

# 表层穿透雷达递归反向投影成像算法

雷文太, 粟毅, 黄春琳

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

**摘要:** 本文提出了一种冲激脉冲表层穿透雷达 (Impulse Surface Penetrating Radar, 简称 ImpSPR) 递归反向投影 (Back Projection, 简称 BP) 成像算法. ImpSPR 应用中, 高精度实时成像是进行表层下目标探测最直接和有效的手段. 基于“延迟求和”处理的时域 BP 成像算法可以对成像区域完成精确聚焦, 得到高质量的雷达图像. 然而由于其巨大的运算量, 难以应用于 ImpSPR 系统的实时处理中. 本文在对 BP 算法详细分析的基础上, 建立了算法的递归模型, 导出了递归 BP 算法的处理流程并对其运算量进行了分析. ImpSPR 实测数据处理结果表明, 递归 BP 成像方法可以大大降低运算量, 有效的运用于 ImpSPR 系统实时处理中, 同时也可用于机载合成孔径雷达系统.

**关键词:** 冲激脉冲表层穿透雷达; 反向投影; 实时成像

**中图分类号:** TN957.52<sup>+</sup>2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2005) 12-2115-05

## Surface Penetrating Radar Recursive Back Projection Imaging Algorithm

LEI Wen tai, SU Yi, HUANG Chuan lin

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract:** A recursive back projection (BP) imaging algorithm is presented. Real time imaging is an intense demand but a challenging task in impulse surface penetrating radar (ImpSPR)'s application. Based on 'delay sum' operation in time domain, BP imaging algorithm can precisely focus scattering intensity and obtain high quality subsurface profile. But its heavy computation load restricts its application in ImpSPR's real time processing. After analyzing BP imaging procedure, a recursive model of this imaging algorithm is established and recursive BP imaging algorithm is deduced subsequently. The computation complexity of both original BP imaging algorithm and recursive BP imaging algorithm are analyzed. Through processing experimental data obtained by a ImpSPR system RadarEye, the recursive BP imaging algorithm validate its capability at the aspect of ImpSPR's real time processing.

**Key words:** impulse surface penetrating radar; back projection; real time imaging

## 1 引言

ImpSPR 是利用超宽带冲激电磁脉冲实现表层下目标探测的, 广泛应用于地质勘探、考古、城市建设、交通、军事等部门<sup>[1,2]</sup>. ImpSPR 系统的实时处理能力可以实现在数据采集的同时观察处理结果, 并作出判决. 这对某些应用是必须的功能. 系统的实时处理不仅依赖系统硬件的并行化设计、高速器件处理能力, 更依赖于信号处理技术的冗余分析、优化设计和高效实时处理算法.

运用成像技术反演区域内电磁异常是 ImpSPR 应用中最直观和有效的手段. BP 算法是一种时域成像处理算法. 与频率波数域偏移成像 ( $f-k$ ) 算法相比, BP 算法可以精确计算电磁波在雷达天线和区域目标之间的传播路径, 补偿有耗媒质对电磁波的衰减造成的目标散射强度畸变, 还可以保留目标的谐振信息便于进行目标识别<sup>[3]</sup>. 但巨大的运算量一直是 BP

算法不能应用于实时成像处理的瓶颈.

## 2 ImpSPR BP 成像算法

ImpSPR 的数据采集方式和合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, 简称 SAR) 基本相同. 确定好探测区域和空间分辨需求后, 即可选用合适的收/发组件 (脉冲源, 收/发天线) 沿一维曲线或二维曲面进行合成孔径扫描. 在每一孔径点处, ImpSPR 以固定的脉冲重复频率进行多次发射并以固定的时窗长度和时间采样间隔进行接收, 接收到的多次回波信号进行平均以抑制高频噪声. 这样在每一孔径点处都可以得到一个脉冲信号. 将这些脉冲信号沿各孔径点的空间相对位置依次排列起来就形成了原始记录剖面, 其中一维是时间, 另一维是空间. 其成像特点与 SAR 成像也有相同之处. BP 成像算法可以概括为“延迟-相加”, 即通过精确计算成像区域各点所对应的时延曲线或曲面, 沿该曲线或曲面对原始记录剖面上的回

收稿日期: 2004-11-12; 修回日期: 2005-07-08

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 课题 (No. 2001AA132020)

波幅值进行叠加即可得到该点处的目标散射强度值。ImpSPR 应用中,当雷达天线与地面有一定距离时,发射信号在空气中传播一段时间后进入地下的,目标散射信号是在地下传播一段时间后进入空气的,都相当于波在分层媒质中的传播。在探测有耗媒质中的目标时,目标回波受媒质电磁特性的影响衰减很大。对 ImpSPR 而言,目标一般位于天线近场区,必须考虑球面波的衰减效应<sup>[4]</sup>。

建立 ImpSPR 扫描模型如图 1 所示。天线位于空气中,距探测区域表层高度为  $h_a$ ,沿  $x$  方向对探测区域进行一维横向扫描。空气介电常数  $\epsilon_1 = \epsilon_0$ ,磁导率  $\mu_1 = \mu_0$ ,电导率  $\sigma_1 = 0$ , $\epsilon_0$  和  $\mu_0$  分别表示真空中的介电常数和磁导率。目标位于表层下,探测区域的电磁特性可表示为  $\epsilon_2 = \epsilon_0 \epsilon_r$ ,磁导率  $\mu_2$ ,电导率  $\sigma_2$ 。

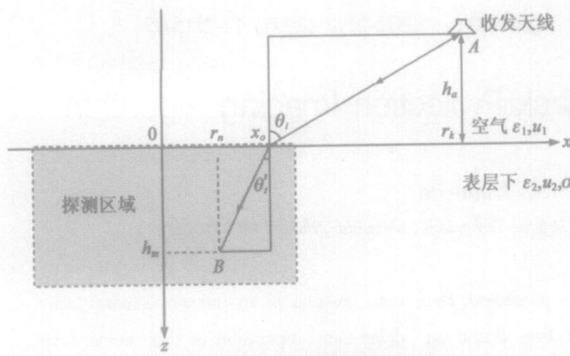


图 1 ImpSPR 电磁波传播示意图

对某一确定的像点  $(r_n, h_m)$  和天线位置  $(r_k, -h_a)$ ,电磁波在 AB 之间传播要满足修正折射定律  $\frac{\sin\theta_i}{\sin\theta_r} = \frac{\sin\theta_i}{\sin\theta_r} = \frac{\eta}{k_1}$ 。由三角关系,可得入射点的横坐标  $x_0$  要满足方程

$$\frac{(r_k - x_0)^2}{(r_k - x_0)^2 + h_a^2} \cdot \frac{h_m^2}{(x_0 - r_n)^2} = \left(\frac{\eta}{k_1}\right)^2, \quad x_0 \in [\min(r_n, r_k), \max(r_n, r_k)] \quad (1)$$

其中,  $\eta$  和  $k_1$  是角频率  $\omega$ 、媒质电磁参数  $(\mu_2, \epsilon_2, \sigma_2)$  的函数<sup>[4]</sup>。当目标位于有耗媒质中时,电磁波传播过程中的衰减效应主要包括以下几个方面:天线到地面的传播衰减  $L_{air}$ ,交界面的传播损耗  $T_{trans}$ ,土壤中的传播损耗  $L_{soil}$ <sup>[4]</sup>。从而,双程传播路径总的传播损耗可表示为:

$$L_{total} = (L_{air} T_{trans} L_{soil})^2 \quad (2)$$

当媒质电磁特性  $(\epsilon_2, \mu_2, \sigma_2)$  已知,成像区域中任一点  $(m, n)$  的坐标和第  $k$  个阵元的位置确定后,式(1)和(2)中的所有参数均可得到。对有耗媒质中的目标,由于时延和衰减都是频率的变量,因此“延迟-相加”聚焦处理需要先在频域进行,再对多个频率点得到的目标散射强度值进行相加。以 ImpSPR 二维扫描为例,记  $p(x) = [p_1(t) p_2(t) \dots p_x(t) \dots]$  表示原始记录剖面,  $q(x) = [q_1(z) q_2(z) \dots q_x(z) \dots]$  表示区域成像结果。其中  $p_x(t) = [p_x(0) p_x(\Delta t) \dots p_x((T-1)\Delta t)]^T$  表示第  $x$  道时

域采样数据,采样间隔为  $\Delta t$ ,采样长度为  $T$ ;  $q_x(z) = [q_x(0) q_x(\Delta z) \dots q_x((M-1)\Delta z)]^T$  表示第  $x$  列区域成像结果,深度方向采样间隔为  $\Delta z$ ,采样长度为  $M$ 。由于在整个合成孔径扫描过程中时间维矢量保持不变,同时实时成像处理也是在确定不变的空间深度维矢量的前提下进行的,因此后续的推导均略去矢量  $p(x)$  和  $q(x)$  各自的时间维矢量和空间深度维矢量的符号表示,而只关注这两个矢量的空间横向矢量  $x$  的符号表示。从而 ImpSPR BP 算法可表示为  $q(x) = \overline{\Psi}[p(x)]$ ,其中算子  $\overline{\Psi}$  可表示为矩阵集的形式:  $\overline{\Psi} = [\Psi_{m,n}]$ ,  $m, n$  分别表示成像区域的横向和纵向采样,即成像区域的每一点都对应一矩阵。单元矩阵  $\Psi_{m,n}$  的具体实现为<sup>[4]</sup>:

$$q(m, n) = \Psi_{m,n}[p(x)] = \sum_r \sum_k F_r[p(x_k)] \cdot \cos(\omega_r \tau_{m,n,k,r}) \quad (3)$$

其中  $F[p(x_n)] = \int p_x(t) \cdot e^{-j\omega t} dt$  表示第  $x_n$  个孔径处接收信号的频谱,下标  $r$  表示第  $r$  个频点的频谱值。 $\tau_{m,n,k,r} = \frac{2}{c} \sqrt{h_a^2 + (r_k - x_0)^2} + \frac{2}{v_r} \sqrt{h_m^2 + (r_n - x_0)^2}$  表示波的双程传播

时间。其中,  $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ,  $v_r = \frac{1}{\sqrt{\frac{\mu_2 \epsilon_2}{2} \left[ 1 + \left( \frac{\sigma}{\omega \epsilon} \right)^2 + 1 \right]}}$  表示

媒质中的波速。 $\epsilon_{e2} = \epsilon_2 - j \frac{\sigma_2}{\omega}$  表示媒质的等效介电常数。

当雷达回波时间采样点数  $T = 2^b$  时,  $F_r[p(x_n)]$  的计算可采用时间抽取型 RFFT 算法,此时离散傅立叶变换需要  $\frac{7}{4} bT - \frac{7}{2} T + 6$  次加法,  $\frac{3}{4} bT - \frac{5}{2} T + 4$  次乘法的运算量<sup>[5]</sup>。一元四次方程的求解采用解析形式<sup>[6]</sup>,开方运算采用寻址方式。则式(1)的建立和求解需要 35 次加法,92 次乘法的运算量。对整个区域进行成像运算则需要  $L \left[ \frac{7}{4} bT - \frac{7}{2} T + 6 \right] + MN$  (41SL-1) 次加法,  $L \left[ \frac{3}{4} bT - \frac{5}{2} T + 4 \right] + 115MNSL$  次乘法的运算量。

三维情况下,天线需要在二维平面对探测区域进行扫描,成像区域中一点对应于原始记录剖面一个曲面,成像算法与二维情况下类似。

### 3 递归 BP 成像算法

由式(3)可见: ImpSPR BP 算法可对任意空间感兴趣区域进行聚焦处理,成像的横向区域  $n \in [L_1, L_2]$  不依赖于雷达的空间扫描区域。但在发射信号确定、空间扫描区域和扫描间隔确定的情况下,区域成像的分辨率  $(\delta_x, \delta_y, \delta_z)$  是确定的。对一确定区域进行成像时,为尽可能的提高分辨率,应利用全部的雷达扫描数据。当雷达对未知区域进行探测,由于无法确定感兴趣区域,成像处理需要在整个扫描区域进行。因此在 ImpSPR 实时成像过程中,随着雷达空间扫描区域的扩大,成像区域也随之扩大。

3.1 BP 算法的递归模型

仍以 ImpSPR 二维扫描为例. 当雷达天线扫描到空间第  $L$  点时, 成像结果为  $q(1, L) | p(1, L)$ . 则当天线扫描到第  $L+K$  点时, 成像结果  $q(1, L+K) | p(1, L+K)$  可表示为  $q(1, L) | p(1, L+K)$  和  $q(L+1, L+K) | p(1, L+K)$  的空间组合, 即  $q(1, L+K) | p(1, L+K) = [q(1, L) | p(1, L+K),$

$$q(L+1, L+K) | p(1, L+K)] \quad (4)$$

由于增加的  $K$  个空间扫描点, 由式(3)  $q(1, L) | p(1, L+K)$  可表示为

$$q(1, L) | p(1, L+K) = q(1, L) | p(1, L) + q(1, L) | p(L+1, L+K) \quad (5)$$

而  $q(1, L) | p(L+1, L+K)$  可简单的表示为

$$q(1, L) | p(L+1, L+K) = \sum_{k=1}^K \sum_r F_r [p(x_{L+K})]^* \cos(\omega_r \tau_{m, n, L+K, r}) / L_{\text{total}}(\omega_r, \epsilon_{e2}, r_n, h_m, r_{L+K}, h_a) \quad (6)$$

其中  $r_n \in [x_1, x_L]; h_m$  隐含在  $q(1, L)$  中, 每一  $m$  值对应成像结果  $q(1, L)$  的一行.

$q(L+1, L+K) | p(1, L+K)$  用式(3) 进行计算时, 可表示为

$$q(L+1, L+K) | p(1, L+K) = \sum_{k=1}^{L+K} \sum_r F_r [p(x_k)]^* \cos(\omega_r \tau_{m, n, k, r}) / L_{\text{total}}(\omega_r, \epsilon_{e2}, r_n, h_m, r_k, h_a) \quad (7)$$

其中  $r_n \in [x_{L+1}, x_{L+K}]; h_m$  的含义和式(6) 中的相同.

由此, 可得 BP 算法的递归模型如图 2 所示:

3.2 递归 BP 算法

由 BP 算法的递归模型可见, 递归 BP 算法是建立在成像结果实时

存储基础上的. 在进行第  $L+K$  点空间扫描时, 前  $L$  点扫描的成像结果  $q(1, L) | p(1, L)$  需要存储下来. 运用递归模型得到这  $L+K$  点扫描的成像结果  $q(1, L+K) | p(1, L+K)$  后就可以替换掉  $q(1, L) | p(1, L)$ . 在此基础上, 递归 BP 算法的处理过程可表示为:

$$q(1, L+K) | p(1, L+K) = [q(1, L) | p(1, L) + q(1, L) | p(L+1, L+K), q(L+1, L+K) | p(1, L+K)]$$

其中  $q(1, L) | p(L+1, L+K)$  和  $q(L+1, L+K) | p(1, L+K)$  见式(6) 和式(7). 基于 3.1 节的 BP 算法的递归模型,  $q(L+1, L+K) | p(1, L+K)$  仍可以通过多次递归运算实现, 直到  $K=1$ .

设成像区域的横向空间采样和雷达扫描的空间采样相同, 当天线扫描到第  $L$  点时成像区域为  $M \times L$ , 则当天线扫描到第  $L+1$  点时的成像区域为  $M \times (L+1)$ . 设时域信号经过离散傅立叶变换后的频率点数为  $S$ , 雷达回波时间采样点数  $T=2^b$ , 则递归 BP 算法各个步骤所需运算量如表 1 所示:

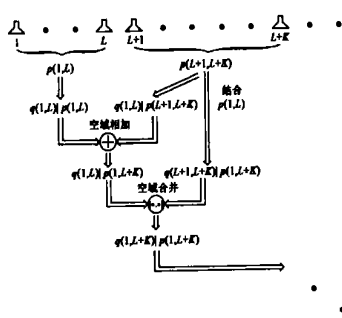


图 2 BP 算法的递归模型

表 1 递归 BP 算法运算量分析

	加法运算次数	乘法运算次数
$q(1, L)   p(L+1)$	$7/4bT - 7/2T + 6$	$3/4bT - 5/2T$
$q(L+1, L+1)   p(1, L+1)$	$+ ML(41S - 1)$	$+ 4 + 115MS$
$q(1, L+1)   p(1, L+1)$	$(L+1) \left[ \frac{7}{4}bT - \frac{7}{2}T + 6 \right] + 41MS(L+1) - M$	$(L+1) \left[ \frac{3}{4}bT - \frac{5}{2}T + 4 \right] + 115MS(L+1)$
$q(1, L+2)   p(1, L+2)$	$(L+2) \left[ \frac{7}{4}bT - \frac{7}{2}T + 6 \right] + 82MSL + 41MS - M$	$(L+2) \left[ \frac{3}{4}bT - \frac{5}{2}T + 4 \right] + 115MS(2L+1)$

如果在递归过程中对当前采集的单道数据的频谱进行存储的话, 整个运算量还可以减少一次 RFFT 的运算量. 在一次雷达探测过程中, 数据的采样点数  $T$ 、成像的纵向长度  $M$  和频域取样点数  $S$  一般是保持不变的, 在这种情况下递归 BP 算法的运算量与空间扫描点数  $N$  呈线性关系. 以 RadarEye 系统<sup>[7]</sup>的典型参数设置为例, 取  $M=50, T=512, S=50$ , 当空间扫描点数  $L$  由 1 到 100 变化时, 原始 BP 算法和递归 BP 算法的运算量对比如图 3 所示:

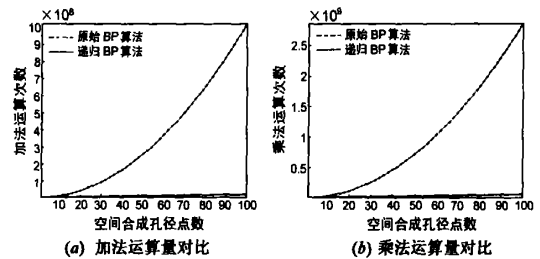


图 3 原始 BP 算法和递归 BP 算法的运算量对比

由图 3 可见,  $L=100$  时, 原始 BP 算法的运算量的量级为  $10^9$ , 而递归 BP 算法的量级仅为  $10^7$ . 原始 BP 算法的运算量随  $N$  的增大变化很快, 而递归 BP 算法的运算量变化很缓慢. 随着  $N$  的增大, 两者的量级差别也越来越大. 递归 BP 算法的运算量要比原始 BP 算法的运算量减少

$$\log \frac{L \left[ \frac{3}{4}bT - \frac{5}{2}T + 4 \right] + 115MSL^2}{(L+2) \left[ \frac{3}{4}bT - \frac{5}{2}T + 4 \right] + 115MS(2L+1)} \quad \text{个量级.}$$

如果是对确定区域  $[M_1, M_2; N_1, N_2]$  进行成像运算, 则原始 BP 算法的运算量表达式不变; 而递归 BP 算法的运算量减少为  $\frac{7}{4}bT - \frac{7}{2}T + 6 + M_L N_L S + 40M_L N_L$  次加法,  $\frac{3}{4}bT - \frac{5}{2}T + 4 + 115M_L N_L S$  次乘法, 即算法的运算量不随空间扫描区域的扩展而增大. 其中  $M_L, N_L$  分别表示成像区域的纵向和横向采样点数. 取  $M_L=50, N_L=50$ , 其他参数不变, 则原始 BP 算法和递归 BP 算法的运算量对比如图 4 所示.

从两种算法运算量的表达式就可以看出: 对于固定区域的成像, 原始 BP 算法的运算量随着空间采样点数的增大而线性递增, 而递归 BP 算法的运算量保持不变.

4 实验数据处理

试验场地为一长方形水泥池, 尺寸为  $L \times W \times H = 150 \times$

$100 \times 100 \text{cm}^3$  ( $L, W, H$  分别表示长度、宽度和深度), 填入均匀细沙. 测试设备采用国防科技大学电子科学与工程学院研制的高分辨表层穿透雷达系统 Radar Eye<sup>[7]</sup>. 工控机控制雷达主机、天线定位装置和数据采集卡协调同步工作. 天线为电阻加载和介质加载形式<sup>[8]</sup>, 通过天线定位装置可完成空间二维扫描, 扫描精度 < 1mm. 扫描方式为点测方式, 即: 在进行扫描前先确定好空间采样点, 控制天线依次移动到各个采样点进行静止探测. 每个采样点采集到的多道数据进行平均以平滑噪声<sup>[9]</sup>. 单道数据采样点数为 512, 采用等效采样的方式, 采样时窗范围为  $[8\ 20]$  ns.

为进行精细成像, 减小收发天线之间的直耦波  $S_{\text{couple}}(t)$  和沙坑表面的反射波  $S_{\text{ref}}(t)$  对目标信号  $S_{\text{obj}}(t)$  的影响, 测试前要先对  $S_{\text{couple}}(t)$  和  $S_{\text{ref}}(t)$  进行静态测试. 每个采样点采集到的数据都要参考  $S_{\text{couple}}(t)$  和  $S_{\text{ref}}(t)$  进行实时预处理<sup>[10]</sup>. 沙坑中的波速和电导率可以通过已知深度的大金属板回波的时延和幅度得到<sup>[11]</sup>. 两根  $\varnothing 8\text{mm}$  钢筋水平间距 20cm, 埋在沙坑 40cm 深处. 空间采样点数为 40 和 100 时的原始记录剖面、实时预处理结果和递归 BP 成像结果如图 5 所示.

由图 5 可见, 随着空间采样点数的增多, 目标雷达图像的聚焦效果变好, 成像精度变高. 在成像过程中, 递归 BP 算法一直都能对预处理后的记录剖面进行实时成像处理. 在 P4 1.6GHz, 256M 内存的兼容机上,  $L=180$  时得到成像结果只用了 5.82s, 这完全可以满足 ImpSPR 的实时应用. 当 ImpSPR 用于区域普查或其他不需要精细成像的场合时, 成像区域的空间采样点数  $M \times N$  还可以适当的减少, 递归 BP 算法的耗时将更少.

### 5 结束语

本文在深入分析时域 BP 算法的基础上, 建立了算法的递归模型, 导出了递归 BP 成像算法. 通过算法运算量的分析和 RadarEye 系统采集数据的处理, 结果显示:

(1) 递归 BP 算法运算量比原始 BP 算法运算量减少

$$\log \frac{L \left[ \frac{3}{4} bT - \frac{5}{2} T + 4 \right] + 115MSL^2}{(L+2) \left[ \frac{3}{4} bT - \frac{5}{2} T + 4 \right] + 115MS(2L+1)} \rightarrow \text{个量级};$$

(2) 递归 BP 算法的成像过程流畅无延迟, 可以应用于 ImpSPR 系统的实时处理中.

可以预见, 随着并行处理技术和高性能 DSP 器件的飞速发展, 递归 BP 算法的最优设计和硬件实现必将为空间遥感技术 (ImpSPR, 机载 SAR, 地基 SAR) 的广泛应用提供更有有效的途径.

### 参考文献:

[ 1 ] D J Daniels. Surface Penetrating Radar[M]. London, United Kingdom: The Institution of Electrical Engineers, 1996. 1-7.  
 [ 2 ] ASTM Standard D 6432-99, Standard guide for using the sur-

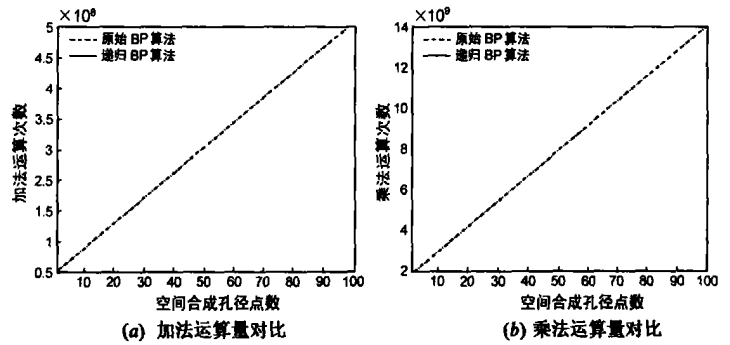


图 4 原始 BP 算法和递归 BP 算法对固定区域成像的运算量对比

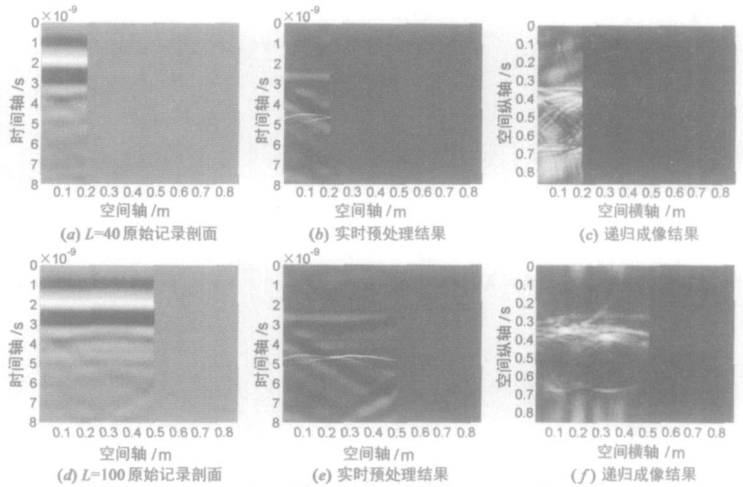


图 5 两根钢筋的实时采集数据和处理结果

face ground penetrating radar method for subsurface investigation[S].

[ 3 ] Y Wang, I D Longstaff, C J Leat. SAR imaging of buried objects from MoM modelled scattered field[J]. IEE Proc Radar, Sonar Navig, 2001, 148(3): 167-172.  
 [ 4 ] Wentai Lei, Yi Su, Chunlin Huang. A TAM BP imaging algorithm in GPR application[A]. Zhenghe Feng. 2004 4th International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology Proceedings[C]. Beijing: IEEE Press, 2004. 619-621.  
 [ 5 ] Daisuke Takahashi. An extended split radix FFT algorithm[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2001, 8(5): 145-147.  
 [ 6 ] 《数学手册》编写组. 数学手册[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998. 88-90.  
 [ 7 ] Wentai Lei, Yi Su, Chunlin Huang, Liye Liu. A UWB impulse surface penetrating radar system for pavement evaluation[A]. 2004 Second International Workshop on Ultra Wideband and Ultra Short Impulse Signals Proceedings[C]. Sevastopol, Ukraine: IEEE Press, 2004. 195-197.  
 [ 8 ] 刘立业, 粟毅, 刘克成, 毛俊杰. FDTD 分析探地雷达天线的辐射特性[J]. 微波学报, 2005, 21(增刊): 91-95.  
 LIU Li ye, SU Yi, LIU Ke cheng, MAO Jur jie. Radiation

characteristics of GPR antenna through FDTD method [ J ] .  
Journal of Microwaves, 2005, 12( supplement ) : 91- 95. ( in  
Chinese)

- [ 9 ] Gary D Sower, Roger Kilgore, Jaime R Roman. GSTAMIDS  
ground penetrating radar: data processing algorithms [ A ] .  
Abinash C Dubey. Detection and Remediation Technologies  
for Mines and Minelike Targets VI [ C ] . Texas, United States:  
Proceedings of SPIE, 2001. 786- 796.
- [ 10 ] Pei ju Chiang, Stacy L Tatum, Leslie M Collins. Signal pro-  
cessing of ground penetrating radar data for subsurface object

detection [ A ] . Abinash C Dubey. Detection and Remediation  
Technologies for Mines and Minelike Targets VI [ C ] . Texas,  
United States: Proceedings of SPIE, 2001. 470- 475.

- [ 11 ] 张安学, 蒋延生, 汪文秉. 探地雷达频率波数域速度估  
计和成像方法的实验研究 [ J ] . 电子学报, 2001, 29( 3 ) :  
315- 317.  
ZHANG An xue, JIANG Yan sheng, WANG Wen bing. Experi-  
mental studies on GPR velocity estimation and imaging method  
using migration in frequency wavenumber domain [ J ] . Acta Elec-  
tronica Sinica, 2001, 29( 3 ) : 315- 317. ( in Chinese)

#### 作者简介:



雷文太 男, 1979 年 11 月出生于河南省南  
阳市, 博士生, 主要研究方向为近场微波成像。  
E-mail: lei\_wentai@163.com.

粟毅 男, 1961 年 11 月出生于山东省泰安市, 博士, 教授, 博  
士生导师, 主要研究方向包括: 超宽带雷达系统、信号与信息处理、遥  
感信息处理。E-mail: y. su@yeah.net.

黄春琳 男, 1973 年 4 月出生于江西省信丰市, 博士, 副教授, 主  
要研究方向为雷达与通信信号处理。E-mail: hcg@netease.com.