

DOI: 10.20189/j.cnki.CN/61-1527/E.202502005

基于高度计位置修正的 SINS/GNSS 车载重力测量方法

张志利, 张克凡*, 赵军阳
(火箭军工程大学, 陕西 西安 710025)

摘要: 针对以车辆为动基座进行重力异常测量试验时, 遇到隧道、立交桥、山谷和密林等地面障碍物遮挡导致全球导航定位系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 天线无法正常输出定位信息, 从而影响重力测量精度的问题, 提出了一种基于高度计位置修正的捷联惯性导航系统 (Strapdown Inertial Navigation System, SINS) /GNSS 集中滤波车载重力测量方法。首先, 利用高度计输出的海拔高度对 GNSS 信号进行自动检测和修正, 解决 GNSS 信号跳变和空缺的问题; 其次, 使用修正后的 GNSS 信息进行组合导航和重力测量改正项计算, 并利用捷联式惯性标量重力测量模型提取测线重力异常; 最后, 以 EGM2190 模型计算的测线重力异常为参考值, 对低通滤波后的测线重力异常进行外符合精度评估。结果表明: 与传统 SINS/GNSS 方法相比, 所提方法具有明显的精度优势。

关键词: 重力异常车载测量; 全球导航卫星系统; 捷联惯性导航系统; 高度计

中图分类号: TJ768.2

文献标志码: A

文章编号: 2097-2741(2025)02-039-08

SINS/GNSS Vehicle Gravity Measurement Method Based on Altimeter Position Correction

ZHANG Zhili, ZHANG Kefan*, ZHAO Junyang
(Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

ABSTRACT: Ground obstacles, such as tunnels, overpasses, valleys and dense forests, obstruct the GNSS (Global Navigation Satellite System) antenna from outputting positioning information. These affect the accuracy of gravity measurement when conducting gravity anomaly measurement tests using vehicles as the moving base. Thus, this study posed a dual-axis rotating SINS (Strapdown Inertial Navigation System) /global navigation satellite system centralized filtering vehicle mounted gravity measurement method based on altimeter position correction. First, the GNSS signals were detected and automatically corrected using the altitude output of the altimeter.

收稿日期: 2024-07-16

基金项目: 国家自然科学基金 (62305393); 173 基础加强领域基金 (2021-JCJQ-JJ-0871)

第一作者: 张志利 (1966—), 男, 教授, 主要从事基准级定瞄、发射系统仿真研究。E-mail: zhangzl_xiht@163.com

通信作者: 张克凡 (1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事基准级定瞄、高超声速热防护研究。
E-mail: kefanzhang2024RFUE@outlook.com

引用格式: 张志利, 张克凡, 赵军阳. 基于高度计位置修正的 SINS/GNSS 车载重力测量方法[J]. 火箭军工程大学学报, 2025, 39 (2): 39-46. ZHANG Zhili, ZHANG Kefan, ZHAO Junyang. SINS/GNSS vehicle gravity measurement method based on altimeter position correction[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2025, 39 (2): 39-46.

eter, which solved the problem of GNSS signal jump and vacancy. Second, the modified GNSS information was used to calculate the integrated navigation and gravity measurement correction term, and the gravity anomaly of the survey line was extracted using a strapdown inertial scalar gravity measurement model. Finally, adopting the gravity anomaly of the survey line calculated using the EGM2190 model as a reference value, the external coincidence accuracy of the gravity anomaly of the survey line after low-pass filtering was evaluated. The results show that compared with traditional SINS/GNSS methods, the proposed method has an obvious accuracy advantage.

KEYWORDS: vehicle measurement of gravity anomaly; global navigation satellite system; strapdown inertial navigation system; altimeter

陆地重力信息具有丰富的工程应用价值,在资源勘测领域,可用于城市地下水、金属矿区及油气田调查^[1-2];在国防工业领域,可用于地下结构探测、水下移动目标识别和陆基武器发射平台的重力补偿定位等^[3-6]。目前,陆地动基座重力测量可用的载体为航空器和车辆。以航空器为动基座的重力测量手段称为航空重力测量,航空重力测量能快速测定目标区域的重力信息,且不受地面条件限制。然而,这种测量手段只能测定航空器航线上的重力信息,实际应用时往往还需要向下延拓,将造成精度损失^[7]。以车辆为基座的重力测量手段称为车载重力测量,测量手段更接近场源,信噪比高,而且免去了复杂的数据延拓处理。当前,车载重力测量已成为陆地区域重力加密测量的主要手段^[8]。

全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)提供的定位信息在重力异常动基座测量试验中具有至关重要的作用^[9-11]。然而,以车辆为载体进行动态重力异常测量试验时,受到的干扰很多,测量道路附近的山体、高大树木甚至隧道等地面结构体都会导致GNSS信号被遮挡,造成较大的定位误差,进而影响到测量精度^[12]。针对这一问题,Yu等^[13]提出了一种人为处理的GNSS定位数据质量检测及修正方法。该方法特别关注车辆途经特殊路段时的GNSS定位结果,利用插值、粗大误差剔除和预滤波手段修正GNSS定位数据。在此基础上,Yu等^[14]又提出了一种以捷联惯性导航系统(Strapdown Inertial Navigation System, SINS)的高程信息为检测量的GNSS数据检测及修正方法。然而,该方法在阈值选择、数据修复等环节均比较繁琐且主观。

在各种车载定位定向传感器中,气压高度计(Barometric Altimeter, BALT)能自主输出不随

时间发散的高精度高程信息^[15]。因此,本文以高度计输出的高程信息为检测量,基于误差分析选择全新的阈值,提出了一种基于高度计位置修正的SINS/GNSS组合车载重力测量方法,简称改进的SINS/GNSS方法,通过自动修复GNSS天向通道定位数据来提高重力异常车载测量试验外符合精度。

1 测量模型及误差分析

选取捷联式惯性标量重力测量(Strapdown Inertial Scalar Gravimetry, SISG)模型提取重力信号,所测物理量为重力异常。测量模型为^[16]

$$\delta g_U = \ddot{v}_U - f_U + 2\omega_{ie} \cdot v_E \cdot \cos L + \frac{v_E^2}{R_N + h} + \frac{v_N^2}{R_M + h} - \gamma \quad (1)$$

式中: δg_U 为重力异常; $\ddot{v}_U$ 为载体的天向运动加速度; f_U 为天向比力; ω_{ie} 为地球自转角速度的模值; v_E 和 v_N 分别为载体的东向速度和北向速度; L 为纬度; R_M 和 R_N 分别为地球子午圈半径和卯酉圈半径; h 为海拔高度; γ 为正常重力的天向分量。

对式(1)进行变分运算,得到重力异常车载动态测量的误差模型为

$$\begin{aligned} d\delta g_U = & \delta \ddot{v}_U - (-f_N \cdot \phi_E + f_E \cdot \phi_N) - \delta f_U - \\ & 2\omega_{ie} \cdot \cos L \cdot \delta v_E + 2 \frac{v_E \cdot \delta v_E}{R_N + h} + \\ & 2\omega_{ie} \cdot v_E \cdot \delta L \cdot \cos L - \delta \gamma \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $d\delta g_U$ 为重力异常测量误差; $\delta \ddot{v}_U$ 为载体的天向加速度误差; f_N 和 f_E 分别为北向比力和东向比力; ϕ_E 和 ϕ_N 分别为SINS“数学平台”的东向失准角和北向失准角; δf_U 为天向比力测量误差; δv_E 为载体东向速度误差; δL 为载体纬度定位误差; $\delta \gamma$ 为正常重力计算误差。

如表 1 所示, 可将式 (2) 按误差来源具体划分为测速误差、航姿误差和定位误差 3 类。在重力异常 SINS/GNSS 组合车载测量方法中, 测速误差和航姿误差与 SINS/GNSS 组合导航解算的比力、姿态、纬度和东向速度有关, 定位误差则与 GNSS 有关^[17]。

表 1 重力异常车载测量误差分析

Table 1 Error analysis of vehicle measurement of gravity anomaly

序号	误差源	误差项
1	测速误差	$-2\omega_{ie} \cdot \cos L \cdot \delta v_E + 2 \frac{v_E \cdot \delta v_E}{R_N + h}$
2	航姿误差	$f_N \cdot \phi_E - f_E \cdot \phi_N - \delta f_U$
3	定位误差	$2\omega_{ie} \cdot v_E \cdot \delta L \cdot \cos L - \delta \gamma + \delta \dot{v}_U$

2 测量方法

2.1 SINS/GNSS 信息融合

由表 1 可知, 惯性导航解算的精度将直接影响到重力异常的测量精度。然而, 纯惯性导航是发散的, 无法满足重力异常测量的需求。因此, 采用 19×6 维集中 Kalman 滤波器融合 GNSS 和 SINS 的信息, 抑制 SINS 误差发散。

通常情况下, SINS 的误差状态量 $\mathbf{X}_{\text{SINS}}$ 由失准角误差 ϕ^n 、速度误差 δv^n 、位置误差 δp^n 、陀螺仪零偏 ∇^b 和加速度计零偏 ε^b 组成。除 $\mathbf{X}_{\text{SINS}}$ 外, 本文再将 GNSS 的杆臂误差 L^b 以及定位滞后误差 δt 增广到系统误差状态量 $\mathbf{X}_{\text{SINS_GNSS}}$ 中。系统的误差状态量和状态方程可表示为

$$\mathbf{X}_{\text{SINS_GNSS}} = [\phi^n \quad \delta v^n \quad \delta p^n \quad \varepsilon^b \quad \nabla^b \quad L^b \quad \delta t]^T$$

$$\dot{\mathbf{X}}_{\text{SINS_GNSS}} = \mathbf{F} \mathbf{X}_{\text{SINS_GNSS}} + \mathbf{G} \mathbf{W} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{F}$ 为误差状态量微分方程的系数矩阵; $\mathbf{G}$ 为噪声驱动矩阵; $\mathbf{W}$ 为系统噪声。

观测车载 GNSS 量测的位置及速度信息进行组合导航, 观测方程可以表示为

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \tilde{p}_{\text{SINS}}^n - \tilde{p}_{\text{GNSS}}^n \\ \tilde{v}_{\text{SINS}}^n - \tilde{v}_{\text{GNSS}}^n \end{bmatrix} = \mathbf{H} \mathbf{X}_{\text{SINS_GNSS}} + \mathbf{V} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{Z}$ 为观测矩阵; $\tilde{p}_{\text{SINS}}^n$ 和 $\tilde{p}_{\text{GNSS}}^n$ 分别为 SINS 和 GNSS 量测的地理位置; $\tilde{v}_{\text{SINS}}^n$ 和 $\tilde{v}_{\text{GNSS}}^n$ 分别为 n 系下 SINS 和 GNSS 量测的速度; $\mathbf{V}$ 为卫星接收机测量

噪声矩阵; 观测方程的结构矩阵 $\mathbf{H}$ 可表示为

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 6} & -\mathbf{C}_b^n(\boldsymbol{\omega}_{eb}^b \wedge) & \mathbf{a}^n \\ \mathbf{0}_{3 \times 6} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 6} & -\mathbf{M}_{pv} \mathbf{C}_b^n & \mathbf{M}_{pv} \mathbf{v}_{\text{SINS}}^n \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: 符号 $\wedge$ 表示叉乘; $\mathbf{C}_b^n$ 为 b 系到 n 系的方向余弦矩阵; $\boldsymbol{\omega}_{eb}^b$ 为 b 系相对于 e 系的角速度在 b 系的投影; $\mathbf{M}_{pv}$ 为速度误差对位置误差的影响矩阵; $\mathbf{a}^n$ 为运载体平均线加速度。上述坐标系的定义和矩阵的具体形式见文献[18]。

2.2 GNSS 数据自动检测及修正算法

由于 GNSS 水平定位误差对重力测量精度的影响并不大, 故选择天向通道数据作为评价原始 GNSS 数据是否异常的依据^[19]。将 BALT 输出的高程信息作为参考值来检测原始 GNSS 的天向通道数据, 并对 GNSS 失效数据进行修复。GNSS 失效数据自动检测及修正的步骤如下。

1) 计算被检测量

将 BALT 输出的高程 h_{BALT} 和 GNSS 天向通道的原始定位结果 h_{GNSS} 作差, 得到高程残差 Δh , 并将其作为被检测量。

2) 识别 GNSS 空缺数据并进行插值补齐

若被检测量与高度计输出相同, 则对卫星定位数据进行插值补齐, 并将空白数据替换为插值量 h_{interp} 。

3) 判断被检测量是否超过阈值并进行数据替换

考虑到地球垂向通道的重力梯度约为 $-0.3 \times 10^{-3} \text{ Gal/m}$ 。那么, 仅仅 3.3 m 的高程定位误差将产生近 $1 \times 10^{-3} \text{ Gal}$ 的误差, 故将阈值 ξ 设置为 1.5 m。若被检测量达到或超过 ξ , 说明该数据为跳变数据, 用高度计输出的高程替换跳变数据; 否则, 说明 GNSS 输出正常, 不用对其进行修正。

4) 输出修复后的 GNSS 信号 h_{GNSS2}

算法程序如下

输入: $h_{\text{BALT}}, h_{\text{GNSS}}$

输出: h_{GNSS2}

While $t > 0$ do

Step1 计算被检测量

$$\Delta h = h_{\text{GNSS}} - h_{\text{BALT}}$$

Step2 识别空缺数据并插值补齐

if $\Delta h = h_{\text{BALT}}$ then

$$h_{\text{GNSS2}} = h_{\text{interp}}$$

End if

Step3 判断被检测量是否超过阈值并进行数

据替换

if $|\Delta h| \leq \xi$ then

$h_{\text{GNSS2}} = h_{\text{GNSS}}$

else

$h_{\text{GNSS2}} = h_{\text{BALT}}$

End if

End while

2.3 改进SINS/GNSS方法的数据处理流程

在改进的SINS/GNSS重力异常测量方法中, 纬度、经度、东向速度和北向速度由SINS/GNSS组合导航解算得到。高程信息由GNSS提供, 数据处理过程如图1所示, 具体步骤总结如下。

Step1 使用GNSS异常数据自动检测与修复算法对GNSS原始数据进行修正。

Step2 车载SINS完成初始对准, 输出系统组合导航所需要的初始姿态角; 观测GNSS信息, 进行SINS/GNSS组合导航, 经SINS/GNSS组合导航解算得到载体的姿态、比力、位置信息和速度信息。

Step3 利用导航信息及GNSS提供的位置及速度计算载体运动加速度、厄特弗斯改正项和正常重力。

厄特弗斯改正项 δa_E 描述了载体和地球相对运动时, 科里奥惯性力对重力测量设备产生的影响。与航空重力测量相比, 车辆在动态实验中的运行速度较慢, 故使用海洋重力测量领域中严密的厄特弗斯改正项模型即可满足车载动态重力测量的要求, 其表达式为

$$\delta a_E = 2\omega_{ie} \cdot v_E \cdot \cos L + \frac{v_E^2}{R_N + h} + \frac{v_N^2}{R_M + h} \quad (6)$$

正常重力则是根据地球形状、大小以及测点

的地理位置计算出来的。选定地球模型后, 只要知道载体所在纬度和高程信息即可进行计算, 表达式为

$$\gamma = \frac{\gamma_0}{(1 + h/\sqrt{R_M \cdot R_N})^2} \quad (7)$$

$$\gamma_0 = 9.780\,318 \times (1 + 5.302\,4 \times 10^{-3} \sin^2 L - 5.8 \times 10^{-6} \sin^2 2L) \quad (8)$$

式中: γ_0 为WGS-84坐标系下经过纬度修正的正常重力, 单位为 m/s^2 。

通过二次差分GNSS天向通道的高程信息, 得到载体的天向运动加速度为

$$\ddot{v}_U = \frac{h_{\text{GNSS2}}(t + 2\Delta t) + h_{\text{GNSS2}}(t - 2\Delta t) - 2h_{\text{GNSS2}}(t)}{4\Delta t^2} \quad (9)$$

式中: $h_{\text{GNSS2}}(t)$ 为 t 时刻GNSS天向通道的定位结果; Δt 为时间间隔。

Step4 计算重力异常, 并利用FIR滤波器对其进行低通滤波。

Step5 以EGM2190地球模型计算的测线重力异常为参考值, 进行外符合精度评估。

3 仿真及实验验证

3.1 仿真实验与分析

首先进行单测线跑车仿真实验, 将载体的仿真起点设置为: 经度 109.117°E , 纬度 34.313°N , 海拔高度 0 m 。车辆由静止出发, 模拟车辆的真实运动状态, 具体包括: ①车辆原地静止 100 s ; ②获得 6 m/s^2 的前向加速度, 并向前行驶 10 s ; ③保持 60 m/s 的前向速度进行匀速直线运动, 行驶 $2\,500 \text{ s}$; ④以 4 m/s^2 的后向加速度行驶 15 s ; ⑤到达仿真轨迹终点, 静止 10 s 。

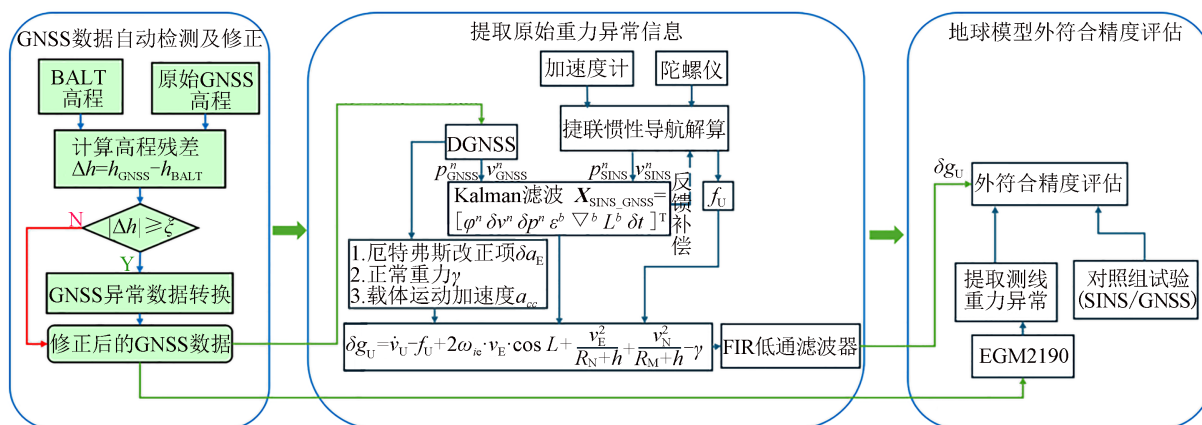


图 1 改进的SINS/GNSS重力测量方法

Fig. 1 Block diagram of improved SINS/GNSS gravity measurement method

传感器的参数设定如下：GNSS采样频率为1 Hz，SINS的采样频率为100 Hz；陀螺仪的零偏设置为 $0.01^{\circ}/\text{h}$ ，角度随机游走设置为 $0.001^{\circ}/\sqrt{h}$ ；加速度计的常值漂移设置为 $50\text{ }\mu\text{g}$ ，速度随机游走设置为 $5\text{ }\mu\text{g}/\sqrt{h}$ ；初始姿态角向量设置为零向量；模拟的气压高度计信息由“仿真轨迹+初始偏差+一阶马尔科夫过程”组成；为了模拟车载GNSS天线长时间受遮挡的测量工况，将模拟GNSS的某段数据赋值为“常值+跳变值”。仿真实验中，载体的运动轨迹如图2所示，行驶时间为2 635 s，轨迹总长度为150.75 km。

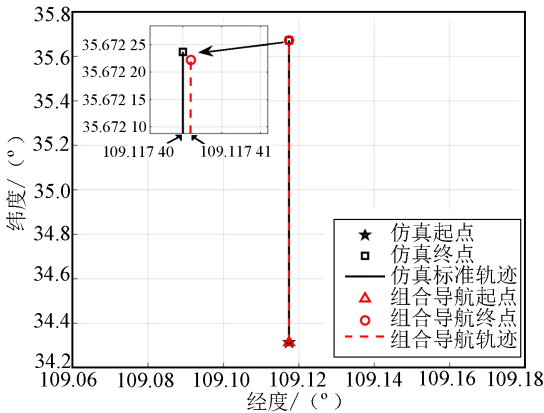


图2 载体运动轨迹
Fig. 2 Traces of carriers

利用图1所示流程处理仿真数据，经100 s FIR滤波后，SINS/GNSS方法和改进SINS/GNSS方法的单测线重力异常测量结果如图3所示。

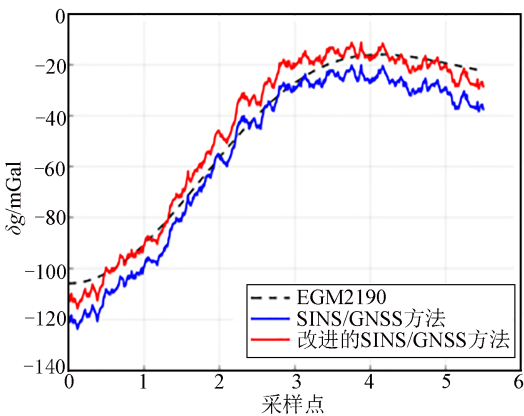


图3 2种方法的重力测量结果对比
Fig. 3 Comparison of gravity measurement results between two methods

由图3可以看出，所提测量方法的重力异常测量结果与地球模型计算结果变化趋势一致，验证了测量方法的有效性。此外，经统计传统SINS/

GNSS方法的外符合精度为8.77 mGal，而改进SINS/GNSS方法的外符合精度为5.49 mGal，能初步说明所提方法具有精度优势。

3.2 重力异常车载动态测量实验

2024年3月，课题组在天津开展了重力异常车载动态测量实验。本次实验的目的有2个：一是充分验证重力异常车载测量系统的可靠性和稳定性；二是验证所提方法的有效性及精度。

测量系统实验用车如图4所示，配备了双轴旋转激光捷联惯性导航系统、轮式里程表、气压高度计、GNSS定位设备、蓄电池和导航计算机等。其中，DGPS天线吸附在车顶，轮式里程计安装在车辆的非转向轮上，双轴旋转激光捷联惯性导航系统固连在测量车内的稳定平台上。表2列出了上述定位定向传感器的性能参数。



图4 重力测量系统
Fig. 4 Gravity measurement system

表2 传感器参数
Table 2 Sensor parameters

名称	参数	性能
惯性测量单元	采样频率	200 Hz
	陀螺仪零偏	$0.003^{\circ}/\text{h}$
	加速度计零偏	$10\text{ }\mu\text{g}$
GNSS	水平定位精度	3 m
	高程定位精度	5 m
BALT	分辨率	0.1 m
	精度	$\pm 0.5\text{ m}$

实验的车辆行驶路线如图5所示，组合导航定位结果的横轴及纵轴坐标数据皆从0开始并使用相对值表示。整个实验过程中，司机驾驶平稳，

未发生明显的加减速、急转弯和车辆侧滑等情况，重力测量系统基本能保证沿着前期设计的重力异常测线进行匀速采样。



(a) 重力异常采样轨迹

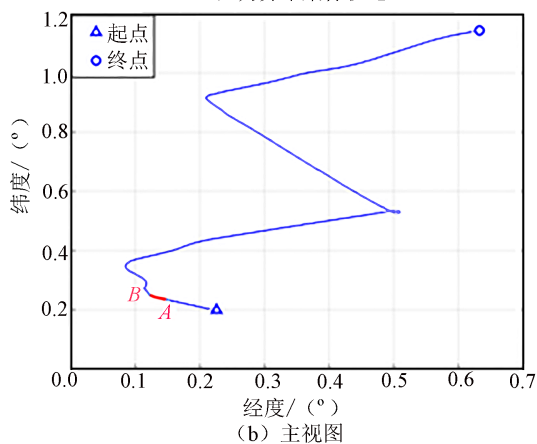


图 5 动态测量实验路线

Fig. 5 Test route of dynamic measurement

对图 5 (a) 中 AB 采样段的跑车数据进行离线数据处理，验证本文所提方法重力异常测量精度。首先利用 GNSS 失效数据自动检测与修正算法处理动态实验过程中 GNSS 输出的定位信号。图 6 为整个动态实验中 BALT 和 GNSS 的高程残差。

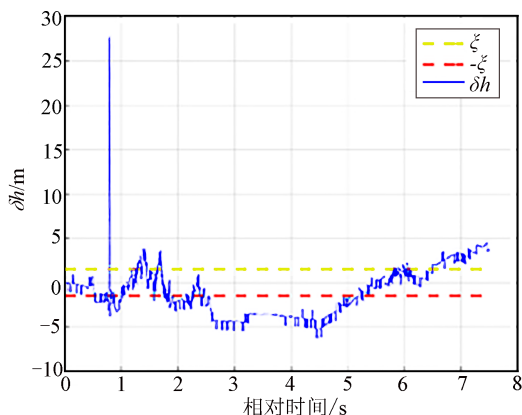


图 6 实验过程中的高度残差

Fig. 6 Height residuals during the test

由图 6 可以看出，在相对时刻 0.8 s 附近，高程残差发生了跳变，这是由卫星接收机信号被地面棚状物遮挡导致的。此外，在相对时刻 2.2~5.1 s 和 6.7 s 之后的时间里，高程残差也超出了阈值。考虑到测量时驾驶一直较平稳，故排除因道路起伏、实验车跳动导致的高程测量数据异常。又因非重力采样道路且无山体和高大树木等结构体，故推测引起高程残差超过阈值的原因是来往大车干扰了卫星接收机的信号接收。

2 种方法测量的原始重力异常经 100 s 低通滤波后的结果如图 7 所示，外符合精度统计结果如表 3 所示。

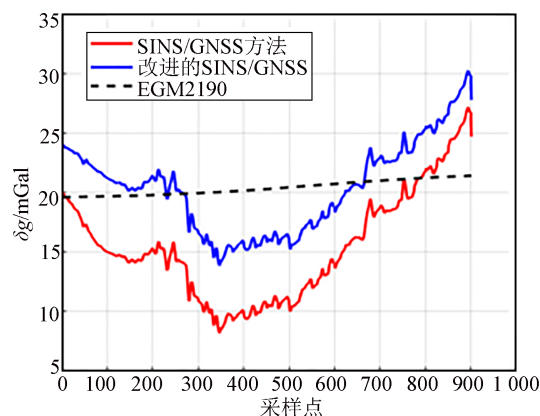


图 7 2 种方法的重力测量结果对比

Fig. 7 Comparison of gravity measurement results between two methods

表 3 2 种方法的精度统计结果

Table 3 Accuracy statistic results of two methods

方法	mGal			
	最大	最小	平均	精度
SINS/GNSS	5.74	-11.83	5.60	6.51
改进的 SINS/GNSS	8.82	-6.16	3.01	3.53

由图 7 可以看出，在采样点 100~200 之间，改进的 SINS/GNSS 方法与 SINS/GNSS 方法的结果曲率明显不同，SINS/GNSS 方法的结果曲线曲率很大，这是由 GNSS 数据跳变所导致的。由表 3 可知，改进的 SINS/GNSS 方法相比传统 SINS/GNSS 方法的外符合精度从 6.51 mGal 提升到 3.53 mGal，精度提升了 46%。

4 结论

针对 GNSS 定位信息不准确和数据中断引起

的重力异常动态测量精度下降问题, 本文提出了一种基于高度计海拔高度信息修正的重力异常车载 SINS/GNSS 测量方法, 并通过仿真和实测数据实验进行了验证, 主要结论如下。

1) 提出的 GNSS 信息检测及修正算法能有效识别 GNSS 数据有效性, 并对异常数据进行修正, 能确保 GNSS 定位信息产生正效果。

2) 本文方法相较于传统重力异常车载 SINS/GNSS 组合方法, 外符合精度提升明显。

综上所述, 本文方法在实际的重力异常车载测量实验中具有一定的使用价值。未来的工作将致力于 Kalman 滤波器参数的选择和信息融合方法研究。

参考文献

- [1] CHIANG K W, LIN C A, KUO C Y. A feasibility analysis of land-based SINS/GNSS gravimetry for groundwater resource detection in Taiwan [J]. *Sensors*, 2015, 15(10): 25039-25054.
- [2] 李红雨, 曹诚, 李凤婷, 等. 航空、航海重力和重力梯度在海洋、未知陆地战略勘探的发展 [J]. *地球物理学进展*, 2019, 34(1): 0316-0325.
LI H Y, CAO C, LI F T, et al. Development of airborne and marine gravity exploration and gravity gradient strategic exploration for the ocean and unknown land [J]. *Progress in Geophysics*, 2019, 34(1): 0316-0325.
- [3] 王新月, 刘杰, 孙澎勇, 等. 基于车载重力测量平台的城市地下空洞快速探测 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2019, 49(3): 837-844.
WANG X Y, LIU J, SUN P Y, et al. Rapid detection of urban underground cavity based on vehicle gravity measurement platform [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2019, 49(3): 837-844.
- [4] 刘敏, 黄漠涛, 欧阳永忠, 等. 海空重力测量及应用技术研究进展与展望(一): 目的意义与技术体系 [J]. *海洋测绘*, 2017, 37(2): 1-5.
LIU M, HUANG M T, OUYANG Y Z, et al. Development and prospect of air-sea gravity survey and its applications, part I: objective, significance and technical system [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2017, 37(2): 1-5.
- [5] 常路宾, 覃方君, 查峰. 单轴旋转捷联惯导系统重力扰动补偿方法研究 [J]. *导航定位与授时*, 2018, 5(2): 12-16.
CHANG L B, QIN F J, ZHA F. Gravity disturbance compensation for single-axis rotary modulation strapdown inertial navigation system [J]. *Navigation Positioning & Timing*, 2018, 5(2): 12-16.
- [6] WENG J, LIU J N, JIAO M X, et al. Analysis and on-line compensation of gravity disturbance in a high-precision inertial navigation system [J]. *GPS Solutions*, 2020, 24(3): 83.
- [7] 赵予菲. 航空重力向下延拓方法研究 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2023: 1-2.
ZHAO Y F. Downward continuation methods of aerial gravity data [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2023: 1-2.
- [8] 赵军阳, 张克凡, 张志利, 等. 捷联式车载重力测量技术发展 [J]. *电光与控制*, 2025, 32(4): 58-64.
ZHAO J Y, ZHANG K F, ZHANG Z L, et al. Development and research status of strapdown vehicle gravimetry [J]. *Electronics & Optics & Control*, 2025, 32(4): 58-64.
- [9] 李东明, 郭刚, 薛正兵, 等. 激光捷联惯导车载重力测量试验 [J]. *导航与控制*, 2013, 12(4): 75-78, 74.
LI D M, GUO G, XUE Z B, et al. Gravimetry tests of laser strapdown INS on ground-vehicle [J]. *Navigation and Control*, 2013, 12(4): 75-78, 74.
- [10] 李东明, 曾宪超, 马杰, 等. 速率方位平台与激光捷联惯导车载重力测量比较 [J]. *导航与控制*, 2014, 13(4): 7-10.
LI D M, ZENG X C, MA J, et al. An airborne gravimeter based on the rate azimuth platform INS [J]. *Navigation and Control*, 2014, 13(4): 7-10.
- [11] LI X P, JEKELI C. Ground-vehicle INS/GPS vector gravimetry [J]. *Geophysics*, 2008, 73(2): I1-I10.
- [12] 魏国, 杨泽坤, 高春峰, 等. 基于二维激光多普勒测速仪的捷联式车载自主重力测量方法 [J]. *红外与激光工程*, 2023, 52(6): 339-346.
WEI G, YANG Z K, GAO C F, et al. Strapdown vehicle autonomous gravimetry method based on two-dimensional laser Doppler velocimeter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(6): 339-346.
- [13] YU R H, CAI S K, WU M P, et al. An SINS/GNSS ground vehicle gravimetry test based on SGA-WZ02 [J]. *Sensors (Basel)*, 2015, 15(9): 23477-23495.
- [14] YU R H, WU M P, CAO J L, et al. A new method of GNSS fault data detection for strapdown land vehicle gravimetry [C]//2018 IEEE International Conference on Applied System Invention

- (ICASI), Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2018: 299-302.
- [15] 杜学禹, 王茂松, 崔加瑞, 等. 一种高精度自主式组合导航系统滤波算法[J]. 中国惯性技术学报, 2021, 29(1): 55-61.
- DU X Y, WANG M S, CUI J R, et al. A high accuracy Kalman filtering algorithm for vehicle self-contained integrated navigation[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2021, 29(1): 55-61.
- [16] WEI M, SCHWARZ K P. Flight test results from a strapdown airborne gravity system[J]. Journal of Geodesy, 1998, 72(6): 323-332.
- [17] ZHANG K F, ZHAO J Y, ZHANG Z L. A method for land vehicle gravity anomaly measurement combining an inertial navigation system, odometer, and geo-information system[J]. World Electric Vehicle Journal, 2024, 15(8): 368.
- [18] 严恭敏, 翁浚. 捷联惯导算法与组合导航原理(2版)[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2023: 78-94.
- [19] 于瑞航. 捷联式车载重力测量关键技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2017: 42-43.
- YU R H. Research on key technologies for strap-down ground vehicle gravimetry[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017: 42-43.
- (编辑: 于福兴)

关于本刊正式启用 OSID 码的公告

《火箭军工程大学学报》自 2025 年第 1 期始正式加入 OSID (Open Science Identity) 开放科学计划。OSID 开放科学计划是国家新闻出版署出版融合发展(武汉)重点实验室发起的, 面向学术期刊行业的一项开放科学公益性计划, 旨在促进学术交流, 推动科研诚信。

至此, 学报每篇论文将拥有专属的 OSID 码, 作者可以在码内对研究背景、学术价值、研究内容等问题进行语音阐述, 也可采用上传视频、图片、PPT、PDF、Word 文档等形式, 对研究方向、研究目的、研究意义、研究内容、实验数据、实验过程、实验方法、调研样本、相关资讯等内容进行介绍, 还可以分享研究过程中的趣事, 以使论文成果更加立体化展现, 提升论文阅读量、下载量和引用率, 扩大论文和作者影响力。

《火箭军工程大学学报》编辑部

二〇二五年四月