

· 通信与信息工程 ·

超宽带脉冲穿墙雷达互相关BP成像

王 宏, 周正欧, 李廷军, 孔令讲

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

【摘要】根据超宽带脉冲穿墙雷达目标回波信号与发射信号具有较强相关性的特点, 提出一种新的互相关后向投影(BP)成像算法, 该算法将沿天线合成孔径方向各接收阵元的回波信号与发射信号先进行互相关, 将获得的互相关信号再利用BP算法进行相干成像。与回波信号进行直接BP成像相比, 该算法具有消除脉冲建立时间对回波延迟时间估计误差的影响, 提高目标成像的位置精度; 能有效抑制背景噪声, 提高图像信噪比。利用时域有限差分(FDTD)方法对穿墙场景进行电磁仿真, 通过对成像方法结果的比较, 表明互相关BP成像算法在成像位置精度和图像信噪比方面明显优越于直接BP成像算法。

关键词 BP成像; 互相关BP成像; 时域有限差分; 超宽带脉冲穿墙雷达

中图分类号 TN959.1

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2011.01.003

Cross-Correlation BP Algorithm for UWB Pulse Through-Wall Radar

WANG Hong, ZHOU Zheng-ou, LI Ting-jun, and KONG Ling-jiang

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

Abstract According to the strong correlation between the transmit signal and received signal of UWB pulse through-wall radar, a cross-correlation back-propagation (BP) algorithm is proposed. The cross-correlation signals between received signals and transmit signal are first formed and then are used to generate their coherent imaging by using BP algorithm. The electromagnetic models for through wall scenarios are setup based on FDTD method. Imaging results of two methods show that the cross-correlation BP algorithm has great advantages than general BP algorithm at the aspects of improving the target imaging localization precision and the signal noise ratio of the imaging.

Key words BP algorithm; cross-correlation BP algorithm; FDTD; UWB pulse through wall radar

超宽带穿墙雷达是近几年国内外雷达应用领域的研究热点。由于其具有硬件成本低、便携性好及实时处理等优点, 在军事装备、城市安全、火灾及地震等自然灾害搜救方面有着广泛的应用前景。其中, 超宽带脉冲穿墙雷达是一种被广泛采用的雷达体制, 通过发射超宽带脉冲信号对墙后探测区域进行扫描, 获得该区域的回波信号。回波信号中包含目标的反射信息, 利用BP成像算法对回波信号进行相干叠加成像, 可以实现对目标的检测、成像、定位和跟踪^[1-6]。

本文根据雷达发射信号和接收信号具有较强相关性的特点, 对超宽带脉冲穿墙雷达一般BP成像算法进行改进, 提出互相关BP成像算法, 即接收天线在沿着合成孔径方向各个位置处的接收信号分别与

发射信号进行互相关运算, 得到的互相关信号再进行BP成像。

1 互相关BP成像算法

采用互相关BP成像的脉冲穿墙雷达系统的工作原理如图1所示。脉冲信号发生器产生的脉冲信号通过功分器分成2路, 一路经功率放大器后通过发射天线辐射出去, 一路与接收天线经低噪声放大器后的接收信号进行数字互相关, 最后再将互相关信号进行BP成像。

下面以真空中的电磁波传播为例说明互相关信号延迟时间精确性。假设发射信号为简单的超宽带高斯脉冲, 如图2a中曲线所示, 其中 t_0 是脉冲建立时间(从信号开始发射到脉冲幅值达到最大值的0.707

收稿日期: 2009-09-07; 修回日期: 2009-12-09

基金项目: 国家自然科学基金(60802063); 云南省科技计划项目(2009CA021)

作者简介: 王 宏(1975-), 女, 博士, 主要从事雷达信号处理方面的研究。

倍时的时间)。如不考虑信号失真, 接收的目标回波信号如图2b中曲线所示。目标回波信号相对于发射信号的实际延迟时间为 τ , 其中 $\tau=2d/c$, d 为目标到雷达的距离, c 为电磁波在真空中的传播速度。从脉冲起始时刻到目标回波信号上升沿的时间 $t_1=t_0+\tau$ 。对于一般的窄脉冲穿墙雷达, 其合成孔径成像过程是直接将沿天线孔径方向的 M 个接收回波进行相干叠加成像, 没有考虑脉冲建立时间 t_0 对成像目标位置的影响, 成像的目标位置 $d'=ct_1/2=ct_0/2+d$ 。故一般超宽带脉冲穿墙雷达BP成像获得的目标位置比真实目标位置远 $ct_0/2$ 。脉冲建立时间 t_0 一般大于1 ns, 所以会引起成像目标位置几十厘米的偏差。在实际的脉冲穿墙雷达中, 为了提高天线的辐射效率, 一般发射信号采用无载波的不含直流分量的微分高斯脉冲, 但同样存在脉冲建立时间, 会造成由于脉冲建立时间引起的成像位置偏差。

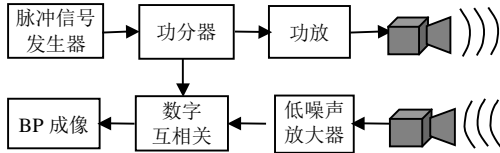


图1 脉冲穿墙雷达互相关成像系统工作原理图

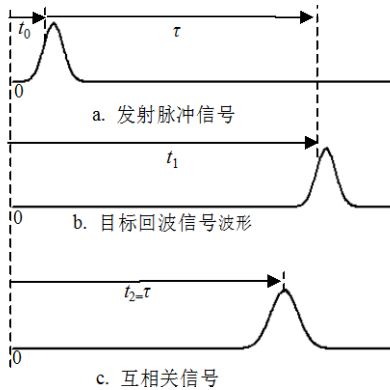


图2 发射脉冲与回波信号及二者的互相关信号时域图

由于目标回波信号与发射信号具有较强的相关性, 二者进行互相关运算后的互相关信号如图2c中曲线所示。从脉冲起始时刻到相关峰值处的时间 $t_2=\tau$ 。因此将接收回波与发射信号先进行互相关再成像, 目标定位准确, 称之为互相关BP成像算法。另外, 互相关BP成像还可以有效抑制噪声, 具体原理如下。

假设超宽带脉冲雷达发射信号为 $s(t)$, 接收信号 $r(t)$ 可表示为:

$$r(t) = \int_{-L/2}^{L/2} \rho(\zeta) s(t-\zeta) d\zeta + n(t) \quad (1)$$

式中, $\rho(t)$ 为一维目标反射函数; $n(t)$ 为加性噪声,

包括各种背景噪声和干扰; L 表示接收信号的扫描时间。

将发射信号与接收信号进行互相关, 互相关信号 $g(t)$ 为:

$$\begin{aligned} g(\tau) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T/2}^{T/2} r(t) s^*(t-\tau) dt = \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T/2}^{T/2} \int_{-L/2}^{L/2} \rho(\zeta) s(t-\zeta) s^*(t-\tau) d\zeta dt + \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T/2}^{T/2} n(t) s^*(t-\tau) dt = \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-L/2}^{L/2} \rho(\zeta) p(\tau-\zeta) d\zeta = \\ &= p(\tau) \otimes p(\tau) \end{aligned} \quad (2)$$

式中, T 表示互相关积分时间; “ \otimes ”表示卷积运算; τ 表示接收信号相对发射信号的延迟时间; $p(t)$ 为发射信号的自相关函数, 定义为:

$$p(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T/2}^{T/2} s(t) s^*(t-\tau) dt \quad (3)$$

由于发射信号和噪声不具有相关性, 所以式(2)推导过程中的第二项趋于0。由此可以看出互相关运算对接收信号中的噪声有很大的抑制作用。由以上分析可以看出, 互相关BP算法具有成像位置准确和抑制噪声的优点。下面具体描述互相关BP成像算法的步骤。

首先将接收信号与发射信号进行互相关运算, 得到互相关信号 $g(t)$, 对 $g(t)$ 进行希尔伯特(Hilbert)变换, 获得复互相关信号的幅度 $G(t)$:

$$G(t) = |g(t) + jH\{g(t)\}| \quad (4)$$

式中, $H\{\cdot\}$ 表示进行Hilbert变换; $|\cdot|$ 表示取幅值。

假设超宽带脉冲穿墙雷达工作于单基站方式, 合成孔径沿 x 轴方向共进行 M 次测量。当天线位置在 X_m 处, 考虑墙的折射, 其二维合成孔径成像的几何图形如图3所示。其中天线坐标为 (x_m, y_m) , 墙的厚度为 d , 相对介电常数和电导率分别用 ϵ_r 和 σ 表示, q 是目标成像区域内的任意一像素点, 坐标为 (x_q, y_q) 。目标区域被划分成若干个像素, 采用互相关BP算法, 像素点 q 的信号 $r_q(t)$ 是各接收天线的互相关信号在不同延迟时间的采样信号相加, 为:

$$r_q(t) = \sum_{m=1}^M G_m(t) \delta(t-\tau_{mq}) = \sum_{m=1}^M G_m(t) \delta\left(t - \frac{2R_{mq}}{c}\right) \quad (5)$$

式中, $G_m(t)$ 为第 m 个接收信号与发射信号的互相关信号的瞬时幅值; τ_{mq} 为像素点 q 到第 m 个收发天线对的延迟时间; R_{mq} 为该两点间的等效于空气中的单向传播距离, 具体计算见参考文献[2]。

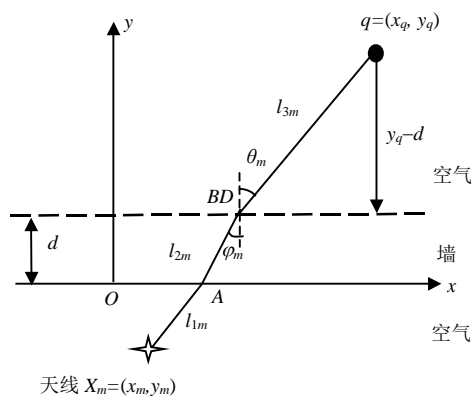


图3 二维合成孔径成像的几何图形

2 电磁模型及成像结果

采用FDTD方法建立的穿墙成像三维模型如图4所示。一个人站在房间中央，距前墙前表面2.0 m，房间内部长5 m、宽4 m、高3 m，前墙前表面位于x轴。四面墙壁以及地板和天棚厚度均为0.2 m，为混凝土结构，其介电常数和电导率取值见表1。人体皮肤和各内器官电参数特性与脂肪的电参数特性等效，介电常数和电导率取值见参考文献[9]。发射电磁波的波形为无载波微分高斯脉冲，最高频率为1 GHz，带宽为0.4 GHz，发射方向朝向房间正前方。在房间前面沿合成孔径方向放置了41个接收点(如图4中圆点所示)，每个接收点距离前墙0.2 m，相邻接收点之间的距离为0.12 m，整个合成孔径长度为4.8 m。

表1 模型目标材料、尺寸及电参数特性

目标	材料	尺寸	电参数特性
墙壁	混凝土	厚度0.2 m	$\epsilon_r=4.5, \sigma=0.03 \text{ S/m}$
人	皮肤和内 脏器官	0.2 m×1.65 m (躯干半径×身高)	$\epsilon_r=50, \sigma=1 \text{ S/m}$

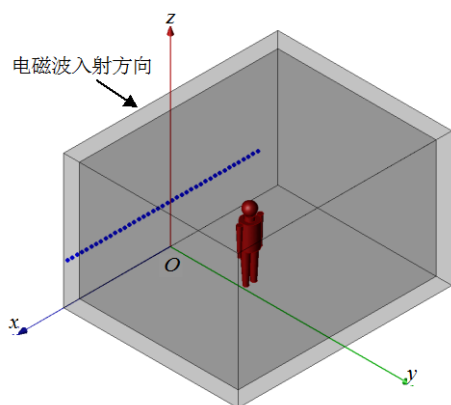


图4 穿墙雷达成像三维模型

图5为中间天线接收信号和互相关信号Hilbert变换幅值。其中，接收信号曲线中人的反射峰值对应的延迟时间是18.09 ns，互相关信号曲线中人的反射峰值对应的延迟时间是15.94 ns，通过计算中间到

人的实际延迟时间为16.16 ns。所以，互相关信号的延迟时间误差为0.22 ns，远远小于接收信号的延迟时间误差1.93 ns。

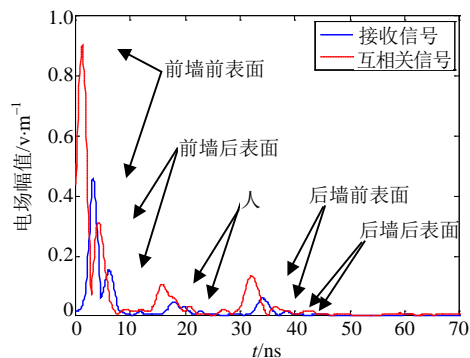
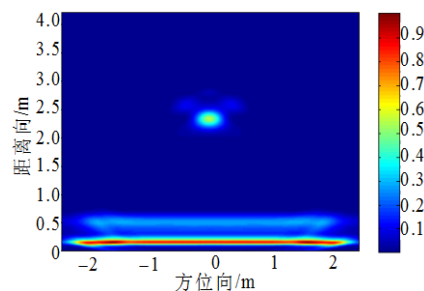
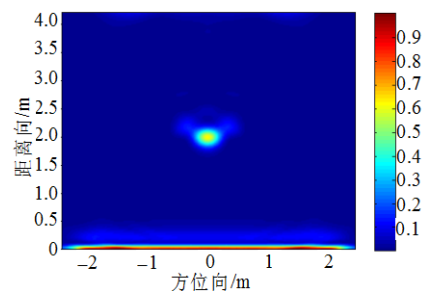


图5 中间天线接收信号和互相关信号Hilbert变换幅值

图6为图4模型在无噪声理想情况下的仿真成像结果，其中图6a是回波数据直接BP成像，图6b是互相关BP成像。人的中心位置坐标为(0,2) m，可以看出采用互相关BP成像人的位置非常准确，基本在实际位置(0,2) m处，而采用直接BP成像人的位置则明显偏后，在(0,2.3) m处，比真实位置偏后约0.3 m。



a. 直接BP成像



b. 互相关BP成像

图6 一个人在房间内无噪声下的成像

由于实际系统中噪声不可避免，因此在回波信号中添加高斯白噪声模拟有噪声情况，然后通过截止频率为1 GHz的低通滤波器进行数字滤波，滤波后的数据分别采用直接BP成像和互相关BP成像算法进行二维合成孔径成像。

图7为图4模型的仿真成像结果。与图6相比，添加了一定的高斯白噪声，信噪比为-5 dB。可以看出，在有噪声情况下互相关BP成像对噪声有较大的抑制

作用, 成像结果中背景噪声小、人像较清晰、位置准确。因此采用互相关BP成像不仅提高了图像的信噪比, 而且成像位置准确。

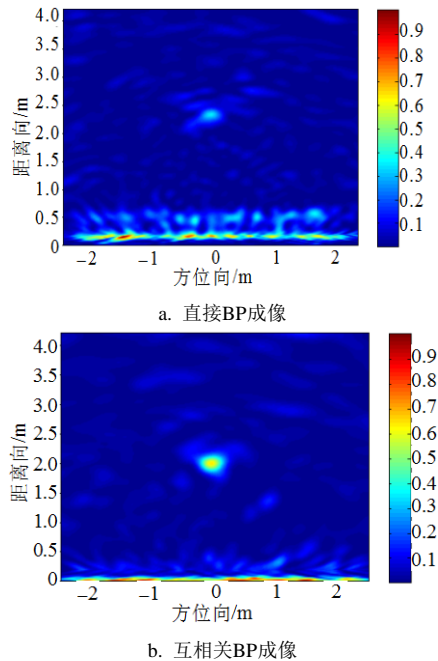


图7 图4模型的仿真成像结果

图8是两个人在空房间内的成像结果, 位置坐标分别是 $(-0.5, 1.5)$ m的A和 $(0.5, 2.5)$ m的B, 信噪比仍为 -5 dB。在图8a中, 采用回波信号直接BP成像, 人A的像比较清晰, 但位置也是延后约 0.3 m; 人B的像很模糊, 基本淹没在背景噪声中, 不能识别。在图8b中, 采用互相关BP成像, 人A和人B的像均清晰可见, 而且成像位置准确。

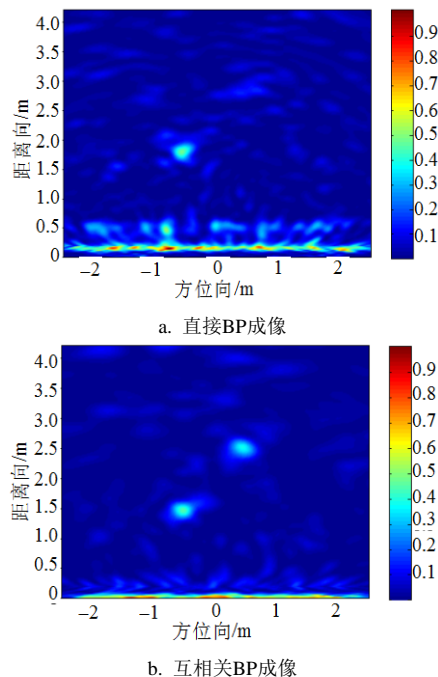


图8 两个人在房间内的成像结果

3 结束语

针对超宽带脉冲穿墙雷达接收信号和发射信号具有较强相关性的特点, 本文提出了一种互相关BP成像算法, 将接收信号与发射信号先进行互相关, 再将得到的互相关信号进行相干叠加成像。理论分析和仿真成像结果均表明, 互相关BP成像不仅能够有效地消除由于脉冲建立时间引起的位置误差, 提高目标成像位置精度; 而且还能有效抑制噪声, 提高图像信噪比, 使目标像更清晰。

参考文献

- [1] SONG L P, YU C, LIU Q H. Through-wall imaging (TWI) by radar: 2-D tomographic results and analyses[J]. IEEE Trans-Geosci Remote Sens, 2005, 43(12): 2793-2798.
- [2] AHMAD F, AMIN M G, KASSAM S A. Synthetic aperture beamformer for imaging through a dielectric wall[J]. IEEE Trans-Aerosp Electron Syst, 2005, 41(1): 271-283.
- [3] AHMAD F, AMIN M G, MANDAPATI G. Autofocusing of through-the-wall radar imagery under unknown wall characteristics[J]. IEEE Trans-Image Process, 2007, 16(7): 1785-1795.
- [4] NGUYEN L, LE C, GAUNAURD G C. Computerized tomographic radar target imaging behind opaque walls[J]. Optical Engineering, 2007, 46(7): 076201.
- [5] DEHMOLLAIAN M, THIEL M, SARABANDI K. Through-the-wall imaging using differential SAR[J]. IEEE Trans-Geosci Remote Sens, 2009, 47(5): 1289-1296.
- [6] DOGARU T, LE C. SAR images of rooms and buildings based on FDTD computer models[J]. IEEE Trans-on Geosci Remote Sens, 2009, 47(5): 1388-1401.
- [7] NARAYANAN R M, XU X, HENNING J A. Radar penetration imaging using ultra-wideband (UWB) random noise waveforms[J]. IEE Proc-Radar Sonar Navig, 2004, 151(3): 143-148.
- [8] 张旻, 程家兴, 樊甫华, 等. 利用Hilbert变换提取信号瞬时特征参数的问题研究[J]. 电讯技术, 2003, 43(4): 44-48. ZHANG Min, CHENG Jia-xing, FAN Fu-hua, et al. Study on the problems in extracting instantaneous characters of signals based on hilbert transform[J]. Telecommunication Engineering, 2003, 43(4): 44-48.
- [9] DOGARU T, NGUYEN L. FDTD models of electromagnetic scattering by the human body[C]//IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Albuquerque, US: IEEE, 2006: 1995-1998.

编辑 税红