

## 基于压缩感知的三孔径毫米波合成孔径雷达侧视三维成像

李烈辰<sup>\*①②③</sup> 李道京<sup>①②</sup> 张清娟<sup>①②③</sup>

<sup>①</sup>(微波成像技术重点实验室 北京 100190)

<sup>②</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

<sup>③</sup>(中国科学院研究生院 北京 100190)

**摘要:** 基于压缩感知, 该文研究了交轨向三孔径毫米波合成孔径雷达侧视 3 维成像问题。利用交轨方向的三孔径天线形成的稀疏阵列结构, 获取高程分辨率并实现 3 维成像。由于交轨方向的采样数较少及非均匀采样, 高程分辨率低, 传统的基于傅里叶变换的 3 维成像技术获得的图像质量较差。针对此不足, 在交轨向稀疏采样的条件下, 该文采用压缩感知方法来实现超分辨成像。利用仿真和实际数据比较了传统成像方法和基于压缩感知的成像方法的性能, 并验证了该文方法的有效性。

**关键词:** 合成孔径雷达; 3 维成像; 压缩感知; 毫米波雷达; 稀疏阵列

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)03-0552-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01016

## Three-aperture Millimeter-wave SAR Side-looking Three-dimensional Imaging Based on Compressed Sensing

Li Lie-chen<sup>①②③</sup> Li Dao-jing<sup>①②</sup> Zhang Qing-juan<sup>①②③</sup>

<sup>①</sup>(Science and Technology on Microwave Imaging Laboratory, Beijing 100190, China)

<sup>②</sup>(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>③</sup>(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** Side-looking three-Dimensional (3D) imaging of three-aperture sparse array Synthetic Aperture Radar (SAR) based on Compressed Sensing (CS) is investigated in this paper. Using the sparse array structure in cross-track direction formed by three aperture antennas, the elevation resolution can be obtained and 3D imaging is achieved. However, the conventional Fourier transform based 3D imaging approach has a low resolution in elevation direction and brings the image quality problem because of the low number of acquisitions and irregular space sampling. CS theory is introduced to improve the resolution in the elevation direction. Experiment results on simulation and real data validate the effectiveness of the proposed method compared with the conventional imaging technique.

**Key words:** SAR; Three-dimensional imaging; Compressed Sensing (CS); Millimeter-wave radar; Sparse array

### 1 引言

随着阵列天线技术的发展, 3 维合成孔径雷达成像(Three-Dimensional Synthetic Aperture Radar imaging, 3D-SAR)近来成为研究的热点。结合高程方向的天线阵列, 多孔径 SAR 系统可以获得地物的高程分辨率从而实现 3 维成像。国内外许多学者对 3 维成像算法进行了研究<sup>[1-3]</sup>, 主要分为 3 维波数域算法, 后向投影(Backscatter Projection, BP)算法和基于层析 SAR (SAR Tomography, TomoSAR)模

型的算法。3 维波数域算法模型准确, 但其非线性相位补偿非常复杂, 运算量大<sup>[4,5]</sup>。对于机载侧视情况, 非零入射角的存在和交轨向较低分辨率会引起高度方向和交轨向的耦合<sup>[6]</sup>。BP 算法是一种比较传统的时域算法, 但其运算量也较大。层析 SAR 利用医学领域 CT 的原理, 利用不同轨道观测角的变化获得高程信息, 国外已有报道利用星载重轨数据对城市地区进行层析成像<sup>[7,8]</sup>。

近年来, 压缩感知 (Compressed Sensing, CS) 理论<sup>[9,10]</sup>的提出, 对信号的采集和处理引起了革命性的变化。该理论认为若一个信号是稀疏的, 那么可以用远少于传统 Shannon-Nyquist 采样定理所需采样数的数据量获取信号的全部信息, 并通过凸优化

2012-08-06 收到, 2012-11-30 改回

国家自然科学基金(61271422)和国家 973 计划项目(2009CB72400)资助课题

\*通信作者: 李烈辰 chrislee365@hotmail.com

等方法，以极大的概率正确恢复原信号。CS 理论已经被应用到与 SAR 相关的诸多领域。

本文基于 CS 的思想，在交轨向使用三孔径稀疏阵列天线结构，研究了机载侧视 3 维成像问题。针对交轨向采样数少及耦合问题，转换坐标系并引入 CS 理论，实现高程方向的超分辨成像。

## 2 机载三孔径 SAR 侧视 3 维成像模型

机载侧视三孔径 SAR 成像模型如图 1 所示。载机平台在高度方向  $z = H$  处沿  $x$  轴(方位向)做速度  $v$  的直线运动，三孔径稀疏阵列天线被安装在机腹处，平行于  $y$  轴(交轨向)。 $r$  轴代表斜距离方向， $s$  轴代表垂直于 2 维成像斜平面的高程方向(简称为高程方向)。 $x$  轴， $r$  轴和  $s$  轴 3 个方向互相垂直，构成一个右手直角坐标系。

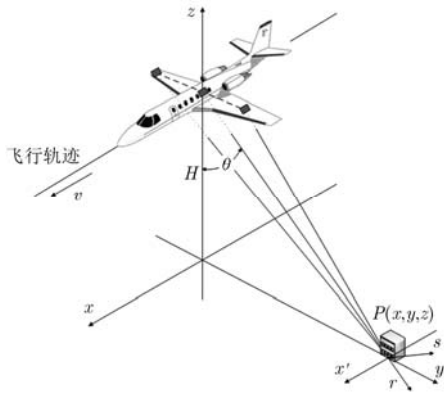


图1 机载侧视三孔径SAR模型

图 1 中的三孔径稀疏阵列的空间位置如图 2 所示。其中  $A_1$  为发射孔径，发射线性调频信号， $A_1$ 、 $A_2$  和  $A_3$  均为接收孔径，依次接收回波。交轨向 3 个真实孔径呈不等间隔的分布，孔径间的间隔分别为  $L_1$  和  $L_2$  ( $L_1 \neq L_2$ )。

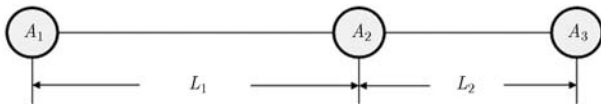


图2 真实孔径位置示意图

根据等效相位中心原理<sup>[11,12]</sup>，当孔径收发分置时，利用交轨向三孔径 1 发 3 收的模式，可获得 3 个等效相位中心，其分布情况如图 3 所示。

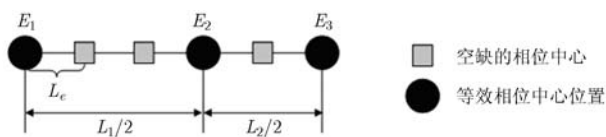


图3 等效相位中心位置示意图

3 个等效相位中心也呈非均匀分布，构成间距  $L_e = (L_1 - L_2)/2$  等效长度为  $(L_1 + L_2)/2$  的交轨向阵列。交轨向 3 个等效相位中心占据 6 个空间位置，构成 (100101) 形式的稀疏阵列结构，序列 (100101) 的自相关函数曲线如图 4 所示。交轨向稀疏阵列结构的自相关函数曲线仅存在一个峰值，且具有等副瓣的特点，可知该稀疏阵列具有一定的随机性。

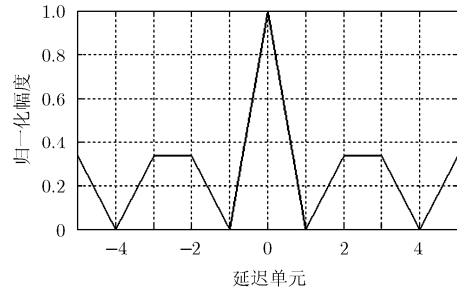


图4 阵列自相关函数曲线

经过等效相位中心补偿，可认为载机平台使用图 3 所示的线阵做自发自收操作。那么，在  $t_m$  采样时刻第  $i$  个等效相位中心到  $P$  点的距离可表示为

$$R(y_i) = \sqrt{(vt_m - x)^2 + (y_i - y)^2 + (H - z)^2} \quad (1)$$

其中  $y_i$  为第  $i$  个等效相位中心在交轨向的位置。从而可以得到第  $i$  个等效相位中心的回波为

$$s(y_i) = a_r \left[ \tau - \frac{2R(y_i)}{c} \right] \cdot a_a(t_m) \cdot \exp \left[ -j4\pi \frac{R(y_i)}{\lambda} \right] \cdot \exp \left[ j\pi K_a \left[ \tau - \frac{R(y_i)}{\lambda} \right]^2 \right] \quad (2)$$

其中  $a_r[\cdot]$  表示发射信号的包络波形， $a_a[\cdot]$  表示慢时间的窗函数， $c$  为光速， $\lambda = c/f_c$  为信号波长， $f_c$  为信号载频。经过运动补偿和成像处理，每个等效的孔径均可获得在  $x-r$  平面的 2 维图像。由于本文的重点为高程方向的信号处理，且传统的成像算法比较成熟，故这里不对每个孔径 2 维成像做更多的表述。对每个孔径的回波信号采用  $\omega$ -K 算法进行处理，获得其 2 维图像

$$u(x, r, y_i) = \text{sinc} \left[ B \left( \tau - \frac{2r}{c} \right) \right] \cdot \text{sinc} \left[ B_a \left( t_m - \frac{x}{v} \right) \right] \cdot \exp \left( -j \frac{4\pi}{\lambda} r \right) \quad (3)$$

其中  $r = \sqrt{(y_i - y_0)^2 + (H - z_0)^2}$ 。

由于天线阵列结构在交轨向上，而成像在  $x-r-s$  坐标系，需要将其补偿至参考轨迹  $s'$  轴上。模型在  $r-s$  平面的投影如图 5 所示。 $E_i$  表示第  $i$  个等效相位中心及其位置。令  $Bp_i$  表示孔径  $E_i$  到参考轨迹位置处平行于视线方向的距离， $Bo_i$  表示孔径  $E_i$  到参考轨迹位



Property, RIP)时, 即

$$(1 - \delta)\|x\|_2 \leq \|\Phi x\|_2 \leq (1 + \delta)\|x\|_2 \quad (12)$$

基追踪(Basis Pursuit, BP)方法可以通过求解  $\ell_1$ -范数恢复  $K$ -稀疏的信号<sup>[14]</sup>。很多类矩阵, 如随机高斯阵, 随机Bernoulli矩阵, 部分傅里叶矩阵, 均满足这一条件。

当测量  $y$  有噪声时, 信号表示问题转化为一个信号近似问题, 其表示可以描述为

$$\min_{x \in \mathbb{R}^N} \|x\|_1, \quad \text{s.t.} \quad \|y - \Phi x\| \leq \varepsilon \quad (13)$$

其中  $\varepsilon$  表示约束测量数据中的噪声水平。

### 3.2 基于压缩感知的成像

由图5已说明, 除特殊情况外(例如垂直于波传播方向的斜面), 场景在高程方向是稀疏的, 即  $\tilde{\sigma}$  可以稀疏表示, 因此可以将CS引入高程向的成像。令  $s_n = n\rho'_s$  ( $\rho'_s = \rho_s/\eta$ ,  $\eta$  为超分辨率), 并将积分式转化为求和式, 则可得式(8)离散形式。

$$\frac{1}{\rho_s} \tilde{u}(s'_i) = \sum_{j=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} \tilde{\sigma}(s) \exp\left[j \frac{4\pi}{\lambda R_0} s'_i s_j\right] \quad (14)$$

将式(9)代入式(14), 并令

$$\Phi = \left\{ \exp\left[j \frac{2\pi}{\eta S_T} \cdot s'_i \cdot j\right] \right\}_{M \times N} \quad (15)$$

那么, 忽略乘积中不影响求解的常数项, 式(14)可写为矩阵形式:

$$u = \Phi \tilde{\sigma} \quad (16)$$

成像的问题转化为由少量的投影  $u_i = \langle \tilde{\sigma}, \Phi_i \rangle$  ( $i = 1, 2, 3$ )重建稀疏信号  $\tilde{\sigma}$  的优化问题, 这是一个典型的CS问题, 利用基于  $\ell_1$ -范数的优化求解或者基于贪婪算法的求解<sup>[15]</sup>, 即可重建场景。

### 3.3 CS应用参数分析

根据以上的分析和CS理论可以知道, 侧视3维成像场景是否能被正确重建, 取决于场景的稀疏度和以及观测矩阵  $\Phi$  是否满足RIP性质。又由式(15)可得, 观测矩阵  $\Phi$  由阵列布局, 超分辨率倍数决定其是否满足RIP特性。

CS理论指出, 当观测矩阵满足一定条件的不相关性时, 只要满足不等式(17), 即可从观测量  $u$  中以极大的概率重建稀疏信号  $\tilde{\sigma}$  中  $K$  个较大的系数<sup>[16]</sup>, 该  $K$  值即为重建的散射点个数。

$$M \geq CK (\ln N)^4 \quad (17)$$

其中  $C$  为一较小的常数。由于侧视3维成像实际是对场景目标的轮廓进行成像, 在同一方位-距离分辨单元中, 场景目标在高程向是稀疏的, 通常只可能有几个散射点, 在此不妨设  $K \leq 5$ 。在试验中  $2 < \ln N < 2.5$ ,  $C$  可由数值试验经验确定约为0.01, 而  $M = 3$ 。因此, 试验参数满足不等式(17), 交轨向的采样数

可以重建场景。

为了用CS实现超分辨, 需要确定超分辨率倍数  $\eta$ 。当超分辨率倍数过高时, 两个散射点之间的距离越近, 则其信号的相关性越强。反应在观测矩阵  $\Phi$  上, 则是列与列之间的相关性增强, 从而不符合RIP性质。若要使观测矩阵满足RIP性质, 则需增加观测数  $M$ 。而在实际应用中, 观测数  $M$  取决于阵列布局, 是有限的。在观测数  $M$  一定时, 超分辨率倍数  $\eta$  的上限为

$$\eta \leq \frac{\lambda R_0}{S_T S_s} \exp\left[\left(\frac{M}{CK}\right)^{1/4}\right] \quad (18)$$

那么, 实现超分辨率成像时, 分辨率可以达到

$$\rho'_s = \frac{\rho_s}{\eta} \geq \frac{S_s}{2} \exp\left[\left(\frac{M}{CK}\right)^{-1/4}\right] \quad (19)$$

过高的分辨率不仅会使观测矩阵不满足RIP性质, 从而使正确重建场景的概率降低, 也会增大观测矩阵  $\Phi$  的规模, 从而降低了运算效率。综合考虑, 本文试验的超分辨率倍数  $\eta$  选为 1.5~2, 与之对应的高程向分辨率可以提高约1倍。

## 4 仿真实验及分析

### 4.1 仿真参数

仿真实验以中国科学院电子学研究所研制的国内第1台三基线毫米波合成孔径雷达原理样机为基础, 详细参数如表1所列。

表1 系统参数

载频 $f_c$ (GHz)	35	孔径间距 $L_1$ (m)	0.6
带宽(MHz)	400	平台高度 $H$ (m)	1000
采样率(MHz)	600	平台速度 $v$ (m/s)	50
信号时宽( $\mu$ s)	0.5	入射角 $\theta$ ( $^\circ$ )	35
等效相位中心间距 $L_c$ (m)	0.1	脉冲重复频率(Hz)	600
孔径尺寸 $D$ (m)	0.2	孔径间距 $L_2$ (m)	0.4

根据以上参数, 使用子阵方向图加权, 可得到阵列方向图的峰值旁瓣比(Peak to Sidelobe Ratio, PSLR)约为-10.66 dB, 积分旁瓣比(Integrated Sidelobe Ratio, ISLR)约为-8.40 dB。通过对稀疏阵列结构天线方向图和第2节中自相关函数曲线的分析, 可以确定交轨向三孔径稀疏阵列天线在交轨向没有欠采样, 因此该系统可以实现对观测场景的侧视3维成像。

### 4.2 成像分辨率和精度分析

由表1参数, 可以确定本试验3维成像在3个方向的分辨率  $\rho_x = 0.1$  m,  $\rho_r = 0.375$  m,  $\rho_s = 12.81$  m。斜距向的分辨率  $\rho_r$  远远小于高程向分辨率,  $\rho_r \ll \rho_s$ ,

斜距向的响应尺度远远小于高程向的响应尺度,相对于高程向可认为是离散的冲击响应( $\delta$ 函数),信号可用极少量的点状分布的组合来描述,说明了场景在高程向是稀疏的。

本文的仿真在无噪声情况下进行试验,在实际情况中,测量精度可由式(20)确定<sup>[17]</sup>。

$$\delta\rho = \frac{\rho}{\sqrt{\text{SNR}/2}} \quad (20)$$

其中 $\rho$ 为测量方向的分辨率,SNR为信噪比。

#### 4.3 点目标仿真分析

本节采用点目标仿真来分析其性能,仿真参数如表1所示。为了验证CS方法的超分辨能力,将点目标设置在高程向的不同和同一分辨单元分别进行成像。为了简化实验,本节的仿真采用6个子阵构成的等间隔满阵进行仿真。

图6(a)中两个点目标同一方位-距离单元的 $s = -18.3\text{ m}$ 和 $s = 0\text{ m}$ 处,由于两点目标处于高程向不同的分辨单元,传统的基于FT的成像和基于CS的方法均能将目标区分。图6(b)中两个点目标 $s = -7.3\text{ m}$ 和 $s = 0\text{ m}$ ,处于同一高程分辨单元内。由成像结果可知,传统方法不能区分两个目标,而基于CS的成像方法能将两个点目标分开。由此可知,CS方法具有超分辨的能力。

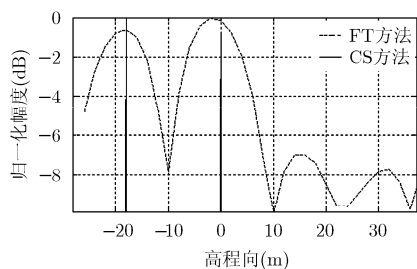
#### 4.4 圆锥场景仿真分析

本节采用对圆锥场景的仿真来分析本文算法的有效性,系统参数与上一节点目标仿真的参数相同,圆锥的参数如表2所示。

表2 圆锥参数

参数	值
锥体半径(m)	20
锥体高度(m)	10

图7为仿真圆锥在 $x-r-z$ 坐标系的几何位置。分别采用基于FT的方法与基于CS的方法在满阵和稀疏阵条件下对锥体进行成像。将两种方法的成像结果由 $x-r-s$ 坐标系转换到 $x-r-z$ 坐标系以方便与仿真



(a) 高程向成像结果1

锥体相比较。采用最小平均距离准则评价成像的质量,

$$\Delta d = \frac{1}{MN} \sqrt{\sum_{x=1}^M \sum_{r=1}^N \Delta z(x,r)^2}$$

式中 $\Delta z(x,r)$ 为成像结果与仿真圆锥在斜距平面坐标点 $(x,r)$ 对应的高度差。

图8至图11分别为基于FT方法与基于CS方法在满阵和稀疏阵条件下对圆锥体3维成像的结果。成像结果与仿真圆锥的平均距离差列于表3。

表3 成像结果与理想圆锥体误差(m)

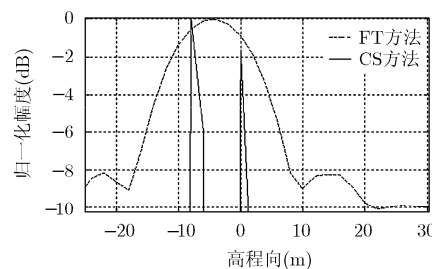
参数	满阵	稀疏阵
基于FT方法	0.0107	0.0206
基于CS方法	0.0055	0.0090

从比较结果来看,CS方法重建场景的能力在满阵和稀疏阵条件下均优于传统方法。由图10可知,在稀疏阵条件下,由于高副瓣的影响,传统方法已经难以重建场景,而CS方法不仅能正确重建场景,成像效果更优于传统方法满阵成像的效果,说明CS方法具备准确重建场景高程信息的能力。

## 5 实际数据处理结果

实际数据由国内第1台三基线毫米波合成孔径雷达原理样机获得,其中信号时宽为 $4\ \mu\text{s}$ ,脉冲重复频率为 $1000\text{ Hz}$ ,平台速度为 $46.78\text{ m/s}$ ,其余参数均与表1相同。图12(a)为利用实测数据获得的2维成像图,截取其中矩形框所包含场景的数据,完成侧视3维成像。图12(b)和图12(c)分别为采用传统波数域算法处理获得的3维成像结果和本文方法处理的结果。

该场景为一片农田,其中有3棵不同高度的树。树的高度约为 $15\sim 25\text{ m}$ ,传统波数域算法能对场景成像,但交轨向的低分辨率转化为高度方向的不确定性,会导致这两个方向的耦合,引起图像质量的下降<sup>[12]</sup>。而本文的方法将成像由 $x-y-z$ 坐标系转换为 $x-r-s$ 坐标系,较好地解决了该问题。



(b) 高程向成像结果2

图6 点目标仿真结果

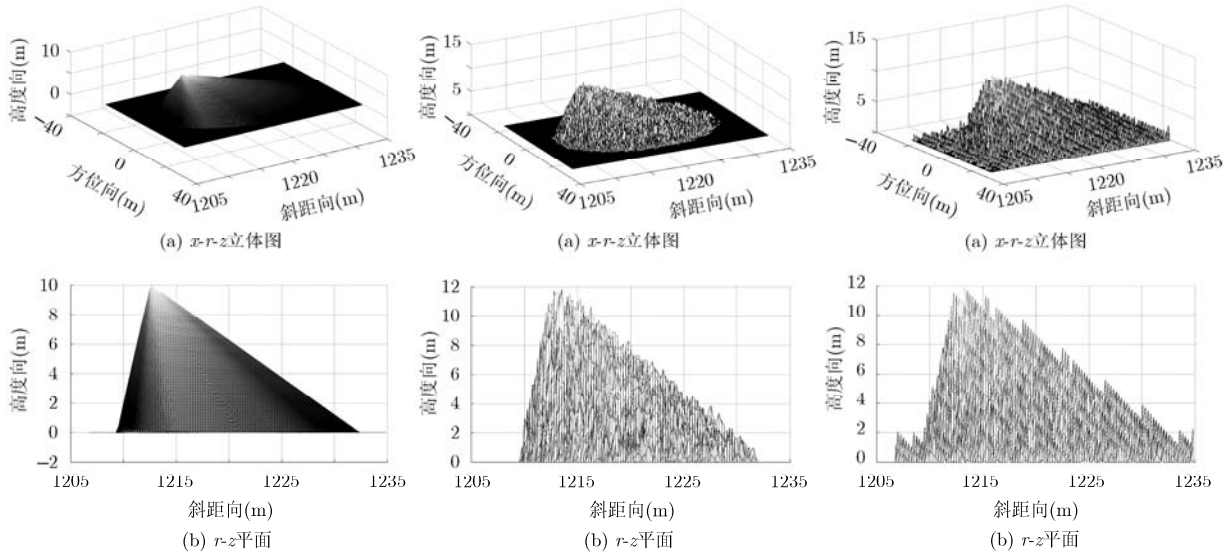


图7 仿真圆锥体位置关系图

图8 满阵条件下基于FT方法的圆锥3维成像

图9 满阵条件下基于CS方法的圆锥3维成像

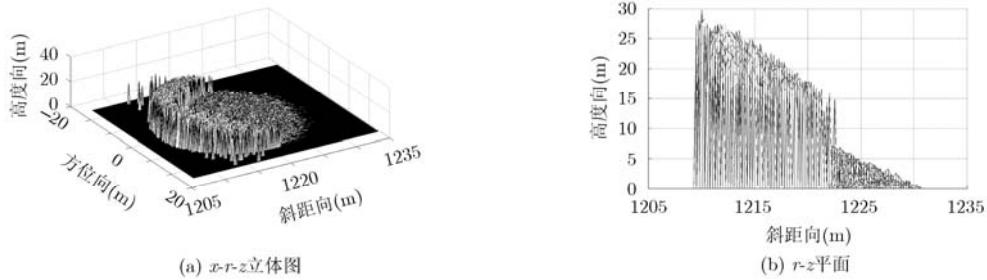


图10 稀疏阵条件下基于 FT 方法的圆锥 3 维成像

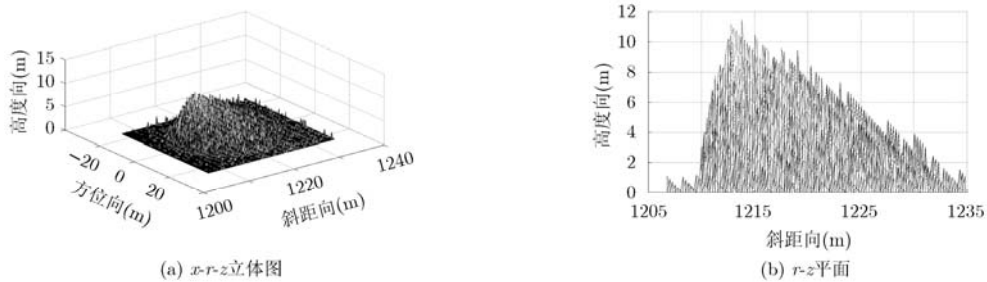


图11 稀疏阵条件下基于 CS 方法的圆锥 3 维成像

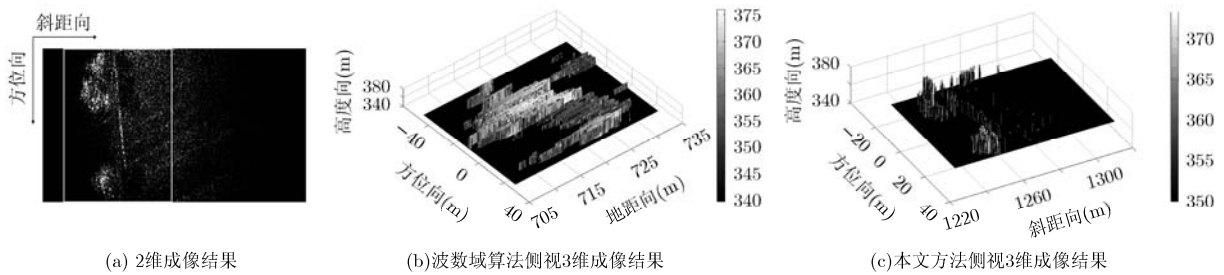


图12 实际数据处理结果

### 6 结束语

基于压缩感知，本文研究了交轨向三孔径毫米

波合成孔径雷达侧视 3 维成像问题。利用交轨方向的三孔径天线形成的稀疏阵列结构，获取高程分辨

率并实现 3 维成像。针对侧视情况下高度方向与交轨向存在耦合的问题, 将 3 维成像处理分解为 2 维斜距平面成像和第 3 维高程方向成像两个步骤。针对同一方位-距离分辨单元内, 高程向场景是稀疏的事实, 引入 CS 方法, 解决了交轨向采样数少及非均匀采样的问题, 并实现了高程向的超分辨成像。仿真和实际数据处理结果均验证了本文方法的有效性。

### 参 考 文 献

- [1] Shi Jun, Zhang Xiao-ling, Yang Jian-yu, *et al.* Surface tracing based LASAR 3-D imaging method via multiresolution approximation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(11): 3719-3730.
  - [2] 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]. [博士学位论文], 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.
  - [3] 李学仕, 孙光才, 徐刚, 等. 基于压缩感知的下视 3 维成像 SAR 成像新方法[J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(5): 1017-1023.  
Li Xue-shi, Sun Guang-cai, Xu Gang, *et al.* A new method of downward-looking 3D-SAR based on compressed sensing[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(5): 1017-1023.
  - [4] Lopez J and Fortuny J. 3-D radar imaging using range migration techniques[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2000, 48(5): 728-737.
  - [5] 滕秀敏, 李道京. 机载交轨阵列稀疏天线雷达的下视 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.
  - [6] Li Dao-jing, Liu Bo, Pan Zhou-hao, *et al.* Airborne MMW InSAR interferometry with cross-track three-baseline antennas[C]. 2012 9th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR 2012), Germany, April 2012: 301-303.
  - [7] Zhu X X and Bamler R. Let's do the time warp: motion estimation in differential multicomponent nonlinear SAR tomography[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(4): 735-739.
  - [8] Zhu X X and Bamler R. Super-resolution power and robustness of compressive sensing for spectral estimation with application to spaceborne tomographic SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(1): 247-258.
  - [9] Donoho D. Compressed sensing[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(4): 1289-1306.
  - [10] Candès E, Romberg J, and Tao T. Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(2): 489-509.
  - [11] Hou Ying-ni, Li Dao-jing, and Hong Wen. The thinned array time division multiple phase center aperture synthesis and application[C]. 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'2008), Boston, America, 2008: 25-28.
  - [12] 滕秀敏. 稀疏阵列天线在雷达成像即目标探测中的应用研究[D]. [硕士学位论文], 中国科学院电子学研究所, 2012.  
Teng Xiu-min. Study on applications of sparse array antenna in radar imaging and target detection[D]. [Master dissertation], Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2012.
  - [13] Budillon A, Evangelista A, and Schirinzi G. Three-dimensional SAR focusing from multipass signals using compressive sampling[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(1): 488-499.
  - [14] Candès E and Tao T. Decoding by linear programming[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2005, 51(12): 4203-4215.
  - [15] Needell D. Topics in compressed sensing[D]. [Ph.D. dissertation], University of California, Davis, 2009.
  - [16] Candès E and Tao T. The Dantzig selector: statistical estimation when  $p$  is much larger than  $n$ [J]. *The Annals of Statistics*, 2007, 35(6): 2313-2351.
  - [17] Skolnik M I. Introduction to Radar Systems[M]. 2nd Edition New York: McGraw-Hill Book Company, 1980: 400-407.
- 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。  
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。