

超宽带穿墙雷达天线阵列配置分析及运动人体跟踪成像算法

吴世有^{*①②} 谭 恺^{①②} 徐艳云^{①②} 邵金进^{①②} 陈 超^{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 100864)

摘要: 近场区域的非接触式穿墙条件下运动人体的实时跟踪成像探测是超宽带雷达在火灾救援、安全保卫、城市巷战以及人身安全等方面的一个重要应用。该文基于超宽带短脉冲穿墙雷达, 推导分析一种 MIMO 阵列排列方式, 并在修正的 Kirchhoff 算法基础上引出简单适用的成像步骤应用于慢速运动人体的跟踪探测中, 给出 5 Hz 的图像更新速率从而实现实时成像。仿真结果验证了新的 MIMO 阵列排列方式的有效性, 并为穿墙雷达系统研制提供了依据。实验结果说明该文提出的成像步骤具有可行性, 能够有效地实现墙后运动人体的实时成像, 跟踪滤波处理后, 可以获得较为理想的目标运动轨迹。

关键词: 穿墙雷达; MIMO 阵列; Kirchhoff 算法; 实时成像

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)11-2601-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.00298

Study on UWB Through-wall Radar Antenna Array Configuration and Moving Person Tracking and Imaging Algorithm

Wu Shi-you^{①②} Tan Kai^{①②} Xu Yan-yun^{①②} Shao Jin-jin^{①②}

Chen Chao^{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 100864, China)

Abstract: The UWB radar is a promising technique in fire rescue operations, police awareness, urban-warfare, life-threatening and other fields for noncontact measurement of the tracking and imaging of moving persons behind walls. Based on the UWB short-pulse through-wall radar, a strategy of the topology of the MIMO array is illustrated and the modified Kirchhoff algorithm is applied to slow-moving persons real-time imaging using a simple but effective imaging procedure. A video-like radar image with 5 Hz imaging rates is provided. Simulation results indicate that the topology of the MIMO array is useful for the through-wall radar system. The laboratory experiments are conducted to validate that the proposed imaging procedure is feasible and effective for slow-moving persons real-time imaging. The reasonable moving target trajectory can be obtained after the tracking and filtering process using the imaging results.

Key words: Through-wall radar; MIMO array; Kirchhoff algorithm; Real-time imaging

1 引言

超宽带雷达具有测距精度高、穿透能力强、分辨能力高、反隐身能力好等优点, 在雷达成像探测、精确定位、目标识别等领域显示了巨大的潜力。近年来, 基于超宽带雷达技术对于墙体背后的运动目标进行非接触式的实时成像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, 墙

体背后的慢速运动人体实时成像探测要求相应的超宽带雷达系统具有较好的实时性, 具有较高的成像分辨率, 能够消除墙体影响^[1], 从而对成像算法提出了较高的要求。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^[2,3]。时域后向投影算法的计算效率不高, 并且成像结果需要进一步处理才能得到较好的效果^[4-6]。相关因子滤波法(CF 滤波)作为一种新提出的穿墙成像方法, 其通过抑制低相关特征图像来减弱成像结果中噪声并提高图像清晰度, 但其效果并

2012-03-23 收到, 2012-09-11 改回

国家重点基础研究发展计划(2010CB73190103)资助课题

*通信作者: 吴世有 ahwushiyou@126.com

不十分明显^[7]。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)算法经过适当的修正之后,同样可以实现运动目标的跟踪探测^[8]。修正后的 Kirchhoff 算法虽然与后向投影算法的效率相当,但其具有良好的成像效果及信噪比,非常适用于穿墙成像^[9-12]。但其同样存在不足之处,当目标离雷达较远时成像效果不如后向投影算法,所以在修正的 Kirchhoff 算法基础上,本文提出一种简单有效的信号处理步骤以实现慢速运动人体的实时跟踪探测。传统的穿墙雷达一般配置了一发两收或一发多收的天线阵列,由于穿墙探测对雷达系统的体积大小有一定的要求,所以天线阵列的尺寸及阵列单元间距的设定是最为关键的。研究表明,天线数目及天线间距逐渐增大,方位向分辨率会逐渐提高,即天线孔径长度越长,方位向分辨率越高^[13]。由此,本文将给出最优的 MIMO 天线阵列拓扑结构并将其应用到穿墙雷达慢速运动人体实时探测中,在雷达系统尺寸满足要求的情况下获取较高的成像分辨率。

2 MIMO 雷达收发天线排列方式

MIMO 天线阵列中的多个发射天线相继辐射电磁波,并且探测目标的反射/散射回波被阵列中的多个接收天线接收。MIMO 天线阵列可以将不同类型的天线或发射波形应用于雷达的同步发射和接收中,有利于提高雷达成像质量,主要体现在提高分辨率、杂波抑制、减少数据获取时间以及增强目标轮廓重建等方面。本节将详细推导分析 MIMO 阵列天线的排列方式对雷达成像的影响,在此基础上将给出在穿墙探测条件下最优的阵列排列拓扑结构。阵列排列的主要目的是形成具有统一权重的等效虚拟孔径,具体通过阵列的拓扑结构实现。这里,假定给定的 MIMO 天线阵列长度为 L 且只考虑线性阵列的情况。另外,设定 MIMO 天线阵列的发射天线个数为 N_{Tx} ,接收天线个数为 N_{Rx} ,则该阵列等效为单发多收阵列天线,接收天线个数为 $M = N_{Tx} \times N_{Rx}$ 。

2.1 2 发 4 收 MIMO 天线阵列排列

2 发 4 收天线阵列具有 2 个发射天线,4 个接收天线,其等效于 1 发 8 收的天线阵列。在给定阵列长度 L 的情况下,两种天线阵列的排列方式直接决定了阵列单元的间距 d ,从而影响了成像质量。传统的排列方式是将天线阵列中各阵元等间距摆放,从而 1 发 8 收天线阵列的单元间距为 $d = L/8$ 。对于 2 发 4 收天线阵列,其排列方式最普通的有两种,

一种情况是发射天线位于阵列的两侧,接收天线位于阵列的中间,各阵元之间等间距排列,间距为 $d = L/5$;另一种情况是发射天线同样位于阵列的两侧,接收天线同样位于阵列的中间,但是接收天线子阵列中的左右两个接收天线与发射天线位置重合,各阵元之间等间距排列,间距为 $d = L/3$ 。可以知道,在阵元间距均大于发射脉冲中心频率对应的波长的一半时(即 $d > \lambda_c$),随着间距 d 的增大,成像分辨率越好,所以间距为 $L/3$ 的阵列排列方式是较为合理的,然而该排列方式并不能等效为等间距的具有统一权重的虚拟孔径^[14]。

以 2 发 4 收天线阵列为例,如图 1(a)所示,各个阵列单元以等间距 $d = L/5$ 进行排列组成长度为 L 的实孔径(4 接收天线单元在水平方向上的位置表示为 X_1, X_2, X_3, X_4 ,2 发射天线的位置表示为 X_L 和 X_R)。图 1(b)所示为其虚拟孔径位置形成的天线阵列,各虚拟孔径位置记为 $X'_1, X'_2, X'_3, X'_4, X'_5, X'_6, X'_7, X'_8$ 。由此可知,2 发 4 收天线阵列的等间距 d 的排列方式不能等效为等间距的具有统一权重的虚拟孔径。

$$\left. \begin{aligned} X'_i &= (X_L + X_i)/2, \quad i = 1, 2, 3, 4 \\ X'_i &= (X_R + X_{i-4})/2, \quad i = 5, 6, 7, 8 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

为了能够使 2 发 4 收阵列等效为等间距虚拟孔径阵列,其实孔径的排列方式不能采用等间距排列,而应该利用非等间距排列方式。以 2 发 4 收天线阵列为例,设定图 1(b)中的虚拟孔径位置 X'_4 和 X'_5 之间相距 $d/2$,使得

$$X'_5 - X'_4 = d/2 \Rightarrow X_R - X_L = 4d \quad (2)$$

则当 2 发 4 收天线阵列中的左右发射天线的间距为 $4d$,接收天线等间距 d 排列,这种非等间距的排列方式即可等效为等间距的具有统一权重的虚拟孔径(如图 2 所示)。

2.2 通用的 MIMO 天线阵列排列

综合上述的 MIMO 天线阵列的排列方式,这里将列出通用的 MIMO 天线阵列排列方式的具体步骤。出于对称性的考虑,通常将发射天线摆放于接收天线的两侧(对应的天线子阵列分别记为左侧发射天线子阵列 A_{LT} ,右侧发射天线子阵列 A_{RT} 和中间接收天线子阵列 A_{CR})。假定在给定阵列长度 L 的情况下,共有 M 个接收天线及 $2N$ 个发射天线,如图 3 所示,对应的阵列排列方式为:

(1)将子阵列 A_{CR} 摆放于中间位置,子阵列 A_{LT} 和 A_{RT} 放置于两侧位置;

(2)子阵列 A_{CR} 的各阵列单元间距为 d ,子阵列 A_{LT} 和 A_{RT} 的各阵列单元间距为 d/N ;

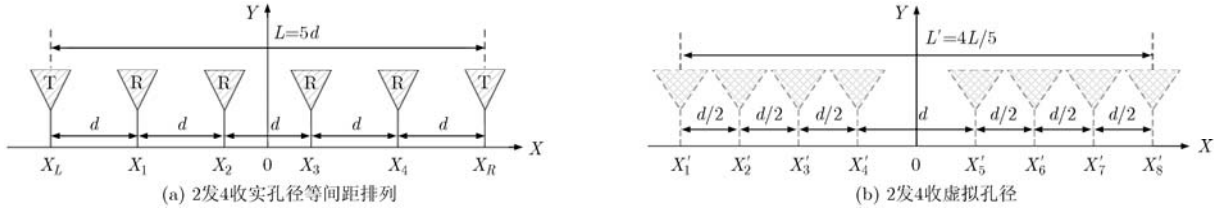


图 1 2 发 4 收 MIMO 天线阵列等间距排列方式

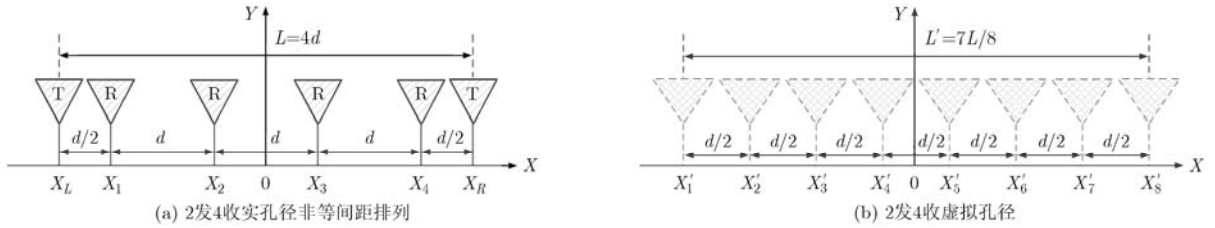


图 2 2 发 4 收 MIMO 天线阵列非等间距排列方式

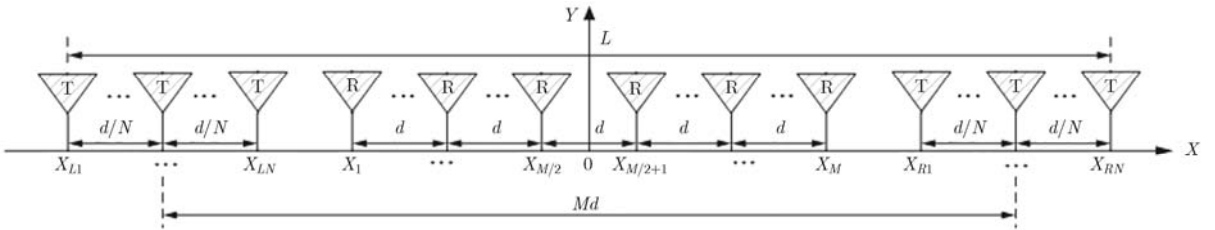


图 3 MIMO 天线阵列非等间距排列方式

(3) 子阵列 A_{LT} 和 A_{RT} 的中心位置之间相距 Md ，从而间距 $d = \frac{NL}{MN + 2}$ 。

3 成像算法原理及实现

结合上述的 MIMO 天线阵列排列方式的分析，以及实际应用对天线阵列尺寸的限制，2 发 4 收天线阵列将被用于实际的穿墙雷达系统，在此基础上本节给出一种切实有效的成像步骤，将修正的 Kirchhoff 算法应用于穿墙运动目标成像。

3.1 修正的 Kirchhoff 成像算法

修正的 Kirchhoff 算法已经在地下目标探测中得到了有效的应用^[9-11]，本文将研究修正的 Kirchhoff 算法并将其用于穿墙雷达中，从而完成对运动人体的实时成像。基于 2 发 4 收天线阵列的修正的 Kirchhoff 算法可表示为 $(U(r', t))$ 表示成像结果)

$$U(r', t) = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^4 (\cos \phi_1 + \cos \phi_2) \frac{R_1 R_2}{c} \cdot \frac{\partial}{\partial t} u_{ij} \left(r, t - \frac{R_1 + R_2}{c} \right) \quad (3)$$

其中 $u_{11}(r, t)$, $u_{12}(r, t)$, $u_{13}(r, t)$, $u_{14}(r, t)$, $u_{21}(r, t)$, $u_{22}(r, t)$, $u_{23}(r, t)$ 和 $u_{24}(r, t)$ 分别为 2 个发射天线依次发射信号，4 个接收天线同时接收的回波信号经

过处理之后用于重构目标图像的信号。 r 表示天线位置， r' 表示成像区域位置， c 为电磁波传播速度， ϕ_1 表示发射天线与目标位置的连线与距离向之间的夹角， ϕ_2 表示接收天线与目标位置的连线与距离向之间的夹角， R_1 和 R_2 分别表示发射天线，接收天线到目标之间的距离。

3.2 运动人体跟踪成像算法

由于穿墙目标跟踪成像应用的复杂性，在修正的 Kirchhoff 算法作为目标成像算法的基础上，本节将进一步根据实验室雷达系统样机的实际性能，提出一种实用的运动人体跟踪成像算法，使之能够有效地提取运动信息，提高 Kirchhoff 图像质量，获取目标位置，实时目标位置跟踪处理，达到理想运动目标探测目的。

由前所述可知， $u_{11}(r, t)$, $u_{12}(r, t)$, $u_{13}(r, t)$, $u_{14}(r, t)$, $u_{21}(r, t)$, $u_{22}(r, t)$, $u_{23}(r, t)$ 和 $u_{24}(r, t)$ 分别为 2 个发射天线依次发射信号，4 个接收天线同时接收的回波信号经过处理之后用于重构目标图像的信号，则将生成第 k 帧目标图像的信号重新记为 $f_{k11}(t)$, $f_{k12}(t)$, $f_{k13}(t)$, $f_{k14}(t)$, $f_{k21}(t)$, $f_{k22}(t)$, $f_{k23}(t)$ 和 $f_{k24}(t)$ 。假定目标做慢速运动，同一个通道通过相邻两个时刻回波信号相减处理实现背景对

消,进而能够提取人体的运动信息,记为 $\hat{f}_{kij}(t)$,具体可以表示为

$$\hat{f}_{kij}(t) = f_{kij}(t) - f_{(k-1)ij}(t) \quad (4)$$

其中 $f_{(k-1)ij}(t)$ 和 $f_{kij}(t)$ 分别表示第 $k-1$ 和 k 时刻接收的原始回波信号, $i=1,2$ 且 $j=1,2,3,4$ 。

由于在实际情况下人体的运动方式是不断变化的,其中包括短暂的停顿过程,简单的背景对消将会导致处于停顿中的目标回波被当作背景杂波而去除,使得停顿中的目标图像不能被重新构建。由于人体在运动过程中停顿的现象更符合实际情况,为了将停顿目标信息保留在回波对消处理中,式(4)可以改写为

$$\hat{f}_{kij}(t) = \alpha \times (f_{kij}(t) - f_{(k-1)ij}(t)) + \beta \times \left(f_{kij}(t) - \frac{1}{N} \sum_{s=k-M-N}^{k-M-1} f_{sij}(t) \right) \quad (5)$$

其中 α 和 β 是平衡因子用于控制目标信息在式(5)中的比重, N 是平均次数,其中前 M 道回波将不被用于平均对消处理。当目标处于运动状态时,式(5)中的第1项将包含目标的运动信息;当目标处于短暂停顿时,则式(5)中的第2项将保留有停顿目标信息,使得 $\hat{f}_{kij}(t)$ 中仍能用于目标图像的构建。对于实际应用系统来说,系统中每个采集通道的系统误差时间必须在成像处理之前被校正,这些时间误差可记为 $\tau_{i,j}$, i 和 j 表示具体的采集通道编号。为此,式(3)必须改写为式(6)以补偿系统误差给采集时间零点带来的影响。

$$I_k(r') = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^4 (\cos \phi_1 + \cos \phi_2) \frac{R_1 R_2}{c} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \hat{f}_{kij} \left(t - \frac{R_1 + R_2}{c} - \tau_{i,j} \right) \quad (6)$$

其中 r' 表示成像区域位置(网格位置),考虑到在实际应用中式(6)给出的成像结果并不十分理想,为了

使得图像更为清晰,可以在成像结果中进行 Hilbert 变换处理,即

$$HI_k(r') = \|\text{Hilbert}(I_k(r'))\|^2 \quad (7)$$

4 仿真及实验验证

本节以 MIMO 天线阵列排列方式为依据,通过仿真实验初步验证 MIMO 天线阵列非等间距排列方式在穿墙成像中的可行性,然后在此基础上结合课题组自主研发的 MIMO 超宽带雷达系统样机对穿墙成像算法进行实用性验证并获取目标的运动轨迹^[15]。

4.1 仿真结果分析

依据图 4 所示的系统模型建立仿真场景:成像区域的整体尺寸为方位向 $0 \sim 8$ m,距离向 $0 \sim 8$ m,位于其中的目标为金属体,2发4收天线阵列紧靠墙面摆放,墙体厚度 $d_w = 0.3$ m,相对介电常数 $\epsilon_r = 6$ 。阵列的排列方式依据等间距和非等间距两种方法(见图 4(a)和图 4(b)),这里针对2发4收天线阵列共给出两种排列形式的成像仿真结果。发射信号为中心频率为1 GHz的一阶微分高斯脉冲,通过 GprMax 仿真软件一次获取 2×4 道回波信号(单道时间步长为23.58 ps,采样时窗为60 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,所以需要每道回波信号进行去除直达波和背景杂波等处理后进行穿墙成像处理,验证非等间距排列方式的可行性。

针对3目标,图5和图6分别给出了2发4收天线阵列进行等间距及非等间距排列的成像结果(L 保持不变)。从图5和图6中可以看出,对于多目标的情况,非等间距排列可以一定程度地抑制旁瓣,非等间距排列同样具有一定的优势,即可以一定程度上减弱目标之间的干扰,提高各目标的成像

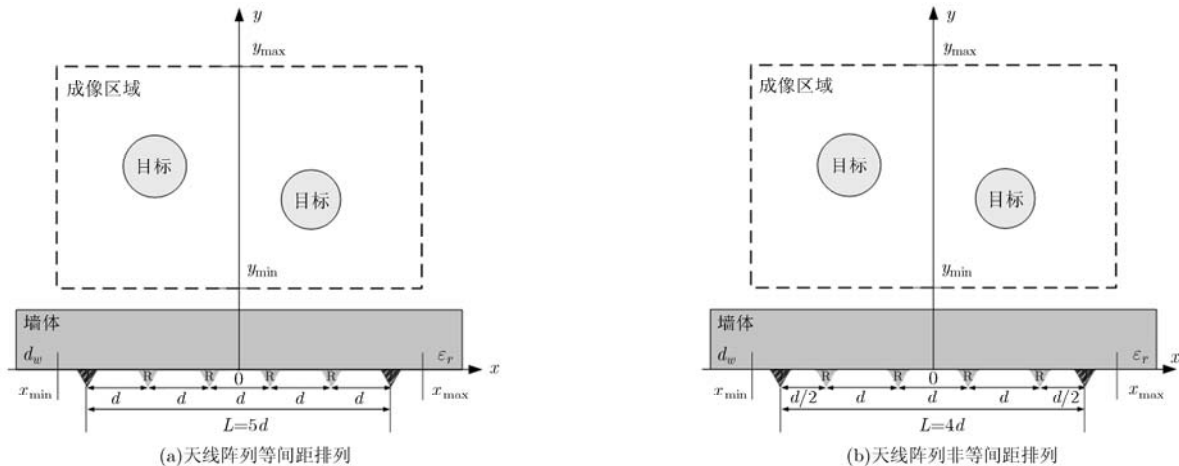


图4 GprMax 成像仿真场景

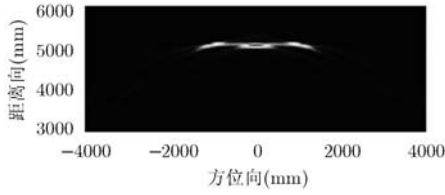


图 5 2 发 4 收天线阵列等间距排列成像结果

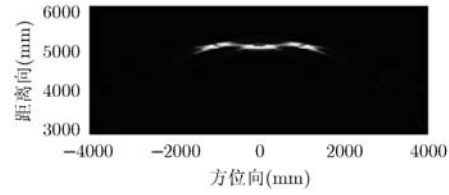


图 6 2 发 4 收天线阵列非等间距排列成像结果

质量。图 5 中的中间的目标成像较为明显，其两侧的目标成像则相对较弱，而非等间距排列可以明显使之有所改善(见图 6)。MIMO 天线阵列非等间距排列方式在穿墙应用中具有较好的成像效果，可以有效地抑制旁瓣及目标之间干扰，由此这种非等间距排列方式被用于设计课题组自主研发的 MIMO 超宽带雷达系统的 2 发 4 收天线阵列，下一小节将结合成像算法具体验证雷达样机的实用性能。

4.2 实验结果分析

本节采用课题组自主研发的MIMO超宽带雷达系统样机验证算法的实用性，系统由PC104主控模块、发射模块、接收模块、天线阵列及显示处理模块等部分组成。发射机产生无载频高斯脉冲由发射天线辐射出去，接收天线接收回波传送给显示处理模块(包含算法处理)，最后进行快速显示(该样机系统可达到5 Hz的图像更新率)。本次实验中，被测人员以走走停停的方式行走，雷达系统样机将对其进行实时成像以检测样机的实用性能。运动目标的实验成像场景为8 m×8 m，墙壁厚度 $d_w = 0.24$ m，相对介电常数 $\epsilon_r = 4$ ，2发4收天线阵列总长度 $L =$

1.5 m，按非等间距方式排列，并紧贴在墙面上。系统采样时窗为86 ns，采样间隔为84 ps。

图 7 和图 8 所示为被测人员分别在探测区域中心距离向及方位向上特定位置处的成像结果，成像结果清晰，易于分辨运动目标，并且成像结果与实际情况相符，从而可以确定 MIMO 超宽带雷达系统样机能够有效地获取被测人员的回波数据，并通过本文的穿墙成像算法验证数据的合理性。

由于天线阵列尺寸及阵元个数限制，所以在仿真与实测结果中，目标成像结果中均出现较高的旁瓣干扰。为了更好地实现墙后运动目标的实时跟踪，需要对目标的运动轨迹进行分析研究。图 7 和图 8 的成像结果只是实验中的部分探测结果，并且依据图像结果提取出的目标位置并不是完全连续准确的，且部分位置为误判位置，这主要是因为位置提取存在一定的误差，且当目标及所处位置导致目标回波较弱时，成像结果并不是非常理想。基于上述原因，目标的运动轨迹需要在成像处理之后进行相应的滤波处理。本文基于提取出来的原始目标位置信息，进行滤波操作，去除明显的错误位置并

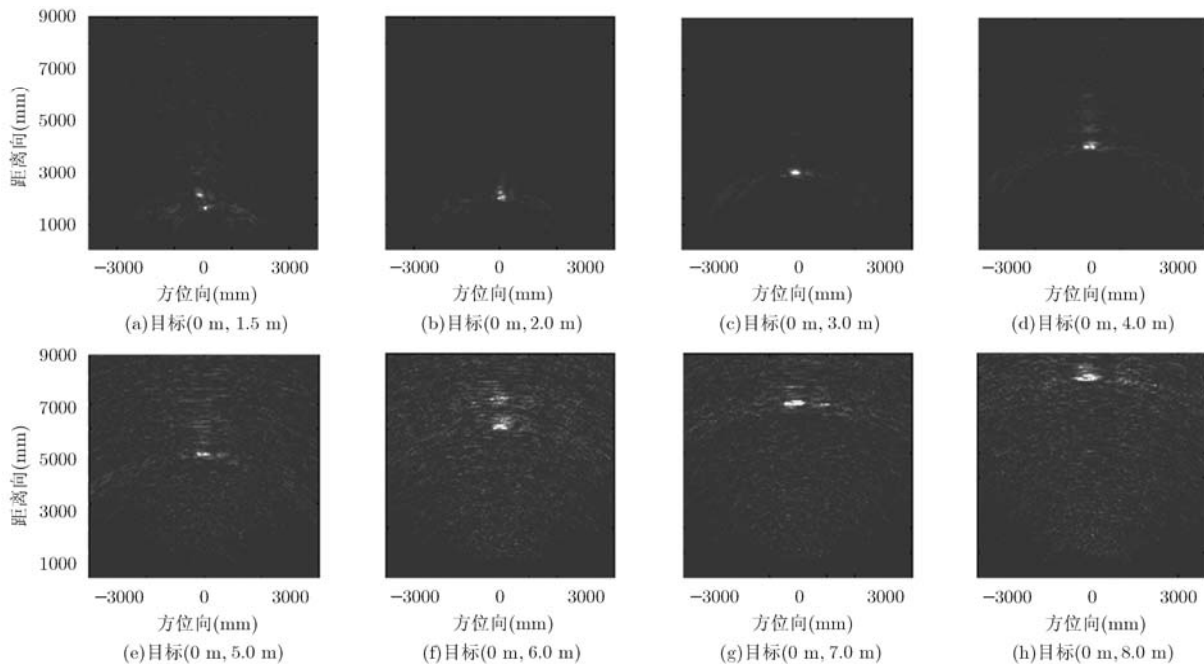


图 7 探测区域中心距离向运动目标成像(方位向位置为 0 m)

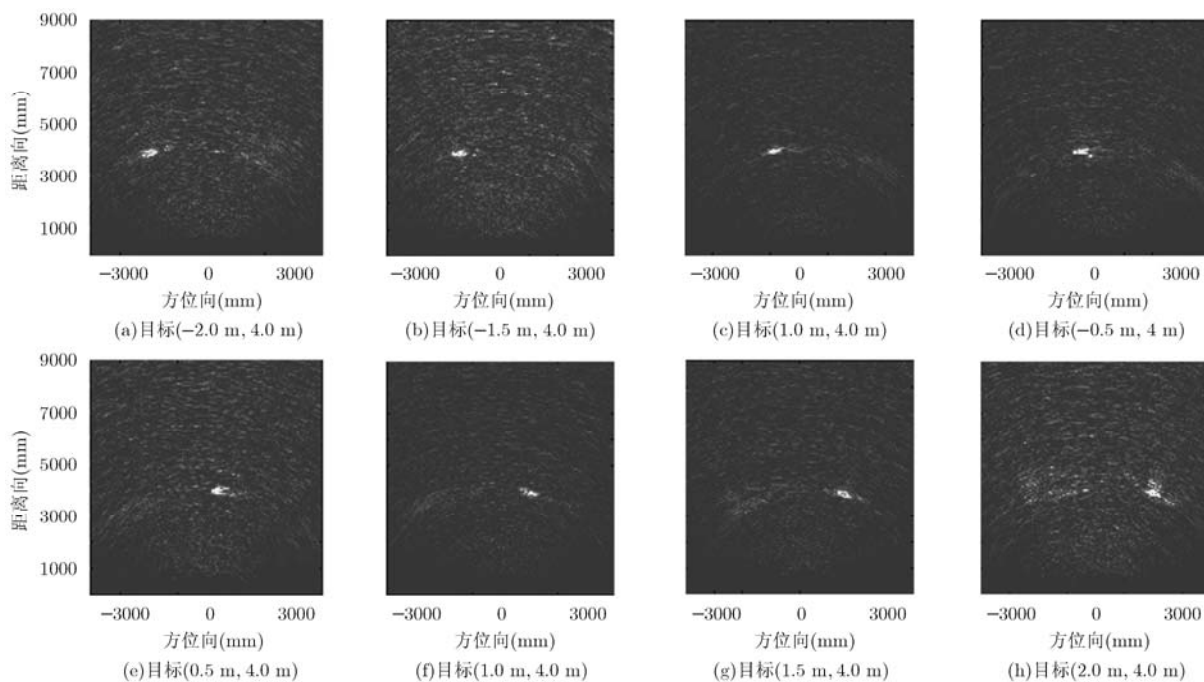


图8 探测区域方位向运动目标成像(距离向位置为4.0 m)

进行一定的光滑处理,最后利用卡尔曼滤波法来确定运动目标轨迹。

图9为被测人员在探测区域中心距离向上的运动轨迹,可以看到基于成像结果提取出来的滤波处理前的目标位置呈现出一定的不连续性及误差,但大体上能够判断出目标具体的运动趋势,被测人员在中心距离向上1 m处开始由近及远直线运动,经过滤波光滑处理及卡尔曼滤波之后,被测人员的运动轨迹有了明显改善,轨迹中的一些错误位置得到了校正,由此体现了目标轨迹处理前后的差异。同理,图10为被测人员在探测区域方位向上的来回行走的运动轨迹,从图10(b)可以看到滤波处理后的目标来回行走的轨迹较为明显,相反图10(a)中基于成像结果提取出来的运动轨迹中的错误位置较多,且不易判别被测人员的运动趋势。

被测人员在行走过程中有停顿的过程,结合平

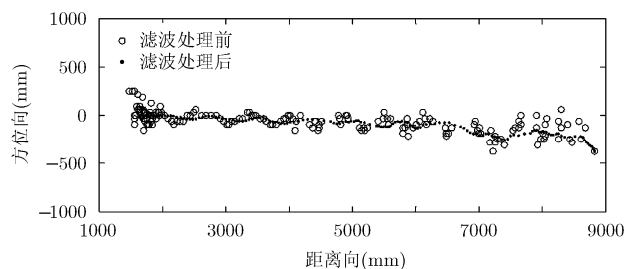


图9 探测区域中心距离向目标运动轨迹(方位向位置为0 m)

均去除背景法和相邻去除背景法在目标出于停顿状态时依然可以给出成像结果。被测人员在中心距离向6 m处开始由远及近行走,中间分别在5 m, 4 m, 3 m, 1.5 m处停顿。图11(a)所示运动轨迹对被测人员的这一运动特征不能很好地检测,而图11(b)的滤波后的距离向运动轨迹则能较好地体现(在目标的停顿位置处,目标轨迹呈现出位置基本不变的特征)。

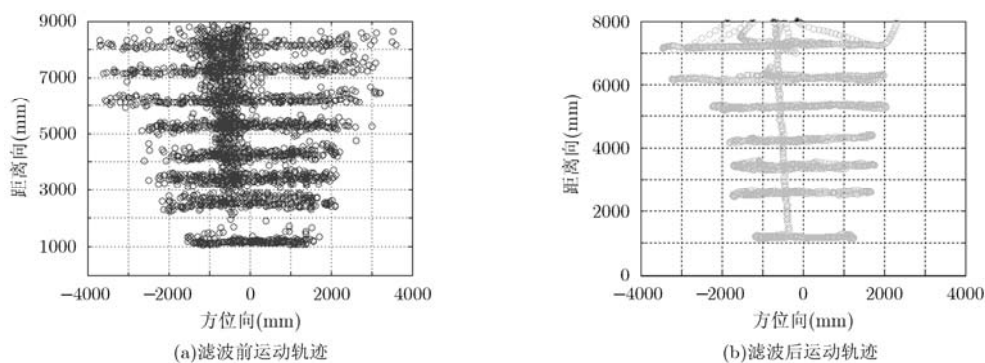


图10 探测区域方位向目标运动轨迹

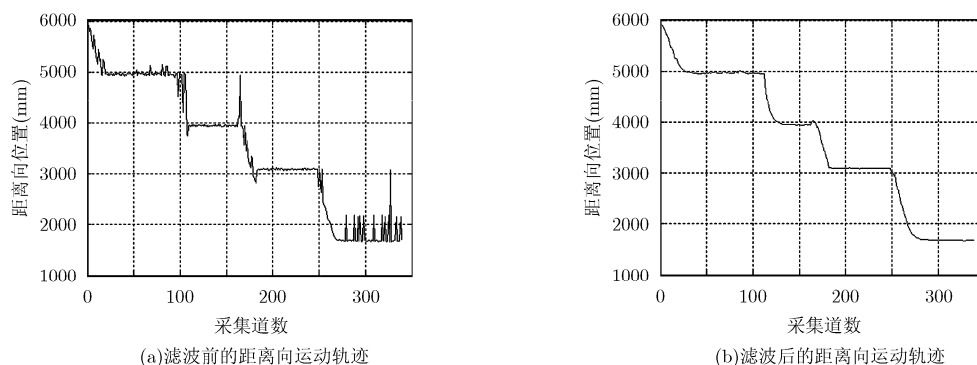


图 11 被测人员走停运动轨迹

5 结束语

本文首先推导分析一种 MIMO 阵列排列方式并将其应用于超宽带短脉冲穿墙雷达系统中，在修正的 Kirchhoff 算法基础上引出简单适用的成像步骤应用于慢速运动人体的跟踪探测中，给出 5 Hz 的图像更新速率从而实现实时成像。由于基于成像结果提取的目标轨迹不完全连续正确，所以需对其作进一步的光滑滤波及卡尔曼滤波处理。仿真实验结果验证了新的 MIMO 阵列排列方式的有效性，为穿墙雷达系统研制提供了依据。实验结果说明本文提出的成像步骤具有可行性，能够有效地实现墙后运动人体的实时成像，另外目标运动轨迹的滤波处理同样为实现墙后运动人体的实时跟踪提供了有效保证。

参考文献

- [1] Iya N M, Muqaibel A H, and Johar U M. Ultra wideband wall compensation for through-wall tracking and imaging[C]. Ultra-Wideband (ICUWB), 2011 IEEE International Conference, 2011: 81-85.
- [2] Ahmad F and Amin M G. A noncoherent approach to radar localization through unknown walls[C]. IEEE Radar Conference 2006, Verona, NY, 2006, 4: 583-589.
- [3] Martone A, Le C, and Ranney K. Coherent and non-coherent change detection for through the wall sensing of moving targets[C]. 2011 IEEE Radar Conference (RADAR), Kansas City, MO, 2011: 256-261.
- [4] 孟升卫, 黄琼, 吴世有, 等. 超宽带穿墙雷达运动目标跟踪成像算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(3): 500-506.
Meng Sheng-wei, Huang Qiong, Wu Shi-you, *et al.*. Research on moving target tracking and imaging algorithm for ultra wideband through-wall radar[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(3): 500-506.
- [5] Nag S, Barnes M, Payment T, *et al.*. An ultra-wideband through-wall radar for detecting the motion of people in real time[C]. Proceedings of SPIE on Radar Sensor Technology and Data Visualization, 2002, 4744: 48-57.
- [6] Nguyen L, Ressler M, and Sichina J. Sensing through the wall imaging using the army research lab ultrawideband synchronous impulse reconstruction (UWB SIRE) radar[C]. Proceedings of SPIE on Radar Sensor Technology and Data Visualization, 2002, 4744: 48-57.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Yarovoy A G, Savelyev T G, Aubry P J, *et al.*. UWB array-based sensor for near-field imaging[J]. *IEEE Transactions on Microwave and Techniques*, 2007, 55(6): 1288-1295.
- [10] Zhuge X, Savelyev T G, Yarovoy A G, *et al.*. UWB array-based radar imaging using modified Kirchhoff migration[C]. Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Ultra-Wideband, Hannover, 2008, 3: 175-178.
- [11] Zhuge X, Yarovoy A G, Savelyev T G, *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.
- [12] Zhuge X. Short-range ultra-wideband imaging with multiple-input multiple-output arrays[D]. [Ph.D. dissertation], Delft Technische University, 2010.
- [13] 黄琼. 超宽带穿墙雷达信号处理与成像方法研究[D]. [博士学位论文], 中国科学院电子学研究所, 2010.
- [14] 金添, 娄军, 宋千, 等. 虚拟孔径天线配置及其成像性能研究[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(10): 2458-2463.
Jin Tian, Lou Jun, Song Qian, *et al.*. Study on antenna configuration of virtual aperture and its associated imaging performance[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(10): 2458-2463.
- [15] Buonanno A, D'Urso M, Felaco M, *et al.*. Through-the-wall tracking of moving targets: tests on experimental data[C]. 2011 IEEE Radar Conference (RADAR), Kansas City, MO, 2011: 846-849.

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。
谭 恺：男，1987年生，博士生，研究方向为超宽带生命检测雷达技术及运动目标跟踪。
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。