

连续场景的稀疏阵列 SAR 侧视三维成像研究

张清娟^{*①②} 李道京^① 李烈辰^{①②}

^①(中国科学院电子学研究所微波成像技术重点实验室 北京 100190)

^②(中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要: 合成孔径雷达的回波数据和图像数据都是复数, 由于各个分辨单元散射点的初始相位是随机的, 致使连续变化地物场景的信号带宽较大, 传统的单天线 SAR 很难实现空间稀疏降采样。该文采用交轨向多天线观测结构, 分析了交轨向稀疏阵列 SAR 的成像模型, 首次提出利用信号重构方法, 去除散射点随机初相位, 降低复信号带宽, 以较大间隔的空间稀疏采样实现稀疏阵列 SAR 侧视 3 维成像。干涉 SAR 2 维成像实际数据处理结果验证了通过信号重构可以降低复信号带宽, 稀疏阵列 SAR 侧视 3 维成像的仿真结果验证了该文方法的有效性。

关键词: 合成孔径雷达; 3 维成像; 稀疏采样; 信号重构; 连续场景

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)05-1097-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01136

Research on Continuous Scene Side-looking 3D Imaging Based on Sparse Array

Zhang Qing-juan^{①②} Li Dao-jing^① Li Lie-chen^{①②}

^①(*Science and Technology on Microwave Imaging Laboratory,*

Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(*Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

Abstract: The raw data of Synthetic Aperture Radar (SAR) is complex value, as well as the image data. Due to the random phase of each scattering cell, continuous scene has a wide signal band which makes single-aperture SAR difficult to realize down-sampling. In this paper, imaging model of cross-track sparse array SAR is analyzed. Signal reconstruction based imaging method under cross-track multi-aperture structure is investigated to eliminate random phases of scatters and reduce the signal bandwidth. Consequently, sparse array side-looking 3D imaging with larger interval space sampling is realized. The results on InSAR 2D real data verify that the bandwidth can be reduced after signal reconstruction. Besides, the simulation experiments on 3D imaging validate the effectiveness of the proposed method.

Key words: SAR; 3D imaging; Sparse sampling; Signal reconstruction; Continuous scene

1 引言

近年来, 3 维合成孔径雷达(Three-Dimensional Synthetic Aperture Radar, 3D-SAR)成像由于可以获得具有 3 维分辨能力的图像而得以重视和深入研究, 文献[1]研究了合成孔径雷达 3 维成像的模型和方法等问题。

3D-SAR 的交轨向分辨率与交轨向孔径尺寸直接相关, 为了增大交轨向分辨率需要有足够大的交轨向孔径, 而交轨向孔径尺寸的增大直接导致子阵增多、系统复杂以及数据量增大。为了避免上述问题, 交轨向阵列可采用稀疏阵列。由于在接收等效

相位中心原理^[2]下可以产生新的相位中心, 从而可以考虑优化稀疏阵列天线的位置, 使在各子阵天线在多发多收条件下, 所产生的相位中心分布情况和满阵天线相同时, 采用的真实子阵天线最少。文献[3]采用该稀疏阵列优化方法完成了机载交轨稀疏阵列雷达下视 3 维成像。

从一般概念讲, 连续变化场景应具有可压缩性。但和光学的灰度图像不同, SAR 的回波数据和图像都是复数, 由于各个分辨单元散射点的初始相位是随机的, 致使连续变化地物场景的可压缩性难以体现, 在空间采样率和系统带宽的设计上, 仍需以对点目标信号空间采样率和系统带宽为参考, 故传统的单孔径 SAR 很难实现空间降采样。采用交轨阵列天线 SAR 形成的多天线观测结构, 有可能消除不同

2012-09-06 收到, 2013-01-11 改回

国家自然科学基金(61271422)资助课题

*通信作者: 张清娟 qingjuan0535@163.com

分辨单元散射点的随机初始相位影响,还原连续变化地物场景的可压缩性,降低复图像带宽。复图像带宽的减少就意味着空间采样率可以降低,该概念不仅可用于2维成像的空间降采样,也可考虑转入交轨稀疏阵列3维成像空间采样过程,并在交轨向实现空间降采样。事实上由于自然地物场景都是在3维空间连续变化的,在3维成像时可实现空间降采样的倍数应该更大,这使得交轨向子阵的高度稀疏布局成为可能。

由于观测场景具有连续性,稀疏阵列多相位中心孔径综合后的相位中心数量和分布情况不必与满阵天线的相同。基于以上考虑,与文献[2,3]相比,本文采用更加稀疏的交轨向阵列,研究了连续场景的稀疏阵列SAR侧视3维成像问题。

2 信号模型

以构型为[100100111001001]的由7个子阵构成的稀疏阵列为例,本文采用的交轨向稀疏阵列SAR侧视3维成像系统信号模型如图1所示。

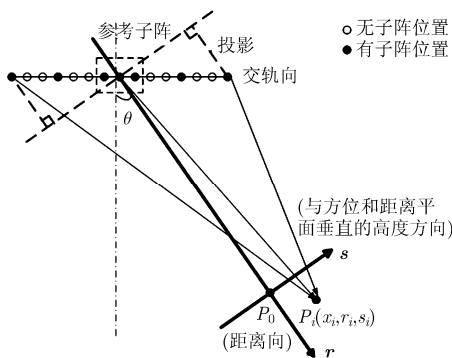


图1 交轨向稀疏阵列天线SAR信号模型

传统的3维成像模型一般建立在以顺轨向 x ,交轨向 y 和高程向 z 为坐标轴的直角坐标系中^[4],定义为传统直角坐标系,文献[5]为了简化距离徙动校正引入了柱面坐标系,将电磁波由发射到接收的距离历程表示为方位向 x ,距离向 r 以及俯仰角 θ 的函数。本文中,为了避免3维成像时交轨向与距离向的耦合影响,根据参考文献[6]将坐标系建立在顺轨向 x ,距离向 r 以及与顺轨和距离平面垂直的高度方向 s (如图1所示),定义为斜平面直角坐标系。此外,实际数据处理过程中,可将交轨方向的水平阵列获取的回波信号投影到与水平方向成 θ 角(θ 为场景中心入射角)的直线上。

图1所示的子阵位置均表示等效相位中心位置,该模型等效于各子阵自发自收,设某子阵投影到图1所示的直线上后在斜平面直角坐标系中的坐标为 $(x_m, Rref, s_n)$,其中Rref为固定值,是阵列中

心到场景中心的斜距, $Rref = H / \cos \theta$ (H 为载机高度),该子阵到目标点 $P_i(x_i, r_i, s_i)$ 的距离为

$$R(x_m, s_n) = \sqrt{(x_m - x_i)^2 + (Rref - r_i)^2 + (s_n - s_i)^2} \approx (Rref - r_i) + \frac{(x_m - x_i)^2}{2(Rref - r_i)} + \frac{(s_n - s_i)^2}{2(Rref - r_i)} \quad (1)$$

由式(1)可以看出,将3维成像选在斜平面直角坐标系时,该模型可以等效为下视3维成像,Rref等效为下视3维成像中的载机高度, x_m 和 s_n 分别等效为下视3维成像中的顺轨向和交轨向坐标。

子阵发射的线性调频信号为

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

其中 T_p 为脉冲持续时间, f_c 为发射信号载波频率, K_r 为线性调频信号的调频率。总的回波信号可以看作是成像区域内所有点目标回波信号的迭加,则第 n 个子阵在方位向采样点为 x_m 时的回波信号可表示为

$$s(t, x_m, s_n) = \sum_i \sigma_{mi} p\left(t - \frac{2R(x_m, s_n)}{c}\right) \quad (3)$$

其中 $2R(x_m, s_n)/c$ 为该子阵到点目标的往返延时, $\sigma_{mi} = \gamma_{mi} e^{j\varphi_{mi}}$ 是点目标的回波系数,为一复数, γ_{mi} 为回波系数的幅度, φ_{mi} 为取值范围在 $[0, 2\pi]$ 的散射点随机初相位,由于观测角度变化很小,每个子阵对同一散射点的回波系数近似相等,可以将各子阵在散射点 P_i 的回波系数统一表示为 $\sigma_i = \gamma_i e^{j\varphi_i}$ 。

3 信号处理

3.1 斜平面直角坐标系3维成像

目前已有的3维成像方法有3维RD算法^[7]、3维 ωK 算法^[8]以及基于层析SAR的高分辨率成像^[9]等,本文的3维成像方法是首先对每个子阵的回波信号进行2维成像,然后对第3维高度方向进行成像,主要成像过程如下所述。

以场景中心点 $P_0(0, 0, 0)$ 为参考点,先采用2维 ωK 成像^[9]方法对每个子阵的回波信号进行2维成像,子阵回波信号2维成像后的信号为

$$s(t, x_m, s_n) = A_a A_r \text{sinc}\left[B\left(t - \frac{2(Rref - r_i)}{c}\right)\right] \cdot \text{sinc}\left[B_a(x_m - x_i)\right] \cdot \exp\left[-j4\pi(Rref - r_i)/\lambda\right] + j4\pi K_r \left[\frac{(s_n - s_i)^2}{2(Rref - r_i)}\right] \quad (4)$$

其中 A_a, A_r 分别为方位向、距离向压缩后的信号幅度, B, B_a 分别为距离向和方位向带宽, 以场景中心点 $P_0(0,0,0)$ 为参考点, 构造第3维频域匹配滤波器为

$$H_s = \text{FFT} \left\{ \exp \left[-j4\pi R_{\text{ref}} / \lambda + j4\pi Kr \frac{s^2}{2R_{\text{ref}}} \right] \right\} \quad (5)$$

其中 s 为 s 轴方向的采样点, FFT 代表1维傅里叶变换经过第3维频域匹配滤波就可以得到聚焦的3维图像。

3.2 3维空间信号重构

对2维复图像, 为了去除散射点的随机初相位, 可利用干涉SAR的处理方法实现信号重构。设两天线的2维复图像分别为

$$S_1 = A_1 \exp(j(\varphi_{r1} + \varphi_1)), \quad S_2 = A_2 \exp(j(\varphi_{r2} + \varphi_2)) \quad (6)$$

其中 A_1, A_2 分别为两幅复图像的幅度, $\varphi_{r1}, \varphi_{r2}$ 为散射点随机初相位, φ_1, φ_2 为由高程引起的相位。以图像 S_2 为2维参考复图像, 对图像 S_1 进行干涉处理有

$$S_{re} = A_1 \exp[j((\varphi_{r1} + \varphi_1) - (\varphi_{r2} + \varphi_2))] \quad (7)$$

由于两天线复图像由散射点引起的随机初相位是近似相等的, 即 $\varphi_{r1} \approx \varphi_{r2}$, 则 S_{re} 可以简化为

$$S_{re} = A_1 \exp[j(\varphi_1 - \varphi_2)] \quad (8)$$

将该图像变换至回波域后形成的信号称之为重构信号, 该重构信号已经去掉了散射点的随机初相位, 只保留了由高程差引起的相位, 其信号带宽已经变窄。

同样的信号处理思路可用于3维成像, 对交轨向阵列SAR系统而言, 构造去除初相位所需的3维参考复图像, 可利用系统阵列中间的3个连续子阵(3个子阵为3维成像所需的最小阵列结构)形成参考回波数据, 对其进行3维成像处理, 并设为3维参考复图像 S_2 。对阵列中全部子阵获得的回波信号进行3维成像处理, 形成全阵3维复图像 S_1 。以3维复图像 S_2 作为参考, 让3维复图像 S_1 的相位减去3维复图像 S_2 的相位后, 信号的3维谱宽已经变窄, 将该3维复图像变换至回波域后形成重构的3维回波信号, 经低通滤波后可用于3维成像处理。

3.3 信号处理流程

基于上述信号处理方法, 本文形成的信号处理流程如图2所示。

信号处理的基本过程是首先对全阵回波信号和参考子阵回波信号分别按本文所述的3维成像方法进行3维成像, 然后用全阵3维复图像的相位减去参考3维复图像的相位并变换至回波信号域形成重构信号, 重构信号经过3维低通滤波^[10]滤除不必要的高频分量后在斜平面直角坐标系中重新成像,

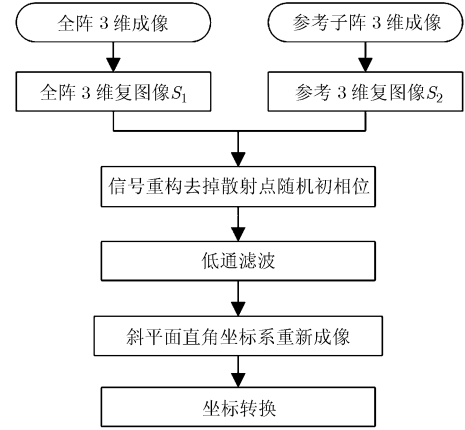


图2 信号处理流程图

最后将成像结果坐标转换到传统直角坐标系中, 进行误差分析。特别要说明的是, 此处传统直角坐标系的 y 轴不是用地距而是用斜距表示的。

4 干涉SAR 2维成像实际数据验证

4.1 实际数据验证

本文采用基线长度为1m的毫米波干涉SAR实际数据(分辨率为方位向0.1m×距离向0.375m), 用2维图像数据来验证本文信号重构方法的有效性。实际数据的幅度、干涉相位及其2维频谱如图3所示。

将天线2的复图像作为参考, 用天线1的复图像相位减掉参考天线复图像的相位, 得到重构后的回波信号, 该信号经过方位向和距离向0.5倍归一化带宽低通滤波和成像处理后形成的复图像的幅度、相位及2维频谱如图4所示。

对比图3和图4可以看出, 实际数据在重构前后形成的复图像的幅度和相位没有明显变化, 而其2维频谱带宽已明显变窄。这说明本文的信号重构处理方法可以实现降低信号带宽的目的。

4.2 误差分析

本文用最小平均距离对重构处理前后的成像结果进行评价,

$$\Delta d = \frac{1}{MN} \sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (\Delta z)^2} \quad (9)$$

其中 Δz 为2维图像重构前后的幅度图像或干涉相位图的数值差, 式(9)也可用于3维成像误差分析, 此时 Δz 变为3维成像结果与仿真场景的高度差。

根据式(9)计算得到的图3和图4的幅度、相位间的最小平均距离分别为0.0093和0.05°, 由此可以证明本文信号重构处理方法对2维成像处理没有引入较大的误差。

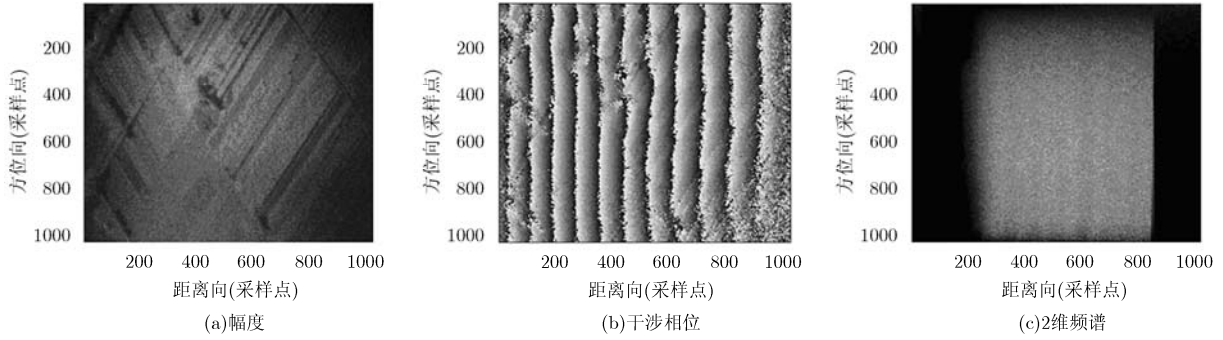


图 3 实际数据图像及频谱

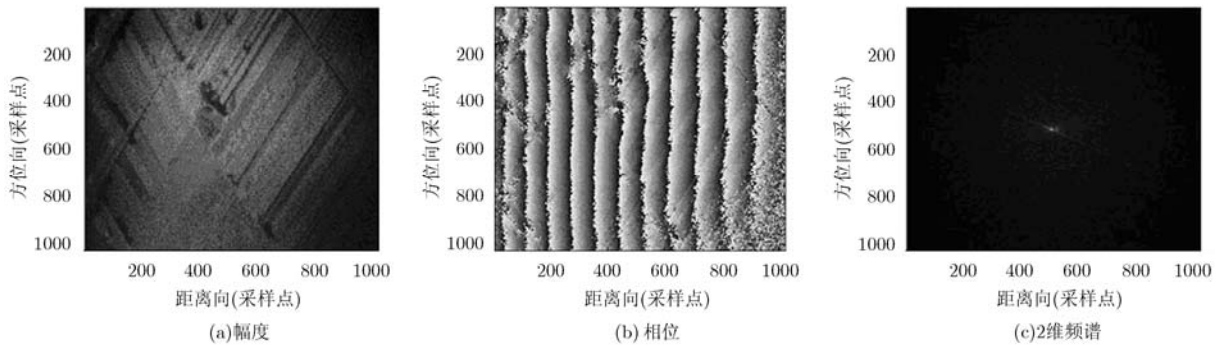


图 4 实际数据重构信号图像及频谱

5 阵列 SAR 侧视 3 维成像仿真分析

5.1 仿真参数

本文设计的仿真连续场景大小为 $15\text{ m} \times 15\text{ m}$ ，场景中心为半径 4 m ，高 2 m 的圆锥体目标。交轨向稀疏阵列 SAR 系统的子阵数目过多会增加系统复杂度，工程实现困难，子阵间隔较大数目太少又会提高对场景连续性的要求。综合考虑以上两个方面将子阵位置的数目选为 15 个，阵列布局如图 1 所示。在仿真中子阵尺寸为 0.3 m ，等效相位中心的阵元间距为 0.15 m ，对应的阵列长度为 2.25 m 。为了得到与上文中实际数据相近的方位向和距离向分辨率，其他系统仿真参数设计如表 1 所示。

如表 1 参数得到的 3 维分辨率的理论值为 0.15 m (顺轨向) $\times 0.375\text{ m}$ (距离向) $\times 1.4\text{ m}$ (高度方向)。在传统直角坐标系下的目标场景如图 5 所示，为了

表 1 系统仿真参数

载机高度	500 m	场景中心入射角	35°
飞行速度	50 m/s	发射信号带宽	400 MHz
脉冲重复频率 (PRF)	600 Hz	距离向采样频率	600 MHz
脉冲宽度	$2\ \mu\text{s}$	基线倾角	0°
交轨向低通滤波归一化带宽	0.1	方位和距离向低通滤波归一化带宽	0.5

方便与 3 维成像的结果进行对比，还将锥体转换到了 y 轴用斜距表示的传统直角坐标系中。

5.2 仿真分析

本文仿真中密集阵型定义为如图 1 所示的交轨向阵列的所有位置上都有子阵的阵型，即 [1111111111111111]，密集阵型 3 维复图像信号以及重构 3 维复图像信号的 3 维频谱如图 6 所示，重构 3 维复图像信号的 3 维频谱已压缩变窄。

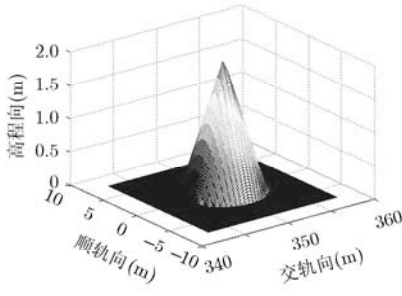
假定地面场景的连续性可使交轨向阵列稀疏 2 倍，在原理上交轨向阵型可稀疏为 [100100100100]，为在空间不欠采样的情况下形成 3 维参考复图像，需增设 2 个子阵形成 [10010011001001] 阵型，该阵型即为本文仿真中的稀疏阵型，此时 15 个子阵缩减为 7 个子阵构成的稀疏阵，该稀疏阵复图像信号和重构的 3 维复图像信号的 3 维频谱如图 7 所示，稀疏阵重构的 3 维复图像信号的 3 维频谱也已压缩变窄。

上述分析结果表明，当观测场景具有连续性，在 3 维复图像域去除不同分辨单元散射点的随机初始相位影响后，尽管参考 3 维复图像的交轨分辨率较低，回波信号的交轨向谱宽仍可以下降，交轨向的子阵可以较大间隔稀疏布设。

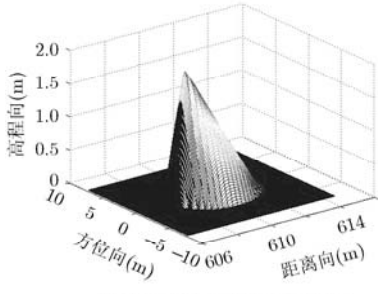
15 个子阵的密集阵型成像结果如图 8 所示。

稀疏阵型的成像结果及用本文方法重构处理后的成像结果如图 9 所示。

对 3 维成像而言，场景坐标点的提取和信号归

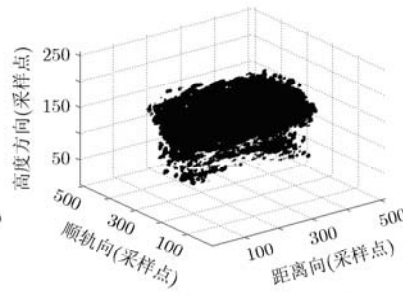


(a)用地距表示的锥体目标场景

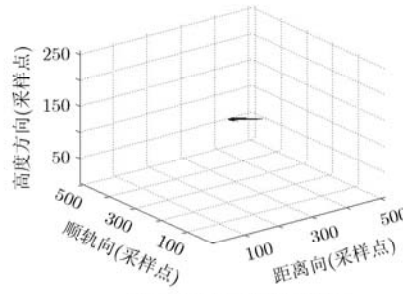


(b)用斜距表示的锥体目标场景

图5 传统直角坐标系下的目标场景

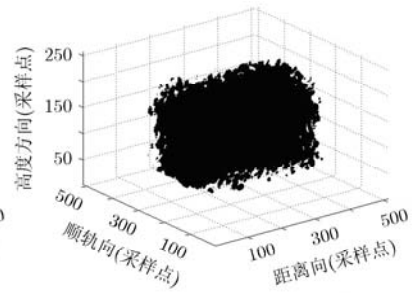


(a)密集阵型成像后3维频谱

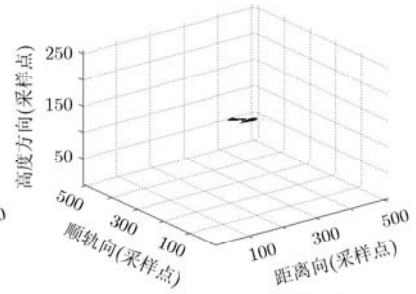


(b)重构信号成像后3维频谱

图6 密集阵型[1111111111111111]复图像3维频谱



(a)稀疏阵型成像后3维频谱



(b)重构信号成像后3维频谱

图7 稀疏阵型[100100111001001]复图像3维频谱

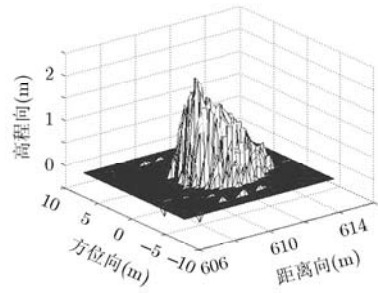
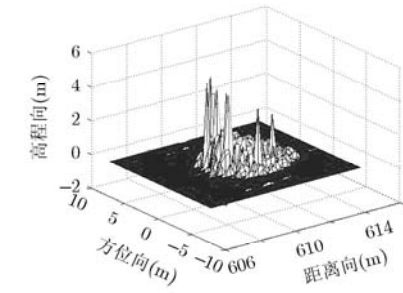
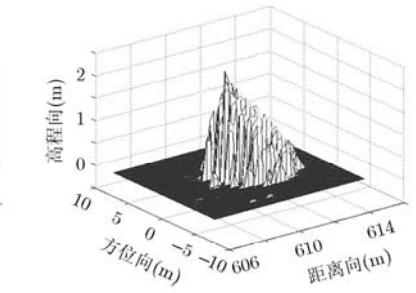


图8 密集阵型成像结果



(a)稀疏阵型直接成像结果



(b)基于信号重构的稀疏阵型成像结果

图9 稀疏阵型成像结果

一化幅度及阈值选取有关，在方位距离向平面内坐标点 (i, j) ($1 \leq i \leq N_a, 1 \leq j \leq N_r, N_a, N_r$ 分别为方位向和距离向点数)处显示的信号幅度值是3维成像得到的3维数组 S 的列向量 $S(i, j, :)$ 中大于阈值的元素的坐标值中的最大值，因此选择较大的阈值可以避免一些幅度值较小的尖峰的存在，但是阈值过大又会影响成像结果的精确度，本文选择 0.3 和 0.4 两个阈值对侧视 3 维成像仿真结果进行的误差分析及高度方向分辨率如表 2 所示。

由图 9(a)可以看出由于稀疏阵列的高副瓣影响，稀疏阵列的成像结果不甚理想，出现很多的尖峰值。而对比图 8 和图 9(b)可以看出基于信号重构的稀疏阵型成像结果与密集阵型的成像结果接近，没有高副瓣的现象。表 2 的误差分析结果可以得出同样的结论，稀疏阵型重构信号成像结果的最小平均距离与密集阵型成像结果接近，而稀疏阵型直接

表 2 仿真结果误差分析

成像阵型	最小平均距离(m)		高度方向分辨率(m)
	阈值 0.3	阈值 0.4	
密集阵型	0.0040	0.0042	1.50
稀疏阵型	0.0064	0.0045	1.50
基于信号重构的稀疏阵型	0.0046	0.0043	1.65

成像结果的最小平均距离较大，此外，由于低通滤波处理影响，基于信号重构的稀疏阵列侧视 3 维成像方法在高度方向的分辨率略有降低。以上仿真实验及分析结果进一步证明了本文方法的有效性。

6 结束语

由于观测场景具有连续性，稀疏阵列多相位中心孔径综合后的相位中心数量可以少于满阵天线，

使用高度稀疏的交轨向阵列有可能获得较为理想的 3 维成像效果。本文基于连续场景信号, 采用交轨多天线观测结构, 分析了 SAR 信号的稀疏性, 证明通过消除分辨单元散射点的随机初相位, 可以降低 SAR 复信号带宽, 实现稀疏降采样, 并首次提出利用信号重构方法实现连续场景的稀疏阵列 SAR 侧视 3 维成像。

本文主要研究了交轨向的稀疏采样问题, 在观测场景具有连续性且分辨率要求不高的情况下, 3 维成像时阵列天线 SAR 在方位向和距离向也可以进行适当的降采样。

参 考 文 献

- [1] 杜磊. 阵列天线下视合成孔径雷达 3 维成像模型、方法与实验研究[D]. [博士学位], 中国科学院电子学研究所, 2010.
Du Lei. Study on model, algorithm and experiment for downward-looking synthetic aperture radar three-dimensional imaging based on linear array antennas[D]. [Ph.D. dissertation], Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2010.
 - [2] 侯颖妮, 李道京, 洪文. 稀疏阵时分多相位中心孔径综合及其应用[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(4): 732-737.
Hou Ying-ni, Li Dao-jing, and Hong Wen. The application of thinned array time division multiple phase center synthesis [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(4): 732-737.
 - [3] 腾秀敏, 李道京. 机载交轨稀疏阵列天线雷达的下视 3 维成像处理[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(6): 1311-1317.
Teng Xiu-min and Li Dao-jing. Downward-looking 3D imaging processing for airborne cross-track sparse array radar [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(6): 1311-1317.
 - [4] She Z, Gray D A, Bogner R E, *et al.* Three-dimensional spaceborne synthetic aperture radar (SAR) imaging with multiple pass processing[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(20): 4357-4382.
 - [5] 彭学明, 王彦平, 谭维贤, 等. 基于跨航向稀疏阵列的机载下视 MIMO 3D-SAR 3 维成像算法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(4): 943-949.
Peng Xue-ming, Wang Yan-ping, Tan Wei-xian, *et al.* Airborne downward-looking MIMO 3D-SAR imaging algorithm based on cross-track thinned array[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(4): 943-949.
 - [6] Fornaro G, Serafino F, and Soldovieri F. Three-dimensional focusing with multipass SAR data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(3): 507-517.
 - [7] 叶荫, 刘光炎, 孟喆. 机载下视稀疏阵列 3 维 SAR 系统及成像 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2011, 6(1): 96-100.
Ye Yin, Liu Guang-yan, and Meng Zhe. Airborne downward-looking 3D-SAR systems and its imaging using sparse array antennas[J]. *Journal of China Academy of Electronics and Information Technology*, 2011, 6(1): 96-100.
 - [8] Zhu Xiao-xiang and Bamler R. Very high resolution spaceborne SAR tomography in urban environment[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(12): 4296-4308.
 - [9] Cumming I G and Wong F H. *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation* [M]. Norwood, MA: Artech House, 2005, Chapter 8.
 - [10] Li Lie-chen, Li Dao-jing, Liu Bo, *et al.* Three-aperture inverse synthetic aperture radar moving targets imaging processing based on compressive sensing[C]. The 8th IEEE International Symposium on Instrumentation and Control Technology (ISICT 2012), London, UK, July 2012: 210-214.
- 张清娟: 女, 1987 年生, 硕士生, 研究方向为多孔径天线 SAR 的数据压缩处理。
李道京: 男, 1964 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为雷达系统和雷达信号处理。
李烈辰: 男, 1988 年生, 博士生, 研究方向为基于阵列信号处理的高分辨率雷达成像。