

一种新的 MIMO 线阵穿墙成像模型及其环境参数估计

宋勇平 金添* 陆必应 周智敏

(国防科学技术大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘要: 通过估计墙体厚度及介电常数等环境参数来进行补偿成像是近年来穿墙雷达成像研究领域的热点。为解决传统穿墙成像模型中天线需要严格平行于墙体的限制,以及现有的环境参数估计算法计算效率低,稳健性较差的问题,该文建立了一种新的多发多收(MIMO)体制穿墙雷达成像模型以适应阵列与墙体位置关系未知的情况,同时根据该模型下墙体前后沿回波路径模型,提出一种仅依赖于墙体回波时延的环境参数估计算法,稳健性高并且运算复杂度低。时域有限差分(FDTD)仿真数据验证了成像模型和环境参数估计算法的有效性。

关键词: 穿墙雷达; 环境参数估计; MIMO 线阵

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)12-2980-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2014.00018

A Novel Linear MIMO Array Through-the-wall Imaging Model and Its Associated Environmental Parameters Estimation

Song Yong-ping Jin Tian* Lu Bi-ying Zhou Zhi-min

(College of Electronics Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Through-the-wall radar imaging by estimating the wall thickness and the dielectric constant is a hot research field in recent years. In order to lift strict restriction that the antenna should parallel to the wall in the traditional through-wall imaging model, and to solve the existing environmental parameters estimation algorithm with low computational efficiency and poor robustness problem, a novel linear MIMO array through-wall imaging model is proposed to adapt to the situation with unknown positional relationship between the array and the wall. Furthermore, based on the analysis of the echo path of the front and rear walls, this paper also presents a novel environmental parameters estimation algorithm with high estimation robustness and low computational complexity. Comparing to the conventional environmental parameters estimation algorithm, this proposed algorithm needs neither extra operations nor special targets to assist. The results calculated from Finite Difference Time Domain (FDTD) simulation verify the effectiveness of the proposed imaging model and environmental parameters estimation algorithm.

Key words: Through-the-wall radar; Environmental parameters estimation; Linear MIMO array

1 引言

穿墙雷达是利用电磁波的低频穿透特性穿透墙壁,对隐蔽在其后的目标进行探测的雷达系统,在反恐斗争、灾害救援、城市巷战等领域都有广阔的应用前景,成为近年来雷达领域的研究热点^[1]。传统穿墙雷达只能检测目标有无或简单的定位^[2],而具备成像能力的穿墙雷达则可以获得目标的2维甚至3维图像^[3-5],逐渐成为穿墙雷达的研究热点。目前最常见的是利用MIMO体制的穿墙雷达进行2维成像,用于探测墙后人员^[6-8]或建筑物内部结构布局^[9,10]。

对墙后目标探测时,电磁波在空气和墙体界面会发生反射和折射。成像时必须考虑墙体厚度和介电常数的影响。目前大部分穿墙成像算法的研究都是建立在给定墙体参数的前提下^[11-13],实际应用中这些参数通常未知,其误差将对墙后目标的聚焦与定位带来很大影响^[14]。

已经有若干文献提出了墙体参数估计算法。如通过调整阵列结构^[15]或阵列到墙体的距离^[16]实现墙体参数估计,由于引入了额外操作,实现较为繁琐。图像自聚焦技术^[17]则通过检测不同墙体参数组合下的成像质量实现参数估计,检测过程中的多次成像导致其计算效率低下。利用墙体回波信息推算反射系数进而确定墙体参数的算法^[18]由于需要估计墙体回波幅度,实际测量时易受墙体结构和噪声影响,稳健性较低。文献[19]通过图像域滤波实现墙体参

2014-01-03 收到, 2014-05-19 改回

国家自然科学基金(61271441, 61372161)和国防科技大学科研计划(CJ12-04-02)资助课题

*通信作者: 金添 tianjin@nudt.edu.cn

数估计，由于需要墙后强散射点的辅助，其实用性受到影响。

另一方面，上述算法在成像模型中假设阵列与墙体平行且距离已知，而实际应用时这一假设难以满足。因此，未知参数不仅包括墙体厚度和介电常数，也应包括阵列与墙体的相对位置信息如距离及对应的倾斜角。此4种未知参数在本文中合称为环境参数。

本文从MIMO线阵体制的穿墙雷达出发，建立了一种新的穿墙成像模型以适应阵列与墙体相对位置未知的情况，并提出了相应的基于时延信息的环境参数估计算法，与传统算法相比，不需要额外的操作与重复成像，也不需要墙后特定目标的辅助，实用性与计算效率都有明显提高。有限时域差分(Finite Difference Time Domain, FDTD)算法的仿真数据验证了算法的有效性和稳定性。

2 MIMO线阵穿墙成像建模

传统MIMO线阵穿墙成像模型中，假设阵列严格平行于墙体，如图1(a)，实际中受探测场景等因素限制，该假设不一定能满足，因此有必要进一步考虑阵列倾斜于墙体的情况。

如图1(b)，一具有 M 个发射阵元和 N 个接收阵元的线阵，相对于墙体倾斜角为 θ ，中心到墙体的距离为 R ，墙体厚度为 d ，介电常数为 ϵ_r ，实际应用中四者通常未知。图中粗实线即为墙体前沿回波路径，粗虚线则为墙体后沿回波路径。设第 m 个发射单元 TX_m 位于两次回波路径的交点 A ，到墙体距离为 R_m ，第 n 个接收单元 RX_n 位于交点 B ， AB 间距为 L_{mn} 。墙体前沿回波反射点为 C ，后沿回波反射点为 D ，折射点分别为 E 和 F 。

过 B 点做墙体平行线，交 AE 于 G ，取 AG 中点为 A' ，过 A' 做墙体平行线，交 BF 的反向延长线于 B' 。可以证明，针对墙体前后沿回波的路径长度，阵元对 AB 等效于平行于墙体的虚拟阵元对 $A'B'$ 。其中 $A'B'$ 间距为 $L_{mn}\cos\theta$ ，当 TX_m 相对 RX_n 远离墙体时， $A'B'$ 到墙体的距离为 $R_m - 0.5L_{mn}\sin\theta$ ，反之则为 $R_m + 0.5L_{mn}\sin\theta$ 。

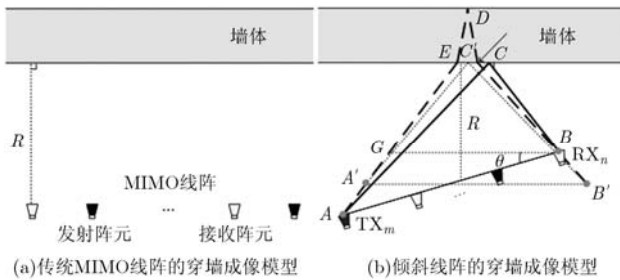


图1 穿墙成像模型

从而对于墙体前后沿回波时延，倾斜于墙体的MIMO线阵可等效为若干连线平行于墙体的虚拟阵元对。

3 MIMO线阵穿墙成像模型的环境参数估计

如图1(b)，当 TX_m 相对 RX_n 远离墙体时，设 $L_{mn} = |L_{mn}|$ ，否则设 $L_{mn} = -|L_{mn}|$ ，从而由几何关系可知

$$c^2 t_f^2(m, n) - L_{mn}^2 = 4R_m^2 - 4L_{mn}R_m \sin\theta \quad (1)$$

其中， c 为光在空气中的传播速度， $t_f(m, n)$ 为 TX_m 和 RX_n 在墙体前沿产生的回波时延。

记 $g_{mn} = c^2 t_f^2(m, n) - L_{mn}^2$ ， $h_{mn} = (4 - 4L_{mn})$ ， $\mathbf{E}_m = (R_m^2 R_m \sin\theta)^T$ ，则有

$$g_{mn} = h_{mn} \mathbf{E}_m \quad (2)$$

综合全部由 TX_m 产生的回波数据有

$$\mathbf{G}_m = \mathbf{H}_m \mathbf{E}_m \quad (3)$$

其中 $\mathbf{G}_m = (g_{m1} g_{m2} \cdots g_{mN})^T$ ， $\mathbf{H}_m = (h_{m1} h_{m2} \cdots h_{mN})^T$ 。于是有

$$\mathbf{E}_m = \begin{bmatrix} e_{m1} \\ e_{m2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_m^2 \\ R_m \sin\theta \end{bmatrix} = (\mathbf{H}_m^T \mathbf{H}_m)^{-1} \mathbf{H}_m^T \mathbf{G}_m \quad (4)$$

从而得到 TX_m 关于墙体距离和倾斜角的估计为

$$\begin{bmatrix} \hat{R}_m \\ \hat{\theta}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{e_{m1}} \\ \arcsin(e_{m2}/\sqrt{e_{m1}}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

对全部回波数据做相同处理，则有

$$\hat{\mathbf{R}}_E = (\hat{R}_1 \hat{R}_2 \cdots \hat{R}_M)^T, \quad \hat{\boldsymbol{\theta}}_E = (\hat{\theta}_1 \hat{\theta}_2 \cdots \hat{\theta}_M)^T \quad (6)$$

对 $\hat{\boldsymbol{\theta}}_E$ 中的元素取平均作为最终倾角 θ 的估计为

$$\hat{\theta} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \hat{\theta}_m \quad (7)$$

相应地，对 $\hat{\mathbf{R}}_E$ 的元素做加权平均作为最终阵列中心到墙体距离的估计为

$$\hat{R} = \sum_{m=1}^M w_m \hat{R}_m \quad (8)$$

其中 w_m 为取决于阵列本身结构的权值。

记平行于墙体的等效虚拟阵元对为 $TX_{m'}$ 和 $RX_{n'}$ ，其间距 $\hat{L}_{m'n'}$ 和到墙体的距离 $\hat{R}_{m'n'}$ 为

$$\hat{L}_{m'n'} = L_{mn} \cos\hat{\theta}, \quad \hat{R}_{m'n'} = \hat{R}_m - 0.5L_{mn} \sin\hat{\theta} \quad (9)$$

此时根据文献[20]可得方程：

$$d^2 \epsilon_r - d^2 \frac{L_{m'n'}^2}{L_{m'n'}^2 + 4\hat{R}_{m'n'}^2} = 0.25c^2 t_d^2(m, n) \quad (10)$$

$t_d(m, n)$ 表示 TX_m 和 RX_n 在墙体前后沿产生的回波时延差，综合全部的回波数据并设

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{L_{1'1'}^2}{L_{1'1'}^2 + 4\widehat{R}_{1'1'}^2} \\ 1 & -\frac{L_{1'2'}^2}{L_{1'2'}^2 + 4\widehat{R}_{1'2'}^2} \\ \vdots & \vdots \\ 1 & -\frac{L_{M'N'}^2}{L_{M'N'}^2 + 4\widehat{R}_{M'N'}^2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{p} = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d^2 \varepsilon_r \\ d^2 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} 0.25c^2 t_d^2(1,1) \\ 0.25c^2 t_d^2(1,2) \\ \vdots \\ 0.25c^2 t_d^2(M,N) \end{bmatrix} \quad (11)$$

则有

$$\mathbf{A}\mathbf{p} = \mathbf{b} \quad (12)$$

从而

$$\mathbf{p} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b} \quad (13)$$

最终得到墙体厚度 d 与介电常数 ε_r 的估计分别为

$$\hat{d} = \sqrt{p_2}, \quad \hat{\varepsilon}_r = p_1/p_2 \quad (14)$$

4 仿真数据处理

设置 FDTD 仿真场景如图 2。墙体长 2 m，厚度为 0.2 m，介电常数为 4.5。直线阵列总长 2 m，

中心距墙 1.5 m，与墙体平行线成 15° 夹角。41 个阵元均匀分布，其中 2 个发射阵元位于阵列两端，由此构成 78 个收发通道。发射时宽 0.6 ns 的高斯一阶微分信号。墙后有 5 个金属二面角，其前沿平行于墙体后沿。仿真场景外使用最佳匹配层进行截断。

4.1 环境参数估计结果

信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)为 15 dB 时回波如图 3(a)，由图 1(b)所示的成像模型可知匹配滤波后 3 个最强峰值的位置，即为直达波、墙体前沿回波、墙体后沿回波的时延位置。其墙体前后沿回波时延提取结果与理论值对比如图 3(b)。可见，成像模型和仿真数据之间得到了较好的吻合。

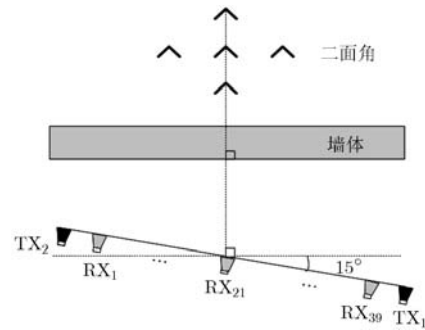
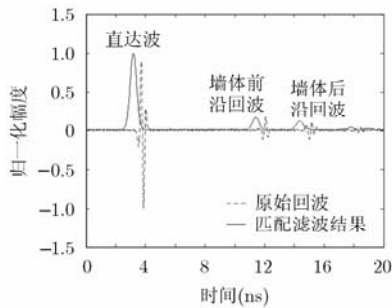
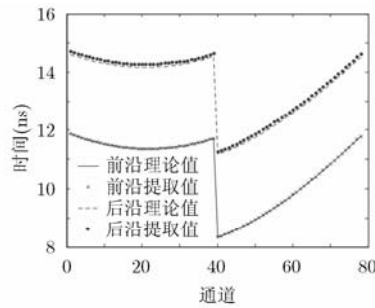


图 2 FDTD 仿真场景



(a) TX₂对RX₂₁的回波



(b)全通道墙体前后沿回波时延提取结果

图 3 墙体前后沿回波时延提取结果

表 1 不同信噪比下 4 种环境参数的估计结果(均值±标准差)

	SNR (dB)	R (m)	θ (°)	d (m)	ε_r
估计值	-5	1.53±0.07	16.09±4.35	1.86±2.43	1.32±5.39
	0	1.50±0.04	15.03±1.06	0.24±0.15	4.13±2.29
	5	1.50±0.01	15.05±6.27e-5	0.19±6.87e-5	4.68±0.13
	10	1.50±0.01	15.06±2.89e-5	0.19±1.18e-5	4.72±0.03
	15	1.50±4.16e-5	15.06±2.12e-5	0.19±5.36e-6	4.72±0.01
预设值		1.50	15.00	0.20	4.50

提取出前后沿回波时延后，即可进行环境参数估计。不同信噪比下环境参数估计统计结果如表 1。随着信噪比的增加，估计值与实际值之间的总体误差不断变小，信噪比超过 5 dB 时，估计结果趋于平稳。可见，本文提出的算法能够有效实现环境参数估计。

4.2 成像结果对比

MIMO 雷达极大提高了雷达的探测能力，代价是成像模型的复杂化，许多传统的合成孔径雷达成像算法不再适用^[21]，而后向投影(Back-Projection, BP)算法由于不受天线阵列形式限制，广泛应用于 MIMO 雷达成像。BP 算法通过计算成像点到收发天线阵元的传播时延来替代相位补偿^[22]，实现目标聚焦。

求解传播时延的关键在于确定回波在墙体前沿的折射点位置。利用估计出的墙体参数，可由 Snell 定律建立一元四次方程精确求解^[23]，或是根据最短时间准则搜索^[24]，为避免求解精确解带来的巨大运算开销，文献[20]则提出了可实用的近似解求法，

从而利用环境参数可实现墙后目标的快速补偿成像。对 SNR=15 dB 时的仿真数据进行补偿成像，同时给出直接 BP 成像的结果作为对比，如图 4 所示。

传统 BP 成像时，多以阵列本身为 x 轴，以阵列垂线为 y 轴建立天线坐标系。当阵列与墙体存在倾斜角时，墙后目标在成像场景中处于倾斜状态，如图 4(a)，补偿时需要增加额外操作来完成目标定位。更有效的方法是根据 \hat{R} 和 $\hat{\theta}$ 以墙体为坐标轴建立墙体坐标系成像，如图 4(b)，此时墙后目标仅存在位置滞后和散焦现象，进一步利用 \hat{a} 和 \hat{e}_r 对墙后场景进行补偿，如图 4(c)。图 4(b)和图 4(c)中目标的位置变化结果如表 2。环境参数补偿有效修正了墙后目标的位置偏差。

分析补偿前后二面角像的主瓣 3 dB 宽度变化，可得环境参数补偿对成像质量的影响。以 1 号目标为例，其主瓣剖面如图 5。注意到纵向分辨率补偿前后变化很小，这是由于纵向分辨率主要取决于信号带宽。5 个目标补偿前后的主瓣 3 dB 宽度变化如表 3。

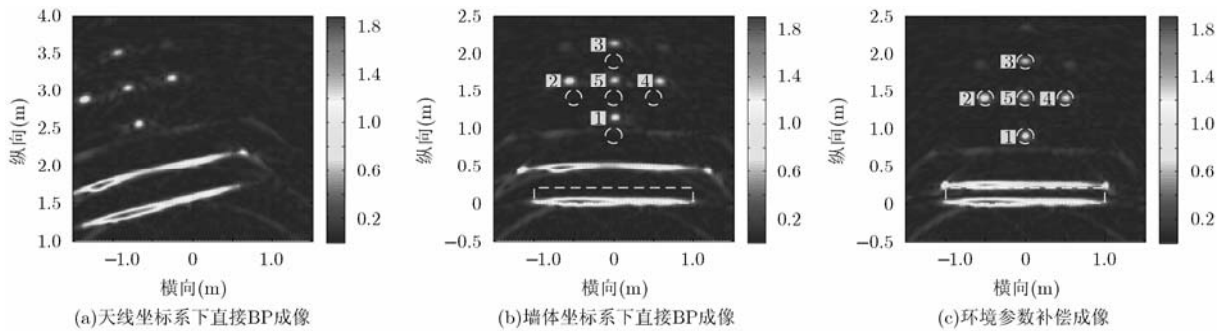


图 4 补偿前后成像结果对比

表 2 补偿前后目标位置变化(m)

	1 号	2 号	3 号	4 号	5 号
补偿前	(0.02,1.13)	(-0.56,1.63)	(0.02,2.13)	(0.58,1.63)	(0.01,1.64)
补偿后	(0.00,0.90)	(-0.51,1.40)	(0.00,1.90)	(0.52,1.40)	(0.00,1.40)
预设值	(0.00,0.90)	(-0.50,1.40)	(0.00,1.90)	(0.50,1.40)	(0.00,1.40)

表 3 补偿前后目标的主瓣 3 dB 宽度变化(m)

		1 号	2 号	3 号	4 号	5 号
纵向	补偿前	0.104	0.101	0.091	0.099	0.990
	补偿后	0.102	0.101	0.089	0.099	0.980
横向	补偿前	0.113	0.150	0.149	0.137	0.132
	补偿后	0.099	0.132	0.136	0.123	0.118

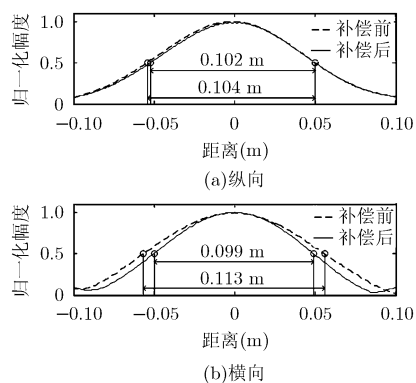


图5 1号目标补偿前后主瓣3 dB宽度变化

可知, 利用环境参数补偿成像可以有效改善成像质量, 提高对目标的分辨能力。

5 结束语

本文针对 MIMO 线阵穿墙雷达系统提出了一种新的适用性更广的穿墙成像模型及其环境参数估计方法, 相关的仿真结果验证了算法的有效性。从仿真结果中可知, 本文提出的算法具有较好的估计性能, 利用获得的环境参数, 可以改善穿墙成像中墙后目标存在位置偏差和散焦的现象, 便于提高穿墙探测的性能。

基于时延信息的环境参数估计算法性能受限于墙体前后沿回波时延的估计精度。对于墙体前沿, 回波模型依然为自由空间传播模型, 传统的相关估计算法仍适用; 而墙体后沿回波存在折射现象, 实际墙体并不严格为单层均匀介质, 色散和衰减效应会导致信号畸变, 传统算法难以奏效, 此时需要进一步结合解卷积等算法实现其时延估计。

参考文献

- [1] Baranoski J. Through-wall imaging historical perspective and future directions[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2008, 345(6): 556-569.
- [2] Sisma O, Gangué A, Liebe C, et al. UWB radar: vision through the wall[J]. *Soldering and Surface Mount Technology*, 2008, 38(1/2): 53-59.
- [3] Song Lin-ping, Yu Chun, and Liu Qing-huo. Through Wall Imaging (TWI) by radar: 2-D tomo graphic results and analyses[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(12): 2793-2798.
- [4] Debes C, Amin M G, and Zoubir A M. Target detection in single- and multiple-view through-the-wall radar imaging[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(5): 1349-1361.
- [5] Kidera Shouhei, Sakamoto Takuya, and Sato Toru. High resolution 3-D imaging algorithm with an envelope of modied spheres for UWB through-the-wall radars[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2009, 57(11): 3520-3529.
- [6] Chetty K, Smith G E, and Woodbridge K. Through-the-wall sensing of personnel using passive bistatic WiFi radar at standoff distances[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(4): 1218-1226.
- [7] 束永江. 穿墙生命探测雷达接收技术研究[J]. *中国电子科学研究院学报*, 2011, 6(6): 648-651.
- [8] Shu Yong-jiang. The research on receiver technology of the through-the-wall surveillance radar[J]. *Journal of China Academy of Electronics*, 2011, 6(6): 648-651.
- [9] Li Jing, Zeng Zhao-fa, Sun Ji-guang, et al. Through-wall detection of human being's movement by UWB radar[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(6): 1079-1083.
- [10] Aftanas M and Drutarovsky M. Imaging of the building contours with through the wall UWB radar system[J]. *Radio Engineering*, 2009, 18(3): 258-264.
- [11] Chang P C. Physics-based inverse processing and multipath exploitation for through-wall radar imaging[D]. [Ph.D.dissertation], The Ohio State University, 2011.
- [12] Browne K E, Burkholder R J, and Volakis J L. Fast optimization of through-wall radar images via the method of lagrange multipliers[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(1): 320-328.
- [13] Chen Pin-heng and Narayanan R M. Shifted pixel method for through-wall radar imaging[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2012, 60(8): 3706-3716.
- [14] Wang Ya-zhou and Fathy A E. Advanced system level simulation platform for three-dimensional UWB through-wall imaging SAR using time-domain approach[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(5): 1986-2000.
- [15] Liu Xiao-xiang, Leung H, and Lampropoulos G A. Effect of wall parameters on ultra-wideband synthetic aperture through-the-wall radar imaging[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2012, 48(4): 3435-3449.
- [16] Wang G Y, Amin M G, and Zhang Y M. A new approach for target locations in the presence of wall ambiguities[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System*, 2006, 42(1): 301-315.
- [17] Wang G Y and Amin M G. Imaging through unknown walls using different standoff distances[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2006, 54(10): 4015-4025.
- [18] Li Lian-lin, Zhang Wen-ji, and Li Fang. A Novel autofocusing approach for real-time through-wall imaging under unknown wall characteristics[J]. *IEEE Transactions*

- on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(1): 423-431.
- [18] Aftanas M, Sachsy J, Drutarovsky M, *et al.* Efficient and fast method of wall parameter estimation by using UWB radar system[J]. *Frequenz Journal*, 2009, 63(11/12): 231-235.
- [19] Jin Tian, Chen Bo, and Zhou Zhi-min. Image-domain estimation of wall parameters for auto focusing of Through-the-wall SAR imagery[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(3): 1836-1843.
- [20] Jin Tian, Lu Zhe-jun, Chen Bo, *et al.* Estimation of wall parameters for cognitive imaging in through-the-wall radar[C]. IEEE 11th International Conference on Signal Processing (ICSP), Beijing, China, 2012, 3: 1936-1939.
- [21] Mc Corkle J W. Focusing of synthetic aperture ultra wideband data[C]. IEEE International Conference on System Engineering, Dayton, OH, USA, 1991: 1-5.
- [22] 王怀军, 黄春琳, 陆珉, 等. MIMO 雷达反向投影成像算法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(8): 1567-1573.
Wang Huai-jun, Huang Chun-lin, Lu Min, *et al.* Back projection imaging algorithm for MIMO radar[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2010, 32(8): 1567-1573.
- [23] Ahmad F, Amin M G, and Kassam S A. Synthetic aperture beamformer for imaging through a dielectric wall[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2005, 41(1): 271-283.
- [24] 崔国龙, 孔令讲, 杨建宇. 步进变频穿墙成像雷达中反投影算法研究[J]. 电子科技大学学报, 2008, 37(6): 864-867.
Cui Guo-long, Kong Ling-jiang, and Yang Jian-yu. Back-projection algorithm to stepped-frequency through-the-wall imaging[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2008, 37(6): 864-867.
- 宋勇平: 男, 1989年生, 博士生, 研究方向为穿墙雷达成像算法.
金添: 男, 1980年生, 副教授, 研究方向为SAR成像算法、目标检测技术、目标电磁建模、机器学习等.
陆必应: 男, 1976年生, 副教授, 研究方向为超宽带雷达系统与信息处理.