

一种新型超宽带穿墙雷达运动目标跟踪成像算法

吴世有^{*①②} 陈洁^① 孟升卫^① 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: 近场区域的非接触式穿墙目标跟踪成像探测是超宽带脉冲雷达在火灾救援、安全保卫、城市巷战以及生命威胁等方面的一个重要应用。基于超宽带脉冲雷达的边界散射变换和直接散射波形提取的边界估计算法(SEABED)由于其不适用于穿墙条件下运动目标的成像与跟踪的情况,该文结合SEABED算法的成像原理,提出回波时延差关系曲线概念从而利用三角定位原理和坐标转换实现运动目标的成像与跟踪。文中提出的算法假设在近场条件下,针对运动目标场景建立系统模型,通过成像结果和速度值的同时估计,对墙体背后的运动目标的边界和轨迹进行有效估计。仿真结果表明,该算法能够弥补墙体对目标回波的影响,精确度高,达到穿墙目标跟踪成像探测的目的。**关键词:** 超宽带脉冲雷达;运动目标;跟踪成像;基于边界散射变换和直接散射波形提取的边界估计算法(SEABED);时延差曲线

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)01-0134-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00294

A New Tracking and Imaging Algorithm of Moving Target for Ultra Wideband Through Wall Radar

Wu Shi-you^{①②} Chen Jie^① Meng Sheng-wei^① 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: The Ultra Wide-Band Short-Pulse (UWB-SP) radar used for detecting targets is a promising technique in fire rescue operations, police awareness, urban-warfare, life-threatening and other fields, and it can be used for noncontact measurement of the tracking and imaging of moving target behind walls. As the Shape Estimation Algorithm based on BST (Boundary Scattering Transform) and Extraction of Directly scattered waves (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 obtain the target shape imaging and track it synchronously using triangle localization method and the difference of time delay. In this paper, the proposed algorithm based on a system model built in the near field can effectively estimate the velocity and track of moving target with the imaging result. Simulation results show that the effect of the wall can be removed visibly and the purpose of the imaging and tracking of moving target can be realized well.

Key words: Ultra Wide-Band Short-Pulse (UWB-SP) radar; Moving target; Tracking and imaging; Shape Estimation Algorithm based on BST (Boundary Scattering Transform) and Extraction of Directly scattered waves (SEABED) algorithm; Difference of time delay

1 引言

超宽带脉冲雷达具有测距精度高、穿透能力强、分辨能力高、反隐身能力好、功耗低等优点,在雷达探测、成像、精确定位、目标识别等领域显示了

巨大的潜力。近年来,基于超宽带脉冲雷达技术对于墙体背后的运动目标进行非接触式的成像和跟踪探测已经成为一个重要的研究热点,并在反恐斗争、灾害救援、公安防暴、城市巷战等领域有着显著应用。

在实际应用中,障碍物背后的运动目标成像跟踪探测要求相应的超宽带雷达系统具有较好的实时性,从而对成像算法和跟踪算法均提出了较高的要

2011-03-30 收到, 2011-09-20 改回

国家重点基础研究发展计划项目(2010CB73190103)资助课题

*通信作者: 吴世有 ahwushiyou@126.com

求。在成像技术方面，传统的超宽带成像算法在识别能力和计算效率上不能满足实时性的要求。三圆定位法对多个目标存在时难以达到定位目的，时域后向投影的计算效率不高，并且这两种方法均不能实现目标边界成像。日本京都大学的学者提出的基于超宽带脉冲雷达的 SEABED(Shape Estimation Algorithm based on BST and Extraction of Directly scattered waves)算法能够实现实时目标边界成像，成像效果明显，但是其不能应用于存在墙体等障碍物的情况以及当目标移动时算法的成像条件不能满足(SEABED 算法要求全向天线沿方位向移动扫描采集不同测量点的回波数据且天线移动期间目标处于静止状态，这在要求实时跟踪目标运动状态的超宽带穿墙雷达系统中难以满足)^[1-5]。国外其它相关大学的研究人员同样对穿墙探测进行了深入细致的研究^[6-8]；在国内，适用于穿墙探测的两步成像方法由哈尔滨工业大学的相关学者提出，并给出了详细分析^[9]。本文针对 SEABED 算法在穿墙运动目标探测应用中的不足，基于在特定接收天线阵列条件下的回波时延差曲线概念并依据此曲线特点弥补墙体对电磁波的传播路径和传播时间的影响，从而实现运动目标跟踪与成像^[10]。

2 静止目标边界成像算法

因为目标的边界与脉冲时延之间存在一种特定的几何转换关系，所以日本京都大学的 Takuya Sakamoto 和 Shouhei Kidera 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，从而提出了成像计算能力优越的 SEABED 算法。针对不同的收发系统(主要为收发同置和收发分置)，SEABED 算法推导出两组不同的转换公式(边界散射变换(Boundary Scattering Transform, BST)和逆边界散射变换(Inverse Boundary Scattering Transform, IBST)，但是由于该算法没有考虑穿透障碍物的情况，所以这两组公式都不能用于穿墙探测应用中。由于 SEABED 算法失效的主要原因是障碍物存在情况下传播路径和传播时延会发生变化，所以可以通过修正传播时延重新建立目标边界与脉冲时延之间的映射。本节将提出一种静止目标边界成像算法来实现这种映射的重建，最终实现目标的边界成像。

墙体的存在会对回波时延和传播路径产生影响，为了能够将 SEABED 算法应用到穿墙静止目标成像中，必须修正墙体带来的影响。静止目标边界成像算法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来实现 SEABED 算法在穿墙情况下的应用。

图 1 给出了消除墙体对传播路径和回波时延的影响的示意图。经过算法处理后的 $K'B-BC$ 段的回波时延和 K' 的位置适用于 SEABED 算法，从而运用逆边界散射变换 IBST 求出目标边界上的散射点 C 的位置。这里墙体厚度 L ，天线实际位置 K 以及到墙体的距离 H 均已知。此算法中入射角 α 的求取将是计算目标边界散射点 C 的重要条件^[10]。

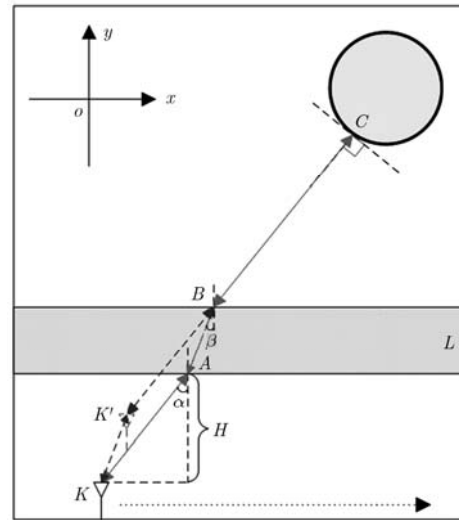


图 1 去除墙体影响示意图

图 2 和图 3 分别说明了如何在收发同置系统和收发分置系统中求取入射角。不同系统中入射角的求取方法和算法流程在文献[10]中有详细说明，本文将不作重复介绍。由于静止目标边界成像是消除墙体影响后应用 SEABED 算法实现穿墙条件下的目标边界成像，所以 SEABED 成像算法本身存在的一些问题仍将无法消除。其中最重要的问题是计算出的目标边界散射点只能在一定程度上与实际目标边界吻合，这主要是因为 SEABED 算法的变换公式

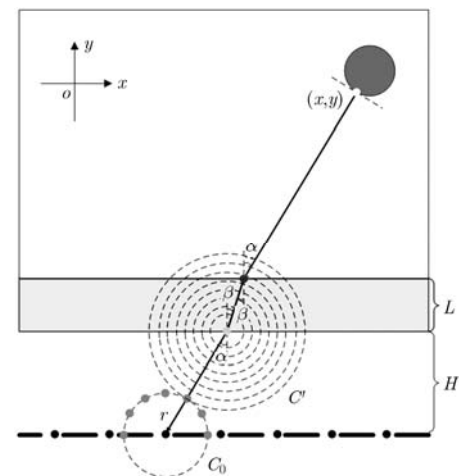


图 2 收发同置系统中算法示意图

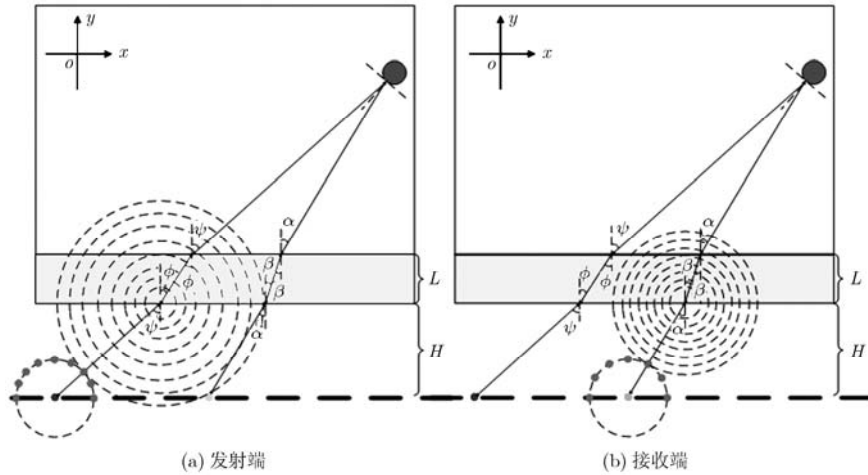


图 3 收发分置系统中的算法示意图

中存在差分计算,从而引入目标边界散射点求解的不稳定性。从算法示意图中可知,在求取入射角之后可以利用几何关系和已知条件直接计算目标边界的散射点位置,所以可以脱离 SEABED 算法实现穿墙条件下目标边界成像。

3 运动目标边界成像跟踪算法

3.1 静止目标边界直接成像

由图 1 可知,当入射角 α 已知的条件下,利用几何关系可以重新建立满足 SEABED 算法变换公式要求的目标边界与脉冲时延之间的映射,从而使得 SEABED 算法在穿墙情况下得到应用。然而,由于目标的实际回波时延同样已知,从而利用这两个已知条件可以不用重建 SEABED 算法中的几何映射,直接计算实际的目标边界散射点位置实现边界成像。

$$A(x_A, y_A) \begin{cases} x_A = X + H \times \tan \alpha \\ y_A = H \end{cases} \quad (1)$$

$$B(x_B, y_B) \begin{cases} x_B = X + H \times \tan \alpha + L \times \tan \beta \\ y_B = H + L \end{cases} \quad (2)$$

在式(1)和式(2)中,天线的实际位置 X 和天线到墙面的垂直距离 H 已知,从而折射点 A 和 B 的位置可以计算出来。利用 $KA-AB-BC$ 段的回波时延减去 $KA-AB$ 段的相应时延(需要考虑墙体的介电常数)确定 BC 段的时延,最后结合入射角 α 计算出目标边界散射点 C 的位置(C 一定在斜率为 $\tan \alpha$ 且过 B 点的直线上)。

3.2 运动目标跟踪

文献[11]中的系统模型是基于目标处于静止状态,收发天线沿着水平测量线移动建立起来的。当天线移动到每个测量位置时,相应的目标的边界散

射点位置得以确定,所有的测量位置对应的目标散射点位置整体构成了目标边界。本文将针对收发天线位置固定,目标运动的情况建立系统模型,从而估计出来的散射点位置表示的将是目标处于运动轨迹上某个位置时的边界点,并且这些散射点位置并不代表目标边界上相同点(需要考虑此时目标的运动轨迹从而这些散射点集合转换为目标在一个固定位置时的边界点集合)。

如图 4 所示建立运动目标跟踪的系统模型,发射天线 T 位于天线阵列中间位置,两边分别是单个接收天线 $R1/R2$ 和以其为中心的圆形接收天线阵列 $CR1/CR2$ 。当一对收发天线对,如 $T-R1-CR1$,用于对运动目标的跟踪,另外一对 $T-R2-CR2$ 将用于求取相应于发射天线 T 的入射角 α ,反之亦然。由于文献[11]中相应于发射天线 T 的入射角 α 的求取依赖于天线阵列的移动,而此系统模型中发射天线不作移动,所以需要额外添加接收天线阵列来求取。由此,可以将目标相对天线移动转换为天线相对目标移动,从而利用文献[10]中的方法求取入射角(收发分置系统)。为方便讨论,这里假设对运动目标进行跟踪时使用天线对 $T-R1-CR1$,求取发射天线 T 的入射角 α 时使用天线对 $T-R2-CR2$,并且任意时刻两个天线对都将同时处于工作状态。

如图 5 所示目标沿着平行于直线 $A-B-C$ 的轨迹做直线运动(此运动轨迹未知),运动目标跟踪算法的具体实现步骤如下:

(1)运用文献[11]中的坐标转换方法,将目标从 A 处移动到 C 处接收的回波数据转换成天线相对目标运动情况下接收的数据,即转换后相当于天线沿着平行于直线 $A-B-C$ 的测量线对静止目标进行扫描获得的回波数据;

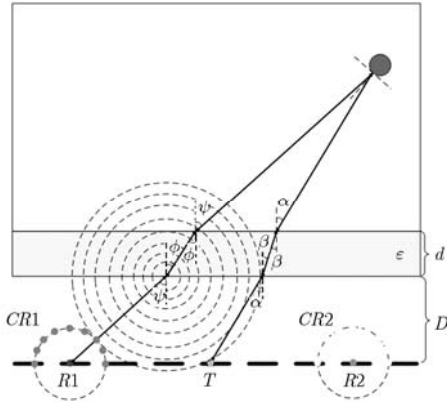


图 4 运动目标跟踪系统模型

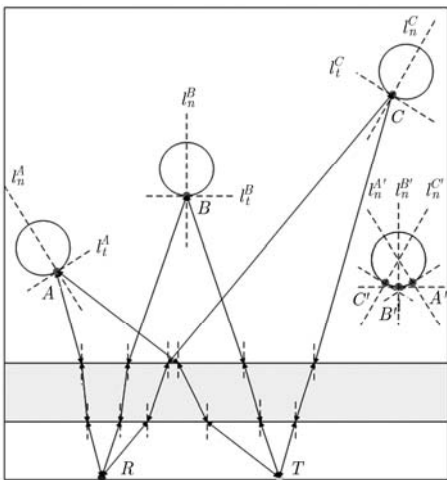


图 5 运动目标跟踪算法示意图

(2)在转换前的回波数据中，利用回波时延曲线求取天线对 $T-R1-CR1$ 中接收天线 $R1$ 的入射角 ψ (对于每个目标回波)；

(3)在转换后的回波数据中，将来自天线对 $T-R2-CR2$ 的回波数据与来自 $T-R1-CR1$ 的进行搜索匹配，寻找它们位置对应互换的测量位置，即此时天线对 $T-R1-CR1$ 中 $R1-CR1$ 和 T 的位置分别与天线对 $T-R2-CR2$ 中 T 和 $R2-CR2$ 的位置对应；

(4)找到匹配位置之后，相应测量点处的天线对 $T-R2-CR2$ 的接收天线的入射角即为天线对 $T-R1-CR1$ 中发射天线的入射角 α ；

(5)由(2)和(4)分别求出的发射天线和接收天线的入射角可以基于计算式(1)，式(2)求出相应的目标的边界散射点位置；

(6)重复(2)-(5)步骤，求出运动轨迹上不同位置处的目标的不同边界散射点，如图 5 中的 A, B, C 。

3.3 运动目标边界成像

3.3.1 估计运动目标边界 当估算出目标的一个特定的边界散射点位置后，基于 3.1 节提出的方法，

可以求出目标在该散射点处的切线 l_t 和法线 l_n 。以图 5 中的 A 点为例， A 点的位置是通过入射电磁波和反射电磁波传播路径的交点来获取的，由此目标在 A 点位置处的法线 l_n^A 和切线 l_t^A 便可以求出(入射路径和反射路径的夹角的角平分线及其垂线)。如图 5 右下角所示，在求出不同散射点(A, B, C 等)对应的法线和切线之后，将它们以及对应的散射点平移到一个选定的固定点处得到集合 $\{l_n^{A'}, l_t^{A'}, A'; l_n^{B'}, l_t^{B'}, B'; l_n^{C'}, l_t^{C'}, C'; \dots\}$ ，其中点集合 $\{A', B', C', \dots\}$ 是在该固定点处估计的目标边界。

由于无法确定目标的半径值，以及获取的目标散射点位置存在误差，所以对应的法线和切线也将存在误差。在实际仿真实验中，目标散射点的法线和切线将不用于估计目标边界，换之利用目标边界和运动参数之间的依赖关系来估计边界。

3.3.2 估计实际运动参数 假定目标作匀速直线运动(图 5)，目标边界和运动参数满足

$$\left. \begin{aligned} x'_i &= x_i - (i-1) \times v_h \\ y'_i &= y_i - (i-1) \times v_v \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中 i 表示目标散射点的序号， N 表示目标散射点个数， x_i 和 y_i 分别表示第 i 个目标散射点位置， x'_i 和 y'_i 分别表示第 i 个目标散射点在平移后的位置坐标， v_h 和 v_v 分别表示目标水平和垂直运动速率(运动参数)。估计 v_h 和 v_v 的值并结合式(3)从而计算出转换后的目标散射点位置 (x'_i, y'_i) ，当估计准确时所有散射点 (x'_i, y'_i) 将聚合在一起形成一定形状的目标边界，而当估计错误时散射点将不会聚合在一起呈现发散状态。这里式(3)是将第 1 个目标散射点作为参考点。

4 仿真验证与结果分析

建立仿真场景如图 4 所示：成像区域方位向 $0 \sim 5$ m，距离向 $0 \sim 5$ m，半径为 0.25 m 的金属球作为目标并在场景中作匀速直线运动(分别为水平，垂直运动和斜直线运动)，墙体厚度为 0.3 m，相对介电常数为 $\epsilon_r = 6$ ，距收发天线 0.7 m 处。发射信号为中心频率为 1 GHz 的一阶微分高斯脉冲，利用 FDTD 法仿真获取 25 个位置处的目标回波数据(采样时窗为 50 ns，单道时间步长为 23.59 ps，收发天线间距为 0.5 m)并获取目标回波时延。

当目标沿方位向在距离向 3 m 处作匀速水平直线运动 ($v_h = 0.1$ m/s, $v_v = 0$ m/s) 时，天线对 $T-R1-CR1$ 和 $T-R2-CR2$ 同时接收回波数据并在进行 3.2 节中的运动目标跟踪算法处理，分别计算出收发分置系统中发射天线和接收天线对应的入射角估计值。这些估计值必须经过适当微调得到可

用于成像的校正值,如图6所示。图7给出的估计值和校正值之间的误差均在 0.5° 以内,故估计的入射角近似准确。目标跟踪算法依据校正的入射角值分别计算电磁波的传播路径并获取25个目标散射点,这些散射点构成了目标的运动轨迹(如图8所示)。这25个目标散射点分别表示目标在不同运动位置处的目标边界点,以第1个散射点为参照,结合式(3)可以获取目标的边界,如图9所示,估计的目标边界与目标实际边界能够近似一致,误差在 0.1% 之内,实现目标边界成像。

同理,当目标沿距离向在方位向 2.5 m 处作匀速直线运动($v_h = 0\text{ m/s}$, $v_v = 0.1\text{ m/s}$)时,估计的

和校正的天线入射角及误差如图10,图11所示,估计目标轨迹和目标边界如图12,图13所示,结果与水平直线运动类似。在图13中,由于目标在收发天线中间的距离向上运动,所以边界成像结果中所有散射点重合为一点,符合实际情况。最后,当目标作匀速斜直线运动($v_h = 0\text{ m/s}$, $v_v = 0.1\text{ m/s}$)时,与上述两种运动方式一样,估计和校正的天线入射角及误差如图14,图15所示,估计目标轨迹和目标边界如图16,图17所示。

综上所述,目标作3种不同的运动方式时,经过同样的目标跟踪算法和目标边界成像算法,在较小的误差值下,均能得到目标的运动轨迹和目标边界,实现了穿墙条件下运动目标的跟踪成像。

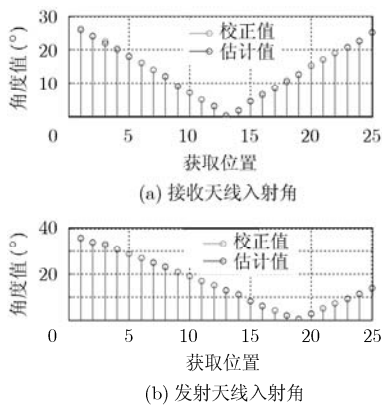


图6 水平直线运动时的天线入射角

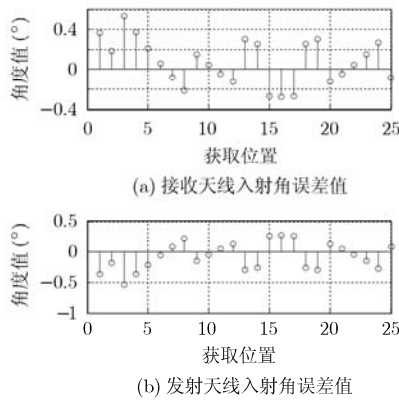


图7 水平直线运动时的天线入射角误差

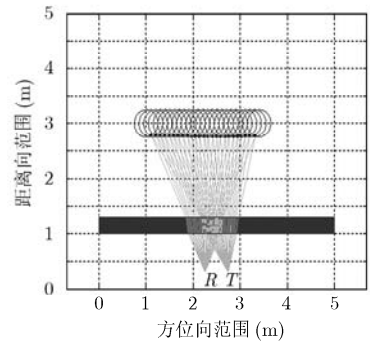


图8 水平直线运动时的目标轨迹

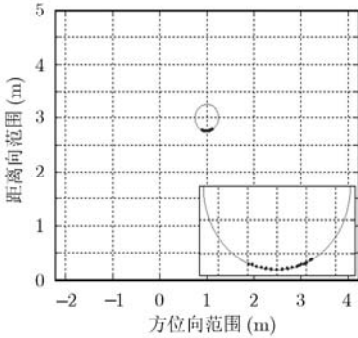


图9 水平直线运动时估计的目标边界

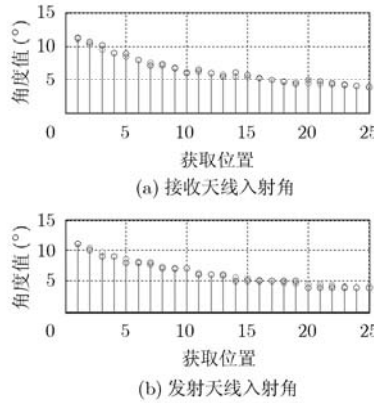


图10 垂直直线运动时的天线入射角

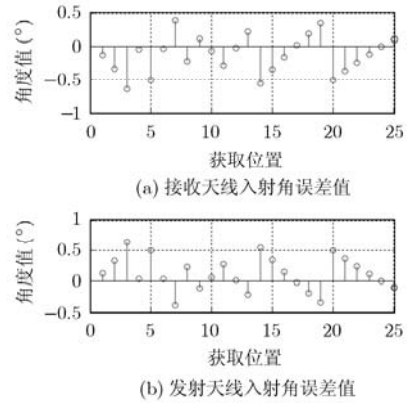


图11 垂直直线运动时的天线入射角误差

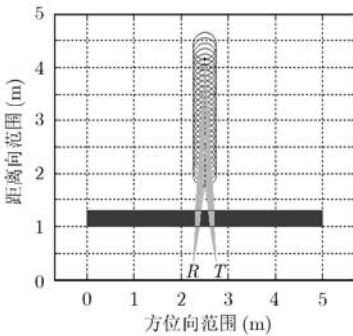


图12 垂直直线运动时的目标轨迹

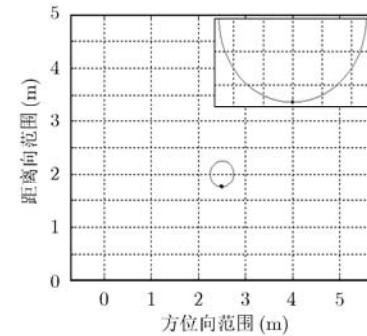


图13 垂直直线运动时估计的目标边界

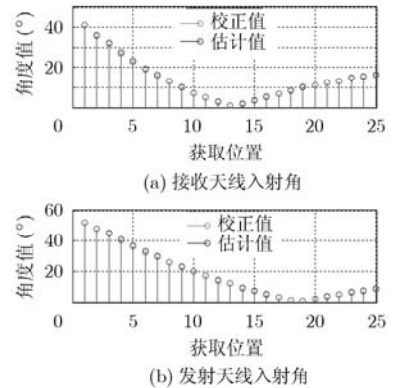


图14 斜直线运动时的天线入射角

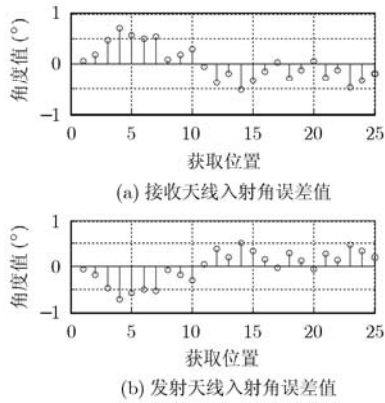


图 15 斜直线运动时的天线入射角误差

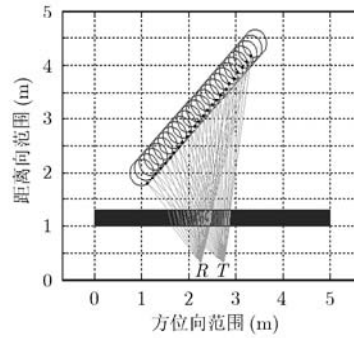


图 16 斜直线运动时的目标轨迹

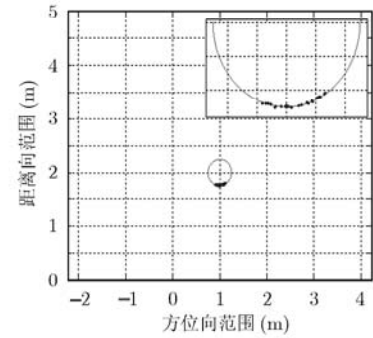


图 17 斜直线运动时估计的目标边界

5 结束语

本文在修正后的 SEABED 算法能够实现穿墙静止目标边界成像的基础上, 提出一种新的运动目标跟踪成像算法用于超宽带脉冲雷达运动目标探测。仿真实验给出目标的 3 种不同运动方式下的算法结果, 验证了新的目标跟踪成像算法的有效性, 同时表明静止目标成像算法能够替代 SEABED 算法利用几何关系实现目标边界成像。由于目标跟踪成像算法需要对目标的运动速率进行合理估计, 所以今后的工作中将继续研究这种算法以实现在跟踪成像的同时能够有效地估算目标的运动速率。

参考文献

- [1] 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.
- [2] Takuya Sakamoto and Toru Sato. A target shape estimation algorithm for pulse radar systems based on boundary scattering transform[J]. *IEICE Transactions on Communications*, 2004, E87-B(5): 1357-1365.
- [3] Shouhei Kidera, Takuya Sakamoto, Satoshi Sugino, et al. An accurate imaging algorithm with scattered waveform estimation for UWB pulse radars[J]. *IEICE Transactions on Communications*, 2006, E89-B(9): 2588-2595.
- [4] Shouhei Kidera, Takuya Sakamoto, and Toru Sato. Accurate UWB radar three-dimensional imaging algorithm for a complex boundary without range point connections[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(4): 1993-2004.
- [5] Shouhei Kidera. High-performance 3-D imaging algorithms for UWB pulse radars[D]. Kyoto University, 2007.
- [6] Zhuge Xiao-dong, Yarovoy A G, Savelyev Timofey, et al. Modified Kirchhoff migration for UWB MIMO array-based radar imaging[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(6): 2692-2703.
- [7] Yarovoy A G, Savelyev T G, Aubry P J, et al. UWB array-based sensor for near-field imaging[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2007, 55(6): 1288-1295.
- [8] Burkholder R J and Browne K E. Coherence Factor Enhancement of Through-Wall Radar Images[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letter*, 2010, 9: 842-845.
- [9] Ma Lin, Zhang Zhong-zhao, and Tan Xue-zhi. Two-step imaging method and resolution analysis for UWB through wall imaging[C]. *IEEE 2008 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, WiCoM'08, Dalian China, Oct. 12-17, 2008*: 1-5.
- [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]. *电子与信息学报*, 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.
- [11] 黄琼, 吴世有, 孟升卫, 等. 基于超宽带雷达的运动人体目标跟踪成像算法[J]. *电子学报*, 2011, 39(3): 531-537. Huang Qiong, Wu Shi-you, Meng Sheng-wei, et al. Tracking and imaging algorithm for walking human bodies by UWB radar system[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(3): 531-537.

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等。

陈洁: 男, 1980年生, 副研究员, 研究方向为超宽带穿墙雷达技术、超宽带探地雷达技术和超宽带生命检测雷达技术等。

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工作。