

动态重力测量高频信号降噪方法

魏国^{1,2}, 陈迈伦^{1,2}, 罗晖^{1,2}, 高春峰^{1,2}, 程嘉奕^{1,2}, 王景^{1,2}, 侯承志^{1,2*}

(1. 国防科技大学 前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073; 2. 国防科技大学 南湖之光实验室, 湖南 长沙 410073)

摘要:近年来,基于光学陀螺惯导系统的动态重力测量技术能高效获取地球重力场数据,得到快速发展;但现有滤波方法对重力信号与噪声的频域混叠处理仍具有局限性,严重限制了测量的精度与分辨率。为此,创新性地提出基于经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)与波数相关滤波(wavenumber correlation filtering, WCF)的联合降噪方法,先对原始重力结果进行低通滤波,再对滤波结果进行经验模态分解并设置阈值保留低阶本征模态函数,对重复测线保留结果进行相关性滤波,实现信号的重构与降噪。仿真结果表明,所提方法较传统EMD信噪比提高了44%、均方误差减小了48%,证明了EMD-WCF联合降噪方法的有效性,能兼顾重力测量精度与分辨率的同时,为高频重力信号降噪提供了新的解决方案。

关键词:动态重力测量技术;经验模态分解;波数相关滤波

中图分类号:P223 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2025)05-078-08



论
文
拓
展

Noise reduction method of high frequency signal in dynamic gravimetry

WEI Guo^{1,2}, CHEN Mailun^{1,2}, LUO Hui^{1,2}, GAO Chunfeng^{1,2}, CHENG Jiayi^{1,2}, WANG Jing^{1,2}, HOU Chengzhi^{1,2*}

(1. College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Nanhu Laser Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In recent years, the dynamic gravity measurement technology utilizing optical-gyro inertial navigation systems has advanced rapidly, owing to its high efficiency capabilities in acquiring Earth's gravity field data. However, existing filtering methods exhibit limitations in addressing the frequency-domain aliasing of gravity signals and noise, which severely constrains the accuracy and resolution of measurements. To address these challenges, a novel joint noise reduction method integrating EMD (empirical mode decomposition) and WCF (wavenumber correlation filtering) was innovatively proposed. The raw gravity results were low-pass filtered initially. The filtered results then underwent EMD, and a threshold was applied to retain low-order intrinsic mode functions. Subsequently, correlation filtering was implemented on repeated line retention results to reconstruct signals and suppress noise. Simulation experiments demonstrate that the proposed method achieves a 44% improvement in signal-to-noise ratio and a 48% reduction in mean square error compared to traditional EMD processing. These results confirm the effectiveness of the EMD-WCF method in balancing measurement accuracy and resolution, offering a new strategy for high-frequency gravity signal denoising.

Keywords: dynamic gravity measurement technology; empirical mode decomposition; wavenumber correlation filtering

近年来,动态重力测量技术发展迅猛,能够快速获得大范围、高分辨率的地球重力场信息,特别是采用激光陀螺/光纤陀螺和石英挠性加速度计的重力仪在海空重力测量方面得到广泛的应用,填补了静态重力测量和卫星重力测量之间的空白^[1-5]。在实施动态测量过程中,飞机、车辆等载体的发动机振动或自身运动都会带来误差,造成原始观测结果中背景噪声的幅值远高于目标信

号^[6],如何在强噪声干扰下提取出微弱重力信息是进一步发展动态重力测量亟须解决的问题。

由于重力测量对实时性要求不高、允许事后处理,已有学者对动态重力测量数据处理方法展开研究。针对部分频率远高于真实信号的噪声,通常采用低通滤波的方式去除,工程中使用的数字滤波器主要分为有限冲激响应(finite impulse response, FIR)低通滤波器和无限冲激响应

收稿日期:2025-01-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(62203454)

第一作者:魏国(1985—),男,江苏连云港人,副研究员,博士,硕士生导师,E-mail:weiguo@nudt.edu.cn

*通信作者:侯承志(2000—),男,山东枣庄人,博士研究生,E-mail:houchengzhi@nudt.edu.cn

引用格式:魏国,陈迈伦,罗晖,等. 动态重力测量高频信号降噪方法[J]. 国防科技大学学报, 2025, 47(5): 78-85.

Citation: WEI G, CHEN M L, LUO H, et al. Noise reduction method of high frequency signal in dynamic gravimetry [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2025, 47(5): 78-85.

(infinite impulse response, IIR) 低通滤波器两种。文献[7-8]描述 IIR 滤波器处理重力数据时,由于其通带平坦、阻带衰减特性快,能够获得较为平滑的结果,在一些航空重力测量作业中得到推广^[6]。但 IIR 滤波器不具有线性相位,无法保证滤波前后波形一致性,降低了滤波处理的精度^[9],因此,重力测量中普遍使用具有良好线性相位特性的 FIR 低通滤波器^[10-13]。除了 FIR 和 IIR,柳林涛等^[14-15]提出一种函数滤波器,属于改进的小波滤波方法,实现了截止尺度参数与过渡带参数的分离,使滤波器设计和滤波实施变得简明灵活。郎骏健等^[16]提出了傅里叶基追踪低通滤波方法,在精度相当条件下对比传统 FIR 处理过程,边缘数据丢失减少,提高了数据利用率。

针对部分频率与真实信号混叠的噪声,低通滤波方法处理则存在缺陷。如果想进一步提高测量精度,就需要降低滤波器截止频率,增大滤波带宽,将信号与噪声混合的部分滤除;或采用经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)方法^[17],直接去除一些本征模态函数(intrinsic mode function, IMF)。Cheng 等^[18]分别采用 200 s 和 300 s 低通滤波处理相同测线的原始数据,得到不同空间分辨率的精度结果。邹欣蕾等^[19]利用 EMD 方法剔除了一些与飞机运动相关性弱的 IMF,保留剩余分量重构出降噪后的信号。两种方法本质上都是通过舍弃重力信号的高频部分来提升重复测线内符合精度,但包含有用信号特别是反映小尺度地质变化的高频信息会丢失,造成测量结果失真,不利于构建高分辨率地球重力场数据库。

为了兼顾动态重力测量的精度与分辨率,本文研究了一种基于 EMD 的改进重力数据处理方法,以期实现对传统低通滤波后的信号进一步降噪,在不损失高频信息的条件下提高测量精度。

1 联合降噪方法实现

EMD 作为一种时域处理方法,具有高度自适应性,它不需要预设基函数或窗口,而是根据信号的局部特征进行分解,能够准确提取信号的瞬时频率和局部特征。因此,EMD 适合处理非平稳重力信号。波数相关滤波(wavenumber correlation filtering, WCF)则是统计学中基于相关性分析的一种方法,同样适合处理重复测线重力结果^[20-22]。下文将简要介绍 EMD 与 WCF 技术的特点及实现方法,并提出一种基于 EMD 和 WCF 的联合降噪方法解决高频重力信号误差耦合问题。

1.1 经验模态分解

20 世纪 90 年代,学者黄锬为了应对经典傅里叶变换无法同时分辨信号的时间和频率问题,提出了按照数据自身时间尺度特征分解信号的方法,称为经验模态分解,该方法将复杂信号分解为有限个 IMF 和残差(residual, Res),各 IMF 代表原信号不同时间尺度的局部特征,Res 是分解出所有 IMF 后的残余信号,能够描述信号的整体趋势^[23-24]。其中,单一 IMF 反映信号某一时间尺度的频率特性,多个 IMF 共同组成了整个信号的频率特性,所以 EMD 适合处理频率随时间变化的非平稳信号。

根据文献[25],经验模态分解流程如图 1 所示,具体步骤如下:

步骤 1: 确定待处理信号 $x(t)$ 的所有极大值和极小值点。

步骤 2: 通过样条曲线拟合对局部极大、极小值分别拟合出上、下包络线,并计算出均值 $m(t)$ 。

步骤 3: 计算原始信号与上一步求出的包络均值的差,形成新信号 $h(t) = x(t) - m(t)$ 。

步骤 4: 判断差值后的信号 $h(t)$ 是否满足本征模态函数条件,如果满足, $h(t)$ 就作为 $x(t)$ 其中一个 IMF,并在 $x(t)$ 中扣掉该分量,将剩余信号 $r(t) = x(t) - h(t)$ 代替 $x(t)$ 返回步骤 1 继续执行,不断迭代直到剩余分量单调或小于设定的阈值,形成残差 r_n ; 如果不满足条件,则将 $h(t)$ 信号替换原始待处理信号 $x(t)$,从步骤 1 开始执行。

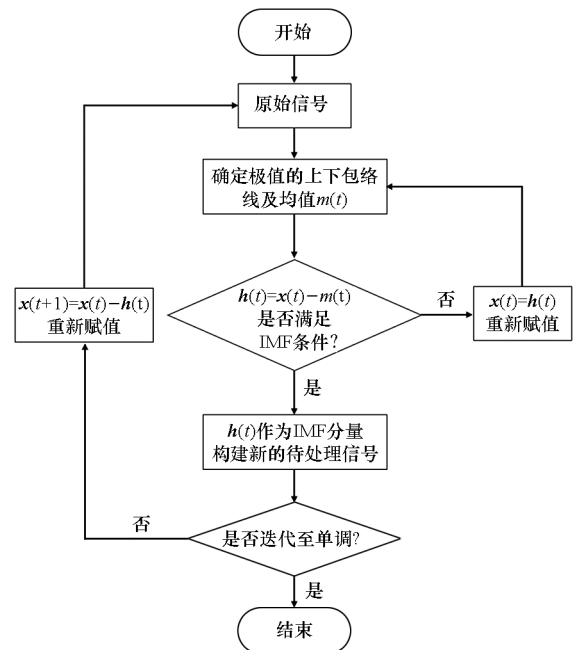


图 1 EMD 分解流程

Fig. 1 Flow chart of EMD decomposition

步骤 5: 经过数次迭代形成了若干 IMF 和残差, 最终信号可表示为 $\mathbf{x}(t) = \sum_{j=1}^n \mathbf{h}_j(t) + \mathbf{r}_n$, 表示 EMD 完成, 分解得到的 IMF 与残差组合能够复现原始信号。

1.2 波数相关滤波

实施重力测量作业时, 通常对同一条测线进行多次重复测量, 采用计算内符合精度的方法评估系统的稳定性^[26]。如果没有噪声干扰, 多次测量相同测线敏感到的重力信号应该是不变的, 而随机噪声和误差会随着测次和载体运动方向改变等存在差别。基于位置不变、重力不变原理, 衍生出利用相关性分析处理重复测线数据的方法, 将多测线结果相关性强的部分认为是重力信号, 相关性弱的部分认为是随机噪声, 通过设置阈值剔除相关性弱的分量, 只保留相关性强的分量, 实现信号与噪声的分离^[20-22]。

假设两条重复测线重力结果分别为 $\mathbf{X}(t)$ 和 $\mathbf{Y}(t)$, 通过傅里叶变换将信号转换到频域, 得到它们在频域中的不同波数分量, 可以将两个信号的第 k 级波数分别表示为:

$$\mathbf{F}_X(k) = |\mathbf{F}_X(k)| e^{-j\theta_{F_X(k)}} \quad (1)$$

$$\mathbf{F}_Y(k) = |\mathbf{F}_Y(k)| e^{-j\theta_{F_Y(k)}} \quad (2)$$

其中: $\mathbf{F}_X(k)$ 、 $\mathbf{F}_Y(k)$ 分别表示 $\mathbf{X}(t)$ 、 $\mathbf{Y}(t)$ 对应的频域第 k 级频率分量; $|\mathbf{F}_X(k)|$ 、 $|\mathbf{F}_Y(k)|$ 表示对应频率下的幅值; $\theta_{F_X(k)}$ 和 $\theta_{F_Y(k)}$ 分别代表对应频率的相位。通过计算相应波数下两组数据的相关系数 C_k 来构建它们的波数相关频谱, 计算方法为:

$$C_k = \cos(\Delta\theta_k) = \frac{\mathbf{F}_X(k) \times \mathbf{F}_Y(k)}{|\mathbf{F}_X(k)| |\mathbf{F}_Y(k)|} \quad (3)$$

其中, C_k 表示 k 波数下的相关系数, $\Delta\theta_k = \theta_{F_Y(k)} - \theta_{F_X(k)}$ 为 $\mathbf{F}_X(k)$ 、 $\mathbf{F}_Y(k)$ 之间的相位差, \times 表示矢量积。

基于计算出的 k 级相关系数, 给定一个阈值, 如果对应波数下的相关系数小于这个阈值, 则将该波数分量认为是噪声并剔除。在处理重力数据时, 阈值符号的选取同时要参照载体的运动方向。如果待处理数据源于运动方向相同的测线, 例如都是从起点到终点, 阈值的选择在正相关系数范围, 如 $T > 0.7$; 如果是连续两条重复测线测量, 从起点到终点后再由终点返回至起点, 则阈值的选择在负相关系数范围, 如 $T \leq -0.7$ 。以正相关系数为例, 剔除弱相关分量如式(4)所示:

$$\mathbf{F}_{XY}(k) = \begin{cases} \mathbf{F}_X(k) + \mathbf{F}_Y(k), & C_k \geq T \\ 0, & C_k < T \end{cases} \quad (4)$$

此外, 阈值幅值的选取也会对最终结果产生影响: 为了保留较高相关性的波数构成信号, 实际应用中需要设置阈值下限; 同时, 为了符合真实重力测量特性, 阈值过高可能导致部分具有弱相关特性的真实信号被误判为噪声而滤除, 需要设置阈值上限。文献[22]提出一种阈值确定方法: 在仿真中通过对所有可能选择的阈值集合(如 $0.3 \leq T \leq 0.8, \Delta T = 0.1$) 的降噪效果进行评估, 比较不同相关滤波结果与真实信号的均方根误差, 选择最小均方根误差对应的阈值。实测数据则在阈值上、下限范围内选择重构后重力内符合精度最高的参数进行滤波。

WCF 属于频域信号处理, 两组数据的所有波数分量筛选后, 利用快速傅里叶反变换 (inverse fast Fourier transform, IFFT) 将滤波后的重力信号恢复到时域中, 得到这条重复测线上的重力处理结果:

$$\mathbf{G} = \frac{1}{2} \text{IFFT}\{\mathbf{F}_{XY}(k)\} \quad (5)$$

利用 WCF 处理的流程如图 2 所示。

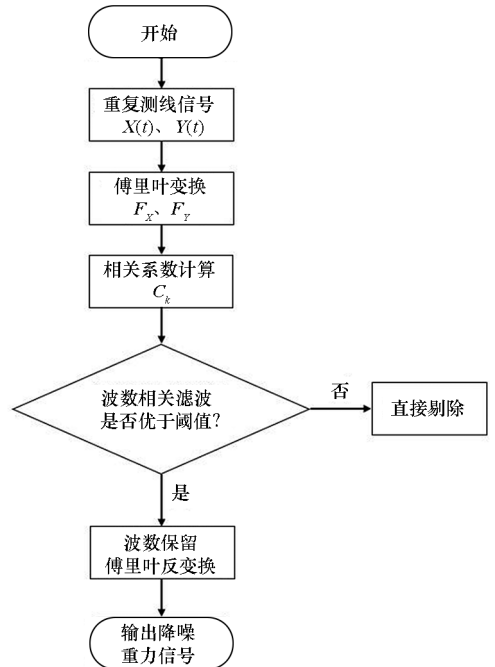


图 2 WCF 处理重力信号流程

Fig. 2 Flow chart of WCF processing gravity signal

1.3 EMD-WCF 联合降噪处理

为了兼顾测量精度与分辨率, 本文提出 EMD-WCF 联合降噪方法, 对重力数据进行处理, 具体步骤如下:

步骤 1: 原始重力测量结果首先进行 FIR 低通滤波, 得到滤波后的重力信号。

步骤 2: 对滤波后的结果进行 EMD 处理, 选

择部分低阶 IMF 构成高频待降噪分量。

步骤 3:对筛选出的高频待降噪分量进行波数相关滤波,得到降噪后的低阶 IMF。

步骤 4:将降噪后的低阶 IMF 与筛选前剩下的高阶 IMF 重构出降噪后的重力结果。

处理实测数据时,由于不同测线测量时载体运动状态不同以及系统偏差影响,会存在分解出的 IMF 数目不同的情况,步骤 2 中待降噪 IMF 分量的选择影响了 EMD-WCF 算法的精度。文献[27]提出地球重力场模型的长波结果相对准确,可以利用地球重力场模型补偿重力低频分量测量误差。因此,通过导出测线位置的模型重力值作为低频基准,选取与基准处于不同频段的 IMF 作为待 WCF 处理的高频信号。

传统的 EMD 降噪方法会丢失高频重力信息,因此,创新性地提出基于 EMD 与 WCF 组合的高频重力信号降噪方法,对 EMD 得到的低阶 IMF 进行相关性滤波,解耦高频信号与噪声,提取真实重力,理论上能够在不降低分辨率的情况下提高测量精度。该方法具体流程如图 3 所示。

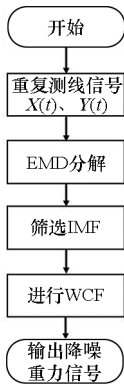


图 3 EMD-WCF 降噪方法流程

Fig. 3 Flow chart of EMD-WCF noise reduction method

2 仿真数据分析

为了方便对比降噪处理前后信号的信噪比 (signal to noise ratio, SNR) 和均方误差 (mean squared error, MSE), 利用仿真数据验证所提方法的有效性。仿真数据基于已发表论文中动态重力测量获取的真实重力特性设置:一方面,实际测量中载体的运动噪声频率较高,需要采用截止频率较低的滤波器进行预处理,采用 300 s 低通滤波已成为一种常用的参数选择^[28-29]。大量相关研究都采用该参数并取得了较好的成果,选择 300 s 滤波也能方便实验数据处理结果与已发表成果进行对比。因此,重力的最高频率设置为 1/300 Hz,对应原始测量值经过 300 s 低通滤波预处理

的结果。另一方面,不同位置的重力信号存在差异,其物理特性在空间域中属于多波长信号的叠加,载体匀速作业时测量结果反映在时域中为调频信号,即频率随着时间变化。因此,确定最高频为 1/300 Hz 后,生成一段频率逐渐降低的信号模拟重力。

首先生成一段 1 000 s 的啁啾信号表示原始低通滤波后的结果 $O(t)$,重力测量中低通滤波器截止频率 f_s 选择 1/300 Hz,设置生成信号的频率 f 变化范围为 $\frac{f_s}{10} < f < f_s$,同时在 1/300 Hz 处添加额外的固定频率信号作为高频信息,如图 4 所示。

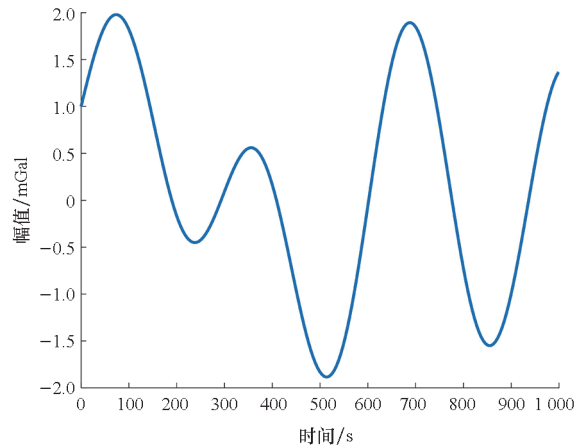


图 4 生成的原始低通滤波后的重力信号

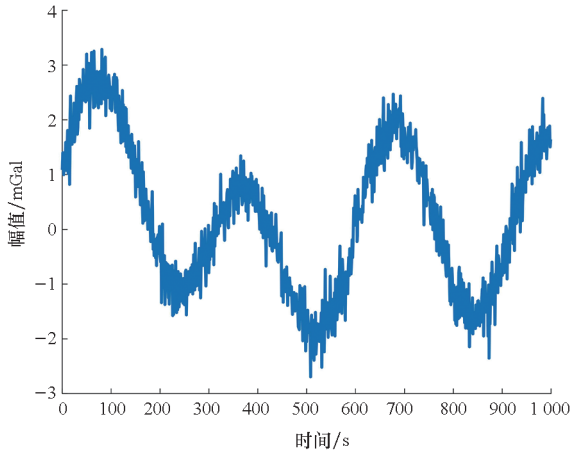
Fig. 4 The generated original low-pass filtered gravity signal

为了模拟真实测量值,对生成的重复测线重力信号 $X(t)$ 和 $Y(t)$ 分别添加不同幅值的固定频率噪声,如式(6)所示:

$$\begin{cases} X(t) = O(t) + K_X E_{1-high}(t) + K_X E_{2-high}(t) + R_X(t) \\ Y(t) = O(t) + K_Y E_{1-high}(t) + R_Y(t) \end{cases} \quad (6)$$

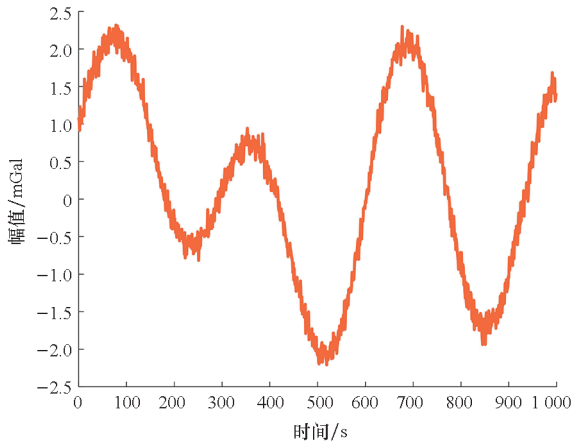
其中: $E_{1-high}(t)$ 表示最高频耦合噪声,频率设置为 $O(t)$ 的最高频率,模拟截止频率处的信号失真和边界噪声; $E_{2-high}(t)$ 表示次高频噪声,其频率略低于 $O(t)$,与 $E_{1-high}(t)$ 组合形成宽频带噪声; K_X 和 K_Y 表示不同的幅值; $R_X(t)$ 和 $R_Y(t)$ 表示白噪声,仿真测量过程其他因素的影响。添加误差后的两个信号如图 5 所示。

对信号 X 和 Y 进行 EMD 处理,得到 7 个 IMF 分量和一个 Res 残差 (IMF8),分解后的结果如图 6 和图 7 所示。仿真数据中两个信号分解得到的图像能够直观表现出相似的频率分布特性,前 5 个 IMF 分量幅值和振荡频率比较大,说明信号高频分量集中在这个部分。而后 2 个 IMF 分量



(a) 添加误差后的 X 信号

(a) X signal after adding error



(b) 添加误差后的 Y 信号

(b) Y signal after adding error

图 5 添加误差后的模拟重力信号

Fig. 5 Simulated gravity signal after adding error

(不包括残差)形状几乎相同且振荡频率较低,对应信号的低频分量,也是信号能量的主要集中部分。因此,选择 X 和 Y 的前 5 个 IMF 构成新的信号进行 WCF 处理,将处理后的信号与剩余 IMF 和残差组合得到降噪后的结果。

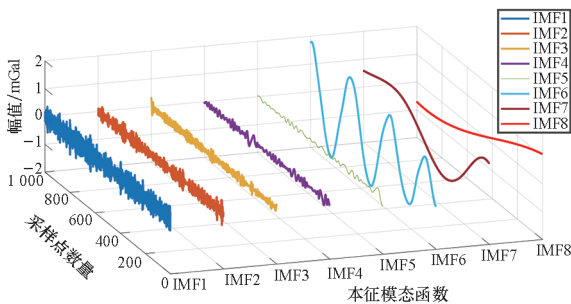


图 6 X 信号 EMD 处理后的结果

Fig. 6 Results of X signal after EMD processing

提取低阶 IMF 分量重构后的信号如图 8 所示。通过图 8 可以看出,经过 EMD 筛选重构出的

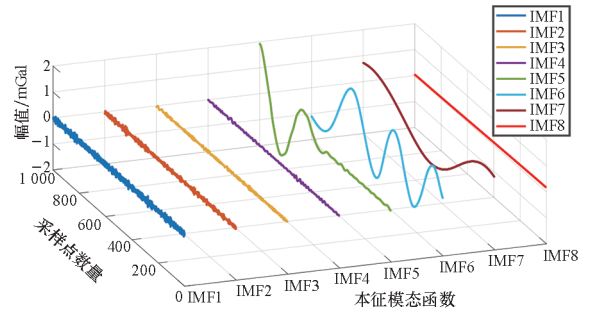
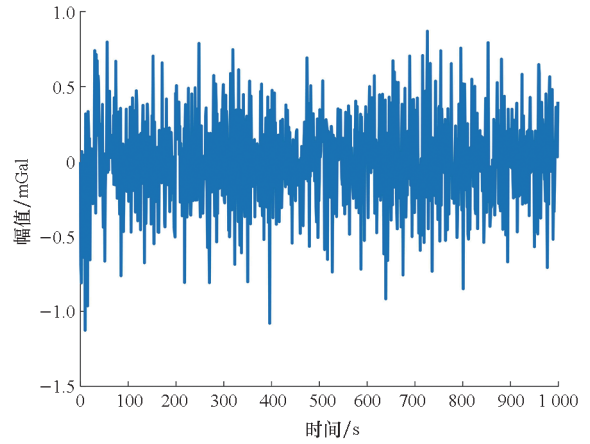


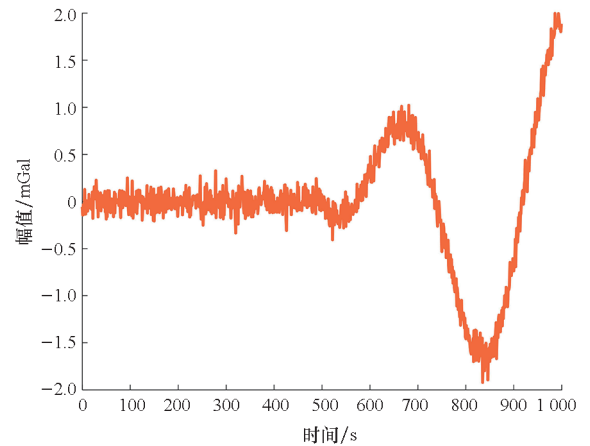
图 7 Y 信号 EMD 处理后的结果

Fig. 7 Results of Y signal after EMD processing



(a) 重构后的 X 信号

(a) The reconstructed X signal



(b) 重构后的 Y 信号

(b) The reconstructed Y signal

图 8 经过 EMD 筛选后的高频重力信号

Fig. 8 The high frequency gravity signal after EMD screening

高频信号起始幅值偏小,说明这部分信号包含的能量较小、长波重力信息较少,这也是大多数学者在研究重力数据处理时选择直接丢弃低阶 IMF 的原因。这对于处理垂向重力扰动数据来说尚可以接受,但是水平重力扰动的高频段反映垂线偏差信息^[30],如果直接丢弃,不利于进一步发展矢

量重力测量技术。采用本文提出的方法对高频段耦合噪声部分的重力信号进行降噪处理,利用波数相关滤波提取真实重力,降噪处理后恢复的高频段结果如图9所示。

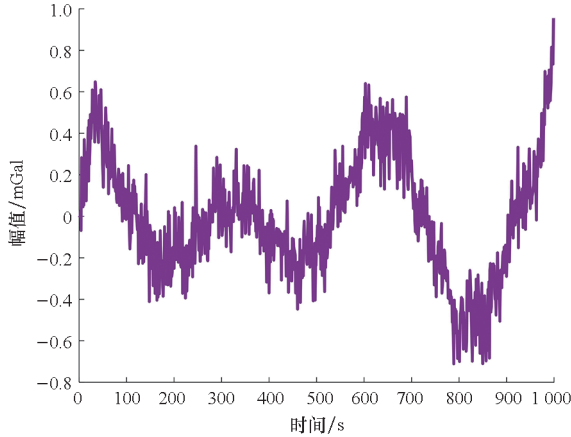


图9 EMD-WCF方法提取出的高频重力信号

Fig. 9 The high frequency gravity signal extracted by EMD-WCF method

图9表明,提取后的信号相比于图8中提取前的结果,噪声波动明显减小,将提取后的信号与EMD处理剩余的IMF和残差组合,重构出降噪后的重力结果,如图10所示。

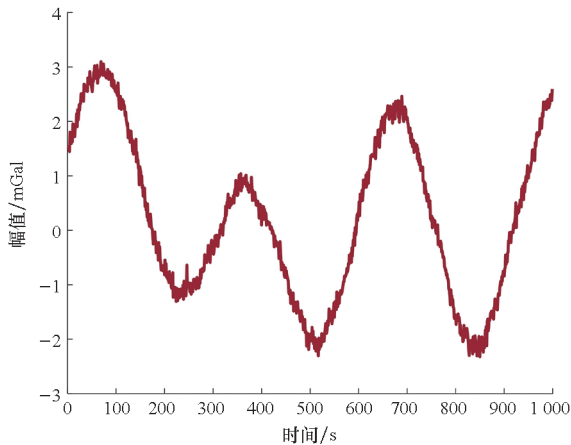


图10 EMD-WCF方法降噪后的重力信号

Fig. 10 The gravity signal after denoising by EMD-WCF method

将EMD-WCF联合降噪算法与传统的EMD处理的结果以及原始低通滤波结果进行对比,并计算三组信号的信噪比和均方误差。如图11所示。起始阶段受限于数据长度,信号的频率特性没有完整地反映出来,EMD-WCF保留信号中部分噪声未被完全滤除,导致前期精度稍低;而传统EMD舍弃了所有高频量,在前期获得了更平滑和更准确的结果。整体来看,传统EMD方法处理后的误差大于所提EMD-WCF方法处理后的结果。

通过计算,EMD-WCF处理后的信号信噪比为8.60 dB,传统EMD处理后的信号信噪比为5.97 dB,模拟的原始低通滤波信号信噪比为0.24 dB,EMD和EMD-WCF处理结果的信噪比相比于原信号均有较大提升,而EMD-WCF处理后的信号均方误差更小、信噪比更高。

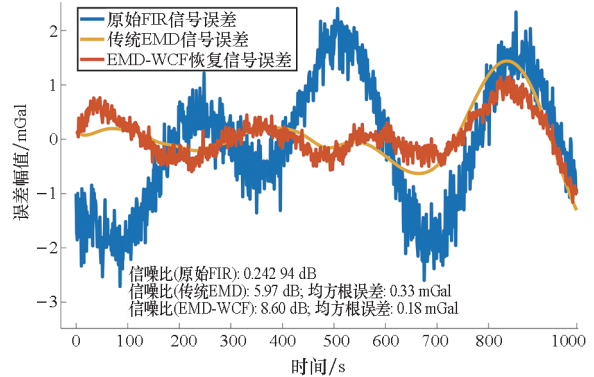


图11 EMD-WCF方法对比原始滤波结果和传统EMD处理后的误差

Fig. 11 The EMD-WCF method compares the error between the original filtering result and the traditional EMD processing

因此,EMD-WCF算法对重力信号降噪具有积极作用,能够在不失分辨率的情况下提高测量精度,同时也防止了重力数据受到低频规律噪声的污染。

3 结论

本文针对当前动态重力测量数据处理时难以平衡测量结果的精度与分辨率问题,提出基于经验模态分解与波数相关滤波的高频重力降噪方法,对低通滤波后的信号进行进一步处理,降低滤波器边界效应等原因造成的高频信号耦合噪声的影响。仿真结果表明,EMD-WCF降噪方法相比于传统EMD处理信噪比提高了44%、均方误差减小了48%,证明了所提方法的有效性,为真实重力数据特别是矢量重力的进一步处理提供了新的思路;同时,基于分频降噪的误差处理方法也为后续开展低频重力误差补偿研究打下基础。

参考文献 (References)

- [1] 赵军阳, 张克凡, 张志利, 等. 捷联式车载重力测量技术发展[J]. 光电与控制, 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. (in Chinese)
- [2] 修睿, 薛正兵, 蒋喆, 等. 新型国产化航空重力测量系

- 统[J]. 导航与控制, 2024, 23(1): 24-33.
XIU R, XUE Z B, JIANG Z, et al. A new domestic airborne gravimetry system [J]. Navigation and Control, 2024, 23(1): 24-33. (in Chinese)
- [3] 柳林涛, 何建刚, 许江宁, 等. CHZ-II 海洋重力仪研制与实践[J]. 测绘学报, 2024, 53(4): 620-628.
LIU L T, HE J G, XU J N, et al. Development and practice of CHZ-II marine gravimeter [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2024, 53(4): 620-628. (in Chinese)
- [4] 黄谟涛, 邓凯亮, 欧阳永忠, 等. 海空重力测量及应用技术研究若干进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(10): 1635-1650.
HUANG M T, DENG K L, OUYANG Y Z, et al. Development and study in marine and airborne gravimetry and its application [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(10): 1635-1650. (in Chinese)
- [5] 熊盛青, 周道卿, 周锡华, 等. 航空重力关键技术突破及应用[J]. 中国科技成果, 2025, 26(3): 1-2.
XIONG S Q, ZHOU D Q, ZHOU X H, et al. Key technical breakthrough and application of aviation gravity [J]. Chinese Scientific and Technological Achievements, 2025, 26(3): 1-2. (in Chinese)
- [6] 刘敏, 黄谟涛, 欧阳永忠, 等. 海空重力测量及应用技术研究进展与展望(三): 数据处理与精度评估技术[J]. 海洋测绘, 2017, 37(4): 1-10.
LIU M, HUANG M T, OUYANG Y Z, et al. Development and prospect of air-sea gravity survey and its applications, part III: data processing and precision evaluation [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2017, 37(4): 1-10. (in Chinese)
- [7] 郭圣焕. 重力测量后数据处理方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
GUO S H. Research on data processing method after gravity measurement[D]. Nanjing: Southeast University, 2015. (in Chinese)
- [8] 郭志宏, 罗锋, 王明, 等. 航空重力数据无限脉冲响应低通数字滤波器设计与试验研究[J]. 地球物理学报, 2011, 54(8): 2148-2153.
GUO Z H, LUO F, WANG M, et al. The design and experiment of IIR lowpass digital filters for airborne gravity data [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(8): 2148-2153. (in Chinese)
- [9] 韦建成. 海空重力数据精细化处理技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.
WEI J C. Research on advance data processing technology for air-sea gravimetry[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019. (in Chinese)
- [10] 孙中苗. 航空重力测量中 FIR 低通滤波器的设计与应用[J]. 解放军测绘学院学报, 1996, 13(4): 247-250.
SUN Z M. Designs and applications of digital lowpass FIR-filter in airborne gravimetry [J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 1996, 13(4): 247-250. (in Chinese)
- [11] 蔡劭琨, 吴美平, 张开东. 航空重力测量中 FIR 低通滤波器的比较[J]. 物探与化探, 2010, 34(1): 74-78.
CAI S K, WU M P, ZHANG K D. A comparison of digital lowpass fir-filters in airborne gravimetry [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2010, 34(1): 74-78. (in Chinese)
- [12] 李宜龙, 曾敏, 孙科, 等. 航空重力测量中 FIR 滤波与高斯滤波的比较[J]. 海洋测绘, 2014, 34(6): 40-42.
LI Y L, ZENG M, SUN K, et al. Comparison between FIR filter and Gaussian filter in airborne gravity surveys [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2014, 34(6): 40-42. (in Chinese)
- [13] 蔡体菁, 邵锦江, 胡啸林. 海洋重力数据处理中的正反 FIR 滤波算法[J]. 压电与声光, 2023, 45(5): 747-751, 758.
CAI T J, SHAO J J, HU X L. Forward and reverse FIR filter algorithm in ocean gravity data processing [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2023, 45(5): 747-751, 758. (in Chinese)
- [14] 柳林涛, 梁星辉, 郎骏健, 等. 改进的函数滤波器及其在航空重力测量中的应用[J]. 测绘学报, 2023, 52(5): 706-713.
LIU L T, LIANG X H, LANG J J, et al. Improved function filter and its application in airborne gravimetry [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2023, 52(5): 706-713. (in Chinese)
- [15] 柳林涛, 许厚泽. 航空重力测量数据的小波滤波处理[J]. 地球物理学报, 2004, 47(3): 490-494.
LIU L T, XU H Z. Wavelets in airborne gravimetry [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47(3): 490-494. (in Chinese)
- [16] 郎骏健, 梁星辉, 柳林涛, 等. 航空重力傅里叶基追踪低通滤波方法研究[J]. 地球物理学报, 2018, 61(12): 4737-4745.
LANG J J, LIANG X H, LIU L T, et al. Research on the Fourier basis pursuit low pass filter for airborne gravity [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(12): 4737-4745. (in Chinese)
- [17] 李新宇, 周召发, 张志利, 等. 航空重力测量重复测线数据处理技术研究[J]. 航空科学技术, 2023, 34(12): 93-99.
LI X Y, ZHOU Z F, ZHANG Z L, et al. Research on data processing technology for repeated survey lines in aerial gravity measurement [J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(12): 93-99. (in Chinese)
- [18] CHENG J Y, HOU C Z, ZHU X, et al. Vehicle dynamic continuous gravimetry technology based on high-precision 2-D LDV and GNSS [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2024, 21: 7508005.
- [19] 邹欣蕾, 蔡劭琨, 吴美平, 等. 基于经验模态分解的航空重力测量动态误差分离[J]. 物探与化探, 2016, 40(6): 1217-1221.
ZOU X L, CAI S K, WU M P, et al. Dynamic errors separation of airborne gravimetry based on empirical mode decomposition [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 40(6): 1217-1221. (in Chinese)
- [20] KIM J W, LEE B Y. Estimating polar marine free-air gravity anomalies from dense radar altimeter data [J]. Geosciences Journal, 2007, 11(4): 369-376.
- [21] HAO S W, ZHANG Z L, ZHOU Z F, et al. Methods for gravity anomaly and DOV determination based on MPGAC for land vehicles [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 1-13.
- [22] VON FRESE R R B, JONES M B, KIM J W, et al. Analysis of anomaly correlations [J]. Geophysics, 1997, 62(1): 342-351.
- [23] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical

- mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1998, 454(1971): 903–995.
- [24] HUAN C M, WANG F W, ZHOU C J. Empirical mode decomposition for post-processing the GRACE monthly gravity field models[J]. Acta Geodynamica et Geomaterialia, 2022, 19(4): 281–290.
- [25] ZHAO L, WU M P, FORSBERG R, et al. Airborne gravity data denoising based on empirical mode decomposition: a case study for SGA-WZ Greenland test data [J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2015, 4(4): 2205–2218.
- [26] WANG M H, CAO J L, CAI S K, et al. Improving the strapdown airborne vector gravimetry by a backward inertial navigation algorithm[J]. Sensors, 2018, 18(12): 4432.
- [27] 蔡劭琨, 曹聚亮, 于瑞航. 捷联式航空重力矢量测量低频误差机理和修正[J]. 中国惯性技术学报, 2020, 28(4): 433–439, 492.
- CAI S K, CAO J L, YU R H. The mechanism and modification of low frequency error in strapdown airborne vector gravimetry[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2020, 28(4): 433–439, 492. (in Chinese)
- [28] CHENG J Y, YANG Z K, HOU C Z, et al. Ground vehicle gravimetry system based on SINS and two-dimensional LDV integration: error analysis and verification [J]. Geocarto International, 2024, 39(1): 2375589.
- [29] HOU C Z, CHENG J Y, ZHU X, et al. Vehicle-borne gravity vector measurement method based on SINS/GNSS/LDV integrated navigation [J]. IEEE Access, 2024, 12: 170610–170619.
- [30] JEKELI C, KWON J H. Results of airborne vector (3-d) gravimetry [J]. Geophysical Research Letters, 1999, 26(23): 3533–3536.