

## 利用多角度 SAR 数据实现三维成像

周汉飞\* 李 禹 粟 毅

(国防科学技术大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

**摘 要:** 利用多角度 SAR 数据实现目标高分辨率 3 维成像对雷达自动目标识别具有重要价值。该文在目标散射稀疏性前提下提出了基于压缩感知的多角度 SAR 3 维成像方法。文章首先论证多角度 SAR 测量能够改善测量矩阵的互不相关性。然后根据互不相干影响因素分析,合理选择目标离散间隔构造多角度 SAR 测量矩阵。最后利用分段正交匹配追踪算法实现目标向量的稀疏重构。该文算法不仅改善了高度分辨率,而且克服了多角度 SAR 空间采样不连续导致的高旁瓣问题。实验验证了该算法的可行性和稳定性。

**关键词:** 多角度 SAR 数据; 3 维雷达成像; 压缩感知; 稀疏信号

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)10-2467-08

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01534

## Three-dimensional Imaging with Multi-aspect SAR Data

Zhou Han-fei Li Yu Su Yi

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

**Abstract:** Carrying out 3-D imaging with multi-aspect SAR data is impressive to radar Automatic Target Recognition (ATR). This paper presents a multi-aspect SAR 3-D imaging technique based on compressive sensing, provides that the target scattering field is sparse. Firstly, it is validated that by multi-aspect SAR measurements the mutual incoherence of measurement matrix is improved. Secondly, the measurement matrix is constructed by carefully selecting the sampling interval in the space domain based on the analysis of mutual incoherence. Finally, the object sparse vector is reconstructed with Stagewise Orthogonal Matching Pursuit (StOMP) algorithm. The proposed method not only improves the resolution of elevation dimension, but also conquers the acute lobe-side resulted from incontinuous sampling. Numerical experiments are given to illustrate the effectiveness and robustness of the proposed method.

**Key words:** Multi-aspect SAR; Three-dimensional radar imaging; Compressive Sensing (CS); Sparse signal

### 1 引言

多角度 SAR 是指多个传统机载或星载 SAR 系统从不同角度对同一场景进行观测。方位向探测角度的差异使多角度 SAR 数据蕴含更丰富的目标特征信息,更重要的是入射高度角的差别为雷达目标 3 维成像提供了高度向信息。实现多角度 SAR 3 维成像对雷达目标分类和识别具有重要的意义。

SAR 3 维成像有两种模式: 2D+1D 模式和完全 3D 模式。2D+1D 模式首先进行 2D 非参数成像然后估计第 3 维参数(散射点高度)<sup>[1-6]</sup>。完全 3D 模式直接使用 DFT 实现目标 3 维成像<sup>[7-9]</sup>。

2D+1D 模式根据多幅具有高度差的 SAR 图像,利用参数估计方法得到散射点高度。该类方法的关键是 SAR 图像散射点对应关系的确定。经典

方法是干涉 SAR(Interferometric SAR, InSAR)<sup>[1,5]</sup>,它利用具有平行孔径的两幅 SAR 图像,根据相位差计算散射点高度。InSAR 只能计算散射点高度,不能得到目标散射特性在高度维的分布。SAR 层析成像(Tomo-SAR)增大了高度维数据采样率,使用参数估计方法得到目标散射特性沿高度维的分布,从而实现 3 维成像<sup>[2,3,6]</sup>。这些算法的高度向分辨率受限于高度维测量范围和采样密度。正则化最优化方法将高度维参数估计转化为信号的稀疏重构问题,其成像分辨率突破了瑞利准则的限制<sup>[4]</sup>。上述方法不适用于多角度 SAR 3 维成像,原因有二。其一,该类方法的最大难点在散射点的关联,为了估计散射点高度,首先要建立各 SAR 图像距离-多普勒分辨单元的对对应关系。其二,各 SAR 系统测量参数的差异给高度维参数估计带来困难。

完全 3D 模式的基础是测量数据与目标散射函数之间的傅里叶变换关系,最简单的方法是波束形

2012-11-26 收到, 2013-04-11 改回

国家自然科学基金(61171135, 60972120)资助课题

\*通信作者: 周汉飞 hanfei\_zhou@yeah.net

成(BF)<sup>[9]</sup>。BF 在对接收数据进行预处理后,直接用 DFT 实现 3 维成像。该算法要求采样数据的连续性,也要求很高的采样密度。多角度 SAR 数据包含目标不连续频谱区域,利用 BF 成像不能得到高分辨 3 维图像。

压缩感知(Compressive Sensing, CS)理论为解决测量数据稀疏性与分辨率之间的矛盾提供了思路<sup>[10, 11]</sup>。压缩感知理论指出,如果目标向量具有稀疏性,当测量矩阵满足约束等距性(Restricted Isometry Property, RIP)要求时,则可用远少于目标向量维数的测量次数重构目标。用传统分辨率概念描述,即基于压缩感知的目标重构具有超分辨率特性。基于压缩感知的雷达成像已经取得了丰富的研究成果<sup>[12-17]</sup>,而利用多角度 SAR 数据实现 3 维成像还未见诸报道。

测量矩阵性质是决定目标重构精度和稳定性的关键因素。通过改变雷达测量方式改善测量矩阵性质是基于压缩感知雷达成像的研究重点。文献[12]通过调整发射信号波形改善测量矩阵性能,这类方法很难应用于现有体制雷达。文献[13]通过随机空间位置采样改善测量矩阵 RIP。在现有雷达体制下,测量矩阵 RIP 一般不能满足目标精确重构的要求,因此从算法角度提升重构精度也是重要研究方向。文献[14]通过在最优化求解过程中引入权值抑制了雷达测量杂波对成像性能的影响,实现了基于压缩感知的 ISAR 成像。文献[15]将贝叶斯压缩感知(BCS)应用于稀疏孔径的 ISAR 成像,取得了很好的成像效果。BCS 用具有稀疏性质的概率密度分布替代确定性的目标稀疏性约束,可以利用目标散射先验信息确定概率密度参数。文献[16, 17]利用稀疏信号方法实现 3 维成像,其中文献[16]使用随机飞行路径的采样数据,文献[17]采用多个平行飞行轨迹获取 SAR 数据,都提高了 3 维图像的分辨率,但是没有从测量矩阵性能的角度分析两类模式的成像效果。

本文研究基于压缩感知的多角度 SAR 3 维成像。首先从理论上分析多角度 SAR 测量方式对测量矩阵性能的影响,在此基础上通过合理离散目标函数构造测量矩阵,然后采用稀疏重构算法实现多角度 SAR 3 维成像。为了保证不同角度 SAR 测量数据的相干性,本文假设多角度 SAR 测量角跨度在 20° 以内。

## 2 压缩感知基本理论及稀疏重构算法

在本文中,假设雷达目标由若干散射点组成<sup>1)</sup>。

<sup>1)</sup>本文侧重于研究人造目标的 3 维重构。在高频区,人造目标总的散射可用少数散射中心描述。但是对自然地物而言,这个假设不再成立。

在此假设下,压缩感知理论中的传感矩阵(Sensing Matrix, SM)与测量矩阵(Measurement Matrix, MM)等价。

假设雷达目标由  $K$  个散射点组成,  $\mathcal{H}$  表示目标离散化算子<sup>2)</sup>。将  $\mathcal{H}$  作用于目标,得到目标向量形式为  $\omega \in \mathcal{C}^N$ ,  $\omega$  为  $K$  稀疏向量,  $K \ll N$ 。

假设有对  $\omega$  的  $M$  次线性测量( $M < N$ ),测量矩阵  $\Phi \in \mathcal{C}^{M \times N}$ , 测量数据  $b \in \mathcal{C}^M$ , 则

$$b = \Phi \omega \quad (1)$$

如果多角度 SAR 测量模式用算子  $\mathcal{M}$  描述<sup>3)</sup>, 则  $\Phi = g(\mathcal{H}, \mathcal{M})$ , 即测量矩阵由目标离散方式和多角度 SAR 测量模式共同决定。研究  $\mathcal{H}$  和  $\mathcal{M}$  对测量矩阵性能的影响是本文研究的重点。

测量矩阵性能一般用约束等距常数(Restricted Isometry Constant, RIC)来衡量,其定义如下:

**定义 1**<sup>[18]</sup> 设  $\omega$  是任意  $K$ -稀疏信号,测量矩阵  $\Phi$  的约束等距常数  $\delta_K$  是指满足式(2)的最小  $\delta$ :

$$(1 - \delta) \|\omega\|_2^2 \leq \|\Phi \omega\|_2^2 \leq (1 + \delta) \|\omega\|_2^2 \quad (2)$$

如果  $\delta_K \in (0, 1)$ , 则说明矩阵  $\Phi$  具有约束等距性。约束等距性要求测量矩阵  $\Phi$  对  $\omega$  具有保距性,测量向量能够保留目标的本质结构。当  $\delta_K \rightarrow 0$  时,表示测量矩阵的任意  $K$  列近似正交。

实际应用中,  $\delta_K$  很难计算,因此经常用容易计算的互相干(Mutual Coherence, MC)替代:

$$\mu = \mu(\Phi) = \max_{i \neq j} \frac{|\langle \varphi_i, \varphi_j \rangle|}{\|\varphi_i\|_2 \|\varphi_j\|_2} \quad (3)$$

其中  $\varphi_i$  表示  $\Phi$  的第  $i$  列(第  $i$  个原子)。 $\mu$  越小,表示任意两个原子越不相干。

因为  $M < N$ , 因此式(1)是欠定方程,存在无数可行解。目标向量  $\omega$  的稀疏性约束是方程存在唯一解的前提。此时,方程可用凸松弛(convex relaxation)算法<sup>[19]</sup>或正交贪婪算法(Orthogonal Greedy Algorithm, OGA)<sup>[20, 21]</sup>求解。凸松弛算法最典型的是基追踪(BP)算法<sup>[19]</sup>。经典的正交贪婪算法包括正交匹配追踪(OMP)<sup>[20]</sup>。该类算法的关键是目标向量支撑区的确定。

在雷达 3 维成像中,测量矩阵维数很高。BP

<sup>2)</sup>一般而言,操作  $\mathcal{H}$  对目标成像区域进行均匀连续采样。但是如果对特定的散射点或者区域进行成像,也不排除非均匀不连续采样情况。

<sup>3)</sup>  $\mathcal{M}$  由 SAR 系统的测量参数决定,比如测量角度、孔径长度和发射信号带宽等。

和 OMP 算法不能处理如此大尺度矩阵。针对大尺度超欠定方程的求解问题, Donoho 等人<sup>[21]</sup>提出了分段正交匹配追踪算法(Stagewise Orthogonal MP, StOMP)。该算法在保证稳定重构的同时大大改善了计算效率。StOMP 算法相对于 OMP 算法的最大不同在于: 对目标向量支撑区进行更新时, 采用的是成批次更新的思路, 而 OMP 采用的是逐个原子更新的方法。

### 3 基于压缩感知的多角度 SAR 成像

#### 3.1 多角度 SAR 测量模型

多角度 SAR 3 维几何模型如图 1 所示。  $t(x, y, z)$  为目标散射函数。假设多角度 SAR 测量路径都位于  $y'o'z'$  平面。  $\theta$  和  $\phi$  分别表示测量方位和高度角。

根据投影切片定理(project-slice theorem)<sup>[22]</sup>, 单个 SAR 测量数据可看成目标散射函数傅里叶变换在航迹-目标平面上的一个切面<sup>4)</sup>, 如图 2 所示。

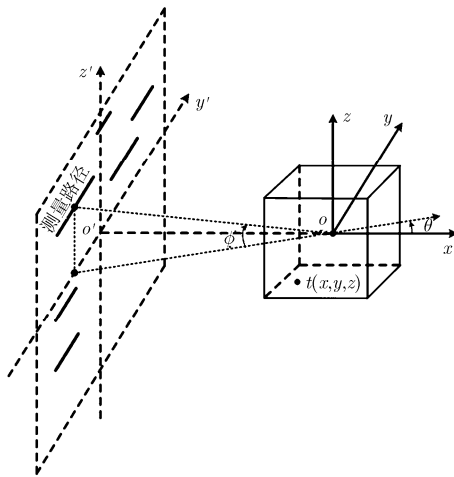


图1 多角度 SAR 3 维几何模型

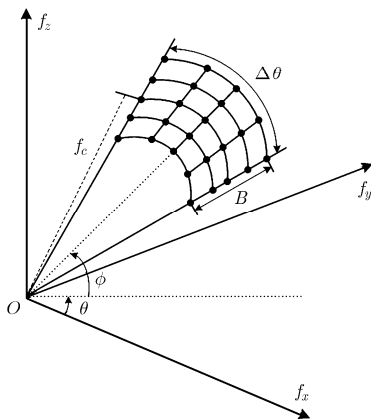


图2 多角度 SAR 测量流形(仅画出一个切片)

<sup>4)</sup>投影切片定理的前提是平面波前近似。对多角度 SAR 而言, 组成它的单个 SAR 满足远场条件。另外, 本文假设 3 维成像区域较小。因此平面波前近似能够满足。

因此多角度 SAR 数据与目标傅里叶变换的多个切面相对应。这些切面构成多角度 SAR 测量流形(manifold), 用  $\mathcal{M}$  表示<sup>5)</sup>。雷达成像就是根据流形上的测量值重构目标。

#### 3.2 多角度 SAR 测量矩阵

设  $T$  为目标散射函数的傅里叶变换, 根据投影切片定理<sup>[22]</sup>, 有

$$T(f, \theta, \phi) = \int t(x, y, z) \cdot e^{-j4\pi f(x \cos \phi \cos \theta + y \cos \phi \sin \theta + z \sin \phi)/c} dx dy dz \quad (4)$$

设  $\mathbf{h} = [f, \theta, \phi]^T \in \mathcal{M}$  表示多角度 SAR 测量点坐标,  $\mathbf{l} = [x, y, z]^T$  表示目标位置点坐标, 将多角度 SAR 测量点排列为列向量, 有

$$\mathbf{S}_M = [\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2, \dots, \mathbf{h}_M]^T \quad (5)$$

将目标位置点排列成列向量, 有

$$\mathbf{L}_N = [\mathbf{l}_1, \mathbf{l}_2, \dots, \mathbf{l}_N]^T \quad (6)$$

令

$$\varphi_n = \varphi(\mathbf{S}_M, \mathbf{l}_n) = \exp(-j4\pi(\mathbf{S}_M \odot \mathbf{l}_n)/c), \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

其中

$$\mathbf{S}_M \odot \mathbf{l}_n = \begin{bmatrix} f_1(x_n \cos \phi_1 \cos \theta_1 + y_n \cos \phi_1 \sin \theta_1 + z_n \sin \phi_1) \\ f_2(x_n \cos \phi_2 \cos \theta_2 + y_n \cos \phi_2 \sin \theta_2 + z_n \sin \phi_2) \\ \vdots \\ f_M(x_n \cos \phi_M \cos \theta_M + y_n \cos \phi_M \sin \theta_M + z_n \sin \phi_M) \end{bmatrix} \quad (8)$$

令

$$\Phi = [\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N] \quad (9)$$

设  $\omega = \mathcal{H}(t(x, y, z))$ ,  $\omega \in \mathbb{C}^N$ ,  $\mathbf{b}$  表示多角度 SAR 测量数据, 则  $\mathbf{b}$  与  $\omega$  的关系为

$$\mathbf{b} = \Phi \omega + \varepsilon \quad (10)$$

在压缩感知理论中, 称  $\Phi$  为测量矩阵,  $\varphi$  为测量矩阵原子,  $\omega$  为目标向量,  $\mathbf{b}$  为测量向量。根据  $\mathbf{b}$  重构  $\omega$  的稳定性与测量矩阵  $\Phi$  的性能有关。

#### 3.3 测量矩阵性能分析

测量矩阵任意两个原子的归一化相干系数表示

<sup>5)</sup>多角度 SAR 测量模式可用测量流形表示, 因此它们共用同一个描述算子  $\mathcal{M}$ 。

为

$$\begin{aligned} \mu_{nn'} &= \frac{\langle \varphi_n, \varphi_{n'} \rangle}{\|\varphi_n\|_2 \|\varphi_{n'}\|_2} \\ &= \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M e^{j4\pi f_m \cos \phi_m \cos \theta_m \Delta x_{nm}/c} \\ &\quad \cdot e^{j4\pi f_m \cos \phi_m \cos \theta_m \Delta y_{nm}/c} \cdot e^{j4\pi f_m \sin \phi_m \Delta z_{nm}/c} \end{aligned} \quad (11)$$

要确保测量矩阵的互不相干性，即要求对任意的  $n$  和  $n'$ ， $\mu_{nn'}$  尽可能小。下面分 3 种情况讨论多角度 SAR 测量流形对测量矩阵的影响。

(1)  $\Delta x_{nn'} = \Delta y_{nn'} = 0$ 。此时，有

$$\mu_{nn'} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M e^{j4\pi f_m \sin \phi_m \Delta z_{nm}/c} \quad (12)$$

$\mu_{nn'}$  之大小与各传感器的测量频率与测量高度有关。在多角度 SAR 模式下， $f'_m = f_m \sin \phi_m$  的分布如图 3 所示。图中， $f_c^i, B^i, \phi^i$  ( $i = 1, 2, 3, 4, 5$ ) 分别表示第  $i$  个 SAR 的中心频率、带宽和测量高度角。

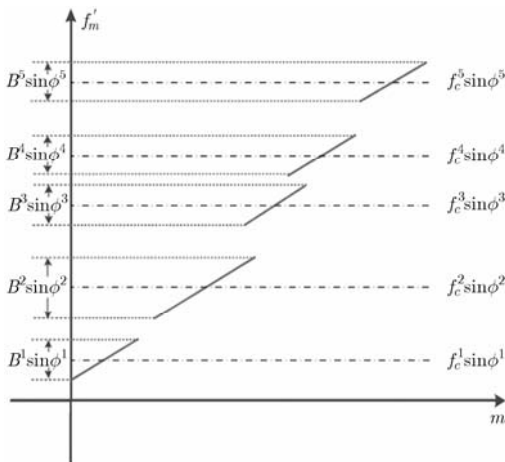


图 3 多角度 SAR 高度维测量频率

在图 3 所示多角度 SAR 测量下，图 4 表示原子之间互相干系数随高度角的变化规律。如实线所示。同时，虚线表示等价带宽时原子之间互相干系数与高度差的关系。其中  $B_{eq\_z} = \sum_{i=1}^5 B^i \sin \phi^i$  表

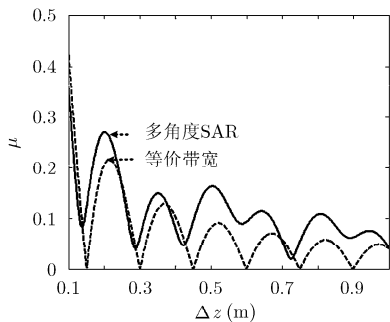


图 4 多角度 SAR 测量矩阵原子互相干系数(高度向)

示多角度 SAR 在高度向上的等价带宽。可以看出：多角度 SAR 测量矩阵的高度维性能接近等价带宽的性能。

(2)  $\Delta x_{nn'} = \Delta z_{nn'} = 0$ 。此时，有

$$\mu_{nn'} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M e^{j4\pi f_m \cos \phi_m \cos \theta_m \Delta y_{nm}/c} \quad (13)$$

设

$$f'_m = f_m \cos \phi_m \cos \theta_m \quad (14)$$

多角度 SAR 参数如表 1 所示。令  $y$  方向的等效带宽  $B_{eq\_y} = \max(f'_m) - \min(f'_m)$ ，则互相干系数与  $\Delta y$  的关系如图 5 所示。图 5 也画出了等价带宽情形。可以看出，多角度 SAR 测量改善了  $y$  方向测量矩阵性能。

表 1 多角度 SAR 参数

序号	载频 (GHz)	带宽 (MHz)	高度角 ( $^\circ$ )	方位角 ( $^\circ$ )
#1 SAR	6.5	400	13	(-1,1)
#2 SAR	7.0	500	15	(-5,-2)
#3 SAR	7.8	1000	17	(3,9)
#4 SAR	8.6	600	19	(-8,-4)
#5 SAR	9.5	1000	21	(-11,-5)

(3)  $\Delta y_{nn'} = \Delta z_{nn'} = 0$ 。分析方法同(2)， $x$  方向测量矩阵原子互相干系数如图 6 所示。同理，多角度 SAR 测量矩阵在  $x$  方向的性能能够接近等效带宽情形下的测量矩阵性能。

### 3.4 多角度 SAR 3 维成像算法

基于压缩感知的多角度 SAR 3 维成像步骤如下：

步骤 1 根据多角度 SAR 参数确定测量流形  $\mathcal{M}$ ；

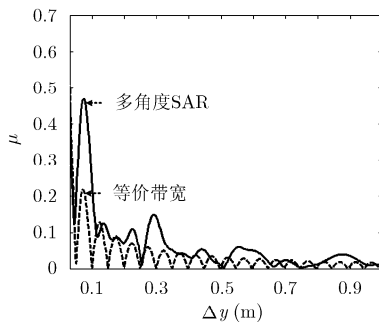


图 5 多角度 SAR 测量矩阵原子互相干系数(y 方向)

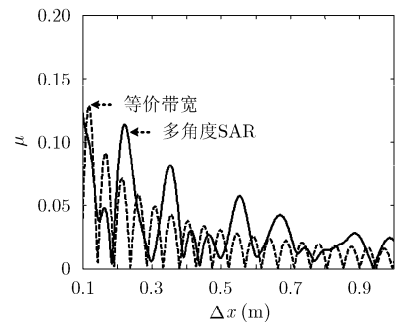


图 6 多角度 SAR 测量矩阵原子互相干系数(x 方向)

步骤2 对  $\mathcal{M}$  离散并进行排序得到多角度测量向量  $\mathcal{S}_M$  (如式(5)所示);

步骤3 根据  $\mathcal{S}_M$ , 考虑测量矩阵互相干与成像分辨率要求, 选择合理的目标离散化算子  $\mathcal{H}$ ;

步骤4 根据成像区域和离散化算子  $\mathcal{H}$ , 得到成像位置点  $\mathcal{L}_H$  (见式(6));

步骤5 根据  $\mathcal{S}_M$  和  $\mathcal{L}_H$ , 得到多角度 SAR 测量矩阵  $\Phi$  (如式(9)所示);

步骤6 根据测量矩阵  $\Phi$  和多角度 SAR 测量数据  $b$ , 利用 StOMP 算法得到目标向量  $\hat{\omega}$ ;

步骤7 根据  $\mathcal{H}^{-1}(\hat{\omega})$ , 得到目标 3 维图像。

### 4 仿真实验与分析

**仿真1 简单目标成像** 3 维目标如图 7 所示, 由 6 个散射点组成, 其位置如图 7 (d)所示。图 7 (a), 7(b), 7(c)分别是前视、侧视和下视图。

多角度 SAR 参数如表 2 所示。测量数据信噪

表 2 多角度 SAR 参数

序号	载频 (GHz)	带宽(MHz)	高度角(°)	方位角 (°)
#1 SAR	10.0	500	0	(-1.5,1.5)
#2 SAR	5.0	500	10	(-7,-4)
#3 SAR	17.0	500	20	(4,7)

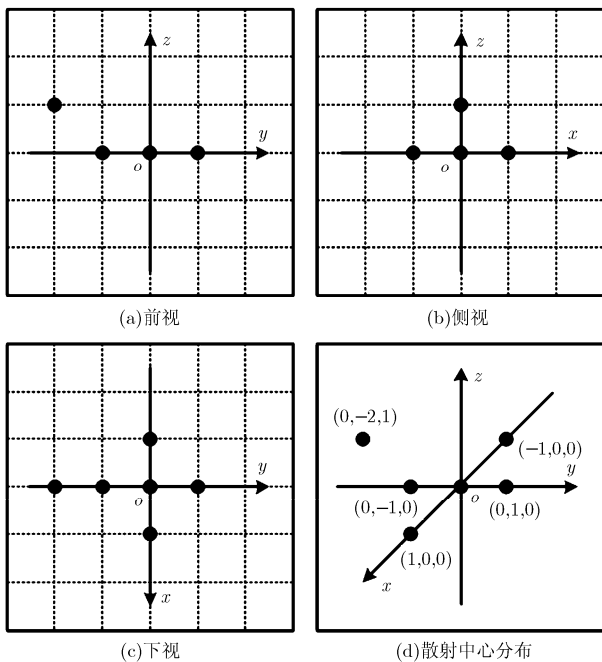


图 7 简单 3D 目标

比  $\text{SNR}=30 \text{ dB}$ , 基于压缩感知的 3D 成像如图 8 所示, 图 8 (a), 8(b), 8(c)分别是前视、侧视和下视成像图。同时, 从图 8 (d)可以看出本文算法正确地估计了散射中心位置。

**仿真2 算法分辨率分析** 多角度 SAR 参数如表 1.将多角度 SAR 测量波形各个切片在  $x, y$  和  $z$  方向的投影相加, 得到各个方向的等效带宽分别为  $3.0 \text{ GHz}, 3.0 \text{ GHz}$  和  $1.0 \text{ GHz}$ , 对应的等效分辨率分别是  $0.05 \text{ m}, 0.05 \text{ m}$  和  $0.15 \text{ m}$ 。

假设有 3 个简单目标, 其散射中心分别沿  $x, y, z$  方向排列。目标 1 由目标 3 个散射中心沿  $x$  方向排列构成, 散射点间隔为  $0.1 \text{ m}$ ; 目标 2 由 3 个散射中心沿  $y$  方向排列构成, 散射点间隔为  $0.1 \text{ m}$ ; 目标 3 由 3 个散射中心沿  $z$  方向排列构成, 散射点间隔为  $0.2 \text{ m}$ 。目标 1 和目标 2 的 3 维成像下视图如图 9(a)和图 9(b)所示。目标 3 的 3 维成像侧视图如图 9(c)所示。3 个图都可轻松分辨 3 个散射中心。

上述实验表明, 本文算法的分辨率基本达到了多角度 SAR 的等效分辨率。

**仿真3 复杂目标成像及误差分析** 目标复杂性主要体现在两个方面:一是包含较多的散射中心, 二是散射强度不一致。仿真目标 3 维模型如图 10 所示。目标由 15 个散射中心组成, 散射中心位置如黑点所示, 散射中心强度服从  $[0.5,1.5]$  的均匀分布。多角度 SAR 参数如表 1 所示。

测量数据  $\text{SNR}=24 \text{ dB}$ , 目标 3 维成像结果如图 11 所示。图 11(d)是散射中心位置估计, 估计值与真实位置一致。图 11(a), 11(b)和 11(c)分别是 3 维图像的前视、侧视和下视图。

表 3 表示噪声对复杂目标成像精度的影响。SNR 表示信噪比, RMSE 表示成像目标与真实目标的均方根误差, ER 表示 RMSE 与真实目标均方能量之比。可以看出, 当  $\text{SNR}<20 \text{ dB}$  时, 对复杂目标, 本文方法能得到较好的估计效果。

表 3 噪声对复杂目标成像精度的影响

SNR (dB)	70	50	40	30	20	10
RMSE	0.05	0.10	0.41	0.94	3.40	4.10
ER (%)	1.25	2.50	10.26	23.52	85.08	102.60

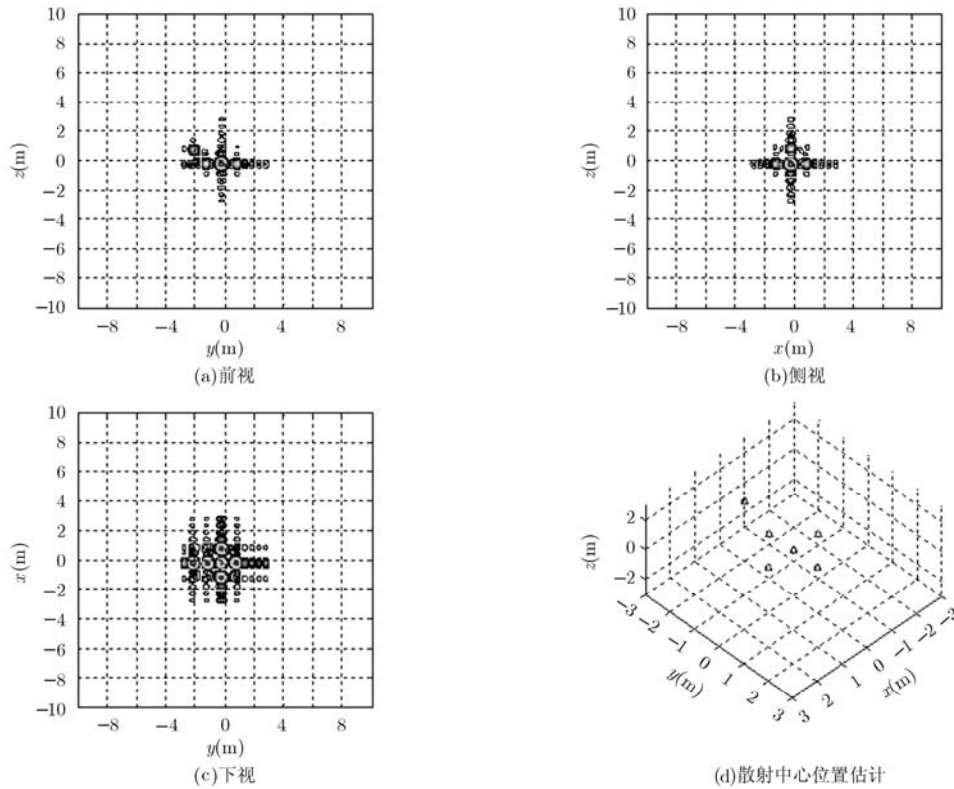


图 8 简单目标 3 维成像

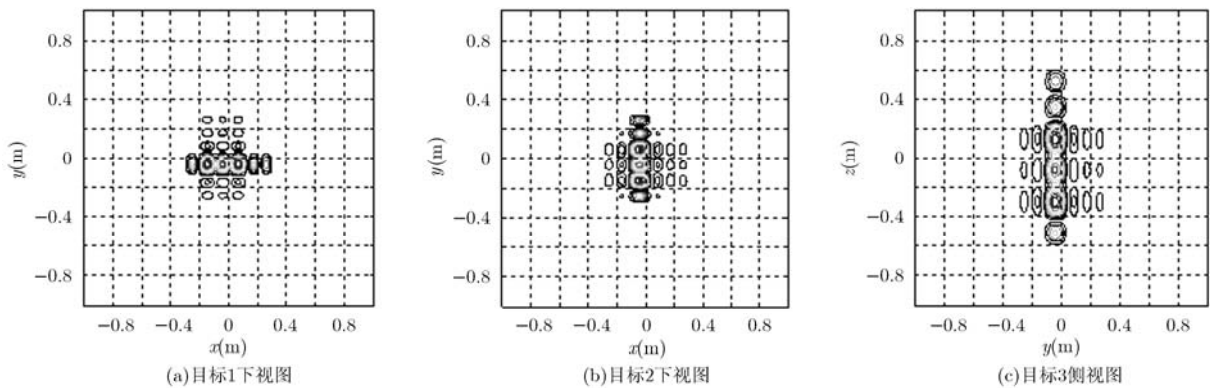


图 9 算法分辨率分析

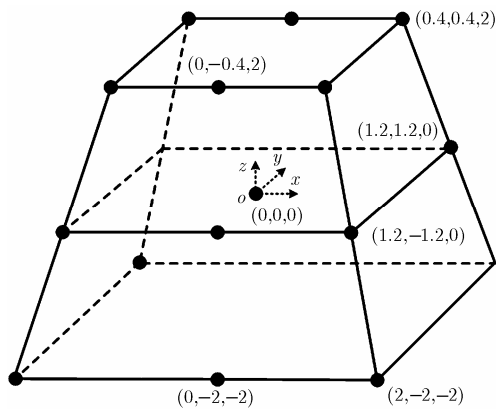


图 10 复杂 3 维目标模型及散射中心分布

### 5 结束语

多角度 SAR 测量流形拓展了目标傅里叶空间的采样范围,因此能够获得更高分辨率的 3D 图像。对比传统 3 维成像方法,多角度 SAR 数据获取具有更大的灵活性和可行性。本文的研究是在经典雷达测量下取得的,雷达测量可看成是对目标傅里叶空间的采样。因此测量矩阵设计受限太多,成像分辨率也受测量带宽的限制。如何从雷达目标散射特性出发,设计与目标散射稀疏性相匹配的发射信息,从而设计性能优异的测量矩阵是基于压缩感知雷达成像理论迫切需要研究的问题。

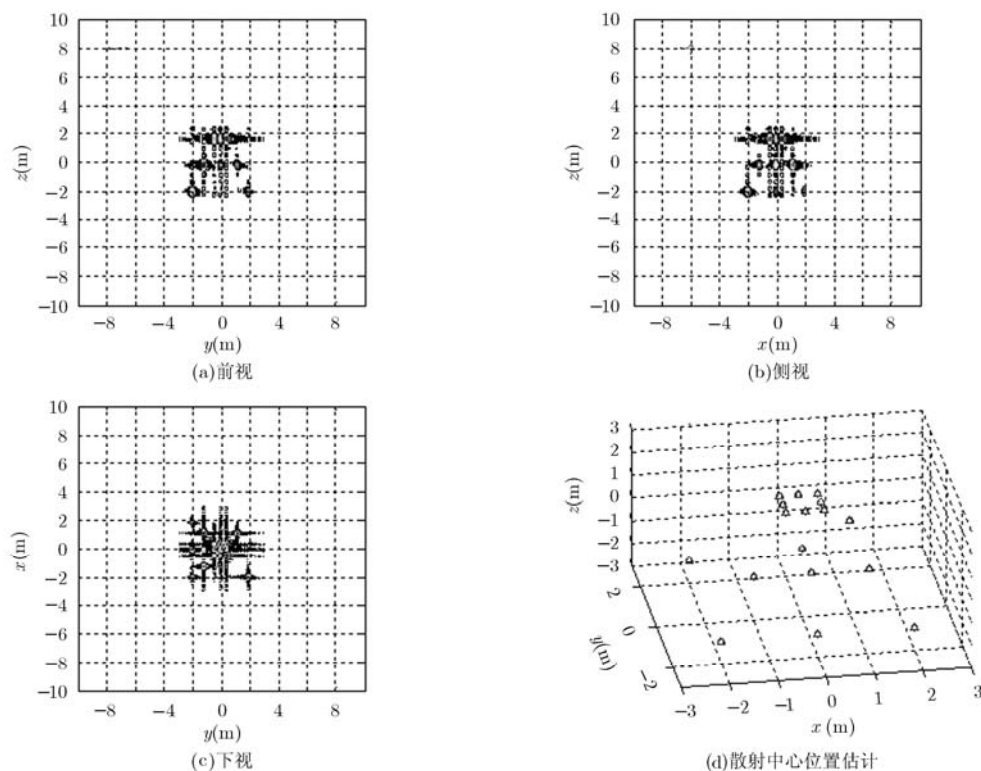


图11 复杂目标3维成像

### 参考文献

- [1] Ferraiuolo G, Meglio F, Pascasio V, et al. DEM reconstruction accuracy in multi-channel SAR interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(1): 191-201.
- [2] Ertin E, Moses R L, and Potter L C. Interferometric methods for 3D target reconstruction with multi-path circular SAR[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2010, 4(3): 464-473.
- [3] Tebaldini S. Single and multipolarimetric SAR tomography of forested areas: a parametric approach[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(5): 2375-2387.
- [4] Zhu X X and Bamler R. Tomographic SAR inversion by ell1-norm regularization: the compressive sensing approach [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(10): 3839-3846.
- [5] 徐刚, 李亚超, 张磊, 等. 基于多视角快拍 InSAR 干涉技术的前视 SAR 3 维成像[J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(3): 634-641.  
Xu Gang, Li Ya-chao, Zhang Lei, et al. Three-dimensional imaging of forward-looking SAR based on interferometric technology through different snapshots[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(3): 634-641.
- [6] 王金峰, 皮亦鸣, 曹宗杰. 一种机载 SAR 层析 3 维成像算法 [J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(5): 1029-1033.  
Wang Jin-feng, Pi Yi-ming, and Cao Zong-jie. An algorithm for airborne SAR tomography 3D imaging[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(5): 1029-1033.
- [7] 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.
- [8] 戴俊文, 金亚秋, 徐丰. 复杂目标电磁散射仿真与频率步进雷达对 3 维目标的重构[J]. *中国科学: 信息科学*, 2011, 41(8): 912-928.  
Dai Jun-wen, Jin Ya-qiu, and Xu Feng. Scattering simulation and reconstruction of a 3D complex target using downward-looking setp-frequency radar[J]. *SCIENCE CHINA Series F: Information Sciences*, 2011, 41(8): 912-928.
- [9] Reigber A and Moreira A. First demonstration of airborne SAR tomography using multibaseline L-band data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(5): 2142-2152.
- [10] Donoho D L. Compressed sensing[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [11] Candes E J, Romberg J, and Tao T. Robust uncertainly principles: exact signal reconstruction from highly

- incomplete frequency information[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(2): 489-509.
- [12] Zhang Lei, Qiao Zhi-jun, Xing Meng-dao, *et al.* High-resolution ISAR imaging with sparse stepped-frequency waveforms[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(11): 4630-4651.
- [13] Patel V M, Easley G R, Healy D M, *et al.* Compressed synthetic aperture radar[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2010, 4(2): 244-254.
- [14] Zhang Lei, Xing Meng-dao, Qiu Cheng-wei, *et al.* Resolution enhancement for inversed synthetic aperture radar imaging under low SNR via improved compressive sensing[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(10): 3824-3838.
- [15] Zhang Lei, Qiao Zhi-jun, Xing Meng-dao, *et al.* High-resolution ISAR imaging by exploiting sparse apertures [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2012, 60(2): 997-1008.
- [16] Austin C D, Ertin E, and Moses R L. Sparse signal methods for 3-D radar imaging[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2011, 5(3): 408-423.
- [17] Budillon A, Evangelista A, and Schirinizi G. Three-dimensional SAR focusing from multipass signals using compressive sampling[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(1): 488-499.
- [18] Baraniuk R G. Compressive sensing[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2007, 24(4): 118-121.
- [19] Donoho D L, Elad M, and Temlyakov V N. Stable recovery of sparse overcomplete representation in the presence of noise [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(1): 6-18.
- [20] Tropp J and Gilbert A. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2007, 53(12): 4655-4666.
- [21] Donoho D L, Tsaig Y, Drori I, *et al.* Sparse solution of underdetermined linear equations by stagewise orthogonal matching pursuit[R]. Technique Report TR-2006-2, Stanford University, Department of Statistics, 2006.
- [22] Jakowatz C V, Wahl D E, Eichel P H, *et al.* Spotlight-mode Synthetic Aperture Radar: A Signal Processing Approach [M]. Boston, MA: Kluwer, 1996.
- 周汉飞: 男, 1981 年生, 博士生, 研究方向为雷达信息处理、多角度 SAR 特征提取以及压缩感知等.
- 李 禹: 男, 1975 年生, 博士, 副教授, 主要从事超宽带雷达信号处理、遥感技术等的工作.
- 粟 毅: 男, 1961 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事雷达信号处理、雷达系统、遥感信息处理的研究.