

L &R 航空重力仪摆杆尺度因子的确定与分析

孙中苗¹ 夏哲仁¹ 李迎春¹

(1 西安测绘研究所, 西安市雁塔路中段 1 号, 710054)

摘要: 讨论了 K 因子的实验确定方法, 基于重力仪检测平台的检测数据和航空重力测量实测数据, 分析了 K 因子对计算结果的影响。

关键词: 航空重力测量; 摆杆尺度因子; FIR 滤波器

中图法分类号: P223.4; TH761.5; P244

航空重力测量是以飞机作为运载平台, 利用航空重力仪(或其他加速度计)在空中测量地球重力场信息的一种重力测量方法。航空重力测量系统主要由航空重力仪和高精度的导航设备组成, 前者紧固在运载平台上, 用于测量包含有重力场信息在内的比力; 后者通常采用性能优良的 GPS 接收机, 用于确定各种扰动加速度, 从比力中减去这些扰动加速度, 应用适当的滤波方法即可获得所需的地球重力场信息^[1]。对于使用广泛的 LaCoste & Romberg 海/空重力仪, 其输出的比力是经 5min 滤波器滤波后的平滑数据, 且有 300s 的时间延迟^[2]。在海洋重力测量中, 由于船速较慢及波浪运动较为规则, 这些平滑后的数据已足以满足所需的精度和分辨率^[3]; 但在航空重力测量应用中, 由于飞机飞行速度快, 飞机运动受大气湍流等不确定因素的影响较大, 这些数据往往难以满足要求。因此, 必须利用重力仪观测到的其他信息重新计算比力。计算中需要用到 K 因子, K 因子表示摆杆速度为每 2mV/min 时重力计数单位的数目, 用于将摆杆速度转换成重力计数单位。通常, 它是一个由厂家标定的常数, 但当飞机具有较大的自身运动时, 往往会使摆杆位置产生较大的角运动, 从而导致 K 因子随摆杆位置的变化而变化。因而, 如何确定这种变化关系便成为航空重力测量数据处理中的一个关键问题。

1 比力计算公式

对于航空重力测量测线上的某点 M , 其比力

计算公式为^[4]:

$$g(M) = G \cdot (S + KB' + CC) \quad (1)$$

式中, $g(M)$ 为 M 点的比力; G 为将计数单位转换成以 mGal 为单位的转换系数, 由仪器出厂时标定; S 为弹簧张力, 以计数单位(CU)为单位; K 为摆杆尺度因子; CC 为交叉耦合改正 CU; B' 为摆杆速度(mV/s), 通常由摆杆位置 B (mV)按下式计算:

$$B'(i) = \frac{B(i+1) - B(i-1)}{2} \quad (2)$$

2 K 因子的实验确定

假设在实验室利用航空重力仪对某点进行静态测量, 则有 $B' = 0$, $CC = 0$, 此时式(1)简化为:

$$g = G \cdot S \quad (3)$$

若重力仪不动, 而调整弹簧张力使其幅度变化 dS , 则有:

$$g = G \cdot (S + dS + KB') \quad (4)$$

式(4)减去式(3)得:

$$dS + KB' = 0 \quad \text{或} \quad K = -dS/B' \quad (5)$$

B' 可由测得的 B 依式(2)算得。因此, 对于每一个已知的 dS , 都可确定一个 K 值, 从而确定出 K 和 B 的经验关系 $K = K(B)$ 。

实际应用中, 利用测得的 K 与 B 的离散关系, 采用多项式进行了拟合, 二次多项式和三次多项式的拟合结果如下(如图 1 所示):

$$K_2 = 40.836 + 2.973 \times 10^{-4} B + 6.353 \times 10^{-9} B^2 \quad (6)$$

$$K_3 = 40.823 + 2.830 \times 10^{-4} B + 6.794 \times 10^{-9} B^2 + 3.043 \times 10^{-13} B^3 \quad (7)$$

从图1可以看出,二次多项式拟合和三次多项式拟合没有显著差别,但当摆杆位置变化较大时(如在曲线两端),则呈现出其中的差异,这一点在后面的实例中将得到进一步证实。

设 K_1 为仪器出厂时的标定值,按照 K 因子标定要求 $\rho = (K_{2(3)} - K_1) / K_1 \leq 5\%$, 笔者对 ρ 进行了统计, ρ 的均值为 2.4%, 标准偏差为 1.98%, ρ 大于 5% 的数目约占比较总数的 8.7%。由于 K 因子在某种程度上反映了重力仪性能的稳定性,因此,从 K 因子的变化总体上没有超出重力仪出厂时的技术指标要求的角度看,该型号重力仪的动态性能是稳定的。

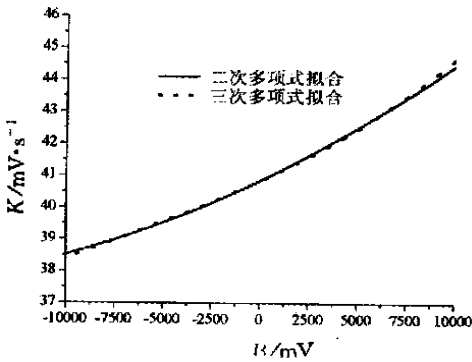


图1 K 因子随摆杆位置的变化

Fig. 1 K-Factor Versus Beam Position

3 测量数据的数字滤波

由于受载体动态性能的影响以及大气湍流等环境因素的制约,按式(1)算得的比力中尚含有大量的高频噪声,因此需要进一步的滤波处理。为与利用 GPS 确定载体垂直扰动加速度所用的滤波器相一致^[1],笔者采用了 FIR 低通滤波器。

对于时间序列 $x(n)$, FIR 滤波器可表示成如下差分方程形式^[4]

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

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

滤波器系数可利用理想频率响应 $H(j\omega)$ 求得:

$$H(j\omega) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n) e^{-j\omega n} \quad (9)$$

确定滤波器系数的方法有多种,最常用的是窗函数设计法和等波纹逼近设计法^[5,6]。这两种

方法只要求给出 3 个设计参数,即通带和阻带的截止频率 f_p, f_c 及滤波器长度 N 。其优点是能够准确地确定通带的截止频率,这对航空重力测量很重要,因为滤波器的截止频率决定了航空重力测量的波长分辨率。

在航空重力测量中,为了获取高分辨率的地球重力场信息,低速飞行是有利的。假设飞机的飞行速度为 $v = 360\text{km/h}$, GPS 数据采样间隔为 $T_s = 1\text{s}$,若要求滤波器能抑制波长短于 2km 的分量,而让波长大于 10km 的所有分量通过(即波长分辨率为 10km),则由 $f = v/\lambda$ 得:

$$f_p = v/\lambda_p = 0.01\text{Hz} \quad (10)$$

$$f_c = v/\lambda_c = 0.05\text{Hz} \quad (11)$$

式中, f_p, f_c 分别表示通带和阻带的截止频率; λ_p, λ_c 为 f_p, f_c 所对应的波长。

因采样频率 $f_s = 1/T_s = 1\text{Hz}$, 于是归一化频率为:

$$f_p^N = f_p/f_s = 0.01 \quad (12)$$

$$f_c^N = f_c/f_s = 0.05 \quad (13)$$

按上述技术指标,利用自行研制的 AGFS 软件设计的低通滤波器的系数和幅频响应如图 2、图 3 所示。

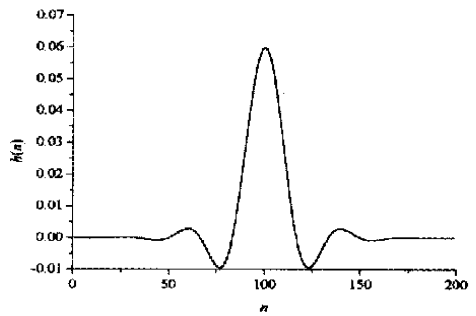


图2 低通滤波器的系数

Fig. 2 Coefficients of the Lowpass Filter

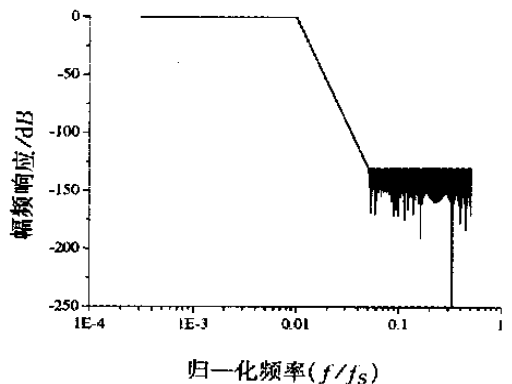


图3 低通滤波器的幅频响应

Fig. 3 Amplitude Response of the Lowpass Filter

4 实验结果与分析

4.1 重力仪检测平台的检测数据分析

正弦式航空重力仪检测平台是为检验航空重力仪的动态性能而研制的,它是由电动机及传动和配重装置构成的作匀速转动的运动平台。航空重力仪置于平台上进行动态测量时,其垂直运动速度分量和水平运动速度分量均为时间的正弦(或余弦)函数,加速度的垂直分量和水平分量当然也为时间的余弦(或正弦)函数,利用该三角函数在整周期内积分均值均为零的特性,可以在数据处理中消除重力仪读数中的平台运动影响,从而达到检验重力仪动态性能的目的^[7]。

图 4 给出了摆杆位置随时间的变化关系,其幅度谱如图 5 所示。从图中可以看到,摆杆位置呈明显的周期性变化,变化周期约为 3.8s,这恰是事先设定的检测平台的旋转周期。按照检测平台的运行原理,该周期相应的旋转加速度为 50 000mGal^[7]。

将 K_1 、 K_2 、 K_3 按式(1)算得的比力分别记为 g_1 、 g_2 和 g_3 。表 1 列出了 g_1 、 g_2 和 g_2 、 g_3 之差值的统计结果,图 6 为滤波前的差值,滤波后的比力与参考值之差如图 7 所示(为清晰起见, g_2 、 g_3 分别加了 1mGal、2mGal)。

从上述结果可以看出,对于检测平台数据,利

表 1 不同 K 值计算结果之比较(实验数据)/mGal

Tab. 1 Comparison of the Results from the K -Factor (Test Data)/mGal

	比较项目	差值均值	最大差值	最小差值	标准偏差
滤波前	$g_1 - g_2$	0.185	296.88	-297.81	189.28
	$g_2 - g_3$	0.007 5	12.15	-12.19	7.528
	$g_1 - g_2$	-0.012 7	0.021	-0.046	0.009 5
	$g_2 - g_3$	-0.000 2	0.010	-0.011	0.004 8
滤波后	$g_1 - \text{参考值}$	0.03	3.33	-4.49	0.95
	$g_2 - \text{参考值}$	0.02	3.36	-4.54	0.96
	$g_3 - \text{参考值}$	0.02	3.35	-4.53	0.96

用不同 K 值算出的比力在滤波前有很大的差异,但经数字滤波后,这种差异微乎其微。其主要原

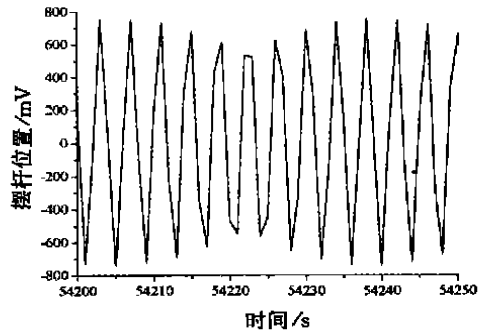


图 4 摆杆位置随时间的变化

Fig. 4 Position Versus Time

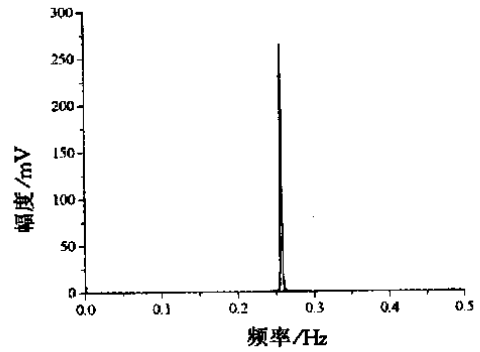


图 5 摆杆位置的幅度谱

Fig. 5 The Amplitude Spectrum

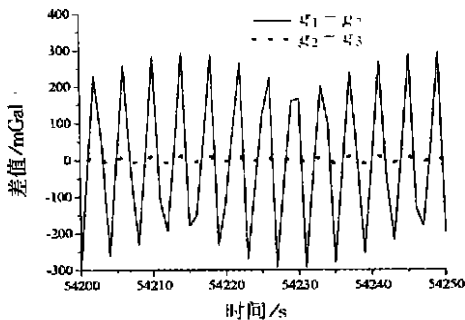


图 6 滤波前不同 K 值计算结果之差

Fig. 6 Difference Between the Results from K -Factor Before filtering

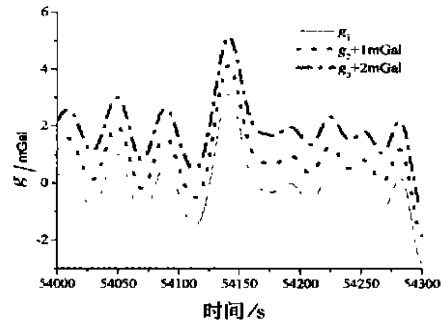


图 7 滤波后的比力与参考值之差

Fig. 7 Difference Between the Filtered Specific Force and the Reference

因在于低通滤波器的截止频率为 0.01Hz, 而摆杆位置的变化频率约为 0.26Hz, 显然, 摆杆位置的高频信息在低通滤波后已经完全消除。

4.2 实际飞行数据分析

数据来源于某航空重力测量实验, 试验中采用了新型的 L & R 航空重力仪, 重力仪数据采样率为 1Hz, 但每秒有 10 个摆杆位置输出。笔者采用了 1Hz 的摆杆位置平均值, 使与弹簧张力、交叉耦合等输出数据的采样率保持一致。本实验总计飞了 9 条测线, 其中东西测线 5 条, 南北测线 4 条, 飞行高度约 3.4km, 飞行速度约 400km/h。选择 1 条东西测线(测线 1)和 1 条南北测线(测

线 6)进行 K 值的比较和分析。

测线 1 重力仪输出的摆杆位置随时间的变化如图 8 所示, 其相应的幅度谱如图 9 所示。从图中可以看出, 摆杆位置的变化近似于有色噪声特性。表 2 列出了测线 1 和测线 6 滤波后的 g_1 、 g_2 和 g_2 、 g_3 之差值的统计结果, 图 10 和图 11 分别是滤波后的差值。从比较结果可见, K 为常数和 K 为变量对计算结果有很大的影响, 这种影响的标准偏差可达 10mGal 以上, 因此, 在实际数据处理时必须予以顾及。 K 与 B 的经验关系用二次多项式拟合和用三次多项式拟合差别不大, 因而, 实际应用中采用二次多项式拟合即可。

表 2 不同 K 值计算结果的比较(实验数据)/mGal

Tab. 2 Comparison of the Results from the K -Factor (Test Data)/ mGal

	比较项目	差值均值	最大差值	最小差值	标准偏差
测线 1	$g_1 - g_2$	-2.44	21.71	-28.96	12.46
	$g_2 - g_3$	0.009	1.05	-0.86	0.46
测线 6	$g_1 - g_2$	4.42	28.46	-20.88	14.51
	$g_2 - g_3$	0.16	1.00	-0.57	0.43

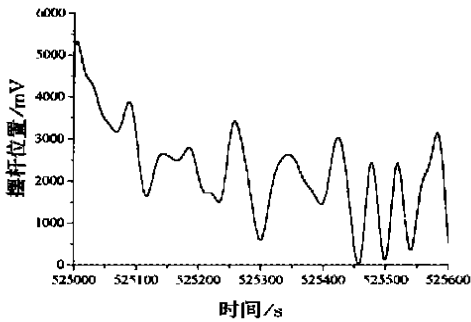


图 8 测线 1 的摆杆位置

Fig. 8 Beam Positions for Line 1

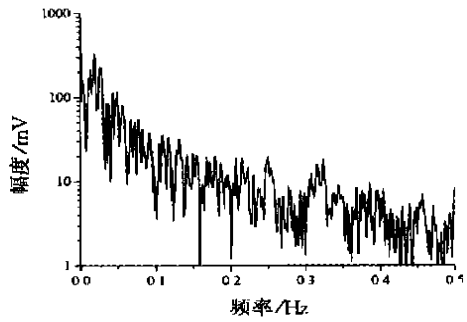


图 9 测线 1 摆杆位置的幅度谱

Fig. 9 Amplitude Spectrum of the Beam Position

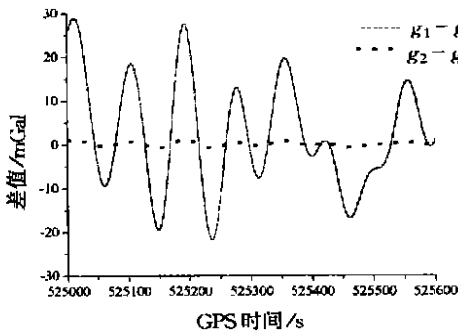


图 10 不同 K 值计算结果之差(测线 1)

Fig. 10 Difference Between the Results from K -Factor (Line 1)

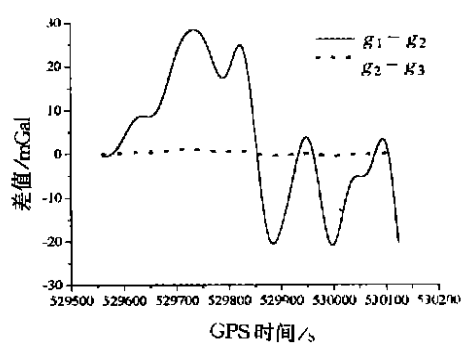


图 11 不同 K 值计算结果之差(测线 6)

Fig. 11 Difference Between the Results from K -Factor (Line 6)

5 结 语

笔者用静态裤验方法确定了 K 因子随摆杆

位置变化的经验关系。基于此, 采用航空重力仪检测平台的检测数据和某航空重力测量实验的实测数据, 比较分析了不同 K 因子对比力计算结果的影响, 可以得出如下初步结论。

1) 对于摆杆位置变化极为规则的重力仪平台检测数据, 采用数字滤波方法后, K 为常数和 K 为变量对计算结果影响甚微, 可完全采用仪器出厂时的标定值;

2) 对于航空重力测量实测数据, 两者之间差异颇大, 其标准偏差可达 10mGal 以上, 实际数据处理时应采用随摆杆位置变化的 K 因子;

3) K 与 B 的经验关系用二次多项式拟合和用三次多项式拟合差别不大, 实用中采用二次多项式拟合即可。

参 考 文 献

- 1 孙中苗, 夏哲仁. FIR 低通差分器的设计及其在航空重力测量中的应用. 地球物理学报, 2000, 43(6): 850 ~ 855
- 2 Instruction Manual of L & R Model "S" AIR-SEA Dynamic Gravity Meter with "Airsea 3. 0" Digital Control System, LaCoste & Romberg LLC, 1998

- 3 黄谟涛, 管 铮, 翟国君, 等. 海洋重力测量理论方法及其应用. 天津: 海潮出版社, 1997
- 4 Verdun J, Bayer R, Klingele E, et al. The Alpine Swiss French Airborne Gravimetry Project (ASFAG Project). Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata, 2001, 40 (3): 273 ~ 276
- 5 胡广书. 数字信号处理: 理论、算法与实现. 北京: 清华大学出版社, 1997
- 6 Rabiner L R, Gold B. Theory and Application of Digital Signal Processing. Prentice-Hall, Inc, 1975
- 7 孙中苗, 石 磐, 夏哲仁, 等. 航空重力仪的动态检验. 测绘通报, 2001, (10): 42 ~ 44

作者简介: 孙中苗, 副研究员, 博士生. 现主要从事精密大地水准面的确定以及航空重力测量等领域的研究. 代表成果: FIR 低通差分器的设计及其在航空重力测量中的应用, 航空重力测量中厄特弗斯改正的计算与分析, 航空重力仪的动态检验, 等. 已发表论文 20 余篇.

E-mail: sunszm@263.net

Determination and Analysis of the Beam Scale Factor for the LaCoste & Romberg Airborne Gravimeter

SUN Zhongmiao¹ XIA Zheren¹ LI Yingchun¹

(1 Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, 1 Middle Yanta Road, Xi'an, China, 710054)

Abstract: The beam scale factor (called K -factor) is one of the important parameters for the AIR-SEA gravimeter. Usually in all classical processing of marine or airborne gravity data, the K -factor is postulated to be a constant. Presumably, this is not true for the large angular deviations of the beam caused by the own movement of the boat or the aircraft. Therefore we propose an experimental procedure to determine the relation $K = K(B)$ where B is the beam angular position. Based on this relation, the effects on the results due to different K -factor (a constant or a variable) are analyzed in detail by using the data from the test platform for gravimeter and the actual data for airborne gravimetry. Some initial conclusions can be made: ① For the data from the test platform, the effects on the results due to different K -factor (a constant or a variable) are completely similar after using digital filter. The reason of this is that the changes of the beam positions are very regular. ② For the actual flight data, the difference of the effects on the results due to different K -factor (a constant or a variable) is relatively large, and the standard derivation of the difference can reach 10 mGal after using digital filter, Thus it is very important to consider this difference in the real data processing. ③ We use the polynomial fit to determine the relation $K = K(B)$. There are no significant effects due to the different orders for the polynomial, and a second orders polynomial can be chosen actually.

Key words: airborne gravimetry; beam scale factor; FIR filter

About the author: SUN Zhongmiao, associate researcher, Ph. D candidate. His major researches include precise geoid determination and airborne gravimetry etc.

E-mail: sunszm@263.net