

## 高平面分辨率穿透成像雷达的研究与实现\*

何志华, 刘涛, 宋晓骥, 陈诚, 金光虎, 黄春琳, 粟毅  
(国防科技大学电子科学学院, 湖南长沙 410073)

**摘要:** 穿透成像雷达利用电磁波对介质的穿透特性, 对非金属介质内的不连续点进行高分辨成像。为实现该雷达系统的毫米级高平面分辨率、高探测效率和高便携适用性, 设计了高平面分辨率穿透成像雷达系统。采用连续波体制和快速扫描空间采样方案以确保小型化和高成像性能, 实现了一体化雷达射频前端; 提出了参数未知条件下的自聚焦成像处理等数据处理方法, 研制了穿透成像雷达系统样机, 质量仅为 2.5 kg, 可单人手持操作; 开展了成像分辨率和穿透能力实验测试, 验证了方案的可行性和有效性。

**关键词:** 穿透成像雷达; 极坐标空间采样; 一体化雷达射频前端; 自聚焦成像

中图分类号: TN95 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1001-2486(2023)05-111-09



与作者互动  
听语音  
聊科研

## Research and implementation of high planar resolution penetrating imaging radar

HE Zhihua, LIU Tao, SONG Xiaoji, CHEN Cheng, JIN Guanghu, HUANG Chunlin, SU Yi

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

**Abstract:** Penetrating imaging radar technology uses the characteristics that the electromagnetic wave can penetrate the medium, to get high-resolution image of discontinuities in the non-metallic medium. In order to realize millimeter high plane resolution, high detection efficiency and high portability of the radar system, a high plane resolution penetration imaging radar system was designed. Continuous wave system and fast scanning spatial sampling scheme were adopted to ensure miniaturization and high imaging performance. An integrated radar RF front end was realized. Data processing methods such as autofocus imaging processing under the condition of unknown parameters were proposed. A prototype of penetrating imaging radar system, which weighs only 2.5 kg and can be operated by one person and one hand, was developed. The experimental tests of imaging resolution and penetration ability were carried out to verify the feasibility and effectiveness of the scheme.

**Keywords:** penetrating imaging radar; polar spatial sampling; integrated radar RF front end; autofocus imaging

穿透成像雷达利用电磁波对介质的穿透能力, 对非金属介质内部进行穿透成像, 已被广泛应用于探地、穿墙和建筑物透视等应用场景中<sup>[1-3]</sup>。在众多穿透成像雷达系统中, 高分辨穿透成像雷达是一类采用相干连续波并以距离平面投影成像为理论的穿透成像系统, 能够以图像形式直观地显示介质内部结构和异常, 其高分辨率成像能力为无损穿透探测提供了新的技术手段<sup>[4-8]</sup>。相比非线性结探测、金属探测器、无线信号探测、红外信号探测等检测手段, 高分辨穿透成像雷达结果直观、分辨特性好, 可同时探测金属和非金属物体; 相对于 X 射线背散射手段, 其具有更好的穿透性和安全性, 可应用于藏匿物品探测、非金属材料无损检测等领域<sup>[5, 9-13]</sup>。

针对不同应用需求, 国内外相关单位开展了一系列穿透成像雷达系统研制和应用方面的研究工作。典型的有:

1) 莫斯科国立鲍曼技术大学研制成功 RASCAN 系列全息表层穿透雷达系统, 并系统地开展了地雷探测、建筑物和材料无损探测、考古探测、安全检测等方面实际应用<sup>[10, 14-15]</sup>。RASCAN 系列雷达采用连续波体制, 工作在 C 波段, 通过手动移动天线形成二维孔径来采集回波信号, RASCAN 系统记录下来回波信号, 全部扫描完成后, 再通过处理软件重建目标图像。RASCAN 系统穿透深度为分米级, 分辨率在厘米级, 其存在的问题主要是在探测时效性及易用性方面存在不足, 即需要手动移动探头完成扫描, 不仅操作麻

\* 收稿日期: 2021-10-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61901501, 62001488)

作者简介: 何志华(1982—), 男, 四川通江人, 副研究员, 博士, 硕士生导师, E-mail: zhihuahe@nudt.edu.cn;

刘涛(通信作者), 男, 山东东营人, 讲师, 博士, E-mail: liutao1@nudt.edu.cn

烦,精度难以保证,且耗时较长,100 像素 × 100 像素图像扫描一般需要分钟以上,而且成像处理是事后处理,非实时成像,难以满足现场快速探测的应用需求。

2) 为解决时效问题,RASCAN 系统也设计了配套的自动行走装置,可实现地面扫描成像,一定程度上提高了效率,但其设备质量较大,未采用一体化设计方案,在自动化、便携性和易用性方面有待提高。

3) 美国 GSSI 公司推出的 StructureScan Mini XT 雷达<sup>[16]</sup>、加拿大 Sensors & Software 公司推出的 Conquest 系列产品<sup>[17]</sup>是针对墙内钢筋网探测应用的专用穿透成像雷达,这类系统采用时宽在纳秒/亚纳秒级的冲激脉冲波形体制获得很大的带宽以达成距离向高分辨能力,发射信号频率范围一般在 1~2 GHz,通过手动扫描可实现墙内钢筋网探测,典型成像平面分辨率在 5 cm 左右。这类产品在集成度、易用性等方面优势明显,但其分辨能力不能满足毫米级高平面分辨率探测应用需求。

4) 国防科技大学 2013 年研制成功穿透成像雷达样机<sup>[18]</sup>,该样机集成了超宽带电磁波收发组件、快速扫描机构、数据处理与显示等组件,质量为 5.8 kg,尺寸为 30 cm × 30 cm × 29 cm,采用双手操作实现扫描对象内部结构和异常探测成像。

5) 北京理工大学针对墙体浅埋小目标成像研制的探墙雷达系统,重点解决了浅表层杂波抑制和近场高分辨成像等难题,可穿透 2 cm 木板和 4 cm 水泥板对小目标进行成像<sup>[19]</sup>。该系统工作在 K 波段,成像分辨率达到了毫米量级,采用阵列天线实现快速扫描探测<sup>[8]</sup>,但也带来了通道一致性、雷达稳定性、耦合杂波增加等需要仔细解决的问题。杭州电子科技大学研制了一种宽带微波全息成像雷达系统<sup>[6, 20]</sup>,系统采用连续波工作体制,工作在 C 波段,集成了二维机械扫描装置,按 S 形移动路径往复扫描并覆盖固定大小区域,一次扫描工作时间约 40 s,成像分辨率在厘米量级。

兼顾毫米级高平面分辨率穿透成像和便携易用的应用需求,本文提出了一种高分辨穿透成像雷达系统技术方案,介绍了系统工作原理,设计了系统的工作频率、波形体制和扫描方式等,通过成像分辨率和穿透能力等实验验证了该技术方案的可行性和有效性。

## 1 穿透成像雷达技术方案

### 1.1 工作原理

穿透成像雷达利用电磁波对非金属介质的穿

透性实现对介质内部的探测成像。微波段电磁波在非金属介质中具有很强的穿透能力,在传播的过程中,遇到任何电磁特性不连续处都会产生散射。不同的空间位置探测后向散射的电磁波经微波全息成像处理可合成介质内部电磁逆散射强度分布的高分辨率图像,进而反映出介质内部物体结构和异常等分布情况,其探测原理如图 1 所示。

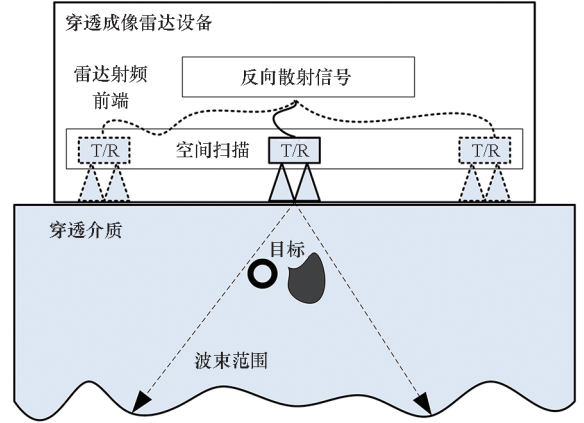


图 1 穿透成像雷达探测原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of detection principle of penetrating imaging radar

雷达探头主动发射并接收电磁波信号,通过空间扫描获取扫描区域后向散射回波,对散射回波进行成像等数据处理可得到高分辨二维图像,还原出介质内不同目标散射系数的空间分布<sup>[21]</sup>,从而直观反映出异常区域或目标的轮廓,以及与周围介质的电磁特性差异,为异常辨识确认提供图像依据。

设某时刻雷达探头位于格点  $(x, y)$ , 其中,  $x$  表示横向坐标,  $y$  表示纵向坐标, 后向散射回波数据为  $s(x, y, \omega)$ 。成像处理包括空域二维快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT)、波场偏移和空域二维快速逆傅里叶变换 (inverse fast Fourier transform, IFFT) 等步骤。首先对  $s(x, y, \omega)$  进行空域 FFT, 得到二维波数谱  $S(k_x, k_y, k)$ , 其中,  $k_x, k_y$  分别表示视场横向和纵向波数变量, 总波数  $k = \omega/v$ ,  $\omega$  表示电磁波角频率,  $v$  表示电磁波在介质中的传播速度 (以下简称波速)。然后利用式 (1) 乘以空间谱进行波场偏移<sup>[5, 20, 22]</sup>:

$$H(k_x, k_y, k, z) = \frac{j2\pi(2k)^3 z_0^3}{k_z^4} \exp(jk_z z) \quad (1)$$

其中,  $z_0$  为所需聚焦成像平面的深度,  $z$  表示介质内部距介质表面的距离,  $k_z = \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2}$  表示深度方向波数变量,  $j$  是虚数单位。将波场偏移后的空间谱进行 Stolt 插值使得数据在波数域中等

间隔排列,最后进行空间 IFFT 即可获得成像结果。对于只需获取二维成像结果的应用场合,可以采用简化的波场偏移函数:

$$H(k_x, k_y, z_0) = A \exp(jk_z z_0) \quad (2)$$

式中,考虑到指数项对成像聚焦起到主导作用,因此用常数  $A$  来替代幅度项。此时获得的二维图像为目标回波在雷达扫描平面上的空间投影,可以表示为:

$$p(x, y; z, v) = \text{IFFT}_{2D} \{ S(k_x, k_y) \times H(k_x, k_y, z_0) \} \quad (3)$$

当深度参数  $z_0$  取为目标所在深度  $z_1$ 、波速参数  $v$  取介质内的波速  $v_1$  时,可得到最优二维图像。实际条件下,可采用自聚焦成像处理来解决参数未知情况下的成像问题(参见第 2.3 节),采用杂波抑制方法抑制杂散和噪声分量<sup>[23-24]</sup>,采用增强成像方法提高成像分辨能力<sup>[25]</sup>。

## 1.2 系统体制设计

### 1.2.1 频点选择

频点选择主要由穿透成像雷达的分辨率和穿透深度决定,根据穿透成像工作原理<sup>[1]</sup>,可达到的分辨率近似正比于介质内中心频率对应的电磁波波长  $\lambda_c$  (反比于电磁波频率):

$$\delta_r \approx \frac{\eta \cdot \lambda_c}{4 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (4)$$

式中:介质内的电磁波波长在无损或低损耗条件下可近似为  $\lambda_c \approx \lambda_0 / \sqrt{\epsilon_r}$ <sup>[26]</sup>,  $\lambda_0$  是真空中电磁波的波长,  $\epsilon_r$  是介质的相对介电常数;  $\theta$  为波束宽度,由天线性质、介质环境决定。近场探测条件下,波束宽度并不等同于远场意义下的波束角宽度,因此上式附加了系数  $\eta$  来修正,而系数的值受介质类型和衰减特性的影响,可通过实验测试的方法确定。

与自由空间中的电磁波传播不同,介质对电磁波有较强的衰减作用。介质中的雷达方程为:

$$P_r \approx \frac{P_t G_t A_r \sigma}{16 \pi^2 z^4} e^{-2\alpha z} \quad (5)$$

式中:  $P_r$  为接收功率;  $P_t$  为发射功率;  $A_r$  和  $G_t$  是与天线有关的系数;  $\sigma$  为目标的雷达散射截面积,由介质内目标的材质、尺寸、目标与介质背景的差异度等因素决定。  $\alpha$  为衰减系数,是与电磁波频率、介质的电磁属性相关的变量,其简化表达式为:

$$\alpha \approx \frac{\sigma_c(f)}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (6)$$

其中:  $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$  是介质中的介电常数,  $\epsilon_0$  为真空中

的介电常数;  $\mu = \mu_r \mu_0$  为介质中的磁导率,  $\mu_0$  为真空中的磁导率,对于雷达的应用场景,  $\mu_r$  的值一般为 1;  $\sigma_c$  是介质的电导率,与频率、介质的电磁属性相关,反映了介质对高频电磁波的衰减效应。同等条件下,电导率越大,电磁波的能量损耗越大。

由分辨率表达式可知,分辨率随频率的增加单调增加;由介质中的雷达方程可知,回波功率随穿透深度的增加呈四次方衰减,随频率的增加呈指数衰减,穿透深度随频率增加迅速衰减。在穿透成像领域,具体采用何种频率,暂无直接的计算方法,一般根据雷达的探测场景和应用需求,以理论公式为指导,结合反复实验测试加以确定。在满足分辨率要求的前提下确定频点,通过合理的雷达系统设计实现高的穿透深度。为实现毫米级平面分辨率,本文选择工作频段为 K 波段<sup>[8, 12]</sup>。

### 1.2.2 波形体制选择

在发射波形体制方面,雷达穿透探测应用常用的波形包括冲激脉冲体制和连续波体制。这两类发射波形对比如表 1 所示,冲激脉冲体制发射超宽带冲激信号,其脉冲时间宽度为纳秒或亚纳秒级,频谱覆盖范围宽,具有距离分辨率较高、探测速度快的优势,常用于探地、穿墙探测等应用领域。连续波体制发射连续波信号,包括步进频和线性调频等信号形式,具有系统动态范围高、能量利用率高的优势。冲激脉冲体制和连续波体制目前在实现上均比较成熟,考虑到高平面分辨率穿透成像应用对瞬时动态范围、体积、质量、能量利用率等的要求,本文优选连续波体制。

表 1 发射波形对比

Tab. 1 Comparison of waveform

波形体制	优势	劣势
冲激脉冲体制	发射脉冲信号持续时间为纳秒或亚纳秒级,带宽大,距离分辨率较高、探测速度快	发射波形重复性不高、系统动态范围较低、能量利用率低
连续波体制	系统动态范围高、抗干扰能力强、能量利用率高	系统相对复杂

### 1.2.3 扫描方式选择

穿透成像雷达需要通过空间扫描重构扫描区域图像,常用的扫描方式包括手持探头扫描<sup>[4, 10]</sup>、机械扫描<sup>[6]</sup>和电扫描<sup>[8]</sup>等,各方式的特点如表 2 所示。手持探头扫描设备简单,但扫描

速度慢、位置精度低、可重复性差；电扫描方式扫描速度最快，但通道间隔度不高，天线间隔小、设计难度大，成本相对较高；机械扫描兼有两者优势，可实现自动化扫描，且重复性较高，采用单个收发探头保证了一致性、低成本的优势，扫描速度也能满足快速穿透成像要求。相对于手持扫描，电扫描和机械扫描由于采用了固定大小的扫描阵列或机械结构，其单次扫描覆盖面积一般是固定的。本文采用机械扫描方式，通过采用极坐标空间采样策略和轻量化扫描装置进一步提高其扫描速度，详见第 2.1 节。

表 2 扫描方式对比

Tab. 2 Comparison of scanning methods

扫描方式	描述	特点
手持探头扫描	在标尺的辅助下，用手带动雷达探头运动，获取二维空间扫描回波	设备简单，扫描速度慢、位置精度低、重复性差
机械扫描	集成机械扫描装置和雷达探头，可实现固定区域高精度快速扫描探测	扫描速度较快，重复性好
电扫描	采用多发多收阵列技术，通过电扫描实现固定区域高精度快速扫描探测，通道一致性需要校准	扫描速度最快，通道间隔度不高，天线设计难度大，成本高

### 1.3 系统组成

为实现毫米级高分辨、便携式穿透成像，本文采用的雷达系统的组成如图 2 所示，主要由目标散射场获取模块、回波采集模块、数据处理模块、控制模块、通信模块和图像显示终端组成。

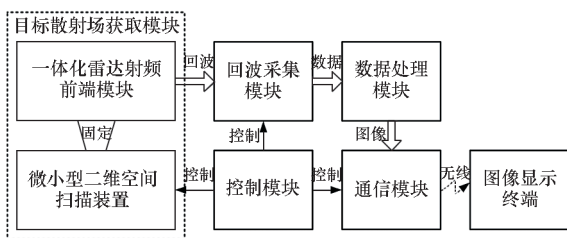


图 2 高分辨穿透成像雷达系统组成图

Fig. 2 Diagram of a high-resolution penetrating imaging radar

目标散射场获取模块由一个微小型二维空间扫描装置驱动一体化的雷达射频前端，一体化雷达射频前端具有雷达信号的发射和接收功能，在

扫描装置的驱动下完成二维空间高速、高密度散射回波采样。目标散射场获取模块是该雷达系统的核心模块，其中，微小型二维空间扫描装置包括精密微型驱动杆和超小型精密陶瓷齿轮机构，在保证实现一体化雷达射频前端进行二维空间高精度扫描的同时，大大减小目标散射场获取模块的结构和质量；一体化雷达射频前端模块采用射频收发部件和天线一体化设计方案，具体采用高集成度微波链路设计、多芯片组件设计、高集成度制作，保证了模块的轻量化。

回波采集模块接收获取的回波信号，实现对回波信号的滤波、放大和模数转换，得到回波数据。数据处理模块完成回波数据预处理、自聚焦成像处理和图像杂散噪声抑制等步骤，得到二维高分辨图像。通信模块以无线的方式将图像结果传输至图像显示终端，可进一步完成最优聚焦图像选择、图像显示和保存等功能。控制模块为目标散射场获取模块、回波采集模块和通信模块提供控制指令，协调完成目标散射场获取、回波采集和通信传输功能。

## 2 穿透成像雷达实现关键技术

采用极坐标空间采样技术、一体化雷达射频前端技术和自聚焦成像处理技术等关键技术确保穿透成像雷达的探测速度、轻量便携性和探测性能。

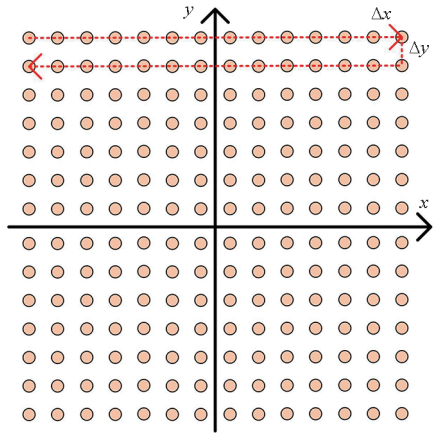
### 2.1 极坐标空间采样技术

二维空间扫描装置搭载一体化雷达射频前端模块实现高密度、高精度、快速空间扫描，二维空间扫描方式的选择决定了整个雷达系统的探测速度和空间采样精度。

现有二维空间扫描方式一般由  $x$  方向和  $y$  方向两个联动移动机构组成，采用 S 形往复移动的方式实现逐行连续空间采样<sup>[6]</sup>，如图 3(a) 所示。其中， $\Delta x$ 、 $\Delta y$  分别表示  $x$  方向和  $y$  方向的采样间隔，为满足采样定理，需小于式(4)所示分辨单元大小  $\delta_r$ 。一次完整的空间采样需要多次折返，耗时在几十秒至分钟量级。本文采用极坐标空间采样方案，通过合理的扫描结构设计，构成小型紧凑的扫描伺服系统，通过精确时序控制沿极轴的匀速圆周运动和沿径向的直线步进两轴联动，驱动一体化的雷达射频前端在扫描面内连续高速运转，配合对射频前端的同步控制，实现了快速的极坐标空间扫描。采用连续的匀速圆周运动形式也避免了反复启停时间，可将探测速度提高到 10 s 以内，同时扫描装置的网格位置控制精度优于

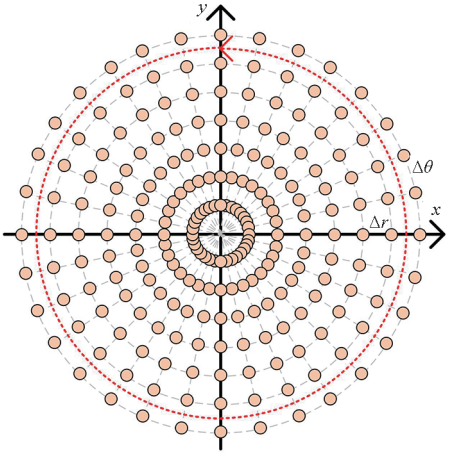
0.1 mm,保障了穿透成像的快速探测能力、高平面分辨率成像精度和图像定位精度。图3(b)给出了极坐标空间采样示意图,其中,  $\Delta r$  表示径向采样间隔,  $\Delta\theta$  表示角度向采样间隔,假设最大扫描半径为  $R_{\max}$ ,为满足采样定理,需满足:

$$\begin{cases} \Delta r < \delta_r \\ R_{\max} \times \Delta\theta < \delta_r \end{cases} \quad (7)$$



(a) 传统均匀空间采样

(a) Traditional uniform spatial sampling



(b) 极坐标空间采样

(b) Spatial sampling with polar grid

图3 二维空间扫描对比示意图

Fig.3 Schematic diagram of two-dimensional spatial scanning comparison

假设极坐标采样数据为  $s(r, \theta)$ ,通过一系列处理可得到二维波数谱  $S(k_x, k_y)$ ,进而完成式(3)所示的成像处理。

首先对极坐标采样数据按变量  $r$  进行傅里叶变换:

$$S_R(k_r, \theta) = \int r \cdot s(r, \theta) \exp(-2\pi j k_r r) dr \quad (8)$$

其中,  $k_r$  是变量  $r$  的傅里叶变换变量,上式可用FFT实现。沿半径方向和角度方向分别进行积

分,即可得到二维波数谱<sup>[27]</sup>为

$$S(k_x, k_y) = \iint S_R(k_r, \theta) \delta(k_r - k_x \cos\theta - k_y \sin\theta) dk_r d\theta \quad (9)$$

### 2.2 一体化雷达射频前端技术

雷达射频前端实现穿透成像雷达电磁波发射和接收,是其核心部件之一。穿透成像应用对其动态范围、抗干扰能力提出较高要求,便携适用特性对其体积、质量、功耗、集成度、辐射安全性等提出刚性要求。为此,采用一体化的雷达射频前端设计,在保证介质内部弱目标成像探测所需的瞬时高动态范围下,通过优化设计组件结构,采用轻量化、一体化设计思路,确保雷达射频前端的高性能、低功耗和轻量化。

图4为本文采用的一体化雷达射频前端框图,图5为采用的一体化雷达射频前端叠层方案。布局设计方面,采用多层微带板和信号调理与采集板叠层设计方案确保系统体积小并降低单板复杂度。多层微带板在正面和反面分别布设微带收发天线和射频收发电路,采用微带贴片天线形式,具有相对效率高、加工一致性好、体积质量小等优势,优化设计确保天线隔离度达到30 dB,将直达波对深埋弱目标探测的影响降低至可接受水平;射频收发电路包括步进频率源、功分器、功放、低噪放、混频器、衰减器和滤波器等器件,通过屏蔽壳体减少干扰影响。信号调理与采集板集成了中频电路、模数转换(analog to digital converter, ADC)、电源及接插件等功能模块,实现了信号滤波、可变增益放大和24 bit ADC采样,采用模拟和数字一体化集成设计,为射频前端轻量化奠定基础。电路方面,优化了射频和中频电路工作参数

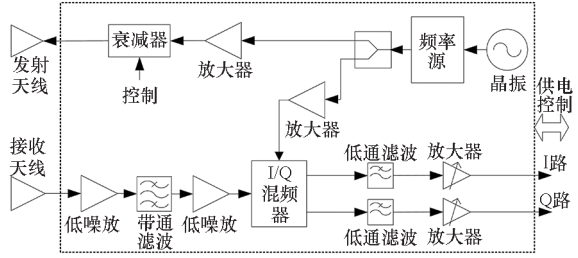


图4 一体化雷达射频前端框图

Fig.4 Integrated radar RF front end block diagram



图5 一体化雷达射频前端叠层方案

Fig.5 Integrated radar RF front end lamination scheme

设计,采用更加紧凑、合理的微波链路设计确保高瞬时动态范围,采用高度集成化器件以降低系统功耗。收发隔离方面,本系统收发天线同时工作,需要同时记录直达/表面反射大信号和深埋弱目标小信号,通过采用高隔离度天线设计、高采样位数 ADC 和射频数字一体化等设计确保系统瞬时动态范围可达到 100 dB,保证对弱信号的高动态采集能力。

经过优化设计,最终实现的一体化雷达射频前端模块的长宽高尺寸仅 35 mm × 28 mm × 10 mm,质量小于 20 g,达到的调频带宽为 1 GHz,通过在调频带宽内调整频率可实现二维平面最优信噪比聚焦,辐射功率小于 1.5 μW/cm<sup>2</sup>,符合国家电磁环境限值。单模块集成了收发天线、射频电路、中频电路、ADC 电路等核心关键部件,综合解决了机械结构、电磁波收发通道的传输结构、电路的集成布线等工程问题,为减小系统体积和减轻质量、确保探测性能和保证扫描探测速度奠定基础。

### 2.3 参数未知条件下的自聚焦成像处理技术

穿透成像算法的关键步骤是重建式(1)所示的波数域匹配滤波器,其中目标所在深度  $z_1$  和介质波速  $v_1$  是两个必不可少的成像参数,参数失配会引起成像散焦。而手动调整参数也对操作人员的专业知识水平和使用经验依赖性强,耗时较长,从而影响探测效率和效果。

本文采用如图 6 所示的自聚焦成像处理方法来解决参数未知条件下的高平面分辨率快速成像问题,算法关键是根据雷达穿透成像的图像特征,构建聚焦度函数算子(即代价函数),对成像结果的聚焦效果进行定量评估,根据评估结果估计成像参数深度  $z_1$  和介质内的电磁波速  $v_1$  相对于真值的

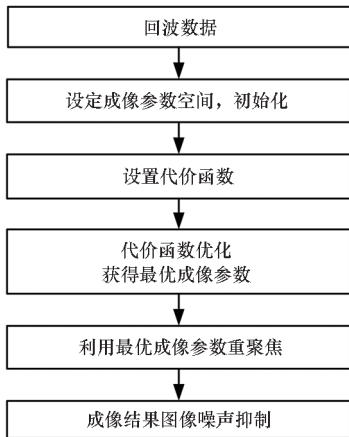


图 6 自聚焦成像处理步骤

Fig. 6 Auto-focusing imaging processing procedures

偏离程度。通过数值优化迭代处理对代价函数寻优获得最优成像参数,同时,采用基于竞争进化理论的数值优化算法提高寻优速度,确保参数优化的准确率和处理效率<sup>[28]</sup>,最终实现穿透成像雷达系统的自聚焦快速、高平面分辨率、全自动成像。

图 7 给出了实测数据自聚焦成像结果。图 7(a)为目标实物,该目标物体为一段金属弯曲导线,布设在均匀 ABS 塑料介质背面,距离介质表面 3 cm,ABS 塑料介质波速约为 0.15 m/ns,代价函数的最小值对应成像参数  $z_1 = 2.93$  cm,  $v_1 = 0.149 2$  m/ns。利用该寻优参数成像的结果如图 7(b)所示,采用归一化线性显示方式,显示的物体形状和尺寸与预设的目标物体一致,表明了自聚焦成像处理的有效性。

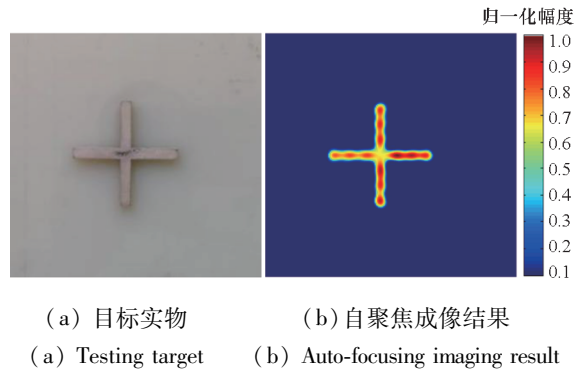


图 7 实测数据自聚焦成像结果

Fig. 7 Auto-focusing imaging results of measured data

## 3 穿透成像雷达实验测试

### 3.1 系统研制情况

研制的穿透成像雷达系统如图 8 所示。系统由穿透成像雷达主机和便携式显示终端两部分组成,可穿透大理石、瓷砖、混凝土、木板、石膏板、复合板等材料,对介质内的金属和非金属材质目标都有良好的探测效果。该系统适合单人握持操作,在便携适用性、探测速度、自动化程度等方面较现有样机系统有较大改进。



图 8 穿透成像雷达系统实物图

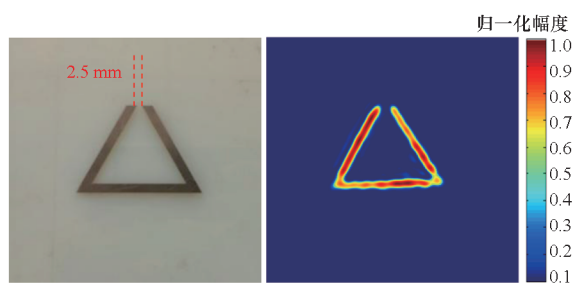
Fig. 8 Physical drawing of penetrating imaging radar

实现的主要技术指标为:

- 1) 成像平面分辨率:2.5 mm。
- 2) 探测深度:5 cm。
- 3) 探测速度:10 s/帧。
- 4) 探测视场:200 cm<sup>2</sup>。
- 5) 主机质量:2.5 kg。

### 3.2 成像分辨率实验

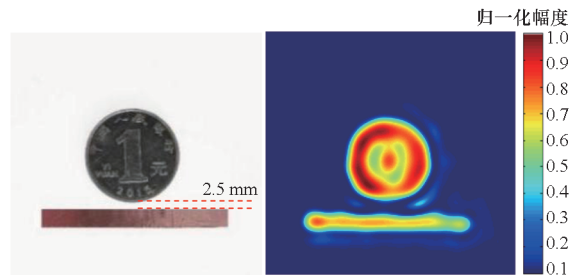
图9为成像分辨率实验结果,采用1 cm厚ABS塑料介质和分辨率试件目标,目标边宽6 mm,缺口处宽度为2.5 mm,如图9(a)所示;图9(b)为经过成像处理后的穿透成像结果,可以清晰地分辨出缺口。图10为硬币成像实验结果,采用1 cm厚石膏板和硬币铜箔目标,铜箔宽度为5 mm,距离硬币边缘最短距离为2.5 mm,如图10(a)所示;图10(b)为穿透成像结果,可以清晰地分辨出硬币与铜箔之间的间隔,同时硬币中间字的痕迹也清晰可见,表明本系统的成像分辨率可达到2.5 mm,可实现小尺寸目标的穿透成像探测。



(a) 分辨率试件 (b) 成像结果  
(a) Resolution test piece (b) Imaging result

图9 成像分辨率实验结果

Fig.9 Experimental results of imaging resolution



(a) 硬币与铜箔目标 (b) 成像结果  
(a) Coin and copper foil target (b) Imaging result

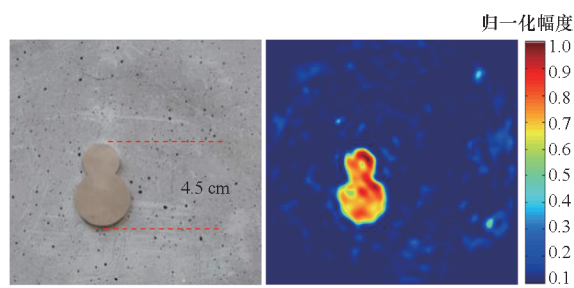
图10 硬币成像实验结果

Fig.10 Experimental results of coin

### 3.3 穿透能力实验

穿透成像雷达系统可实现不同介质条件下金属目标和非金属目标的穿透成像。

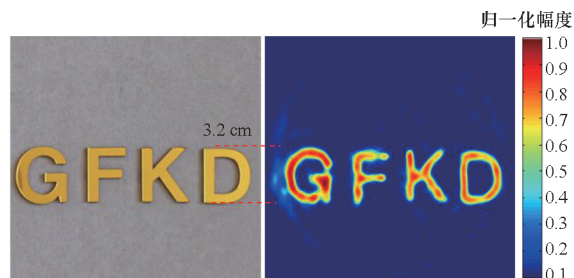
图11为金属目标、混凝土复合介质情况下实验结果,采用5 cm厚混凝土复合介质(由2 cm厚混凝土层、2 cm厚胶合板和1 cm厚石膏板叠加组成)及葫芦形金属目标(高度4.5cm),如图11(a)所示;图11(b)为穿透成像结果,可以清晰地呈现葫芦形状,表明本系统可以实现5 cm探测深度。图12为非金属字母目标、轻质隔墙板介质条件下实验结果,采用1 cm厚轻质隔墙板和“GFKD”字样非金属字母目标,字母高度为3.2 cm,如图12(a)所示;图12(b)为穿透成像结果,“GFKD”4个字母清晰可见,表明本系统对非金属目标也具有较好的穿透成像探测能力。大量实验测试表明,本系统的穿透能力与介质类型和介质均匀性等因素有关,最大探测深度可达15 cm。



(a) 5 cm厚混凝土复合介质板 (b) 成像结果  
(a) Composite concrete plate (b) Imaging result with thickness of 5 cm

图11 金属目标、混凝土复合介质情况下实验结果

Fig.11 Experimental results of metal target and composite concrete plate



(a) 1 cm厚轻质隔墙板 (b) 成像结果  
(a) Lightweight partition board (b) Imaging result with thickness of 1 cm

图12 非金属字母目标、轻质隔墙板介质条件下实验结果

Fig.12 Experimental results of non-metallic letter target and light partition board medium

为进一步评价本系统对不同介质的穿透成像探测能力,设计了采用金属字母目标、不同类型介质条件下的探测实验,结果如图13~15所示。目

标为“GFKD”字样金属字母,字母高度为 2.9 cm,图 13、图 14、图 15 分别给出了采用密度板、多层板、轻质隔墙板三种介质材料的实验场景及成像结果,材料厚度均为 1 cm。由图可见,三种实际介质情况下均能得到清晰的“GFKD”字母字样结果,不同介质具有不同的电磁属性和几何属性,呈

现不同的杂波特性;从探测结果来看,轻质隔墙板的杂波最强、多层板次之,密度板材料均匀,探测效果最好。本实验表明系统具有较好的非金属介质适应能力。

### 4 结论

本文实现了一种毫米级高平面分辨率穿透成像雷达系统,能够穿透混凝土、石膏板、轻质隔墙板、密度板、多层板等非金属介质材料探测金属和非金属材质目标,主机质量仅为 2.5 kg,成像平面分辨率可达 2.5 mm,探测深度可达 5 cm,具有毫米级高平面成像分辨力、快速探测能力和便携适用的特点,在高分辨率墙体穿透成像探测、藏匿物品探测、非金属材料无损检测等应用领域中具有较好的应用前景。该技术还可以进一步推广应用于地雷探测、考古、生物探测等领域。

### 参考文献 (References)

[1] 吴彦奇,刘四新,傅磊,等. 探地雷达探测桥梁浅基础缺陷的正演研究[J]. 物探与化探, 2017, 41(1): 183-188.  
WU Y Q, LIU S X, FU L, et al. Forward modeling on shallow bridge foundation defect detection by GPR[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(1): 183-188. (in Chinese)

[2] 金添,宋勇平. 穿墙雷达人体目标探测技术综述[J]. 电波科学学报, 2020, 35(4): 486-495.  
JIN T, SONG Y P. Review on human target detection using through-wall radar[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2020, 35(4): 486-495. (in Chinese)

[3] 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.  
JIN T, SONG Y P, CUI G L, et al. Advances on penetrating imaging of building layout technique using low frequency radio waves[J]. Journal of Radars, 2021, 10(3): 342-359. (in Chinese)

[4] IVASHOV S I, RAZEVIĆ V V, VASILIEV I A, et al. Holographic subsurface radar of RASCAN type: development and applications[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2011, 4(4): 763-778.

[5] 粟毅,朱宇涛. 一种表层穿透雷达成像方法及装置: CN104808202A[P]. 2015-07-29.  
SU Y, ZHU Y T. Surface penetration radar imaging method and device: CN104808202A [P]. 2015-07-29. (in Chinese)

[6] 张琳琳. 应用于浅层目标探测的宽带微波全息成像算法研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2018.  
ZHANG L L. THE research on wide-band microwave holographic imaging algorithm applied to shallow target detection [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2018. (in Chinese)

[7] 劳保强. 近程微波全息成像关键技术研究[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2015.

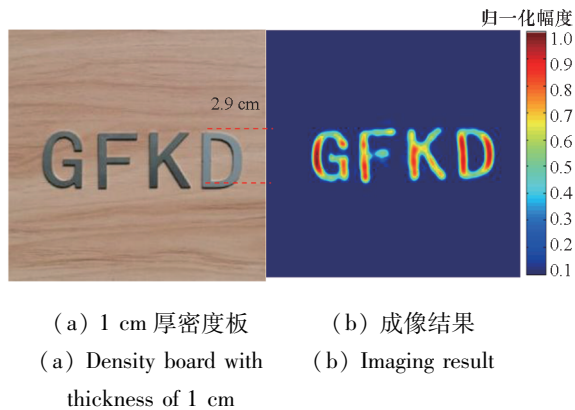


图 13 金属字母目标、密度板介质条件下实验结果  
Fig. 13 Experimental results of metal letter targets and density board

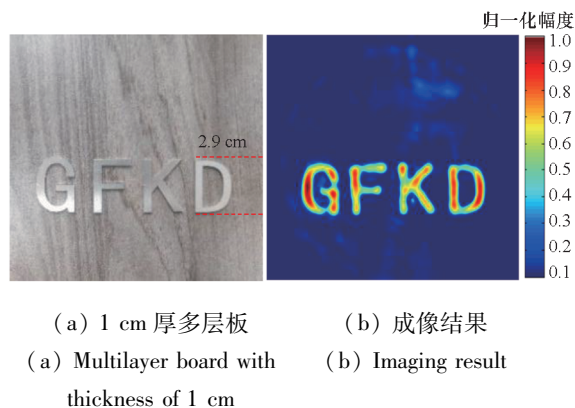


图 14 金属字母目标、多层板介质条件下实验结果  
Fig. 14 Experimental results of metal letter targets and multilayer board

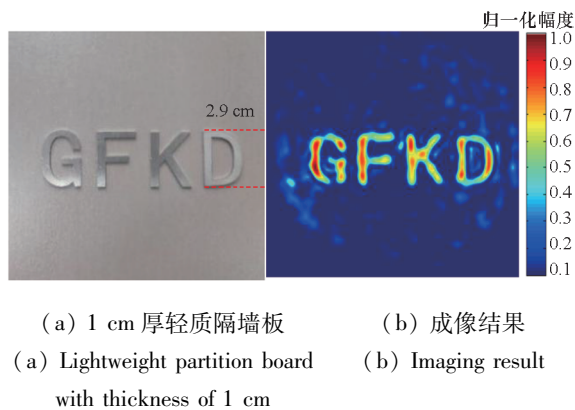


图 15 金属字母目标、轻质隔墙板介质条件下实验结果  
Fig. 15 Experimental results of metal letter targets and lightweight partition board



- LAO B Q. Research on key technologies of short-range microwave holographic imaging [D]. Guilin: Guilin University of Electronic Technology, 2015. (in Chinese)
- [8] 郑梦. 微波探墙成像中的杂波抑制算法研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016
- ZHENG M. Clutter suppression algorithm of intra-wall microwave imaging [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [9] HUANG C L, LIU T, LU M, et al. Holographic subsurface imaging for medical detection[C]// Proceedings of the 15th International Conference on Ground Penetrating Radar, 2014.
- [10] IVASHOV S I, CAPINERI L, BECHTEL T, et al. Design and applications of multi-frequency holographic subsurface radar; review and case histories[J]. Remote Sensing, 2021, 13: 3487.
- [11] CAPINERI L, FALORNI P, IVASHOV S, et al. Combined holographic subsurface radar and infrared thermography for diagnosis of the conditions of historical structures and artworks[J]. Near Surface Geophysics, 2010, 8(5): 355 - 364.
- [12] ZHANG X X, LIANG J, WANG N, et al. Broadband millimeter-wave imaging radar-based 3-D holographic reconstruction for nondestructive testing [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2020, 68(3): 1074 - 1085.
- [13] 王露露. 多频全息微波脑成像系统及成像方法: CN110960216A[P]. 2020-04-07.
- WANG L L. Multi-frequency holographic microwave brain imaging system and imaging method: CN110960216A[P]. 2020-04-07. (in Chinese)
- [14] CHIZH M, ZHURAVLEV A, RAZEVIK V, et al. Defects investigation in thermal insulation coatings with microwave imaging based on a 22 GHz holographic radar[J]. NDT & E International, 2020, 109: 102191.
- [15] IVASHOV S I, VASILIEV I A, BECHTEL T D, et al. Comparison between impulse and holographic subsurface radar for NDT of space vehicle structural materials [J]. PIERS Online, 2007, 3(5): 658 - 661.
- [16] GSSI. StructureScan Mini XT [EB/OL]. [2021-08-15]. <https://www.geophysical.com/products/structurescan-mini-xt>.
- [17] Sensors & Software Inc. Conquest® 100 concrete scanner [EB/OL]. [2021-08-15]. <https://www.sensoft.ca/products/conquest100/overview/>.
- [18] SONG X J, SU Y, HUANG C L, et al. Landmine detection with holographic radar[C]//Proceedings of 16th International Conference on Ground Penetrating Radar, 2016.
- [19] 龙腾, 丁泽刚, 李银川, 等. 新体制民用雷达与实时信息处理研究 [J]. 数据采集与处理, 2017, 32(4): 649 - 657.
- LONG T, DING Z G, LI Y C, et al. New system civil radar and real-time information processing [J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2017, 32(4): 649 - 657. (in Chinese)
- [20] 张琳琳, 汪海勇, 吴美武, 等. 基于双频融合的微波全息成像算法研究[J]. 微波学报, 2018, 34(1): 55 - 59.
- ZHANG L L, WANG H Y, WU M W, et al. Microwave holographic imaging algorithm based on two-frequency [J]. Journal of Microwaves, 2018, 34(1): 55 - 59. (in Chinese)
- [21] 朱世平. 探地雷达三维高分辨成像与树根参数估计[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015.
- ZHU S P. Three-dimensional full-resolution imaging and root parameter estimation using ground penetrating radar [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015. (in Chinese)
- [22] 王俊义, 劳保强, 王锦清, 等. 二维近程微波全息成像算法[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(12): 2348 - 2355.
- WANG J Y, LAO B Q, WANG J Q, et al. Two-dimensional short-range microwave holography imaging algorithm [J]. Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(12): 2348 - 2355. (in Chinese)
- [23] SONG X J, XIANG D L, ZHOU K, et al. Improving RPCA-based clutter suppression in GPR detection of antipersonnel mines[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2017, 14(8): 1338 - 1342.
- [24] CHEN C, HE Z H, SONG X J, et al. A subspace projection approach for clutter mitigation in holographic subsurface imaging[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2022, 19: 1 - 5.
- [25] 陈诚, 刘涛, 宋晓骥, 等. 基于稀疏信号处理的穿透成像增强算法[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(8): 2021 - 2027.
- CHEN C, LIU T, SONG X J, et al. Penetration imaging enhancement algorithm based on sparse-signal processing[J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(8): 2021 - 2027. (in Chinese)
- [26] 粟毅, 黄春琳, 雷文太. 探地雷达理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- SU Y, HUANG C L, LEI W T. Ground penetrating radar: theory and applications[M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese)
- [27] 黄春琳, 宋晓骥, 粟毅, 等. 一种全息穿透成像雷达极坐标数据处理方法: CN201811545809.7[P]. 2020-09-25.
- HUANG C L, SONG X J, SU Y, et al. A polar coordinate data processing method for holographic penetrating imaging radar: CN109557541A[P]. 2020-09-25. (in Chinese)
- [28] 刘涛, 粟毅, 何志华, 等. 一种全息穿透成像雷达的自聚焦成像方法: CN109581373A[P]. 2019-04-05.
- LIU T, SU Y, HE Z H, et al. Self-focusing imaging method of holographic penetrating imaging radar: CN109581373A[P]. 2019-04-05. (in Chinese)