

航空重力测量中 FIR 低通滤波器的比较

蔡劭琨, 吴美平, 张开东

(国防科学技术大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:航空重力测量数据中含有大量的噪声,需要采用 FIR 低通滤波器来提取实际的重力异常信息。结合一组实测的航空重力测量数据,讨论 FIR 低通数字滤波器截止频率和滤波器长度的确定方法,研究了无效数据的删除方法;通过比较不同窗函数设计的滤波器的数据处理性能,得出了在航空重力测量数据处理中,汉宁窗和海明窗设计 FIR 低通数字滤波器可以满足重力场信息提取的要求。

关键词:航空重力测量; FIR 低通数字滤波器;窗函数;重力异常提取

中图分类号: P631.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2010)01-0074-05

航空重力测量是在测量平台处于不断高速运动状态下的动态测量。各类观测数据均受到大量具有不同频谱特性的噪声的影响,因此,计算得到的重力异常中包含了大量噪声。航空重力测量数据中重力异常信号往往不足 100 mGal,而噪声的幅度可能比重力信号高出百倍甚至几千倍;另一方面,信号比噪声大的频带通常在低频段的很窄部分,而噪声占据了相当宽的频带,主要集中在高频段^[1-6]。为了获得实际的重力场信息,要对原始的重力异常信号进行处理,因此,航空重力测量中一般只记录原始数据,数据进行事后处理^[7]。

数字滤波器是信号处理过程中针对噪声使用最为广泛的装置。数字滤波器实质上是一个有限精度算法实现的线性时不变离散系统^[8]。它的基本工作原理是利用离散系统特性对系统输入信号进行加工和变换,改变输入序列的频谱或信号波形,让有用的频率信号分量通过,抑制无用的信号分量输出。因此,可以利用低通滤波器消除或减弱噪声的影响,最常用的数字滤波器是无限冲激响应数字滤波器(即 IIR 数字滤波器)和有限冲激响应数字滤波器(即 FIR 数字滤波器)。FIR 数字滤波器的最大优点在于可以得到严格的线性相位,并且总是稳定的^[9]。由于航空重力测量中信号主要集中在低频段,所以多采用 FIR 低通数字滤波器进行航空重力测量数据的处理。

笔者利用加拿大渥太华地区的测量数据,讨论滤波器参数的选择对滤波器性能的影响,分析比较利用各种窗函数设计的 FIR 低通数字滤波器在航空

重力测量滤波处理中的应用特性。

1 重力异常值提取过程中存在的问题

笔者采用 SGL 公司在加拿大渥太华地区的测量数据^[10]。此次测量采用 AirGrav 系统,测区范围为 12.5' × 20',地形的平均海拔为 268 m。飞行高度约 468 m,平均飞行速度为 50 m/s,共计 54 条测线,其中南北方向 8 条(控制线),东西方向 46 条,南北向测线间距 5 000 m,东西向测线间距 500 m,测线长度总计 1 836 km,数据采样频率为 2 Hz。

对数据进行频谱分析可得到滤波前的重力异常功率谱如图 1 所示,频率在 0 ~ 0.33 Hz。

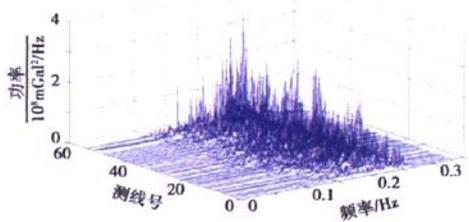


图 1 渥太华地区滤波前重力异常功率谱

从图 1 可以看出,滤波前的原始数据中含有大量的噪声。对数据进行交叉点搜索^[11],可得到滤波前的交叉点不符值如图 2 所示。

从图 2 可以看出,由于噪声的存在,交叉点不符值的绝对值高达 4 000 mGal,这样的数据显然不能满足应用要求,这就需要对原始重力异常数据进行滤波处理。

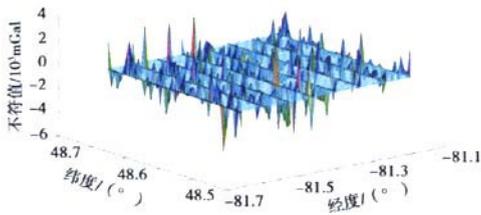


图2 渥太华地区滤波前交叉点不符值

当采用 FIR 低通数字滤波器进行数据处理时,由于重力信号与噪声之间的过渡不是很明显,因此,在设计滤波器时,需要确定合适的截止频率;另外, FIR 低通滤波器具有边界效应,这和滤波器长度是相关的,也需要考虑滤波器的长度。

2 FIR 低通滤波器的优化设计

FIR 滤波器可以表示成差分方程形式^[12]

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

式中, $x(n)$ 为输入序列; $y(n)$ 为滤波后序列; $h(k)$ 为滤波器系数,即单位冲激响应; N 为滤波器的长度。

FIR 数字滤波器的设计有窗函数法、频率采样法以及等波纹法等方法。运用窗函数法设计滤波器是 FIR 数字滤波器设计的主要方法之一。窗函数法运算简单,又有闭合形式的公式可循,因而很实用。笔者以窗函数法为例,讨论 FIR 低通滤波器截止频率和滤波器长度的确定,并讨论滤波器设计时各种窗函数的选择。

2.1 截止频率的确定

滤波器截止频率的设计应兼顾波长分辨率和精度,在航空重力测量中,截止频率与飞行速度 v 、波长分辨率 λ 之间的关系为^[1-2]

$$f = v/\lambda. \quad (2)$$

当飞行速度一定时,截止频率 f 增大,可以提高波长分辨率,但截止频率的增大会使得残留噪声增多,从而导致精度降低;减小截止频率,可以消除或减弱噪声,但会影响波长分辨率。对于事先设计好的重力测量分辨率,为了改变截止频率以达到理想的滤波效果,就必须改变飞机的飞行速度。从提高测量分辨率的角度看,低速飞行是有利的^[12-13]。

此次航空重力测量试验的飞行速度为 50 m/s,要求实现分辨率为 4 km 波长,那么,滤波器的截止频率应为 $f_c = 0.0125$ Hz。由测线上数据最终的采样频率 $f_s = 2$ Hz,可得滤波器的归一化频率为 $f_c^N = f_c/f_s = 0.00625$ 。

2.2 滤波器长度的确定

在实际应用中滤波器长度的确定应考虑两个因素^[2,14]:一是滤波器长度的奇偶性,偶数长度的滤波器比奇数长度的滤波器具有更好的幅频响应,但是偶数长度的滤波器会产生非整数的时间延时,滤波后需要进行内插处理,所以通常采用奇数长度的滤波器;二是滤波器的绝对长度,长度长的滤波器可以获得更精确的幅频响应,但长度太长会导致较大的时间延迟,且会加大边界效应的影响,使得因边界效应的影响而舍弃的数据增多,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精度,所以在应用时应该选择合适的滤波器长度。

对于用窗函数法设计的滤波器,其长度可以通过主瓣宽度来进行估算,令主瓣宽度的一半等于实际的归一化截止频率就可以估算出滤波器的长度,以该数值来指导滤波器长度的选择^[2]。几种主要窗函数的基本参数如表 1 所示。

表1 渥太华地区主要窗函数的基本参数

窗函数	主瓣近似宽度	旁瓣峰值 dB	阻带最小衰减 dB
矩形窗	$2/N$	-13	-21
三角窗	$4/N$	-25	-25
汉宁窗	$4/N$	-31	-44
海明窗	$4/N$	-41	-53
布莱克曼窗	$6/N$	-57	-74
凯泽窗 $\beta = 7.865$	$5/N$	-57	-

如采用海明窗,则 $N = 2/f_c^N = 320$ 。由于通常采用奇数长度的滤波器,所以滤波器的长度可以考虑选为 321。

2.3 滤波后的无效数据

由于 FIR 低通滤波器具有边界效应,在滤波后的数据中要舍弃一部分因边界效应而产生的无效数据。图 3 所示即为滤波后的交叉点不符值(未舍弃无效数据)。从图中可以直观地看出,无效数据的存在使得测区的四周仍有不符值较大的交叉点。

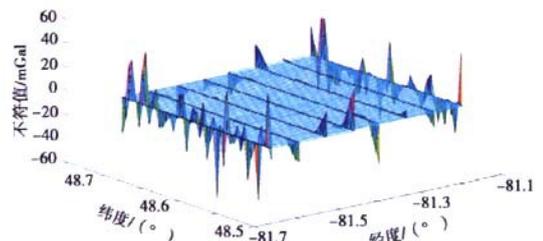


图3 渥太华地区滤波后的交叉点不符值

FIR 低通滤波器的边界效应和滤波器的长度有关^[2],实际处理结果表明:假设滤波器的长度为 N

(通常选为奇数长度),则对于滤波后的结果要在每条测线首末端各舍弃 $(N - 1)/2$ 个数据,剩下的部分就是有效数据,文献[1]也说明了这一点。图4所示的上面一层为舍弃了无效数据后的交叉点不符值,下面一层为未删除无效数据的交叉点不符值。图5所示为对数据进行滤波处理并舍弃了无效数据后的重力异常功率谱。

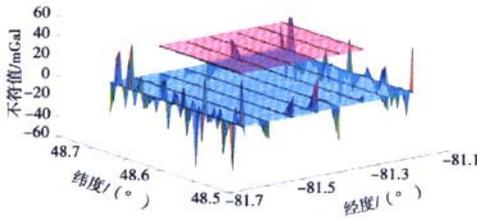


图4 渥太华地区滤波后舍弃无效数据和未舍弃无效数据的交叉点不符值比较

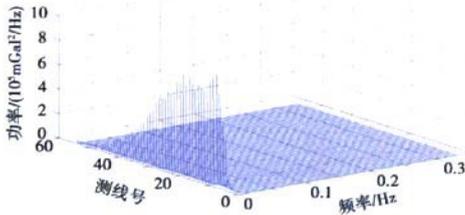


图5 渥太华地区滤波后的重力异常功率谱

可以看出,滤波器长度越长,则无效数据越多,那么舍弃无效数据之后剩余的交叉点数目将会减少,这会对后续的平差处理产生影响^[2,11]。所以必须选择合适的滤波器长度,使得最后得到的交叉点数目不至于太少。

2.4 不同长度的 FIR 滤波器的比较

为了验证3.2节中提到的滤波器长度的确定方法是否有效,这里比较了滤波器长度 N 的不同对滤波器性能的影响,图6中画出了 N 分别为161、261、321、401时的幅频响应(均为运用海明窗设计的滤波器,截止频率相同 $f_c = 0.0125$ Hz)。

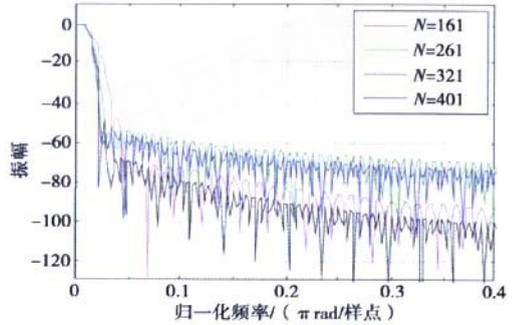


图6 渥太华地区不同滤波长度的幅频响应

表2中列出了 N 分别为161、261、321、401时的滤波效果,表中所示的为交叉点重力异常的不符值统计,其中 $std/\sqrt{2}$ 可以衡量数据的精度,数值越小说明精度越高。需要指出的是,SGL公司在针对该次航空重力测量的报告中指出该次测量数据的 $std/\sqrt{2}$ 为 $0.45 \text{ mGal}^{[10]}$,表中的相应数据和该数值有所差别,这主要是使用不同的滤波器造成的。另外交叉点的数目越多对后续的平差处理越好。图7a~图7d示出了 N 分别为161、261、321和401时滤波后的交叉点不符值直方图以及标准差分别为1.1502、0.9492、0.7643、0.8191 mGal的标准正态分布曲线。可以看出,交叉点误差大致服从标准正态分布。

表2中列出了 N 分别为161、261、321、401时的

表2 渥太华地区不同长度滤波器的滤波效果

滤波器长度 N	差值均值	标准偏差 (std)	$std/\sqrt{2}$	最小差值	最大差值	交叉点数
161	-0.4199	1.1502	0.8133	-3.1097	3.3206	217
261	-0.5248	0.9492	0.6712	-2.8236	3.1667	185
321	-0.5754	0.7643	0.5404	-2.0963	2.3178	167
401	-0.6199	0.8191	0.5792	-2.1147	2.2569	129

滤波效果,表中所示的为交叉点重力异常的不符值统计,其中 $std/\sqrt{2}$ 可以衡量数据的精度,数值越小说明精度越高。需要指出的是,SGL公司在针对该次航空重力测量的报告中指出该次测量数据的 $std/\sqrt{2}$ 为 $0.45 \text{ mGal}^{[10]}$,表中的相应数据和该数值有所差别,这主要是使用不同的滤波器造成的。另外,交叉点的数目越多,对后续的平差处理越好。图7a~图7d示出了 N 分别为161、261、321和401时滤波后的交叉点不符值直方图统计以及标准差分别为

1.1502、0.9492、0.7643、0.8191 mGal的标准正态分布曲线。可以看出,交叉点误差大致服从标准正态分布。

从图6中可以看出,在其他参数相同的情况下,滤波器的长度越长,其幅频响应越精确,滤波的效果将会越好。但从表2可以看出随着滤波器长度的增加,可以利用的交叉点数目越来越少,这是由于长度较长的滤波器将产生较大的边界效应造成的,所以滤波器的长度不宜太长。综合考虑滤波器幅频响应

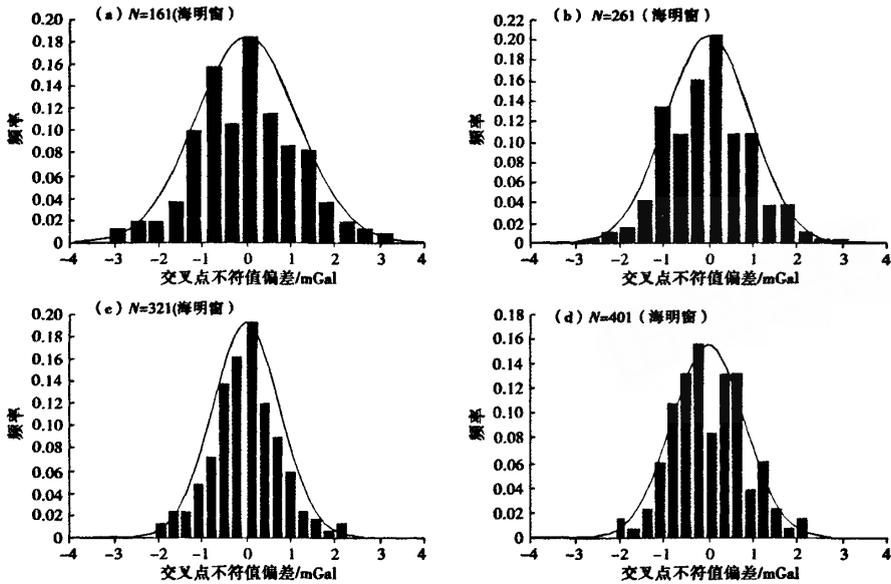


图 7 渥太华地区不同滤波器长度滤波(海明窗)后的交叉点不符值直方图和标准差正态分布曲线

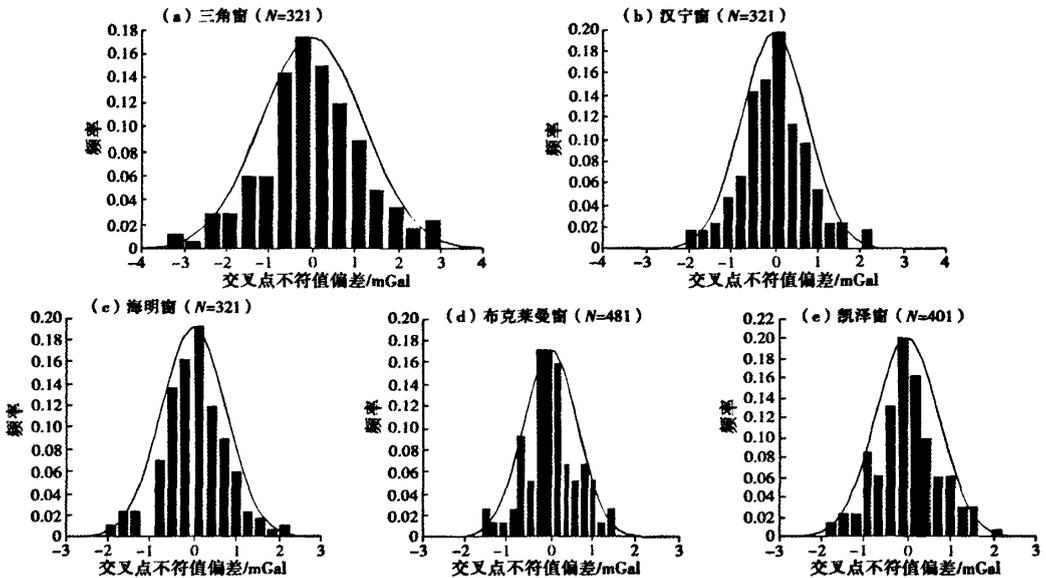


图 8 渥太华地区选用不同窗函数滤波后的交叉点不符值直方图和标准差正态分布曲线

的精度和最后可利用的交叉点数目,从表 2 中可以看出 N 取 321 是比较适宜的,这说明了本文中提及的滤波器长度的确定方法是有效的。

2.5 不同窗函数设计的 FIR 滤波器的比较

用窗函数法设计 FIR 滤波器时有多个窗函数可供选择,如三角窗(Triangular)、汉宁窗(Hanning)、海明窗(Hamming)、布莱克曼窗(Blackman)和凯泽窗(Kaiser)。究竟哪种窗函数设计的滤波器对航空重力测量数据的滤波更有效呢?这里用各种窗函数设计 FIR 低通滤波器,并对数据进行处理得到如表

3 所示结果,其中滤波器的长度是按照 2.2 节的方法确定的。图 8a ~ 图 8e 示出了分别用三角窗、汉宁窗、海明窗、布莱克曼窗和凯泽窗设计的滤波器滤波后的交叉点不符值直方图统计以及标准差分别为 1.205 1、0.765 4、0.764 3、0.634 6、0.737 1 mGal 的标准正态分布曲线。可以看出,交叉点误差大致服从标准正态分布。

从表 3 中可以看出,用布莱克曼窗和凯泽窗设计的滤波器对数据进行处理得到的精度分别为 0.448 8、0.521 2 mGal,数据处理精度较高,但由于

表 3 渥太华地区不同窗函数设计的滤波器处理结果的比较

mGal

窗函数	滤波器长度 N	差值均值	标准偏差 (std)	$\text{std}/\sqrt{2}$	最小差值	最大差值	交叉点数
三角窗	321	-0.5221	1.2051	0.8522	-3.4367	3.0566	167
汉宁窗	321	-0.5709	0.7654	0.5413	-2.0973	2.3136	167
海明窗	321	-0.5754	0.7643	0.5404	-2.0963	2.3178	167
布莱克曼窗	481	-0.5303	0.6346	0.4488	-1.6227	1.5178	76
凯泽窗 $\beta=7.865$	401	-0.5602	0.7371	0.5212	-1.8912	2.2305	129

边界效应舍弃了太多的无效数据,得到的用于下一步处理的交叉点数目比较少;用三角窗、汉宁窗和海明窗设计的滤波器得到的交叉点数目一样,但用三角窗设计的滤波器对数据的处理精度为 0.852 2 mGal,相对较差。综合考虑精度和最后得到的交叉点数目,运用汉宁窗和海明窗设计的滤波器滤波效果比较好。

3 结论

根据上述试验数据处理分析,航空重力测量中 FIR 滤波器的设计应当综合考虑以下因素:

(1) 滤波器截止频率的选取要综合考虑波长分辨率的要求和飞机的飞行速度,低速飞行有利于提高精度。

(2) 滤波器长度的选取以奇数为宜,长度的选择要兼顾滤波效果和边界效应的影响,选得太短达不到理想的滤波效果,太长又增加了受边界效应影响的无效数据量。令主瓣宽度的一半等于实际的归一化截止频率来估算滤波器的长度是一个比较好的方法。

(3) 滤波后的结果在每条测线首末端各舍弃 $(N-1)/2$ 个数据就可以将因边界效应的影响而产生的无效数据删除。

(4) 对于运用窗函数来设计 FIR 低通滤波器,汉宁窗和海明窗的效果比较好。

参考文献:

- [1] 郭志宏,罗锋,安战锋.航空重力数据窗函数法 FIR 低通数字滤波试验[J].物探与化探,2007,31(6):568-571,576.
- [2] 孙中苗.航空重力测量理论、方法及应用研究[D].郑州:中国人民解放军信息工程大学,2004.
- [3] Bruton A M. Improving the Accuracy and Resolution of SINS/DGPS Airborne Gravimetry [D]. Calgary: University of Calgary, 2000.
- [4] 张昌达.几种新型的航空重力测量系统和航空重力梯度测量系统[J].物探与化探,2005,29(6):471-476.
- [5] 张开东.基于 SINS/DGPS 的航空重力测量方法[D].长沙:中国人民解放军国防科学技术大学,2007.
- [6] 周坚鑫,刘浩军,王守坦,等.国外航空重力测量在地学中的应用[J].物探与化探,2004,28(2):119-122.
- [7] 张开东,吴美平,胡小平.基于捷联惯导的航空重力测量滤波算法[J].中国惯性技术学报,2007,15(1):5-8.
- [8] 王占中.基于 MATLAB 的 IIR 滤波器设计与仿真[J].电脑知识与技术,2008,3(5):1072-1074.
- [9] 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.
- [10] Elieff S, M. Sc. Airborne Gravity Evaluation Survey [R]. Project Report, Canada: Sander Geophysics Limited. 2003:7.
- [11] 李海.航空重力测量测线网平差的理论与方法[D].郑州:中国人民解放军信息工程大学,2002.
- [12] 孙中苗,夏哲仁.航空重力测量中低通滤波器参数的优选[J].测绘学院学报,2003,19(1):11-14,18.
- [13] 张开东,吴美平,胡小平.基于捷联惯导的航空矢量重力测量的降阶滤波算法[J].测绘学报,2006,35(3):204-209.
- [14] 孙中苗,夏哲仁,石磐,等.航空重力测量数据的滤波与处理[J].地球物理学进展,2004,19(1):119-124.

A COMPARISON OF DIGITAL LOWPASS FIR-FILTERS IN AIRBORNE GRAVIMETRY

CAI Shao-kun, WU Mei-ping, ZHANG Kai-dong

(Mechatronics and Automation College, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: There is a lot of noise in the data observed by airborne gravimeter. Digital lowpass FIR-filter is needed to extract the factual gravity field information from such data. Based on a set of real data of airborne gravimetry, the authors dealt with the determination of the cutoff frequency and filter length of the digital lowpass FIR-filter, and studied the method for deleting ineffectual data. Based on a comparison of the capabilities of filters designed by different window functions, it is concluded that, in airborne gravimetry, the digital lowpass FIR-filter designed by Hanning window and Hamming window can meet the requirement of extracting the gravity field information.

Key words: airborne gravimetry; digital lowpass FIR-filter; window function; extraction of gravity anomaly

作者简介:蔡琨珉(1986-),男,福建南平人,国防科学技术大学机电工程与自动化学院惯性技术实验室硕士研究生,主要从事航空重力测量网络平差方法研究。