

文章编号: 2095-4980(2023)11-1364-06

基于 IAA 的毫米波人体三维高分辨成像算法

陈曦, 马健博, 李鹏哲*, 张桂福

(中国民航科学技术研究院, 北京 100028)

摘要: 针对利用三维合成孔径技术成像的毫米波人体安检设备成像分辨力低的问题, 提出一种将迭代自适应(IAA)技术与合成孔径成像技术相结合的波数域 IAA 成像算法。波数域 IAA 技术能估计出每个潜在位置所对应的信号源能量, 具有分辨力高、旁瓣低且适合单快拍估计等优点。通过理论模型分析和仿真运算, 将重构效果图与传统的匹配滤波方法重构效果图进行对比分析, 验证了该算法的有效性; 同时随着计算能力的提高, 该算法的性能也得到提高。

关键词: 毫米波成像; 合成孔径雷达; 迭代自适应; 超分辨算法

中图分类号: TN959.3

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022114

Millimeter wave human body three-dimensional high-resolution imaging algorithm based on IAA

CHEN Xi, MA Jianbo, LI Pengzhe*, ZHANG Guifu

(China Academy of Civil Aviation Science and Technology, Beijing 100028, China)

Abstract: Aiming at the problem of low resolution of millimeter wave human security inspection equipment using three-dimensional synthetic aperture imaging technology, a wavenumber domain IAA imaging algorithm is proposed by combining Iterative Adaptive Approach(IAA) technology and synthetic aperture imaging technology. IAA technique can estimate the energy of the signal source corresponding to each potential position, and bears the advantages of high resolution, low sidelobe and is suitable for single snapshot estimation. Through theoretical model analysis and simulation operation, the reconstructed rendering is compared with the traditional matching filter rendering to verify the effectiveness of the algorithm. At the same time, with the improvement of computing power, the performance of the algorithm will also be improved.

Keywords: millimeter wave imaging; Synthetic Aperture Radar(SAR); Iterative Adaptive Approach; super-resolution algorithm

与传统安全检测方式如触摸式安检、金属探测器、X射线透射设备等相比, 主动毫米波全息成像技术具有穿透人体衣物、人体辐射安全、能够识别各类金属及非金属违禁品等诸多优点。近年来, 随着毫米波技术的发展及器件成本的降低, 该技术在人体安检中的重要程度越来越高^[1]。主动式毫米波人体安检设备采用三维合成孔径技术进行成像, 通过发射宽带信号, 以及采用大的阵列口径来获得三维空间的高分辨力(分辨力是该设备的核心指标之一)。高的分辨力可以提升对违禁品的识别率, 同时还可以降低误报的风险。

传统的合成孔径技术基于匹配滤波原理进行成像。匹配滤波技术具有稳健性好、运算效率高等优点, 但分辨力受瑞利限的约束, 在带宽和口径一定的前提下, 难以达到更高的指标。基于此, 一些经典的现代谱估计方法, 如最大熵(Maximum Entropy Method, MEM)、自回归(Autoregression, AR)、Capon 谱估计、幅度相位估计(Amplitude Phase Estimation, APES)、多重信号分类(Multiple Signal Classification, MUSIC)等纷纷被引入到合成孔径雷达(SAR)成像中^[2-3]。近年来, 一些学者提出了迭代自适应(IAA)的谱估计方法^[4-5]。该方法基于非参量加权最小二乘思想, 具有分辨力高、旁瓣低且适合单快拍估计等一系列优点, 受到广泛关注, 并在雷达技术中得到

收稿日期: 2022-05-30; 修回日期: 2022-08-16

基金项目: 国家自然科学基金委员会与中国民用航空局联合资助项目(U1633202)

*通信作者: 李鹏哲 email:lipzh@mail.castc.org.cn

应用^[6]。本文将 IAA 技术与三维合成孔径成像技术相结合，提出一种基于波数域 IAA 的主动式毫米波人体安检高分辨成像算法，对此进行了理论分析，并进行了算法仿真和性能验证。

1 人体三维成像技术相关研究

1.1 成像方法

三维场景下的成像几何关系如图 1 所示，天线在 xoy 平面排布成一个二维均匀线阵，位置坐标分别为 x 和 y ，而横、竖向间隔为 dx 和 dy 。待成像场景为 V ， V 内散射体的位置坐标为 (x,y,z) ，其对应的散射系数为 $f(x,y,z)$ 。

雷达发射一个宽带信号，则天线接收到的中频回波可表示为^[7-8]：

$$S(X,Y,f) = \iiint_V f(x,y,z) e^{-j2k\sqrt{(x-X)^2+(y-Y)^2+(z-Z_0)^2}} dx dy dz \quad (1)$$

式中： $k = 2\pi f/c$ ，为电磁波的传播波数； Z_0 为 z 向参考位置。采用基于球面波分解的方法，忽略幅值和无穷小项影响，对式(1)作变换，可将球面波在波数域表示成空间各个方向上平面波的叠加，即

$$e^{-j2k\sqrt{(x-X)^2+(y-Y)^2+(z-Z_0)^2}} = \iint e^{-jk_x(x-X)-jk_y(y-Y)-jk_z(z-Z_0)} dk_x dk_y \quad (2)$$

式中 k_x 、 k_y 、 k_z 分别为 3 个空间维度的波数，且满足式(3)：

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = (2k)^2 \quad (3)$$

将式(2)代入式(1)，可得

$$\begin{aligned} S(X,Y,f) &= \iiint_V f(x,y,z) \iint e^{-jk_x(x-X)-jk_y(y-Y)-jk_z(z-Z_0)} dk_x dk_y dx dy dz = \\ &= \iint \left(\iiint_V f(x,y,z) e^{-jk_x x -jk_y y -jk_z z} dx dy dz \right) e^{jk_x X +jk_y Y} dk_x dk_y = \mathcal{F}_{2D}^{-1} \left[\mathcal{F}_{3D} [f(x,y,z)] e^{jk_z Z_0} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

因为 $f(x,y,z)$ 为待求变量，故而有

$$f(x,y,z) = \mathcal{F}_{3D}^{-1} \left[\mathcal{F}_{2D} [S(X,Y,f)] e^{-jk_z Z_0} \right] \quad (5)$$

式(5)描述了基于匹配滤波技术的宽带信号三维成像算法流程。在实际处理过程中，考虑到 k_x 、 k_y 、 k_z 之间具有式(3)形式的非线性耦合关系，故在三维波数空间 (k_x, k_y, k_z) ，其对应的数据并非来自均匀网格点，需要通过特殊处理才能够获得在三维波数空间 (k_x, k_y, k_z) 下的均匀采样数据。在工程实践中，这种处理方式一般通过 Stolt 插值进行。

1.2 分辨力分析

图 2 为三维波数空间 (k_x, k_y, k_z) 下，数据对应的支撑区形状。其中， θ_{BW} 为天线波束宽度， $k_1 = \min(k)$ 、 $k_2 = \max(k)$ 、 $k_c = \text{mean}(k_1, k_2)$ 。可以看到，该形状下对应的等效波数宽度 $\Delta k = 4k_c \sin \frac{\theta_{BW}}{2}$ 。与此对应的三维空间分辨力为：

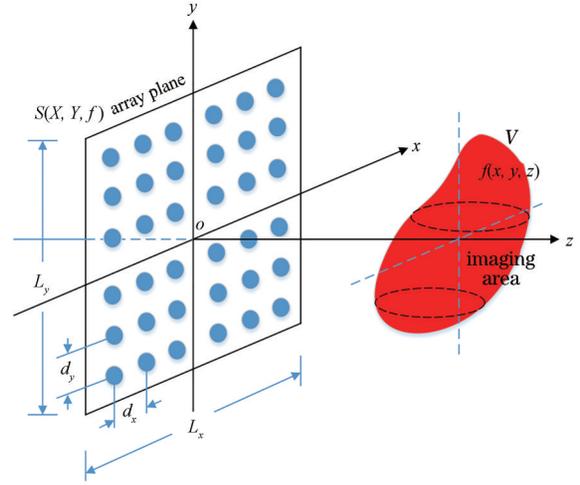


Fig.1 Geometric model of 3D imaging
图 1 三维成像几何模型

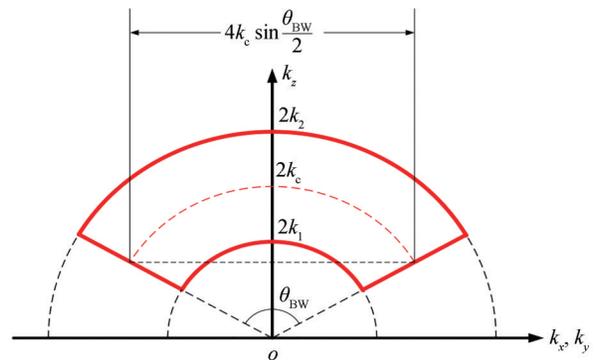


Fig.2 Shape and resolution of support zone
图 2 支撑区形状与分辨力

$$\begin{cases} \rho_{x,y} = \frac{2\pi}{\Delta k} = \frac{c}{4f_c \sin \frac{\theta_{BWx,y}}{2}} \\ \rho_z = \frac{c}{2(f_2 - f_1)} = \frac{c}{2B} \end{cases} \quad (6)$$

式(6)代表了在匹配滤波技术下可获得的理论分辨率。对于距离维, 提高分辨率可以通过增加发射信号带宽 B 进行; 对于水平和俯仰维, 要提高成像分辨率则只能通过提高电磁波频率或增加天线波束宽度进行。无论是提高频率还是增加波束宽度, 最终都会导致通道数量的增多, 从而带来集成复杂度和成本的增加。

2 IAA 方法

迭代自适应方法是一种基于加权最小二乘(Weighted Least Squares, WLS)思想且数据依赖的非参量谱估计方法。其基于如下的数据模型^[9-11]:

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (7)$$

式中: \mathbf{y} 为一个长度为 M 的数据向量; 矩阵 $\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\omega_0), \mathbf{a}(\omega_1), \dots, \mathbf{a}(\omega_{K-1})]$, 频率向量 $\mathbf{a}(\omega_k) = [1, e^{j\omega_k}, \dots, e^{j(M-1)\omega_k}]^T$, 频点 $\omega_k = 2\pi k/K$, $k=0, 1, \dots, K-1$; 向量 $\mathbf{x} = [x_0, x_1, \dots, x_k, \dots, x_{K-1}]^T$ 代表不同频点下的数据幅度; \mathbf{n} 为噪声向量。

IAA 的思想为最小化基于 WLS 的代价函数:

$$x_x^{\text{IAA}} = \min_{x_k} \|\mathbf{y} - \mathbf{a}(\omega_k)x_k\|^2 = (\mathbf{y} - \mathbf{a}(\omega_k)x_k)^H \mathbf{Q}^{-1}(\omega_k) (\mathbf{y} - \mathbf{a}(\omega_k)x_k), k=0, 1, \dots, K-1 \quad (8)$$

式中: $\mathbf{Q}(\omega_k) = \mathbf{R} - p_k \mathbf{a}(\omega_k) \mathbf{a}^H(\omega_k)$ 为 IAA 中的干扰项, 即除频点 ω_k 之外其他频点的信号及噪声的协方差矩阵; \mathbf{R} 为数据 \mathbf{y} 的协方差矩阵, \mathbf{R} 可以用 \mathbf{x} 的协方差阵 \mathbf{P} 表示为:

$$\mathbf{R} = \mathbf{A}\mathbf{P}\mathbf{A}^H \quad (9)$$

式中: $\mathbf{P} = \text{diag}([p_0, p_1, \dots, p_{K-1}])$, 且 $p_k = |x_k|^2$ 为信号在频点 ω_k 上的功率。

对式(8)求关于 x_k 的 WLS 解, 可得

$$x_x^{\text{IAA}} = \frac{\mathbf{a}^H(\omega_k) \mathbf{Q}^{-1}(\omega_k) \mathbf{y}}{\mathbf{a}^H(\omega_k) \mathbf{Q}^{-1}(\omega_k) \mathbf{a}(\omega_k)}, k=0, 1, \dots, K-1 \quad (10)$$

式(10)意味着对每个频点 ω_k 都需要计算 $\mathbf{Q}^{-1}(\omega_k)$, 这会带来异常庞大的计算开销。事实上, 根据矩阵逆引理, 可进一步得

$$x_x^{\text{IAA}} = \frac{\mathbf{a}^H(\omega_k) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{y}}{\mathbf{a}^H(\omega_k) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}(\omega_k)}, k=0, 1, \dots, K-1 \quad (11)$$

显然, IAA 谱要通过参数 \mathbf{R} 生成, 而 \mathbf{R} 依赖于未知信号功率, 故实际中 IAA 只能通过迭代的思想实现。

3 基于波数域 IAA 的算法流程

本文提出一种基于波数域 IAA 的人体三维高分辨成像算法, 在传统的基于匹配滤波技术成像算法的基础上, 通过 IAA 的引入、构建, 有效提高了成像的分辨率。以毫米波人体安检中经常采用的调频连续波(Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW)雷达为例, 该算法的流程如图 3 所示。

相比较经典的基于匹配滤波的三维成像算法, 新方法将经典方法 Stolt 插值后对三维波数空间 (k_x, k_y, k_z) 的 3D IFFT 转换为一个距离向 IFFT 和一个水平、俯仰两维的 2D IAA 谱估计的级联^[12-13]。距离向之所以依然采用 IFFT 处理, 一方面是因为 IFFT 可以将计算量维持在一个相对较低的水平; 另一方面, 距离向的高分辨率通过发射大带宽的信号相对容易实现, 其采用 IAA 进行谱分析的必要性及优势相对其他两个维度并不明显。

图 3 所示的算法流程中, 需要计算二维信号的 2D IAA 谱, 这就需要在一维 IAA 方法进行二维延拓, 将其转换为 1D 的研究问题。具体步骤如下:

1) 对二维数据 \mathbf{z}_{MN} , 其中 M 、 N 分别代表数据 2 个维度的长度, 显然 \mathbf{z}_{MN} 是一个 $M \times N$ 维的矩阵。对 \mathbf{z}_{MN} 进行向

量化，即得到 $MN \times 1$ 维的数据向量 $\mathbf{z} = \text{vec}(\mathbf{z}_{MN})$;

2) 定义数据在 2 个维度的频率向量分别为：

$$\mathbf{a}_M(\omega_k) = [1, e^{j\omega_k}, \dots, e^{j(M-1)\omega_k}]^T, k=0, 1, \dots, K-1, \omega_k = 2\pi k/K$$

$$\mathbf{b}_N(\omega_l) = [1, e^{j\omega_l}, \dots, e^{j(N-1)\omega_l}]^T, l=0, 1, \dots, L-1, \omega_l = 2\pi l/L$$

矩阵：

$$\mathbf{A}_M = [\mathbf{a}_M(\omega_0), \dots, \mathbf{a}_M(\omega_k), \dots, \mathbf{a}_M(\omega_{K-1})]$$

$$\mathbf{B}_N = [\mathbf{b}_N(\omega_0), \dots, \mathbf{b}_N(\omega_l), \dots, \mathbf{b}_N(\omega_{L-1})]$$

即新的频率向量 $\mathbf{c} = \mathbf{a}_M(\omega_k) \otimes \mathbf{b}_N(\omega_l)$ 和矩阵 $\mathbf{C} = \mathbf{A}_M \otimes \mathbf{B}_N$ ，矩阵 \mathbf{C} 中包含了 KL 个新频率向量 \mathbf{c} 。

至此，用 \mathbf{z} 、 \mathbf{c} 和 \mathbf{C} 分别取代 \mathbf{y}_M 、 \mathbf{a}_M 和 \mathbf{A}_M ，从而将 2D IAA 问题转换为 1D IAA 进行处理。与此同时，信号的长度由原先的 M 增至 MN ，协方差阵 \mathbf{R} 的维度也由原先的 $M \times M$ 增至 $MN \times MN$ 。

4 实验仿真及结果分析

本文的仿真参数如表 1 所示。

其中，设置 5 个待成像点目标，其位置坐标分别为： $(x, y, z) = \{(0, 0, 0.3) \text{ m}, (-0.03, -0.03, 0.3) \text{ m}, (-0.03, 0.03, 0.3) \text{ m}, (0.03, -0.03, 0.3) \text{ m}, (0.03, 0.03, 0.3) \text{ m}\}$ 。图 4 为采用经典成像方法与本文所提的波数域 IAA 方法的成像结果。

图 5 为 2 种方法下二维点扩展函数 (Point Spread Function, PSF) 的图像，从中可以看到，图 5(b) 相对图 5 (a)，具有更窄的主瓣宽度，说明其具有更高的成像分辨力。

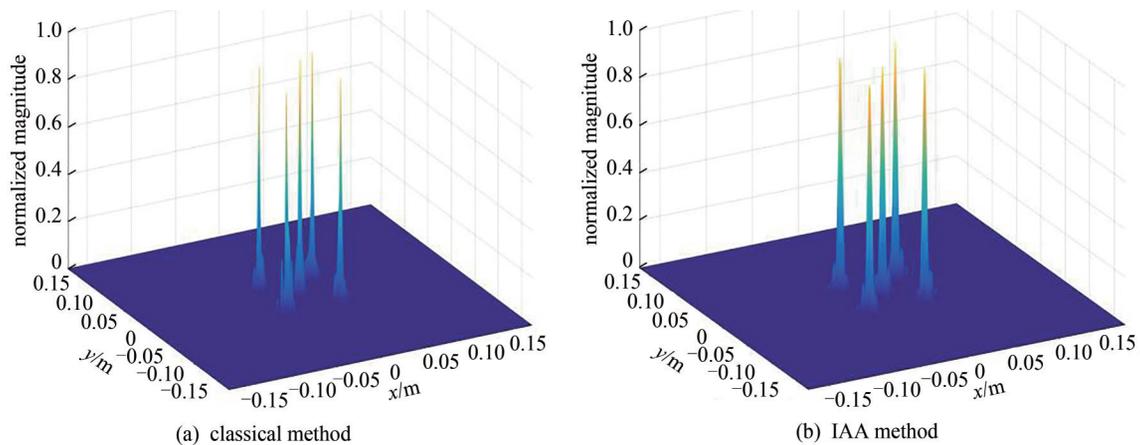


Fig.4 Comparison of two imaging methods
图 4 两种成像方法结果对比

图 6 为水平和俯仰 2 个维度分辨力 (PSF 主瓣 -4 dB 宽度) 的比较，经过计算可得到表 2 中的结果。

由表 2 中可见，采用波数域 IAA 成像方法使得

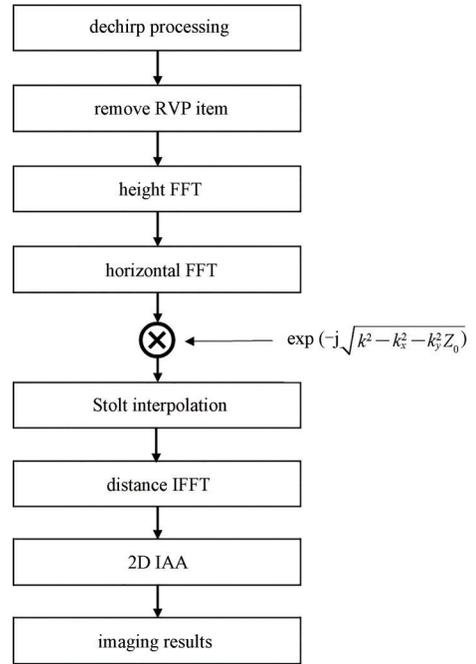


Fig.3 Flow chart of proposed algorithm
图 3 算法流程

表 1 仿真参数

Table1 Simulation parameters

parameter	numerical value
center frequency/GHz	35
transmit bandwidth/GHz	6
range resolution/cm	2.5
horizontal resolution/mm	5
pitch resolution/mm	5
number of targets	5
number of interpolation points	4

表 2 两种成像方法的分辨力对比

Table2 Resolution comparison of two imaging methods

resolution(-4 dB width)	classical method	IAA method
level x/mm	5.11	3.08
pitch y/mm	5.11	3.08

两个维度的成像分辨力得到了明显提高,证明了该方法的有效性。

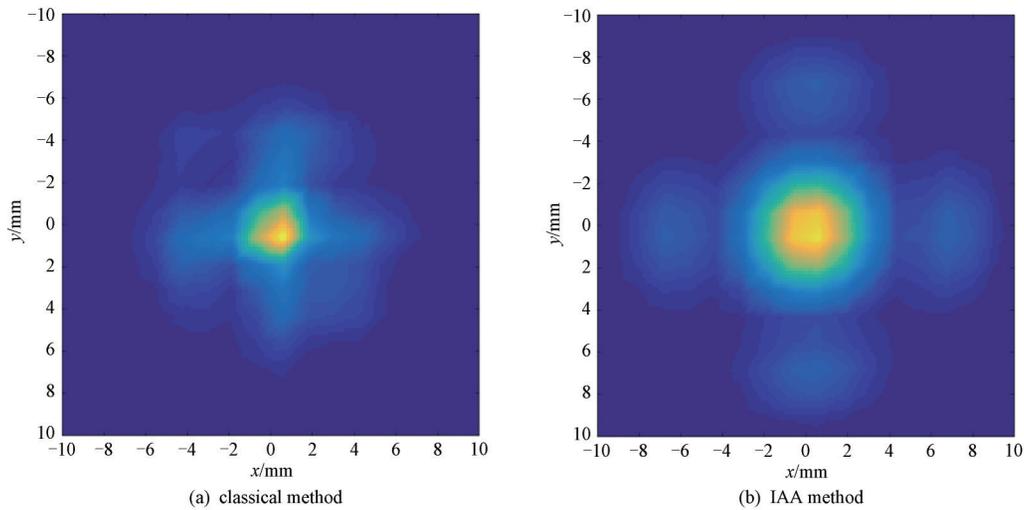


Fig.5 2D PSF of two imaging methods

图5 两种成像方法的二维 PSF

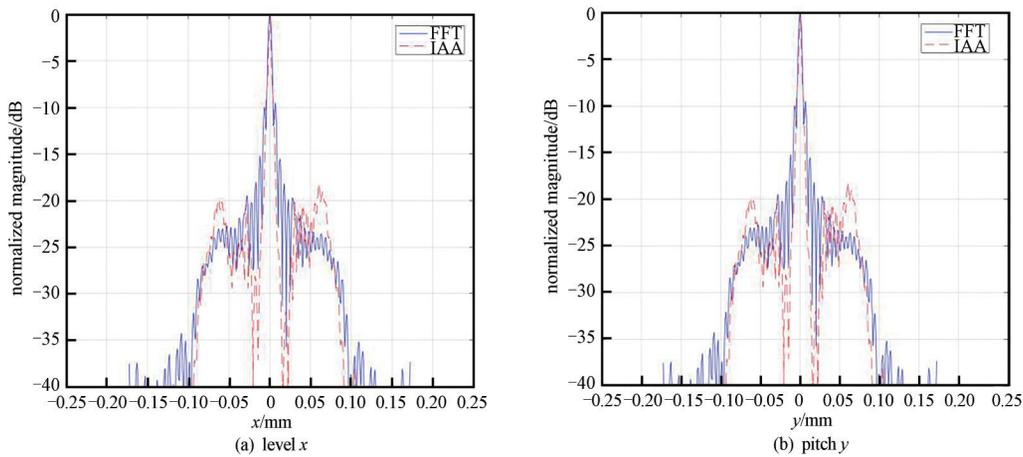


Fig.6 x/y dimensional PSF comparison of two imaging methods

图6 两种成像方法x/y维 PSF对比

对图3算法流程中核心的2D IAA模块进行计算量分析。对于规模为 $M \times N$ 的数据矩阵,如果输出的网格数为 L ,则标准2D IAA一次迭代的计算量(复数乘法)约为 $M^3 N^3 + 2LM^2 N^2 + 2LMN$,相较传统的二维匹配滤波方法(通常采用FFT加速),其计算量(复数乘法)大约为 $L(M+N)/2 \log_2 L$ 。以较为典型的毫米波人体安检成像参数为例,对两种方法的计算量进行对比。假设俯仰通道数 $N=800$,水平通道数 $M=300$,则完整2D IAA的计算量约为 3.7×10^{17} 量级,而传统方法约在 1.1×10^7 量级。可见,标准 IAA 方法用于大尺度目标成像时,其计算量相对传统的二维匹配滤波方法偏大。

5 结论

本文将 IAA 技术与三维合成孔径成像技术相结合,提出了一种基于波数域 IAA 的毫米波人体安检高分辨成像算法,进行了详实的理论分析,并通过仿真验证了其性能。该算法将超分辨技术与谱估计技术应用在毫米波人体安检高分辨成像方面进行了有益探索,对后续的三维成像分辨力的提高具有很高的参考价值和借鉴意义。

当然,波数域 IAA 技术在实际应用中还存在计算量大、对硬件性能要求高等问题。这可以有以下两种解决途径:首先,很多学者针对快速以及超快速 IAA 算法进行了研究,最新一些成果表明,其计算量相较标准 IAA 算法可以明显降低。其次,传统匹配滤波方法在采样稀疏时会产生较高的副瓣电平,导致人体图像动态范围的恶化,进而影响成像质量和对危险品的检测和识别,而 IAA 算法的优势在于其对稀疏采样不敏感,在稀疏的情

况下依然可以获得较低的压缩副瓣和图像动态。这样通过减少通道数目，不仅可以带来计算量的进一步降低，同时也能够让硬件成本得到显著下降。总之，快速 IAA 与稀疏采样的结合，在现有毫米波人体安检设备及未来通过式全电子阵列人体扫描成像中将具有更大的科研价值与应用前景，也将是作者未来研究工作的重点。

参考文献：

- [1] 赵自然. 人体安检新技术的分析与探讨[J]. 中国安防, 2012(3):40–43. (ZHAO Ziran. Analysis and discussion of new technology of human body security inspection[J]. China Security & Protection, 2012(3):40–43.)
- [2] 张状和,韩东,刘德亮. 基于迭代自适应方法的柱面共形阵 2D DOA 估计[J]. 现代电子技术, 2020,43(11):6–9. (ZHANG Zhuanghe,HAN Dong,LIU Deliang. Cylindrical conformal array's 2D DOA estimation based on iterative adaptive approach[J]. Modern Electronics Technique, 2020,43(11):6–9.)
- [3] THOMPSON P,NANNINI M,SCHIEBER R. Target separation in SAR image with the MUSIC algorithm[C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Barcelona:IEEE, 2007:468–471.
- [4] YARDIBI T,LI Jian,STOICA P,et al. Source localization and sensing: a nonparametric iterative adaptive approach based on weighted least squares[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2010,46(1):425–443.
- [5] XUE Ming, XU Luzhou, LI Jian. IAA spectral estimation: fast implementation using the Gohberg–Semencul factorization[C]// 2011 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Prague, Czech Republic: IEEE, 2011. doi: 10.1109/ICASSP.2011.5947305.
- [6] 孙培林,汤俊,唐波. 基于快速 IAA 算法的 MIMO 雷达参数估计[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012,52(9):1244–1248. (SUN Peilin,TANG Jun,TANG Bo. MIMO radar parameter estimation based on fast IAA algorithm[J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition), 2012,52(9):1244–1248.)
- [7] 姜浩浩,曲卫,童菲. 近场雷达三维成像技术综述[J]. 兵器装备工程学报, 2021,42(11):25–30. (JIANG Haohao,QU Wei,TONG Fei. Overview of near field radar 3D imaging technology[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021,42(11):25–30.)
- [8] 刘浩,朱莉,高传斌,等. 基于降维积分的空间域毫米波全息成像算法[J]. 微波学报, 2021,37(S1):208–212. (LIU Hao,ZHU Li, GAO Chuanbin, et al. Millimeter wave holographic imaging algorithm in spatial domain based on dimensionality reduction integral[J]. Journal of Microwaves, 2021,37(S1):208–212.)
- [9] 鲁欢,南亨,谭伟杰. 基于 IAA 的协方差矩阵重构稳健波束形成方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020,18(5):820–825. (LU Huan,NAN Heng,TAN Weijie. Robust beamforming using IAA-based interference-plus-noise covariance matrix reconstruction[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2020,18(5):820–825.)
- [10] 胡瑞贤,张博,石健,等. 基于 IAA 的多通道 SAR 系统目标测速新方法[J]. 电波科学学报, 2014,29(3):462–470. (HU Ruixian, ZHANG Bo,SHI Jian,et al. Novel target velocity estimation method for multichannel SAR system based on Iterative Adaptive Approach[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2014,29(3):462–470.)
- [11] 张新明,程金凤,康强,等. 迭代自适应权重均值滤波的图像去噪[J]. 计算机应用, 2017,37(11):3168–3175. (ZHANG Xinming, CHENG Jinfeng, KANG Qiang, et al. Iterative adaptive weighted-mean filter for image denoising[J]. Journal of Computer Applications, 2017,37(11):3168–3175.)
- [12] WAN Yangliang, LIANG Xingdong, BU Xiangxi, et al. FOD detection method based on Iterative Adaptive Approach for Millimeter-Wave radar[J]. Sensors, 2021,21(4):1241.
- [13] 李林琳,赵毅寰,丁庆海,等. 基于运动补偿的双通道星载 SAR 动目标检测方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(6): 1015–1021. (LI Linlin, ZHAO Yihuan, DING Qinghai, et al. An approach of dual-channel spaceborne SAR moving target detection based on motion compensation[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(6): 1015–1021.)

作者简介：

陈 曦(1982–), 女, 博士, 高级工程师, 主要从事航空安保与安检技术研究. email:Chenxi@mail.castc.org.cn.

李鹏哲(1993–), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事航空安保与安检技术研究.

马健博(1995–), 男, 硕士, 研究实习员, 主要从事航空安保与安检技术研究.

张桂福(1993–), 男, 学士, 工程师, 主要从事航空安保与安检技术研究.