

SAR 穿墙成像中墙体影响图像域补偿方法

金 添, 孙 鑫, 李 欣, 陆必应, 周智敏

(国防科学技术大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘 要: 合成孔径雷达(SAR)穿墙成像中的关键问题是对墙体影响的补偿. 而墙体参数通常为未知量, 获得其值后才能进行补偿. 本文在定量分析了墙体对墙后目标聚焦和定位影响的基础上, 提出了一种图像域墙体影响补偿方法. 该方法基于传统成像算法获得的图像及其滤波结果进行墙体参数估计, 具有估计精度高和计算量小的优点. 仿真结果验证了本文提出的方法能够实现墙后目标的精确聚焦和定位.

关键词: 穿墙成像; 合成孔径雷达; 电磁波折射; 参数估计; 图像滤波

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2012) 07-1423-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.07.022

A Method to Compensate Wall Effects in the Image Domain for SAR Through-the-Wall Imaging

JIN Tian, SUN Xin, LI Xin, LU Bi-ying, ZHOU Zhi-min

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: Compensation of wall effects is the key problem of Synthetic Aperture Radar (SAR) in through-the-wall imaging. Wall parameters are usually unknown, which are essential for wall effects compensation. In this paper, an approach to compensate wall effects in the image domain is proposed on the quantitative analysis of the wall effects on focusing and locating of behind-the-wall targets. The proposed method estimates the wall parameters from the image formed by traditional image formations and its filtered results, which has the advantages of high precision and low computational burden. It is validated that the proposed method can precisely focus and locate behind-the-wall targets using simulated data.

Key words: through-the-wall imaging; synthetic aperture radar; electromagnetic wave refraction; parameter estimation; image filtering

1 引言

超宽带穿墙探测雷达可穿透混凝土、木、砖、土坯墙等非金属障碍物对建筑物内的人员及内部结构进行探测, 能够满足城市巷战, 反恐行动和灾难救援等任务的需要^[1~3]. 超宽带合成孔径雷达(SAR)将超宽带技术与合成孔径技术相结合, 能够实现对墙后目标甚至建筑物结构的高分辨率成像, 极大增强了目标信息获取能力^[4,5]. 与传统成像相比, 穿墙成像的主要特点是目标和雷达之间存在墙体遮挡, 因此墙体对于电磁波传播的影响是穿墙成像探测中必须考虑的问题. 电磁波穿透墙壁时会产生能量衰减、反射、折射和速度变慢等影响, 造成定位偏差、图像散焦甚至出现虚假目标等现象^[6], 必须设法消除.

SAR 成像算法可以分为时域和频域两大类, 时域算

法相比频域算法对空间采样的等间隔性要求不高, 插值误差只会影响整个成像区域, 并且电磁波在墙体内传播速度变化的补偿更加容易, 因此时域算法更适合穿墙成像^[7]. 后向投影(BP)算法是时域成像算法的代表, 通过延时-相加实现回波的相干叠加^[8,9]. 当墙体参数已知时, 电磁波在墙体内部的传播特性可以准确计算, 然后进行补偿. 由于缺少电磁波在空气-墙体分界面入射角的直接信息, 因此电磁波穿墙传播时延无法直接通过入射角信息计算, 而是首先确定折射点, 再计算电磁波穿墙传播时延. 确定折射点的算法主要有基于折射定律的补偿方法^[10,11]和最短时间法^[12]等, 前者需要求解一个一元四次方程, 后者则通过迭代实现折射点位置的求解. 由于对成像区域中的每个点都需要确定其对应的折射点, 因此这类方法的计算量都非常大. 更重要的是, 这类方法需要已知墙体介电常数、墙壁厚度等参数, 限制

了其实际应用.

当墙体参数未知时, 穿墙成像算法的关键就是估计墙体参数. Nikolic 等^[13]通过计算反射系数估计墙体相对介电常数, 利用墙壁后表面的传播延时聚焦电场与参考脉冲的相关性估计墙壁厚度, 但该方法存在解不唯一和精度不高的问题. Wang 等^[14, 15]假定不同的介电常数和墙壁厚度, 利用两种天线配置方式或改变雷达与墙壁距离寻找交叉点来估计墙体参数, 实际使用比较繁琐. 为了避免利用多个不同的天线阵带来的繁琐, Ahmad 等^[16]提出通过分析墙体参数估计误差对图像对比度的影响, 直接调整墙体参数实现对目标图像的自动对焦和定位误差修正. 然而, 该方法需要针对不同墙体参数进行多次成像, 计算效率不高, 并且仅适用于墙体参数误差较小和目标位于远场情况. Li 等^[17]基于快速时间反转成像算法提出了一种新的自动对焦穿墙成像算法, 该方法通过在成像过程中引入一个时间分量, 利用图像的熵作为图像质量的评价指标, 选择当图像熵达到极值的时刻为最优聚焦时间, 实现对墙后目标的聚焦和定位误差修正. 该方法虽然适用于近场情况, 但为了得到最优聚焦时间, 需要遍历可能的时间分量取值对回波进行反复成像, 计算效率仍然不高. 因此, 如何解决墙体影响补偿精度和计算效率的矛盾是目前穿墙成像算法面临的难题.

本文提出一种图像域墙体影响补偿方法. 该方法首先利用合成孔径成像模型推导了图像域墙体影响补偿因子, 然后利用传统成像算法得到的图像及其图像域滤波结果确定补偿因子中的最佳参数. 由于该方法针对传统成像算法图像进行处理, 不需要对回波多次成像, 因此计算效率大幅度提高. 时域有限差分 (FDTD) 数值仿真数据处理结果验证了本文方法的有效性.

2 SAR 穿墙成像回波模型

在穿墙成像应用中, 雷达回波主要由墙体回波和墙后目标回波两部分组成. 墙体回波中, 与墙体垂直方向的墙体回波最强, 也称为直达波. 天线发射的电磁波在墙体外表面发射反射和透射, 反射回波被雷达接收, 即为墙体外表面的一次反射波; 透射波继续向前传播, 在墙体内部发生反射和透射, 反射部分反向传播, 遇到墙体外表面再次发射反射和透射, 透射部分被雷达接收, 称为墙体内部的一次反射波, 而反射部分继续在墙体内部多次反射并透射出墙壁, 但幅度与墙体外表面和内表面的一次反射波相比已经大幅度减小. 因此, 墙体回波主要由直达波中墙体外表面和内表面的一次反射波组成. 目标回波是雷达发射的电磁波经墙体透射出去后照射目标获得. 虽然电磁波在墙体内部会多次反射并透射出墙壁, 但考虑到墙体对电磁波的衰减效

应, 目标回波主要由一次透射波组成, 即雷达发射的电磁波透射出墙体后经目标反射, 再按原传播路径返回被雷达接收的回波.

根据图 1 所示的一次反射波和一次透射波的传播示意图, 接收电磁场 $E_r(t)$ 由墙体反射部分 $E_r^W(t)$ 和目标反射部分 $E_r^T(t)$ 组成, $E_r^W(t)$ 、 $E_r^T(t)$ 和发射电磁场 $E_i(t)$ 有如下关系:

$$E_r^W(t) = E_i(t) A_{W1} \exp[j2\pi f(t - \frac{2R}{c})] + E_i A_{W2} \times \Gamma_1(0) \Gamma_2(0) \exp[j2\pi f(t - \frac{2R}{c} - \frac{2D}{v_w})] \quad (1)$$

$$E_r^T(t) = A_T \Gamma_1^2(\theta_i) \Gamma_2^2(\theta_t) E_i(t) \times \exp[j2\pi f(t - \frac{2r_{T1}}{c} - \frac{2r_{T2}}{v_w} - \frac{2r_{T3}}{c})] \quad (2)$$

式中 R 为天线到墙体外表面的垂直距离, D 为墙壁厚度, A_{W1} 、 A_{W2} 和 A_T 分别为墙体外表面、墙体内部和目标的反射系数, $\Gamma_1(\cdot)$ 和 $\Gamma_2(\cdot)$ 分别为电磁波由空气进入墙体和由墙体进入空气的透射系数, 透射系数是入射角的函数, f 为电磁波频率, c 和 v_w 分别为电磁波在空气中和墙体内部的传播速度, 且

$$v_w = c/\sqrt{\epsilon_r} \quad (3)$$

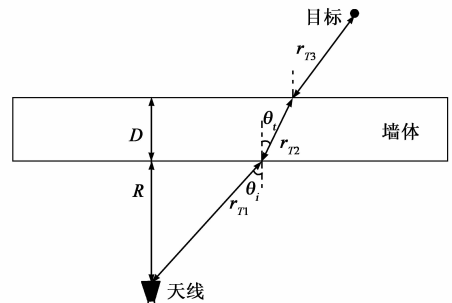


图1 穿墙成像雷达成像几何示意图

墙体回波中的直达波主要由墙体外表面的反射信号和内表面的反射信号组成, 由式(1)和式(3)可知, 它们的延时差 $\Delta\tau_w$ 为:

$$\Delta\tau_w = 2D\sqrt{\epsilon_r}/c \quad (4)$$

根据式(2)可知, 墙后目标回波的延时跟雷达与墙体的距离无关, 因此可以看成天线紧贴墙面, 如图 2 所示.

根据图 2 所示的几何关系, 回波延时为

$$t_d = \frac{2(r_1 + r_2\sqrt{\epsilon_r})}{c} \quad (5)$$

入射角 θ_i 和折射角 θ_t 满足 Snell 定律:

$$\frac{\sin\theta_i}{\sin\theta_t} = \sqrt{\epsilon_r} \quad (6)$$

根据图 2 所示的几何关系可以得到:

$$r_1 = r_3 - \Delta r = r_3 - \frac{D\cos(\theta_i - \theta_t)}{\cos\theta_t}$$

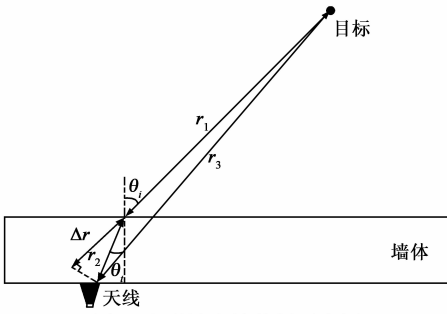


图2 电磁波穿墙传播示意图

$$= r_3 - D(\cos\theta_i + \sin\theta_i \tan\theta_r) \quad (7)$$

$$r_2 = \frac{D}{\cos\theta_i} \quad (8)$$

将式(6)、(7)和式(8)代入式(5)中可以将延时化简为:

$$t_d = \frac{2[r_3 + D(\sqrt{\epsilon_r - \sin^2\theta_i} - \cos\theta_i)]}{c} \quad (9)$$

天线沿与墙表面平行的方向运动形成合成孔径,在成像平面内建立直角坐标系,其中与墙表面平行的方向为方位向 x ,与墙表面垂直的方向为距离向 y .点目标位于 (x_T, y_T) ,反射系数为 A_T .天线在 $(u, 0)$ 位置发射宽带信号 $p(t)$,并接收位于 (x_T, y_T) 处点目标的回波信号.根据上面推导的电磁波传播规律,目标二维回波(为表达简洁,传播衰减、透射衰减和天线方向图的影响等均合入目标反射系数中)为:

$$s_T(t, u) = A_T FT_{t \leftrightarrow k}^{-1} \{ P(k) \exp[-j2k \times (r_3 + D(\sqrt{\epsilon_r - \sin^2\theta_i} - \cos\theta_i))] \} \quad (10)$$

$$r_3 = \sqrt{(x_T - u)^2 + y_T^2} \quad (11)$$

$$\theta_i \approx \arctan(|x_T - u|/y_T) \quad (12)$$

式中 $k = 2\pi f/c$ 为电磁波在空气中的传播波数, $P(k)$ 为发射信号频谱, $FT_{t \leftrightarrow k}^{-1}(\cdot)$ 对 t 的逆傅立叶变换算子.

3 墙体对传统成像算法定位和聚焦的影响

传统成像算法假设电磁波在均匀介质(如空气)中传播,不考虑电磁波在分层介质中传播会产生折射.以BP算法为例,利用固定积累角BP算法^[18]对回波成像,

$$g_{BP}(x, y) = \iint h(x - u, y) s(t, u) \times \delta(t - \frac{2}{c} \sqrt{(x - u)^2 + y^2}) du dt \quad (13)$$

式中, $h(x - u, y)$ 为控制孔径形状的窗函数.当成像积累角取 Θ 时,平均加权形式的窗函数为:

$$h(x - u, y) = \begin{cases} 1, & \arctan(|x - u|/y) \leq 0.5\Theta \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

式(14)表示的平均加权窗函数即为矩形窗,为了抑制旁瓣也可以采用hanning窗等加权形式,但通过加窗的方

法抑制旁瓣是以分辨率损失为代价的.

由于传统成像算法均假设电磁波在均匀介质(如空气)中传播,没有考虑电磁波在分层介质中传播时会发射折射,因此利用传统成像算法对穿墙成像雷达数据进行成像时,墙壁厚度会展宽,墙后目标会发生定位误差和散焦.

当没有考虑到电磁波在墙体内传播时速度的变化,仍假设电磁波以在空气中的速度 c 传播时,由式(4)可得到传统BP算法成像结果获得的墙壁等效厚度 \tilde{D} 为

$$\tilde{D} = \Delta\tau_W c/2 = D\sqrt{\epsilon_r} \quad (15)$$

墙壁厚度展宽为原来的 $\sqrt{\epsilon_r}$ 倍,而且墙壁内表面会发生散焦,只是由于墙表面为扩展散射目标,这种散焦在图像中不容易发现.

对于墙后 (x_T, y_T) 处的点目标,根据式(10)可得到其在回波域 $t - u$ 上的轨迹为:

$$0.5ct - [r_3 + D(\sqrt{\epsilon_r - \sin^2\theta_i} - \cos\theta_i)] = 0 \quad (16)$$

式中 r_3 和 θ_i 的计算式同式(11)和式(12).

该轨迹的顶点在 $u = x_T, t = 2[y_T + D(\sqrt{\epsilon_r} - 1)]/c$ 处,即常规BP算法图像 $g(x, y)$ 中,该目标将被定位在 $(x_T, y_T + D(\sqrt{\epsilon_r} - 1))$ 处,定位误差为 $D(\sqrt{\epsilon_r} - 1)$.根据常规BP成像算法的原理,对于 $(x_T, y_T + D(\sqrt{\epsilon_r} - 1))$ 处的积累轨迹为:

$$0.5ct - \sqrt{(x_T - u)^2 + [y_T + D(\sqrt{\epsilon_r} - 1)]^2} = 0 \quad (17)$$

根据泰勒公式可得,

$$\begin{aligned} & \sqrt{(x_T - u)^2 + [y_T + D(\sqrt{\epsilon_r} - 1)]^2} \\ & \approx \sqrt{(x_T - u)^2 + y_T^2} \\ & \cdot \left(1 + \frac{D(\sqrt{\epsilon_r} - 1)y_T + 0.5D^2(\sqrt{\epsilon_r} - 1)^2}{(x_T - u)^2 + y_T^2} \right) \\ & = r_3 + D(\sqrt{\epsilon_r} - 1)\cos\theta_i + 0.5D^2(\sqrt{\epsilon_r} - 1)^2/r_3 \end{aligned} \quad (18)$$

因此 $(x_T, y_T + D(\sqrt{\epsilon_r} - 1))$ 处的积累轨迹近似为:

$$\begin{aligned} & 0.5ct - [r_3 + D(\sqrt{\epsilon_r - \epsilon_r \sin^2\theta_i} - \cos\theta_i)] \\ & - 0.5D^2(\sqrt{\epsilon_r} - 1)^2/r_3 = 0 \end{aligned} \quad (19)$$

比较式(16)和式(19)可知,积累轨迹与目标的回波轨迹并不重合,因此常规BP算法图像将墙后 (x_T, y_T) 处的目标成像在 $(x_T, y_T + D(\sqrt{\epsilon_r} - 1))$ 处,并且目标会发生散焦.

4 墙体影响补偿方法

4.1 回波域墙体影响补偿方法

墙壁对墙后目标回波的影响可以在回波域进行补

偿,补偿后再利用BP算法进行成像,结合回波域补偿的BP算法为:

$$g_{ED}(r, y) = \iint h(r, u - y) FT_{t \leftrightarrow k}^{-1} \{ FT_{t \leftrightarrow k} [s(t, u)] \times F_{ED}(\epsilon_r, \theta_i, D) \} \delta(t - \frac{2}{c} \sqrt{(x-u)^2 + y^2}) dudt \quad (20)$$

式中 $FT_{t \leftrightarrow k}(\cdot)$ 为对 t 的傅立叶变换算子, $F_{ED}(k)$ 为回波域补偿因子(EDCF),

$$F_{ED}(k) = \exp[j2kD(\sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i} - \cos \theta_i)] \quad (21)$$

由式(21)可知,利用 $F_{ED}(k)$ 在回波域进行补偿时,有三个参数需要事先确定,即墙体相对介电常数、入射角和墙壁厚度。

(1) 墙体相对介电常数的确定

墙体相对介电常数可以通过测量获得,但这种方法在雷达实际应用时很难实现.利用式(15)将墙体相对介电常数的确定转换为对墙壁等效厚度的确定,这时回波域补偿因子表示为:

$$F_{ED}(k) = \exp[j2k(\sqrt{\tilde{D}^2 - D^2 \sin^2 \theta_i} - D \cos \theta_i)] \quad (22)$$

根据前面的分析可知,从回波中可以获得墙壁外表面回波与内表面回波的延时差估计 $\Delta \tau_w$,那么墙壁等效厚度的估计 \tilde{D} 可通过下式计算得到:

$$\tilde{D} = \Delta \tau_w c / 2 \quad (23)$$

式(23)表明,墙壁等效厚度估计的精度直接取决于 $\Delta \tau_w$ 的精度. $\Delta \tau_w$ 是通过计算墙壁外表面回波与内表面回波的延时差获得,因此需要雷达系统具备区分内外表面回波的分辨能力.雷达系统的纵向分辨率 ρ 与系统带宽 B 成反比,即 $\rho = c/2B$.当 $\rho < \tilde{D}$,即 $B > c/(2\sqrt{\epsilon_r}D)$ 时,墙壁外表面和内表面回波表现为两个峰值,从而可以有效区分.对于常见墙壁材料,干土的 ϵ_r 为 2~6,混凝土的 ϵ_r 为 4~6,石灰石的 ϵ_r 为 7~9.因此取相对介电常数 ϵ_r 为 4,当墙壁厚度为 0.2m 时,系统带宽大于 375 MHz 就能给区分墙壁内外表面回波.目前主流的穿墙雷达大部分能够满足这个要求.

(2) 入射角的确定

根据式(12)可知,要获得入射角就需要知道目标位置.然而穿墙成像雷达的目的就是探测墙后目标并对其定位,因此目标位置是不可能事先获得的.一个可行的方法是利用常规成像算法对回波进行成像,获得目标位置 (x'_T, y'_T) .根据前面的分析可知,由于墙体的存在, (x_T, y_T) 处的目标将被定位在 $(x_T, y_T + D(\sqrt{\epsilon_r} - 1))$ 处,但是考虑到墙壁厚度远小于雷达和目标的距离,因此利用 (x'_T, y'_T) 计算雷达在 $(u, 0)$ 处接收到的回波的入射角 θ'_i ,

$$\theta'_i \approx \arctan(|x'_T - u|/y'_T) \quad (24)$$

(3) 墙壁厚度的确定

在实际应用中,虽然可以知道墙壁厚度的大致范围,但无法确定其精确值.一个可行的方法是用不同厚度 d 对应的补偿因子对墙后目标回波进行补偿然后成像, d 越接近墙壁真实厚度,补偿效果越好.图像聚焦质量可以用点目标分辨率或图像熵来定量衡量,因此将墙壁厚度确定转化为参数估计问题.

上面给出了回波域墙体影响补偿的方法,但该方法存在两个主要问题.一个问题是该方法不能对墙后多目标同时补偿.因为当墙后有多目标时,不同目标的入射角是不同的,即不同目标对应的回波域补偿因子是不同的.但是这些目标的回波在回波域无法分离,因此只能针对一个目标精确聚焦.另一个问题是该方法计算量很大.因为在墙壁厚度确定中,需要进行多次成像,因此计算量大幅度增加.为了解决回波域补偿方法的问题,我们下面提出了图像域墙体影响补偿.

4.2 图像域墙体影响补偿方法

根据BP算法成像模型^[19,20],在回波域的预处理可以等效为对图像的后处理,

$$g_D(x, y) = FT_{x, y \leftrightarrow k_x, k_y}^{-1} \{ FT_{x, y \leftrightarrow k_x, k_y} [g_{BP}(x, y)] F_D(k_x, k_y) \} \quad (25)$$

式中 $FT_{x, y \leftrightarrow k_x, k_y}(\cdot)$ 和 $FT_{x, y \leftrightarrow k_x, k_y}^{-1}(\cdot)$ 分别为对 x, y 的二维傅立叶变换算子和二维逆傅立叶变换算子, k_x 和 k_y 分别为方位波数和距离波数, $F_D(k_x, k_y)$ 为图像域补偿因子(IDCF),

$$F_D(k_x, k_y) = \exp[j\sqrt{k_x^2 + k_y^2} (\sqrt{\tilde{D}^2 - D^2 \sin^2 \theta_i} - D \cos \theta_i)] \quad (26)$$

墙壁等效厚度的估计 \tilde{D} 还是通过式(23)得到,而入射角 θ_i 近似为方位角 θ_a 的绝对值,因此

$$\theta_i = \arctan(|k_x/k_y|) \quad (27)$$

于是式(26)所示的IDCF可以写成:

$$F_D(k_x, k_y) = \exp\{j\sqrt{k_x^2 + k_y^2} \cdot [\sqrt{\tilde{D}^2 - D^2 \sin^2(\arctan|k_x/k_y|)} - D \cos(\arctan|k_x/k_y|)]\} \quad (28)$$

式(28)所示的IDCF与目标位置无关,因此可以对墙后多目标同时补偿.

图像域补偿方法中,墙壁厚度的估计首先通过利用 M 个不同 $d_i, i = 1, \dots, M$ 对应的IDCF对常规BP成像结果进行处理,然后根据补偿后图像的聚焦质量判断墙壁厚度.图像域墙体影响补偿方法的流程图如图3所示,图像域补偿方法只需要进行一次成像处理和 M 次图像滤波处理,而回波域补偿方法则需要 M 次成像处理和 M 次回波滤波处理,因此图像域补偿方法的运算量相比回波域补偿方法大幅度减少.

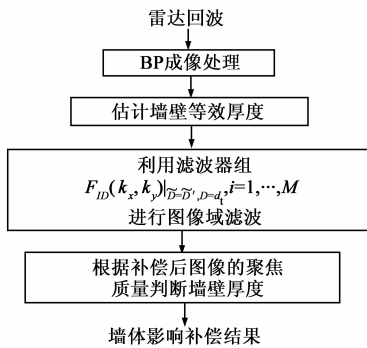


图3 图像域补偿方法流程图

5 仿真实验结果

在仿真中,设雷达到墙体外表面的垂直距离为 8m, 墙壁厚度 0.2m, 相对介电常数为 3.24, 墙后三个目标

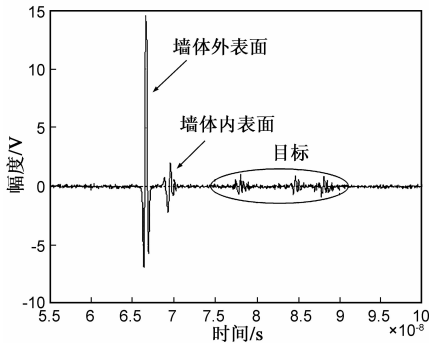


图4 雷达在某位置得到的一维回波

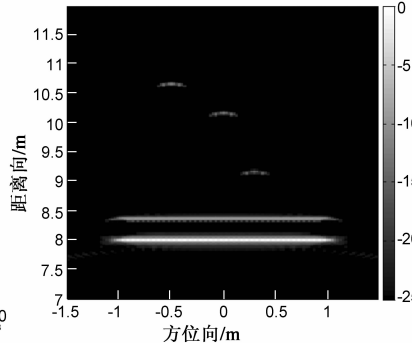
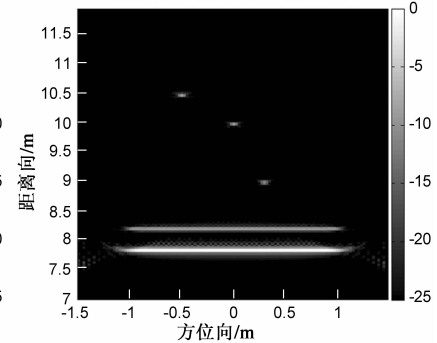


图5 常规BP算法成像结果

图6 补偿后的结果($d=0.2\text{m}$)

根据回波得到墙壁等效厚度为 0.36m, 因此利用 IDCF 对常规 BP 算法图像进行处理, 墙壁实际厚度的估计 d 以 0.02m 为间隔, 从 0m 到 0.36m 遍历. 当 $d = 0.02\text{m}$ 时, 补偿后图像的平均方位分辨率最优, 为 0.045m, 相比常规 BP 算法图像中三个目标的平均方位分辨率 0.072m 得到大幅度提高. 图 7 为 $d = 0.2\text{m}$ 对应的补偿结果(图像动态范围为 25dB). 可以发现: 图 6 中三个目标均实现了正确定位. 需要说明的是, 墙体外表面由于补偿处理产生了错位, 而内表面在补偿后得到了正确的定位.

6 结论

穿墙成像在军事和民用领域都有广泛的应用前景. 在墙体参数未知情况下实现墙后目标精确聚焦和准确定位有重要意义. 本文基于合成孔径成像模型提出了基于图像域墙体影响补偿的穿墙成像算法, 该方法在无墙体参数先验知识的情况下, 可完成墙体影响的高精度补偿, 而且计算效率高, 能满足实际需要. 仿真结果表明了该方法的有效性.

参考文献

[1] C P Lai, R M Narayanan. Ultrawideband random noise radar

分别位于(0.3,9)、(0,10)和(-0.5,10.5)处. 利用 FDTD 进行回波仿真^[21,22], 整个 FDTD 计算区域利用完全匹配层截断, 以满足吸收边界条件, 发射激励为高斯一阶微分信号. 雷达在某个位置的一维回波如图 4 所示, 由于高斯一阶微分信号为实信号, 也称为电平信号, 因此将该信号做 Hilbert 变换得到对应的复信号然后再取幅值得到电平信号的包络, 利用包络可以估计出墙壁外表面和内表面的时延差为 2.41ns, 利用式(23)得到墙壁等效厚度的估计为 0.3615m(理论定位误差为 0.36m).

利用常规 BP 算法对回波数据进行成像, 成像结果如图 5 所示(图像动态范围为 25dB). 目标均发生了定位误差和散焦, 如(0,10)处目标的最大值出现在(0,10.15)处, 距离向定位误差为 0.15m(理论定位误差为 0.16m).

design for through-wall surveillance [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2010, 46(4): 1716 - 1730.

[2] F Soldovieri, F Ahmad, R Solimen. Validation of microwave tomographic inverse scattering approach via through-the-wall experiments in semi controlled conditions [J]. IEEE Geosciences and Remote Sensing Letters, 2011, 8(1): 123 - 127.

[3] 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. (in Chinese)

[4] 谭覃燕, H Leung, 宋耀良. 基于混沌调频信号的超宽带穿墙 SAR 成像[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(2): 388 - 394. Tan Qin-yan, Henry Leung, Song Yao-liang. Through-the-wall SAR imaging based on chaotic FM signal [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(2): 388 - 394. (in Chinese)

[5] E Ertin, R L Moses. Through-the-wall SAR attributed scattering center feature estimation [J]. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 2009, 47(5): 1338 - 1348.

[6] E J Baranoski. Through-wall imaging: Historical perspective and future directions [J]. Journal of Franklin Institute, 2008,

- 345(6):556 – 569.
- [7] 黄冬梅. 基于 IR-UWB 穿墙成像系统的性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
Huang Dong-mei. Study of Through Wall Imaging System Performance Based on IR-UWB [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)
- [8] L M H Ulander, H Hellsten, G Stenstrom. Synthetic-aperture radar processing using fast factorized back-projection [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(3): 760 – 776.
- [9] 李杨寰, 宋千, 王鹏宇等. 多级多分辨快速后向投影成像算法[J]. 电子学报, 2011, 39(3): 519 – 524.
Li Yang-huan, Song Qian, Wang Peng-yu, et al. Multi-stage multi-resolution fast back-projection imaging algorithm [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(3): 519 – 524. (in Chinese)
- [10] F Ahad, M G Amin, S A Kassam. Synthetic aperture beamformer for imaging through a dielectric wall [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2005, 41(1): 271 – 283.
- [11] 陈洁, 方广有, 李芳. 时域波束形成在超宽带穿墙成像雷达中的应用[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(6): 1341 – 1344.
Chen Jie, Fang Guang-you, Li Fang. The application of time domain beamforming to ultra-wideband through-wall imaging radar [J]. Journal of electronics & information technology, 2008, 30(6): 1341 – 1344. (in Chinese)
- [12] 崔国龙, 孔令讲, 杨建宇. 步进频率穿墙成像雷达中的反投影算法研究[J]. 电子科技大学学报, 2008, 37(6): 865 – 867.
Cui Guo-long, Kong Ling-jiang, Yang Jian-yu. Back-projection algorithm to stepped-frequency through-the-wall radar imaging [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2008, 37(6): 865 – 867. (in Chinese)
- [13] M M Nikolic, A Nehorai, A R Djordjevic. Estimating moving targets behind reinforced walls using radar [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2009, 57(11): 3530 – 3538.
- [14] G Y Wang, M G Amin, Y M Zhang. New approach for target locations in the presence of wall ambiguities [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2006, 42(1): 301 – 315.
- [15] G Y Wang, M G Amin. Imaging through unknown walls using different standoff distances [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(10): 4015 – 4025.
- [16] F Ahmad, M G Amin, G Mandapati. Autofocusing of through-the-wall radar imagery under unknown wall characteristics [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(7): 1785 – 1795.
- [17] L Li, W Zhang, F LI. A novel autofocusing approach for real-time through-wall imaging under unknown wall characteristics [J]. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 2010, 48(1): 423 – 431.
- [18] R Rau, J H McClellan. Analytic models and postprocessing techniques for UWB SAR [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2000, 36(4): 1058 – 1074.
- [19] T Jin, Z Zhou, W Chang. UWBWA SAR imaging modeling and its time-frequency processing [A]. Proceedings of the 7th International Conference on Signal Processing [C]. Piscataway, NJ, USA; IEEE Press, 2004. 1930 – 1933.
- [20] 金添, 周智敏. 一种超宽带 SAR 地雷散射方位不变特征提取新方法[J]. 电子学报, 2007, 35(12): 2273 – 2278.
Jin Tian, Zhou Zhi-min. A novel ultra-wide band SAR landmine scattering aspect invariance feature extraction method [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(12): 2273 – 2278. (in Chinese)
- [21] W A Chamma. FDTD modeling of a realistic room for through-the-wall radar applications [J]. International Journal of Numerical Modeling: Electronic Networks, Devices and Fields, 2009, 22(2): 159 – 174.
- [22] 薛正辉, 杨仕明, 高本庆, 张泽杰. FDTD 算法的网络并行运算实现[J]. 电子学报, 2003, 31(12): 1839 – 1843.
Xue Zheng-hui, Yang Shi-ming, Gao Ben-qing, Zhang Ze-jie. A parallel implementation strategy for the FDTD algorithm [J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(12): 1839 – 1843. (in Chinese)

作者简介



金添 男, 1980 年出生, 湖北武汉人. 博士、副教授、硕士生导师. 分别于 2002 年、2003 年和 2007 年在国防科技大学获得工学学士、工学硕士和工学博士学位. 目前主要从事雷达成像与目标检测识别的研究工作.

E-mail: tianjin@nudt.edu.cn

孙鑫 男, 1986 年出生, 山东滕州人, 在读博士生, 研究方向为穿墙成像技术.