

doi: 10. 11720/wtyht. 2022. 0002

钱学武,赵立业,尹航. 航空重力梯度仪实时重力梯度解调方法[J]. 物探与化探, 2022, 46(6): 1507–1511. [http://doi.org/10. 11720/wtyht. 2022. 0002](http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.0002)

Qian X W, Zhao L Y, Yin H. A real-time gravity gradient demodulation method for airborne gravity gradiometers[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(6): 1507–1511. [http://doi.org/10. 11720/wtyht. 2022. 0002](http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.0002)

航空重力梯度仪实时重力梯度解调方法

钱学武^{1,2}, 赵立业¹, 尹航³

(1. 东南大学 仪器科学与工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 济南职业学院 电子工程学院, 济南 250103; 3. 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083)

摘 要: 为了进一步提高重力梯度测量精度, 提出了一种实时解调相位角补偿和重力梯度实时处理方法。首先根据重力梯度仪样机结构特性给出了重力梯度解调相位角的求解过程和求解算式, 然后研究了实时重力梯度解调方法并给出了重力梯度解调算式, 最后在重力梯度信号半物理仿真平台上进行了仿真实验测试。测试结果表明, 所提方法可以明显提高重力梯度测量精度, 具有较高的工程应用价值, 可以为航空重力梯度仪的研制提供技术参考。

关键词: 重力梯度仪; 解调相位角; 梯度解调; 半物理仿真

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2022)06-1507-05

0 引言

重力梯度是重力加速度的空间微分, 能够反映场源体更多的细节, 具有比重力更高的分辨率。重力梯度测量对于空间科学、地球科学、地质科学的发展以及资源勘探、惯性导航等研究具有非常重要的意义^[1-4]。20 世纪末, 澳大利亚 BHP 公司和美国 Lockheed Martin 公司合作共同研制了基于加速度计的部分张量航空重力梯度测量系统 FALCON, 随后 Lockheed Martin 公司研制了全张量重力梯度测量系统 Air-FTGTM, 英国 ARKeX 公司采用 Lockheed Martin 公司重力梯度专利技术开发了全张量重力梯度测量系统 FTGeX, 这 3 种重力梯度测量系统经过不断测试和改进, 证实了其在能源勘探方面的巨大优势, 并取得了很好效果^[5]。目前, 国际上正在研发的重力梯度仪主要包括旋转加速度计重力梯度仪、超导重力梯度仪、冷原子重力梯度仪、静电重力梯度仪, 还有最近兴起的基于微机械加工 (MEMS) 技术的重力梯度仪等, 其中旋转加速度计重力梯度仪是

目前唯一成功用于机载/船载动基座上的重力梯度测量仪器^[6]。

地球表面重力梯度异常信号非常微弱, 其幅值大约在 3 500~4 500 Eu (重力梯度单位, 1 Eu = $10^{-9}/s^2$), 地下矿藏引起的重力梯度异常更小, 一般在 10 Eu 左右, 重力梯度仪如果能够实现探矿能力, 梯度仪噪声密度水平不能超过 $14 \text{ Eu}/\sqrt{\text{Hz}}$ ^[7-8]。旋转加速度计重力梯度仪是由多种机械装置组成, 加速度计性能、加速度计安装精度、旋转机构稳定性、温控性能、平台稳定性、初始相位角精确性等因素都会对重力梯度信号造成较大影响, 且直接体现在重力梯度仪输出信号上。重力梯度信号中含有的噪声会对重力梯度的解调精度带来严重影响, 其中, 在航空重力梯度仪实时重力梯度测量过程中, 实时获取准确的解调相位角非常重要。本文针对现有重力梯度仪结构和信号特点, 经过认真研究和反复实验测试, 提出了一种航空重力梯度实时解调方法, 首先采用 FIR 数字带通滤波器对重力梯度仪输出信号进行滤波处理, 然后对带通滤波器输出信号进行解调相位角解

收稿日期: 2022-01-05; 修回日期: 2022-04-01

基金项目: 中国博士后科学基金项目“动基座航空重力梯度仪数据处理与误差补偿技术研究”(2020M671287); 江苏省博士后科研资助计划项目“航空重力梯度测量误差补偿与数据处理方法研究”(2020Z387); 山东省自然科学基金面上项目“高精度航空重力梯度误差补偿与数据处理技术研究”(ZR2020MF089)

第一作者: 钱学武 (1981-), 男, 博士后, 副教授, 主要从事精密仪器研究工作。Email: sdqxwu@163.com

通讯作者: 赵立业 (1977-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事精密仪器研究工作。Email: liyeczao@seu.edu.cn

算,得到实时准确的初始相位角,通过半实物仿真实验验证,证实采用本文提出的实时重力梯度解调方法可以进一步提高航空重力梯度测量精度。

1 旋转加速度计重力梯度仪工作原理

将 4 只高精度加速度计(A)对称安装在慢速旋转圆盘上,其敏感轴方向沿着圆盘切线方向且相互正交,相对两只加速度计敏感轴方向相反,并且与圆盘旋转轴垂直,各加速度计质量中心到圆盘中心的距离相等,圆盘以固定角频率旋转,相对两只加速度计输出信号相加再相减,可以降低圆盘平动加速度和旋转角加速度对重力梯度信号的影响。对重力梯度仪输出信号进行滤波和解调,就可以得到重力梯度分量,为了实时获取圆盘旋转角度用于重力梯度解算,在圆盘中心位置处放置高精密光栅角编码器。旋转加速度计重力梯度仪测量原理如图 1 所示。

2 重力梯度解调相位角分析

重力梯度仪样机是由复杂机械结构、电气线路

和控制算法等构成的高精密测量仪器。由于重力梯度仪所处的环境非常恶劣,如果直接对输出信号进行重力梯度解调,必然会引入额外的干扰,导致重力梯度解调过程中造成数据的不准确,因此,在进行重力梯度信号解调前,需要实时确定出精确的解调相位角。重力梯度解调相位角结构如图 2 所示。

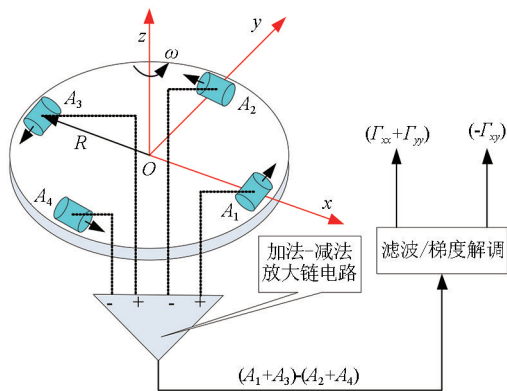


图 1 旋转加速度计重力梯度仪测量原理

Fig. 1 Schematic of the rotating accelerometer gravity gradiometer

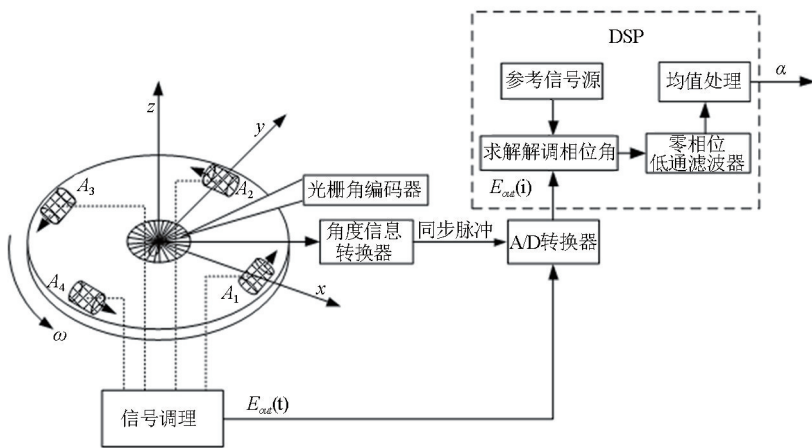


图 2 重力梯度解调相位角结构

Fig. 2 Schematic of the gravity gradient demodulation phase angle

4 只加速度计输出信号经过信号调理处理,得到模拟信号 $E_{out}(t)$,角度信息转换器输出同步脉冲信号给 A/D 转换器, A/D 转换器对模拟信号进行 A/D 转换得到第 $(i-1)\Delta t$ 时刻数字信号 $E_{out}(i)$,其表达式为^[9]:

$$\begin{cases} E_{out}(i) = A_k \sin[(2k+1)(\omega\Delta t(i-1) + \alpha - \theta)] + \\ B_k \cos[(2k+1)(\omega\Delta t(i-1) + \alpha - \theta)] + \\ C_k \sin[(2k+2)(\omega\Delta t(i-1) + \alpha - \theta)] + D\dot{\omega} \\ \alpha = \varphi - \psi \end{cases} \quad (1)$$

式中: A_k 、 B_k 分别为 $2k+1$ 次谐波正弦、余弦信号幅值; C_k 为 $2k+2$ 次谐波信号幅值; D 为圆盘旋转角加

速度幅值; α 为重力梯度解调相位角; φ 为调理通路信号延迟导致的延时角; θ 为加速度计 A_1 与重力梯度测量坐标系 x 轴之间的初始夹角; ψ 为环境物体引起的方位角; Δt 为采样时间; ω 为重力梯度仪圆盘旋转角频率; $\dot{\omega}$ 为重力梯度仪圆盘旋转角加速度。

参考信号源数字正余弦信号,它由 DSP 发出^[9],其表达式为:

$$\begin{cases} S_s(i,j) = \sin 2[\omega\Delta t(i-1) + \vartheta_j] \\ S_c(i,j) = \cos 2[\omega\Delta t(i-1) + \zeta_j] \end{cases}, \quad (2)$$

式中: ϑ_j 、 ζ_j 分别为正弦、余弦信号参考源的初始相角在第 j 次的修正角。

利用参考信号源数字正余弦信号对 A/D 转换

器的输出信号进行 2 倍频幅值解调,通过改变其初始相角直到得到最大的幅值为止,最终的初始相角即为重力梯度解调相位角^[9],其计算表达式为:

$$\begin{cases} \vartheta_q = \vartheta_i \mid \max_{k=Nq-N+1}^{\sum_{k=Nq-N+1}^{Nq} E_{out}(k) S_s(k,i)} \\ \zeta_q = \zeta_i \mid \max_{k=Nq-N+1}^{\sum_{k=Nq-N+1}^{Nq} E_{out}(k) S_c(k,i)} \end{cases}, \quad (3)$$

式中: N 为圆盘每旋转一圈角度信息转换器输出的脉冲数, ϑ_q 、 ζ_q 分别为第 q 次得到的重力梯度解调相位角;对得到的重力梯度解调相位角 ϑ_q 、 ζ_q 进行

组合,然后把组合的数据通过零相位低通滤波器进行滤波处理,最后对处理后的相位角进行均值处理,最终得到重力梯度解调相位角 α 。

3 重力梯度实时解调分析

为了实现航空重力梯度实时测量,在求解出解调相位角的基础上,添加重力梯度解调部分^[10],结构图如图 3 所示。

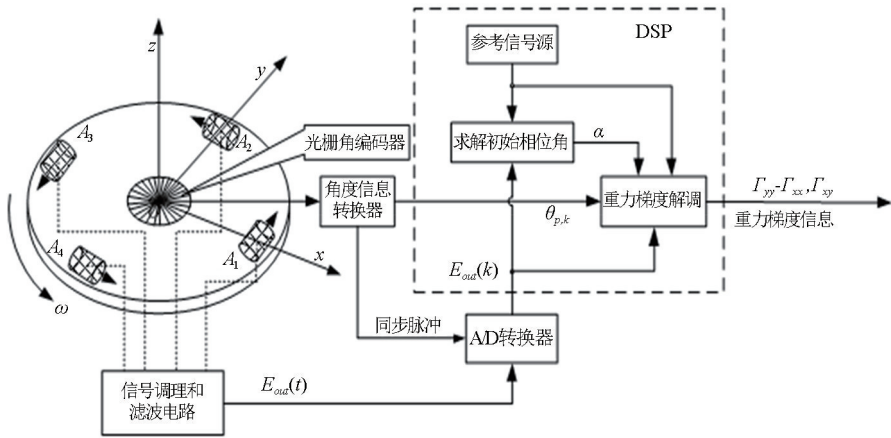


图 3 航空重力梯度仪实时重力梯度解调结构

Fig. 3 Structure of the real-time gravity gradient demodulation for the airborne gravity gradiometer

将 4 只加速度计输出信号经过信号调理和滤波电路进行处理,得到模拟信号 $E_{out}(t)$,角度信息转换器输出同步脉冲信号给 A/D 转换器,A/D 转换器

对模拟信号 $E_{out}(t)$ 进行 A/D 转换得到第 $(k-1)\Delta t$ 时刻数字信号 $E_{out}(t)$ ^[10],其表达式为

$$E_{out}(k) = 2K_lKR\{(\Gamma_{yy} - \Gamma_{xx})\sin2[\omega\Delta t(k-1) - \alpha] + 2\alpha_{xy}\cos2[\omega\Delta t(k-1) - \alpha]\} \quad (4)$$

式中: k 为数据序列索引; K 为系统信号放大增益; Δt 为采样时间; K_l 为加速度计标度因数; R 为圆盘半径; ω 为圆盘旋转角频率; α 为重力梯度解调相位角; Γ_{xx} 为 x 轴上的重力加速度分量在 x 轴方向上的空间导数; Γ_{yy} 为 y 轴上的重力加速度分量在 y 轴方向上的空间导数; $(\Gamma_{yy} - \Gamma_{xx})$ 为重力梯度 Γ_{yy} 与

Γ_{xx} 之差; Γ_{xy} 为 $x(y)$ 轴上的重力加速度分量在 $y(x)$ 轴方向上的空间导数。

圆盘光栅编码器上的角度信息转换器实时输出圆盘角位置信息为 $\theta_{p,k}$,利用角位置信息 $\theta_{p,k}$ 对重力梯度数字信号进行实时重力梯度解调,得到具有时空信息的重力梯度数据,重力梯度解调表达式为:

$$\begin{cases} (\Gamma_{yy} - \Gamma_{xx})(gps, \Delta tpk, p, k) = \frac{\sum_{p=1}^M [\sum_{k=p}^{N+p-1} E(k) \sin[2\omega\Delta t(k-p) - \alpha + 2\theta_{p,k}]]}{MNRKK_l} \\ \Gamma_{xy}(gps, \Delta tpk, p, k) = \frac{\sum_{p=1}^M [\sum_{k=p}^{N+p-1} E(k) \cos[2\omega\Delta t(k-p) - \alpha + 2\theta_{p,k}]]}{2MNRKK_l} \end{cases}, \quad (5)$$

式中: q 为当前时刻的圆盘旋转圈数序列索引; M 为圆盘旋转总圈数; gps 为 GPS 提供的位置信息。

4 仿真验证

根据旋转加速度计重力梯度仪工作原理,采用

高性能计算机、可编程高精度电流源、低噪声电流放大器、低噪声电压放大器、多路切换开关和高精度数字电压表等仪器组建了重力梯度半实物仿真分析系统。计算机把仿真数据发送给仿真分析系统,转换为接近真实的重力梯度仪工作环境下的重力梯度信

号,通过改变各种实验参数和实验数据,可以全方位模拟重力梯度信号,有助于进一步对重力梯度仪的信号特征、误差分析、加速度计标度因子反馈调整算法以及信号处理方法等进行详细研究^[11],重力梯度半实物仿真分析系统实物图如图 4 所示。

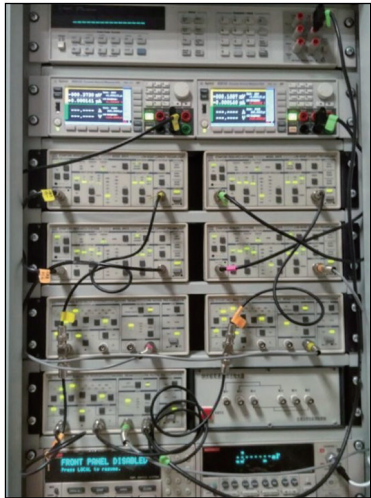


图 4 重力梯度仪半物理仿真系统实物

Fig. 4 Hardware-in-the-loop simulation platform of the gravity gradiometer

设定圆盘基线距离为 1 m,加速度计标度因数为 32 mA/g,重力加速度为 9.81 m/s²,圆盘旋转周期为 20 s,采样率为 2 Hz,初始时刻,加速度计 A_1 与 x 轴之间的夹角为 0°,环境物体引起的方位角为 0°,对重力梯度信号进行数据采集并处理,角度变动步长为 0.01°,解调相位角结果如图 5 所示。从图 5 中可以看到,重力梯度解调相位角在 -50.3°左右,零相位滤波处理前的解调相位角波动较大,标准差为 0.14°,通过零相位滤波处理后降低了波动范围,标准差变为 0.046°,最后做均值处理,得到重力梯度解调相位角均值为 -50.29°。如果采用 0°初始相位角作为重力梯度解调相位角,则会导致较大的重力梯度测量误差,从而影响重力梯度测量精度^[10]。

通过计算得到该环境物体引起的重力梯度分量 $(\Gamma_{yy}-\Gamma_{xx})$ 和 Γ_{xy} 的理论值分别为 -335 Eu 和 0 Eu,如果不做重力梯度解调相位角处理,采用 0°初始相位角作为重力梯度解调相位角,解调得到的重力梯度分量 $(\Gamma_{yy}-\Gamma_{xx})$ 和 Γ_{xy} 分别为 61.89 Eu 和 164.62 Eu,与理论梯度值之间的误差达到了几百 Eu,因此直接对原始重力梯度数据解调会产生非常大的测量误差,无法进行航空重力梯度测量;若采用计算得到的解调相位角作为重力梯度解调初始相位角对重力梯度信号进行解调,解调得到重力梯度分量 $(\Gamma_{yy}-\Gamma_{xx})$ 和 Γ_{xy} 分别为 -335.008 5 Eu 和 0.000 55 Eu,与理论梯

度值之间的误差小于 0.01 Eu,能够满足航空重力梯度测量需求,重力梯度解调相位补偿前后的梯度信息比较如图 6、图 7 所示。

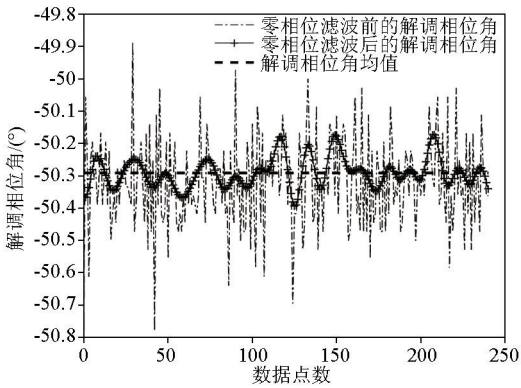


图 5 重力梯度解调相位角在零相位滤波前后比较波形

Fig. 5 Comparison of gravity gradient demodulation phase angle before and after zero-phase filtering

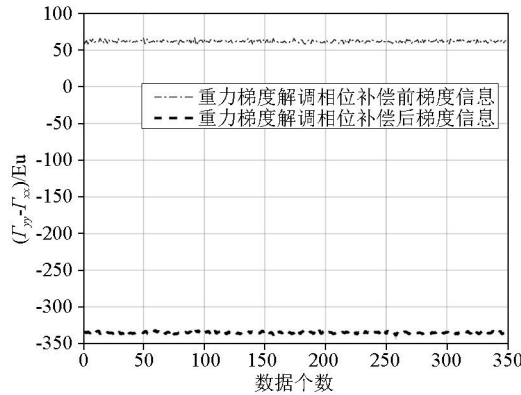


图 6 相位补偿前后的梯度信息 $(\Gamma_{yy}-\Gamma_{xx})$ 比较的波形

Fig. 6 Comparison of the gradient component $(\Gamma_{yy}-\Gamma_{xx})$ before and after phase compensation

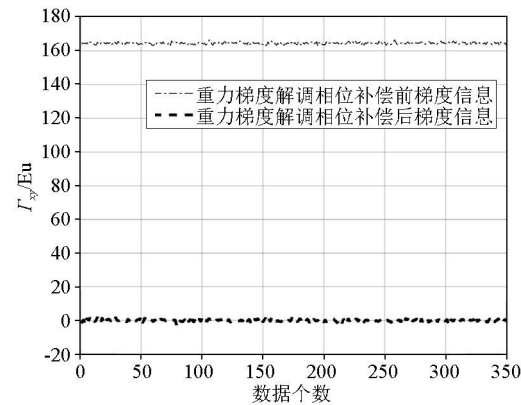


图 7 相位补偿前后的梯度信息 Γ_{xy} 比较的波形

Fig. 7 Comparison of the gradient component Γ_{xy} before and after phase compensation

5 结论

本文针对航空重力梯度仪在测量过程中解调相

位角对重力梯度测量精度的影响,提出了实时确定解调相位角和重力梯度解调求解的方法。首先提出了解调相位角的确定方法和求解算式;然后给出了实时重力梯度解调算式;接着利用解调相位角对重力梯度仪输出数据进行实时重力梯度解调,得到更高精度的重力梯度数据;最后为了验证所提方法的有效性,在重力梯度半物理仿真系统上进行半物理仿真实验测试,仿真结果表明,所给的初始相位角解算式和重力梯度实时解调算式能够明显提高重力梯度测量精度,可以为重力梯度仪的研制提供技术参考。

参考文献 (References) :

[1] 钱学武,蔡体菁,尹航. 一种旋转加速度计重力梯度仪重力梯度解调方法[J]. 物探与化探,2015,39(S1):80-83.
Qian X W, Cai T J, Yin H. A gravity gradient demodulation method for rotating accelerometer gravity gradiometer[J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2015, 39(S1):80-83.

[2] 蔡体菁,钱学武,丁昊. 旋转加速度计重力梯度仪重力梯度信号仿真[J]. 物探与化探,2015,39(S1):80-83.
Cai T J, Qian X W, Ding H. Signal simulation of gravity gradient for gravity gradiometer of rotating accelerometer[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015,39(S1): 80-83.

[3] DiFrancesco D. Advances and challenges in the development and deployment of gravity gradiometer systems[C]// EGM 2007 International Workshop, Innovation in EM, Grav. and Mag. Methods: A new Perspective for Exploration, Italy: Capri, 2007.

[4] Roberts D,Chowdhury P R,Lowe S J, et al. Airborne gravity gradiometer surveying of petroleum systems under Lake Tanganyika,

Tanzania[J]. Exploration Geophysics,2016,47(3):228-236.

[5] DiFrancesco D, Meyer T, Christensen A, et al. Gravity gradiometry-today and tomorrow [C] // 11th SAGA Biennial Technical Meeting and Exhibition, 2009.

[6] Lococo J J. The Falcon airborne gravity gradiometer for engineering applications[C]//Environment and Engineering Geophysical Society, 2010.

[7] Yamanaka H. HeliFalcon © airborne gravity gradiometer data acquisition in rugged terrain[C]// Global Meeting Abstracts Society of Exploration Geophysicists, 2013.

[8] 钱学武,蔡体菁. 旋转加速度计重力梯度仪数据处理方法[J]. 东南大学学报:自然科学版,2016,46(4):708 - 712.
Qian X W, Cai T J. Data processing methods for rotating accelerometer gravity gradiometer[J]. Journal of Southeast University Natural Science Edition,2016,46(4): 708 - 712.

[9] 钱学武,赵立业. 旋转加速度计重力梯度仪重力梯度解调相位角确定方法及装置[P]. 中国专利,CN 111624671A. 2020. 09. 04
Qian X W, Zhao L Y. Method and device for determining phase angle of gravity gradient demodulation for rotating accelerometer gravity gradiometer[P]. Patent, CN 111624671A. 2020. 09. 04.

[10] 钱学武,赵立业. 一种航空重力梯度仪实时重力梯度解调方法及装置[P]. 中国专利,CN 111650664A. 2020. 09. 11.
Qian X W, Zhao L Y. Method and device of real-time gravity gradient demodulation for an airborne gravity gradiometer[P]. Patent, CN 111650664A. 2020. 09. 11.

[11] 蔡体菁,钱学武,丁昊. 旋转加速度计重力梯度仪重力梯度信号仿真[J]. 物探与化探, 2015, 39(S1): 76-79.
Cai T J, Qian X W, Ding H. Signal simulation of gravity gradient for gravity gradiometer of rotating accelerometer[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(S1): 76-79.

A real-time gravity gradient demodulation method for airborne gravity gradiometers

QIAN Xue-Wu^{1,2}, ZHAO Li-Ye¹, YIN Hang³

(1. School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. School of Electronic Engineering, Jinan Vocational College, Jinan 250103, China; 3. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: To further improve the precision of gravity gradient measurement, this study proposed a method for real-time phase angle compensation of gravity gradient demodulation and real-time processing of gravity gradients. Firstly, this study determined the process and formula used to determine the phase angles for gravity gradient demodulation based on the structural features of the gravity gradiometer prototype. Then, it investigated the method for real-time gravity gradient demodulation and determined the formula. Finally, this study carried out simulation experiments using the hardware-in-the-loop simulation platform of gravity gradient signals. The simulation results show that the method proposed in this study can significantly improve the precision of gravity gradient measurement and can be applied to engineering. Therefore, this study can provide technical references for the development of airborne gravity gradiometers.

Key words: gravity gradiometer; demodulation phase angle; gradient demodulation; hardware-in-the-loop simulation

(本文编辑:王萌)