

基于超宽带雷达的运动人体目标跟踪成像算法

黄 琼^{1,2}, 吴世有², 孟升卫^{2,3}, 陈 洁², 方广有²

(1. 上海航天技术研究院 802 所, 上海 200090; 2. 中国科学院电子学研究所, 北京 100190; 3. 哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150086)

摘 要: 超宽带雷达用于人体探测, 在大规模城区巷战、反恐斗争和灾害救援等方面有着广阔的应用前景. 传统的超宽带成像算法在识别能力及计算效率上已不能满足要求. 本文针对运动人体目标场景建立系统模型, 将人体运动等效为天线移动扫描, 基于快速 SEABED 成像算法提出一种用于超宽带雷达的动目标跟踪成像算法. 仿真与实验结果验证了算法的有效性和可行性, 该算法对系统硬件要求低, 实时性好, 准确度高, 能完成对运动目标速度估计及运动轨迹跟踪, 并对目标边界成像.

关键词: 超宽带雷达; 边界散射变换; SEABED 算法; 目标边界成像; 动目标跟踪

中图分类号: TN957.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 03-0531-07

Tracking and Imaging Algorithm for Walking Human Bodies by UWB Radar System

HUANG Qiong^{1,2}, WU Shi-you², MENG Sheng-wei^{2,3}, CHEN Jie², FANG Guang-you²

(1. No. 802 Institute of Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 200090, China; 2. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150086, China)

Abstract: The Ultra WideBand (UWB) Radar is a promising candidate for detecting human bodies in many fields such as urban-warfare, counter-terrorism and calamity rescue scenarios. Conventional UWB imaging algorithm can not meet the demand in the capability of targets recognition and calculation efficiency. This paper proposed a novel algorithm based on high-speed SEABED algorithm for UWB radar systems in which walking motion was used to replace antenna scanning by assuming a system model. The effectiveness and feasibility of the algorithm is demonstrated via simulated and experimental results. It is shown that the proposed algorithm features simple hardware requirement, low calculation, and high imaging precision, and it can be used to estimate the velocity, image and track walking human bodies.

Key words: ultra wideband (UWB) radar; boundary scattering transform (BST); SEABED algorithm; target shape imaging; moving targets tracking

1 引言

超宽带雷达技术具有测距精度高、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. 利用超宽带雷达对运动人体进行隐蔽的、非接触式的识别和探测成为近年来的一个研究热点, 在城市巷战、反恐斗争、公安防暴、灾害救援等领域中得到广泛应用.

对运动人体目标跟踪成像要求系统有较好的实时性, 对成像算法也提出了较高的要求. 传统的超宽带成像算法在识别能力及计算效率上已不能满足要求. 如三圆定位 (Trilateration) 方法只能对点目标定位成像^[1], 并且存在多个目标时难以求解. 时域后向投影 (Back-Pro-

jection, BP) 算法计算量大, 成像效果也不尽人意^[2,3]. 近年来, 有学者提出了基于可逆边界散射变换的 SEABED (Shape Estimation Algorithm based on BST and Extraction of Directly Scattered Waves) 成像算法, 该算法计算效率高, 可以对目标边界形状准确成像^[4-6]. SEABED 算法要求全向天线沿方位向移动扫描并采集多个测点数据, 在天线扫描过程中要求目标处于静止状态, 这对于要求实时跟踪人体运动的超宽带雷达系统而言无法实现. 文献 [7,8] 基于 SEABED 算法将人体运动等效为天线扫描, 提出一种跟踪运动人体目标的成像算法, 但其只能用于目标沿方位向运动的场景, 有较大的局限性. 本文针对探测运动人体目标的特殊场景进行建模, 提出一种基于超宽带雷达的动目标跟踪成像算法, 采用固定的一发二

收天线阵完成对人体目标运动速度估计及运动轨迹跟踪,并对目标边界成像。

2 SEABED 成像算法原理

SEABED 算法在 2004 年由日本人 Takuya Sakamoto 等提出,该算法主要是利用了目标边界形状和接收脉冲延迟之间存在逆边界散射变换 (IBST, Inverse Boundary Scattering Transform) 的特性^[9],其最大的优越性在于直接完成由准波前到目标边界的转换计算,计算时间非常短,且可以对目标边界形状清晰成像。

图 1 为 SEABED 算法实际空间,全向天线沿 x 轴方向移动扫描,天线扫描到位置 $(X, 0)$ 时,回波沿与目标边界垂直方向返回,根据每一个天线扫描位置处的回波 $s(X, Y)$ 可以得到发射脉冲的相应延迟 t ,接收回波准波前 $Y = ct/2$ (c 为真空中光速)。由于实际接收数据为离散数据,提取准波前的过程为利用多项式或三次样条函数对 $s(X, Y)$ 进行拟合,则集合

$$P = \{(X, Y) | \partial s(X, Y) / \partial Y = 0, |s(X, Y)| \geq T_s\}$$

(其中, T_s 为噪声门限)即为准波前集合。图 2 所示数据空间中曲线即为提取出的准波前,由图中几何关系可以得到 BST 变换,它描述了目标边界点 (x, y) 与准波前 (X, Y) 之间的关系:

$$\begin{cases} X = x + y dy/dx, \\ Y = y \sqrt{1 + (dy/dx)^2} \end{cases} \quad (1)$$

那么,其逆变换就解决了从接收准波前到目标边界的重建问题。由图 1 可知目标边界点 (x, y) 在以 $(X, 0)$ 为圆心,以 $Y = ct/2$ 为半径的一簇圆上:

$$F(x, y; X, Y) = (x - X)^2 + y^2 - Y^2 = 0 \quad (2)$$

这一簇圆的包络构成了目标边界,包络线由下式求得:

$$\partial F(x, y; X, Y) / \partial X = -2(x - X) - 2Y dY/dX = 0 \quad (3)$$

即 $x = X - Y dY/dX$, 代入式(2)中,可得

$$y = Y \sqrt{1 - (dY/dX)^2} \text{ (假设 } y > 0 \text{ 和 } Y > 0),$$

即 BST 的逆变换 (IBST) 为:

$$\begin{cases} x = X - Y dY/dX, \\ y = Y \sqrt{1 - (dY/dX)^2}, \end{cases} \quad (|dY/dX| \leq 1) \quad (4)$$

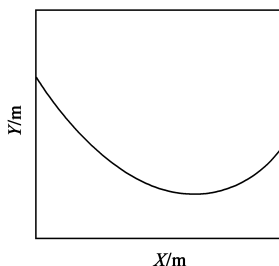
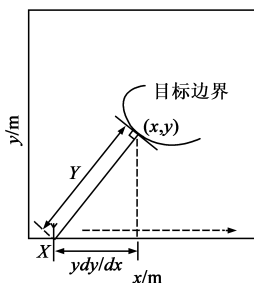


图1 SEABED算法实际空间

图2 SEABED算法数据空间

因此,从接收回波中提取出目标边界对应的准波前信息进行 IBST,便可以得到目标边界点 (x, y) 集合,从而实现对目标边界成像。

在实际雷达系统中,通常采用收发分置雷达,此时图 1 中的几何关系不再成立,需要对 BST 及 IBST 进行修正^[10]。如图 3 所示,收发天线对 T/R 沿 x 轴方向移动扫描,收发间距固定为 $2d$,定义 $X = (X_T + X_R)/2$,与单基地雷达求解过程类似,可得到基于收发分置雷达的 IBST:

$$\begin{cases} x = X - \frac{2Y^3(dY/dX)}{Y^2 - d^2 + \sqrt{(Y^2 - d^2)^2 + 4d^2 Y^2 (dY/dX)^2}} \\ y = \sqrt{(Y^2 - d^2)[Y^2 - (x - X)^2]}/Y \end{cases} \quad (5)$$

同理,联立 $F(x, y; X, Y, d) = 0$ 与 $\frac{\partial F(x, y; X, Y, d)}{\partial x} = 0$ 得到基于收发分置雷达的 BST:

$$\begin{cases} X = x + 2(dy/dx)(y^2 + d^2)/\beta, \\ \beta = y[1 - (dy/dx)^2] \\ \quad + \sqrt{y^2[1 + (dy/dx)^2]^2 + 4d^2(dy/dx)^2} \\ Y = \sqrt{y^2 + d^2 + y(dy/dx)(X - x)} \end{cases} \quad (6)$$

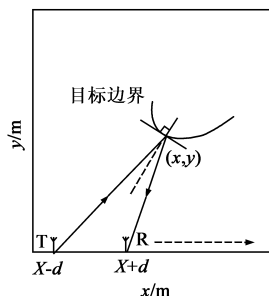


图3 基于收发分置雷达几何模型

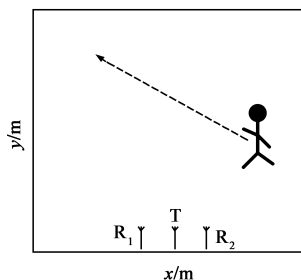


图4 系统场景

3 系统模型及算法实现

如上节所述,SEABED 算法要求天线沿方位向移动扫描并采集多个测点数据,在天线扫描采集数据过程中要求目标处于静止状态,显然,在探测运动人体目标的场景中,尽管人体属于慢速运动目标,但要在人体近似静止的一瞬间内完成扫描采集数据是不可能的,而如果采用固定的多个接收天线又会给系统硬件造成极大的压力。本节利用人体运动等效于天线运动这一思想对系统进行建模,提出一种采用一发二收固定天线阵实时探测人体运动的成像算法,该算法可以估计人体运动速度及运动轨迹,并对目标边界成像。

3.1 系统建模

人体属于慢速运动目标,速度通常限制在 $0 \sim 2\text{m/s}$ 范围内,而在短时段内,人体运动可以近似为匀速直线运动。图 4 给出了探测运动人体目标的系统场景,系统

采用一发二收固定天线阵,人体在成像区域范围内匀速直线运动.针对这一系统场景建立图 5 所示二维成像系统模型,将人体横截面用图中所示目标代替,将天线静止、人体运动等效为人体静止、天线运动,即在人体运动的某一时段内,两个接收天线采集不同时刻回波数据,这等效于目标静止而天线沿某一方向移动扫描采集数据.

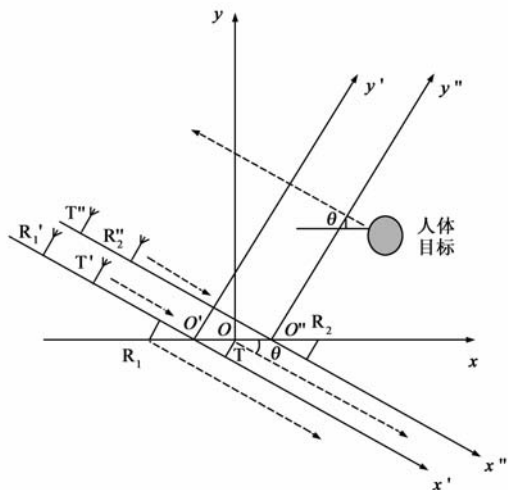


图5 系统模型

以发射天线 T 位置为原点建立坐标系 xoy ,假设人体沿与坐标轴 x 成 θ 角方向运动,以发射天线 T 与接收天线 R_1 中点为新坐标系 $x'o'y'$ 原点,新坐标系 x' 坐标轴方向与原坐标系 x 坐标轴方向夹角为 θ ,因此,原运动场景等效于人体目标静止,而天线对 T' 与 R_1' 沿新坐标系 x' 方向移动扫描,经此建模等效后满足 SEABED 算法条件,可以利用基于收发分置雷达的 SEABED 算法在坐标系 $x'o'y'$ 中对目标边界成像.同理,根据接收天线 R_2 位置也可以建立另一新坐标系 $x''o''y''$,其原点位置为发射天线 T 与接收天线 R_2 中点,此时也可以在坐标系 $x''o''y''$ 中对目标边界成像.

3.2 人体目标跟踪成像算法

经过 3.1 节所述方法建模后,可以在新坐标系下采用 SEABED 算法对目标边界形状成像,但目标运动方向、运动速度无法预知,因此需首先估计这两个参数.由于人体运动速度及运动角度均是有限的,建立运动速度集合与角度集合:

$$v_i = \{ \pm (i * v_{\max}/M); i = 1, 2, \dots, M \} \quad (7)$$

$$\theta_j = \{ -\pi/2 + (j-1) * \pi/(2N); j = 1, 2, \dots, 2N+1 \} \quad (8)$$

其中,假设人体运动最大速度为 v_{\max} ,定义速度的 x 分量与 x 正方向一致时取正,设人体速度方向相对 x 正方向夹角为 ϕ ($-\pi < \phi \leq \pi$),则 θ_j 定义为

$$\theta_j = \begin{cases} \phi & , -\pi/2 \leq \phi \leq \pi/2 \\ \pi - \phi & , \pi/2 < \phi \leq \pi \\ -\pi - \phi & , -\pi < \phi < -\pi/2 \end{cases} \quad (9)$$

因此,集合 $\{v_i, \theta_j; |v_i| \leq v_{\max}, |\theta_j| \leq \pi/2\}$ 包括了所有人体可能的运动情况.

对于 $\{v_i, \theta_j\}$ 集合中每一对取值,根据接收天线 R_1 回波数据提取出准波前得到 (X_1, Y_1) , X_1 为将人体运动等效为天线运动扫描后收发天线对 T 与 R_1 的中点扫描位置:

$$X_1(k) = v_i * t \quad (10)$$

其中, $t = (k - K) * \Delta t, k = 1, 2, \dots, 2K - 1, \Delta t$ 为天线慢时采样时间间隔,即在目标运动期间,天线采集 $2K - 1$ 个时刻点的数据,等效于目标静止时,天线扫描 $2K - 1$ 个位置采集数据.

收发天线间隔为:

$$2d' = 2d \cos \theta_j \quad (11)$$

其中, $2d$ 为原坐标系下接收天线与发射天线间距.将 (X_1, Y_1) 与 d' 代入式(6)可以计算出坐标系 $x'o'y'$ 下的目标边界 $Q' = \{(x', y')\}$,同理根据接收天线 R_2 回波数据提取出准波前得到 (X_2, Y_2) ,并计算出坐标系 $x''o''y''$ 下的目标边界 $Q'' = \{(x'', y'')\}$,利用坐标系旋转平移变换公式将 Q' 及 Q'' 变换到坐标系 xoy 下:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_j & -\sin \theta_j \\ \sin \theta_j & \cos \theta_j \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -d/2 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_j & -\sin \theta_j \\ \sin \theta_j & \cos \theta_j \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x'' \\ y'' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} d/2 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (13)$$

由此得到在坐标系 xoy 下两组目标边界集合 $Q_1 = \{(X_1, Y_1)\}$ 和 $Q_2 = \{(x_2, y_2)\}$,随着 $\{v_i, \theta_j\}$ 变化,当 Q_1 与 Q_2 重合时,对应的 $\{v_i, \theta_j\}$ 即为目标速度及运动方向.实际中 Q_1 与 Q_2 都是离散点集,不可能完全重合,因此当其差别最小时计算出的估计值最接近真实值,即:

$$(v, \theta) = \arg \min_{[v_i, \theta_j]} \|Q_1 - Q_2\|_{l_2} \quad (14)$$

其中, $\|\cdot\|_{l_2}$ 表示 2-范数.估计出目标速度 v 及角度 θ 后,可计算出目标速度的方位向分量 v_x 以及距离向分量 v_y ,最终目标边界成像为两次目标边界图像的并集,即 $Q = Q_1 \cup Q_2$,注意此时目标的位置对应总时间段中间时间点 $k = K$ 的位置,根据目标速度 v_x, v_y 及时间间隔 Δt 计算出目标方位向及距离向运动轨迹:

$$\begin{cases} x_{\text{track}}(k) = \hat{x} + (k - K) * v_x * \Delta t \\ y_{\text{track}}(k) = \hat{y} + (k - K) * v_y * \Delta t \end{cases}, (k = 1, 2, \dots, 2K - 1) \quad (15)$$

其中, \hat{x} 及 \hat{y} 可以取目标边界成像图像中任一点的横纵坐标值,则计算出的轨迹即是以该点为参考点的运动轨迹.

3.3 计算效率与算法优化

完成一次 IBST 的时间极短暂,因其只需完成数据点到数据点的直接转换.但本算法中,在估计 $\{v_i, \theta_j\}$ 时需要进行 $2MN$ 次 IBST 计算,占用了大部分算法时间,算法速度主要取决于 M 、 N 的取值.同时为了保证速度和角度估计误差在可接受范围内, M 、 N 取值不能太小.为提高算法运算速度,可以从以下三个方面对算法进行优化:

(1) 自适应确定 v_{\min} 取值

当从接收天线回波中提取出准波前集合 $\{Y_1\}$ 和 $\{Y_2\}$ 后,根据准波前的几何意义,以及三角形两边之差小于第三边可知相邻两个时刻的 Y 的差值应该小于 $v * \Delta t$,即可以进一步限制集合 $\{v_i\}$ 的范围,根据回波自适应确定:

$$v_{\min} = \max(dY_1/dt, dY_2/dt) \quad (16)$$

进而 $\{v_i: |v_i| \in [v_{\min}, v_{\max}]\}$, 集合 $\{v_i\}$ 元素数目相对减少,也即减少了循环次数.

(2) 根据 IBST 的限制减少循环次数

式(6)的第二式有意义需满足 $Y^2 - (x - X)^2 \geq 0$, 即 $x - Y \leq X \leq x + Y$, 而 x 代表目标边界横坐标,应在成像区域范围内,有 $|x| \leq x_{\max}$, 所以当:

$$\begin{aligned} \max(X_p) &> x_{p,\max} + \max(Y_p) \quad (p=1,2) \text{ 或} \\ \min(X_p) &< -x_{p,\max} - \max(Y_p) \quad (p=1,2) \end{aligned} \quad (17)$$

时可直接跳出循环,无需进行 IBST 变换. 注意此时 $x_{p,\max}$ ($p=1,2$) 为变换后坐标系的成像区域方位向最大值. 根据式(9), 当 θ_j 变化时, $X(k)$ 会发生较大变化, 有相当部分 $X(k)$ 取值不满足条件, 因此也减少了循环次数.

(3) 逐步细化 $\{v_i, \theta_j\}$ 集合

在初次建立 $\{v_i, \theta_j\}$ 集合时, 可以选择较小的 M 、 N , 使集合元素间隔 Δv 和 $\Delta \theta$ 较大, 找到最接近真实值的 \hat{v} 和 $\hat{\theta}$ 后, 更新 $\{v_i, \theta_j\}$ 集合, 此时集合元素取值范围变为 $[\hat{v} - \Delta v/2, \hat{v} + \Delta v/2]$ 和 $[\hat{\theta} - \Delta \theta/2, \hat{\theta} + \Delta \theta/2]$, 而集合元素间隔更新为 $\Delta v/M$ 和 $\Delta \theta/N$, 再次找到最接近真实值的 \hat{v} 和 $\hat{\theta}$ 后, 更新 $\{v_i, \theta_j\}$ 集合, 如此循环几次后即找到最接近真实值的最终速度与角度估计值.

假设采用原算法集合元素个数分别为 M 、 N , 集合元素间隔分别为 Δv 和 $\Delta \theta$, 在不考虑前两种优化措施时算法需进行 $2MN$ 次 IBST 计算. 而采用逐步细化方法进行 L 次更新循环时, 在与原算法保持相同的估计误差时, 即最后一次集合元素间隔仍然为 Δv 和 $\Delta \theta$, 那么每一次建立的集合元素个数分别为 $M^{1/L}$ 和 $N^{1/L}$, 第 l ($l=1, 2, \dots, L$) 次建立的集合元素间隔分别为 $M^{(L-l)/L} \Delta v_x$ 和 $N^{(L-l)/L} \Delta \theta$, 总共需要计算 $2L(MN)^{1/L}$ 次 IBST 计算, 远远小于未经优化的 $2MN$ 次. 选择合适的更新循环次

数可以兼顾 M 、 N 的取值导致的计算量与估计误差. 理论上 L 越大越节省计算量, 实际中进行 2~3 次更新循环即可达到较满意的结果.

3.4 算法实现流程

采用优化后的算法完成人体目标实时跟踪成像步骤如下:

(1) 设置系统基本参数(成像区域大小、收发天线间隔、慢时采样间隔等), 建立初始角度集合 $\{\theta_j\}$;

(2) 根据两个接收天线在某时间段 $(2K-1) * \Delta t$ 内采集的回波数据提取准波前集合 $\{Y_1\}$ 和 $\{Y_2\}$, 根据 $\{Y_1\}$ 和 $\{Y_2\}$ 确定 v_{\min} , 建立初始速度集合 $\{v_i\}$, 设置集合更新循环总次数 L , 当前 $l=1$;

(3) 对于 $\{v_i, \theta_j\}$ 集合中的元素, 利用基于收发分置雷达的 IBST 分别计算出相应坐标系下的目标边界图像 Q' 及 Q'' ;

(4) 对 Q' 和 Q'' 进行坐标变换, 找到在新坐标系下两次成像最接近时的 (v_i, θ_j) 作为目标运动速度与运动方向, 如果 $l < L$, 针对此步计算得到的 v 和 θ 更新集合 $\{v_i, \theta_j\}$, $l = l + 1$, 跳至步骤(3)继续; 如果 $l = L$, 则更新循环结束, 此时得到的 v 和 θ 为最终估计值, 对应的图像为最终目标边界成像, 并进行下一步;

(5) 根据上步中估计的目标运动速度与方向计算目标方位向及距离向运动轨迹, 并合成为目标运动轨迹.

4 仿真与实验结果

4.1 仿真结果与分析

建立如图 6 所示仿真实验场景: 成像区域大小为方位向 $[-2.5\text{m}, 2.5\text{m}]$ 和距离向 $[0, 5\text{m}]$, 发射天线位置 $[0, 0]$, 两个接收天线位置分别为 $[-0.25\text{m}, 0]$ 和 $[0.25\text{m}, 0]$, 目标为一半径 0.25m 的圆柱, 目标速度方位向分量和距离向分量均为 1m/s, 即目标以 1.414m/s 的速度沿与方位向成 $-\pi/4$ 角度运动, 起始位置与运动轨迹如图所示. 发射信号采用一阶微分高斯脉冲, 中心频率 1GHz, 利用 FDTD 数值仿真得到两个接收天线回波数据, 单道时间步长取 23.59ps, 采样时窗 50ns, 慢时时间采样间隔为 0.05s, 共采集 61 个慢时刻即 3 秒钟的回波数据. 在应用本文提出的算法之前, 需要对回波数据进行预处理, 包括去除直达波、背景去除、匹配滤波等, 以保证能提取出正确

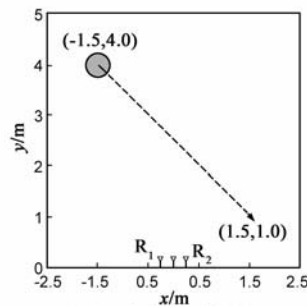


图6 仿真实验场景

的准波前,本文不详加赘述.

图 7 为根据两个天线接收的数据分别提取的准波前,算法估计出目标速度与方向角分别为 1.41m/s 和 -0.7854rad ,图 8 给出了目标边界成像结果,根据式 (10) 的设定,该图是采样时间段中间时刻 ($t = 1.5\text{s}$) 目标边界的图像,从图 9 中可以看出,算法能较为准确地估计出目标边界形状.

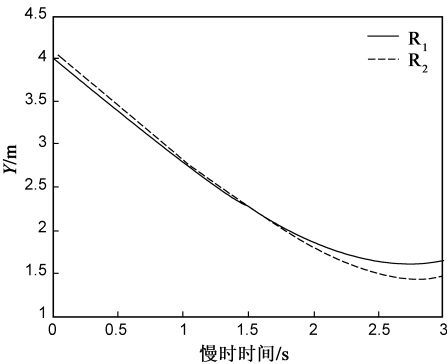


图7 准波前

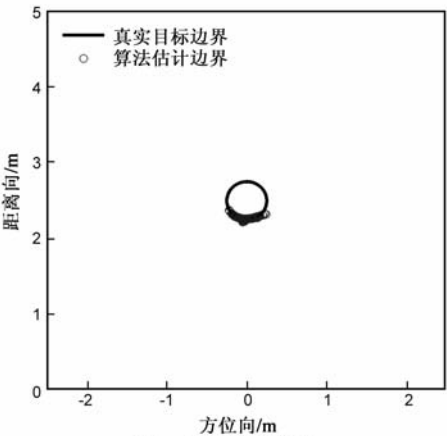


图8 目标边界成像

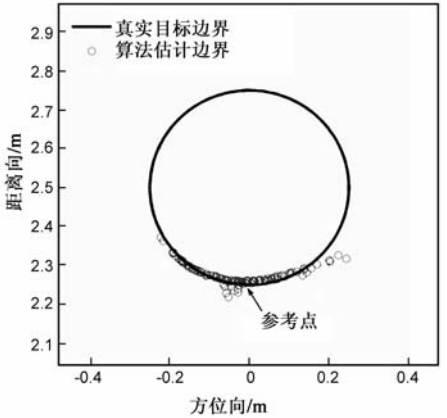


图9 目标边界成像(放大显示)

图 10 为目标合成运动轨迹,注意该轨迹是以目标边界成像点集里的某一点为参考点计算的,本例中取为边界点集的中间点.算法优化前在 P4 3.07GHz,512M 内存的兼容机上总计算时间为 2.38s ,优化后计算时间

为 0.7129s ,可见经优化后大幅度缩减了计算时间,可以满足探测人体目标运动的实时性要求.

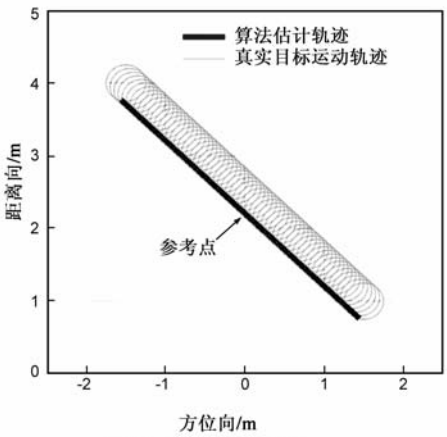


图10 运动轨迹估计

4.2 实验结果与分析

实际的人体运动即使在短时间内不可能是绝对的匀速直线运动,本小节采用真实的人体目标运动数据验证本文提出的算法,图 11 所示为目标运动场景,以发射天线为坐标原点,单个人体目标由点 $[-1.6\text{m}, 2.0\text{m}]$ 运动至点 $[1.4\text{m}, 1.1\text{m}]$ 处,雷达接收天线每秒采集约 6 道数据,共采集 41 个慢时刻(共 7.2s)数据.



图11 实验场景

人体四肢的摆动、系统噪声以及环境噪声造成回波非常复杂,因此提取的准波前波动较大,图 12 为从接收回波中提取出的准波前,图 14 为直接采用此数据进行成像结果,由于提取的准波前存在一定波动,使得 IBST 计算中的微分运算出现较大误差,导致错误的成像结果(纵坐标的数量级变得极大),其估计的轨迹也

必然是错误的. 因此首先对准波前进行多项式拟合得到较为平滑的准波前, 结果如图 13 所示. 算法估计出目标速度与方向角分别为 0.4161m/s 和 -0.27925rad , 图 15 为目标边界成像, 虽然存在少量错误边界点, 仍然可以形成平滑的边界图像, 由于实验人员的运动轨迹无法准确测得, 无法精确计算估计误差, 但是将图 16 中算法估计的目标运动轨迹与人体目标运动的起点、终点进行对比可以看出, 算法可以较为准确地估计出人体运动轨迹. 算法在 P4 3.07GHz, 512M 内存的兼容机上总计算时间为 0.4098s .

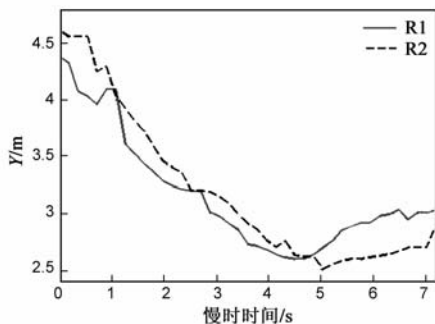


图12 准波前

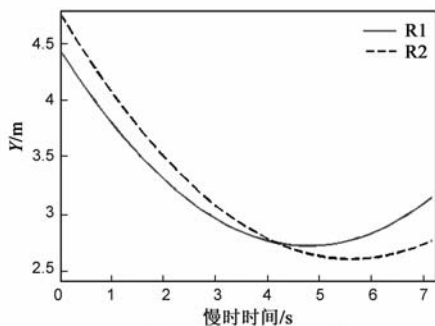


图13 准波前(拟合后)

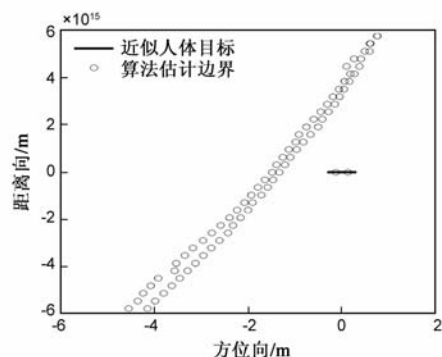


图14 目标边界成像(拟合前数据)

4.3 讨论

为了验证算法, 仿真数据采用了较长时间的慢时回波数据, 而实验中由于雷达硬件系统采样的限制, 实验人员运动速度较慢, 也采用了长时间慢时回波数据, 在今后的应用中, 可缩短慢时采样间隔, 即提高慢时采样速度, 算法的计算效率完全可以满足每秒进行 3 次更

新估计.

综上所述, 本文提出算法可以较为准确跟踪运动人体目标成像, 但是仍然存在一定的限制. 当目标沿距离向运动时, 即 $\theta = \pm \pi/2$ 时, 两组变换后坐标系 $x'o'y'$ 和 $x''o''y''$ 如图 17 所示, 此时 T' 与 R_1' 重合为一点, T'' 与 R_2'' 重合为一点, 尤其当目标在阴影区域距离向运动时, 由两组接收信号计算出的目标边界经过坐标变换后几乎无重叠部分, 算法此时失效, 因此寻求针对距离向运动目标的解决方法将是未来的工作重点之一.

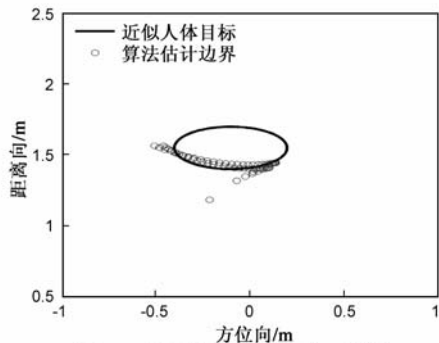


图15 目标边界成像(拟合后数据)

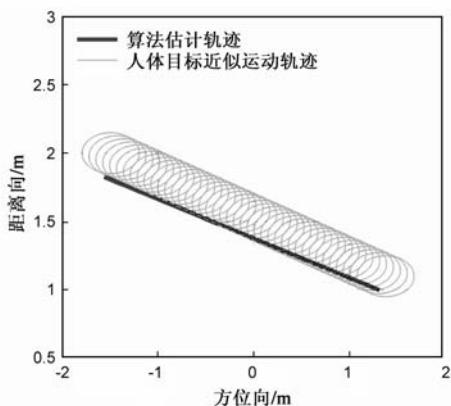


图16 人体目标轨迹估计

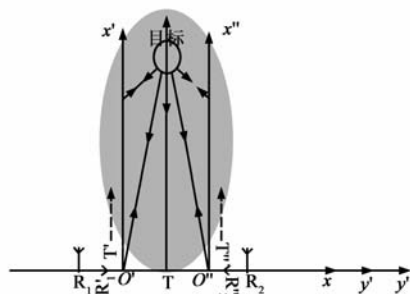


图17 目标距离向运动模型

5 结论

本文针对超宽带雷达系统实时跟踪探测运动人体目标问题, 提出了一种基于 SEABED 算法的动目标跟踪成像算法. 根据人体运动等效于天线移动扫描对目标运动场景建模, 利用逆边界散射变换对目标边界成像,

估计目标运动速度及方向,并对算法进行优化以提高其实时性,给出了具体的算法流程.仿真与实验结果表明,本文提出的实时跟踪人体目标成像算法在实际中具有一定的实用价值和良好的应用前景,如何优化算法使其具有更好的实时性和跟踪距离向人体目标运动将作为今后研究的重点.

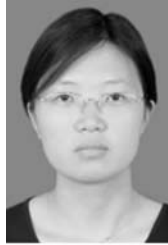
参考文献

- [1] Ahmad F, Amin M G, Setlur P. Through-the-wall target localization using dual-frequency CW radars [J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6201(4): 1 – 12.
- [2] Ahmad F, Amin M G. Multi-location wideband synthetic aperture imaging for urban sensing applications [J]. Journal of the Franklin Institute. 2008, 345(6): 618 – 639.
- [3] Nguyen L, Ressler M, Sichina J. Sensing through the wall imaging using the army research lab ultra-wideband synchronous impulse reconstruction (UWB SIRE) radar [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6947(69470B): 1 – 10.
- [4] Sakamoto T. A 2 – D image stabilization algorithm for UWB pulse radars with fractional boundary scattering transform [J]. IEICE Transactions, 2007, E90-B(1): 131 – 139.
- [5] Kidera S, Sakamoto T, Sato T. High-resolution and real-time three-dimensional imaging algorithm with envelopes of spheres for UWB radars [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(11): 3503 – 3513.
- [6] Hantscher S, Praher B, Reizenzahn A, Diskus C G. 2D imaging algorithm for the evaluation of UWB B-scans [A]. Sevastopol, Ukraine: Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals [C]. Sevastopol, Ukraine: IEEE, 2006. 139 – 141.
- [7] Sakamoto T, Sato T. Real-time imaging of human bodies with UWB radars using walking motion [A]. Singapore: IEEE International Conference, ICUWB [C]. Singapore: IEEE, 2007. 26 – 30.
- [8] Sakamoto T, Sato T. A study on fast imaging for walking human bodies by UWB radar with realistic model (Vol 2) [A]. Proceedings of the 2008 IEEE international conference on ultra-

wideband (ICUWB) [C]. Hannover: IEEE, 2008. 93 – 96.

- [9] Sakamoto T, Sato T. A target shape estimation algorithm for pulse radar systems based on boundary scattering transform [J]. IEICE Transactions Communication, 2004, E87-B (5): 1357 – 1365.
- [10] Kidera S, Sakamoto T, Sato T. A high-resolution 3-D imaging algorithm with linear array antennas for UWB pulse radars [A]. IEEE AP-S International Symposium [C]. Albuquerque, NM: IEEE, 2006. 1057 – 1060.

作者简介



黄 琼 女, 1984 年 4 月出生于湖北鄂州市. 2010 年毕业于中国科学院电子学研究所, 获博士学位. 现在上海航天技术研究院 802 所工作, 从事超宽带雷达目标检测、快速成像技术等方面的研究工作.

E-mail: huangqiong05@mails.gucas.ac.cn



吴世有 男, 1985 年 7 月出生于安徽合肥市. 2007 年毕业于安徽师范大学电子信息工程系, 获学士学位. 现为中国科学院电子学研究所硕博连读生, 从事超宽带雷达成像算法及软件开发等方面的研究工作.

孟升卫 男, 1970 年 4 月出生于河北藁城市, 副教授, 从事高速高精度时间测量的研究工作, 目前在中科院电子所做博士后研究工作, 研究方向为超宽带雷达成像技术.

陈 洁 男, 1978 年 8 月出生于福建莆田市, 副研究员, 从事超宽带雷达信号处理及成像技术等方面的研究工作.

方广有 男, 1963 年 5 月出生于河南确山市, 中国科学院电子学研究所研究员, 博士生导师, 中国科学院“百人计划”入选者, 研究兴趣主要有: 超宽带电磁学及其工程应用、损耗介质中隐蔽目标的电磁探测、微波成像新技术和新方法和电磁场的数值计算方法等.