

# 柱面阵三维成像的降维时域相关法

朱荣强 周剑雄 付 强

(国防科技大学电子科学与工程学院 ATR 重点实验室, 湖南长沙 410073)

**摘 要:** 针对时域相关法用于三维成像时, 运算量较大, 成像效率较低的缺点, 提出了一种降维时域相关法用于柱面阵三维成像, 该方法在高度向利用傅里叶变换, 而在距离-方位域采用相干累加, 使三维时域相关降维至二维时域相关, 有效减少了运算量, 同时保留了时域相关法无需插值的优点, 保证了成像精度。分析了时域相关法、后向投影算法和本文方法应用于柱面阵成像的运算量, 证明了在柱面阵人体扫描成像应用中, 本文方法在运算量上具有优势。最后通过仿真实验验证了该方法的有效性。

**关键词:** 三维成像; 柱面阵成像; 时域相关法; 运算量

中图分类号: TN957 文献标识码: A DOI: 10.16798/j.issn.1003-0530.2016.07.004

## Dimension-Reduced Time Domain Correlation Algorithm for 3-D Cylindrical Array Imaging

ZHU Rong-qiang ZHOU Jian-xiong FU Qiang

(ATR Key Laboratory, School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract:** The time domain correlation algorithm has disadvantages of large computational load and low efficiency for 3-D imaging. In view of this, this paper presents a dimension-reduced time domain correlation algorithm for 3-D cylindrical array imaging, solving the aforementioned disadvantages. The proposed method adopts the Fourier transform in height and the time domain correlation in azimuth and range, which reduces the 3-D time domain correlation to 2-D time domain correlation, and thus effectively reduces the computational load. Additionally it preserves the advantage of time domain correlation method without interpolation and ensures the imaging precision. The computational load of time domain correlation algorithm, back projection algorithm and dimension-reduced time domain correlation algorithm are analyzed. The result proves that the proposed method has advantage in the application of cylindrical array imaging of human body. Finally, simulation results show that the proposed method has the validity and feasibility in application of 3-D imaging of human body.

**Key words:** 3-D imaging; cylindrical array imaging; time domain correlation algorithm; computational load

## 1 引言

随着危险品种类的日益繁多,金属探测器、X射线扫描仪等传统的安检设备已无法满足当前的实际需求。微波主动成像技术由于具有良好的穿透性、低辐射性和高分辨率等特性,已被广泛用于隐匿危险物品检测、无损检测、雷达散射截面积测量、

探地/穿墙雷达等重要领域<sup>[1-3]</sup>。

近场阵列成像方法与星载/机载合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)成像方法相比,主要不同在于近场观测条件下,平面波假设不再成立,距离-多普勒算法和调频变标算法等远场成像方法不再适用,而距离迁徙算法(Range Migration Algorithm, RMA)和距离堆积算法(Range Stacking Algo-

rithm, RSA) 由于没有引入远场近似, 同样可以用于近场阵列成像<sup>[4-5]</sup>。文献[6]将 RMA 应用于平面阵三维成像, 在空间波数域对信号进行相位补偿, 补偿后的信号利用逆傅里叶变换就可得到成像结果; 文献[7]将 RSA 应用于平面阵三维成像, 逐距离平面对目标进行成像, 有效避免了插值提高了成像精度; 文献[8]利用波谱展开理论推导了一种平面阵三维成像方法, 其算法的实现步骤与文献[6]类似。文献[9]将后向投影算法 (Back Projection Algorithm, BPA) 用于平面阵人体扫描三维成像, 采用多个数字处理单元并行处理, 成像时间为 2 s, 表明 BPA 用于三维实时成像具有可行性。

平面阵只能在部分方位角对目标进行观测, 无法获得目标的全方位散射信息, 不能满足安检的实际需求。而采用柱面阵测量形式, 能有效弥补平面阵成像的不足。但是, 由于其在直角坐标系中非均匀采样, 使得柱面阵成像处理比平面阵更为复杂。文献[10]将柱面阵回波先反演至平面阵列形式, 再利用平面阵 RMA 进行成像; 文献[11]利用波谱展开理论推导了一种用于多航过圆迹 SAR 的三维成像方法, 通过角度域的反卷积实现远近场变换, 文献[12]将该方法应用于近场柱面阵成像。但是, 上述几种柱面阵成像算法都需要利用插值, 插值核函数的选择会直接影响成像的精度, 并且长度受限的插值核函数会引入截断误差。为了避免插值对成像精度的影响, 文献[13]推导了一种柱坐标格式的柱面阵成像算法, 单次成像只能实现对同一半径目标的聚焦, 并且点展布函数的形式不同于其他算法; 文献[14]将时域相关法 (Time Domain Correlation, TDC) 用于近场三维成像, 有效避免了插值, 但是 TDC 算法需要对空间目标逐点进行相干累加成像, 运算量大, 成像效率低。

本文提出了一种适用于柱面阵三维成像的降维 TDC (Dimension-Reduced TDC, DRTDC) 算法, 该方法逐方位逐距离对目标进行成像, 有效减少了运算量, 并避免了插值, 保证了成像精度。

## 2 成像模型

柱面阵成像的几何模型如图 1 所示。以目标中心为原点  $O$  建立直角坐标系,  $x$ 、 $y$ 、 $z$  分别表示距离向、方位向和高度向。天线阵列以  $z$  轴为中心绕目

标旋转, 旋转半径为  $R_0$ , 波束中心始终指向  $z$  轴, 等效形成柱面阵测量。图中天线阵列的长度为  $L$ ,  $\theta$  表示天线阵列的观测方位角, 天线在高度向的采样位置记为  $w$ 。假设空间中只存在一个点目标  $(x, y, z)$ , 对应后向散射系数为  $\sigma(x, y, z)$ , 采用步进频信号作为发射信号时,  $(R_0 \cos \theta, R_0 \sin \theta, w)$  处的天线接收到该点目标的回波信号为:

$$s_0(w, \theta, k) = \sigma(x, y, z) e^{-jkR} \quad (1)$$

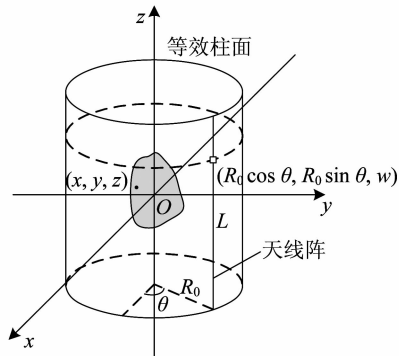


图 1 柱面阵成像几何

Fig. 1 Geometry of cylindrical imaging

式中,  $k = 4\pi f/c$  表示双程波数,  $c$  表示光速;  $R$  为天线与目标间的距离, 具体表达式为:

$$R = \sqrt{(x - R_0 \cos \theta)^2 + (y - R_0 \sin \theta)^2 + (z - w)^2} \quad (2)$$

式(1)中的指数项可以表征回波信号的相位历程, 将式(2)代入式(1)可以看出, 回波信号的相位历程随空间采样位置的变化而变化, 并且变化规律随目标位置的不同而不同。

当目标分布于三维空间时,  $(R_0 \cos \theta, R_0 \sin \theta, w)$  处的天线接收到的回波信号为:

$$s(w, \theta, k) = \iiint_V \sigma(x, y, z) e^{-jkR} dx dy dz \quad (3)$$

式中,  $V$  表示目标的分布空间。

## 3 成像算法

### 3.1 TDC 算法

文献[13]利用驻定相位原理推导了目标后向散射系数的空间分布与回波信号间的映射关系, 具体为:

$$\sigma(x, y, z) = \iiint s(w, \theta, k) e^{jkR} dk d\theta dw \quad (4)$$

式中,  $R$  的表达式如式(2)所示。上式就是 TDC 算

法用于柱面阵成像的原理。由于回波信号的相位历程随目标的空间位置发生变化,并且变化规律不具有有一致性,因此,TDC算法对目标逐点补偿回波信号中的相位历程差异,将补偿后的信号进行相干累加得到该点的成像结果。从式(4)可以看出,TDC算法的补偿函数  $e^{jkR}$  正是  $(x, y, z)$  处理理想点目标回波信号的共轭。

从 TDC 算法的成像原理可以看出,TDC 算法需要逐点对目标进行成像,其运算量与目标的离散点数成正比,与空间采样点数成比例,当目标场景在三维空间分布,且系统的成像分辨率要求较高时,TDC 算法的成像效率很低。

### 3.2 降维 TDC 算法

TDC 算法对目标逐点补偿回波信号中的相位历程差异,导致运算量较大。在雷达成像处理中,傅里叶变换能有效提高相位补偿和累积的效率。但是,柱面阵回波信号的波数谱在距离-方位空间频域内存在耦合,为避免插值,仅在空间均匀采样的高度向进行傅里叶变换从而转换为频域处理,而在距离-方位域内仍采用时域相干累加,使三维时域相关降维至二维时域相关。

回波信号在高度向的傅里叶变换为:

$$s'(k_z, \theta, k) = \int s(w, \theta, k) e^{-jk_z w} dw \quad (5)$$

式中,  $k_z$  表示高度向波数。为了得到后向散射系数与高度向傅里叶变换后的回波信号的对应关系,对式(4)沿高度向做傅里叶变换得到后向散射系数在高度向的傅里叶变换为:

$$\sigma'(x, y, k_z) = \int \left[ \iiint s(w, \theta, k) e^{jkR} dk d\theta dw \right] e^{-jk_z z} dz \quad (6)$$

改变上式的积分顺序:

$$\sigma'(x, y, k_z) = \iiint s(w, \theta, k) \left[ \int e^{jkR} e^{-jk_z z} dz \right] dk d\theta dw \quad (7)$$

式中,方括号中的表达式可以看作是  $e^{jkR}$  沿高度向  $z$  的傅里叶变换,利用驻定相位原理进行求解,得到驻相点满足如下关系:

$$k_z = k \frac{z - w}{\sqrt{(x - R_0 \cos \theta)^2 + (y - R_0 \sin \theta)^2 + (z - w)^2}} \quad (8)$$

利用上式得到驻相点并由驻定相位原理求解可得:

$$\sigma'(x, y, k_z) =$$

$$\iiint s(w, \theta, k) e^{jk_r \sqrt{(x - R_0 \cos \theta)^2 + (y - R_0 \sin \theta)^2}} e^{-jk_z w} dk d\theta dw \quad (9)$$

式中,  $k_r$  表示垂直于高度向的波数。对上式先做  $w$  向的积分,利用式(5)可以得到:

$$\sigma'(x, y, k_z) = \iint s'(k_z, \theta, k) e^{jk_r \sqrt{(x - R_0 \cos \theta)^2 + (y - R_0 \sin \theta)^2}} dk d\theta \quad (10)$$

将上式中的指数项记为补偿函数  $s'_c(k_z, \theta, k; x, y)$ ,

$$s'_c(k_z, \theta, k; x, y) = e^{jk_r \sqrt{(x - R_0 \cos \theta)^2 + (y - R_0 \sin \theta)^2}} \quad (11)$$

因此,后向散射系数的高度向傅里叶变换可以表示为:

$$\sigma'(x, y, k_z) = \iint s'(k_z, \theta, k) s'_c(k_z, \theta, k; x, y) dk d\theta \quad (12)$$

可以发现,上式的形式与二维时域相关法的成像公式非常类似,都可以看作是在二维空间内逐点补偿信号中的非相干性后进行相干累加。

对式(1)利用驻定相位原理可以得到  $(x, y, z)$  处理理想点目标回波信号的高度向傅里叶变换  $s'_0(k_z, \theta, k)$  为:

$$s'_0(k_z, \theta, k) = e^{-jk_r \sqrt{(x - R_0 \cos \theta)^2 + (y - R_0 \sin \theta)^2}} e^{-jk_z z} \quad (13)$$

当  $z=0$  时,上式恰好就是式(10)中的指数项的共轭,即  $(x, y, 0)$  处的理想点目标回波信号的高度向傅里叶变换的共轭就是补偿函数  $s'_c(k_z, \theta, k; x, y)$ 。

对式(12)做高度向的逆傅里叶变换,得到目标后向散射系数与高度向傅里叶变换后的回波信号的对应关系为:

$$\sigma(x, y, z) = \mathcal{F}_{(z)}^{-1} \left\{ \iint s'(k_z, \theta, k) s'_c(k_z, \theta, k; x, y) dk d\theta \right\} \quad (14)$$

式中,  $\mathcal{F}_{(z)}^{-1} \{ \cdot \}$  表示  $z$  方向的逆傅里叶变换。

式(14)就是降维 TDC 算法的柱面阵成像公式,可以看出,降维 TDC 算法先对回波信号做高度向的傅里叶变换,再利用补偿函数补偿后进行相干累加就可得到后向散射系数在高度向的傅里叶变换,有效减少了运算量并避免了插值。具体的成像步骤如下:

**步骤 1** 将成像场景在距离-方位平面进行离散,离散化后的目标坐标可表示为  $(x_m, y_n, z)$ ;

$$x_m = -\frac{x_{\max}}{2} + m \frac{x_{\max}}{N_x} \quad (15)$$

$$y_n = -\frac{y_{\max}}{2} + n \frac{y_{\max}}{N_y} \quad (16)$$

式中,  $m=1, \dots, N_x$ ,  $N_x$  为成像场景在  $x$  方向上的离散化点数,  $x_{\max}$  为  $x$  方向的成像范围;  $n=1, \dots, N_y$ ,  $N_y$  为成像场景在  $y$  方向上的离散化点数,  $y_{\max}$  为  $y$  方向的成像范围。

**步骤 2** 对回波信号做高度向的傅里叶变换得到  $s'(k_z, \theta, k)$ ;

**步骤 3** 计算补偿函数  $s'_c(k_z, \theta, k; x_m, y_n)$ ;

$$s'_c(k_z, \theta, k; x_m, y_n) = e^{ik_r \sqrt{(x_m - R_0 \cos \theta)^2 + (y_n - R_0 \sin \theta)^2}}$$

**步骤 4** 将补偿函数与高度向傅里叶变换后的回波信号对应相乘, 在  $\theta-k$  域内进行相干累加, 得到  $\sigma'(x_m, y_n, k_z)$ ;

$$\sigma'(x_m, y_n, k_z) = \sum_j \sum_l s'(k_z, \theta_j, k_l) s'_c(k_z, \theta_j, k_l; x_m, y_n) \quad (17)$$

式中,  $\theta_j$  表示天线阵列的采样角,  $j=1, 2, \dots, N_\theta$ ,  $N_\theta$  为角度采样点数;  $k_l = 4\pi f_l / c$ ,  $f_l$  表示频率采样点,  $f_l = f_0 + l\Delta f$ ,  $\Delta f$  为频率步进间隔,  $l=0, 1, \dots, N_f-1$ ,  $N_f$  为频率采样点数。

**步骤 5** 对  $\sigma'(x_m, y_n, k_z)$  做高度向逆傅里叶变换, 就可得到  $(x_m, y_n, z)$  处的后向散射系数  $\sigma(x_m, y_n, z)$ ;

$$\sigma(x_m, y_n, z) = \mathcal{F}_{(z)}^{-1} \{ \sigma'(x_m, y_n, k_z) \} \quad (18)$$

**步骤 6** 对距离-方位平面离散后的所有目标重复步骤 3 至步骤 5。

TDC 算法对目标逐点进行成像, 而降维 TDC 算法逐方位逐距离对目标进行成像, 有效地减少了运算量, 算法的流程图如图 2 所示。

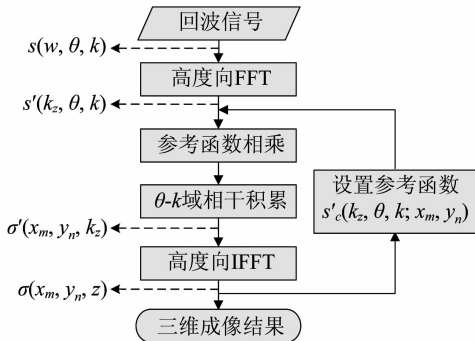


图 2 降维 TDC 算法的流程图

Fig. 2 The flow chart of DRDTC algorithm

### 3.3 运算量分析

本小节分析 TDC 算法、BPA 和降维 TDC 算法的运算量, 参考文献[15]中的计算方法, 以算法所需的浮点运算量(FLOP)进行衡量, 主要考虑插值运算、傅里叶变换、乘法和加法的运算量, 忽略逻辑运算、索引查找、参考信号设置等运算。一次浮点运算可以是一次实数相乘, 也可以是一次实数相加, 常用运算所需的浮点运算量如表 1 所示。表 1 中,  $N_{\text{ker}}$  表示插值核函数的长度;  $N$  为 2 的整数幂, 是 FFT 或 IFFT 的长度。

表 1 常用运算的运算量

Tab. 1 Computational load of common operations

运算	运算量/FLOP
复数加法	2
复数乘法	6
一维插值(单点)	$2(2N_{\text{ker}}-1)$
基二 FFT/IFFT	$5N \log_2 N$

BPA 和 TDC 算法用于柱面阵三维成像时, 需要将目标场景在三维空间中进行离散, 成像场景在方位和距离平面内的离散坐标与式(15)和式(16)相同, 高度向的离散坐标表示为:

$$z_q = -\frac{z_{\max}}{2} + q \frac{z_{\max}}{N_z} \quad (19)$$

式中,  $q=1, \dots, N_z$ ,  $N_z$  为成像场景在  $z$  方向上的离散化点数,  $z_{\max}$  为  $z$  方向的成像范围。天线在高度向的采样点坐标表示为  $w_i$ ,  $i=1, 2, \dots, N_h$ ,  $N_h$  为高度向采样点数。

TDC 算法的成像公式的离散形式可以写为:

$$\sigma(x_m, y_n, z_q) = \sum_i \sum_j \sum_l s(w_i, \theta_j, k_l) s_c(w_i, \theta_j, k_l; x_m, y_n, z_q) \quad (20)$$

式中,  $k_l = 4\pi f_l / c$ ;  $s_c$  表示参考信号。由上式可以计算出 TDC 算法的运算量  $C_{\text{TDC}}$  为:

$$C_{\text{TDC}} = N_x N_y N_z \underbrace{6N_h N_\theta N_f}_{\text{相位补偿}} + N_x N_y N_z \underbrace{2(N_h N_\theta N_f - 1)}_{\text{相干累加}} \quad (21)$$

BPA 利用后向投影原理, 将单次测量得到的距离像利用插值投影至三维空间, 最后进行相干累加得到后向散射系数的三维空间分布, 成像公式可表

示为:

$$\sigma(x_m, y_n, z_q) = \sum_i \sum_j s_M(w_i, \theta_j, r(x_m, y_n, z_q)) \quad (22)$$

式中,  $s_M$  表示距离向压缩后的回波信号。当发射信号为步进频信号时, 对回波信号沿频率做 FFT 就可以得到距离像。为了提高计算效率, FFT 或 IFFT 的长度应为 2 的整数幂, 因此, 在做 FFT 或 IFFT 之前需要先对信号进行补零。另外, 为了得到较为精确的成像结果, 通常需要对距离向进行升采样, 假设升采样倍数为  $N_{up}$ , 则根据式 (22) 可以计算出 BPA 的运算量  $C_{BPA}$  为:

$$C_{BPA} = N_h N_\theta \underbrace{5(N_{up} N_f)_2 \log_2(N_{up} N_f)_2}_{\text{距离压缩}} + N_h N_\theta \underbrace{2N_x N_y N_z (2N_{ker} - 1)}_{\text{三维空间后向投影}} + N_x N_y N_z \underbrace{2(N_h N_\theta - 1)}_{\text{相干累加}} \quad (23)$$

式中,  $(\cdot)_2$  为运算符,  $(n)_2$  表示取不小于  $n$  的最小 2 的整数幂。

由式 (17) 和式 (18) 可以计算出降维 TDC 算法的运算量  $C_{DRTDC}$  为:

$$C_{DRTDC} = \underbrace{5N_f N_\theta (N_h)_2 \log_2(N_h)_2}_{\text{高度向FFT}} + N_x N_y \underbrace{6N_f N_\theta (N_h)_2}_{\text{相位补偿}} + N_x N_y \underbrace{2(N_h)_2 (N_f N_\theta - 1)}_{\text{相干累加}} + N_x N_y \underbrace{5(N_h)_2 \log_2(N_h)_2}_{\text{高度向IFFT}} \quad (24)$$

在实际成像系统中, 空间采样点数  $N_h$ 、 $N_\theta$ 、频率采样点数  $N_f$ 、成像场景在三个维度上的离散点数  $N_x$ 、 $N_y$ 、 $N_z$  一般不小于 10, 插值核函数的长度  $N_{ker}$  一般取 8, 16 或 32。因此, TDC 算法、BPA 和降维 TDC 算法的运算量可分别近似为:

$$C_{TDC} \approx 8N_h N_\theta N_f N_x N_y N_z \quad (25)$$

上式近似中, 忽略了  $2N_x N_y N_z$ ;

$$C_{BPA} \approx 4N_h N_\theta N_x N_y N_z N_{ker} + 5N_h N_\theta N_{up} N_f \log_2(N_{up} N_f) \quad (26)$$

上式近似中, 利用了近似  $(n)_2 \approx n$ , 并忽略了  $2N_x N_y N_z$ ;

$$C_{DRTDC} \approx 8N_h N_\theta N_f N_x N_y \quad (27)$$

上式近似中, 利用了近似  $(n)_2 \approx n$ , 并忽略了  $5(N_x N_y + N_f N_\theta)(N_h)_2 \log_2(N_h)_2$ 。

式 (25)、式 (26) 和式 (27) 的推导中引入了近似, 并忽略了小项, 上述近似不会改变算法运算量的排序结果。从上述近似运算量分析可以看出,

当成像场景一定时, 随着空间采样点数及成像场景离散点数的增大, BPA 和 TDC 的运算量要比降维 TDC 算法的运算量增加的快。但是, 当频率采样点数增大时, 降维 TDC 算法的运算量要比 BPA 增加的快。

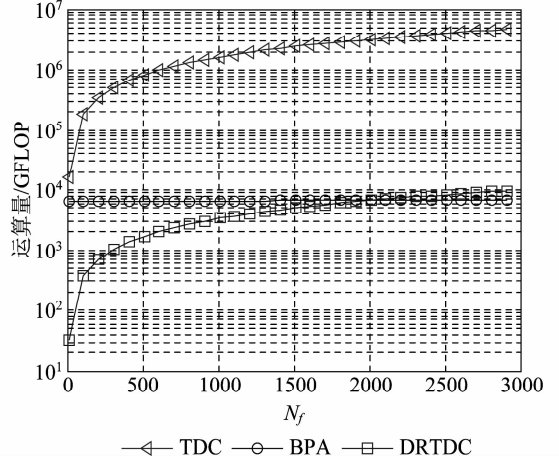


图 3 运算量随频率采样数变化的变化曲线

Fig. 3 The curve of computational load changed with the number of frequency samples

取  $N_\theta = 201$ 、 $N_h = 501$ 、 $N_x = 201$ 、 $N_y = 201$ 、 $N_z = 501$ 、 $N_{up} = 10$ 、 $N_{ker} = 8$  时, 不同算法的运算量随频率采样数的变化规律如图 3 所示。图中  $GFLOP = 10^9$  FLOP。从图 3 可以看出, 当频率采样点数小于 2000 时, 降维 TDC 算法的运算量要小于 BPA 的运算量。可以计算出, 当系统的距离向分辨率要求为 5 mm, 无模糊成像范围为 2 m 时, 频率采样点数为 400, 而在实际的柱面阵人体扫描成像系统中, 无模糊成像范围一般小于 1 m, 因此, 降维 TDC 算法用于柱面阵人体扫描三维成像时, 其运算量要小于 BPA 和 TDC 算法。

## 4 仿真实验

仿真实验以人体柱面阵扫描三维成像系统为例, 量化分析不同算法的运算量, 并在相同仿真实验条件下, 比较三种算法的仿真成像时间, 给出本文所提方法的三维成像结果。

仿真设置的系统参数如表 2 所示。此时系统在高度向所能达到的最佳分辨率为:

$$\rho_z = \frac{\lambda}{4\sin(\psi/2)} \approx 4.3 \text{ mm}$$

表2 仿真参数  
Tab.2 Simulation parameters

中心频率 $f_0$	35 GHz
带宽 $B$	5 GHz
天线 3 dB 波束角 $\psi$	$60^\circ$
扫描半径 $R_0$	0.5 m
天线长度 $L$	2 m

为了使成像结果的侧向分辨率保持均匀,取角度向的扫描范围  $\Theta = 60^\circ$ 。由奈奎斯特采样定理可知,角度采样间隔  $\Delta\theta$ 、高度采样间隔  $\Delta z$ 、频率步进间隔  $\Delta f$  必须满足如下关系:

$$\Delta\theta \leq \frac{\lambda}{4R_{igt}} \quad (28)$$

$$\Delta z \leq \frac{\lambda}{4\sin(\psi/2)} \quad (29)$$

$$\Delta f \leq \frac{\cos(\psi/2)}{2(R_0 + R_{igt})}c \quad (30)$$

上式中,  $R_{igt} = \sqrt{(x_{\max}/2)^2 + (y_{\max}/2)^2}$  表示目标在垂直于高度向的最大半径;  $\lambda = c/f$  表示波长。

目标设为典型的人体模型,在  $x$  方向上的长度为  $x_{\max} = 0.5$  m,在  $y$  方向上的长度为  $y_{\max} = 0.5$  m,在  $z$  方向上的长度为  $z_{\max} = 1.8$  m。将上述参数代入式(28)、式(29)和式(30)得到采样必须满足:  $\Delta\theta \leq 0.35^\circ$ ,  $\Delta z \leq 4.3$  mm,  $\Delta f \leq 152.2$  MHz。由于实际天线的方向图并不是理想的矩形函数,并且系统中还存在其他非理想因素,实际取采样间隔为:  $\Delta\theta = 0.3^\circ$ ,  $\Delta z = 4$  mm,  $\Delta f = 100$  MHz,则角度采样数、高度向采样数和频率采样数应分别为:  $N_\theta = 201$ 、 $N_h = 501$ 、 $N_f = 51$ 。成像场景在三个方向上的离散间隔均取为 4 mm,与分辨率相当,即在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的离散点数分别为  $N_x = 126$ 、 $N_y = 126$ 、 $N_z = 501$ ;BPA 中的升采样倍数  $N_{up} = 10$ ,插值核函数的长度  $N_{ker} = 8$ 。利用式(21)、式(23)和式(24)计算得到在此仿真参数设置下,不同算法的运算量如表3所示。

表3 不同算法的运算量与成像时间

Tab.3 Computational load and imaging time of different algorithms

	降维 TDC	BPA	TDC
运算量/GFLOP	66.72	2563.31	32679.30
成像时间/s	1851.13	36968.23	×

表3中还给出了BPA和降维TDC算法在相同仿真环境下的成像时间,其中降维TDC算法的成像时间中包含了参考信号的设置时间。可以看出,降维TDC算法的运算量要小于BPA和TDC算法的运算量,表明本文所提方法有效减小了运算量,并且仿真成像时间也验证了该方法的有效性。上述仿真是基于仿真软件得到的结果,应用于实际成像系统时,可以通过离线设置参考信号,采用逐角度并行处理等方法进一步提高成像效率。

仿真目标设置为380个理想点目标,呈圆柱形分布,半径为0.2 m,高度向间隔为0.1 m,方位向角度间隔为  $10^\circ$ ,如图4所示。图5是降维TDC算法的三维成像结果的-14 dB包络图,图6和图7分别是成像结果在  $x=0$  平面和  $z=0$  平面的剖面图。

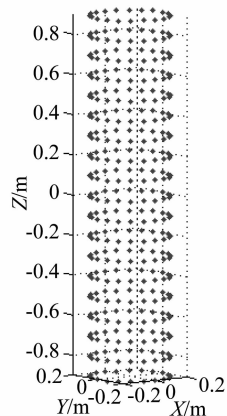


图4 仿真目标

Fig.4 Simulated targets

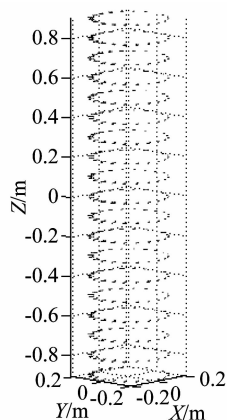


图5 成像结果包络图

Fig.5 Iso-surfaces of the imaging result

从图6和图7可以明显地看到成像的点展布函数具有空变性,这是因为波数谱的支撑域与目标点

位置存在对应关系,所以导致点展布函数和分辨率具有空变性;而天线波束角受限,使得目标被非均匀照射,导致成像强度具有空变性。

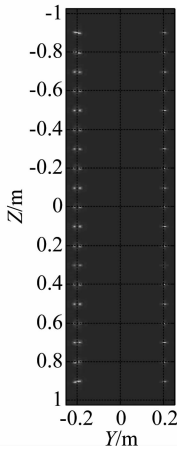


图 6  $x=0$  处成像剖面图

Fig. 6 The slice through the result on  $x=0$

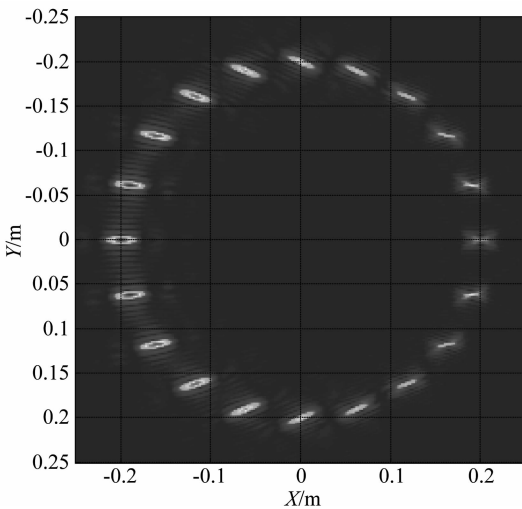


图 7  $z=0$  处成像剖面图

Fig. 7 The slice through the result on  $z=0$

## 5 结论

本文提出了用于柱面阵三维成像的降维 TDC 算法,在高度向利用傅里叶变换,在距离-方位平面采用相干累加,有效减小了运算量,并避免了插值。运算量分析表明,在人体扫描三维成像场景参数下,降维 TDC 算法的运算量要小于 BPA 和 TDC 算法。通过仿真实验,给出了降维 TDC 算法的三维成像结果,验证了降维 TDC 算法的有效性,说明该方法用于柱面阵人体扫描成像具有可行性。

## 参考文献

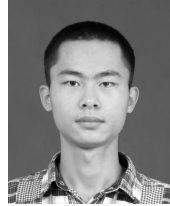
- [1] Sheen D M, McMakin D L, Hall T E. Near-field three-dimensional radar imaging techniques and applications [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(19): E83-E93.
- [2] Bialkowski M E, Abbosh A M, Wang Y, et al. Microwave imaging systems employing cylindrical, hemispherical and planar arrays of ultrawideband antennas [C] // *Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings, APMC. IEEE*, 2011: 191-194.
- [3] 张彪,皮亦鸣,李晋. 采用格林函数分解的太赫兹逆合成孔径雷达近场成像算法[J]. *信号处理*, 2014, 30(9): 993-999.  
Zhang B, Pi Y M, Li J. Terahertz Inverse Synthetic Aperture Radar Near-field Imaging Algorithm Using Green's Function Decomposition [J]. *Journal of Signal Processing*, 2014, 30(9): 993-999. (in Chinese)
- [4] Soumekh M. Range stacking: an interpolation-free SAR reconstruction algorithm [C] // *Aerospace/Defense Sensing and Controls. International Society for Optics and Photonics*, 1998: 13-24.
- [5] Soumekh M. *Synthetic aperture radar signal processing* [M]. Malden, MA, USA: Wiley, 1999: 319-361.
- [6] 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.
- [7] 谭维贤,洪文,王彦平,等. 基于波数域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.  
Tan W X, Hong W, Wang Y P, et al. Three-dimensional micro-wave imaging algorithm for the surface of the human body based on wavenumber domain integration [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(11): 2541-2545. (in Chinese)
- [8] Sheen D M, McMakin 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.
- [9] Ahmed S S, Genghammer A, Schiessl A, et al. Fully Electronic-Band Personnel Imager of 2 m Aperture Based on a Multistatic Architecture [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2013, 61(1): 651-657.
- [10] Fortuny-Guasch J, Lopez-Sanchez J M. Extension of the 3-D range migration algorithm to cylindrical and spherical

scanning geometries[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2001, 49(10): 1434-1444.

- [11] Bryant M L, Gostin L L, Soumekh M. 3-D E-CSAR imaging of a T-72 tank and synthesis of its SAR reconstructions[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(1): 211-227.
- [12] 温鑫, 黄培康, 年丰, 等. 主动式毫米波近距离圆柱扫描三维成像系统[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(6): 1044-1049.  
Wen X, Huang P K, Nian F, et al. Active millimeter wave near field cylindrical scanning three-dimensional imaging system[J]. Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(6): 1044-1049. (in Chinese)
- [13] Tan W X, Hong W, Wang Y P, et al. A novel spherical-wave three-dimensional imaging algorithm for microwave cylindrical scanning geometries[J]. Progress in Electromagnetics Research, 2011, 111(8): 43-70.
- [14] Qi Y L, Wang Y P, Tan W X, et al. Application of sparse array and MIMO in near-range microwave imaging [C] // SPIE Remote Sensing. International Society for Optics and Photonics, 2011: 81790X-81790X-12.
- [15] Cumming I G, Wong F H. Digital processing of synthetic

aperture radar data: algorithms and implementation[M]. Norwood, MA, USA: Artech House, 2005:473-476.

### 作者简介



**朱荣强** 男, 1991年生, 甘肃定西人, 现为国防科技大学电子科学与工程学院 ATR 实验室硕士研究生, 主要研究方向为近场三维成像。

E-mail: zhurq91@163.com



**周剑雄** 女, 1977年生, 湖南湘潭人, 现为国防科技大学电子科学与工程学院 ATR 实验室副教授, 主要研究方向为高分辨雷达成像、目标特性与识别。

E-mail: zjxjanet@sina.com.cn



**付强** 男, 1962年生, 湖南长沙人, 现为国防科技大学电子科学与工程学院 ATR 实验室教授, 主要研究方向为雷达自动目标识别系统。