Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

文章编号: 2095-4980(2025)06-0590-07

W波段近距离高分辨毫米波全息成像系统

金颖康1, 乔灵博*2,3, 柳 兴2,3, 郭大路2,3

(1.北京神目科技有限公司,北京 100084; 2.清华大学 工程物理系,北京 100084; 3.危爆物品探测技术国家工程研究中心,北京 100084)

摘 要:基于相位成像的毫米波全息成像系统凭借其优异的穿透特性和高分辨力优势,已广泛用于人体安检及无损检测等领域。突破现有分辨力极限向更高频段扩展已成为技术发展趋势,但高频段成像面临密集收发单元排布与高系统复杂度的双重挑战。本文提出一种基于线阵扫描的W波段近距离高分辨力毫米波全息成像系统,通过25发100收的阵列架构和集成电子学链路设计,成功实现了85~105 GHz工作频段的近距离高质量成像。实验结果表明,该系统在0.5 m成像距离下,水平与竖直方向分别实现了优于2 mm和2.5 mm的空间分辨成像。

关键词:毫米波;全息成像;成像系统;W波段

中图分类号: TN957.51

文献标志码· A

DOI: 10.11805/TKYDA2025079

W-band short-range high-resolution millimeter-wave holographic imaging system

JIN Yingkang¹, QIAO Lingbo*^{2,3}, LIU Xing^{2,3}, GUO Dalu^{2,3}
(1.Beijing SHENMUTEK Technology Co., Ltd., Beijing 100084, China;
2.Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3.National Engineering Laboratory for Dangerous Articles and Explosives Detection Technologies, Beijing 100084, China)

Abstract: Millimeter-wave holographic imaging systems based on phase imaging have been extensively applied in fields such as security screening and non-destructive testing, due to their special penetration capabilities and high-resolution advantages. While extending operational frequencies to higher bands for achieving better resolution, the problems of dense transceiver arrangements and high system complexity need to be considered. This study presents a W-band short-range high-resolution millimeter-wave holographic imaging system utilizing linear array scanning. By implementing a 25-transmitter and 100-receiver array configuration with integrated electronic circuitry design, the system achieves high-quality short-range imaging across the 85~105 GHz operational band. Experimental results demonstrate the system can obtain spatial resolutions superior to 2 mm in the horizontal direction and 2.5 mm in the vertical direction at an imaging distance of 0.5 m, confirming its enhanced performance in practical applications.

Keywords: millimeter-wave; holographic imaging; imaging system; W-band

毫米波是指频率在30~300 GHz的电磁波,继承了长波频段对雨雾烟尘、常见遮挡材料(如,纸张、衣物、塑料等)的穿透能力;同时相比于微波,波长更短,能够获得更高的成像分辨力,因而在人体安检[1-2]、无损检测[3-4]、智能驾驶[5-6]、医疗诊断[7-8]等领域有着广泛应用。近年来,随着微波固态电子学器件的快速发展,毫米波射频前

收稿日期: 2025-03-13; 修回日期: 2025-03-29

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2023YFF0715002)

*通信作者: 乔灵博 email:qlb mmtech thu@mail.tsinghua.edu.cn

引用格式: 金颖康,乔灵博,柳兴,等. W波段近距离高分辨毫米波全息成像系统[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2025,23(6):590-596. DOI:10.11805/TKYDA2025079.

Citation format: JIN Yingkang, QIAO Lingbo, LIU Xing, et al. W-band short-range high-resolution millimeter-wave holographic imaging system[J].

Journal of Tetrahertz Science and Electronic Information Technology, 2025, 23(6):590-596. DOI:10.11805/TKYDA2025079.

端电路性能逐步提升,小型化和集成化程度也越来越高,为毫米波系统走向大规模应用提供了坚实基础。

基于外差混频技术,毫米波接收电路能够直接获取测量信号的相位信息,因而毫米波成像系统大多采用相干成像体制,即全息成像,综合幅度和相位能够获取目标丰富的空间分辨信息。毫米波全息成像系统的研究最早开始于1995年美国 Collins 等的研究,其发明专利^[9]公开了一种 35 GHz 单频线阵扫描成像系统,可实现对人体等大尺寸目标的快速扫描成像。随后,美国西北太平洋实验室继续该方向的研究,将单频扩展到宽带^[10],先后开发了适用于人体安检成像的平面^[2]以及圆柱面毫米波全息成像系统^[11],频率为 27~33 GHz,成像分辨力可达 5 mm 左右。为进一步提升成像分辨力和扫描速度,Rohde Schwarz公司的 Ahmed 等开发了 70~80 GHz 毫米波成像系统^[12-13],成像分辨力优于 2.5 mm。该系统采用了 32 个 "口"字型排布的二维稀疏阵列,包含了集成 3 072 个发射和接收通道的复杂射频电路。由于全息成像体制接近半波长的采样要求,高频成像系统需包含密集排布的收发单元。除采用二维稀疏阵列外,另一种针对高频成像系统的折中策略是采用稀疏线阵扫描的方式^[14]。Matthew Dvorsky等^[15]开发了包含 256 个发射单元(Tx)和 256 个接收单元(Rx)的线性多站收发阵列,频率为 26.5~40 GHz,借助一维机械扫描获得了高信噪比的毫米波图像;Bessem Baccouche等^[16]基于 12Tx-12Rx 稀疏线阵开发了一套高频毫米波成像系统,频率为 75~110 GHz;SUN Chao等^[17]采用 32Tx-12Rx 稀疏线阵实现了 170~210 GHz 的高频成像;崔振茂等^[18-19]采用准光聚焦和合成孔径相结合的方法,开发了一套 4Tx-16Tx 的 340 GHz 高频成像系统。

本文采用线性阵列扫描的方式,通过优化阵列单元排布和集成电子学链路设计,开发了一套25Tx-100Rx针对W波段高频毫米波成像系统,工作频率为85~105 GHz,成像分辨力接近2 mm,能够实现对近距离区域大尺寸目标的快速成像。

1 系统设计

1.1 整体方案

设计的近距离高分辨毫米波全息成像系统如图1所示,包括毫米波线性扫描阵列、机械传动装置以及用于控制和数据处理的计算机。在一次扫描成像中,机械传动装置控制毫米波线性阵列自上而下或自下而上运动,实现竖直方向数据的获取。机械传动装置采用电机带动齿轮传送带的方式,电机转动时,在传送带带动下毫米波阵列在滑轨上实现往复运动。在运动的同时,毫米波阵列通过开关电路快速切换发射单元实现水平方向和频率扫描(接收单元同时接收)。

1.2 电子学实现

毫米波收发阵列工作在W波段,频率为85~105 GHz, 其电子学实现原理如图2所示。

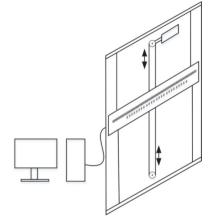


Fig.1 Schematic illustration of the short–range high–resolution millimeter–wave holographic imaging system 图 1 近距离高分辨毫米波全息成像系统示意图

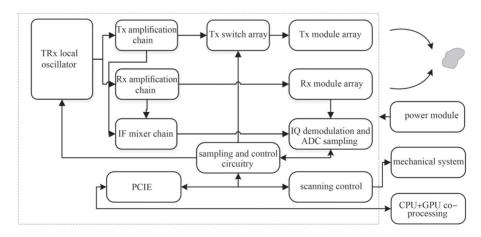


Fig.2 Schematic diagram of the electronic implementation for W-band millimeter-wave transceiver array 图 2 W波段毫米波收发阵列电子学实现原理图

TRx 本振源模块采用双源驱动方式,发射链路本振源扫描频率为10.625~13.125 GHz,接收链路本振源扫描频率为10.725~13.225 GHz,两者相差100 MHz。发射本振源通过Tx放大链路后,由三级开关阵列实现发射单元

的快速切换,最后接入Tx模块阵列,8倍频后通过喇叭天线发射毫米波信号;接收链路本振源通过Rx放大链路直接接入Rx模块阵列。由Tx放大链路输出的发射本振信号与Rx放大链路输出的接收本振信号接入IF混频链路实现混频和8倍频,形成的800 MHz信号作为参考中频输入IQ解调及ADC采集模块;Rx模块阵列将接收的高频毫米波信号与参考信号混频后输出800 MHz接收中频,接入IQ解调及ADC采集模块进行采集接收。采集控制电路实现对整个发射和采集的控制,最后将获取的全息数据由外围组件快速互连(Peripheral Component Interconnect Express, PCIE)高速采集卡传送至PC端进行图像重建。

Tx 模块阵列和Rx 模块阵列包含大量W波段毫米波收发单元,为保证复用性和集成化,采用模块化设计。典型的W波段收发模块如图3所示,收发模块天线均采用角锥喇叭天线,通过一体化微机械加工,直接集成在模块上,天线波束张角大约为60°。发射模块支持输入频率范围为10.6~13.2 GHz,内部包含8倍频电路,输出频率范围为85~105 GHz,输出功率约10 dBm;接收模块本振输入频率范围为10.6~13.2 GHz,内部包含谐波混频电路;测量的高频毫米波信号下变频后输出中频信号,中频信号频率为800 MHz。



Fig.3 Modular W-band transmitting and receiving units 图 3 模块化W波段发射和接收单元

1.3 阵列设计

在毫米波全息成像系统中,毫米波收发阵列的设计决定了毫米波成像效果。为实现高分辨成像,基于W波段高频毫米波收发模块搭建线性毫米波收发阵列。毫米波线性阵列工作频率为85~105 GHz,考虑到收发隔离度,采用发射和接收双排排布方式。在近距离成像的应用场景下,为实现收发模块覆盖横向约1 m的视场,在阵列形态设计中,发射单元阵列或接收单元阵列至少有1组需覆盖约1 m的横向视场。基于上述目标,设计了4种毫米波收发阵列,如图4所示,其主要参数见表1,表中 D_t 为发射单元间隔, D_r 为接收单元间隔,H为收发单元高度差。Array I包含25个发射单元和25个接收单元,Array II和 Array III保持发射单元不变提升接收单元数目同时减小接收单元间距,Array IV发射单元和接收单元均为50个,发射单元和接收单元间距相比于Array I均缩小1倍。

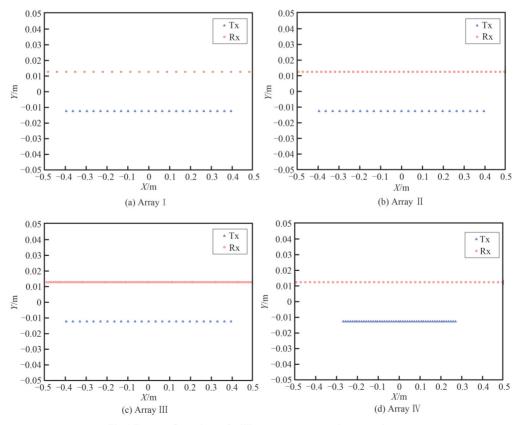


Fig.4 Four configurations of millimeter–wave transceiver array layouts
图 4 四种毫米波收发阵列排布

表1	四种毫米波收发阵列布局参数
Table1 T	he parameters of four array topologies

Array	number of Tx	number of Rx	$D_{\scriptscriptstyle m T}$ /mm	$D_{ m \scriptscriptstyle R}/{ m mm}$	offset H/mm
Array I	25	25	33	44	25
Array II	25	50	33	22	25
Array III	25	100	33	11	25
Array IV	50	50	11	22	25

在不考虑天线方向图情况下,对上述4种阵列的点扩散函数进行数值仿真,结果如图5所示。阵列I~III发射阵列和接收阵列采用了接近相同的几何孔径,因而点扩散函数的主瓣和旁瓣接近,而阵列IV发射单元阵列孔径相对较小,其3dB波束宽度及旁瓣水平相对于其他3组阵列稍差;阵列I~III接收阵列单元间隔分别为44、22、11 mm,由于接收阵列排布逐渐密集,其栅瓣位置不断远离主瓣,且得到明显抑制。进一步地,考虑到线性阵列快速扫描对于减小开关切换数量的需求,优先采用阵列III的排布方式,即采用25个发射单元和100个接收单元。在实际实现中,毫米波收发阵列频率采样间隔设置为144 MHz,扫频点数144,采用1发多收模式,即1个发射单元发射毫米波信号,所有接收单元同时接收。

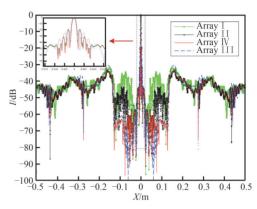


Fig.5 Point spread functions of the millimeter–wave transceiver arrays 图 5 毫米波收发阵列的点扩散函数

1.4 图像重建

结合线阵阵列电子扫描和机械运动扫描, 获取毫米波全息数据, 表示为:

$$U(x_1, y_1, x_r, y_r, k) = \iint (x, y, z) \exp(-jkr)/r^2 dx dy dz$$
(1)

式中: $U(x_t, y_t, x_r, y_r, k)$ 为 IQ 解调获得的全息数据(包含实部和虚部), (x_t, y_t, x_r, y_r) 为数据对应发射单元和接收单元的空间坐标; f(x,y,z) 为成像目标的复反射率; k 为毫米波波数; 假设阵列所在平面 z=0, $r=\sqrt{(x_t-x)^2+(y_t-y)^2+z^2}+\sqrt{(x_t-x)^2+(y_t-y)^2+z^2}$ 。

相对于二维均匀排布的单发单收毫米波全息数据,本文研究的毫米波全息系统的全息数据在水平方向是非等间排布的,因而不能直接由基于快速傅里叶变换的重建算法计算图像。对于非规则数据,可采用反向传播算法合成图像:

$$f(x_i, y_i, z_i) = \sum_{N_i} \sum_{N_i} \sum_{N_i} U_{N_i, N_i, N_k} \exp(jk_{N_k} r_{N_i, N_i})$$
(2)

式中: $r_{N_t,N_t} = \sqrt{(x_t - x_i)^2 + (y_t - y_i)^2 + z_i^2} + \sqrt{(x_r - x_i)^2 + (y_r - y_i)^2 + z_i^2}$; N_k 、 N_t 、 N_t 分别为频率个数、发射单元个数及接收单元个数。由于在聚焦过程没有采用近似处理,反向传播算法能够获得高信噪比低重建误差的最优图像。

但由于计算量巨大,重建时间是制约该方法应用的主要因素。针对反向传播算法计算量大的问题,课题组注意到反向传播算法中的冗余计算问题^[20],基于降维处理和距离向快速傅里叶算法提出了一种快速聚焦方法,能够在不损失图像质量的情况下,将计算复杂度由 $O(N^6)$ 降低到 $O(N^3\log N)$,其中 N 为数据尺寸。

2 成像实验

基于上述设计搭建的W波段近距离高分辨毫米波全息成像系统实物如图6所示。一次扫描完成后,获取的全息数据由PCIE高速采集卡传递给计算机中央处理器 (Central Processing Unit, CPU)和图形处理器 (Graphics Processing Unit, GPU)进行图像重建。采用计



Fig.6 Physical prototype of the W-band short-range high-resolution millimeter-wave holographic imaging system 图 6 W波段近距离高分辨毫米波全息成像系统实物图

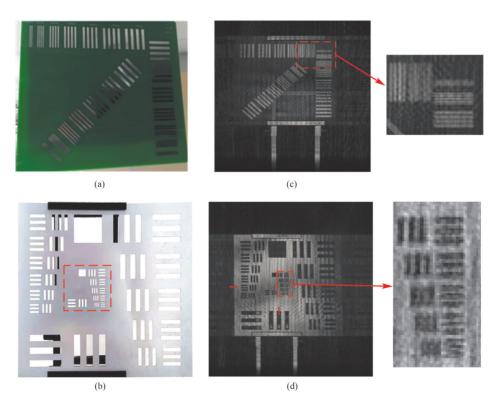
算统一设备架构(Compute Unified Device Architecture, CUDA)并行计算技术,开发了基于 C++的 GPU 加速聚焦算法代码,图像重建过程主要由显卡计算完成。

在毫米波全息成像理论中,方位向分辨力可通过 $\delta = \lambda/(4\sin\gamma)$ 估算(其中 γ 为几何孔径张角和天线半张角的最小值, λ 为波长),距离向分辨力由带宽决定, $\delta_z = c/2B$ (其中c 为光速,B 为带宽),通过计算可得到本系统分辨力理论极限为方位向 1.6 mm,距离向 7.5 mm。

首先,对金属线对分辨力测试板进行成像,实物如图 7(a)所示,金属线对分辨力测试板的基底材质为环氧板 (FR-4),上面粘贴不同尺寸的金属线对,线对宽度分别为 7~1 mm(以 1 mm等间隔缩小),包括水平、竖直、斜 45°三组。对其进行毫米波成像,结果如图 7(c)所示(右上角为局部放大图):在竖直和斜 45°方向,可分辨 2 mm 线对, 1 mm 线对隐约可见;水平方向,3 mm 线对清晰可见,2 mm 线对隐约可见,1 mm 线对完全模糊。

其次,对镂空线对分辨力测试板进行成像,实物如图 7(b)所示。镂空线对分辨力测试板为金属铝,对于毫米波信号为强反射率材料。在铝制基底上刻制镂空 USAF(United States Air Force)分辨力测试图案,图 7(b)中虚线框里的线对分辨力从上到下依次为 3.5 mm、3 mm、2.8 mm、2.5 mm、2.2 mm,最左侧线对分辨力为 4 mm。通过W波段毫米波全息成像系统获得的毫米波图像如图 7(d)所示(右下角为局部放大图)。通过观察可以发现,竖直方向最小的分辨力线对 2.2 mm 清晰可见,而水平方向 2.5 mm 线对清晰可见,2.2 mm 线对隐约可见,该结果与金属线对分辨力测试板成像结果接近。

通过上述成像实验可以发现,本文设计的W波段近距离高分辨毫米波全息成像系统能够实现接近2mm高分辨成像,同时其垂直方向分辨力要明显优于水平方向。这是由于垂直方向通过机械运动实现了密集采样,而水平方向阵列单元排布相比半波长采样有一定稀疏性,因而水平方向易受旁瓣和栅瓣影响,从而引起图像混叠,造成分辨能力有所下降。在图7(d)中,由于目标整体为强反射目标,图像左右边缘隐约可见微弱伪影,该伪影轮廓与分辨力测试板相近。经验证是由栅瓣引起的镜像伪影,该伪影除了在边缘产生干扰,也会对中间图像造成模糊,影响水平方向分辨力。



(a~b) optical images of the metal pair resolution test board, respectively; (c~d) millimeter wave images of the hollow–structured line pair resolution test board
Fig.7 Imaging experiments for resolution test board
图 7 分辨力测试板成像实验

除通过分辨力测试板直观地测试分辨力外,还可通过点扩散函数评估毫米波图像分辨力。在图7(d)中选取水平和竖直金属板边缘位置,通过反向传播算法进行过采样重建,对归一化幅度数据进行曲线拟合:

$$A(x) = \frac{a}{1 + \exp\left(-\frac{x - b}{c}\right)} + d \tag{3}$$

式中: x为位置坐标; A为拟合的幅度; a、b、c、d为曲线参数。进一步地,对拟合曲线做差分处理即可获得近似的点扩散函数,X方向和Y方向的点扩散函数如图 $8(a)\sim(b)$ 所示。通过该方法计算点扩散函数半高宽,水平方向为 $2.6\,$ mm,竖直方向为 $2.4\,$ mm,该结果与分辨力测试板测试结果有一定差异。观察拟合数据可以发现,金属板边缘幅值波动较大,影响计算准确性。选取图 7(d)中小圆圈位置进行距离方向的过采样重建,重建结果如图 8(c)所示,计算获得的点扩散函数半高宽约为 $7.6\,$ mm,这与理论 $7.5\,$ mm的距离向分辨力接近。

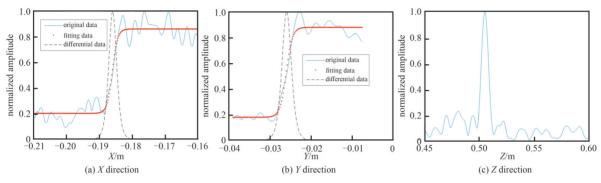


Fig.8 Point spread function calculations 图 8 点扩散函数计算

3 结论

基于线阵扫描技术路线,本文实现了一种85~105 GHz针对近距离成像的高分辨力毫米波全息成像系统。该系统包含一个由25个发射和100个接收模块组成的线性阵列,在扫描工作时,通过三级开关电路控制25个发射单元依次发射毫米波信号,100个接收单元同时接收反射信号。由于收发单元覆盖了1 m左右的水平孔径且接收单元紧密排布,在确保成像分辨力的同时在一定程度上抑制了旁栅伪影。通过金属线对和镂空线对两种分辨力测试板进行了成像实验验证,结果表明,在0.5 m的近距离成像距离下,该系统垂直方向分辨力优于2 mm,水平方向分辨力优于2.5 mm,能够实现大视场的高分辨成像。需要注意的是,由于收发单元间隔相对于半波长采样仍有一定差距,水平方向分辨力略差于垂直方向,同时强目标反射图像容易受栅瓣伪影的影响。下一步可通过研究基于深度学习的毫米波图像重建方法进一步提升重建图像质量和减少重建时间。

参考文献:

- [1] QIAO Lingbo, WANG Yingxin, ZHAO Ziran, et al. Exact reconstruction for near-field three-dimensional planar millimeter-wave holographic imaging[J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2015, 36(12): 1221–1236. DOI: 10.1007/s10762–015–0207–z.
- [2] SHEEN D M,MCMAKIN D L,HALL T E. Three-dimensional millimeter-wave imaging for concealed weapon detection[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2001,49(9):1581-1592. DOI:10.1109/22.942570.
- [3] KHARKOVSKY S, ZOUGHI R. Microwave and millimeter wave nondestructive testing and evaluation—overview and recent advances[J]. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2007,10(2):26–38. DOI:10.1109/MIM.2007.364985.
- [4] MURAKAMI H,FUKUDA T,OTERA H,et al. Development of a high-sensitivity millimeter-wave radar imaging system for non-destructive testing[J]. Sensors, 2024,24(15):4781. DOI:10.3390/s24154781.
- [5] KONG Hao, HUANG Cheng, YU Jiadi, et al. A survey of mmWave radar-based sensing in autonomous vehicles, smart homes and industry [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2025, 27(1):463-508. DOI:10.1109/COMST.2024.3409556.
- [6] ABDU F J,ZHANG Y X, FU M Z,et al. Application of deep learning on millimeter-wave radar signals:a review[J]. Sensors, 2021, 21(6):1951. DOI:10.3390/s21061951.
- [7] TOPFER F, OBERHAMMER J. Millimeter-wave tissue diagnosis: the most promising fields for medical applications[J]. IEEE Microwave Magazine, 2015,16(4):97-113. DOI:10.1109/MMM.2015.2394020.
- [8] DI M S, ESPIN-LOPEZ P F, MARTELLOSIO A, et al. On the feasibility of breast cancer imaging systems at millimeter-waves frequencies[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2017, 65(5): 1795–1806. DOI: 10.1109/TMTT. 2017.

- 2672938.
- [9] COLLINS H D, MCMAKIN D L, HALL T E, et al. Real-time holographic surveillance system: US patent 5455590[P]. 1995-10-03
- [10] SHEEN D M, COLLINS H D, HALL T E, et al. Real-time wideband holographic surveillance system: US patent 5557283[P]. 1995-05-12.
- [11] SHEEN D,MCMAKIN D,HALL T. Near-field three-dimensional radar imaging techniques and applications[J]. Applied Optics, 2010,49(19):E83-E93. DOI:10.1364/A0.49.000E83.
- [12] AHMED S S,SCHIESSL A,SCHMIDT L P. A novel fully electronic active real-time imager based on a planar multistatic sparse array[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2011,59(12):3567-3576. DOI:10.1109/TMTT.2011.2172812.
- [13] AHMED S S,SCHIESSL A,GUMBMANN F,et al. Advanced microwave imaging[J]. IEEE Microwave Magazine, 2012,13(6):26–43. DOI:10.1109/MMM.2012.2205772.
- [14] 赵磊,黄昆,郝鑫,等. 近场雷达成像非均匀稀疏阵设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017,15(5):707-710. (ZHAO Lei, HUANG Kun,HAO Xin,et al. Non-uniform sparse array design in near field radar imaging[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017,15(5):707-710.) DOI:10.11805/TKYDA201705.0707.
- [15] DVORSKY M,SIM S Y,MOTES D T,et al. Multistatic Ka-band(26.5~40 GHz) millimeter-wave 3-D imaging system[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023(72):1-14. DOI:10.1109/TIM.2023.3306535.
- [16] BACCOUCHE B, AGOSTINI P, MOHAMMADZADEH S, et al. Three-dimensional terahertz imaging with sparse multistatic line arrays[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2017,23(4):1-11. DOI:10.1109/JSTQE.2017.2673.
- [17] SUN Chao, CHEN Wei, WANG Lei, et al. Three-dimensional terahertz imaging based on sparse multistatic linear array[C]// 2023 IEEE MTT-S International Wireless Symposium(IWS). Qingdao, China: IEEE, 2023:1-3. DOI:10.1109/IWS58240.2023.10222852.
- [18] 崔振茂,高敬坤,陆彬,等. 340 GHz稀疏 MIMO 阵列实时 3-D 成像系统[J]. 红外与毫米波学报, 2017,36(1):102-106. (CUI Zhenmao, GAO Jingkun, LU Bin, et al. Real time 3D imaging system based on sparse MIMO array at 340 GHz [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2017,36(1):102-106.) DOI:10.11972/j.issn.1001-9014.2017.01.018.
- [19] 经文,安健飞,成彬彬,等. 一种 0.34 THz 站开式三维成像安检仪[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(5):757-762. (JING Wen, AN Jianfei, CHENG Binbin, et al. A 0.34 THz 3D imaging radar for standoff personal screening[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(5):757-762.) DOI:10.11805/TKYDA201805.0757.
- [20] QIAO Lingbo, CHENG Yayun, GUO Dalu, et al. Accelerating digital focusing method for millimeter-wave holographic imaging with arbitrary MIMO array[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2023,72(6):3788-3796. DOI:10.1109/ TMTT.2023.3329722.

作者简介:

金颖康(1982-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电磁波成像感知与安检应用.email:jinyingkang@shenmutek.com.

乔灵博(1990-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究 方向为毫米波与太赫兹成像、雷达探测、信号与信息 处理. 柳 兴(1990-), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为毫米波成像、高功率光腔、新型光源.

郭大路(1988-), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究 方向为毫米波与太赫兹器件、电路与系统.