

## 基于柱形抛物面天线的 MIMO SAR 研究

叶恺<sup>\*①②</sup> 禹卫东<sup>①②</sup> 徐伟<sup>①</sup> 王伟<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

<sup>②</sup>(中国科学院大学 北京 100049)

**摘要:** 为了实现星载合成孔径雷达(SAR)的高分辨率宽测绘带成像, 该文提出一种基于柱形抛物面天线的多发多收合成孔径雷达系统(MIMO SAR)。根据对系统结构和短偏移正交(STSO)发射波形的分析, 该文给出该系统的具体处理方法。基于柱形抛物面天线易于在俯仰向形成高增益窄波束的优势, 该系统能够利用数字波束形成技术对不同波形回波数据进行有效分离, 从而获取更多的方位向等效相位中心。通过方位向多通道数据重构处理, 成像场景回波数据可利用传统成像算法进行成像。仿真结果表明, 该系统能够确保 MIMO SAR 的成像质量, 并具有良好的成像性能。

**关键词:** 合成孔径雷达; 多发多收; 柱形抛物面天线; 数字波束形成

中图分类号: TN959.74

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)08-1816-07

DOI: 10.11999/JEIT171105

## Investigation on Parabolic Cylinder Reflector Based MIMO SAR

YE Kai<sup>①②</sup> YU Weidong<sup>①②</sup> XU Wei<sup>①</sup> WANG Wei<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>②</sup>(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** To realize the high-resolution wide-swath mapping capability of spaceborne SAR, this paper presents a parabolic cylinder reflector based MIMO SAR system. According to the analysis of system configuration and Short-Term Shift-Orthogonal (STSO) transmitting waveforms, the specific processing method are elaborated. Taking advantage of parabolic characteristics in elevation, the narrow beams with high gain can be easily realized by the parabolic cylinder reflector. This facilitates the efficient separation of STSO transmitting waveforms by using the digital beam-forming technique, therefore, more azimuth equivalent phase centers can be obtained. After the multichannel reconstruction processing in azimuth, the echo signals from illuminated scene can be imaged by conventional imaging algorithms. The simulation results show that, the proposed system has satisfactory performance for MIMO SAR imaging.

**Key words:** SAR; MIMO; Parabolic cylinder reflector; Digital BeamForming (DBF)

### 1 引言

星载合成孔径雷达(SAR)是一种先进的微波成像雷达系统, 具有全天时、全天候的空间对地观测能力, 在自然灾害监测、地形测绘和军事侦察等方面具有重要的应用价值<sup>[1]</sup>。在遥感应用中, 几何分辨率和测绘带宽是评价星载 SAR 系统成像能力的两个重要指标: 高分辨率意味着能够获取更精确的目

标特征信息, 有利于目标识别和特征提取; 宽测绘带意味着能够提供更广阔的场景信息以及降低对地观测的重访周期。因此, 星载 SAR 系统的高分辨率宽测绘带成像是人们一直追求的目标。但是传统的单通道星载 SAR 系统受到最小天线面积的限制<sup>[2]</sup>, 不能同时实现高分辨率和宽测绘带成像, 这有限的成像能力导致星载 SAR 图像越来越不能满足很多遥感应用的需求。随着多通道技术的发展和数字波束形成技术(Digital Beam-Forming, DBF)的应用, 下一代星载 SAR 系统<sup>[3-8]</sup>将以单发多收体制突破传统星载 SAR 成像能力的限制, 显著改善 SAR 图像的空间分辨率和测绘带宽度。为了进一步提升星载 SAR 的成像能力, 将多发多收体制(MIMO)应用到系统设计中成为了星载 SAR 未来的重要发展趋

收稿日期: 2017-11-24; 改回日期: 2018-04-13; 网络出版:

\*通信作者: 叶恺 yekai\_seven@hotmail.com

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0502700), 国家自然科学基金(61701479)

Foundation Items: The National Key Research and Development Project (2017YFB0502700), The National Natural Science Foundation of China (61701479)

势<sup>[9-15]</sup>。MIMO SAR 系统通过多个发射通道将多个正交波形照射到地面场景，利用多个接收通道接收回波并进行波形分离处理，能够获得比单发多收体制星载 SAR 更多的空间自由度，从而具有潜力实现很多先进的成像模式，例如全极化高分宽幅成像模式、多模式混合成像、3 维成像等，因此 MIMO SAR 是未来遥感应应用中能够满足用户需求的理想解决方案<sup>[16-20]</sup>。

近年来，采用短偏移正交(Short-Term Shift-Orthogonal, STSO)波形的 MIMO SAR 系统成为了多发多收体制 SAR 发展方向上的研究热点。根据文献[21]可知，短偏移正交波形不仅占据相同时域范围，而且占据相同的频谱范围，因此有利于在 MIMO SAR 系统设计过程中减轻脉冲重复频率、发射功率等因素的限制。同时，这类发射波形相互之间瞬时频率偏移很大，满足短偏移正交性质：在一定的时间间隔内，STSO 发射波形的互相关积分为零，保持相互正交。这意味着，根据目标回波时间和目标星下点偏移角之间的对应关系，不同的 STSO 发射波形可通过俯仰向多波束 DBF 技术进行分离。通常，MIMO SAR 系统采用平面相控阵天线来发射 STSO 波形，因为基于平面相控阵天线的 MIMO SAR 系统能够利用发射波形分集和方位向上灵活的波束指向实现 MIMO SAR 系统的很多先进成像模式。但是，短偏移正交波形的有效分离严重依赖于俯仰向 DBF 接收波束的宽度，因此需要设计高度较高的平面相控阵天线以满足波形分离的要求，这不利于 MIMO SAR 系统在星载平台上实现。针对这一问题，本文提出了一种基于柱形抛物面天线的 MIMO SAR 系统。该系统不仅具备基于平面相控阵天线的 MIMO SAR 系统在方位向上波束指向灵活的优势，而且借助于柱形抛物面天线俯仰向聚焦波束的特性，更有利于形成俯仰向的高增益窄波束来有效分离 STSO 发射波形。本文将详细分析该系统的结构和发射波形，并阐述具体的处理方法，仿真实验将验证该系统的有效性。

## 2 系统结构

为了便于分析，本文将主要讨论两波形情况下的基于柱形抛物面天线的 MIMO SAR 系统。如图 1 所示，该 MIMO SAR 系统包含一个柱形抛物面天线和一个馈源阵列。馈源阵列共有  $N_e \times 2$  个发射通道(位于馈源阵列左右两侧的深色区域)和  $N_e \times N_a$  个接收通道，其中  $N_e$  表示俯仰向上的通道数目， $N_a$  表示方位向上的通道数目。所有馈源都被放置在平行于卫星轨道方向的平面上，并且馈源辐射方向都朝向柱形抛物面天线。当 MIMO SAR 系统发射信号时，馈源阵列左右两侧的发射通道同时激活并辐射 STSO 波形 1 和 STSO 波形 2，经过柱形抛物面天线反射后，2 种波形同时照射地面场景。当 MIMO SAR 系统接收信号时，所有接收通道同时打开并接收地面场景回波，每个接收通道的回波信号经过低噪放大、混频、数字化等处理后在 DBF 处理器中进行波形分离处理。对比基于平面相控阵天线的 MIMO SAR 系统，基于柱形抛物面天线的 MIMO SAR 系统的主要优势在于，更易于在俯仰向上形成高增益窄波束对 STSO 波形进行有效分离。经过波形分离处理后，基于柱形抛物面天线的 MIMO SAR 系统在每个脉冲重复间隔内都能获得  $2N_a - 1$  个方位向等效相位中心，这意味着系统的脉冲重复频率 PRF<sub>sys</sub> 只需满足不等式  $(2N_a - 1)PRF_{sys} \geq B_a$  就可以确保回波信号的多普勒频谱能够被重构恢复，其中  $B_a$  表示多普勒带宽。因此，在保持相同方位向分辨率的条件下，该系统的脉冲重复频率(Pulse Repetition Frequency, PRF)相比传统单通道 SAR 系统的脉冲重复频率可降低  $1/(2N_a - 1)$  倍，这也远低于单发多收体制 SAR 系统对脉冲重复频率的要求。受益于额外的方位向等效相位中心数目，该系统不仅能够提升高分宽幅成像性能，而且能够增强地面移动目标探测能力和提升全极化模式的成像性能。

## 3 处理方法

如图 2 所示，基于柱形抛物面天线的 MIMO

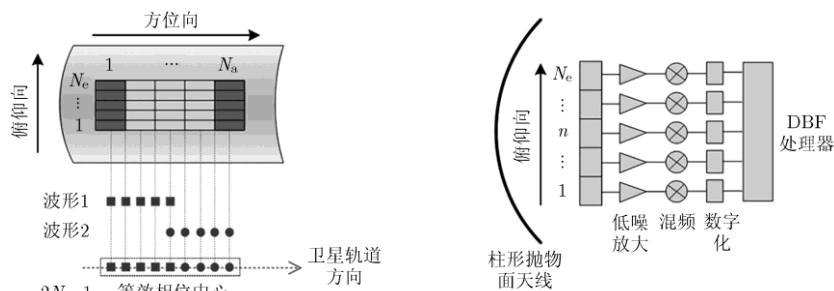


图 1 基于柱形抛物面天线的 MIMO SAR 系统示意图

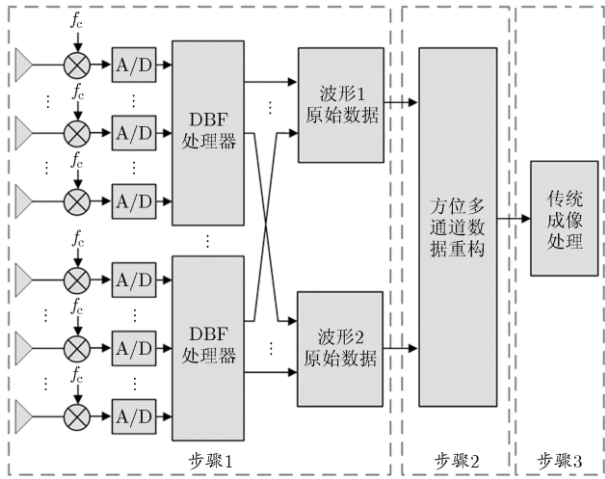


图 2 主要处理流程图

SAR 系统对地面场景回波的主要处理流程包含以下 3 个重要步骤：首先在卫星平台上利用 DBF 处理器对俯仰向各接收通道回波进行加权组合和波形分离处理；然后将分离得到的 2 个波形数据下载到地面雷达站，利用方位多通道数据重构算法对 2 个波形数据进行处理；最后对重构后的数据进行传统成像处理。本节将对处理方法进行详细阐述。

MIMO SAR 系统的 2 个 STSO 发射波形的信号模型表达式分别为：

$$s_1 t = \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \exp j\pi k_r t^2$$

$$\text{和 } s_2 t = \text{rect}\left(\frac{t + T_p/4}{T_p/2}\right) \exp j\pi k_r (t + T_p/2)^2 + \text{rect}\left(\frac{t - T_p/4}{T_p/2}\right) \exp j\pi k_r (t - T_p/2)^2$$

其中  $T_p$  表示脉冲时宽， $k_r$  表示调频率， $\text{rect } t$  表示范围在  $[-0.5, 0.5]$  的归一化矩形窗。这 2 个发射波形之间满足短偏移正交性质，即  $\int_{-\infty}^{\infty} \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \text{rect}\left(\frac{t + \Delta t}{T_p}\right) dt = 0, \forall \Delta t \in \mathbb{R}$ 。这意味着 2 个波形之间存在相互正交的时间间隔  $T_p/2$ ，在这个时间间隔内，两者之间的互相关积分为零。如果地面成像场景的回波时间范围小于半个脉冲时宽，2 个 STSO 波形将相互分离。但是，在实际情况下，星载 SAR 照射的地面场景远大于半个脉冲时宽对应的地距范围。考虑基于柱形抛物面天线的 MIMO SAR 系统能够在俯仰向形成足够窄的高增益波束，该系统的 STSO 波形分离处理的基本想法为：将整个宽测绘带成像场景的回波在俯仰向角度域分割成多个子测绘带的回波，并确保提取的子测绘带回波的角度范

围受限于  $T_p/2$  对应的角度范围，所提取的回波角度范围通过以下公式进行计算： $\theta(\tau) = \text{acos}\left(\frac{4 R_e + H_0^2 - 4R_e^2 + (c\tau)^2}{4c\tau R_e + H_0}\right)$ 。其中  $\theta$  表示目标星下点偏移角， $\tau$  表示目标回波时间， $R_e$  表示地球半径， $H_0$  表示轨道高度， $c$  表示光速。这意味着在实际处理中，需要在接收端对俯仰向各接收通道回波数据进行 DBF 处理，以确保形成的数字接收波束中心指向子测绘带中心。并且需要通过柱形抛物面天线的设计，确保提取的每个子测绘带回波受到数字接收波束方向图的幅度加权远大于 STSO 波形干扰信号对应的幅度加权，从而保证 STSO 波形的有效分离。

如图 1 右侧所示，MIMO SAR 系统第  $n$  个俯仰向接收通道接收到的地面场景回波  $r_n t$  的表达式为

$$r_n t = \int_{x_{\text{near}}}^{x_{\text{far}}} \sigma(x) A_n \theta(x) s_1 t - T_n(x) + s_2 t - T_n(x) \exp -j2\pi f_c T_n(x) dx$$

其中， $\sigma(x)$  表示目标后向散射系数， $x$  表示地距， $A_n(\theta(x))$  表示第  $n$  个俯仰向接收通道对应的俯仰向双程天线方向图， $T_n(x)$  表示目标到第  $n$  个俯仰向接收通道的双程时延， $f_c$  表示雷达载频。假设  $N_c$  为奇数，由于地面目标到星载 SAR 系统各俯仰向通道的距离差远小于 1 个分辨率单元，可对  $r_n t$  做如式(1)的近似：

$$r_n t = \int_{x_{\text{near}}}^{x_{\text{far}}} \sigma(x) A_n \theta(x) \left[ s_1 \left( t - \frac{T_{N_c+1}(x)}{2} \right) + s_2 \left( t - \frac{T_{N_c+1}(x)}{2} \right) \right] \exp -j2\pi f_c T_n(x) dx \quad (1)$$

考虑所有俯仰向接收通道的回波数据可得： $\mathbf{r} = [r_1(t) \ r_2(t) \ \dots \ r_{N_c}(t)]^T$ 。根据上述分析，需要对俯仰向各接收通道的回波数据进行 DBF 处理。由于每个俯仰向接收通道对应的俯仰向天线方向图的波束宽度较窄，因此在利用 DBF 提取子测绘带的回波数据时，需要比较各俯仰向天线方向图在子测绘带范围内的幅度值，然后选取  $N_c$  个在子测绘带范围内幅度值较大的俯仰向天线方向图来计算 DBF 加权矢量。假设采用俯仰向第  $n$  个到第  $n + N_c - 1$  个接收通道对应的俯仰向天线方向图来计算第  $m$  个子测绘带对应的 DBF 加权矢量，采用 MVDR(Minimum Variance Distortionless Response)方法<sup>[22]</sup>进行计算，得到：

$$\mathbf{w}_m = \frac{\mathbf{R}_n^{-1} \mathbf{a}_m}{\mathbf{a}_m^H \mathbf{R}_n^{-1} \mathbf{a}_m} \quad (2)$$

其中,  $\mathbf{w}_m$  表示第  $m$  个子测绘带对应的 DBF 加权矢量,  $\mathbf{R}_u$  表示由  $N_c$  个俯仰向接收通道回波数据计算得到的协方差矩阵,  $\mathbf{a}_m = [A_n \theta_m \ A_{n+1} \theta_m \ \cdots \ A_{n+N_c-1} \theta_m]^\top$  表示天线导向矢量, 其中  $\theta_m$  为第  $m$  个子测绘带中心的星下点偏移角。根据式(2)可计算得到第  $m$  个子测绘带的 DBF 处理结果:  $\bar{r}_m = \mathbf{w}_m^H \mathbf{r}_m$ , 其中  $\mathbf{r}_m = [r_n(t) \ r_{n+1}(t) \ \cdots \ r_{n+N_c-1}(t)]^\top$ 。分离提取第  $m$  个子测绘带回波数据中的 STSO 波形 1, 得到:

$$\bar{r}_{m-1} t = \mathcal{F}^{-1} \mathcal{F} \bar{r}_m t S_{MF} f \operatorname{rect}\left(\frac{t-t_m}{T_m}\right) \quad (3)$$

其中,  $\mathcal{F}\{\cdot\}$  和  $\mathcal{F}^{-1}\{\cdot\}$  分别表示傅里叶变换和傅里叶逆变换,  $S_{MF}$  表示 STSO 波形 1 的频域匹配滤波器。  $t_m$  表示第  $m$  个子测绘带中心的双程时延。  $T_m$  表示第  $m$  个子测绘带对应回波时间间隔。分离提取第  $m$

个子测绘带回波数据中的 STSO 波形 2, 得到:

$$\begin{aligned} \bar{r}_{m-2} t = & \mathcal{F}^{-1} \mathcal{F} \bar{r}_m t S_{MF} f \exp[-j\pi f T_p] \\ & + \exp[j\pi f T_p] \operatorname{rect}\left(\frac{t-t_m}{T_m}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

由于将整个宽测绘带回波分割成多个子测绘带回波分别进行 DBF 处理和波形分离处理, 这会导致 SAR 图像出现扇贝效应, 因此采用  $\bar{A}_m^{-1}$  对  $\bar{r}_{m-1} t$  和  $\bar{r}_{m-2} t$  进行幅度加权, 其中  $\bar{A}_m$  表示由 DBF 形成的数字波束方向图。重复以上步骤, 最终可得到从整个成像场景回波中分离提取出的两种 STSO 波形。

将分离提取出的两种波形数据下传至地面雷达站, 根据天线结构和脉冲重复周期将波形 1 和波形 2 对应的方位向等效相位中心进行组合, 如图 1 所示。由于方位向多通道数据通常是以不相等间隔排列的, 因此需要使用重构矩阵  $\bar{\mathbf{P}}_{f_{az}}$  对回波数据的重采样处理:

$$\bar{\mathbf{P}}_{f_{az}} = \begin{bmatrix} \bar{H}_1 f_{az} & \bar{H}_2 f_{az} & \cdots & \bar{H}_{2N_a-1} f_{az} \\ \bar{H}_1 f_{az} + \operatorname{PRF}_{\text{sys}} & \bar{H}_2 f_{az} + \operatorname{PRF}_{\text{sys}} & \cdots & \bar{H}_{2N_a-1} f_{az} + \operatorname{PRF}_{\text{sys}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{H}_1 f_{az} + 2N_a - 2 \operatorname{PRF}_{\text{sys}} & \bar{H}_2 f_{az} + 2N_a - 2 \operatorname{PRF}_{\text{sys}} & \cdots & \bar{H}_{2N_a-1} f_{az} + 2N_a - 2 \operatorname{PRF}_{\text{sys}} \end{bmatrix}^{-1} \quad (5)$$

$$\bar{H}_k f_{az} = \begin{cases} \exp\left(\frac{-j\pi}{2\lambda R_0} (k-1) l_a^2\right) \exp\left(\frac{j2\pi f_{az}}{2V_a} (k-1) l_a\right), & k = 1, 2, \dots, N_a \\ \exp\left(\frac{-j\pi}{2\lambda R_0} (2N_a - k - 1) l_a^2\right) \exp\left(\frac{j2\pi f_{az}}{2V_a} (k-1) l_a\right), & k = N_a + 1, \dots, 2N_a - 1 \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $l_a$  表示方位向接收通道的长度,  $\lambda$  表示波长,  $R_0$  表示目标到星载 SAR 的最短斜距,  $V_a$  表示平台速度。最后利用传统成像算法对方位多通道重构数据进行成像处理。

## 4 仿真实验

### 4.1 系统仿真

表 1 为该文设计的基于柱形抛物面天线的 MIMO SAR 的系统参数。当该系统发射脉冲信号时, 馈源阵列上的所有发射通道都激活并辐射电磁波, 俯仰向天线方向图的半功率波束宽度超过  $17.5^\circ$ , 能够覆盖 200 km 的测绘带宽。每个通道对应的方位向天线方向图的半功率波束宽度为  $1.1^\circ$ , 能够确保系统的方位向分辨率小于 1 m。接下来我们将通过对比基于平面相控阵天线的 MIMO SAR(该系统的天线高度为 1.53 m, 俯仰向通道数目为 17 个, 其他仿真参数如表 1 所示)来分析基于柱形抛物面天线的 MIMO SAR 的系统性能。图 3、图

4 中的实线和虚线分别对应基于柱形抛物面天线的 MIMO SAR 和基于平面相控阵天线的 MIMO SAR。图 3(a)、图 3(b)和图 3(c)分别为成像场景中最近端、中间和最远端子测绘带对应的俯仰向 DBF 波束方向图(基于柱形抛物面天线的 MIMO SAR 的俯仰向 DBF 波束方向图是采用各子测绘带对应的 5 个相邻俯仰向接收通道对应的俯仰向天线方向图和式 2 计算得到的)。可见, 对于基于平面相控阵天线的 MIMO SAR, 最近端和中间子测绘带的干扰信号都存在超过  $-15$  dB 的幅度加权, 这意味着干扰信号将不能被有效抑制, MIMO SAR 成像质量将受到较大影响。但是, 对于基于柱形抛物面天线的 MIMO SAR, 提取回波对应的方向图幅度加权都远大于干扰信号对应的方向图幅度加权, 因此能够确保在整个测绘带内 STSO 发射波形的有效分离, 并保证系统成像质量。图 4(a)和图 4(c)分别对应这两个系统的距离模糊比(RASR)和噪声等效后向散射系数(NESZ)。对比系统 RASR 可见, 基于平面相控阵天

表 1 系统仿真参数

轨道高度	500 km
卫星速度	7612 m/s
载频	9.65 GHz
视角范围	17.8° ~ 35.3°
柱形抛物面天线高度	6 m
柱形抛物面天线长度	10 m
焦距	4.2 m
馈源阵列高度	1.42 m
俯仰向通道数目	57
馈源阵列长度	7.1 m
方位向通道数目	5
脉冲宽度	140 μs
信号带宽	310 MHz
脉冲重复频率	1187 Hz
发射峰值功率	2 kW
系统温度	300 K
系统噪声系数与损耗	5.7 dB

线的 MIMO SAR 有接近 100 km 测绘带范围对应的 RASR 都大于 -17 dB, 因此系统距离模糊严重, 不能够满足星载 SAR 系统指标。而基于柱形抛物面天线的 MIMO SAR 的 RASR 值都小于 -17 dB, 并且

有超过 150 km 的测绘带范围对应的 RASR 值都小于 -40 dB, 因此更有利于 MIMO SAR 的成像。对比系统 NESZ 可见, 两个系统的 NESZ 值都小于 -20 dB, 都能够满足星载 SAR 系统指标, 但是基于柱形抛物面天线的 MIMO SAR 的 NESZ 值在整个测绘带内都优于基于平面相控阵天线的 MIMO SAR, 因此该系统探测弱目标的能力相对更强。图 4(b)为系统的方位模糊比(AASR)。由于这两个系统方位向的波束方向图以及天线参数相同, 因此系统 AASR 值都小于 -23 dB, 都能满足星载 SAR 系统的方位模糊指标。综上所述, 在天线尺寸基本相同的情况下, 基于柱形抛物面天线的 MIMO SAR 的系统性能相比于基于平面相控阵天线的 MIMO SAR 更优越, 因此成像质量更高。

### 4.2 点目标成像仿真

为了验证系统处理方法的有效性, 本节将对点目标进行成像仿真试验。图 5 为仿真场景示意图。假设所有点目标的回波幅度都被归一化处理, 每个接收通道的回波信号都加入高斯白噪声。对目标 4、目标 5 和目标 6 进行 1 维距离向成像仿真。图 6(a)为原始回波信号的实部, 图 6(b)为原始回波信号经过匹配滤波处理后的结果。由于存在 STSO 波形干扰, 3 个点目标的脉冲压缩结果相互重叠。对俯仰向接收通道回波信号进行 DBF 处理和波形分离处

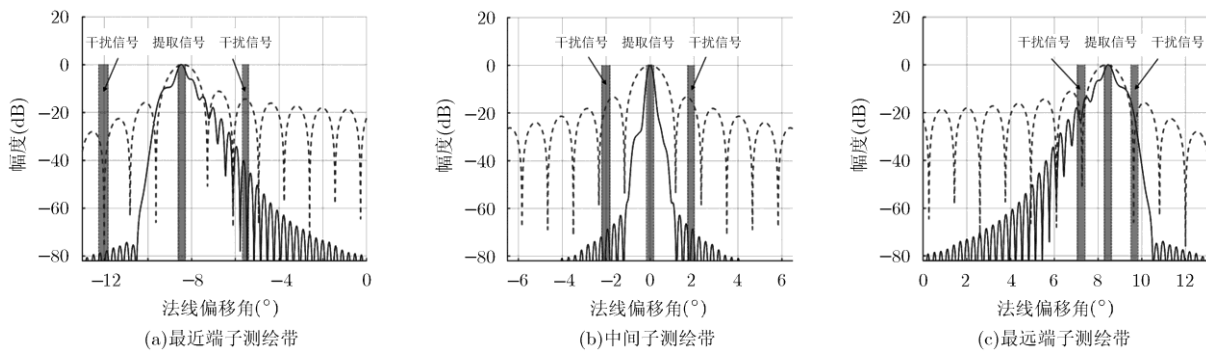


图 3 俯仰向 DBF 波束方向图

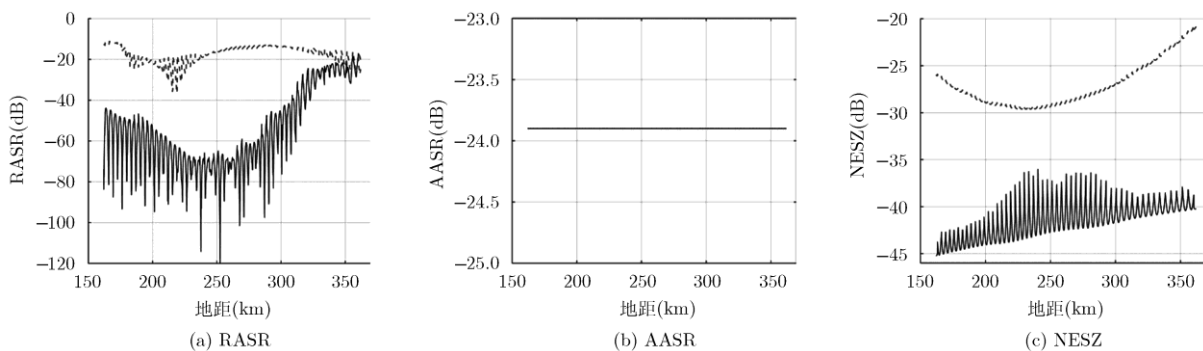


图 4 系统性能参数仿真结果

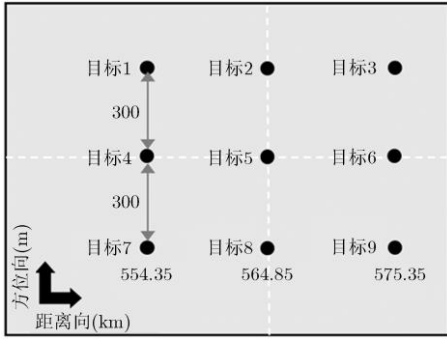


图 5 仿真场景示意图

理，图 6(c)和图 6(d)分别为分离提取的 STSO 波形 1 和 STSO 波形 2 的距离向脉冲压缩结果，可见波形干扰信号被明显抑制，3 个点目标能被清楚辨认。采用本文所提处理方法对图 5 中所有点目标进行 2 维成像仿真，得到的 2 维成像结果如图 6(e)所示，

可见点目标聚焦良好，这验证了该系统处理方法具有良好的成像性能。

### 4.3 分布目标成像仿真

本节将对分布目标进行成像仿真试验。在分布目标回波仿真时，目标的后向散射系数采用图 7(a)所示的 SAR 图像数据。对生成的回波信号直接进行传统成像处理，得到的结果如图 7(b)所示，可见 STSO 的波形干扰和方位向数据的非均匀采样导致生成的 SAR 图像出现鬼影目标和散焦现象，这严重影响了 SAR 图像的解译。采用本文所提处理方法对分布目标回波信号进行处理，得到的结果如图 7(c)所示，可见基于柱形抛物面天线的 MIMO SAR 系统能够有效实现 STSO 波形的成像，并具有良好的分布目标成像性能。

## 5 结束语

本文提出了一种基于柱形抛物面天线的 MIMO

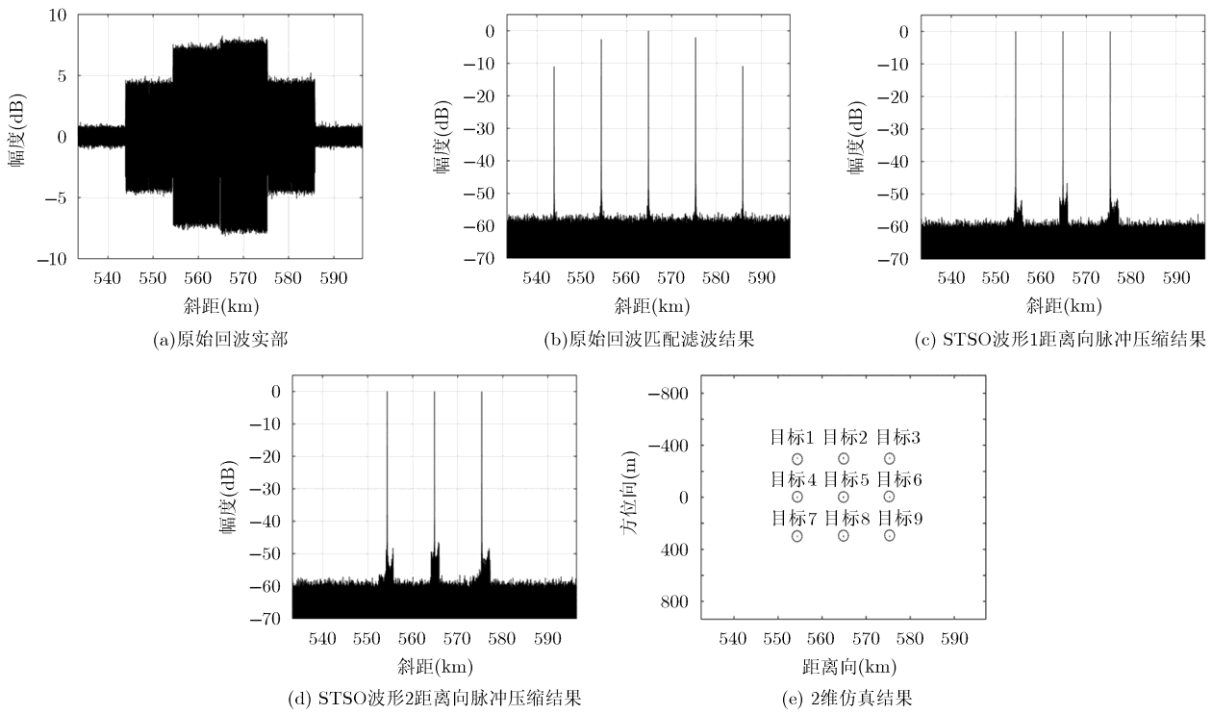


图 6 点目标仿真结果

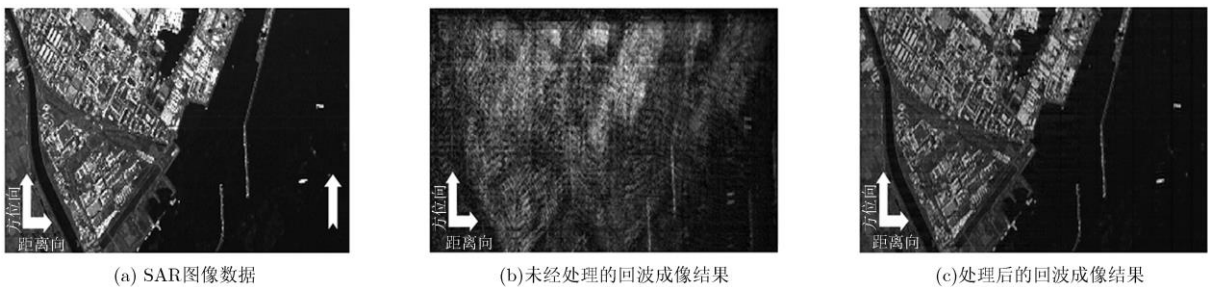


图 7 分布目标仿真结果

SAR 系统, 该系统利用柱形抛物面天线易于在俯仰向形成高增益窄波束的特性来有效分离短偏移正交发射波形, 并获取更多的方位向等效相位中心, 从而有利于实现 MIMO SAR 系统的高分辨率宽测绘带成像。本文详细分析了系统结构, 并阐述了具体的处理方法, 主要包含以下步骤: 首先对俯仰向各接收通道回波进行 DBF 处理和波形分离处理, 然后对分离提取的波形进行方位向多通道数据重构处理, 最后对重构数据进行传统成像处理。通过系统仿真以及点目标和分布目标的成像仿真结果可知, 本文所提系统能够确保 MIMO SAR 的成像质量, 并具有良好的成像性能。

### 参 考 文 献

- [1] CUMMING I and WONG F. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data Algorithms and Implementation[M]. Norwood, MA: Artech House, 2005: 3-15.
- [2] FREEMAN A, JOHNSON W, HUNEYCUTT B, *et al.* The "myth" of the minimum SAR antenna area constraint[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(1): 320-324. doi: 10.1109/36.823926.
- [3] SUESS M, GRAFMUELLER B, ZAHN R, *et al.* A novel high resolution, wide swath SAR system [C]. Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Sydney, 2001: 1013-1015.
- [4] MOREIRA A, KRIEGER G, HAJNSEK I, *et al.* Tandem-L: A highly innovative bistatic SAR mission for global observation of dynamic processes on the Earth's surface[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2015, 3(2): 8-23. doi: 10.1109/MGRS.2015.2437353.
- [5] RINCON R, FATOYINBO T, OSMANOGLU B, *et al.* Development of NASA's next generation L-band digital beamforming synthetic aperture radar (DBSAR-2)[C]. Proceedings of EUSAR 2016, Hamburg, Germany, 2016: 1251-1254.
- [6] HUBER S, VILLANO M, YOUNIS M, *et al.* Tandem-L: Design concepts for a next-generation Spaceborne SAR system[C]. Proceedings of EUSAR 2016, Hamburg, Germany, 2016: 1237-1241.
- [7] YOUNIS M, ALMEIDA F, LOPEZ-DEKKER P, *et al.* Techniques and modes for multi-channel SAR instruments [C]. Proceedings of EUSAR 2016, Hamburg, Germany, 2016: 812-817.
- [8] TRIDON D, BACHMANN M, ZAN F, *et al.* Tandem-L observation concept-contributions and challenges of systematic monitoring of earth system dynamics[C]. The 18th International Radar Symposium, Prague, Czech Republic, 2017: 1-9.
- [9] KRIEGER G, ROMMEL T, and MOREIRA A. MIMO-SAR tomography[C]. Proceedings of EUSAR 2016, Hamburg, Germany, 2016: 91-96.
- [10] LIU Feng, MU Shanxiang, LU Wanghan, *et al.* MIMO SAR waveform separation based on costas-LFM signal and co-arrays for maritime surveillance[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2017, 26(1): 211-217. doi: 10.1049/cje.2016.11.015.
- [11] YANG Dong, YANG Xi, TAN Xiaomin, *et al.* Ground moving target detection in MIMO-SAR system[C]. 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Beijing, China, 2016: 1062-1065.
- [12] KIM J, YOUNIS M, MOREIRA A, *et al.* Spaceborne MIMO synthetic aperture radar for multimodal operation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(5): 2453-2466. doi: 10.1109/TGRS.2014.2360148.
- [13] WANG Wenqin. MIMO SAR OFDM chirp waveform diversity design with random matrix modulation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(3): 1615-1625. doi: 10.1109/TGRS.2014.2346478.
- [14] WANG Jie, CHEN Longyong, LIANG Xingdong, *et al.* Implementation of the OFDM chirp waveform on MIMO SAR systems[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(9): 5218-5228. doi: 10.1109/TGRS.2015.2419271.
- [15] WANG Jie, LIANG Xingdong, CHEN Longyong, *et al.* A novel space-time coding scheme used for MIMO-SAR systems [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(7): 1556-1560. doi: 10.1109/LGRS.2015.2412961.
- [16] JING Guobin, XING Mengdao, CHEN Jianlai, *et al.* A novel digital beam-forming (DBF) method for multi-modes MIMO SAR[C]. 2016 CIE International Conference on Radar, Guangzhou, China, 2016: 1-5.
- [17] LI Taoyong, ZHANG Qun, WANG Kai, *et al.* A novel imaging method for airborne downward-looking 3D MIMO-SAR based on compressed sensing[C]. 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Beijing, China, 2016: 5027-5030.
- [18] LI Jian, STOICA P, and ZHENG Xiayu. Signal synthesis and receiver design for MIMO radar imaging[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(8): 3959-3968. doi: 10.1109/TSP.2008.923197.
- [19] KRIEGER G, GEBERT N, and MOREIRA A. Multidimensional waveform encoding: A new digital beamforming technique for synthetic aperture radar remote sensing[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(1): 31-46. doi: 10.1109/TGRS.2007.905974.
- [20] KRIEGER G, HUBER S, VILLANO M, *et al.* SIMO and MIMO system architectures and modes for high-resolution ultra-wide-swath SAR imaging[C]. Proceedings of EUSAR 2016, Hamburg, Germany, 2016: 187-192.
- [21] KRIEGER G. MIMO-SAR: Opportunities and pitfalls[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(5): 2628-2645. doi: 10.1109/TGRS.2013.2263934.
- [22] VAN T H L. Optimum Array Processing Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory[M]. New York: John Wiley & Sons, 2002: 428-669.

叶 恺: 男, 1988 年生, 博士生, 研究方向为新体制星载 SAR 系统设计和信号处理。  
 禹卫东: 男, 1969 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为合成孔径雷达系统设计和信号处理。  
 徐 伟: 男, 1983 年生, 副研究员, 硕士生导师, 研究方向为合成孔径雷达系统设计和信号处理。  
 王 伟: 男, 1985 年生, 博士生, 研究方向为新体制星载 SAR 系统设计和信号处理。