

浅地层探地雷达自动目标检测与定位研究

张春城 周正欧

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

摘要: 该文提出了一种基于图像熵变化及窗口能量检测的探地雷达自动目标检测与定位方法, 该方法首先通过探地雷达未经合成孔径处理的图像与经合成孔径处理后的图像之间的熵变化来检测目标, 再通过合成孔径图像中进行窗口能量检测来判断目标所在的位置。通过对实测数据的处理, 结果表明该方法取得了较好的效果。

关键词: 探地雷达, 自动目标检测, 合成孔径成像, 熵

中图分类号: TN959, TN957.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2005)07-1065-04

Research on Automatic Target Detection and Orientation of Ground Penetrating Radar in Shallow Subsurface Application

Zhang Chun-cheng Zhou Zheng-ou

(College of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract This paper proposed a new automatic target detection and orientation method based on image entropy variation and window energy detection. This method decides whether target is existing by the variation of entropy in ground penetrating radar image before synthetic aperture processing and after synthetic aperture processing, then decides the location of target by detecting window energy in ground penetrating radar synthetic aperture image. The results of processing measurement data show this method is effective.

Key words Ground penetrating radar, Automatic target detection, Synthetic aperture imaging, Entropy

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, 而且近年来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, 而探地雷达作为清除地雷的重要工具之一, 正得到越来越多的使用与研究^[1-4]。对埋于地下的地雷尤其是反个人雷, 由于其体积小, 金属成分少, 且埋于浅地层, 使得对它们的探测与定位非常困难^[5], 这与探地雷达常规探测相比, 对信号处理技术提出了更高的要求, 同时也推动了探地雷达信号处理技术的发展。

自动目标检测与定位探地雷达一个重要的研究方面, 通过自动目标检测与定位可直观反映地下目标的位置。近年出现的一些利用神经网络与模式识别实现探地雷达自动目标检测的方法^[5]存在一定的不足: 需要大量的数据进行训练, 运算量大; 由于不同的土壤其介电常数等特性不同, 在一个地方训练所得的结果对于另一个地方可能不适用; 在检测多目标时, 由于双曲线与实际的目标大小相比扩展了几倍甚至

十几倍, 以及双曲线间可能相互交叠, 影响了检测的正确性及定位精度。本文提出了一种探地雷达自动目标检测与定位方法, 该方法具有一些优点: 不需用大量数据进行训练, 实时性好; 由于是在合成孔径处理后的图像中进行定位, 图像的分辨力已得到了提高, 目标所反映的双曲线已得到聚焦, 在图像中更接近目标的实际尺寸大小, 且对于多目标的情况, 相互间不会交叠, 因此可使定位更精确。

2 探地雷达数据特点

探地雷达回波数据有 A-scan, B-scan, C-scan 3 种形式^[6]。探地雷达在地面沿同一个水平方向移动, 在不同的位置采集数据, 则每个位置采样得到的数据为 A-scan, 该水平方向所有 A-scan 就组成了一个 B-scan。沿另一水平方向在不同起始点采集可得到一系列的 B-scan, 从而组成一个 C-scan。B-scan 数据通常是把各个 A-scan 数据顺序排列成一个矩阵, 矩阵的行数是 A-scan 数据的采样点数, 而矩阵的列数是 A-scan 数据的个数。地下目标在 B-scan 数据所形成的探地雷达图像中呈双曲线状^[7], 探地雷达合成孔径成像可使反映地下目标的双曲线在探地雷达图像中聚焦于目标所在的位置且更接近

目标的实际大小,从而提高探地雷达图像的分辨力,有利于对地雷等埋地目标的探测与定位。

3 探地雷达自动目标检测与定位

3.1 基于图像熵变化的目标检测

有无目标的探地雷达图像之间存在一定的差别,有目标的探地雷达图像中存在反映目标的双曲线,且占据较多的位置,无目标的探地雷达图像则不存在这种特点,因此这两种图像在合成孔径成像处理前后的图像熵^[8]变化趋势就有所不同。通常,对于有目标的 B-scan 数据所形成的探地雷达图像,经合成孔径处理后图像熵有变小的趋势;而对于无目标的 B-scan 数据所形成的探地雷达图像,经合成孔径处理后图像熵有变大的趋势。因此本文提出了通过探地雷达图像合成孔径处理前后的熵变化特点来实现对埋地目标的自动检测,其基本步骤如下:

(1) 对探地雷达原始图像作去除杂波的处理。采用均值法去杂波^[6],其数学表达式:

$$\hat{x}_i(j) = x_i(j) - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_i(k), \quad i=1, \dots, M, \quad j=1, \dots, N \quad (1)$$

其中 M, N 分别是 B-scan 数据的总行数与总列数, $x_i(i=1, \dots, M)$ 表示数据, $\hat{x}_i(j)(i=1, \dots, M)$ 表示处理后的数据。

(2) 计算去除杂波后的探地雷达图像的熵 Ω_1 。计算式为^[8]

$$\Omega_1 = \frac{\left[\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N X^2(m, n) \right]^2}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N X^4(m, n)} \quad (2)$$

其中 M, N 分别是 B-scan 数据的总行数与总列数, $X(m, n)$ 表示 B-scan 数据中的一个元素值, Ω_1 表示图像的熵。

(3) 对去除杂波后的探地雷达图像作合成孔径处理(本文所用方法为基于微波全息成像的合成孔径成像方法^[3])。

(4) 计算经合成孔径处理后探地雷达图像的熵 Ω_2 , 计算式与式(2)相同。

(5) 比较合成孔径处理前后探地雷达图像熵的变化,从而判断是否存在目标。数学表达式为

$$\text{target} = \begin{cases} 1, & \Omega_2 < W \cdot \Omega_1 \\ 0, & \Omega_2 \geq W \cdot \Omega_1 \end{cases} \quad (3)$$

其中 target 等于 1 表示有目标, target 等于 0 表示无目标, W 表示一权值, 本文处理实测数据时该权值取 1。

3.2 窗口能量检测法目标定位

在判定有目标的情况下,进一步就要对目标的位置进行判断。在探地雷达合成孔径图像中,目标所形成的双曲线聚

焦于目标所在的实际位置且更接近目标实际尺寸大小,从而目标所在位置处的能量远大于没有目标的位置处的能量。依据这些特点提出了一种基于窗口能量检测的探地雷达自动目标定位方法,该方法判定目标在探地雷达合成孔径图像中的位置。

首先确定目标在水平方向的位置,其基本步骤如下:

(1) 确定窗口大小及划分窗口 窗口的大小也就是所包含 A-scan 数据的多少,窗口内包含的 A-scan 数据均是依次相邻的。确定窗口大小的原则是窗口尺寸应与目标在合成孔径图像中所占的尺寸相近。在探地雷达合成孔径图像中,目标所反映的双曲线得到聚焦且接近目标的实际尺寸大小,因此可根据要探测目标的实际尺寸及相邻两个 A-scan 数据间的间隔距离确定窗口大小。设目标水平方向的尺寸为 T , 相邻两个 A-scan 数据间的间隔距离为 L , 则窗口大小为

$$S = T/L \quad (4)$$

一个 $M \times N$ 的 B-scan 数据共有 $N-S+1$ 个窗口,各个窗口所包含 A-scan 数据的序号分别是 $(1, 2, \dots, S), (2, 3, \dots, S+1), \dots, (N-S, N-S+1, \dots, N-2, N-1), (N-S+1, N-S+2, \dots, N-1, N)$ 。

(2) 计算各个窗口内的能量 计算式为

$$\text{ENG}_i = \sum_{m=1}^M \sum_{n=i}^{i+S} X^2(m, n) \quad (5)$$

其中 M 是 B-scan 数据的总行数, S 为窗口大小,亦即 A-scan 数据的个数, i 表示第 i 个窗口的起始位置, $X(m, n)$ 表示 B-scan 数据中的一个元素值, ENG_i 表示的是第 i 个窗口内所包含的 A-scan 数据的能量和。

(3) 计算所有窗口能量的平均值 计算式为

$$\text{ENG}_{\text{avg}} = \frac{\sum_{i=1}^{N-S+1} \text{ENG}_i}{N-S+1} \quad (6)$$

(4) 寻找出窗口能量中所有的极大值点 将每个窗口的能量值与前后两个窗口能量值相比较(第一个窗口与最后一个窗口除外),当大于前一个窗口的能量值,同时又小于后一个窗口的能量值时该窗口的能量即为极大值点。在数学上表示为

$$\text{ENG}_{i-1} < \text{ENG}_i < \text{ENG}_{i+1} \quad (7)$$

第一个窗口的能量值只与第二个窗口的能量值比较,当大于第二个窗口的能量值时,将其记入极大值点。最后一个窗口的能量值只与其前一个窗口的能量值进行比较,当大于前一个窗口的能量值时,将其记入极大值点。

(5) 将所有的能量极大值都分别与一个门限值相比较，当大于该门限值，则这个能量极大值点所对应的窗口为有目标窗口。

本文中该门限值取的是所有窗口能量的平均值 ENG_{avg} 。如果出现各个目标所在的窗口中包含有相同的 A-scan 数据这种情况，即各个目标所在的窗口有相互重叠的地方，则判断为那些包含相同 A-scan 数据的有目标的窗口反映的是同一个目标，这时目标的位置判断为在这些窗口所包含的所有 A-scan 数据上。

通过上述处理确定了目标在水平方向的位置，也就是确定了目标分布在哪些 A-scan 数据中，同时还确定了目标的个数。

确定目标在水平位置后，进一步要确定目标的埋地深度。确定目标的埋地深度是在上述确定目标水平方向的位置时所找出的有目标的 A-scan 数据中进行，基本步骤如下：

(1) 确定窗口大小及划分窗口 确定目标埋地深度时的窗口大小与确定目标在水平方向位置时的窗口大小表示的意义不同，确定水平方向位置时的窗口大小表示的是 A-scan 数据的多少，而确定深度方向位置时是在上述确定目标在水平方向找出的 A-scan 数据上划定窗口，所以其大小表示的是在一个 A-scan 数据中取多少个采样点数。设目标垂直方向的尺寸为 H ，一个 A-scan 数据中相邻两个采样点间的间隔距离为 R ，则窗口大小为：

$$P = H / R \tag{8}$$

一个 A-scan 数据共有 $M - P + 1$ 个窗口，各个窗口所包含的采样点序号分别是 $(1, 2, \dots, P), (2, 3, \dots, P + 1), \dots, (M - P, M - P + 1, \dots, M - 2, M - 1), (M - P + 1, M - P + 2, \dots, M - 1, M)$ 。

(2) 在每一个包含有目标的窗口内分别寻找能量最大的一个 A-scan 数据 能量最大的一个 A-scan 数据是聚焦能

量最多的地方，所以它能最真实地反映目标的深度。

(3) 对寻找到的各个 A-scan 数据，分别计算它们各个窗口内所包含采样点的能量 计算公式为

$$ENGA_{i,j} = \sum_{m=i}^{P-i+1} X_j^2(m) \tag{9}$$

其中 P 为窗口大小， i 表示第 i 个窗口的起始位置， j 表示的是第 j 个 A-scan 数据， $X_j(m)$ 表示的是第 j 个 A-scan 数据中的位于 m 处的一个元素值， $ENGA_{i,j}$ 表示的是第 j 个 A-scan 数据中第 i 个窗口内所包含采样点的能量和。

(4) 对寻找到的各个 A-scan 数据，分别找出它们各自的能量值最大的窗口，这些窗口的起始位置即为以 A-scan 数据采样点表示的各个目标的埋地深度位置。

4 对实测数据的处理结果及分析

作者编写了上述自动目标检测与定位方法的程序，并对 4 组不同的实测数据进行了处理。第 1 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；第 2 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；第 3，第 4 组数据为无目标数据(但它们采集的位置不同)，来自国外人道主义反雷技术研究中心。各组数据的参数如表 1 所示。

处理结果如下：第 1 组数据合成孔径处理前的熵为 2040，合成孔径处理后的熵为 795；第 2 组数据处理前的熵为 3912，处理后的熵为 2355；第 3 组数据处理前的熵为 777，处理后的熵为 1170；第 4 组数据处理前的熵为 753，处理后的熵为 1230。图 1 为处理第 2 组数据的结果，水平方向位置是以厘米为单位表示，深度方向以 A-scan 采样点为单位表示。与之相对应的其它组数据的处理结果为：第 1 组数据目标个数为 1，目标在水平方向 40-52cm 处，在深度方向第 99 个采样点以下；第 3，第 4 组数据无目标。

表 1 各组数据的参数

数据组数	A-scan 个数	采样点数	相邻两个 A-scan 间距	目标及尺寸	目标埋地深度
第一组	98	512	1cm	PMN2 地雷：直径 12cm, 高度 5.3cm	10cm
第二组	160	480	1cm	纸杯：直径 5.3cm, 高度 9.3cm 塑料瓶：直径 6.6cm, 高度 20cm 铁罐：直径 7.3cm, 高度 14.5cm 玻璃瓶：直径 5.5cm, 高度 16.8cm	纸杯：5cm 塑料瓶：12cm 铁罐：16cm 玻璃瓶：8cm
第三组	50	500	1cm	无	
第四组	50	500	1cm	无	

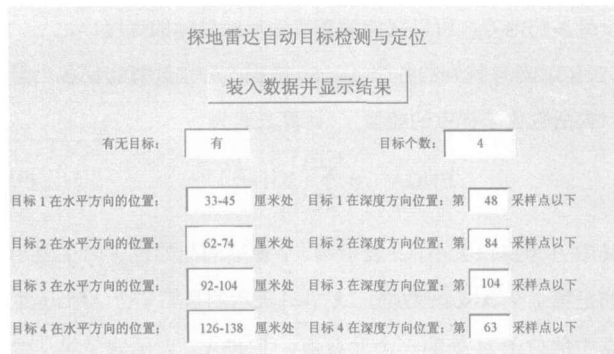
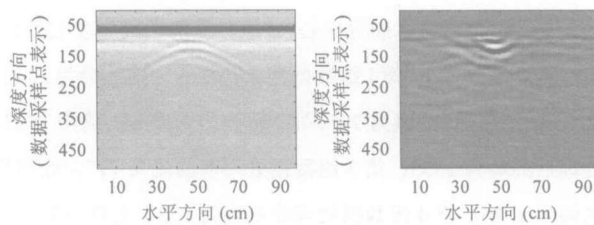
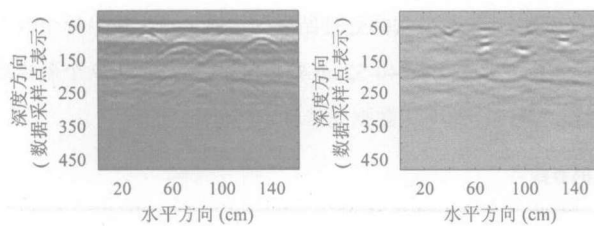
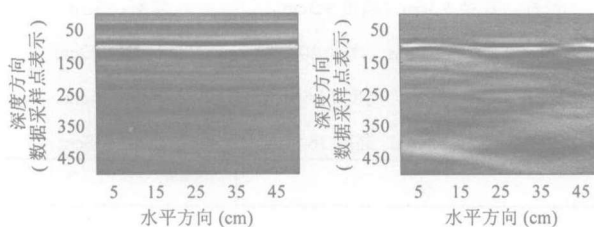
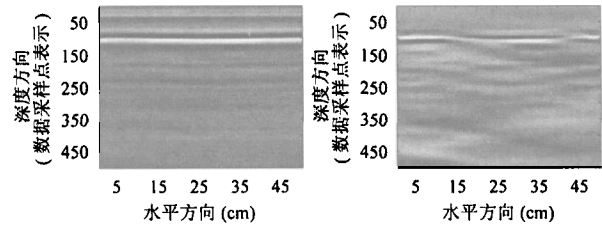


图1 所提方法处理第二组数据的结果

此外, 各组数据的相关图像如图2至图9所示。从原始图像及合成孔径处理后的图像可看出: 对于有目标的数据, 经合成孔径处理后, 反映目标的双曲线得到了聚焦, 图像的分辨力得到了较大的提高。将对各组数据的检测与定位结果与各组数据的参数描述及合成孔径处理后的图像对照可看出: 本文所提的基于图像熵变化及窗口能量检测的探地雷达自动目标检测与定位方法能正确的判断出目标的有无及目标的个数, 并且能正确的定位出目标在水平及深度方向的位置。

图2 原始图像
(第1组数据)图3 合成孔径处理后的
图像(第1组数据)图4 原始图像
(第2组数据)图5 合成孔径处理后的
图像(第2组数据)图6 原始图像
(第3组数据)图7 合成孔径处理后的
图像(第3组数据)图8 原始图像
(第4组数据)图9 合成孔径处理后的
图像(第4组数据)

5 结论

本文通过对探地雷达图像特性的分析, 提出了一种基于图像熵变化及窗口能量检测的探地雷达自动目标检测与定位方法。该方法具有实时性好, 定位精度较高等优点。通过对实测数据进行处理, 结果表明该方法具有较好的应用效果。

参考文献

- [1] Scheers B. Ultra-wideband ground penetrating radar with application to the detection of anti personnel landmines. [Ph.D thesis], Royal Military Academy, Brussels, 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.
- [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] Al-Nuaimy W, Huang Y, Nakhkash M, et al.. Automatic detection of buried utilities and solid objects with GPR using neural networks and pattern recognition[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2000, 43: 157 - 165.
- [6] Daniels D J. *Surface Penetrating Radar*[M]. London, UK: Published by IEE, 1996: 143 - 190.
- [7] 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.
- [8] Xu Xiaoyin, Miller E L. Entropy optimized contrast stretch to enhance remote sensing imagery[C]. *IEEE 16th International Conference on Pattern Recognition*, Quebec, Canada, 2002, Vol.3: 915 - 918.

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。

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。