

文章编号: 1001-893X(2012)09-1541-06

超宽带穿墙雷达成像技术研究现状*

蔡继亮¹, 童创明^{1,2}, 姬伟杰¹

(1. 空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800; 2. 东南大学 毫米波国家重点实验室, 南京 210096)

摘 要:介绍了国内外超宽带穿墙雷达(Ultra Wide-Band Through the Wall Radar, UWB-TWI)装备研制现状,重点放在穿墙雷达成像算法上,包括逆散射成像算法、后向投影算法、时间反转镜方法、压缩感知成像方法等,以期为相关研究人员提供参考。

关键词:超宽带穿墙雷达;成像算法;逆散射;后向投影;时间反转镜;压缩感知

中图分类号:TN95 **文献标志码:**A doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2012.09.025

Recent Progress of Ultra-wideband Through-the-wall Radar Imaging

CAI Ji-liang¹, TONG Chuang-ming^{1,2}, JI Wei-jie¹

(1. Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, China;
2. State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: This paper introduces the current status of equipment development of the Ultra-Wideband Through-the-Wall Imaging Radar (UWB-TWI) in home and abroad, with emphasis on the imaging algorithms, including inverse scattering method, back-projection method, time reversal mirror technique, compressive sensing method and so on. The research in this paper can provide reference for relative researchers.

Key words: ultra-wideband Through-the-Wall imaging radar; imaging algorithm; inverse scattering; back-projection method; time reversal mirror; compressive sensing

1 引 言

穿墙雷达(Through the Wall Radar, TWR)是伴随着大规模巷战和反恐等军事需求而发展起来的一种新型雷达技术。它主要通过获取并分析回波信号携带的信息,探测隐藏在可穿透介质如黏土墙、介质板、混凝土等之后的目标,获得距离、方位等信息。由于能够提供非入侵式探测,因此,该技术具有广泛而重要的应用前景。在反恐探测中,利用穿墙雷达可实现对建筑物内无法看见的恐怖分子或人质的侦查、定位和跟踪,为狙击手提供重要的方位信息;在军事战争中,它可以对建筑或掩体内的可疑目标

(人)进行外部的非入侵式探测,并对建筑物内的运动目标进行监测,因而能较大程度地提高作战人员的侦察与探测、态势感知和生存能力,还可以进行战场伤员搜救;在关口安检中,可以实现对危险品如金属武器等的非接触式的隔物探测;在灾难搜救中,能够对地震、塌方等情况下废墟里的人员进行搜救。

通常, -10 dB带宽大于或等于500 MHz的信号就可以称为超宽带信号。由于这超宽带信号具有可实现厘米量级的测距精度、能识别和区分不同目标类型、能克服窄带雷达的吸波效应、穿透墙壁的能力强、对复杂背景下的杂乱回波抑制能力强等优点,因此穿墙雷达成像主要采用超宽带信号。

* 收稿日期:2012-03-31;修回日期:2012-05-28

基金项目:陕西省自然科学基金资助项目(2011JM8025);东南大学毫米波国家重点实验室开放课题基金(K201201)

Foundation Item: The Natural Science Foundation of Shaanxi Province (2011JM8025); The National Key Laboratory of Millimeter Waves at Southeast University in China(K201201)

超宽带的实现主要有 3 种方法^[1]:一是冲激脉冲法,二是步进频法,三是线性调频法。它们各有所长:冲激脉冲法中,系统可以采用很窄电磁脉冲和很高的脉冲重复频率,且对目标的反应迅速,利于实时处理,但弱点是脉冲功率难以提高,因而探测距离受到一定限制;线性调频法的功率大,信噪比高,但是实时性不如前者,不利于跟踪快速运动的目标,信号处理也相对复杂;步进频法与线性调频法情况类似,在进行脉冲压缩处理后,均可等效为冲激脉冲系统。值得注意的是,步进频能够控制信号带宽和频率步长,此外,较超短脉冲而言实现较简单,对硬件没有特殊要求,可以达到相同带宽的超短脉冲同样性能,因此更适合手提式穿墙成像雷达中的信号形式。

本文主要介绍超宽带穿墙雷达成像的装备研究和成像算法,包括逆散射成像算法、后向投影算法、时间反转镜方法、压缩感知成像方法等,以期为相关研究人员提供参考。

2 国内外超宽带穿墙雷达装备

2.1 国外

美国 Time Domain 公司推出了基于时间反转镜(Time Reverse Mirer, TRM)技术的首台 UWB 穿墙雷达 SV2000,不久又推出改进版手持式 SV2000A1。该雷达采用超宽带体制,重频 10 MHz,带宽 2.1 ~ 5.6 GHz,距离分辨力小于 1 m,输出功率 50 μ W。视野水平 $\pm 45^\circ$,俯仰 $\pm 60^\circ$,可以二维显示目标实时运动方向和距离。当穿透 20 cm 厚的混凝土墙,可以检测到距离雷达大于 20 m 的目标。美国的 Akela 公司也在近年开发了 UWB 穿墙雷达,其结构如下:由独立的传感器构成的分布式阵列,每个传感器都是高距离分辨力雷达,可固定使用或单人携带。这些传感器工作于 0.5 ~ 2 GHz,频率灵活可变。该 UWB 雷达距离分辨力 10 cm,试验表明该系统可以检测到距离雷达 6.5 m 的混凝土墙后静止人员的呼吸响应信号。美国 Eureka 航空正利用具有极高分辨率的瞬时脉冲合成孔径雷达开发安检系统(简称 ImpSAR)。该系统工作于瞬时脉冲机制,脉宽约 100 ps,因此可得到大的 0.25 ~ 3.5 GHz 带宽,采用特别的脉冲辐射天线,距离分辨力为 5 cm,这种技术保证了适当的穿墙能力及高分辨率的微波成像。

以色列 Camero 公司在 2008 年左右开发了一款强力的 UWB 穿墙雷达成像系统 Xaver800,该系统采

用超宽带体制,可以探测诸如粘土砖、混凝土、灰泥墙、木板、石块和玻璃等环境,探测距离约为 20 m,可以同时实现二维和三维显示,实时捕捉人员位置和移动信息。英国剑桥咨询中心研制的便携式内部空间监视雷达(简称 Prism - 200)基于脉冲体制可以显示出测量区域的 2D 或 3D 图像,可以穿透 40 cm 厚的传统建筑材料,探测人员活动距离可达 15 m。此外,加拿大国防研究与发展部门(DRDC Ottawa)则正在开发超宽带合成孔径穿墙雷达,同时寻求改进支架及成像能力以增强穿墙探测系统的对位置信息的智能判断。初步数值仿真和实验证明了 UWB 合成孔径穿墙雷达可以产生表明房间内大致布局的静态物体位置指示,在此基础上,还能反映建筑物内人员的移动情况。

2.2 国内

在国内,第四军医大学生物医学工程系从 1998 年开始,研制了不同频段的连续波生物雷达样机,自由空间探测距离可达 50 m,能穿透 2 m 厚的实体砖墙并检测到人体的呼吸信号。其中雷达式“生命探测仪”于 2004 年在北京通过了总后勤部和卫生部组织的专家鉴定,标志着我国首次研制出穿墙雷达^[4]。之后,第四军医大学在国家自然科学基金和军队有关部门的资助下,联合必肯科技有限公司和中国电波研究所,自主研制了“生命探测雷达”。该雷达在 5·12 汶川地震救灾中,为成功挽救 35 个压埋人员的生命提供了重要信息。国防科技大学已经开发了 RdarEye 穿墙探测雷达,这是一种工作在 UHF 和 L 频段的超宽带微功率冲激脉冲雷达系统,发射信号为双极性无载频短脉冲信号,对非金属墙体后人体目标进行探测,探测距离可达到 3 ~ 5 m。其高重复频率能提供很好的实时性,能够迅速跟踪动目标,对周围其他电磁设备干扰小,不易被发现,很适合于国家安全部门使用。江苏北方湖光光电公司的 TDR - 6000 超宽带穿墙雷达,比 Soldiervision 穿墙成像雷达的穿透性能更强,成像精度更高,功耗更小,性价比更高;比 Prism 200 对目标实时成像快,探测距离更远,穿透力更强。四川华信科技生产的 Radar Explorer II 能够探测跟踪墙后方 30 m 的多个目标,分辨率为 0.4 m。西安比肯科技业开发了警视 - 3 穿墙雷达。这 3 种雷达都走向了市场。

3 超宽带穿墙雷达成像算法

一般而言,穿墙雷达成像的诸多算法中,都是基

于分层模型。收发天线位于墙前面接收区域,媒质为空气,目标位于墙后面的成像区域,媒质也为空气,中层媒质为墙体。发射天线发射信号,穿透墙体,到达目标,经过目标的反射,反射信号再次穿过墙体到达接收天线。穿墙成像就是利用接收信号,得到成像区域目标的信息。经过国内外众多研究人员的努力,形成了一系列穿墙雷达成像算法,以下分述之。

3.1 逆散射方法

逆散射方法求解超宽带穿墙雷达成像,从数学上看,实质上是一个最优化问题,优化的对象为成像区域的目标信息。主要有两类方法求解:Born 近似法和随机搜索法。

3.1.1 Born 近似法

首先要建立墙后面成像区域中目标-背景媒质间的对比度函数和墙前面接收区域中的散射场之间的电磁场积分方程。通过求解积分方程,得到成像区域中的目标-背景媒质间的对比度函数,从而得到成像区域电磁参数的分布,实现成像。由于积分方程是非线性的,并且含有分层媒质的格林函数,因此,计算过程比较复杂。为了简化计算,通常采用 Born 近似,将非线性积分方程线性化,然后通过迭代方法进行求解。每次迭代都要进行正散射计算,并且,正散射计算时,墙体的参数必须是已知的,而在实际中准确获取墙体参数比较困难。

为避免迭代求解,文献[2]提出了基于一阶 Born 近似的衍射断层成像(Diffraction Tomography, DT)方法进行了二维穿墙成像。该方法只用一次求解散射场,而不用多次正散射计算,并且在计算过程中采用了快速傅里叶变换,从而大大减少了计算量。文献[3]采用截断奇异值分解(Truncated Singular Value Decomposition, TSVD)方法对测量得到的散射场进行 SVD 分解,截取若干较大的奇异值,用于二维成像。同样也只用一次求解散射场,就能得到正则化的穿墙成像结果。文献[4]采用同样的方法,在不同的墙面对室内二维目标分别成像,并进行融合,能够得到目标更丰富的信息。文献[5]在不同的观测高度处,采用 Born 近似并结合 TSVD 方法,得到三维成像区间的不同水平高度的一系列二维切片图像,再将这些切片组合,得到三维图像。

值得注意的是:从原理上看,上述文献并不需要多次求解散射场,因此,只要测量得到散射场,而不需要预先知道墙体参数,就能成像。此外,Born 近似

是基于目标是弱散射体这一假设的,在某些情况下,对目标的电磁参数成像,可能不太准确。

3.1.2 随机搜索算法

这种方法首先构造一个关于接收区测量场和计算场的价值函数,而计算场又是关于成像区域电参数分布的函数,然后再用粒子群算法、差分进化算法等随机搜索算法进行搜索。随机搜索算法的优点是将待求参数作为变量,比较直观;不需要设置初始点,能保证全局收敛;不需要价值函数的导数信息,计算比较简单;可以将墙体参数作为带优化变量,不必事先已知。它的缺点在于,很多随机优化算法会遇到早熟收敛,需要求解很多次正散射。此外当变量较多,达到几十个时,价值函数是一个极难优化的复杂多峰值非线性函数,随机搜索算法的寻优效果不明显。

采用随机搜索算法求解穿墙问题时,为加快速求解速度,一方面,一般正问题要采用加速算法;另一方面,要采取收敛速度快的随机搜索算法。文献[6]用差分进化算法求解了墙体后方二维导体目标的位置、形状以及墙体的厚度、电参数。

逆散射穿墙成像时,一般采用步进频率来实现超宽带,因此要计算多个频点的散射场。而对每一个频点都要计算一次正散射,因此计算量非常大。也可以采用脉冲来实现超宽带,只是要对脉冲产生的场进行时频变换,从而得到多个频点的场值^[2]。

3.2 后向投影方法

后向投影(Back Projection, BP)算法是最具代表性的时域成像处理方法,它来源于计算机层析成像技术,是 McCorkle 根据 CT 成像的投影切片理论导出的一种合成孔径雷达成像方法^[7],因此,也被应用到穿墙成像中^[8-14]。

但在穿墙雷达应用时,传统的后向投影算法会产生较大的误差。因此,为了提高穿墙成像的精度,文献[10]提出了有介质遮挡时目标成像的数学模型,推导了步进频率信号穿墙后向投影算法。根据电磁波的传播路径,对时间延迟项进行了修正。虽然成像结果更为准确,但要求解很多个四次方程的根,计算较为复杂;文献[11]把后向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。在墙后多目标成像上,由于目标之间有耦合,导致在图像中不能区分目标。文献[12]认为,产生这一现象的主要原因是由于 BP 算法与大部分 SAR 成像算法一

样其理论基础是基于远区场的,而对于大多数无载频时域脉冲成像来说采样所得到的数据是不满足这一条件的,因而要应用后向投影算法处理雷达近场成像问题时则必须采用一种基于近场数据的成像模型。为此,提出了将采样所得数据等同为偶极子电流,根据偶极子近场辐射模型求得辐射场,再反向投影到成像区域,从而成像。文献[13]提出了一种双基地合成孔径雷达穿墙成像,可以获取目标非后向散射信息,特别适合对建筑物一类多反射面目标的观测,它采用的也是后向投影算法。而文献[14]则是出于隐蔽探测、抗截获抗干扰的考虑,提出了超宽带噪声穿墙雷达,采用互相关预处理和 BP 算法进行成像。

总的而言,后向投影算法简单,通用性强,但计算量巨大。不少学者开发了 SAR 的快速后向投影算法^[15-16],可在一定程度上解决计算量的问题。将其应用到穿墙成像中,是一个值得研究的方向。

3.3 TRM 方法

近年来,时间反转镜(Time Reversal Mirror, TRM)技术在国外成为光学、声学、电磁学等目标探测领域的研究热点。TRM 源于光学中的相位共轭方法。法国巴黎大学 M. A. Fink^[17]在非均匀介质中,用 TRM 对目标的发射声信号进行聚焦,实现对目标的定位。TRM 是基于复杂随机媒质中波传输的互易性原理,即:目标探测源发射的信号经过复杂随机媒质,由收发合置的天线阵列接收,然后将接收到的信号在时域上做时间反转(相当于频域的相位求共轭),反转信号再经由各自的天线重新发射回去。发射信号遵循先收后发、后收先发这一原则。由于相干作用,这些重新发射的时间反转信号就会聚焦在原来源的位置。

电子科技大学赵志钦教授在美留学和工作期间,将 TRM 技术与 SAR 成像技术相结合,应用于超宽带(UWB)穿墙雷达成像,并取得了可喜的成果。文献[18]采用 TRM-SAR 方法对墙后面的目标成了像,结果比传统的后向投影技术成像结果要好很多。文献[19]使用 TRM 技术对墙后面目标成了像,文献[20]使用 TRM 技术对复杂墙体目标成了像,它们主要是通过短脉冲来实现超宽带的。

值得提出的是,TRM 技术成像不需要准确已知墙体的参数,也能很好地成像。文献[21]结合 Born 近似和 TRM,在墙体参数与实际偏差很大的情况下,实现了墙后二维目标的自聚焦成像。目前,基于

该方法的三维穿墙目标成像还未见报道。

3.4 压缩感知方法

一般而言,穿墙雷达通过在空间各个位置发射和接收超宽带信号然后对成像区域进行高分辨率成像,系统可采用移动天线方式或采用阵列天线实现合成孔径扫描成像。成像区域的距离向分辨率由发射信号带宽决定,方位向分辨率由天线孔径决定。要实现高分辨率成像,必须提高发射信号的带宽和天线的孔径,这样势必增加数据量 and 处理时间。TWR 系统都假设在雷达成像的数据采集时间内,目标是静止的,成像时间的增加意味着目标移动的可能性增加,目标成像准确性将会降低。在获得同等的成像分辨率前提下,减小数据采集时间和数据量不仅可以降低对系统硬件的要求,也可以避免成像时产生目标图像模糊^[22]。

近年来,Donoho 等人从信号分解和逼近理论发展了一种新的压缩感知(Compressive Sensing, CS)理论^[23]。CS 理论指出:只要信号是稀疏的或可压缩的,就能以远低于 Nyquist 采样定理的数据量,通过求解一个带约束的 l_1 范数凸规划问题,以很高的概率重建原始信号。由于在降低数据量上具有突出的优点,CS 在雷达成像中得到广泛应用^[24-26]。

文献[22, 27]采用 CS 理论,随机采样,只用了 7.7% 的全孔径数据,就能很好地对墙后方二维点目标进行成像,并且具有很好的抗随机噪声干扰能力。仿真数据和实测数据都证明了 CS 算法的正确性。文献[28]使用多测量向量 CS 模型,采用多极化数据,得到了比单测量向量的 CS 模型更好的成像结果。压缩感知应用于雷达成像,大都是基于目标对点目标而言的。文献[29]突破了 CS 只能应用于点目标的限制,利用块状目标在小波空间里是稀疏的这一特性,采用 2D 离散小波变换作为成像区间的稀疏基函数,使用压缩感知,得到图像的小波系数,再经过小波逆变换,对墙后面块状目标进行了成像。

尽管 CS 理论在超宽带穿墙雷达中显示出良好的应用前景,但也存在一些亟待解决的问题:其一,如何选择更合适的随机测量矩阵,使得用尽可能少的采样数据达到尽可能高的重建概率以及在硬件上实现随机测量;其二,研究针对 CS 中凸规划问题更加快速的解法;其三,由于 CS 成像结果中噪声点是无规则的,当存在多个目标并且目标反射率相差较大时,真实目标与噪声分离问题等^[22]。

3.5 其他算法

除了上述超宽带穿墙雷达成像算法外,其他的成像算法也见诸报道。

文献[30]提出了已知墙体参数的二维时间延迟求和算法,并将其推广到了三维墙后目标成像^[31],虽然计算量较大,但能准确成像。此外,该方法具有很好的推广性,一旦得到墙体参数的二维时间延迟求和算法,很容易将其推广到三维目标成像。文献[32]研究了基于逆边界散射变换(Inverse Boundary Scattering Transform, IBST)的三维成像算法,并将其应用到超宽带穿墙雷达系统中。基于 IBST 的成像算法虽然硬件较为复杂,但是实时性好,计算效率高,并且可以实现对目标边界准确重建,尤其适用于三维成像。文献[33]在逆边界散射变换的 SEABED 基础上进行了改进,提出了一种新的包络线算法,应用于超宽带穿墙雷达系统,对二维目标成了像。包络线算法可以实现对目标边界精确成像,算法效率高,实时性好,并且随墙体参数估计误差增大,包络线算法误差明显小于 SEABED 算法。

4 结束语

穿墙雷达技术在军用和民用产品中都具有广阔的前景。超宽带具有高空间分辨率、强目标特性提取能力、强电磁穿透特性等优点,是穿墙雷达技术的重要发展方向,值得深入研究。在超宽带穿墙雷达算法中,基于逆散射成像方法会随着优化算法和加速算法的改进而不断完善,走向应用;传统的后向投影算法经过不断改进,也会在穿墙成像中发挥更大的作用;时间反转镜技术借鉴光学、声学等领域目标探测的成果,其与超宽带技术的结合进一步丰富了穿墙雷达成像的内涵;而基于压缩感知的成像算法,在减少采样数据从而缩减计算时间,提高成像分辨率具有独特的优势。运动目标检测、三维目标成像、实时成像、多目标成像都是需要深入研究的问题。

参考文献:

- [1] 易大方, 穿墙雷达人体探测技术的新进展[J]. 电讯技术, 2009, 49(10): 88-92.
YI Da-fang. Recent Progress of Human Body Detection Using Through-wall Radar [J]. Telecommunication Engineering, 2009, 49(10): 88-92. (in Chinese)
- [2] Soldovieri F, Solimene R. Through-Wall Imaging via a Linear Inverse Scattering Algorithm[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2007, 4(4): 513-517.
- [3] Soldovieri F, Solimene R, Prisco G. A Multiaarray Tomographic Approach for Through-Wall Imaging[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(4): 423-431.
- [4] Zhang W J, Hoorfar A. Two-Dimensional Diffraction Tomographic Algorithm For Through-the-Wall Radar Imaging [J]. Progress In Electromagnetics Research B, 2011, 31: 205-218.
- [5] Solimene R, Soldovieri F, Prisco G. Three-Dimensional Through-Wall Imaging Under Ambiguous Wall parameters [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(5): 1310-1317.
- [6] Dehmollaian M. Through-Wall Shape Reconstruction and Wall Parameters Estimation Using Differential Evolution [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(2): 201-205.
- [7] Dehmollaian M, Thiel M, Sarabandi K. Through-the-Wall Imaging Using Differential SAR [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(5): 1289-1296.
- [8] Nag S, Barnes M A, Payment T, et al. An ultra wideband through-wall radar for detecting the motion of people in real time[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4744: 48-57.
- [9] Gauthier S, Chamma W. Surveillance through concrete walls [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5403: 597-608.
- [10] 李述为, 高梅国, 傅雄军. 步进频穿墙雷达成像算法[J]. 现代雷达, 2007, 29(12): 8-11.
LI Shu-wei, GAO Mei-guo, FU Xiong-jun. Imaging Arithmetic Based on Stepped Frequency Through-wall Radar [J]. Modern Radar, 2007, 29(12): 8-11. (in Chinese)
- [11] 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, YANG Jian-yu. Back-Projection Algorithm to Stepped-Frequency Through-the-Wall Radar Imaging [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2008, 37(6): 864-867. (in Chinese)
- [12] ZHONG Wei-jun, TONG Chuang-ming, XIN Lei. A Novel Near Field Imaging Approach for Through-wall Imaging [C]//Proceedings of 2011 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference. Harbin: IEEE, 2011: 164-167.
- [13] 李欣, 黄晓涛, 沈忠义. 双基地合成孔径雷达穿墙成像研究[J]. 宇航学报, 2011, 32(4): 888-897.
LI Xin, HUANG Xiao-tao, SHEN Zhong-yi. Study on Bistatic SAR Through-Wall Imaging [J]. Journal of Astronautics, 2011, 32(4): 888-897. (in Chinese)
- [14] Wang Hong, Narayanan R M, Zheng Ou Zhou. Through-Wall Imaging of Moving Targets Using UWB Random Noise Radar [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2009, 8(2): 802-805.
- [15] Ulander L M H, Hellsten H, Stenstrom G. Synthetic aperture radar processing using fast factorized back-projection [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(3): 760-776.

- [16] 雷文太, 粟毅, 黄春琳, 等. 表层穿透雷达递归反向投影成像算法[J]. 电子学报, 2005, 33(12): 2115 – 2119.
LEI Wen-tai, SU Yi, HUANG Chun-lin, et al. Surface Penetrating Radar Recursive Back Projection Imaging Algorithm [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(12): 2115 – 2119. (in Chinese)
- [17] Fink M, Prada C, Wu F, et al. Self-focusing in inhomogeneous media with Time Reversal Acoustic Mirror[C]//Proceedings of 1989 IEEE Ultrasonics Symposium. Montreal, Que: IEEE, 1989: 681 – 686.
- [18] 赵志钦. 时间反转镜技术及共形天线相关研究[C]//中国电子科技集团公司第十研究所第一届新技术新概念研讨会. 成都: 中国电子科技集团公司第十研究所, 2009.
ZHAO Zhi-qin. Relative research TRM and conformal antenna[C]//The first conference on the New Technologies and the New Concepts of the No. 10 Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation. Chengdu: The 10th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, 2009. (in Chinese)
- [19] Zheng W, Zhao Z, Nie Z. Application of TRM in the UWB through wall radar[J]. Progress In Electromagnetics Research, 2008, 87: 279 – 296.
- [20] Zheng W, Zhao Z, Nie Z, et al. Evaluation of TRM in the complex through wall environment[J]. Progress In Electromagnetics Research, 2009, 90: 235 – 254.
- [21] Li Lianlin, Zhang Wenji, Li Fang. A Novel Autofocusing Approach for Real-Time Through-Wall Imaging Under Unknown Wall Parameters[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(1): 423 – 431.
- [22] 黄琼, 屈乐乐, 吴秉横, 等. 压缩感知在超宽带雷达成像中的应用[J]. 电波科学学报, 2010, 25(1): 77 – 82.
HUANG Qiong, QU Le-le, WU Bing-heng, et al. Compressive sensing for ultra-wideband radar imaging[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2010, 25(1): 77 – 82. (in Chinese)
- [23] Donoho D L. Compressive sensing[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289 – 1306.
- [24] Gurbuz A C, McClellan J H, Scott W R. A compressive sensing data acquisition and imaging method for stepped frequency GPRs[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(7): 2640 – 2650.
- [25] Wei S J, Zhang X L, Shi J, et al. Sparse reconstruction for SAR imaging based on compressed sensing[J]. Progress In Electromagnetics Research, 2010, 109: 63 – 81.
- [26] Zhang L, Xing M, Qiu C, et al. Achieving higher resolution ISAR imaging with limited pulses via compressed sampling[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2009, 6(3): 567 – 571.
- [27] Huang Qiong, Qu Lele, Wu Bingheng, et al. UWB Through-Wall Imaging based on Compressive Sensing[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(3): 1408 – 1415.
- [28] Yang J, Bouzerdoum A, Tivive F H C, et al. Multiple-Measurement Vector Model and Its application to Through-the-wall Radar Imaging[C]//Proceedings of 2011 International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Prague, Czech Republic: IEEE, 2011: 2672 – 2675.
- [29] Michael L, Debes C, Zoubir A M. Compressive Sensing in Through-the-wall Radar Imaging[C]// Proceedings of 2011 International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Prague, Czech Republic: IEEE, 2011: 4008 – 4011.
- [30] Ahmad F, Zhang Y M, Amin M G. Three-dimensional wide-band beamforming for imaging through a single wall[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2008, 5(2): 176 – 179.
- [31] Ahmad F, Amin M G, Kassan S A. Synthetic aperture beamformer for imaging through a dielectric wall[J]. IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems, 2005, 41(1): 2793 – 2798.
- [32] 黄琼, 陈洁, 孟升卫, 等. 一种快速超宽带雷达成像算法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(8): 2001 – 2005.
HUANG Qiong, CHEN Jie, MENG Sheng-wei, et al. A Fast Imaging Algorithm for UWB Through-Wall Radar[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(8): 2001 – 2005. (in Chinese)
- [33] 黄琼, 陈洁, 孟升卫, 等. 超宽带穿墙雷达三维快速成像算法[J]. 数据采集与处理, 2010, 32(6): 136 – 140.
HUANG Qiong, CHEN Jie, MENG Sheng-wei, et al. 3 – D Fast Imaging Algorithm for Ultra-wideBand Through-Wall Radar[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2010, 32(6): 136 – 140. (in Chinese)

作者简介:

蔡继亮(1984—), 男, 湖北人, 博士研究生, 主要研究方向为电磁散射与逆散射、穿墙成像;

CAI Ji-liang was born in Hubei Province, in 1984. He is currently working toward the Ph. D. degree. His research concerns electromagnetic scattering, inverse scattering and through-wall imaging.

Email: shitouji840716@126.com

童创明(1964—), 男, 湖北人, 教授、博士生导师, 主要研究方向为电磁散射与逆散射、计算电磁学、超宽带技术等;

TONG Chuang-ming was born in Hubei Province, in 1964. He is now a professor and also the Ph. D. supervisor. His research concerns electromagnetic scattering, inverse scattering, computational electromagnetics and ultra-wideband.

Email: chmtong@126.com

姬伟杰(1985—), 男, 山西人, 博士研究生, 主要研究方向为目标与环境电磁散射特性。

Ji Wei-jie was born in Shanxi Province, in 1985. He is currently working toward the Ph. D. degree. His research concerns object and environment electromagnetic scattering characteristic.

Email: jiweijie01@163.com