

# 步进变频穿墙成像雷达中反投影算法研究

崔国龙, 孔令讲, 杨建宇

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

**【摘要】**反投影(back-projection, BP)算法具有很高的成像精度并容易进行各种形式的补偿,是广泛应用于穿墙、探地等领域的一种有效的时域成像算法。该文把时域反投影算法应用到步进变频穿墙雷达成像中,并根据墙壁的参数提出了用最短时间法对墙壁的影响进行补偿。通过对实测数据的处理可以看出,反投影算法在穿墙雷达中具有很好的成像精度,最短时间法也能很好地补偿墙壁对目标成像位置的影响。

**关键词** 反投影成像; 步进变频穿墙雷达; 最短时间法; 墙壁  
**中图分类号** TN957.52 **文献标识码** A

## Back-Projection Algorithm to Stepped-Frequency Through-the-Wall Radar Imaging

CUI Guo-long, KONG Ling-jiang, and YANG Jian-yu

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

**Abstract** Back-projection imaging algorithm is widely used in through-the-wall and ground penetrating radar(GPR) imaging because of the high image quality and being compensated easily. This paper introduces the Back-Projection(BP) algorithm to the stepped-frequency through-the-wall radar and proposes the time-minimization method to eliminate the wall's effects, such as refraction, changing in speed and attenuation. Proof of concept is provided using real data collected in a laboratory environment. The results show that the BP algorithm outputs a high quality image and the time-minimization method can eliminate the wall's effect very well.

**Key words** back-projection imaging; stepped-frequency through-the-wall radar; the time-minimization method; the wall

穿墙成像雷达(through-the-wall imaging radar, TWIR)是用来对被障碍物遮挡住的区域进行成像,在城市巷战、反恐斗争、公安防暴、灾害救援等军事和民事领域都有着广泛的应用前景。近几年,国内外许多机构都对穿墙成像雷达进行了广泛和深入的研究<sup>[1-4]</sup>。

手提式穿墙成像雷达有很高的成像精度并且具有造价低、轻便、易于携带等特点。步进变频信号较超短脉冲而言,实现简单,对硬件没有特殊要求,可以达到相同带宽的超短脉冲一样的性能,适合于手提式穿墙成像雷达中的信号形式。反投影算法具有很高的成像精度并且易于进行各种形式的补偿,是一种有效的时域成像算法<sup>[5]</sup>。本文通过发射步进频率信号合成超宽带信号,取得了较高的距离分辨率,以满足对墙壁后人体的探测成像要求。步进变频雷达的回波数据为一系列频点的复信号,根

据时域反投影算法和用步进频率回波数据直接成像的一致性<sup>[6-7]</sup>,提出对用步进频率回波数据进行逆傅里叶变换,压缩成等效的时域超短脉冲后,进行反投影成像。

墙壁的位置、厚度、介电常数以及信号的入射角等都会影响信号在墙壁中的传输特性。当信号穿过墙壁,会引起信号传输速度降低、能量衰减和在墙壁与空气界面的折射。由于墙壁的存在,图像会出现散焦、偏离真实位置,甚至出现虚假目标。文献[8]根据折射定律详细地分析了电磁波穿过墙壁引起的传输速度和折射路径的影响,并对图像进行补偿,计算繁琐,复杂。本文提出了一种新算法,从最短时间的角度分析了电磁波透过墙壁的影响并提出了补偿算法。通过对实测数据的处理可以看出,该算法可以取得良好的成像补偿效果。

收稿日期: 2007-05-21; 修回日期: 2008-03-25

基金项目: “十一五”预研项目(51307040402)

作者简介: 崔国龙(1982-),男,博士生,主要从事穿墙雷达检测与成像方面的研究。

## 1 成像算法

### 1.1 反投影算法

成像模型如图1所示。天线为单发单收、沿  $x$  轴依次移动、间距为  $d$ 、合成阵元数目为  $M$  的线阵，天线的位置为  $x_i$  ( $i=1, 2, \dots, M$ )。

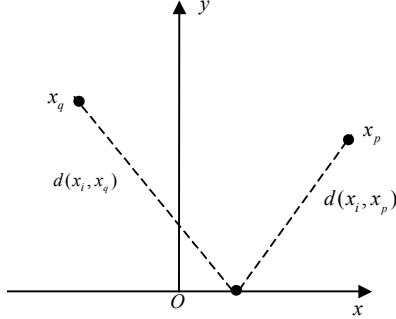


图1 成像模型

对于点目标  $p: x_p = (x_p, y_p)$ ，反射系数为  $a(x_p)$ ，天线在  $x_i$  处发射信号为  $s(t)$ ，则在  $x_i$  处接收的回波信号为：

$$p(x_i, t) = a(x_p) s(t - \tau_{pi}) \quad (1)$$

式中  $\tau_{pi} = 2 \times \frac{d(x_i, x_{pi})}{c}$  为天线在  $x_i$  处点目标的回波延迟。则天线对整个区域  $D$  照射所形成的回波数据为：

$$P_D(x_i, t) = \iint_D p(x_i, t) dx dy = \iint_D a(x_p) s(t - \tau_{pi}) dx dy \quad (2)$$

依次移动天线位置，采集  $M$  组回波数据。

成像区域按距离向和方位向划分成有限个像素点，则  $x_q$  处  $q$  点的像素为：

$$I(x_q) = \sum_{i=1}^M P_D(x_i, t) |_{t=t_{qi}} = \sum_{i=1}^M \iint_D a(x_p) s(t - \tau_{pi}) dx dy |_{t=t_{qi}} \quad (3)$$

式中  $t_{qi} = 2 \times \frac{d(x_i, x_q)}{c}$  表示天线到像素点  $q$  的延迟。依次计算每个像素点的像素完成整个场景的成像。

### 1.2 步进频率分析

雷达发射的信号为步进变频信号合成超宽带信号。下面来考虑反投影算法与步进变频信号之间的等效关系。

设  $S(\omega)$  为发射信号  $s(t)$  的傅里叶变化，则：

$$s(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (4)$$

$$s(t - \tau_{pi}) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{j\omega t} e^{-j\omega \tau_{pi}} d\omega \quad (5)$$

把式(5)代入式(3)，可得像素  $q$  处的频域表示：

$$I(x_q) = \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^M \iint_D a(x_p) \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{j\omega t} e^{-j\omega \tau_{pi}} d\omega dx dy |_{t=t_{qi}} \quad (6)$$

雷达发射信号  $s(t)$  为步进变频信号，起始频率为  $\omega_0$ ，步进间隔为  $\Delta\omega$ ， $K$  个步进，则信号带宽  $B = K\Delta\omega$ ，带宽内的频率  $\omega_k = \omega_0 + k\Delta\omega$ ， $k = 0, 1, \dots, K-1$ 。由于步进间隔  $\Delta\omega$  很小，信号  $s(t)$  的频谱集中在带宽  $B$  内，所以可以近似用求和来代替式(6)中频率的积分：

$$I(x_q) = \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^M \iint_D a(x_p) \sum_{k=0}^{K-1} S(\omega_k) e^{j\omega_k t} e^{-j\omega_k \tau_{pi}} \Delta\omega dx dy |_{t=t_{qi}} \quad (7)$$

从式(3)~(7)的推导过程可以看出，时域反投影算法和步进频率成像算法具有一致性。由于步进变频雷达接收到的回波数据为一系列步进频率复信号，可以利用式(7)求各点的像素值，直接成像，但成像速度很慢。还可以对这些频率信号进行逆傅里叶(IFFT)压缩处理变换到时域，根据式(3)中像素点的求法进行反投影成像，成像速度要快得多。

## 2 墙壁存在下的图像形成

当穿过墙壁时，信号能量要衰减，在墙壁中的传输速度要减小，在墙壁和空气的界面，由于介电常数不同而引起折射，使信号偏离直线方向导致目标的图像偏离真实位置和散焦。在成像中，需要对墙壁的这些因素影响进行适当的补偿。

### 2.1 电磁波透过墙壁的传播延迟

文献[8]根据折射定律详细地分析了墙壁的折射影响以及补偿方法。由于列出的方程组很难求出理论解，具体操作中只能用数值解法，计算比较复杂，运算量也比较大。

本文从另外一个角度来考虑墙壁对信号的折射影响以及补偿方法——最短时间法<sup>[9]</sup>。电磁波从  $A$  点到传播另外一点  $B$  总是沿着一条特定的路径，使得传输的时间最短。在同一种均匀的介质中，电磁波是沿直线传播的。当电磁波从一种介质传输到另外一种不同介质中时，在两种不同介质的表面传播路径发生变化，产生折射，满足 Snell 折射定律。由于在不同的介质中电磁波的传播速度不同，沿直线传播的时间将不再是最短，所以产生折射的目的就是在两种介质中寻找一条最短的传输路径。

图2为电磁波穿墙传播路径示意图。假设墙壁的厚度为  $d_w$ ，相对介电常数为  $\epsilon_r$ ，点  $p(x_p, y_p)$  为成像区域任意一点，天线放置在  $x_i = (x_i, -d_w)$  处，紧靠墙

壁, 单发单收。信号从天线发射, 经墙壁的表面 $M$ 点折射到达目标点 $P$ 后再沿原路径返回到天线, 则回波延迟为:

$$t(x_i, p) = 2 \times \min_x (l_1 / v + l_2 / c) \quad (8)$$

式中  $l_1 = \sqrt{(x_i - x)^2 + d_w^2}$  为电磁波在墙壁中传播的距离;  $l_2 = \sqrt{(x_p - x)^2 + y_p^2}$  为电磁波在空气中传播的距离;  $p$  为目标的位置向量;  $v = c / \sqrt{\epsilon_r}$  为电磁波在墙壁中的速度;  $c = 3.0 \times 10^8$  m/s 为光速。

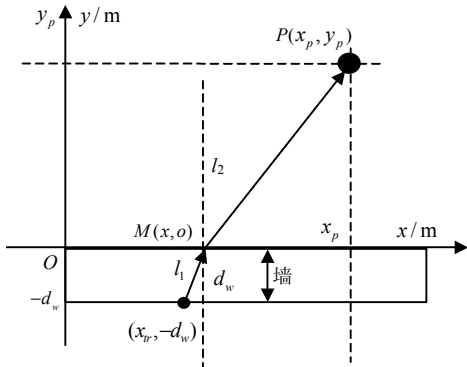


图2 电磁波穿墙传播路径示意图

## 2.2 图像形成

由于墙壁的影响, 电磁波传播速度和路径都发生变化, 所以需要式(3)和式(7)中计算 $x_q$ 处 $q$ 点像素进行适当的修改, 则:

$$\hat{I}(x_q) = \sum_{i=1}^M P_D(x_i, t) |_{t=t_{qi}} = \sum_{i=1}^M \iint_D a(x_p) s(t - \tau_{pi}) dx dy |_{t=t_{qi}} \quad (9)$$

$$\hat{I}(x_q) = \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^M \iint_D a(x_p) \sum_{k=0}^{K-1} S(\omega_k) e^{j\omega_k t} e^{-j\omega_k \tau_{pi}} \Delta \omega dx dy |_{t=t_{qi}} \quad (10)$$

式中

$$\tau_{pi} = t(x_i, p) = 2 \times \min_x (l_1 / v + l_2 / c)$$

$$t_{qi} = t(x_i, q) = 2 \times \min_x (l_1 / v + l_2 / c)$$

## 3 实测数据处理及结果分析

系统框图如图3所示。本实验采用安捷伦(Agilent)公司的矢量网络分析仪8753D合成1 GB带宽的信号, 点数 $N = 201$ , 频率步进 $\Delta f = 5$  MHz; 两个带宽为1~4GB阿基米德右螺旋天线来发射和接收信号; 合成阵列长度为3 m, 间隔为10 cm。对3 m×4 m的房间进行成像, 人站立在墙壁后面, 水平距离为1.5 m, 距离墙1.7 m (脚尖距离墙1.5 m), 墙壁厚度 $d_w = 23$  cm, 相对介电常数 $\epsilon_r = 4$ 。

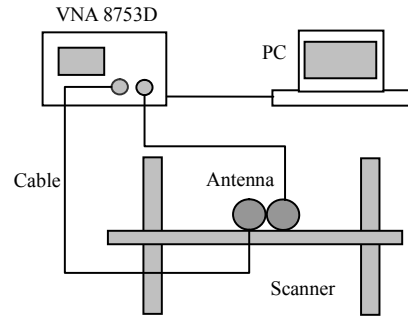
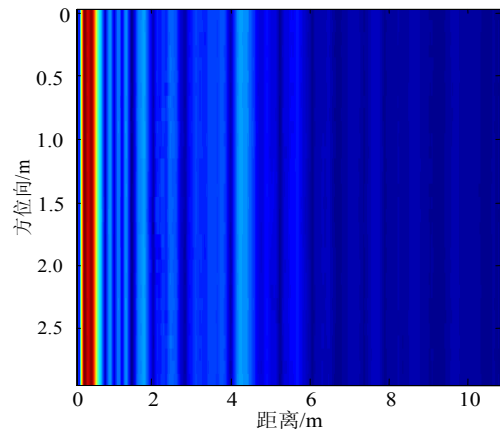
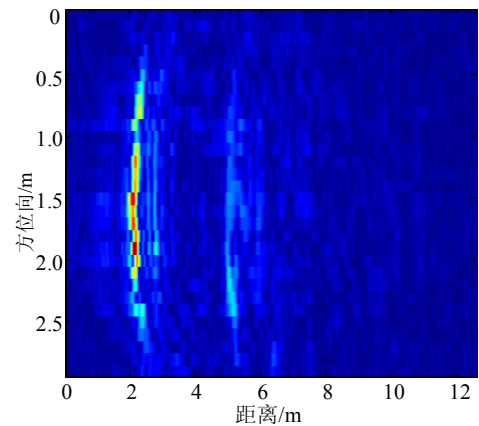


图3 实验系统的框图

由于天线间的直接耦合和墙壁反射的信号能量要远大于人体反射回波信号的能量, 所以需要对直接耦合和墙壁的反射进行抵消。图4是回波数据进行距离压缩(IFFT)以后的时域图像。图4a是对图像未做任何处理, 可以看到很强的直接耦合和墙壁反射, 无法看到人体反射的信号。由于直接耦合和墙壁的反射位置固定, 而在不同的孔径照射, 人体到天线的距离不同, 呈双曲线变化, 这样就可以在方位向上通过平均对消法来消除背景。图4b为通过平均背景对消后的图像, 可以很明显地看到一条人体的双曲线。反投影(BP)成像处理就是把同一个目标的双曲线能量积累到目标所在位置。



a. 背景对消前



b. 平均背景对消后

图4 步进变频回波压缩后时域图像

图5为利用反投影(BP)算法对双曲线进行聚焦处理而达到对整个场景进行成像的结果。图5a为直接反投影成像,把墙壁也看成“空气”,不考虑速度的减小和折射影响。从图像上可以明显地看出,在距离向和方位向上,图像偏离人体的真实位置。图5b是对墙壁作了补偿后的成像结果,从图上可以看出,人体的图像真实地反映了人体的位置。

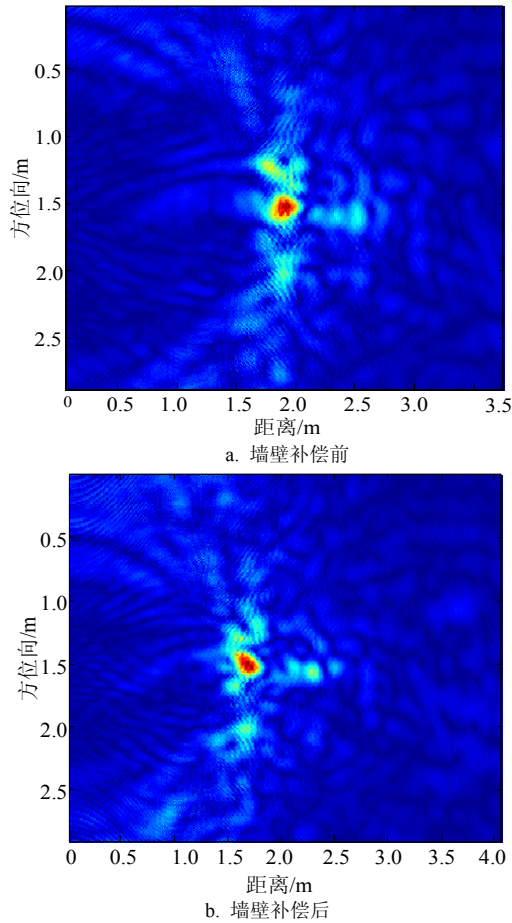


图5 反投影成像

## 4 结 论

本文详细分析了时域反投影算法和步进变频回波数据直接成像的一致性,把反投影算法引入到步

进变频穿墙雷达成像中,并提出了用最短时间法来补偿墙壁对信号传输速度以及折射的影响。通过对实测数据的处理结果可以看出,反投影算法可以实现对墙壁后面的人体的探测和成像,且具有很好的成像精度;最小时间法也能很好地补偿墙壁对信号速度以及折射的影响。

## 参 考 文 献

- [1] WANG G, AMIN M G. Imaging through unknown walls using different standoff distances[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2006, 54: 4015-4025.
- [2] ALLAN R, HUNT A. Wideband imaging radar for through-the-wall surveillance[J]. SPIE, 2004, 5403: 590-596.
- [3] HUNT A R. Image formation through walls using a distributed radar sensor array[C]//Proceedings of the 32nd Applied Imagery Pattern Recognition Workshop (AIPR'03). [S.l.]: IEEE, 2003.
- [4] BOREK S E. An overview of through the wall surveillance for homeland security[C]//Proceedings of the 34th Applied Imagery and Pattern Recognition Workshop (AIPR05). [S.l.]: IEEE, 2005.
- [5] GREG B. Through-wall synthetic aperture radar(TWSAR) 3D imaging [R]. Canada: DRDC Ottawa, 2004.
- [6] AHMAD F, AMIN M G, KASSAM S A. A beamforming approach to stepped-frequency synthetic aperture through-the-wall radar imaging[C]// Computational Advances in Multi-Sensor Adaptive Processing, 2005 1st IEEE International Workshop. [S.l.]: IEEE, 2005.
- [7] AHMAD F, FRAZER G J, KASSAM S A, et al. Design and implementation of near-field, wideband synthetic aperture beamformers[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2004, 40(1): 206-220.
- [8] AHMAD F, AMIN M G, KASSAM S A. Synthetic aperture beamformer for imaging through a dielectric wall[J]. IEEE Trans AES, 2005, 41(1): 271-283.
- [9] JOHANSSON E M, JEFFREY E. Mastthree-dimensional ground penetrating radar imaging using synthetic aperture time-domain focusing[C]//Proc of SPIE Conference on Advanced Microwave and Millimeter Wave Detectors. San Diego, USA: SPIE, 1994.

编辑 税 红