

航空重力数据低通滤波处理及其功效分析*

田颜锋^{1,2)} 李姗姗¹⁾ 刘晓刚¹⁾ 付国峰²⁾

(1) 解放军信息工程大学测绘学院, 郑州 450052)
(2) 73603 部队, 南京 210049

摘要 针对航空重力测量数据事后处理的特点, 基于窗函数法设计了 FIR 数字滤波器。数据处理结果表明: FIR 数字滤波器具有精确的线性相位, 滤波过程稳定; 设计方法简单, 易于上机实现; 在滤波过程中卷积运算能够部分降低傅立叶变换中的栅栏效应。

关键词 傅立叶变换; 卷积; FIR 数字滤波; 航空重力数据; 栅栏效应

中图分类号: P203

文献标识码: A

LOW-PASS FILTER AND ITS EFFECT IN DATA PROCESSING OF AERIAL GRAVITY MEASUREMENTS

Tian Yanfeng^{1,2)}, Li Shanshan¹⁾, Liu Xiaogang¹⁾ and Fu Guofeng²⁾

(1) Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou 450052)
(2) 73603 Troops, Nanjing 210049

Abstract Considering the characteristics of the processing of aerial gravimetry data, a FIR digital filter based on the window function is designed. The results show that FIR digital filter has accurate linearity phase and its filtering process is steady and the method is simple and easy to be realized on the computer. The barrier phenomena in the Fourier transform can be partially reduced by the convolution integral in the process of filtering.

Key words: Fourier transform; convolution integral; FIR digital filter; aerial gravity data; barrier phenomena

1 前言

航空重力数据的滤波与估算方法是航空重力测量的主要发展方向之一, 理想滤波器的设计与实现一直是其追寻的目标^[1]。Jay Hyoun Kwon^[2] 讨论了波束相关滤波器 (Wavenumber Correlation Filter) 在航空重力测量中的应用, 在未来的捷联式航空重力测量系统 SAGS4 中, Gerd Boedecker^[3] 提议使用长度为 5 的 Bessel 滤波器对数据进行处理, 但是由于算法的复杂性和数据处理结果不理想, 他们的算法没有得到推广。FIR 低通滤波器以其简洁、实用的

特点成为目前航空重力数据滤波处理的常用滤波器, 设计 FIR 滤波器的主要方法有窗函数法、频率抽样法、切比雪夫逼近法和等波纹逼近设计法等^[4], 本文采用窗函数法设计了一个数字滤波器并对其滤波功效进行分析。

2 FIR 数字滤波器及其实现方法

设 $x(n)$ 、 $y(n)$ 、 $h(n)$ 分别为数字滤波器的输入序列、输出序列和冲激响应序列, 则时域数字滤波器的输入输出关系为:

$$y(n) = x(n) * h(n) \quad (1)$$

* 收稿日期: 2009-07-07

基金项目: 国家自然科学基金(40774031); 军事测绘任务“中国及周边重力场精化”项目基金

作者简介: 田颜锋, 男, 1981 年生, 助工, 硕士, 主要从事物理大地测量方面研究。E-mail: yanftian@126.com

其中 * 表示卷积。对应的频域输入输出关系为

$$Y(Z) = X(Z)H(Z) \quad (2)$$

FIR 滤波器的冲激响应序列是有限序列,它的 z 传递函数

$$H(z) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n)z^{-n} \quad (3)$$

是关于 z^{-1} 的多项式,参数 N 是滤波器的阶数。对于航空重力数据来说,参数 N 通常为数百或者几千。将式(3)代入式(2)可得

$$Y(Z) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k)z^{-k}X(Z) \quad (4)$$

式(4)两端取 Z 反变换,得:

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k)x(n-k) \quad (5)$$

式(5)即为输入数据序列和滤波器的线性卷积关系式。其中理想滤波器的长度是无限的,信号采样后的数据是离散的,因此在计算中不可避免地要遇到对滤波器抽样响应序列的截短问题。窗函数法是把一个无限的长序列变成有限的短序列经常采用的方法之一,窗函数是一个非负的实偶函数,其性能设计指标主要有 3 dB 带宽 B 、最大边瓣峰值 A (dB)、边瓣谱峰渐近衰减速度 D (dB/oct)。由于汉宁窗有较小的边瓣和较大的衰减速度,本文采用汉宁窗对滤波器进行截短。

汉宁窗的数学表达式为^[4]:

$$w(k) = 0.5 - 0.5 \cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right) \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (6)$$

性能设计指标为: 3 dB 带宽 B : $1.44 \Delta w$; 最大边瓣峰值 A : -32 dB; 边瓣谱峰渐近衰减速度 D : -18 dB/oct。

3 航空重力数据的 FIR 滤波处理

为验证航空重力数据的 FIR 低通滤波处理效果,对山东东营地区部分实测数据进行处理分析。测量地区属沿海区域,测线的布设如图 1 所示,共计 12 条测线,其中 8 条为主测线,4 条为副测线,有 27 个交叉点以提供精度检核。主测线间距为 $1'$,副测线间距 $8'$,载体平均飞行速度为 220 km/h,航高约 500 m,运载平台为国产某航测机。

测得的空中重力异常原始信号如图 2(a) 所示(量级很大)。分析信号的频谱图 2(b) 可以发现,数据中不仅含有所需的重力异常,还含有飞机抖动等其他噪声,并且夹杂的噪声信号远大于所需的重力异常信号,是典型的低信噪比信号。

FIR 滤波器主要涉及两个设计指标:归一化截

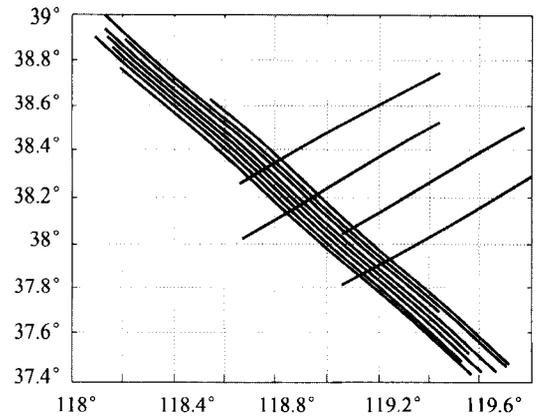


图 1 东营地区测线分布

Fig. 1 Flight path over Dongying area

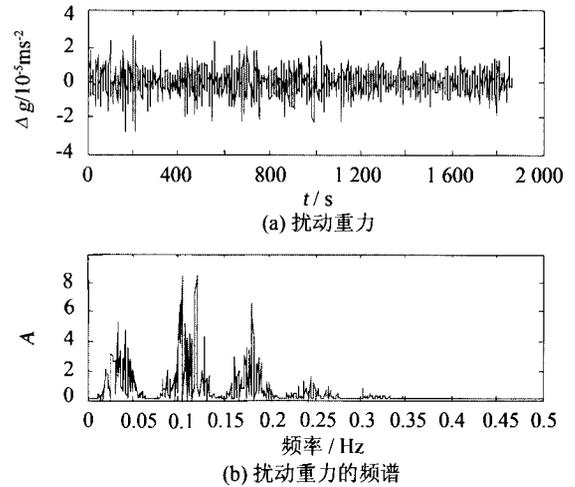


图 2 原始重力异常及其频谱

Fig. 2 Raw gravity anomaly and its spectrum

止频率 f_c 和滤波器长度 N 。截止频率的确定需兼顾航空重力测量的空间分辨率和精度,较大的截止频率有利于提高空间分辨率,但其代价是残留噪声的增多和精度的降低,反之亦然^[1]。假设航空重力测量的目标是探测波长分辨率为 λ 的重力场,飞机的平均速度为 v ,则对应的归一化截止频率为:

$$f_c = v/\lambda \quad (7)$$

采用较长的滤波器可以获得更精确的幅频响应,但会导致较大的时间延迟,同时加大边界效应的影响;反之,较短的滤波器长度能够减弱边界效应的影响,但降低了幅频响应的逼近精度。在满足幅频响应精度的前提下,滤波器长度应尽可能短。

根据式(5)和(6)确定的航空重力测量的滤波表达式为:

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k)w(k)x(n-k) \quad (8)$$

综合考虑航空重力测量时的飞行条件,取滤波器的归一化截止频率 $f_c = 0.006$ 、长度 $N = 400$ 比较合适。利用 MATLAB 画出的滤波器及其频谱如图 3

所示。

由图 3 可以看出,滤波器能有效地抑制重力频谱窗口之外的噪声而让重力信号不失真地通过。利用设计的滤波器对该测区某测线进行滤波处理,结果如图 4 所示。

从图 4 可以看出,滤波后重力异常的量级合理,频谱范围符合要求。

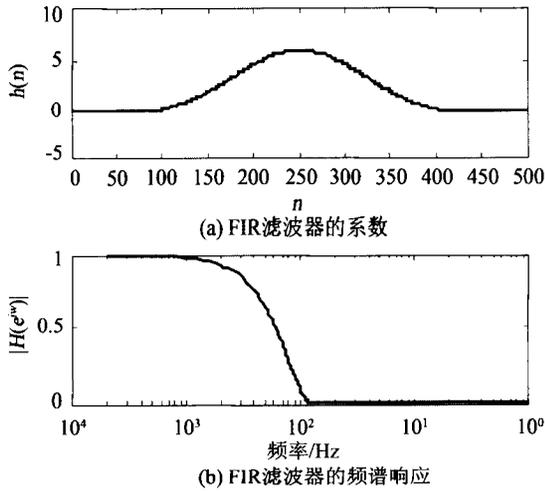


图 3 设计的滤波器及其频谱

Fig.3 Designed FIR digital filter and its spectrum

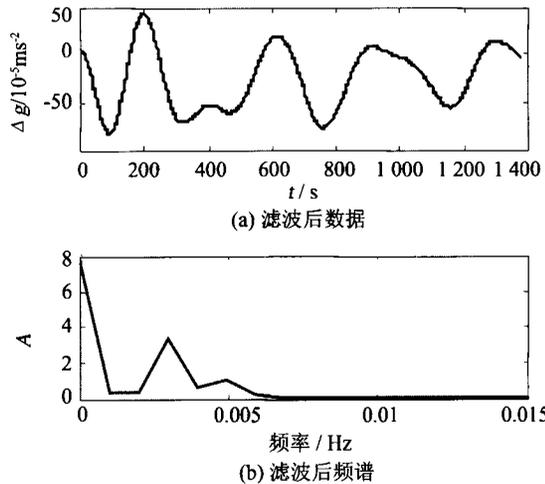


图 4 滤波后的数据及其频谱

Fig.4 Aerial gravity data after filtration and its spectrum

4 航空重力数据 FIR 滤波功效分析

4.1 自相比不符值

根据滤波器的定义,滤波器设计的初衷是用来有选择地提取部分频段的数据,滤除数据中的噪声分量,因此对于理想的滤波器来说,其滤波效果应不受滤波数据序列初始位置的影响,即在进行航空重力测量时,无论作业员从何时开始采集测线的有效数据,最后同一时刻的滤波结果在理论上应该是相等的。据此设计的验证方法为:人为地截短所使用的

航空重力测线,使每条测线的开始时间后延,结束时间提前,然后进行滤波处理并与之前的滤波结果作差。根据这个思路,对测区 12 条测线进行了验证,图 5 显示了其中 6 条测线的差值结果。

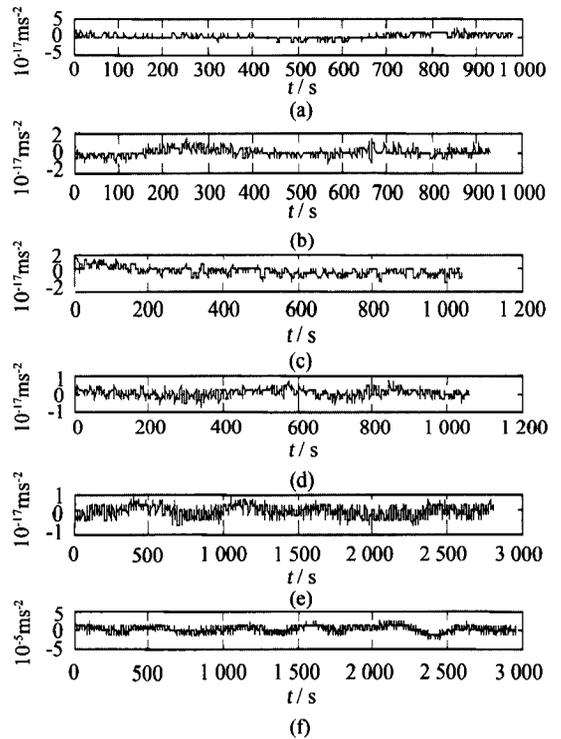


图 5 6 条测线截短前后的滤波结果比较

Fig.5 Comparison between the filtration results before and after shortening in six lines

从图 5 可以明显看出,测线截短前后滤波结果未发生明显变化,差值均在 $10^{-12} \times 10^{-5} \text{ms}^{-2}$ 量级,并且该测区其余 6 条测线的差值图形与图 5 类似。考虑计算机的舍入误差,滤波器的自相比不符值令人满意。这说明 FIR 数字滤波具有精确的线性相位,滤波过程稳定。

4.2 交叉点不符值

对航空重力测量的精度评定经常用到交叉点不符值。由于航空重力测量重力和载体位置的采样率较高,难以进行点位的逐一比对搜索。孙中苗^[1]曾提出一种快速、准确的交叉点搜索方法,具体算法如下:

1) 根据主副测线两端的坐标写出两条测线的直线方程,求解交叉点的近似位置;

2) 以所得到的交叉点近似位置为中心,在一定范围内对主副测线上的采样值进行逐一比对,其相距最近的两个点即为交叉点。

测量时的外部条件不同,两条测线交叉点的两个测值不尽相同。利用文中设计(下转第 138 页)

(上接第 132 页)

的 FIR 滤波器完成测线处理后,对某测区 27 个交叉点详细情况进行统计(假定各测线之间的观测相互独立),结果如表 1 所示。

表 1 某测区交叉点不符值统计(单位: 10^{-5}ms^{-2})

Tab.1 Differences of the intersection points(unit: 10^{-5}ms^{-2})

差值均值	标准偏差	中误差	最小差值	最大差值
0.5	4.59	3.25	-14.03	12.71

从表 1 可以看出,采用窗函数法设计 FIR 滤波器处理航空重力数据的精度约为 $3.5 \times 10^{-5} \text{ms}^{-2}$,满足精度需求。由于所使用的数据较少,无法进行测线系统误差的检验与调整,否则交叉点不符值的中误差会更小,测量精度会更高。

4.3 栅栏效应的处理

若信号长度为 N ,采样间隔为 Δt ,则傅立叶变换后的离散频谱间隔为^[5]:

$$\Delta f = \frac{1}{N\Delta t} \quad (9)$$

由式(9)可知,只有通过增大采样间隔 Δt 和信号长度 N 才能减小栅栏效应,但是航空重力测量系统的采样间隔固定,实际工作中往往采用在信号尾部补零的办法增加信号长度。滤波过程中进行卷积运算时为了使信号长度与滤波器长度达到一致,对信号和滤波器均进行了补零处理,因此,FIR 滤波对

降低栅栏效应有一定的效果。但如上述所言,滤波器的长度也不能过大,较长的滤波器将增大滤波延迟和加大边界效应的影响。

5 结论

FIR 数字滤波的主要作用是通过滤除航空重力测量中的高频部分,减弱噪声对测量结果的影响,分析表明利用该方法可以取得令人满意的滤波效果。FIR 数字滤波滤波过程稳定,易于上机实现,滤波过程中的卷积运算能够部分降低傅立叶变换中的栅栏效应,是处理航空重力测量数据的一种有效方法。

参 考 文 献

- 1 孙中苗. 航空重力测量理论、方法及应用研究[D]. 解放军信息工程大学测绘学院,2004.
- 2 Jay Hyoun Kwon B S and M Ed M S. Airborne vector gravimetry using GPS/INS[D]. American:The Ohio State University,2000.
- 3 Boedecker G and Stürze A. SAGS4-strap down airborne gravimetry system analysis[A]. Observation of the Earth system from space[C]. Netherlands:Almas Schimmel, 2006.
- 4 胡广书. 数字信号处理的理论、算法与实现[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
- 5 夏洪瑞,葛川庆,董江伟. 谐波小波滤波功效分析[J]. 勘探地球物理进展,2007,30(3):168 - 174.