

## 基于超宽带穿墙雷达的目标定位识别算法

吴世有<sup>①②</sup> 黄琼<sup>①②</sup> 陈洁<sup>①</sup> 孟升卫<sup>①</sup> 方广有<sup>①</sup> 阴和俊<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

<sup>②</sup>(中国科学院研究生院 北京 100039)

<sup>③</sup>(中国科学院 北京 100039)

**摘要:** 穿墙目标探测是超宽带脉冲雷达在反恐斗争、灾难救援、城市巷战等方面的一个重要应用。SEABED 算法是基于超宽带脉冲雷达的一种新型目标定位识别算法,但其不适用于对障碍物背后的目标进行定位的情况。该文在 SEABED 算法的基础上,分析 SEABED 算法在穿墙探测中的不足,提出一种新的定位算法使得 SEABED 算法能够对目标进行定位识别。该算法假设在近场条件下,利用回波时延差的关系曲线求得入射角,从而结合几何关系消除墙体对传播时延和传播路径的影响,将 SEABED 算法应用于穿墙成像应用中。仿真结果表明,该算法能够弥补墙体对 SEABED 算法的影响,精确度高,目标定位识别效果好,达到穿墙探测的目的。

**关键词:** 超宽带雷达; 目标定位; SEABED 算法; 目标边界成像

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)11-2624-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.01575

## Target Localization and Identification Algorithm for Ultra Wideband Through-wall Radar

Wu Shi-you<sup>①②</sup> Huang Qiong<sup>①②</sup> Chen Jie<sup>①</sup>  
Meng Sheng-wei<sup>①</sup> Fang Guang-you<sup>①</sup> Yin He-jun<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>②</sup>(Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

<sup>③</sup>(Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** The Ultra WideBand Short-Pulse (UWB-SP) Radar used for detecting targets is a promising technique in counter-terrorism, calamity rescue scenarios, urban-warfare and other fields as its high range resolution, strong penetrating power and good resolving ability. The detecting of targets through wall is an important application based on UWB-SP Radar. As the SEABED algorithm (a new target localization and identification algorithm) based on the UWB-SP Radar is not applicable for that application, this paper proposes a new algorithm to offset the influence brought from the wall firstly and then obtain the image of targets behind the wall by using the SEABED algorithm. Simulation results show that the proposed algorithm can remove the effect of the wall visibly and the imaging results can estimate the shape of targets well.

**Key words:** UWB-SP Radar; Target localization; SEABED algorithm; Target shape imaging

### 1 引言

穿透墙体对目标进行精确成像要求超宽带雷达系统具有高的分辨率,并对成像算法提出较高要求。传统的成像算法在目标的定位识别上显得有所欠缺,不能满足穿墙探测的要求。一方面,这些算法只能对点目标进行成像,无法得到目标的边界形状,如三圆定位算法。另一方面,某些算法计算量大并且目标边界成像效果不明显,如后向投影算法

(back-projection algorithm)。近些年来,世界各国的大学与研究机构一直致力于研究一些新型算法用于目标的定位与识别。其中 Villanova 大学的学者对穿墙探测进行了深入细致的研究<sup>[1-3]</sup>;哈尔滨工业大学的学者也同样提出了适用于穿墙探测的 Two-Step Imaging 方法<sup>[4,5]</sup>;日本京都大学的学者基于超宽带雷达提出了 SEABED 算法<sup>[6-8]</sup>。SEABED(Shape Estimation Algorithm based on BST and Extraction of Directly Scattered waves)算法能够基于几何变换对目标的边界进行精确成像,并且计算量小,运算速度快,从而实现了对目标的快速定位与识别。本文在 SEABED 算法的基础

2009-12-11 收到, 2010-04-28 改回

国家高技术研究发展计划项目(2007AA12Z124)资助课题

通信作者: 吴世有 ahwushiyou@126.com

上，提出一种新型定位识别算法用来消除墙体的影响，使 SEABED 算法能够在穿墙探测中得到应用。

## 2 SEABED 算法

### 2.1 SEABED 算法原理

SEABED 算法由日本京都大学的 Takuya Sakamoto 等学者提出，是一种成像计算能力优越的算法。因为目标的边界形状与雷达的接收脉冲时延存在着一种特定的几何转换关系，所以 Takuya Sakamoto 等学者对这种几何转换关系进行了深入的研究并加以数学证明。他们把这种几何转换关系称之为边界散射变换 (Boundary Scattering Transform, BST) 和逆边界散射变换 (Inverse Boundary Scattering Transform, IBST)。利用这种变换可以在目标的边界形状与脉冲时延之间建立一种映射，从而通过数学方法将目标的边界形状预测出来并实现目标成像。由于在目标成像过程中进行的只是时延到目标边界的转换运算(运算量不大)，所以目标的边界形状能够很快地估计出来。

如图 1 所示，在收发同置系统中，天线沿水平轴  $x$  轴方向移动扫描并接收目标回波；在收发分置系统中，收发天线相隔一固定距离沿水平轴  $x$  轴方向移动扫描并接收目标回波。这里的天线均假定为全向天线。

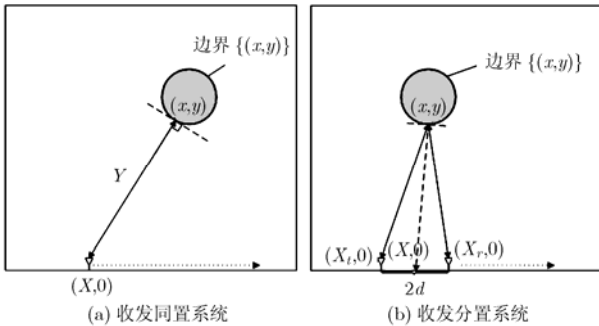


图 1 不同收发系统下的 SEABED 算法示意

在收发同置系统中，天线在水平轴  $x$  轴方向的位置用  $(X, 0)$  表示，并且用  $s(X, Y)$  表示天线接收到的来自目标边界表面法线方向的回波。这里的  $Y = ct/2$  ( $c$  是真空中光速)，表示目标与天线之间的距离。 $s(X, Y)$  同时又称为收发同置系统中的数据空间。由于接收到的数据一般为离散数据，所以可以在数据空间  $s(X, Y)$  上应用条件  $D = \{(X, Y) | \partial s(X, Y) / \partial Y = 0, |s(X, Y)| \leq J\}$  来获取数据空间的准波前集合  $D$  ( $J$  是自定义门限)。获取的准波前与目标边界存在一定的几何关系(SEABED 算法中的

BST 变换)，

$$\left. \begin{aligned} X &= x + y(dy/dx) \\ Y &= y\sqrt{1 + (dy/dx)^2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

对获取的准波前应用 IBST 变换可以得到目标边界点的坐标  $(x, y)$ ，此时计算获取的目标边界点  $(x, y)$  构成的集合能够准确的反映出实际目标的轮廓，从而实现目标的定位与识别<sup>[9]</sup>。

$$\left. \begin{aligned} x &= X - Y(dY/dX) \\ y &= Y\sqrt{1 - (dY/dX)^2}, |dY/dX| \leq 1 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

收发分置系统中的处理情况与收发同置系统类似，但是 BST 变换需要进行修正。发射天线和接收天线在水平轴  $x$  轴的位置分别表示为  $(X_t, 0)$  和  $(X_r, 0)$ ，收发间距为  $2d$ 。定义收发天线的中心位置  $(X, 0)$ ， $Y = ct/2$  ( $c$  是真空中光速)，其中  $X = (X_t + X_r)/2$ 。用  $s(X, Y)$  表示数据空间，在提取准波前集合之后，应用修正后的 IBST 变换可以得到目标的边界轮廓(由计算得到的目标边界点  $(x, y)$  集合表示)<sup>[10]</sup>。

$$\left. \begin{aligned} X &= x + \left[ \frac{2(dy/dx)(y^2 + d^2)}{y[1 - (dy/dx)^2]} + \sqrt{y^2[1 + (dy/dx)^2]^2 + 4d^2(dy/dx)^2} \right] \\ Y &= \sqrt{y^2 + d^2 + y(dy/dx)(X - x)} \\ x &= X - \frac{2Y^3(dY/dX)}{Y^2 - d^2 + \sqrt{(Y^2 - d^2)^2 + 4d^2Y^2(dY/dX)^2}} \\ y &= \sqrt{(Y^2 - d^2)[Y^2 - (x - X)^2] / Y} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} x &= X - \frac{2Y^3(dY/dX)}{Y^2 - d^2 + \sqrt{(Y^2 - d^2)^2 + 4d^2Y^2(dY/dX)^2}} \\ y &= \sqrt{(Y^2 - d^2)[Y^2 - (x - X)^2] / Y} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

### 2.2 SEABED 算法与穿墙应用

SEABED 算法计算目标边界的时间非常短，这一优点可以在实时成像中得到应用。结合超宽带脉冲雷达的测距精度高，穿透能力强，分辨能力高等优点，可以将 SEABED 算法应用于穿墙探测的应用中。在穿墙应用中，墙体的存在对 SEABED 算法的实现造成一定程度的影响。SEABED 算法中的边界散射变换 BST 和边界逆散射变换 IBST 在墙体存在的情况下不再成立，需要对其进行修正。

图 2 中的  $KAD$  表示的是在没有墙体存在的情况下电磁波的传播路径，并且  $D$  表示目标的边界上的某一反射点。SEABED 算法依据回波时延与目标边界之间存在的几何关系，计算  $D$  的位置，最后  $D$  所构成的集合可以反映出目标的边界，从而达到成像的效果。当存在墙体时，传播路径( $KA - AB - BC$ )与无墙体时的路径不同，真实的反射点应该是  $C$ 。

如果仍然按照 SEABED 算法,那么依据有墙体存在时的回波时延计算出的目标边界反射点必然不是真实的反射点  $C$ , 而是  $KAD$  连线上的  $D$  点。这些在有墙体时计算出的  $D$  点在真实的反射点  $C$  附近, 存在明显的误差, 从而导致目标边界成像的错误。图 3 中的结果表明 SEABED 算法在穿墙探测应用中失效。

SEABED 算法的修正可以有两种方案, 一种是修正变换公式使之能够在穿墙情况下成立, 另一种则是对获取的回波时延进行特定的处理使之能够消除墙体的影响从而不需要修正变换公式直接应用原有的公式。本文将采取第 2 种方案实现 SEABED 算法在穿墙成像中的应用。

### 3 定位识别算法原理

#### 3.1 算法原理

前面提到, 墙体的存在对回波时延和传播路径产生影响, 为了应用 SEABED 算法, 必须消除墙体的这些影响。在穿墙探测目标时, 如图 2 所示, 获取的回波时延表示的是电磁波沿  $KA-AB-BC$  往返传播所用的时间, 其中在  $AB$  段电磁波的传播速度为  $c/\sqrt{\epsilon_r}$  ( $\epsilon_r$  表示墙体的相对介电常数)。为了消除墙体对回波时延的影响, 必须将  $AB$  段的回波时延从总的回波时延中去除, 进而计算出  $KA-BC$  段的回波时延。然后修改天线位置使之满足 SEABED 算法要求, 从而实现穿墙成像。

图 4 具体展示了如何消除墙体对传播路径和回波时延的影响。从总的回波时延中去除  $AB$  段的回波时延后的回波时延 ( $KA-BC$  段) 可以等效为  $K'B-BC$  段的回波时延, 其中  $K'$  表示的是 SEABED 算法需要的天线位置。这样处理之后,  $K'B-BC$  段的回波时延和  $K'$  的位置可以满足 SEABED 算法要求的几何关系, 从而运用 IBST 变换计算出  $C$  的位置。这里墙体的厚度  $L$ , 天线实际位置  $K(X, 0)$  以及天线实际位置  $K$  到折射点  $A$  的距

离  $H$  已知。如果入射角  $\alpha$  已知, 那么可以结合已有的条件并依据几何关系得到  $K'$  的位置:

$$A(x_A, y_A) \begin{cases} x_A = X + H \times \tan \alpha \\ y_A = H \end{cases} \quad (5)$$

$$B(x_B, y_B) \begin{cases} x_B = X + H \times \tan \alpha + L \times \tan \beta \\ y_B = H + L \end{cases} \quad (6)$$

$$AB = \sqrt{(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2} \quad (7)$$

$$K'(x_{K'}, y_{K'}) \begin{cases} x_{K'} = X + AB \times \sin \beta \\ y_{K'} = AB \times \cos \beta \end{cases} \quad (8)$$

$$T_{K'C} = T_{\text{total}} - T_{AB} = T_{\text{total}} - \sqrt{\epsilon_r} \times AB/c \quad (9)$$

$$\frac{\tan \alpha}{\tan \beta} = \sqrt{\epsilon_r} \quad (10)$$

依据式(5), 式(6)和式(10)可以首先求出电磁波穿过墙体时的折射点  $A$  和  $B$  的位置, 然后通过式(8)计算出  $K'$  的位置后将  $K'$  的坐标分量  $x_{K'}$  作为收发同置系统 SEABED 算法中的  $X$  (为了区别天线实际位置  $K$  的坐标分量  $X$ , 将其记为  $X'$ ), 最后将  $Y' = cT_{K'C}/2$  和  $X'$  代入收发同置 SEABED 算法中, 可以计算出目标的边界反射点  $C$ 。

由上所述, 在知道入射角  $\alpha$  的情况下, 可以依据式(5)–式(10)以及 SEABED 算法, 计算出在墙体存在时目标的边界, 实现成像。由于入射角  $\alpha$  的重要性, 所以为了实现以上成像过程, 接下来的部分将提出一种求取入射角  $\alpha$  的方法。

图 5 中的  $k$  表示的是天线在水平移动过程中的位置,  $R$  同样表示天线(分布在以  $k$  为圆心, 以定长  $r$  为半径的上半圆周  $C_0$ ),  $G$  和  $B$  分别表示两个折射点,  $P$  表示的是目标边界的反射点。首先, 不考虑  $R$  处的天线的影 响, 位于  $k$  处的天线发射高斯脉冲, 穿过墙体遇到目标反射回来, 再次穿过墙体, 最后被  $k$  处的天线接收; 然后, 不考虑  $k$  处天线的影 响, 位于  $R$  处的天线同样发射高斯脉冲, 穿过墙体, 遇

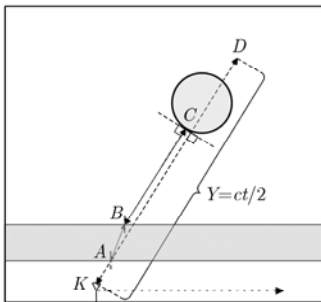


图 2 穿墙探测目标

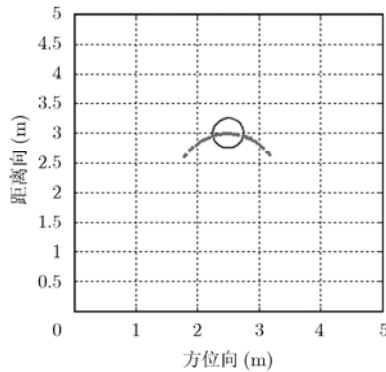


图 3 SEABED 算法在穿墙探测应用中失效

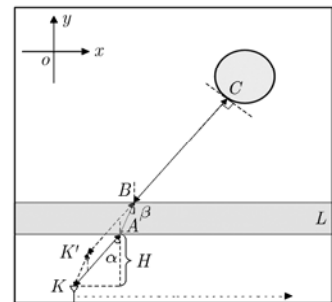


图 4 去除墙体影响示意图

到目标反射回来，再次穿过墙体，最后被  $R$  处的天线接收。这两次发射接收过程，电磁波的传播路径是一致的，仅仅相差圆周  $C_0$  的半径  $r$  所表示的一段路径。由于穿墙探测应用中的目标到天线的距离大多满足大于等于  $\lambda$  ( $\lambda$  为波长) 的条件，因此电磁波是以球面波的形式在空间中传播。当电磁波反射回来穿过墙体后，它以折射点  $G$  为球心的球面波形式向前传播，最后被位于圆周  $C_0$  (以  $k$  为圆心) 上的天线接收。图 5 中的虚线表示电磁波的传播形式，从中可以看出，接收天线  $R$  所在的圆周与最外侧虚线圆  $C'$  相切并且这个切点上代表的接收天线接收到的回波时延总是最短的。此时切点上的天线接收到的目标回波时延与  $k$  处接收到的回波时延之间的差对应的便是圆周  $C_0$  的半径  $r$ 。利用这个特点，可以根据这个切点与  $k$  之间的位置关系求得入射角  $\alpha$  进而运用前面所述的方法对目标边界进行成像。对于收发分置系统来说，算法思想与收发同置系统相似，但需做些修正，具体将在收发分置系统算法实现流程中说明。

**3.2 收发同置系统算法实现流程**

综上所述，收发同置系统的定位识别算法的具体实现步骤如下：

(1) 构建穿墙探测场景包括收发天线(全向天线)，墙体(厚度为  $L$ ，相对介电常数为  $\epsilon_r$ ) 和一个金属圆形目标；

(2) 移动天线到水平测量线上的某一测量点  $k$  处，发射高斯脉冲，将接收到的回波去噪并进行相关处理，然后得到总的回波时延  $T_{total}^k$ ；

(3) 设置一个定长  $r$ ，然后将天线放置于此时的测量点  $k$  为圆心，定长  $r$  为半径的上半圆周上，每隔  $\Delta\omega$  移动到一个新位置  $i$  ( $R$ )，发射一次高射脉冲并接收回波，然后处理回波获取相应的回波时延  $T_i^k$ ，这里假设共移动了  $N$  个位置 ( $N \times \Delta\omega = \pi$ )；

(4) 将上一步获得的所有  $T_i^k$  集中起来构成一个

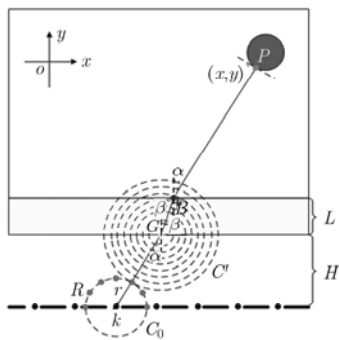


图 5 收发同置系统中求取入射角  $\alpha$  示意图

集合  $T^k = \{T_i^k | 1 \leq i \leq N\}$ ；

(5) 将  $T_{total}^k$  与  $T^k$  中的每个元素值做相减运算，得到一个新的集合  $\Delta T^k = \{T_{total}^k - T_i^k | 1 \leq i \leq N, T_i^k \in T^k\}$ ；

(6) 从集合  $\Delta T^k$  中找到最大值，并根据最大值确定其对应的  $i$  的值，从而依据几何关系，由测量点  $k$  和上一步求得的  $i$  的值确定测量点  $k$  处的入射角  $\alpha_k$ ；

(7) 重复步骤(2)-步骤(6)，获得的入射角构成集合  $\alpha = \{\alpha_k | 1 \leq k \leq M\}$  (天线水平移动共  $M$  个位置)；

(8) 对于入射角集合  $\alpha = \{\alpha_k | 1 \leq k \leq M\}$  中的每个元素值和每个天线在水平测量线上的位置，运用式(5)-式(10)和收发同置系统的 SEABED 算法对目标边界进行成像。

**3.3 收发分置系统算法实现流程**

收发分置系统的定位识别算法与收发同置系统的相似，需要进行修正。如图 6 所示，对于收发分置系统，需要求取两个入射角  $\alpha$  和  $\psi$  的值，求取的原理与收发同置系统的相同。图 6 中的  $B$  和  $G$  分别表示发射天线和接收天线， $R$  表示的含义和图 5 的含义相同。与收发同置系统的定位识别算法的步骤大体上相同，不同之处在于：首先保持接收天线  $G$  的位置不变，改变发射天线的位置，按收发同置系统中定位识别算法的步骤求取入射角  $\psi_k$  (图 6(a) 所示)，然后保持发射天线  $B$  的位置不变，改变接收天线的位置，按收发同置系统中定位识别算法的步骤求取入射角  $\alpha_k$  (图 6(b) 所示)。对于入射角集合  $\psi = \{\psi_k | 1 \leq k \leq M\}$  和  $\alpha = \{\alpha_k | 1 \leq k \leq M\}$  中的每个元素值以及收发天线在水平测量线上的位置，运用前面所述的式(5)-式(10)和收发分置系统的 SEABED 算法对目标边界进行成像。

**3.4 算法说明**

因为定位识别算法的本质是求取入射角，所以

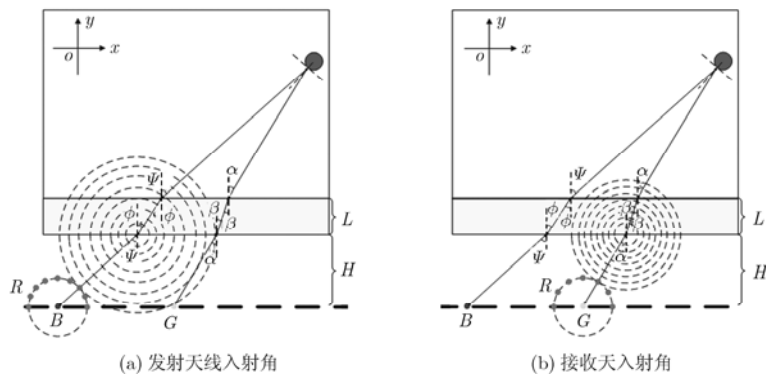


图 6 收发分置系统中求取入射角  $\alpha$  和  $\psi$  示意图

在保证正确求取入射角的前提下,可以对定位识别算法进行适当的优化从而降低其复杂性。比如,当天线移动的位置在目标的左侧(右侧)时,入射角的取值范围在 $0^\circ \sim 90^\circ$ ( $90^\circ \sim 180^\circ$ )之间,可以依据获取的回波时延的变化来限定天线在半径为 $r$ 的圆周上的位置只在 $0^\circ \sim 90^\circ$ ( $90^\circ \sim 180^\circ$ )之间的圆弧上变化。这样经过位置限定之后,可以将原需要获取的数据量降为原先的一半。另外,在设定半径 $r$ 的值的时候,必须保证其大小不能超过天线沿着水平轴移动时相对墙体的距离 $H$ ,否则定位识别算法将会失效。与此同时,半径 $r$ 的选择必须满足条件 $r \geq \lambda$ 使得电磁波在空间中以球面波在空间中进行传播。

## 4 仿真结果与验证

### 4.1 收发合置系统仿真

建立仿真场景如图 4 所示:整个成像区域大小为方位向 $0 \sim 5$  m,距离向 $0 \sim 5$  m,目标是位于场景中(2.5,3.0)位置处的半径为 0.25 m 的金属球体,距离收发天线 1 m 处的墙体厚度为 0.5 m,相对介电常数 $\epsilon_r = 6$ 。发射信号为一阶微分高斯脉冲,中心频率为 1 GHz,利用 FDTD 法仿真获取 61 个位置处的回波数据(单道时间步长为 23.59 ps,采样时窗为 50 ns)。由于获取的回波数据包含了直达波,墙体反射的回波及其它背景信息,所以在目标边界成像之前,需要对每个位置处的回波数据进行去除直达波和背景信息等处理并做匹配检测以获取回波时延。

当收发天线移动到水平轴上的某个位置时,按照收发合置系统的定位识别算法步骤获取该位置处的回波时延的差值与入射角的关系曲线。在仿真实验中,取步骤中的定长 $r = 0.4$  m。从图 7 中可以看到水平位置(0.82,0)处得到的回波时延的差值与入射角 $\alpha$ 的关系曲线(回波时延差值曲线)。由于曲线的抖动比较大,故对其进行二次曲线拟合。从中可以看出,在入射角的余角值为 $52^\circ$ 时,对应着回波时延差值曲线的峰值并且这个峰值最接近取定的定长

$r$ 。由此,按照收发合置系统定位识别算法的步骤获取所有收发天线移动的位置处的入射角 $\alpha$ 之后,运用式(5)–式(10)消除墙体对回波时延和传播路径进行修正并代入收发合置系统的 SEABED 算法的 IBST 式(2)估计目标边界达到成像效果。图 8 显示了运用修正后的 SEABED 算法后的目标边界成像效果,从中可以看出运用定位识别算法修正后的 SEABED 算法能够对墙体背后的目标实行有效的边界成像。

### 4.2 收发分置系统仿真

建立与收发同置系统类似的仿真场景,如图 6 所示,其中发射天线和接收天线保持间距为 $2d = 0.3$  m 沿着水平轴移动,总共获取 58 个位置处的回波数据。在仿真实验中,取步骤中的定长 $r = 0.2$  m。图 9 显示在水平位置(1.14,0)处得到回波时延的差值与发射入射角 $\psi$ 的关系曲线(拟合后),可以看出在发射入射角 $\psi$ 的余角值为 $57^\circ$ 时,对应着回波时延差值曲线的峰值并且这个峰值最接近取定的定长 $r$ 。同样,图 10 显示的是在水平位置(1.14,0)处得到的回波时延的差值与接收入射角 $\alpha$ 的关系曲线和拟合后的关系曲线,可以看出发射入射角 $\alpha$ 的余角值为 $65^\circ$ 。按照收发分置系统定位识别算法的步骤获取所有收发天线移动的位置处的发射入射角 $\psi$ 和接收入射角 $\alpha$ 之后,运用式(5)–式(10)消除墙体对回波时延和传播路径进行修正并代入收发分置系统的 SEABED 算法的 IBST 式(4)估计目标边界达到成像效果。图 11 和图 12 显示了运用修正后的 SEABED 算法后的目标边界成像效果,从中可以看出运用定位识别算法修正后的 SEABED 算法能够对墙体背后的目标实行有效的边界成像。

综上所述,定位识别算法能够有效地消除了墙体对回波时延和传播路径的影响,将穿墙探测转化为在空气中对目标进行探测,从而使得收发合置与收发分置系统下的 SEABED 算法能够在穿墙探测中得到应用。

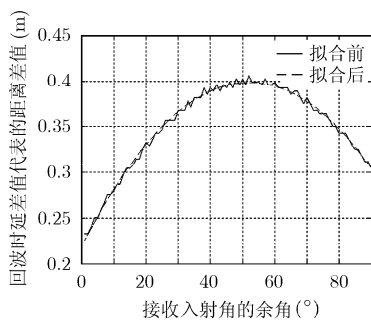


图 7 收发合置回波时延差值曲线

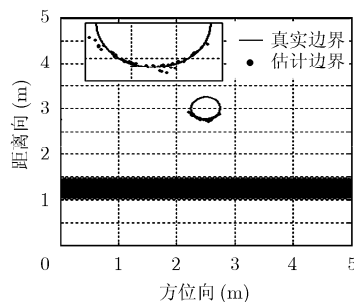


图 8 收发合置下穿墙目标边界成像

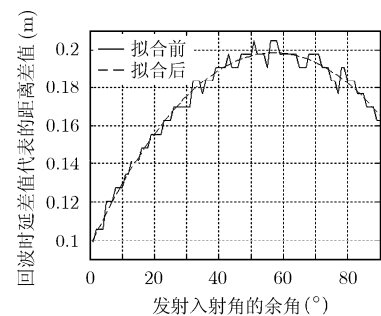


图 9 收发分置发射天线回波时延差值曲线

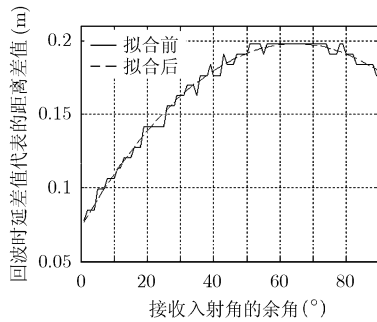


图 10 收发分置接收天线回波时延差值曲线

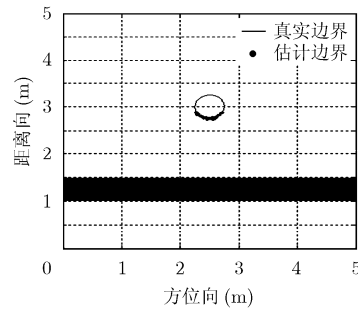


图 11 收发分置下穿墙目标边界成像

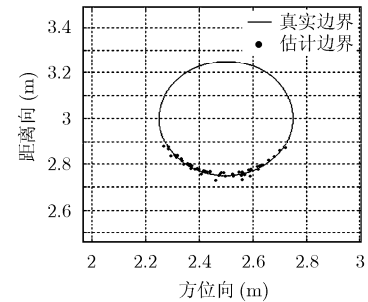


图 12 收发分置下穿墙目标边界成像放大图

## 5 结论

针对 SEABED 算法只适用于无障碍物条件下的探测应用, 本文在分析 SEABED 算法的基础上, 提出一种新的定位识别算法用于消除穿墙探测中墙体对回波时延与传播路径的影响, 从而将 SEABED 算法应用于穿墙探测中。仿真结果表明新的定位识别算法能够有效地消除墙体的影响, 使 SEABED 算法能够在穿墙探测中得到应用, 并且估计的目标边界能够准确地反映出真实目标的轮廓与位置从而达到目标定位识别的效果。由于新的定位识别算法同样能够利用几何关系独立估计出目标的边界, 所以在今后的工作中将继续研究这种算法的估计目标边界的特性并与 SEABED 算法进行比较。

### 参考文献

- [1] Ahmad F, Zhang Yi-min, and Amin M G. Three-dimensional wideband beamforming for imaging through a single wall[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008, 5(2): 176-179.
- [2] Wang Gen-yuan and Amin M G. Imaging through unknown walls using different standoff distances[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2006, 54(10): 4015-4025.
- [3] Ahmad F and Amin M G. Through-the-wall polarimetric imaging[C]. *Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XV*, 2008, Proc. of SPIE Vol. 6970: 69700N-1-69700N-10.
- [4] Ma Lin, Zhang Zhong-zhao, and Tan Xue-zhi. A novel through-wall imaging method using ultra wideband pulse system[C]. *IEEE International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing*, Pasadena, 2006: 147-150.
- [5] Ma Lin, Zhang Zhong-zhao, and Tan Xue-zhi. Two-step imaging method and resolution analysis for UWB through wall imaging[J]. *IEEE Networking and Mobile Computing*, 2008, 8: 548-553.
- [6] Takuya Sakamoto. A 2-D Image stabilization algorithm for UWB pulse radars with fractional boundary scattering transform[J]. *IEICE Transactions on Communications*, 2007, E90-B(1): 131-139.
- [7] Takuya Sakamoto and Toru Sato. A target shape estimation algorithm for pulse radar systems based on boundary scattering transform[J]. *IEICE Transactions on Communications*, 2003, E87-B(5): 1357-1365.
- [8] Shouhei Kidera, Takuya Sakamoto, Satoshi Sugino, and Toru Sato. An accurate imaging algorithm with scattered waveform estimation for UWB pulse radars[J]. *IEICE Transactions on Communications*, 2006, E89-B(9): 2588-2595.
- [9] Takuya Sakamoto. Nonparametric imaging algorithms for UWB pulse radars[D]. Kyoto University, 2005.
- [10] Shouhei Kidera. High-performance 3-D imaging algorithms for UWB pulse radars[D]. Kyoto University, 2007.

吴世有：男，1985年生，博士生，从事超宽带雷达目标检测、成像技术和软件开发等方面的研究工作。

黄琼：女，1984年生，博士生，从事超宽带穿墙雷达目标检测、快速成像技术等方面的研究工作。

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。