

## 基于频域稀疏压缩感知的星载SAR稀疏重航过3维成像

田鹤<sup>①</sup> 于海锋<sup>②</sup> 朱宇<sup>②</sup> 刘磊<sup>②</sup> 张润宁<sup>②</sup>  
袁莉<sup>①</sup> 李道京<sup>\*③</sup> 周凯<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(电磁散射重点实验室 北京 100854)

<sup>②</sup>(中国空间技术研究院总体设计部 北京 100094)

<sup>③</sup>(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)

**摘要:** 星载合成孔径雷达(SAR)稀疏重航过3维成像技术通过交轨向的多次飞行观测, 获得观测场景的第3维分辨。该文给出了单颗卫星SAR稀疏重航过轨道分布, 为有效缩短重访时间, 同时给出了编队双星SAR轨道分布, 对应的交轨向等效孔径长度为20 km。提出了一种基于干涉处理和频域压缩感知(CS)的稀疏3维成像方法, 利用稀疏重航过中的部分回波形成参考3维复图像, 对待重建SAR 3维图像信号进行干涉处理, 使信号在频域具备稀疏性。在大轨道分布范围下, 建立频域距离向-交轨向线性测量矩阵, 利用CS理论联合求解稀疏表征下的图像频谱, 避免交轨向和距离向的回波信号耦合。将求解所得频谱逆变换至空间域, 可得到观测场景的3维图像重建结果。仿真结果表明, 该文方法在稀疏采样率74.4%条件下, 仍可获得与满采样成像性能相当的结果, 验证了干涉处理频域稀疏方法在星载SAR 3维成像中的有效性。

**关键词:** 星载SAR; 稀疏重航过; 编队卫星; 压缩感知; 干涉处理

中图分类号: TN959.74

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)08-2021-08

DOI: 10.11999/JEJT190638

## Sparse Flight 3-D Imaging of Spaceborne SAR Based on Frequency Domain Sparse Compressed Sensing

TIAN He<sup>①</sup> YU Haifeng<sup>②</sup> ZHU Yu<sup>②</sup> LIU Lei<sup>②</sup> ZHANG Running<sup>②</sup>  
YUAN Li<sup>①</sup> LI Daojing<sup>\*③</sup> ZHOU Kai<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(*Science and Technology on Electromagnetic Scattering Laboratory, Beijing 100854, China*)

<sup>②</sup>(*General Design Department, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China*)

<sup>③</sup>(*Key Laboratory of Science and Technology on Microwave Imaging, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

**Abstract:** The space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) sparse flight three-dimensional (3-D) imaging technology through the multiple observations in cross-track direction obtains the 3-D spatial distribution of the observed scene. In this paper, the orbit distribution of single satellite SAR sparse flight is given. In order to shorten effectively the satellite revisit time, the formation of double star SAR orbit distribution is given. The corresponding cross-track equivalent aperture length is 20 km. A sparse 3-D imaging method based on interferometry and compressed sensing is proposed. The referential complex image is formed by using part of the echoes of the sparse flight, and the SAR 3-D image signals which are to be reconstruct are processed by interferometry. This method makes the signal sparse in the frequency domain. Under the large orbit distribution range, the frequency domain range direction and cross-track linear measurement matrix is established, which is beneficial to the Compressed Sensing(CS) theory to solve jointly the image frequency spectrum under sparse representation, and avoid the echoes coupling between the range and cross-track direction. Inversely transforming the resulting spectrum into the spatial domain, the reconstruction result can be obtained. Simulation results show that under the condition of sparse sampling rate of 74.4%, the imaging

收稿日期: 2019-08-26; 改回日期: 2020-05-05; 网络出版: 2020-05-16

\*通信作者: 李道京 lidj@mail.ie.ac.cn

基金项目: 第五届高分辨率对地观测学术年会青年创新基金

Foundation Item: Youth Innovation Fund of 5th China High Resolution Earth Observation Conference

performance of the proposed method is still comparable to that of full sampling.

**Key words:** Space-borne SAR; Sparse flight; Satellite formation flying; Compressed Sensing (CS); Interferometry

## 1 引言

星载SAR 3维成像技术在地形测绘、战场侦察等领域具有重要应用价值<sup>[1]</sup>。由于平台、观测成本等限制,星载SAR交轨向通常为稀疏分布,轨道分布范围较小,交轨向成像性能较差。层析SAR<sup>[2,3]</sup>借鉴稀疏信号处理理论中的压缩感知(Compressive Sensing, CS)<sup>[4-6]</sup>等方法,从稀疏观测数据中估计出散射点的位置和强度。该类方法可以解决交轨稀疏信号重构问题,但交轨孔径长度受到最优垂直基线长度<sup>[7]</sup>的限制。例如,Zhu等人<sup>[8-10]</sup>在TerraSAR-X卫星数据成像试验中的交轨等效孔径长度约270 m,对应交轨向3 dB分辨率为33 m;文献<sup>[11]</sup>利用TanDEM-X数据进行了差分SAR层析试验,重航过形成的交轨等效孔径长度约750 m。基于CS等的空间域成像方法通过寻找欠定方程的稀疏解,在一定程度上提高图像分辨率,但假设前提是观测场景在空间具备稀疏性,当同一距离-方位分辨单元沿高度向存在多个散射点时,其信号重建性能会大幅下降。文献<sup>[12-14]</sup>提出通过干涉处理使图像频谱具备稀疏性,并利用频域低通滤波处理和CS等方法重建频谱,成像结果保留了图像连续性。文献<sup>[15]</sup>提出了运动误差下的机载稀疏重航过阵列SAR 3维成像方法。本文在此基础上,进一步研究了基于频域稀疏性质的星载SAR稀疏3维成像问题。

随着小卫星技术的发展,利用编队卫星实现3维成像已成为星载SAR技术的研究热点<sup>[16]</sup>。目前,欧洲多个团队针对编队卫星SAR成像技术开展了深入研究,典型方案有法国Cartwheel计划<sup>[17]</sup>、德国TanDEM-X<sup>[18]</sup>系统任务等。将编队卫星技术和稀疏重航过方式相结合,可以有效缩短卫星重访时间、大幅增加重轨次数、扩大交轨向合成孔径长

度。据此,本文结合卫星实际轨道数据,同时给出了单颗卫星和编队双星SAR稀疏重航过轨道分布情况,交轨向等效孔径长度均为20 km。在大轨道分布范围下,建立频域距离向-交轨向线性测量矩阵,利用CS理论联合求解频谱,避免交轨向和距离向的回波信号耦合问题。

## 2 3维成像几何

图1为星载SAR稀疏重航过3维成像几何示意图。在图1(a)中,假设 $x, y, z$ 坐标分别表示3维场景空间的地距、方位和高程向, $r$ 表示雷达视线方向(距离向), $s$ 表示垂直视线方向(交轨向), $s$ 与方位-距离平面垂直。图1中 $\theta_n$ 表示星下点离线角, $\theta_i$ 表示雷达入射角,为便于分析,假设 $\theta_n \approx \theta_i$ ;  $H$ 表示卫星平台高度, $R_0$ 表示平台至场景中心的最近距离;卫星沿方位向作匀速直线运动,飞行速度为 $v$ 。在图1(b)中,假设编队卫星形成的等效相位中心个数为 $M$ ,通过编队卫星平台对同一场景的 $N$ 次稀疏重航过观测,构成 $MN - 1$ 条基线,在交轨向形成长度为 $L$ 的孔径结构,且 $L = (MN - 1)d_a$ ,其中 $d_a$ 为平均基线长度。

根据交轨等效孔径长度,可获得目标在交轨向和高程向的3 dB分辨率 $\rho_r$ 和 $\rho_h$

$$\rho_r = \frac{\lambda R_0}{2L}, \rho_h = \rho_r \sin \theta \quad (1)$$

其中, $\lambda$ 为工作波长。根据最小基线长度,可获得交轨向和高程向地物不模糊范围 $l_{\max}$ 和 $h_{\max}$

$$l_{\max} = \frac{\lambda R_0}{2d_{\min}}, h_{\max} = l_{\max} \sin \theta \quad (2)$$

其中 $d_{\min}$ 为最小基线长度。根据编队卫星中等效相位中心个数、稀疏重航过次数、交轨孔径长度和最

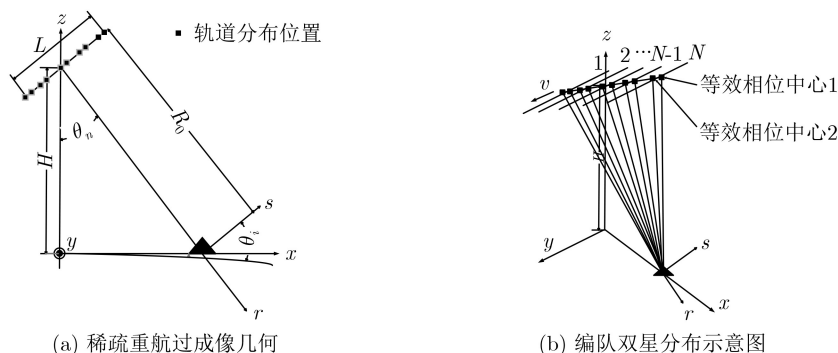


图1 星载SAR稀疏重航过3维成像几何示意图

小基线长度可以获得卫星平台在交轨向的稀疏采样率 $\eta$

$$\eta = \left(1 - \frac{MN - 1}{L/d_{\min}}\right) \times 100\% \quad (3)$$

### 3 稀疏重航过采样方式

以高度为550 km的卫星实际飞行轨道设计为例，针对某一固定观测区域，卫星观测时间为120 d，通过轨道控制可将轨道分布在[-10 km, 10 km]内。表1为卫星实际飞行轨道分布随观测时间的漂移情况。

#### 3.1 单颗卫星轨道分布

单颗卫星对应的稀疏重航过次数为23次，轨道分布情况与表1相同，轨道最小间隔为111 m。在X波段和45°正侧视模式下，交轨向地物不模糊范围为105 m，高程向地物不模糊范围为74 m，基本满足地物3维成像要求。方向图分析是评价稀疏采样程度、成像性能以及基于稀疏信号理论的图像重建算法性能的基础。根据方向图乘积原理<sup>[19]</sup>可以获得稀疏重航过形成的方向图如图2所示。图2(a)所示为单颗卫星交轨向稀疏重航过空间分布情况，其中横坐标为空间位置序号，纵坐标为方位归一化时间，稀疏采样率为87.2%。图2(b)为稀疏重航过自相关函数示意图，从中可知其具有一定的随机性。图2(c)为10 m天线对应的单颗卫星稀疏重航过方向

图，其中天线3 dB波束宽度为0.17°，天线主瓣位于区间[-0.17°, 0.17°]，在[-0.003°, 0.003°]内方向图不存在栅瓣影响(对应交轨地物不模糊范围105 m、高程向地物不模糊范围74 m)，峰值旁瓣值为-9.78 dB，积分旁瓣值为-3.77 dB，基本满足在有初始DEM条件下地物3维成像要求。但由于重复观测次数较少，该范围内远区副瓣较高。

#### 3.2 编队双星轨道分布

本文结合卫星实际轨道分布，将单颗卫星改为基于2颗小卫星的编队结构，小卫星间隔为222 m，1发2收工作模式下形成的等效相位中心为2个，间隔为111 m；或者2颗自发自收的小卫星前后编队飞行，间隔为111 m。对应地物不模糊范围与单颗卫星情况相同。编队卫星实际轨道分布对应的稀疏重航过方式如图3(a)所示，形成重复观测轨道为46条，稀疏采样率为74.4%。图3(b)为编队卫星稀疏重航过分布的自相关函数图，从中可看出该分布方式具备良好的随机性质。图3(c)为10 m天线对应的编队双星稀疏重航过方向图，2颗编队卫星对应的稀疏重航过方向图在[-0.003°, 0.003°]内不存在栅瓣影响(对应地物不模糊范围与单颗卫星相同)，其中峰值旁瓣值为-9.77 dB，积分旁瓣值为-4.20 dB，且方向图中远区副瓣较低，有利于成像。基于此采样方式，结合进一步的图像重建可以准确恢复观测场景。

表 1 卫星轨道漂移情况

时间(d)	0.285479	6.285773	12.28588	18.2858	24.28553	30.28536	36.28558	42.28562
经度漂移(km)	0	0.123000	0.180000	0.168000	0.087000	0.043000	0.141000	0.173000
距离漂移(km)	0	13.692300	20.037520	18.701680	9.684800	4.786740	15.696060	19.258280
时间(d)	48.285470	54.285150	60.285210	66.285380	72.285390	78.285250	84.284980	90.284810
经度漂移(km)	0.138000	0.039000	0.079000	0.159000	0.183000	0.152000	0.071000	0.029000
距离漂移(km)	15.362100	4.341462	8.794244	17.699810	20.371480	16.920570	7.903688	3.228267
时间(d)	96.285010	102.285100	108.285000	114.284900	120.284600	126.284500	132.284700	
经度漂移(km)	0.119000	0.164000	0.167000	0.128000	0.049000	0.017000	0.117000	
距离漂移(km)	13.247030	18.256410	18.590360	14.248900	5.454658	1.892432	13.02439	

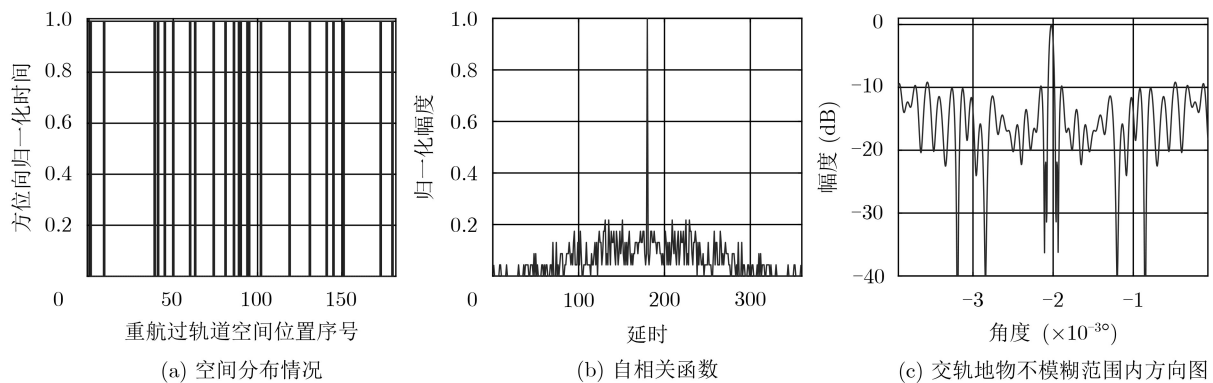


图 2 单颗卫星稀疏重航过轨道分布情况和10 m天线方向图分析

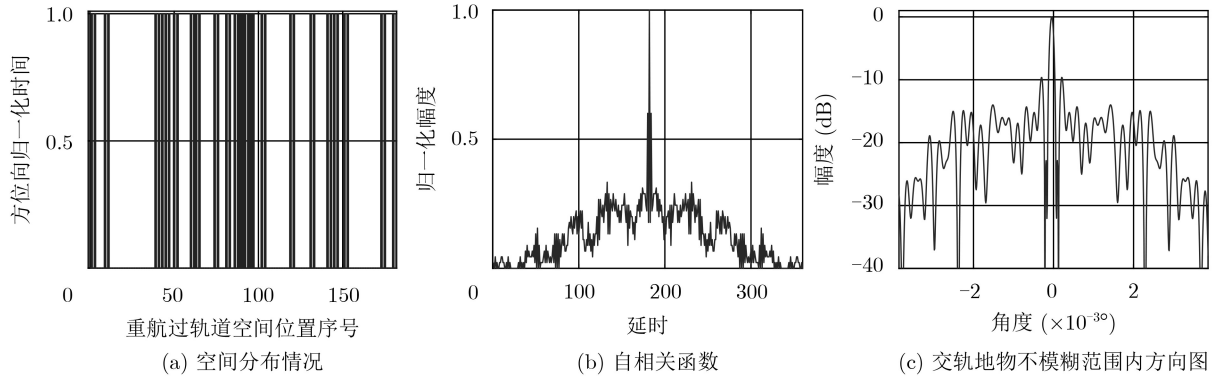


图3 编队双星稀疏重航过轨道分布情况和10 m天线方向图分析

#### 4 基于频域CS的3维重建方法

假设SAR发射信号为线性调频信号

$$p(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \exp(j2\pi f_c t + j\pi K_r t^2) \quad (4)$$

其中 $T_p$ 为脉冲时间宽度,  $f_c$ 为工作载频,  $K_r$ 为调频率。假设观测场景中存在一点目标 $q$ , 在 $s$ - $y$ - $r$ 坐标系下的空间位置为 $(s_q, y_q, r_q)$ , 后向散射系数为 $\sigma_q$ 。假设编队卫星在单发多收模式下共形成 $M$ 个等效相位中心, 针对同一场景共进行了 $N$ 次稀疏重航过。第 $m$ 个等效相位中心在第 $n$ 次重航过采样中, 对应的交轨空间位置为 $s_{mn}$ ,  $s_{mn} = -L/2 + (mn - 1)d_a$ 。则SAR接收的基带回波信号为

$$g(t, y, s_{mn}) = \sigma_q \text{rect}\left[\frac{t - \tau_q(y, s_{mn})}{T_p}\right] \cdot \exp\left\{-j2\pi f_c \tau_q(y, s_{mn}) + j\pi K_r [t - \tau_q(y, s_{mn})]^2\right\} \quad (5)$$

其中 $y$ 表示某方位采样时刻的采样点位置,  $\tau_q(y, s_{mn})$ 为采样点 $(s_{mn}, y, R_0)$ 至场景中第 $q$ 个点目标位置 $(s_q, y_q, r_q)$ 的时间延迟

$$\tau_q(y, s_{mn}) = \frac{2}{c} \sqrt{(R_0 - r_q)^2 + (y - y_q)^2 + (s_{mn} - s_q)^2} \quad (6)$$

$c$ 表示光传播速度。

##### 4.1 SAR频域稀疏表征

由于地面观测目标在空间为连续分布, 其图像在频域应具有稀疏性。但在SAR 3维复图像中, 其图像分辨单元初始相位是随机变化的, 该随机初始相位主要是由于距离方向分辨单元复散射系数不同和距离方向采样间隔较大而产生, 由此使复图像频谱较宽难以压缩。本文考虑通过构造参考复图像并对稀疏采样下的复图像进行干涉处理, 实现SAR图像在频域的稀疏表征。假设待重建SAR 3维复图像为 $\sigma$ , 对应的3维频谱为 $\alpha$ , 两者关系为

$$\sigma = F^{-1} \alpha \quad (7)$$

其中 $F^{-1}$ 为逆傅里叶基。采用基于匹配滤波的成像方法对编队卫星稀疏重航过方式下的部分回波数据进行成像, 得到参考复图像 $\sigma_{\text{ref}}$ 。对两幅图像 $\sigma$ 和 $\sigma_{\text{ref}}$ 进行干涉处理, 得到干涉后的图像 $\sigma_{\text{new}}$

$$\sigma_{\text{new}} = |\sigma| \cdot \exp\{j[\angle(\sigma) - \angle(\sigma_{\text{ref}})]\} \quad (8)$$

由于两幅图像 $\sigma$ 和 $\sigma_{\text{ref}}$ 对应的回波数据中雷达视角相同, 随机初始相位近似相等, 故相位中已去除随机初始相位的大部分影响。假设图像 $\sigma_{\text{new}}$ 对应的频谱为 $\alpha_{\text{new}}$

$$\sigma_{\text{new}} = F^{-1} \alpha_{\text{new}} \quad (9)$$

则 $\alpha_{\text{new}}$ 具备稀疏性, 可通过建立频域线性测量矩阵并利用CS理论进行求解, 将重建后的频谱反变换至空间域, 可实现编队卫星稀疏重航过下的SAR 3维成像。

##### 4.2 频域CS模型

由于编队卫星稀疏重航过方式形成的交轨向等效孔径较长, 为避免复杂的相位中心补偿和距离徙动校正处理, 本文利用基于CS的方法直接对回波信号进行2维联合处理(距离向-交轨向)。假设经过方位向聚焦后, SAR回波信号可写为

$$g_{ac}(t, y, s_{mn}) = \sigma_q \text{sinc}(y - y_q) \text{rect}\left[\frac{t - 2R_{s_{mn}}/c}{T_p}\right] \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi R_{s_{mn}}}{\lambda}\right) \cdot \exp\left\{j\pi K_r [t - 2R_{s_{mn}}/c]^2\right\} \quad (10)$$

其中 $R_{s_{mn}} = \sqrt{(R_0 - r_q)^2 + (s_{mn} - s_q)^2}$ 。将待重建的距离向-交轨向成像空间划分为 $N_s \times N_r$ 个成像单元, 假设成像空间中第 $i$ 个距离向和第 $j$ 个交轨向分辨单元 $P_{ij}$ 的位置为 $(s_{P_{ij}}, r_{P_{ij}})$ ,  $1 \leq i \leq N_s$ ,  $1 \leq j \leq N_r$ 。针对第 $m$ 个方位向分辨单元, 按照式(10)建立距离向-交轨向2维线性测量矩阵 $\Phi$

$$\Phi = \begin{bmatrix} \varphi[R_{s_{11}}(P_{11})] & \varphi[R_{s_{11}}(P_{12})] & \cdots & \varphi[R_{s_{11}}(P_{ij})] & \cdots & \varphi[R_{s_{11}}(P_{N_s N_r})] \\ \varphi[R_{s_{12}}(P_{11})] & \varphi[R_{s_{12}}(P_{12})] & \cdots & \varphi[R_{s_{12}}(P_{ij})] & \cdots & \varphi[R_{s_{12}}(P_{N_s N_r})] \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \varphi[R_{s_{mn}}(P_{11})] & \varphi[R_{s_{mn}}(P_{12})] & \cdots & \varphi[R_{s_{mn}}(P_{ij})] & \cdots & \varphi[R_{s_{mn}}(P_{N_s N_r})] \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \varphi[R_{s_{MN}}(P_{11})] & \varphi[R_{s_{MN}}(P_{12})] & \cdots & \varphi[R_{s_{MN}}(P_{ij})] & \cdots & \varphi[R_{s_{MN}}(P_{N_s N_r})] \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中  $\varphi[R_{s_{mn}}(P_{ij})] = \exp\{j\pi K_r [t - 2R_{s_n}(P_{ij})/c]^2\}$ ,  $\mathbf{t} = [t_1 \ t_2 \ \cdots \ t_{N_{rg}}]^T$  为距离向快时间向量,  $R_{s_{mn}}(P_{ij}) = \sqrt{(R_0 - r_{P_{ij}})^2 + (s_{mn} - s_{P_{ij}})^2}$ ,  $N_{rg}$  表示距离向采样点数。

假设成像单元  $P_{ij}$  内的目标后向散射系数为  $\sigma_{ij}$ , 则待重建图像可以表示为向量形式  $\sigma$

$$\sigma = [\sigma_{11} \cdots \sigma_{1N_r} \ \sigma_{21} \cdots \sigma_{2N_r} \ \cdots \ \sigma_{N_s 1} \cdots \sigma_{N_s N_r}]^T \quad (12)$$

距离向-交轨向2维数据构成的回波同样可表示为向量形式  $\mathbf{y}$

$$\mathbf{y} = [g_{ac}(\mathbf{t}, \mathbf{y}, s_{11})^T \cdots g_{ac}(\mathbf{t}, \mathbf{y}, s_{mn})^T \cdots g_{ac}(\mathbf{t}, \mathbf{y}, s_{MN})^T]^T \quad (13)$$

则线性测量方程为

$$\mathbf{y} = \Phi \sigma \quad (14)$$

由式(8)可知, 待重建图像  $\sigma$  可表示为

$$\sigma = \exp[j\angle(\sigma_{\text{ref}})] \sigma_{\text{new}} \quad (15)$$

综合式(7)、式(14)和式(15), 可建立稀疏频谱  $\alpha_{\text{new}}$  对应的频域线性测量方程为

$$\mathbf{y} = \Phi P F^{-1} \alpha_{\text{new}} \quad (16)$$

其中,  $P$  为参考复图像相位构成的对角矩阵,  $P = \text{diag}\{\exp(j\angle\sigma_{\text{ref}})\}$ 。

利用压缩感知理论, 基于  $\ell_{1/2}$  范数优化准则建立最优化方程为

$$\min_{\alpha_{\text{new}}} \left\{ \|\mathbf{y} - \Phi P F^{-1} \alpha_{\text{new}}\|_2^2 + \xi \|\alpha_{\text{new}}\|_{1/2} \right\} \quad (17)$$

其中  $\xi$  表示正则化参数。对上述最优化方程进行求解, 得到目标在距离向、交轨向的后向散射系数对应的频谱  $\alpha_{\text{new}}$ 。对求解结果进行逆傅里叶变换, 可得到待重建地物目标的3维高分辨率成像结果  $\sigma$ 。

## 5 仿真分析

编队卫星稀疏重航过SAR侧视3维成像仿真参数如表2所示。系统工作在侧视模式, 轨道最小间隔为111.3 m, 形成的交轨等效孔径长度为20 km。距离向分辨率为0.50 m, 方位向分辨率为1.00 m, 交轨向分辨率为0.58 m, 对应高程向分辨率为0.41 m。场景大小为40 m(方位)×40 m(地距)×30 m(高程), 场景内包含一个圆锥体, 半径为7 m, 高度为30 m。

根据上表所示的交轨采样最小间隔和等效孔径长度可知, 满采样条件下卫星需要180次重航过观测。图4为满采样对应的3维成像仿真结果, 其中成像方法采用3维后向投影(Back Projection, BP)算法。成像空间为方位向-距离向-交轨向( $s$ - $y$ - $r$ )3维空间, 可通过坐标转换获得目标的方位向-地距向-高程向( $X$ - $Y$ - $Z$ )图像。在地物不模糊范围内, 图像接近场景真实值, 可将其作为图像重建质量评价的比较值; SAR复图像频谱受随机初相影响, 频率覆盖范围较宽, 在重建频谱时需要进行干涉处理实现SAR图像信号在频域的稀疏表征。

表2 星载重航过SAR侧视3维成像仿真参数

参数	数值	参数	数值
工作波长 $\lambda$	0.03 m	单星轨道最小间隔	111.3 m
发射信号带宽 $B_s$	300 MHz	编队双星间隔	222.6 m
参考平台高度 $H$	550 km	交轨采样最小间隔	111.3 m
入射角	45°	交轨等效孔径长度	20 km
方位分辨率	1 m	重复轨道次数	23
机载平台速度	7 km/s		

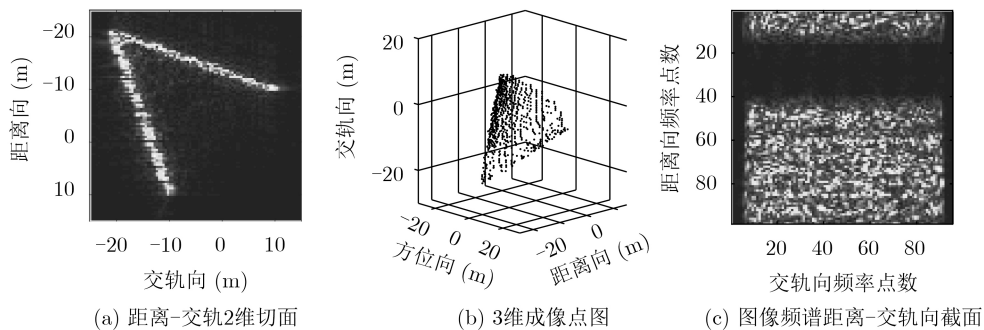


图4 180次航过对应的满采样3维BP成像结果

### 5.1 单星稀疏重航过仿真

针对单颗卫星，在23次稀疏重航过条件下，对应的3维BP成像结果如图5所示。从图中可知，在稀疏采样条件下，直接成像方法对应的图像在交轨向产生严重混叠，目标散射强度被副瓣噪声所淹没。

利用本文算法对单颗卫星稀疏重航过方式下的回波数据进行重建，其中选用第6至第16条轨道对应的回波数据构造参考复图像。成像结果如图6所示。从重建结果可看出，通过干涉处理和频域稀疏CS的3维成像方法，信号3维频谱已压缩变窄。但由于构造参考复图像所用的回波中连续分布轨道较少，对应的复图像本身包含较多副瓣噪声，故重构后的频谱仍然存在少量混叠，成像结果仍然受到副瓣干扰。

### 5.2 编队双星稀疏重航过仿真

针对编队双星，在23次稀疏重航过条件下的3维BP成像结果如图7所示。从图中可知，直接成像方法对应的图像在交轨向同样产生严重混叠，但由于编队卫星结构，目标主瓣能量仍然较高，通过阈值选取得到的3维图像中仍然能看出椎体形状，通过进一步算法重构有可能提升成像效果。

利用本文算法对编队双星稀疏重航过方式下的回波数据进行重建，编队双星条件下共产生46条重复轨道观测数据，其中构造参考复图像所用的回波选自第10条至第30条轨道数据。成像结果如图8所示，从结果可看出所提方法可有效抑制稀疏采样带来的副瓣噪声，同时较好地保留了观测场景的细节和连续性。

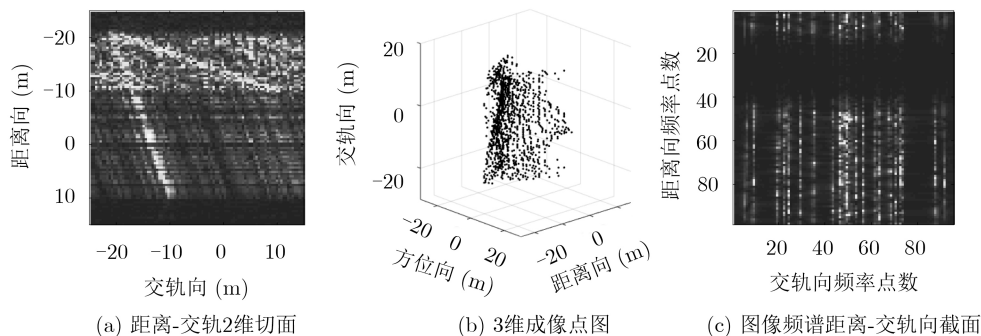


图5 单颗卫星23次稀疏重航过对应的3维BP成像结果

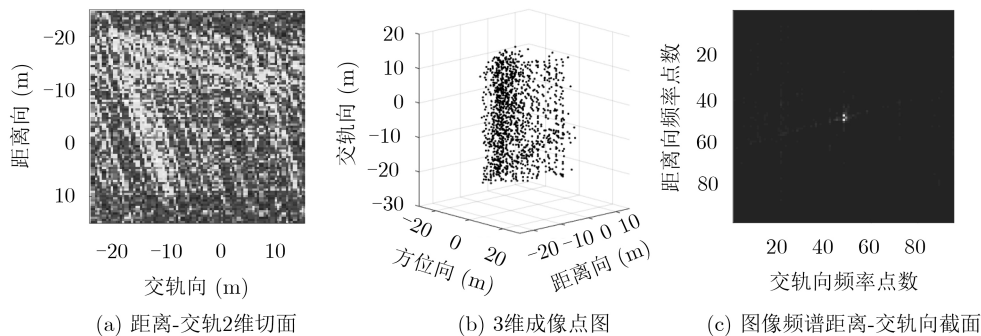


图6 单颗卫星23次稀疏重航过对应的频域CS成像结果

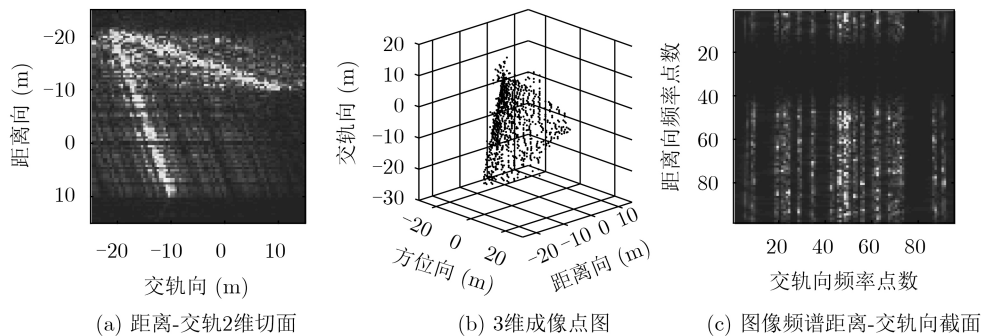


图7 编队双星23次稀疏重航过对应的3维BP成像结果

### 5.3 误差分析

对图像重建结果进行误差分析，评价指标分别为图像熵、相关系数和均方根误差。为了全面评估本文算法的性能，同时采用基于空间域稀疏性质的CS理论方法进行比较。基于文中公式(14)，可得到空间域距离-交轨CS模型的求解结果。图像重建性能量化评价如表3所示，其中将满采样成像结果作为相关系数和均方根误差的理论真值。从表中可知，在相同成像方法下，编队卫星成像

性能明显优于单颗卫星。针对编队卫星结构，基于频域稀疏CS的图像重建方法性能最优，其次是基于空间域CS的成像方法。由于基于空间域CS成像方法求解结果为空间稀疏解，故对应图像熵最小，但重建结果中丢失大量信息，与满采样图像的相关系数最低，相似性最差。基于频域稀疏CS的图像重建方法通过重建SAR图像频谱，进而实现空间场景3维重建，较好地保留了观测场景的细节和连续性。

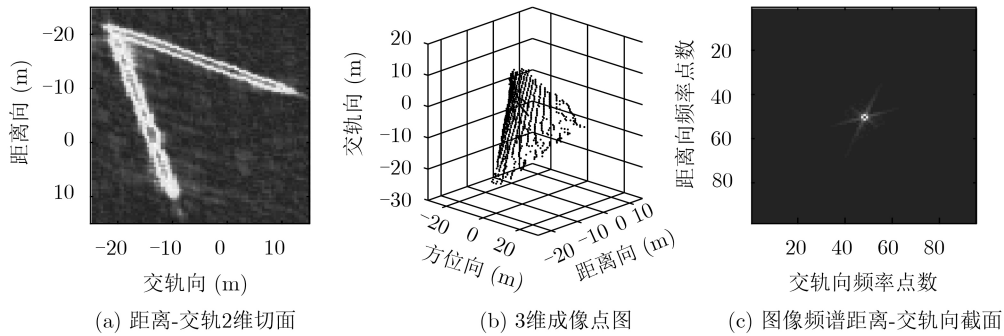


图8 编队卫星23次稀疏重航过对应的频域CS成像结果

表3 图像重建结果误差分析

观测方式	算法	评价指标		
		图像熵	相关系数	均方根误差(m)
180次满采样重航过	3维BP成像	0.4532		
单颗卫星23次稀疏重航过	3维BP成像	0.7214	0.6566	0.0604
编队双星23次稀疏重航过	3维BP成像	0.6980	0.7903	0.0453
单颗卫星23次稀疏重航过	空间域CS成像	0.0095	0.5902	0.0432
编队双星23次稀疏重航过	空间域CS成像	0.0093	0.6094	0.0414
单颗卫星23次稀疏重航过	频域CS成像	0.0503	0.7843	0.0405
编队卫星23次稀疏重航过	频域CS成像	0.0453	0.8280	0.0296

## 6 结论

本文给出了单颗卫星SAR稀疏重航过轨道分布情况，为有效缩短卫星重访时间、增加重轨次数，将编队卫星技术和稀疏重航过方式相结合，同时给出了编队双星SAR轨道分布。提出了一种基于干涉处理和频域CS的3维成像方法，利用稀疏重航过中的部分回波形成参考复图像，对待重建SAR图像信号进行干涉处理，使SAR信号在频域具备稀疏性。建立频域距离向-交轨向线性测量矩阵，利于CS理论联合求解频谱，将求解所得频谱逆变换至空间域，可得到观测场景的3维图像重建结果。仿真分析结果表明，本文方法在稀疏采样率74.4%条件下，仍可获得与满采样成像性能相当的结果，验证了干涉处理频域稀疏方法在星载SAR 3维成像中的有效性。

## 参考文献

- [1] GIRET R, JEULAND H, and ENERT P. A study of a 3D-SAR concept for a millimeter wave imaging radar onboard an UAV[C]. The 1st European Radar Conference, Amsterdam, The Netherland, 2004: 201-204.
- [2] REIGBER A, MOREIRA A, and PAPATHANASSIOU K P. First demonstration of airborne SAR tomography using multibaseline L-band data[C]. IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Hamburg, Germany, 1999: 44-46. doi: 10.1109/IGARSS.1999.773395.
- [3] CANDES E J, WAKIN M B. An introduction to compressive sampling[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, 25(2): 21-30. doi: 10.1109/MSP.2007.914731.
- [4] CANDÈS E J. Compressive sampling[C]. The International Congress of Mathematicians, Madrid, Spain, 2006: 1-20.
- [5] DONOHO D L. Compressed sensing[J]. *IEEE Transactions*

- on *Information Theory*, 2006, 52(4): 1289–1306. doi: [10.1109/TIT.2006.871582](https://doi.org/10.1109/TIT.2006.871582).
- [6] 徐华平, 周荫清, 李春升. 分布式星载干涉SAR中空间基线的分析和设计[J]. 电子与信息学报, 2003, 25(9): 1194–1199.  
XU Huaping, ZHOU Yinqing, and LI Chunsheng. Baseline analysis and design for distributed spaceborne interferometric SAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2003, 25(9): 1194–1199.
- [7] ZHU Xiaoxiang 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. doi: [10.1109/TGRS.2010.2050487](https://doi.org/10.1109/TGRS.2010.2050487).
- [8] ZHU Xiaoxiang and BAMLER R. Sparse tomographic SAR reconstruction from mixed TerraSAR-X/TanDEM-X data stacks[C]. 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Munich, Germany, 2012: 7468–7471. doi: [10.1109/IGARSS.2012.6351905](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2012.6351905).
- [9] ZHU Xiaoxiang and BAMLER R. Let's do the time warp: Multicomponent nonlinear motion estimation in differential SAR tomography[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(4): 735–739. doi: [10.1109/LGRS.2010.2103298](https://doi.org/10.1109/LGRS.2010.2103298).
- [10] GE Nan and ZHU Xiaoxiang. Bistatic-like differential SAR tomography[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(8): 5883–5893. doi: [10.1109/TGRS.2019.2902814](https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2902814).
- [11] 张清娟, 李道京, 李烈辰. 连续场景的稀疏阵列SAR侧视三维成像研究[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(5): 1097–1102. doi: [10.3724/SP.J.1146.2012.01136](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2012.01136).  
ZHANG Qingjuan, LI Daojing, and LI Liechen. Research on continuous scene side-looking 3D imaging based on sparse array[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(5): 1097–1102. doi: [10.3724/SP.J.1146.2012.01136](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2012.01136).
- [12] 李烈辰, 李道京. 基于压缩感知的连续场景稀疏阵列SAR三维成像[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(9): 2166–2172. doi: [10.3724/SP.J.1146.2013.01645](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2013.01645).  
LI Liechen and LI Daojing. Sparse array SAR 3D imaging for continuous scene based on compressed sensing[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(9): 2166–2172. doi: [10.3724/SP.J.1146.2013.01645](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2013.01645).
- [13] TIAN He and LI Daojing. Sparse flight array SAR downward-looking 3-D imaging based on compressed sensing[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, 13(10): 1395–1399. doi: [10.1109/LGRS.2016.2560238](https://doi.org/10.1109/LGRS.2016.2560238).
- [14] 田鹤, 李道京. 稀疏重航过阵列SAR运动误差补偿和三维成像方法[J]. 雷达学报, 2018, 7(6): 717–729. doi: [10.12000/JR18101](https://doi.org/10.12000/JR18101).  
TIAN He and LI Daojing. Motion compensation and 3-D imaging algorithm in sparse flight based airborne array SAR[J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(6): 717–729. doi: [10.12000/JR18101](https://doi.org/10.12000/JR18101).
- [15] 尹建凤, 张庆君, 刘杰, 等. 国外编队飞行干涉SAR卫星系统发展综述[J]. 航天器工程, 2018, 27(1): 116–122. doi: [10.3969/j.issn.1673-8748.2018.01.016](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-8748.2018.01.016).  
YIN Jianfeng, ZHANG Qingjun, LIU Jie, et al. A review on development of formation flying interferometric SAR satellite system[J]. *Spacecraft Engineering*, 2018, 27(1): 116–122. doi: [10.3969/j.issn.1673-8748.2018.01.016](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-8748.2018.01.016).
- [16] PETERSON E H, FOTOPOULOS G, and ZEE R E. A feasibility assessment for low-Cost InSAR formation-flying microsattellites[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(8): 2847–2858. doi: [10.1109/TGRS.2009.2017521](https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2017521).
- [17] ZINK M, BARTUSCH M, and MILLER D. TanDEM-X mission status[C]. 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Vancouver, Canada, 2011: 2290–2293. doi: [10.1109/IGARSS.2011.6049666](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2011.6049666).
- [18] TRIDON D B, BACHMANN M, BÖER J, et al. TanDEM-X going for the DEM: Acquisition, performance, and further activities[C]. The 5th IEEE Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR), Singapore, 2015: 163–168. doi: [10.1109/APSAR.2015.7306180](https://doi.org/10.1109/APSAR.2015.7306180).
- [19] WANG Puzhong and SHI Changsheng. *Antenna Principle*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1993.
- 田 鹤: 女, 1991年生, 工程师, 研究方向为雷达信号处理、雷达成像识别和目标特性研究.  
于海锋: 男, 1978年生, 研究员, 研究方向为微波遥感.  
朱 宇: 男, 1978年生, 研究员, 研究方向为微波遥感.  
刘 磊: 男, 1985年生, 高级工程师, 研究方向为微波遥感.  
张润宁: 男, 1966年生, 研究员, 研究方向为微波遥感.  
袁 莉: 女, 1977年生, 研究员, 研究方向为雷达目标识别.  
李道京: 男, 1964年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为雷达系统, 微波成像, 信号处理方面.  
周 凯: 男, 1995年生, 博士生, 研究方向为雷达信号处理.

责任编辑: 余 蓉