

# 主元分析法去除瞬态系统收发耦合波研究<sup>1</sup>

高守传 黄春琳 粟毅

(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

**摘要:** 在瞬态信号的测量系统中,收发天线的耦合信号是接收系统的主要干扰之一,对系统的性能有很大影响,尤其对近场遥感系统如表层穿透雷达(SPR)系统的影响更为明显。故耦合波的去掉对系统的信号处理性能起着至关重要的作用。该文依据 SPR 系统对信号处理的特定要求及其工作条件,提出了采用主元分析法去除直达波的方法。通过理论分析和具体试验证明该方法可有效去除回波信号中耦合信号;此外,该处理算法简单高效,易于实现实时处理。

**关键词:** 表层穿透雷达,干扰抑制,主元分析法

**中图分类号:** TN958, TN951 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)09-1461-07

## Principal Component Analysis Method to Suppress TX/RX Coupled Interference

Gao Shou-chuan Huang Chun-lin Su Yi

(School of Electron. Sci. and Eng., National Univ. of Defence Tech., Changsha 410073, China)

**Abstract** In a transient signal system, the TX/RX coupled interference is one of principle interferences and has great influence to the system capability, especially to the near field remote sensing system such as Surface Penetrating Radar(SPR). Suppression of the coupled interference is very important for the system performance. With consideration of the system operating condition, the signal and system character, realization object of the signal processing, the Principal Component Analysis (PCA) method is employed. The validity of the method for the engineering application is demonstrated with theoretical analysis and experiments in this paper, and it can be applied to real-time processing.

**Key words** Surface Penetrating Radar (SPR), Interference depression, Principal Component Analysis (PCA)

### 1 引言

随着瞬态电磁场理论和信号处理技术的不断发展,瞬态电磁场的时域测量以及窄脉冲电磁波探测地下目标的遥感技术得到广泛应用。由于超宽带收发器件的限制,瞬态测量系统中通常采用收发分离的双站结构。对于近距离瞬态测量系统,如探地雷达,时间灵敏度开关难以达到所需速度,因而接收信号中就含有发射信号的直接耦合部分,而且其能量可能远远强于目标散射回波信号,因而抑制、去除耦合波便成为瞬态测量系统信号处理的重要一环。

高分辨率表层穿透雷达(SPR)是一种典型的瞬态测量系统,在高速公路、桥梁以及建筑物的质量检测以及内部损坏评估方法得到广泛应用。其工作原理为通过向探测表面发射电磁波,表层下目标的电磁特性的非连续点产生散射,利用表层及表层下物体的散射回波来探测目标<sup>[1,2]</sup>。提高雷达回波信号的信杂比是 SPR 信号处理中的重要一环,这里的杂波指收发天线的耦合波、探测表面直接反射波以及周围环境、仪器等引起的各种随机杂波(见图 1)。其中探测表面的反射波与耦合波具有相似的特点——出现时间相对较早,在各个测点都存在且近似相同,因而可以

<sup>1</sup> 2003-04-19 收到, 2003-07-11 改回

国家 863 高技术计划项目资助课题(2001AA132020)

一同作为耦合波考虑, 统一称为“直达波”。由于其具有很高的能量, 对目标回波信号的提取存在较强的干扰, 同时减小了系统的有效动态范围; 对浅层目标, 目标回波可能淹没于直达波之中, 根本无法直接进行信号的后处理和目标分类。

已有很多学者对探地雷达系统直达波的去除了进行了广泛的研究。主要的处理方法包括时间门限法, 平均去除法, 模型参数法<sup>[3-5]</sup>和子空间投影法<sup>[6,7]</sup>等。由于 SPR 所探测的主要是浅层目标, 显然时间门限法并不可行; 平均去除法处理简单, 应用较多, 但对目标散射信号波形影响大, 应用也受限; 模型参数法虽然具有自适应能力但是算法复杂, 稳健性差, 不适合大数据量的实时处理。本文基于对直达波特点的深入分析, 考虑到直达波信号矩阵可近似认为秩为 1, 结合子空间投影方法, 运用主元分析法对直达波进行去除。研究表明该方法处理简单, 具有很好的直达波去除效果, 并且对目标散射信号的影响相对比较小。

## 2 主元分析法

主元分析 (PCA) 是一种建立在最小均方误差基础上的线性变换处理方法。具体可以表示为如果对信号  $X \in R^m$  进行主元分解, 即找到变换矩阵  $W$  使  $S = W \cdot X$ ,  $s_1, s_2, \dots, s_n (n \leq m)$  称为  $X$  的主元, 其中  $s_i = w_i^T X$ , 各主元之间是相互正交的。通常变换矩阵  $W$  选取为  $C = X \cdot X^T$  的特征向量。

针对 SPR 系统去除直达波问题的主元分析法及其实现如下:

SPR 系统天线接收信号可以表示为  $w = s + b + c + n$  (图 1 所示), 其中  $n$  表示测量以及系统引起的随机噪声, 其在数据采集过程中可以得到有效的抑制, 因而本文对此不作考虑。由前面的介绍直达波  $d = b + c$ , 其中  $b, c$  分别表示表层反射波与耦合波。因此 SPR 接收信号可简化为  $w = s + d$ 。实际 SPR 系统工作的时候, 在介质表面上直线移动, 不断向介质发射宽带窄脉冲, 同时接收介质中目标的反射信号。于是在某测线上的接收信号可以表示为矩阵  $W_R \in R^{M \times N}$  (其中  $M$  为某测线的测点数目,  $N$  为时间上的采样点数)。对  $W_R$  进行主元分析, 采用的方法为奇异值分解, 具体可以表示为

$$W_R = UDV^T = \sum_{i=1}^P u_i D_{i,i} v_i^T, \quad P = \min\{M, N\} \quad (1)$$

其中  $U = \{U_{m,i}\} = \{u_1, u_2, \dots, u_N\} \in R^{M \times N}$ ,  $V = \{V_{n,i}\} = \{v_1, v_2, \dots, v_N\} \in R^{N \times N}$  为正交矩阵, 其列向量分别为对称矩阵  $W_R W_R^T$  和  $W_R^T W_R$  的特征向量。  $D \in R^{N \times N}$  为对角阵, 对角元素即为其奇异值, 按由大到小排列, 可以表示为  $D_{1,1} \geq D_{2,2} \geq \dots \geq D_{N,N}$ 。

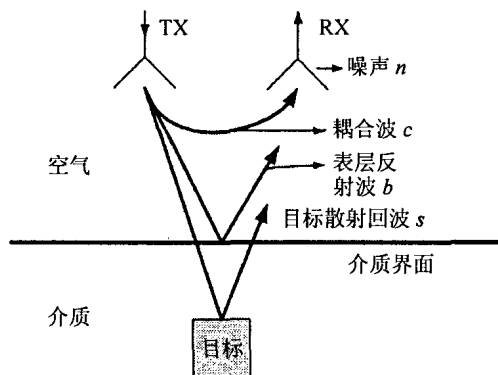


图 1 SPR 接收信号示意图

令  $y_i = D_{i,i}v_i, i = 1, 2, \dots, N$ ,  $y_i$  即为“主元”, 对应时间采样信息. 接收信号矩阵  $W_R$  就可以看作主元  $y_i$  与相应的特征图像的  $u_i$  的加权和即  $W_R = \sum_{i=1}^N u_i y_i$ . 由于  $V$  为正交矩阵, 因此对  $\forall i \neq j, y_i^T y_j = 0$ , 主元分析本质上就是将信号分解成具有最大方差的向量构成的子空间. 如果能够去除属于直达波主元而尽可能保留含有目标回波信号的主元, 再经过重构就可以实现直达波的去除. 结合具体的仿真数据对直达波与目标回波在各主元中的可分性进行下面研究.

### 3 直达波与目标回波可分性

本文采用的主元分析是通过奇异值分解来实现的 (见式 (1)). 令  $w_i = u_i v_i^T$ , 则  $w_i$  是相互正交的秩 1 部分等距矩阵. 令  $\sigma_i = D_{i,i}$ , 则  $W_R = \sum_{i=1}^P \sigma_i w_i$ , 即 SPR 接收信号矩阵就分解成相互正交秩 1 部分等距矩阵  $w_i$  的非负线性组合. 奇异值分解 (SVD) 的一个重要性质是  $W_R^{(l)} = \sum_{i=1}^l \sigma_i w_i (l \leq p)$  为矩阵  $W_R$  的“最近”秩  $l$  矩阵. 所谓“最近”就是对所有秩为  $l$  矩阵满足

$$\text{err} = \sum_{i,j} |W_{R(i,j)} - W_{R^{(l)}(i,j)}|^2 \Rightarrow \min \tag{2}$$

由上一节的分析, SPR 接收信号矩阵可以表示为  $W_R = S_R + D_R$ ,  $D_R$  为直达波信号矩阵. 由于在同一测线的各个测点直达波信号变化不是很大, 因此在理想情况下可认为各测点直达波相同, 即直达波矩阵  $D_R$  秩为 1. 而对于地下离散小目标其散射回波信号在时间—水平位置 (B-scan) 图上呈双曲线形状 [8], 因而目标散射回波矩阵  $S_R$  的秩大于 1. 由式 (2) 可知, 当  $l = 1$  时, 即  $W_R^{(1)} = \sigma_1 w_1$  为矩阵  $W_R$  的最近秩 1 矩阵, 由于直达波信号能量远远大于目标回波信号, 因而在矩阵  $W_R^{(1)}$  中  $D_R$  占绝对主导地位, 且其秩为 1. 因而在  $W_R^{(1)}$  中必然包含  $D_R$  的全部或者绝大部分信息, 而含有少许目标回波信号的信息, 通过去除  $W_R^{(1)}$  便可以有效地去除直达波.

用仿真数据来进行直观说明. 图 2(a) 为介质中存在一个目标时 SPR 系统的反射回波时间堆积图 (B-scan). 各个测点直达波均相同即  $D_R$  的秩为 1, 目标 (理想点目标) 散射回波呈明显的双曲线形状. 图 2(b) 为通过 SVD 分解去除  $W_R^{(1)}$  后得到的结果, 从中可以直观看到直达波所呈现的直线几乎完全去除, 而目标的双曲线得以保留, 这与前面的分析吻合.

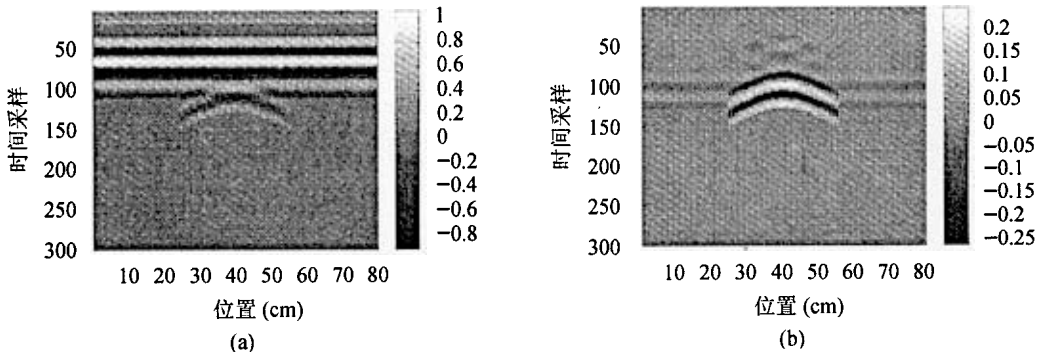


图 2

我们比较关心的另一个问题是处理对目标回波的影响, 这里采用信号的保真度 (TF) 进行评估:

$$\text{TF} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M F_i = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \int \hat{s}_i(t) \hat{s}'_i(t) dt \quad (3)$$

$\hat{s}_i(t)$  与  $\hat{s}'_i(t)$  分别为去除直达波前后能量归一化的目标回波信号。计算出目标回波的保真度  $\text{TF}=97.4\%$ , 可见目标回波基本没有损失。通过分析和对仿真数据的处理可以看到采用 SVD 分解去除最大奇异值即第一个奇异值  $\sigma_1$ , 并用其余的奇异值及其对应的特征向量重构信号可以实现直达波的去掉, 并且基本不会引起目标回波信号的损失。

由上述分析可知主元分析法去除直达波的原理认为各个测点直达波近似相同, 因而直达波信号矩阵的秩近似认为 1, 经过对雷达接收信号矩阵的主元分析, 可以将直达波信号主要反映在一个或很少的几个主元。在实际应用中主元分析法一般采用奇异值分解的方法分解信号矩阵, 因而其对各个测点接收直达波时间的“错动”比较敏感。当所探测的介质表面起伏较大或设备振动等因素造成直达波信号在时间上波动, 这种情况下直接采用主元分析方法去除直达波效果往往不理想, 可以采用相关对齐和振动补偿的方法对直达波的时间波动进行预先修正。

#### 4 主元分析处理算法

主元分析处理算法主要是通过 SVD 分解得到各主元, 通过分析去除那些主要对应于直达波信号的主元, 这些主元基本不反映目标回波的特征信息, 而用其余主元重构信号就可实现直达波的较精确去除。具体去除直达波的处理步骤如下:

(1) 对接收信号矩阵采用第 1 节中提到的细奇异值分解方法进行主元分析, 由式 (1) 可知变换矩阵为  $U = [u_1, u_2, \dots, u_N] \in R^{M \times N}$ , 则可得  $Y = U^T W_R$ ,  $Y \in R^{N \times N}$  可以表示为  $Y = [y_1, y_2, \dots, y_N]^T$ 。  $y_i$  为主元,  $u_i$  为其对应的特征图像。

(2) 分析分解结果, 以找到属于直达波的  $w_i$  进行去除。由步骤 (1) 可知  $W_R = UY = \sum_{i=1}^N u_i y_i = \sum_{i=1}^N w_i$ , 对主元  $y_i$  分析可知, 理想情况下如果  $y_i$  为 delta 函数, 即  $y_i(t) = \delta(t - t_0)$ , 那么所对应的  $w_i$  表示在  $t = t_0$  时刻雷达在各测点的接收信号  $R_i(t)$ 。因此根据直达波时间比目标回波信号时间相对较早的特点, 如果主元  $y_i$  的能量分布为一尖峰且出现在时间相对较早的位置, 则可以认为它是直达波的主元而直接去除。由第 2 节的分析可知  $y_1$  反映主要的直达波信息, 实际处理中各主元的判断可以利用  $y_1$  来进行比对, 以确定是否需要去除。

由于实际雷达发射信号波形不可能是理想脉冲信号, 而具有一定的时间宽度, 因此其能量聚集效果不很明显。为了直观地判断, 对每个主元  $y_i$  各点的能量计算采用窗函数加权的方法。本文采用的是 Kaiser 窗, 即假设窗函数  $w(i)$  长度为  $2N + 1$ , 则主元  $y_i$  的能量分布  $s_i(j)$  可以表示为

$$s_i(j) = \sum_{m=1}^{2N+1} w(m) \cdot (y_i(j + m - N - 1))^2 \quad (4)$$

窗函数长度选取原则一般是与雷达发射信号波形时宽  $\tau$  相对应。

假设  $P = \min(M, N)$ , 则细奇异值分解中非零奇异值的个数就为  $N$ , 主元  $y_i$  的数目也为  $N$ 。如果对  $N$  个主元分别进行能量分布分析, 找出属于直达波的主元, 计算量是很大的, 实际上也没有必要。因为 SVD 分解后, 信号的能量主要集中在前面几个奇异值  $D_{i,i}$  (因为奇异值是按递减的顺序排列的), 后面的一些奇异值贡献很小, 可以忽略。主元个数的选取可以采用能量百分比准则, 即

$$\xi = \left( \frac{\sum_{i=1}^K D_{i,i}^2}{\sum_{i=1}^N D_{i,i}^2} \right) \cdot 100\% \quad (5)$$

确定  $\xi$  后，通过上式就可算出需要选取的主元数目  $M$ ，这样可以明显减小运算量。

(3) 重构信号：根据步骤 (2) 的分析，去除属于直达波信号 (且不包含目标回波信号) 的主元，得到矩阵  $\tilde{Y}$ ，因而此时  $W_s \approx \tilde{W}_R = U\tilde{Y}$ 。

### 5 试验结果及分析

试验：直径为 5 cm 的 PVC 管与直径为 1.9 cm 的细金属管平行放置，水平间距 22.5 cm 埋藏于沙坑中，埋深 9.5 cm，天线距离沙坑表面 2 cm。空间采样间隔为 1 cm，时间采样为在 20 ns 时窗中采 512 个点。在记录数据中取垂置 PVC 管的一个剖面的 70 个采样点进行分析，其剖面堆积图 (B-scan) 如图 3 所示。

接收信号矩阵  $W_R$  大小为  $70 \times 512$ ，用“细 SVD”的方法将其进行分解，则可得到 70 个主元  $y_i, i = 1, 2, \dots, 70$ 。显然对 70 个主元全部进行分析处理是没有必要的，对式 (5) 的取值 99.8%，可以计算出只需取前 10 个主元就能满足要求 (此时  $\xi = 99.81\%$ )。采用式 (4) 计算主元  $y_i$  的能量分布，其中 Kaiser 窗参数  $\beta = 6$ ，窗长度为 71 (雷达反射信号时宽约为 3 ns，对应的采样点数约为 71)，如图 4 所示。计算出前 10 个主元能量分布如图 5 (Ey1 ~ Ey10) 所示。由图可以直观看到 Ey1, Ey2 分布呈现明显尖峰，位置相对靠前，因而可以判断主元  $y_1, y_2$  主要反映了直达波的信息 (与图 3 强反射回波—直达波出现位置比较，可以发现这两个主元位置与直达波位置相吻合)；而 Ey3 ~ Ey5 分布也呈尖峰分布但是位置相对靠后，因此，可以判断主元  $y_3, y_4, y_5$  主要反映目标回波信号的信息。将主元  $y_1, y_2$  去除，而用其它主元重构信号就可实现直达波的去，去除直达波后得到的堆积图 (B-Scan) 如图 6(a) 所示。

通过与传统的平均抵消法去除直达波的效果 (图 6(b)) 对比，可见主元分析法效果要好于平均抵消法。与平均抵消法相比主元分析方法还有另一个突出的优点，各主元能量峰隐含了目标回波信息，可以根据主元能量分布的尖峰位置差异粗略确定出目标埋藏深度。本试验中 Ey3, Ey4 主要对应目标回波信息，而 Ey1, Ey2 主要反映介质表面反射回波信息，故由两者能量尖峰位置之差可粗略估计目标埋藏深度。这是平均抵消法所无法实现的。

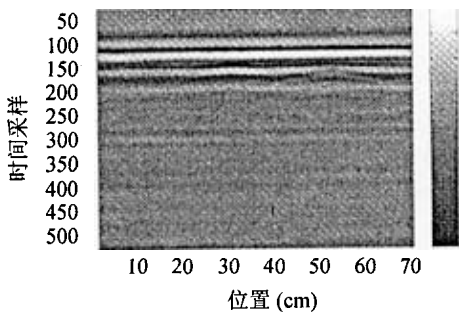


图 3 雷达信号 (B-Scan)

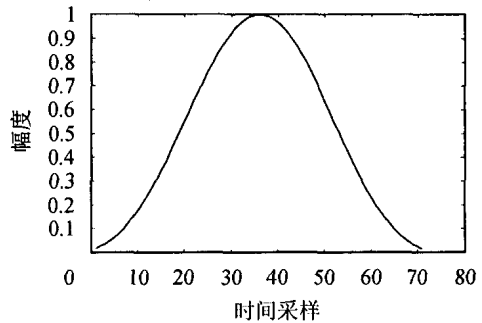


图 4 窗函数 ( $\beta = 6$ )

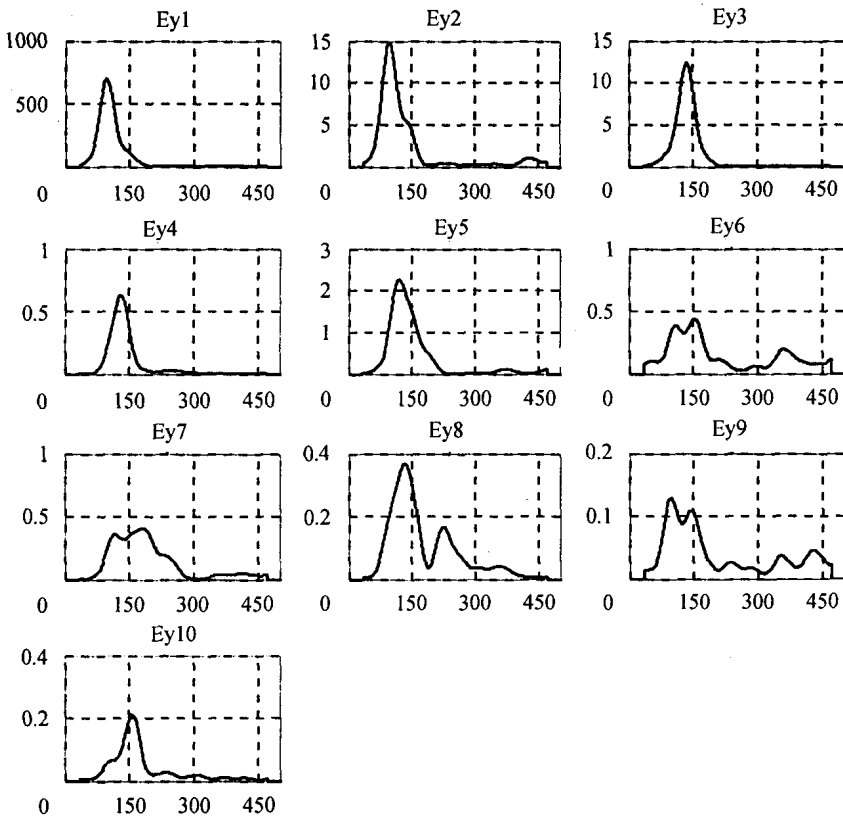


图 5 各主元能量分布 (采用窗函数加权和方法)

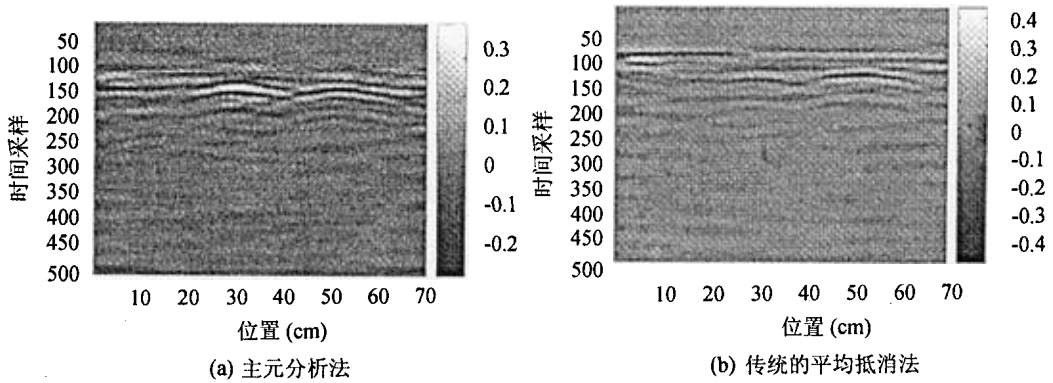


图 6 去除直达波后的信号 (B-Scan)

### 6 结论

本文采用基于 SVD 分解的主元分析法去除瞬态测量系统——SPR 信号接收中的直达波 (耦合波 + 表层反射波)。根据直达波在各个测点近似相同的特性, 从理论上通过仿真模型论述了运用主元分析法在尽量不影响目标回波的情况下直达波去除的可行性。试验结果表明与传统的平均抵消法相比, 该方法能够有效地去除直达波, 而对目标回波信号波形影响很小, 而且具有其

独特的优势...; 同时也指明了该方法工程应用过程中的不足——对时间“错动”比较敏感及其解决方法。

### 参 考 文 献

- [1] Boryssenko A, Boryssenko O, Lishichenko A, *et al.*. Inspection of internal structure of walls by subsurface radar. *SPIE*, 2000, 4084: 32–35.
- [2] Umberto K, Vittorio J. Multitarget detection/tracking for monostatic ground penetrating radar: application to pavement profiling. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote sensing*, 1999, 37(1): 383–394.
- [3] van der Merwe A, Gupta I J. A novel signal processing technique for clutter reduction in GPR measurements of small, shallow land mines. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote sensing*, 2000, 38(6): 2627–2637.
- [4] Salvati J L S, Chen C C, Johnson J T. Theoretical study of a surface clutter reduction algorithm. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote sensing*, 1998, 36(3): 1460–1462.
- [5] Larsson E G, Li J, Habersat J, *et al.*. Removal of surface return in ground-penetrating radar data. *SPIE*, 1999, 4394: 764–775.
- [6] Gunatilaka A H, Baertlein B A. A subspace decomposition technique to improve GPR imaging of anti-personnel mines. *SPIE*, 1997, 4038: 1008–1018.
- [7] Karlsen B, Jakobsen K B, Larsen J, *et al.*. Mine detection using SF-GPR: A signal processing approach for resolution enhancement and clutter reduction. *SPIE*, 1999, 4394: 817–827.
- [8] Osum N, Ueno K. Detection of buried plant. *IEE Proc.-Special Issue on Subsurface Radar*, 1988, 135(4): 330–342.

高守传: 男, 1979 年生, 在读硕士, 主要研究方向: 信息获取、信号处理。  
黄春琳: 男, 1973 年生, 讲师, 主要研究方向: 超宽带系统、信号处理。  
粟毅: 男, 1961 年生, 教授, 主要研究方向: 空间信息处理。