

低频电磁波建筑物内部结构透视技术研究进展

金 添^{*①} 宋勇平^② 崔国龙^③ 郭世盛^③

^①(国防科学技术大学电子科学学院 长沙 410073)

^②(空军预警学院雷达士官学校 武汉 430019)

^③(电子科技大学信息与通信工程学院 成都 611731)

摘 要: 在进入陌生建筑物内部之前获取其内部结构信息, 能够为反恐作战、灾害救援等多种应用提供服务, 具有重要的现实意义和研究价值。低频电磁波能够穿透常见建筑物材料传播, 进而安全、稳定、隐蔽地获取墙后目标信息。利用低频电磁波获取墙后信息因此成为建筑物内部结构透视领域的研究重点。为获知该领域的发展脉络, 并预测未来可能的发展趋势, 该文对21世纪初以来该领域国内外公开文献进行了归纳总结。相关文献的梳理结果表明, 利用低频电磁波进行建筑物内部结构穿透探测的技术目前主要包括3类: 基于反射波测量的穿墙雷达成像技术、基于透射波测量的射频层析成像技术、基于多径信号的墙体位置估计技术。这3类技术均已取得一定具有实际意义的研究成果。该文围绕这3类技术所涵盖主要内容的发展历程进行了梳理, 主要包括穿墙雷达墙后静止目标成像原理、基于穿墙雷达的建筑物内部结构观测模式、基于穿墙雷达成像的建筑物内部结构重建技术、基于射频层析成像的建筑物内部结构反演技术、基于多径信号的墙体位置估计技术, 并以此对该领域的发展趋势进行了探讨。总结近20年以来低频电磁波建筑物内部结构透视技术的发展历程, 可以发现建筑物内部结构穿透探测平台已由传统的机载、车载平台转向微型机器人、无人机等新型平台, 而对应的建筑物内部结构信息重建方法, 则由传统的雷达成像技术, 发展成包含图像增强、稀疏重构等在内的多种新型方法。这些结果表明, 建筑物内部结构透视技术正朝着系统化、多样化、智能化的方向发展。

关键词: 建筑物内部结构; 穿透探测; 低频电磁波; 穿墙雷达; 雷达成像; 射频层析成像

中图分类号: TN957

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2021)03-0342-18

DOI: 10.12000/JR20119

引用格式: 金添, 宋勇平, 崔国龙, 等. 低频电磁波建筑物内部结构透视技术研究进展[J]. 雷达学报, 2021, 10(3): 342-359. doi: 10.12000/JR20119.

Reference format: JIN Tian, SONG Yongping, CUI Guolong, *et al.* Advances on penetrating imaging of building layout technique using low frequency radio waves[J]. *Journal of Radars*, 2021, 10(3): 342-359. doi: 10.12000/JR20119.

Advances on Penetrating Imaging of Building Layout Technique Using Low Frequency Radio Waves

JIN Tian^{*①} SONG Yongping^② CUI Guolong^③ GUO Shisheng^③

^①(College of Electronic Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

^②(School of Radar Noncommissioned Officers, Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

^③(School of Information and Communication Engineering, University of Electronic Science and
Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: Obtaining the internal layout of an unfamiliar building before entering the building has important practical significance and research value, as it can be applied for various services, such as anti-terrorism

收稿日期: 2020-08-27; 改回日期: 2020-10-19; 网络出版: 2020-11-02

*通信作者: 金添 tianjin@nudt.edu.cn *Corresponding Author: JIN Tian, tianjin@nudt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61971430)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61971430)

责任编辑: 孔令讲 Corresponding Editor: KONG Lingjiang

operations and disaster relief. Low-frequency electromagnetic waves can propagate through common building materials, and then the target information behind the wall is obtained safely and stably. Therefore, using low frequency radio waves to obtain the information behind the wall has become the research focus in the field of building layout reconstruction. To reveal the development context of this field and predict the possible future development trends, this paper summarizes the domestic and foreign public literature in this field since the onset of the 21st century. The results of the relevant literature indicate that the techniques of using low-frequency electromagnetic waves to reconstruct building layout currently include three types: through-the-wall radar imaging technology based on reflected wave measurement, radio-frequency tomography technology based on transmitted wave measurement, and wall position estimation technology based on multipath signals. These three technologies have achieved several practical research results. This article clarifies the development history of the main content covered by these technologies, which mainly includes the principle of through-the-wall radar imaging of stationary targets behind the wall, the observation mode of building internal structure based on through-the-wall radar, the reconstruction technology of building internal structure on the basis of through-the-wall radar imaging, the inversion technology of building internal structure on the basis of radio-frequency tomography, and the wall position estimation technology based on multipath signals. We also discuss the development trend of this field. In the past two decades, the development history of building layout penetrating imaging using low-frequency radio waves shows a change from the traditional airborne and vehicle-mounted building-layout-reconstruction platforms to new platforms such as microrobots and unmanned aerial vehicles. The corresponding reconstruction method has been developed from the traditional radar imaging technology to a variety of new methods, including image enhancement and sparse reconstruction. The results indicate that the building-layout-reconstruction technology is developing in the direction of systematization, diversification, and intelligence.

Key words: Building internal layout; Penetration detection; Low frequency electromagnetic wave; Through-the-wall radar; Radar imaging; Radio frequency tomography

1 引言

城市环境下的反恐作战、灾害救援等行动中, 作战、救援人员往往需要深入陌生建筑物内部, 缺少建筑物内部结构信息将对行动的顺利开展以及人员的安全产生较大威胁。因此, 研究建筑物内部结构的穿透探测, 具有重要的现实意义和研究价值。在不破坏现场的情况下, 声波、红外、低频电磁波等探测技术均能够不同程度地实现穿透探测, 这其中, 低频电磁波探测在可穿透墙体类型、探测范围、探测精度等指标上最为突出, 因此成为建筑物内部结构穿透探测的研究热点^[1]。本文将围绕基于低频电磁波的建筑物内部结构穿透探测技术, 回顾21世纪初以来科研人员在该领域中所做出的努力。

利用低频电磁波的穿透特性获取建筑物内部信息的典型代表是穿墙雷达技术, 由于建筑物本身几乎不存在任何运动, 因此利用穿墙雷达进行合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)成像来获得大面积高分辨率图像成为自然而然的选择。考虑到建筑物本身的特性, 穿墙探测中的SAR扫描往往沿着建筑物的外墙进行, 研究人员由此开展了多种观测模式的研究, 例如沿单侧外墙扫描的单视角观测模式^[2]、沿垂直和水平侧外墙扫描的多视角观

测模式^[3]、单视角下的多高度基线观测模式^[4,5]、固定位置下的多斜视角观测模式^[6]、多极化观测模式^[7]等。这些研究的主要目的是获得建筑物内部结构的成像结果, 其核心是基于反射波测量的穿墙雷达成像技术, 雷达系统的收发天线往往位于建筑物同一外侧, 通过运动收集建筑物内部物体的反射回波, 最后利用穿墙雷达成像技术来估计建筑物内部结构。

除此之外, 基于透射波测量的射频层析成像(Radio Tomographic Imaging, RTI)技术^[8]与基于多径信号的墙体位置估计技术^[9], 也因在建筑物结构探测中具有各自独特的优势而为人关注。前者的收发天线分置于建筑物不同外侧, 信号从建筑物的某一外侧出发, 穿过建筑物并被另一外侧的接收系统采集, 最后通过反演信号衰减率的空间分布来获得建筑物内部结构信息; 后者的雷达固定在某个位置, 以凝视模式探测室内运动目标, 利用目标真实运动轨迹与其多径信号形成的虚假轨迹之间的几何关系来估计室内墙体位置。

基于穿墙雷达成像技术的建筑物结构穿透探测是目前主流的探测方案, 墙后静止目标成像则是其核心内容^[10,11]。有鉴于此, 本文将首先简要介绍穿

墙雷达墙后目标的成像原理, 然后讨论基于穿墙雷达的建筑物内部结构观测模式的发展历程, 接着介绍典型的基于穿墙雷达成像技术的建筑物内部结构重建方法, 之后介绍RTI与基于多径信号的墙体位置估计这两种探测技术, 最后对建筑物内部结构穿透探测这一领域的发展特点进行总结。

2 穿墙雷达墙后静止目标成像原理

穿墙透视成像与其他成像技术的区别在于, 穿墙探测时, 墙体会改变信号的传播路径。图1给出了建筑物内部结构探测过程中信号传播路径的常用简化模型, 天线被设置为沿着平行于墙体的方向运动, 信号由A点发出后, 经B点进入墙体, 又经C点离开后到达目标D处, 经目标反射的回波经C点再次进入墙体, 并从B点离开后回到天线A处。

根据穿墙探测中常用的墙体折射模型^[12], D处的静止理想点目标回波可以被简写为

$$S(f, m) = \sigma \exp\left(-j4\pi f \frac{l_{AB}(m) + \sqrt{\varepsilon}l_{BC}(m) + l_{CD}(m)}{c}\right) \quad (1)$$

其中, f 为工作频率, σ 为目标反射系数, m 为方位向采样序号, ε 为墙体相对介电常数, c 为光速, $l_{AB}(m)$ 为A点到B点的直线距离, 其余符号以此类推。墙体的存在, 除了对信号造成直接衰减之外, 还导致目标在回波中存在额外时延(相对于自由空间传播模型)。站在傅里叶变换的角度来看, D处的目标成像结果为

$$I(D) = \sum_{m=0}^{M-1} \int_{f_{\text{vad}}} S(f, m) \exp\left(j4\pi f \frac{r_{AD}(m)}{c}\right) df \quad (2)$$

其中, M 是方位向采样数, f_{vad} 为系统有效工作频段, $r_{AD}(m)$ 是根据成像模型设定的信号传播路径长度。当D点遍历场景所有的网格坐标时, 利用式(2)即获得了建筑物内部结构的成像结果。式(2)

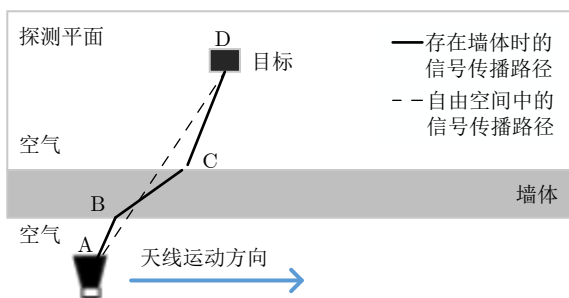


图1 穿墙探测的一般信号传播模型

Fig. 1 General signal propagation model for through-the-wall detection

为后向投影(Back Projection, BP)成像方法的实现原理。在传统的SAR成像中, $r_{AD}(m)$ 一般被假设为A点到D点的直线距离, 但在穿墙成像中, 受墙体折射效应影响, 墙后目标的回波信号传播路径长度要大于A点到D点的直线距离, 如图1所示, 在未知墙体参数的情况下, 直接采用传统的SAR成像模型会造成墙后目标图像散焦与错位。因此获取建筑物的几何布局和介质参数是实现室内目标精准定位的前提。

3 基于穿墙雷达的建筑物内部结构观测模式的发展

机载与车载SAR系统是最早引入建筑物内部结构探测的穿墙雷达系统, 这些大型穿墙雷达具有良好的机动性, 在观测规模与效率上具有明显优势。但其缺陷也很明显, 即只能工作在建筑物外部进行远距离探测。由于信号每穿透一层墙体, 都将发生一定的衰减和变形, 穿透的层数越多, 累积的衰减与变形越严重, 前墙拖尾以及多径等影响也越严重, 信号被接收与复原的难度也越大。因此对于结构较为复杂的建筑物, 仅依赖外部探测很难正确估计建筑物的内部结构。一种解决手段是逐层推进深入建筑物内部进行观测, 虽然其效率较低, 但往往能获得更好的观测性能。为此, 雷达系统需要被设计得体积更小、重量更轻、功耗更低。一些原本用于室内人员探测的小型多输入多输出(Multi-Input Multi-Output, MIMO)穿墙雷达因而也被应用于探测建筑物的内部结构, 相比于大型穿墙雷达, 小型MIMO穿墙雷达更为灵活, 能够被操作员带入室内环境使用, 有效扩大了建筑物内部结构的可观测范围。另一些被设计搭载在小型机器人平台上的穿墙雷达则进一步扩展了雷达操作的灵活性, 此类穿墙雷达甚至能进入操作员无法到达的某些位置进行探测。

3.1 室外主动雷达观测模式的发展

美国斯坦福国际研究院Falconer等人^[13]于2000年就提出了基于机载SAR的平面图雷达(Floor Plan Radar, FPR)穿墙探测方案。FPR可以获得任意高度下的探测结果, 因此是高层建筑穿墙探测的有效解决方案, 但受限于当时的低空飞行器技术, FPR的实现复杂度与成本较高, 其性价比明显低于车载平台, 此后并未见后续报道。

车载平台上, 最早具有实用意义的建筑物内部结构成像系统是2008年由美国陆军实验室Nguyen等人^[2]所公布的超宽带同步脉冲重构(Synchronous Impulse REconstruction, SIRE)车载穿墙雷达系统, SIRE工作在侧视SAR模式, 沿着建筑物的某

一墙体基线运动，从而得到建筑物的单视角观测结果。实验室研究人员还给出了多份针对复杂封闭建筑物内部结构探测的仿真报告^[14,15]。单视角观测无法直接得到垂直视角上的结构信息，2008年美国维拉诺瓦大学Ahmad等人^[3]提出了穿墙成像中的多视角观测融合技术，首先使雷达沿两个相互垂直的墙体基线进行扫描，得到不同视角下的子图像，而后引入指数因子来实现子图像融合，不过Ahmad等人并没有给出最优指数因子的选取方法。次年，美国陆军实验室的Le等人^[16,17]给出了SIRE在多视角探测模式下的实测结果，采用了非相干叠加的方式实现子图像之间的融合，最终获得了相对完整的建筑物结构成像结果，如图2所示。

由于并非任何时候都能够沿不同的墙体基线进行扫描，2011年澳大利亚伍伦贡大学Seng等人^[4,5]提出了基于俯仰向的多视角观测方案，在某一面墙上设置多个高度基线对墙后场景进行观测，他们同时也提出了基于模糊逻辑的图像融合方法，多高度

基线的观测方式虽然只能获得单一方向的测绘结果，但却能够有效降低室内场景在不同视线上的拖尾污染。2013年，加拿大国防研发部的Sévigny等人^[6]提出沿着同一侧墙体以不同斜视角进行照射，即多斜视角融合也能够提升成像性能。同一时期，多极化探测也被引入穿墙探测之中^[7]，Seng等人考虑到室内目标具有不同的极化特性，因此将HH, HV, VH, VV 4种极化探测的穿墙结果进行融合，最终得到高信杂比的增强成像结果。除了设法提高墙体本身的成像质量之外，墙角信息在建筑物结构中的特殊地位也引起了研究人员的注意，2016年成都理工大学的Jia等人^[18]提出了一种基于MIMO穿墙雷达的单边双点观测模式，仅需将雷达摆放在两个不同的观测视角对建筑物进行斜视探测，就可对建筑物的4个墙角以及内部目标同时进行成像，结果如图3所示。

为了更高效地获得建筑物内部结构信息，研究人员开始在穿墙探测中引入MIMO-SAR模式，

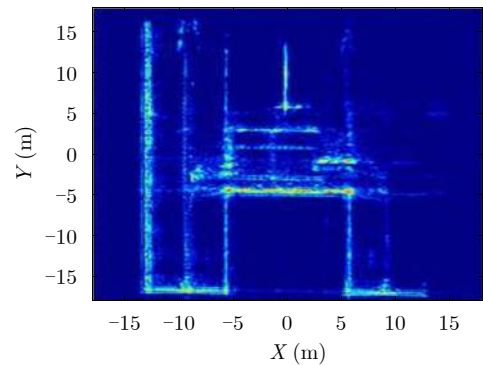
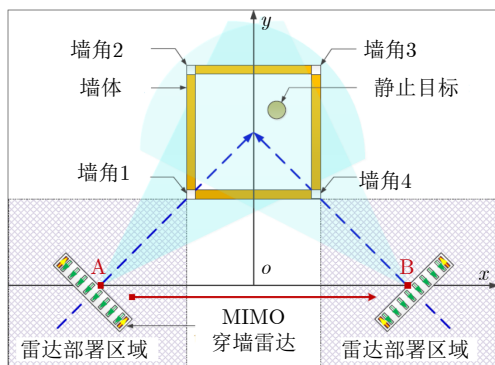
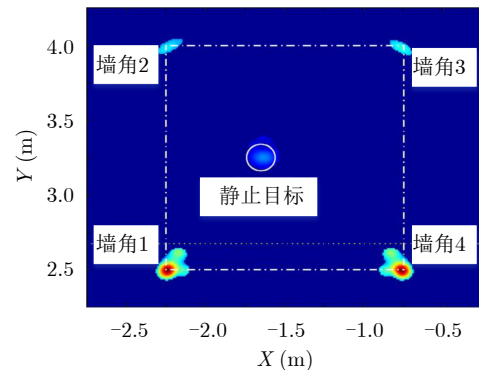


图 2 SIRE在多视角探测模式下的实测数据成像结果

Fig. 2 Imaging results of SIRE's measured data in multi-view detection mode



(a) 基于多输入多输出的单侧双位置凝视成像模型
(a) Single-side two-location spotlight imaging model based on MIMO through-wall-radar



(b) 包含墙角和目标的雷达全景图像
(b) The panorama image maintaining all corner and target images

图 3 单边双点观测模式及其实验结果^[18]

Fig. 3 Single-side two-location mode and its experiment result^[18]

MIMO阵列内部不存在运动误差,对空间采样点的数目与密度要求也远低于传统SAR模式,因此逐渐受到研究人员的青睐。2009年荷兰应用科学院deWit等人^[19,20]报告了使用极化干涉相控阵合成孔径雷达装备(Synthetic Aperture Polarimetric PHased array Interferometer Radar Equipment, SAPPHIRE)的建筑物3D成像结果,如图4所示。SAPPHIRE在方位向上采用直线SAR扫描模式,在俯仰向上采用MIMO虚拟阵列模式,通过对场景中墙体、不同墙体交汇形成的二面角、墙体与地板形成的三面角等主要散射体的定位与识别,来获取建筑物的三维结构。2010年美国俄亥俄州立大学Browne等人^[21]则设计了一款可携带的3D穿墙成像雷达,采用小型二维MIMO阵列,通过设置若干快拍点的形式进一步简化了方位向的扫描过程。相比于传统SAR模式,MIMO-SAR模式有效提高了探测效率,但也带来了栅瓣与非均匀采样等问题,国防科技大学Song

等人^[22]针对MIMO-SAR的观测特点,提出了基于功率谱相干因子加权的增强成像方法,降低栅瓣对室内场景的污染,并在国防科技大学自研的建筑物可视化雷达上得到了验证。

3.2 室内主动雷达观测模式的发展

上述探测均在室外进行,即雷达系统布设于建筑物之外,信号经由外墙向室内辐射的过程中会不断衰减,雷达的探测距离往往受限于信号经过的墙体数目,难以有效探测具有复杂结构的建筑物。为了解决多层墙体的探测问题,一种简单的思路是由外向内逐层推进探测,因此需要雷达系统具有小型化、可移动、低功耗等特征,从而便于在室内环境中工作。

美国国家标准与技术研究院Braga等人^[23]于2009年设计出了一款可用于室内穿墙成像的雷达系统,如图5所示,雷达搭载于小型移动平台之上,以SAR模式对其他房间进行扫描,可以实现高分辨

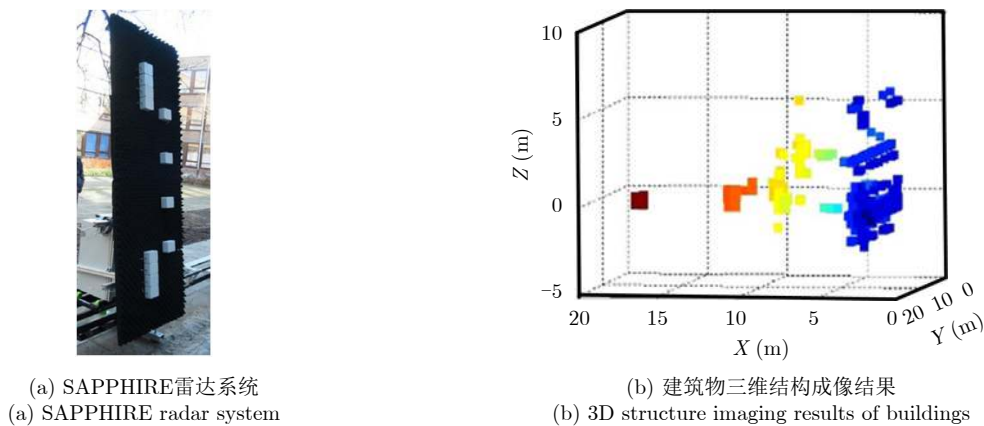


图 4 SAPPHIRE雷达系统及其实验结果^[19,20]

Fig. 4 SAPPHIRE radar system and its experiment result^[19,20]

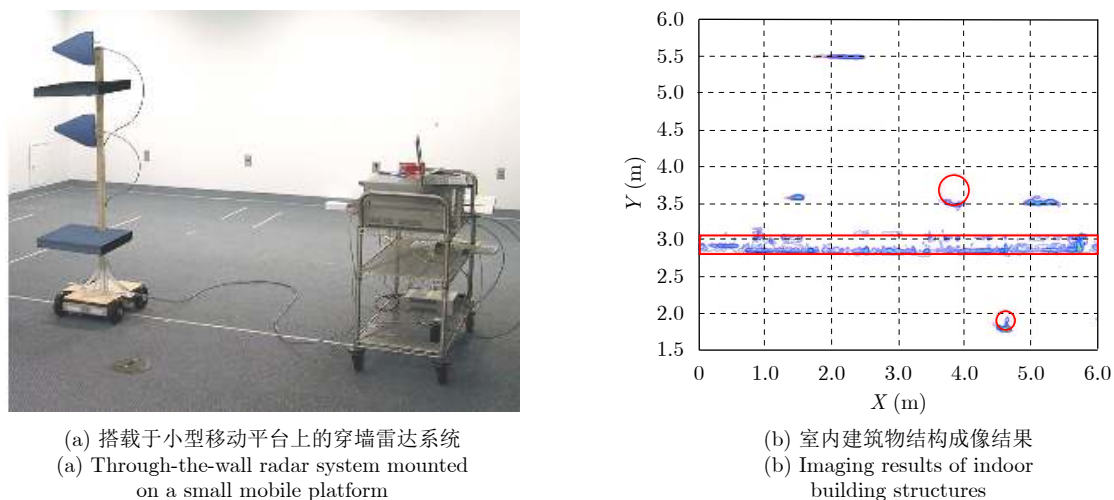


图 5 小型移动平台上的穿墙雷达系统及其实验结果^[23]

Fig. 5 Through-the-wall radar system mounted on a small mobile platform and its experiment result^[23]

的静止场景成像。类似的思路可以追溯到2000年由Falconer等人^[24]提出的基于机器人平台的穿墙成像雷达。除了设计专门的小型移动平台外,扩展面向室内运动目标探测的小型便携式MIMO穿墙雷达的使用功能,使其具备对建筑物内部结构的探测也是一种可行的思路^[25]。

Braga等人只是将雷达系统由室外搬移到了室内,并没有改变观测过程本身。与上述研究不同,2010年Sakamoto等人^[26]仅利用位于建筑内部的单发单收天线所采集的墙体散射回波,通过找到回波时延与传播路径的最佳匹配组合,进而估计出了建筑内部的几何布局,并基于仿真试验验证了该方法的可行性。2016年美国密歇根大学Yektakhah等人^[27]则提出了全方向(all-directions)穿墙雷达建筑物结构探测方案,全方向穿墙雷达系统工作于室内环境,其发射单元固定在中心位置,接收单元围绕发射单元进行圆周运动,探测圆圈外的建筑物布局。全方向探测的一大优势是雷达在各个角度上保持了相同的方位向分辨率,有效避免了不同方位上目标在成像中产生的畸变。在后续的研究成果中他们给出了这一方案的实验样机与初步的实验结果^[28,29],如图6所示。

3.3 被动雷达观测模式

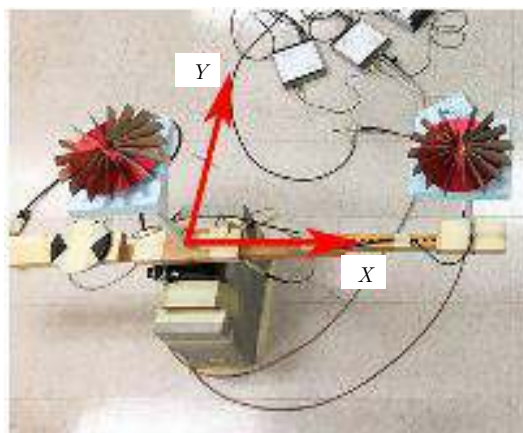
上述观测模式都是以主动雷达为基础,即雷达平台本身承担了发射信号照射场景的任务。除此之外,基于被动合成孔径雷达(Passive Synthetic Aperture Radar, PSAR)技术的穿墙探测方案也被研究人员提出^[30],由于可以采用广泛存在的电视广播等第三方信号,基于PSAR技术的建筑物内部结构探测具备良好的研究与应用前景。

4 基于穿墙雷达成像技术的建筑物内部结构重建方法

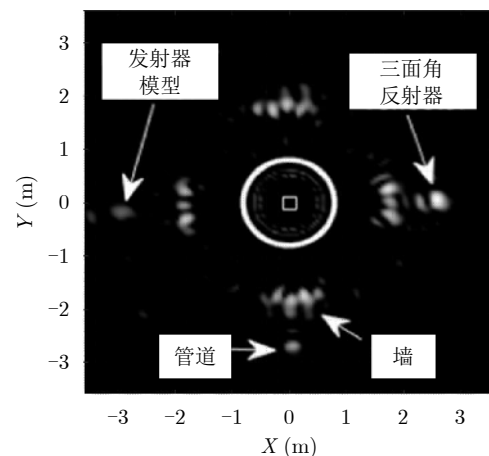
基于穿墙雷达成像技术的建筑物内部结构重建方法,在算法模型或重建过程中依赖雷达成像技术,不过受分辨率、栅旁瓣、外墙拖尾、多径等因素影响,直接进行雷达成像处理的结果往往难以辨识,特别是对于一些内部面积狭小、结构复杂的建筑物,还需要辅以其他处理技术,才能得到相对清晰完整的建筑物内部结构布局图。典型的重建技术包括电磁仿真拟合技术、图像增强技术、基于图理论的最优估计技术以及稀疏重构技术等。

4.1 基于电磁仿真拟合技术的建筑物内部结构重建

2006年美国国防高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) Baranoski等人^[31]做了名为VisiBuilding项目的专题报告,分析了建筑物布局信息对城市巷战的重要意义,提出了机载、车载、单兵等多套系统相组合的建筑物布局探测模型^[32],如图7所示。VisiBuilding项目中的基于模型的建筑物3D结构反演技术,设想在多系统的穿墙成像结果与电磁仿真模型之间形成闭环迭代结构,通过不断降低实测回波与电磁仿真模型之间的差异,最终得到精确的建筑物墙体、楼梯、门等的3D结构。2008年美国密西根理工学院Subotic等人^[33]参照这一设想进行了相关的电磁仿真实验。执类似想法的还有意大利SELEX Sistemi Integrati公司的Buonanno等人^[34],设想利用全波模型来生成与实际回波匹配的仿真模型,从而反推建筑物结构。相比于具体的技术,建筑物3D结构反演更接近于一种方案设想,其实现难度如此之大,以至于到目前都没有看到相关后续报道。



(a) 全方向穿墙雷达样机
(a) All-directions through-wall radar prototype



(b) 成像结果
(b) Imaging result

图6 全方向穿墙探测^[28]

Fig. 6 All-directions through-wall detection^[28]

4.2 基于图像增强技术的建筑物内部结构重建

典型的基于图像增强技术的建筑物内部结构成像技术，是2009年由斯洛伐克Košice技术大学Aftanas等人^[35,36]提出的，利用图像处理中的边缘检测与Hough变换来处理穿墙成像结果，通过提取墙体的直线结构来获得相对直观的建筑物结构信息，如图8所示。

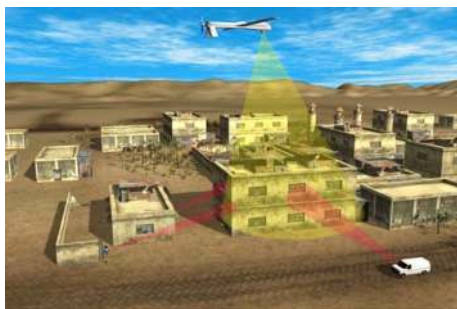
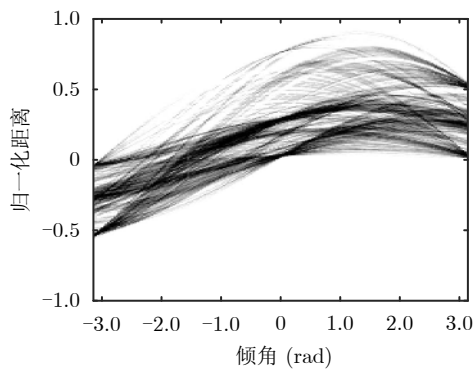


图 7 多系统结合的穿墙探测示意图^[31,32]

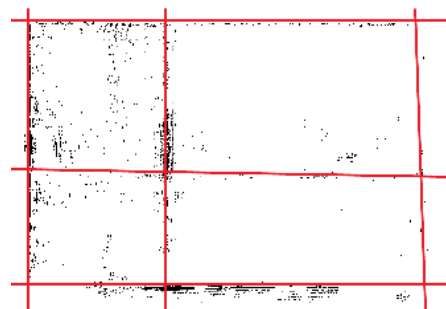
Fig. 7 Schematic of multi-system combined through-wall detection^[31,32]

另一种以图像增强技术为基础的建筑物内部结构重建技术是由电子科技大学贾勇等人^[37]于2013年提出的M-N-K检测器，M-N-K检测器首先被成功应用于电磁仿真数据，在将各子视角的成像结果归一化后利用M-N-K检测器进行融合，并结合Hough变换去除融合结果中的毛刺。2014年M-N-K检测器在实测数据上得到了验证^[38]，如图9所示。M-N-K检测器不需要知晓墙体参数，容易与传统雷达成像方法结合，具有很强的实用性，但也正因为不考虑墙体参数补偿，最终得到的建筑物布局相对粗糙。2015年，电子科技大学姚雪^[39]提出了灰度线变换结合频域滤波的建筑物内部结构图像优化方法，对多视角融合成像时的子视角不均衡问题进行了改善。

为解决单一尺度域下图像增强成像效果不佳的缺点，桂林电子科技大学唐茜等人^[40]于2019年提出了一种基于多方位多尺度的建筑布局成像方法。该方法首先对方位向进行二维匹配滤波，再通过非下采样Contourlet变换将多视角下不同频率成分按照



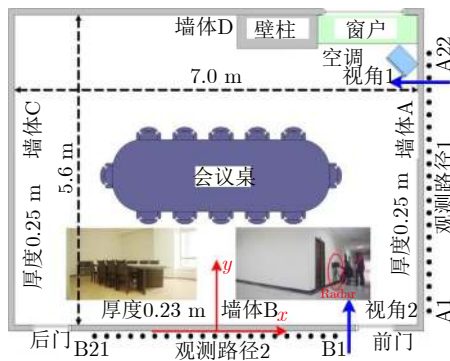
(a) 对穿墙成像的边缘提取结果进行Hough变换
(a) The Hough transform performed on the detected edges



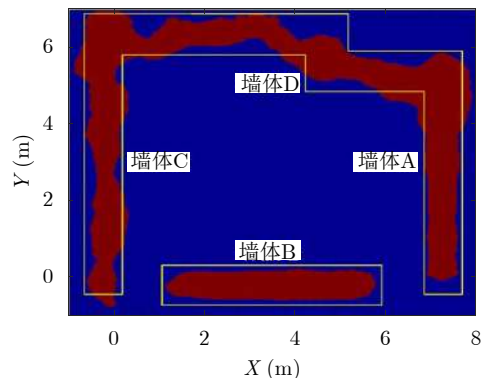
(b) 墙体的直线结构
(b) The highlighted walls drawn over the scanned image obtained by inverse Hough transform

图 8 利用Hough变换提取墙体的直线特征^[35]

Fig. 8 Using Hough transformation to extract the straight-line features of the wall^[35]



(a) 基于M-N-K检测器的建筑物布局成像实验场景
(a) M-N-K detector experiment scene



(b) 检测结果
(b) Detection results

图 9 利用M-N-K检测器提取建筑物结构^[38]

Fig. 9 Using M-N-K detector to extract building structure^[38]

不同融合准则进行融合。仿真与实测数据的处理结果表明该方法能够有效增强建筑布局图像的轮廓和细节信息，如图10所示。

此外，2019年成都理工大学的Jia等人^[41]提出了基于生成对抗网络的建筑物结构重建方法，将深度学习思想引入以图像处理技术为基础的建筑物内部结构重建技术中。该方法通过训练生成对抗网络，建立原始雷达图像与标签清晰结构图像之间的映射关系，实现多径和栅旁瓣鬼影干扰在原始雷达图像中空间分布特征的解析，进而生成期望的清晰结构图像，电磁仿真结果如图11所示，初步验证了生成对抗网络在简单标准建筑物结构重建方面的优

异性能，不过对于复杂建筑物结构和实际雷达成像数据的处理性能，还需要进一步验证和优化。

4.3 基于图理论的建筑物内部结构最优估计技术

基于图理论的建筑物内部结构最优估计技术在2014年由国防科技大学陈波等人^[42-44]提出，在详细分析了墙角散射的空变特性后，他们利用最小生成树(Minimum Spanning Tree, MST)算法获得了建筑物内部结构的最优估计，如图12所示。与其他方法相比，这一方法能够获得高精度的建筑物内部结构矢量图。

4.4 基于稀疏重构技术的建筑物内部结构重建

压缩感知技术兴起后，西班牙加泰罗尼亚理工

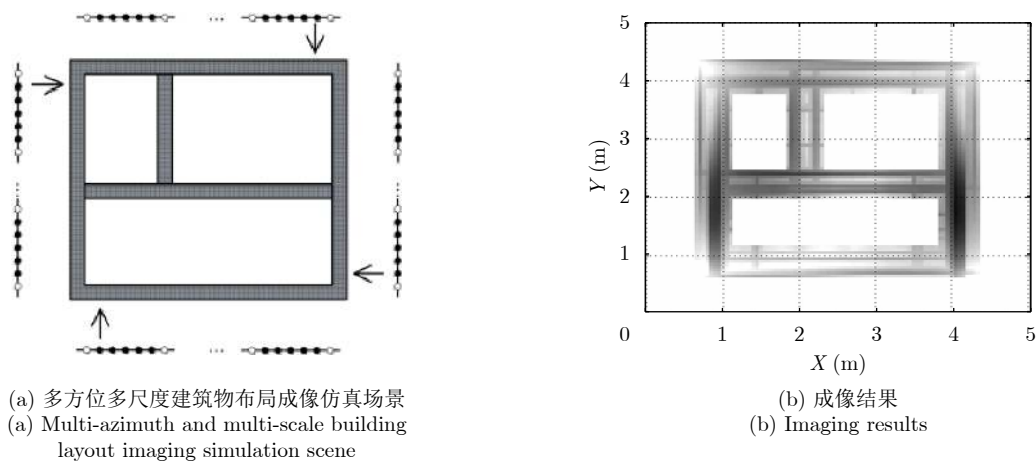


图 10 基于多方位多尺度的建筑布局成像融合方法^[40]

Fig. 10 Multi-azimuth and multi-scale building layout imaging fusion method^[40]

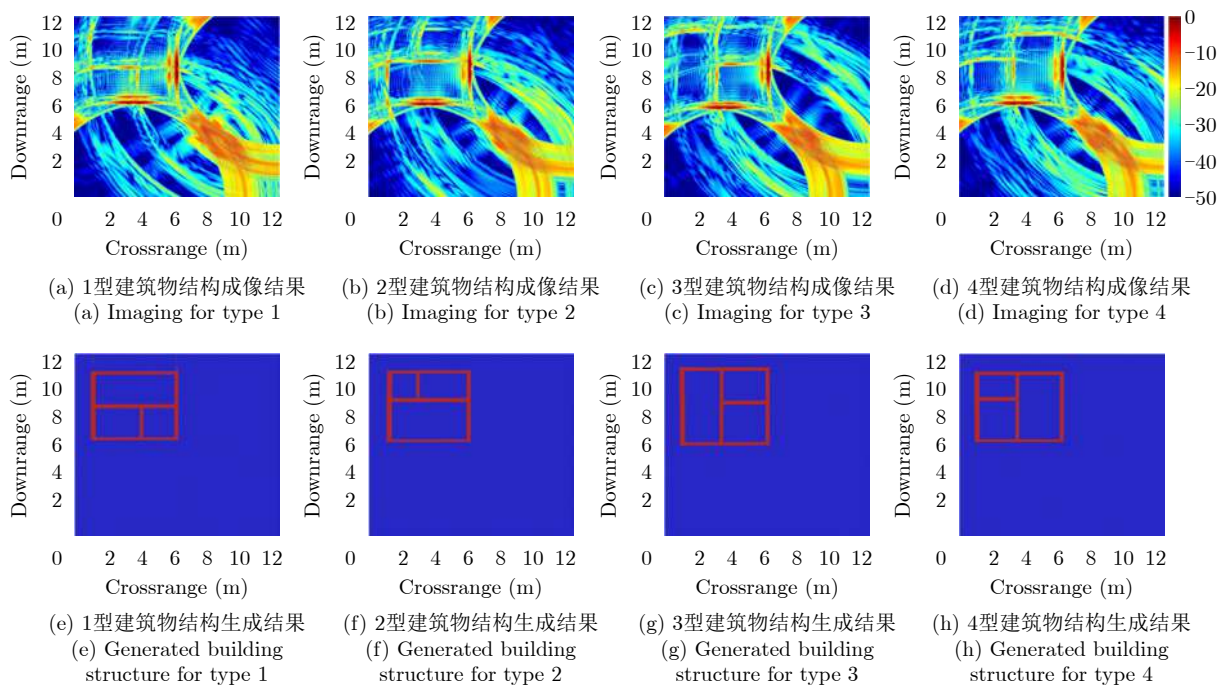


图 11 原始模糊的建筑物结构图像与生成重建的建筑物结构图像^[41]

Fig. 11 Original blurred building structure images and generated building structure images^[41]

大学Lagunas联合美国维拉诺瓦大学Amin等人^[45]在2012年开始尝试利用稀疏重构技术在回波域直接重建墙体回波,以降低雷达成像时墙体拖尾对墙后目标的污染,不过仅依赖稀疏约束容易造成目标割裂,他们进一步采用直线结构来辅助墙体的重建^[46],仿真数据验证了这一方法对建筑物内部结构成像的改善,结果如图13所示。

2018年,国防科技大学金添等人^[47]提出了单侧墙体方向观测模式下的建筑结构稀疏成像方法,利用传统雷达成像技术中的相干因子(Coherence Factor, CF)加权算法来提高稀疏重建中支撑集选取的稳定性与准确性,实测数据的处理结果表明,该方法可以在较少的迭代次数下获得高质量的建筑物结构成像结果,如图14所示。

2019年桂林电子科技大学的Zhao等人^[48]提出了基于全变差(Total Variation, TV)正则化的建筑物结构稀疏重构方法,降低了墙后目标结构差异导致的重构损失,仿真实验结果如图15所示。

雷达成像往往是一个病态的逆问题^[49],基于雷达成像技术的建筑物内部结构重建算法,虽然种类

众多,但本质上都是在成像过程中或成像之后加入额外的正则化约束,从而使重建结果变得稳定,只不过相比于其他的重建方法,稀疏重构技术在算法模型上将这一点体现得更为明显。在重构模型中如何通过增加其他约束,以应对更加复杂的建筑物内部结构,可能是该领域未来的一个研究方向。

5 其他建筑物内部结构探测技术

除了穿墙成像技术之外,还有两种新型建筑物内部结构探测技术,即RTI技术与基于多径信号的墙体位置估计技术,本节将介绍这两类技术的发展。

5.1 基于RTI的建筑物结构反演技术

RTI主要利用接收信号强度(Received Signal Strength, RSS)信息来反演信号衰减率的空间分布。场景中不同物体对信号存在不同程度的遮蔽作用,信号强度因此会产生额外的衰减,所以信号衰减率的空间分布即是对建筑物内部结构的一种刻画。严格来说,RTI并非雷达技术,甚至与雷达技术有本质区别。RTI接收处理的是透射波,获得的是场景的传输特性,而雷达接收处理的是反射波,

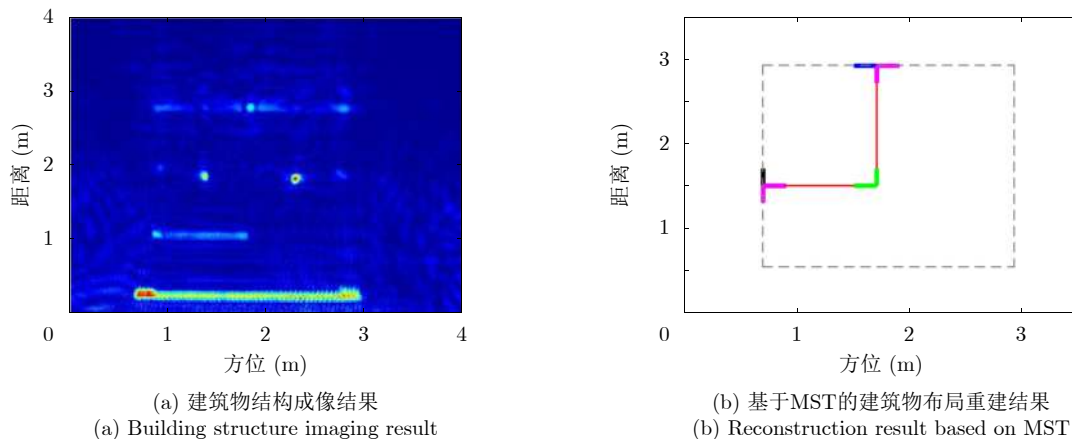


图 12 基于MST的建筑物内部结构估计^[43]

Fig. 12 Estimation of building internal structure based on MST^[43]

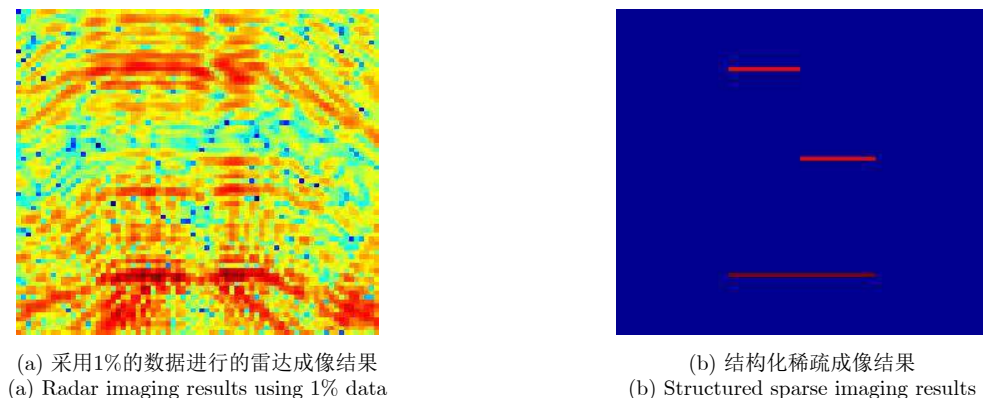
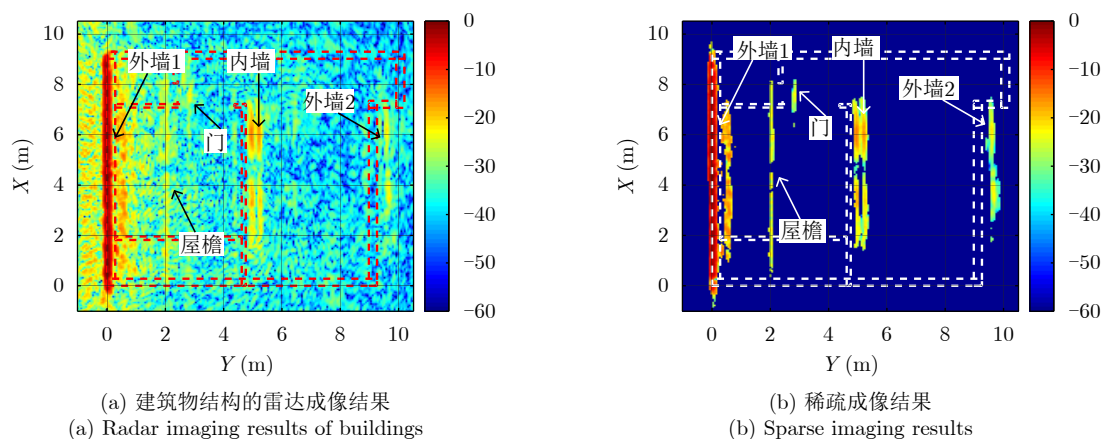
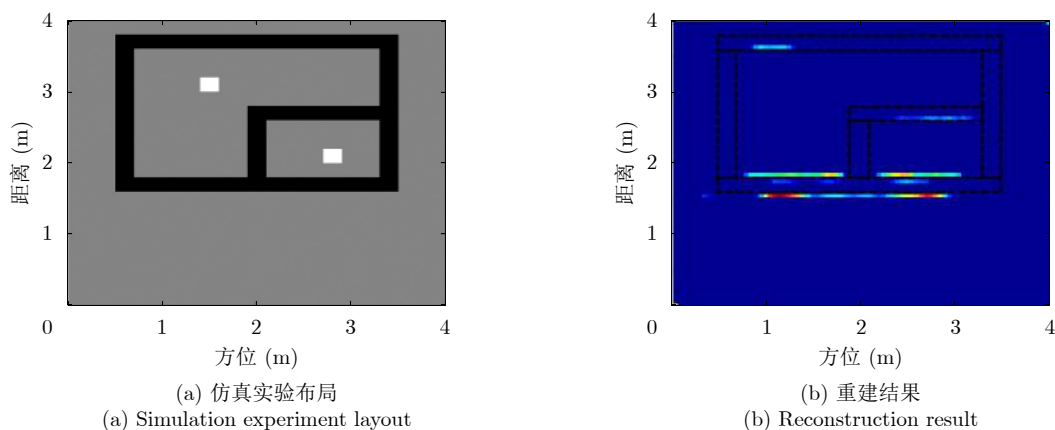


图 13 直线结构辅助下的墙体稀疏重构^[46]

Fig. 13 Sparse reconstruction of wall with the aid of linear structure^[46]

图 14 CF加权下的建筑物结构稀疏成像^[47]Fig. 14 Sparse imaging of building structure under CF weighting^[47]图 15 基于TV正则化的建筑物结构稀疏重构^[48]Fig. 15 Sparse reconstruction of building structure based on TV regularization^[48]

获得的是场景的散射特性^[8]。将RTI技术应用于室内运动目标探测的研究起步较早，国内外均有研究者提出通过布设多组无线传感器来监测RSS的变化来估计室内目标的运动信息^[8,50-52]。相比于运动目标探测，静止场景的RTI难度更大，需要更多的传感器节点以及更为复杂的反演技术。

2008年美国新墨西哥大学Mostofi等人^[53]结合压缩感知技术建立了静止场景RSS分布的压缩映射模型，即在传统的线性RTI模型中增加了稀疏正则化约束，提出利用合作的移动无线传感器节点，低成本获得场景的RSS分布。2011年Mostofi^[54]利用这一模型，将WiFi网卡搭载在小型机器人身上作为探测平台，成功得到了一个T型柱子的平面结构。2013年Mostofi进入美国加州大学工作，此后Mostofi等人^[55-58]在利用压缩感知技术进行RTI的研究中，尝试了多种改进方案，包括TV约束下的稀疏重建、贝叶斯压缩感知技术、基于Rytov线性近似的TVL3 (TV minimization by Augmented Lagrangian and Alternating Direction Algorithms)

算法等，最终得到了建筑物二维平面布局信息，如图16所示。

2017年，Karanam等人^[59]利用两台小型无人机对建筑物进行同步绕飞来获取探测数据，再结合温特-克拉默斯-布里渊(Wentzel-Kramers-Brillouin, WKB)线性近似方法，将三维结构反演问题转化为最小化三维全变差(3D Total Variation, 3D TV)问题，进一步得到了静止建筑物的三维成像结果，如图17所示。

除了稀疏正则化约束之外，其他类型的正则化约束也出现在RTI的研究中。例如2012年美国佐治亚理工学院Hamilton等人^[60]提出了射频层析成像与非合作分析(RF Exploitation for Tomographic Imaging and Non-cooperative Analysis, RETINA)算法，在反演模型中追加了Tikhonov正则化约束，RETINA可以同时获得建筑物结构布局与室内运动目标的分布信息，并在仿真实验中表现出了优异的性能，如图18所示。2013年他们又根据建筑物结构中墙体具有互相垂直等特性，将Tikhonov正则化约束替换



图 16 基于WiFi信号的机器人平台穿墙探测及场景反演结果^[57]

Fig. 16 WiFi signal-based robot platform through-the-wall detection and scene inversion results^[57]

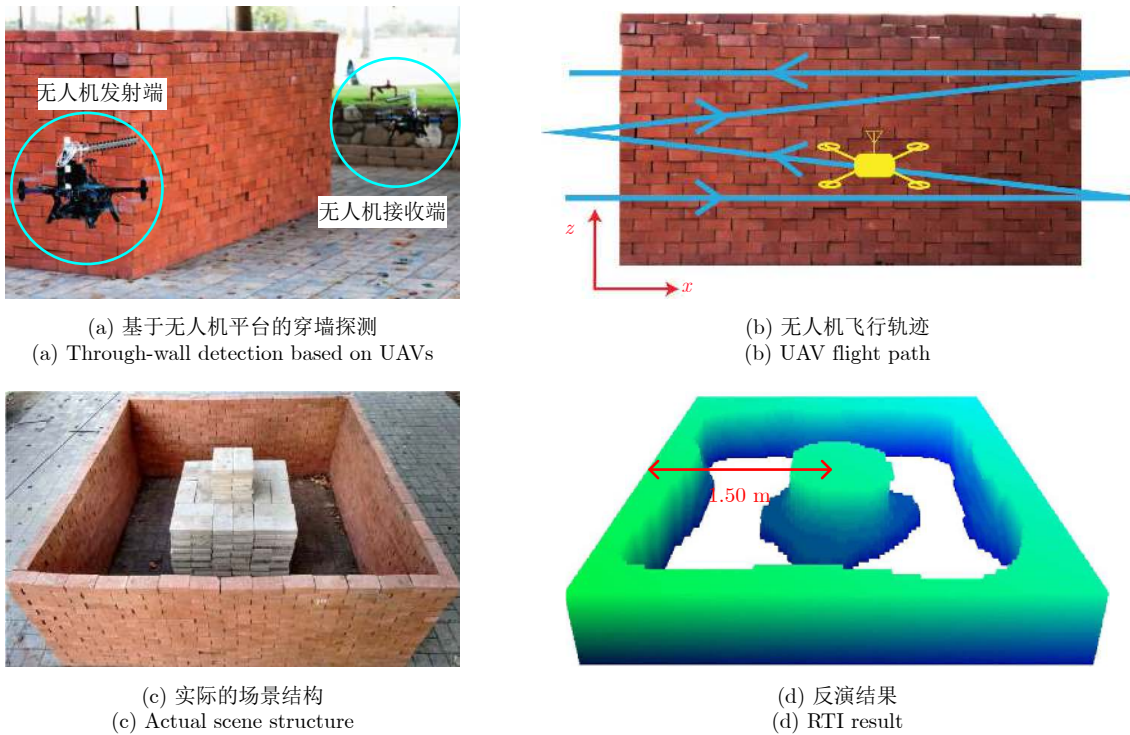


图 17 无人机载平台的WiFi探测实验与场景反演结果^[59]

Fig. 17 Experiments on Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) and scene inversion results^[59]

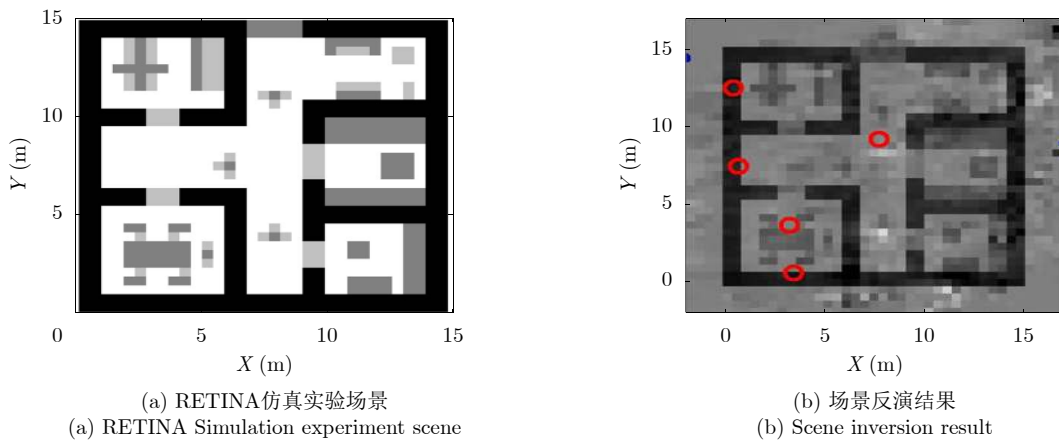


图 18 基于RETINA的RTI算法^[60]

Fig. 18 RTI algorithm based on RETINA^[60]

成了椭圆协方差约束，从而在仿真实验中得到了更高质量的建筑物结构反演结果^[61]。

Hamilton等人的反演模型虽然只在仿真实验中得到了验证，但给予了后继研究者很多启发。2018年北京理工大学Xu等人^[62]就在Hamilton等人提出的椭圆协方差约束的基础上，利用定向天线取代全向天线以获得更高的信号质量，并进一步加入了像素衰减非负约束，最终在实测实验中获得了更好的反演性能，如图19所示。

2020年中国科学院Guo等人^[63]则结合了Mostofi等人与Hamilton等人的研究，利用墙体的厚度与长度具有明显差异的特征，提出使用重新加权全变差(Rewighted Total Variation, RTV)约束代替传统的TV约束，同时借助墙体往往只有水平和垂直这两个方向的先验信息，提出了重新加权全变差与先验信息联合(Rewighted Total Variation and Prior Information, RTV-PIR)算法，RTV-PIR在RTV模

型中增加了椭圆协方差约束，进一步改善了反演结果中墙体的不规则现象。

为解决多介质场景成像问题，2020年，电子科技大学Zhang等人^[64]在单介质场景成像的研究基础上，考虑将各介质的电磁参数作为先验灰度向量融入迭代求解算法中，提出了一种先验信息约束下的代数重建技术(Priori Information Constrained Algebraic Reconstruction Technology, PIC-ART)算法，在每一轮迭代求解的过程中，加入了各像素值与先验灰度向量的误差约束。相较传统的TV约束方法，所提算法不仅提高了运行效率，同时改善了多介质场景的成像质量，结果如图20所示。

上述针对RTI的研究工作主要利用的是RSS信息，缺少信号的相位信息，难以解决电磁波的多径传播问题，导致直接成像效果较差。为此，2019年电子科技大学的Chen等人^[65]尝试将线性调频信号替代窄带信号，并通过延时谱分析完成了收发天

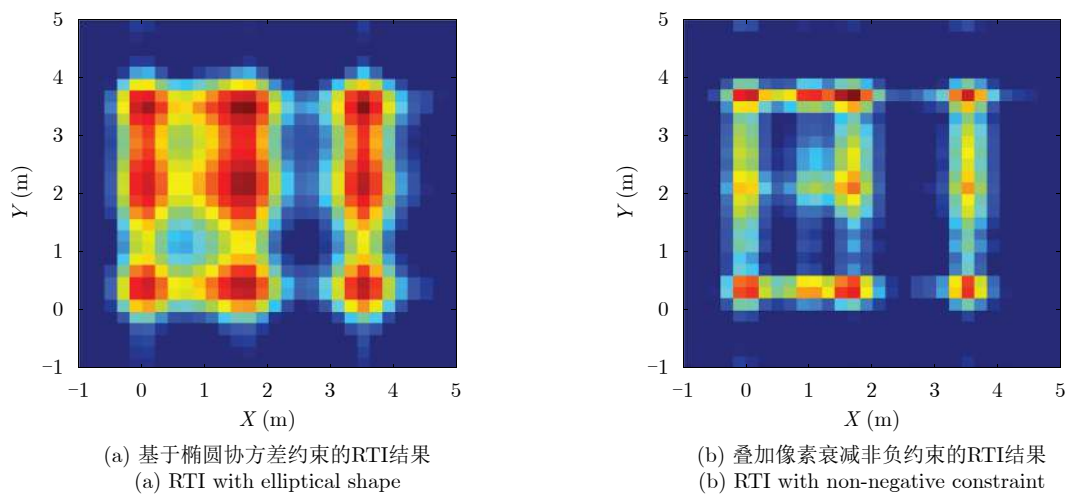


图 19 基于椭圆协方差约束与叠加像素衰减非负约束的RTI结果对比^[62]

Fig. 19 Comparison of RTI results based on elliptical shape and superimposed pixel attenuation non-negative constraints^[62]

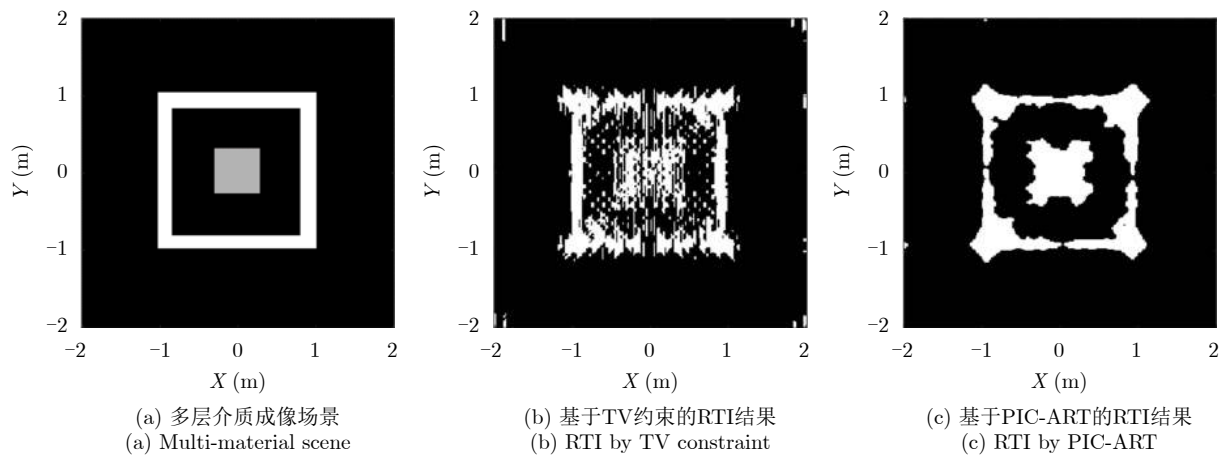


图 20 基于TV约束与PIC-ART的RTI结果对比^[64]

Fig. 20 Comparison of RTI results by TV constraint and by PIC-ART^[64]

线之间直达路径提取, 基于电磁仿真数据实现了建筑结构的反演。次年, 中国科学院Guo等人^[66]通过所提的时延估计算法完成了基于传播时延的建筑结构层析成像实测验证, 结果如图21所示。

除了在建筑物外布设无线传感器节点之外, 研究人员也尝试利用建筑物内部的辐射源进行RTI处理。2017年德国慕尼黑工业大学的Holl等人^[67]借鉴光学全息成像的思路, 将辐射源布置于建筑物内部, 在建筑外部部署二维阵面记录电磁波的波前复振幅, 通过角谱传播得到了任意深度的二维全息成像结果, 如图22所示。电磁仿真结果表明该方法不仅可以获得建筑物的三维成像结果, 而且可以实现对辐射源的定位。

总体而言, RTI成像求解过程往往比传统雷达成像更为病态, 反演过程更为复杂, 但是RTI技术在传感器成本、系统复杂度和布设灵活度等方面, 相较于穿墙雷达成像技术具有明显优势, 因此具有广阔的发展前景。

5.2 基于多径信号的墙体位置估计技术

基于多径信号的墙体位置估计技术依然属于雷达探测领域, 这一技术需要室内存在运动目标。2014年, 美国杜克大学Li等人^[9]提出了一种基于多径信号的目标定位与建筑布局联合估计方法, 首先建立了目标与环境中心散射体和面散射体的参数化位置关系, 进而通过多周期多假设跟踪方法同时求解目标位置与散射体位置参数, 最终实现了目标位置与建筑布局的同时估计, 实验结果如图23所示。

电子科技大学的刘剑刚等人^[68,69]于2015年采用一个小孔径穿墙雷达, 在单站凝视模式下探测室内人员目标与其多径虚假目标的运动轨迹, 再分析真实轨迹与虚假目标轨迹之间的几何关系, 最终反向重构侧墙的位置分布, 如图24所示。2018年开始, 电子科技大学的研究人员对MIMO穿墙雷达中的多径效应^[70]、L拐角处的多径效应^[71,72]进行了深入研究, 为复杂建筑物结构中的墙体位置估计提供了进一步研究的依据。

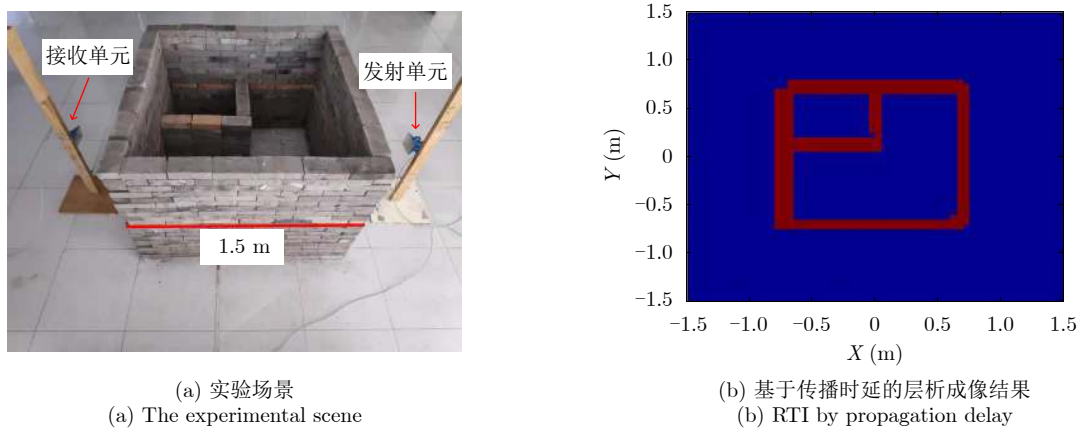


图 21 基于传播时延的建筑结构层析成像^[66]

Fig. 21 Building structure tomography based on propagation time delay^[66]

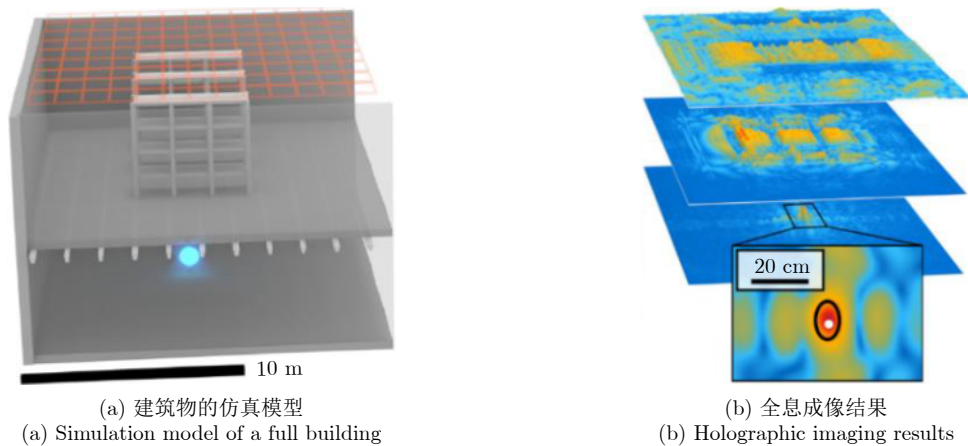
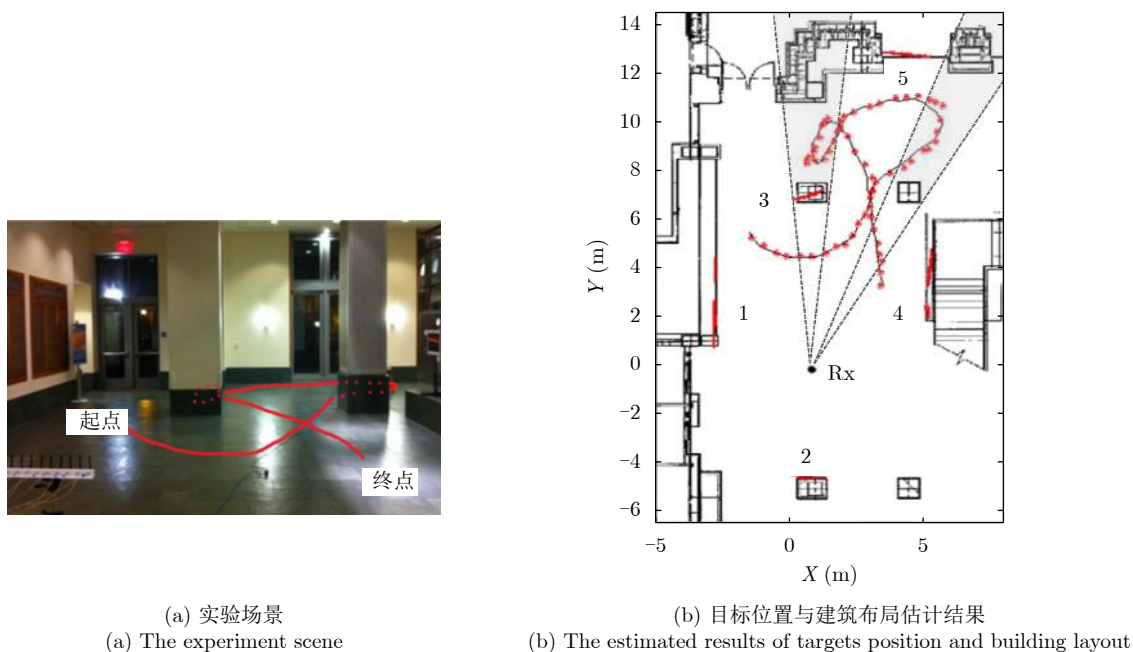


图 22 基于内部辐射源的建筑结构全息成像^[67]

Fig. 22 Holographic imaging of building structure based on internal radiation source^[67]



(a) 实验场景
(a) The experiment scene

(b) 目标位置与建筑布局估计结果
(b) The estimated results of targets position and building layout

图 23 基于多径信号的目标定位与建筑布局联合估计^[9]

Fig. 23 Joint target location and building layout estimation based on multipath signals^[9]

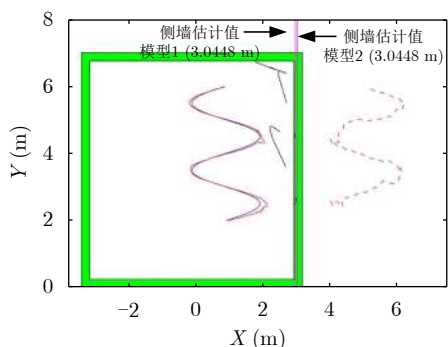


图 24 利用目标运动轨迹反推墙体位置^[68]

Fig. 24 Use trajectory to infer wall position^[68]

利用多径定位墙体的方法需要室内运动目标的合作，不可能在任何情况下都实现，但这一方法所需的雷达系统结构简单，易于操作与实现，为建筑物内部结构穿透探测提供了非常新颖的思路。

6 结束语

本文对建筑物内部结构探测领域近20年来的发展情况进行了简要梳理。从FPR到全方向穿墙雷达，从直接进行雷达成像到复杂的RTI处理，以及利用室内目标的运动信息间接获取建筑物内部结构，无论是探测平台，还是重建方法，建筑物内部结构穿透探测已经取得了许多振奋人心的成果。当然就现有结果而言，目前获得的建筑物内部结构信息还较为简单，只适合提供一些初步的辅助参考服务，不过随着探测系统与重建算法的不断更新发展，这一领域非常有可能出现新的突破。

从本文梳理的结果来看，虽然国外在该领域的研究起步早于国内，但在国内研究人员的努力下，国内也涌现出很多新颖高效的建筑物内部结构探测方法。不过也应注意到，国内在该领域的创新依然弱于国外，一个非常显著的特点是国外研究人员侧重于系统架构与处理算法的综合改进，国内则更倾向于单纯的算法创新。不过伴随着国内器件水平的提高与制造成本的下降，我们有理由相信，未来国内在该领域的研究将可能取得非常显著的突破。

建筑物内部结构穿透探测有着广阔的应用前景与研究价值，结合目前的发展情况与应用需求来看，一些可能的发展趋势是：

(1) 探测平台将更加轻型化与多样化，特别是结合当前机器人、无人机等技术的发展，未来的穿墙探测会具有更高的空间探测自由度，针对高层建筑以及地下建筑物等目前几乎尚未涉及的探测对象，开展内部结构穿透探测将变得更加容易；

(2) 多种探测技术的融合将提高建筑物内部结构的探测性能，现有的雷达成像技术与RTI等技术，除了各自独立发展之外，未来将可能出现融合上述技术的探测平台与结构重建方法，从而实现技术互补；

(3) 目前建筑物内部结构探测领域还主要依赖于研究人员手工设计成像模型与方法，而在与之紧密相关的室内人员目标探测领域，已经出现了大量使用人工智能技术的研究成果，未来这些研究很可能会迁移到建筑物内部结构穿透探测领域。

参 考 文 献

- [1] NKWARI P K M, SINHA S, and FERREIRA H C. Through-the-wall radar imaging: A review[J]. *IET Technical Review*, 2018, 35(6): 631–639. doi: [10.1080/02564602.2017.1364146](https://doi.org/10.1080/02564602.2017.1364146).
- [2] NGUYEN L, RESSLER M, and SICHINA J. Sensing through the wall imaging using the Army Research Lab ultra-wideband synchronous impulse reconstruction (UWB SIRE) radar[C]. The SPIE 6947, Radar Sensor Technology XII, Orlando, USA, 2008: 69470B. doi: [10.1117/12.776869](https://doi.org/10.1117/12.776869).
- [3] AHMAD F and AMIN M G. Multi-viewpoint image fusion for urban sensing applications[C]. The SPIE 6968, Signal Processing, Sensor Fusion, and Target Recognition XVII, Orlando, USA, 2008: 69680L. doi: [10.1117/12.782302](https://doi.org/10.1117/12.782302).
- [4] SENG C H, BOUZERDOUM A, PHUNG S L, *et al.* A two-stage image fusion method for enhanced through-the-wall radar target detection[C]. 2011 IEEE RadarCon (RADAR), Kansas City, USA, 2011: 643–647. doi: [10.1109/RADAR.2011.5960616](https://doi.org/10.1109/RADAR.2011.5960616).
- [5] SENG C H, BOUZERDOUM A, TIVIVE F H C, *et al.* Fuzzy logic-based image fusion for multi-view through-the-wall radar[C]. 2010 International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications, Sydney, Australia, 2010: 423–428. doi: [10.1109/DICTA.2010.78](https://doi.org/10.1109/DICTA.2010.78).
- [6] SÉVIGNY P and DIFILIPPO D J. A multi-look fusion approach to through-wall radar imaging[C]. 2013 IEEE Radar Conference (RadarCon13), Ottawa, Canada, 2013: 1–6. doi: [10.1109/RADAR.2013.6586154](https://doi.org/10.1109/RADAR.2013.6586154).
- [7] SENG C H, BOUZERDOUM A, AMIN M G, *et al.* Probabilistic fuzzy image fusion approach for radar through wall sensing[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, 22(12): 4938–4951. doi: [10.1109/TIP.2013.2279953](https://doi.org/10.1109/TIP.2013.2279953).
- [8] PATWARI N and AGRAW P. Effects of correlated shadowing: Connectivity, localization, and RF tomography[C]. 2008 International Conference on Information Processing in Sensor Networks (ipsn 2008), St. Louis, USA, 2008: 82–93. doi: [10.1109/IPSN.2008.7](https://doi.org/10.1109/IPSN.2008.7).
- [9] LI Li and KROLIK J L. Simultaneous target and multipath positioning[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2014, 8(1): 153–165. doi: [10.1109/JSTSP.2013.2289949](https://doi.org/10.1109/JSTSP.2013.2289949).
- [10] 张驰, 李悦丽, 周智敏. 基于独立分量分析法的稀疏阵列穿墙成像雷达直达波干扰抑制[J]. *雷达学报*, 2014, 3(5): 524–532. doi: [10.3724/SP.J.1300.2014.14066](https://doi.org/10.3724/SP.J.1300.2014.14066).
ZHANG Chi, LI Yueli, and ZHOU Zhimin. Wall clutter mitigation in through-the-wall imaging radar with sparse array antenna based on independent component analysis[J]. *Journal of Radars*, 2014, 3(5): 524–532. doi: [10.3724/SP.J.1300.2014.14066](https://doi.org/10.3724/SP.J.1300.2014.14066).
- [11] TAN Yunhua, WANG Libo, and LI Lianlin. A novel probability model for suppressing multipath ghosts in GPR and TWI Imaging: A numerical study[J]. *Journal of Radars*, 2015, 4(5): 509–517. doi: [10.12000/JR15056](https://doi.org/10.12000/JR15056).
- [12] JIN Tian, CHEN Bo, and ZHOU Zhimin. Image-domain estimation of wall parameters for autofocusing of through-the-wall SAR imagery[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(3): 1836–1843. doi: [10.1109/TGRS.2012.2206395](https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2206395).
- [13] FALCONER D G and UEBERSCHAER R M. Floor-plan radar[C]. The SPIE 4033, Radar Sensor Technology V, Orlando, USA, 2000, doi: [10.1117/12.391842](https://doi.org/10.1117/12.391842).
- [14] DOGARU T and LE C. SAR images of rooms and buildings based on FDTD computer models[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(5): 1388–1401. doi: [10.1109/TGRS.2009.2013841](https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2013841).
- [15] DOGARU T and LE C. Through-the-wall radar simulations for complex room imaging[R]. ARL-TR-5205, 2010.
- [16] LE C, DOGARU T, NGUYEN L, *et al.* Ultrawideband (UWB) radar imaging of building interior: Measurements and predictions[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(5): 1409–1420. doi: [10.1109/TGRS.2009.2016653](https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2016653).
- [17] LE C, NGUYEN L, and DOGARU T. Radar imaging of a large building based on near-field Xpatch model[C]. 2010 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Toronto, Canada, 2010: 1–4. doi: [10.1109/APS.2010.5562119](https://doi.org/10.1109/APS.2010.5562119).
- [18] JIA Yong, ZHONG Xiaoling, LIU Jiangang, *et al.* Single-side two-location spotlight imaging for building based on MIMO through-wall-radar[J]. *Sensors*, 2016, 16(9): 1441. doi: [10.3390/s16091441](https://doi.org/10.3390/s16091441).
- [19] DE WIT J J M, VAN ROSSUM W L, and SMITS F M A. SAPPHERE: A novel building mapping radar[C]. 2009 European Radar Conference (EuRAD), Rome, Italy, 2009: 625–628.
- [20] SMITS F M A, DE WIT J J M, VAN ROSSUM W L, *et al.* 3D mapping of buildings with SAPPHERE[C]. The 6th Electro-Magnetic Remote Sensing - Defence Technology Centre (EMRS DTC) Technical Conference, Edinburgh, UK, 2009.
- [21] BROWNE K E, BURKHOLDER R J, and VOLAKIS J L. A novel low-profile portable radar system for high resolution through-wall radar imaging[C]. 2010 IEEE Radar Conference, Washington, USA, 2010: 333–338. doi: [10.1109/RADAR.2010.5494602](https://doi.org/10.1109/RADAR.2010.5494602).
- [22] SONG Yongping, ZHU Jiahua, HU Jun, *et al.* Grating lobes suppression for ultra-wideband MIMO radar imaging[C]. The 2017 3rd IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC), Chengdu, China, 2017: 957–961. doi: [10.1109/CompComm.2017.8322685](https://doi.org/10.1109/CompComm.2017.8322685).

- [23] BRAGA A J and GENTILE C. An ultra-wideband radar system for through-the-wall imaging using a mobile robot[C]. 2009 IEEE International Conference on Communications, Dresden, Germany, 2009: 1–6. doi: [10.1109/ICC.2009.5198740](https://doi.org/10.1109/ICC.2009.5198740).
- [24] FALCONER D G, FICKLIN R W, and KONOLIGE K G. Detection, location, and identification of building occupants using a robot-mounted through-wall radar[C]. The SPIE 4037, Digitization of the Battlespace V and Battlefield Biomedical Technologies II, Orlando, USA, 2000, doi: [10.1117/12.395028](https://doi.org/10.1117/12.395028).
- [25] SONG Yongping, ZHU Jiahua, HU Jun, *et al.* Enhanced imaging of building interior for portable MIMO through-the-wall radar[J]. *Journal of Physics*, 2018, 960: 012023.
- [26] SAKAMOTO T and SATO T. A method of estimating a room shape using a single antenna in a multipath environment[C]. The 4th European Conference on Antennas and Propagation, Barcelona, Spain, 2010: 1–5.
- [27] YEKTAKHAH B and SARABANDI K. All-directions through-the-wall radar imaging using a small number of moving transceivers[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(11): 6415–6428. doi: [10.1109/TGRS.2016.2585112](https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2585112).
- [28] YEKTAKHAH B and SARABANDI K. All-directions through-the-wall imaging using a small number of moving omnidirectional bi-static FMCW transceivers[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(5): 2618–2627. doi: [10.1109/TGRS.2018.2875695](https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2875695).
- [29] YEKTAKHAH B and SARABANDI K. A method for detection of walls and large flat surfaces in through-the-wall SAR imaging[C]. 2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting, Atlanta, USA, 2019: 815–816. doi: [10.1109/APUSNCURSINRSM.2019.8889357](https://doi.org/10.1109/APUSNCURSINRSM.2019.8889357).
- [30] ABEDI H and ZAKERI B. Through-the-multilayered wall imaging using passive synthetic aperture radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(7): 4181–4191. doi: [10.1109/TGRS.2018.2890027](https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2890027).
- [31] BARANOSKI E J. VisiBuilding: Sensing through walls[C]. The 4th IEEE Workshop on Sensor Array and Multichannel Processing, Waltham, USA, 2006: 1–22. doi: [10.1109/SAM.2006.1706221](https://doi.org/10.1109/SAM.2006.1706221).
- [32] BARANOSKI E J. Through-wall imaging: Historical perspective and future directions[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2008, 345(6): 556–569. doi: [10.1016/j.jfranklin.2008.01.005](https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2008.01.005).
- [33] SUBOTIC N, KEYDEL E, BURNS J, *et al.* Parametric reconstruction of internal building structures via canonical scattering mechanisms[C]. 2008 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Las Vegas, USA, 2008: 5189–5192. doi: [10.1109/ICASSP.2008.4518828](https://doi.org/10.1109/ICASSP.2008.4518828).
- [34] BUONANNO A, D’URSO M, PRISCO G, *et al.* An improved radar system for inside-building awareness[C]. 2012 Tyrrhenian Workshop on advances in radar and remote sensing (TyWRRS), Naples, Italy, 2012: 85–89. doi: [10.1109/TyWRRS.2012.6381109](https://doi.org/10.1109/TyWRRS.2012.6381109).
- [35] AFTANAS I M. Through wall imaging with UWB Radar system[D]. [Ph. D. dissertation], Technical University of Košice, 2009: 68–75.
- [36] AFTANAS M and DRUTAROVSKÝ M. Imaging of the building contours with through the wall UWB radar system[J]. *Radioengineering*, 2009, 18(3): 258–264.
- [37] 贾勇, 孔令讲, 马静, 等. 穿墙雷达多视角建筑布局成像[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(5): 1114–1119. doi: [10.3724/SP.J.1146.2012.01056](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2012.01056).
- JIA Yong, KONG Lingjiang, MA Jing, *et al.* Through-wall-radar multi-view imaging for architectural layout of building[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(5): 1114–1119. doi: [10.3724/SP.J.1146.2012.01056](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2012.01056).
- [38] JIA Yong, CUI Guolong, KONG Lingjiang, *et al.* Multichannel and multiview imaging approach to building layout determination of through-wall radar[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(5): 970–974. doi: [10.1109/LGRS.2013.2283778](https://doi.org/10.1109/LGRS.2013.2283778).
- [39] 姚雪. 透视雷达建筑布局多视角成像算法研究[D]. [硕士学位论文], 电子科技大学, 2015: 41–44.
- YAO Xue. Perspective detection research about the multi-view imaging of building layout[D]. [Master dissertation], University of Electronic Science and Technology of China, 2015: 41–44.
- [40] 唐茜, 晋良念. 多方位多尺度建筑物布局成像融合方法[J]. 雷达科学与技术, 2019, 17(1): 83–88, 93. doi: [10.3969/j.issn.1672-2337.2019.01.015](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-2337.2019.01.015).
- TANG Qian and JIN Liangnian. Multi-azimuth and multi-scale building layout imaging fusion method[J]. *Radar Science and Technology*, 2019, 17(1): 83–88, 93. doi: [10.3969/j.issn.1672-2337.2019.01.015](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-2337.2019.01.015).
- [41] JIA Yong, CHEN Shengyi, SONG Ruiyuan, *et al.* Building layout determination based on generative adversarial nets in through-wall radar imaging[C]. 2019 IEEE International Conference on Signal, Information and Data Processing, Chongqing, China, 2019: 1–6.
- [42] 陈波. 基于图理论的穿墙雷达建筑物布局重构技术研究[D]. [博士学位论文], 国防科学技术大学, 2014: 77–82.
- CHEN Bo. Study on building layout reconstruction techniques based on graph theory from through-the-wall radar[D]. [Ph. D. dissertation], National University of Defense Technology, 2014: 77–82.

- [43] CHEN Bo, JIN Tian, LU Biying, *et al.* Building interior layout reconstruction from through-the-wall radar image using MST-based method[J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2014, 2014(1): 1–9. doi: [10.1186/1687-6180-2014-1](https://doi.org/10.1186/1687-6180-2014-1).
- [44] 陈波, 金添, 陆必应, 等. 穿墙雷达中基于最小生成树的建筑物内部结构重构技术[J]. 电子学报, 2015, 43(9): 1682–1688. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2015.09.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2015.09.002).
CHEN Bo, JIN Tian, LU Biying, *et al.* Building interior structure reconstruction from through-the-wall radar image using MST-based method[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2015, 43(9): 1682–1688. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2015.09.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2015.09.002).
- [45] LAGUNAS E, AMIN M G, AHMAD F, *et al.* Compressive sensing for through wall radar imaging of stationary scenes using arbitrary data measurements[C]. The 2012 11th International Conference on Information Science, Signal Processing and their Applications (ISSPA), Montreal, Canada, 2012: 1347–1352. doi: [10.1109/ISSPA.2012.6310503](https://doi.org/10.1109/ISSPA.2012.6310503).
- [46] LAGUNAS E, AMIN M G, AHMAD F, *et al.* Sparsity-based radar imaging of building structures[C]. The 20th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), Bucharest, Romania, 2012: 864–868.
- [47] 金添, 宋勇平. 超宽带雷达建筑物结构稀疏成像[J]. 雷达学报, 2018, 7(3): 275–284. doi: [10.12000/JR18031](https://doi.org/10.12000/JR18031).
JIN Tian and SONG Yongping. Sparse imaging of building layouts in ultra-wideband radar[J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(3): 275–284. doi: [10.12000/JR18031](https://doi.org/10.12000/JR18031).
- [48] ZHAO Jifang, JIN Liangnian, and LIU Qinghua. Through-the-wall radar sparse imaging for building walls[J]. *The Journal of Engineering*, 2019, 2019(21): 7403–7405. doi: [10.1049/joe.2019.0541](https://doi.org/10.1049/joe.2019.0541).
- [49] 杨俊刚. 利用稀疏信息的正则化雷达成像理论与方法研究[D]. [博士学位论文], 国防科学技术大学, 2013: 1–2.
YANG Jungang. Research on sparsity-driven regularization radar imaging theory and method[D]. [Ph. D. dissertation], National University of Defense Technology, 2013: 1–2.
- [50] SUNDARAM R, MARTIN R, and ANDERSON C. Regularization in radio tomographic imaging[C]. The SPIE 8753, Wireless Sensing, Localization, and Processing VIII, Baltimore, USA, 2013: 87530O. doi: [10.1117/12.2012167](https://doi.org/10.1117/12.2012167).
- [51] WILSON J and PATWARI N. Radio tomographic imaging with wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2010, 9(5): 621–632. doi: [10.1109/TMC.2009.174](https://doi.org/10.1109/TMC.2009.174).
- [52] LIU Heng, WANG Zhenghuan, BU Xiangyuan, *et al.* Image reconstruction algorithms for radio tomographic imaging[C]. 2012 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER), Bangkok, Thailand, 2012: 48–53. doi: [10.1109/CYBER.2012.6392525](https://doi.org/10.1109/CYBER.2012.6392525).
- [53] MOSTOFI Y and SEN P. Compressed mapping of communication signal strength[C]. MILCOM 2008 - 2008 IEEE Military Communications Conference, San Diego, USA, 2008: 1–7. doi: [10.1109/MILCOM.2008.4753442](https://doi.org/10.1109/MILCOM.2008.4753442).
- [54] MOSTOFI Y. Compressive cooperative sensing and mapping in mobile networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2011, 10(12): 1769–1784. doi: [10.1109/TMC.2011.31](https://doi.org/10.1109/TMC.2011.31).
- [55] MOSTOFI Y. Cooperative wireless-based obstacle/object mapping and see-through capabilities in robotic networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2013, 12(5): 817–829. doi: [10.1109/TMC.2012.32](https://doi.org/10.1109/TMC.2012.32).
- [56] GONZALEZ-RUIZ A, GHAFARHAH A, and MOSTOFI Y. An integrated framework for obstacle mapping with see-through capabilities using laser and wireless channel measurements[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2014, 14(1): 25–38. doi: [10.1109/JSEN.2013.2278394](https://doi.org/10.1109/JSEN.2013.2278394).
- [57] DEPATLA S, BUCKLAND L, and MOSTOFI Y. X-ray vision with only WiFi power measurements using Rytov wave models[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, 64(4): 1376–1387. doi: [10.1109/TVT.2015.2397446](https://doi.org/10.1109/TVT.2015.2397446).
- [58] DEPATLA S, KARANAM C R, and MOSTOFI Y. Robotic through-wall imaging: Radio-frequency imaging possibilities with unmanned vehicles[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2017, 59(5): 47–60. doi: [10.1109/MAP.2017.2731302](https://doi.org/10.1109/MAP.2017.2731302).
- [59] KARANAM C R and MOSTOFI Y. 3D through-wall imaging with unmanned aerial vehicles using WiFi[C]. The 2017 16th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN), Pittsburgh, USA, 2017: 131–142.
- [60] HAMILTON B R, MA Xiaoli, BAXLEY R J, *et al.* Radio frequency tomography in mobile networks[C]. 2012 IEEE Statistical Signal Processing Workshop (SSP), Ann Arbor, USA, 2012: 508–511. doi: [10.1109/SSP.2012.6319745](https://doi.org/10.1109/SSP.2012.6319745).
- [61] BECK B, BAXLEY R and MA Xiaoli. Regularization techniques for floor plan estimation in radio tomographic imaging[C]. 2013 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing, Austin, USA, 2013: 177–180. doi: [10.1109/GlobalSIP.2013.6736844](https://doi.org/10.1109/GlobalSIP.2013.6736844).
- [62] XU Shengxin, LIU Heng, GAO Fei, *et al.* Experimental verification: Enabling obstacle mapping based on radio tomographic imaging[C]. The 2018 IEEE 88th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), Chicago, USA, 2018: 1–5. doi: [10.1109/VTCFall.2018.8690867](https://doi.org/10.1109/VTCFall.2018.8690867).
- [63] GUO Qichang, LI Yanlei, LIANG Xingdong, *et al.* Through-the-wall image reconstruction via reweighted total variation and prior information in radio tomographic imaging[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 40057–40066. doi: [10.1109/ACCESS.2020.3000000](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3000000).

- 10.1109/ACCESS.2020.2976769.
- [64] ZHANG Yang, CUI Guolong, RAN Qingxin, *et al.* Knowledge-assisted building layout reconstruction for through-the-wall radar imaging[C]. 2020 IEEE Radar Conference, Florence, Italy, 2020: 1–5.
- [65] CHEN Jiahui, CUI Guolong, LIU Xinyu, *et al.* Strong scatterer reconstruction based on chirp-pulse microwave computed tomography[C]. 2019 IEEE International Conference on Signal, Information and Data Processing, Chongqing, China, 2019: 1–4.
- [66] GUO Qichang, LI Yanlei, LIANG Xingdong, *et al.* A novel CT-mode through-the-wall imaging method based on time delay estimation[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2020, in press. doi: [10.1109/LGRS.2020.3000423](https://doi.org/10.1109/LGRS.2020.3000423).
- [67] HOLL P M and REINHARD F. Holography of Wi-Fi radiation[J]. *Physical Review Letters*, 2017, 118(18): 183901. doi: [10.1103/PhysRevLett.118.183901](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.118.183901).
- [68] LIU Jiangang, CUI Guolong, JIA Yong, *et al.* Sidewall detection using multipath in through-wall radar moving target tracking[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(6): 1372–1376. doi: [10.1109/LGRS.2015.2403133](https://doi.org/10.1109/LGRS.2015.2403133).
- [69] 刘剑刚. 穿墙雷达隐蔽目标成像跟踪方法研究[D]. [博士论文], 电子科技大学, 2017: 95–106.
- LIU Jiangang. Imaging-tracking technology for hidden targets of a through-the-wall radar[D]. [Ph. D. dissertation], University of Electronic Science and Technology of China, 2017: 95–106.
- [70] GUO Shishen, CUI Guolong, KONG Lingjiang, *et al.* Multipath analysis and exploitation for MIMO through-the-wall imaging radar[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, 11(10): 3721–3731. doi: [10.1109/JSTARS.2018.2865746](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2865746).
- [71] YANG Xiaqing, FAN Shihao, GUO Shisheng, *et al.* NLOS target localization behind an L-shaped corner with an L-band UWB radar[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 31270–31286. doi: [10.1109/ACCESS.2020.2973046](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2973046).
- [72] LI Songlin, CUI Guolong, GUO Shisheng, *et al.* On the electromagnetic diffraction propagation model and applications[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, 13: 884–895. doi: [10.1109/JSTARS.2020.2974529](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.2974529).

作者简介



金添(1980–), 男, 国防科学技术大学教授, 博士生导师, 研究方向为超宽带雷达成像、隐蔽目标检测识别等。全国百篇优秀博士论文获得者, 入选教育部“新世纪优秀人才支持计划”, 获国际无线电科学联盟青年科学家奖, 评为中国电子学会优秀科技工作者。“信号处理与系统”国家精品课程和资源共享课主讲教师, 信号处理系列课程国家级教学团队主要成员。已发表论文100余篇, 获授权国家发明专利7项, 出版专著3部、译著1部、教材1部。《雷达学报》、《信号处理》、《雷达科学与技术》等期刊编委。



宋勇平(1989–), 男, 空军预警学院雷达士官学校讲师, 博士, 研究方向为穿墙探测、MIMO雷达成像、微弱目标检测。



崔国龙(1982–), 男, 电子科技大学教授, 青年长江学者, 博士生导师, 《雷达学报》编委。研究方向为最优化理论和算法、雷达目标检测理论、波形多样性以及城市环境目标探测等。



郭世盛(1991–), 男, 电子科技大学特聘副研究员, 硕士生导师, 研究方向为城市环境遮蔽目标探测、基于雷达的人体行为识别。