

文章编号:1004-9037(2012)05-0547-05

# 机场场道道面结构层电磁特性反演的辨识方法

何炜琨<sup>1,2</sup> 吴仁彪<sup>2</sup> 刘家学<sup>2</sup>

(1. 天津大学电信学院, 天津, 300072; 2. 中国民航大学智能信号与图像处理天津市重点实验室, 天津, 300300)

**摘要:**研究了基于系统辨识方法的机场场道道面介质层电磁特性的反演问题。在传统系统辨识法反演层状介质电磁特性的基础上,对电磁波在地下介质层中传输时传输模型的建立及回波时延的估计方法作了改进。新方法传输模型中考虑了发射带宽内各频率分量对介质层介电常数虚部的影响,同时引入超分辨率时延估计 WRELAX 算法估计回波信号的时延。实现了具有薄层的道面介质层电磁特性及其厚度的反演,并使道面下各介质层电磁特性的反演精度有所提高。

**关键词:**探地雷达;介电常数;电导率;电磁反演;系统辨识

中图分类号:TN955

文献标识码:A

## Identification of EM Property Inversion for Runway Structure

He Weikun<sup>1,2</sup>, Wu Renbiao<sup>2</sup>, Liu Jiaxue<sup>2</sup>

(1. Electronic and Information Engineering Institute, Tianjin University, Tianjin, 300072, China;

2. Tianjin Key Lab for Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin, 300300, China)

**Abstract:** The electromagnetic properties of the runways structure are important and meaningful for quality surveillance, timing maintenance of runways and correct location of the target underground. The inversion method of the dielectric property and thickness of multilayer media is studied. Based on the conventional system identification method, the construction of the propagation model and the estimation method of time delay of echoes are modified in the proposed method. The new method considers the relationship of the image part of the permittivity and frequency, and introduces the weighted-RELAX (WRELAX) method to estimate the time delay of echoes. The electromagnetic properties and thickness of the runway structure containing the thin layer can be calculated and the estimation precision is improved, compared with the conventional system identification method.

**Key words:** ground penetrating radar (GPR); permittivity; conductivity; electromagnetic inversion; system identification

## 引 言

机场道面介质层电磁特性、厚度及脱空状况是评价机场场道质量的重要因素,对提高机场道面承载能力、延长道面使用寿命、保证机场安全运营具有重要意义。探地雷达(Ground penetrating radar, GPR)作为高分辨率、高精度、高速度的无损探测技术,广泛应用于评价道面状况、跟踪道面变化、检测道面病害等方面。机场道面结构层厚度

的计算是探地雷达在机场场道道面检测中的一个重要应用。为准确计算道面下介质层厚度及被测目标深度,需要计算电磁波在道面下介质层中的传播速度,为此要求比较精确地反演出道面介质层的电磁参数。

基于探地雷达的地下介质电磁特性反演方法主要有层剥反演和基于接收信号模型的电磁反演方法<sup>[1]</sup>,这两种方法均未考虑地下介质层的损耗特性。近几年,大多围绕基于雷达波正演模型来反演有耗介质层的电磁特性<sup>[2-6]</sup>。文献[2]基于高斯-牛

顿迭代算法得到了单层介质介电常数随频率的变化关系,但该算法只限于单层介质。文献[3-6]基于系统辨识方法实现了单层及多层介质介电常数和厚度的联合反演,该算法将系统辨识理论引入到路面结构层电磁特性反演中,从而能够基于有效的参数调整算法解决雷达波模拟合成信号和实测信号的拟合问题。该方法所建立的电磁波在多层介质中的传输模型认为介质层介电常数虚部是发射脉冲带宽内各频率分量所对应虚部的一个综合效应,即介电常数虚部是一个与频率无关的常量;电磁波在各结构层中的传输时间是根据雷达接收波形直接搜索得到的,若实现回波信号时延估计,则要求各回波能够完全分开且具有一定的强度。

本文所提出的电磁特性反演算法中,电磁波在地下介质层中的传输模型考虑了介质层介电常数虚部对电导率、频率的依赖关系,即介电常数虚部是频率的函数,从而进一步实现了介质层电导率的反演。同时基于超分辨率时延估计 WRELAX 算法<sup>[7]</sup>估计反射回波的时延,从而实现了薄层介质回波信号的检测及其电磁特性的估计。

## 1 电磁波在介质层中的传播模型

探地雷达天线发射出的电磁波在到达场道道面时,其波前可近似看成为平面,且当收发天线间距很近及道面倾角很小时,发射波波前可近似看作与道面垂直<sup>[8]</sup>。根据探地雷达电磁波的波动方程及其传输特性,当同时考虑电磁波在介质层交界面上的反射、折射及其在介质层中传播的能量衰减(介质层电导率的影响),对于  $N$  层介质,电磁波在其中传输时所对应的传输函数可表示为<sup>[4]</sup>

$$H(\omega) = \sum_{j=1}^N \left[ R_j \prod_{i=1}^{j-1} (1 - R_i^2) T_i^2 \right] \quad (1)$$

式中  $R_i$  为电磁波在第  $i$  个交界面上的反射系数

$$R_i = \frac{\sqrt{\bar{\epsilon}_i} - \sqrt{\bar{\epsilon}_{i+1}}}{\sqrt{\bar{\epsilon}_i} + \sqrt{\bar{\epsilon}_{i+1}}} \quad (2)$$

式中  $T_i$  为电磁波在第  $i$  层介质中传输时所对应的传输系数

$$T_i = \exp \left[ \frac{-j\omega d_i \sqrt{\bar{\epsilon}_i}}{c} \right] = \exp \left[ -j \frac{1}{2} \frac{\omega \tau_i \sqrt{\bar{\epsilon}_i}}{\sqrt{\bar{\epsilon}_i^R}} \right] \quad (3)$$

式中:  $c$  为电磁波在空气中的传播速度;  $d_i$  为介质层厚度;  $\tau_i$  为电磁波在介质层中传播的双程时延;  $\bar{\epsilon}_i$  为第  $i$  层介质所对应的相对介电常数,具体可表示

为  $\bar{\epsilon}_i = \bar{\epsilon}_i^R - j \bar{\epsilon}_i^I$ ,  $\bar{\epsilon}_i^R$  为其实部,由 Maxwell 方程可知

$$\bar{\epsilon}_i^I = \frac{\sigma_i}{\omega \epsilon_0} \quad (4)$$

式中:  $\sigma_i$  为第  $i$  层介质所对应的电导率;  $\epsilon_0$  为空气层介电常数;  $\omega$  为角频率。由式(2~4)可知,由于考虑了介质层介电常数虚部对电导率、频率的依赖关系,因而介电常数虚部的反演可以转化为电导率的反演,且上述反射系数与传输系数均为频率的函数,进而由入射波频谱及电磁波在多层介质中传输时所对应的传输函数可得到模拟合成信号,即

$$F_{r,\text{syn}}(\omega) = F_i(\omega) H(\omega) \quad (5)$$

式中:  $F_i(\omega)$  为入射波频谱;  $F_{r,\text{syn}}(\omega)$  为模拟合成波频谱。

建立了道面结构体系电磁波传播模型(正演模型),将雷达入射波和初始模型参数输入到正演模型,从而提供了电磁波在道面结构体系中传播的模拟反射信号。合理的正演模型是基于系统辨识法反演介质层电磁特性的基础。

## 2 多层介质电磁特性及其厚度反演的系统辨识法

系统辨识法是根据系统的输入和输出数据来辨识系统的特性参数。首先建立一个合理的正演模型来模拟未知系统,然后通过迭代过程修改模型参数使其与实际系统之间的误差在某种意义上达到最小。

### 2.1 多层介质电磁特性反演

在获得实际接收数据及合理的正演模型的基础上,系统辨识法反演介质电磁特性的关键在于参数调整算法,本文基于灵敏度分析实现参数调整,其实质是通过输出对被调参数的灵敏度求得参数的调整量。

设有一机场场道道面结构,介质层层数为  $N$  ( $N$  值可根据探地雷达接收信号的回波数目确定,对于机场场道,道面结构较为规整,一般由面层、上基层、下基层、土层组成),与其对应的系统模型可以表示为

$$E = E(\mathbf{p}, x, t) \quad (6)$$

式中:  $E$  为雷达反射波幅,它是道面介质层介电常数实部、电导率以及时间、空间的函数;  $\mathbf{p} = [\bar{\epsilon}_1^R, \sigma_1, \bar{\epsilon}_2^R, \sigma_2, \dots, \bar{\epsilon}_N^R, \sigma_N]^T$  为道面介质层电磁参数矢量;  $\bar{\epsilon}_i^R$  和  $\sigma_i$  分别为第  $i$  层介质所对应的介电常数实部及电导率;  $x, t$  分别为独立的空间和时间变量。对任意函数  $E_k(\mathbf{p}, x_k, t_k)$  进行泰勒级数展开,且只保留一

阶级数项,则有

$$\mathbf{E}_k(\mathbf{p} + \Delta\mathbf{p}) = \mathbf{E}_k(\mathbf{p}) + \nabla \mathbf{E}_k \cdot \Delta\mathbf{p} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{E}_k(\mathbf{p} + \Delta\mathbf{p})$ 是时间变量为 $t_k$ ,空间变量为 $x_k$ 时所对应的实际雷达接收信号; $\mathbf{E}_k(\mathbf{p})$ 是时间变量为 $t_k$ ,空间变量为 $x_k$ ,且道面结构层参数矢量为 $\mathbf{p}$ 时的模拟合成信号; $\nabla \mathbf{E}_k$ 是模拟合成信号对参数矢量 $\mathbf{p}$ 的微分; $\Delta\mathbf{p}$ 为模拟合成信号所对应的道面结构层参数矢量与实际道面结构层参数矢量之间的误差。由此可得时间变量为 $t_k$ ,空间变量为 $x_k$ 时,实际接收信号与模拟合成信号之间的误差 $e_k$ 为

$$e_k = \mathbf{E}_k(\mathbf{p} + \Delta\mathbf{p}) - \mathbf{E}_k(\mathbf{p}) = \nabla \mathbf{E}_k \cdot \Delta\mathbf{p} \quad (8)$$

$$\nabla \mathbf{E}_k = \left[ \frac{\partial \mathbf{E}_k}{\partial \bar{\epsilon}_1^R} \quad \frac{\partial \mathbf{E}_k}{\partial \sigma_1} \quad \dots \quad \frac{\partial \mathbf{E}_k}{\partial \bar{\epsilon}_N^R} \quad \frac{\partial \mathbf{E}_k}{\partial \sigma_N} \right]$$

$$\Delta\mathbf{p} = [\Delta \bar{\epsilon}_1^R \Delta \sigma_1 \Delta \bar{\epsilon}_2^R \Delta \sigma_2 \dots \Delta \bar{\epsilon}_N^R \Delta \sigma_N]^T$$

式中: $\frac{\partial \mathbf{E}_k}{\partial \bar{\epsilon}_i^R}$ 为模拟合成信号对第 $i$ 层介质介电常数实部的微分; $\frac{\partial \mathbf{E}_k}{\partial \sigma_i}$ 为模拟合成信号对第 $i$ 层介质电导率的微分; $\Delta \bar{\epsilon}_i^R$ 为模拟合成信号所对应的第 $i$ 层介质介电常数实部与实际道面结构第 $i$ 层介质介电常数实部的偏差; $\Delta \sigma_i$ 为模拟合成信号所对应的第 $i$ 层介质电导率与实际道面结构第 $i$ 层介质电导率的偏差。因此,可得

$$e_k = \nabla \mathbf{E}_k \cdot \Delta\mathbf{p} = \frac{\partial \mathbf{E}_k}{\partial \bar{\epsilon}_1^R} \Delta \bar{\epsilon}_1^R + \frac{\partial \mathbf{E}_k}{\partial \sigma_1} \Delta \sigma_1 + \dots + \frac{\partial \mathbf{E}_k}{\partial \bar{\epsilon}_N^R} \Delta \bar{\epsilon}_N^R + \frac{\partial \mathbf{E}_k}{\partial \sigma_N} \Delta \sigma_N \quad (9)$$

等号两侧同时除以 $\mathbf{E}_k$ ,使其无量纲化,即

$$\frac{e_k}{\mathbf{E}_k} = \frac{\partial \mathbf{E}_k}{\partial \bar{\epsilon}_1^R} \frac{\bar{\epsilon}_1^R}{\mathbf{E}_k} \frac{\Delta \bar{\epsilon}_1^R}{\bar{\epsilon}_1^R} + \frac{\partial \mathbf{E}_k}{\partial \sigma_1} \frac{\sigma_1}{\mathbf{E}_k} \frac{\Delta \sigma_1}{\sigma_1} + \dots + \frac{\partial \mathbf{E}_k}{\partial \bar{\epsilon}_N^R} \frac{\bar{\epsilon}_N^R}{\mathbf{E}_k} \frac{\Delta \bar{\epsilon}_N^R}{\bar{\epsilon}_N^R} + \frac{\partial \mathbf{E}_k}{\partial \sigma_N} \frac{\sigma_N}{\mathbf{E}_k} \frac{\Delta \sigma_N}{\sigma_N} \quad (10)$$

若一个雷达反射波由 $M$ 个采样点组成,且令

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} e_1 & e_2 & \dots & e_M \\ E_1 & E_2 & \dots & E_M \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{F} = [F_{k,l}], F_{k,l} = \frac{\partial \mathbf{E}_k}{\partial \mathbf{p}(l)} \frac{\mathbf{p}(l)}{\mathbf{E}_k}$$

$$k = 1, 2, \dots, M; l = 1, 2, \dots, 2N$$

$$\alpha = \left[ \frac{\Delta \bar{\epsilon}_1^R}{\bar{\epsilon}_1^R} \quad \frac{\Delta \sigma_1}{\sigma_1} \quad \dots \quad \frac{\Delta \bar{\epsilon}_N^R}{\bar{\epsilon}_N^R} \quad \frac{\Delta \sigma_N}{\sigma_N} \right]^T$$

则式(10)可写为如下矩阵方程形式

$$\mathbf{F}\alpha = \mathbf{r} \quad (11)$$

求解控制方程式(11)即可得到参数的调整量 $\alpha$ ,然而矩阵 $\mathbf{F}$ 并非都非常理想,本文基于奇异值分解技术解决病态方程的求解问题<sup>[6]</sup>。获得参数调整矢量 $\alpha$ 后,逐步更新路面结构层电磁参数矢量 $\mathbf{p}$ ,确定此时的模拟合成信号 $\mathbf{E}_k(\mathbf{p})$ ,使模拟合成信号与实际

接收信号之间的误差 $e_k$ 达到最小,根据此时的电磁参数矢量 $\mathbf{p}$ 即可得到道面下各介质层介电常数实部与电导率的估值。

## 2.2 多层介质厚度的反演

雷达波正演模型的输入参数包括雷达入射波、各结构层介电常数的实部、电导率以及厚度,由于各结构层厚度和介电常数的实部之间存在如下关系

$$d_i = \frac{1}{2} \frac{c}{\sqrt{\bar{\epsilon}_i^R}} \tau_i \quad (12)$$

由此可知,只要已知各结构层介电常数的实部及电磁波在其中的传播时间即可得到该介质层的厚度。文献[4]中,各结构层对应的雷达回波时延是根据计算机直接搜索得到的,此时要求各回波信号要完全分开,且具有一定的能量。实际的机场场道道面结构中,为找平基层表面,保证面层的厚度均匀,一般在混凝土面层与基层之间有一个找平薄层,此时该薄层的回波信号与表层回波不能完全分开。为实现薄层回波信号的时延估计,本文引入超分辨率参数估计WRELAX算法<sup>[7]</sup>实现回波信号的时延估计,进而实现各结构层的厚度反演。

综上所述,基于系统辨识法的多层介质电磁特性及其厚度的反演过程如图1所示。由于正演模型中考虑了介质层介电常数虚部与电导率、发射信号频率之间的具体函数关系式(4),即考虑了发射信

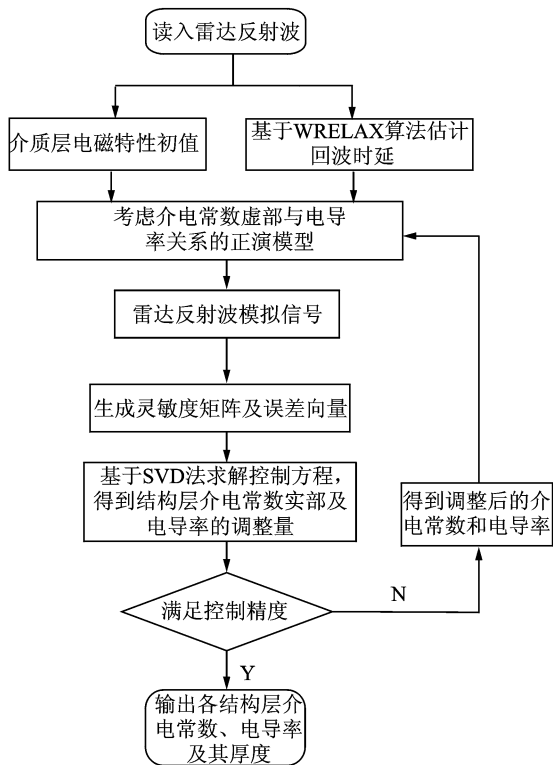


图1 电磁参数及厚度反演流程图

号带宽内各个频率分量的影响,从而将介电常数虚部的反演转化为电导率的反演。文献[4]中考虑的介电常数虚部为发射脉冲带宽内各频率分量所对应虚部的一个综合效应,因而本文方法介电常数的反演精度要高于文献[4]算法的反演精度,但同时计算量也随之加大。

### 3 仿真实验

为验证本文方法的有效性,进行了机场场道道面下各介质层电磁特性及其厚度的反演。机场场道道面典型结构包括混凝土面层、碎石上基层、沙砾下基层、土层4层结构,与其对应的地下结构如图2所示。仿真实验中,发射脉冲信号为Ricker脉冲<sup>[9]</sup>,其对应的中心频率为900 MHz,时间窗为20 ns,信噪比为20 dB。本文根据探地雷达参数及地下介质层电磁特性,基于通用的GprMax软件<sup>[9]</sup>得到的接收信号如图3所示。

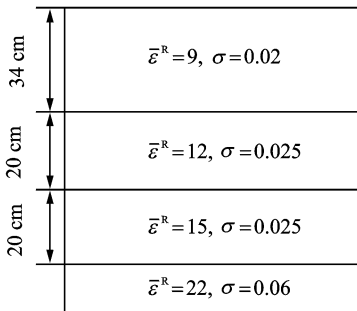


图2 仿真实验1对应的道面结构

表1 实验1对应的反演算法性能比较

方法	相对介电常数实部误差		电导率误差		厚度误差	
	表层	基层	表层	基层	表层	基层
	$\bar{\epsilon}^R = 9$	$\bar{\epsilon}^R = 12$	$\sigma = 0.02 \text{ s/m}$	$\sigma = 0.025 \text{ s/m}$	$d = 34 \text{ cm}$	$d = 20 \text{ cm}$
文献[4]算法	0.69	1.61	—	—	0.32	0.80
本文算法	0.31	1.47	5.68	6.78	0.15	0.73

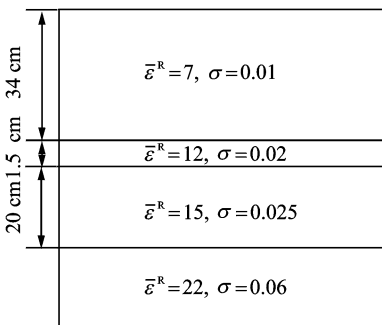


图4 仿真实验2对应的道面结构

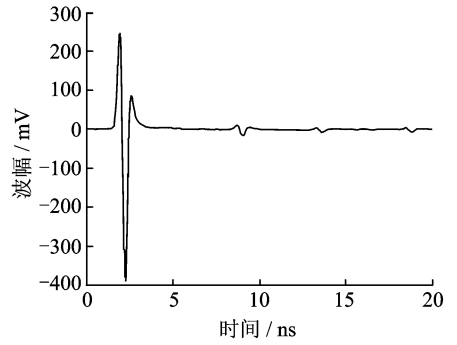


图3 仿真实验1接收信号

利用WRELAX进行回波信号的时延估计,然后利用文献[4]中传统的系统辨识方法反演地下介质介电常数实部、虚部及其厚度,得到的结果如表1所示,其中的误差为均方相对误差。对于机场道面结构而言,关注的是表层和基层特性,机场道面常见的灾害(脱空和裂缝)也多发生于表层和基层,因而本文只进行了表层和基层特性的反演。若考虑介质层介电常数虚部对电导率、频率的依赖关系,基于本文提出的方法对该结构层进行了介电常数实部及电导率的反演,反演结果如表1所示,由表1可以看出,由于考虑了发射信号带宽内各个频率分量的影响,因而本文算法介电常数的反演精度要高于文献中算法的反演精度,但同时计算量也随之加大。

为了突出超分辨率参数估计WRELAX算法在电磁特性反演中的实际意义,本文还仿真了具有找平层的机场场道道面结构,如图4所示,与其对应的接收回波信号如图5所示。

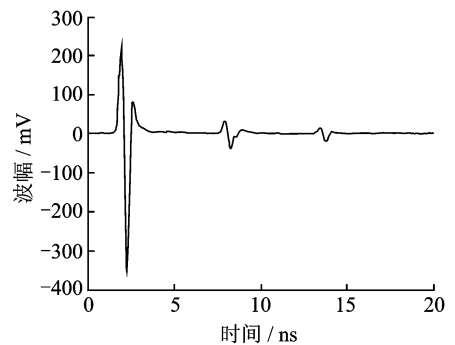


图5 仿真实验2接收信号

由图5可以看出,由于该结构具有很薄的找平层,因而第2,3个回波信号不能完全分开,如果采用文献[4]中传统的系统辨识的方法,则不能成功地得到回波时延。基于WRELAX可以估计出薄层

上下界面对应的回波信号的幅度和时延信息,同时利用本文的系统辨识法及上述回波信号的时延信息反演介质层介电常数实部、电导率及其厚度得到的结果如表2所示。

表2 实验2对应的本文算法性能分析

方法	相对介电常数实部误差			电导率误差			厚度误差		
	表层	找平层	基层	表层	找平层	基层	表层	找平层	基层
	$\bar{\epsilon}^R = 7$	$\bar{\epsilon}^R = 12$	$\bar{\epsilon}^R = 15$	$\sigma = 0.01 \text{ s/m}$	$\sigma = 0.0 \text{ s/m}$	$\sigma = 0.025 \text{ s/m}$	$d = 34 \text{ cm}$	$d = 1.5 \text{ cm}$	$d = 20 \text{ cm}$
本文算法	0.64	1.58	2.18	4.61	8.94	9.13	0.31	0.66	1.2

### 4 结束语

本文所提出的方法实现了多层有耗介质电磁特性及其厚度的反演。该方法以系统辨识法为整个算法的核心,超分辨率时延估计算法WRELAX是系统识别法的补充,利用WRELAX估计回波信号的时延,同时考虑了介质层介电常数虚部对电导率、发射信号频率的依赖关系,实现了具有薄层结构的多层有耗介质介电常数、电导率及其厚度的同时反演,且其精度也得到了提高,但其计算复杂度较高,不适合实时信号处理。

#### 参考文献:

[1] Umberto S. Permittivity measurements of multilayered media with monostatic pulse radar [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(2): 454-463.

[2] Amara L. Development of ground penetrating radar signal modeling and implementation for transportation infrastructure assessment [D]. Virginia, USA: the Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001:60-88.

[3] Wand F, Lytton R L. System identification method for backcalculating pavement layer properties [J]. TRB, 1993, 1384:1-7.

[4] 张蓓. 路面结构层材料介电特性及其厚度反演分析的系统识别方法[D]. 重庆:重庆大学, 2003.

Zhang Bei. System identification method for backcalculating the dielectric property and thickness of pavement structures—study on applied technology of

ground penetrating radar [D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2003.

[5] Zhong Yanhui, Wang Fuming, Zhang B, et al. System identification method for evaluating the effect of thickness error on backcalculated pavement layer moduli [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2004, 38(Z):182-187.

[6] 钟燕辉. 层状体系介电特性反演及其工程应用[D]. 大连:大连理工大学, 2006.

Zhong Yanhui. Inverse analysis of dielectric properties of layered structures and the applications in engineering [D]. Dalian, China: Dalian University of Technology, 2006.

[7] Li J, Wu R B. An efficient algorithm for time delay estimation [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1998, 46:2231-2235.

[8] 谭覃燕, 宋耀良. 超宽带穿墙SAR成像中的多径干扰抑制[J]. 数据采集与处理, 2011, 26(3):300-307.

Tan Qinyan, Song Yaoliang. Multipath interference suppression for through-the-wall SAR imaging [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2011, 26(3):300-307.

[9] Antonis G. Modeling ground penetrating radar using GprMax [J]. Construction and Building Material, 2005, 19(10):755-762.

作者简介:何炜琨(1977-),女,博士研究生,研究方向:探地雷达信号处理,E-mail: hwkcauc@yahoo.com.cn; 吴仁彪(1966-),男,教授,研究方向:探地雷达信号处理、自适应阵列信号处理、空时自适应处理等;刘家学(1971-),男,教授,研究方向:雷达信号处理。