

# 浅地层探地雷达波速估计和成像方法的研究

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

**摘要** 在分析探地雷达图像特点的基础上,将图像处理方法应用于雷达波速估计和合成孔径成像,提出了基于模板匹配的浅地层探地雷达波速估计方法和基于图像分割的快速合成孔径成像方法;实测数据的处理结果验证了该方法的可行性和有效性。

**关键词** 探地雷达, 模板匹配, 波速估计, 合成孔径

中图分类号: TN959.71

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)11-2003-04

## Research on Wave Velocity Estimation for Ground Penetrating Radar

Hu Jin-feng Kong Ling-jiang Zhou Zheng-ou

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

**Abstract** The estimation of the wave velocity underground and synthetic aperture imaging are two of the key issues in the research of ground penetrating radar (GPR). In this paper the image processing methods are introduced into the GPR velocity estimation and synthetic aperture imaging based on the characteristic of the GPR image. A new GPR velocity estimation method is proposed based on template matching and the fast synthetic aperture imaging method is proposed based on the image segmentation. The experimental result shows that the methods proposed are effective.

**Key words** Surface penetrating radar, Template matching, Wave velocity estimation, Synthetic aperture

### 1 引言

探地雷达广泛应用于国防和国民经济建设<sup>[1-4]</sup>。对地下目标定位是探地雷达的基本功能和主要用途<sup>[1]</sup>,例如:探测地下电缆、水气管道,探测地雷等,需要准确的确定目标位置,波速估计是目标准确定位的基础。

探地雷达探测地雷等目标时,目标图像呈双曲线,且对于一定埋深的目标,双曲线的形状由波速决定<sup>[2]</sup>,因此可以用不同的波速生成回波模板,然后用模板来匹配雷达图像,与雷达图像匹配最好的模板所对应的波速就是雷达波速。

探地雷达通过合成孔径成像来提高分辨率,基于微波全息成像的合成孔径方法能获得较好的分辨率,但处理速度较慢<sup>[3,4]</sup>。本文在合成孔径运算前先用域值方法分割雷达图像<sup>[6,7]</sup>,将目标图像从背景图像中分割出来,从而得到一种快速的全息合成孔径成像方法。最后用实验数据验证了所提方法的可行性和有效性。

### 2 探地雷达图像特点<sup>[2,8]</sup>

探地雷达数据有A扫描、B扫描和C扫描三种形式<sup>[4]</sup>。如图1,假设雷达收发天线共置。雷达在地面上某一点探测得到一个A扫描数据,雷达沿水平方向移动探测得到二维B扫描数据,相邻的多个B扫描数据组成一个C扫描数据,水平轴和垂直轴分别指示目标的水平位置和用采样点表示的深度。假设介质是均匀的,因此波速是常数,对浅地层目标

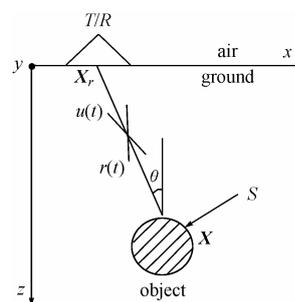


图1 目标和雷达之间的几何关系示意图<sup>[4,8]</sup>

Fig.1 GPR imaging configuration

这种假设更加合理<sup>[2]</sup>。设天线位置是  $\mathbf{X}_r = (x_r, y_r, 0)$ , 目标在  $\mathbf{X} = (x, y, z)$  处, 从目标到天线的距离用  $l$  表示<sup>[8]</sup>:

$$l = |\mathbf{X} - \mathbf{X}_r| = \sqrt{(x - x_r)^2 + (y - y_r)^2 + z^2} \quad (1)$$

则脉冲回波的响应时间  $t(x)$  为

$$t(x) = 2l/v = 2\sqrt{(x - x_r)^2 + (y - y_r)^2 + z^2}/v \quad (2)$$

其中  $v$  是电磁波在介质中的传播速度。

式(2)说明目标的雷达回波图像是双曲线,曲线形状由目标深度  $z$  和波速  $v$  决定。设双曲线顶点的回波延时为  $t_0$ , 则目标深度为

$$z = t_0 v / 2 \quad (3)$$

### 3 波速估计方法

由于波速只能在一定范围内变化<sup>[1]</sup>,因此对于雷达图像中某一确定的目标,可以用试验波速生成曲线模板,然后用模板来匹配目标的雷达图像,匹配最好的模板对应的波速就

是雷达波速。

### 3.1 目标回波图像矩阵的选取

假设雷达中的目标回波曲线的图像为  $\mathbf{T}[M, N]$ ，均值和方差分别是  $\mu_T$  和  $\sigma_T$ 。矩阵  $\mathbf{T}[M, N]$  是这样得到的：在经过杂波抑制后的雷达图像中，首先寻找目标回波曲线的顶点，然后以该顶点为基点，用矩形框在雷达图像中选取一个子图像，该子图像就是  $\mathbf{T}[M, N]$ 。所选子图像应该将雷达目标回波双曲线的能量较强的部分包含进去。

寻找目标回波曲线顶点的方法是：首先对雷达  $\mathbf{B}$  扫描数据进行杂波抑制，在有效抑制杂波后，目标回波信号就成为雷达图像中最强的信号成份。本文中用到的深度都是相对深度。寻找杂波抑制后的图像中幅度最大点，该点不一定是目标回波曲线的顶点，但目标回波曲线的顶点通常在该点附近。寻找该点附近的每个  $\mathbf{A}$  扫描中的最大值对应的延时，在这些延时中最小延时所在  $\mathbf{A}$  扫描就是双曲线回波顶点所在  $\mathbf{A}$  扫描(如果有多个，则取中间的那个  $\mathbf{A}$  扫描)，该最小延时就是双曲线顶点的回波延时。

### 3.2 模板生成方法

通常的模板生成方法是：对多个实测模板取平均并重采样<sup>[5]</sup>。对于探地雷达波速估计，这种模板生成方法无法实现。这里生成模板过程如下：

(1) 设定试验速度<sup>[1]</sup> 设试验速度  $v = v_{\min} + n\Delta v$ ,  $n = 1, 2, \dots, N$ 。其中  $\Delta v$  是扫描步距，按照要求的波速估计精度选取；由于地下的介电常数通常在  $1 \sim 81$  之间，因此雷达波速  $v$  在  $3.4\text{cm/ns} \sim 30\text{cm/ns}$  之间。不同的土壤类型，波速  $v$  都有一些典型值，如果  $v$  只在这些典型值附近取值将可以减少计算量。

(2) 确定目标深度  $z$ <sup>[2]</sup> 用 3.1 节所述方法确定雷达图像中双曲线顶点的延时，然后按照式(3)计算深度  $z$ 。

(3) 生成模板 根据文献[8,9]的推导，假设  $p(\mathbf{X})$  是目标表面的复幅度反射，则由费涅耳和基尔霍夫的衍射理论及球面波在介质中的传播特征得到雷达在不同位置接收到的目标信号为<sup>[8,9]</sup>

$$r(\mathbf{X}_r, t) = 1/(2\pi v) \iint_S \frac{z}{l^3} p(\mathbf{X}) u' \left( t - \frac{2l}{v} \right) dx dy \quad (4)$$

式(4)中的积分只和  $p(\mathbf{X})$  有关，即  $1/(2\pi) \iint_S p(\mathbf{X}) \cdot dx dy = \text{const}$ <sup>[9]</sup>。上式说明目标表面  $S$  上一个小面积( $dx dy$ )的散射点的散射信号与发射信号的延时的导数  $u'(t - 2l/c)$  成正比<sup>[9]</sup>。将试验速度  $v$  和目标深度  $z$  以及式(2)代入式(4)，可以求得雷达天线在一系列位置的接收信号。设计算出来的接收信号矩阵为  $\mathbf{H}[M, N]$ ，该矩阵就是生成的矩阵模板：

$$\mathbf{H}[i, j] = r(\mathbf{X}_r, t) = \frac{1}{v} \frac{z}{l^3} u' \left( t - \frac{2l}{v} \right) \text{const} \quad (5)$$

其中  $t = dt \cdot j$ ,  $dt$  是采样时间间隔， $\mathbf{X}_r = dx \cdot i$ ,  $dx$  是雷达水平采样间隔。const 可以取任意常数，不影响生成的模板中的双曲线形状。每个试验波速对应一个模板。

### 3.3 匹配算法

雷达的目标回波图像和生成的对应模板之间的匹配度定义为两个图像的相关系数：

$$\gamma(\mathbf{T}, \mathbf{H}) = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (\mathbf{T}[i, j] - \mu_T)(\mathbf{H}[i][j] - \mu_H)}{MN\sigma_T\sigma_H} \quad (6)$$

用式(6)计算每个速度模板对应的匹配度，最大匹配度对应的波速就是波速估计值。根据式(6)中相关系数的定义，匹配度只和两个图像的形状有关，因此式(5)中的 const 取值不影响匹配度的值。

## 4 快速合成孔径成像方法<sup>[3,4,6,7]</sup>

探地雷达图像可以看成普通的灰度图像，图像分割方法可以将雷达图像分割成目标图像区域和背景图像区域。合成孔径运算时，只对目标图像区域的点集进行计算则可以大大减少计算量，并且与普通合成孔径成像方法相比，所得图像的分辨率相当。

全息合成孔径成像原理和算法可参见文献[8]：

$$b(\mathbf{X}) = \int_{-\infty}^{+\infty} w(\mathbf{X}_r, 2|\mathbf{X} - \mathbf{X}_r|/v) \frac{z^3}{|\mathbf{X} - \mathbf{X}_r|^3} dx_r \quad (7)$$

其中  $b(\mathbf{X})$  是对  $p(\mathbf{X})$  的估计， $w(\mathbf{X}_r, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} r(\mathbf{X}_r, \tau) \cdot h_1(t - \tau) d\tau$ ,  $h_1(t - \tau)$  主要实现距离向压缩。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，此时可近似认为  $w(\mathbf{X}_r, t) = r(\mathbf{X}_r, \tau)$ 。式(7)中的延时  $2|\mathbf{X} - \mathbf{X}_r|/v$  由式(2)求得。

全息合成孔径成像的具体实现可认为是对  $\mathbf{B}$  扫描数据中的每一个点，将以该点为中心的沿式(2)描绘的双曲线路径上的数据进行加权累加。由于合成孔径处理时的有用数据是目标回波数据。若在合成孔径成像时只用目标回波数据运算，表现在式(7)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。

$\mathbf{P}$ -tile 图像分割法是运算量最小的图像分割方法<sup>[6,7]</sup>。 $\mathbf{P}$ -tile 法假设在亮(灰度级高)背景中存在一个暗(灰度级低)目标，并且已知目标在整幅图中所占面积比为  $P\%$ 。该方法选择阈值的原则是，依次累计灰度直方图，直到该累计值大于或等于目标所占面积，此时的灰度级即为所求的阈值。

由于探地雷达图像中，通常灰度级最高和最低的都是目标，而背景的灰度级通常处在中间，因此对于探地雷达图像不能直接应用  $\mathbf{P}$ -tile 方法进行图像分割。这里提出一种类似于  $\mathbf{P}$ -tile 的图像分割方法：

设杂波抑制后的雷达图像是  $\mathbf{S}(x, y)$ ，雷达探测时，均匀的地背景通常反射的回波信号很弱，而目标信号反射的回波很强，可以根据这个特点用域值法分割雷达图像。设图像分割后的图像为  $\mathbf{S}'(x, y)$ ， $\text{th}$  是图像分割的阈值，则：

$$S'(x, y) = \begin{cases} S(x, y), & |S(x, y)| \geq th \\ 0, & |S(x, y)| < th \end{cases} \quad (8)$$

式 (8) 中  $S'(x, y) = 0$  的区域是没有目标的区域； $S'(x, y) = S(x, y)$  的区域是可能有目标信号的区域。只对可能有目标的区域合成孔径，因而可以减少计算量。域值  $th$  根据雷达数据的特点取值。研究表明，探地雷达图像中目标回波数据区域所占的比例通常小于 2%<sup>[4]</sup>。考虑到地表杂波等成分要占一定的区域，为了尽可能多地保留目标回波数据，同时又能较好地减少计算量，这里选取的域值  $th$  使可能存在目标信号的区域等于或稍大于 10%。域值的选取是一个类似 P-tile 方法的自适应过程。

### 5 实测数据计算及结果分析

数据来自反雷研究中心<sup>[2]</sup>。直径 12cm，高 53cm 的 PMN-2 雷埋藏于地下 10cm 深处，一个雷达 B 扫描包括 98 个 A 扫描，每个 A 扫描记录 512 个数据点。图 2 是雷达探测图。图 3 是抑制杂波后的图像<sup>[2]</sup>。

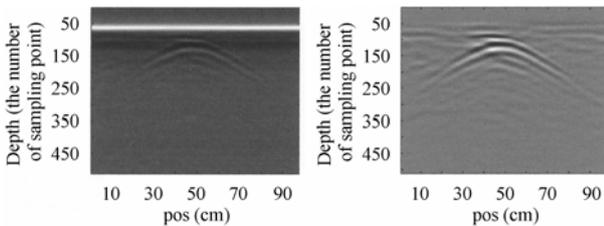


图 2 地雷的雷达图像 Fig.2 The GPR image of PMN-2  
图 3 抑制杂波后的图像 Fig.3 After removing clutter

根据 3.1 节中所述方法生成的目标曲线模板如图 4。根据雷达图像中目标回波曲线的大小，确定子图像 T 的大小。用所提方法创建大小为 70×35 的模板并对图 3 中的目标回波曲线用式(6)进行匹配计算，计算出来的匹配度图如图 5；当选取的模板大小为 512×98 时，匹配度图如图 6。

图 5 和图 6 中匹配度最大值对应的波速都是  $v = 16.00\text{cm/ns}$ ，匹配度曲线的形状也相近，说明在子图像 T 包含目标双曲线的能量较强部分的前提下，子图像 T 的大小对计算的匹配度图基本上没有影响，因而不影响估计的波速值。双曲线顶点和地表回波的相对延时为 1.25ns，则所提方法估算的目标深度为 10.00cm，比较贴近实际埋深<sup>[2]</sup>。用估计的波速对图 3 用普通全息合成孔径成像算法进行合成孔径处理的结果如图 7。图 7 表明，所提方法估计的波速能使图像较好的聚焦。

对图 3 用所提方法进行图像分割后如图 8。对图 8 快速合成孔径成像的结果如图 9。仿真程序都用 matlab6.5 编写，在同一台 PC 机上仿真，普通合成孔径成像方法处理时间为 73.86s(对图 3 合成孔径处理时间)，所提快速合成孔径成像方法处理时间为 5.69s(包括对图 3 的图像分割、快速合成孔径处理所用的总时间)。

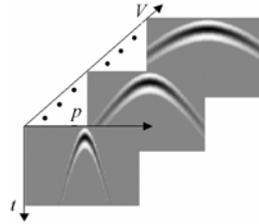


图 4 用试验速度生成的模板

Fig.4 Constructing templates with trial velocity

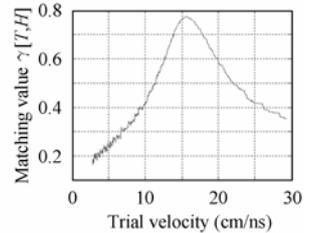


图 5 模板大小为 70×35 时的速度——匹配度图

Fig.5 Velocity-matching value(template is 70×35)

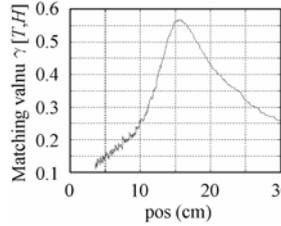


图 6 模板大小为 512×98 时的速度——匹配度图

Fig.6 The size of template is 70×35

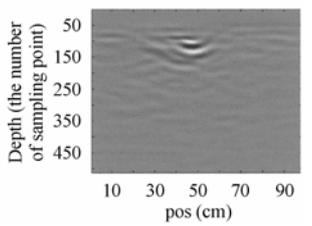


图 7 用估计的波速合成孔径后的图像

Fig.7 Synthetic aperture imaging with velocity estimated

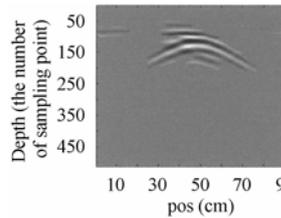


图 8 用图像分割后的图像

Fig.8 After image segmentation

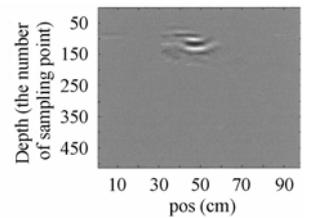


图 9 快速合成孔径成像结果 (第 1 组数据)

Fig.9 After fast synthetic aperture imaging

### 6 结束语

基于雷达图像的特点，将模板匹配方法用于雷达波速估计，得到了基于模板匹配的波速估计方法；将图像分割方法用于合成孔径成像处理，得到快速合成孔径成像方法。对实测数据处理结果证明了所提方法的可行性和有效性。

### 参考文献

- [1] 张安学，将延生，汪文秉. 探地雷达频率波数域速度估计和成像方法的试验研究[J]. 电子学报, 2001, 29(3): 315-317.
- [2] 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.
- [3] 张立国，孔令讲，周正欧. 浅地层探地雷达合成孔径处理的一种快速算法[J]. 电子与信息学报, 2004, 26(10): 1645-1649.
- [4] 张春城，孔令讲，周正欧. 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[J]. 电子与信息学报, 2005, 27(11): 1790-1794.

- [5] 梁路宏等. 基于多关联模板匹配的人脸检测[J]. 软件学报, 2002, 12(1): 94-102.
- [6] 韩思奇, 王蕾. 图像分割的域值法综述[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(6): 91-102.
- [7] 王爱民, 沈兰荪. 图像分割研究综述[J]. 测控技术, 2000, 19(5): 1-16.
- [8] 孔令讲, 周正欧. 浅地层探地雷达中改善成像分力的一种有效方法[J]. 信号处理, 2002, 18(6): 505-508.
- [9] Osuni N, Ueno K. Microwave holographic imaging method with improved resolution [J]. *IEEE Trans. on AP*, 1984, AP-32(10): 1018-1026.
- 胡进峰: 男, 1976年生, 博士生, 现从事探地雷达信号处理方面的研究.
- 孔令讲: 男, 1974年生, 讲师, 现从事探地雷达、机载雷达、星载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, 目前从事探地雷达数据、传输等方面的研究.