

压缩感知理论在频率步进探地雷达偏移成像中的应用

屈乐乐^{*①} 方广有^① 杨天虹^②

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(沈阳航空航天大学电子信息工程学院 沈阳 110136)

摘 要: 该文针对频率步进探地雷达的具体工作过程, 利用目标成像空间的稀疏性提出了一种基于压缩感知理论的频率步进探地雷达偏移成像算法, 成像过程中首先采用杂波抑制方法在频率域去除直达波, 同时利用交叉验证算法来估计成像过程中的正则化参数, 最后基于稀疏约束最优化方法实现对地下目标成像, 仿真和实验数据表明了该算法的可行性和有效性。

关键词: 探地雷达; 压缩感知; 频率步进; 稀疏性

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)01-0021-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.01528

The Application of Compressed Sensing to Stepped-frequency Ground Penetrating Radar Migration Imaging

Qu Le-le^① Fang Guang-you^① Yang Tian-hong^②

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(School of Electronics Information Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: With the sparsity of the target space, a novel migration imaging algorithm for the stepped-frequency GPR based on compressive sensing is proposed in this paper. The new imaging algorithm removes the direct wave in frequency domain in advance, estimates the regulation parameter with cross validation algorithm, and images the subsurface with sparsity constraint. The simulation and experimental data show that the new imaging algorithm is effective and practical.

Key words: Ground Penetrating Radar (GPR); Compressive Sensing (CS); Stepped frequency; Sparsity

1 引言

探地雷达(Ground Penetrating Radar, GPR)是一种利用电磁波进行地下浅层目标探测的设备, 目前该项技术在考古、矿产资源勘探、岩土工程调查、工程质量检测、军事探测等众多领域发挥着重要作用^[1]。频率步进方法是探地雷达技术的重要工作体制之一, 与传统时域脉冲探地雷达技术相比, 频率步进探地雷达具有较高的平均发射功率, 便于频域补偿处理, 接收灵敏度高和动态范围大等优点^[2], 其研究和开发开始受到越来越多的关注。

在探地雷达工程应用中, 由于雷达收发天线具有一定的波束宽度, 致使地下目标回波图像与实际目标的真实位置和形状产生偏差, 需采用一定的偏移成像算法对地面记录的 B 扫描或 C 扫描数据进行聚焦处理, 使处理后的数据能够重现目标的真实位置和物理形状以便更好进行数据释疑。目前国内外学者提出了各种不同的偏移成像算法^[3]: 如建立在射

线理论基础上的后向投影(Back Projection, BP)成像算法, 基于波动方程的相移法成像算法和频率波数成像算法等。

近年来, 文献[4-6]从信号分解和逼近理论入手发展了一种新型信息获取理论: 压缩感知(Compressive Sensing, CS)理论。压缩感知理论指出任意长度为 N 的 K 稀疏信号 \mathbf{s} 可以通过它在空间 \mathbf{R}^N 中 $J = O(K \log N)$ 个随机向量上的线性投影以很高的概率精确重建。在压缩感知理论框架下信号采样可大幅度突破奈奎斯特采样定理的限制, 给信号获取、存储、传输及处理带来极大便利。目前, 压缩感知理论在图像处理、信道编码、模式识别和雷达成像等诸多工程领域受到高度关注^[7-9]。

文献[10]提出一种基于压缩感知理论的频率步进探地雷达成像方法, 但其字典矩阵构造中公式表述有一定错误, 同时成像过程中没有考虑直达波的影响, 导致成像过程中需要的频率采样数据很多, 计算量很大。本文结合频率步进探地雷达的具体工作过程, 考虑到目标的散射中心一般仅占探测区域很小部分这一先验知识, 提出了一种杂波抑制基础

2009-12-01 收到, 2010-09-09 改回

国家 863 计划项目(2007AA12Z124)资助课题

*通信作者: 屈乐乐 qulele83@126.com

上的压缩感知频率步进探地雷达偏移成像算法。仿真和实验结果表明,与传统偏移成像算法相比,压缩感知偏移成像算法得到的目标像具有成像分辨率高、旁瓣小、信噪比高等优点。

2 压缩感知频率步进探地雷达成像原理

在探地雷达工程应用中,当对地雷、管线和钢筋等小目标探测时,目标通常可以等效为多个离散的散射中心,如果对目标所在的区域进行加细剖分,这些散射中心往往只占据很小一部分的空间单元,也就是说待建目标图像具备稀疏性。基于压缩感知理论的偏移成像算法将充分利用待建目标成像的稀疏性,实现对地下目标的准确成像。

2.1 字典矩阵的构造

探地雷达通常采取正下视测量形式,典型的测量方式有沿一条直线的1维测量和在一平面进行的2维测量,1维测量示意图如图1所示。频率步进探地雷达系统距离地面一定的高度 h ,收发天线的间隔为 d_{tr} ,当系统在目标上方移动时,在不同的孔径位置 (u_x, u_y) 对地下区域进行照射从而得到目标的B-Scan图像。若将需成像的目标空间 π 沿 x, z 轴(2维)剖分为 N 个网格,记为 $\pi = [\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_N]^T$,则每个网格 π_j 对应成像空间中一个空间坐标为 $[x_j, z_j]$ 的点目标(散射中心)。若假设地下媒质为均匀非色散媒质,地下有 P 个点目标,目标位于天线主瓣的照射范围内,电磁波在目标之间不发生多次散射,则第 i 个孔径处的频域响应 $\zeta_i(\omega)$ 为(忽略传播损耗):

$$\zeta_i(\omega) = \sum_{k=1}^P b(k) \exp(-j\omega\tau_i(\pi_k)) \quad (1)$$

其中 ω 表示工作频率, $\zeta_i(\omega)$ 和 ω 均为 $M \times 1$ 维向量(M 为每个孔径处总共发射的频点数), $b(k)$ 表示目标 π_k 对应的反射系数, $\tau_i(\pi_k)$ 表示第 i 个测量孔径处信号从发射机经目标 π_k 反射到达接收机的延时,假设电磁波的传播服从射线理论,由文献[11]给出的方法可求得折射点的近似位置,则目标 π_k 对应的传输延时 $\tau_i(\pi_k)$ 为

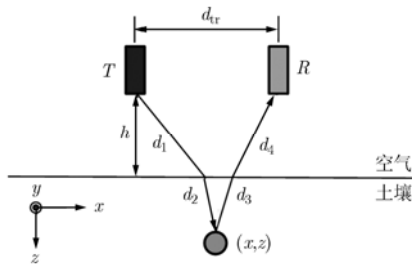


图1 频率步进探地雷达成像示意图

$$\tau_i(\pi_k) = (d_1 + d_2)/v_1 + (d_2 + d_3)/v_2 \quad (2)$$

其中 v_1 和 v_2 分别代表电磁波在空气和土壤中的传播速度。

式(1)用矩阵形式表示为

$$\xi_i(\omega) = \Psi_i \mathbf{b} \quad (3)$$

其中 Ψ_i 为 $M \times N$ 维字典矩阵,其第 j 列定义为当 $b(\pi_j) = 1$ 时网格 π_j 对应的目标频域响应, Ψ_i 可记为

$$[\Psi_i]_j = \exp[-j\omega\tau_i(\pi_j)] \quad (4)$$

向量 \mathbf{b} 表示加权系数向量,即为所求的目标像矩阵中的各元素。具体的物理解释为:加权系数向量 \mathbf{b} 满足稀疏性,当 π_j 对应网格处无目标时,则 $b(j) = 0$,当 π_j 对应网格处有目标时,则向量 \mathbf{b} 中第 j 个元素 $b(j)$ 为目标 π_j 对应的反射系数。

2.2 压缩感知数据获取

频率步进探地雷达在每个孔径位置测量 M 个固定的频点响应得到 $M \times 1$ 维频域测量向量 $\xi_i(\omega)$ 。压缩感知理论指出可以由一定数量的随机测量信号来重构稀疏信号,基于随机测量的概念,可构造随机测量矩阵 Φ_i 实现在每个孔径处 L 个频点的随机测量得到随机频率测量向量 β_i ,用矩阵形式表示为

$$\beta_i = \Phi_i \xi_i = \Phi_i \Psi_i \mathbf{b} \quad (5)$$

其中 Φ_i 表示 $L \times M$ 维测量矩阵,其构造可以通过从 $M \times M$ 维单位矩阵中随机选取 L 行来实现。通过 Φ_i 可以实现在每个孔径处的随机频率测量,在每个孔径处随机测量矩阵 Φ_i 可以相同也可以不同。

2.3 压缩感知频率步进探地雷达成像

频率步进探地雷达系统在需成像的探测区域沿着测量线得到 K 个孔径的频域测量数据,通过上面的理论分析,基于 K 个孔径的频域测量数据可以构造复合字典矩阵 $\Psi = [\Psi_1^T, \Psi_2^T, \dots, \Psi_K^T]^T$,复合测量矩阵 $\Phi = \text{diag}[\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_K]$ 和复合测量数据向量 $\beta = [\beta_1^T, \beta_2^T, \dots, \beta_K^T]^T$ 。复合测量数据向量 β 可以通过复合字典矩阵 Ψ ,复合测量矩阵 Φ 及加权系数向量 \mathbf{b} 表示为

$$\beta = \Phi \Psi \mathbf{b} \quad (6)$$

式(6)将随机测量数据向量 β 与加权系数向量 \mathbf{b} 通过字典矩阵 Ψ 和随机测量矩阵 Φ 有机联系起来,完成了整个压缩感知的建模过程。根据压缩感知理论, \mathbf{b} 可以通过 $T = O(K \log N)$ 个测量数据以很高的概率重建,只需要通过求解 l_1 范数约束问题。

$$\hat{\mathbf{b}} = \arg \min \|\mathbf{b}\|_{l_1} \quad \text{s.t.} \quad \beta = \Phi \Psi \mathbf{b} \quad (7)$$

式(7)代表的约束问题求解在随机测量数据向量 β 不包含噪声的情况下成立。考虑到系统实际测量过程中会有噪声引入,则有

$$\beta = \Phi\Psi b + n \quad (8)$$

其中 n 代表系统噪声向量，此时 b 的重建问题可通过 Dantzig 选择器方法得到^[12]

$$\hat{b} = \arg \min \|b\|_{l_1} \quad \text{s.t.} \quad \|A^T(\beta - Ab)\|_{\infty} < \varepsilon \quad (9)$$

其中 $A = \Phi\Psi$ ，通过求解式(9)代表的约束问题即可从含噪频域随机测量信号中以很高的概率重构加权系数向量 b 。

2.4 算法参数的选择

压缩感知偏移成像算法中主要涉及两个参数的设置：目标成像空间网格数 N 和正则化参数 ε 。

(1) 目标成像空间网格数 N ：目标成像空间的划分将关系到字典矩阵的构造和目标最终的成像位置。目标空间划分的网格越多，对目标的定位越精确、分辨率越高，但同时也将增加算法的计算量。目标空间划分的准则为首先对目标空间进行粗略划分得到目标的大致位置，然后对目标空间进行细致划分以得到目标的精确位置。

(2) 正则化参数 ε ： ε 若设置得过大将导致最终成像结果中丢失目标，同时若 ε 设置得过小会导致成像结果中出现虚假目标。当系统噪声统计特性已知，例如系统噪声均值为 0，方差为 σ^2 的高斯白噪声时，选取 $\varepsilon = \sqrt{2 \log N} \sigma$ ，通过式(9)能以很高的概率重构加权系数向量 b ^[12]。由于实际测量过程中系统噪声统计特性往往是未知的，这里可通过交叉验证(Cross-Validation, CV)算法^[13]来选择参数 ε 。交叉验证算法将测量数据分为估计数据 β_E 和交叉验证数据 β_{CV} 两个部分。

$$\beta_E = A_E b + n_E \quad (10)$$

$$\beta_{CV} = A_{CV} b + n_{CV} \quad (11)$$

交叉验证算法首先选择一个初始参数 ε ，然后通过估计数据对目标空间进行成像，同时将成像结果通过交叉验证数据进行验证，通过不断迭代最终确定参数 ε 的值。具体实现步骤如下：

(1) 初始化 ε ：设置 $\varepsilon = \alpha \|A_E^T \beta_E\|_{\infty}$ ， $\hat{b} = 0$ 和 $i = 1$ 。为防止 ε 的初值过大，通常设置 $\alpha = 0.99$ ；

(2) 估计：利用 A_E 和式(9)得到加权系数向量的估计 $\hat{b}^{(i)}$ ；

(3) 交叉验证：若不等式 $\|A_{CV}(\beta_{CV} - A_{CV} \hat{b}^{(i)})\|_{\infty} < \varepsilon$ 成立，则重新设置 $\varepsilon = \|A_{CV}(\beta_{CV} - A_{CV} \hat{b}^{(i)})\|_{\infty}$ ，否则算法终止；

(4) 重复： i 加 1，重复步骤(2)和步骤(3)。

3 算法仿真

3.1 成像结果

为了对比各种算法的成像效果，下面通过数值例子对各种成像算法进行仿真分析。首先构造一个

30 cm 宽 \times 30 cm 高的二维模拟目标空间，目标空间记为 π 。将目标空间剖分为 $30 \times 30 = 900$ 个网格，记作 $\pi = [\pi_1, \dots, \pi_j, \dots, \pi_{900}]^T$ ，用 $b = [b_1, \dots, b_j, \dots, b_{900}]^T$ 表示目标空间 π 的加权系数向量。在目标空间 π 内随机放置 3 个理想点目标，对应反射系数分别为 1, 0.5 和 0.3，如图 2(a)所示。仿真条件设置如下：系统采用收发分置天线，天线距离地面的高度 $h = 10$ cm，收发天线间隔为 $d_{tr} = 2$ cm，天线移动步长为 1 cm，测量孔径数为 30，地下媒质的相对介电常数 $\varepsilon_r = 4$ 。系统工作起始频率 $f_L = 100$ MHz，终止频率 $f_H = 10$ GHz，频率步进间隔 $\Delta f = 100$ MHz，系统信噪比 $\text{SNR} = 10$ dB，各个孔径处测得的频率响应如图 2(b)所示。

相移法，频率波数法以及频域 BP 算法利用每个孔径处的 100 个频点测量数据对地下目标进行成像，其成像结果如图 2(c), 2(d), 2(e)所示。压缩感知方法仅利用每个孔径处的 30 个随机频点测量数据通过求解 l_1 范数约束问题实现对地下目标成像，其成像结果如图 2(f)所示。图 2(c)-2(f)显示时图中各像素值均对最大像素值作归一化处理，显示幅度动态范围均为 0~-35 dB。从图 2(c)-2(f)的成像结果可以看出，相比于传统的成像算法，压缩感知成像算法所需数据量少，成像结果分辨率高，目标像旁瓣小，更利于对目标的辨识。

3.2 波速估计误差对成像结果影响

3.1 节中分别采用不同成像方法得到的目标像过程中都是把速度参数都是作为已知参数使用的，然而实际成像过程中电磁波在地下介质中的波速往往是未知的，波速估计的准确度将直接影响目标成像结果，下面就波速估计对压缩感知成像结果的影响进行仿真分析。仿真条件设置与 3.1 节一样，目标空间有一点目标位于 $\langle 15 \text{ cm}, 15 \text{ cm} \rangle$ 处，真实波速 $v_{\text{real}} = 1.5 \times 10^8$ m/s。采用压缩感知成像算法对目标进行成像时，假定估计波速 v 在 1×10^8 m/s $- 2.5 \times 10^8$ m/s 范围内变化，成像结果如图 3(a)-3(f)所示。

从图 3 可以看出不管使用何种波速，压缩感知成像算法都能得到聚焦的目标像，这样就无法根据图像的聚焦程度来估计波速。当估计波速等于真实波速时压缩感知成像算法能够得到准确的目标像(如图 3(b)所示)，当估计波速与真实波速偏差较小时压缩感知成像算法仍可以得到准确的目标像(如图 3(c)所示)，当估计波速与真实波速偏差较大时，最终目标成像的水平位置和深度与真实值将有一定的偏差(如图 3(a), 3(d)所示)。由以上分析可见波速估计的准确度将会影响最终目标成像的水平位置和

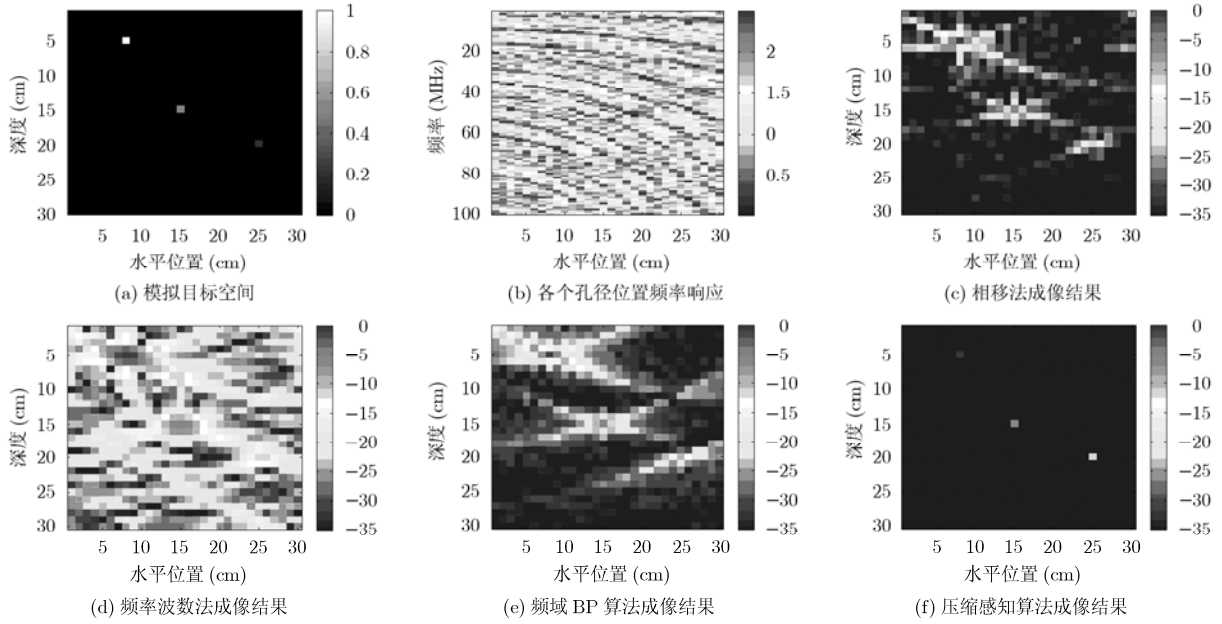


图2 频率步进探地雷达仿真数据成像结果

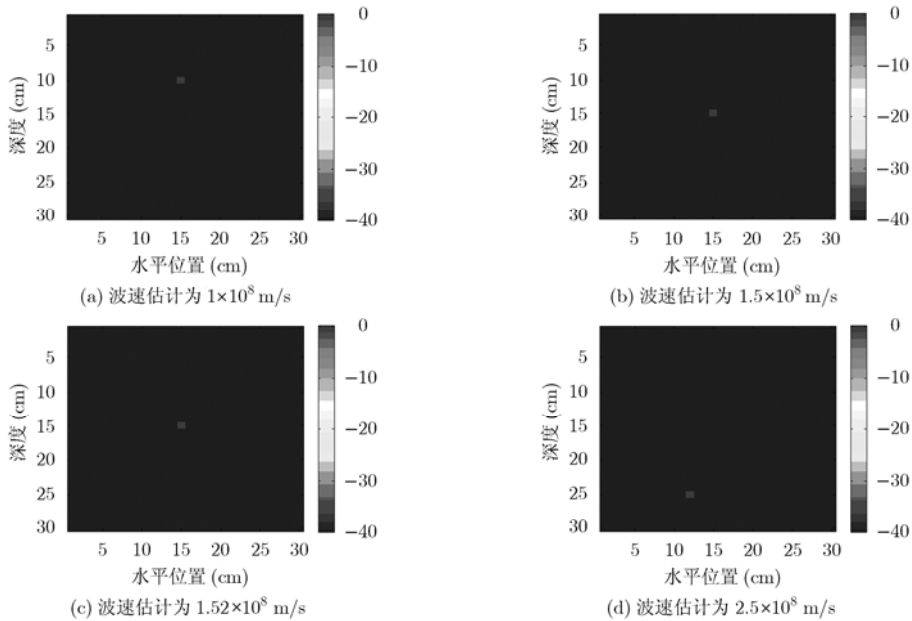


图3 波速估计对成像结果影响示意图

深度，而在一定的波速估计误差范围内，压缩感知成像算法能够得到准确的目标像。这是因为虽然基于估计波速构造的字典矩阵与真实波速构造的字典矩阵有一定的偏差，但由于压缩感知成像算法实质是求解关于 l_1 范数约束的凸优化问题，当波速估计在一定的误差范围内时，波速估计误差对成像的影响小于分辨单元尺度，通过求解凸优化问题仍可得到准确的目标像。

3.3 直达波对成像结果影响分析

频率步进探地雷达系统的接收信号通常由以下

几部分组成：收发天线之间的耦合信号和地面直接反射回波(合称为直达波信号)、地下目标反射回波信号以及系统噪声和干扰信号。则第 i 个孔径处频域响应 $x_i(w_m)$ 可表示为

$$x_i(w_m) = b_i(w_m) + g_i(w_m) + e_i(w_m) \quad (12)$$

其中下标 i 表示第 i 个探测点，下标 m 表示第 m 个发射频点， $b_i(w_m)$ 表示直达波信号， $g_i(w_m)$ 表示目标信号， $e_i(w_m)$ 表示方差为 σ^2 加性高斯白噪声。对于第 i 道数据，定义系统信噪比 SNR 和信杂比 SCR 分别为

$$SNR = 10 \log \frac{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M |g_i(w_m)|^2}{\sigma^2} \quad (13)$$

$$SCR = 10 \log \frac{\sum_{m=1}^M |g_i(w_m)|^2}{\sum_{m=1}^M |b_i(w_m)|^2} \quad (14)$$

固定系统信噪比 SNR = 20 dB，对每一个固定的信杂比和孔径频点采样数，重复 50 次试验。不考虑重建目标回波的幅度，当重建结果中目标位置为真实目标位置时，即可认为目标探测成功。目标探测成功概率 PD(Probability of Detection)与每个孔径随机频点采样数 L 的关系曲线如图 4 所示。从图中看出在信杂比 SCR = -15 dB 时，随着每个孔径随机频点采样数 L 的增加，目标探测成功概率 PD 相应提高，当信杂比 SCR = -20 dB 时，目标探测成功概率 PD = 0。由于收发天线间直耦信号和地面反射回波构成的直达波信号通常远大于地下目标回波信号，这样导致频率步进探地雷达的原始数据信杂比很低，压缩感知成像算法较难用于实测数据成像。所以在采用压缩感知成像算法时，需采用合适的杂波抑制方法去除原始频域数据的直达波成分。

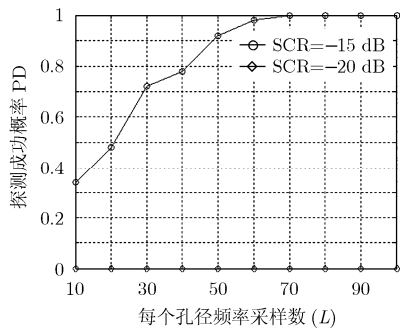


图 4 探测成功概率与每个孔径采样数的关系

4 实测数据处理结果及分析

本文所用实测数据由佐治亚理工大学提供，室验中频率步进探地雷达系统的工作频段为 500 MHz-8.06 GHz，频率步进间隔为 20 MHz，每一个 A 扫描有 379 个频率样本数据，每一个 B 扫描由 91 个 A 扫描组成。实验在沙箱里进行，收发天线相位中心距离地面的高度为 27.8 cm，收发天线间隔为 12 cm，移动步长为 2 cm，两个非金属 TS-50 地雷和一个尼龙圆柱体埋入沙坑中，沙的介电常数 $\epsilon_r = 4$ ，图 5 为系统的探测示意图。

图 6(a)为频域数据直接经 IDFT 变换后得到的时域 B 扫描图。由于地面反射信号很强，目标回波完全被淹没在地表杂波中，在这种情况下频率域采

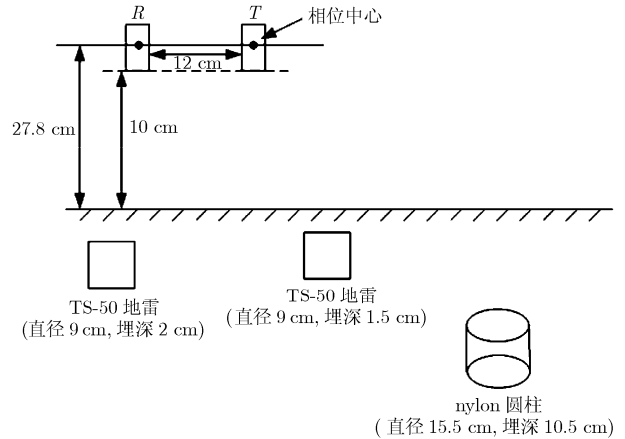


图 5 系统探测示意图

样数据包含地表回波导致采样数据信杂比较低，不利于各种成像方法对目标进行成像。首先采用一定的去杂波算法在频率域去除直达波信号，图 6(b)为频率域数据通过 ASaS 法^[14]去除直达波后再经 IDFT 变换到时域得到的 B 扫描图，从图 6(b)中可以清晰看到 3 个目标形成的空时响应表现为明显的双曲线特征。为提高目标的方位分辨率，对去掉直达波后的频率域数据分别采用不同成像算法对目标进行成像，成像结果如图 6(c)-6(f)所示。由于天线的波束宽度有限，另外凸优化问题的求解比较耗费时间和资源，采用压缩感知成像算法进行成像时首先将目标成像空间根据目标的大致位置划分为 3 个感兴趣区域，然后对每个区域采用压缩感知成像算法对目标进行成像，最后将 3 个区域的图像连接起来得到完整的目标像。从图 6(c)-6(f)可以看出，经过一定成像算法处理后，目标像的方位分辨率都得到了明显改善。传统成像算法是利用每个孔径处的 379 个频率样本数据进行目标成像，而压缩感知成像算法在每个孔径处随机选取 40 个频率样本数据对目标进行成像。尽管成像过程中所用波速有一定误差，地下目标的散射并不能严格地等效为若干个离散点散射中心，压缩感知成像算法仍能对目标进行很好地成像。与传统的成像方法相比，基于稀疏约束的压缩感知成像算法得到的目标像旁瓣小，分辨率高、信噪比高，更利于对目标的辨识。

5 结束语

频率步进方法是探地雷达技术领域的一种重要工作体制，本文针对频率步进探地雷达的工作过程，考虑到目标成像空间具备稀疏性，提出了一种基于压缩感知理论的偏移成像算法。仿真和实验结果表明，与传统成像算法相比，压缩感知偏移成像算法具有分辨率高，目标旁瓣小、更易于目标辨识等优

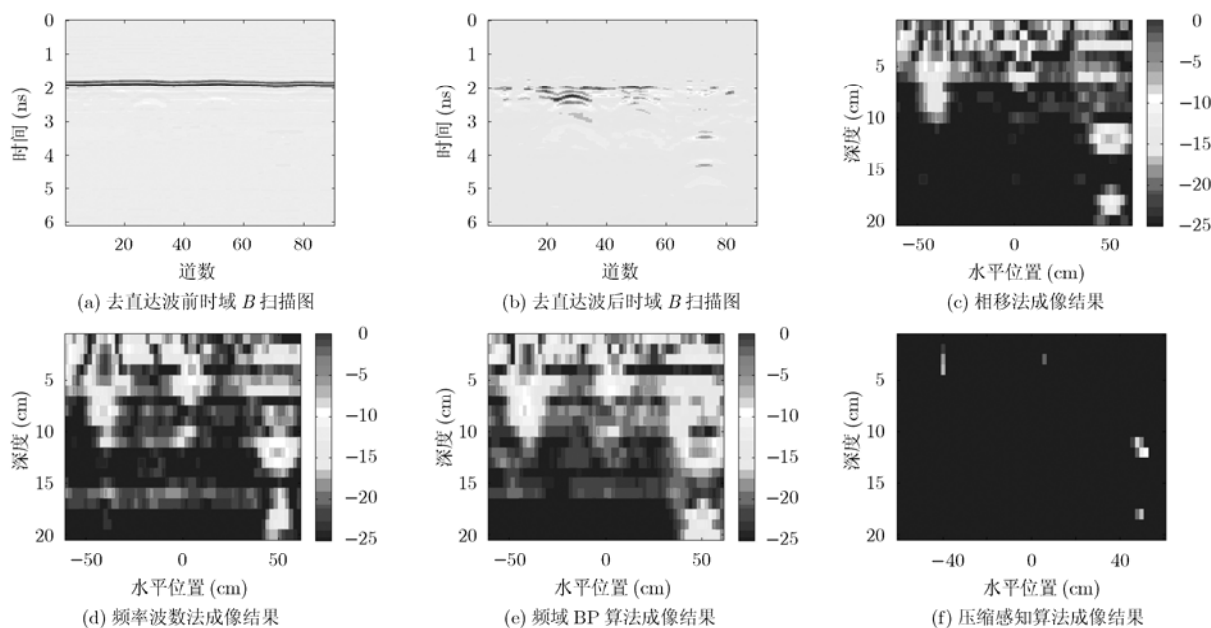


图6 实测数据成像结果

点, 但压缩感知成像算法中凸问题的优化求解会耗费较多的时间和资源, 其计算量比传统成像算法要大得多, 限制了其在实时成像场合中的应用。因此发展效率更高的凸优化问题计算方法是下一步研究的重点。

参考文献

- [1] 粟毅, 黄春琳, 雷文太. 探地雷达理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 1-3.
- [2] 方广有, 佐藤源之. 频率步进探地雷达及其在地雷探测中的应用[J]. 电子学报, 2005, 33(3): 436-439.
Fang Guang-you and Sato Motoyuki. Stepped frequency ground penetrating radar and its application for landmine detection[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 33(3): 436-439.
- [3] Fang Guang-you. The research activities of ultrawideband(UWB) radar in China[C]. IEEE International Conference on Ultra-Wideband, Singapore, 2007: 43-45.
- [4] Donoho D L. Compressed sensing[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [5] Candes E J and Wakin M B. An introduction to compressive sampling[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, 25(2): 21-30.
- [6] 石光明, 刘丹华, 高大化等. 压缩感知理论及其研究进展[J]. 电子学报, 2009, 27(5): 1070-1081.
Shi Guang-ming, Liu Dan-huang, and Gao Da-hua, et al. Advances in theory and applications of compressed sensing[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(5): 1070-1081.
- [7] Romberg J. Imaging via compressive sampling[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, 25(2): 14-20.
- [8] Ma J W. Single-pixel remote sensing. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2009, 6(2): 199-203.
- [9] Herman M A and Strohmer T. High-resolution radar via compressed sensing[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2009, 57(6): 2275-2284.
- [10] Gurbuz A C, McClellan J H, and Scott W R. A compressive sensing data acquisition and imaging method for stepped frequency GPRs[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2009, 57(7): 2640-2650.
- [11] Johansson E M and Mast J E. Three dimensional ground penetrating radar imaging using a synthetic aperture time-domain focusing[C]. Proc of SPIE Conference on Advanced Microwave and Millimeter Wave Detectors. San Diego, 1994: 205-214.
- [12] Candes E and Tao T. The dantzig selector: statistical estimation when p is much larger than n[J]. *The Annals of Statistics*, 2007, 35(6): 1-41.
- [13] Boufounos P, Duarte M F, and Baraniuk R G. Sparse signal reconstruction from noisy compressive measurements using cross validation[C]. IEEE Workshop on Statistical Signal Processing, Madison: 2007: 200-303.
- [14] Wu R and Clement J, et al. Adaptive ground bounce removal[J]. *Electronic Letters*, 2001, 37(2): 1250-1252.

屈乐乐: 男, 1983年生, 博士生, 研究方向为频率步进探地雷达系统设计与成像技术。

方广有: 男, 1963年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为超宽带电磁场理论及其工程应用、超宽带成像雷达技术、微波成像新方法和新技术。

杨天虹: 女, 1982年生, 讲师, 硕士, 研究方向为电磁场理论与微波电路。