

航空 γ 能谱全谱数据的高斯分解方法

Gaussian Function Fitting by Least- Square for Deconvolving the Data of Full Spectrum by the Airborne Gamma-ray Spectrometer

裴少英/PEI Shao-ying, 王南萍/WANG Nan-ping

中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院, 地下信息与探测技术教育部重点实验室, 北京 100083

School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences (Beijing) and Geo-detection Laboratory, Ministry of Education of China, Beijing, 100083, China

[摘要] ^{137}Cs 等人工放射性核素的活度浓度是核应急环境电离辐射水平评价中的重要数据。为了提取 NaI(Tl) 航空 γ 能谱仪(GR-820)实测全谱数据的 ^{137}Cs 信息, 采用高斯最小二乘拟合算法对实验谱线的低能重叠峰进行了单高斯和双高斯峰的拟合方法研究。对铀源、钍源和铯源实验数据用单高斯拟合的最大相对误差小于 $\pm 5\%$, 对铀和铯混合源的双高斯峰拟合峰面积的平均误差为 21.84%。对 3 个重叠峰以上的高斯拟合方法仍需进一步深入研究。

[关键词] 航空 γ 能谱; 最小二乘; 高斯函数; 核应急

[中图分类号] P3

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2006)11-0010-04

Abstract: The radioactive concentrations of ^{137}Cs source and other man-made radionuclides are important data for estimating environment radiation level in nuclear emergency. In order to extract the data of energy peak of ^{137}Cs from full spectra measured by NaI (Tl) airborne gamma-ray spectrometer (GR-820), the overlapped peaks at lower energy bands are deconvolved by Gauss function fitting by least square (single peak and double peaks). The maximum relative error of single peak area is less than $\pm 5\%$ due to only uranium, thorium or cesium sources. And the average relative error of overlapping peak (double peaks) is 21.84%, which are produced by uranium and cesium sources. A research of deconvolving overlapped peaks of more than three peaks is needed.

Key Words: airborne gamma ray spectrometry; the square least; Gaussian function; nuclear emergency

CLC Number: P3

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2006)11-0010-04

1 引言

航空 γ 能谱测量是一种快速、经济、有效的核地球物理测量方法。该方法始于 20 世纪 50 年代, 最早采用 NaI(Tl) 探测器做 γ 总量测量, 后做成 4 道 γ 能谱仪, 现改进为多道测量系统 (256 道或更多道), 高纯锗 (HpGe) 半导体探测器也用于航空 γ 能谱测量。该方法通过测量地面介质的特征 γ 射线谱来求得地面岩石或土壤中的铀、钍、钾的含量。该方法最初主要用于寻找放射性矿产及石油和天然气资源, 后用于地质填图、寻找与放射性核素伴生或共生的金属矿 (铝、钼、金、稀土等) 及钾盐、磷灰岩等其他矿产资源。自 20 世纪 80 年代以来, 国外主要将该方法用于环境放射性污染调查与评价, 包括天然放射性元素 ^{238}U 、 ^{226}Ra 、 ^{232}Th 、 ^{40}K 和核事故造成的人工放射性元素 ^{137}Cs 等^[1-2]。

除了监测天然和人工放射性污染外, 比利时用 16 L 的闪烁探测器 (NaI(Tl)) 和半导体探测器 (HPGe, 效率 50%) 探测器组成的航空 γ 能谱仪在核设施上空飞行, 实时测量核设施运行时其上空空气中人工核素 ^{137}Cs 、 ^{134}Cs 、 ^{60}Co 及 ^{41}Ar 的活度浓度。探测器安装在 AS355 双引擎直升飞机上, 飞行高度 30~100 m, NaI(Tl) 谱仪每 2 s 记录一组全谱数据, 这些人工核素的特征能量峰都有不同程度的显示, 但谱线展宽, 是多个能量峰的重叠^[3]。加拿大应用航空 γ 能谱方法监测地面放射污染, 确定了天然或人工放射源, 讨论了航空 γ 能谱仪的灵敏度, 比较了不同方法的测量结果^[4]。J D Allyson, L Guilla 等研究用蒙特卡罗、全谱数据提取技术等研究环境 γ 能谱数据的分解, 并与传统的能量窗方法进行了比较^[4-5]。

我国研究了传统能量窗数据处理和人

工核素比值法 VMMGC 提取全谱数据中 ^{137}Cs 信息的方法技术^[6], 以及低能峰的信息提取方法^[7]。

NaI(Tl) 航空 γ 能谱仪对 γ 射线的能量分辨率不高, ^{238}U 系列中的 ^{214}Bi 的 0.609 MeV、 ^{232}Th 系列中 ^{208}Tl 的 0.583 MeV 特征 γ 射线与 ^{137}Cs 的 0.662 MeV、 ^{134}Cs 的 0.605 MeV 的 γ 射线谱峰会重叠在一起, 从而导致 ^{137}Cs 和 ^{134}Cs 活度浓度计算得不准确, 有时因剥谱过多, 局部地段可出现 ^{137}Cs 的负值^[8]。但是, 由于 NaI(Tl) 探测器的探测效率是 HPGe 的 30 倍, 可在常温下使用等特性, 在核应急中仍将广泛应用。因此, 研究航空 γ 能谱全谱数据的分解方法对快速进行大范围放射性水平监测是很有意义的。

2 航空 γ 能谱测量及全谱数据特征

2.1 航空 γ 能谱测量

收稿日期: 2006-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40274023), 中国地质调查局项目 (200214100025)

作者简介: 裴少英, 男, 北京市海淀区学院路 29 号中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院, 硕士生, 主要研究方向为环境与工程物探; E-mail: dearsl@tom.com

王南萍(通讯作者), 女, 中国地质大学地球物理与信息技术学院, 教授, 主要从事环境放射性和核地球物理的教学与科研工作; E-mail: npwang@cugb.edu.cn

航空 γ 能谱测量通常将 16 L 的 NaI (TI) 探测器安装在飞机上, 在距地面 60 ~ 120 m 的空中飞行, 通过测量 ^{214}Bi 的 1.760 MeV、 ^{208}Tl 的 2.620 MeV、 ^{40}K 的 1.460 MeV 特征能量窗的计数率, 求得地面岩石和土壤中的当量 U、当量 Th 和 K 的含量。目前常用航空 GR-820 为加拿大 Exploranium 公司生产的 NaI (TI) 256 道 γ 能谱测量系统, 对 ^{137}Cs 的 0.662 MeV 的 γ 射线能量分辨率小于 12%。该系统有 GPS 卫星导航、雷达高度计等辅助设备, 一般情况下每秒记录 1 条全谱数据。

由于 NaI (TI) 闪烁探测器的能量分辨率较低, 且在低能峰谱段有较高的康普顿散射本底, 因此, 铀系的 ^{214}Bi 的 0.609 MeV、 ^{228}Ac 的 1.112 MeV 和 ^{208}Tl 的 0.911 MeV 的低能峰信息至今尚未被利用。 ^{214}Bi 是 ^{238}U 系列中 ^{226}Ra 的衰变子体, 大气氡及其衰变子体的存在是影响航空 γ 能谱数据 ^{238}U 、 ^{137}Cs 含量计算的重要干扰因素之一。在前苏联切尔诺贝利核电站事故造成的人工核素 ^{137}Cs 在全球范围地面污染水平的调查与评价中, 按要求提取了它的 0.662 MeV 特征峰的低能信息。

2.2 全谱数据特征

典型的航空 γ 能谱全谱图如图 1 所示, 图的横轴表示道数 (即能量), 道数越大所代表的能量越高; 纵轴表示每道的脉冲计数, 每道脉冲计数的高低与该能量的 γ 光子数成正比。从图中可以看出, 在道数比较大即能量比较高的范围之内, 能量峰都比较孤立, 很少会相互干扰, 比如 218 道的钍峰、147 道的铀峰及 122 道的钾峰, 这 3 个峰的能量依次是 2.620 MeV、1.760 MeV 和 1.460 MeV。因此, 航空 γ 能谱测量中常规采用的能量窗是钍窗 (2.620 MeV)、铀窗 (1.760 MeV) 和钾窗 (1.460 MeV)。

同时, 我们可以发现, 在低能部分的能量峰 51 道、77 道、94 道等都由多个能量峰重叠而成。例如, 51 道对应的能量为 0.609

MeV, 但这个峰实际上并不单单只是能量为 0.609 MeV 的 γ 射线的贡献, 当调查核泄露事故的时候, 其中还会包括 ^{137}Cs 的 0.662 MeV 能量 γ 射线的累加计数。造成这种现象的原因在于探测器本身的物理特性。与半导体探测器相比, NaI (TI) 晶体的分辨率比较低, 受温度影响也比较大。因此, 在低能部分的能量峰 NaI (TI), 晶体探测器不能够将其完全地区分开来。

3 全谱数据高斯分解方法研究

3.1 高斯函数拟合的最小二乘算法

在全谱 γ 能谱测量得到的谱线中, 在条件好的情况下, 核素的特征全能峰一般都符合放射性的统计涨落规律, 即正态分布。而高斯函数是正态分布的一个特例, 因此可以用高斯函数去拟合多道 γ 能谱的全能峰。在这里, 高斯函数的形式采用的是下面的表达式:

$$G(x_i) = A_i \exp[-4(\ln 2) \left(\frac{x_i - \mu_i}{B_i} \right)^2] \quad (1)$$

式中: A_i ——第 i 峰的高度, 即计数; B_i ——第 i 峰的半高宽 (FWHM); μ_i ——第 i 峰中心道所在 i 横坐标的位置; $x_i - \mu_i$ 表示道数, 也就是横坐标, j 表示第几个道数。这里, 峰高、峰位和半高宽是高斯函数的 3 个参数, 其中峰位可以用实验来确定, 或者由仪器的能量刻度全谱数据确定。

3.2 多道 γ 能谱全能峰的参数设置

在自然界中, 天然放射性系列在低能部分重叠的主要有 ^{238}U 的子体 ^{214}Bi 的 0.609 MeV 全能峰和 ^{232}Th 系的 ^{208}Tl 的 0.583 MeV 的全能峰, 低能的能量较高部分主要有 ^{238}U 系的 1.120 MeV 的全能峰和 ^{232}Th 系的 0.911 MeV 的全能峰。

能量窗即表示感兴趣区域 ROI。设定 ROI 区的原则是要尽量将感兴趣的光电峰全部包含在所定的区域内, 使得这个能量 γ 射线的贡献都落在其内, 但同时又要尽量避免其他能量比较接近的能量峰的干扰。

这就是说, 要在避免干扰的前提下尽量取宽一些。具体的设定方法是确定感兴趣能量峰后, 测定谱仪对发射这些能量的 γ 射线的标准源的响应谱线, 然后从能谱谱线上确定全能峰的最左边的道数和最右边的道数, 从而设定感兴趣全能峰 ROI 区的范围, 见表 1。

3.3 多道 γ 能谱单个全能峰高斯拟合

在对拟合叠加的全能峰进行叠加前, 我们先对加了相应标准源的几个全能峰进行高斯拟合, 检验是否符合高斯分布规律, 由此确定我们采用的高斯拟合是否合乎规律。图 2 就是分别加源后对应的特征能量峰的峰形以及相应的高斯拟合曲线。从图 2 中可以看出, 除了 ^{137}Cs 标准源的 0.662 MeV 峰的低能量端拟合得稍微有点差别外, 其他拟合得都很好。其中, 单个峰的全能峰净面积和高斯拟合全能峰净面积及其相对误差见表 2。从表 2 中也可以看出, ^{137}Cs 峰的拟合误差最大, 这和铯峰的峰形有关系。因此, 采用高斯分解方法对航空 γ 能谱全谱数据的单个全能峰进行拟合可获得很好的效果, 其最大相对误差小于 $\pm 5\%$ 。

3.4 多道 γ 能谱双高斯拟合

由于 0.609 MeV 峰和 0.662 MeV 峰的重叠范围较大, 各自的预定峰位也包括在里面, 其中 0.609 MeV 峰的最为突出, 除了头 2 个数据 (45 道和 46 道) 外, 其他道的数据全在重叠区域中, 因此采用单个高斯峰分别拟合单个全能峰的做法就会有很大的难度, 而且无法确定拟合区域 (对 0.609 MeV 峰)。所以, 本次拟合采用了另外一种拟合方法——双高斯峰拟合方法。

双高斯峰拟合, 就是用 2 个高斯函数分别去拟合 0.609 MeV 峰和 0.662 MeV 峰, 叠加部分是 2 个高斯函数的和与原始数据求差的平方, 非重叠部分的算法不变; 两部分和的最小就是双高斯峰的最小二乘拟合算法, 计算所得结果见图 3, 平均误差为 21.84%。它们的原始数据总面积和高斯拟合总面积相比为 208.32: 201.55, 相对误差为 3.25%。

4 结论与建议

本研究对多道 γ 能谱数据中部分重叠的低能峰和准高能峰进行了高斯拟合分解, 从中拟合分解出了理论上存在的单个谱峰。由此得出以下结论。

1) 放射性元素的特征能量峰在统计性比较好的时候, 是可以由高斯分布来表示的, 这一点在对铀源、钍源和铯源的特征能量峰进行拟合后得到验证。

2) 对一些重叠部分较少的 2 个全能峰 (重叠区域内不包括峰位), 如 0.911 MeV 和 1.120 MeV 峰, 可先拟合 0.911 MeV 峰的非叠加部分, 得出高斯函数的参数后计算出叠加部分的值, 然后再对 1.120 MeV 峰没有叠加的部分进行拟合。也可以采用双高斯峰同时拟合分解。不过, 在拟合叠加部

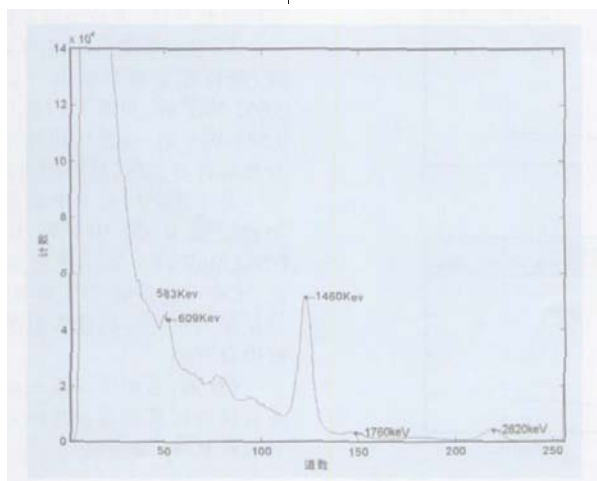


图 1 航空 γ 能谱仪 GR-820 实测天然本底全谱图

Fig. 1 The full spectra of natural radioactivity measured by NaI(Tl) airborne gamma-ray spectrometer (GR-820)

表 1 各个核素对应的能量峰(MeV)
Tbl. 1 The energy peaks of radionuclides (MeV)

核素	能量峰/道址	能量峰/道址
^{238}U	0.609/45 ~61	1.120/87 ~100
^{232}Th	0.911/87 ~100	0.583/45 ~58
^{137}Cs	0.662/47 ~67	

表 2 放射源特征能量峰的净面积及其与高斯拟合净面积数据表
Tbl. 2 The net area of energy peak of standard sources and that of Gaussian fitting

能量峰 (MeV)	0.583	0.911	0.609	1.120	0.662
净面积 (cps)	368.90	700.45	656.27	170.00	973.19
高斯拟合净面积(cps)	367.47	785.17	630.39	168.46	861.49
相对误差(%)	0.39	- 12.10	4.58	0.91	11.46

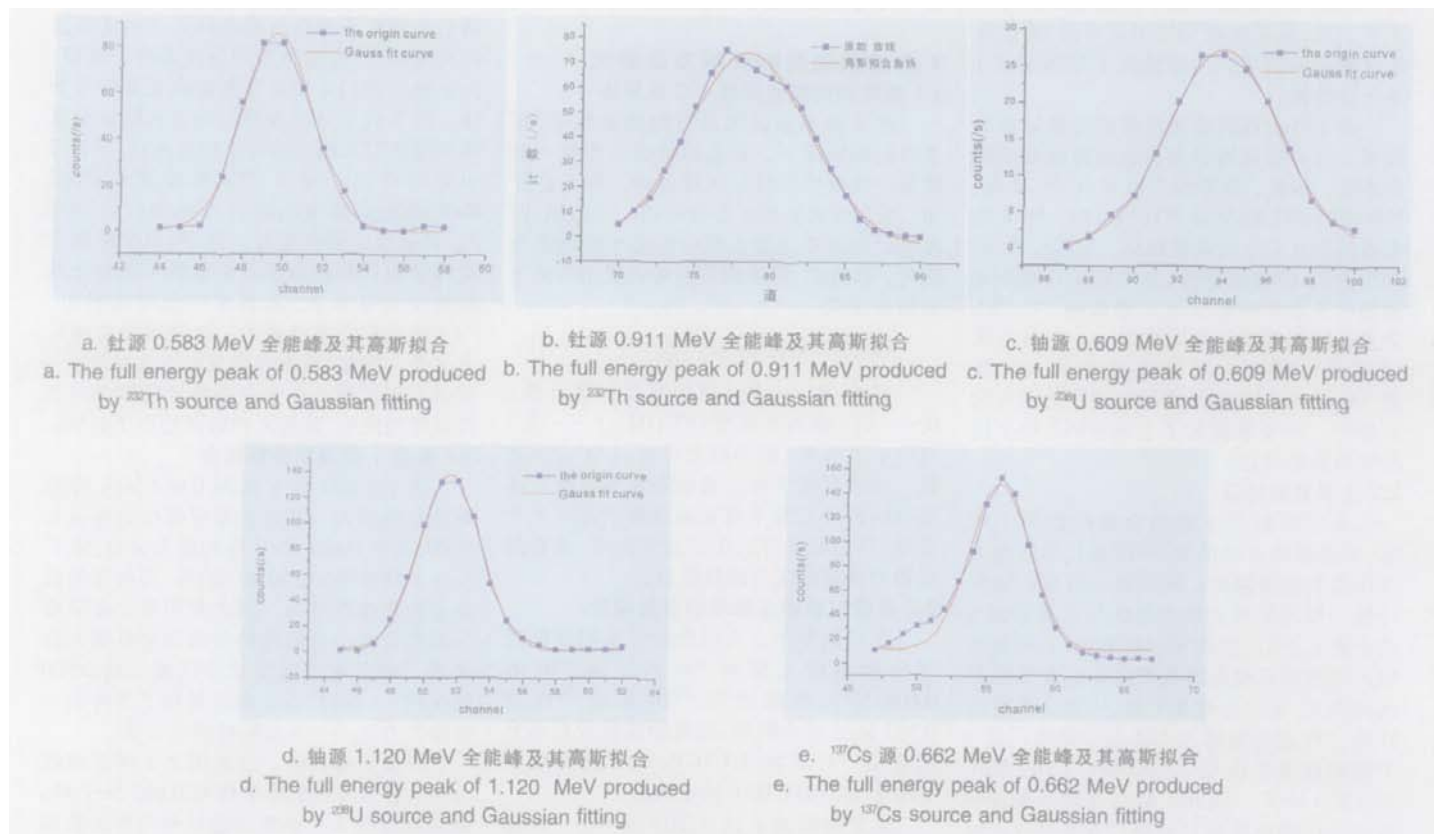


图 2 γ 能谱全谱数据单个全能峰及其高斯拟合

Fig. 2 The single net area of gamma-ray spectrum and Gaussian fitting

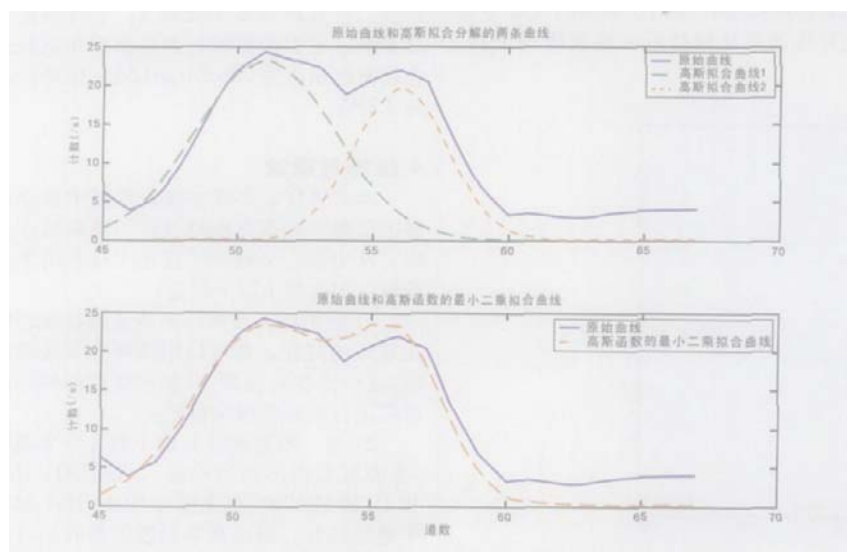


Fig. 3 The spectrum deconvolved and fitted of overlapped peaks at lower energy bands by Gaussian function

分的时候,要把 2 个高斯函数的值叠加和实际计数相比,求最小均方误差。

3) 对重叠部分较多的 2 个相邻的全能峰(峰位在重叠范围内),如 0.609 MeV 和 0.662 MeV 峰,更常见的是 0.609 MeV 峰和 0.583 MeV 峰,是无法用单个高斯峰分别拟合然后再叠加的,只有用双高斯峰去拟合。

对于 3 个以上全能峰叠加在一起的复杂谱,如 0.609 MeV 峰、0.583 MeV 峰和 0.662 MeV 峰,要用更复杂的高斯分解方法,才有可能提取 ^{137}Cs 的有用信息。建议进一步深入研究 γ 能谱数据的重叠峰高斯分解拟合方法。

(致谢:感谢中国国土航空遥感中心为实验提供仪器设备,感谢刘少敏同学提供的实验数据。)

参考文献 (References)

- [1] IAEA. Airborne gamma ray spectrometer surveying, IAEA Technical Reports [R].

高频振动外差激光干涉仪研究

Research of Heterodyne Interferometer of High-frequency Vibration

左爱斌/ZUO Ai-bin, 于梅/YU Mei, 马明德/MA Ming-de, 杨丽峰/YANG Li-feng, 刘爱东/LIU Ai-dong

中国计量科学研究院, 北京 100013

National Institute of Metrology, Beijing 100013, China

[摘要] 光外差激光干涉测量技术具有非接触、超高灵敏度的优点,用于微小振动的测量有独特的优势。采用外差激光干涉技术,结合正交正弦逼近法,在国家高频基准振动台上实现了纳米级的振动位移和相位测量。

[关键词] 外差干涉仪; 正弦逼近法; 振动测量; 相位移

[中图分类号] TN248, TH744

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2006)11-0013-02

Abstract: Based on the non-contact and super-sensitivity of the heterodyne interfere technique, and its particular advantage at minuteness vibration test, we set up a heterodyne interferometer and use the sine-approximate method, and got the nanometer level displacement and phase shift measurement of high-frequency vibration at the national standard device.

Key Words: heterodyne interferometer; sine-approximate method; vibration measurement; phase shift

CLC Numbers: TN248, TH744

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2006)11-0013-02

1 前言

随着科学进步和社会的发展,对机械振动测量的要求也不断提高,主要体现在振动频率范围的拓宽和测量精度的提高两个方面,同时对于测量振动的加速度、速度和位移传感器及测量仪的绝对校准的要求也越来越高。因此,世界各国计量和工程测试方面的单位和专家都加大了这方面的研究。振动测量最简单的方法是条纹计数法,一般用氦-氖激光作双光束干涉仪的光源,即当两束光的光程差变化 $1/2$ 个波长时,能产生一个振动干涉条纹,这样计数器进行条纹计数就能测量出振动的位移,但这种方法能够测量的分辨率还不够高,经光路或计数方案改进后,也只能分辨出几十纳米的位移。在高频振动的情况下,由于振动的频率高,幅值非常小,常常需要测量到纳米量级,所以条纹计数法在高频振动测量中不宜采用。外差干涉测量最显著的特点是利用载波技术,将被测物理量的信息转换成调频或者调相信号,具有抗干扰能力强、测量速度快、信噪比高、易于实现高分辨率测量等特点,得到了很大的发展,用于微小振动的测量有独特的优势^[1-6]。

2 高频振动测量的一般方法

之前,高频振动测量一般采用贝塞尔函数法,贝塞尔函数法使用的干涉仪与普通条纹计数法的干涉仪相同。使用频率分析仪测量光电信号中与振动频率的基波或某次谐波的幅值,就能得到正比于以振动位移为变量的各阶贝塞尔函数值的指示。在某些特殊的位移值,贝塞尔函数值为零,利用这一性质可以测量振动的位移,该类方法有 J_0 零值法、 J_1 零值法、 J_1 最大值法、 J_1/J_2 法及 J_2/J_3 法等。其中又由于一阶贝塞尔函数值较大、信噪比好,国际标准中列入了一阶贝塞尔函数零值法(即 J_1 零值法)。由于贝塞尔函数值为零的值是一系列间断不连续的点,所以测量的位移也是不连续的,上述前 2 种方法只能测量一定大小的振幅,后 3 种方法也只能测量一定范围内的振幅,且都只能测量振动加速度计灵敏度的幅值,而不能测量灵敏度的相移。目前只有采用 ISO16063-11 “激光干涉绝对法振动校准”推荐的正弦逼近法校准技术,才能实现 1 Hz~10 kHz 宽频带范围内振动传感器幅频和相频特性的绝对测量,该测量技术运用虚拟仪器技术和功能强大的信号处理软件,集成化和自动化程度高^[7-9]。

收稿日期: 2006-09-11

作者简介: 左爱斌,男,北京市北三环东路 18 号中国计量科学研究院,工程师,主要从事力学计量和激光技术的研究;

E-mail: zuoab@nim.ac.cn

Vienna: Austria, 1991(323).

[2] ICRU. International Commission on Radiological Units and Measurements, ICRU report 53[R]. Bethesda, Maryland: U.S.A.

[3] SANDERSON D C, CRESSWELL A J, et al. An airborne gamma-ray spectrometry survey of nuclear sites in Belgium [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2004, 72(1-2): 213-224.

[4] GUILLOT L. Extraction of full abstraction

peaks in airborne gamma-spectrometry by filtering techniques coupled with a study of the derivatives Comparison with the window method[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2001, 53(3): 381-398.

[5] ALLYSON J D, SANDERSON D C W. Monte carlo simulation of environmental airborne gamma-spectrometry[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 1998, 38(3): 259-282.

[6] 王南萍,熊盛青,周锡华,等.航空伽玛能谱仪对 ^{137}Cs 点源响应特征及全谱数据的提取技术[J].核技术,2005,28(4): 313-318.

[7] 中国地球物理学会.中国地球物理学会年刊 2002[C].北京:地震出版社,2002:190.

[8] DUBOIS G, DE CORT M. Mapping ^{137}Cs deposition: data validation methods and data interpretation [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2001, 53(3): 271-289. (责任编辑 胡春华)