

# 一种高精度的毫米波稀疏平面阵列 频域类成像算法

孟祥新, 柳桃荣, 笄敏, 刘泽鑫  
(博微太赫兹信息科技有限公司, 安徽合肥 230088)

**摘要:** 本文以手持式毫米波人体安检设备为研究背景, 设计了一种工作于 90 ~ 94GHz 频段的稀疏十字阵列, 并采用时域相关算法与改进距离徙动算法(Range Migration Algorithm, RMA)对目标进行成像. 针对改进 RMA 算法在推导过程中存在球面波展开为平面波近似和复杂的插值问题, 本文提出一种高精度的无需球面波展开和复杂插值运算的基于(Fast Fourier Transform, FFT)的成像算法, 在实现过程中不会引入近似误差和插值误差. 采用电磁仿真软件建立目标回波模型, 进行测试分辨率和噪声鲁棒性的实验. 系统方位分辨率达到 5mm, 满足系统设计指标要求, 验证了所提算法的正确性. 综合实验结果得出所提算法的计算效率优于时域相关算法并且噪声鲁棒性优于改进 RMA 算法, 在手持式毫米波人体安检设备实时成像的应用中, 所提算法的适用性更好.

**关键词:** 稀疏平面阵列; 手持式人体安检设备; 改进距离徙动算法; 基于 FFT 算法; 噪声鲁棒性  
**中图分类号:** TN95      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2020)08-1479-07  
**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.08.004

## A High-Precision Frequency-Domain Imaging Algorithm of Millimeter-wave Sparse Planar Array

MENG Xiang-xin, LIU Tao-rong, DA Min, LIU Ze-xin  
(Brainware Terahertz Information Technology Company Limited, Hefei, Anhui 230088, China)

**Abstract:** Sparse cross array that operating in the 90 ~ 94GHz frequency band was designed for the handheld millimeter-wave human body security inspection. The time-domain correlation algorithm and the modified range migration algorithm (RMA) were chosen as image reconstruction methods. Due to the existence of spherical wave expansion approximation and complex interpolation processes in the deriving of the modified RMA algorithm, a high-precision FFT-based imaging algorithm without spherical wave expansion and complex interpolations was proposed. The electromagnetic simulation software was used to build target model obtaining raw echo data, the resolution test and noise robustness verification experiments were carried out. The azimuth resolution can achieve 5mm, which meets the system design requirements, and verifies the effectiveness of the proposed algorithm. The computational efficiency of the proposed algorithm is better than that of the time-domain correlation algorithm and the noise robustness is better than the modified RMA algorithm. It can be concluded that the proposed algorithm is a better choice in real-time imaging scenarios of the handheld millimeter-wave human body security inspection.

**Key words:** sparse planner array; handheld human body security inspection; the modified RMA algorithm; FFT-based algorithm; noise robustness

### 1 引言

近年来,毫米波稀疏阵列成像技术得到越来越多研究人员的关注<sup>[1-6]</sup>,并逐渐呈现商业化的趋势,而且

部分已经取得商业化的应用成果<sup>[3,4]</sup>.稀疏阵列为发射天线与接收天线按照一定规则的顺序和分布原则在空间中进行排布,由于二维稀疏阵列无任何机械运动扫描部件,获取回波数据的时间极短,因此具备极大的实

时成像的潜力;同时二维稀疏阵列具备两维方位维度、一维距离维度的成像视场,因此具备三维全息成像的能力;稀疏阵列成像技术的研究成果可以应用于人体安检成像<sup>[1-4]</sup>、探地雷达、穿墙雷达<sup>[7,8]</sup>、无损检测<sup>[9]</sup>等研究领域。

毫米波稀疏平面成像阵列的关键核心技术包括硬件系统的搭建和高精度成像算法的研究。目前稀疏阵列成像中针对不规则分布阵列大多采用时域类成像算法或其快速实现算法<sup>[3,4,9,10]</sup>,即时域相关算法和后向投影重建算法,时域类成像算法适用于任意的稀疏天线布阵形式,实现不存在任何的近似误差,成像精度高,但是算法运算量大,消耗的信号处理硬件资源多,难以应用于实时性要求较高的场合。

针对于空间分布连续且均匀的规则稀疏阵列,可以采用频域类算法进行处理,Xiaodong Zhuge 等人针对规则分布的稀疏十字阵列构型提出的改进 RMA 算法基于快速傅里叶变换,极大提高了成像计算效率<sup>[1,2]</sup>,使得稀疏阵列具备实时成像的能力,同时其他学者针对改进 RMA 算法实现了不用程度的改进算法<sup>[11-13]</sup>。但是在其所提算法的推导过程中仍然存在两个问题:

(1) 球面波需要展开为平面波近似,以得到求解的频域匹配滤波器进行距离徙动校正;

(2) 需要复杂的插值计算进行残余距离徙动校正。即改进 RMA 类算法在实现过程中存在近似处理误差。Mehryar Abbasi 等人提出了一种基于 FFT 的成像方法<sup>[14]</sup>,算法克服了频域类算法的两个局限条件,并对多种阵列构型进行了仿真,文献中设计的阵列构型为将两个一定间距的竖直阵列分别作为发射阵列与接收阵列,对十字目标进行成像,得到了较好的成像效果。

上述问题,以 Mehryar Abbasi 等人的研究为基础,提出一种无需球面波展开与复杂插值运算的基于 FFT 的稀疏十字阵列成像算法。本文首先对应用于手持式毫米波人体安检设备的稀疏十字阵列的参数进行详细设计,对所提基于 FFT 算法的具体细节进行详细的推导。采用电磁仿真软件建立目标回波模型,获取原始回波数据,对系统分辨率进行测试,对比不同算法的成像结果,采用图像评价指标对图像的聚焦效果进行评价。为模拟系统噪声与环境噪声的综合影响,在回波信号中加入不同功率水平的随机噪声信号,验证不同算法对于噪声的鲁棒性。

## 2 毫米波稀疏平面阵列设计

手持式毫米波人体安检设备需要具备体积小、轻量化、系统高度集成的特点,因此在阵列构型设计上,需要阵列本身的覆盖范围小,但是需要对人体携带的一般危险品的区域进行成像,因此本文设计的阵列覆盖

范围为  $0.2\text{m} \times 0.2\text{m}$  左右。稀疏平面阵列包括多种多样的构型形式,从实时成像能力的角度考虑,本文选取 Xiaodong Zhuge 等人研究的十字阵列构型进行研究<sup>[1,2]</sup>。系统采用的信号体制为步进连续波,频率范围为  $90 \sim 94\text{GHz}$ ,要求系统方位向分辨率达到  $5\text{mm}$ ,根据方位分辨率理论计算公式<sup>[1]</sup>:

$$\Delta x = \frac{\lambda_c R_0}{L_{(Tx)} + L_{(Rx)}}, \Delta y = \frac{\lambda_c R_0}{L_{(Tx)} + L_{(Rx)}} \quad (1)$$

其中  $\lambda_c$  为毫米波信号中心波长,  $R_0$  为阵列到成像目标的中心距离。设置  $R_0 = 0.3\text{m}$ ,从而可以计算得出成像孔径长度至少为  $L_{Tx} = L_{Rx} = 0.1980\text{m}$ 。将其设置为  $L_{Tx} = L_{Rx} = 0.1996\text{m}$ ,满足分辨率设计指标,此时方位维度理论分辨率优于  $5\text{mm}$ 。

距离维度的理论分辨率与系统带宽有关,可以表示为<sup>[1]</sup>:

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

$c$  为光在真空中的传播速度,  $B$  为毫米波信号带宽,因此距离维度理论分辨率为  $\Delta z = 37.5\text{mm}$ 。为了避免两个方位维度成像出现混叠,根据空间采样定理,发射与接收天线的相邻阵元间隔设置准则<sup>[1]</sup>为:

$$\delta_{Rx} \leq \lambda_{\min} \frac{\sqrt{(L_{Rx} + D)^2/4 + R_0^2}}{L_{Rx} + D} \quad (3)$$

$$\delta_{Tx} \leq \lambda_{\min} \frac{\sqrt{(L_{Tx} + D)^2/4 + R_0^2}}{L_{Tx} + D} \quad (4)$$

其中  $D$  为目标的尺寸,设置为  $D = 0.2\text{m}$ ,因此可以得出  $\delta_{Rx} \leq 2.9\text{mm}$ ,  $\delta_{Tx} \leq 2.9\text{mm}$ ,将采样间隔设置为  $2.8\text{mm}$ ,发射阵元数量  $N_{Tx}$  与接收阵元数量  $N_{Rx}$  分别设置为 72。

稀疏十字阵列阵元的空间分布如图 1 所示,实际工作时,单个发射阵元发射毫米波信号,所有的接收阵元接收目标后向散射信号,当所有发射阵元开关切换完成后,完成全部回波的收集,再进行后续的成像处理。详细系统参数列于表 1 中。

表 1 系统参数设置

频率	90 ~ 94GHz
频点	64 点
发射阵元数	72
接收阵元数	72
发射阵元间隔	2.8mm
接收阵元间隔	2.8mm
方位向理论分辨率	5mm
距离向理论分辨率	3.75cm

成像场景如图 2 所示,发射阵元坐标为  $(x_i, y_i, z_0)$ ,

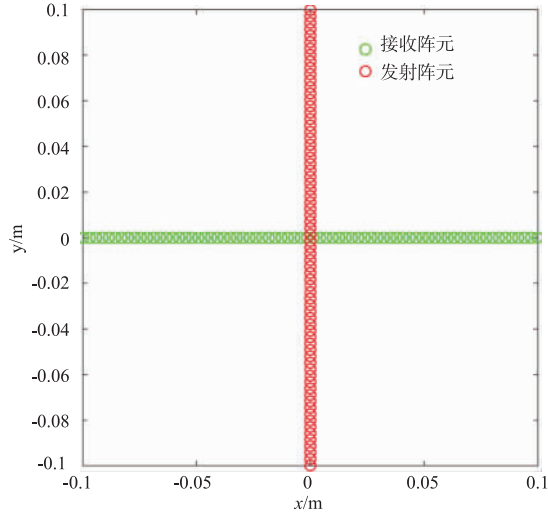


图1 稀疏平面十字阵阵元分布图

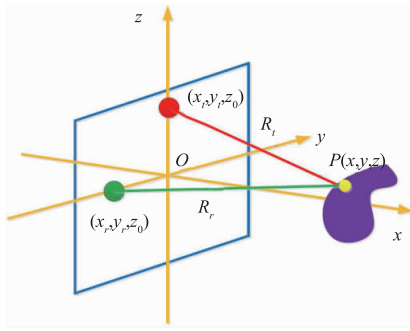


图2 稀疏阵列成像场景示意图

接收阵元坐标为  $(x_r, y_r, z_0)$ , 目标位置坐标为  $(x, y, z)$ , 则在波恩近似模型下目标回波可以表示为<sup>[3]</sup>:

$$s(x_t, y_t; x_r, y_r, k) = \iiint O(x, y, z) e^{-jk(R_t + R_r)} dx dy dz \quad (5)$$

其中  $O(x, y, z)$  为目标反射率函数, 即目标图像;  $k = 2\pi f/c$  为频率波数,  $f = 90 \sim 94\text{GHz}$  为发射信号频率,  $c$  为电磁波在真空中的光速,  $R_t = \sqrt{(x_t - x)^2 + (y_t - y)^2 + (z_0 - z)^2}$  为发射阵元到目标的斜距,  $R_r = \sqrt{(x_r - x)^2 + (y_r - y)^2 + (z_0 - z)^2}$  为接收阵元到目标的斜距。

### 3 基于 FFT 的成像算法

稀疏阵列的时域相关算法具体细节可以参见文献

$$\begin{aligned} O(x, y, z) &= \iint_{D(x_t, y_t)} dx_t dy_t \left\{ \int_{D(k)} \text{IFFT}_{2D} [S(x_t, y_t; kx_r, ky_r, k) \cdot G(kx_r, ky_r, k)] e^{jkR_t} dk \right\} \\ &= \sum_{m=0}^{N_x T_x} \sum_{n=0}^{N_y T_x} \left\{ \int_{D(k)} \text{IFFT}_{2D} [S(x_t, y_t; kx_r, ky_r, k) \cdot G(kx_r, ky_r, k)] e^{jkR_t} dk \right\} \Delta x_{T_x} \Delta y_{T_x} \end{aligned} \quad (15)$$

因此可以得到最终成像公式:

$$O(x, y, z) = \sum_{m=0}^{N_x T_x} \sum_{n=0}^{N_y T_x} \left\{ \sum_{k=0}^{N_f} \text{IFFT}_{2D} [S(x_t, y_t; kx_r, ky_r, k) \cdot G(kx_r, ky_r, k)] e^{jkR_t} \Delta k \right\} \Delta x_{T_x} \Delta y_{T_x} \quad (16)$$

[3], 改进 RMA 算法实现的具体细节可以参见文献[1, 2], 本文在此不再赘述。一种高精度的基于 FFT 的算法在稀疏十字阵列中的推导过程如下。

目标回波信号如第 2 节式(5)所示, 采用时域相关算法求解:

$$\begin{aligned} O(x, y, z) &= \int_{D(k)} \iint_{D(x_t, y_t)} \iint_{D(x_r, y_r)} s(x_t, y_t; x_r, y_r, k) \\ &\quad \cdot e^{jk(R_t + R_r)} dx_r dy_r dx_t dy_t dk \end{aligned} \quad (6)$$

对式(6)变形得到:

$$\begin{aligned} O(x, y, z) &= \int_{D(k)} e^{jkR_t} dk \iint_{D(x_t, y_t)} dx_t dy_t \iint_{D(x_r, y_r)} s(x_t, y_t; x_r, y_r, k) \\ &\quad \cdot e^{jkR_r} dx_r dy_r \end{aligned} \quad (7)$$

由二维卷积理论<sup>[15]</sup>,

$$\begin{aligned} y(t_1, t_2) &= s_1(t_1, t_2) \otimes s_2(t_1, t_2) \\ &= \iint s_2(\tau_1, \tau_2) s_1(t_1 - \tau_1, t_2 - \tau_2) d\tau_1 d\tau_2 \end{aligned} \quad (8)$$

得出:

$$\begin{aligned} \iint_{D(x_r, y_r)} s(x_t, y_t; x_r, y_r, k) e^{jkR_r} dx_r dy_r \\ = s(x_t, y_t; x_r, y_r, k) \otimes e^{jkR_r} \end{aligned} \quad (9)$$

其中  $\otimes$  表示卷积,  $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ 。

由卷积与傅里叶变换的关系<sup>[15]</sup>可以得出:

$$\begin{aligned} s(x_t, y_t; x_r, y_r, k) \otimes e^{jkR_r} = \\ \text{IFFT}_{(k_x, k_y)} [ \text{FFT}_{(x_t, y_t)} [s(x_t, y_t; x_r, y_r, k)] \\ \cdot \text{FFT}_{(x_r, y_r)} [e^{jkR_r}] ] \end{aligned} \quad (10)$$

因此, 式(7)可变形为:

$$\begin{aligned} O(x, y, z) &= \int_{D(k)} e^{jkR_t} dk \iint_{D(x_t, y_t)} dx_t dy_t \iint_{D(x_r, y_r)} S(x_t, y_t; kx_r, ky_r, k) \\ &\quad \cdot G(kx_r, ky_r, k) e^{j(kx_r x + ky_r y)} dk dx_r dy_r \end{aligned} \quad (11)$$

其中,

$$S(x_t, y_t; kx_r, ky_r, k) = \text{FFT}_{2D} [s(x_t, y_t; x_r, y_r, k)] \quad (12)$$

$$G(kx_r, ky_r, k) = \text{FFT}_{2D} [e^{jk\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}] \quad (13)$$

$\text{FFT}_{2D}[\cdot]$  表示二维快速傅里叶变换, 因此可以得出下式:

$$\begin{aligned} O(x, y, z) &= \int_{D(k)} e^{jkR_t} dk \iint_{D(x_t, y_t)} dx_t dy_t \text{IFFT}_{2D} \\ &\quad \cdot [S(x_t, y_t; kx_r, ky_r, k) \cdot G(kx_r, ky_r, k)] \end{aligned} \quad (14)$$

对(14)式变形得到:

总结所提算法的实现步骤如下:

(1) 回波信号在接收阵列的  $y_r$  维度进行补零, 使得补零后的长度与  $x_r$  维度相一致.

(2) 对补零后的数据在  $(x_r, y_r)$  维度进行二维 FFT, 得到信号  $S(x_r, y_r; kx_r, ky_r, k)$ .

(3) 距离维度划分网格, 网格坐标为  $z_i \in [z_{\min}, z_{\max}]$ , 并选择其中一个距离位置  $z_i$ .

(4) 选择一个发射阵元对应接收阵列信号, 计算出匹配滤波信号  $G(kx_r, ky_r, k)$ , 进行匹配滤波处理.

(5) 对匹配滤波后的信号在  $(kx_r, ky_r)$  维度进行二维 IFFT, 并在  $k$  维度累加计算.

(6) 当把所有发射阵元遍历完后, 在  $(x_r, y_r)$  维度进行累加, 得到位置  $z_i$  处的图像.

(7) 当把所有距离平面位置  $z_i$  遍历完后, 就得到最终的三维图像.

由上述推导可见所提算法无需球面波展开为平面波近似, 而是采用卷积的方法实现匹配滤波过程, 并且采用了  $k$  维度积分计算代替改进 RMA 算法的复杂插值过程, 这样无需插值计算就不会引入插值误差. 因此相比于改进 RMA 算法, 本文所提算法在波恩近似回波模型基础上, 推导过程中没有引入任何近似误差, 是一种高精度的稀疏平面阵列成像算法.

## 4 实验结果与分析

为衡量图像的聚焦效果, 采用一种评价图像聚焦效果的评价指标: 图像雷尼熵<sup>[16]</sup>. 雷尼熵为信息论里熵的一种, 图像的雷尼熵值越大, 表示图像的信息量越大, 图像的聚焦效果就越差<sup>[16]</sup>. 采用图像对比度指标衡量系统回波信号噪声对于图像质量的影响, 图像的对比度反映了图像强度值波动的程度, 其值越大, 表示图像的亮度强弱区分越明显, 图像效果更优<sup>[17]</sup>.

### 4.1 系统分辨率仿真

为测试系统的方位分辨率, 采用电磁仿真软件仿真目标回波<sup>[18]</sup>, 建立 5mm 宽度的条带目标模型, 如图 3 所示为条带目标的尺寸, 条带宽度为 5mm, 条带之间的间距为 5mm, 长度为 25mm.

图 4 所示为不同算法的成像结果, 由图中可以分

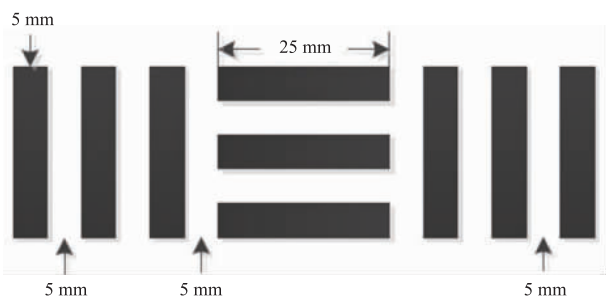


图3 条带目标尺寸示意图

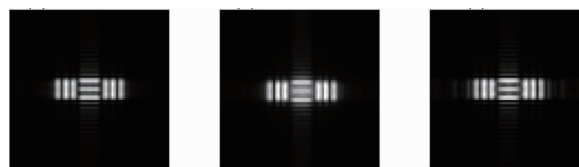


图4 成像结果

辨出 5mm 的条带目标, 因此所设计的稀疏十字阵列方位维度分辨率可以达到 5mm. 不同算法对应图像的雷尼熵值列于表 2, 由于雷尼熵值越小, 图像聚焦的效果越好, 根据表 2 结果时域相关算法的雷尼熵值最小, 因此对应图像结果最佳. 所提 FFT 算法的雷尼熵值小于改进 RMA 算法, 说明成像效果优于改进 RMA 算法. 因为 FFT 算法的推导过程中无球面波展开为平面波近似和距离维度的插值处理, 所以不会引入额外的计算误差, 与理论分析相一致. 而 FFT 算法由于存在回波补零过程, 因此成像效果是稍差于时域相关算法的.

表 2 不同算法结果图像雷尼熵指标对比

	时域相关算法	改进 RMA 算法	FFT 算法
雷尼熵	6.8931	7.0866	6.9363

表 3 不同算法计算时间对比

	时域相关算法	改进 RMA 算法	FFT 算法
计算时间/s	2445.123	0.9068	4.7756

本文算法的计算软件为 MATLAB R2015, 计算机平台为 Intel (R) Xeon (R) CPU E3-1203 v6 @ 3.5GHz, 32GB 内存. 将不同成像算法的计算时间列于表 3 中, 可见时域相关算法计算时间最长, 改进 RMA 算法计算时间最短, FFT 算法由于需要回波数据补零与 FFT 操作实现卷积计算, 因此计算时间大于改进 RMA 算法, 大约是改进 RMA 算法的 5.3 倍, 但是其图像的聚焦效果是优于改进 RMA 算法的. 同时由仿真结果看, 成像视场内无栅瓣的影响, 也即阵元采样间隔的设置是符合要求的, 否则采样间隔过大会导致图像出现栅瓣, 背景杂波抬高. 由上述分析可知, 系统分辨率与成像栅瓣水平达到设计指标, FFT 算法的有效性得到了验证, 下面在回波数据中加入随机噪声信号, 测试不同成像算法对于噪声的鲁棒性.

### 4.2 系统噪声仿真

采用电磁仿真软件仿真 T 型目标, 在回波数据中加入 -40 ~ 0dB 功率水平的随机噪声信号, 回波数据加入随机噪声信号模型为:

$$S_{\text{noise}} = S + \text{Rand}_{\text{Noise}} \quad (17)$$

$$\text{Rand}_{\text{Noise}} = 10^{\text{Amp}_{\text{dB}}/20} \times S_{\text{max}} \times \text{rand}[Nf] \quad (18)$$

其中,  $S$  为距离维度原始回波信号,  $\text{Rand}_{\text{Noise}}$  为加入的随机噪声信号, 表示最大幅度为  $10^{\text{Amp}_{\text{dB}}/20} \times S_{\text{max}}$  的随



图5 T型字母目标模型



(a)时域相关算法 (b)改进RMA算法 (c)FFT算法

图6 无噪声成像结果



(a)时域相关算法 (b)改进RMA算法 (c)FFT算法

图7 -3dB噪声成像结果



(a)时域相关算法 (b)改进RMA算法 (c)FFT算法

图8 0 dB噪声成像结果

机波动的信号,转换为功率水平即为  $Amp_{dB}$  大小,  $S_{noise}$  为加入噪声后的信号。

建立的 T 型目标模型如图 5 所示,成像结果的对比度指标列于表 4 中,可以得出时域相关算法图像对比度值最高,成像效果最好,同时 FFT 算法的对比度值是优于改进 RMA 算法的。分别将回波信号无噪声、加入 -3dB 水平噪声和加入 0dB 水平噪声的成像结果列于图 6 ~ 图 8 中。回波信号不同噪声水平下图像对比度值曲线如图 9 所示,随着噪声水平由 -20dB ~ 0dB 变化时,改进 RMA 算法图像的对比度值急剧恶化,而时域相关算法与 FFT 算法的对比度值变化不大,说明对于噪声的鲁棒性较强,在噪声水平为 0dB 处,此种对比更为明显。

在系统工程实现中,考虑到系统噪声水平与回波信号的噪声水平对成像效果的影响,时域相关算法与 FFT 算法对噪声均有较强的鲁棒性。但是考虑到应用于手持式毫米波人体安检设备的用途,对于成像的实时性要求较高,时域相关算法计算量较大,因此实现实时成像的信号处理硬件成本较高,而所提 FFT 算法计算效率高于时域相关算法,而且成像聚焦质量与噪声鲁棒性均优于改进 RMA 算法,因此将其应用于手持式毫米波人体安检设备中是一种好的选择。

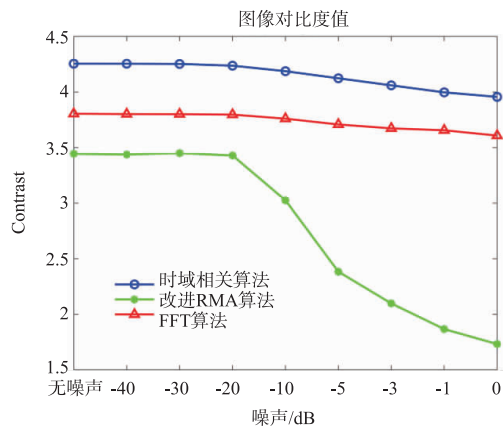


图9 回波信号不同噪声水平下图像对比度值曲线

表 4 加入不同水平噪声成像结果对比度指标

	时域相关算法	改进 RMA 算法	FFT 算法
无噪声	4.2551	3.4443	3.8047
-40dB	4.2549	3.4380	3.8018
-30dB	4.2529	3.4503	3.8009
-20dB	4.2374	3.4294	3.7970
-10dB	4.1878	3.0259	3.7605
-5dB	4.1239	2.3833	3.7083
-3dB	4.0603	2.0978	3.6732
-1dB	3.9973	1.8669	3.6560
0dB	3.9564	1.7319	3.6081

## 5 结论

本文将一种工作于毫米波频段的稀疏十字阵列应用于手持式毫米波人体安检设备的概念中,在对阵列构型和系统参数设计基础上,分析对比了三种成像算法的成像性能,其中针对改进 RMA 算法存在球面波展开为平面波近似和复杂的 STOLT 插值计算问题,提出将一种基于 FFT 卷积操作进行匹配滤波的高精度成像算法应用于此阵列。在分辨率仿真实验与噪声鲁棒性验证实验中,得出本文所提算法成像效果优于改进 RMA 算法并且对于噪声有较好的鲁棒性,与此同时计算效率高于时域相关算法。综合考量手持式毫米波人体安检设备对于成像效果和成像效率的要求,本文所提算法是一种较优的选择。

## 参考文献

- [1] Zhuge X D, Yarovoy A G. Three-dimensional near-field MIMO array imaging using range migration techniques [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21 (6): 3026 - 3033.
- [2] Zhuge X D, Yarovoy A G. Study on two-dimensional sparse MIMO UWB arrays for high resolution near-field

- imaging[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(9):4173-4182.
- [3] Ahmed S S, Schiessl A, Gumbann F, et al. Advanced microwave imaging[J]. IEEE Microwave Magazine, 2012, 13(6):26-43.
- [4] 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 Technoques, 2011, 59(12):3567-3576.
- [5] 赵宇娇, 成彬彬, 刘杰, 蒋济群, 喻洋. 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.  
Zhao Yujiao, Cheng Binbin, Liu Jie, Jiang Jiqun, Yu Yang. Two-dimensional sparse array topology for millimeter-wave near-field imaging[J]. System Engineering and Electronics, 2018, 40(9):1926-1930. (in Chinese)
- [6] 田鹤, 李道京, 祁春超. 频域稀疏毫米波人体安检成像处理和快速成像稀疏阵列设计[J]. 雷达学报, 2018, 7(3):376-386.  
Tian He, Li Daojing, Qi Chunchao. Millimeter-wave human security imaging based on frequency-domain sparsity and rapid imaging sparse array architecture[J]. Journal of Radars, 2018, 7(3):376-386. (in Chinese)
- [7] 黄琼, 陈洁, 孟升卫, 方广有. 超宽带穿墙雷达三维快速成像算法[J]. 数据采集与处理, 2009, 24(S):136-140.  
Huang Qiong, Chen jie, Meng Shengwei, Fang Guangyou. 3-D fast imaging algorithm for ultra-wide band through-wall radar[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2009, 24(S):136-140. (in Chinese)
- [8] 刘鹏飞. 穿墙三维成像技术研究[D]. 国防科学技术大学, 2014.  
Liu Pengfei. Study on the technology of three-dimensional through-the-wall imaging[D]. National University of Defense Technology, 2014. (in Chinese)
- [9] Baccouche B, Keil A, Kahl M, et al. A sparse array based sub-terahertz imaging system for volume inspection[A]. Proceeding of the 45<sup>th</sup> European Microwave Conference [C]. Paris, France; IEEE, 2015. 438-441.
- [10] 王武. 近场 MIMO 雷达三维成像技术[D]. 国防科学技术大学, 2015.  
Wang Wu. 3D near-field imaging using MIMO radar[D]. National University of Defense Technology, 2015. (in Chinese)
- [11] Kai T, Shiyong W, Xiaojun L, Guangyou F. A modified omega-K algorithm for near-field MIMO array-based 3-D reconstruction[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2018. 1-5.
- [12] Kai T, Shiyong W, Xiaojun L, Guangyou F. Omega-K algorithm for near-field 3-D image reconstruction based on planar SIMO/MIMO array[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018. 1-14.
- [13] Qijia G, Jie W, Tianying C, et al. Dimension-factorized range migration algorithm for regularly distributed array imaging[J]. Sensors, 2017, 17(11):2549-2561.
- [14] Mehryar A, Ali S, Mahdi S, Zahra K. Fast fourier-based implementation of sythetic aperture radar algorithm for multistatic imaging system[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2018. 1-11.
- [15] Ian G Cumming, Frank H Wong. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation[M]. Boston: Artech House, 2005. 22-24.
- [16] 田甲申, 张晓玲. 基于自聚焦 BP 的圆周 SAR 运动补偿方法[J]. 中国科技论文, 2014, 9(1):4-15.  
Tian Jiashen, Zhang Xiaoling. Circular SAR motion compensation based on autofocus back-projection algoeithm [J]. China Scienceaper, 2014, 9(1):4-15. (in Chinese)
- [17] 赵侠, 汪雄良, 王正明. 基于最优对比度准则的 SAR 图像相位梯度自聚焦算法[J]. 遥感技术与应用, 2005, 20(6):606-610.  
Zhao Xia, Wang Xiongliang, Wang Zhengming. Phase gradient autofocus algorithm for SAR imagery based on contrast criteria[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2005, 20(6):606-610. (in Chinese)
- [18] 蒋彦雯, 邓彬, 王宏强, 秦玉亮, 王瑞君. 基于 FEKO 和 CST 的太赫兹目标 RCS 仿真[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(5):684-689.  
Jiang Yanwen, Deng Bin, Wang Hongqiang, Qin Yuliang, Wang Ruijun. RCS simulation in THz band based on FEKO and CST[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013, 11(5):684-689. (in Chinese)

#### 作者简介



**孟祥新 (通信作者)** 男, 1990 年出生, 内蒙古赤峰市人, 2015 年获北京理工大学电子与通信工程专业硕士学位, 现为信号处理算法工程师, 主要研究方向为近场测量技术、毫米波太赫兹信号处理成像算法与图像处理技术等。  
E-mail: demonmeng@163.com



**柳桃荣** 女, 1968 年出生, 研究员级高工, 第一届合肥市学术和技术带头人, 主要研究方向为信号处理及人工智能。获国防科技进步一等奖 1 项、二等奖 2 项、省部级科技进步特等奖 1 项、一等奖 2 项、三等奖 1 项, 发明专利授权 4 项, 公开发表学术论文数篇。



**笪敏** 男,1992年出生,2017年获合肥工业大学仪器与仪表专业硕士学位,主要研究方向为雷达成像算法及实现.



**刘泽鑫** 男,1994年出生,2018年获哈尔滨工业大学信息与通信工程专业硕士学位,主要研究方向为毫米波成像算法与计算机视觉.