

基于超宽带穿墙雷达的目标边界估计算法

吴世有^{*①②} 丁一鹏^{①②} 陈超^{①②} 徐艳云^{①②} 方广有^① 阴和俊^③

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(中国科学院研究生院 北京 100039)

^③(中国科学院 北京 100039)

摘要: 基于超宽带雷达的穿墙成像技术在灾难救援和反恐作战等非侵入式探测领域有着广泛的应用前景,而这些应用领域往往需要对探测目标的高分辨成像以确定其边界形状。该文针对这一需求,提出一种基于超宽带雷达的边界成像算法从而实现墙后目标的外形估计及识别。该算法假定在近场探测条件下,利用提出的回波时延差关系曲线确定回波的入射方向,进而消除墙体影响,对墙后目标进行有效的边界估计。对具有不同边界的目标进行的仿真和实验结果表明,该算法能够有效补偿墙体影响,目标边界估计效果好,达到依据估计的目标外形实现目标初步识别的要求。

关键词: 超宽带穿墙雷达; 目标识别; 边界估计; 时延差曲线

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)06-1277-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00935

Target Boundary Estimation Algorithm for Ultra Wideband Through-wall Radar

Wu Shi-you^{①②} Ding Yi-peng^{①②} Chen Chao^{①②}

Xu Yan-yun^{①②} Fang Guang-you^① Yin He-jun^③

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

^②(Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

^③(Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Through-wall imaging techniques with Ultra-WideBand (UWB) radar are promising candidates for non-destructive detection, especially in disaster areas like calamity rescue scenarios, counter-terrorism and so on. These applications always require high-resolution target imaging to identify the object shape. Based on this requirement, a complex target boundary imaging algorithm for UWB radar is proposed to realize the shape estimation and identification of the target behind walls. As the application is a near field problem, the algorithm offsets the influence from walls using the incident angle of the radar echo calculated by the time-delay difference curve, and estimates the target boundary effectively. Simulation and experimental results of targets behind walls with different shapes show that the proposed algorithm can remove the influence from walls, estimate the target boundary effectively and realize the basic target identification.

Key words: UWB through-wall radar; Target Identification; Shape estimation; Time-delay difference curve

1 引言

超宽带穿墙成像技术由于超宽带雷达的高分辨率及穿透非金属介质的能力,近年来被广泛研究并应用于城市反恐,公共安全,火灾救援,人质解救等非侵入式探测领域。这些领域往往需要快速高分辨率的成像技术以探测物体的外形或者微小微动。基于穿墙雷达技术的成像算法已经有了很大的应用

成果,它们有的针对具有简单外形的物体,如点目标或球体^[1-4];有的需要进行大量的数据合成,如基于 ISAR 技术,基于后向散射技术和时间反转技术^[5]。近年来物体边界估计算法同样有了一定的研究成果^[6,7],其中 SEABED (Shape Estimation Algorithm based on BST and Extraction of Directly scattered waves)算法能够估计复杂物体的边界,在一定程度上满足快速高分辨率的应用要求,由于存在微分算子,SEABED 算法不能有效解决距离偏差问题^[8]。其衍生算法避免使用微分算子,从而

2011-09-09 收到, 2012-03-16 改回

国家 973 计划项目(2010CB73190103)资助课题

*通信作者: 吴世有 ahwushiyou@126.com

在一定程度上能够克服这一缺点,进而能够在穿墙条件下克服墙体对回波传播时延和路径的影响,对墙后物体进行成像,但是其算法中用到的最为重要的回波入射角的获取需要求解一元四次方程,且成像结果存在误差需要进行校正,运算时间较大且后处理过程较复杂^[9]。本文基于回波入射角对物体边界估计的重要性,提出回波时延差关系曲线的概念^[10],并基于此引出一种新的边界估计算法,应用于超宽带雷达系统。

本文第2节首先提出目标边界估计的系统模型,在回波时延差关系曲线的基础上具体介绍基于超宽带穿墙雷达的目标边界估计算法并给出算法实现流程,第3节和第4节分别给出基于系统模型的FDTD数值仿真和实验成像结果,第5节是结论。

2 2维复杂目标边界成像算法

2.1 系统模型

假定墙后目标存在较为复杂的外形边界且墙体的参数已知,如图1所示,一全向天线沿着水平 x 轴扫描,其前方水平放置一各向同性的,相对介电常数为 ϵ_r ,厚度为 d_w 的墙体,且墙体尺寸远远大于天线尺寸。全向天线在扫描过程中发射超宽带高斯脉冲信号并接收回波信号。仿照SEABED算法中的定义方式,定义目标,墙体及天线所在的空间为真实空间,记为 R 空间,并用 (x,y) 表示空间中物体的位置,并同时假定 $y > 0$ 。同样定义回波信号所在空间为数据空间,记为 D 空间,并用 (X,Y) 表示空间中的回波信息。这里 X 表示全向天线在 R 空间中的水平位置(如 R 空间中天线的位置为 $(x,0)$,则在 D 空间中 $X = x$), Y 表示天线到目标的单程传播距离(即 $Y = ct/2$, c 为空气中光速, t 为全程传播时间)。 (X,Y) 在 D 空间中表示的曲线被称为准波前。由于目标边界与回波时延存在特定的几何转换关系,所以利用准波前从 D 空间到 R 空间的转换即可实现目标边界的估计,达到墙后目标探测的目的。这里仅仅是采用了SEABED算法的数据表示方式,本文将在此基础上利用回波时延关系曲线求取回波入射角,进而提出目标边界成像算法实现对墙后物体的边界估计。

图2所示为基于收发分置的系统模型,它主要由两个发射天线和两个接收天线组成。两个发射天线和1个接收天线等间距线性排列,接收天线位于中间位置 $(X,0)$,发射天线置于其两侧 $(X_L,0)$ 和 $(X_R,0)$,天线到目标的单程传播距离分别记为 Y_L 和 Y_R 。另外一个接收天线以位于中间的接收天线为中心,一定距离为半径在测量过程中作旋转,从而获

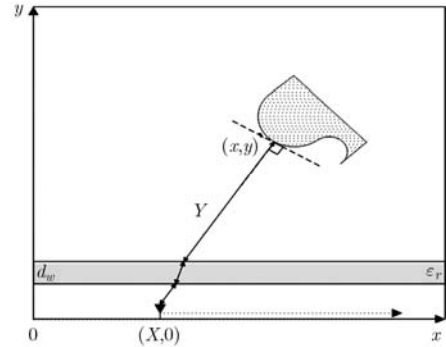


图1 收发同置系统模型

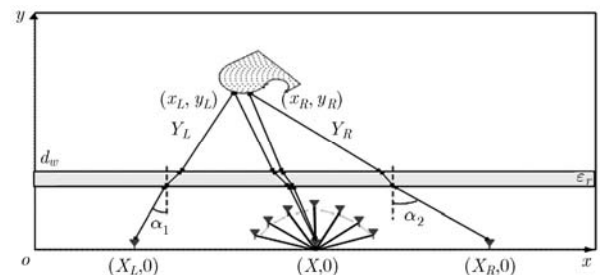


图2 收发分置系统模型

取时延差关系曲线^[10]。图3中位于 $K(X,0)$ 的天线发射高斯脉冲信号,在墙面 A 和 B 两点产生折射,最后经由目标 C 返回(电磁波传播路径为 $KA-AB-BC$)。将天线位置等效为 $K'(X',0)$ 并用 $K'B$ 替换为 KA ,从而可以用虚拟传播路径 $K'B-BC$ 等效为实际传播路径 $KA-AB-BC$ 来消除墙体对传播时延的影响。 K' 位置的求取需要依据入射角 α ,而时延差关系曲线正好可以用于其计算。如图4所示,考虑两次不同的发射接收过程:一次位于圆周 C_0 中心处的天线发射信号并接收回波信号,另一次是天线在圆周 C_0 上不同位置处发射和接收信号。这两次过程,电磁波的传播路径是一致的,仅相差圆周 C_0 的半径所代表的一段路径。可以看出,在圆周 C_0 与虚线圆周 C' 的切点处获取的回波时延总是最短的,且其与圆周 C_0 圆心处获取的回波时延的差值正好对应圆周 C_0 的半径。由此,圆周 C_0 上不同位置获取的回波时延与圆周 C_0 圆心处获取的回波时延的差值构成回波时延差关系曲线。该曲线可以表示为圆周 C_0 上天线位置(用极坐标表示)的函数,其峰值位置即表示了回波入射角。

2.2 算法原理

为简便讨论,本节将基于图3和图4的收发同置系统对利用回波时延差关系曲线求取回波入射角 α 的方法进行证明,证明过程同样适用于收发分置系统。证明过程将给出回波时延差关系曲线的解析

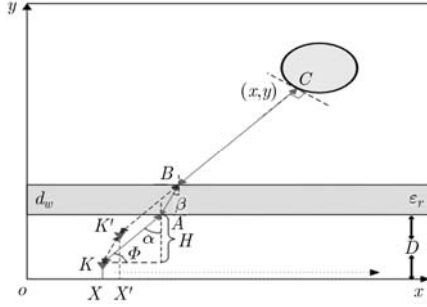


图3 虚拟和实际传播路径

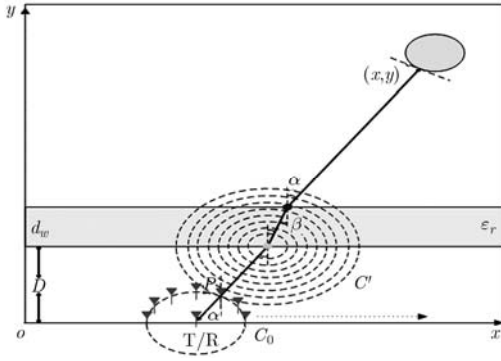


图4 不同的发射接收过程

式，进而求取入射角 α ，最后给出基于入射角 α 的墙后目标边界估计公式。

如图3所示，电磁波经天线发射出去，遇到墙体发生折射，穿透墙体进入空气中遇到目标被反射回来，再次穿过墙体被天线接收，此过程中电磁波的传播时间可以用 τ 表示为

$$\tau = \frac{1}{c} \times \left(\frac{\sqrt{\varepsilon_r} d_w}{\cos \beta} + \frac{y - d_w}{\cos \alpha} \right) \quad (1)$$

这里， α 和 β 分别为入射角和相应的折射角。由式(1)可以看出，入射角 α 将直接影响传播时间 τ 。假定 α 发生微小变化 $\Delta\alpha$ ，则新的传播时间 $\tilde{\tau}$ 可以表示为

$$\tilde{\tau} = \tau + \Delta\tau \quad (2)$$

此时 $\Delta\tau$ 称为回波时延差，它的求解可转换为在 $(p - p_0)^2 + (q - q_0)^2 = r^2$ 的条件下对距离 $S(p, q) = \sqrt{(m - p)^2 + (n - q)^2}$ 最小值的求解。其中，圆周 C_0 的半径记为 r ， (m, n) ， (p, q) 和 (p_0, q_0) 分别表示位于面向天线的墙面上的折射点，圆周 C_0 上的天线位置和圆周 C_0 的圆心位置。运用拉普拉斯极值法定义函数 $F(p, q)$ ，在求解条件下计算该函数的极小值，此函数可以定义为

$$F(p, q) = S^2 + \lambda [(p - p_0)^2 + (q - q_0)^2 - r^2] \quad (3)$$

这里的 λ 表示拉普拉斯因子，从而可以计算 $d^2 F(x, y)$ 以确定 $F(x, y)$ 在求解条件下存在最小值，

$$d^2 F(p, q) = 2 \frac{(m - p_0)^2 + (n - q_0)^2}{r^2} (dp^2 + dq^2) > 0 \quad (4)$$

最后，回波时延差 $\Delta\tau$ 可以表示为

$$\Delta\tau = \frac{1}{c} \left(\sqrt{(p_0 - m)^2 + (q_0 - n)^2} - \sqrt{S} \right) \quad (5)$$

这里需要注意的是， (m, n) 和 (p_0, q_0) 在计算 $F(x, y)$ 最小值过程中始终为已知常数值。由于式(5)表示的回波时延差关系曲线是天线位置 (p, q) 的函数，通过其最小值对应的天线位置 (p_{\min}, q_{\min}) 与圆周 C_0 的圆心位置可以确定回波入射角 α (最小值的大小为圆周 C_0 的半径 r)。分别记 T_{total} 为电磁波的总传播时延 τ ， T_{KA} ， T_{AB} ， T_{BC} 为电磁波在传播路径 KA ， AB ， BC 段的时延， $T_{K'C}$ 为虚拟传播路径所占用的时延， $|AB|$ 为墙面上两个折射点 A 和 B 间空气中的距离，且折射点 A ， B 和虚拟天线位置 K' 的坐标分别表示为 (x_A, y_A) ， (x_B, y_B) 和 $(x_{K'}, y_{K'})$ ，则

$$\begin{aligned} T_{K'C} &= T_{K'B} + T_{BC} = T_{\text{total}} - T_{AB} \\ &= T_{\text{total}} - \sqrt{\varepsilon_r} \times |AB| / c \end{aligned} \quad (6)$$

$$|AB| = d_w \times \sqrt{\varepsilon_r} / \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \alpha} \quad (7)$$

$$\sin \alpha = \sqrt{\varepsilon_r} \sin \beta \quad (8)$$

其中 $x_A = X + D \cdot \tan \alpha$ ， $y_A = D$ ， $x_B = X + D \cdot \tan \alpha + d_w \tan \beta$ ， $y_B = D + d_w$ ， $x_{K'} = X + |AB| \cdot \sin \beta = X'$ ， $y_{K'} = |AB| \cos \beta = d_w$ 。由此，目标边界 (x, y) 可以通过式(9)，式(10)估计，

$$x = X + \left(c T_{\text{total}} + \frac{1 - \varepsilon_r}{\sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \alpha}} d_w \right) \sin \alpha \quad (9)$$

$$y = d_w + \left(c T_{\text{total}} - \frac{\varepsilon_r d_w}{\sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \alpha}} \right) \cos \alpha \quad (10)$$

其中回波入射角 α 是由回波时延差关系曲线获取。式(9)和式(10)给出的解析解对噪声较为敏感，估计出的目标边界散射点将会产生误差，为了克服解析解不如迭代解稳定的特点，对目标多次扫描并将多次估计的边界进行均值处理可作为一种有效的探测方式。

基于收发分置系统的回波入射角的求取过程与收发同置系统类似，唯一不同的是需要求取两个入射角 α_T 和 α_R ， α_T 对应于发射天线， α_R 对应于接收天线。基于2.1节中提出的收发同置系统模型和时延差关系曲线求取的入射角 α 相对于接收天线，从而在一般的收发分置系统中相对于发射天线的入射角则无法求取。当收发天线相同时，根据互易定理可知，天线无论是作为发射天线还是接收天线，其方向图都是一样的。为了实现该入射角的求取，假

定当目标与收发天线的位置保持相对固定时,电磁波的传播路径与互换收发天线位置时的传播路径是相同的,并且目标上的散射位置不变。由此,图2中所示的收发分置系统模型可用于实现两个入射角 α_T 和 α_R 的求取。图2中的系统模型由位于中心位置的接收天线和其两侧的发射天线组成,构成的天线阵列沿着水平方向扫描目标,同时另外一个接收天线将以先前的接收天线为中心旋转并接收回波信号。中心位置的接收天线对应的入射角可以利用回波时延差关系曲线求取,对应的左右两侧的发射天线入射角(图2中的 α_1 和 α_2)则不能直接求得。然而根据假设条件,在一定条件下,不同扫描时刻 T 下求得的接收天线的入射角与发射天线的入射角 α_1 和 α_2 之间存在着联系,从而它们可通过接收天线入射角进行计算。如图5所示,在扫描时刻 T_1 时,左右发射天线和中心接收天线的水平位置为 $X_L = x_1$, $X_R = x_2$ 和 $X = x_0$,中心接收天线对应的入射角记为 α^{T_1} 。同理,在扫描时刻 T_2 时,左发射天线和中心接收天线的水平位置为 $X_L = x_0$ 和 $X = x_2$,中心接收天线对应的入射角记为 α^{T_2} 。同样基于先前的假设,由于天线与目标的相对位置并未改变,发射和接收天线互换位置并不改变电磁波的传播路径,所以基于图5所示的收发分置系统模型可以用于求取发射天线对应的入射角。两个不同时刻下天线阵列的移动距离为天线阵列间隔 d ,这相当于收发天线位置互换,所以根据假设条件入射角 α^{T_2} 和 α^{T_1} 可以作为 T_1 时刻下对应于接收和发射天线的入射角 α_R 和 α_T ($\alpha_R = \alpha^{T_2}$, $\alpha_T = \alpha^{T_1}$)。

2.3 算法流程

综上所述,基于收发分置系统模型下的复杂目标边界成像算法的具体实现步骤如下:

(1)构建穿墙探测场景包括两个接收天线和1个发射天线(均为全向天线)组成的阵列,墙体(厚度为 d_w ,相对介电常数为 ϵ_r)和1个具有复杂边界的金属目标;

(2)水平移动天线阵列,此时刻标记为 T_k ,发射高斯脉冲,将中心接收天线接收到的回波去噪并进

行相关处理;

(3)同样在 T_k 时刻,发射高斯脉冲,另外一个接收天线围绕中心天线位置旋转并接收回波信号,然后进行相关信号处理,处理方法与步骤(2)一致;

(4)根据回波时延差关系曲线的原理,结合步骤(2)和步骤(3)中获取的信号生成相应曲线,并由此获取对应于中心接收天线的入射角,记为 α^{T_k} ;

(5)按照天线阵列的间隔 d 来水平移动,重复步骤(2)~步骤(4),获取整个扫描过程的入射角集合 $\alpha = \{\alpha^{T_k} | 1 \leq k \leq N\}$,其中 N 为总的测量位置个数;

(6)基于图5所示的匹配方法,从入射角集合 $\alpha = \{\alpha^{T_k} | 1 \leq k \leq N\}$ 中找出合适值两两组合形成某一时刻 T_k 对应的发射和接收天线的入射角 α_T 和 α_R ;

(7)在收发同置系统模型中,获取的入射角 α 可直接代入式(9)和式(10)中即可求得散射点位置 (x, y) ,从而确定目标边界。与此不同,收发分置系统模型下求取的入射角 α_T 和 α_R 不可直接代入。为此从几何角度考虑,入射角 α_T 和 α_R 代表的两条直线的交点可认为是目标散射点位置。为了减小误差,真实的传播时延值将用于散射点位置的校正以确保正确。

(8)步骤(7)中求取的散射点组合起来即可认为是目标的边界,从而实现穿墙条件下的目标探测。

3 仿真实验

依据图2所示的收发分置系统模型建立仿真场景:成像区域的整体尺寸为方位向0~5 m,距离向0~5 m,位于其中的目标为金属体,天线阵列放置于距离墙体1 m处,且其厚度为 $d_w = 0.3$ m,相对介电常数 $\epsilon_r = 6$ 。发射信号为中心频率为1 GHz的高斯脉冲(时域波形和频谱见图6),通过GprMax软件仿真获取100个测量位置处的回波信号(单道时间步长为23.59 ps,采样时窗为50 ns)。获取的回波信号中包含了直达波,墙体反射的回波及其它杂波成分,所以需要每个测量位置处的回波信号进行去除直达波和背景杂波等处理并做匹配检测以获

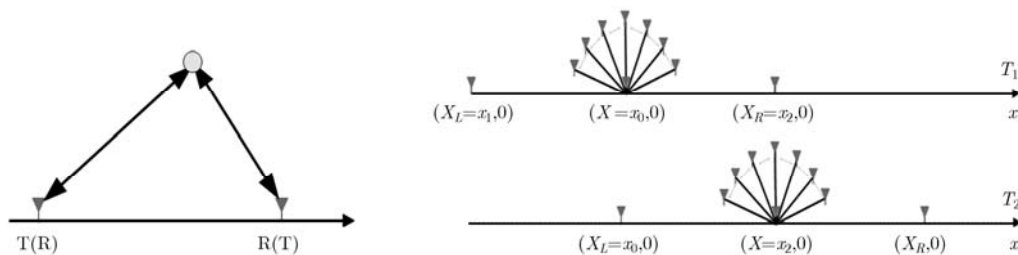


图5 不同时刻下的天线阵列移动等效为收发天线位置互换

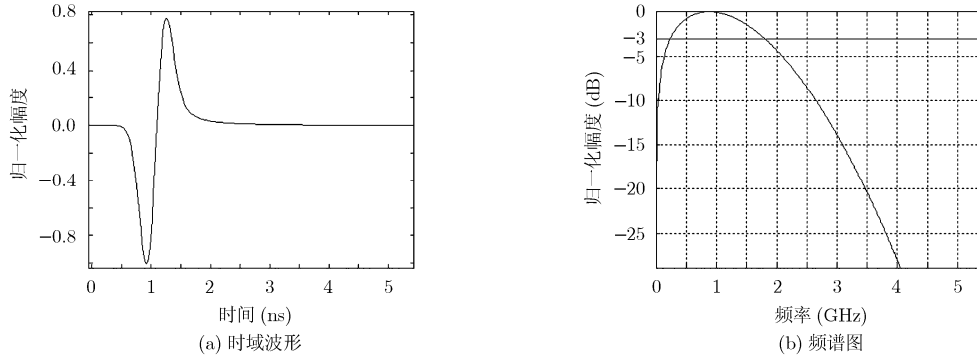


图 6 仿真实验中的超宽带发射信号

取回波时延，从而通过生成回波时延差关系曲线进而实现入射角的获取，最终实现穿墙条件下的目标边界估计。

3.1 梯形目标仿真实验

如图 7 所示，一个梯形目标位于仿真场景中，图 2 所示的收发分置系统中的天线间距为 $d = 0.3 \text{ m}$ ，沿着水平方向进行扫描测量。取围绕中心接收天线旋转的半径为 $r = 0.2 \text{ m}$ ，则依据 2.3 节的算法流程，可得到分别对应发射和接收天线的回波时延差关系曲线，进而求取在某个特定测量位置处的对应发射和接收天线的入射角 α_T 和 α_R 。为了与旋转半径 r 的单位保持一致，时延差关系曲线纵坐标表示的传播时差的单位转换为单位米(m)表示。图 8 和图 9 分别给出了 100 个测量位置处的接收和发射天线的回波时延差关系曲线(拟合后)。这些曲线的峰值处给出了入射角 α_T 和 α_R 对应的仰角值(每条曲线峰值处对应横坐标为入射仰角，纵坐标为旋

转半径 r)。图 10 给出了在不同测量位置处的天线对应的入射仰角 ϕ ，进而可以求出对应的入射角 α_T 和 α_R ，之后经过微小校正后可以按 2.3 节中的步骤(7)估计梯形目标的边界。图 11 给出了运用本文提出的估计算法的成像结果，可以看出梯形目标的边界被有效地估计，从而验证了算法的有效性。

3.2 三角目标仿真实验

同理，如图 12 所示，一个三角目标位于仿真场景中，100 个测量位置处的分别对应发射和接收天线的回波时延差关系曲线(拟合后)在图 13 和图 14 中给出。为了与旋转半径 r 的单位保持一致，时延差关系曲线纵坐标表示的传播时差的单位转换为单位米(m)表示。与前面的仿真实验相同，不同测量位置处的天线入射角 α_T 和 α_R 可以由回波时延差关系曲线求出，经过微小校正后实现三角目标边界的准确估计。图 15 给出了天线对应的入射仰角 ϕ 。图 16 给出的边界估计结果进一步验证了算法的有效性。

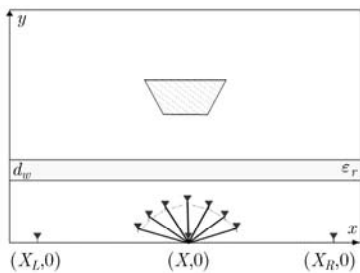


图 7 实验场景(梯形目标)

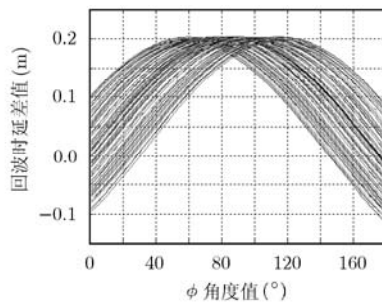


图 8 接收天线的回波时延差关系曲线(梯形目标)

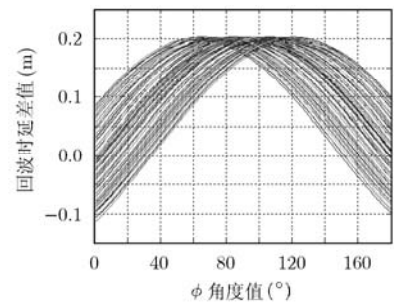


图 9 发射天线的回波时延差关系曲线(梯形目标)

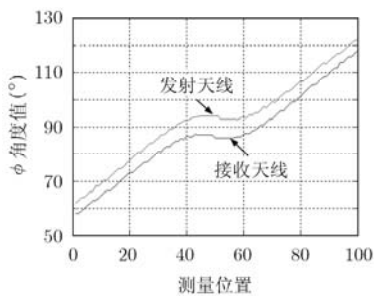


图 10 入射仰角 ϕ (梯形目标)

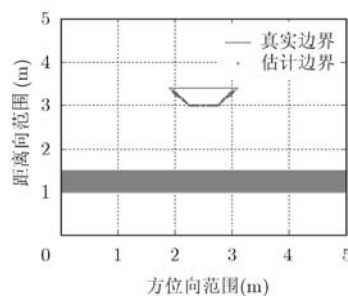


图 11 梯形目标边界估计

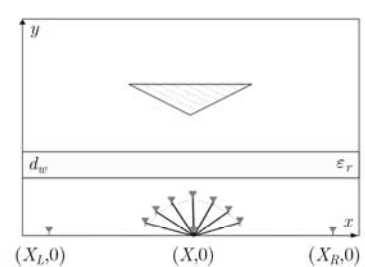


图 12 实验场景(三角目标)

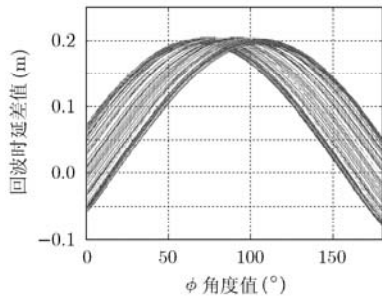


图13 接收天线的回波时延差关系曲线(三角目标)

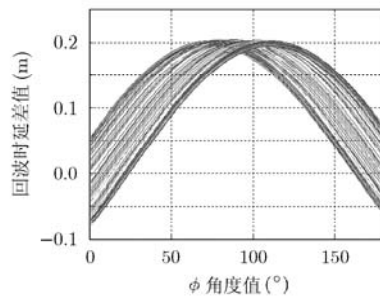


图14 发射天线的回波时延差关系曲线(三角目标)

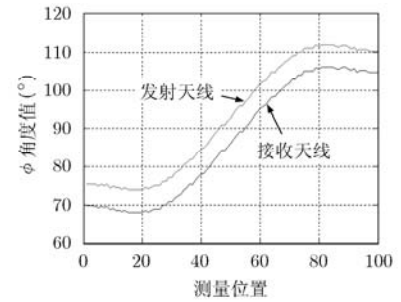


图15 入射仰角 ϕ (三角目标)

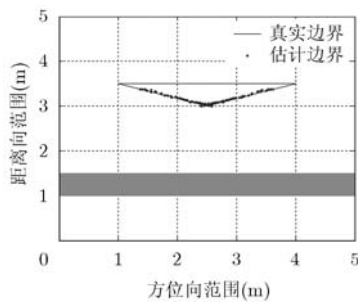


图16 三角目标边界估计

4 实验验证与分析

实验场景成像区域的整体尺寸为方位向 $0\sim 2$ m, 距离向 $0\sim 2$ m, 位于其中的目标为柱状金属体, 天线阵列放置于距离墙体 0.7 m 处, 墙体厚度为 $d_w = 0.1$ m, 相对介电常数 $\epsilon_r = 4.4$ 。天线由转台设备进行旋转控制。发射信号为脉冲宽度为 300 ps 的超宽带脉冲信号, 接收机带宽为 $0.5\sim 3$ GHz, 通过获取 15 个测量位置处的回波信号(时域波形和频谱见图 17, 单道时间步长为 7.32 ps, 采样时窗为 30 ns)。

取围绕中心接收天线旋转的半径为 $r=0.38$ m, 则依据 2.3 节的算法流程, 可得到分别对应发射和接收天线的回波时延差关系曲线, 进而求取在某个特定测量位置处的对应发射和接收天线的入射角 α_T 和 α_R 。图 18 给出了 15 个测量位置处的接收和

发射天线的入射角 α_T 和 α_R 对应的仰角值 ϕ 。结合这些仰角值, 通过 2.3 节中的步骤(7)估计梯形目标的边界。图 19 给出了运用本文提出的估计算法的实验结果, 圆柱目标横截面的边界被有效地估计, 验证了算法的有效性。

5 结束语

针对有障碍物条件下的目标外形估计的应用需求, 本文首先提出一种基于超宽带雷达的边界成像算法, 在给定的系统模型下利用回波时延差关系曲线实现墙后目标的外形估计。其后算法的证明过程在文中具体给出, 在理论上说明算法的可行性。最后的仿真和实验结果表明本文提出的边界估计算法能够有效地消除墙体的影响, 能够准确地估计目标边界并反映出真实目标的轮廓, 验证了算法的有效性。本文算法主要是针对具有光滑连续凸面目标进行边界估计的, 故对于具有凹槽或缝隙结构的金属目标的边界估计需要建立相适应的探测模型。由于金属目标的尺寸对算法效果具有较为重要的影响, 当目标尺寸较大时, 因为要获取更多的边界散射点信息, 从而实现目标边界估计, 天线的水平扫描范围至少需要覆盖金属目标。目标尺寸不可太小, 否则本文建立的探测模型将不适用, 目标将被看作是点目标, 无法实现边界估计。金属目标的尺寸与算法的定量分析将作为本文之后的一个工作重点。

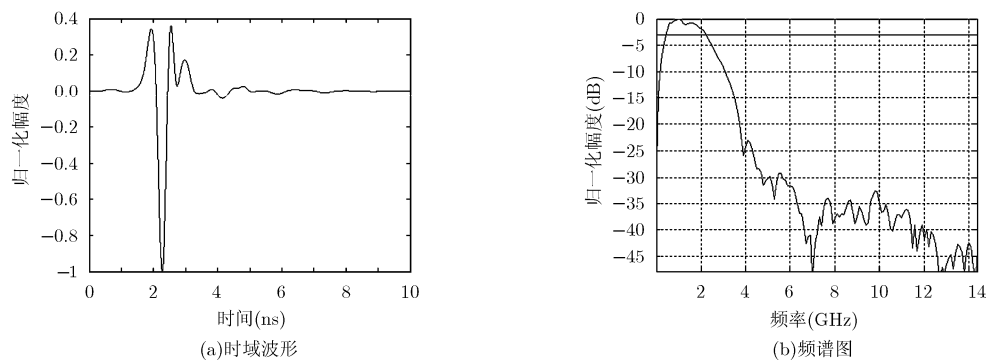


图17 实验中的超宽带发射信号

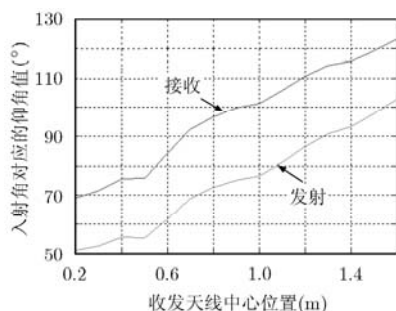


图18 入射角对应的仰角值

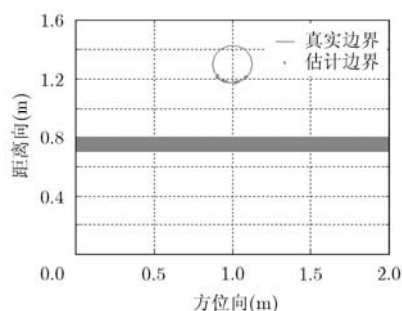


图19 圆柱目标边界估计

参考文献

- [1] Wang G and Amin M G. Imaging through unknown walls using different standoff distances[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2006, 54(10): 4015-4025.
- [2] Ahmad F and Amin M G. Noncoherent approach to through-the-wall radar localization[J]. *IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems*, 2006, 42(4): 1405-1419.
- [3] Ahmad F, Zhang Y, and Amin M G. Three-dimensional wideband beamforming for imaging through a single wall[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letter*, 2008, 5(2): 176-179.
- [4] Burkholder Robert J and Browne Kenneth E. Coherence factor enhancement of through-wall radar images[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letter*, 2010, 9(1): 842-845.
- [5] Chatelle V, Dubois A, Yedlin M, *et al.* Time reversal of experimental ultra wideband microwave data in a through-the wall (TTW) configuration[C]. Presented at the Electromagn, Theory Symposium, (EMTS), Ottawa, July 2007: 1-4.
- [6] Dehmollaian Mojtaba. Through-wall shape reconstruction and wall parameters estimation using differential evolution[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(2): 201-205.
- [7] Sakamoto T and Sato T. A target shape estimation algorithm for pulse radar systems based on boundary scattering transform[J]. *IEICE Transactions on Communications*, 2004, 5E87-B(5): 1357-1365.
- [8] Hantscher S, Reizezahn A, and Diskus C G. Through-wall imaging with a 3-D UWB SAR algorithm[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2008, 15(1): 269-272.
- [9] Kidera Shouhei, Sakamoto Takuya, and Sato Toru. High-resolution 3-D imaging algorithm with an envelope of modified spheres for UWB through-the-wall radars[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2009, 57(11): 3520-3529.
- [10] 吴世有, 黄琼, 陈洁, 等. 基于超宽带穿墙雷达的目标定位识别算法[J]. *电子信息学报*, 2010, 32(11): 2624-2629.
Wu Shi-you, Huang Qiong, Chen Jie, *et al.* Target localization and identification algorithm for ultra wideband through-wall radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(11): 2624-2629.

吴世有：男，1985年生，博士生，研究方向为超宽带雷达目标检测、成像技术和软件开发。

陈超：男，1986年生，博士生，研究方向为超宽带穿墙雷达信号采集与控制。

方广有：男，1963年生，研究员，博士生导师，主要从事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等方面的研究工作。