

## 基于双曲线特征的浅地层探地雷达杂波抑制与合成孔径成像研究

张春城 孔令讲 周正欧  
(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

**摘要:** 本文根据浅地层探地雷达图像的特点, 提出了一种基于图像处理技术的杂波抑制方法。并在此基础上, 进而提出了一种实现探地雷达合成孔径成像的快速方法。通过对实测数据进行处理, 结果表明, 所提杂波抑制方法取得了很好的效果, 且通用性强; 所提的快速合成孔径成像方法与普通合成孔径成像方法相比, 所得图像的分辨力相当, 且所提方法减少了杂波成分的影响, 使处理速度得到了极大的提高, 成像的效果更好。

**关键词:** 探地雷达, 杂波抑制, 合成孔径成像, 图像处理

中图分类号: TN957.52 文献标识码: A 文章编号: 1009-5896(2005)11-1790-05

## Research on Clutter Reduction and Synthetic Aperture Imaging of Shallow Subsurface Ground Penetrating Radar Based on Hyperbolic Feature

Zhang Chun-cheng Kong Ling-jiang Zhou Zheng-ou  
(College of Electronic Engineering University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract** This paper proposed a new clutter reduction method based on characteristic of Ground Penetrating Radar(GPR) image in detecting shallow subsurface objects. Moreover, a method to realize fast synthetic aperture imaging based on the proposed clutter reduction method is proposed. The results of processing measurement data show the proposed clutter reduction method is very effective and universally valid; The resolving power of image gained by the proposed fast synthetic aperture imaging method corresponds with that general synthetic aperture imaging method, thanks to the proposed method can eliminate the influence of clutter, so the processing speed is improve greatly comparing with general synthetic aperture imaging method, the effect of image gained by the proposed method better than general synthetic aperture imaging method.

**Key words** Ground penetrating radar, Clutter reduction, Synthetic aperture imaging, Image processing

### 1 引言

到目前为止, 在世界上不少发展中国家仍有很多过去战争中埋下且未清除的地雷, 而且近年每年均有新的地雷被埋下。在和平时期, 这些未清除的地雷严重威胁着这些国家人民的生命安全, 并且阻碍了这些国家的经济发展, 因此地雷清除工作仍然是一项重要的工作, 而探地雷达作为地雷清除的一种重要工具, 正得到越来越多的使用与研究<sup>[1-4]</sup>。对地雷尤其是反个人雷这类浅地层埋地目标, 由于其体积小, 金属成分少, 使得对它们的探测与定位非常困难<sup>[4]</sup>。探地雷达杂波抑制是探地雷达信号处理中一个非常重要的方面, 抑制探地雷达杂波就是要去除探地雷达数据中的非目标成分, 使目标成分得到增强, 从而有利于对埋地目标的探测。传统上最常用且最简单的均值法去背景是探地雷达杂波抑制方法

中的一种<sup>[5]</sup>, 该方法常常与各种方法配合使用以取得更好的杂波抑制效果。近年出现了一些新的杂波抑制方法, 如模型化杂波的方法<sup>[4]</sup>, 这类方法取得了一定效果, 但由于地雷等浅地层埋地目标所处环境非常复杂, 使得杂波特性十分复杂, 很难找到通用性强的模型, 因此这类方法的通用性不强。本文从探地雷达图像的特点出发, 提出了一种基于图像处理技术抑制探地雷达杂波的方法, 该方法处理较简单, 通用性强, 通过对实测数据进行处理, 结果表明所提方法取得了很好的效果。

探地雷达合成孔径成像是探地雷达信号处理中另一个非常重要的方面, 通过合成孔径成像可提高探地雷达图像的分辨力, 有利于对埋地目标的探测和定位。常用的探地雷达合成孔径成像方法有基于微波全息成像的方法<sup>[6,7]</sup>, 及基于各

种偏移技术的频率波数域方法<sup>[8]</sup>, 基于微波全息成像的方法其处理速度与频率波数域方法中的Stolt偏移相比慢很多<sup>[9]</sup>。本文在所提杂波抑制方法的基础上, 进而提出了一种实现基于微波全息成像的探地雷达合成孔径成像的快速方法。通过对实测数据进行处理, 结果表明, 所提的快速合成孔径成像方法与普通合成孔径成像方法相比, 所得图像的分辨率相当, 且所提方法减少了非目标成分的影响, 使处理速度得到了极大的提高, 成像的效果更好。

## 2 探地雷达图像特性

探地雷达回波数据有A-scan, B-scan, C-scan 3种形式<sup>[5]</sup>, 本文处理针对B-scan数据。诸如地雷这类浅地层埋地目标在探地雷达B-scan数据所形成的图像中将呈双曲线状, 这里简要作一几何解释<sup>[3]</sup>。图 1 为目标与雷达之间的几何示意图, 设  $x_0$  和  $z_0$  分别表示目标水平位置和目标的深度。目标到雷达天线的距离用  $D$  表示,  $x_a$  表示天线的水平位置, 有方程<sup>[3]</sup>:

$$D = \sqrt{(x_a - x_0)^2 + z_0^2} \quad (1)$$

脉冲回波的响应时间  $t(x_a)$  用下方方程给出, 其中  $v$  是电磁波在介质中的传播速度。

$$t(x_a) = 2D/v = \sqrt{4(x_a - x_0)^2/v^2 + t_0^2} \quad (2)$$

所有的坐标轴被离散化后, 可记  $t = j\Delta t$ ,  $x_a = i\Delta x$ ,  $x_0 = i_0\Delta x$ ,  $t_0 = j_0\Delta t$ , 其中  $\Delta t$  为雷达的采样间隔时间,  $\Delta x$  为雷达的采样间隔距离。离散化后可以得到下面的双曲线参数方程:

$$j = \sqrt{\frac{4\Delta x^2}{\Delta t^2 v^2} (i - i_0)^2 + j_0^2} \quad (3)$$

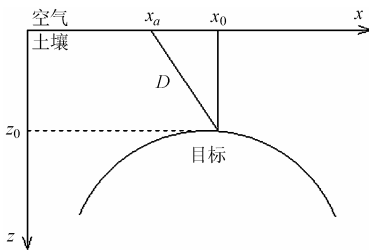


图 1 目标和雷达之间的简单几何关系示意图

## 3 所提杂波抑制方法

由上一节可知, 浅地层埋地目标在探地雷达 B-scan 数据所形成的图像中呈双曲线状, 即目标回波在整个 B-scan 回波数据中呈双曲线状分布。本文根据这一特点, 提出了一种基于图像处理技术抑制探地雷达杂波的方法, 所提方法基本思想为: 通过图像处理技术确定探地雷达图像中双曲线所在位置, 从而确定目标回波在整个回波数据中的分布位置, 在整

个回波数据中保留这些数据并对其它位置上的数据加以去除, 也就去除了探地雷达数据中的非目标成分, 从而达到抑制杂波的目的。为使所提方法得到更好的效果, 先用均值法去背景, 所提方法针对的数据是去除背景后的数据。所提方法过程如下:

(1) 对探地雷达图像进行灰度量化处理 进行灰度量化处理的目的是便于后续处理中对图像进行运算。先从探地雷达 B-scan 数据中找出绝对值最大的那个数, 再将 B-scan 数据中的每一个数都除以该数的绝对值, 以使所有的数据都在  $[-1,1]$  或  $(-1,1]$  的范围内。再将每一个数都乘以 128 并取整, 从而使灰度范围在  $[-128,128]$  或  $(-128,128]$ , 即进行了 256 级的灰度量化。

(2) 求图像梯度幅度 对量化后的图像求梯度幅度, 其目的是为确定双曲线在图像中的分布作准备。由于本文处理的是数字图像, 因此求幅度  $TM(x, y)$  可通过差分运算完成, 数学表达式为<sup>[10]</sup>

$$TM(x, y) = |f(x, y) - f(x+1, y)| - |f(x, y) - f(x, y+1)| \quad (4)$$

(3) 门限法将梯度幅度图像二值化 对于梯度幅度图像  $TM(x, y)$ , 本文用门限法将其分成两部分, 数学表达式为

$$t(x, y) = \begin{cases} C1, & TM(x, y) \geq \text{threshold} \\ C2, & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

该式将原梯度幅度图像  $TM(x, y)$  中的每一个值都与一门限值  $\text{threshold}$  相比较, 当原梯度幅度图像中的值大于或等于门限值时, 将该值变为  $C1$ , 否则变为  $C2$ 。

与各种普通图像一样, 探地雷达图像边缘是由灰度级跳变构成。去背景后的探地雷达图像中的双曲线轮廓部分的灰度级跳变大, 反映在梯度幅度图像中即这部分的梯度幅度值大。通过设定一门限值  $\text{threshold}$ , 用式(5)可将探地雷达梯度幅度图像分为两部分, 一部分为反映目标成分的双曲线, 其值为  $C1$ ; 另一部分为非目标成分, 其值为  $C2$ 。

门限  $\text{threshold}$  的取值, 本文根据探地雷达数据的特点进行确定。研究表明, 探地雷达数据中的目标回波数据所占比例是很小的, 甚至可小于 2%<sup>[11]</sup>。考虑到地表强回波等成分的梯度幅度也比较大, 为尽可能多的保留目标回波数据, 同时又达到能很好抑制杂波的目的, 本文所取的门限值  $\text{threshold}$  使  $C1$  在梯度幅度图像所占比例为 12% 或稍小。门限的选取是一自适应过程, 门限从小到大地变化, 每选一个值, 都要计算  $C1$  在梯度图像所占比例, 当所取的门限值使得  $C1$  在梯度图像所占比例第一次达到 12% 或小于 12% 时, 则该门限值就是本文所确定的门限值  $\text{threshold}$ 。

(4) 梯度幅度图像补偿 若探地雷达图像中双曲线轮廓范围有梯度幅度值较小的点, 则在上述二值化处理中, 会将

这些极少量的点判为  $C_2$ ，为尽量将这些点恢复为  $C_1$ ，本文根据图像特点进行了补偿。由于目标回波是连续分布在一定范围，因而若  $C_1$  分布范围出现了不连续点(即出现了  $C_2$ )，则该点为需要补偿的点。补偿方法如下：对每一个  $C_2$  值(除第 1, 2 行与第 1, 2 列以外)，设其在图像中的坐标为  $(i, j)$ ，若与其临近的  $(i+1, j+1)$ ， $(i-1, j-1)$  坐标点的值都为  $C_1$ ，或  $(i+2, j+2)$ ， $(i-2, j-2)$  坐标点的值都为  $C_1$ ，或  $(i-1, j+1)$ ， $(i+1, j-1)$  坐标点的值都为  $C_1$ ，或  $(i+2, j-2)$ ， $(i-2, j+2)$  坐标点的值都为  $C_1$ ，则将该  $(i, j)$  坐标点的值变为  $C_1$ 。

(5) 非目标成分去除通过上述处理给出了目标回波数据和非目标回波数据在探地雷达原图像中的位置信息，在梯度幅度图像中值为  $C_1$  所对应的位置为目标回波数据在探地雷达原图像中的位置，在梯度幅度图像中值为  $C_2$  所对应的位置为非目标回波数据在探地雷达原图像中的位置。因此，在原图像中将非目标回波所在位置的数据加以去除，就抑制了探地雷达杂波。

#### 4 所提快速合成孔径成像方法

本文所提的快速算法针对的是基于微波全息成像的合成孔径成像方法，这里简要介绍微波全息成像原理。大多数探地雷达的工作方式都是发射天线与接收天线水平放置，沿着水平方向移动。当收发天线共置时，收发天线和目标之间的几何关系如图 2 所示。假设天线位置是  $\mathbf{X}_r=(x_r, y_r, 0)$ ，在  $\mathbf{X}_r$  点接收的目标回波记为  $r(\mathbf{X}_r, t)$ ，则在一系列接收点  $\{\mathbf{X}_r\}$  接收到的信号集为  $\{r(\mathbf{X}_r, t)\}$ 。由费曼耳和基尔霍夫的衍射理论和球面波在介质中的传播特征及推导可得<sup>[9]</sup>

$$r(\mathbf{X}_r, t) = 1/(2\pi v) \iint_S \frac{z}{r^3} p(\mathbf{X}) u' \left( t - \frac{2l}{v} \right) dx dy \quad (6)$$

其中  $u'(t)$  是发射脉冲  $u(t)$  的一阶偏导数。 $v$  是电磁波在介质中的传播速度。 $l=|\mathbf{X}-\mathbf{X}_r|$  是天线和目标表面反射点之间的距离， $p(\mathbf{X})$  是目标表面  $S$  的反射波幅度。成像的基本原理是计算所有的回波信号与一个测试函数的相关，即

$$b(\mathbf{X}) = \iiint r(\mathbf{X}_r, t) h(\mathbf{X}-\mathbf{X}_r, t) d\mathbf{X}_r dt \quad (7)$$

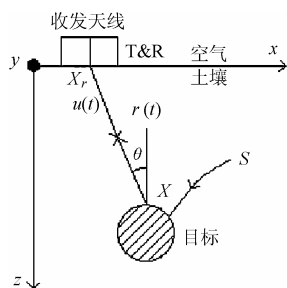


图2 探地雷达进行探测的简单示意图

其中  $\mathbf{X}=(x, y, z)$  是图像点的坐标向量； $h(\mathbf{X}, t)$  是测试函数， $h(\mathbf{X}, t)=k(z)h_1(t)h_2(\mathbf{X})$ ，该等式右边三项分别表示归一化因子，距离向测试函数，方位向测试函数； $b(\mathbf{X})$  被称为图像函数，也就是最终的合成孔径图像。定义

$$w(\mathbf{X}_r, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} r(\mathbf{X}_r, \tau) h_1(t-\tau) d\tau \quad (8)$$

假设天线只沿着  $x$  方向进行移动，根据文献[9]的推导可将式(7)简化为

$$b(\mathbf{X}) = \int_{-\infty}^{+\infty} w(\mathbf{X}_r, 2|\mathbf{X}-\mathbf{X}_r|/v) \frac{z^3}{|\mathbf{X}-\mathbf{X}_r|} dx_r \quad (9)$$

式(9)即为最终的合成孔径成像数学表达式。式中有表示深度的参数  $z$ ，可见不同深度处的所乘因子的值是不同的。对浅地层探地雷达来说，多是使用单周期窄脉冲超宽带(UWB)雷达，因而不作距离向压缩。

上述合成孔径成像的具体实现可看作这样一个过程：对 B-scan 数据中的每一个点，将以该点为中心的沿一定参数的双曲线路径上的数据进行加权累加。由于目标回波在探地雷达 B-scan 数据呈双曲线状分布，因此合成孔径处理时的有用数据是目标回波数据。若能通过一定方法判断出目标回波在整个回波数据中的分布，在合成孔径成像时只用目标回波数据参与运算(表现在式(9)中即运算时只选取接收信号集中目标回波位置处的数据)，则可减少合成孔径运算量，实现快速合成孔径成像。

由于通过第 3 节抑制杂波的处理得出了目标回波数据在探地雷达图像中的位置信息(在梯度幅度图像中值为  $C_1$  所对应的位置为目标回波数据在探地雷达原图像中的位置)，因此在合成孔径成像时本文只选取目标回波所在位置的数据参与运算，从而排除了非目标回波数据对合成孔径成像的影响，实现了探地雷达快速合成孔径成像。

#### 5 对实测数据的处理结果及分析

本文用所提方法对两组数据进行了处理，这两组数据一组来自国外人道主义反雷技术研究中心，另一组为作者及课题组成员用探地雷达采集的实验数据。第一组数据为单目标数据，来自国外人道主义反雷技术研究中心，其相关参数如下：探地雷达为无载频脉冲探地雷达，工作频率为 1GHz，采样所得的一个 B-scan 包括 98 个 A-scan，相邻两个 A-scan 之间相距 1cm，每个 A-scan 记录 512 个采样点。目标为一个 PMN-2 地雷，直径 12cm，高度 5.3cm，埋于地下大约 10cm 深。第二组数据为多目标数据，系作者及课题组成员用探地雷达采集的数据，其相关参数为：探地雷达为无载频脉冲探地雷达，工作频率为 1GHz，采样所得的一个 B-scan 包括 160 个 A-scan，相邻两个 A-scan 之间相距 1cm，每个 A-scan 记

录 480 个采样点。目标为 4 个，均埋在沙坑下(沙坑土壤较湿)，目标 1 为纸杯，直径 5.3cm，高度 9.3cm，埋于地下大约 5cm 深；目标 2 为塑料瓶，直径 6.6cm，高度 20cm，埋于地下大约 12cm 深；目标 3 为铁罐，直径 7.3cm，高度 14.5cm，埋于地下大约 16cm 深；目标 4 为玻璃瓶，直径 5.5cm，高度 16.8cm，埋于地下大约 8cm 深。

处理第一组数据的结果如图 3 至图 7 所示，处理第二组数据的结果如图 8 至图 12 所示。从图 3，图 4，图 5，及图 8，图 9，图 10 可看出，均值法去背景后的图像与原始图像相比，去除了一定的杂波，目标所反映的双曲线得到了增强。而本文所提杂波抑制方法去除杂波后的图像与均值法去背

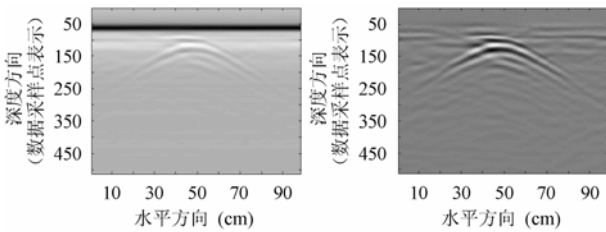


图 3 原始图像(第一组数据) 图 4 均值法去背景后的图像(第一组数据)

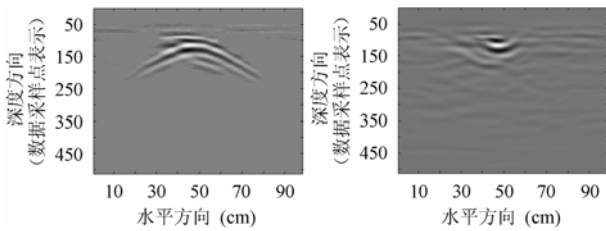


图 5 所提杂波抑制方法去除杂波后的图像(第一组数据) 图 6 普通合成孔径成像处理后的图像(第一组数据)

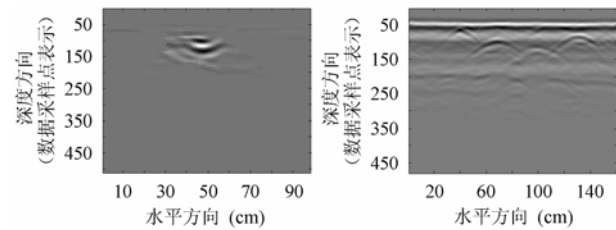


图 7 所提快速合成孔径成像方法处理后的图像(第一组数据) 图 8 原始图像(第二组数据)

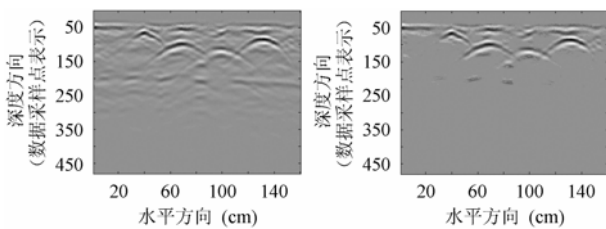


图 9 均值法去背景后的图像(第二组数据) 图 10 所提杂波抑制方法去除杂波后的图像(第二组数据)

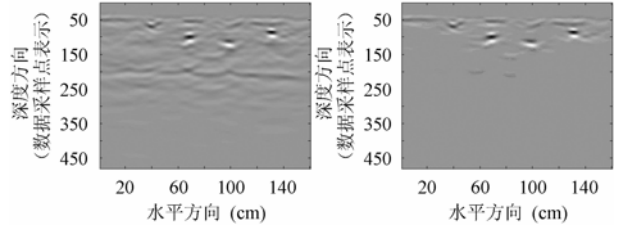


图 11 普通合成孔径成像处理后的图像(第二组数据) 图 12 所提快速合成孔径成像方法处理后的图像(第二组数据)

景后的图像相比，杂波被进一步的去除，目标所反映的双曲线得到了进一步的增强，因此所提方法是非常有效的。

所提快速合成孔径成像方法及普通合成孔径成像方法的程序用Matlab编写，在同一台PC机上运行，PC机的CPU为 1.8GHz的P4 芯片，内存为 256M。普通合成孔径成像方法处理第一组数据用时 84.7s(去背景处理与合成孔径处理所用的总时间)，所提快速合成孔径成像方法处理第一组数据用时 14.4s(去背景处理，本文所提的去杂波处理，对数据进行判断，及合成孔径处理所用的总时间)。普通合成孔径成像方法处理第二组数据用时 205.9s(去背景处理与合成孔径处理所用的总时间)，所提快速合成孔径成像方法处理第二组数据用时 35.6s(去背景处理，本文所提的去杂波处理，对数据进行判断，及合成孔径处理所用的总时间)。可见，所提快速合成孔径成像方法与普通合成孔径成像方法相比，在处理速度上有了极大的提高。有关的结果如图 6，图 7，图 11，图 12 所示。从图 6，图 7，图 11，图 12 可看出，经合成孔径成像处理后的图像与原始图像相比，双曲线得到了聚焦，图像分辨率得到了提高(探地雷达图像分辨率可用A-scan能量进行定量分析<sup>[9]</sup>，从直观上说就是看双曲线的聚焦程度)。同时还可看出，所提快速合成孔径成像方法处理实测数据所得图像的分辨力与普通合成孔径成像方法所得图像的相当，并且在目标范围以外的杂散成分更少。由此可见，所提快速合成孔径成像方法使处理速度得到了极大的提高，成像的效果更好。

### 6 结束语

本文根据浅地层埋地目标在探地雷达 B-scan 数据所形成的图像中呈双曲线这一特点，提出了一种基于图像处理技术抑制探地雷达杂波的方法。由于这一特点不会因目标所处的环境改变而改变，因而所提方法通用性强。通过所提杂波抑制方法，得到了目标回波在整个 B-scan 回波数据中的分布位置。在此基础上，本文又提出了一种实现探地雷达合成孔径成像的快速方法。通过对实测数据进行处理，结果表明，所提探地雷达杂波抑制方法很好地抑制了杂波；所提的快速合成孔径成像方法与普通合成孔径成像方法相比，所得图像

的分辨力相当, 但所提方法大大减少了杂波成分的影响, 使处理速度得到了极大的提高, 成像的效果更好。

### 参 考 文 献

- [1] Scheers B. Ultra-wideband ground penetrating radar with application to the detection of anti personnel landmines. [Ph.D thesis], Brussels, Royal Military Academy, 2001.
- [2] Gurel L, Oguz U. Optimization of the transmitter-receiver separation in the ground-penetrating radar[J]. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 2003, 51(3): 362 – 370.
- [3] 孔令讲, 周正欧. 浅地层探地雷达波速测量方法的研究[J]. *电子学报*, 2002, 30(9): 1330 – 1332.
- [4] Andria van der Merwe, Inder Gupta J. A novel signal processing technique for clutter reduction in GPR measurements of small, shallow land mines[J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(6): 2627 – 2637.
- [5] Daniels D J. Surface Penetrating Radar[M]. London, UK: Published by IEE, 1996.
- [6] Osuni N, Ueno K. Detection of buried plant[J]. *IEE Proc.-F*, 1988, 135(4): 330 – 342.
- [7] 孔令讲, 周正欧. 浅地表探地雷达中改善成像分辨力的一种有效方法[J]. *信号处理*, 2002, 18(6): 505 – 508.
- [8] Xu Xiaoyin, Eric Miller L. A statistical method to localize buried landmines from GPR array measurement[C]. SPIE, 2001, (4394): 742 – 753.
- [9] 孔令讲. 浅地层探地雷达信号处理算法的研究[D]. [博士论文], 成都: 电子科技大学, 2003.
- [10] 王新成. 高级图像处理[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2001: 47 – 50.
- [11] Al-Nuaimy W, Huang Y, Shihab S. Automatic target detection in GPR data[C]. SPIE, 2002, (4758): 139 – 143.
- 张春城: 男, 1976年生, 博士生, 目前正从事探地雷达信号处理方面的研究.
- 孔令讲: 男, 1974年生, 博士, 目前正从事探地雷达等方面的研究.
- 周正欧: 男, 1940年生, 教授, 博士生导师, 目前正从事探地雷达数据、传输等方面的研究.