

基于矩阵束方法的星载MEB SAR俯仰向DBF处理方法

叶 恺^{*①②} 禹卫东^{①②} 王 伟^①

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要: 俯仰向数字波束形成(DBF)处理是距离向多波束体制(MEB)星载合成孔径雷达(SAR)系统实现较高分辨率、超宽幅成像的关键。但是, 由于存在卫星姿态误差等因素的影响, 星载MEB SAR系统的DBF接收波束指向会出现偏差, 这将导致在对具有强散射体的区域(如存在船舶的海面、港口等区域)进行成像时会出现鬼影目标。针对这一问题, 该文提出一种基于矩阵束方法的俯仰向DBF处理方法。首先对俯仰向通道回波数据进行匹配滤波处理, 并根据预设阈值寻找强散射体的峰值位置; 然后利用矩阵束方法准确估计强散射体的波达角; 最后利用这些信息调整俯仰向DBF加权矢量, 确保DBF接收波束指向正确, 从而消除鬼影目标的干扰。仿真实验验证了该方法的有效性。

关键词: 合成孔径雷达; 距离向多波束; 数字波束形成; 矩阵束方法

中图分类号: TN959.74

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)11-2659-08

DOI: 10.11999/JEIT180076

Matrix Pencil Method Based Processing Approach for Spaceborne MEB SAR with Digital Beamforming in Elevation

YE Kai^{①②} YU Weidong^{①②} WANG Wei^①

^①(*Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

^②(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Digital BeamForming (DBF) in elevation plays a crucial role for spaceborne Multiple Elevation Beam (MEB) SAR realizing the High-Resolution Wide-Swath (HRWS) imaging mode. However, due to the influence of satellite attitude error, the deviation of the DBF receiving beam direction always arises in such system. This leads to ghost targets appearing in the SAR image, when mapping the scenes (such as the seaport areas) with strong scatterers. To address the problem, a matrix pencil method based DBF processing approach in elevation is presented. Firstly, according to the given threshold, the peak position of the strong scatterer is found from the range-compressed signals. Then, the direction of arrival angle of the strong scatterer is estimated using the matrix pencil method. Finally, based on the imaging geometry model, the DBF weighting vector is adjusted to ensure the receiving beam to precisely point to the signal sources. Thereby, the interferences of ghost targets in SAR image can be eliminated effectively. The theoretical analysis is derived in detail, then it is validated by simulation experiments.

Key words: SAR; Multiple Elevation Beam (MEB); Digital BeamForming (DBF); Matrix pencil method

1 引言

传统的单通道星载合成孔径雷达(SAR)系统由

于受到最小天线面积的约束^[1], 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, 其有限的成像能力越来越不能满足人们在遥感应用中对SAR图像质量的要求。随着多通道技术的发展和数字波束形成(DBF)技术的应用, 配备多个接收通道的新体制星载SAR系统能够有效克服这一限制^[2-5]。近年来, 距离向多波束(MEB)体制的星载SAR系统^[6-8]成为了各大科研机构在下一代星载SAR系统预研过程中的重点关注对象, 如德宇航正在研制的双基星载SAR系统Tandem-L就应用了MEB体

收稿日期: 2018-01-19; 改回日期: 2018-05-10; 网络出版: 2018-08-14

*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 of China (2017YFB0502700), The National Natural Science Foundation of China (61701479)

制^[9,10]。星载MEB SAR系统的主要优势在于能够获取较高分辨率(5~10 m)、超宽幅(350~400 km)的SAR图像数据,这意味着能够以短重访周期对地球系统的大范围动态变化过程进行较高精度的观测,因此在海洋遥感、环境监测、灾害评估等领域有着重要的应用价值^[11,12]。传统的MEB SAR由于受到发射脉冲的干扰,在生成的图像中会存在固定不变的盲区。为了实现对大测绘带场景的连续观测,文献^[13,14]提出了改进的成像模式staggered SAR,通过周期性连续变化系统脉冲重复间隔(PRI)来改变测绘带盲区的位置,使得整个测绘带内目标回波均能被接收到,从而消除测绘带内的盲区。此外,方位向多通道技术、多维波形编码技术和MIMO技术的引入还能进一步提升这类系统的成像性能^[15-19]。尽管这些星载MEB SAR系统的具体处理方案不同,但是由于对大测绘带场景进行成像,这些系统都需要利用俯仰向的数字波束形成技术对来自不同子测绘带的回波进行分离处理。因此,俯仰向的DBF处理是星载MEB SAR系统实现较高分辨率、超宽幅成像的关键。

通常,基于平面相控阵天线的星载MEB SAR系统在发射端产生俯仰向宽波束照射地面场景,在接收端利用俯仰向多通道接收地面回波。基于地球理想球体模型,不同子测绘带目标的回波时间和波达角(AOA)的对应关系可根据确定的成像几何关系计算得到。因此,这类系统可利用零点指向技术^[20]生成合适的DBF接收波束,将波束方向图的中心对准需要提取的子测绘带目标回波,同时将波束方向图的零陷位置对准其他子测绘带目标的干扰回波,从而确保不同子测绘带回波能够有效分离。但是,由于存在卫星姿态误差等因素的影响,星载MEB SAR系统的DBF接收波束指向会出现偏差,使得波束方向图的零陷位置不能准确指向干扰回波的方向,这将导致在对具有强散射体的区域(如存在船舶的海面、港口等区域)进行超宽幅成像时会出现明显的鬼影目标,从而严重影响SAR图像的解译。针对这一问题,有一种解决思路是利用自适应数字波束形成(ADBF)进行处理^[21,22]。该处理方法采用空间谱估计算法对每个距离门单元的回波信号进行波达角估计,然后利用波达角估计值计算DBF加权矢量来调整接收波束指向。但是这种方法通常需要很多个快拍数据来构造样本协方差矩阵并进行求逆运算,运算量较大,难以满足实时性要求,而且易受到多径效应和相干信号源的干扰,因此能否有效应用于星载SAR系统中还有待进一步研究。考虑矩阵束方法^[23]能够在复杂环境中基于单快拍数据准确而且稳健地估计目标的波达角,本文提出了一种基

于矩阵束方法的星载MEB SAR俯仰向DBF处理方法。本文详细分析了星载MEB SAR的成像几何模型和俯仰向多通道回波信号模型,并具体推导了主要的处理流程,点目标和分布目标的仿真实验将验证本文方法能够有效抑制鬼影目标的干扰。

2 星载MEB SAR的成像几何模型和信号模型

图1为星载MEB SAR的成像几何模型。星载MEB SAR系统利用高度较小的天线发射脉冲信号照射超宽幅测绘带,发射信号模型的表达式为: $s(t) = \text{rect}(t/T_p) \exp(j2\pi f_0 t) \exp(j\pi k_r t^2)$ 。其中 T_p 为脉冲时宽, f_0 为雷达载频, 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。如图2所示,这类系统的接收天线在俯仰向由 N 个俯仰向子孔径组成,每个俯仰向子孔径的方向图都覆盖整个成像场景。由于星载MEB SAR的测绘带宽很大, M 个子测绘带回波将在同一个雷达接收窗内相互重叠。考虑成像场景中任意位置目标的回波到接收天线各俯仰向子孔径的距离差远小于1个距离门,经

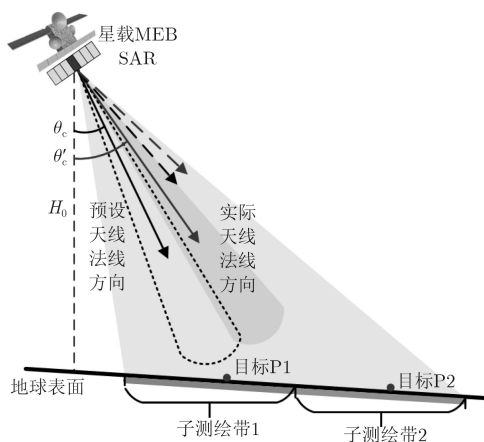


图1 星载MEB SAR成像几何模型

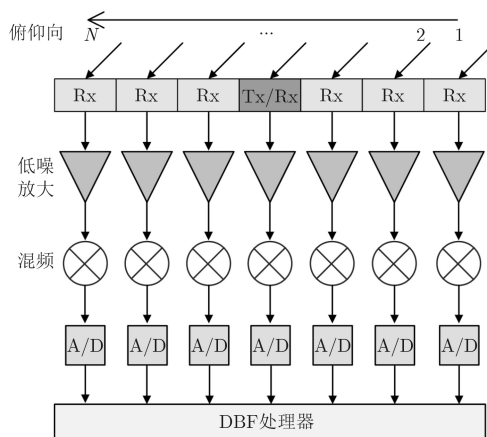


图2 星载MEB SAR俯仰向DBF处理示意图

过去载频处理后，俯仰向第 n 个子孔径接收到的目标回波信号 $r_n(t)$ 可表示为

$$r_n(t) = \sum_{m=1}^M \sigma_m A_m \text{rect} \left(\frac{t - t_1}{T_p} \right) \exp(-j2\pi f_0 t_m) \cdot \exp \left(j2\pi f_0 \frac{h_n \sin(\theta_m - \theta_c)}{c} \right) \cdot \exp \left(j\pi k_r (t - t_1)^2 \right) + e_n(t) \quad (1)$$

其中， σ_m 表示第 m 个子测绘带目标的后向散射系数， A_m 表示第 m 个子测绘带目标受到的双程天线

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} \exp \left(j2\pi f_0 \frac{h_1 \sin(\theta_1 - \theta_c)}{c} \right) & \cdots & \exp \left(j2\pi f_0 \frac{h_1 \sin(\theta_M - \theta_c)}{c} \right) \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ \exp \left(j2\pi f_0 \frac{h_n \sin(\theta_1 - \theta_c)}{c} \right) & \cdots & \exp \left(j2\pi f_0 \frac{h_n \sin(\theta_M - \theta_c)}{c} \right) \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ \exp \left(j2\pi f_0 \frac{h_N \sin(\theta_1 - \theta_c)}{c} \right) & \cdots & \exp \left(j2\pi f_0 \frac{h_N \sin(\theta_M - \theta_c)}{c} \right) \end{bmatrix} \quad (2)$$

尽管不同子测绘带目标的回波信号在接收窗内相互重叠，但是这些回波信号的波达角都不相同，因此可利用零点指向技术对不同子测绘带目标回波进行分离提取，例如采用线性约束最小方差(LCMV)的波束形成算法^[20]。假定分离提取第 m 个子测绘带目标回波的加权矢量为 $\mathbf{w}_m = [\omega_{m,1} \omega_{m,2} \cdots \omega_{m,N}]^T$ ，采用LCMV算法可得到 \mathbf{w}_m 的表达式为

$$\mathbf{w}_m^H = \mathbf{I}_m^H (\mathbf{a}^H \mathbf{S} \mathbf{a})^{-1} \mathbf{a}^H \mathbf{S}^{-1} \quad (3)$$

其中， \mathbf{I}_m 表示 $M \times M$ 单位矩阵的第 m 列， \mathbf{S} 表示噪声的协方差矩阵。假设这一噪声为高斯白噪声且功率为 σ_s^2 ，则 \mathbf{S} 可表示为

$$\mathbf{S} = \sigma_s^2 \mathbf{I}_{N \times N} \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)中，得到： $\mathbf{w}_m^H = \mathbf{I}_m^H (\mathbf{a}^H \mathbf{a})^{-1} \mathbf{a}^H$ 。基于地球理想球体模型，地球表面目标的回波时刻 τ 与波达角 θ 之间的对应关系可表示为

$$\theta(\tau) = \arccos \left(\frac{4(R_e + H_0)^2 - 4R_e^2 + (c\tau)^2}{4c\tau(R_e + H_0)} \right) \quad (5)$$

其中， R_e 表示地球半径， H_0 表示卫星平台轨道高度。在理想情况下，如果星载MEB SAR系统的天线法线指向准确，那么DBF加权矢量可根据式(3)计算得到，并且各个子测绘带回波可有效分离提取。但是由于存在卫星姿态误差等因素的影响，星载SAR系统的天线法线指向会出现偏差。如图1所示，如果仍然按照理想情况计算DBF加权矢量，并形成DBF波束对成像场景进行扫描接收以及分离

方向图幅度加权， t_1 表示中间俯仰向子孔径接收到最近端子测绘带目标回波的双程时延。 $t_m = t_1 + mT$ 表示中间俯仰向子孔径接收到第 m 个子测绘带目标回波的双程时延， T 表示系统脉冲重复间隔。假设 N 为奇数， $h_n = \left(n - \frac{N+1}{2} \right) h_r$ 表示第 n 个俯仰向子孔径相对于中间俯仰向子孔径的距离， h_r 为俯仰向子孔径高度。 θ_m 表示第 m 个子测绘带目标对应的下视角， θ_c 表示天线法线的下视角， c 为光速。 $e_n(t)$ 表示第 n 个俯仰向子孔径接收回波受到的噪声干扰。由式(1)可得到回波信号的导向矢量 \mathbf{a} 表达式为

提取各子测绘带回波，将导致接收波束中心不能准确对准需要提取的子测绘带回波，接收波束方向图的零陷指向不能对准来自其他子测绘带的干扰回波。当对具有强散射体的区域进行超宽幅成像时，比如存在船舶的海面、港口等区域，由于不同子测绘带的强散射体回波信号没有被有效抑制，SAR图像中将出现鬼影目标的干扰，严重影响图像解译。针对这一问题，本文提出了一种基于矩阵束方法的星载MEB SAR俯仰向DBF处理方法，下一节将对该方法进行详细阐述和推导。

3 基于矩阵束方法的俯仰向DBF处理方法

在理想情况下，星载MEB SAR系统根据预先计算好的DBF加权矢量对俯仰向多通道回波信号进行DBF处理。预设的俯仰向DBF加权矢量的主要计算步骤是：根据预先计划照射的成像场景计算每个距离门单元的回波双程时延，利用式(5)计算相应的目标下视角，然后结合已知的预设天线法线指向角计算目标导向矢量，最后根据式(3)和导向矢量计算每个距离门单元的DBF加权矢量。但是，当存在卫星姿态误差等因素的影响时，将导致星载SAR系统的天线法线指向出现偏差，天线方向图出现偏离，这将进一步导致成像场景目标的导向矢量发生改变，从而影响星载MEB SAR的俯仰向DBF处理。

如图1所示，在这种情况下，星载MEB SAR系统的预设天线法线指向角 θ_c 将偏离实际的天线法线指向角 θ'_c ，这导致了在计算预设DBF加权矢量时

采用的导向矢量 \mathbf{a} 与成像场景的导向矢量 \mathbf{a}' 出现偏差, 其中 \mathbf{a}' 的表达式为

$$\mathbf{a}' = \begin{bmatrix} \exp\left(j2\pi f_0 \frac{h_1 \sin(\theta_1 - \theta'_c)}{c}\right) & \cdots & \exp\left(j2\pi f_0 \frac{h_1 \sin(\theta_M - \theta'_c)}{c}\right) \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ \exp\left(j2\pi f_0 \frac{h_n \sin(\theta_1 - \theta'_c)}{c}\right) & \cdots & \exp\left(j2\pi f_0 \frac{h_n \sin(\theta_M - \theta'_c)}{c}\right) \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ \exp\left(j2\pi f_0 \frac{h_N \sin(\theta_1 - \theta'_c)}{c}\right) & \cdots & \exp\left(j2\pi f_0 \frac{h_N \sin(\theta_M - \theta'_c)}{c}\right) \end{bmatrix} \quad (6)$$

此时, 如果仍然采用预设的DBF加权矢量对回波信号进行处理, 将导致DBF接收波束中心和零陷指向都出现偏差。解决这一问题的关键在于根据实际的天线法线指向角和成像场景的目标下视角重新计算导向矢量, 从而确保每个距离门单元的DBF加权矢量计算正确。由于每个距离门单元的距离向时间都是已知的, 那么每个距离门单元对应的下视角可以根据式(5)计算得到, 这意味着成像场景中目标下视角都是已知的。因此, 如果能准确估计成像场景中的任一目标波达角, 那么就能结合该目标的下视角计算得到实际的天线法线指向角, 从而调整成像场景的导向矢量。根据上述解决思路, 同时考虑具有高信噪比的强散射体回波有利于目标波达角的正确估计, 下面将详细阐述基于矩阵束方法的俯仰向DBF处理方法。

为了便于寻找强散射体的位置以及提升回波信号的信噪比, 首先对俯仰向中间子孔径接收的回波信号进行匹配滤波处理, 然后根据系统预设的阈值对回波信号脉冲压缩结果进行过滤, 预设的阈值主要通过SAR系统的地面测量和回波仿真计算得到。当脉冲压缩后的回波信号峰值都小于预设阈值时, 则直接应用预设DBF加权矢量对所有俯仰向子孔径回波进行处理。当存在超过预设阈值的回波信号脉冲压缩结果时, 进一步寻找最大幅度值所在的位置, 即对应强散射体目标所在位置。提取最大幅度值位置处的俯仰向多通道回波信号的脉冲压缩结果, 得到

$$\bar{\mathbf{r}}(t) = \begin{bmatrix} \bar{r}_1(t) & \bar{r}_2(t) & \cdots & \bar{r}_N(t) \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \bar{r}_n(t) = & \sum_{m=1}^M \sqrt{|k_r|} T_p \sigma_m A_m \exp(-j2\pi f_0 t_m) \\ & \cdot \text{sinc}(k_r T_p(t - t_1)) \\ & \cdot \exp\left(j2\pi f_0 \frac{h_n \sin(\theta_m - \theta_c)}{c}\right) + \bar{e}_n(t) \end{aligned} \quad (8)$$

其中, $\bar{e}_n(t)$ 表示匹配滤波处理后的噪声。接下来利用矩阵束方法对所提取数据进行处理并估计强散射体目标的波达角。矩阵束方法是一种用于参数估

计的直接数据域算法, 能够利用单个快拍样本数据准确估计相干信号或非相干信号的波达角, 这种算法不仅计算效率高, 而且在存在噪声干扰的环境中具有稳健的估计性能。本文采用的矩阵束方法的主要处理步骤跟文献[24]中的描述大体相同, 不同点在于考虑了星载MEB SAR系统的实际应用环境来设置数据矩阵 \mathbf{Y} 的奇异值筛选条件。根据式(7)和文献[24], 定义 $(N-L) \times (L+1)$ 的数据矩阵 \mathbf{Y} , 其表达式为

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \bar{r}_1(t) & \bar{r}_2(t) & \cdots & \bar{r}_{L+1}(t) \\ \bar{r}_2(t) & \bar{r}_3(t) & \cdots & \bar{r}_{L+2}(t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{r}_{N-L}(t) & \bar{r}_{N-L+1}(t) & \cdots & \bar{r}_N(t) \end{bmatrix} \quad (9)$$

为了有效减轻噪声的影响, 参数 L 的取值需要在 $\left[\frac{N}{3}, \frac{N}{2}\right]$ 范围内选取[25]。对数据矩阵 \mathbf{Y} 进行奇异值分解, 得到

$$\mathbf{Y} = \mathbf{U} \mathbf{X} \mathbf{V}^H \quad (10)$$

其中, $\mathbf{U} = [\mathbf{u}_1 \ \mathbf{u}_2 \ \cdots \ \mathbf{u}_{N-L}]_{(N-L) \times (N-L)}$, 由矩阵 $\mathbf{Y} \mathbf{Y}^H$ 的特征向量组成。 $\mathbf{V} = [\mathbf{v}_1 \ \mathbf{v}_2 \ \cdots \ \mathbf{v}_{L+1}]_{(L+1) \times (L+1)}$, 由矩阵 $\mathbf{Y}^H \mathbf{Y}$ 的特征向量组成。 \mathbf{X} 为 $(N-L) \times (L+1)$ 的对角矩阵, 对角线上的元素对应数据矩阵 \mathbf{Y} 的奇异值。接下来对矩阵 \mathbf{X} 中的奇异值进行筛选, 筛选的限制条件包含以下两点: 由于星载MEB SAR系统的成像场景由 M 个子测绘带组成, 选取的奇异值数目不能超过 M ; 考虑强散射体回波信号具有较高的信噪比, 选取的奇异值要求大于最大奇异值的一半。假定选取了 N_s 个奇异值, 强散射体的波达角估计值 $\tilde{\theta}$ 可通过式(11)计算得到:

$$\tilde{\theta} = \arcsin\left(\frac{\arctan(\text{imag}(\alpha)/\text{real}(\alpha))}{2\pi f_0 h_r} \cdot c\right) \quad (11)$$

$$\alpha = \text{eig}\left(\left((\bar{\mathbf{V}}_1)^H\right)^\dagger (\bar{\mathbf{V}}_2)^H\right) \quad (12)$$

其中, $\bar{\mathbf{V}} = [\mathbf{v}_1 \ \mathbf{v}_2 \ \cdots \ \mathbf{v}_{N_s}]_{(L+1) \times N_s}$, 矩阵 $\bar{\mathbf{V}}_1$ 为删去了最后一行元素的矩阵 $\bar{\mathbf{V}}$, 矩阵 $\bar{\mathbf{V}}_2$ 为删去了第1行元素的矩阵 $\bar{\mathbf{V}}$ 。 $\text{real}(\cdot)$ 和 $\text{imag}(\cdot)$ 分别表示

取复数实部和虚部的运算符号。 $\text{eig}(\cdot)$ 表示计算矩阵特征值的运算符号。

根据强散射体所在距离门单元的位置和式(5)计算强散射体对应的下视角 θ_q ，并进一步计算实际的天线法线指向角： $\theta'_c = \theta_q - \tilde{\theta}$ 。然后对DBF加权矢量进行调整，从而确保DBF接收波束中心和零陷位置指向准确。最后，利用调整后的DBF加权矢量对俯仰向多通道回波数据进行处理，分离提取各子测绘带回波并下传地面雷达站进行传统成像处理。

根据上述推导可知，本文方法是对一个 $N \times 1$ 维的单快拍回波信号矢量进行处理，计算量主要集中在对 $(N - L) \times (L + 1)$ 维的数据矩阵 \mathbf{Y} 进行奇异值分解的运算上，其计算量约为 $O((L + 1)^3)$ 次复乘。由于参数 L 的取值通常在 $[N/3, N/2]$ 范围内选取，当 L 取最大值 $N/2$ 时，本文方法的计算量约为 $O(N^3/8 + 3N^2/4 + 3N/2 + 1)$ 次复乘。文献[21]是采用Capon谱估计的方法进行目标波达角估计，需要利用多组快拍样本数据进行处理，因此该方法是对一个 $N \times K$ 维的信号矩阵进行处理，其中 K 表示快拍数目。文献[21]方法的计算量主要集中在以下2方面：(1) 对 $N \times N$ 维样本协方差矩阵的构造和求逆运算；(2) 将发射天线主瓣对应的角度范围以 $\Delta\theta$ 为间隔进行划分($\Delta\theta$ 的选取与精度需求有关)，该方法需要计算每个划分的角度对应的功率谱密度。假定需要计算 \bar{K}_e 个角度对应的功率谱密度，文献[21]方法的计算量约为 $O(N^3 + KN^2 + \bar{K}_e(N^2 +$

$N))$ 次复乘。由于 K 和 \bar{K}_e 的取值通常远大于 N ，因此本文方法的计算量要明显低于文献[21]方法。

4 仿真试验

4.1 点目标仿真实验

本节将通过一个C波段星载MEB SAR系统来验证本文提出的处理方法。表1为相应的系统参数。首先进行点目标仿真实验。如图1所示，目标P1和目标P2的斜距分别为791.17 km和880.59 km，下视角分别为 27.00° 和 35.13° ，其中目标P1位于子测绘带1，目标P2位于子测绘带2。将目标P2的幅度设置为目标P1幅度的3倍，并在回波信号仿真中加入高斯白噪声。假定在仿真实验中预先已知天线法线指向角为 26.00° ，但是由于存在卫星姿态误差等因素的影响，实际的天线法线指向角为 27.00° 。图3(a)为没有经过俯仰向DBF处理的直接成像结果

表 1 系统仿真参数

轨道高度	700 km
卫星速度	7504 m/s
载频	5.4 GHz
信号带宽	60 MHz
脉冲宽度	22 μ s
天线高度	1.5 m
俯仰向子孔径数目	23
天线长度	10 m
脉冲重复频率	1800 Hz

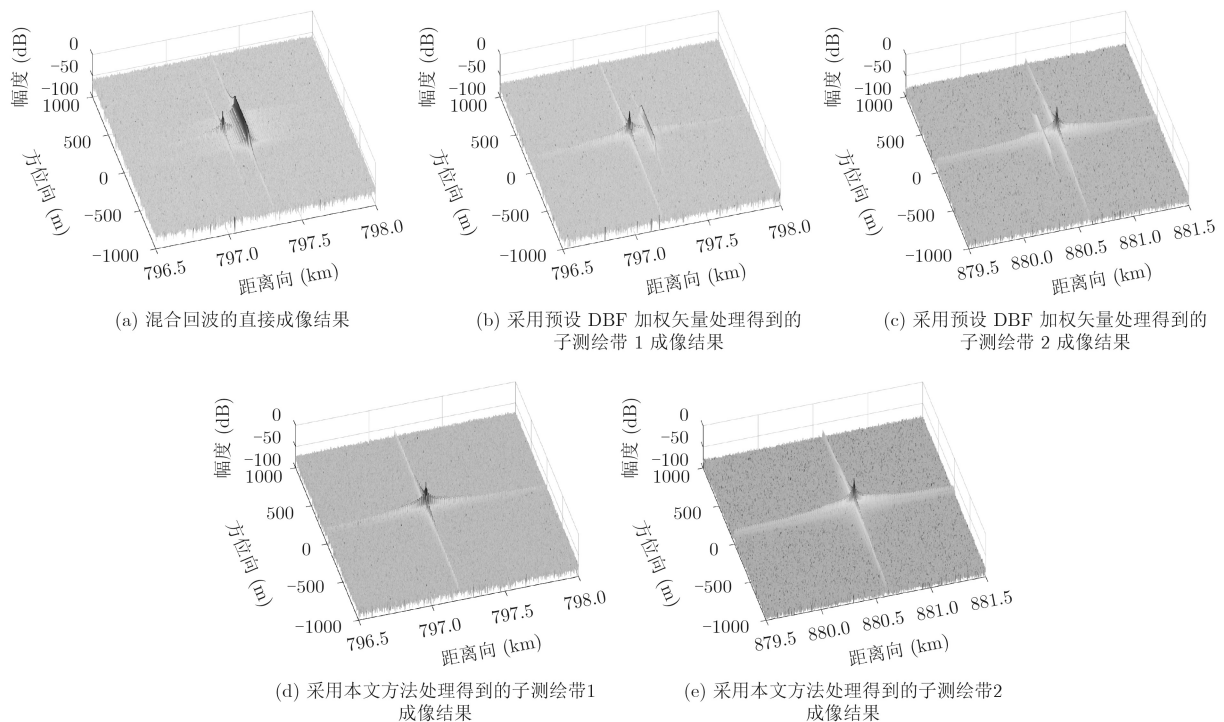


图 3 点目标仿真结果

果。由于不同子测绘带回波在同一个雷达接收窗内相互重叠，当采用子测绘带1对应的成像参数进行处理时，目标P1的成像聚焦良好，目标P2的成像结果在方位向出现散焦。但是，由于目标P2幅度较大，这将导致鬼影目标出现在子测绘带1的成像结果中。采用预设的DBF加权矢量对混合回波进行分离处理，得到子测绘带1和子测绘带2的成像结果分别如图3(b)和图3(c)所示。由于采用的DBF加权矢量出现偏差，DBF接收波束中心和零陷位置指向都发生偏离，导致两个子测绘带成像结果中都出现干扰目标。针对这一问题，采用本文所提的基于矩阵束方法的俯仰向DBF处理方法。图4为利用矩阵束方法通过100次Monte Carlo实验得到的目标P2波达角估计值与实际值的偏差，根据实验数据计算得到目标P2的波达角估计期望值为修改为： 8.1218° ，均方根估计误差为 0.0016° ，因此可看出矩阵束方法能够准确地估计强散射体目标的波达角。按照上节阐述的处理方法对回波数据进行处理，最终得到图3(d)和图3(e)所示的子测绘带1和子

测绘带2的成像结果，可见本文方法能够准确调整DBF加权矢量，有效消除鬼影目标的干扰。

4.2 分布目标仿真实验

为了进一步验证本文方法的有效性，本节将采用中国科学院电子学研究所航天微波遥感系统部的海洋机载SAR数据进行分布目标仿真试验。图5(a)和图5(b)分别对应子测绘带1和子测绘带2的SAR图像数据。根据星载MEB SAR成像几何模型生成多通道回波数据。图5(c)为采用子测绘带1成像参数

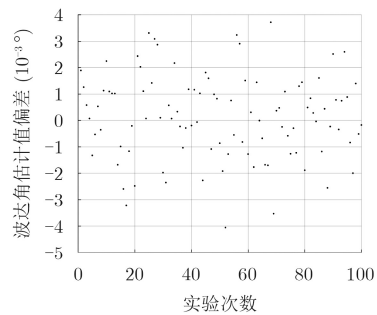


图4 目标P2的波达角估计值偏差

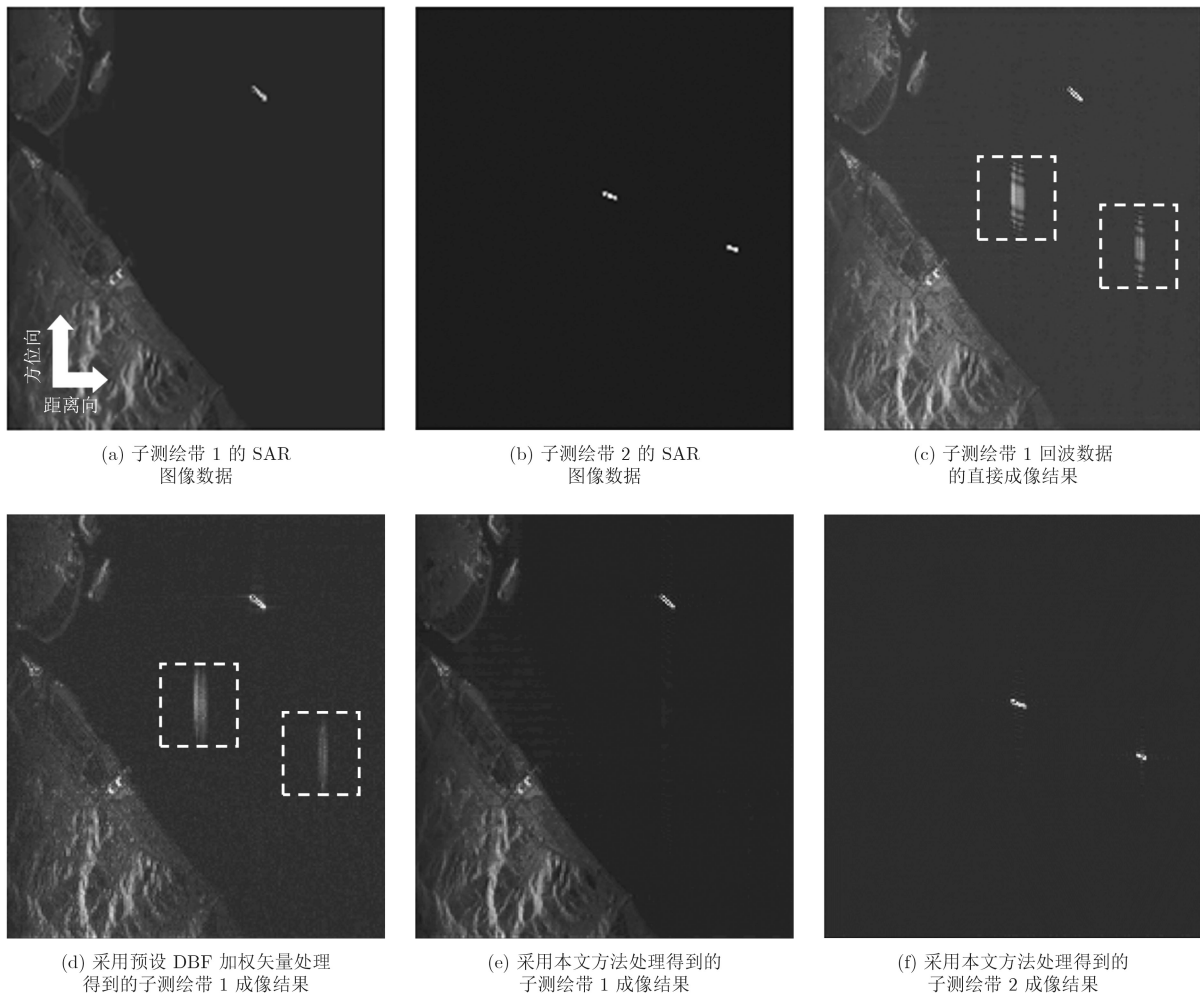


图5 分布目标仿真结果

对回波数据处理得到的直接成像结果。如图中虚线框所示, 由于2个子测绘带回波相互混叠, 子测绘带1的成像结果中出现了子测绘带2的场景, 因此需要利用DBF处理对混合回波数据进行分离提取。图5(d)为采用预设DBF加权矢量处理后的成像结果。由于采用存在偏差的DBF加权矢量对混合回波数据进行处理, 在对子测绘带1回波数据进行提取时, DBF波束方向图的零陷指向出现偏离, 导致子测绘带2中的强散射体目标回波未能得到有效抑制, 因此SAR图像中出现了明显的鬼影目标干扰。采用本文方法对混合回波数据进行处理, 得到子测绘带1和子测绘带2的成像结果分别如图5(e)和图5(f)所示。对比图5(c)和图5(d)可见, 由于正确调整DBF加权矢量, SAR图像中的鬼影目标被明显消除, 这也验证了所提处理方法的有效性。

5 结束语

针对由卫星姿态误差等影响因素导致的星载MEB SAR系统的DBF波束指向偏差问题, 本文提出了一种基于矩阵束方法的星载MEB SAR俯仰向DBF处理方法。该方法主要包含以下重要步骤: 首先对俯仰向子孔径回波信号进行匹配滤波处理并寻找强散射体目标所在位置; 然后利用矩阵束方法准确估计强散射体目标的波达角, 并根据星载MEB SAR系统的成像几何模型和回波信号模型调整DBF加权矢量, 从而确保DBF接收波束中心和零陷位置指向准确; 最后利用该DBF加权矢量分离提取各子测绘带回波, 并进行传统成像处理。本文详细阐述了主要处理流程, 并给出了点目标和分布目标的仿真实验。仿真结果验证了本文方法能够准确调整DBF加权矢量, 有效消除鬼影目标的干扰。

参 考 文 献

- [1] 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](https://doi.org/10.1109/36.823926).
- [2] 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.
- [3] YOUNIS M, ALMEIDA F, LOPEZ-DEKKER P, *et al.* Techniques and modes for multi-channel SAR instruments[C]. Proceedings of European Conference on Synthetic Aperture Radar, Hamburg, Germany, 2016: 812–817.
- [4] 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 European Conference on Synthetic Aperture Radar, Hamburg, Germany, 2016: 187–192.
- [5] YOUNIS M, HUBER S, PATYUCHENKO A, *et al.* Performance comparison of reflector- and planar- antenna based digital beam-forming SAR[J]. *International Journal of Antenna and Propagation*, 2009, 2009(6): 1–13. doi: [10.1155/2009/614931](https://doi.org/10.1155/2009/614931).
- [6] 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 European Conference on Synthetic Aperture Radar, Hamburg, Germany, 2016: 1251–1254.
- [7] VILLANO M, KRIEGER G, and MOREIRA A. Advanced spaceborne SAR systems with planar antenna[C]. Radar Conference, Seattle, USA, 2017: 152–156.
- [8] YAN Wei, YANG Xu, SUN Jia, *et al.* An airborne demonstration for high-resolution wide-swath spaceborne reflector SAR systems[C]. International Conference on Frontiers of Sensors Technologies, Shenzhen, China, 2017: 350–353.
- [9] HUBER S, VILLANO M, YOUNIS M, *et al.* Tandem-L: design concepts for a next-generation Spaceborne SAR system[C]. Proceedings of European Conference on Synthetic Aperture Radar, Hamburg, Germany, 2016: 1237–1241.
- [10] 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.
- [11] 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](https://doi.org/10.1109/MGRS.2015.2437353).
- [12] NANNINI M, MARTONE M, RIZZOLI P, *et al.* Spaceborne demonstration of coherent SAR tomography for future companion satellite SAR missions[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Fort Worth, USA, 2017: 129–132.
- [13] VILLANO M, KRIEGER G, and MOREIRA A. Staggered SAR: High-resolution wide-swath imaging by continuous PRI variation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(7): 4462–4479. doi: [10.1109/TGRS.2013.2282192](https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2282192).
- [14] VILLANO M, KRIEGER G, JAGER M, *et al.* Staggered SAR: Performance analysis and experiments with real data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(11): 6617–6638. doi: [10.1109/TGRS](https://doi.org/10.1109/TGRS).

- 2017.2731047.
- [15] 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](https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.905974).
- [16] 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](https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2263934).
- [17] 叶恺, 禹卫东, 王伟. 一种基于短偏移正交波形的MIMO SAR处理方案研究[J]. *雷达学报*, 2017, 6(4): 376–387. doi: [10.12000/JR17048](https://doi.org/10.12000/JR17048).
YE Kai, YU Weidong, and WANG Wei. Investigation on processing scheme for MIMO SAR with STSO chirp waveforms[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(4): 376–387. doi: [10.12000/JR17048](https://doi.org/10.12000/JR17048).
- [18] 林玉川, 张剑云, 武拥军, 等. 双基星载HRWS-SAR系统方位向信号重构的矩阵求逆算法[J]. *雷达学报*, 2017, 6(4): 388–396. doi: [10.12000/JR17060](https://doi.org/10.12000/JR17060).
LIN Yuchuan, ZHANG Jianyun, WU Yongjun, et al. Matrix inversion method for azimuth reconstruction in bistatic spaceborne high-resolution wide-swath SAR system[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(4): 388–396. doi: [10.12000/JR17060](https://doi.org/10.12000/JR17060).
- [19] 赵庆超, 张毅, 王宇, 等. 基于多帧超分辨率的方位向多通道星载SAR非均匀采样信号重建方法[J]. *雷达学报*, 2017, 6(4): 408–419.
ZHAO Qingchao, ZHANG Yi, WANG Yu, et al. Signal reconstruction approach for multichannel SAR in azimuth based on multiframe super resolution[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(4): 408–419.
- [20] VAN T H L. Optimum Array Processing Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory[M]. New York: John Wiley & Sons, 2002: 428–669.
- [21] MAKHOUL V. Adaptive digital beam-forming for high-resolution wide-swath synthetic aperture radar[D]. [Master dissertation], Polytechnic University of Catalonia, 2009: 23–91.
- [22] BORDONI F, YOUNIS M, MAKHOUL V, et al. Adaptive digital beamforming algorithm for high-resolution, wide-swath synthetic aperture radar[C]. International Radar Symposium, Hamburg, Germany, 2009: 1–5.
- [23] KHAN M and TUFAIL M. Comparative analysis of various matrix pencil methods for direction of arrival estimation[C]. International Conference on Image Analysis and Signal Processing, Zhejiang, China, 2010: 1–6.
- [24] SARKAR T and PEREIRA O. Using the matrix pencil method to estimate the parameters of a sum of complex exponentials[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 1995, 37(1): 48–55. doi: [10.1109/74.370583](https://doi.org/10.1109/74.370583).
- [25] HUA Y and SARKAR T. On SVD for estimating generalized eigenvalues of singular matrix pencil in noise[J]. *IEEE Transaction on Signal Processing*, 1991, 39(4): 892–900. doi: [10.1109/78.80911](https://doi.org/10.1109/78.80911).
- 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。