

浅地层探地雷达合成孔径处理的一种快速算法¹

张立国 孔令讲 周正欧

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

摘要: 该文根据浅地层探地雷达回波信噪比较高的特征, 结合基于微波全息技术的 SA(Synthetic Aperture) 成像算法, 提出了一种基于 A 扫描能量进行自动目标方位识别、减少合成孔径运算量的快速算法。该算法简单、易实现。通过对实测数据进行处理, 所成图像与普通合成孔径算法成像基本相同, 但速度有了极大地提高。

关键词: 探地雷达, 合成孔径, 方位识别, 加窗运算

中图分类号: TN958, TN951 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)10-1645-05

A Fast SA Algorithm for Subsurface Penetrating Radar

Zhang Li-guo Kong Ling-jiang Zhou Zheng-ou

(The College of Electronic Engineering, UEST of China, Chengdu 610054, China)

Abstract This paper presents a fast SA(Synthetic Aperture) algorithm based on the high SNR of the subsurface Subsurface Penetrating Radar's (SPR's) reflecting signal and the SA algorithm of microwave holographic imaging. With this fast algorithm, the target azimuth is automatically detected and the amount of SA operating data is cut down. The algorithm is simple and easy to be realized. When the image is processed with the fast SA algorithm, the result is almost the same as the image processed with the general SA algorithm, but its processing speed is enhanced greatly.

Key words Subsurface Penetrating Radar (SPR), Synthetic aperture, Azimuth detecting, Operation in window

1 引言

浅地层探地雷达是对浅地层目标进行探测, 而且目标的体积一般都比较小。由电磁波的传播及反射理论, 探地雷达的发射电磁波在地面以下的最小波长应小于或相当于目标的最大物理尺寸, 否则那些远大于目标尺寸的波长能量几乎不被目标反射。因此浅地层探地雷达多是单周期窄脉冲超宽带 (UWB) 雷达以提高雷达的垂直分辨率^[1]。当需要对目标进行定位, 并且需要区分在同一深度的不同目标时, 探地雷达的方位分辨率是非常重要的。如果对探地雷达的回波数据不加处理直接成像, 目标在所成的二维图像中表现为双曲线, 方位分辨率很低。为了提高目标的水平分辨率, 可以对回波数据进行合成孔径处理^[2]。但是合成孔径需要完成大量的相关运算, 对探地雷达信号处理的实时性影响很大。所以目前合成孔径在探地雷达中还没有得到广泛的推广。

基于 stolt 偏移的 SA(Synthetic Aperture) 算法是一种基于 FFT 的合成孔径快速算法^[3], 但是合成孔径后垂直分辨率降低。在波速测不准的情况下, 目标的水平位置将发生偏移。另一种方法是利用神经网络与模式识别的方法来提取双曲线^[4], 再进行合成孔径。但算法比较复杂且需要大量的训练。本文结合基于微波全息成像的 SA 算法, 提出了一种基于 A 扫描能量进行

¹ 2003-06-06 收到, 2003-09-19 改回

目标方位识别、减少合成孔径运算数据量的快速算法。本算法简单、易实现，通过对一组实测数据进行处理，证明了本算法的有效性，大大提高了浅地层探地雷达信号处理的速度。

2 探地雷达微波全息成像原理 [1,5-7]

大多数探地雷达的工作方式都是发射天线和接收天线水平放置，沿着水平方向移进行工作。当收发天线共置时，收发天线和目标之间的几何关系如图 1 所示。假设天线位置是 $X_r = (x_r, y_r, 0)$ ，在 X_r 点接收的目标回波记为 $v(X_r, t)$ ，则在一系列接收点 $\{X_r\}$ 接收到的信号集为 $\{v(X_r, t)\}$ ；由费聂耳和基尔霍夫的衍射理论和球面波在损耗介质中的传播特征可以得到：

$$v(\mathbf{X}, t) = \frac{1}{2\pi c} \iint_S \frac{\cos \theta}{l^2} p(\mathbf{X}) u'(t - \frac{2l}{c}) dx dy \tag{1}$$

其中 $u'(t)$ 是发射脉冲 $u(t)$ 的一阶偏导数。 c 是电磁波在介质中的传播速度。 $\mathbf{X} = (x, y, z)$ 是目标表面的点， $l = |\mathbf{X} - \mathbf{X}_r|$ 是天线和目标表面反射点之间的距离。 θ 是电磁波入射方向与入射点处目标表面法线方向的夹角。 $p(\mathbf{X})$ 是目标表面 S 的反射波幅度。

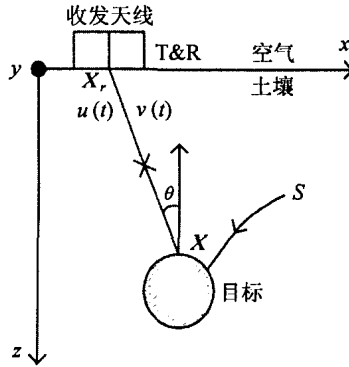


图 1 收发天线和目标之间的几何关系

如果只进行目标定位，可以假设目标表面 S 上的点 $\mathbf{X} = (x, y, z)$ 的法线方向垂直于记录孔径（只影响接收到的场强，不影响定位，目标的轮廓略有失真），则此方向余弦可以表示为 $\cos \theta = z/|\mathbf{X} - \mathbf{X}_r| = z/l$ 。从而有

$$v(\mathbf{X}_r, t) = \frac{1}{2\pi c} \iint_S \frac{z}{l^2} p(\mathbf{X}) u'(t - \frac{2l}{c}) dx dy \tag{2}$$

图像重建意味着从 $u(t)$ 和 $\{v(\mathbf{X}_r, t)\}$ 实现对 $p(\mathbf{X})$ 的估计。成像的基本原理是计算所有的回波信号和一个测试函数的相关，即

$$b(\mathbf{X}) = \iiint v(\mathbf{X}_r, t) h(\mathbf{X} - \mathbf{X}_r, t) dt dx_r dy_r \tag{3}$$

其中 $\mathbf{X} = (x, y, z)$ 是图像点的坐标向量； $v(\mathbf{X}_r, t)$ 是在 \mathbf{X}_r 所接收的信号； $h(\mathbf{X}, t)$ 是测试函数； $B(\mathbf{X})$ 被称为图像函数，也就是最终的合成图像。

假设天线只沿着 x 方向进行移动，定义：

$$w(\mathbf{X}_r, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} v(\mathbf{X}_r, \tau) h_1(t - \tau) d\tau \tag{4}$$

其中 $h_1(t)$ 为主要完成水平向压缩的测试函数因子。如果只关心水平向的压缩, 则根据文献 [1] 的推导可将式 (3) 简化为

$$b(\mathbf{X}) = \int_{-\infty}^{+\infty} w(\mathbf{X}_r, 2|\mathbf{X} - \mathbf{X}_r|/c) \frac{z^3}{|\mathbf{X} - \mathbf{X}_r|} dx_r \quad (5)$$

从式 (4) 和式 (5) 中可以看出, 如果对每一帧的所有数据 (M 行, N 列的二维矩阵) 进行合成孔径必须完成 $M \times N \times N$ 次循环, 其中包含大量的冗余信息 (离目标点较远, 与目标相关性较小或不相关的数据), 这将极大地耗费信号处理的运算时间, 影响系统的速度。本文提出浅地层探地雷达合成孔径的一种快速算法。该算法经过少量的训练之后便可以自动地识别目标方位。仅在目标存在处周围的二维窗口中做合成孔径处理。

3 浅地层探地雷达合成孔径快速算法

本文所涉及的探地雷达为浅地层探地雷达, 浅地层目标的回波较强 [8]。由此可以根据 A 扫描的能量来检测目标的存在并估计目标的水平位置。

3.1 目标的检测与水平位置估计

对每个 A 扫描求能量和, 整个 B 扫描组成一个 A 扫描的能量向量 $E[N]$ 。在目标出现的位置, 能量向量相应的位置就会出现极大值。通过这些极值点来发现目标并确定目标的水平位置。虽然在合成孔径之前已做了背景去除的处理, 但是由于存在残余的背景噪声, 给寻找这些目标的能量极点造成一定的困难, 所以必须对能量向量作一些预处理。

首先去除叠加在能量向量曲线上的一些小的尖峰, 如果不加去除, 这些小尖峰在目标识时将被误认为是目标。可以通过对能量向量进行低通滤波实现。算法如下:

$$E_0(n) = \sum_{k=0}^{K-1} E(n-k)h(k), \quad n = 1, \dots, N-1 \quad (6)$$

其中 $E_0[N]$ 为能量曲线滤波输出向量, K 为 FIR 滤波器的抽头数, $h(k)$ 为滤波器的系数。滤波器的参数要经过实测数据的训练得到。值得注意的是在对能量向量曲线低通滤波后, 目标的水平位置要有一个固定的延迟, 必须予以校正。

其次为了去除没有目标时背景噪声的干扰, 必须通过一定的训练设定一个门限 TH, 只有大于 TH 的极点才认为是目标。被判定为目标的 A 扫描能量极大值点必须满足以下条件:

$$\begin{cases} E_0(i) > \text{TH} \\ E_0(i) > E_0(i-1) \\ E_0(i) > E_0(i+1) \end{cases} \quad (7)$$

在能量向量 $E_0[N]$ 中如果能够找到这样的极大值点, 则证明该帧数据中存在目标。这样便可以继续完成以下的加窗合成孔径运算。反之, 如果找不到这样的极点, 则证明该帧数据中没有目标, 省去合成孔径运算。

3.2 合成孔径水平窗口的设置

在浅地层目标存在的情况下, 合成孔径运算数据量的减少是通过仅计算目标周围二维窗口内的数据来实现的。由探地原始数据图像可知, 目标表现为双曲线。所以在水平方向上目标双曲线以外的数据与目标的相关性很小或无相关性。以能量极大值点确定的列为中心, 用能量曲线极值点两侧两个半功率点间的长度的两倍去估计的双曲线的宽度做一个水平窗。该窗即为合成孔径水平窗口。

3.3 合成孔径垂直窗口的设置

在实际的探测中，天线一般置于小车上，天线与地面保持恒定的高度。在系统校准时记录下地面回波所在的采样点数，即为地面所在行。在做合成孔径时将该行作为起始行，即为垂直窗口的行上限。

本文采用均值法去除地面的强干扰与背景噪声。在均值去背景的过程中，要对每一帧数据的行求均值，组成一个均值向量 $A[M]$ 。通过一定的训练设定一个门限 DL 来获取合成孔径的垂直窗口的行下限 DR 。算法流程如图 2 所示。从 $A[M]$ 的最后一个元素开始，对 $A[M]$ 的

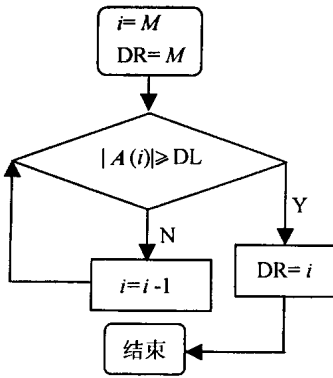


图 2 寻找行下限的流程

元素 $A(i)$ 取绝对值并与 DL 进行比较。如果 $|A(i)| < DL$ 则继续比较 $|A(i-1)|$ 与 DL 。直到 $|A(i)| \geq DL$ 为止，并将这个 i 作为合成孔径垂直窗口的下限 DR 。本文认为 DR 以下不存在目标。有了行上限、行下限便实现了合成孔径的垂直窗口。

实现了目标的自动检测与二维窗口的设置之后，便可以用文献 [1] 中的普通合成孔算法在此二维窗口中对数据进行合成孔径处理。

4 所提算法对实测数据的处理

本算法所采用的数据为北京某公司的进口下视探地雷达在电子科技大学操场的沙坑中作的下视多目标成像实验中取得。原始数据图像如图 3 所示。图中成像的物体由左到右分别是：纸杯、塑料瓶、铁罐、玻璃瓶。均值去背景后如图 4 所示。

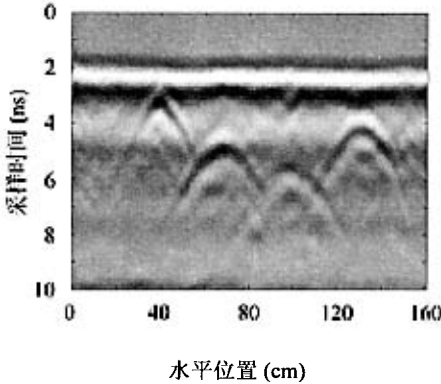


图 3 原始数据图像

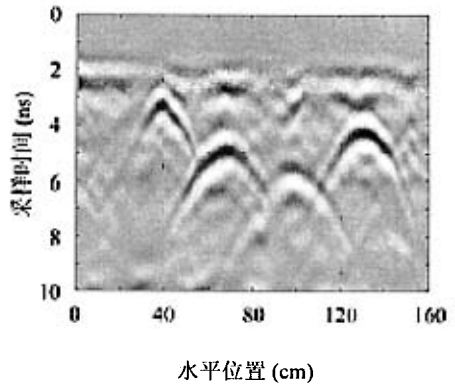


图 4 均值去背景后图像

快速算法与普通算法合成孔径后的结果分别如图 5、图 6 所示。可见两种算法的图像基本相同。

下面将快速算法与普通算法的运算速度进行比较。比较的硬件平台为 PC 电脑，赛扬 IV 1.7G CPU，256M 内存。程序用标准 C 编写。

应用普通算法完成本实验 1 帧数据 (1 帧数据为 480×160 点，四个浅地层目标) 的背景去除与合成孔径处理耗时 22s。而应用本文所提出的快速算法完成同样的处理仅耗时 1s，速度提

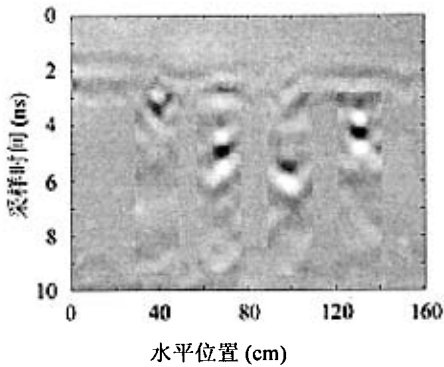


图 5 快速算法合成孔径后的图像

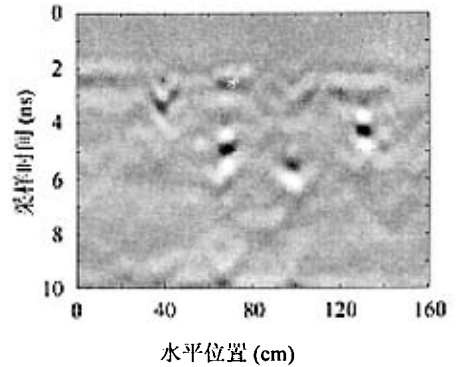


图 6 普通算法合成孔径后的图像

高了 22 倍。本算法只在存在目标时才作合成孔径处理, 如果数据中目标数少于 4 个, 改善的效果会更加明显。

5 结束语

从上面的分析可以看出, 本文提出的基于微波全息成像的 SA 快速算法能够有效的进行自动目标方位识别、减少合成孔径运算数据量。通过对实测数据处理结果的对比得知, 快速算法与普通合成孔径算法处理后的图像基本相同, 而速度却有极大地提高。由此证明了该快速算法的有效性。本文测试数据环境较单纯, 有效性的适用范围将在后续工作中加以验证。

参 考 文 献

- [1] 孔令讲, 周正欧. 浅地表探地雷达中改善成像分辨率的一种有效方法. 信号处理, 2002, 18(6): 505-508.
- [2] Gunawardena A, Longstaff D. Wave equation formulation of synthetic aperture radar (SAR) algorithms in the time-space domain. *IEEE Trans. on GRS*, 1998, 36(6): 1995-1999.
- [3] Xu X, Miller E L. A statistical method to localize buried landmines from GPR array measurement. *Proc.SPIE*, 2001, Vol.4394: 742-753.
- [4] Al-Nuaimy W, Huang Y, Nakhkash M, Fang M T C, Nguyen V T, Eriksen A. Automatic detection of buried utilities and solid objects with GPR using neural networks and pattern recognition. *Journal of Applied Geophysics*, 2000, 43(2-4): 157-165.
- [5] Brunzell H, Detection of shallowly buried objects using impulse radar, *IEEE Trans. on GRS*, 1999, 37(2): 875-886.
- [6] Duflos E, Hervy P, Nivellet F, Perrin S, Vanheeghe P. Time-frequency analysis of ground penetrating radar signals for mines detection applications. *Processings of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, Tokyo, 1999, 1: 520-525.
- [7] Daniels D J. *Surface-Penetrating Radar*. London: The Institution of Electrical Engineers, 1996: 142-190.
- [8] 孔令讲, 周正欧. 浅层探地雷达波速测量方法研究. 电子学报, 2002, 30(9): 1330-1332.

张立国: 男, 1978 年生, 硕士生, 主要从事探地雷达 SA 成像算法及实现的研究。

孔令讲: 男, 1974 年生, 博士生, 主要从事雷达信号处理、数据传输、探地雷达 SA 成像算法的研究。

周正欧: 男, 1940 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事雷达信号处理、数据传输、光传输等领域的研究。