

基于 VNA 的建筑物成像快照雷达系统设计^{*}

刘琦 晋良念

(桂林电子科技大学 信息与通信学院 桂林 541004)

摘要: 针对脉冲体制的穿墙雷达系统在建筑物布局反演应用中分辨率低、距离近的问题,提出一种步进频信号体制的建筑物成像快照雷达系统设计方案,该方案使用矢量网络分析仪、微波射频控制模块、超宽带喇叭天线以及 PC 上位机搭建系统硬件平台;天线阵列采用非均匀线性布阵,通过微波射频控制模块用以扩展通道及实现通道选择,使不同阵元依次工作,实现阵元收发状态转换从而达到分时复用的工作目的;为实现整机控制,基于 LabVIEW 软件开发系统控制平台实现参数配置、数据采集和在线成像处理;实验结果表明,该系统能够对建筑物内部墙体探测,并实现在线检测。

关键词: 快照雷达;LabVIEW;非均匀线性阵列

中图分类号: TN957.7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Design of building-imaging snapshot radar on VNA

Liu Qi Jin Liangnian

(School of Information and Communication Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: A scheme of stepped-frequency radar that is used for building detection has been proposed, which solve the problem that the pulse through-the-wall radar in the building layout inversion application of low resolution, the distance. The hardware platform of the scheme includes vector network analyzer, microwave RF control module, ultra-wideband horn antenna and personal computer. Six ultra-wideband horn antennas are arrayed by non-uniform interval, that the microwave RF control module was used to expand the channel and to achieve channel selection. LabVIEW is used to develop system software control platforms which achieves parameter configuration, data acquisition and online imaging processing. The experiments show that the system can be applied to different scenes of building wall imaging.

Keywords: snapshot radar; LabVIEW; nonuniform linear array

0 引言

由于建筑物布局结构反演具有广阔的应用前景,最近几年,国际上众多的科研机构都对建筑物结构布局反演技术展开了研究。

美国陆军研究实验室研制的车载超宽带同步脉冲重建雷达系统^[1-3],沿着垂直于建筑物方向运动以获取 SAR 成像数据,实现对建筑物内部结构的成像,当工作在圆周聚束 SAR 模式时,实现了房间内部人体目标的成像。尽管该系统获得了很好的成像效果,但是其在成像过程中雷达平台需要沿着预定的轨迹移动,不但要求移动轨迹不受障碍物影响,而且在数据采集过程中需要花费大量时间,以上因素导致其在实际应用中有诸多限制,不能满足实时成像的要求。针对建筑物三维成像,荷兰应用科学机构研发了一款

名为 SAPPHIRE 的实验系统^[4-5],该系统在方位向天线采用 SAR 体制进行数据采集,并配合导轨横向移动,在高度向使用 MIMO 天线阵列形式,该系统采用中心频率为 2.3 GHz 的调频连续波频连续波,通过采集方位向和高度向数据实现建筑物三维成像。除此之外,还采用机载聚束 SAR 测量系统研究建筑物布局成像问题^[6-7],机载聚束 SAR 测量系统不但克服了车载雷达系统在探测环境中容易受到障碍物阻挡影响的缺点,同时也克服了条带式 SAR 中孔径方向成像方式信息不完整的缺点。机载聚束 SAR 成像系统具有高角分辨率的优点,还能够一次性实现建筑物的完整成像。然而研究发现,机载聚束 SAR 测量系统仍然考虑的是相对简单的情况,实际应用中 SAR 的运动规律更加复杂,例如存在不规则运动路径或者非直线 SAR 等,这会使系统特性变得更加复杂,因而需要对系统进行深入

收稿日期:2017-05

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(61461012)、广西物联网技术及产业化推进协同创新中心项目(WLW20060204)、桂林电子科技大学研究生教育创新计划(YJXS201513)资助项目

的研究。

由于电磁波信号在建筑物内部的传播情况复杂,包括墙体和室内设施的电磁属性、目标与墙体地板天花板之间的相互作用以及多个目标之间的相互影响,这些都对系统的设计提出了特殊要求,要求探测距离尽可能远,分辨率尽可能高,并且系统结构尽可能简单。步进频信号是一种高分辨率信号,波形具有灵活设置的优点,所以在建筑物布局成像应用中雷达系统使用步进频信号不失为一个良好的解决方案^[6-7]。

1 系统设计方案及参数设置

系统方案如图1所示,该方案中系统硬件平台包括VNA、6个超宽带喇叭天线、微波射频控制模块和PC上位机。由于系统采用步进频信号,所以信号参数必须合理设置以满足建筑物透视的需要,其中主要满足探测距离和距离分辨率指标要求。由此根据步进频信号特性,通过仿真设计雷达系统的波形参数,并给出合理的仪器参数配置。

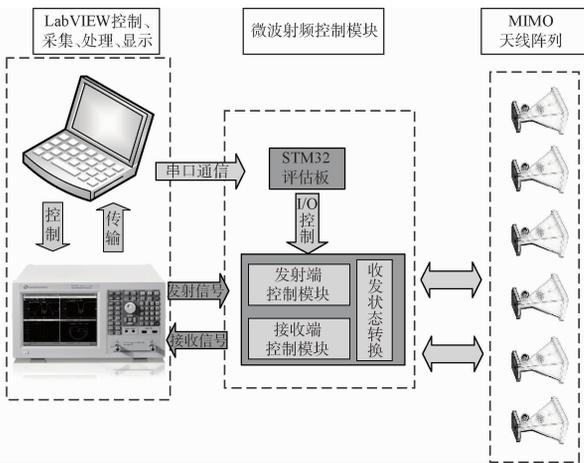


图1 雷达系统设计方案

本系统使用步进频信号作为雷达发射信号,步进频率信号作为一种频域信号,其波形具有灵活设置的特点,不合理的波形参数设计可能导致系统参数相互矛盾影响系统性能,所以必须合理的设置波形参数以满足建筑物成像的需要,步进频率信号的表达式为^[8]:

$$S(t) = \sum_{n=0}^{N-1} A_n \text{rect}\left(\frac{t - nT_r - T_u/2}{T_u}\right) \exp(-j2\pi f_n t) \quad (1)$$

式中: f_n 表示第 n 个相参脉冲的中心频率,其中 $f_n = f_0 + (n-1)\Delta f$, $\text{rect}(t)$ 表示矩形窗函数,其表达式为:

$$\text{rect}\left(\frac{t}{T_u}\right) = \begin{cases} 1, & -T_u/2 < t < T_u/2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

进行系统参数设计时,考虑建筑物布局探测应用中两个系统工作指标,一个是探测距离,另一个则是距离分辨

率,而决定上述系统性能的波形参数有步进频率 Δf , 带宽 B , 相参脉冲数 N , 单频点持续时间 T_r 等。在实际应用过程中,真实的房间面积大小未知,所以在探测距离要求上尽可能的远,步进频雷达的探测距离要转换为最大时间窗,而时间窗响应是对频域数据快速傅里叶逆变换(IFFT)后得到,要保证最大时间没有重叠(也称之为最大不模糊时间),而最大不模糊时间又与频率采样间隔有关,式(3)表示最大不模糊时间。为保证成像质量,频率采样间隔必须要小,当宽带成像时,只关注包含目标的距离段,所以只要式(3)中 W_r 大于目标长度,就可以得到目标无折叠的一维距离像。但是当使用IFFT时需要特别注意的是:当目标长度较大时,为保证合成无模糊距离窗宽度能够覆盖该目标,频率步进量 Δf 不能太大,在保证距离分辨率的前提下,保证步进点数 N 的数量,而频率采样间隔也与 Δf 有关。

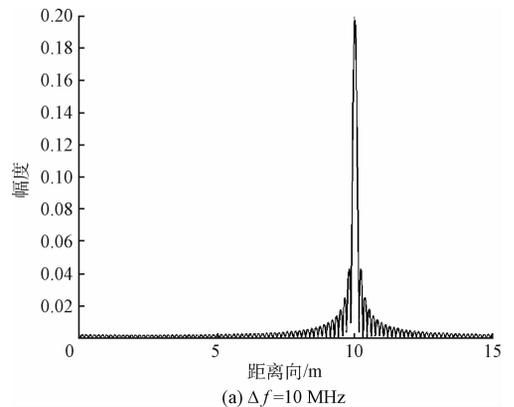
$$W_r = \frac{1}{2\Delta f} \quad (3)$$

$$R_{\max} = \frac{c}{2\Delta f} = (N-1)\Delta d \quad (4)$$

$$T_r \geq \frac{2R_{\max}}{c} = \frac{1}{\Delta f} \quad (5)$$

式(4)表示最远探测距离 R_{\max} 。 R_{\max} 是与步进频率 Δf 有关, Δf 的减小会增大探测距离,探测距离 R_{\max} 还与距离分辨率 Δd 成正比例关系,提高探测距离 R_{\max} 会使得 Δd 增大,造成距离分辨率降低。式(5)表明了单个频点持续时间与最大不模糊距离的关系, T_r 一定要大于 $2R_{\max}/c$ 。根据式(4)、(5)表明,探测距离与 Δf 、 T_r 以及 N 有关。实际上, VNA 的 T_r 是固定的,对于波形参数的设计仅考虑 Δf 和 N , 所以为了提高系统的探测距离,可以通过减小 Δf 或者增加 N 。

通过仿真设计波形参数,首先设定两个目标,位置分别在 10 和 25 m 处,仿真中信号起始频率 $f_0 = 1$ GHz, 带宽 $B = 1$ GHz, 图 2(a) 为 $\Delta f = 10$ MHz, $N = 101$, 图 2(b) 为 $\Delta f = 5$ MHz, $N = 201$ 。从图 2(a) 可以看出,最远探测距离达到 15 m, 看不到 25 m 处目标, 而图 2(b) 探测距离达到 30 m, 可以看到 25 m 处目标, 所以说明了探测距离 R_{\max} 与 Δf 、 N 之间存在关系。



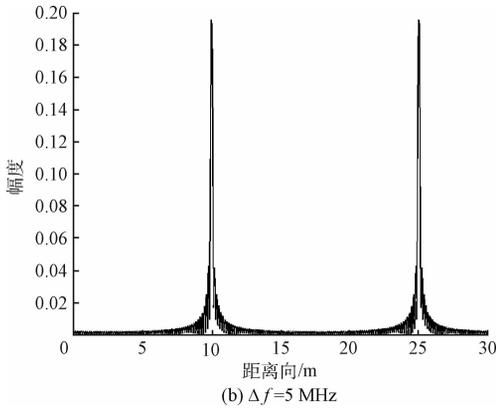


图 2 探测距离仿真

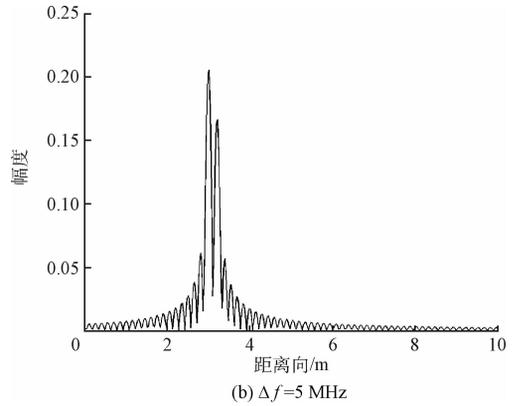


图 3 距离分辨率仿真

仿真只是针对理想情况,实际中,对探测距离的影响因素还包括墙体对电磁波的衰减作用,还与信号源的输出功率 P , 以及接收机最小可探测信号功率 P_r 有关, P 越大, P_r 越小, 就能接收到更远距离的回波信号, 则 R_{max} 就越大。

雷达距离分辨率是表示多个目标在同一方位角时, 能被雷达区分出来的最小方位角距离。式(6)表示信号的绝对带宽, 式(7)表示距离分辨率。

$$B = (N - 1)\Delta f \quad (6)$$

$$\Delta d = \frac{c}{2B} \quad (7)$$

式中: c 表示电磁波在空气中的传播速度, 通常选取常值 3×10^8 m/s。根据式(6)、(7)可知, 不仅影响分辨率, 同时还与步进频率 Δf 与步进点数 N 有关, 当 Δf 不变, 随着 N 的增加也会提高绝对带宽 B , 从而提高距离分辨率, 但是相应随着步进点数 N 的增加系统扫描时间也会增加, 进而影响系统的工作效率以及数据采集时间, 所以要合理的选择系统参数。

通过仿真验证参数对距离分辨率的影响, 设定两个目标, 分别在 3 m 和 3.15 m 位置, 前后距离间隔 0.15 m。图 3(a)的 Δf 设定为 10 MHz, 从波形中不能区分 2 个目标, 图 3(b)的 Δf 设定为 5 MHz, 可以区分出前后 2 个目标。综上所述, 本系统参数设置如表 1 所示:

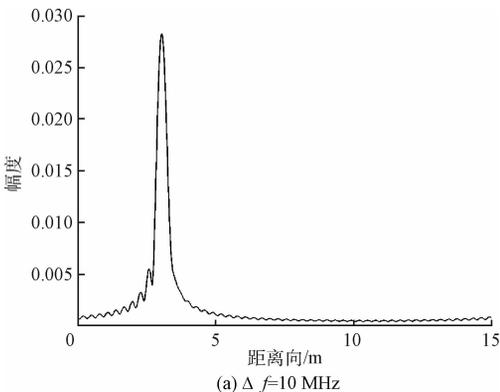


表 1 系统参数设定

参数	符号	数值
起始频率	f_0	1 GHz
带宽	B	1 GHz
步进点数	N	201
步进频率	Δf	5 MHz
功率	P	10 dBm
中频带宽	B_{IF}	50 kHz
扫描时间	T	20.1 ms

2 基于虚拟相位中心天线阵列设计

建筑物成像快照雷达系统使用有限阵元的固定孔径天线阵列进行数据采样, 其中面临的问题就是该情况下如何有效获取更多建筑物墙体数据。本文基于虚拟相位中心原理设计非均匀线性阵列, 使用 6 个超宽带喇叭天线稀疏布阵组成 MIMO (multiple-input multiple-output) 阵列, 孔径长度为 2 m, 阵元间隔为 0.6、0.3、0.2、0.3、0.6 m; 天线工作方式使用分时复用的方法获得 30 组阵元数据, 以解决有限阵元的固定天线阵列获取更多的建筑物目标信息的问题, 使用微波射频控制模块对阵元组合进行切换, 依次使一个阵元为发射阵元, 其余阵元为接收阵元, 遍历 6 个超宽带喇叭天线, 采集 30 组阵元数据, 如式(8)所示, 其中 M 表示阵元组合数, T_j 表示第 j 个发射阵元, R_k 表示第 k 个接收阵元。

$$M = T_j \times R_k \quad (8)$$

基于 MIMO 阵列虚拟相位中心原理, 每组发射、接收阵元之间可以形成一个空间并存的虚拟阵元, 所以使用非均匀布阵方式含有更多虚拟阵元。假设 X_j 表示发射阵元的空间位置, X_k 表示接收阵元的空间位置, 则该情况下, 虚拟阵元 X_v 所在位置的计算公式为^[9-11]:

$$X_v = \frac{X_j + X_k}{2} \quad j \neq k \quad (9)$$

根据 MIMO 阵列的虚拟相位中心原理, 在分时复用的

情况下会引入更多的虚拟阵元,实阵元位置如图 4(a)所示,每组收发阵元组合下的虚拟阵元位置如图 4(b)所示。

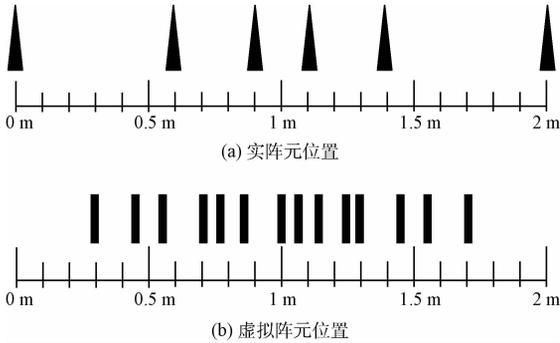


图 4 阵元分布

由于虚拟阵元的存在可以两阵元之间内插,所以除了实阵元的空间采样外,额外的虚拟阵元同样能够提供采样数据,这有助于雷达成像系统获得更多目标信息,所以提高了雷达系统的单次“快照”空间采样能力。

3 基于 LabVIEW 的系统控制平台

为实现系统操作的灵活性与便捷性,通过 LabVIEW 开发系统控制平台^[12-14],实现系统参数配置、数据采集、成像处理等功能。LabVIEW 的后面板程序结构非常重要,是整个控制程序的骨骼框架。本文设计的上位机控制程序框架采用状态机结构,状态机结构是 LabVIEW 程序开发的一种主要用于人机交互操作的程序结构,使用状态机结构能够短时间内开发出所需要的应用程序。图 5 是本系统上位机控制软件所使用的改进的状态机结构,在程序框图设计中,使用 LabVIEW 中以下控件搭建程序框图的状态机结构框图:1)While 循环结构:用于不断执行程序的各种状态,并且使程序在事件、动作结束后能够处于等待状态。2)条件分支结构:执行状态,用于响应不同输入状态下的输出状态。3)移位寄存器:包含状态转换信息。4)字符串:用于状态信息传递。

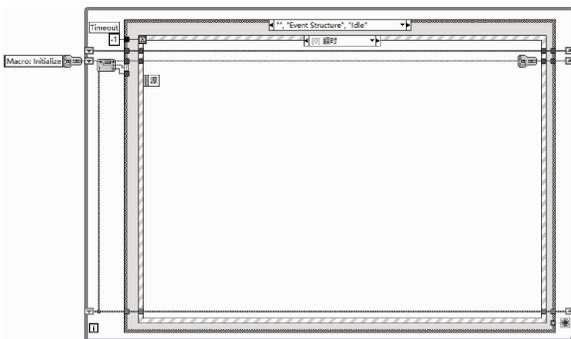


图 5 状态机结构框图

基于状态机结构设计相应程序功能,程序功能模块如图 6 所示,主要有以下功能模块^[15]。

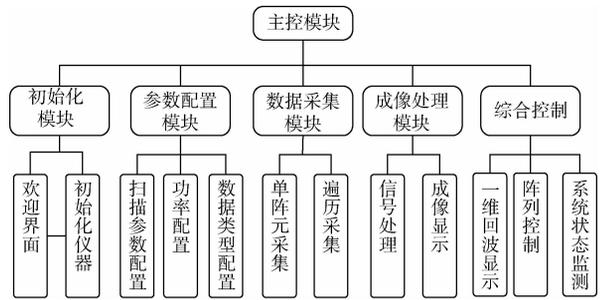


图 6 程序功能模块

1)主控模块:主控模块完成主控程序和仪器的初始化操作,在初始化过程中调用欢迎界面子程序,还可以调其他功能模块的执行相应操作,当程序运行结束后,释放 VISA 串口资源,关闭设备。

2)参数配置模块:在上位机控制操作界面上提供各种设置选项来代替仪器面板上的设置菜单,用以实现系统参数的配置。

3)数据采集模块:根据实际应用需要,分为单阵元数据采集和遍历采集两种工作方式。遍历采集模式配合微波射频控制模块,遍历所有阵元组合采集数据。此过程置于循环结构中,LabVIEW 读取测量参数的幅度和相位写入到测量文件,并且指定文件夹存储,需要注意的是 VNA 在执行完一个完整的扫描帧才能执行下一次存储指令。

4)成像处理模块:使用 LabVIEW 中的 mathscript 节点实现对复杂信号处理,mathscript 节点是面向数学的文本编程,所以可以内嵌后向投影(back projection, BP)算法进行成像处理。使用 mathscript 公式节点对保存到上位机的观测数据进行处理,并且处理后将成像结果通过图形控件显示到程序前端显示界面。

5)综合控制模块:用于监测当前系统设定的参数,方便用户了解当前仪器的参数配置以及工作状态,并且可以实现对天线阵列通道选择的控制。LabVIEW 控制界面如图 7 所示。



图 7 LabVIEW 系统控制界面

4 实验结果与分析

为验证系统性能分别对不同场景进行实验,系统实验平台与场景如图 8(a)、(b)所示,其中场景 1 墙体为非均匀介质材料,该场景包括前墙、后墙以及木门;场景 2 墙体为均匀介质材料,该场景包括前后两面墙体。系统参数设定如表 1 所示,对场景单次快照采集数据并使用后向投影算法进行在线成像。



图 8 系统平台与实验场景

上位机成像结果显示如图 9(a)、(b)所示,场景 1 成像区域为 $2\text{ m} \times 3\text{ m}$,从成像结果可以明显的看到前后两面墙体,由于是非均匀材料,表明该系统可以用于非均匀介质墙体和均匀介质墙体等不同场景建筑物布局成像。该系统通过 LabVIEW 的应用,操作简便且易用,并且最终成像结果也验证了系统的可靠性。

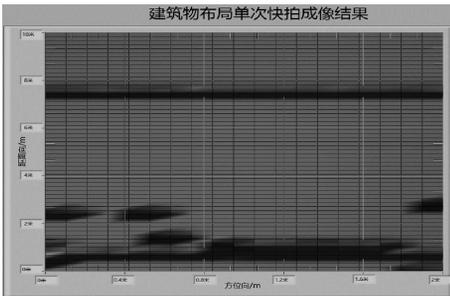


图 9 上位机成像结果显示

5 结 论

基于 VNA 搭建建筑物布局成像系统,利用微波射频开关板实现 MIMO 天线阵列配置方式,采用合成孔径的工作方式采集数据,通过 LabVIEW 上位机实现控制,实现系统控制、数据采集、处理和显示一体化的工作模式,达到在线检测的目的。实验结果验证了该系统的工作性能,能够适用于不同探测场景,同时该系统的搭建也为以后的实验提供了一个很好的测试平台,弥补了当前课题组没有自建实验平台的弊端。

参考文献

- [1] LE C, NGUYEN L, DOGARU T. Radar imaging of a large building based on near-field Xpatch model[C]. Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), IEEE, 2010: 1-4.
- [2] NDOYE M, ANDERSON J M M. An MM-based algorithm for L 1-regularized least squares estimation in GPR image reconstruction[C]. Radar Conference (RADAR), IEEE, 2013: 1-6.
- [3] DOGARU T, SULLIVAN A, LE C, et al. Radar signature prediction for sensing-through-the-wall by Xpatch and AFDTD-Part II[C]. High Performance Computing Modernization Program Users Group Conference (HPCMP-UGC), IEEE, 2010: 401-406.
- [4] DE WIT J J M, ANITORI L, VAN ROSSUM W L, et al. Radar mapping of buildings using sparse reconstruction with an overcomplete dictionary[C]. Radar Conference (EuRAD), IEEE, 2011: 9-12.
- [5] DE WIT J J M, VAN ROSSUM W L, MILLER R J, et al. multifunction radar concept for through-wall surveillance [C]. Radar Conference (RADAR), IEEE, 2013: 1-6.
- [6] LAGUNAS E, AMIN M G, AHMAD F, et al. Determining building interior structures using compressive sensing [J]. Journal of Electronic Imaging, 2013, 22(2): 021003-021003.
- [7] AMIN M G, AHMAD F. Compressive sensing for through-the-wall radar imaging [J]. Journal of Electronic Imaging, 2013, 22(3): 030901-030901.
- [8] 金胜, 朱天林, 王海波. 步进频雷达成像技术研究进展[J]. 飞行器测控学报, 2013, 32(6): 490-495.
- [9] BROVOLL S, BERGER T, PAICHARD Y, et al. Time-lapse imaging of human heartbeats using UWB radar [C]. Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS), IEEE, 2013: 142-145.
- [10] BROVOLL S, BERGER T, PAICHARD Y, et al. Time-lapse imaging of human heart motion with switched array UWB radar[J]. IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, 2014, 8(5): 704-715.
- [11] LU B, ZHAO Y, SUN X, et al. Design and analysis of ultra-wideband split transmit virtual aperture array for through-the-wall imaging [J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2013(1): 170-174.
- [12] 刘正琼, 胡丽莉, 唐璇, 等. 基于虚拟仪器的肢体姿态检测系统研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2015,

- 29(6): 907-913.
- [13] 袁圆, 马昌媛, 王辉, 等. 基于 LabVIEW 的药粉气溶胶颗粒雾化测控仪研制[J]. 电子测量技术 2016, 39(3): 171-176.
- [14] 李玉霞, 张斌, 杨晓霞. 基于 LabVIEW 的大望远镜直线位移传感器测量系统[J]. 国外电子测量技术. 2016, 35(3): 80-84.
- [15] 刘琦, 晋良念, 张燕, 等. 超宽带雷达人体呼吸在线检测系统设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(10): 1606-1614.

作者简介

刘琦, 1991 年出生, 硕士研究生, 主要研究方向为超宽带雷达隐藏目标探测技术及应用。

E-mail: kterl@sina.com