

多晶体航空 γ 能谱仪的地面辐射监测模拟仿真

龚春慧^{1,2} 曾国强¹ 葛良全¹ 汤晓斌² 谭承君¹

1 (成都理工大学核技术与自动化工程学院 成都 610059)

2 (南京航空航天大学核科学与工程系 南京 210016)

摘要 采用基于 MCNP5 的 Monte Carlo 模拟方法对多晶体航空 γ 能谱仪用于地面辐射监测进行模拟仿真。鉴于目前航空 γ 能谱仪主要用于资源勘探,对 ^{137}Cs 以及 ^{131}I 低能射线探测并不关注。本文以地面辐射为监测目标,通过建立多晶体航空 γ 能谱仪探测装置的 Monte Carlo 模拟模型,获得 ^{137}Cs 以及 ^{131}I 的模拟电子脉冲能量幅度分布谱,然后用计算得到的全能峰高斯展宽系数对模拟电子脉冲能量幅度分布谱进行高斯展宽,并对不同探测条件下最小可探测活度(Minimum detectable activity, MDA)进行计算。结果表明, Monte Carlo 模拟方法能较好地对地面辐射监测进行仿真,在相同测量条件下,探测器外置计数比探测器内置计数大,且探测器外置时 MDA 优于探测器内置时 MDA。所以实际航测过程中,建议采用探测器外置的方式,以减小 MDA 值。

关键词 多晶体航空 γ 能谱仪, Monte Carlo, 高斯展宽, 最小可探测活度(Minimum detectable activity, MDA)

中图分类号 TL81, X837

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.050205

航空 γ 能谱测量在地质找矿领域有着广泛的应用,它是将航空 γ 能谱仪系统安装在飞机上,在飞机飞行过程中测量介质放出的 γ 射线,通过分析获得的 γ 能谱数据而获得地表介质铀、钍、钾含量^[1],因此对低能射线的探测并不关注。而在核事故中泄露放射性核素发出的 γ 射线能量普遍偏低,如最可能出现的 ^{137}Cs 的特征 γ 射线能量为 661.6 keV, ^{131}I 为 364.5 keV。

使用航测系统用于核应急监测时,由于飞机外壳相当于数厘米厚的铝壳,对低能 γ 射线的衰减很严重,采用探测器内置的测量模式的探测效率很低。其次,由于空气对低能 γ 射线的衰减也很严重,为减少空气层对 γ 射线的衰减,应当在尽可能低的高度进行飞行测量,而固定翼飞机的最低飞行高度仅为约 100 m^[2]。因此在使用该类航测系统对环境中的低能射线进行探测时,存在探测效率低等问题,本文对 GRS-16 航测系统在地面辐射监测中的应用进行模拟仿真,对以地面辐射为监测目标的航空 γ 能谱测量的方法研究做一些初步探索和研究。

好,且能通过锻压等技术制作体积较大的晶体,在航空 γ 能谱测量领域得到广泛应用^[3]。我国航空 γ 能谱测量主要由石家庄核工业航测遥感中心承担,使用的是 GRS-16 航空多道 γ 谱仪系统。GRS-16 由 15 条 10.16 cm×10.16 cm×40.64 cm NaI(Tl)晶体组成,分装成 3 箱,每箱包括五条晶体,成“品”字形排列,每条晶体外表包裹一层 2 mm 的坡莫合金,箱体为厚度为 2 mm 的铝壳,如图 1。模型物质成分如表 1。

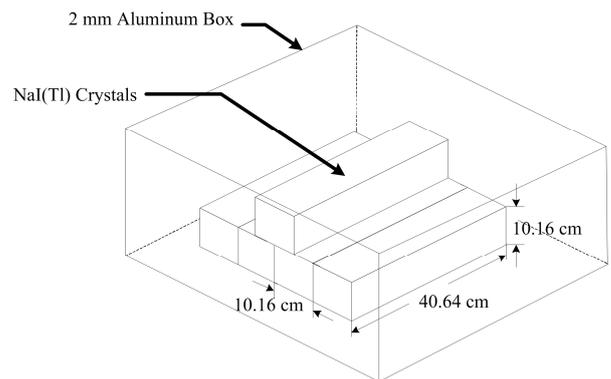


图 1 探测器几何模型
Fig.1 Detector geometric model.

1 探测器模型

Na(Tl)晶体密度大、探测效率高、发光效率

国家高技术研究发展计划(863)项目(No.2012AA061803)、成都理工大学中青年教学骨干教师项目(No.JXGG201408)、国防基础科研项目(No.B2520133007)资助

第一作者: 龚春慧, 女, 1990 年出生, 2012 年毕业于成都理工大学, 现为该校硕士研究生, 核能与核技术工程专业

通讯作者: 曾国强, E-mail: zgq@cdut.edu.cn

收稿日期: 2013-12-19, 修回日期: 2014-01-29

表 1 探测器模型的物质成分
Table 1 Ingredient of the detector model.

模型组件 Modules	元素百分含量 Composition (atomic ratio)	密度 Density / g·cm ⁻³
环境空气 Air	75.611%N, 23.186%O, 1.157%Ar, 0.045%C, 0.001%H	0.001 29
箱体外壳 Aluminum box	100%Al	2.7
晶体外壳 Crystal shell	80%Ni, 4.4%Mo, 0.3%Si, 0.5%Mn, 14.8%Fe	8.74
Na(Tl)晶体 NaI(Tl) crystal	49.9%Na, 49.9%I, 0.2%Tl	3.67

2 理论基础

2.1 Monte Carlo 方法

MCNP 程序(Monte Carlo Neutron and Photo Transport Code)是由美国洛斯阿拉莫斯国家实验室的 Monte Carlo 小组(称为 X-6 组)在一系列程序工作基础上,集中编制的一个大型多功能 Monte Carlo 计算程序,可用于计算中子、光子和电子的联合运输问题以及临界问题,中子能量范围从 10⁻¹¹–20 MeV,光子和电子的能量范围从 1 keV–1 000 MeV^[4-5]。

在 MCNP 输入卡的描述中除使用了栅元、曲面、材质和源的描述外,最关键的是联合使用 F8 和 E8 两个计数卡。F8 卡可以用于计算电子脉冲能量幅度分布,通过高斯展宽值设定模拟不同探测效率的探测器。E8 卡称作记数能量卡,运用它可划分一组能量沉积箱^[6]。在航测中由于有各种干扰粒子进入探测器,为记录从地面发射而进入探测器的有效粒子就要划定一个记数的有效能量范围,E8 就可以用于划分一组有效能量沉积箱^[7]。

MCNP 程序中的重复结构卡对于有相同结构栅元的描述非常方便。重复结构能力导致栅元概念的扩充 Universe。在一个 U 单元是一个栅元或一批栅元的集合,Fill 卡能将 U 单元按指定的顺序对所描述的几何模型进行填充。TRCL 卡使得只需一次扫描界定在形状和尺寸是等同的只是在几何位置上不同的几个栅元的曲面。在本文模拟中,晶体分装为三箱,且每箱内部结构相同,所以编写 MCNP5 输入卡文件时,使用重复结构卡以减少用户必须提供的输入数据量以及有大量重复结构问题所需的机器内存。

2.2 等效质量厚度的原理

等效质量厚度是基于虚拟源原理:通过改变空气密度来模拟不同的探测高度,对于辐射源经过厚度为 h_1 密度为 ρ_1 的介质 1(航测系统空中测量)和厚度为 h_2 密度为 ρ_2 的介质 2(模拟实验)衰减后,在空中一点的未散射光子通量相同,对航测系统空中测量与模拟实验这两种情况,到达飞机外壳任何一点的未散射光子通量相同,即作用于航测系统的辐射场相同,则航测系统的响应也就相同,如图 2 所示。

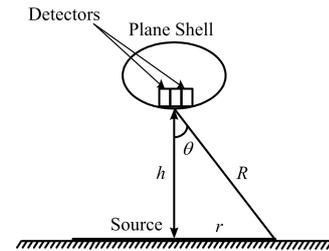


图 2 地面辐射监测
Fig.2 Ground radiation monitoring.

其中, h 是地面距离飞机底部的直线距离,单位 m; R 是地面距离飞机底部的斜距,单位 m; r 是源的半径,单位 m。

设 μ 为介质对某一能量 γ 光子的线性衰减系数,单位 m⁻¹; μ_m 为介质对某一能量 γ 光子的质量衰减系数,单位 m⁻¹; Φ 为活度为 A_s 的辐射源发射的 γ 光子经过厚度为 d 的介质到达飞机底部一点的未散射光子注量。 h_1 、 R_1 、 r_1 、 μ_1 、 Φ_1 代表航测系统空中测量, h_2 、 R_2 、 r_2 、 μ_2 、 Φ_2 代表模拟实验,有:

$$\Phi_1 = A_s \int \frac{1}{4\pi R_1^2} e^{-\mu_1 R_1} \cdot 2\pi r_1 dr_1 \quad (1)$$

$$R_1 = h_1 \sec \theta$$

$$r_1 = h_1 \tan \theta \Rightarrow dr_1 = h_1 \sec^2 \theta d\theta$$

则:

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= A_s \int \frac{e^{-\mu_1 h_1 \sec \theta}}{4\pi h_1^2 \sec^2 \theta} \cdot 2\pi h_1 \tan \theta \cdot h_1 \sec^2 \theta d\theta \\ &= A_s \int \frac{\tan \theta \cdot e^{-\mu_1 h_1 \sec \theta}}{2} d\theta \end{aligned} \quad (2)$$

同理,

$$\Phi_2 = A_s \int \frac{\tan \theta \cdot e^{-\mu_2 h_2 \sec \theta}}{2} d\theta \quad (3)$$

设:

$$\rho_1 h_1 = \rho_2 h_2 \quad (4)$$

$$\text{则: } \frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{\mu_m \cdot \rho_2}{\mu_m \cdot \rho_1} = \frac{\mu_2}{\mu_1} \Rightarrow \mu_1 h_1 = \mu_2 h_2 \quad (5)$$

$$\Rightarrow A_5 \int \frac{\tan \theta \cdot e^{-\mu_1 h_1 \sec \theta}}{2} d\theta = A_5 \int \frac{\tan \theta \cdot e^{-\mu_2 h_2 \sec \theta}}{2} d\theta \quad (6)$$

由式(2)、(3)和(6), 有 $\Phi_1 = \Phi_2$, 即按照式(4)选择相同的质量厚度, 对同样的辐射源来说, 同一能量 γ 射线经过厚度为 h_1 密度为 ρ_1 的介质 1 散射后到达飞机底部相同一点的未散射光子注量, 与经过厚度为 h_2 密度为 ρ_2 的介质 2 散射后的相同, 所以采用等效质量厚度方法是可行的。

2.3 最小可探测活度 MDA

最小可探测活度(Minimum Detectable Activity, MDA)是探测系统的重要性能指标之一, 如果某核素的活度大于其 MDA 值, 则其可以被探测系统较可靠地测量到。航空 γ 能谱测量系统 MDA^[8-9]可用下式表示:

$$\text{MDA} = \frac{L_D}{\varepsilon_m \cdot p \cdot T_L} \quad (7)$$

式中, T_L 为测量活时间, 航测系统的探测周期一般为 1 s 或数秒, T_L 一般为 1 s; p 为 γ 射线的发射概率; ε_m 为有效探测效率; L_D 为最小可探测限。

$$\varepsilon_m = \varepsilon \cdot S \quad (8)$$

式中, ε 为特征能量的光峰效率; S 为源面积。

由于航测是在空中测量, 探测范围大, 在模拟过程中, 地面以有限面源代替无限面源。探测器与源的最大距离可以通过衰减系数来计算, 取 $u(E)$ 为能量为 E 的 γ 射线在空气中的线性衰减系数, 此处 E 为 1.33 MeV, 从而确定源面积:

$$\begin{aligned} I &= I_0 e^{-u(E)R} \\ I &= 0.001I_0 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow R &= \frac{6.91}{u(E)} = \frac{6.91}{5.504 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1} \times 1.293 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}} \\ &= 971 \text{ m} \end{aligned} \quad (10)$$

如式(10)所示, 取航测系统与源的斜距为 1 km, 足以用于模拟 γ 射线能量小于 1.33 MeV 的真实环境。源面积为:

$$S = \pi r^2 = \pi(R^2 - h^2) \quad (11)$$

$$L_D = k^2 + 2k\sigma_0 = 2.71 + 4.65\sqrt{B} \quad (12)$$

式中, k 为单边置信度因子; σ_0 为分布的标准偏差 ($\sigma_0^2 = 2B$); B 为峰区本底。

$$B = (B_1 + B_2)N / (2m) \quad (13)$$

式中, B_1 和 B_2 分别为能谱感兴趣区域(Region of interest, ROI)左边 m 道和右边 m 道的总计数; N 为 ROI 的计数之和。本文中, m 值取为 1。

2.4 全能峰高斯展宽系数

采用实际航测的 γ 能谱, 谱仪的半高宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)随 γ 射线能量的关系如表 2。

表 2 FWHM 随 γ 射线能量的关系
Table 2 Relationship between the FWHM and γ -ray energy.

能量 Energy / MeV	半高宽 FWHM / MeV
2.626	0.036 891 714
1.46	0.037 646 694
0.946	0.052 462 637
0.600 2	0.023 553 859
0.352	0.030 731 270
0.253 9	0.043 029 042

半高宽 FWHM 与能量 E 的关系可用下式表示:

$$\text{FWHM} = a + b\sqrt{E + cE^2} \quad (14)$$

式中, a 、 b 、 c 为系数, FWHM、 E 、 a 的单位是 MeV, b 的单位是 $\sqrt{\text{MeV}}$, c 的单位为 MeV^{-1} 。在 MCNP 输入文件中用式(14)来保证输出能谱的峰展宽严格和实验谱一致, 即模拟能量沉积谱在探测器里面的分辨函数和实际探测器的分布函数相一致。

根据式(14)和表 2 中能量及对应半高宽的数据, 在 Matlab 中拟合得到 MCNP 中展宽 a 、 b 、 c 的值如下: $a = 0.0282$, $b = 0.0135$, $c = -0.3186$ 。用该值作为 GEB 卡输入实现高斯能量展宽。

3 结果分析

在实际航测过程中, 航测谱仪系统通常安装在飞机上, 由于飞机外壳对低能 γ 射线衰减很严重, 为了对探测器内置和探测器外挂进行比较, 本文分别对两种测量模式进行模拟。

航测测量高度主要在 80–120 m 范围内^[10], 根据 §2.2 提出的等效质量厚度方法, 在模拟中将空气密度扩大 10 倍, 则飞机与源距离相应缩短为 8–12 m。同时, 该模型假设源粒子发射方向各向同性, 为了避免计算效率太低, 本文采用二次源方法进行减小方差模拟计算, 具体实施方法为: 在探测器下方 1 cm 处设置垂直距离为 8–12 m 的平面记录初始源的放射性粒子进入该平面的粒子数及能谱, 将此作为二次源模拟计算探测器的脉冲幅度分布。根据式(11), 可求得当高度为 100 m 时源半径设置为 965 m。

3.1 探测器外置

为了简化计算过程,加速计算结果的收敛速度,使用Monte Carlo模拟软件MCNP5建立了一个相对简化的三维蒙特卡罗模型,如图2,其中NaI(Tl)探测器几何模型如图1。图3分别为MCNP5模拟探测器外置测量模式下,航测系统在不同高度时对 ^{137}Cs 和 ^{131}I 探测所得到的结果。图3(a)中能量为0.662 MeV的峰是 ^{137}Cs 的全能峰,在0.112 MeV附近有一个峰,该峰相当于一次散射射线。模拟中未考虑核素特征X射线的发射。图3(b)中能量为0.364 MeV的峰是 ^{131}I 的全能峰,0.104 MeV所在的峰为散射峰。

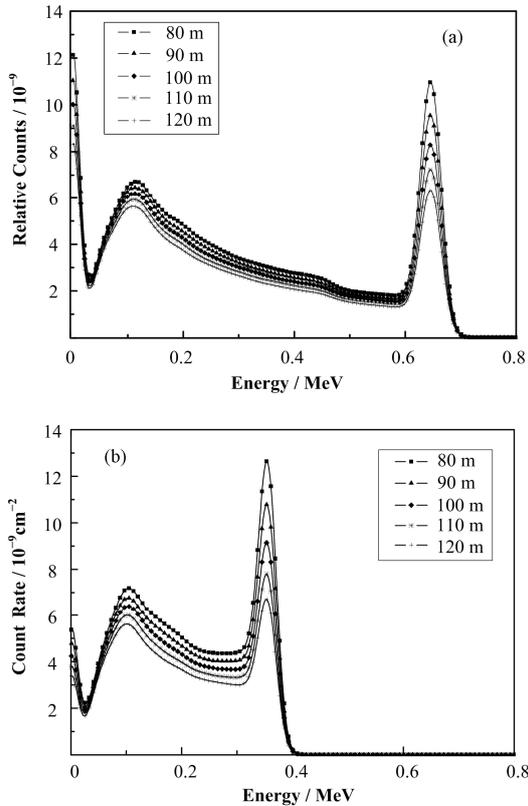


图3 探测器外置时不同高度下 ^{137}Cs (a)和 ^{131}I (b)探测结果
Fig.3 Pulse height distributions of external detectors for ^{137}Cs (a) and ^{131}I (b) at different heights.

以上模拟出来的结果乘以源活度即可转换为计数率,鉴于固定翼飞机的最低飞行高度仅为约100 m,分别取 ^{137}Cs 与 ^{131}I 的沉积活度为 $37\text{ kBq}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $80\text{ kBq}\cdot\text{m}^{-2}$,在100 m高度对其进行探测,得到的计数率谱线如图4所示。其中,航测谱仪距离地面100 m处时,源面积:

$$S=\pi(1\ 000^2-100^2)=3.110\times 10^7\text{ m}^2$$

对沉积活度为 $37\text{ kBq}\cdot\text{m}^{-2}$ 的 ^{137}Cs ,放射性活度为:

$$A_1=37\text{ kBq}\cdot\text{m}^{-2}\times S=1.151\times 10^{17}\text{ Bq}$$

对沉积活度为 $80\text{ kBq}\cdot\text{m}^{-2}$ 的 ^{131}I ,放射性活度:

$$A_2=80\text{ kBq}\cdot\text{m}^{-2}\times S=2.488\times 10^{11}\text{ Bq}$$

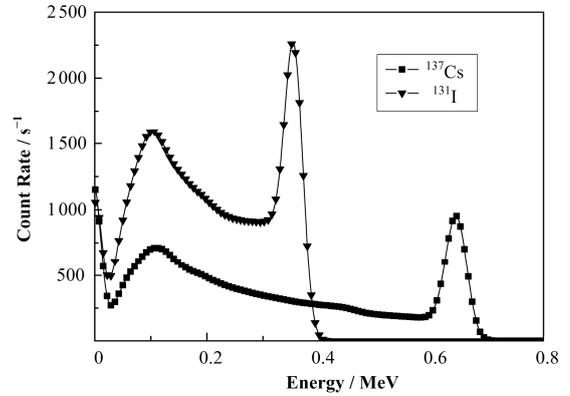


图4 探测器外置100 m处对 ^{137}Cs 、 ^{131}I 计数率谱线
Fig.4 Spectra of external detectors for ^{137}Cs and ^{131}I at the height of 100 m.

对 ^{137}Cs 而言,

$$\varepsilon_{m1}=\varepsilon_1\cdot S=4.9\times 10^{-7}\times 3.11\times 10^6=1.52$$

$$L_{D1}=2.71+4.65\sqrt{B_1}=2.71+4.65\sqrt{\frac{(184+4.7)\times 150}{2}}=555.418$$

$$\text{MDA}_1=\frac{L_{D1}}{\varepsilon_{m1}\cdot p\cdot T_L}=\frac{555.418}{1.520\times 0.849\ 508\times 1}=430.139$$

对 ^{131}I 而言,

$$\varepsilon_{m2}=\varepsilon_2\cdot S=5.55\times 10^{-7}\times 3.11\times 10^6=1.73$$

$$L_{D2}=2.71+4.65\sqrt{B_2}=2.71+4.65\sqrt{\frac{(915+3.34)\times 130}{2}}=1\ 139.023$$

$$\text{MDA}_2=\frac{L_{D2}}{\varepsilon_{m2}\cdot p\cdot T_L}=\frac{1\ 139.023}{1.73\times 0.727\ 347\ 421\ 68\times 1}=905.200$$

3.2 探测器内置

编写MCNP5输入卡文件时,假设飞机机舱为10 cm厚的7075型铝合金,密度为 $0.281\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,元素含量百分比分别为0.4%Si、0.5%Fe、1.8%Cu、0.3%Mn、2.5%Mg、0.23%Cr、5.6%Zn、0.2%Ti、88.47%Al。图5为MCNP5模拟不同高度下航测系统对 ^{137}Cs 和 ^{131}I 的探测得到的结果。同样地,图5(b)中能量为0.364 MeV的峰是 ^{131}I 的全能峰。图5(a)、(b)均可看出,探测效率随着航测高度的增加在减小。

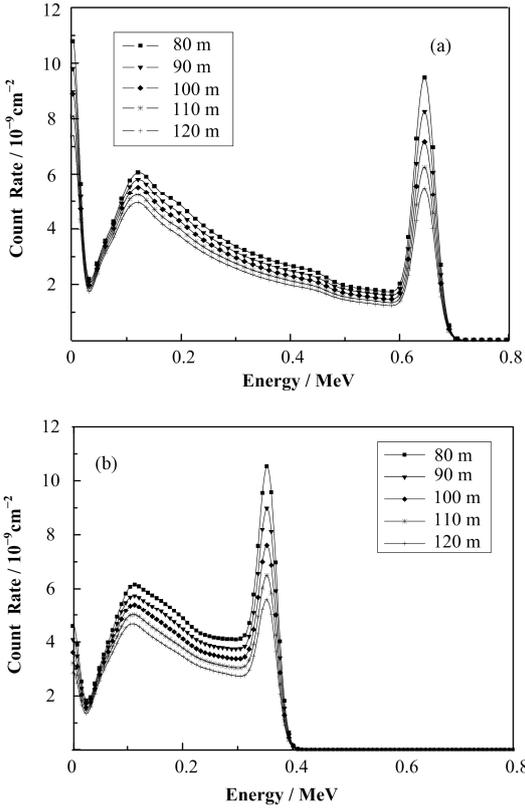


图5 探测器内置时不同高度下 ^{137}Cs (a)和 ^{131}I (b)探测结果
Fig.5 Pulse height distributions of internal detectors for ^{137}Cs (a) and ^{131}I (b) at different heights.

同样地，以上模拟出来的结果乘以源活度即可转换为计数率，鉴于固定翼飞机的最低飞行高度仅为约 100 m，分别在 100 m 高度对 ^{137}Cs 和 ^{131}I 进行探测，分别取 ^{137}Cs 与 ^{131}I 的沉积活度为 $37 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $80 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-2}$ ，得到的计数率谱线如图 6 所示。

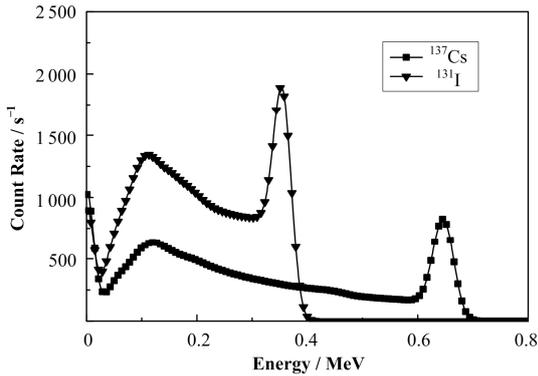


图6 探测器内置 100 m 处对 ^{137}Cs 、 ^{131}I 计数率谱线
Fig.6 Spectra of internal detector in the present works for ^{137}Cs and ^{131}I at the height of 100 m.

对 ^{137}Cs 而言，

$$\varepsilon'_{m1} = \varepsilon'_1 \cdot S = 4.06 \times 10^{-7} \times 3.11 \times 10^6 = 1.26$$

$$L'_{D1} = 2.71 + 4.65 \sqrt{B'_1} = 2.71 + 4.65 \sqrt{\frac{(170 + 29.8) \times 122}{2}} = 516.446$$

$$\text{MDA}'_1 = \frac{L'_{D1}}{\varepsilon'_{m1} \cdot p \cdot T_L} = \frac{516.446}{1.26 \times 0.849 \times 508 \times 1} = 482.488$$

对 ^{131}I 而言，

$$\varepsilon'_{m2} = \varepsilon'_2 \cdot S = 4.65 \times 10^{-7} \times 3.11 \times 10^6 = 1.44$$

$$L'_{D2} = 2.71 + 4.65 \sqrt{B'_2} = 2.71 + 4.65 \sqrt{\frac{(845 + 9.9) \times 120}{2}} = 1\ 055.732$$

$$\text{MDA}'_2 = \frac{L'_{D2}}{\varepsilon'_{m2} \cdot p \cdot T_L} = \frac{1\ 055.732}{1.44 \times 0.727 \times 347 \times 421 \times 68 \times 1} = 1\ 007.991$$

综上所述，使用蒙特卡罗方法计算探测器外置与探测器内置两种测量模式下，航测系统对 ^{137}Cs 和 ^{131}I 的最小可探测活度如表 3 所示。

表3 航测系统对 ^{137}Cs 和 ^{131}I 的 MDA 模拟计算
Table 3 MDAs for ^{137}Cs and ^{131}I in simulation, as calculated from their most intense γ -rays, for the external detectors and internal detectors.

核素种类 Nuclides	最小可探测活度量 MDA / $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$	
	探测器外置 External detectors	探测器内置 Internal detectors
^{137}Cs (0.662 MeV)	430	482
^{131}I (0.364 MeV)	905	1 007

注：测量周期为 1 s，飞行高度为 100 m， ^{137}Cs 与 ^{131}I 的沉积活度分别取 $37 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $80 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-2}$

Note: The measurement period is 1 s, flight altitude of 100 m, activity of ^{137}Cs and ^{131}I is $37 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-2}$, $80 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-2}$, respectively.

从图 3(a)和 5(a)可以看到，探测器外置时，在高度为 80 m、90 m、100 m、110 m、120 m 全能峰峰位处对应的相对计数率分别为 $1.097 \times 10^{-8} \text{ cm}^{-2}$ 、 $9.563 \times 10^{-9} \text{ cm}^{-2}$ 、 $8.279 \times 10^{-9} \text{ cm}^{-2}$ 、 $7.233 \times 10^{-9} \text{ cm}^{-2}$ 、 $6.346 \times 10^{-9} \text{ cm}^{-2}$ ，相应地，探测器内置时对应的相对计数率分别为 $9.478 \times 10^{-9} \text{ cm}^{-2}$ 、 $8.263 \times 10^{-9} \text{ cm}^{-2}$ 、 $7.164 \times 10^{-9} \text{ cm}^{-2}$ 、 $6.250 \times 10^{-9} \text{ cm}^{-2}$ 、 $5.485 \times 10^{-9} \text{ cm}^{-2}$ ；从图 3(b)和 5(b)可以看到，探测器外置时，在高度为 80 m、90 m、100 m、110 m、120 m 对应的相对计数率分别为 $1.265 \times 10^{-8} \text{ cm}^{-2}$ 、 $1.079 \times 10^{-8} \text{ cm}^{-2}$ 、 $9.134 \times 10^{-9} \text{ cm}^{-2}$ 、 $7.778 \times 10^{-9} \text{ cm}^{-2}$ 、 $6.699 \times 10^{-9} \text{ cm}^{-2}$ ，相应地，探测器内置时对应的相对计数率分别为 $1.054 \times 10^{-8} \text{ cm}^{-2}$ 、 $8.959 \times 10^{-9} \text{ cm}^{-2}$ 、 $7.608 \times 10^{-9} \text{ cm}^{-2}$ 、 $6.497 \times 10^{-9} \text{ cm}^{-2}$ 、 $5.598 \times 10^{-9} \text{ cm}^{-2}$ 。综上可知，在不同的探测高度，相同能量对应的计数随高度的增加而减小，说明探测器距离源越远，其探测效率越低。

同时, 结合图 4 和图 6, 在 100 m 处探测器外置、探测器内置时, 对 ^{137}Cs 探测时其全能峰峰位处对应的相对计数率分别为 953.941 s^{-1} 、 821.788 s^{-1} , 对 ^{131}I 探测时其全能峰峰位处对应的相对计数率分别为 2275.643 s^{-1} 、 1894.897 s^{-1} , 可知相同的能量对应的计数探测器外置比探测器内置大。同时, 根据表 3 的探测器外置和探测器内置 MDA 值对比, 可以看出在相同探测条件下, 探测器外置优于探测器内置。这是由于飞机外壳对 γ 射线有衰减, 模拟结果与理论相符。为了避免飞机外壳对 γ 射线的衰减, 实际航测时, 建议使用探测器外置方式进行测量。

图 7 为该航测系统空中飞行时在天然本底地区的测量能谱, 计算其在 ^{137}Cs 和 ^{131}I 特征 γ 射线能区的本底, 然后根据式(7)计算其对 ^{137}Cs 和 ^{131}I 的最小可探测活度分别为 $244\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $386\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ (测量周期为 1 s, 飞行高度为 100 m)。

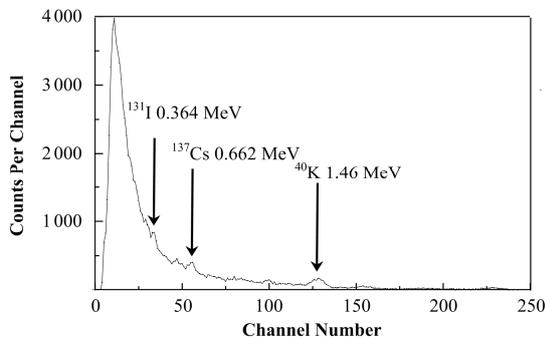


图 7 空中飞行时实测谱线

Fig.7 Measured spectrum in airborne detection.

由式(7)可知, 本底越小, 探测限越低, MDA 越小。图 7 所示这条谱线为天然本底地区的测量能谱, 其放射性核素 ^{137}Cs 和 ^{131}I 的含量均很低。

4 结语

通过 Monte Carlo 程序模拟计算, 建立了航空测量能谱的模拟方法, 通过实验结果计算并得到全能峰高斯展宽系数 a 、 b 、 c ; 同时得到探测器外置以及探测器内置时不同高度对 ^{137}Cs 和 ^{131}I 的探测结果, 并对 MDA 进行计算。在相同测量条件下, 探测器外置测量模式优于探测器内置测量模式。

实际航测时, 在完全相同情况下, 采用铝合金包裹 NaI 晶体对于 ^{137}Cs 的探测效率相对不锈钢提高 8.7%, 铝合金的原子序数以及密度都低于不锈钢。本文模拟坡莫合金包裹 NaI 晶体, 考虑到探测效率对 MDA 的影响, 可使用碳纤维包裹 NaI 晶体以提高探测效率。同时模拟仿真的条件相对实际情况比较理想, 譬如对飞机的模拟仅采用 10 cm 厚的 7075 型铝合金做简单替代, 考虑的问题也相对简

单, 在实际情况下, 航测谱仪在进行测量时, 在测量地面放射性的同时, 空气中放射性也有涉及。在下一步工作中, 同时对地面辐射、空气辐射进行模拟仿真研究, 并对比分析在不同探测手段下的 MDA, 探索不同放射性环境下最为合适的用于航空环境放射性调查的探测器及其安装方法, 为下一阶段航空放射性测量仪器的研发做一定的指导工作。

参考文献

- 谷懿. 航空伽玛能谱测量大气氡校正方法研究[D]. 成都理工大学, 2010
GU Yi. Study on radon influence estimation in airborne gamma-ray spectrometry[D]. Chengdu University of Technology, 2010
- 李惠彬, 李君利. 航空放射性测量技术对核事故泄露核素的探测能力评估[J]. 核电子学与探测技术, 2013, 33(5): 531-534
LI Huibin, LI Junli. Evaluation of airborne radiation survey used for monitoring leakage of radionuclides in nuclear accident[J]. Nuclear Electronics and Detection Technology, 2013, 33(5): 531-534
- 林帆, 张庆贤, 葛良全, 等. 多晶体 γ 探测器相互影响的蒙特卡洛数值模拟[J]. 核技术, 2010, 33(9): 675-678
LIN Fan, ZHANG Qingxian, GE Liangquan, et al. A Geant4-based M-C simulation on the interaction of multi-crystal gamma spectrometer[J]. Nuclear Techniques, 2010, 33(9): 675-678
- X-5 Monte Carlo Team. MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code[R]. Version 5, Los Alamos National Laboratory, Report LA-UR-03-1987, 2003
- 许淑艳. 蒙特卡罗方法在实验核物理中的应用(修订版)[M]. 北京: 原子能出版社, 2006
XU Shuyan. Monte Carlo methods in experimental nuclear physics (revised edition)[M]. Beijing: Published by Atomic Energy Press, 2006
- GRS-16/GRS-10/GRS-2 Gamma Spectrometer Operation Manual[R]. Calibration Program PEICalib, Version 5.0, 2006: 4-5
- 孙健, 来永芳, 张力军, 等. 无人直升机航测系统探测效率的 M-C 计算[C]. 第十四届全国核电子学与核探测技术学术年会论文集(下册), 2008: 877-811
SUN Jian, LAI Yongfang, ZHANG Lijun, et al. Calculation of detecting efficiency for unmanned-airplane airborne radioactivity measuring system by Monte Carlo[C]. 14th session of the National Nuclear Science and Nuclear Detection Technology Annual Meeting Proceedings(b), 2008: 877-811

- 8 师全林, 常永福, 张佳媚. 最小可探测活度 MDA 的统计学解释[C]. 全国第四届核仪器及其应用学术会议论文集, 2003: 188–195
SHI Quanlin, CHANG Yongfu, ZHANG Jiamei. A statistical interpretation to MDA[C]. Proceedings of the 4th National Conference on Nuclear Instrument & Its Application, 2003: 188–195
- 9 Bagatelas C, Tsabaris C, Kokkoris M, *et al.* Determination of marine gamma activity and study of the minimum detectable activity (MDA) in 4pi geometry based on Monte Carlo simulation[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2010, **165**: 159–168
- 10 贾明雁, 黄雄亮, 苏旭军, 等. 基于虚拟源原理的航空放射性测量系统刻度装置[P]. CN 201732166 U, 2011
JIA Mingyan, HUANG Xiongliang, SU Xujun, *et al.* Scale device of aerial radioactivity measuring system based on virtual source principle[P]. CN 201732166 U, 2011

Monte Carlo simulation of polycrystalline airborne γ -ray spectrometer for ground radiation monitoring

GONG Chunhui^{1,2} ZENG Guoqiang¹ GE Liangquan¹ TANG Xiaobin² TAN Chengjun¹

¹(College of Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

²(Department of Nuclear Science and Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract Background: Airborne γ -ray spectrometer has been used extensively over several decades for mineral exploration and geological mapping purposes to look for the peaks of potassium, uranium and thorium. And the low-energy ray is ignored. **Purpose:** In order to provide a basis for obtaining effective environmental radioactivity measurement results, Minimum detectable activity (MDA) values in monitoring ground radiation of the polycrystalline airborne γ -ray spectrometer need to be calculated. **Methods:** MDA is related with the detection efficiency. A Monte Carlo simulation was performed using the MCNP5 code for different radionuclides in the ground environment. Equivalent mass thickness was proposed to reduce variance, and the secondary source was used in the MCNP5 input. **Results:** The pulse height distributions of external detectors and internal detectors for ^{137}Cs and ^{131}I at different heights were obtained, which represent the counting rate decreased as the altitude increases. And the MDA of external detectors is better than that of internal detectors. **Conclusion:** The external detector is suggested to adopt in flight measurement for enhancing MDA.

Key words Polycrystalline airborne gamma-ray spectrometer, Monte Carlo, Gaussian broadening, Minimum detectable activity (MDA)

CLC TL81, X837