

基于 SFCW 雷达的多场景墙体参数反演*

葛薇 张照 彭正辉 王春和

(中国电波传播研究所 青岛 266107)

摘要: 穿墙探测所处的外界环境内通常存在多种散射体,是否存在金属物品、有无人体对墙体参数反演具有不同的影响,进而影响穿墙定位与成像的准确性。将不同的外界环境分为不同场景,根据电磁波传播理论和菲涅尔公式建立电磁波穿墙传播模型,并详细阐述了用于提高步进扫频连续波(steped frequency continuous wave, SFCW)穿墙雷达分辨率的 Extend Prony 算法和墙体参数快速反演算法,得出一种反演墙体介电常数和厚度的方法,并在墙后无散射体场景、墙后存在金属物体场景和墙后存在人体场景多场景中进行实验,最后将真实值与实验结果对比,表明在不同场景中具有较强适应性,反演出的墙体参数是现场穿墙探测的重要参考依据。

关键词: 多场景; 步进扫频连续波雷达; 墙体参数反演; Extend Prony

中图分类号: TN959.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.70

Wall parameters inversion in multi-scenes based on SFCW radar

Ge Wei Zhang Zhao Peng Zhenghui Wang Chunhe

(China Research Institute of Radio Wave Propagation, Qingdao 266107, China)

Abstract: Through-Wall detection is usually in the external environment with many scatterers. Whether metal objects or people exist or not has different effects on wall parameters inversion, and further affects the accuracy of locating and imaging through the wall. Different external environment is simplified different scenes. A model of electromagnetic wave propagation through the wall is built according to the theory of electromagnetic wave propagation and the Fresnel equations, and the theory and procedure of extend prony method for enhancement resolution in a SFCW through-wall radar and wall parameters inversion fast algorithm are described. A method of wall permittivity and thickness inversion is presented, and the experiment is performed in multi-scenes. At last, the results of the experiments are contrasted with the true value. It is concluded that the method is highly adaptable in different scenes, and the wall parameters calculated are valuable references of through-wall detection in reality.

Keywords: multi-scenes; stepped frequency continuous wave (SFCW) radar; wall parameters inversion; Extend Prony

1 引言

穿墙雷达(through-wall radar, TWR)能够穿透不含或含少量钢筋的墙体探测墙后信息。步进扫频连续波(steped frequency continuous wave, SFCW)穿墙雷达发射频率带精确可控^[1],发射能量大效率高,提高了雷达的穿透深度,不仅可以不使用非色散天线,而且可以使用对数螺旋天线,对数螺旋天线外型紧凑,具有聚焦功能,非常适合穿墙探测^[2]。

执法抓捕、反恐维稳、灾难救援过程中,利用穿墙雷达对墙后或废墟下人体定位和成像或反演建筑布局,都必须考虑墙体对探测结果的影响,如图像散焦和偏移,虚警较

多,边界模糊,因此墙体参数反演成为穿墙雷达准确定位和成像的重要环节^[3-6]。此外,位于墙后或废墟下的人体处于一个复杂的多散射环境内,环境中静止的物体和不相关的人体走动都会影响反演结果^[7-8]。当前主要的墙体参数反演方法是基于时域反射测量法,此种方法要求墙体和雷达设备之间存在很长一段距离,这不适用于战场等危急环境,并且反演过程需要大量的迭代算法,耗时长^[9]。

针对上述问题,本文将不同外界环境分为不同场景,分别研究了墙后无散射体场景、墙后存在金属物体场景和墙后存在人体场景,用 Extend Prony 算法提高雷达系统分辨率,采用快速反演算法反演墙体介电常数和厚度数据,实验数据表明反演结果准确,在战场等特殊环境下可行性高。

收稿日期:2016-10

* 基金项目:国家自然科学基金(61327805)资助项目

2 墙体参数反演原理和步骤

由电磁波传播理论,图1所示为墙体对电磁波的反射和透射作用,其中 D_w 为墙体厚度, ϵ_w 为墙体介电常数, $h_1(n)$ 表示仅在空气-墙界面发生一次反射后即被接收天线接收的电磁波,即一次反射波, $h_2(n)$ 表示穿透空气-墙界面进入墙内部,到达墙-空气界面又被反射回空气-墙界面并穿出墙体被接收天线接收的电磁波,即二次反射波。当电磁波入射到平坦的墙体表面时,在墙体的前表面(空气-墙界面)和后表面(墙-空气界面)都发生多次反射和透射,其中反射波的主要能量集中在 $h_1(n)$ 和二次反射波 $h_2(n)$ 中,由于 $h_1(n)$ 和 $h_2(n)$ 占据了接收天线接收的反射回波的大部分能量,因此下文主要利用这两种反射回波进行墙体参数反演。而透射波主要用于墙后目标检测^[10,11]。

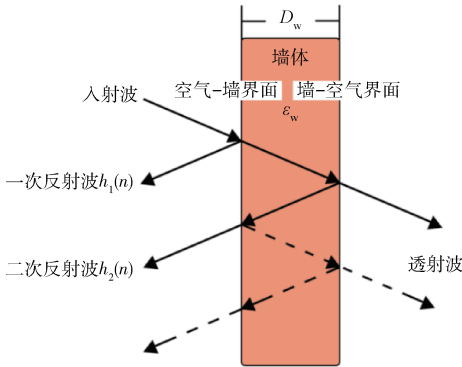


图1 墙体对电磁波的反射和透射作用

根据菲涅尔公式:

$$\Gamma_1 = \frac{\sqrt{\epsilon_a} - \sqrt{\epsilon_w}}{\sqrt{\epsilon_a} + \sqrt{\epsilon_w}} \quad (1)$$

$$\Gamma_2 = \frac{\sqrt{\epsilon_w} - \sqrt{\epsilon_a}}{\sqrt{\epsilon_w} + \sqrt{\epsilon_a}} \quad (2)$$

$$T = \frac{2\sqrt{\epsilon_a \epsilon_w}}{\sqrt{\epsilon_a} + \sqrt{\epsilon_w}} = \sqrt{1 - \Gamma^2} \quad (3)$$

式(1)~(3)中: Γ_1 为空气-墙界面(图1)的反射系数, Γ_2 为墙-空气界面(图1)的反射系数, T 为透射系数, ϵ_w 为墙体介电常数, ϵ_a 为空气或真空中介电常数。

首先确定反射系数 Γ 。由于空气-墙界面的入射波无法直接测量得到,实验中,收发天线同侧放置,将大金属铜板放置在与收发天线装置相距 d_1 处,认为经大金属铜板反射被接收天线接收的电磁波 $h_m(n)$ 即为空气-墙界面的入射波。同样的,将收发天线置于墙体一侧距墙 d_1 处,测量墙体反射回波 $h(n)$ 。由雷达回波数据的峰值,计算得到^[2]:

$$\Gamma = -\frac{\|h_1(n)\|_{\infty}}{\|h_m(n)\|_{\infty}} = -\frac{\|h(n)\|_{\infty}}{\|h_m(n)\|_{\infty}} \quad (4)$$

获得准确的 $h(n)$ 和 $h_m(n)$ 要求提高系统分辨率,由于SFCW雷达信号会出现频率锐截止,在此处理过程中不可避免的引入旁瓣干扰,本文用Extend Prony算法对步进扫频穿墙雷达的回波信号在频域进行处理,提高分辨率。然后可计算出墙体相对介电常数 ϵ_{rw} :

$$\epsilon_{rw} = \frac{(1 - \Gamma)^2}{(1 + \Gamma)^2} \quad (5)$$

进而求得墙体内部电磁波传播速度 v_w ,单位为m/s。

$$v_w = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{rw}}} \quad (6)$$

式中: c (单位m/s)为电磁波在空气中传播速度,由墙内传播时间 Δt (单位s),计算墙体厚度 D_w (单位m):

$$D_w = \frac{v_w \Delta t}{2} \quad (7)$$

3 Extend Prony 算法原理和步骤

在1795年,Prony提出了用指数函数的线性组合描述等间距采样数据。经适当扩展后,Extend Prony方法可用来估计有理式功率谱密度^[12-13]。

步进扫频连续波探地雷达系统接收的回波信号可以看作是在 N 个频率向量 $\{f_k\}_0^{N-1}$ 上的等 Δf 间隔采样,该频率向量为^[14]:

$$f_k = f_0 + n\Delta f \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (8)$$

ExtendProny方法是将每个频点采集的数据看作是一组 m 个具有任意幅值、相位、频率与衰减因子的指数函数累和,其离散时间的函数形式为:

$$\hat{h}(n) = \sum_{i=1}^m b_i z_i^k \quad (9)$$

其中, $n = 0, 1, \dots, N-1$ 或 k_0, k_1, \dots, k_{N-1} , $\hat{h}(n)$ 作为 $h(n)$ 的近似,式(9)中, m 代表模型阶数,

$$b_i = A_i \exp(j\theta_i) \quad (10)$$

$$z_i = \exp[(\alpha_i + i2\pi f_i)\Delta t] \quad (11)$$

式中: A_i 为幅值, θ_i 为相位(单位rad), α_i 为衰减因子, f_i 表示振荡频率, Δt 表示采样间隔,方便统计,令 $\Delta t=1$ 。

构造代价函数

$$\epsilon = \sum_{n=0}^{N-1} |h(n) - \hat{h}(n)|^2 \quad (12)$$

在确保误差平方和 ϵ 最小的情况下,求出参数四元组 $(A_i, \theta_i, \alpha_i, f_i)$ 。在这里仅讨论参数四元组的线性估计问题。由文献[14]推导可得 $\hat{h}(n)$ 满足递推差分方程式:

$$\hat{h}(n) = -\sum_{i=1}^m \alpha_i \hat{h}(n-i), n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (13)$$

最小能量误差:

$$\epsilon_m = \sum_{j=0}^m \alpha_j \left[\sum_{n=m}^{N-1} h(n-j) h^*(n) \right] \quad (14)$$

具体步骤如下:

1) 构造扩展阶矩阵 \mathbf{R} 。

$$\mathbf{R}_i = \begin{bmatrix} r(1,0) & r(1,1) & \cdots & r(1,M) \\ r(2,0) & r(2,1) & \cdots & r(2,M) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r(M,0) & r(M,1) & \cdots & r(M,M) \end{bmatrix}, M > m \quad (15)$$

其中 M 为 m 的初始值, $r(i,j) = \sum_{n=p}^{N-1} h(n-j)h^*(n-i)$, $i, j = 0, 1, \dots, m$, $*$ 表示共轭运算。

2) 利用 SVD-TLS(singular value decomposition-total least squares) 算法确定矩阵 \mathbf{R}_i 的有效秩 m , 即模型阶数^[15]。

3) 由 Prony 方法的方程形式:

$$\begin{bmatrix} r(0,0) & r(0,1) & \cdots & r(0,m) \\ r(1,0) & r(1,1) & \cdots & r(1,m) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r(m,0) & r(m,1) & \cdots & r(m,m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_m \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

其中 $r(i,j) = \sum_{n=p}^{N-1} h(n-j)h^*(n-i)$, $i, j = 0, 1, \dots, m$, $*$ 表示共轭运算。

求解系数向量 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ 和特征多项式 $1 + \alpha_1 z^{-1} + \dots + \alpha_m z^{-m} = 0$ 的根 $z_i, i = 1, 2, \dots, m$, 并且利用式(13)求出 $\hat{h}(n), n = 1, 2, \dots, N-1$, 其中 $\hat{h}(0) = h(0)$ 。

4) 将指数模型式(9)简化为位置参数 b_i 的线性方程:

$$\mathbf{Z}\mathbf{b} = \hat{\mathbf{h}} \quad (17)$$

其中,

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ z_1 & z_2 & \cdots & z_m \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \cdots & z_m^{N-1} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\mathbf{b} = [b_1, b_1, \dots, b_m]^T \quad (19)$$

$$\hat{\mathbf{h}} = [\hat{h}(0), \hat{h}(1), \dots, \hat{h}(N-1)]^T \quad (20)$$

式(17)的最小二乘解为:

$$\mathbf{b} = (\mathbf{Z}^H \mathbf{Z})^{-1} \mathbf{Z}^H \hat{\mathbf{h}} \quad (21)$$

计算得到参数 b_1, b_2, \dots, b_m

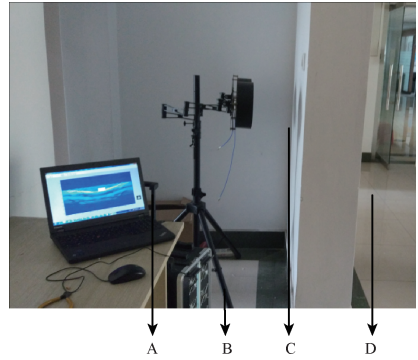
5) 计算幅值 A_i , 相位 θ_i , 频率 f_i , 衰减因子 α_i :

$$A_i = |b_i|, \theta_i = \arctan[\text{Im}(b_i)/\text{Re}(b_i)], f_i = \arctan[\text{Im}(z_i)/\text{Re}(z_i)]/2\pi\Delta t, \alpha_i = \text{Im}|z_i|/\Delta t, i = 1, \dots, m \quad (22)$$

由此可得到指数函数累计和表示的雷达回波信号。

4 墙体参数反演结果

本文所采用的步进扫频穿墙雷达有效带宽为 40 MHz~4.4 GHz, Δf 为 5 MHz, 采样间隔为 4.42 ms, 所使用的天线为一对对数螺旋天线, 如图 2 所示。



A: 上位机; B: 步进扫频穿墙雷达系统主机; C: 单发单收对数螺旋天线; D: 钢筋混凝土墙体

图 2 实验平台

4.1 实验并提取 $h_{in}(n)$

实验所选用的墙体为常见楼房建筑所使用的钢筋混凝土墙体, 墙体介电常数为 5~7, 墙体厚度为 29 cm。将 122 cm×102 cm 的大金属铜板放置在与收发天线装置相距 d_1 处, 用 Extend Prony 方法处理得到 $h_{in}(n)$ 如图 3 所示。

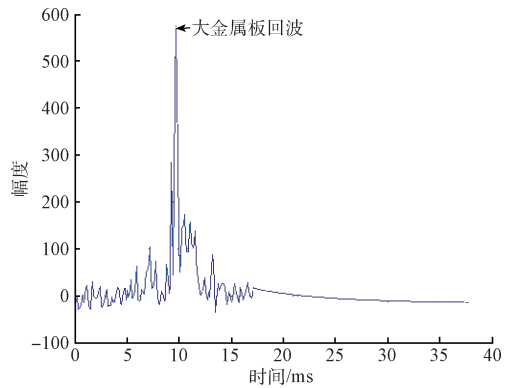


图 3 经 Extend Prony 方法处理得到的 $h_{in}(n)$

4.2 墙后无散射体时实验并提取 $h(n)$

墙后无散射体时, 图 4 所示为用 Extend Prony 方法处理得到墙体反射回波数据 $h(n)$ 。

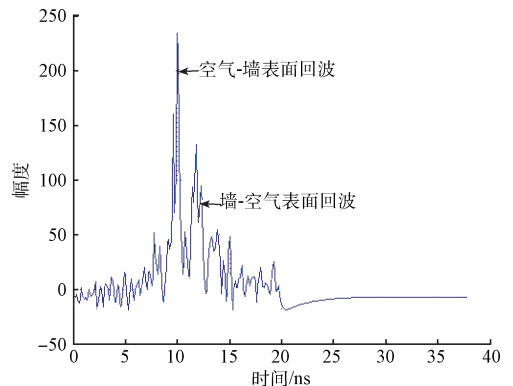


图 4 墙后无散射体时经 Extend Prony 方法处理得到的 $h(n)$

代入式(4)计算可得到反射系数,进一步代入式(5)~(7)计算得到墙体相对介电常数 ϵ_{rw} 为 5.66,墙体中波速为 v_w 为 1.26×10^8 m/s,墙体厚度 D_w 为 28.7 cm。

4.3 墙后存在金属物体时实验并提取 $h(n)$

墙后存在金属物体时,用金属板模拟铁皮柜子等金属制品,当金属板贴墙放置正对天线时,图5所示为用 Extend Prony 方法处理得到墙体反射回波数据 $h(n)$ 。

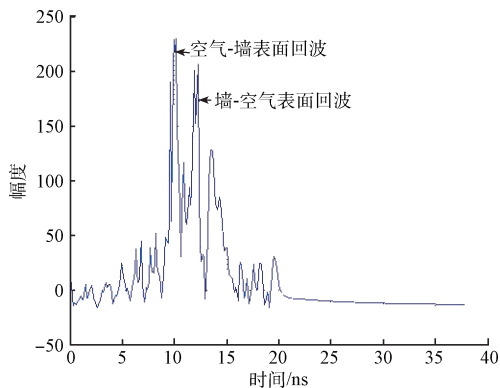


图5 墙后金属物体贴墙时经 Extend Prony 方法处理得到的 $h(n)$

代入式(4)计算可得到反射系数,进一步代入式(5)~(7)计算得到墙体相对介电常数 ϵ_{rw} 为 5.39,墙体中波速为 v_w 为 1.29×10^8 m/s,墙体厚度 D_w 为 29.6 cm。

当金属板放置在距墙 25 cm 正对天线时,图6表示用 Extend Prony 方法处理得到墙体反射回波数据 $h(n)$ 。

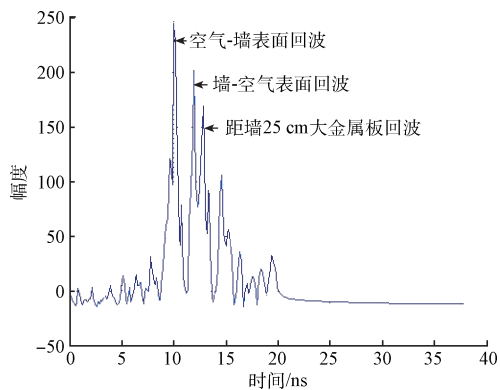


图6 墙后金属物体距墙 25 cm 时经 Extend Prony 方法处理得到的 $h(n)$

代入式(4)计算可得到反射系数,进一步代入式(5)~(7)计算得到墙体相对介电常数 ϵ_{rw} 为 6.14,墙体中波速为 v_w 为 1.21×10^8 m/s,墙体厚度 D_w 为 23.5 cm,金属板到墙-空气界面纵向距离 d_2 为 27.5 cm。

4.4 墙后存在人体时实验并提取 $h(n)$

墙后存在人体时,人靠墙正对墙体另一侧的天线保持站立,图7所示为用 Extend Prony 方法处理得到墙体反射回波数据 $h(n)$ 。

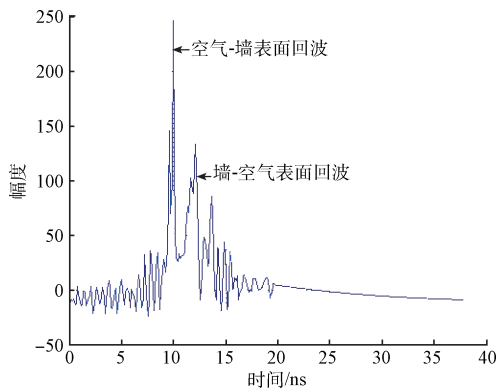


图7 墙后人体贴墙时经 Extend Prony 方法处理得到的 $h(n)$

代入式(4)计算可得到反射系数,进一步代入式(5)~(7)计算得到墙体相对介电常数 ϵ_{rw} 为 6.25,墙体中波速为 v_w 为 1.20×10^8 m/s,墙体厚度 D_w 为 26.1 cm。

表1表示在墙后无散射体场景、墙后存在金属物体场景和墙后存在人体场景多场景中,墙体介电常数和墙体厚度的估计值,查阅手册可知^[6],墙体介电常数估计值在常见钢筋混凝土结构的介电常数范围内,将墙体厚度估计值与真实值对比,绝对误差较小,说明该墙体参数反演方法效果好。

表1 多场景某墙体介电常数和厚度反演结果

场景	介电常数	厚度	厚度	厚度
	估计值 ϵ_{rw}	估计值 D_w /cm	真实值 D_w /cm	绝对误差 δ_w /cm
墙后 无散射体	5.66	28.7	29	0.3
墙后金属 物体贴墙	5.39	29.6	29	0.6
墙后金属物 体距墙 25 cm	6.14	23.5	29	5.5
墙后人体 贴墙	6.25	26.1	29	2.9

5 结 论

实验结果表明,在不同场景下,本方法反演墙体参数较准确,由于距墙一定距离时目标回波信号变弱,反射回波路径变长,信噪比降低,导致墙体厚度估计误差较大,此处有待对算法进行改进。本方法不需要额外测量设备,不需要先验知识,无需迭代,因此实时性强,大大提高了对战场、搜救现场等实际环境的适应能力,对紧急情况下利用穿墙雷达定位和成像具有重要意义。

参考文献

- [1] 陈伟民,李存龙. 基于微波雷达的位移/距离测量技术[J]. 电子测量与仪器学报,2015,29(9):1251-1265.
- [2] 曾昭发,刘四新,冯晖,等. 探地雷达原理与应用[M]. 北京:电子工业出版社,2010.
- [3] 李南京,党娇娇,胡楚峰. 标准球定位获取复杂目标散射点位置信息技术[J]. 国外电子测量技术,2014,33(9):31-33.
- [4] 王涵宁,陆必应,周智敏,等. 基于墙体参数估计的穿墙成像与校正算法[J]. 雷达科学与技术,2011,9(5):430-436.
- [5] 晋良念,钱玉彬,刘庆华,等. 超宽带穿墙雷达偏离网格目标稀疏成像方法[J]. 仪器仪表学报,2015,36(4):743-748.
- [6] 史洪印,赵欣悦. 基于CS的SAR旋转微动目标检测方法研究[J]. 仪器仪表学报,2015,36(6):1342-1349.
- [7] 王扬,朱振乾,陈明,等. 穿墙生命探测系统干扰抑制方法的研究与实现[J]. 电子测量技术,2009,32(9):34-37.
- [8] 丁一鹏,方广有. 一种高性能的连续波穿墙定位系统研究[J]. 仪器仪表学报,2012,33(12):2781-2788.
- [9] AFTANAS M, SACHS J, DRUTAROVSKY M, et al. Efficient and fast method of wall parameter estimation by using UWB radar system[J]. Frequenz Journal,2009,63(11-12):231-235.
- [10] THAJUDEEN C, HOORFAR A. Wall parameter estimation using a hybrid time-delay-only and reflected wave ratio technique[C]. IEEE International Symposium on Antennas & Propagation & Usnc/ursi National Radio Science Meeting,2013,9(6):526-527.
- [11] PROTIVA P, MRKVICA J, MACHAC J. Estimation of wall parameters from time-delay-only through-wall-radar measurements [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2011, 59(11):4268-4278.
- [12] 张亮,李梅,张新燕. 基于 Prony 理论的高压输电线保护算法 [J]. 电气自动化,2013,35(2):40-42.
- [13] 李传江,费敏锐,胡豁生,等. 基于谐波小波和 Prony 算法的转子不平衡信号提取[J]. 仪器仪表学报,2012,33(11):2516-2522.
- [14] 张照,林曙光,任强,等. Extend Prony 算法在提高步进扫频连续波探地雷达分辨率中的应用[J]. 地球物理学进展,2013,28(6):3231-3236.
- [15] LIU CH, XU L J, CAO ZH. Measurement of nonuniform temperature distribution by combining line-of-sight TDLAS with regularization methods [J]. Instrumentation,2014,1(3):43-57.

作者简介

葛薇,硕士研究生,主要研究方向为探地雷达信号处理。

E-mail:gw_gpr@163.com