余弦方法相比,姿态角求方向余弦方法可以有效提高补偿精度。

由于三分量求方向余弦方法的分量值受到载体干扰的影响存在误差,导致补偿结果较差。

表 5 三分量与姿态角求方向余弦的补偿结果标准差

Table 5 Standard deviation of compensation results for direction cosine of three components and attitude angle

	姿态角求方向余弦磁补偿	三分量求方向余弦磁补偿
标准差/nT	0.0109	0.4260

3.5 野外实验

为了进一步验证本文方法的可行性,在野外进行了在线载体磁补偿实验。实验环境选取了周围无磁干扰的区域,利用光泵测得该区域的磁场总场值作为参照值,并按照前文的步骤进行实测飞行。将无人机设定为匀速直线飞行,速度为 10 m/s,采样率为 10 Hz,飞行时间为 100 s,共采集到 1 000 组数据。选取数据集中连续的 550 组数据,550 组数据中前 50 组数据用于求解补偿系数,对后 50 组数据进行补偿,图 7 给出了两种方法的补偿结果。由图可知,实测飞行情况下本文方法确实可以有效求解出补偿系数,提高补偿精度。

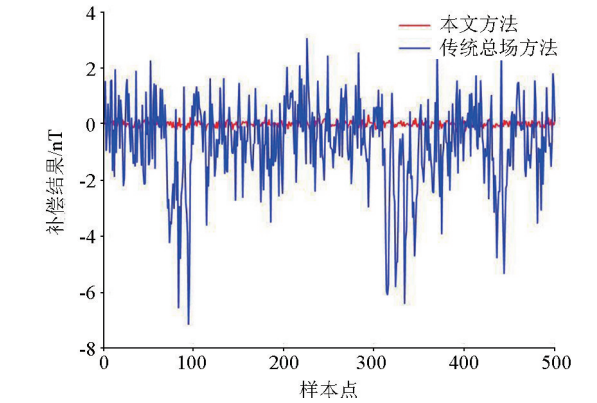


图 7 实测飞行本文方法与传统模型补偿结果对比
Fig.7 Comparison of the measured flight method and the compensation results of the traditional model

4 基于 HLS 工具的在线载体补偿算法硬件验证

为了实现在线载体补偿,需要验证该算法在嵌入式硬件的实时性和补偿精度的有效性。现阶段,基于单片机和 FPGA 的硬件算法设计占据主流。与单片机相比,FPGA 内部集成锁相环,可以把外部时

钟倍频,核心频率甚至可以达到几百 MHz。且 FPGA 内部程序可以并行运行,有处理更复杂功能的能力,比单片机运行速度更快。本文方法对速度和并行处理的要求很高,FPGA 可以更好地满足其实时性的特点。由于 Verilog 语言属于硬件描述语言,在进行浮点数运算时,会造成精度的损失。而 HLS 工具则可以直接使用 C、C++或 System C 来对 Xilinx 系列的 FPGA 进行编程,HLS 工具在内部运算过程中可以对 float、double 等数据类型进行操作,有效提高运算结果的精度。HLS 工具是为了尽快把新产品推向市场,数字系统的设计者通过“设计重用”和“抽象层级的提升”这两个方面来减少设计开发的周期。通过提高抽象的层级,大大减少了使用传统 RTL 描述进行 FPGA 开发所需的时间。

本文研究了在 HLS 工具中实现载体补偿系数的求解,仿真验证在线载体补偿,并通过 HLS 工具与 Verilog 语言进行仿真对比。本次以求解 x 分量的 4 项系数进行仿真试验,选用了 Xilinx 公司 kintex7l 系列的 xc7k480tlffv901-2l FPGA 芯片。试验共有 5 000 组数据,包含姿态角数据和磁场分量数据,每次选取 4 组数据分别作为 HLS 工具和 Verilog 语言的输入信号,将求解出的系数补偿后面 50 组数据。两者的补偿结果的标准差如图 8 所示,分别对 100 个测试点的标准差求平均值。对比两者消耗的时间、资源情况,如图 9、图 10 所示。综上可得,HLS 工具比较 Verilog 语言有效提高了补偿精度,所需要的资源也更多,两者在时间消耗上相差不多,本次选用的芯片可以满足其资源和时间方面的要求。

由图可知,比较 Verilog 语言,HLS 工具的补偿效果更为稳定、精确。

图中 HLS 工具消耗的时间为 2 090 ns,Verilog 语言则是 2 235 ns。

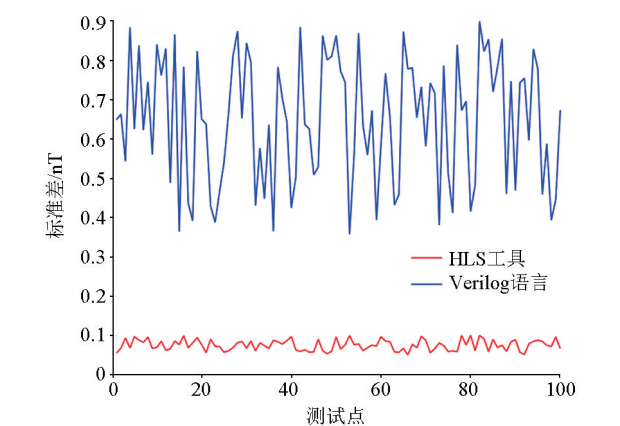


图 8 HLS 工具与 Verilog 语言标准差对比

Fig. 8 Comparison of standard deviation between HLS tool and Verilog language

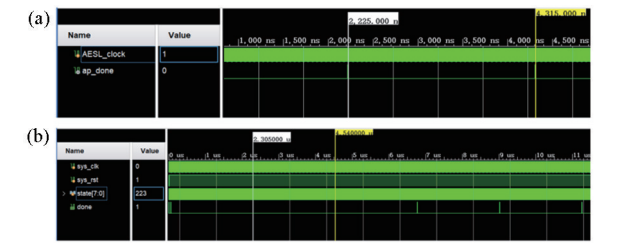


图 9 HLS 工具(a)与 Verilog 语言(b)时间消耗对比

Fig. 9 Time consumption comparison of the HLS tool (a) and the Verilog language (b)

(a)	LUT	FF	BRAMs	URAM	DSP
	109344	57894	0.00	0	1613
	0	135	0.00	0	0
(b)	LUT	FF	BRAMs	URAM	DSP
	1316	1308	0.00	0	0
	0	0	0.00	0	0
	3388	114	0.00	0	0
	57	0	0.00	0	0
	57	0	0.00	0	0

图 10 HLS 工具(a)与 Verilog 语言(b)消耗资源对比

Fig. 10 Resource consumption comparison of the HLS tool (a) and the Verilog language (b)

图中分别是 HLS 工具、Verilog 语言消耗的资源情况,主要是 LUT(查找表)和 FF(触发器)资源的消耗,HLS 工具还有 DSP(数字信号处理)资源的消耗。

由表 6 可知,HLS 工具与 Verilog 语言相比,由于运算过程中涉及了大量浮点数、乘除操作,极大地消耗了资源,也因此提高了运算结果的精度,有效提高了补偿精度。

表 6 HLS 工具与传统 Verilog 语言的 FPGA 对比

Table 6 FPGA comparison between HLS tools and traditional Verilog language

	资源消耗:LUT	资源消耗:FF	资源消耗:DSP	时间消耗/ns	平均值/nT
HLS 工具	109344	58029	1613	2090	0.0753
Verilog 语言	4818	1422	0	2235	0.6047

5 结论

本文讨论了传统 T-L 模型的磁干扰问题,在此基础上分析了载体磁场干扰的特性,对传统模型进行了简化,提出了基于矢量测量的在线载体磁补偿方法。通过相关仿真试验验证了本文方法的在线载体补偿可以有效降低地磁梯度的影响;本文方法改善了传统总场方法的病态性严重的问题,提高了补

偿效果;姿态角相对于三分量求方向余弦方法的补偿效果更好。最后利用 HLS 工具在硬件系统仿真实时性地更新载体补偿系数,验证了在线载体磁补偿,且相对于 Verilog 语言,其硬件算法精度更高。

致谢:感谢我的老师庄志洪、王宏波,师兄金煌煌还有同期董笙雅的帮助。

参考文献 (References):

- [1] 张昌达. 关于磁异常探测的若干问题[J]. 工程地球物理学报, 2007, 4(6): 549-553.
Zhang C D. Several issues on the detection of magnetic anomalies [J]. Journal of Engineering Geophysics, 2007, 4(6): 549-553.
- [2] Reeves C V. Aeromagnetic surveys principles, practices & interpretation[M]. Washington: GEOSOFT, 2005: 31-32.
- [3] Xiong S Q, Tong J, Ding Y Y, et al. Aeromagnetic data and geological structure of continental China: A review[J]. Applied Geophysics, 2017, 13(2): 227-237.
- [4] 朱学军. 无人机航磁测量中载体干扰磁场补偿方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.
Zhu X J. Research on compensation method of carrier interference magnetic field in field in UAV aeromagnetic survey[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014.
- [5] 张光, 张英堂, 尹刚, 等. 一种磁张量探测系统载体的磁张量补偿方法[J]. 地球物理学报, 2016, 59(1): 311-317.
Zhang G, Zhang Y T, Yi G, et al. Magnetic tensor compensation method for magnetic tensor detection system carrier[J]. Acta Geophysics, 2016, 59(1): 311-317.
- [6] Tolles W E. Compensation of induced magnetic fields in MAD equipped aircraft[R]. Airborne Instruments Lab, OSRD, 1943.
- [7] Tolles W E, Lawson J D. Magnetic compensation of MAD equipped aircraft[R]. Airborne Instruments Lab. Inc., 1950.
- [8] 韩磊. 航空磁异常探测关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
Han L. Research on key technologies of aeromagnetic anomaly detection[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [9] 谭斌, 林春生, 张宁, 等. 地磁场梯度对飞机磁场求解精度的影响分析[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2011, 36(12): 1482-1485.
Tan B, Lin C S, Zhang N, et al. Analysis of the influence of geomagnetic field gradient on the accuracy of aircraft magnetic field solution[J]. Journal of Wuhan University: Information Science Edition, 2011, 36(12): 1482-1485.
- [10] 何敬礼. 飞机磁场的自动补偿方法[J]. 物探与化探, 1985, 9(6): 464-469.
He J L. Automatic compensation method of aircraft magnetic field [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1985, 9(6): 464-469.
- [11] Williams P M. Aeromagnetic compensation using neural networks [J]. Neural Computing & Applications, 1993 (1): 207-214.
- [12] 边刚, 刘雁春, 卞光浪, 等. 海洋磁力测量中多站地磁日变改正值计算方法研究[J]. 地球物理学报, 2009, 52(10): 2613-2618.
Bian G, Liu Y C, Bian G L, et al. Research on calculation method of multi-station geomagnetic diurnal correction value in marine magnetometric survey[J]. Acta Geophysics, 2009, 52(10): 2613-2618.
- [13] Hardwick C D. Techniques for achieving stable and aeromagnetic compensation coefficients[C]// 1986 SEG Annual Meeting. Houston, Texas: Society of Exploration Geophysicists, 1986: 140-141.
- [14] Leach B W. Aeromagnetic compensation as a linear regression problem[J]. Information Linkage Between Applied Mathematics and Industry, 1980, 2(2): 139-161.
- [15] 伍东凌, 陈正想, 王秀. 基于遗传算法的磁干扰补偿方法[J]. 探测与控制学报, 2012, 34(6): 16-20.
Wu D L, Cheng Z X, Wang X. Magnetic interference compensation method based on genetic algorithm[J]. Journal of Detection and Control, 2012, 34(6): 16-20.
- [16] 潘雪, 张琦, 潘孟春, 等. 一种考虑地磁梯度变化的航磁补偿方法[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(10): 5-7, 10.
Pan X, Zhang Q, Pan M C, et al. An aeromagnetic compensation method considering geomagnetic gradient changes[J]. Sensors and Microsystems, 2020, 39(10): 5-7, 10.
- [17] 赵塔. 海域环境下铁磁性载体地磁场矢量差分检测方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
Zhao T. Research on vector difference detection method of ferromagnetic carrier geomagnetic field in marine environment[D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [18] 高全明. 固定翼无人机航磁三分量系统误差校正与干扰补偿技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
Gao Q M. Research on error correction and interference compensation technology of fixed-g UAV aeromagnetic three-component system[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [19] 冯彦, 蒋勇, 孙涵, 等. 地磁场水平梯度及高空地磁场的计算与分析[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(2): 735-746.
Fen Y, Jiang Y, Sun H, et al. Calculation and analysis of horizontal gradient of geomagnetic field and high-altitude geomagnetic field [J]. Advances in Geophysics, 2013, 28(2): 735-746.
- [20] 张永军, 吴磊, 林立文, 等. 摄影测量中病态问题的条数指标分析[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2010, 35(3): 308-312.
Zhang Y J, Wu L, Lin L W, et al. Analysis of number index of pathological problems in photogrammetry[J]. Journal of Wuhan University: Information Science Edition, 2010, 35(3): 308-312.
- [21] Moulin M, Goudon J C, Marsy J M, et al. Process for compensating the magnetic disturbances in the determination of a magnetic heading, and devices for carrying out this process [P]. USA, US4414753.

An online magnetic compensation method for carriers based on vector measurement

LING Jie-Ya¹, JIN Huang-Huang², ZHUANG Zhi-Hong¹, WANG Hong-Bo¹, DONG Sheng-Ya¹

(1. School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Huangshan University, Huangshan 245041, China)

Abstract: Aiming at the ill-conditioned coefficients in the traditional carrier magnetic compensation, this study investigated the main source of magnetic interference, simplified the original model by ignoring the influence of the eddy current field, and established a three-component magnetic compensation model. Accordingly, it proposed an online carrier magnetic compensation method for the magnetic field components. Compared with the traditional method, the method proposed in this study effectively improved the compensation accuracy by about 1.14 nT. This study conducted embedded hardware simulations of this method using the high-level synthesis (HLS) tool of the field programmable gate array (FPGA), verifying the real-time performance and magnetic compensation accuracy of this method in a hardware system.

Key words: magnetic interference; HLS; vector; online compensation

(本文编辑:王萌)