

基于跨航向稀疏阵列的机载下视 MIMO 3D-SAR 三维成像算法

彭学明^{*①②③} 王彦平^{①②} 谭维贤^{①②} 洪文^{①②} 吴一戎^{①②}

^①(微波成像技术国家重点实验室 北京 100190)

^②(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^③(中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要: 基于阵列天线的 SAR 3 维成像技术是实现 SAR 3 维高分辨成像的重要方式之一。该文通过沿飞行平台跨航向稀疏地布置多个收发天线阵列单元, 构造了跨航向稀疏下视阵列天线构型的 MIMO(多发多收)机载 3D-SAR, 并分析了跨航向稀疏下视阵列 MIMO 机载 3D-SAR 的成像几何、3 维回波信号模型, 提出了适用于跨航向稀疏下视阵列 MIMO 机载 3D-SAR 的 3 维成像算法, 最后通过仿真实验验证了算法的有效性并对结果进行了分析。

关键词: 3 维 SAR; 稀疏阵列; 多发多收(MIMO); 机载下视三维成像

中图分类号: TP722.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)04-0943-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00720

Airborne Downward-looking MIMO 3D-SAR Imaging Algorithm Based on Cross-track Thinned Array

Peng Xue-ming^{①②③} Wang Yan-ping^{①②} Tan Wei-xian^{①②} Hong Wen^{①②} Wu Yi-rong^{①②}

^①(National Key Laboratory of Science and Technology on Microwave Imaging, Beijing 100190, China)

^②(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^③(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Three dimensional SAR imaging technology based on linear array is one of the most important three dimensional SAR high resolution imaging methods. In this paper, transmit and receive antenna elements are placed to form cross-track thinned downward-looking array MIMO 3D-SAR. The imaging geometry and three dimensional echo signal model of cross-track thinned array MIMO 3D-SAR is analyzed, and an applicative imaging algorithm based on cross-track thinned array MIMO 3D-SAR is given. Finally, by emulation experiments, the imaging algorithm is verified and the 3D-SAR imaging results are analyzed.

Key words: 3D-SAR; Thinned array; MIMO; Airborne downward-looking three-dimensional imaging

1 引言

下视阵列机载 3D-SAR^[1]是一种新的 3 维 SAR 成像体制, 它在方位向通过合成孔径原理获得分辨能力, 在波传播方向通过脉冲压缩技术获得分辨能力, 在跨航向通过布置一个线性阵列, 由孔径综合、波束形成^[2]等方法获得分辨能力。由于下视阵列机载 3D-SAR 采用下视观测方式, 能够很好地解决常规 2 维 SAR 中的几何失真、左右模糊^[3]问题。另外下视阵列机载 3D-SAR 的下视 3 维观测能力, 使得它在城区测绘、山区搜索和自然环境灾害监测中具有广泛的应用前景。因此, 下视阵列机载 3D-SAR 得到

了国内外许多研究机构的重视, 中国科学院电子学研究所开展了下视阵列 3D-SAR 的成像机理验证和成像试验装置研究^[4], 电子科技大学也开展了下视阵列 3D-SAR 原理验证和成像算法方面的研究^[5-7], 法国 ONERA 的 DRIVE 系统^[8,9]和德国 FGAN-FHR 的 ARTINO 系统^[1]也针对下视阵列 3D-SAR 进行了相关的研究。

下视阵列机载 3D-SAR 在波传播方向和方位向均比较容易做到高分辨成像, 但是其跨航向分辨能力受限于阵列的长度, 要想获得跨航向高分辨率, 需要在跨航向布置一个很长的线性均匀阵列。这样的线性均匀阵列需要很多的天线单元, 提高了系统复杂度和经济成本。解决这一困难的有效方法之一是在跨航向布置稀疏阵列单元, 通过相位中心等效原理^[10]等效得到跨航向线性均匀分布的相位中心。

2011-07-14 收到, 2011-11-28 改回

国家杰出青年科学基金(60725103)和国家自然科学基金重大项目基金(60890071)资助课题

*通信作者: 彭学明 yaotoufengshan2007@163.com

ARTINO 系统和文献[11]都给出了下视 3 维成像稀疏阵列的设计方法, 本文在参考上述工作的基础上将 MIMO Radar^[12,13] 技术应用到下视阵列机载 3D-SAR 成像研究中。

在下视阵列机载 3D-SAR 成像算法方面, 文献[4-6]都是针对单发射天线或双发射天线构型的下视阵列机载 3D-SAR; 文献[10]分析了 ARTINO 系统的 3 维成像原理, 但是没有分析距离徙动问题, 由于下视阵列 3D-SAR 的距离历程与方位向采样和跨航向采样均有关系, 因此文献[9]提到的方法在跨航向测绘带较大的情况下不适用。文献[7]提出了一种多发多收虚拟阵列的 3 维成像算法, 该算法在跨航向采用的是数字波束形成的方法, 需要对接收阵列的各阵元沿方位角加权再相加才可以得到该阵列沿方位角的波束形成。在接收阵元数目较多、成像场景较大的场合, 该算法计算量非常大。文献[14]给出了机载稀疏阵列下视 3 维 SAR 的 3 维 RD 算法, 文中按照等效阵列进行了距离历程推导, 并且对距离历程进行了菲涅尔近似, 没有考虑近似对成像性能带来的影响。

本文首先给出了收发天线分置的跨航向稀疏阵列 MIMO 机载 3D-SAR 成像几何模型, 然后在此几何模型的基础上导出了跨航向稀疏阵列 MIMO 机载 3D-SAR 的 3 维回波信号模型, 针对 3 维信号模型中的距离历程与方位向采样和跨航向采样均相关的特点, 将 3 维回波信号模型由直角坐标系(波传播方向-方位向-跨航向)变换到柱面坐标系(斜距向-方位向-俯仰向), 然后提出了柱面坐标系下的 3 维成像算法, 最后在柱面坐标系内对仿真回波数据进行斜距向、方位向、俯仰向压缩得到了跨航向稀疏阵列 MIMO 机载 3D-SAR 3 维成像结果并分析了成像指标, 验证了成像算法的有效性。

2 跨航向稀疏阵列机载下视 MIMO 3D-SAR 几何模型

我们设定成像场景的 3 维空间坐标系为 $O-xyz$, 如图 1 所示。飞机飞行高度为 H , 飞机沿 x 方向以速度 V 飞行。图 1 是跨航向稀疏阵列 MIMO 机载 3D-SAR 几何模型(其中圆圈代表发射单元, 方框代表接收单元, 发射单元位于阵列两端, 每端有 M 个发射单元, 接收单元位于阵列中间, 总共有 N 个接收单元)。2M 个发射单元和 N 个接收单元通过相位中心等效原理, 总共得到了 $2MN$ 个均匀的虚拟相位中心。跨航向稀疏阵列虚拟相位中心等效示意图如图 2 所示。假设天线阵列长度为 L , 虚拟相位中心

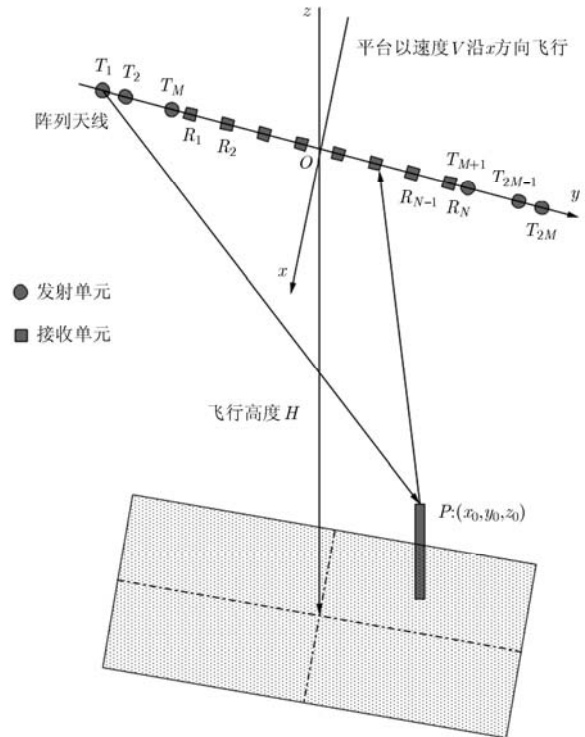


图 1 跨航向稀疏阵列机载下视 MIMO 3D-SAR 几何模型

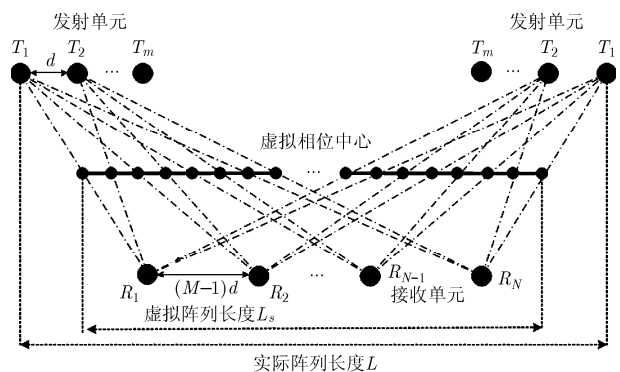


图 2 跨航向稀疏阵列等效相位中心示意图

长度为 L_s , 为防止跨航向出现模糊, 跨航向采样须满足奈奎斯特采样定理, 由此可以推导出发射单元间距 $d \leq D_e$, 其中 D_e 为发射单元在跨航向上的尺寸。

发射单元指向机下点, 成像区域为飞机的正下方场景, 设发射单元在方位向和跨航向的波束宽度分别为 α_T 和 β_T , 接收单元在方位向和跨航向的波束宽度分别为 α_R 和 β_R 。为保证发射单元照射范围内的所有回波信号都能被接收单元接收到, 须保证接收单元在方位向和跨航向的波束宽度大于发射阵元的波束宽度, 即 $\alpha_R \geq \alpha_T, \beta_R \geq \beta_T$ 。

3 跨航向稀疏阵列机载下视 MIMO 3D-SAR 回波信号模型

本文采用了时间分集的方式来区分各个发射单元之间的信号。并且两个发射信号的时间间隔大于发射信号持续时间和信号接收窗的时间之和。

根据图 1 所示的几何模型中采用的直角坐标系，我们假设发射单元的坐标为 $(x, y_T, 0)$ ，接收单元的坐标为 $(x, y_R, 0)$ ，对于图 1 中所示的发射单元和接收单元，

$$\left. \begin{aligned} y_T &= \begin{cases} -\frac{L}{2} + (m-1)d, & m \in [1, M] \\ \frac{L}{2} + (m-2M)d, & m \in [M+1, 2M] \end{cases} \\ y_R &= -\frac{L-(M-1)d}{2} + (n-1)(M-1)d \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

发射单元和接收单元到场景目标 P 的距离分别为

$$\left. \begin{aligned} R_T &= \sqrt{(x-x_0)^2 + (y_T-y_0)^2 + z_0^2} \\ R_R &= \sqrt{(x-x_0)^2 + (y_R-y_0)^2 + z_0^2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

电磁波由发射单元发射到被接收单元接收到的整个距离历程为

$$\begin{aligned} R &= R_T(x, y_T) + R_R(x, y_R) \\ &= \sqrt{(x-x_0)^2 + (y_T-y_0)^2 + z_0^2} \\ &\quad + \sqrt{(x-x_0)^2 + (y_R-y_0)^2 + z_0^2} \end{aligned} \quad (3)$$

由式(3)看出对于场景目标 P 的距离历程与方位向采样 x 和跨航向采样 y_T, y_R 均有关，这使得距离单元徙动问题更为严重，距离单元徙动校正也更加复杂。为了简化距离单元徙动校正，我们引入柱面坐标系。图 3 给出了直角坐标系和柱面坐标系的定义。

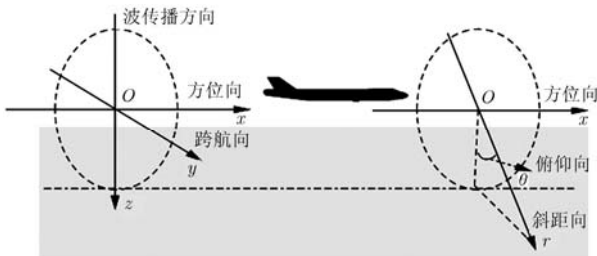


图3 直角坐标系和柱面坐标系的定义

场景目标 P 的直角坐标 (x_0, y_0, z_0) 到柱面坐标 (x_0, r_0, θ_0) 的变换为

$$r_0 = \sqrt{y_0^2 + z_0^2}; \quad \theta_0 = \arcsin(y_0 / z_0) \quad (4)$$

在柱面坐标系 $O-xr\theta$ 中，场景目标 P 的距离历程为

$$\begin{aligned} R &= r_0 \sqrt{1 + \frac{(x-x_0)^2}{r_0^2} + \frac{y_T^2}{r_0^2} - 2y_T r_0 \sin(\theta_0)} \\ &\quad + r_0 \sqrt{1 + \frac{(x-x_0)^2}{r_0^2} + \frac{y_R^2}{r_0^2} - 2y_R r_0 \sin(\theta_0)} \end{aligned} \quad (5)$$

对地观测中， r_0 非常大，因此对上述距离历程进行泰勒级数展开并忽略三次及三次以上的高次项。泰勒展开后场景目标 P 的距离历程为

$$\begin{aligned} R &= 2r_0 + \frac{(x-x_0)^2}{r_0} + (y_T + y_R) \sin \theta_0 \\ &\quad - \frac{1}{2} \frac{(y_T^2 + y_R^2) \cos^2 \theta_0}{r_0} \end{aligned} \quad (6)$$

假设该机载 3D-SAR 的发射信号 $p(t)$ 为线性调频脉冲信号

$$p(t) = \text{rect}\left\{\frac{t}{T_p}\right\} \exp\left\{j2\pi\left(f_c t + \frac{1}{2} K_r t^2\right)\right\} \quad (7)$$

其中 T_p 为脉冲宽度， f_c 为发射信号载波频率， K_r 为线性调频信号的调频率，线性调频信号的带宽 $B = K_r T_p$ ， $\text{rect}(\bullet)$ 表示发射信号的包络，为矩形函数。

经过解调后的机载 3D-SAR 回波信号模型如下：

$$\begin{aligned} S(t, x) &= \sigma \text{rect}\left\{\frac{t-R/C}{T_p}\right\} \exp\left\{j\pi K_r \left(t - \frac{R}{C}\right)^2\right\} \\ &\quad \cdot \exp\left\{-j2\pi f_c \frac{R}{C}\right\} \end{aligned} \quad (8)$$

其中 σ 为解调后的回波信号幅度。

4 跨航向稀疏阵列机载下视 MIMO 3D-SAR 成像算法

采用时分的方式区分不同的发射信号，由于平台的运动，使得不同脉冲下得到的等效相位中心在方位向发生相对运动，一个孔径综合周期内获得的等效相位中心将不在同一条直线上，因此，在成像处理之前，需要对获取的回波数据进行运动补偿，使得孔径综合的相位中心分布在同一条直线上，然后在进行 3 维成像处理。

需要补偿的相位为^[10]

$$\begin{aligned} \Delta\phi_{k,i} &= \frac{4\pi}{\lambda} \left[\sqrt{\left(x_0 + \frac{2MV}{\text{PRF}}(k-N) + \Delta x_i\right)^2 + y_0^2 + z_0^2} \right. \\ &\quad \left. - \sqrt{\left(x_0 + \frac{2MV}{\text{PRF}}(k-N)\right)^2 + y_0^2 + z_0^2} \right] \end{aligned} \quad (9)$$

其中 $i \in [1, 2M], k \in [1, 2N - 1]$, i 代表第 i 个发射单元, $2N-1$ 表示获取的数据在方位向的采样点数, $2M$ 表示有 $2M$ 个发射单元, V 为平台的飞行速度, PRF 表示脉冲重复频率, Δx_i 表示在第 k 个方位向采样点处, 第 1 个发射单元到第 i 个发射单元期间内平台运动的距离。

结合该车载 3D-SAR 的距离历程和回波信号模型可以看出:

$$S(t, x) = \sigma_i \text{rect} \left[\frac{t - R/C}{T_p} \right] \exp \left\{ j\pi K_r \left(t - \frac{R}{C} \right)^2 \right\} \cdot \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda} \frac{(x - x_0)^2}{r_0} \right\} \cdot \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda} \left[(y_T + y_R) \sin \theta_0 - \frac{1}{2} \frac{(y_T^2 + y_R^2) \cos^2 \theta_0}{r_0} \right] \right\} \exp \left\{ -j \frac{4\pi r_0}{\lambda} \right\} \quad (10)$$

其中, 第 1 个相位项包含了斜距向信息, 第 2 个相位项包含了方位向信息, 第 3 个相位项包含了俯仰向信息, 最后一个相位项对成像没有影响。常规 2 维 SAR 回波信号模型中也存在第 2 个与第 2 个相位项, 因此 3 维成像处理中, 斜距向和方位向可以采用距离多普勒算法处理, 俯仰向信息中存在一个二次相位项, 并且 y_T 和 y_R 代表发射单元和接收单元的坐标位置, 飞机高空飞行时, 跨航向阵列的长度相比斜距 r_0 来说非常小, 因此俯仰向的信息满足 SPECAN(频谱分析)处理的条件^[15], 可以使用频谱分析的方法进行俯仰向成像处理, 最终得到斜距向-方位向-俯仰向的 3 维 SAR 图像。

(1)斜距向处理 斜距向压缩是在距离向频域-方位向空域-俯仰向空域通过匹配滤波完成的。回波信号在距离向频域-方位向空域-俯仰向空域的表达式为

$$S(f, x) = \sigma \cdot \text{rect} \left[\frac{f}{K_r T_p} \right] \exp \left\{ -j \frac{\pi f^2}{K_r} \right\} \cdot \exp \left\{ -j \frac{2\pi f R}{C} \right\} \exp \left\{ -j \frac{2\pi f_c R}{C} \right\} \quad (11)$$

斜距向匹配滤波参考函数为

$$H_r(f) = \text{rect} \left[\frac{f}{K_r T_p} \right] \exp \left\{ -j \frac{\pi f^2}{K_r} \right\} \quad (12)$$

斜距向匹配滤波后的信号经斜距向逆傅里叶变换完成压缩, 压缩后的信号为

$$S(t, x) = A_r \text{sinc} \left[B \left(t - \frac{R}{C} \right) \right] \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda} \frac{(x - x_0)^2}{r_0} \right\} \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} r_0 \right\} \cdot \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda} \left[(\cos^2 \theta_0 (y_T^2 + y_R^2) / 2 - (y_T + y_R) r_0 \sin \theta_0) / r_0 \right] \right\} \quad (13)$$

其中 A_r 为斜距向压缩后的信号幅度, B 为线性调频信号的带宽。

(2)方位向处理 方位向压缩是在斜距向空域-方位向波数域-俯仰向空域完成的。利用驻定相位原理, 将斜距向压缩后的信号变换到方位向波数域:

$$S(t, k_x) = \int_x S(t, x) \exp \{-jk_x x\} dx = C_r \text{sinc} \left[B \left(t - \frac{R}{C} \right) \right] \cdot \exp \left\{ j \frac{k_x^2}{4\pi K_a} \right\} \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} r_0 \right\} \exp \{-jk_x x_0\} \quad (14)$$

其中 $K_a = 2/\lambda r_0$ 表示方位向信号调频率, C_r 为与方位向压缩无关的项。

$$C_r = A_r \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} r_0 \right\} \cdot \exp \left\{ -j \frac{2\pi \cos^2 \theta_0 (y_T^2 + y_R^2) / 2 - (y_T + y_R) r_0 \sin \theta_0}{\lambda r_0} \right\} \quad (15)$$

由驻定相位原理, 求得方位向的时频关系为 $k_x = -2\pi K_a (x - x_0)$ 。

距离历程中方位向的距离徙动项为 $(x - x_0)^2 / r_0$, 方位向压缩前先校正该距离徙动项。

方位向距离徙动校正之后的信号为

$$S(t, k_x) = C_r \text{sinc} \left[B \left(t - \frac{R_e}{C} \right) \right] \exp \left\{ j \frac{k_x^2}{4\pi K_a} \right\} \cdot \exp \{-jk_x x_0\} \quad (16)$$

其中 $R_e = 2r_0 + (y_T + y_R) \sin \theta_0 - \frac{1}{2} \frac{(y_T^2 + y_R^2) \cos^2 \theta_0}{r_0}$ 。

方位向匹配滤波参考函数为

$$H_a(k_x) = \exp \left\{ -j \frac{k_x^2}{4\pi K_a} \right\} \quad (17)$$

方位向匹配滤波后经过逆方位向傅里叶变换完成方位向压缩, 方位向压缩后的信号表达式为

$$S(t, x) = C_r A_a \text{sinc} \left[B \left(t - \frac{R_e}{C} \right) \right] \text{sinc} [B_a (x - x_0)] \quad (18)$$

其中 A_a 为方位向压缩后的信号幅度, $B_a = 2\alpha/\lambda$ 为方位向信号带宽。

(3)俯仰向处理 方位向距离徙动校正后得到

的距离徙动项为

$$\Delta R_e = -(y_T + y_R) \sin \theta_0 + \frac{1}{2} \frac{(y_T^2 + y_R^2) \cos^2 \theta_0}{r_0} \quad (19)$$

该距离徙动项与斜距 r_0 和俯仰角 θ_0 均有关，针对 r_0 对数据分块，对每一块数据使用场景中心处的斜距在俯仰向校正该距离徙动项。

距离徙动校正参考函数为

$$H_{\text{ercmc}} = \exp \left\{ j \frac{2\pi f}{C} \Delta R_e \right\} \quad (20)$$

俯仰向距离徙动校正后的信号表达式为

$$\begin{aligned} S(t, x) = & A_r A_a \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} r_0 \right\} \text{sinc} \left[B \left(t - \frac{2r_0}{C} \right) \right] \\ & \cdot \text{sinc} [B_a (x - x_0)] \exp \{ -j\pi K_e (y_T^2 + y_R^2) \} \\ & \cdot \exp \left\{ j \frac{2\pi}{\lambda} (y_T + y_R) \sin \theta_0 \right\} \end{aligned} \quad (21)$$

其中 $K_e = \cos^2 \theta_0 / \lambda r_0$ 为俯仰向信号调频率。

对俯仰向距离徙动校正后的信号进行解斜操作，消除俯仰向的二次相位项，解斜参考函数为

$$H_{de} = \exp \{ j\pi K_e (y_T^2 + y_R^2) \} \quad (22)$$

解斜后的信号为

$$\begin{aligned} S(t, x) = & A_r A_a \text{sinc} \left[B \left(t - \frac{2r_0}{C} \right) \right] \text{sinc} [B_a (x - x_0)] \\ & \cdot \exp \left\{ j \frac{2\pi}{\lambda} (y_T + y_R) \sin \theta_0 \right\} \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} r_0 \right\} \end{aligned} \quad (23)$$

解斜后的信号进行傅里叶变换，完成俯仰向压缩，俯仰向压缩后的信号为

$$\begin{aligned} S_{\text{image}} = & A \cdot \text{sinc} \left[B \left(t - \frac{2r_0}{C} \right) \right] \\ & \cdot \text{sinc} [B_a (x - x_0)] \text{psinc} (\sin \theta_0) \end{aligned} \quad (24)$$

其中

$$\begin{aligned} \text{psinc} (\sin \theta_0) = & \sin \left[\frac{\pi}{\lambda} 2MN d (\sin \theta - \sin \theta_0) \right] \\ & \left/ 2MN \sin \left[\frac{\pi}{\lambda} d (\sin \theta - \sin \theta_0) \right] \right. \end{aligned}$$

由 S_{image} 可以看出该算法完成了斜距向、方位向、俯仰向的聚焦，最终得到了斜距向、方位向、俯仰向的 3 维分辨图像。

跨航向稀疏阵列 MIMO 机载 3D-SAR 在斜距向、方位向、俯仰向的分辨率为

$$\left. \begin{aligned} \rho_r &= C / 2B \\ \rho_x &= 1 / B_a = D_a / 2 \\ \rho_\theta &= \lambda / 2MN d = \lambda / 2L_s \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

其中 D_a 为接收天线单元在方位向的尺寸， L_s 为整个稀疏阵列等效得到的虚拟阵列的长度(斜距向和方

位向的分辨率单位为 m，俯仰向的分辨率单位为弧度，也可以换算成角度)。

5 跨航向稀疏阵列机载下视 MIMO 3D-SAR 成像仿真实验

成像仿真实验参数示于表 1。成像结果分辨率、峰值旁瓣比、积分旁瓣比指标示于表 2。

仿真的场景是空间中分布的 7 个点目标，使用本文提出的成像算法对回波数据进行处理，7 个目标的 -33 dB 3 维成像结果如图 4 所示，从图 4 可以看出目标的脉冲响应比较符合理论情况；图 5~图 7

表 1 仿真实验参数

载波频率	37.5 GHz
信号带宽	750 MHz
脉冲重复频率	400 Hz
脉冲持续时间	1 μ s
飞行高度	500 m
飞机飞行速度	20 m/s
方位向成像范围	0~20 m
方位向合成孔径长度	8 m
阵列天线长度	4 m
发射单元数目	4
接收单元数目	87
发射天线方位向波数宽度	4°
发射天线俯仰向波数宽度	5°
点目标位置(斜距向 m,	1(490,5,0); 2(490,15,0);
方位向 m, 俯仰向 °)	3(490,10,2); 4(490,10,-2);
	5(495,10,0); 6(490,10,0);
	7(485,10,0)

分别为目标在斜距-方位向、方位-俯仰向、斜距-俯仰向的 2 维剖面成像结果，从图 4~图 7 结合成像指标分析可以看出，该成像算法可以精确重建场景目标的 3 维图像。从上述仿真结果可看出，采用收发天线分置的跨航向稀疏阵列 MIMO 机载 3D-SAR，不仅减少了天线数目，降低了系统复杂度，还能获得较理想的 3 维成像结果。

6 结束语

本文首先给出了跨航向稀疏阵列 MIMO 机载 3D-SAR 的成像几何，并推导了该成像几何条件下的 3 维回波信号模型。然后结合场景目标的距离历程和回波信号模型提出了柱面坐标系中的 3 维成像

表2 成像结果分辨率、峰值旁瓣比、积分旁瓣比指标

目标	斜距向(分辨率(m), PSLR, ISLR)	方位向(分辨率(m), PSLR, ISLR)	俯仰向(分辨率(°), PSLR, ISLR)
1	(0.20, -13.86, -10.09)	(0.25, -14.01, -10.68)	(0.18, -13.99, -10.43)
2	(0.21, -13.92, -10.07)	(0.26, -13.96, -10.70)	(0.19, -14.11, -10.45)
3	(0.21, -13.87, -10.03)	(0.25, -13.99, -10.75)	(0.19, -14.09, -10.47)
4	(0.20, -13.90, -10.11)	(0.25, -13.89, -10.69)	(0.20, -14.07, -10.48)
5	(0.20, -13.88, -10.07)	(0.26, -14.00, -10.77)	(0.18, -13.98, -10.50)
6	(0.20, -13.92, -10.13)	(0.26, -13.95, -10.76)	(0.19, -13.99, -10.49)
7	(0.20, -13.90, -10.09)	(0.26, -13.97, -10.69)	(0.18, -14.06, -10.51)

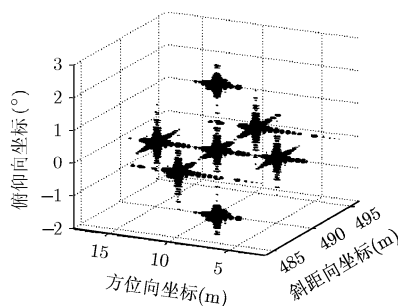


图4 3维成像结果(-33 dB结果)

算法。最后通过仿真实验精确重建了场景目标的3维图像,并给出了成像结果的分辨率、峰值旁瓣比、积分旁瓣比,通过这些成像指标验证了算法的有效性。在实际的3维成像系统中,线性阵列的各个通道之间会存在通道间相位误差,对成像造成一定影响,这也是使用本文的算法在处理实际数据时需要进一步研究的内容。

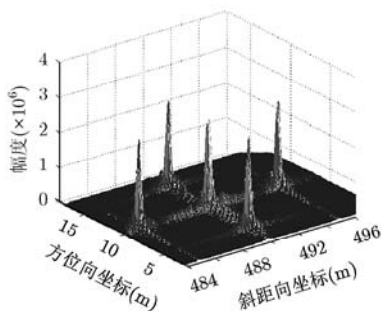


图5 斜距-方位向成像结果

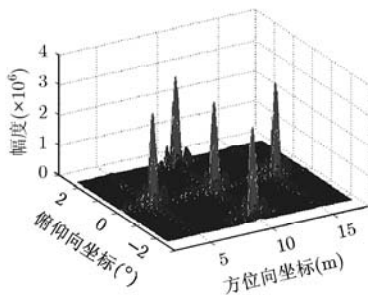


图6 方位-俯仰向成像结果图

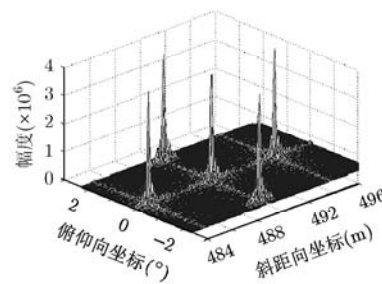


图7 斜距-俯仰向成像结果

参考文献

- [1] Klare J, Brenner A R, and Ender J H G. A new airborne radar for 3D imaging-image formation using the ARTINO principle[C]. 6th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Dresden, Germany, May 16-18, 2006: 16-18.
- [2] Gierull C H. On a concept for an airborne downward-looking imaging radar[J]. *International Journal of Electronics and Communications*, 1999, 53(6): 295-304.
- [3] 保铮, 刑孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 103-105.
- [4] 杜磊. 阵列天线视合成孔径雷达三维成像模型、方法与实验研究[D]. [博士学位论文], 中国科学院电子学研究所, 2010: 61-86.
- [5] 成晨, 张晓玲. 基于MUSIC算法的超分辨率三维SAR成像方法[OL]. 中国科技论文在线. <http://www.paper.edu.cn/index.php/default/releasepaper/content/201012-1046>. 2011.1.
- [6] Zhang Dong-hao and Zhang Xiao-ling. Downward-looking 3-D linear array SAR imaging based on Chirp scaling algorithm[C]. Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar 2009, Xi'an China, Oct. 26-30, 2009: 1043-1046.
- [7] 李伟华, 张晓玲. 一种基于多发多收的虚拟阵列的三维SAR成像模型[C]. 第十届全国雷达学术年会, 北京, Oct. 31-Nov. 2, 2008: 1308-1311.
- [8] Nouvel J F, Roques S, and Ruault du Plessis O. A low-cost imaging radar: DRIVE on board ONERA motorglider[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2007 (IGARSS 2007), Barcelona, Spain, July 23-27, 2007: 5306-5309.
- [9] Nouvel J F, Ruault du Plessis O, Svedin J, et al. Along track interferometry on rhone river [C]. 7th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Friedrichshafen, Germany, 2008: 495-497.

- [10] Hou Ying-ni, Li Dao-jing, and Hong Wen. The thinned array time division multiple phase center aperture synthesis and application[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2008 (IGARSS 2008), Boston, Massachusetts, USA, 2008: 25-28.
- [11] Xie Wen-cheng, Zhang Xiao-ling, and Shi Jun. MIMO antenna array design for airborne down-looking 3D imaging SAR[C]. Signal Processing Systems(ICSPS) 2010 2nd International Conference, Dalian, China, July 5-7, 2010, Vol 2: 452-456.
- [12] Li Jian. MIMO Radar Signal Processing[M]. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 2009: 65-77.
- [13] Klare J, Ceruttii-Maori D, Brenner A, *et al.* Image quality analysis of the vibrating sparse MIMO antenna array of the airborne 3D imaging radar ARTINO[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2007 (IGARSS 2007), Barcelona, Spain, July 23-27, 2007: 5310-5314.
- [14] 叶荫, 刘光炎, 孟喆. 机载下视稀疏阵列三维SAR系统及成像[J]. 中国电子科学研究院学报, 2011, 6(1): 96-100.
- [15] Reigber A. Airborne polarimetric SAR tomography[D]. [Ph.D.dissertation], University of Stuttgart, 2001: 65-70.
- 彭学明: 男, 1987年生, 硕博连读生, 研究方向为合成孔径雷达3维成像理论、成像算法、实时成像处理.
- 谭维贤: 男, 1981年生, 助理研究员, 研究方向为合成孔径雷达3维成像体制与算法、阵列天线 SAR 等.
- 王彦平: 男, 1976年生, 副研究员, 研究方向为3维成像 SAR、轨道(地基)SAR、阵列天线 SAR 等.
- 洪文: 女, 1968年生, 研究员, 研究方向为雷达信号处理理论、微波成像算法、微波遥感图像理解及其应用.
- 吴一戎: 男, 1963年生, 研究员, 中国科学院院士, 研究方向为微波成像、信号与信息的应用.