

超宽带时域近距离高分辨 ISAR 成像

徐艳云^{*①②} 张群英^① 方广有^①

^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 100190)

摘要: 近距离目标超高分辨率微波成像技术在安全检测、非破坏性控制、生物医学等领域中有着非常重要的应用价值和广阔的应用前景。该文利用基于窄脉冲形式的超宽带时域雷达系统研究近距离目标的高分辨率 ISAR 成像,给出了仿真和实测结果。利用转台旋转目标,基于超宽带脉冲源和超宽带收发天线以及高性能取样示波器,配以同步触发脉冲和自行研发的数据采集软件,搭建了该时域雷达实验系统,提出了准确获取目标回波信息的实验条件,和实现回波延时精确校正的误差补偿方法。并针对采样时间窗内的杂波干扰,讨论了时域后向投影算法(Back Projection, BP)与背景对消技术相结合的成像算法,实现了分辨率为 8 mm 的近距离目标的成像,准确地反映了目标的位置、形状和大小等信息。

关键词: 超宽带雷达; 时域; 后向投影; 背景对消; 脉冲重复频率

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)01-0043-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00132

UWB Time Domain Near Field High Resolution ISAR Imaging

Xu Yan-yun^{①②} Zhang Qun-ying^① Fang Guang-you^①

^①(The Institute of Electronic Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

^②(Graduated University of Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

Abstract: The high resolution imaging of near field targets are interesting for security, non-destructive control and biomedical application. In this paper, high resolution near field ISAR imaging is implemented using Ultra Wide Band (UWB) time domain radar system. Simulation and experiment are both conducted. The target is rotated by turntable. The system is built based on the UWB pulse source, UWB antennas, high performance sampling oscillograph, synchronous trigger pulse and proper motion study data acquisition software. Experiment condition and delay errors compensation method are presented to obtain accurate echo information of the target. And Back Projection (BP) combined with background cancel algorithm is discussed considering the clutter interference in time window. High resolution (8 mm) image is obtained, which exactly represents the position, shape and size of target.

Key words: Ultra Wide Band (UWB) radar; Time domain; Back Projection (BP); Background cancel; Pulse Repetition Frequency (PRF)

1 引言

在微波成像技术中,合成孔径雷达(SAR)和逆合成孔径雷达(ISAR)是两个重要的应用,两者均是利用雷达与目标的相对运动成像的^[1]。传统的 SAR 或 ISAR 成像中,为了解决信号带宽和作用距离之间的矛盾,发射信号一般为线性调频或步进频率信号。然而对于近距离目标的成像,可采用超宽带时域测量方法,通过合理设置采样时间窗可避免接收到目标之外的大部分回波^[2],超宽带雷达正是由于其

高分辨率以及较强的穿透能力,近年来得到广泛的应用,如国内外对穿墙、探地雷达的应用研究^[3,4],对人体探测成像、医学成像、安检等方面也有不少的应用研究^[5-8]。如何将微波成像技术更好地应用于各领域有着广阔的前景和巨大的挑战,因此对近距离目标超高分辨率微波成像技术的研究有重要的意义。

本文利用超宽带时域雷达系统研究近距离目标的高分辨成像,给出了仿真和实测结果,针对实测中存在的问题,给出了补偿和校正方法,实现了毫米级分辨率的成像。

2010-02-02 收到, 2010-06-14 改回

*通信作者: 徐艳云 xuyanyun07@mails.gucas.ac.cn

2 系统几何与成像原理

系统几何如图 1 所示, 雷达不动, 目标随转台以 O 为轴心转动, 雷达视线方向为距离向, 转台旋转平面内与雷达视线正交的方向为方位向, 距离-方位平面为成像投影平面。

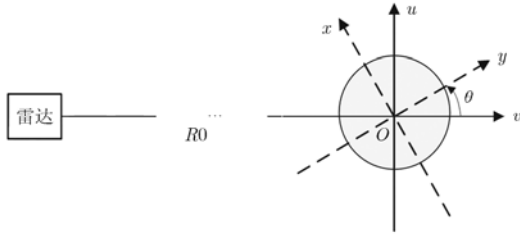


图 1 旋转目标成像模型

旋转坐标轴 $x-y$ 与固定坐标轴 $u-v$ 的关系如式 (1) 所示 (θ 为旋转角度):

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (1)$$

若发射信号为窄脉冲形式的超宽带信号 $s_t(t)$, $f(x, y)$ 为目标函数, 并设目标始终处于雷达波束内, 没有产生多次散射, 对极化也没有产生影响, 接收到的回波信号为

$$s_r(t, \theta) = \int \int_{y, x} f(x, y) s_t \left(t - \frac{2R}{c} \right) dx dy \quad (2)$$

其中 c 为电磁波传播速度, $R = \sqrt{(R_0 + v)^2 + u^2}$ 为雷达到目标散射点的距离, u, v 可由式 (1) 表示, 可见回波信号是快时间域 t 和慢时间域 θ 的函数。

借助于目标的转动可实现目标的成像, 根据远近场条件及转角大小的不同, 可采用不同的成像算法以提高成像效率。远场条件下, 总转角 $\Delta\theta$ 为小角度 ($3-5^\circ$), 设 B 为发射信号带宽, λ 为波长, 距离和方位分辨率分别为 $c/2B$ 和 $\lambda/2\Delta\theta$ [1], 并满足文献 [9] 中式 1.1 和式 1.2 的条件时, 散射点无越分辨单元走动 (Migration Through Resolution Cell (MTRC)) [10], 此时可利用 2 维 FFT 快速成像 [11]。然而小转角的相干积累时间短, 成像质量差, 高分辨率的获得需要大的合成孔径, 即目标做大角度转动, 此时需考虑 MTRC 现象, 使用适当的成像算法可获得高质量的图像。

3 成像算法及仿真

在传统 SAR 成像中, 将成像过程分解为方位和距离向两个独立的处理过程是由于满足菲涅尔近似, 而在近距离高分辨成像中, 雷达与目标产生相对大的转角, 散射点有严重的 MTRC 现象, 许多经

典 SAR 算法不能适用。而基于波前重建理论的算法没有这些限制。

3.1 时域后向投影算法

由波前重建理论可以得到时域后向投影算法 [12], SAR 回波数据表示如式 (3) 所示:

$$s_r(\eta, t) = \iint_{x, y} f(x, y) s_t \left(t - \frac{2R(x, y, \eta)}{c} \right) dx dy \quad (3)$$

天线位置和散射点 (x, y) 的距离 $R(x, y, \eta) = \sqrt{y^2 + (x - \eta)^2}$, η 和 t 分别为慢时间和快时间, 如果天线做圆弧运动, 即为一个旋转目标模型。将式 (3) 变换到 2 维频域得

$$S_r(k_\eta, f) = S_t(f) \iint_{x, y} f(x, y) \exp(-jk_\eta x - jk_\eta y) dx dy \quad (4)$$

其中 $k_y = \sqrt{4k^2 - k_\eta^2}$, $k = 2\pi f / c$, 因此目标函数 $f(x, y)$ 可由式 (5) 得到

$$f(x, y) = \iint_{k, k_\eta} S_r(k_\eta, f) S_t^*(f) / |S_t(f)|^2 \cdot \exp(jk_\eta x + jk_\eta y) dk dk_\eta \quad (5)$$

但由式 (5) 求目标函数, 运动补偿较为复杂, 因此利用式 (6) 的关系,

$$\exp(jk_\eta x + jk_\eta y) = -2jF_\eta^{-1}[\exp(j2kR(x, y, \eta))] \quad (6)$$

$F_\eta^{-1}[\bullet]$ 表示关于 η 的逆傅里叶变换, 因此式 (5) 写为

$$\begin{aligned} f(x, y) &= \iint_{k, k_\eta} S_r'(k_\eta, f) \int_\eta \exp(2jkR(x, y, \eta)) \\ &\quad \cdot \exp(jk_\eta \eta) d\eta dk dk_\eta \\ &= \frac{2\pi}{c} \iint_{\eta, k} s_r'(\eta, f) \exp(j4\pi fR(x, y, \eta) / c) df d\eta \\ &= \frac{2\pi}{c} \int_\eta s_r'(\eta, 2R(x, y, \eta) / c) d\eta \end{aligned} \quad (7)$$

从而得到时域成像方法, 从以上各式可以看出, 基于波前重建理论的实现有频域 (式 (5)) 和时域算法, 鉴于运动补偿的难易程度, 本文采用时域后向投影算法, 发射信号为冲激信号, 利用式 (7) 的算法原理, 将每个位置的回波数据后向投影到成像区。雷达回波是以天线为中心等距离圆上所有散射点回波的矢量和, 通过计算每个位置的回波在天线和成像区像素点之间的延时累加决定像素点的值, 算法流程如图 2 所示。

此算法对运动轨迹没有苛刻的限制, 对成像区每个像素点进行逐点处理, 精度较高, 若用于大场景 SAR 成像时运算量较大, 而对近距离小目标的成像数据量小, 该算法是适合的。

3.2 算法仿真

发射高斯形式的窄脉冲信号 (如图 3), 峰值-9

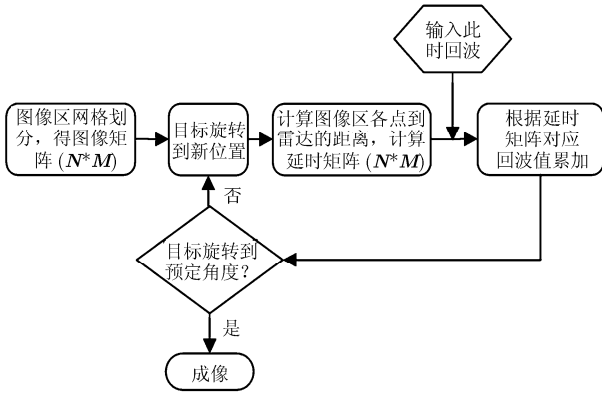


图 2 算法流程图

dB 宽度为 30 ps, 雷达到转台中心的距离为 3 m, 目标最大长度和宽度均为 0.5 m, 总转角为 2π 。点目标坐标分别为 $(-0.1, -0.15), (-0.1, 0.15), (-0.1, 0), (0.1, -0.15), (0.1, 0.15), (0.1, 0), (0, -0.15), (0, 0.15), (0, 0)$, 相对位置如图 4 所示。

仿真回波如图 5 所示, 横轴为目标旋转角度, 纵轴为雷达到散射点的距离, 由图可见位于轴心的点目标不随转台转动, 无 MTRC 现象, 而其他点目标的距离变化较大, 产生了严重的 MTRC。对回波后向投影成像, 成像区划分间隔为 0.9 mm, 得目标图如图 6 所示, 比较图 4 可见其正确反映了点目标的分布情况。选取 $(0.1, 0.15)$ 点做分辨率分析, 取距离向切片如图 7 所示, 峰值的 -6 dB 宽度为 7.2 mm, 同理分析方位分辨率为 7.2 mm。

3.3 背景对消技术

在实际测量中, 接收回波中会存在杂波干扰, 为了减小其对成像的影响, 在后向投影算法中引入背景对消技术。在同样的实验场景和参数设置下, 分别获取无目标和有目标时的回波, 采用图 8 的两种方式均可实现背景对消, 第 1 种是对回波的背景对消, 两回波矢量相减得到去除了背景杂波的回波信号, 然后做后向投影成像; 第 2 种是对图像的背景对消, 将两回波后向投影成像后, 对两幅图像矢量相减得到目标图像。根据后向投影式(7)和定积分的性质可知这两种方式等价, 从计算机实现复杂度看, 第 1 种方式只进行 1 次减法和 1 次后向投影操作, 第 2 种方式做 2 次后向投影和 1 次减法操作, 因此第 1 种方式更简洁。

根据接收信号的形式上述相减可有复相减和实相减, 本文采用窄脉冲形式的超宽带实信号作为发射信号, 时域接收的回波信号仍为实信号, 因此图 8 均为实相减。第 5 节将给出背景对消的结果。

4 毫米级分辨率实验系统

搭建超宽带时域 ISAR 转台成像实验系统获取实测数据, 如图 9 所示, 窄脉冲发射源产生脉宽为 30 ps 的负极性窄脉冲信号作为发射信号如图 10 所示(横轴为时间轴 100 ps/div), 利用两个超宽带天线分别发射和接收信号, 构成准单站实验系统, 天线带宽 1 GHz -18 GHz, 天线到转台中心的距离为 3 m, 转台转角精度为 $\pm 0.02^\circ$, 图中实心箭头表示触

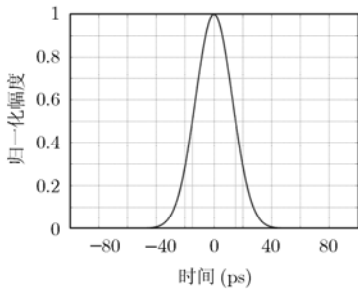


图 3 高斯信号

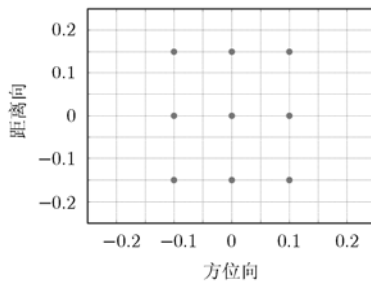


图 4 9 个点目标相对位置关系

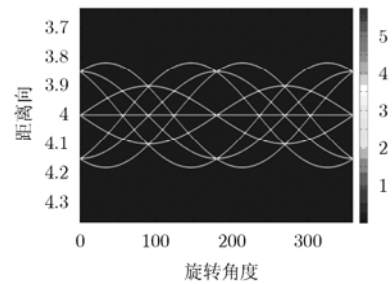


图 5 回波图

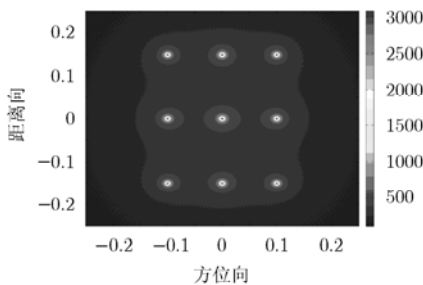


图 6 2 维成像图

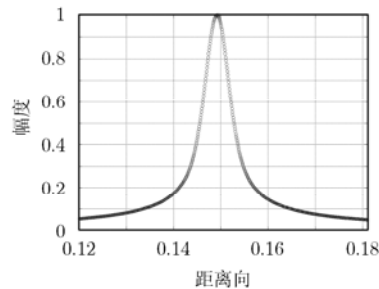


图 7 点目标成像的切片

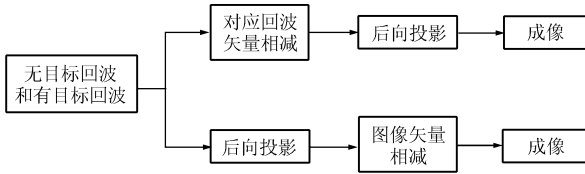


图 8 背景对消的两种实现方式

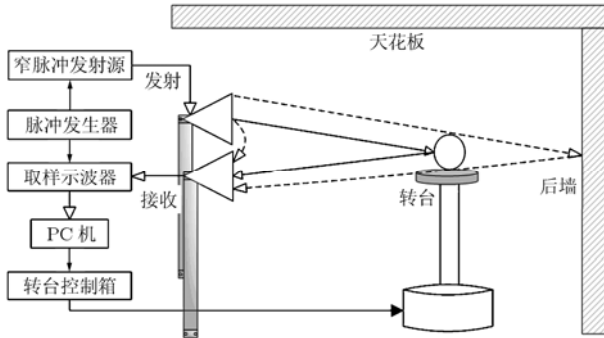


图 9 实验测量系统



图 10 发射信号波形

发或控制信号，空心箭头表示数据传输，为了保证发射和接收的同步，由脉冲发生器产生触发信号，为窄脉冲发射源和取样示波器同时提供触发。发射信号由发射天线辐射出去，经目标后向散射后到达接收天线，由高性能的 Wave expert 100H 取样示波器以等效 250 GHz 的取样率接收回波，以计算机为控制中心，利用自行研发的数据采集软件实现转台转动和数据采集的自动化，转台每转动 1° 存储一次回波数据，直到目标旋转 360° 获取各个方向的目标信息。

在存储数据过程中转台处于动态，其转速远小于电磁波传播速度，在发射和接收时认为转台静止。为了准确存储目标回波信息，脉冲重复频率(PRF)要足够小以保证目标回波在一个周期内全部被接收到，而且不能太小以保证每度存储的回波数据为目标对该角度发射脉冲的散射数据，即脉冲重复周期 $(1/\text{PRF})$ 须远小于或者等于转台转动 1° 的时间。

$$\frac{180\omega}{\pi} \ll \text{PRF} \leq c/2(R_{\max} - R_{\min}) \text{ 或}$$

$$\frac{180\omega}{\pi} = \text{PRF} \leq c/2(R_{\max} - R_{\min}) \quad (8)$$

其中 ω 为转动角速度， R_{\max} 和 R_{\min} 分别为目标到天线的最远和最近距离。本实验中 ω 为 0.0524 rad/s，PRF 为 600 kHz，目标区域小于 70 cm，满足式(8)的条件。

在一个脉冲重复周期内，接收天线接收到的回波除了目标的回波以外，还有收发天线的耦合信号、墙壁、天花板、转台等的反射信号，根据转台到天花板的距离以及目标的大小合理设置采样时间窗，保证目标的回波在时间窗内，而收发天线的耦合信号、后墙的反射信号(如图 9 中虚线所示)及部分转台和天花板的反射信号被设置在时间窗之外。

为了对存储的回波数据准确后向投影成像，对信号线上传输和仪器等的时延造成的回波延时误差进行补偿，实现成像区各像素点回波信号延时的精确校正。设 d 为发射和接收天线的距离， t_{odw} 为接收到直达波的时间，由 $d/c + \text{delay} = t_{\text{odw}}$ 得回波传播延时误差 delay ，然后补偿接收到的最近散射点的回波延时 $t_{\text{o,min}}$ 得实际最小回波延时 $t_{\text{min}} = t_{\text{o,min}} - \text{delay}$ ，最后可对各像素点的回波延时进行校正，实现相干累加完成后向投影成像。

5 实验结果及分析

在相同参数和实验场景下，分别获取各目标和无目标时的回波，补偿延时误差后对各目标成像。首先分析背景对消对成像的影响，表面包有铝箔并有一定厚度的十字模型如图 11(a)，纵向 48.5 cm 横向 39.5 cm，图 11(b)为不使用背景对消得到的目标成像图，从图中可看到背景杂波及转台转动对成像的干扰，图 11(c)为无目标的背景成像图，图 11(d)为使用图 8 两种方式的背景对消得到的目标成像图，其有效地抑制了杂波干扰。成像图正确反映了模型的形状和大小，而且从该 2 维成像图可以看出，该物体是具有一定的厚度的，主要是因为厚度方向上散射点的回波也有不同的时延，对成像投影平面中像素点值产生影响。

因此利用后向投影与背景对消相结合的成像算法能得到高质量的图像，相距 20 cm 的铝箔包裹的竖立放置的小方块成像如图 12 所示，可见成像相对位置及间隔与实际相符；图 13 为从左到右间隔为 3 mm, 5 mm, 8 mm, 1 cm, 3 cm 排列的铝箔包裹的竖立放置的小方块的成像，得到了 5 个小方块的像，间隔为 3 mm 的方块没有分辨开，右边 3 个方块成像效果明显好于左边的 3 个方块，成像分辨率

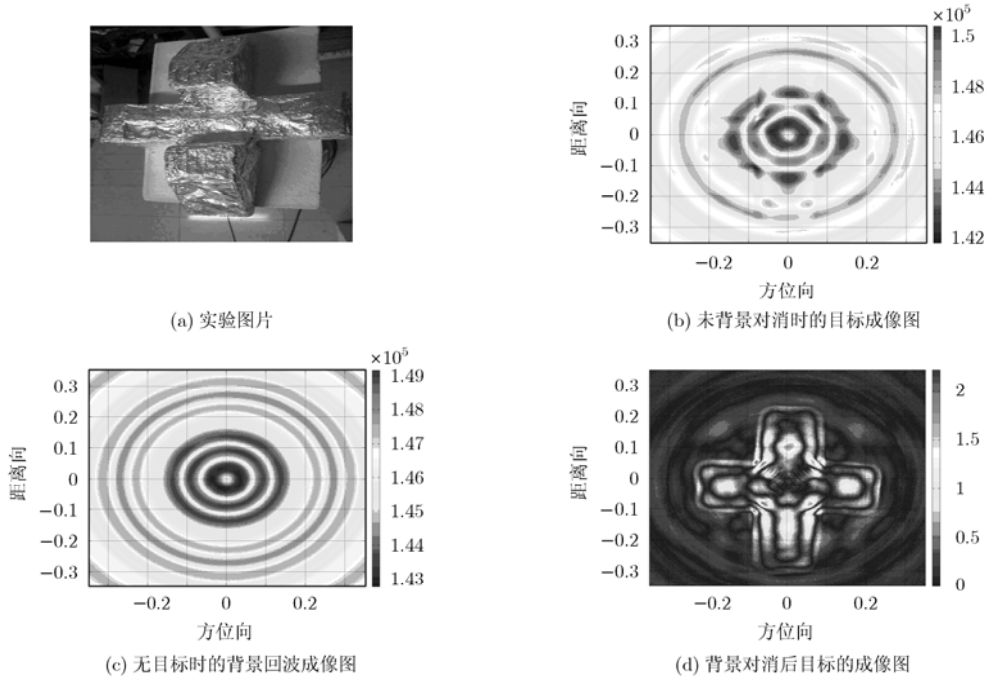


图 11 包有铝箔的十字模型的成像

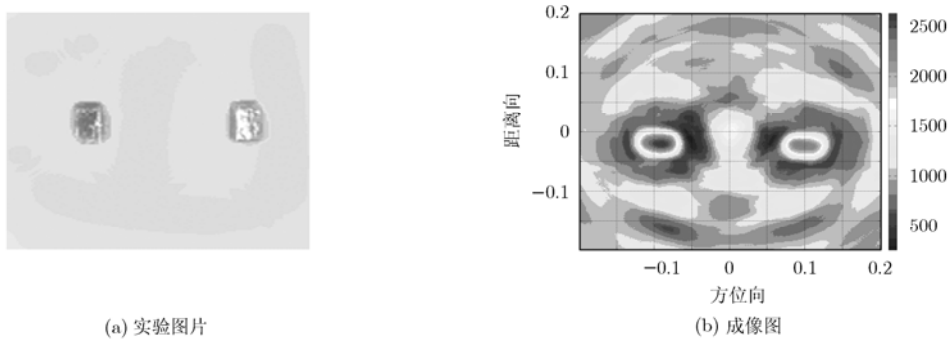


图 12 包有铝箔的 2 个小方块的成像

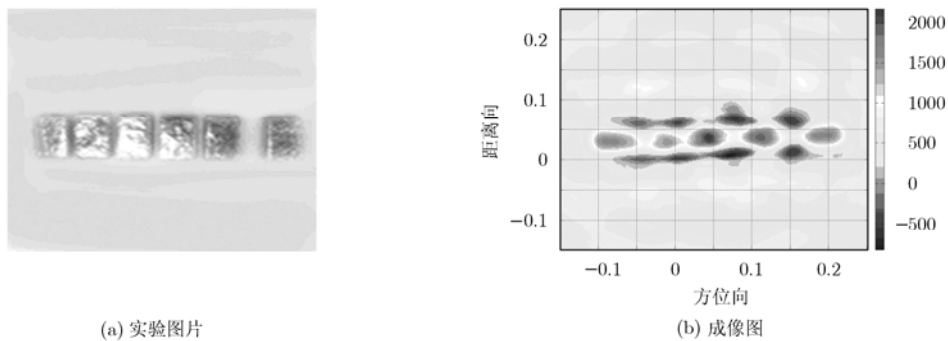


图 13 不同间隔的 6 个小方块的成像

约为 8 mm。图中 5 mm 间隔的像却大于 8 mm 间隔的像，可能的原因是目标的多次散射造成的，这种影响因素还有待研究。由于系统误差等的影响，实验分辨率低于理论仿真分辨率，由于目标与环境的耦合作用，成像图中目标之外的像素值不是最小

值，需进一步改进背景对消技术得到更理想的目标回波信息，从而提高成像质量。

电磁波照射不同物体会产生不同程度的穿透，其穿透程度由波长及目标本身的属性所决定，设 μ 为磁导率， σ 为电导率， ϵ 为介电常数， f 为发射信

号频率, 电磁波传入电介质和导体的穿透深度分别为 $2\sqrt{\varepsilon/\mu}/\sigma$ 和 $1/\sqrt{\pi f\mu\sigma}$ [13], 本文使用窄脉冲超宽带信号, 具有宽频和低频的特点, 在具有高距离分辨率的同时对电介质或电导率小的目标有很强的穿透力, 因此该雷达系统具有很大的应用优势, 后续将会有进一步的研究。

6 结束语

本文利用冲激体制的超宽带时域雷达系统配以有效的成像算法, 实现了近距离目标的高分辨成像, 通过仿真和实测分析, 获得与目标实际形状、大小和位置相一致的图像, 实验分析分辨率为 8 mm, 由于超宽带信号的强穿透性使得该雷达系统具有较大的应用优势。

本系统仍存在不足, 分辨率不很理想, 后续需进一步改进实验系统和成像算法, 消除系统本身和算法实现时带来的误差, 并根据超宽带信号的特点分析多次散射、目标与背景耦合等对成像的影响, 对不完全数据的成像以及对此雷达系统的应用研究也是研究的方向。

参考文献

- [1] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 6-11.
Bao Zheng, Xing Meng-dao, and Wang Tong. Radar Imaging Technique [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2005: 6-11.
- [2] Levitas B. Time domain measurement for RCS measurements and ISAR imaging. http://www.geozondas.com/Old_Site/pdf/ISAR%20Imaging.pdf. 2008.5.
- [3] 黄琼, 陈洁, 孟升卫, 方广有. 一种快速超宽带穿墙雷达成像算法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(8): 2001-2005.
Huang Qiong, Chen jie, Meng Sheng-wei, and Fang guang-you. A fast imaging algorithm for UWB through-wall radar [J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2009, 31(8): 2001-2005.
- [4] Daniels D J, Curtis P, and Hunt N. A high performance time domain UWB radar design[C]. Wideband receivers and components IET seminar, London, UK, May 7, 2008: 1-4.
- [5] Zhuge X, Savelyev T G, Yarovoy A G, Ligthart L P, Matuzas J, and Levitas B. Human body imaging by microwave UWB radar[C]. European Radar conference, Amsterdam, Netherlands, Oct. 30-31, 2008: 148-151.
- [6] Immoreev I Y. Practical application of ultra-wideband radars[C]. The third international conference on Ultrawideband and Ultrashort impulse signals, Sevastopol, Ukraine, Sept. 18-22, 2006: 44-49.
- [7] Gashinova M, Daniel L, Gang D Z, and Cherniakov M. Target resolution enhancement in UWB radar for security system [C]. European Radar conference, Amsterdam, Netherlands, Oct. 30-31, 2008: 17-20.
- [8] Salman R, Schultze T, and Willms I. UWB material characterization and object recognition with applications in fire and security [C]. IEEE international conference on Ultrawideband, Hannover, Germany, Sept. 10-12, 2008, 2: 203-206.
- [9] Walker J L. Range-Doppler imaging of rotating objects [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1980, AES-16(1): 23-52.
- [10] 何静. 高分辨ISAR转台成像MTRC的补偿算法研究[D]. [硕士学位论文], 西北工业大学, 2007.
He Jing. High resolution ISAR rotation platform imaging [D]. [MA. dissertation], Northwestern Polytechnical University, 2007.
- [11] 胡楚峰. 雷达目标RCS测试系统及微波成像诊断技术研究[D]. [硕士学位论文], 西北工业大学, 2007.
Hu Chu-feng. RCS measurement system of radar target and microwave imaging diagnosis technique research [D]. [MA. dissertation], Northwestern Polytechnical University, 2007.
- [12] 粟毅. 冲激脉冲SAR成像理论与方法研究[D]. [博士学位论文], 国防科学技术大学, 2001.
Su Yi. Impulse SAR imaging theory and algorithm research [D]. [Ph.D. dissertation], National University of Defense Technology, 2001.
- [13] 朱中奇, 朱满座, 卢智远, 路宏敏. 电磁场理论基础[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001: 175-179.
Zhu Zhong-qi, Zhu Man-zuo, Lu Zhi-yuan, and Lu Hong-min. Electromagnetic Field Theory [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2001: 175-179.

徐艳云: 女, 1985年生, 博士生, 研究方向为超宽带雷达成像和信号处理。

张群英: 女, 1972年生, 研究员, 研究方向为微波遥感技术和信号处理技术。

方广有: 男, 1963年生, 研究员, 研究方向为超宽带电磁场理论及工程应用、超宽带雷达成像技术、微波成像新方法和新技术。