

文章编号: 2095-4980(2021)02-0250-06

毫米波多发多收阵列成像的分级重建方法

乔灵博^{1,2}, 游 燕¹, 柳 兴¹, 于 洋^{1,2}, 王迎新^{1,2}, 赵自然^{*1,2}

(1.危爆物品扫描探测技术国家工程实验室, 北京 100084; 2.清华大学 工程物理系, 北京 100084)

摘 要: 在毫米波多发多收阵列成像中, 由于收发天线排布不规则, 图像重建依赖于逐点计算的反向传播算法, 重建速度难以满足快速成像需求。为了解决上述问题, 本文提出了一种“粗到精”的分级重建策略, 通过基于相位补偿的快速粗重建和基于反向传播的子区域细重建来对多发多收全息数据进行快速处理。通过任意复杂电磁场计算(FEKO)电磁仿真实验对正交阵列和紧凑方框型阵列的毫米波成像进行了模拟, 验证了分级重建方法的有效性。

关键词: 毫米波成像; 多发多收阵列; 分级重建

中图分类号: TN928; O 438.1

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019394

Hierarchical reconstruction method for millimeter-wave holographic imaging based on multiple-input-multiple-output array

QIAO Lingbo^{1,2}, YOU Yan¹, LIU Xing¹, YU Yang^{1,2}, WANG Yingxin^{1,2}, ZHAO Ziran^{*1,2}

(1.National Engineering Laboratory for Dangerous Articles and Explosives Detection Technologies, Beijing 100084, China;

2.Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In millimeter-wave multiple-input-multiple-output(MIMO) array imaging, image reconstruction relies on point-by-point back propagation algorithm due to the irregular antenna arrangement. As a result, the reconstruction speed cannot meet the need of fast imaging. In order to solve this problem, a hierarchical “Coarse-To-Fine” reconstruction strategy is proposed. The fast coarse reconstruction based on phase compensation and the fine reconstruction based on back propagation are combined to process the MIMO holographic data. The millimeter wave imaging experiments by using orthogonal arrays and compact square arrays are simulated by Feldberechnung bei Korpern mit beliebiger Oberflache(FEKO), verifying the effectiveness of the proposed hierarchical reconstruction method.

Keywords: millimeter-wave imaging; MIMO array; hierarchical reconstruction

近年来, 国际安全形势日益恶化, 恐怖袭击频繁发生。为了保障公共安全, 在机场、火车站、地铁站、体育场馆等人流密集的公共场所, 通过技术手段对出入人流进行安全检测已经成为一种常态。目前对行李物品的检测主要依赖 X 射线透射或断层成像技术, 由于 X 射线穿透能力强, 成像分辨率高, 能够较好地对行李物品中的各类违禁品进行检测, 而对于人身携带违禁品的检测则较为困难。一方面为了避免潜在的健康风险, 针对普通旅客的检测不能采用存在电离辐射的 X 射线类成像技术; 另一方面, 人身可藏匿部位较多且涉及到隐私问题, 传统的基于手持金属探测器的搜身式检查在准确率和旅客体验方面均存在一定问题。毫米波全息成像技术采用极低功率的毫米波穿透衣物, 能够对人体体表进行非接触式的快速成像检测, 成像分辨力在毫米级, 由于其安全、快速、精确度高的特点, 已经成为人体安检领域的主流发展方向。毫米波全息成像技术按照收发配置不同, 可以分为单发单收(Single-Input-Single-Output, SISO)^[1-2]和多发多收式(MIMO)^[3]两种。单发单收毫米波全息成像在扫描的某一时刻只有一组收发天线工作(准单站模式下一个发射通道, 两个接收通道), 且收发天线近似位于同一位置, 发射天线发射宽波束毫米波信号照射到目标表面, 反射信号被接收天线接收, 由外差混频

收稿日期: 2019-10-12; 修回日期: 2019-12-18

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); 国家重点研发计划资助项目(2017YFE0123200)

作者简介: 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。email:qlb199063@163.com

*通信作者: 赵自然 email:zhaozr@mail.tsinghua.edu.cn

技术即可得到包含目标空间位置以及复反射率信息的全息数据。在毫米波成像系统中，通常借助线阵阵列的机械运动来实现对平面或圆柱面的全息数据获取，进而由图像重建算法形成高分辨率毫米波图像。以平面扫描为例，毫米波发射和接收的往返过程可以等效为半波长毫米波场数据的单向传播过程^[4]，因而由快速傅里叶变换方法反向传播全息数据即可实现图像聚焦。毫米波全息成像图像重建算法的实质是用数值计算方法代替光学透镜，从而实现毫米波图像的自适应聚焦。多发多收式毫米波全息成像在扫描的某一时刻一个发射通道发射，多个接收通道同时接收，然后通过不断切换发射通道来实现 MIMO 阵列的扫描。由于对收发通道进行了复用，多发多收模式适合应用于二维面阵成像系统。为进一步减少收发单元数目和提升成像质量，即通过最少的收发通道实现最优的成像效果，需要对收发天线的稀疏排布方式进行优化，常见的有正交型^[5]、方框型^[6]、紧凑方框型^[7]、曲线型^[8]、螺旋型^[8]等不规则排布方式。典型的多发多收式毫米波全息成像系统如 Ahmed 等的研究^[6]，由于采用了 3 000 多组收发通道，成像系统可以通过全电子扫描的方式实现全息数据获取，但是由于每组全息数据对应的收发天线在空间上按照相间正方形方框进行排布，需要采用反向传播算法逐点重建毫米波图像，计算量巨大，图像重建速度成为限制其应用的主要问题。

本文围绕毫米波多发多收阵列成像的图像重建方法展开研究，提出了一种可以显著降低计算量的分级重建策略，即首先采用基于相位补偿的快速聚焦算法进行粗重建，然后再针对关心的重点子区域进行反向传播精确重建。采用 FEKO 电磁仿真软件对正交阵列和紧凑方框型两种 MIMO 阵列成像进行了模拟，由仿真获取的全息数据验证了分级重建算法的有效性。

1 毫米波多发多收阵列成像

为了实现对成像目标的快速面阵扫描，需要通过密集排布的收发单元来完成全息数据的获取。然而，若按照单发单收式毫米波成像半波长的天线排布要求，收发单元数目将会过于庞大，难以工程实现。为了显著减少收发通道数目，可以采用天线单元稀疏排布的多发多收阵列进行全息成像。典型的毫米波多发多收阵列成像如图 1 所示，发射天线发出的毫米波信号照射到物体上，反射信号被接收平面上的所有接收天线同时接收，依次切换发射单元即可完成所有全息数据的获取。

假设成像目标的复反射率为 $f(x, y, z)$ ，发射天线的位置为 $(x_m^T, y_m^T, 0)$ ，接收天线的位置为 $(x_n^R, y_n^R, 0)$ ，在波恩一次散射近似下，多发多收阵列扫描获取的全息数据为：

$$U(x_m^T, y_m^T, x_n^R, y_n^R, \omega) = \iiint f(x, y, z) \exp(-jkr) dx dy dz \tag{1}$$

式中： ω 和 k 分别为毫米波的角频率和波数； $r = \sqrt{(x - x_m^T)^2 + (y - y_m^T)^2 + z^2} + \sqrt{(x - x_n^R)^2 + (y - y_n^R)^2 + z^2}$ 为收发天线与目标点的距离之和，忽略了球面波随距离的衰减。

2 分级重建方法研究

由于多发多收阵列中收发天线排布不规则，无法采用快速傅里叶变换类的方法进行快速图像重建，传统的方法是采用反向传播算法进行逐点聚焦，对于每个成像点需要将所有全息数据进行一次加权累加，因而造成了重建计算量巨大，即使采用 GPU 加速等加速技术也远远无法满足接近实时的成像需求。

针对上述问题，本文提出了一种“Coarse-To-Fine”的分级重建策略，结合粗细两种重建算法来实现多发多收阵列成像的快速图像重建。该方法整体思路如图 2 所示，首先采用基于相位补偿的快速聚焦算法对成像区域进行近似粗重建，其次对可疑区域或重点区域进行定位，最后基于反向传播算法对划分出的子区域进行快速精细重建。

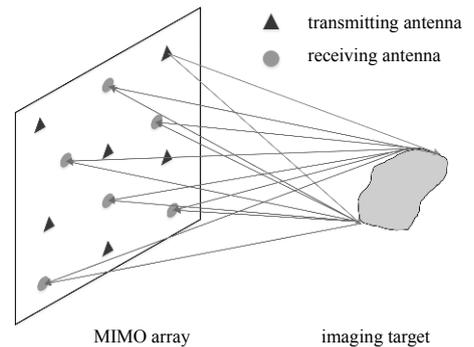


Fig.1 Illustration of millimeter-wave MIMO imaging
图 1 毫米波多发多收阵列成像示意图

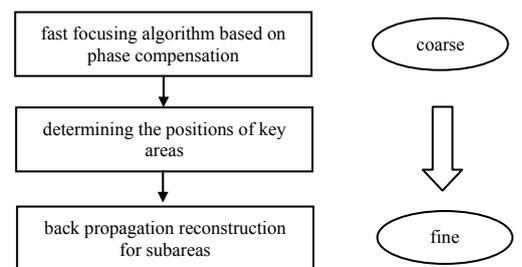


Fig.2 Flow chart of the hierarchical reconstruction
图 2 分级重建方法流程

2.1 基于相位补偿的快速粗重建

为了实现快速聚焦, 可以将多发多收阵列接收到的全息数据等效为单发单收模式下的全息数据, 这样就可以采用基于快速傅里叶变换的方法进行快速重建。在远场情况下, MIMO 阵列设计可以采用等效孔径理论来作为指导, 即通过发射阵列和接收阵列空间位置卷积来判断 MIMO 阵列的设计效果。依据等效孔径理论^[9], 每组收发单元可以进行如下等效:

$$x_E = x_T + x_R, y_E = y_T + y_R \quad (2)$$

另外还可以采用虚拟阵元的方法进行等效^[10], 如图 3 所示, 虚拟阵元位于发射天线和接收天线的中间位置, 若发射天线和接收天线的间距远小于成像目标到发射天线和接收天线之间的距离, 则可以将发射和接收天线都等效为中间位置的虚拟阵元:

$$x_E = \frac{x_T + x_R}{2}, y_E = \frac{y_T + y_R}{2} \quad (3)$$

通过等效孔径或者虚拟阵元等效后, 多发多收阵列的全息数据可以看作单发单收成像数据。在实际成像中, 等效孔径以及虚拟阵元的等效条件往往无法满足, 为了减小成像误差, 首先对等效后的全息数据进行相位补偿:

$$U'_{m,n} = U_{m,n} \cdot \exp[-jk(2r_{E_{m,n}} - r_{m,n})] \quad (4)$$

式中: $r_{E_{m,n}} = 2\sqrt{(x_{E_{m,n}} - x_0)^2 + (y_{E_{m,n}} - y_0)^2 + (z_{E_{m,n}} - z_0)^2}$ 为虚拟阵元和补偿点 (x_0, y_0, z_0) 之间距离的两倍; $r_{m,n} = \sqrt{(x_m^T - x_0)^2 + (y_m^T - y_0)^2 + (z_m^T - z_0)^2} + \sqrt{(x_n^R - x_0)^2 + (y_n^R - y_0)^2 + (z_n^R - z_0)^2}$ 为发射天线与补偿点的距离和接收天线与补偿点的距离之和。

对于补偿点 (x_0, y_0, z_0) , 通过式(4)的相位补偿等效孔径或者虚拟阵元等效后不存在相位误差, 但是其他成像点即使通过相位补偿, 也存在相位误差, 成像点离 (x_0, y_0, z_0) 越远则相位误差越大。因此, 为了使整个成像区域都能获得较好的成像效果, 补偿点可以选取为成像区域的中心点, 该点附近区域的图像最为清晰, 远离该点的区域则会因为相位误差而形成一定的模糊。相位补偿后, MIMO 收发数据等效为单站式的毫米波全息数据, 进而可以采用基于快速傅里叶变换的重建算法进行聚焦^[4]:

$$f(x, y, z) = \left\{ \text{FT}_{2D}^{-1} \left(\text{FT} \left[\text{Stolt} \left[\text{FT}_{2D} \left(U_{m,n}^* \exp(-jZ_0 k_z) \right) \right] \right] \right) \right\}^* \quad (5)$$

式中: FT_{2D} , FT_{2D}^{-1} 和 FT 分别为二维快速傅里叶变换、二维快速傅里叶反变换和一维快速傅里叶变换; Stolt 为频率域线性插值; Z_0 为聚焦距离; k_z 为 z 方向对应的空间波束。

2.2 基于反向传播的子区域细重建

上述基于相位补偿的快速聚焦算法能够实现对毫米波图像的近似重建, 距离补偿点 (x_0, y_0, z_0) 近的区域图像相对清晰, 而远离聚补偿点 (x_0, y_0, z_0) 的区域则图像会存在散焦现象。接下来, 可以由用户交互或深度学习的方法识别出可疑或重点区域, 最后由反向传播算法对仅包含少量像素点的子区域进行快速重建:

$$I_{\text{sub}}(x, y, z) = \sum_m \sum_n \sum_{f_\omega} U(x_m^T, y_m^T, x_n^R, y_n^R, f_\omega) \exp \left[jk_{f_\omega} \left(\sqrt{(x - x_m^T)^2 + (y - y_m^T)^2 + z^2} + \sqrt{(x - x_n^R)^2 + (y - y_n^R)^2 + z^2} \right) \right] \quad (6)$$

式中: I_{sub} 为选取的待重建子区域像素值; f_ω 为毫米波频率; k_{f_ω} 为对应波数。反向传播算法对每一组全息数据补偿对应的相位延迟然后叠加形成聚焦图像, 由于没有相位误差, 重建的子区域图像清晰, 分辨力高。子区域选取可以由用户交互的方式实现, 即用户通过观察基于相位补偿的快速粗重建结果来手动选取感兴趣区域; 另一方面, 也可以采用深度学习中的目标检测技术进行子区域选取^[11], 通过大量标注样本进行神经网络训练, 从而由计算机实现对感兴趣区域进行自动选取。

2.3 算法时间复杂度分析

对于毫米波多发多收阵列成像, 由于收发天线排布不规则, 传统的方法是采用反向传播算法对整个成像区域进行逐点重建。

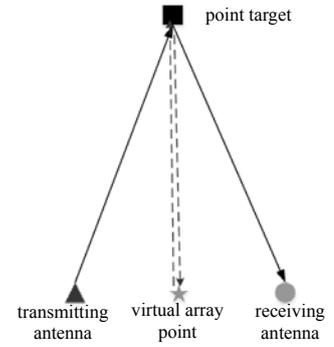


Fig.3 Equivalent method of virtual array
图3 虚拟阵元等效方法

假设发射天线数目、接收天线数目以及频率点数分别为 N_T, N_R 和 N_f ，且反向传播重建图像的像素点数与基于相位补偿的快速聚焦重建的点数一样均为 $N_T N_R N_f$ ，则反向传播重建算法的时间复杂度为： $O_{BP}=(N_T N_R N_f)^2$ 。若采用分级重建算法，则可以通过分步重建显著降低计算量。首先由基于相位补偿的快速聚焦重建算法进行粗重建，包含两次二维快速傅里叶变换、一次频率维度的一维快速傅里叶变换以及频率域的一维线性插值，时间复杂度可以估计为： $O_{FFT}=2N_T N_R \log_2(N_T N_R)+N_T N_R N_f \log_2(N_f)+N_T N_R N_f$ ；其次，针对选取的感兴趣子区域进行反向传播重建，时间复杂度为 $N_T N_R N_f N_{sub}$ 。分级重建算法的总时间复杂度约为 $O_H=O_{FFT}+N_T N_R N_f N_{sub} \approx N_T N_R N_f N_{sub}$ ，则加速比为 $N_T N_R N_f / N_{sub}$ ，由于 N_{sub} 一般远小于整个三维图像的像素数目，因此总计算量显著降低。

3 电磁仿真实验

3.1 正交阵列成像

为了能够适用于本文提出的“Coarse-To-Fine”分级重建方法，MIMO 阵列的等效阵元需要能够排满整个孔径平面。正交型多发多收阵列包含两个正交排布的发射阵列和接收阵列，其虚拟阵元能够排布成均匀分布的矩形点阵，符合基于相位补偿的快速重建方法的要求。

仿真实验中成像频率设为 70~80 GHz，10 GHz 带宽内模拟 81 个频点的数据。设计如图 4(a)所示的正交阵列，发射天线和接收天线的单元数目均为 250 个，线阵阵列中相邻两个天线间隔为 2 mm，收发天线均采用偶极子全向天线。采用电磁仿真软件 FEKO 对如图 4(b)所示的金属手枪模型进行全息成像模拟(大面元物理光学法)，成像距离设为 1 m。采用反向传播算法对正交型 MIMO 阵列全息数据进行重建，结果如图 6(a)所示。

接下来按照式(3)进行虚拟阵元的等效，则等效阵列排布如图 5(a)所示，由于虚拟阵元位于发射天线和接收天线的中间位置，等效阵列在水平和垂直方向长度仅为收发阵列的一半，因而等效后的单站式全息数据覆盖面积相对较小，选定(0,0,1)(单位：m)为补偿点，进而由基于相位补偿的快速聚焦算法进行重建，结果如图 6(b)所示，由于成像视野无法覆盖整个手枪模型，枪口部分混叠到图像左侧区域。

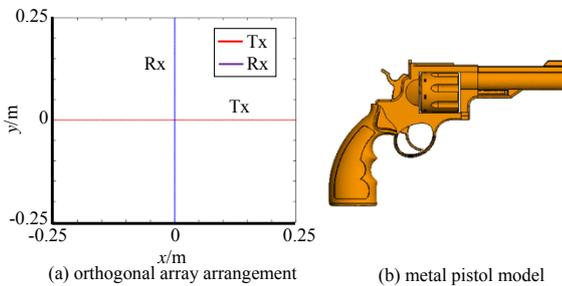


Fig.4 Orthogonal array arrangement and metal pistol model
图 4 正交阵列排布及金属手枪模型

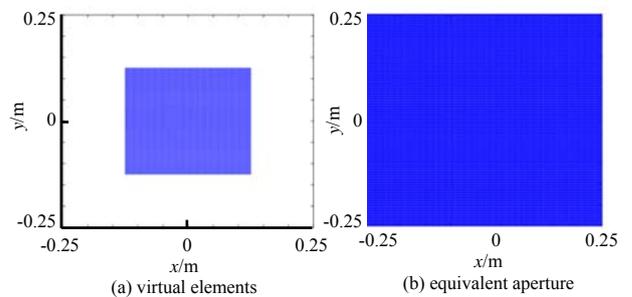


Fig.5 Equivalent array
图 5 等效阵列

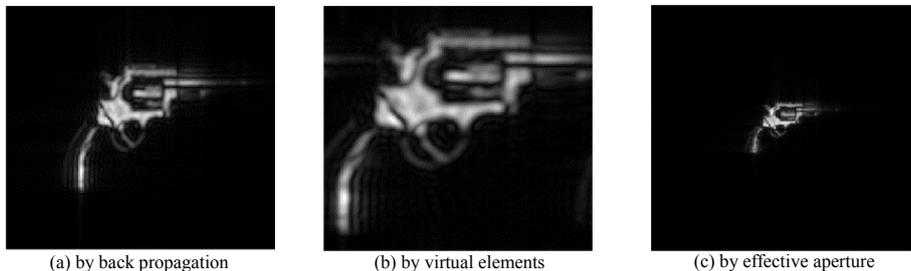


Fig.6 Reconstruction results of back propagation and phase compensation based fast focusing algorithms (virtual elements, effective aperture)
图 6 反向传播和基于相位补偿的快速聚焦算法(虚拟阵元等效、等效孔径)的重建结果

为了扩大成像视野，可以采用等效孔径等效方法，即等效单元的位置由式(2)计算到，如图 5(b)，此时等效阵列排满了整个 $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ 的采样空间，等效阵列的间隔相比虚拟阵元等效方法扩大了 2 倍。同样由基于相位补偿的快速聚焦算法进行重建，结果如图 6(c)。从结果可以看出，成像视野得到了明显放大，但是放大倍数却是 4 倍。为了解释这一现象，考虑发射和接收天线位置为 $(x_T, 0, 0)$ 和 $(0, y_R, 0)$ ，对于位于 $(\Delta x, 0, Z)$ 的目标点(补偿点选取为 $(0, 0, Z)$)，则真实的光程为 $r_0=\sqrt{(x_T-\Delta x)^2+Z^2}+\sqrt{y_R^2+Z^2}$ ，采用虚拟阵元等效方法补偿后光程为：

$$r_1 = \sqrt{(x_T - \Delta x)^2 + Z^2} + \sqrt{y_R^2 + Z^2} + 2\sqrt{(x_T/2 - \Delta x)^2 + y_R^2/4 + Z^2} - \sqrt{x_T^2 + Z^2} - \sqrt{y_R^2 + Z^2} \quad (7)$$

假设 Δx 为一小量, 则上式可以化简为:

$$r_1 = 2\sqrt{(x_T/2 - \Delta x)^2 + y_R^2/4 + Z^2} \quad (8)$$

上式对 Δx 求导:

$$\frac{dr_1}{d\Delta x} = \frac{-2(x_T/2 - \Delta x)}{\sqrt{(x_T/2 - \Delta x)^2 + y_R^2/4 + Z^2}} \approx \frac{-x_T}{Z} \quad (9)$$

同样地, 采用等效孔径卷积等效补偿后的光程为:

$$r_2 = 2\sqrt{(x_T - \Delta x)^2 + y_R^2 + Z^2} \quad (10)$$

上式对 Δx 求导并乘以 2(重建图像的像素间隔翻倍):

$$2 \frac{dr_2}{d\Delta x} = \frac{-4(x_T - \Delta x)}{\sqrt{(x_T - \Delta x)^2 + y_R^2 + Z^2}} \approx \frac{-4x_T}{Z} \quad (11)$$

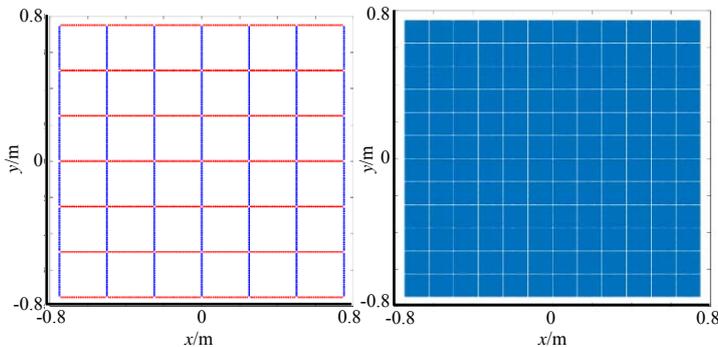
对比式(9)和式(11)可以发现, 改变同样的像素间隔, 光程改变为 4 倍关系, 从而解释了等效孔径卷积等效方法相比虚拟阵元等效方法像素间隔变大为 4 倍的现象。

由于收发天线间隔(最大 0.35 m)相对成像距离(1 m)较小, 因而经过相位补偿后, 相位误差得到了很好的抑制, 采用快速聚焦重建的图像与反向传播图像重建的结果相当, 没有明显的散焦现象。

3.2 紧凑方框型阵列成像

除了正交阵列之外, 也可基于紧凑方框型多收多发阵列实现基于相位补偿的快速聚焦重建算法。典型的紧凑方框型多收多发阵列, 如图 7(a)所示, 该 MIMO 阵列包含 6×6 的子方框阵列, 每个子方框阵列包含四个线阵列排布在正方形的四条边, 每个线阵列由 24 个发射或接收天线组成, 相邻两个子方框阵列复用发射或接收线阵列。在 MIMO 阵列工作时, 每个子方框的发射天线发射毫米波信号, 该子方框内的所有接收天线同时接收反射信号, 其他子方框的接收天线不工作。由虚拟阵元等效法, 其等效阵列如图 7(b)所示, 可以看到虚拟阵元基本排满了整个 $1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ 的空间区域, 其中个别行列缺失虚拟阵元, 但由于数目较少, 对全息成像影响不大。

仿真实验中毫米波频率设为 24~28 GHz, 81 个采样点, 线阵收发天线阵列相邻两个天线间隔为 1 cm, 则等效的虚拟阵元间隔为 0.5 cm。对如图 8(a)所示的人体模型进行电磁仿真实验, 成像距离设为 1.5 m, 获取全息数据后, 由反向传播重建算法重建的结果如图 8(b)所示, 可以看到人体的轮廓细节清晰可见。采用基于相位补偿的快速聚焦算法进行重建(补偿点为 $(0,0,1.5) \text{ m}$), 结果如图 8(c), 由于收发阵列排布孔径较大($1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$), 与成像距离相当, 远离补偿点的收发天线对会引起较大相位误差, 从而造成了图像的模糊。因此, 可以应用本文提出的基于“Coarse-To-Fine”的分级重建策略, 先用快速聚焦算法进行全视野的快速重建得到如图 8(c)的图像, 然后选定可疑或重点区域(以胸部区域为例), 基于反向传播图像重建算法进行精细化的子区域快速重建, 分级重建结果如图 8(d)所示。采用分级重建方法不仅实现了对感兴趣区域的高精确度图像重建, 也大幅减少了计算量, 以图 8(d)的重建结果为例, 子区域像素数约占整个反向传播重建图像像素数的 1.6%, 计算量减小了约 98.4%。



(a) compact square MIMO array (b) corresponding virtual equivalent array

Fig.7 Compact square MIMO array and the corresponding virtual equivalent array

图 7 紧凑方框型多收多发阵列及虚拟阵元等效阵列

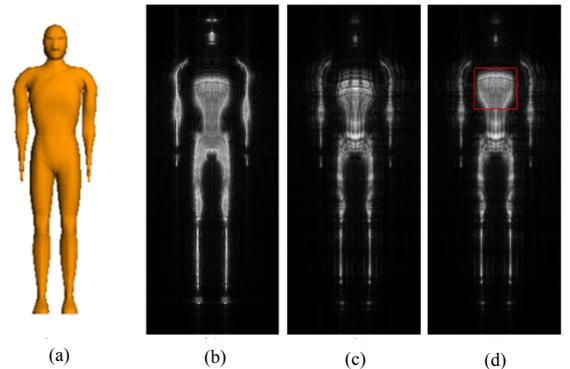


Fig.8 Human model(a), and results of back propagation(b), phase compensation based fast focusing algorithm(c) and hierarchical reconstruction algorithm(d)

图 8 人体模型(a), 以及反向传播(b)、基于相位补偿的快速聚焦算法(c)及分级重建算法(d)的结果

4 结论

本文提出了一种针对多发多收成像的分级重建方法，基于“Coarse-To-Fine”策略，首先采用基于相位补偿的快速聚焦算法进行粗重建，然而采用反向传播对选定的子区域进行细重建，以此来解决毫米波多发多收阵列成像的快速重建问题。分级重建方法能够在保证毫米波多发多收阵列成像图像精确度的前提下，大幅提高重建速度，缺点是需要通过用户交互或者深度学习的方法进行子区域选取。

参考文献：

- [1] SHEEN D M, MCKIN 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.
- [2] 王子野, 乔灵博, 王迎新, 等. 高分辨力亚毫米波全息成像系统[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2016,14(6):833-837. (WANG Ziye, QIAO Lingbo, WANG Yingxin, et al. Wide-band three-dimensional submillimeter-wave holographic imaging system[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2016,14(6):833-837.)
- [3] AHMED S S, SCHIESSL A, SCHMIDT L. 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.
- [4] QIAO L, WANG Y, ZHAO Z, 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.
- [5] 沈宗俊, 乔灵博, 游燕, 等. 基于全变分正则化的毫米波正交阵列近场成像重建算法[J]. *中国体视学与图像分析*, 2017,22(4):435-442. (SHEN Zongjun, QIAO Lingbo, YOU Yan, et al. Total variance regularized reconstruction for near field multistatic millimeter-wave holographic imaging by using orthogonal array[J]. *Chinese Journal of Stereology and Image Analysis*, 2017,22(4):435-442.)
- [6] AHMED S S, SCHIESSL A, GUMBMAN F, et al. Advanced microwave imaging[J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2012,13(6):26-43.
- [7] MOULDER W F, KRIEGER J D, MAJEWSKI J J, et al. Development of a high-throughput microwave imaging system for concealed weapons detection[C]// 2016 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology(PAST). Waltham, MA, USA:IEEE, 2016:1-6.
- [8] ZHUGE X, YAROVY 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.
- [9] AHMED S S, SCHIESSL A, SCHMIDT L. Near field mm-wave imaging with multistatic sparse 2D-arrays[C]// 2009 European Radar Conference(EuRAD). Rome, Italy:IEEE, 2009:180-183.
- [10] 金添, 娄军, 宋千, 等. 虚拟孔径天线配置及其成像性能研究[J]. *电子与信息学报*, 2011,33(10):2458-2463. (JIN Tian, LOU Jun, SONG Qian, et al. Study on antenna configuration of virtual aperture and its associated imaging performance[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011,33(10):2458-2463.)
- [11] HAN J, ZHANG D, CHENG G, et al. Advanced deep-learning techniques for salient and category-specific object detection: a survey[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2018,35(1):84-100.