

# 旅客人身时频调和型毫米波三维重建

杨磊\*, 陈英杰, 王腾腾, 宋昊, 方澄

(中国民航大学天津市智能信号与图像处理重点实验室, 天津 300300)

**摘要:**在毫米波人身安检成像中,二维平面承载的有限信息量使得安检系统对隐匿危暴/爆品的检出概率不高,亟待获取人体三维全聚焦重建结果,且以往仅时域或频域三维重建算法均难以实现精度与效率的平衡。为此,基于“维度分解-算法调和”策略提出时频调和型三维重建算法(Time-Frequency Coordination 3D Reconstruction, TFC-3DR)。该算法融合频域算法的效率与时域算法的精度优势,利用距离徙动频域成像算法(Range Migration Algorithm, RMA)的方位平移不变性,在距离-高度截面统一地校正距离徙动,以保证运算效率,而后将时域后向投影(Back Projection, BP)算法应用于距离-角度维截面,通过将脉冲压缩数据与成像空间分辨单元逐点相干积累,以保证成像精度,由此加快运算效率的同时又保证重建精度。由于BP算法的引入,阵列天线角度维扫描轨迹灵活可变,有效降低了人体侧面盲区面积,避免漏检、误检。仿真和实测人体毫米波数据实验,验证了算法的有效性与实用性,同时分析重建效果与运算复杂度,验证了该文所提算法相比三维BP重建算法的优越性。

**关键词:**毫米波成像; 三维重建; 距离徙动算法; 后向投影算法

中图分类号: TN951

文献标识码: A

## Three-dimensional reconstruction algorithm for passengers based on time-frequency coordination

YANG Lei\*, CHEN Ying-Jie, WANG Teng-Teng, SONG Hao, FANG Cheng

(Tianjin Key Laboratory for Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** In the millimeter wave imaging of personal security inspection, it is with low probability to detect the dangerous and violent/explosive things in the limited two-dimensional imaging plane. Therefore, the human result reconstructed by three-dimensional fully focused algorithm is demanded urgently. It is difficult to achieve a balance between the accuracy and efficiency for the conventional three-dimensional reconstruction algorithms that are purely either in time or frequency domain. To this end, time-frequency coordinated three-dimensional reconstruction algorithm (TFC-3DR) is proposed based on the dimensional decomposition and algorithmic coordination scheme, in which the efficiency of frequency-domain algorithm and the accuracy of time-domain algorithm can be combined and coordinated. In order to guarantee the operational efficiency, the range migration is uniformly calibrated in the range-height plane under the azimuth invariance characteristics of the range migration algorithm (RDA) in the frequency-domain. Then, the time-domain back projection (BP) is employed in the range-angle plane through point-by-point coherent accumulation of pulse-compressed data and resolution units to guarantee the imaging accuracy. In the end, TFC-3DR is established with both high efficiency and accuracy. Due to the introduction to BP algorithm, the scanning trajectory of the array antenna in the angle dimension is flexible and variable, which reduces the blind area of the human body, so that highly missed and false detection rate can be avoided. Simulated and practical data of human body is performed to verify the effectiveness of the proposed algorithm. Meanwhile, the superiority over the proposed algorithm is examined by comparing with the BP reconstruction algorithm in terms of the reconstruction accuracy and computation complexity.

**Key words:** millimeter wave imaging, three-dimensional reconstruction, range-migration algorithm, back-projection algorithm

收稿日期: 2022-09-28, 修回日期: 2023-02-09

Received date: 2022-09-28, Revised date: 2023-02-09

基金项目: 国家自然科学基金(62271487)

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China(62271487)

作者简介(Biography): 杨磊(1984-), 男, 天津人, 教授, 博士, 主要研究领域为合成孔径雷达成像、毫米波安检成像以及机器学习理论及应用研究, E-mail: yanglei840636@163.com

\*通讯作者(Corresponding author): E-mail: yanglei840636@163.com

## 引言

随着危暴/爆恐事件的频发与恐怖主义势力抬头,未来民航安检面临着层出不穷的高新科技危暴/爆品挑战,旅客人身安检成为民航反恐的关键环节<sup>[1]</sup>。手持金属探测器与金属探测门会对常规金属物品频繁报警造成误警率上升,导致需要进一步的搜身式人工安检。这样的安检查验方式不但造成安检效率低下,而且易使得出行旅客产生不良的抵触情绪,造成安检口堵塞影响安检通道的流通性。虽然,当今疫情常态化防控,但是新冠病毒仍然具有较强的感染与传播能力,故搜身式人工安检不一定会增加疫情传播的风险,进而加重对民航运输业的影响。因此,发展新型的非接触式快速安检技术成为迫切需求。

在民航旅客人身安检领域,用于人体的安检技术为上述问题提供了解决方案<sup>[2]</sup>。由于安检应用面向人体,因此,发射信号在电离属性上应具备安全性与可靠性。但传统的非接触安检手段如X光安检仪与近来面世的弱光子安检仪,均存在令人诟病的辐射危害、电磁污染等问题。随着电磁微波技术的发展,毫米波因其独特优势逐渐走进人们的视野<sup>[3]</sup>,其波段位于30~300 GHz之间,波长位于1~10 mm范围,可穿透人体表层衣物以实现对于隐匿物品探测,同时又具有对人体的辐射极小的先天优势<sup>[4]</sup>。目前,国内外各大机场所采用的安检技术可以大致分为被动式与主动式。被动式安检基于黑体辐射原理,通过接收待测目标自身辐射出的电磁能量与环境温度对比,利用亮温差异进行无差别恢复成像<sup>[5]</sup>。该技术最大的好处就是没有辐射危害与电磁污染。但被动式安检由于易受环境影响使得接收信号形式不可预知,导致成像分辨率不高。就被动式毫米波安检整体成像效果来说,由于在成像效果图中噪声分布明显导致图像信噪比低,成像效果图只能模糊看清目标的整体形状和轮廓,不能看到局部的细节,并且在区分相近的辐射温度材料时,容易出现错误识别的现象。例如,陶瓷材料和塑料材料的有效辐射温度相差不大,故在没有额外的信息下,被动式毫米波安检成像很难区分塑料与陶瓷。

主动式安检属于有源雷达探测领域,解决了被动式安检难以避免的噪声、温度等环境因素所引起的成像精度低、易受干扰等问题。主动式安检通过对人体目标反射的回波信号进行反演得出带有目标电磁特性的图像,其图像有着较高的成像精度与

较大动态范围<sup>[6]</sup>。同时,空间阵列扫描构型与主动式安检相融合可实现旅客人身安检三维重建。在实际旅客人身安检过程中,重建算法应具有近实时处理能力与较准确的重建精度。但在传统三维重建算法中,仅时域或频域三维重建算法因存在算法复杂度高、计算负担大与重建精度低等问题阻碍其工程实用性。时域三维重建算法虽然具有算法原理简单、成像准确等优势,但高分辨率的形成导致所需的成像网格数也越多,处理数据量也越大,导致计算负担极大,难以满足民航旅客安检需求及应用标准要求。而频域三维重建算法中,常见的频域算法有距离多普勒(Range Doppler, RD)、频率变标(Chirp Scaling, CS)与RMA成像算法等。由于安检场景的近场特性,导致RD与CS算法在准确校正距离徙动操作时失效<sup>[7]</sup>。故针对RD与CS算法在近场处理过程中存在的局限性,文献<sup>[8]</sup>提出平面扫描构型结合频域三维RMA重建算法,但算法受限于方位平移不变性影响导致扫描系统构型固化,且算法存在复杂度高、相位补偿复杂等问题。针对文献<sup>[8]</sup>存在的问题,文献<sup>[9]</sup>从优化扫描构型与算法结构入手,提出融合圆周极坐标算法与RMA成像算法,通过沿高度维对重建场景分层处理,有效解决上述算法在扫描构型固化与算法复杂度上的问题,但同样在获取数据量过多的情况下,此算法的近实时处理能力应用于实际安检场景下的三维重建效果并不理想。

本文面向民航旅客毫米波非接触式安检三维重建需求,针对仅时域或频域三维重建算法难以同时满足重建精度与效率的问题,提出基于“维度分解-算法调和”策略的一种时频调和型三维重建算法。首先,“维度分解”将三维空间划分为距离-高度与距离-角度两个二维平面使其三维重建过程得以简化。其次,“算法调和”通过融合时域与频域成像的优势使得重建算法能够同时满足重建精度与效率。发射信号采用步进频体制,在保证分辨率的同时降低收发系统复杂度。并且该算法鉴于频域RMA算法方位平移不变性准则统一实现距离徙动校正以及时域BP算法,将回波脉压数据与空间分辨单元点对点进行图像恢复,实现高效解耦和聚焦操作并保证重建精度。最后,仿真及实测人体毫米波实验,验证时频调和型三维重建算法的有效性,并对比传统算法的运算复杂度与重建效果验证算法的高运算效率与良好的重建精度。

### 1 信号模型

本文重点研究毫米波人体安检三维重建,属于典型近场问题。在雷达电磁领域,根据发射信号波前到达目标时波前阵面的表现形式<sup>[10]</sup>,近远场划分有如下表达式:

$$R_d \sim L^2/(1.44\lambda) \quad (1)$$

式(1)中, $R_d$ 、 $L$ 与 $\lambda$ 分别表示散射点距离天线阵面的垂直距离、天线阵列实际长度与阵列天线正常工作时的信号波长。当满足 $R_d < L^2/(1.44\lambda)$ 时近场假设成立。依据估算可知旅客人身安检应按照近场假设作为后续研究的出发点<sup>[11]</sup>。在旅客人身安检过程中,一维探测与二维成像只能给出目标的模糊信息,而三维重建可以完整地反演出被测目标的三维空间散射分布情况<sup>[12]</sup>。常见的三维重建扫描模式有平面扫描、斜下视圆周扫描与圆周柱面扫描等<sup>[13]</sup>。平面扫描易存在视觉盲区,使得检测的可靠性受到质疑。而斜下视圆周扫描受限于扫描视线影响所获取信息量不及圆周柱面扫描。圆周柱面扫描模式的扫描范围能够实现人体表面全方位均分辨成像,无视觉盲区且重建覆盖范围足够大,整体性能优于其他扫描模式<sup>[14]</sup>。

本文采用圆周柱面扫描模式,开展时频调和型三维重建算法研究。圆周柱面扫描工作方式可采用一维阵列天线电扫描与一维机械扫描相结合形成虚拟二维孔径阵面。在高度维天线阵元排布上,利用等效相位中心原理将双基阵元等效单基阵元方式,即在任意时刻有且仅有一个阵列单元处于发射工作状态,而存在两个阵列单元处于接收状态<sup>[15]</sup>。其原理相当于在每两个相邻的天线阵元中间插入一个新的虚拟阵元。但由于利用等效相位中心原理,需要考虑阵元间的互耦效应,经分析可知,当等效相位中心对回波信号相位的影响是在中间等效位置产生为 $1^\circ$ 左右的相位误差,此时的相位误差可忽略不计<sup>[16]</sup>。圆周柱面扫描模式示意图如下图1所示。假设,阵列天线高度维一共分布 $N_n$ 个阵列单元天线,按照上述收发方式,高度维等效 $2N_n - 1$ 个单基天线自收自发。因此,这样的等效方式一方面迅速扩充天线通道数目,另一方面利用较少的天线接收更多的回波数据,大大节约收发系统天线阵元的硬件成本。

#### 1.1 步进频信号模型

为了避免瞬时大带宽时宽信号调制困难的问题,通过步进频调频连续波(Stepped Frequency Mod-

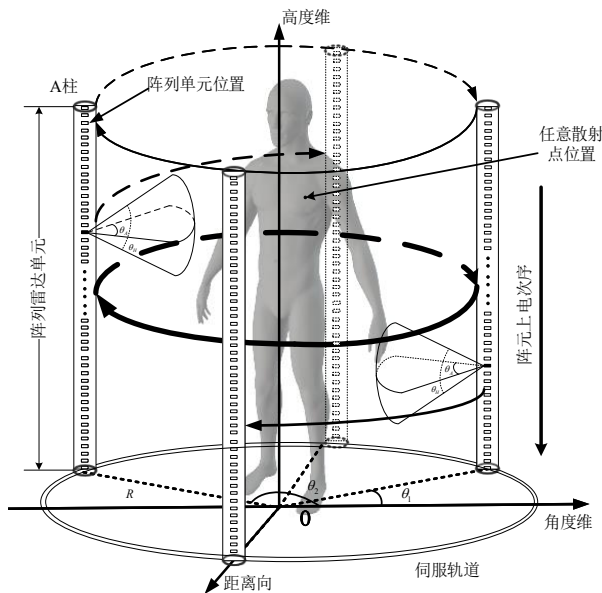


图1 圆周柱面扫描模式

Fig. 1 Mode of circular cylinder scanning

ulation Continue Wave, SFMCW)发射信号<sup>[17]</sup>。步进频(Stepped Frequency, SF)信号的距离维高分辨是将回波信号进行解线性频调处理,在每个子时间段内完成采样,将采集的频点按顺序排列起来,最后利用离散傅里叶逆变换完成距离维脉冲压缩<sup>[18]</sup>。步进频调频连续波发射信号模型如图2所示。

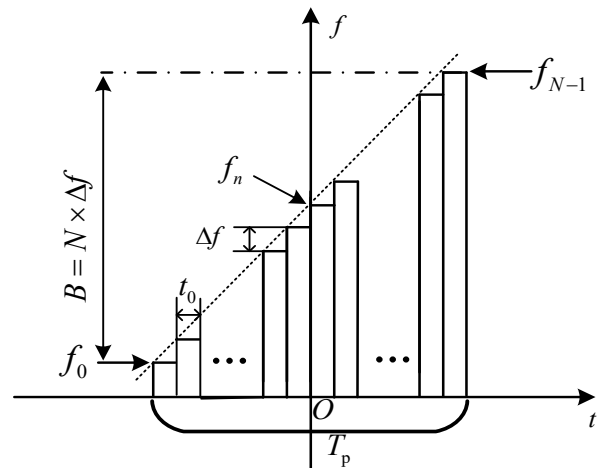


图2 步进频调频连续波信号

Fig. 2 Signal of stepped frequency modulation continuous wave

上图中 $f_0$ 与 $f_{N-1}$ 为步进频信号始末频率, $\Delta f$ 、 $f_n$ 、 $T_p$ 与 $f_c$ 分别表示频率间隔、第 $n, n \in [0, N - 1]$ 个频点频率、步进频信号时宽与信号中心频率,SF信号频带合成的信号带宽为 $B = N \times \Delta f$ 。阵列天线单元



发射步进频信号的第  $n$  个频点的信号表达式可以写为:

$$s_n(t, f_n) = \text{rect}\left(\frac{t}{t_0}\right) \exp(j2\pi f_n t) \quad , \quad (2)$$

式(2)中,  $t = n \times t_0$  表征距离维快时间与  $j = -1$  表征虚数单位,  $t_0$  表征单一子脉冲持续时间, 故经过重建场景中任一散射点回波延时所获得的回波表达式可写为:

$$s_i(t, f_n) = \sum_i \delta_i \cdot G \cdot \text{rect}\left(\frac{t - 2R_i/c}{t_0}\right) \times \exp\left[j2\pi f_n \left(t - \frac{2R_i}{c}\right)\right] \quad , \quad (3)$$

式(3)中,  $R_i, \delta_i$  与  $G$  分别表征第  $i$  个点目标与天线的距离、目标点散射强度与信号包络。为了完成解线性频调处理, 引入参考距离  $R_{\text{ref}}$  构造参考信号, 参考信号表达式可以表示为:

$$s_{\text{ref}}(t, f_n) = \sum_i G \cdot \text{rect}\left(\frac{t - 2R_{\text{ref}}/c}{t_0}\right) \times \exp\left[j2\pi f_n \left(t - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)\right] \quad , \quad (4)$$

对式(3)经过解线性频调接收后的差频回波信号表达式:

$$s_{\text{if}}(t, f_n) = s(t, f_n) \times s_{\text{ref}}^*(t, f_n) = \sum_i \delta_i \cdot G \cdot \text{rect}\left(\frac{t - 2R_{\text{ref}}/c}{t_0}\right) \times \exp\left[-j \frac{4\pi f_n}{c} (R_i - R_{\text{ref}})\right] \quad , \quad (5)$$

式(5)中,  $s_{\text{ref}}^*(t, f_n)$  表征参考信号的共轭形式。通过采样将各子时间段内的频点按照各个频点对应的数据大小排列起来, 回波信号可以表示为:

$$s_{\text{if}}(t) = \sum_i \delta_i \cdot G \cdot \exp\left[-j \frac{4\pi(f_c + \gamma t)}{c} (R_i - R_{\text{ref}})\right] \quad , \quad (6)$$

式(6)中,  $\gamma = \Delta f/t_0$  与线性调频信号的调频率相似, 表征 SF 信号频率的变化快慢。

## 1.2 三维回波信号模型

阵列天线在伺服系统的牵引下按照“停-走-停”方式, 依次沿圆周柱面轨道旋转直至完成三维回波数据收集。阵列天线一共旋转  $U$  次, 阵列天线的阵元数量为  $M$ , 当阵列天线旋转至某一角度维位置  $P_u (u \in [0, U-1])$  时, 阵列天线上第  $m, m \in [0, M-1]$  个阵元发射的第  $n$  点信号表达式同式(2)。由于安检场景的成像范围较小, 故不考虑发射信号随传播距离的衰减和阵元与目标之间的相互作用<sup>[19]</sup>, 故

接收的点目标总回波信号表达式为:

$$s_{P_u}(t, f_n, m) = \sum_i G(m) \cdot \text{rect}\left[\frac{t - 2R_i(m)/c}{t_0}\right] \times \exp\left\{j2\pi f_n \left[t - \frac{2R_i(m)}{c}\right]\right\} \quad , \quad (7)$$

对于第  $i$  个点目标其高度为  $Z_i$ , 该点目标沿径向方向距离阵列天线的最短距离为  $R_{B_i}$  且  $\Delta z$  为天线通道的间距, 根据第  $m$  个阵元与第  $i$  个点目标的空间几何关系可以得出其斜距历程为:

$$R_i(m) = \sqrt{R_{B_i}^2 + (m \times \Delta z - Z_i)^2} \quad , \quad (8)$$

通过引入参考距离  $R_{\text{ref}}$  构造参考信号(为了简化计算过程与验证重建算法的有效性, 将参考斜距设置为 0, 此时三维重建中心与场景中心重合形成距离零值点)<sup>[20]</sup>。经过接收端 A/D 采样后, 将各个频点对应的回波数据按照频点排列起来, 可以得到回波信号表达式为:

$$s_{P_u}(t, m) = \sum_i \delta_i \cdot G(m) \times \exp\left\{-j \frac{4\pi(f_c + \gamma t)}{c} [R_i(m) - R_{\text{ref}}]\right\} \quad , \quad (9)$$

此时, 式(9)表示仅角度维位置为  $P_u$  时距离-高度截面二维回波数据。依据“维度分解-算法调和”策略, 收集三维回波数据需要将式(9)沿角度维进行组合, 距离-高度截面的解耦与聚焦和距离-角度维截面相干积累将在第二节进行分析, 因此, 组合后的三维回波信号模型表达式可以写为式(10), 并且,  $\coprod$  表征三维回波数据由二维截面回波数据组合而成。

$$s_{3D}(t, m; u) = \coprod_u [s_{P_u}(t, m)] \quad . \quad (10)$$

## 2 时频调和型三维重建算法

本文所采用的“维度分解-算法调和”策略, 首先是将三维立体重建问题通过维度分解处理得到两个易于求解的二维平面成像问题, 之后调和全局重建算法, 利用频域 RMA 算法的计算优势填补时域 BP 算法计算负担的缺陷。与此同时, 时域 BP 算法利用成像精确与构型灵活的特点补偿频域 RMA 算法在重建精度与扫描构型上的缺失。

### 2.1 距离-高度维聚焦成像

根据圆周柱面扫描模式, 距离-角度维扫描是在伺服系统带动下的非线性机械扫描, 此截面成像处理不符合频域成像算法对线性轨迹的严格要求<sup>[21]</sup>。但基于“维度分解”, 仅在高度维线性阵列流

型下使用频域RMA成像算法是可行的。因此,在某个角度维接收时刻,式(9)中的距离-高度维回波信号在距离波数域下可以表述为:

$$s(K_r, m) = \sum_i \delta_i \cdot G(m) \times \exp\{-jK_r[R_i(m) - R_{ref}]\} \quad (11)$$

式(11)中,  $K_r = 4\pi(f_c + \gamma t)/c$  为距离频率对应的波数变量,即距离频率在三维空间的表征。由于发射信号选取的是步进频信号,其在距离维进行的脉冲压缩为解线性频调操作,因此在完成距离压缩后,其距离维聚焦域为频域,而频域RMA算法主要操作集中在二维波数域,故仅需要对式(11)沿高度维做傅里叶变换,得到距离-高度截面二维波数域回波信号。在求解此二维波数域信号表达式过程中,此积分表达式难以得到简洁的解析形式<sup>[22]</sup>,分析可知被积函数为包络缓变信号,对积分结果有影响的相位存在于频率为零的平缓位置,故采用驻定相位原理(Principle of Stationary Phase, POSP)求解出二维波数域信号解析表达式,其二维波数谱表达式如下:

$$S(K_r, K_z) = \sum_i T_i(K_r) \cdot G(K_z) \cdot \exp(jK_r R_{ref}) \times \exp\left(-j\sqrt{K_r^2 - K_z^2} R_{Bi} - jK_z Z_i\right) \quad (12)$$

式(12)中相位第一项利用  $\exp(-jK_r R_{ref})$  函数进行补偿,而剩余待补偿项则为:

$$\phi_{rc}(K_r, K_z) = -j\sqrt{K_r^2 - K_z^2} R_{Bi} - jK_z Z_i \quad (13)$$

式(13)的第一项是距离-高度耦合产生的距离徙动(Range Cell Migration, RCM),表征目标点与阵元之间的斜距弯曲变化<sup>[23]</sup>。该部分会使得回波信号在距离压缩域呈现近似二次曲线进而影响高度维聚焦,因此需要对此耦合相位项进行解耦合。同时为了使图像位于图幅中心,需要完成中心点的聚焦操作,通过对二维波数谱信号作中心点匹配滤波完成一致压缩操作,中心点匹配滤波函数具体表达式为  $\exp(j\sqrt{K_r^2 - K_z^2} R_s)$ 。于是,经中心点匹配滤波后的距离-高度二维截面波数域表达式可写为:

$$S(K_r, K_z) = \sum_i T_i(K_r) \cdot G(K_z) \times \exp\left(-j\sqrt{K_r^2 - K_z^2} \Delta R - jK_z Z_i\right) \quad (14)$$

式(14)中,  $\Delta R$  表示沿径向方向目标点到参考坐标系高度轴的距离,  $\Delta R = R_s - R_{Bi}$ 。  $R_s$  为参考坐标系高度轴到天线阵列最短距离,其大小等于圆周柱面扫描模式下阵列天线的旋转半径。为了完成距离-高

度二维平面聚焦,需要把二维波数域信号变换为二维时域,即对式(14)做二维逆傅里叶变换。但是,由于耦合相位没有妥善处理,使得高度维匹配滤波失败从而出现严重的图像散焦现象。因此,在二维傅里叶逆变换前,需要对距离-高度维二维波数域信号沿高度维进行距离徙动校正<sup>[24]</sup>(Range Cell Migration Correction, RCMC)。式(14)中的第一项相位表征距离徙动量,第二项表示目标点的高度维位置。通过插值变量代换引入  $K_r'$  变量对式(14)中的耦合项进行解耦,采用的方式为 Stolt 映射(Stolt Mapping, SM)<sup>[25]</sup>,其映射表达式如下所示:

$$\begin{cases} \sqrt{K_r^2 - K_z^2} \rightarrow \sqrt{(K_r')^2 - K_z^2} \\ K_r' = \sqrt{(\Delta K_r + \sqrt{K_{rc}^2 - K_z^2})^2 + K_z^2} \\ \Delta K_r = K_r - \frac{4\pi f_c}{c} = K_r - K_{rc} \end{cases} \quad (15)$$

经过 Stolt 映射插值变量代换后的距离-高度二维耦合表达式(14)可以重新表示为:

$$S(K_r, K_z) = \sum_i T_i(\Delta K_r) \cdot G(K_z) \times \exp(-j\Delta K_r \Delta R - jK_z Z_i) \times \exp\left(-j\sqrt{K_{rc}^2 - K_z^2} \Delta R\right) \quad (16)$$

对比式(14)与式(16),可以明显发现距离徙动耦合相位部分得到解耦分离。但由于插值变量代换不可避免地引入的误差相位项,  $\exp(-j\sqrt{K_{rc}^2 - K_z^2} \Delta R)$ ,故需要对其进行补偿防止影响后续重建精度。同时,为了后续时域BP成像算法在距离-角度截面上的应用,故应加入角度维补充相位  $\exp(-jK_{rc} \Delta R)$  以满足三维重建需求。并通过对式(16)进行插值误差相位补偿与角度维补充相位的引入,式(16)可以重新表示为:

$$\begin{aligned} S(\Delta K_r, K_z) &= S(K_r', K_z) \times \\ &\exp\left(j\sqrt{K_{rc}^2 - K_z^2} \Delta R - jK_{rc} \Delta R\right) \\ &= \sum_i T_i(\Delta K_r) \cdot G(K_z) \times \exp(-jK_{rc} \Delta R) \times \\ &\exp(-j\Delta K_r \Delta R - jK_z Z_i) \end{aligned} \quad (17)$$

对式(17)进行二维逆傅里叶变换,使得进行沿距离维的逆傅里叶变换可以让不同距离位置的点目标被区分,而沿高度维进行逆傅里叶变换使得不同高度位置的点目标得以区分开,最后,经过解耦与聚焦处理后的单一角度维位置的距离-高度二维聚焦

截面表达式可以写为:

$$s(t, Z) = \sum_i T_i \cdot \text{sinc}(t - \Delta t) \times \text{sinc}(Z - Z_i) \times \exp(-jK_r \Delta R) \quad (18)$$

式(18)中,  $\Delta t$  表示同一水平截面上目标点距离参考坐标轴之间的双程时延,  $\Delta t = 2\Delta R/c$ 。至此, 阵列天线在角度位置  $P_u$  完成距离-高度二维截面的解耦与聚焦操作, 即将转动到下一角度位置  $P_{u+1}$  重复上述操作以实现其他距离-高度截面的解耦与聚焦。但是, 在此角度维位置时刻的阵列天线仍然无法有效地分离沿角度维分布的目标点。因此, 下一节将在距离-角度维截面应用时域 BP 算法实现角度维的散射点相干积累。

## 2.2 距离-角度维聚焦成像

时域 BP 成像算法具有较强的轨迹适应能力, 能够在任意非线性轨迹下对目标实现无近似精准聚焦<sup>[26]</sup>。在时域 BP 成像处理过程中, 由于成像分辨率与成像网格划分有关, 因此当成像网格划分越密时其通过时域 BP 算法的图像的成像分辨率也更高。因此, 将距离-角度维脉压数据与成像网格单位逐点匹配将会带来极大的运算负担<sup>[27]</sup>。为了保障三维重建的有效实现, 通过层析方式对每一个距离-角度截面进行投影成像, 之后沿高度维将各距离-角度截面堆叠。在投影成像过程中, 根据角度维转台模型分析, 如下图 3(a) 所示, 当阵列天线旋转至  $\theta_3$  时, A、B 散射点处于同一距离门但存在于不同的角度维位置, 而当阵列天线单元旋转至  $\theta_4$  时, A、B 两点到阵列单元的斜距历程发生变化。

针对这一现象分析得出, 阵列天线匀速转动时, 处于同一截面的不同散射点到该截面所对应的阵元有着不同的斜距历程, 其斜距历程变换关系可以表示为如下图 3(b) 所示的斜距历程函数图。当阵列天线转轴旋转至  $\theta_3$  位置两点斜距相同, 两轨迹相交于一点, 当阵列天线转动至  $\theta_4$  时 A、B 轨迹错开斜距历程不再一样, 即通过时域 BP 算法操作可以实现有效的区分。

时域 BP 算法需要对距离-角度维截面作二维匹配滤波处理完成聚焦操作<sup>[28]</sup>, 但由于上节已完成距离维的聚焦操作, 故在本节仅需要处理阵列天线在角度维旋转所引起的多普勒延时相位与角度维相干积累。实际算法处理过程中, 依据层析切片处理, 将三维目标沿单基天线等效相位中心划分  $2N_n - 1$  个距离-角度维水平切面, 相邻截面间距与

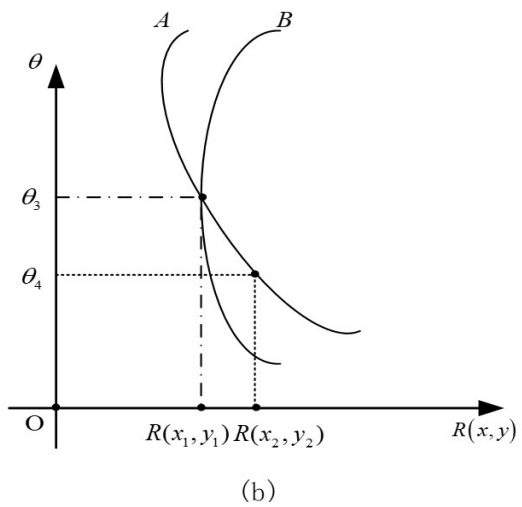
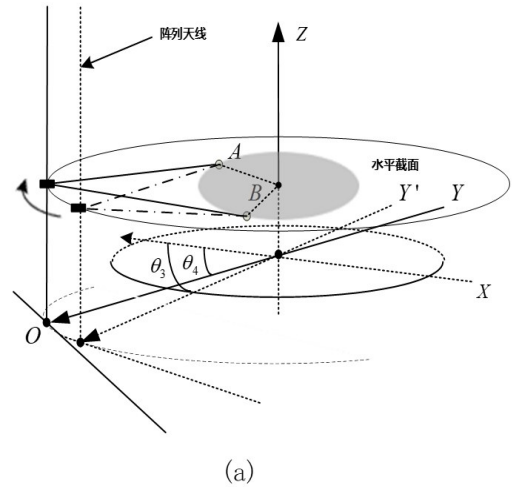


图3 距离-角度截面散射点运动轨迹分析图(a) 转台模型几何关系图, (b) 不同转动角度散射点的斜距历程图

Fig. 3 Movement trajectory analysis diagram of range-angle dimensional section (a) geometry of rotary table, (b) range history of scattered points at different rotation angles

天线通道之间等效间距相等。对于每一个成像切面, 利用成像网格上的像素点与天线阵元的几何关系计算出距离延时因子, 并利用延时因子构造多普勒相位补偿项来进行相位补偿<sup>[29]</sup>。在成像处理过程中, 距离压缩域数据是以离散形式存储, 因此, 距离延时因子因离散化后难以准确匹配到采样点, 为此对距离压缩域数据沿距离维进行插值重采样以确保实施准确的相位补偿。插值重采样选取频率插值的方式, 可以直接将该角度维时刻对应的距离压缩域数据乘以该时刻的多普勒相位补偿式, 并将不同角度维时刻经过相位补偿后的信号进行相干



累加即可得到目标点散射系数。对于每一个距离-高度截面来说,其聚焦表达式可以忽略其高度维聚焦,即:

$$s(t, \theta) = \sum_i T_i \cdot \text{sinc}(t - \Delta t) \times \exp(-jK_{rc} \Delta R). \quad (19)$$

设某一散射点的散射函数 $f(x, y)$ ,将该点经角度维相干积累后,位于 $(x_i, y_j)$ 处点目标的散射点函数表达式表示为:

$$f(x_i, y_j) = \int s(t, \theta) \times \exp[jK_{rc} R_v(\theta)] d\theta, \quad (20)$$

式(20)中,假设阵列天线旋转角度为 $\theta_1$ ,则 $R_v(\theta)$ 是成像截面网格点坐标 $(x_i, y_j)$ 到阵列雷达天线单元的斜距历程, $R_v(\theta_1) = \sqrt{(R_s \cos \theta_1 - x_i)^2 + (R_s \sin \theta_1 - y_j)^2}$ 。式(20)为角度维时域BP算法的相干积累过程。通过将天线通道对应的距离-角度维截面重复进行上述积分步骤完成三维重建操作。其三维重建表达式如下:

$$s(t, Z, \theta) = \int \text{sinc}(t - \Delta t) \times \text{sinc}(Z - Z_i) \times \exp\{jK_{rc}[R_v(\theta) - \Delta R]\} d\theta. \quad (21)$$

最后,依据“维度分解-算法调和”思想,完成距离-高度维与距离-角度维两个二维截面聚焦成像处理,因此,对于旅客人身安检应用场景,采用上述时频调和型三维重建算法可以获取人体三维重建响应函数。

### 2.3 时频调和型重建算法流程

目标重建过程可以理解为针对目标三维回波求解其逆问题,图4为时频调和型三维重建算法流程。依据“维度分解-算法调和”策略,其主要包括距离-高度维频域RMA的解耦与聚焦、距离-角度维时频BP的相干积累。具体如下,首先将三维回波分解为多个二维截面回波进行处理,即式(7)所示。通过对距离维步进频回波信号进行解线性频调处理式(5),由于距离-高度维采用频域RMA,故将距离频率通过距离波数变量进行替换。其次,沿高度维进行傅里叶变换并通过POSP求解得到距离-高度二维波数域回波如式(12),式中的耦合相位将采用SM进行解耦操作如式(15)与(16),之后进行二维傅里叶逆变换得到二维聚焦如式(18)。最后,针对角度维补充相位进行多普勒延时相位补偿与角度维时刻相干积累即式(20),完成后得到三维聚焦表达式(21),此时二维截面通过组合实现三维重建即式(10)。

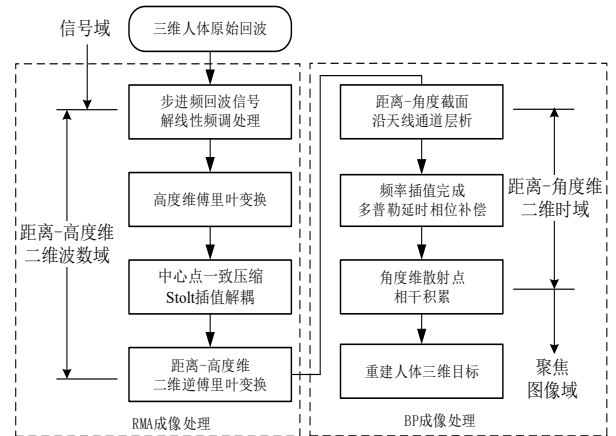


图4 时频调和型三维重建算法流程

Fig. 4 Flow chart of time-frequency coordination 3D reconstruction algorithm

## 3 仿真与实测

### 3.1 仿真数据验证

为了验证时频调和型三维重建算法的可行性,本文利用立方体模型对所提算法的重建效果进行验证。阵列天线发射步进频信号并接收反射系数均为1且尺寸大小为 $0.4\text{ m} \times 0.4\text{ m} \times 0.4\text{ m}$ 的立方体三维回波进行仿真重建。立方体模型位于空间原点,且阵列天线以固定的角速度围绕立方体模型进行圆周柱面扫描。圆周柱面阵列天线实验台仿真相关参数如下表1所示。空间散射点分布如图5(a)所示,对图5(a)的立方体散射点回波进行三维重建恢复。为了便于观察将重建立方体应用沿距离维最大值投影方法实现对高度-角度截面二维投影成像,其立方体沿着距离维在高度-角度维的投影成像图如图5(b)所示。

表1 阵列天线试验台参数

Table 1 Parameters of array antenna testbed

项目	参数值
工作频率	35 GHz
合成带宽	9.6 GHz
目标距离	0.8~1.2 m
方位波束角	75°
俯仰波束角	60°
单脉冲簇采样点数	96
旋转半径	0.75 m
图像动态范围	≥50 dB

进一步验证本文所提时频调和型三维重建算法的理论正确性,选取空间立方体仿真模型中的A1

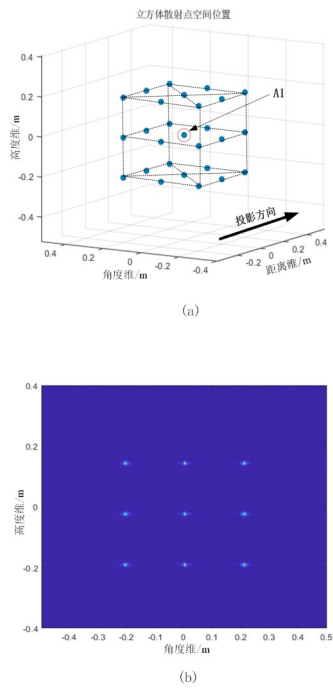


图5 空间立方体模型仿真实验 (a) 立方体模型散射点图, (b) 时频调和型三维重建算法下的立方体高度-角度维成像图  
 Fig. 5 Simulation experiment of space cube model (a) scatters of cube model, (b) imaging cube with height-angle dimension under time-frequency coordination 3D reconstruction algorithm

散射点进行分析。其中,角度维与高度维的采样间距均为 $\Delta Y=\Delta Z=4.8\text{ mm}$ 。同时,对A1散射点进行八倍插值下的高度维与角度维归一化剖面操作,其角度与高度维剖面图、高度-角度截面等高线图与该点冲激响应三维图,如图6(a)、(b)、(c)、(d)所示。

从图6(a)与图6(b)的高度维与角度维八倍插值所得到归一化剖面图分析,并通过半功率点对应带宽准则进行判断可以得出,其中,立方体中的A1散射点的角度维与高度维实际分辨率分别约为6 mm与7.2 mm,立方体点仿真实验达到理论分辨率。图6(c)与图6(d)两图可以看出所提算法对A1散射点的重建效果良好。图7所示的是立方体模型在三维空间的重建恢复。根据测算可以得出三维重建后的立方体在高度、角度与距离维长度分别约为:0.43 m、0.39 m与0.46 m。根据上述计算所得,立方体三维重建仿真与图5(a)中实际的立方体模型尺寸 $0.4\text{ m}\times 0.4\text{ m}\times 0.4\text{ m}$ 大小近似。三维重建立方体仿真实验与分析可以证明所提时频调和型三维重建算法可以得到较为良好的准确率且其准确率达到毫米级别。

为确定所提时频调和型三维重建算法在实际工程应用中具备良好的三维重建效果,利用等比例三维人体点云模型进行仿真验证,仿真实验的系统

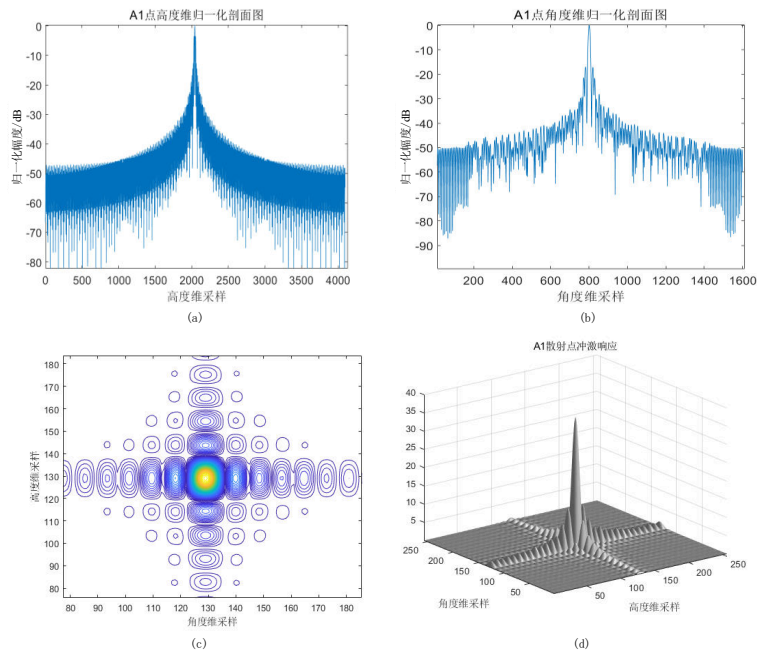


图6 时频调和型三维重建算法下立方体A1散射点仿真实验 (a) 高度维剖面图, (b) 角度维剖面图, (c) A1散射点等高线图, (d) A1散射点三维冲激响应图  
 Fig. 6 Simulation results of scattering A1 with cube under time-frequency coordination 3D reconstruction algorithm (a) section of height dimension, (b) section of angle dimension, (c) contour map of A1, (d) three-dimensional impulse response diagram of scattering A1



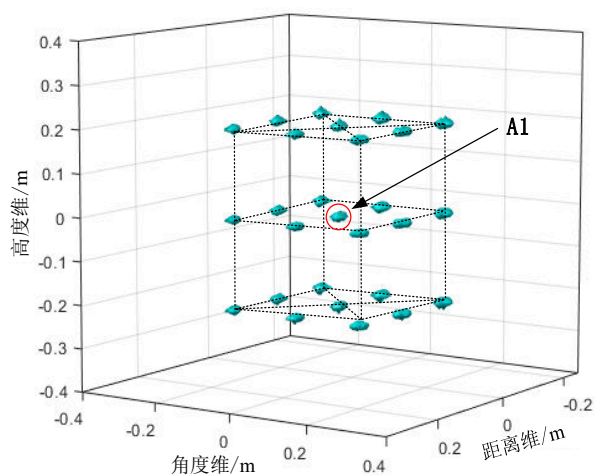


图7 时频调和型三维重建算法下空间立方体三维重建图  
Fig. 7 Three-dimensional reconstruction of cube mode under time-frequency coordination 3D reconstruction algorithm

参数如表1所示。其中,设置等比例三维人体点云模型身高约为1.6 m,自然垂直摆臂状态下其人体正面宽度约为0.6 m,人体侧面宽度约为0.25 m,模拟三维人体点云散射点模型如下图10所示。在仿真实验过程中,阵列天线以0.75 m为半径进行匀速圆周转动,其每次转动角度为 $0.32^\circ$ ,同时天线收发系统沿高度维方向依次上电工作后,沿角度维方向

进行旋转。

由于该人体模型是由空间散射点所组成,其各个部分的疏密程度不均匀也同样模拟不同的人体部位有着不一样的散射强度。将重建后的人体点云三维模型沿距离维进行投影成像,如图8(b)所示,得到的高度-角度维投影成像聚焦效果良好,证明本文所述的时频调和型三维重建算法的有效性。接下来,为了验证人体多角度细节重建情况与图8(a)中的三维人体点云模型是否一致,利用本文所提算法得到的人体模型三维重建图如下图8(c)所示。对比人体三维重建图的结果(图8(c))与三维人体点云模型(图8(a))可见,人体三维重建图与三维人体点云模型基本符合。

### 3.2 实测数据验证

为了验证本文所提时频调和型三维重建算法相比于仅时域BP三维重建算法在重建效率上的优越性。在实测实验上采用人体实测三维回波数据进行验证,系统参数如表一所示。得到人体正面与背面不同角度时刻的三维重建下的沿距离维投影成像图,如下图9(a)与图9(b)所示。

由图9(a)与图9(b)可以看出,二维投影成像聚焦效果良好。实测人体面部五官结构清晰,躯干部分的腹部、股部以及背部的纹理清晰且腿部关节分

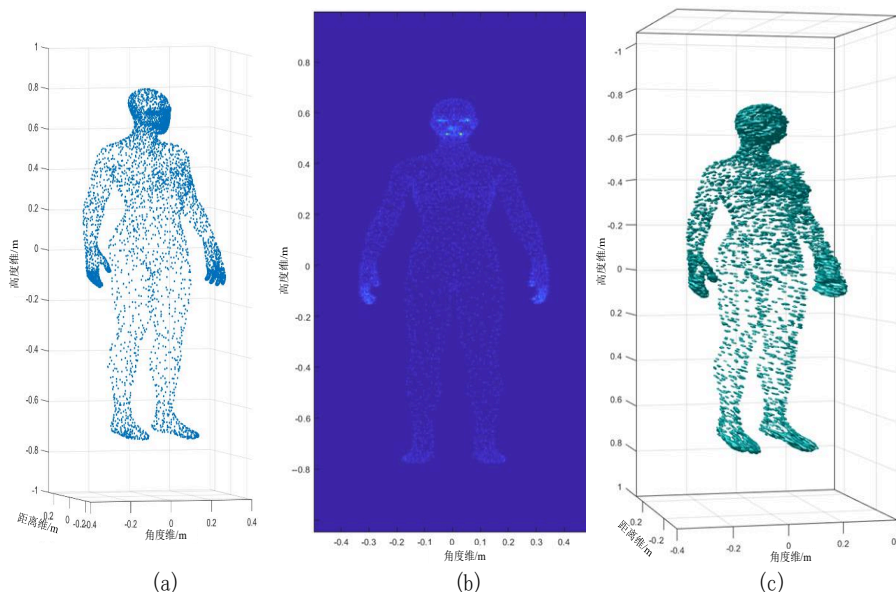


图8 时频调和三维重建算法人体模型仿真实验 (a) 仿真人体点云三维模型图, (b) 时频调和型三维重建算法下的高度-角度维人体点云投影成像图, (c) 时频调和型三维重建算法下的人体三维重建图

Fig. 8 Simulation experiment of human body model under time-frequency coordination 3D reconstruction algorithm (a) three-dimensional point cloud model of human body, (b) projection imaging of human body in height-angle dimension with time-frequency coordination 3D reconstruction algorithm, (c) three-dimensional reconstruction of human body under time-frequency coordination 3D reconstruction algorithm

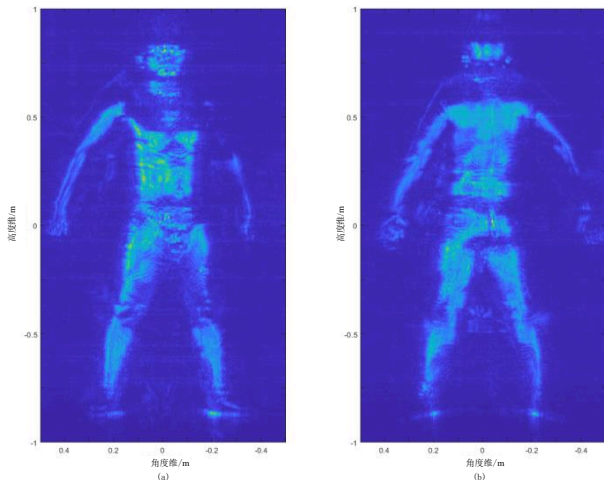


图9 时频调和型三维算法实测人体回波数据处理实验图 (a) 时频调和型算法下人体三维重建正面成像图, (b) 时频调和型算法下人体三维重建背面成像图

Fig. 9 Experimental figures of human raw echo data processing under back projection 3D reconstruction algorithm (a) imaging result of front of human body by time-frequency coordination 3D reconstruction algorithm, (b) imaging result of back of human body by time-frequency coordination 3D reconstruction algorithm

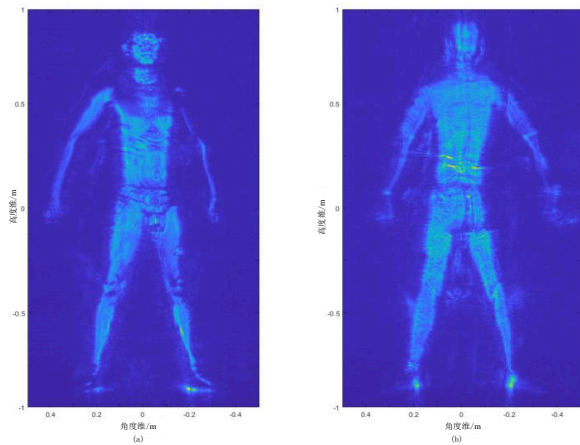


图10 时域BP三维算法实测人体回波数据处理实验图 (a) 时域BP重建算法下的人体三维重建正面成像图, (b) 时域BP重建算法下的人体三维重建背面成像图

Fig. 10 Experimental figures of human raw echo data processing under time domain back projection 3D reconstruction algorithm (a) imaging result of front of human body by time domain back projection 3D reconstruction algorithm, (b) imaging result of back of human body by time domain back projection 3D reconstruction algorithm

明。容易藏匿危爆品的关键部位如人体大小腿内侧、人体后背的脂肪堆积缝隙成像清晰。下图10(a)与图10(b)是仅时域三维BP重建算法所得的三

维重建恢复下沿距离维人体正面与背面投影成像图。依据时域成像算法的相关理论可以得出,仅时域BP三维重建算法有着重建精度高的优点,但重建高精度是牺牲大量的计算效率,为三维重建带来了极大的运算负担。图11(a)与图11(b)为三维时频域调和型重建算法下的人体实测数据三维重建恢复,从下图可以看出,三维重建恢复后的人体目标的整体结构仍然较为完整,并且人体三维重建的相关关键部位的细节得到重建。图12(a)与图12(b)为时域BP三维重建算法下的人体实测数据三维重建恢复,从下图可以看出,在三维重建人体结构细节上,人体后脑以及脖子部分,时域BP三维重建算法很好地恢复出人体结构,突出了其三维重建精度高、重建质量好等优点。但是其重建质量的提升是以牺牲重建效率为代价的,因此,在实际安检应用中,三维重建算法应尽可能地平衡重建精度与重建效率使其达到平衡状态。在毫米波人体安检应用场景中,三维重建恢复能够更有效地提高筛查危爆品的检出率,且更加易于机场安检人员发现恐怖分子刻意利用身体部位隐匿违禁刀具和枪支等危爆品。

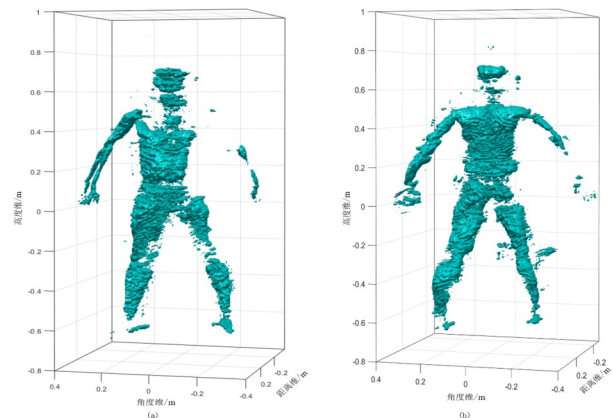


图11 时频调和型三维算法实测人体回波三维重建图:(a) 时频调和型算法下人体三维重建正面图, (b) 时频调和型算法下人体三维重建背面图

Fig. 11 3D Reconstruction of raw data with human body under back projection 3D reconstruction algorithm: (a) reconstruction result of front of human body by back projection 3D reconstruction algorithm, (b) reconstruction result of back of human body by back projection 3D reconstruction algorithm

根据上述实测实验,时频调和型三维重建算法在成像精度上基本达到了仅时域BP三维重建的精度,且容易隐藏的关键部位同样成像清晰。但通过

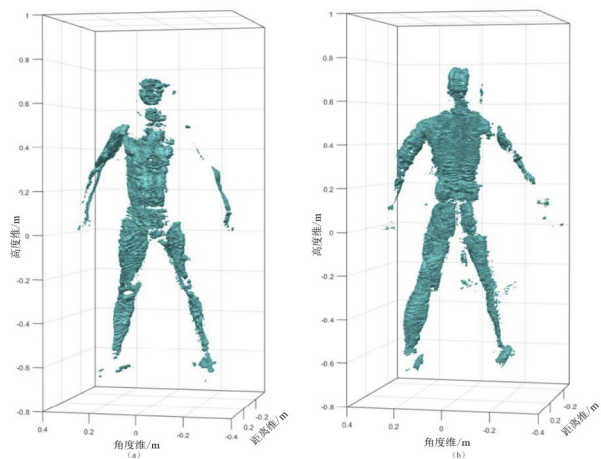


图 12 时域 BP 三维算法实测人体回波三维重建图 (a) 时域 BP 三维重建算法下人体三维重建正面图, (b) 时域 BP 三维重建算法下人体三维重建背面图

Fig. 12 3D Reconstruction of raw data with human body under back projection 3D reconstruction algorithm (a) reconstruction result of front of human body by back projection 3D reconstruction algorithm, (b) reconstruction result of back of human body by back projection 3D reconstruction algorithm

运算复杂度分析可知,假设空间三维成像区域的像素点数为  $M_x$ 、 $M_y$  与  $M_z$ , 三维回波数据在距离、角度与高度维的采样点数为  $P_R$ 、 $P_A$  与  $P_H$ 。时域 BP 三维重建算法的运算操作数为  $M_x \times M_y \times M_z \times P_A \times P_H$ , 而所提调和算法的运算操作数主要集中在距离-角度维时域 BP 投影操作上,其大小为  $M_x \times M_y \times M_z \times P_A$ 。进而通过对比所提算法与时域 BP 三维重建算法的运算操作数可以得出其运算计算量大小为  $O[\log_2(P_R) \cdot 2 \log_2(P_H) \cdot P_A^2]$ , 而时域 BP 三维重建算法的运算计算量大小为  $O[P_R \cdot P_H^2 \cdot P_A^2]$ , 从运算量和复杂度等因素来看,所提算法明显降低了运算量和复杂度。因此,可以得出本文所提时频调和型三维重建算法虽然牺牲了一些非关键部位的成像精度,但有效加快三维重建效率,给旅客人身安检下近实时三维重建恢复带来了可能。

## 4 总结

本文面向旅客人身安检场景下近场高分辨三维重建,针对传统仅时域或频域三维重建算法所存在的相关问题,基于“维度分解-算法调和”的策略,提出步进频体系下时频调和型毫米波三维重建算法。引入发射成本较低的 SF 信号来代替常见的线性调频信号。主要是将传统的三维重建算法做出平衡折中处理,依据聚焦维度具体属性,通过分解

维度并全局调和算法。所提算法一方面利用频域 RMA 的高效性的优势,另一方面引入时域 BP 算法进而保证重建精确性且实现扫描模式的灵活构型。最后,实验部分利用三维点云模型仿真实验验证算法可行性,并通过实测人体三维回波数据对比时频调和型三维重建算法与仅时域 BP 三维重建算法的重建效果,分析两种算法的运算消耗量与重建精度,验证所提算法的有效性与优越性。但是,在利用所提算法处理人体三维实测回波数据中发现一些非关键部位仍然存在一些虚影与模糊现象,对后续的认识检测可能存在影响,使得心存侥幸的恐怖分子利用此漏洞,对航空安全造成威胁,将在之后的研究中不断改进优化。

## References

- [1] MA Zhao-Hui, WANG Jing-Yang, JING Han-Dan, *et al.* Millimeter wave security imaging based on single-channel MIMO radar [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2020, **39**(6): 709-717. (马朝辉, 王晶阳, 敬汉丹, 等. 基于单通道 MIMO 雷达的毫米波安检成像. *红外与毫米波学报*), 2020, **39**(6): 709-717.
- [2] Wang C J, Sun X W, Yang K H. A low-complexity method for concealed object detection in active millimeter-wave images [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2019, **38**(1): 32-38.
- [3] YU Yang, YOU Yan, CHEN Xu-Dong, *et al.* Research on the MIMO short-range imaging mechanism of millimeter wave for fast and accurate reconstruction [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2021, **40**(5): 638-646. (于洋, 游燕, 陈旭东, 等. 可快速精确重建的毫米波 MIMO 近距离成像机制研究. *红外与毫米波学报*), 2021, **40**(5): 638-646.
- [4] JIANG Ge, LIU Jie, JING Wen, *et al.* A range-doppler algorithm for holographic radar imaging [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2017, **36**(3): 367-375. (江舸, 刘杰, 经文, 等. 基于距离多普勒概念的全息雷达成像算法. *红外与毫米波学报*), 2017, **36**(3): 367-375.
- [5] XIE Peng-Fei. Millimeter Wave Human Body Three-Dimensional Imaging and Target Detection [D]. XI'AN: XIDIAN University, 2019. (谢鹏飞. 毫米波人体三维成像及目标检测 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- [6] MENG Yang. Research on Fundamental Theory and Key Techniques of Millimeter Wave Imaging Security Inspection System [D]. CHENDU: Electronic Science and Technology University, 2021. (孟杨. 毫米波成像安检系统基础理论及关键技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
- [7] Wang J P, Aubry P, Alexander Y. 3-D Short-Range Imaging With Irregular MIMO Arrays Using NUFFT-Based Range Migration Algorithm [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, **58**(7): 4730-4742.
- [8] TAN Wei-Xian, HONG Wen, WANG Yan-Ping. The three-dimensional imaging algorithm of the surface microwave is based on the wave number domain integral [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, **31**(11): 2541-2545. (谭维贤, 洪文, 王彦平. 基于波数域积分的人体表面微波三维成像算法研究 [J]. *电子与信息*



- 学报), 2009, **31**(11): 2541–2545.
- [9] Lin Y, Hong W, Tan W X. Extension of range migration algorithm to squint circular SAR imaging [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, **8**(4): 651–655.
- [10] Huang Y, Liu F Y, Chen Z-Y, et al. An Improved Map-Drift Algorithm for Unmanned Aerial Vehicle SAR Imaging [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2021, **18**(11): 1–5.
- [11] Akbarpour A, Somayyeh C. Ultra-wideband Circularly Polarized Antenna for Near-Field SAR Imaging Applications [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, **68**(6): 4218–4228.
- [12] Shao S A, Liu H W, Zhang L, et al. Three-Dimensional InSAR Imaging of Maneuvering Targets With Joint Motion Compensation and Azimuth Scaling Under Single Baseline Configuration [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, **19**: 1–5.
- [13] Naghibi A, Amir R A. Near-Field Radar-Based Microwave Imaging for Breast Cancer Detection: A Study on Resolution and Image Quality [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, **69**(3): 1670–1680.
- [14] Wu S Y, Wang H, Li C, et al. A Modified Omega-K Algorithm for Near-Field Single-Frequency MIMO-Arc-Array-Based Azimuth Imaging [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, **69**(8): 4909–4922.
- [15] Akbarpour A, Chamaani S, Sachs J, et al. Clutter Removal of Near-Field UWB SAR Imaging for Pipeline Penetrating Radar [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, **13**: 1527–1539.
- [16] Ren K, Burkholder R. A 3-D Novel Fast Back-Projection Imaging Algorithm for Stratified Media Based on Near-Field Monostatic and Bistatic SAR [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, **69**(4): 2326–2335.
- [17] Dai G E, Zhang L, Huan S, et al. Random Stepped-Frequency SAR Imagery With Full Cell Doppler Coherent Processing [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, **19**: 1–5.
- [18] Sun X P, Wu Y F, Zhang L, et al. Stepped Frequency Waveform Optimization for Formation Targets Detection [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, **19**: 1–5.
- [19] Lu J Y, Zhang L, Quan Y H, et al. Parametric Azimuth-Variant Motion Compensation for Forward-Looking Multi-channel SAR Imagery [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, **59**(10): 8521–8537.
- [20] Alqadami A, Stancombe A. Flexible Meander-Line Antenna Array for Wearable Electromagnetic Head Imaging [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, **69**(7): 4206–4211.
- [21] Li Y, Li W C, Wu J J, et al. An Autofocus Scheme of Bistatic SAR Considering Cross-Cell Residual Range Migration [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, **19**: 1–5.
- [22] Tan K, Wu S Y, Liu X J, et al. Omega-K Algorithm for Near-Field 3-D Image Reconstruction Based on Planar SIMO/MIMO Array [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, **57**(4): 2387–2394.
- [23] Huang Y, Chen Z Y, Wen C, et al. An Efficient Radio Frequency Interference Mitigation Algorithm in Real Synthetic Aperture Radar Data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, **60**: 1–12.
- [24] Shi H Y, Zhang L, Da L. SAR Imaging Method for Moving Targets Based on Omega-k and Fourier Ptychographic Microscopy [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, **19**: 1–5.
- [25] Wu J J, Li Z Y, Huang Y, et al. A Generalized Omega-K Algorithm to Process Translationally Variant Bistatic-SAR Data Based on Two-Dimensional Stolt Mapping [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, **52**(10): 6597–6614.
- [26] Luo Y, Zhao F J, Li N, et al. A Modified Cartesian Factorized Back-Projection Algorithm for Highly Squint Spotlight Synthetic Aperture Radar Imaging [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2019, **16**(6): 902–906.
- [27] Domínguez E, Magnard C. A Back-Projection Tomographic Framework for VHR SAR Image Change Detection [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, **57**(7): 4470–4484.
- [28] Zhou S, Yang L, Zhao L F, et al. A New Fast Factorized Back Projection Algorithm for Bistatic Forward-Looking SAR Imaging Based on Orthogonal Elliptical Polar Coordinate [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2019, **12**(5): 1508–1520.
- [29] Ji J H, Zhang B J. Image Interpolation Using Multi-Scale Attention-Aware Inception Network [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2020, **29**: 9413–9428.