

# 基于 Cerenkov 效应水下放射源 搜寻技术的可行性分析研究

舒迪昀, 汤晓斌, 侯笑笑, 耿长冉, 陈 达  
(南京航空航天大学 核科学与工程系, 江苏 南京 210016)

**摘要:** 本文采用 Geant4 对水下放射源致 Cerenkov 光及 Cerenkov 光在水中的输运过程进行计算研究, 获得 Cerenkov 光强及光子数在水平面上的分布规律, 进而对该技术手段进行了理论验证和可行性分析。研究结果表明: 当放射源出射粒子能量满足产生 Cerenkov 光的条件时, 其在水面形成的 Cerenkov 光斑及 Cerenkov 光子数在水面的分布具有规律性, 可以此来确定放射源的位置和深度。本工作为基于 Cerenkov 效应水下放射源搜寻技术的发展提供了理论依据和科学基础。

**关键词:** 水下放射源; Geant4; Cerenkov 光

中图分类号: O536 文献标志码: A 文章编号: 1000 6931(2015)04 0582 07

doi: 10.7538/yzk.2015.49.04.0582

## Analysis of Feasibility for Searching Underwater Radioactive Source Using Cerenkov Effect

SHU Di-yun, TANG Xiao-bin, HOU Xiao-xiao, GENG Chang-ran, CHEN Da  
(Department of Nuclear Science and Engineering,  
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** In this paper, Geant4 was used to simulate the process of underwater radioactive source generating Cerenkov light and transportation of Cerenkov light in water, and the intensity of Cerenkov light and distribution of photon number in the horizontal plane were obtained. The theoretical verification and the feasibility analysis of this technical means were performed. Calculation results show that when the energy of emitted particle is greater than the threshold energy of Cerenkov light generating, the Cerenkov light spot as well as the distribution of Cerenkov photon number on the surface of water is regular, and then the location and depth of radioactive source can be deduced. Thereby, this work contributes a theoretical basis for the development of using Cerenkov light to search underwater radioactive source.

**Key words:** underwater radioactive source; Geant4; Cerenkov light

收稿日期: 2014-01-07; 修回日期: 2014-07-15

基金项目: 国防基础科研项目资助 (B2520133007); 南京航空航天大学基本科研业务费青年科技创新基金资助项目 (NS2014060); 国家自然科学基金资助项目 (11475087)

作者简介: 舒迪昀 (1992 ), 男, 浙江衢州人, 硕士研究生, 辐射防护及环境保护专业

随着核技术应用产业的快速发展,放射源在辐照加工、无损探伤、石油测井等领域的应用日益广泛。一旦放射源因使用保管不善而遗失、被盗,将会成为公众安全的潜在威胁。此类放射源丢失事故占放射性事故的 80% 以上。在放射源丢失后,应尽快利用已知信息对放射源进行搜寻,找回放射源并排除一切可能的受照危险,避免对公众和环境造成更大的影响。

目前,对于丢失和被盗放射源通常采用各种剂量仪和  $\gamma$  谱仪进行搜寻<sup>[1]</sup>;根据在搜寻路线上测得的剂量率分布在地图上画出等剂量率曲线,将测得的剂量率与正常辐射水平测得的本底数据进行对比,圈出剂量率高值区域,从而标注出所要搜寻的放射源具体位置。然而当放射源被丢弃于水中时,由于水屏蔽层对放射源出射粒子的衰减作用,水面剂量率被极大地减弱。如活度为  $5 \times 10^9$  Bq 的  $^{60}\text{Co}$  源位于水下 2.5 m 处时,利用积累因子法计算得到其在水面产生的最大剂量率为 0.639 nGy/h,远小于天然放射性的本底水平,并不会导致水面的剂量率明显升高。因此,无法通过常规剂量探测方法来实现对水下一定深度放射源的搜寻。当前,水下放射源的搜寻主要依赖于水下视觉搜索,但这种方法存在工作量巨大、耗时多、搜寻难度高和漏寻可能性大等诸多不足<sup>[2]</sup>。

1934 年,前苏联物理学家 Cerenkov 在研究发自镭放射源的辐射穿入不同的液体并被液体吸收而发生的现象时,发现了 Cerenkov 辐射<sup>[3-4]</sup>。高速带电粒子以匀速  $v(\beta c)$  穿过折射率为  $n$  的透明介质,当其速度超过光在该介质中的相速度( $c/n$ )时,将沿圆锥波前发射微弱的光子流(集中在紫外线及可见光波段),这种效应称为 Cerenkov 辐射<sup>[5]</sup>。由于 Cerenkov 光在水中的衰减远小于放射源出射粒子在水中的衰减,所以放射源在水中的深度对穿过水面的 Cerenkov 光探测成像产生的影响相对较小。随着光学成像技术的发展,光学仪器的分辨率和灵敏度大幅度提高,目前已能实现对极微弱光进行探测成像,为实现对水下放射源产生穿过水面的 Cerenkov 光进行探测成像提供了条件。本文采用蒙特卡罗程序包 Geant4 对水下

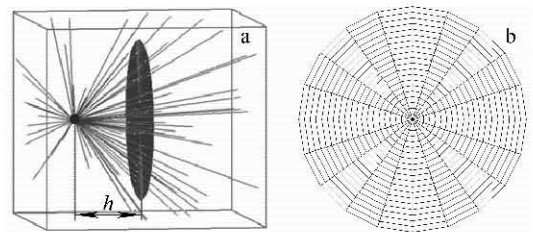
$\gamma$  放射源致 Cerenkov 光及 Cerenkov 光在水中的输运过程进行计算研究,获得 Cerenkov 光强及光子数在水面的分布规律,对利用 Cerenkov 光搜寻水下放射源进行理论验证和可行性分析。

## 1 材料与方法

### 1.1 计算模型

#### 1) 几何模型

如图 1a 所示,计算模型的几何体尺寸为  $500 \text{ m} \times 500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$ ,内部材料为水。探测器尺寸为  $\phi 400 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$ ,位于放射源正上方  $h$  处, $h$  分别设置为 5、25、55、75 和 105 m;探测器的几何构造如图 1b 所示,每个圆环的宽度为 0.25 m,每个圆环平均分成 20 等份,构成一包含 16 000 个扇形区域的探测器,每个扇形区域均可单独获取数据。



a 几何模型; b 探测器的几何构造

图 1 几何模型及探测器的几何构造示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of geometric model and geometric construction of detector

#### 2) 放射源

设置放射源的  $\gamma$  射线能量分别为 0.662、0.83、1.0、1.25 和 1.5 MeV,粒子出射方向为各向同性,活度均为  $5 \times 10^9$  Bq。

#### 3) 物理过程

本文通过 Geant4 计算实现的物理作用过程除 Cerenkov 效应外,还包括:(1) 标准电磁相互作用过程,包括康普顿散射、光电效应、电子对生成效应和多次散射等过程;(2) 光学过程,包括吸收、边界和瑞利散射等过程;(3) 衰变过程;(4) 输运过程。

### 1.2 计算框架

对水下  $\gamma$  放射源致 Cerenkov 光及 Cerenkov 光在水中的输运过程计算包括的模块为:

事例的产生、探测器的构造、入射粒子在探测器内的物理过程、敏感探测器中信息的记录、信息

数字化与输出。水下放射源致 Cerenkov 光研究的计算框架如图 2 所示。

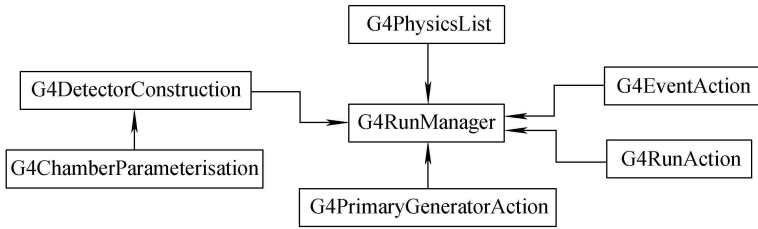


图 2 水下放射源致 Cerenkov 光研究的计算框架

Fig. 2 Computation framework of Cerenkov light generated by underwater radioactive source

G4RunManager 控制整个计算的流程和管理事件,同时用以计算的初始化。图 2 中的其他类是针对计算需要所设计的用户类,其中, G4DetectorConstruction 和 G4ChamberParameterisation 用于构建图 1 所示的几何模型及其材料; G4PrimaryGeneratorAction 用于产生水下放射源出射  $\gamma$  射线的动力学信息; G4PhysicsList 用于定义计算过程中所用到的所有粒子及粒子在水中发生的物理过程; G4EventAction 用于处理可见光在水中所产生的击中信息; G4RunAction 用于信息的读取及输出到指定的文件。

### 1.3 粒子输运过程

1) 设定放射源  $\gamma$  射线从源中随机均匀抽样出射,在水中发生电磁相互作用,生成次级电子。当次级电子满足 Cerenkov 光的产生条件时,Geant4 程序调用 G4Cerenkov 确定 Cerenkov 光的出射位置、辐射角和能量。根据惠更斯原理,可得到产生 Cerenkov 辐射的条件为:

$$\cos \theta = 1/\beta n \quad (1)$$

其中,  $\beta = v/c$ <sup>[6]</sup>。带电粒子在某一点产生的 Cerenkov 光是以这点为顶点的 1 个光锥,张角为  $2\theta$ ,轴向是粒子运动方向,如图 3 所示。当  $\theta=0$ 时, Cerenkov 光最小阈速度为  $v=c/n$ ,相应阈动能为:

$$E_T = mc^2 \left( \frac{1}{(1-\beta^2)^{1/2}} - 1 \right) \quad (2)$$

其中,  $mc^2$  为粒子静止能量<sup>[6]</sup>。 $\gamma$  射线在水中的阈值为 0.42 MeV。

2) Cerenkov 光在水中传输,发生吸收、瑞利散射等过程。当光通过介质时,不仅水

的吸收使透射光强减弱,而且由于光的散射也使射入水中的光强按指数形式衰减,因此穿过厚度为  $l$  的水层透射光强为:

$$I = I_0 e^{-(\alpha+\epsilon)l} \quad (3)$$

其中: $\alpha$  为吸收系数; $\epsilon$  为散射系数, $\alpha+\epsilon$  为衰减系数<sup>[7]</sup>。

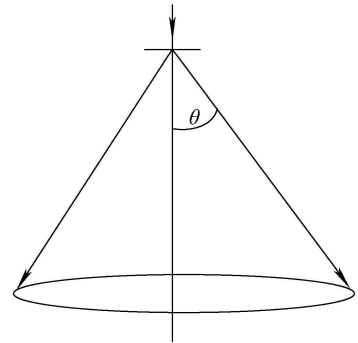


图 3 高速带电粒子在介质中运动产生 Cerenkov 光的原理图

Fig. 3 Schematic diagram of Cerenkov light generated by high-speed charged particle in medium

3) 通过过滤器的设定,只对穿入探测器的 Cerenkov 光子进行记录;当 Cerenkov 光子穿入探测器时,获取该 Cerenkov 光子的能量和入射点位置等信息。输出的运行结果包括单位时间穿过每个扇形区域的 Cerenkov 光子数和光子总能量等。穿过给定扇形区域  $A_n$  的 Cerenkov 光子数为:

$$N_{A_n} = S_{A_n} \int_{A_n} \frac{\phi(r)}{f_{A_n}(r)} f_{A_n}(r) dA \quad (4)$$

其中: $S_{A_n}$  为扇形区域  $A_n$  的面积; $\phi(r)$  为扇形区

域  $A_n$  内任意一点的点通量;  $f_{A_n}(r)$  为扇形区域  $A_n$  上任一分布密度函数<sup>[8]</sup>。

## 2 结果

通过计算得到单位时间穿过探测器每个扇形区域(图 1b)的 Cerenkov 光子能量,同一圆环内各扇形区域穿过的光子能量基本相等;把单位时间穿过每一圆环的光子总能量除以圆环的面积,得到穿过每个圆环的 Cerenkov 光强,将光强几乎相等的圆环进行合并处理,得到光强随垂轴半径的分布。同时,通过计算得到穿入探测器每个圆环的光子数,得出位于水下不同深度放射源在水面的 Cerenkov 光子数随垂轴半径的分布。图 4 为能量为 1.25 MeV 的  $\gamma$  放射源分别位于水下 5、25、55、105 m 时计算得到的水面 Cerenkov 光分布规律。图 5 为能量为 0.662、0.83、1.25、1.5 MeV 的  $\gamma$  放射源位于水下 25 m 时计算得到的水面 Cerenkov 光分布规律。

由图 4、5 可知,位于水下不同深度的放射源在水面垂轴半径上的光强分布具有较好的规律性;在放射源正上方的水面光强最强,离中心越远的水面光强越弱;Cerenkov 光在水面上的

光强分布呈一圈圈圆环状,称为 Cerenkov 光斑。图 6 为利用图 4 中的光强分布得出的 Cerenkov 光斑效果图。位于水下不同深度的放射源在水面的 Cerenkov 光子数随垂轴半径的分布趋势几乎相同;随着圆环半径的增加,水平面上 Cerenkov 光子数均表现出先增大后减小的趋势,在距圆心一定距离处达到最大值。

## 3 分析与讨论

### 3.1 不同能量 $\gamma$ 放射源致 Cerenkov 光强随水深度变化的规律

图 7 为 3 种不同能量的  $\gamma$  放射源位于水下不同深度时在正上方水面中心点的 Cerenkov 光强。可看出,随放射源位于水下的深度增大,在水面上形成的光斑变大,Cerenkov 光斑会随运输距离的增加不断往外扩散,但光强也会随深度的增大而变弱。光强减弱的原因有两个:1) 随着水面与放射源的距离增大,Cerenkov 光运输的距离增大,从而有更多的光被水所吸收;2) 某一点产生的 Cerenkov 光是以这点为顶点的一个光锥,这一特性使得离 Cerenkov 光产生位置越远的水面被 Cerenkov 光照射的区域面积越大,所以光强越弱。

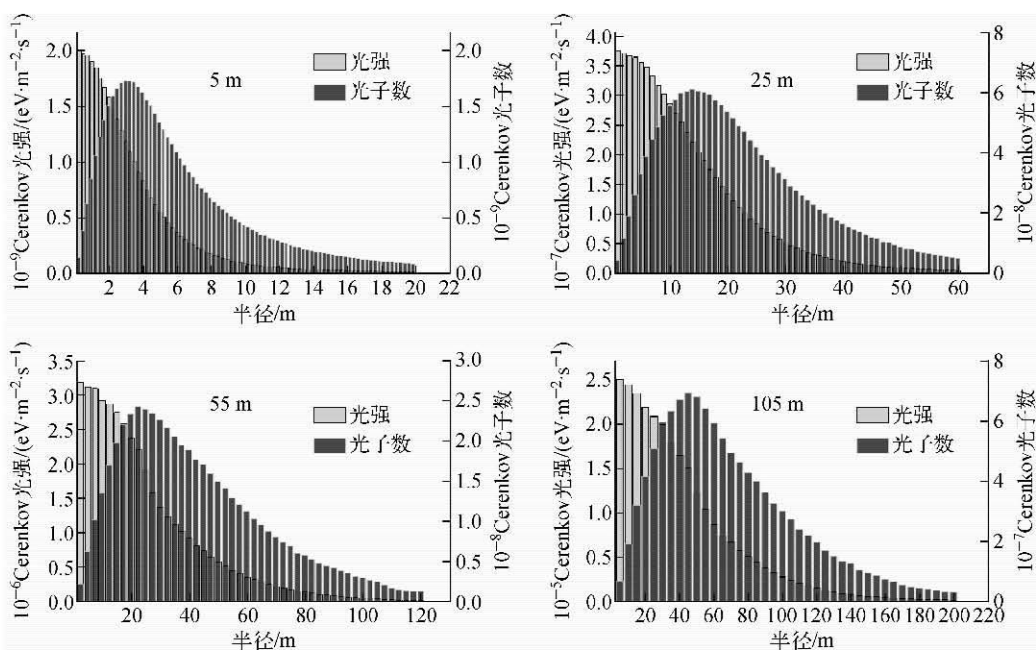


图 4 1.25 MeV 的  $\gamma$  放射源位于水下不同深度时水面 Cerenkov 光的分布规律

Fig. 4 Cerenkov light distribution on water surface with  $\gamma$  radioactive source locating in different depths under water

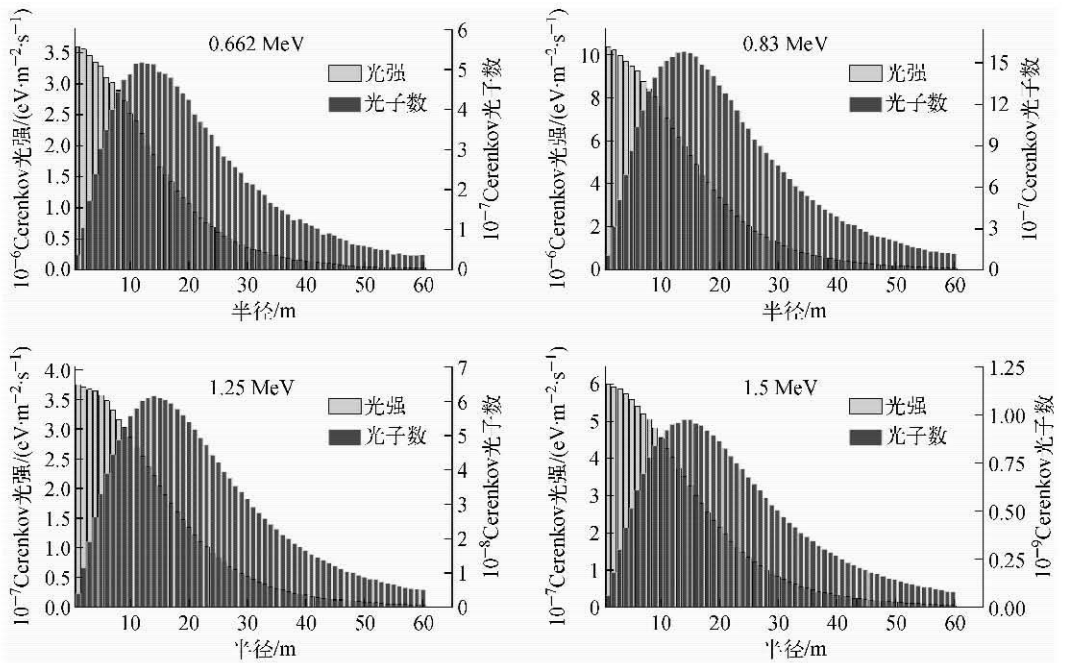


图5 不同能量的 $\gamma$ 放射源位于水下同一深度(25 m)时水面Cerenkov光的分布规律

Fig. 5 Cerenkov light distribution on water surface

with different energy  $\gamma$  radioactive sources locating in same depth (25 m) under water

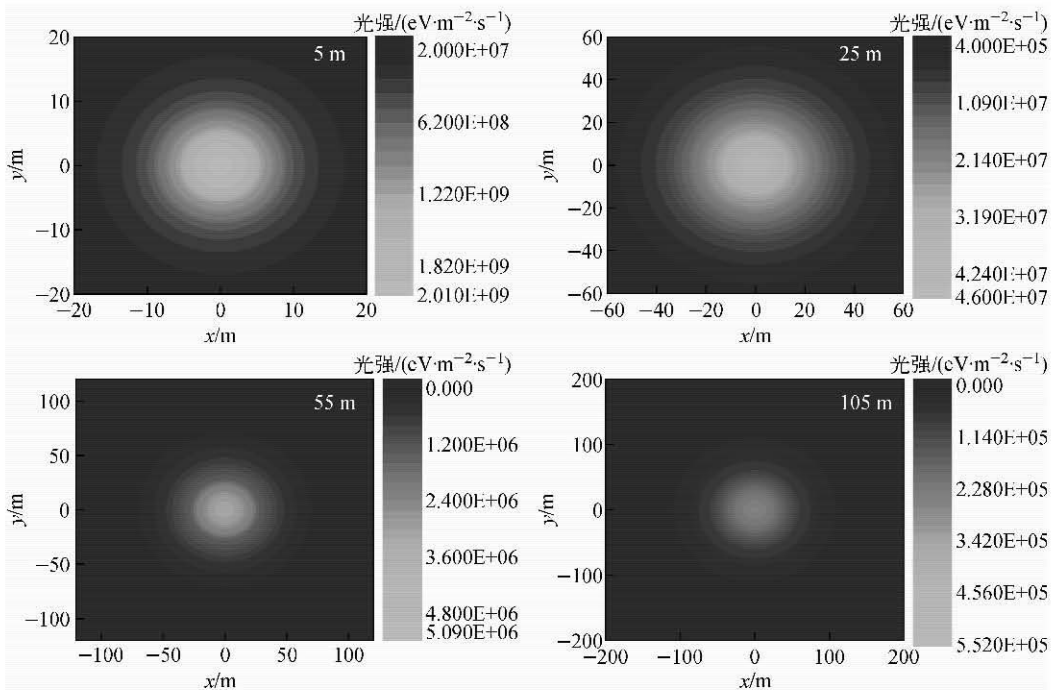


图6 1.25 MeV的 $\gamma$ 放射源位于水下不同深度时的Cerenkov光斑效果图

Fig. 6 Cerenkov light spot diagram with radioactive source locating in different depths under water

图8为不同能量的 $\gamma$ 放射源位于水下5 m时在水面各处的Cerenkov光强,图8中3条曲线分别是放射源正上方中心点、距正上方中心

点20 m处和50 m处水面的Cerenkov光强。对于能量超过Cerenkov光阈能(0.42 MeV)的不同 $\gamma$ 放射源,均能在水面产生Cerenkov光

斑,但在距放射源相同距离的水面形成的 Cerenkov 光斑亮度不同。 $\gamma$  射线的能量越高,产生能满足 Cerenkov 光产生条件的次级带电粒子的能量越大且数目越多,从而 Cerenkov 光子数越多、Cerenkov 光斑越亮。

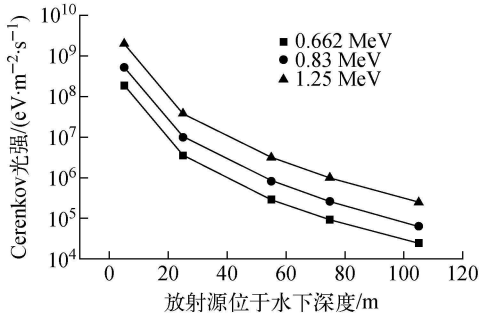


图 7 3 种不同能量的  $\gamma$  放射源

正上方水面中心点的 Cerenkov 光强

Fig. 7 Cerenkov light intensity on center of water surface above radiation source with three  $\gamma$  radioactive sources

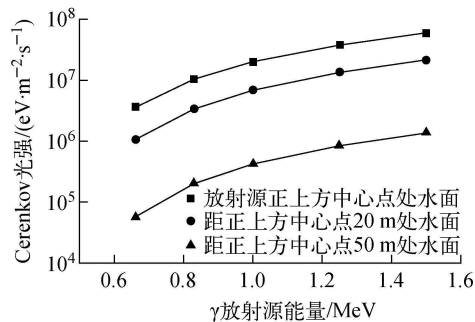


图 8 不同能量的  $\gamma$  放射源位于水下 5 m 时在水面各处的 Cerenkov 光强

Fig. 8 Cerenkov light intensity of water surface with different energy  $\gamma$  radioactive sources locating in depth of 5 m under water

在放射源丢失和被盗事故中以  $^{60}\text{Co}$  源和  $^{137}\text{Cs}$  源居多,通过计算证明了利用 Cerenkov 光来搜寻  $^{60}\text{Co}$  源、 $^{137}\text{Cs}$  源及其他 3 种能量  $\gamma$  放射源的可行性。如对于活度为  $5 \times 10^9 \text{ Bq}$  的  $^{60}\text{Co}$  源即使在水下 105 m 处,穿过水面的 Cerenkov 光强在一定区域内大于  $1\,316 \text{ eV} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,已能利用相应灵敏度的 CCD 相机对水面进行拍照,获得 Cerenkov 光斑图像,放射源的水平位置即可通过 Cerenkov 光斑确定。

绝大多数常用的放射源均会伴随着  $\gamma$  射线的发射,在水中几乎均能产生 Cerenkov 光,因此可通过 Cerenkov 光斑完成对大多数水下放射源的水平位置确定。

### 3.2 不同能量 $\gamma$ 放射源致 Cerenkov 光子数随水深变化的规律

图 9 为 3 种不同能量的  $\gamma$  放射源位于水下的深度与水面集中光子数最多处的圆环半径之间的关系。可看出,对于 3 种能量  $\gamma$  放射源,放射源位于水下的深度与水面集中光子数最多处的圆环半径之间的关系均近似呈线性关系,可用方程近似表示为:

$$H \approx 2.4r - 2.1 \quad (5)$$

式中: $H$  为放射源位于水下的深度; $r$  为水面集中光子数最多处的圆环半径。

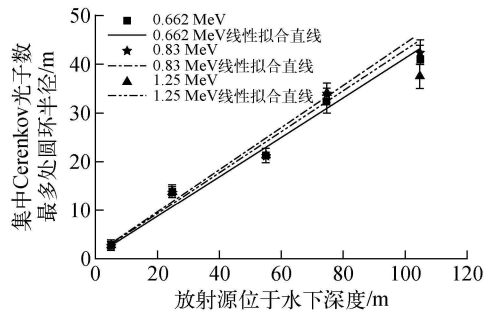


图 9  $\gamma$  放射源位于水下的深度与水面集中光子数最多处的圆环半径之间的关系

Fig. 9 Relationship between depth of  $\gamma$  radioactive source under water and radius of circle concentrated maximum photon number on water surface

由此可见,对于出射粒子能量超过 Cerenkov 阈能的放射源位于水下时,放射源在水中产生 Cerenkov 光所形成的以上规律与放射源发出  $\gamma$  射线的能量无关,这是 Cerenkov 光在水中的运输及其方向性导致的。因此,当搜寻水下放射源时,可利用集中光子数最多处的圆环半径来确定放射源在水中的深度。在实际应用中,利用 CCD 相机对水面进行拍照,获得 Cerenkov 光斑中心在水面的位置,从中心位置沿半径方向利用光子计数器每隔 1 m 对水面的 Cerenkov 光进行计数,把获得的计数分别乘以计数点距光斑中心的距离,乘积最大值所对应的计数点距光斑中心的距离即是水面集中光子

数最多处的圆环半径,由以上的线性关系可获得放射源处于水下的深度。

核技术应用中的绝大部分常用放射源在水下均能产生 Cerenkov 光,而 Cerenkov 光具有较好的方向性,会在辐射体的底面形成局部面积和一定形状的照明区,为利用 Cerenkov 光搜寻水下放射源提供了可能性。由于水屏蔽层对 Cerenkov 光的衰减远小于对放射源出射粒子的衰减,对于处于水下较大深度的放射源产生的 Cerenkov 光仍有一部分能穿过水面。而目前的 CCD 成像技术已能对几十个光子成像,通过 CCD 相机、光子计数器等光学仪器可实现对 Cerenkov 光的探测。因此,利用 Cerenkov 光实现对处于水下较大深度处的放射源的搜寻,解决了目前水下放射源搜寻的困境。

#### 4 结论

本文利用 Geant4 计算研究了水下放射源产生 Cerenkov 光及 Cerenkov 光在水中的输运过程,对利用 Cerenkov 光搜寻水下放射源进行了理论验证和可行性分析。研究表明:对于不同能量的放射源,只要其出射粒子能量大于产生 Cerenkov 光阈能,则可利用其在水面形成的 Cerenkov 光斑及 Cerenkov 光子数在水面的分布规律来确定放射源的位置和深度,即放射源处于 Cerenkov 光斑中心位置的正下方,放射源在水中的深度可通过其与水面集中光子数最多处的圆环半径之间的线性关系确定。同时,本文建立的放射源位置与 Cerenkov 光学参数的关系模型,为水下放射源的搜寻提供了技术指导。

#### 参考文献:

- [1] 刘新华,李冰,吴德强. 位置未知废放射源的搜寻[J]. 辐射防护通讯,2002,22(5):11 16.  
LIU Xinhua, LI Bing, WU Deqiang. Search for the location unknown spent radiation sources[J]. Radiation Protection Bulletin, 2002, 22(5): 11 16(in Chinese).
- [2] 梅遂生. 光电子技术:信息化武器装备的新天地[M]. 北京:国防工业出版社,2008.
- [3] BOLOTOVSKII B M. Theory of Cerenkov radiation[J]. Physics Uspekhi, 1962, 4(5): 781 811.
- [4] ROSS H H. Measurement of beta emitting nuclides using Cerenkov radiation[J]. Analytical Chemistry, 1969, 41(10): 1 260 1 265.
- [5] 徐杰谔,乐永康,俞熹. 水基切伦科夫  $\mu$  子探测器的研究[J]. 大学物理,2011,30(6):57 61.  
XU Jieshen, LE Yongkang, YU Xi. Experiment of a simple water tank Cerenkov muon detector [J]. College Physics, 2011, 30(6): 57 61(in Chinese).
- [6] JELLEY J V. Cerenkov radiation and its applications[J]. British Journal of Applied Physics, 1955, 6(7): 227 232.
- [7] 孙传东,陈良益,高立民,等. 水的光学特性及其对水下成像的影响[J]. 应用光学,2000,21(4): 39 46.  
SUN Chuandong, CHEN Liangyi, GAO Limin, et al. Water optical properties and their effect on underwater imaging[J]. Journal of Applied Optics, 2000, 21(4): 39 46(in Chinese).
- [8] 许淑艳. 蒙特卡罗方法在实验核物理中的应用[M]. 北京:原子能出版社,2006.