



DOI: 10.12086/oe.2020.190682

应用在人体安检中的太赫兹近场 MIMO-SAR 技术

刘杰^{1,2}, 安健飞^{1,2}, 周人^{1,2}, 喻洋^{1,2*}¹中国工程物理研究院微系统与太赫兹研究中心, 四川 成都 610200;²中国工程物理研究院电子工程研究所, 四川 绵阳 621900

摘要: 太赫兹近场多输入多输出合成孔径雷达(MIMO-SAR)技术具有在保证分辨率同时降低阵元数量的优势, 在人体安检中有重要的研究和应用价值。该文首先介绍了应用在人体安检领域的太赫兹近场 MIMO-SAR 技术系统现状, 将典型系统进行了归纳和对比; 其次介绍阵列设计, 对典型面阵列的指标特性进行了仿真对比; 介绍典型的成像算法和加速方法, 比较成像算法的图像重构速度。最后对发展进行了展望。

关键词: 太赫兹雷达; 多输入多输出技术; 合成孔径雷达; 雷达图像

中图分类号: TN951; O441.4

文献标志码: A

引用格式: 刘杰, 安健飞, 周人, 等. 应用在人体安检中的太赫兹近场 MIMO-SAR 技术[J]. 光电工程, 2020, 47(5): 190682

Terahertz near-field MIMO-SAR technology for human security inspection

Liu Jie^{1,2}, An Jianfei^{1,2}, Zhou Ren^{1,2}, Yu Yang^{1,2*}¹Microsystem and Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Chengdu, Sichuan 610200, China;²Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract: Terahertz near field MIMO-SAR technology has advantage of reducing the number of arrays while ensuring resolution, thus it has important application in human security inspection. This paper firstly introduces the application of terahertz near field MIMO-SAR technology in human body security inspection, then introduces the system composition, imaging algorithm, and finally makes a prospect of development.

Keywords: terahertz radar; multiple input multiple output technology; synthetic aperture radar; radar imaging

Citation: Liu J, An J F, Zhou R, *et al.* Terahertz near-field MIMO-SAR technology for human security inspection[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(5): 190682

1 引言

太赫兹波介于微波波段和红外波段之间, 是电子学向光学的过渡频段, 泛指频率为 0.1 THz ~ 10 THz,

波长约为 3 mm ~ 30 μm 的电磁波。狭义的太赫兹波特指 0.3 THz ~ 3 THz 这一波段^[1]。近场指的是辐射近场(又称为“菲涅耳区”)。在人体安检场景中, 阵列天线到

收稿日期: 2019-11-11; 收到修改稿日期: 2020-04-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61805217)

作者简介: 刘杰(1981-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事太赫兹成像系统及组件的研究。E-mail: liujie2003_2006@163.com

通信作者: 喻洋(1986-), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事太赫兹成像系统及信号处理的研究。E-mail: yuyang@mtrc.ac.cn

版权所有©2020 中国科学院光电技术研究所

人体的距离一般在几十厘米,处于菲涅耳区。菲涅耳区内电磁场的角分布与离开天线的距离有关^[2],因此方向图具有空变性。多输入多输出合成孔径雷达(multiple input multiple output-synthetic aperture radar, MIMO-SAR)利用MIMO技术获得多个等效SAR通道,降低了常规SAR系统采用增加收发天线数量提高方位分辨率的缺点;采用带宽合成技术获得一个等效的大带宽信号,克服了常规SAR系统采用超宽带信号提高距离分辨率的缺点^[3]。

近年来,暴力与恐怖事件的日益增多,严重危害到人民群众的生命安全,公共安全问题受到全球各个政府的广泛关注。以安检门和摄像头等为代表的传统人体安检方法已难以满足大人流的反恐要求,迫切需要开发有效的安检技术手段,实现对人体隐藏目标快速、精确检测。

将太赫兹成像技术应用于公共安全检测,具有如下优势:

a) 兼顾衣物穿透和高分辨成像的双重特性:相对微波毫米波而言,可实现对人体隐匿违禁物品进行高分辨成像^[4],成像分辨率可以毫米和亚毫米量级;

b) 具有光子能量低,生物安全性好:太赫兹光子能量1 meV量级,远小于人体皮肤的电离能,不同于X光射线,对人体不会产生电离损伤,且所需辐射功率不及手机辐射的十分之一,远低于人体安全阈值^[5]。

综上所述,太赫兹成像技术在安全检查、反恐维稳、重点区域的监测与防护等方面有着重要潜在应用价值,也成为国际太赫兹研究的热点。

本文对国内外发展现状、系统构成、成像算法和成像结果等方面概述太赫兹近场MIMO-SAR技术研究进展情况,最后对太赫兹近场MIMO-SAR技术在人体安检中的应用进行展望。

2 国内外发展现状

太赫兹成像安检的研究方向有主动式和被动式两种。被动式成像系统利用物体和人身产生和反射环境的太赫兹波的差异进行对比成像,其优势是被动式成像系统不发射任何射线或者能量,缺点是成像分辨率受限。被动式成像系统适合成像分辨率不高且需要快速检测的应用场景。该类系统的代表有英国DB公司的THRUVISION。主动式成像系统借助雷达原理,通过发射太赫兹波信号,接收目标散射的回波信号,通过图像重构实现对人体隐匿违禁物品成像和识别。早期的太赫兹主动成像安检采用多发多收一维机械线扫

描体制^[6],并采用了光学反射镜对太赫兹波束进行汇聚,再配合反射镜的机械扫描实现成像。这种体制的优势在于汇聚后的波束能在相对较远距离处实现足够的照射功率,成像处理简单,对数字波束形成的计算压力较小。而其劣势也是明显的,由于反射镜决定了聚焦深度和汇聚光斑尺寸,因而对不同距离处目标的聚焦效果不同,同时需要大口径聚焦镜来保证系统的分辨力。又大又重的光学反射镜严重限制了该体制的实际应用。

克服大口径光学反射镜在应用中受限问题的一个思路是采取全息成像体制^[7]。利用合成孔径雷达成像原理,既可以保证成像速度,同时提升成像分辨率。全息成像安检体制有:多发多收一维机械线扫描全息成像体制和多发多收二维电子扫描全息成像体制。

2.1 多发多收一维机械线扫描体制

多发多收一维机械线扫描体制在单发单收二维机械点扫描体制上进行了改进,通过减少一维扫描维度提升扫描速度,采用了一维合成孔径技术进行图像重构。其代表性系统有2013年欧洲第七框架计划支持的TeraSCREEN项目^[9]以及2016年中物院电子工程研究所微系统与太赫兹研究中心报道的对0.34 THz频段4发16收的主动成像系统^[10],如图1和图2所示。这种体制在单发单收二维机械点扫描体制上进行的重要改进之处是将太赫兹波束聚焦为“线状”而不是“点状”,从而只需要通过一维扫描即可遍历成像面,大大提升成像速度。但其缺点是扫描维的成像分辨率取决于线状波束的宽度,即聚焦镜的口径,从而使其分辨率受限。同时,由于多数姿态下目标特性导致的反射回波弱以及相干斑,也影响了成像质量。

2.2 多发多收二维电子扫描全息成像体制

多发多收二维电子扫描全息成像体制去除机械扫描环节,利用大规模面阵实现对人体成像面的全覆盖。德国Rohde & Schwarz公司开发的QPS成像安检仪^[11],系统集成于工作于70 GHz~80 GHz的3072发射和3072接收通道,基于高集成密度主动面阵和强大的数字信号处理能力,将数据获取时间控制在16 ms,方位分辨率为2 mm,如图3所示。美国MIT林肯实验室也开发了类似系统^[12],工作于24 GHz~40 GHz的1008发射和1008接收通道,方位分辨率为5 mm。2018年中物院微太中心报道的对毫米波64发64收的主动成像系统^[13],如图4所示。虽然目前基于多发多收二维电子扫描体制的人体安检系统的工作频率未在太赫

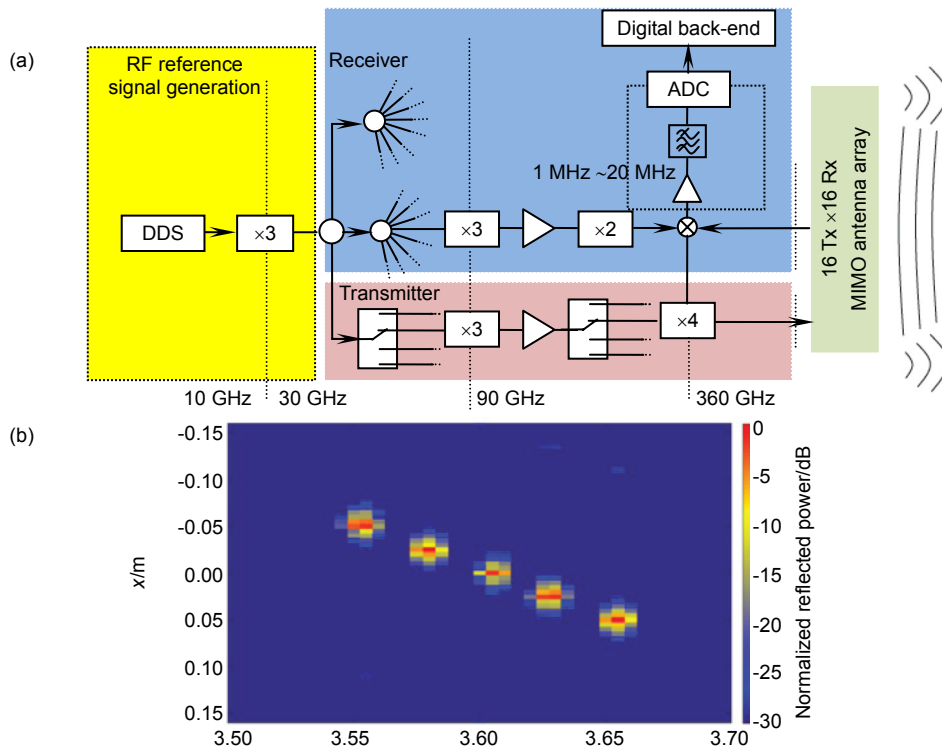


图 1 TeraSCREEN 系统的框架及仿真结果^[8]

Fig. 1 Framework of TeraSCREEN system and simulation results^[8]

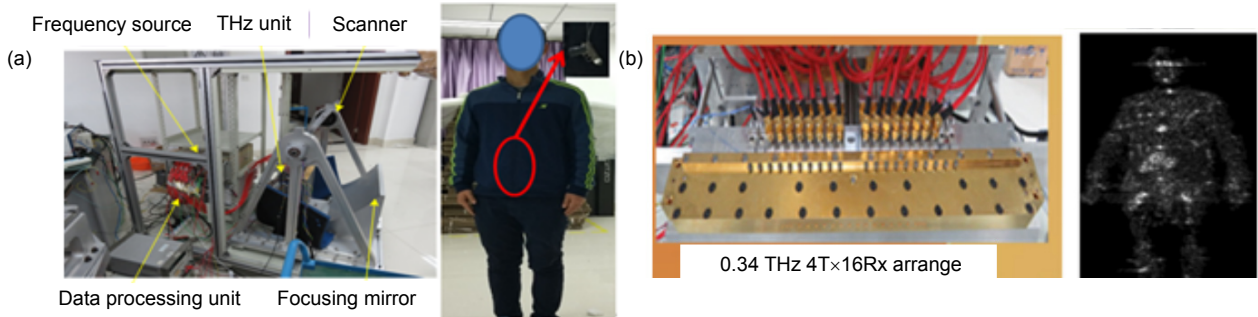


图 2 0.34 THz 4发 16 收成像系统框架及成像结果^[9]

Fig. 2 Framework of 0.34 THz 4Tx and 16Rx imaging system and imaging result^[9]

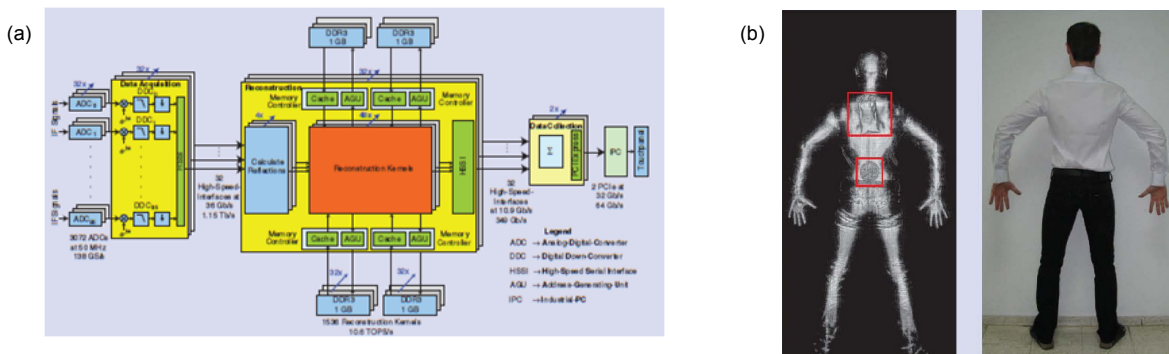


图 3 QPS 成像安检仪的系统框架及成像结果^[10]

Fig. 3 Framework of QPS imaging security system and imaging result^[10]

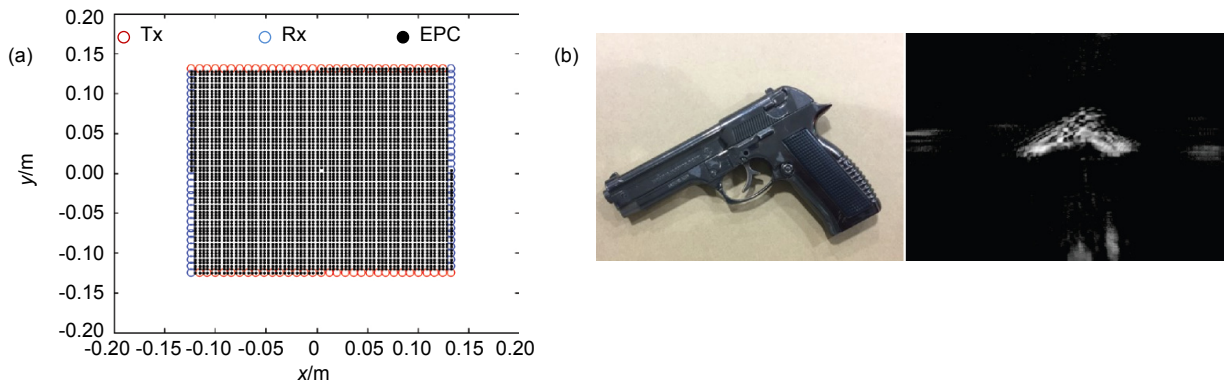


图 4 毫米波 64 发 64 收成像的系统框架及成像结果^[12]

Fig. 4 Framework of 64Tx and 64Rx millimeter wave imaging system and imaging result^[12]

兹频段，主要原因在于太赫兹收发芯片尚不成熟，随着系统对分辨率指标要求提高，可以预计未来工作频率将提高到太赫兹频段。

2.3 多发多收一维机械线扫描全息成像体制

多发多收一维机械线扫描全息成像体制可看作多发多收一维机械线扫描体制和多发多收二维电子扫描全息成像体制的折中产物，保持 MIMO 体制的优势的同时实现了阵列低成本。系统设计的主要思想是将线阵(或者被测目标)通过传送带产生机械直线运动，由此产生一个维度的合成孔径，再和与运动方向正交的电子扫描线阵产生的一维 MIMO-SAR 相结合，生成

混合的二维采样孔径。文献[14-17]最早报道了对这一体制的系统设计及成像方法方面研究工作。近年来，针对该体制阵列设计和成像算法的研究不断取得新进展^[18-21]，推动了该技术面向应用。图 5 和图 6 分别为凯泽斯劳滕大学^[22]和中物院微太中心所研制的成像系统。

表 1 对目前人体安检系统体制进行了对比。

由表 1 可以看出，全息成像体制在成像分辨率上有较大优势，在较低的工作频率下，就能达到较高的成像分辨率，其缺点在于作用距离近。如何在保证分辨率和成像速度的同时降低阵元数量是设计该类系统的关键问题，涉及到稀疏阵列构型和快速成像算法。

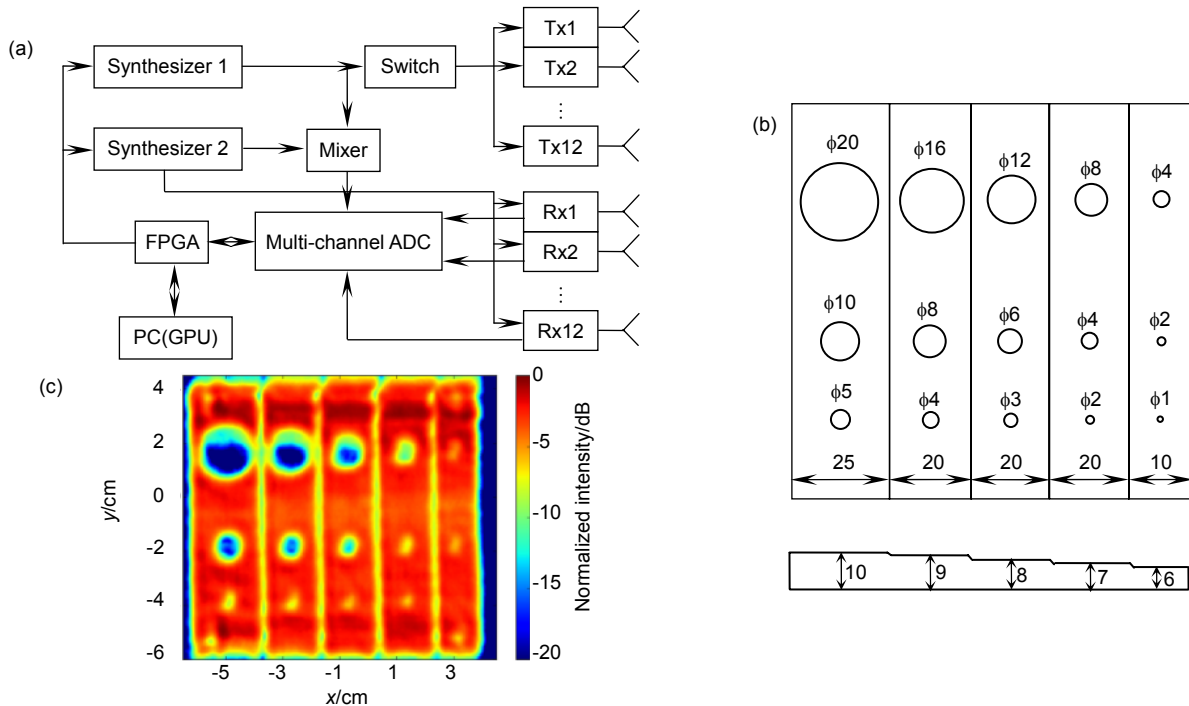


图 5 凯泽斯劳滕大学成像系统的框架及成像结果^[22]

Fig. 5 Framework of Kaiserslautern University's imaging system and imaging result^[22]

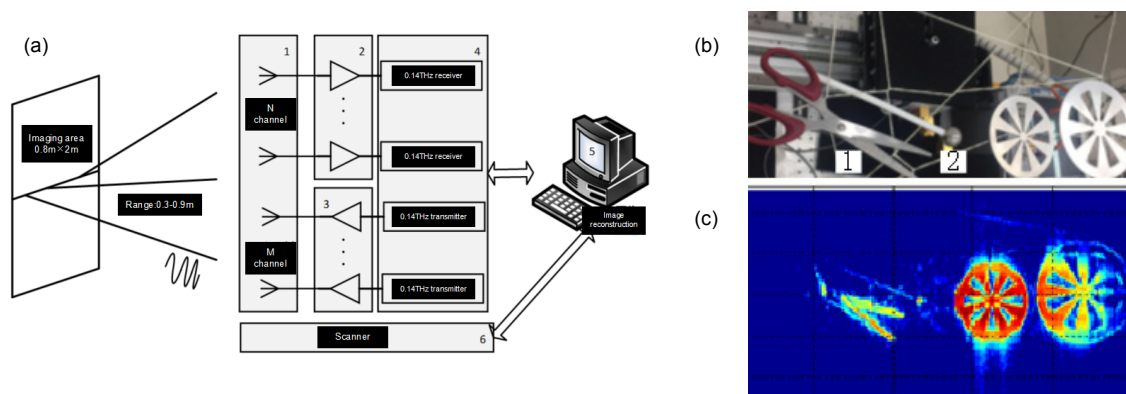


图 6 0.14 THz 80 发 80 收成像系统的框架及成像结果

Fig. 6 Framework of 0.14 THz 80Tx and 80Rx imaging system and imaging result

表 1 国内外毫米波/太赫兹安检系统汇总对比

Table 1 Summary of millimeter wave/terahertz security system

成像体制	研究机构	频率/GHz	带宽/GHz	方位分辨率/mm	作用距离/m
多发多收一维机械线扫描体制	德国法兰克福	300	72	≤ 20	10
	欧盟第 7 框架计划	360	40	≤ 10	4
	中科院电子所	220	15	≤ 10	1
多发多收二维电子扫描全息成像体制	R&S 公司	75	10	2	≤ 1
多发多收一维机械线扫描全息成像体制	美国 MIT	27	16	≤ 5	≤ 1
多发多收一维机械线扫描全息成像体制	凯泽斯劳滕大学	110	10	≤ 2	≤ 1
多发多收一维机械线扫描全息成像体制	中物院微太中心	140	5	≤ 2	≤ 1

3 稀疏阵列构型

稀疏阵列设计的基础是有效孔径方法。由于有效孔径由 Tx 阵列和 Rx 阵列两个孔径的卷积得来，因此设计稀疏多站阵列的常用方法是将其中的一个阵列设计成所需有效孔径的稀疏形式，另一个阵列设计成更密集的形式，使其孔径填充稀疏阵列各单元之间的间距。这也被称为内插方法^[23-24]。假设 Tx 阵列包含 N_t 单元，Rx 阵列包含 N_r 单元，则等效单元个数为 $N_e = N_t \times N_r$ 。稀疏阵列单元减少为实孔径阵列单元为 $(N_t + N_r) / N_t \times N_r$ 。由于 N_t 和 N_r 的不同组合可以有相同数量的等效采样单元，因此选择 N_t 和 N_r 以实现 $(N_t + N_r) / N_t \times N_r$ 的最小化比率。理想情况下，在 $N_t = N_r$ 时这个比率最小，也就是说最少的 Tx 和 Rx 物理单元数得到了最大的等效孔径。这只是阵列设计中要考虑的一方面，通常不会严格按照这个原则进行设计，但是考虑到系统实现问题，比如考虑系统低功耗时，往往会采用多 Rx 少 Tx 的方式来降低能耗。MIMO 阵列有一维线阵和二维面阵。

常见的一维线阵中 Tx 阵列平行于 Rx 阵列，TeraSCREEN 项目采用的线阵如图 7 所示。其中，Rx 阵列单元与单元间距为 $N_r \times \Delta x$ ；Rx 阵列单元与 Tx 阵列单元间距为 $2 \times \Delta x$ ；Tx 阵列单元与单元间距为 $2 \times \Delta x$ 。总阵列长度 L_{MIMO} 为 $N_t \times (N_r + 1) \times \Delta x$ 。阵列^[12]、方块阵列^[26]等，参照文献中稀疏面阵构型，分别设计了口字形、十字形、方块以及 T 形阵列，如图 8(a)，9(a)，10(a)，11(a)所示，目前使用较多的二维面阵有口字形阵列^[13, 25]、十字形，图 8(b)，9(b)，10(b)，11(b)分别为对应的等效孔径。天线个数为 16 个发射单元和 16 接收单元，间隔归一化，单位为 1，“*”为发射阵列，“.”为接收阵列。

对上述仿真阵型性能进行分析，仿真使用的波形参数为 75 GHz 载频，得到系统成像点扩散函数。阵列性能比较结果如表 2 所示。

由表 2 中看出，四种阵列性能相近，口字阵列、十字形阵列和 T 形阵列的收发阵列线性周期排布，易于加工实现。积分旁瓣比可以通过阵列加窗归一化、信号幅度加窗等方法降低。

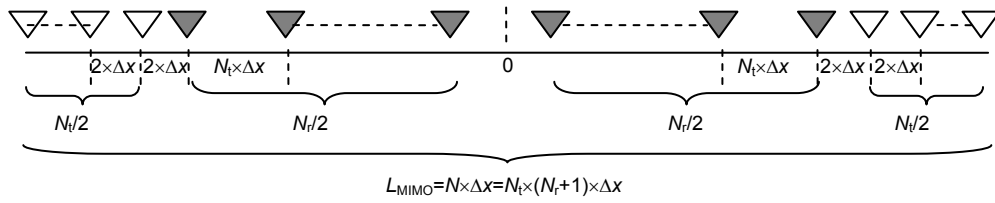


图7 一维线阵构型

Fig. 7 1D MIMO array configuration

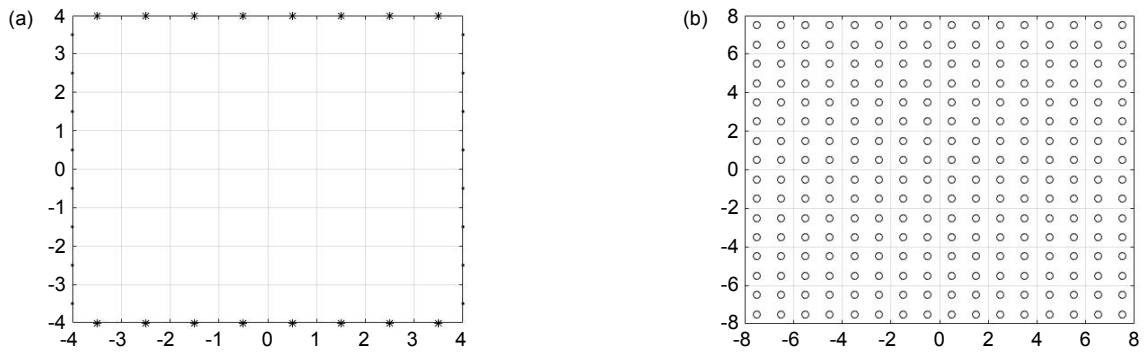


图8 (a) 口字阵列和(b)其等效孔径

Fig. 8 (a) Tetragonum array and (b) its effective aperture

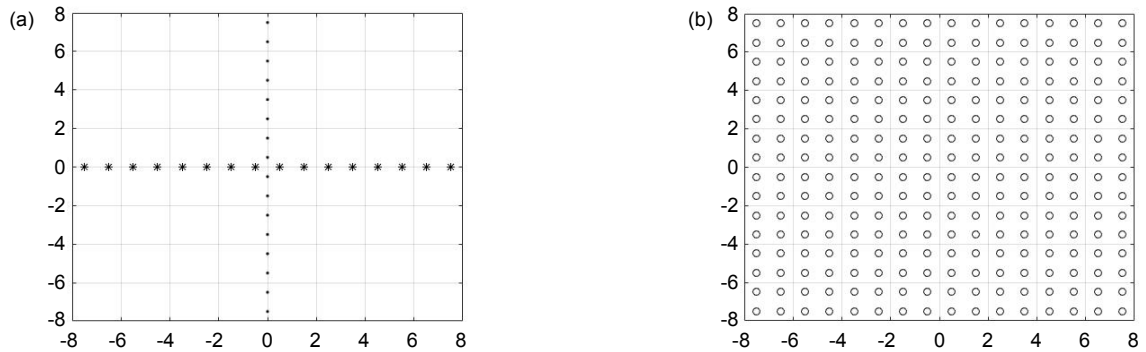


图9 (a) 十字阵列和(b)其等效孔径

Fig. 9 (a) Cross array and (b) its effective aperture

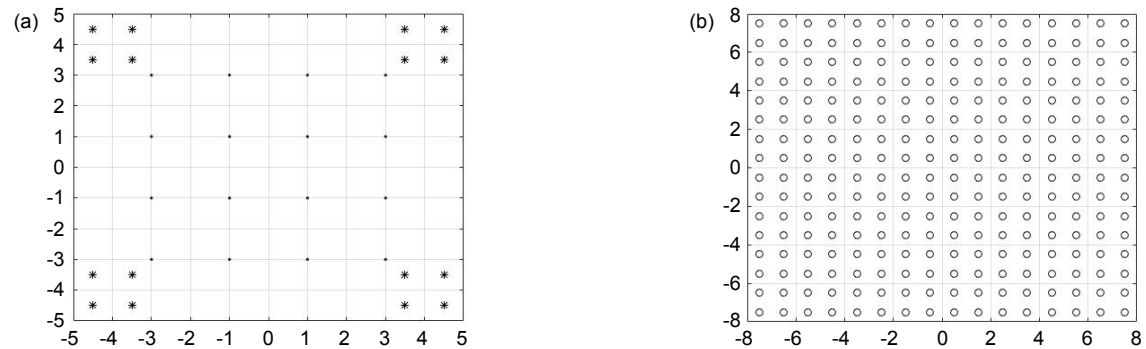


图10 (a) 方块阵列和(b)其等效孔径

Fig. 10 (a) Square array and (b) its effective aperture

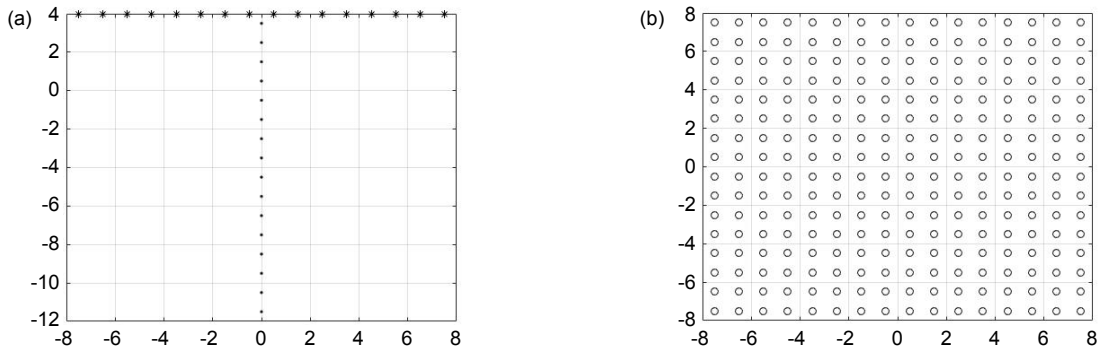


图 11 (a) T形阵列和(b)其等效孔径
Fig. 11 (a) T array and (b) its effective aperture

表 2 阵列性能比较
Table 2 Comparison of array performances

阵列类型	目标点位置/m			主瓣宽度/mm		峰值旁瓣比/dB		积分旁瓣比/dB	
	X	Y	Z	X	Z	X	Z	X	Z
口字阵列	0.0	0.5	0.0	2.4	2.4	23	23	3	3
	0.0	0.5	0.2	2.7	2.9	24	23	14	16
十字形	0.0	0.5	0.0	2.4	2.4	22	22	3	3
	0.0	0.5	0.2	2.7	2.4	23	22	11	15
方块阵列	0.0	0.5	0.0	2.4	2.4	22	22	3	3
	0.0	0.5	0.2	2.7	2.4	23	22	10	14
T形阵列	0.0	0.5	0.0	2.4	2.4	22	22	4	6
	0.0	0.5	0.2	2.5	2.7	23	22	11	11

4 成像算法

根据图 12 中的成像场景设置,可以获得一个四维度的复杂数据集 $S(v, u_t, u_r, k)$, 它是一个关于目标位置沿 x 轴 v 、发射机 u_t 坐标、接收机 u_r 坐标以及波数 k 的函数。取一阶玻恩近似, 接收信号等于目标反射率函数 $o(r)$ 与目标体积 V 上的空间变量传递函数的乘积:

$$S(v, u_t, u_r, k) = \int_V o(r) \exp(-jkr_{mu}(v, u_t, u_r, r)) dV, \quad (1)$$

其中: $r_{mu}(v, u_t, u_r, r)$ 为电磁波传播的路径, 定义为从任意 Tx 位置到任意 Rx 位置, 并由此返回的路径。信号处理的目的是从实测数据中提取反射率函数。这就产生了一个逆问题, 可以使用空间变量匹配滤波器来解决:

$$\tilde{o}(r) = \iiint_{v, u_t, u_r, k} S(v, u_t, u_r, k) e^{(jkr_{mu}(v, u_t, u_r, r))} dk du_t du_r dv. \quad (2)$$

直接实现式(2)会导致较高的计算负载。假设需要

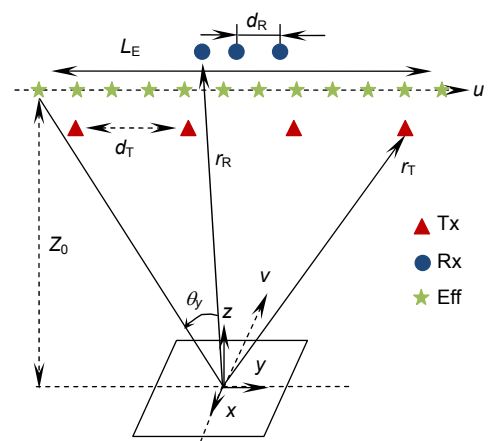


图 12 等效孔径方法与合成孔径相结合的成像系统原理图

Fig. 12 Schematic of the imaging system using the effective aperture approach in combination with a synthetic aperture

重建 M 个孔径位置、 N_f 频点和 N^3 体素，计算负载为 $O(MN_f N^3)$ 。然而，基于此算法的主要工作是，基于式(2)的推导低计算负载和相似成像质量的重建算法。利用快速傅里叶变换算法计算卷积积分，可节省计算量。接下来介绍它的实现，并讨论了三种计算效率较高的算法。

4.1 后向投影算法

该算法广泛应用于合成孔径雷达成像^[27]，可由式(2)推导得到。在该算法中，对反射率函数的估计主要分两步进行。首先对 k 做一维傅里叶逆变换：

$$S_1(v, u_t, u_r, t) = iFT_{(k)}\{S(v, u_t, u_r, k)\} \quad (3)$$

这相当于沿 z 轴聚焦数据。然后将距离聚焦数据插值到 r 处，并在二维孔径上积分，得到位于 r 处的体素的反射率：

$$\tilde{o}_{BP}(\mathbf{r}) = \int \int \int S_1\left(v, u_t, u_r, t = \frac{|\mathbf{r}|}{c}\right) du_t du_r dv \quad (4)$$

由于使用了快速傅里叶变换算法来进行距离聚焦，因此降低了计算负载。

4.2 快速因子分解后向投影算法

算法的基本思想是采用极线图像近似区域图像，通过迭代的孔径合并和图像分裂完成合成孔径成像。具体来说，该算法利用相邻孔径单元对成像体素形成贡献的变化较小这一事实，进行局部近似处理来减少 BP 算法的计算量。这可以通过在子孔径中迭代地分割要重构的卷积来实现。递归孔径划分处理首先将邻近的孔径合并为一个子孔径，得到子图像，然后将子孔径合并为一个新子孔径，提高图像分辨率，然后继续子孔径合并得到分辨率进一步提高的子图像，最终得到所需分辨率的图像^[28-30]。对于因子分解系数 Q 和因子分解深度 n ，与 BP 算法相比，可节省的计算量为 $O(Q^n)$ 。因子分解的程度是可接受的成像质量和所需的成像分辨率之间的折衷。

4.3 距离徙动算法

虽然后向投影算法和快速因子分解后向投影算法的计算效率有所提高，但是距离偏移算法更加高效，因为它将式(2)中的卷积积分作为频域中的一个复杂乘积进行计算^[31-32]。但是距离徙动算法不能直接使用到稀疏阵列中。因此对距离徙动算法需要进行修改，来适合稀疏阵列成像。算法的主要步骤分为三步：

第一步，利用补偿因子将多站实测数据映射到等效孔径上，减小实际多站信号路径与等效信号路径之

间的差异，

$$r_{cp}(v, u_t, u_r, k) = \exp\left(jk \frac{v^2 + Z_0^2}{(v^2 + Z_0^2)^{3/2}} u_t, u_r\right) \quad (5)$$

将实测数据乘以 r_{cp} ，按照有效孔径 u 进行等距采样排序，

$$S_2(v, u, k) = S(v, u_t, u_r, k) r_{cp}(v, u_t, u_r, k) \quad (6)$$

第二步，将映射数据在孔径域 (v, u) 进行二维傅里叶变换，

$$S_3(k_x, k_y, k) = FT_{(v, u)}\{S_2(v, u, k)\} \quad (7)$$

第三步，进行 Stolt 插值，它将 $S_3(k_x, k_y, k)$ 映射到 $S_4(k_x, k_y, k)$ ，

$$k_z = \sqrt{\left(k_x + \sqrt{k^2 - k_y^2}\right)^2 - k_x^2} \quad (8)$$

将 $S_4(k_x, k_y, k)$ 乘以相位项 $\exp(-jk_z Z_0)$ ，并对 k_x 和 k_y 进行傅里叶反变换得到的未补偿的反射率函数，

$$\tilde{o}_{RMA,1}(\mathbf{r}) = iFF_{(k_x, k_y)}\{S_4(k_x, k_y, k) \exp(-jk_z Z_0)\} \quad (9)$$

随后，我们将 $\tilde{o}_{RMA,1}$ 与一个附加相位因子相乘，以补偿由远场假设产生的距离曲率。补偿系数为

$$\eta_{cp}(v, Z_0, \mathbf{r}) = \exp\left(j \frac{k_z y^2}{4\sqrt{(v-x)^2 + (Z_0-z)^2}}\right) \quad (10)$$

最后一步，对 k_z 进行傅里叶反变换：

$$\tilde{o}_{RMA}(\mathbf{r}) = iFF_{(k_z)}\{\tilde{o}_{RMA,1} \eta_{cp}(v, Z_0, \mathbf{r})\} \quad (11)$$

与后向投影算法相比，距离徙动算法节省了 $O(M^2)$ 的计算量。

4.4 图形处理单元重构

为了加速图像的生成，可以采用图形处理单元实现并行处理的后向投影算法。后向投影算法和快速因子分解后向投影算法的内核易于并行化，而且具有较高加速比，因为它们对每个成像单元执行相同的计算操作。因此，图像重建可以通过将图形处理单元的每个线程分配给一个成像单元来实现。距离徙动算法可以通过图形处理单元加速执行快速傅里叶变换算法，提高成像速度。文献[18]在一个商业图形处理单元(GTX 780)上实现了这三种算法，该单元有 2304 个核、内存 3 GB 和时钟 863 MHz。结果如图 13 所示。以重建时间与待重建成像单元数量的关系作为比较标准。对于快速因子分解后向投影算法，设置的分解因子 ($Q=2$)，因数分解深度为 ($n=(1, 2, 3, 4)$)。由于商业图形处理单元并行工作核的数量有限，使用后向投影算法重建时间随成像单元数量的增加而线性增加。增加快速因子分解后向投影算法的因数分解深度可以降低

低时间-体素曲线的斜率,但代价是增加额外的启动计算开销。图 13 中的几种算法在开始分解过程中有一个初始常数的计算开销,快速因子分解后向投影算法在小规模图像重建中速度和距离徙动算法都较快。

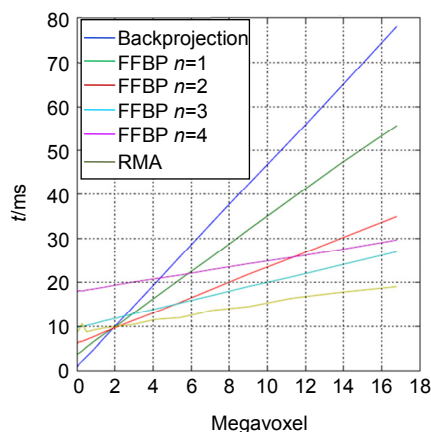


图 13 后向投影、快速因子分解后向投影和距离徙动算法的重构时间^[18]

Fig. 13 Comparison of the reconstruction time of the BP, FFBP, and RMA algorithms on a GTX 780 graphics processing unit^[18]

5 结论

近年来,我国太赫兹基础器件日趋进步,性能稳步提高,促进了太赫兹雷达系统的快速发展。目前在人体安检场景,太赫兹 MIMO-SAR 体制架构清晰,但仍有一些基础与工程问题需要攻克,重点在以下几个方面。

5.1 集成阵列与片上雷达

通过高度集成实现阵列化与片上化是太赫兹近场 MIMO-SAR,也是太赫兹雷达重要发展方向之一。目前太赫兹频段雷达阵列由于难以实现阵列,一般采用一发多收或快速开关切换多发多收方式。突破稀疏 MIMO 线阵面阵设计、片上 MIMO 雷达设计、阵列-合成孔径一体化成像等技术,进一步降低阵列成本,推动其在人体安检中的应用。

5.2 快速成像算法

在保证分辨率前提下,如何降低阵元数量和提高成像速度是该类系统关键问题。非均匀快速傅里叶变换,压缩感知技术是新生的主流雷达成像算法之一。将这些算法引入到人体安检这种近场环境中,根据特定的阵列构型进行优化提高成像速度。

5.3 阵列多视角下隐藏物品回波特征与信息联合提取方法

对于人体目标,在线性阵列的观测条件下,隐藏目标由于与收发单元相对位置的不同,将呈现多个观察视角,根据电磁散射理论,其散射特征会随视角呈现较大变化。散射角度接近镜面反射的回波强度较高,而对覆测平面有较大夹角区域散射回波强度弱,因此分析阵列多视角下隐藏物品回波特征,研究多视角目标回波的联合提取方法对目标信息的精确探测具有重要意义。

总之,太赫兹近场 MIMO-SAR 技术是太赫兹雷达研究热点,在人体安检中有重要意义,同时作为一项基于光电交叉学科的新兴技术有着重要的学术和应用价值,还需要进一步深入研究,最终推动太赫兹近场 MIMO-SAR 技术发展并促进其在军民领域的重要应用。

参考文献

- [1] Wang H Q, Deng B, Qin Y L. Review of terahertz radar technology[J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(1): 1–21.
王宏强, 邓彬, 秦玉亮. 太赫兹雷达技术[J]. *雷达学报*, 2018, 7(1): 1–21.
- [2] Lin C L. *Antenna Engineering Manual*[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2002.
林昌禄. *天线工程手册*[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- [3] Meng C Z, Xu J, Tan X S, et al. Development opportunities and challenges of MIMO-SAR imaging technology[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2015, 13(3): 423–430.
孟藏珍, 许稼, 谭贤四, 等. MIMO-SAR 成像技术发展机遇与挑战[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2015, 13(3): 423–430.
- [4] Appleby R, Wallace H B. Standoff detection of weapons and contraband in the 100 GHz to 1 THz region[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2007, 55(11): 2944–2956.
- [5] Gao J K, Deng B, Qin Y L, et al. Near-field 3D SAR imaging techniques using a scanning MIMO array[J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(6): 676–684.
高敬坤, 邓彬, 秦玉亮, 等. 扫描 MIMO 阵列近场三维成像技术[J]. *雷达学报*, 2018, 7(6): 676–684.
- [6] Bao Z, Xing M D, Wang T. *Radar Imaging Technology*[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2005.
保铮, 邢孟道, 王彤. *雷达成像技术*[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [7] Cooper K B, Dengler R J, Llombart N, et al. THz imaging radar for standoff personnel screening[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2011, 1(1): 169–182.
- [8] Alexander N E, Alderman B, Allona F, et al. TeraSCREEN: multi-frequency multi-mode terahertz screening for border checks[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9078: 907802.
- [9] Cui Z M, Gao J K, Lu B, 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.
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.

- [10] 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.
- [11] Moulder W F, Krieger J D, Majewski J J, et al. Development of a high-throughput microwave imaging system for concealed weapons detection[C]//*Proceedings of 2016 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology (PAST)*, Waltham, MA, USA, 2016.
- [12] Zhao Y J, Cheng B B, Liu J, et al. Two-dimensional sparse array topology for millimeter-wave near-field imaging[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2018, **40**(9): 1926–1930.
赵宇蛟, 成彬彬, 刘杰, 等. 基于毫米波近场成像的二维稀疏面阵结构[J]. *系统工程与电子技术*, 2018, **40**(9): 1926–1930.
- [13] Johnson D H, Dudgeon D E. *Array Signal Processing: Concepts and Techniques*[M]. Englewood Cliffs, NJ: P T R Prentice Hall, 1993.
- [14] Lockwood G R, Li P C, O'Donnell M, et al. Optimizing the radiation pattern of sparse periodic linear arrays[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1996, **43**(1): 7–14.
- [15] Schwartz J L, Steinberg B D. Ultrasparse, ultrawideband arrays[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1998, **45**(2): 376–393.
- [16] South F A, Liu Y Z, Carney P S, et al. Computed optical interferometric imaging: methods, achievements, and challenges[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2016, **22**(3): 6800911.
- [17] Steinberg B D. Digital beamforming in ultrasound[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1992, **39**(6): 716–721.
- [18] 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): 8501411.
- [19] Ge T Y, Jin W, Zhao L, et al. Sparse array in near-field millimeter-wave multiple-input multiple-output radar imaging system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, **28**(11): 113101.
葛桐羽, 经文, 赵磊, 等. 毫米波多输入多输出雷达稀疏阵列近场成像[J]. *强激光与粒子束*, 2016, **28**(11): 113101.
- [20] Zhu R Q, Zhou J X, Jiang G, et al. Range migration algorithm for near-field MIMO-SAR imaging[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, **14**(12): 2280–2284.
- [21] Zhu R Q, Zhou J X, Tang L, et al. Frequency-domain imaging algorithm for single-input-multiple-output array[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, **13**(12): 1747–1751.
- [22] 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): 8501411.
- [23] Zhao L, Huang K, Hao X, 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.
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.
- [24] Li D J, Hou Y N, Teng X M, et al. *Thin Sparse Array Antenna Radar Technology and Its Application*[M]. Beijing: Science Press, 2014.
李道京, 侯颖妮, 滕秀敏, 等. 稀疏阵列天线雷达技术及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [25] Ahmed S S, Schiessl A, Gumbmann F, et al. Advanced microwave imaging[J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2012, **13**(6): 26–43.
- [26] Zhuge X D, Yarovsky A G. A sparse aperture MIMO-SAR-based UWB imaging system for concealed weapon detection[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, **49**(1): 509–518.
- [27] Wang H J, Huang C L, Lu M, et al. Back projection imaging algorithm for MIMO radar[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2010, **32**(8): 1567–1573.
王怀军, 黄春琳, 陆珉, 等. MIMO 雷达反向投影成像算法[J]. *系统工程与电子技术*, 2010, **32**(8): 1567–1573.
- [28] 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.
- [29] Moll J, Schops P, Krozer V. Towards three-dimensional millimeter-wave radar with the Bistatic fast-factorized back-projection algorithm—potential and limitations[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2012, **2**(4): 432–440.
- [30] Lin S B, Li Y L, Yan S S, et al. An sub-image fast factorized back projection algorithm based on optimal regional partition[J]. *Signal Processing*, 2012, **28**(8): 1187–1193.
林世斌, 李悦丽, 严少石, 等. 基于最优区域划分的子块快速因子分解后向投影算法[J]. *信号处理*, 2012, **28**(8): 1187–1193.
- [31] Lopez-Sanchez J M, Fortuny-Guasch J. 3-D radar imaging using range migration techniques[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2000, **48**(5): 728–737.
- [32] Baccouche B, Keil A, Kahl M, et al. A sparse array based sub-terahertz imaging system for volume inspection[C]//*Proceedings of 2015 European Microwave Conference*, Paris, France, 2015.

Terahertz near-field MIMO-SAR technology for human security inspection

Liu Jie^{1,2}, An Jianfei^{1,2}, Zhou Ren^{1,2}, Yu Yang^{1,2*}

¹Microsystem and Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Chengdu, Sichuan 610200, China;

²Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China



Three-dimensional terahertz imaging with MIMO-SAR

Overview: As growing violent and terrorist incidents are endangering people, security inspection in the public becomes increasingly important. The sparse linear array multiple-input multiple-output (MIMO) synthetic aperture radar (SAR) based system, taking into consideration the high resolution of images and the low complexity of the system, is one of the new human body security inspection imaging technologies. This paper mainly introduces the application of MIMO SAR in human body security inspection based on the investigation and analysis of current status and development of domestic and foreign studies on active millimeter-wave/terahertz-wave imaging technologies. Four frameworks are introduced, including single-input single-output (SISO) imaging systems, one dimensional MIMO-SAR with mirror imaging systems, one dimension MIMO-SAR with one dimension SAR imaging systems, and two dimension MIMO imaging systems. Then, the MIMO sparse line array is introduced. The main design idea of the system with MIMO line array is to combine a frequency modulated MIMO line array with an orthogonal synthetic aperture generated by the linear movement of the object under test, such as a conveyor. An array of transmitters illuminates the human with concealed weapon and an array of receivers records the back-scattered radiation coherently. Four kinds of MIMO sparse plane arrays are introduced, including tetragonum array, cross array, square array, and T array. The MIMO sparse plane arrays are designed with 16Tx and 16Rx, then, their performances are compared. Thirdly, signal processing basics and three efficient computational 3D imaging algorithms are presented, including back-projection (BP), fast-factorized back-projection (FFBP), and range migration algorithm (RMA). Those imaging algorithms can be implemented for parallel processing on a graphics processing unit for accelerating the image generation. The BP and FFBP kernels profit strongly from the parallelization since they perform the same computational operation for each voxel. Therefore, the volume reconstruction is mainly achieved through assigning each thread of the graphics processing unit to a voxel. The RMA algorithm also benefit from accelerated execution of the fast Fourier transform algorithm on the graphics processing unit without parallelization. In addition, three different imaging algorithms are compared in regard to their computational efficiency. Finally, this paper makes a prospect of development. In recent years, the THz basic devices in China have made great progress and performances have been steadily improved, which has promoted the rapid development of THz radar system. Although the THz MIMO-SAR system structure is clear for the human body security inspection, but there are still some basic and engineering problems to be overcome, such as: radar chip with integrated array, faster imaging algorithm, a method to extract the echo characteristics and information of hidden objects from multiple view angles. The THz near-field MIMO-SAR technology is still a hot spot in the THz radar and is important for the human security inspection and also need to be further in-depth study for promoting its important application in the field of military and civilian.

Citation: Liu J, An J F, Zhou R, *et al.* Terahertz near-field MIMO-SAR technology for human security inspection[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(5): 190682

Supported by National Natural Science Foundation of China (61805217)

* E-mail: yuyang@mtrc.ac.cn