

## 一种双基星载 MIMO SAR 系统体制与处理方法

叶 恺<sup>\*①②</sup> 禹卫东<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:** 双基星载合成孔径雷达(SAR)利用双平台接收以及联合处理回波信号,在测绘、干涉测量、目标识别、自然灾害监测等领域有重要的应用价值。为了进一步提升该体制的成像性能,该文提出一种采用空时编码和短偏移正交波形的双基星载多发多收合成孔径雷达系统(MIMO SAR)。基于接收端的数字波束形成技术,该系统能够有效分离提取不同波形回波数据,获取更多空间自由度,从而同时具备双基体制和 MIMO 体制的优势。此外,通过对获取的不同波形图像数据做波束形成处理,该系统能够减轻 2 次散射干扰回波对 SAR 图像的影响。仿真实验验证了该系统方案的有效性。

**关键词:** 合成孔径雷达; 多发多收; 双基; 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(2017)11-2697-08

DOI: 10.11999/JEIT170149

## Investigation on System Scheme and Processing Approach for Bistatic Spaceborne MIMO SAR

YE Kai<sup>①②</sup> YU Weidong<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:** Benefiting from the combined processing of echo signals received on spatially separated platforms, bistatic spaceborne SAR has many valuable applications such as survey, interferometry, target recognition and classification, disaster monitoring, etc. In order to improve the imaging performance further, this paper presents a bistatic spaceborne Multiple-Input Multiple-Output SAR (MIMO SAR) system combined with Space-Time Coding (STC) and Short-Term Shift-Orthogonal (STSO) chirp waveforms. With the help of digital beamforming techniques on receive, different transmitting waveforms can be separated and extracted from mixed echoes, so that such enhanced architecture can achieve the advantages of both bistatic and MIMO configuration from more spatial degrees of freedom. Furthermore, it offers an opportunity for mitigating the influences of double-bounce scattering by using beamforming on multiple SAR images. The theoretical analysis is derived in detail, then validated by simulation experiments.

**Key words:** SAR; Multiple-Input Multiple-Output (MIMO); Bistatic; Digital Beam Forming (DBF)

### 1 引言

双基星载合成孔径雷达(SAR)利用双平台发射、接收信号,能够同时获取不同视角的观测数据,在测绘、干涉测量、地面目标识别、自然灾害监测等领域<sup>[1-3]</sup>具有重要的应用价值。但是当前的双基体制受限于传统单通道 SAR 系统的成像能力,不能同时获取方位向高分辨率和距离向宽测绘带的 SAR 图像。随着多通道技术的发展和数字波束形成技术(DBF)的应用,下一代的双基星载 SAR 系统如 Tandem-L 将显著改善 SAR 图像的质量<sup>[4,5]</sup>。为了进

一步提升成像性能,在 SAR 系统设计中引入多发多收(MIMO)体制<sup>[6-11]</sup>成为未来新体制 SAR 发展方向上的研究热点。MIMO SAR 发射多个正交波形照射地面场景,利用所有天线接收回波并分离发射波形,能够获得最大化的空间自由度。从而具有潜力实现很多先进的成像模式<sup>[12]</sup>,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 是未来遥感应用中能够满足用户需求的理想解决方案。

当前 MIMO SAR 系统所面临的主要挑战包括以下两个方面,合适的正交发射波形的设计以及相应的回波信号分离方法。根据 Krieger 在文献[13]中的分析,对分布目标场景成像时,不完全正交的发

射波形之间的互相关积分能量将会分散开, 导致 SAR 图像出现模糊效应。而对于完全正交波形, 因为所占据的频谱相互分离, 波形之间相干性很差, 不利于实现 MIMO SAR 的应用价值。因此, 设计占据相同频谱范围并能够有效分离的发射波形是实现 MIMO SAR 系统的基本要求。近年来, 许多有潜力的研究成果被提出和发展。由 Kim 等人<sup>[14,15]</sup>提出的正交频分复用(OFDM)波形利用相互正交的子载频, 能够确保波形之间的零互相关, 但是如何减轻多普勒偏移的影响是一个需要仔细研究的课题。Alamouti 波形<sup>[16,17]</sup>利用发射信号组合成的编码矩阵能够有效分离回波并获得高信噪比数据, 但是如何保持稳定的通道响应是研究难点。考虑双基星载 SAR 成像的几何模型, 本文提出一种采用空时编码(STC)<sup>[18]</sup>和短偏移正交(STSO)<sup>[13]</sup>波形相结合的发射体制。根据对发射波形信号模型的分析, 提出采用多波束 DBF 技术来分离回波, 相应的接收回波信号模型和处理方案将详细推导。比较获取的各个波形图像数据可知, 双基星载 MIMO SAR 相比于传统双基系统能够在俯仰向获取额外的等效相位中心, 通过对不同波形图像数据进行波束形成处理, 该体制能够减轻 2 次散射干扰回波对 SAR 图像的影响。仿真实验将验证该系统方案的有效性。

## 2 双基星载 MIMO SAR 的波形方案

### 2.1 短偏移正交波形

短偏移正交波形是由相互循环时移的线性调频信号组成, 两波形的信号模型表达式为

$$s_{b1}(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \exp(j\pi k_r t^2) \quad (1)$$

$$s_{b2}(t) = \text{rect}\left(\frac{t + T_p/4}{T_p/2}\right) \exp(j\pi k_r (t + T_p/2)^2) + \text{rect}\left(\frac{t - T_p/4}{T_p/2}\right) \exp(j\pi k_r (t + T_p/2)^2) \quad (2)$$

其中,  $T_p$  为脉冲时宽,  $k_r$  为调频率,  $\text{rect}(t)$  表示范围在  $[-0.5, 0.5]$  的归一化矩形窗。根据式(1)和式(2)可知, 这类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, 由于两波形的瞬时频率偏移很大, 它们之间满足短偏移正交性质:  $\int \text{rect}\left(\frac{\Delta t}{T_p/2}\right) s_{b1}^*(t) s_{b2}(t + \Delta t) dt = 0, \forall \Delta t \in \mathbb{R}$ 。这意味着在时间间隔  $T_p/2$  内, 两波形之间的互相关积分为零, 保持相互正交。如果地面场景对应的时间范围小于半个脉冲

宽度, 不同波形对应的接收回波将保持相互正交, 距离向脉冲压缩结果将在时域上相互分离。但是通常星载 SAR 照射的地面场景远大于半个脉冲宽度对应的范围, 因此可以利用多波束 DBF 技术将整个场景的回波在角度域进行分割, 确保提取的回波的角度范围受限于  $T_p/2$  对应的角度范围。

### 2.2 双基星载 MIMO SAR 的发射信号模型

双基星载 MIMO SAR 系统的几何模型如图 1 所示。MIMO SAR 1 和 MIMO SAR 2 分别发射信号照射相同地面场景, 在远场条件下, 假设场景中的任意点目标到两个卫星平台的距离满足:

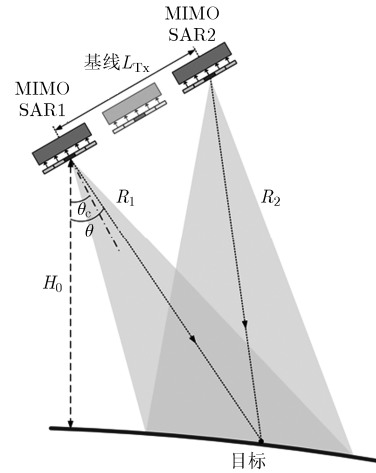


图 1 双基星载 MIMO SAR 几何模型

$$R_2 \approx R_1 - L_{Tx} \sin(\theta - \theta_c) \quad (3)$$

其中,  $R_1 = \sqrt{(R_E + H_0)^2 + R_E^2 - 2R_E(R_E + H_0)\cos(\gamma)}$ ,  $\gamma = \theta + \arcsin\left(\frac{(R_E + H_0)\sin\theta}{R_E}\right)$ 。  $R_1$  和  $R_2$  分别为目标到 MIMO SAR 1 和 MIMO SAR 2 的距离,  $L_{Tx}$  为两个平台之间的基线,  $\theta$  为目标的下视角,  $\theta_c$  为天线法线的下视角,  $R_E$  为地球半径,  $H_0$  表示 MIMO SAR 1 的轨道高度。为了满足式(3)的近似关系, 需要确保场景中任意目标到 MIMO SAR 2 的距离与该近似值之差不超过  $\rho_r/2$ , 即

$\left| R_1 - L_{Tx} \sin(\theta - \theta_c) - \sqrt{R_1^2 + L_{Tx}^2 - 2R_1 L_{Tx} \sin(\theta - \theta_c)} \right| \ll \rho_r/2$ , 其中  $\rho_r$  表示距离向分辨率。

由于卫星平台之间的基线通常很大, 由式(3)可知两个 SAR 系统接收同一目标回波会存在时间差, 因此空时编码波形是双基 MIMO SAR 体制的适合发射波形。考虑每个 MIMO SAR 系统的天线尺寸相对于回波双程路径非常小, 同一目标回波到达天线俯仰向各子孔径的时间差远小于距离向时间分辨

率，因此每个 MIMO SAR 系统适合采用具有同时发射特性的短偏移正交波形。图 2 为 MIMO SAR 1 和 MIMO SAR 2 的天线结构示意图，该天线在方位向有  $N_a$  个通道，在距离向有  $N_c$  个通道，其中黑色部分表示发射通道。对于 MIMO SAR 1，方位向发射通道 1 和  $N_a$  同时发射 STSO 波形 1 和波形 2，分别表示为  $s_1(t) = \exp(j2\pi f_0 t) \cdot s_{b1}(t)$ ,  $s_2(t) = \exp(j2\pi f_0 t) \cdot s_{b2}(t)$ 。对于 MIMO SAR 2，方位向发射通道 1 和  $N_a$  将延迟时间间隔  $T_d$  发射 STSO 波形 3 和波形 4，分别表示为  $s_3(t) = s_1(t - T_d)$ ,  $s_4(t) = s_2(t - T_d)$ 。根据 2.1 节的讨论可知，STSO 波形保持相互正交的条件是回波时间范围小于  $T_p/2$ 。如图 3 所示，当满足该条件时，波形 1 与波形 2 的距离向脉冲压缩结果相互分离，并且这两个波形脉冲压缩数据占据了  $3T_p/2$  的时间范围。同样，波形 3 和波形 4 的距离向脉冲压缩结果也相互分离并占据  $3T_p/2$  的时间范围。为了确保系统能够有效分离提取各波形，首先需要保证波形 1、波形 2 和波形 3、波形 4 的发射间隔  $T_d$  大于  $3T_p/2$ ，然后采用多波束 DBF 技术分割提取小于  $T_p/2$  对应角度范围的回波。此时，将提取回波进行匹配滤波处理后，MIMO SAR 1 的发射波形 1、波形 2 的距离向脉冲压缩结果将和 MIMO SAR 2 的发射波形 3、波形 4 的距离向脉冲压缩结果相互分离，分别提取后，基于短偏移正交性可将两个系统的 STSO 波形分离，最终获得 4 个波形的回波数据。

### 3 双基星载 MIMO SAR 的回波模型和处理流程

如图 1 所示，MIMO SAR 1 接收到的点目标回波信号  $r_1(t)$  由两部分组成：MIMO SAR 1 照射点目标的回波  $r_{11}(t)$  和 MIMO SAR 2 照射点目标的回波  $r_{21}(t)$ 。去载频处理后，回波模型可表示为

$$r_1(t) = r_{11}(t) + r_{21}(t) \quad (4)$$

$$r_{11}(t) = A_{2way}(\theta)\sigma(\theta)\exp\left[-j\frac{4\pi R_1}{\lambda}\right] \cdot \left[s_{b1}\left(t - \frac{2R_1}{c}\right) + s_{b2}\left(t - \frac{2R_1}{c}\right)\right] \cdot v(\theta) \quad (5)$$

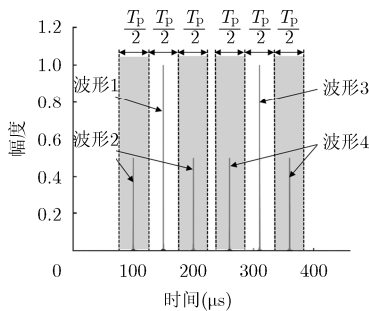


图 3 MIMO SAR 系统接收的点目标回波距离向脉冲结果

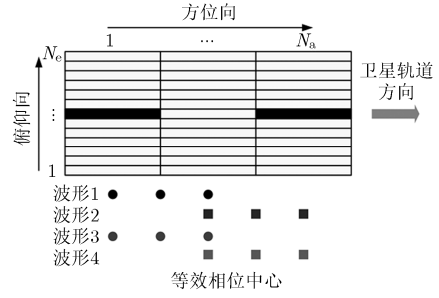


图 2 MIMO SAR 天线结构示意图

$$r_{21}(t) = A_{2way}(\theta)\sigma(\theta)\exp\left[j\frac{2\pi L_{Tx}\sin(\theta - \theta_c)}{\lambda}\right] \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi R_1}{\lambda}\right]\exp(-j2\pi f_0 T_d) \cdot \left[s_{b1}\left(t - T_d - \frac{2R_1 - L_{Tx}\sin(\theta - \theta_c)}{c}\right) + s_{b2}\left(t - T_d - \frac{2R_1 - L_{Tx}\sin(\theta - \theta_c)}{c}\right)\right] \cdot v(\theta) \quad (6)$$

其中， $v(\theta) = [\exp(j(1 - n_0)\psi) \cdots \exp(j(n - n_0)\psi) \cdots \exp(j(N_c - n_0)\psi)]^T, n=1, 2, \dots, N_c, \psi = \frac{2\pi h_t \sin(\theta - \theta_c)}{\lambda}$ 。

$v(\theta)$  表示与接收端 DBF 密切相关的导向矢量， $n_0$  表示俯仰向子孔径的参考通道数， $h_t$  表示天线子孔径高度， $A_{2way}(\theta)$  表示由双程方向图引起的幅度变化， $\sigma(\theta)$  表示目标的后向散射系数， $c$  表示光速。根据 2.2 节的分析，采用 DBF 技术提取角度范围小于  $T_p/2$  对应的地面场景回波，得到的处理结果为  $\bar{r}_1(t) = w^H \cdot r_1(t)$ ，其中  $w$  表示  $N_c \times 1$  的加权矢量。

由于在实际情况中，形成如同理想矩形窗的窄波束来提取回波是不可实现的，因此需要利用最优阵列处理的算法来进行逼近处理，例如采用 Dolph-Chebyshev 合成技术<sup>[19]</sup>。图 4 是根据表 1 参数计算得到的 Dolph-Chebyshev 方向图，其中所提取信号对应 3 dB 角度范围的金色区域，干扰信号对应灰色区域。对比这两块区域可见，提取信号对应的方向图幅度超过干扰信号对应的方向图幅度 24 dB 以上，能够确保 STSO 波形的干扰信号对所提取回波

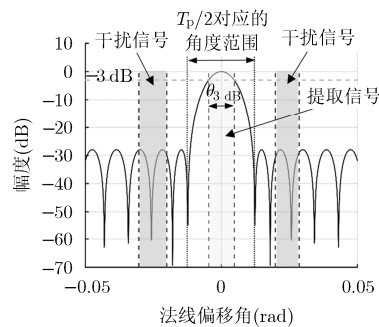


图 4 DBF 形成的接收波束示意图

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	21° -30°
测绘带宽	100 km
信号带宽	75 MHz
脉冲宽度	100 μs
天线高度	3.5 m
俯仰向子孔径数目	25
天线长度	12 m
方位向子孔径数目	3
脉冲重复频率	913 Hz

的影响足够小。对 DBF 处理结果  $\bar{r}_1(t)$  进行匹配滤波可得

$$\bar{r}_1(t) = \bar{r}_{11}(t) + \bar{r}_{21}(t) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \bar{r}_{11}(t) = & A_w(\theta)A_{2\text{way}}(\theta)\sigma(\theta)\exp\left[-j\frac{4\pi R_1}{\lambda}\right] \\ & \cdot \left[ \bar{s}_{b1}\left(t - \frac{2R_1}{c}\right) + \bar{s}_{b2}\left(t - \frac{2R_1}{c}\right) \right] \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \bar{r}_{21}(t) = & \exp\left[j\frac{2\pi L_{\text{Tx}} \sin(\theta - \theta_c)}{\lambda}\right] A_w(\theta)A_{2\text{way}}(\theta)\sigma(\theta) \\ & \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi R_1}{\lambda}\right] \exp(-j2\pi f_0 T_d) \\ & \cdot \left[ \bar{s}_{b1}\left(t - T_d - \frac{2R_1 - L_{\text{Tx}} \sin(\theta - \theta_c)}{c}\right) \right. \\ & \left. + \bar{s}_{b2}\left(t - T_d - \frac{2R_1 - L_{\text{Tx}} \sin(\theta - \theta_c)}{c}\right) \right] \end{aligned} \quad (9)$$

其中,  $A_w(\theta) = \mathbf{w}^H \cdot \mathbf{v}(\theta)$ ,  $\bar{s}_{b1}(t) = \sqrt{|k_r|} T_p \text{sinc}(k_r T_p t)$ ,

$$\begin{aligned} \bar{s}_{b2}(t) = & \frac{\sqrt{|k_r|} T_p}{2} \left\{ \text{sinc}\left(\frac{k_r T_p}{2} \left(t + \frac{T_p}{2}\right)\right) \exp\left[j\frac{\pi k_r T_p}{2} \left(t + \frac{T_p}{2}\right)\right] \right. \\ & \left. + \text{sinc}\left(\frac{k_r T_p}{2} \left(t - \frac{T_p}{2}\right)\right) \exp\left[-j\frac{\pi k_r T_p}{2} \left(t - \frac{T_p}{2}\right)\right] \right\} \circ \bar{r}_{11}(t) \end{aligned}$$

和  $\bar{r}_{21}(t)$  分别表示 MIMO SAR 1 接收到的来自于波形 1、波形 2 和波形 3、波形 4 的回波的距离向脉冲压缩结果。对比  $\bar{r}_{11}(t)$  和  $\bar{r}_{21}(t)$  的表达式可见, 除了常数相位  $\exp(-j2\pi f_0 T_d)$  外,  $\bar{r}_{21}(t)$  的距离向脉冲压缩峰值相比  $\bar{r}_{11}(t)$  整体延迟了  $\left(T_d - \frac{L_{\text{Tx}} \sin(\theta - \theta_c)}{c}\right)$ , 而

且还存在额外的相位项  $\exp\left[j\frac{2\pi L_{\text{Tx}} \sin(\theta - \theta_c)}{\lambda}\right]$ , 该相位项取决于两颗卫星之间的基线以及目标的下视

角。假设本节所分析的点目标位于 DBF 形成的窄波束中心, 对 MIMO SAR 1 接收到的各个波形的回波压缩数据进行分离处理, 可得:

$$\bar{r}_{s11}(t) = \text{rect}\left(\frac{t - 2R_1/c}{T_{\text{HP1}}/2}\right) \bar{r}_{11}(t) \quad (10)$$

$$\bar{r}_{s21}(t) = \text{rect}\left(\frac{t - 2R_1/c}{T_{\text{HP1}}/2}\right) \left[ \bar{r}_{11}\left(t + \frac{T_p}{2}\right) + \bar{r}_{11}\left(t - \frac{T_p}{2}\right) \right] \quad (11)$$

$$\bar{r}_{s31}(t) = \text{rect}\left(\frac{t - 2R_1/c}{T_{\text{HP1}}/2}\right) \bar{r}_{21}\left(t + T_d - \frac{L_{\text{Tx}} \sin(\theta - \theta_c)}{c}\right) \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \bar{r}_{s41}(t) = & \text{rect}\left(\frac{t - 2R_1/c}{T_{\text{HP1}}/2}\right) \\ & \cdot \left[ \bar{r}_{21}\left(t + \frac{T_p}{2} + T_d - \frac{L_{\text{Tx}} \sin(\theta - \theta_c)}{c}\right) \right. \\ & \left. + \bar{r}_{21}\left(t - \frac{T_p}{2} + T_d - \frac{L_{\text{Tx}} \sin(\theta - \theta_c)}{c}\right) \right] \end{aligned} \quad (13)$$

其中,  $\bar{r}_{s11}(t)$ ,  $\bar{r}_{s21}(t)$ ,  $\bar{r}_{s31}(t)$  和  $\bar{r}_{s41}(t)$  分别表示 MIMO SAR 1 获取的波形 1、波形 2、波形 3 和波形 4 回波的压缩结果。 $T_{\text{HP1}}$  为 MIMO SAR 1 接收窄波束 3 dB 角度范围对应的时间范围。如图 2 所示, 根据方位向发射通道位置和式(10)、式(11), 在一个脉冲重复周期(PRT)内, 分离后的波形 1 和波形 2 可以组合获取最多  $2N_a - 1$  个等效相位中心。同样, 根据式(12)、式(13), 波形 3 和波形 4 也可以组合获取最多  $2N_a - 1$  个等效相位中心。由于等效相位中心数目的增加, 在系统设计中脉冲重复频率的限制得到降低, 因此 MIMO SAR 1 可以同时获取两幅高分辨率宽幅 SAR 图像数据。成像处理的基本步骤为: 在整个合成孔径时间内, 对每个脉冲重复周期接收到的回波信号进行上述分离处理, 将分离开的 4 种波形脉冲压缩结果还原为原始回波数据, 然后对波形 1、波形 2 和波形 3、波形 4 分别在方位向进行等效相位中心组合以及多普勒频谱重构<sup>[20]</sup>, 最后利用传统的 SAR 成像算法进行成像处理。

对于 MIMO SAR 2, DBF 处理后的距离向脉冲压缩数据  $\bar{r}_2(t)$  可表示为

$$\bar{r}_2(t) = \bar{r}_{12}(t) + \bar{r}_{22}(t) \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \bar{r}_{12}(t) = & \exp\left[j\frac{2\pi L_{\text{Tx}} \sin(\theta - \theta_c)}{\lambda}\right] A_w(\theta)A_{2\text{way}}(\theta) \\ & \cdot \sigma(\theta) \exp\left[-j\frac{4\pi R_1}{\lambda}\right] \\ & \cdot \left[ \bar{s}_{b1}\left(t - \frac{2R_1 - L_{\text{Tx}} \sin(\theta - \theta_c)}{c}\right) \right. \\ & \left. + \bar{s}_{b2}\left(t - \frac{2R_1 - L_{\text{Tx}} \sin(\theta - \theta_c)}{c}\right) \right] \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \bar{r}_{22}(t) = & \exp\left\{j\frac{4\pi L_{Tx} \sin(\theta - \theta_c)}{\lambda}\right\} A_w(\theta) A_{2way}(\theta) \\ & \cdot \sigma(\theta) \exp\left(-j\frac{4\pi R_1}{\lambda}\right) \exp(-j2\pi f_0 T_d) \\ & \cdot \left[ \bar{s}_{b1} \left( t - T_d - \frac{2R_1 - 2L_{Tx} \sin(\theta - \theta_c)}{c} \right) \right. \\ & \left. + \bar{s}_{b2} \left( t - T_d - \frac{2R_1 - 2L_{Tx} \sin(\theta - \theta_c)}{c} \right) \right] \end{aligned} \quad (16)$$

其中,  $\bar{r}_{12}(t)$  和  $\bar{r}_{22}(t)$  分别表示 MIMO SAR 2 接收到的来自于波形 1、波形 2 和波形 3、波形 4 的回波的距离向脉冲压缩结果。将  $\bar{r}_{12}(t)$  和  $\bar{r}_{22}(t)$  的表达式与  $\bar{r}_{11}(t)$  对比可见, 除了常数相位项外,  $\bar{r}_{12}(t)$  的距离压缩结果整体延迟了  $\frac{-L_{Tx} \sin(\theta - \theta_c)}{c}$ , 并存在额外相位项  $\exp\left\{j\frac{2\pi L_{Tx} \sin(\theta - \theta_c)}{\lambda}\right\}$ , 而  $\bar{r}_{22}(t)$  的距离压缩结果整体延迟了  $\left(T_d - \frac{2L_{Tx} \sin(\theta - \theta_c)}{c}\right)$ , 并存在额外相位项  $\exp\left\{j\frac{4\pi L_{Tx} \sin(\theta - \theta_c)}{\lambda}\right\}$ 。与 MIMO SAR 1 的处理方案相同, 对 DBF 提取回波的压缩结果进行波形分离处理, 然后将波形 1、波形 2 和波形 3、波形 4 分别进行方位向频谱重构, 最后通过传统成像算法获得两幅高分辨率宽幅 SAR 图像。

定义在 MIMO SAR 1 中由波形 1、波形 2 组合成像得到的 SAR 图像为  $I_{11}$ , 由波形 3、波形 4 组合成像得到的 SAR 图像为  $I_{21}$ 。定义在 MIMO SAR 2 中由波形 1 和波形 2 组合成像得到的 SAR 图像为  $I_{12}$ , 由波形 3 和波形 4 组合成像得到的 SAR 图像为  $I_{22}$ 。根据上述分析, 对比 4 幅图像可见,  $I_{21}$  和  $I_{12}$  相比  $I_{11}$  存在额外的相位项  $\exp\left\{j\frac{2\pi L_{Tx} \sin(\theta - \theta_c)}{\lambda}\right\}$ ,  $I_{22}$  相比  $I_{11}$  存在额外的相位项  $\exp\left\{j\frac{4\pi L_{Tx} \sin(\theta - \theta_c)}{\lambda}\right\}$ , 将  $I_{11}$ ,  $I_{12}$  和  $I_{22}$  进行组合可

$$\text{得到} \begin{bmatrix} I_{11} \\ I_{12} \\ I_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \exp\left\{j\frac{2\pi L_{Tx} \sin(\theta - \theta_c)}{\lambda}\right\} \\ \exp\left\{j\frac{4\pi L_{Tx} \sin(\theta - \theta_c)}{\lambda}\right\} \end{bmatrix} \cdot I_{11}。 \text{这等效于}$$

在基线方向上存在间距为  $L_{Tx}$  的 3 阵元天线阵列的接收信号, 该等式右边第 1 项为相应的导向矢量。

由于基线  $L_{Tx}$  通常很大, 该等效阵列能够形成非常窄的接收波束, 同时由于阵元间距为  $L_{Tx}$ , 该阵列合成波束会存在严重的栅瓣影响。假如想要获取的目标信号处在波束主瓣或栅瓣范围内, 而干扰目标信号处于旁瓣范围内, 那么该等效阵列就能够利用 DBF 零陷方法对干扰信号进行抑制。考虑某些人造目标的场景, 如图 5 所示, 由于该建筑物类似直角反射器, 雷达照射到地面或墙体表面的电磁波将发生 2 次散射, 当 2 次散射回波信号的传播路径长度与目标 2 的回波信号的双程路径相等时, 这两种回波信号能量将相互混叠, 导致在 SAR 图像中无法真实反映目标 2 的后向散射系数, 并且 2 次散射回波对应的下视角和目标下视角相差很小, 只有依赖很窄的波束才能分离提取出目标回波。而双基星载 MIMO SAR 系统具备形成足够窄波束的能力, 因此能够针对某些特定场景减轻 2 次散射效应对 SAR 图像的影响。图 6 为具体的处理流程图。

#### 4 仿真试验

本节将通过一个 X 波段双基星载 MIMO SAR 系统来验证本文提出的处理方案。表 1 为相应的系统参数。MIMO SAR 1 和 MIMO SAR 2 采用相同的系统仿真参数, 平台之间的基线长度为 1 km, 其发射模式为: MIMO SAR 1 同时发射 STSO 波形 1 和波形 2, 间隔  $160\mu\text{s}$  后, MIMO SAR 2 同时发射 STSO 波形 3 和波形 4。图 5 为仿真场景示意图, 目标  $P_1$ ,  $P_2$  和  $P_3$  的斜距分别为 561.72 km, 562.32 km 和 562.92 km, 下视角分别为  $26.0244^\circ$ ,  $26.1380^\circ$  和  $26.2508^\circ$ 。目标  $P_2$  为直角反射面的交叉点, 其回波与 2 次散射的回波发生重叠, 假设两个 2 次散射回波角度分别为  $26.1373^\circ$  和  $26.1387^\circ$ , 这与目标  $P_2$  回波角度的间隔为  $\pm 0.0007^\circ$ 。在仿真试验中将 3 个点目标的回波幅度和两个 2 次散射回波幅度分别归

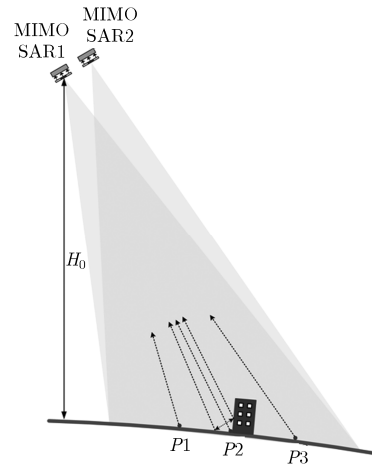


图 5 仿真试验场景示意图

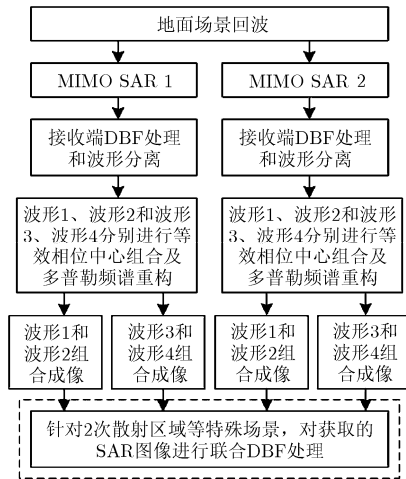


图6 处理流程图

一化。图7(a)和图8(a)分别为MIMO SAR 1和MIMO SAR 2接收回波经过接收端DBF处理后的距离向脉冲压缩结果。可以看出,两个MIMO SAR系统接收的回波由4种波形混合而成,波形1、波形2的压缩结果和波形3、波形4的压缩结果在时域相互分离。采用本文处理方案进行波形分离,MIMO SAR 1和MIMO SAR 2分别可获得4种波形的距离向脉冲压缩结果,根据上节分析,波形1和波形2的距离向脉冲压缩结果幅度图相同,波形3和波形4的距离向脉冲压缩结果幅度图相同。图7(b)和图8(b)分别为MIMO SAR 1和MIMO SAR 2

分离提取的波形1的脉冲压缩结果,图7(c)和图8(c)分别为MIMO SAR 1和MIMO SAR 2分离提取的波形3的脉冲压缩结果。可以看出,目标 $P_1$ 和 $P_3$ 的各个波形压缩结果幅度保持相同,而目标 $P_2$ 的压缩结果受到2次散射回波影响出现明显起伏。针对目标 $P_2$ 区域,联合MIMO SAR 1的波形1、波形3的压缩数据和MIMO SAR 2的波形3的压缩数据进行DBF处理,得到如图9(a)和图9(b)所示结果。对比目标 $P_1$ 和 $P_3$ 的压缩结果可见,2次散射回波对目标 $P_2$ 压缩结果的影响得到明显抑制。根据图6的处理方法对这3个点目标进行2维成像仿真试验,最终得到消除2次散射效应的SAR图像,图10(a)和图10(b)分别对应处理结果的3维幅度图和2维等高线图。可见,本文所提双基MIMO SAR的处理方案不仅能够有效进行回波分离,而且能够减轻2次散射干扰回波对SAR图像的影响。

## 5 结束语

本文提出了一种双基星载MIMO SAR的系统方案,该方案采用空时编码波形和短偏移正交波形相结合的发射波形,相应的信号模型和发射模式被详细阐述。本文还具体分析和推导了两个MIMO SAR系统的接收回波信号模型,并给出具体的分离方法和处理流程图。根据对双基MIMO SAR系统获取的4幅SAR图像数据的分析,该系统能够利用获取的SAR图像进行联合DBF处理,减轻2次散射干扰回波对SAR图像数据的影响。仿真结果验证

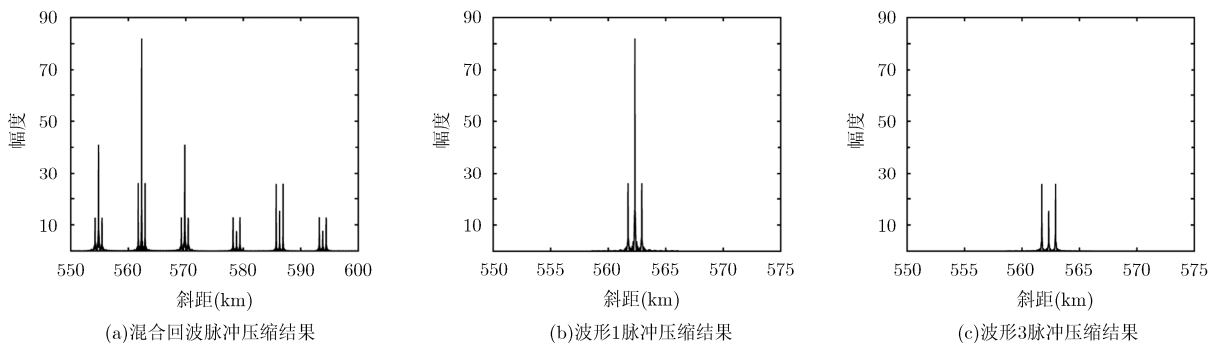


图7 MIMO SAR 1接收回波的脉冲压缩结果

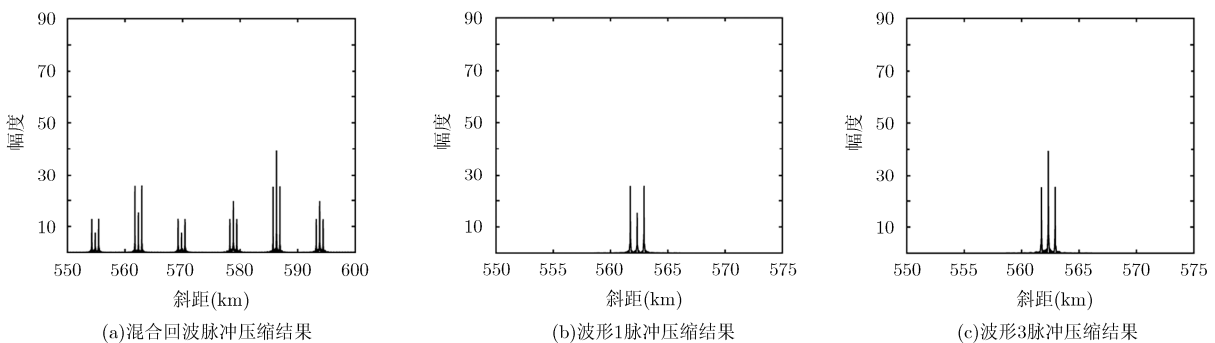


图8 MIMO SAR 2接收回波的脉冲压缩结果

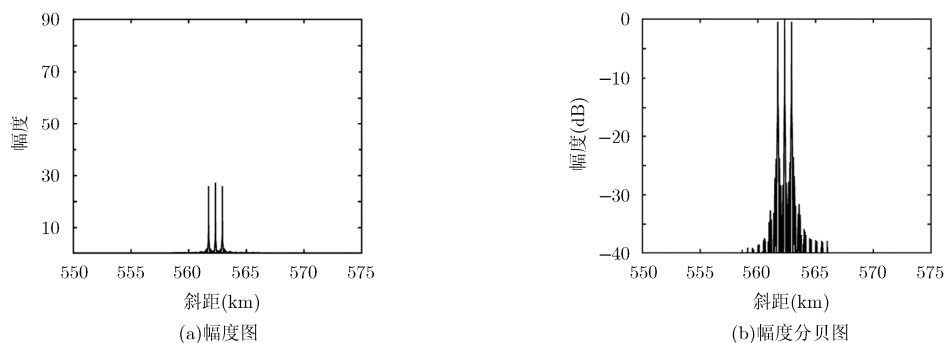


图 9 MIMO SAR 1 和 MIMO SAR 2 联合 DBF 处理结果

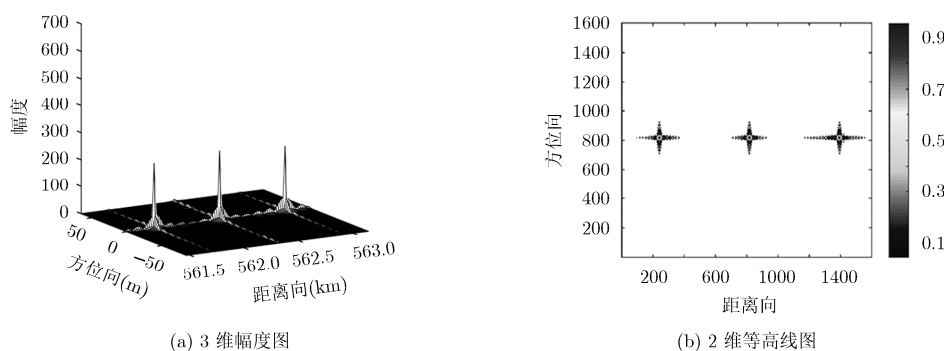


图 10 MIMO SAR 1 和 MIMO SAR 2 联合 DBF 处理后的成像结果

了本文所提处理方案对波形分离和 2 次散射回波抑制的有效性。

### 参考文献

- [1] MARC R, PRATS P, SCHULZE D, *et al.* First bistatic spaceborne SAR experiments with TanDEM-X[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(1): 33–37. doi: 10.1109/LGRS.2011.2158984.
- [2] ZINK M, BACHMANN M, BRAUTIGAM B, *et al.* TanDEM-X: The new global DEM takes shape[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2014, 2(2): 8–23. doi: 10.1109/MGRS.2014.2318895.
- [3] BUESO J, PRATS P, MARTONE M, *et al.* Performance evaluation of the TanDEM-X quad polarization acquisitions in the science phase[C]. *Proceedings of EUSAR 2016, Hamburg, Germany, 2016: 627–632.*
- [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] 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.*
- [6] WANG Wenqin. MIMO SAR imaging: potential and challenges[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2013, 28(8): 18–23. doi: 10.1109/MAES.2013.6575407.
- [7] 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.
- [8] KRIEGER G, ROMMEL T, and MOREIRA A. MIMO-SAR tomography[C]. *Proceedings of EUSAR 2016, Hamburg, Germany, 2016: 91–96.*
- [9] 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.
- [10] 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.*
- [11] MENG Cangzhen, XU Jia, XIA Xianggen, *et al.* MIMO-SAR waveform separation based on inter-pulse phase modulation and range-doppler decouple filtering[J]. *Electronics Letters*, 2013, 49(6): 420–422. doi: 10.1049/el.2013.0016.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] KIM J, YOUNIS M, MOREIRA A, *et al.* A novel OFDM chirp waveform scheme for use of multiple transmitters in SAR[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(3): 568–572. doi: 10.1109/LGRS.2012.2213577.
- [15] 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.
- [16] WANG Wenqin. Space-time coding MIMO-OFDM SAR for high-resolution imaging[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(8): 3094–3104. doi: 10.1109/TGRS.2011.2116030.
- [17] 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.
- [18] FENG Fan, LI Shiqiang, YU Weidong, *et al.* Echo separation in multi-dimensional waveform encoding SAR remote sensing using an advanced null-steering beam-former[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(10): 4157–4172. doi: 10.1109/TGRS.2012.2187905.
- [19] VAN TREES H. L. Optimum Array Processing Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory[M]. New York: John Wiley & Sons, 2002: 90–204.
- [20] KRIEGER G, GEBERT N, and MOREIRA A. Unambiguous SAR signal reconstruction from nonuniform displaced phase center sampling[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2004, 1(4): 260–264. doi: 10.1109/LGRS.2004.832700.
- 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.
- 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.