

## 基于自适应滤波的 DPC-MAB SAR 方位向信号重建

陈倩<sup>\*①②</sup> 邓云凯<sup>①</sup> 刘亚东<sup>①②</sup> 尚秀芹<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

<sup>②</sup>(中国科学院研究生院 北京 100039)

**摘要:** 偏置相位中心方位多波束(DPC-MAB)SAR系统利用方位向多个子孔径同时接收回波,在PRF较低时根据多波束回波的相关性对其进行联合处理,实现方位向信号的重构,从而在保证高方位分辨率的同时增加测绘带宽。该文针对DPC-MAB SAR系统研究了基于波束形成理论的多普勒解模糊方法。传统非自适应的波束形成算法敏感于通道幅相误差以及各类噪声,而基于Capon算法的自适应最小方差无畸变(MVDR)最优波束形成器在多个模糊分量相关性较强时性能大大衰减,针对以往方法的局限性与不足之处,该文提出了一种改进的最小输出能量(MOE)波束形成算法,该算法首先利用多通道回波数据自适应的估计统计自相关矩阵,根据子空间投影理论对理想导向矢量进行修正,然后利用多重约束条件有效抑制相关模糊分量,解模糊性能明显提升。仿真实验和实测数据处理均验证了其有效性。

**关键词:** 合成孔径雷达;高分辨宽测绘带;方位多波束;多普勒模糊;自适应波束形成

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)06-1331-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.01074

## SAR Azimuth Signal Reconstruction Based on Adaptive Filtering for the DPC-MAB SAR System

Chen Qian<sup>①②</sup> Deng Yun-kai<sup>①</sup> Liu Ya-dong<sup>①②</sup> Shang Xiu-qin<sup>①②</sup>

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

<sup>②</sup>(Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** The DPC-MAB SAR system enables the reconstruction of the azimuth signal with quite low PRF by coherent process of the multichannel signals, hence relieving the contradiction of the azimuth resolution and the swath for the traditional monochannel SAR. In this paper the multichannel reconstruction algorithms based on beamforming are investigated. Considering the disadvantages of the non-adaptive beamformer and the Capon beamformer, a novel Minimum Output Energy (MOE) beamforming algorithm is proposed, which can modify the space steering vectors adaptively, and can restrain the correlative ambiguities by the multiple restrictions. The effectiveness of this method is verified by the computer-based simulations and the imaging of the real SAR data.

**Key words:** SAR; High Resolution Wide Swath (HRWS); Multiple Azimuth Beam (MAB); Doppler ambiguities; Adaptive beamforming

### 1 引言

合成孔径雷达(SAR)因具备不受天气和昼夜影响,穿透性较强等优点,在许多军事和民用方面都得到了广泛应用。然而,受最小天线面积条件的约束,传统单通道SAR的分辨率和测绘带宽两个重要指标之间存在固有矛盾,使得二者不能同时提高<sup>[1]</sup>。针对上述局限性,近几年提出了一种偏置相位中心方位向多波束(DPC-MAB)SAR系统<sup>[2-4]</sup>,通过增加系统复杂度使得分辨率和测绘带宽可得到同时提升。

本文主要针对单平台DPC-MAB SAR系统的方位向预处理方法进行研究。该系统利用多个接收

通道的空域相关性进行多普勒解模糊处理实现方位向信号重构。传统的频谱重构法<sup>[5-7]</sup>、滤波器组法<sup>[8]</sup>以及非自适应波束形成法<sup>[9,10]</sup>等解模糊算法均敏感于通道误差以及各类噪声,即存在稳健性不足的缺陷。而近年来提出的基于Capon算法的自适应波束形成法<sup>[11]</sup>虽具有较好的稳健性,但对于相关源问题存在严重的缺陷,即不具备普遍的适用性。针对以上各种算法的不足之处,本文提出了一种基于多重约束条件和子空间投影技术的最小输出能量(MOE)自适应波束形成重构算法,其利用子空间投影技术对空间导向矢量进行修正,通过估计观测数据的统计自相关矩阵自适应地抑制模糊分量及各类噪声,并采用多重约束条件对相关源进行有效抑制。仿真分析以及实测数据处理均验证了该方法的有效性。

2011-10-17收到,2012-03-22改回

\*通信作者: 陈倩 chenqian19860123@sina.com

## 2 DPC-MAB SAR 系统建模与信号分析

### 2.1 DPC-MAB SAR 系统模型与回波分析

图 1 给出了正侧视条带模式下 3 波束 DPC-MAB SAR 系统的几何模型, 中间孔径为发射孔径, 分布在航迹向不同相位中心的多个子孔径同时接收回波。建立如图 1 所示的空间坐标系, SAR 平台高度为  $H$ , 飞行速度为  $v_a$ ,  $\eta$  表示方位慢时间。SAR 天线沿航迹向等分成间距为  $d$  的  $N$  个子孔径, 中心子孔径为发射孔径, 其在  $\eta = 0$  时刻位于  $(0, 0, H)$  处。地面分布有  $M$  个散射点, 坐标分别为  $(x_i, y_i, 0)$ ,  $i = 1, 2, \dots, M$ 。令  $n_c$  为发射孔径序号, 在  $\eta$  时刻第  $n$  个接收孔径到第  $i$  个散射点的斜距设为  $R_{ni}(\eta)$ , 令  $\Delta\eta_n = (n - n_c)d/v_a$ , 则

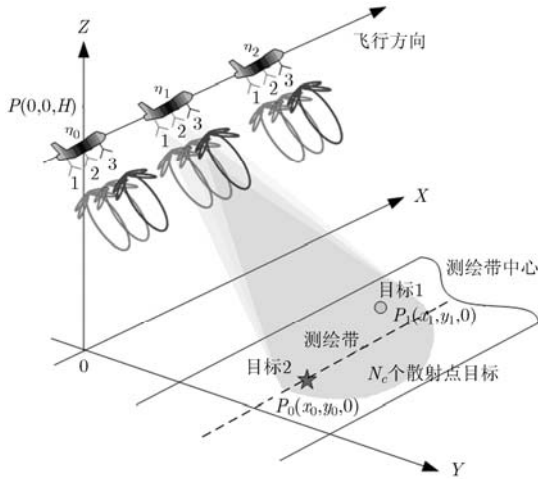


图 1 DPC-MAB SAR 系统工作示意图

$$R_{ni}(\eta) = \sqrt{(x_i - v_a(\eta + \Delta\eta_n))^2 + y_i^2 + H^2} \quad (1)$$

文献[12]中通过定量分析指出, 在单星平台下距离徙动对于方位向重构性能的影响是可以忽略的, 故此处暂不考虑距离徙动, 只考虑方位向 1 维信号。利用 Taylor 公式对距离等式进行二次展开可得距离压缩后第  $n$  个通道的方位向信号近似为

$$\begin{aligned} s_n(\eta) &= \sum_{i=1}^M w_{ai}(\eta - \eta_i) \cdot w_{ai}(\eta + \Delta\eta_n - \eta_i) \\ &\quad \cdot \exp\left[-j2\pi \frac{R_{n_{c,i}}(\eta) + R_{n_i}(\eta)}{\lambda}\right] \\ &\approx \sum_{i=1}^M w_{ai}^2 \left(\eta + \frac{1}{2} \Delta\eta_n - \eta_i\right) \\ &\quad \cdot \exp\left[-j \frac{4\pi}{\lambda} R_{n_{c,i}} \left(\eta + \frac{1}{2} \Delta\eta_n\right)\right] \\ &\quad \cdot \exp\left[-\frac{j\pi v_a^2 \Delta\eta_n^2}{2R_{0i}\lambda}\right] \end{aligned} \quad (2)$$

其中  $\lambda$  为工作波长,  $\eta_i$  表示第  $i$  个散射点波束中心穿越时刻,  $w_{ai}$  分别表示方位向收发天线方向图。  $R_{0i} = \sqrt{y_i^2 + H^2}$  表示第  $i$  个点目标的零多普勒斜距。

### 2.2 方位向信号的空时频特性

首先分析方位向多通道信号之间的关系。由式(2)可知, 对于单个点目标, 不同通道方位向信号之间的主要差异在于一个常数相位和一个延时因子。距离压缩后每个点目标的大部分能量都集中在其所在距离线上, 因此可以逐个距离门对常数相位进行补偿。补偿后的方位信号近似表达式如下:

$$\begin{aligned} s'_n(\eta) &\approx \sum_{i=1}^M w_{ai}^2 \left(\eta + \frac{1}{2} \Delta\eta_n - \eta_i\right) \\ &\quad \cdot \exp\left[-j \frac{4\pi}{\lambda} R_{n_{c,i}} \left(\eta + \frac{1}{2} \Delta\eta_n\right)\right] \\ &\approx s_{n_c} \left(\eta + \frac{1}{2} \Delta\eta_n\right) \end{aligned} \quad (3)$$

以下的讨论均针对相位补偿后的方位向多通道信号。若 PRF 大于多普勒带宽, 对多通道信号进行方位向傅里叶变换得到

$$F_n(f_a) = F_{n_c}(f_a) \cdot \exp\left[j2\pi f_a \cdot \frac{1}{2} \Delta\eta_n\right] \quad (4)$$

式(4)说明  $N$  通道多普勒信号具有公共项  $F_{n_c}(f_a)$ , 而接收孔径空间位置的差异导致了附加的相位项  $\exp\left[j2\pi f_a \cdot \frac{1}{2} \Delta\eta_n\right]$ 。

由多普勒频率的物理意义可知, 目标方位角  $\phi(f_a)$  与多普勒频率  $f_a$  之间存在一一对应关系  $\cos(\phi(f_a)) = f_a \lambda / 2v_a$ , 当 PRF 小于多普勒带宽时, 多普勒谱发生混叠, 此时每个多普勒单元  $f_a$  包含  $P$  个信号分量 ( $P$  为混叠次数), 这些分量来自于不同的空间方位角。各模糊分量的中心频率为  $\mathbf{f} = \text{PRF} \cdot \left[-\frac{(P-1)}{2}, \dots, 0, \dots, \frac{P-1}{2}\right]^T$ , 对多普勒频带内任意频率点  $f_a \in [-\text{PRF}/2, \text{PRF}/2]$ , 各模糊频率组成矢量  $\mathbf{f}_a = \mathbf{f} + f_a$ , 令  $\phi_p$  表示  $\mathbf{f}_a(p)$  分量对应的方位角, 则混叠后的  $N$  波束多普勒信号为

$$\tilde{F}_n(f_a) = \sum_{p=1}^P F_{n_c}(\mathbf{f}_a(p)) \cdot \exp\left[j2\pi \frac{v_a \Delta\eta_n \cos(\phi_p)}{\lambda}\right] \quad (5)$$

从混叠后的  $N$  波束多普勒信号  $\tilde{\mathbf{F}}(f_a) = [\tilde{F}_1(f_a), \tilde{F}_2(f_a), \dots, \tilde{F}_N(f_a)]^T$  中提取出  $\mathbf{F} = [F_{n_c}(\mathbf{f}_a(1)), F_{n_c}(\mathbf{f}_a(2)), \dots, F_{n_c}(\mathbf{f}_a(p))]^T$   $P$  个非模糊分量即可实现多普勒解模糊。

## 3 基于自适应滤波的方位向信号重建

### 3.1 基于波束形成解多普勒模糊的原理

对于多普勒频带内任意频率点  $f_a \in [-\text{PRF}/2, \text{PRF}/2]$ , 为了从  $N$  通道多普勒信号  $\tilde{\mathbf{F}}(f_a)$  中提取出

$P$  个非模糊分量  $\mathbf{F}$ , 需要进行  $P$  次波束形成, 即空域滤波, 每次波束形成均保留 1 个有用信号而在其他  $P-1$  个模糊信号处形成零陷, 最后拼接成完整的多普勒谱。设  $N$  通道的空间导向矢量为  $\mathbf{z}(\phi_p)$ , 为了提取第  $k$  个模糊分量  $F_{n_k}(\mathbf{f}_a(k))$ , 需要构造权向量  $\mathbf{w}_k$  对  $\tilde{\mathbf{F}}(\mathbf{f}_a)$  进行滤波,  $\mathbf{w}_k$  需要满足

$$\mathbf{w}_k^H \mathbf{z}(\phi_i) = \begin{cases} 1, & i = k \\ 0, & i \neq k \end{cases} \quad i = 1, \dots, P, k = 1, \dots, P \quad (6)$$

构造矩阵  $\mathbf{Z} = [\mathbf{z}(\phi_1), \mathbf{z}(\phi_2), \dots, \mathbf{z}(\phi_P)]_{N \times P}$  和矩阵  $\mathbf{H}_k = [h_1, h_2, \dots, h_P]_{P \times 1}^T$ , 其中  $h_k = 1$ , 其它为零, 则由式(6)可求得加权矢量

$$\mathbf{w}_k = (\mathbf{Z}^H)^+ \mathbf{H}_k^H \quad (7)$$

其中  $(\cdot)^+$  表示矩阵求伪逆运算。

### 3.2 通道幅相误差和噪声存在时的稳健算法

3.1 节中论述的非自适应波束形成器是基于通道完全一致且无噪声环境下的求解, 虽然操作简单, 性能优良, 但该算法敏感于通道幅相误差与系统热噪声。对于实际多通道 SAR 系统, 导向矢量误差和系统噪声是不可避免的, 因此需要更为稳健的波束形成器。

假设子孔径个数  $N$  大于多普勒模糊次数  $P$ , 在噪声环境中,  $N$  通道的多普勒模糊信号可表示为

$$\mathbf{x}(f) = \sum_{i=1}^P \mathbf{z}(\phi_i) s_i(f) + \mathbf{e}(f) = \mathbf{Z}(f) \mathbf{s}(f) + \mathbf{e}(f) \quad (8)$$

其中  $\mathbf{x}(f)$ ,  $\mathbf{s}(f)$  和  $\mathbf{e}(f)$  分别表示  $N$  通道的混叠信号, 待求分量以及噪声的列向量形式。矩阵  $\mathbf{Z}(f) = [\mathbf{z}(\phi_1), \mathbf{z}(\phi_2), \dots, \mathbf{z}(\phi_P)]$  表示各个模糊分量对应的导向矢量矩阵。以求解  $\mathbf{w} = [w_1, w_2, \dots, w_N]^T$  提取第  $k$  个分量  $s_k(f)$  为例, 文献[13]指出, 当满足各个模糊分量互不相关且均与噪声均不相关的条件时, 求解权向量  $\mathbf{w}$  归结为一定约束条件下最小输出能量(MOE)准则对应的最优解的求解问题, 即

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{w}^H \mathbf{z}(\phi_k) &= 1 \\ \min_{\mathbf{w}} \mathbf{w}^H \mathbf{R}_{xx} \mathbf{w} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

如式(9)所示的波束形成器最早由 Capon 提出, 被称为最小方差无畸变(MVDR)波束形成器<sup>[13]</sup>。根据 Lagrange 乘子法求解这一最优化问题可得最优波束形成器为

$$\mathbf{w}_{\text{opt}} = \frac{\mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{z}(\phi_k)}{\mathbf{z}^H(\phi_k) \mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{z}(\phi_k)} \quad (10)$$

假设各通道噪声是方差为  $\sigma^2$  的加性白噪声, 信号与噪声不相关, 且各模糊分量相互独立, 由式(8)容易得到

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{xx} &= \mathbf{E}\{\mathbf{x}(f) \mathbf{x}^H(f)\} = \mathbf{Z}(f) \cdot \mathbf{E}\{\mathbf{s}(f) \mathbf{s}^H(f)\} \\ &\cdot \mathbf{Z}^H(f) + \sigma^2 \mathbf{I} = \mathbf{Z} \mathbf{P} \mathbf{Z}^H + \sigma^2 \mathbf{I} \end{aligned} \quad (11)$$

式中  $\mathbf{Z} = \mathbf{Z}(f)$ ,  $\mathbf{P} = \mathbf{E}\{\mathbf{s}(f) \mathbf{s}^H(f)\}$ 。  $\mathbf{R}_{xx}$  为对称阵, 令其特征分解为

$$\mathbf{R}_{xx} = \mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{U}^H \quad (12)$$

其中  $\mathbf{\Sigma} = \text{diag}\{\sigma_1^2, \dots, \sigma_N^2\}$ ,  $\mathbf{U} = [\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_N]$ ,  $\sigma_i^2$  为  $\mathbf{R}_{xx}$  的特征值, 对应特征向量为  $\mathbf{u}_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ 。对于均匀线阵, 不难得出矩阵  $\mathbf{Z}$  是列满秩的, 又考虑到各分量相互独立的假设, 因此存在  $\text{rank}\{\mathbf{Z} \mathbf{P} \mathbf{Z}^H\} = \text{rank}\{\mathbf{P}\} = P$ 。

### 3.3 经典 MVDR 最优波束形成器的局限性

3.2 节中 MVDR 最优波束形成器的推导是基于如下 3 个假设:

(1) 对于不同的  $\phi_i$  值, 向量  $\mathbf{z}(\phi_i)$  相互线性独立;  
(2) 加性噪声向量  $\mathbf{e}(f)$  的每个元素都是零均值的复高斯白噪声, 它们互不相关并且具有相同的方差  $\sigma^2$ ;

(3)  $P$  个模糊分量相互独立, 即  $\mathbf{E}\{s_i(f) s_j^H(f)\} = 0$  ( $i \neq j$ ) 或  $\text{rank}\{\mathbf{P}\} = P$ 。

对于等间距的多孔径天线, 假设(1)是成立的; 假设(2)一般也是可以满足的, 关键在于假设(3)的讨论。根据线性调频信号的特点, 同一个散射点回波的能量较均匀的分布于各个多普勒通道, 若需要重构的多普勒信号仅来自于少数强点目标, 则其分布于各个多普勒通道的模糊分量一定是高度相关的, 即上述假设(3)不再成立。综上, 在假设  $\mathbf{E}\{s_i(f) s_j^H(f)\} = 0$  ( $i \neq j$ ) 即  $\text{rank}\{\mathbf{P}\} = P$  不满足时, 多普勒解模糊演变为一个利用波束形成器实现相关源的分离问题, 此时传统的 MVDR 波束形成器已经不再适用。3.4 节针对相关源以及存在导向矢量误差的情况, 提出了一种新的解模糊算法, 结合了 MOE 准则以及子空间投影技术, 较传统 MVDR 波束形成器性能更为稳健。

### 3.4 基于 MOE 准则和子空间投影的解模糊算法

当各个模糊分量不满足完全独立的假设时,  $\text{rank}\{\mathbf{P}\} = K < P$ , 有

$$\begin{aligned} \mathbf{U}^H \mathbf{R}_{xx} \mathbf{U} &= \mathbf{U}^H \mathbf{Z} \mathbf{P} \mathbf{Z}^H \mathbf{U} + \sigma^2 \mathbf{U}^H \mathbf{U} \\ &= \text{diag}\{\alpha_1^2, \dots, \alpha_K^2, 0, \dots, 0\} + \sigma^2 \mathbf{I} \\ &= \text{diag}\{\alpha_1^2 + \sigma^2, \dots, \alpha_K^2 + \sigma^2, \sigma^2, \dots, \sigma^2\} \end{aligned} \quad (13)$$

这表明, 自相关矩阵  $\mathbf{R}_{xx}$  的特征值为

$$\lambda_i = \sigma_i^2 = \begin{cases} \alpha_i^2 + \sigma^2, & i = 1, \dots, K \\ \sigma^2, & i = K + 1, \dots, N \end{cases} \quad (14)$$

因此对  $\mathbf{R}_{xx}$  进行特征分解即可得到  $K$  个主特征值和  $N-K$  个相同的小特征值。设  $K$  个较大的主特征值为  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_K$ , 其相应的特征向量为  $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_K$ 。

记  $\mathbf{U} = [\mathbf{E}_S, \mathbf{E}_N]$ , 其中  $\mathbf{E}_S = [\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_K]$ ,

$\mathbf{E}_N = [\mathbf{u}_{p+1}, \mathbf{u}_{p+2}, \dots, \mathbf{u}_N]$ , 由  $\mathbf{E}_S$  和  $\mathbf{E}_N$  的列向量分别张成信号子空间和噪声子空间。设真实导向矢量分别为  $\hat{\mathbf{z}}(\phi_i) (i=1, 2, \dots, P)$ , 由于各个模糊分量  $\hat{\mathbf{z}}(\phi_i) \cdot \mathbf{s}_i(f)$  均为信号  $\mathbf{x}(f)$  的一部分, 因此导向矢量  $\hat{\mathbf{z}}(\phi_i)$  必定落在信号子空间中, 根据子空间投影理论<sup>[14]</sup>, 求得  $\mathbf{z}(\phi_i)$  在信号子空间的投影为

$$\hat{\mathbf{z}}(\phi_i) = (\mathbf{E}_S \mathbf{E}_S^H) \cdot \mathbf{z}(\phi_i), \quad i=1, 2, \dots, P \quad (15)$$

利用  $\mathbf{z}(\phi_i)$  在信号子空间的投影对其进行修正, 可以提高导向矢量的估计精度, 利于后续的波束形成处理。

根据 3.3 节的分析, 当各个模糊分量不满足相互独立假设时, Capon 算法解模糊性能的急剧下降, 针对此不足, 可以构造一个  $K$  次约束的 MOE 波束形成器。若在  $\mathbf{w}^H \hat{\mathbf{z}}(\phi_k) = 1$  的前提下, 令  $\mathbf{w}$  满足式(16)约束关系

$$\mathbf{w}^H \hat{\mathbf{z}}(\phi_i) = 0, \quad i \neq k \quad (16)$$

则输出能量变为

$$\mathbb{E} \left\{ \left| \mathbf{w}^H \mathbf{x}(f) \right|^2 \right\} = \mathbb{E} \left\{ \left| s_k(f) \right|^2 \right\} + \mathbf{w}^H \mathbf{R}_n \mathbf{w} \quad (17)$$

现利用 MOE 准则求出使输出功率最小的最优权向量, 设所有列向量  $\hat{\mathbf{z}}(\phi_i) (i \neq k)$  构成矩阵  $\mathbf{B} = [\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2, \dots, \mathbf{b}_{p-1}]$ , 根据 Lagrange 乘子法求解这一最优化问题, 可得最优权向量为

$$\mathbf{w}_{\text{opt}} = -\frac{1}{2} \lambda \mathbf{R}_{xx}^{-1} \hat{\mathbf{z}}(\phi_k) - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{P-1} \mu_i \mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{b}_i \quad (18)$$

将式(18)分别代入  $\mathbf{w}^H \hat{\mathbf{z}}(\phi_k) = 1$  和式(16)得到

$$\left. \begin{aligned} -\frac{1}{2} \left( \lambda \mathbf{b}_j^H \mathbf{R}_{xx}^{-1} \hat{\mathbf{z}}(\phi_k) + \sum_{i=1}^{P-1} \mu_i \mathbf{b}_j^H \mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{b}_i \right) &= 0 \\ -\frac{1}{2} \left( \lambda \hat{\mathbf{z}}^H(\phi_k) \mathbf{R}_{xx}^{-1} \hat{\mathbf{z}}(\phi_k) + \sum_{i=1}^{P-1} \mu_i \hat{\mathbf{z}}^H(\phi_k) \mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{b}_i \right) &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

其中  $j=1, \dots, P-1$ 。令待求参数构成向量  $\mathbf{A} = [\lambda, \mu_1, \dots, \mu_{p-1}]^T$ , 且设  $\mathbf{S} = \hat{\mathbf{z}}(\phi_k)$ ,  $\mathbf{0}$  表示一个  $(P-1) \times 1$  的零列向量, 则将式(19)写成矩阵形式

$$\begin{pmatrix} \mathbf{S}^H \mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{S} & \mathbf{B}^H \mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{S} \\ \mathbf{S}^H \mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{B} & \mathbf{B}^H \mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{B} \end{pmatrix} \cdot \mathbf{A} = \begin{pmatrix} -2 \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} \quad (20)$$

根据式(20)即可求得式(19)中  $P$  个待定参数。综上所述, 可将基于 MOE 准则和子空间投影的解方位模糊的 DPC-MAB SAR 成像算法归纳为图 2。在完成多通道方位向预处理后, 得到一个“单通道”数据, 此时方位向采样率变为原来的  $P$  倍, 然后利用传统单通道 SAR 的成像算法即可完成后续成像。

#### 4 仿真分析

假设载机工作在正侧视条带模式, 表 1 为机载 DPC-MAB SAR 系统仿真参数。2 m 的平面相控阵

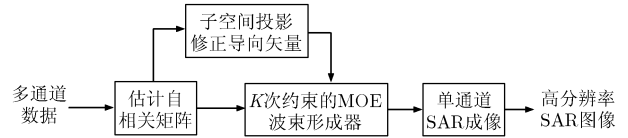


图 2 基于 MOE 准则和子空间投影的解方位模糊的 DPC-MAB SAR 成像算法

表 1 机载 DPC-MAB SAR 仿真参数

载机高度 $H$ (m)	5000	发射信号带宽 $B_r$ (MHz)	105
载机速度 $v_a$ (m/s)	142	中心频率 $f_c$ (GHz)	9.6
系统方位向子孔径个数 $n$	5	脉宽 $T_r$ ( $\mu$ s)	20
子孔径间距 $d$ (m)	0.4	脉冲重复频率 PRF (Hz)	250
信噪比 SNR(dB)	20	多普勒带宽 $B_a$ (Hz)	630

天线沿方位向等分为 5 个子孔径, 中间孔径为发射孔径, 系统信噪比 SNR 设为 20 dB。多普勒带宽为 630 Hz, 为了论证本文提出的多普勒解模糊算法, 将 PRF 设为 250 Hz, 此时模糊次数为 3。

图 3(a)为子孔径 1 的点目标成像结果及其方位向切片, SNR=20 dB。由于系统 PRF 小于多普勒带宽, 导致多普勒发生严重混叠, 图像在方位向产生 -17 dB 左右的虚假目标。图 3(b)和 3(c)分别为采用非自适应 DBF 算法和传统 Capon 最优波束形成器进行解模糊后的方位压缩结果, 5 个波束回波各自加入了 10%~50% 的通道幅度误差和  $10^\circ \sim 15^\circ$  的通道相位误差。图 3(b)表明通道幅相误差导致非自适应 DBF 算法性能的明显下降, 而图 3(c)中由于不同频率信号分量均来自同一个点目标, 因此各个模糊分量之间是高度相关的, 此时该算法将会导致模糊分量无法完全消除, 且会造成有用信号的衰减, 性能大大降低。图 3(d)为采用本文提出的基于多重约束条件及子空间投影技术的 MOE 波束形成器的处理结果, 从图中可见模糊信号得到了较好的抑制。表 2 为不存在和存在通道误差的情况下各种算法的压缩性能指标。

#### 5 实测论证

本文采用某 3 通道机载 SAR 系统的实测数据进行方位多波束处理。首先对该系统原始数据进行脉冲隔 3 抽 1 处理, 单波束方位模糊次数为 2。然后分别采用非自适应 DBF 算法和本文的算法进行解模糊处理, 得到图 4 所示的图像。由于方位向欠采样导致单通道成像结果在方位向发生较为严重的混叠, 如图 4(a)所示; 而采用非自适应 DBF 算法解模糊后的成像结果较单子带结果有较大改善, 但由于存在通道误差和各类噪声的缘故, 导致图像中强目

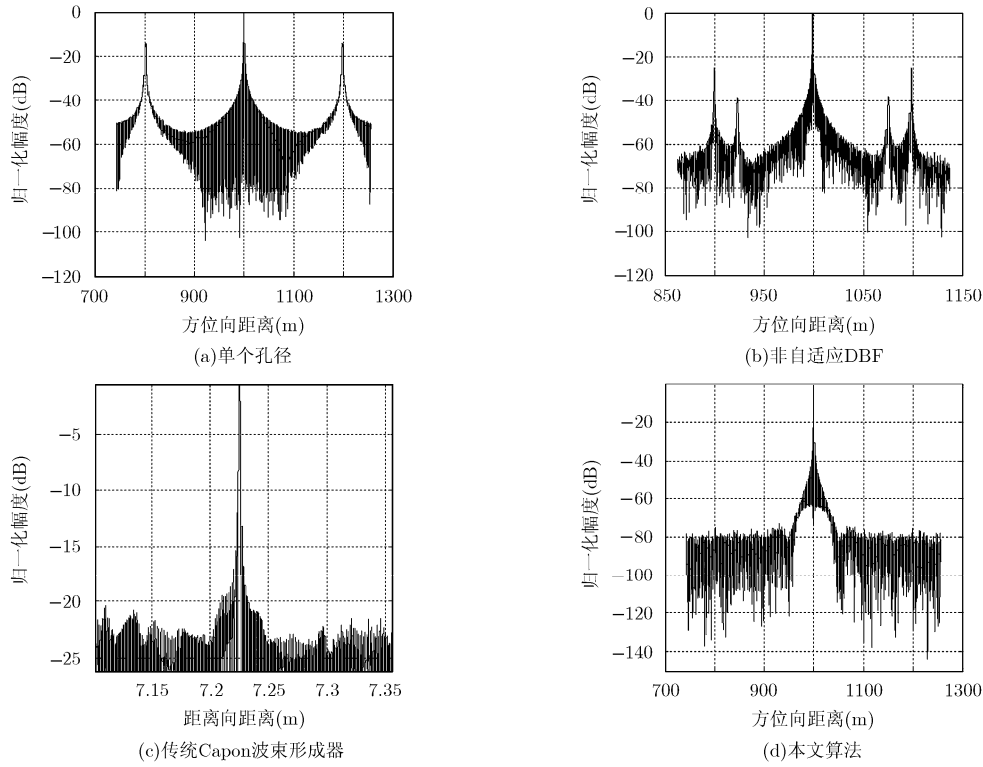


图 3 单通道方位向成像结果以及不同波束形成算法处理结果的方位向切片

表 2 不存在/存在通道误差情况下各种算法的压缩性能比较

算法类别	通道误差	$\rho_a$ (m)	PSLR1(dB)	ISLR1(dB)	$\rho_r$ (m)	PSLR2(dB)	ISLR2(dB)
重排	N	0.2160	-13.47	-8.6879	1.2563	-13.41	-10.2263
	Y	0.2160	-10.51	-6.3153	1.2563	-13.59	-10.2233
非自适应 DBF	N	0.2150	-13.52	-9.6808	1.2563	-13.36	-10.2709
	Y	0.2152	-9.99	-7.4811	1.2563	-13.32	-10.2713
Capon 波束形成器	N	0.2441	-12.25	-9.1245	1.2234	-12.00	-7.0230
	Y	0.2426	-9.07	-6.4172	1.2047	-12.06	-7.1247
本文提出的波束形成器	N	0.2152	-13.56	-9.6804	1.2563	-13.56	-10.2722
	Y	0.2152	-13.42	-9.0476	1.2563	-13.45	-10.2677

注： $\rho_a$  表示方位向分辨率，PSLR1 和 ISLR1 表示方位向峰值旁瓣比和积分旁瓣比； $\rho_r$  表示距离向分辨率，PSLR2 和 ISLR2 表示距离向峰值旁瓣比和积分旁瓣比；N 表示不存在通道误差，Y 表示存在通道误差。

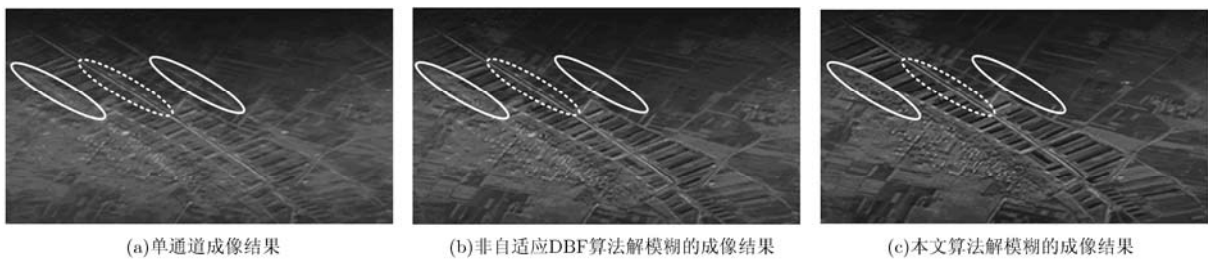


图 4 解模糊前后的成像结果对比

标在方位向还是存在较为明显的虚像，如图 4(b)所示；采用本文方法对导向矢量进行修正并基于多重约束条件下的 MOE 准则进行自适应的滤波后图像质量明显改善，几乎看不到虚假目标且图像对比度

较高，如图 4(c)所示。

为了量化评估不同处理方法得到的图像成像质量，选定一块区域进行模糊和信号能量比值的计算，如图 4 所示，虚线标注区域为强目标区域，从

图 4(a)和 4(b)中明显可观察到一次模糊信号,分布在左右两侧(实线标注区域),通过对该区域进行能量求和并与信号区域能量相比,可粗略得到归一化模糊比,计算结果如表 3 所示,可见本文方法具有较好的稳健性,方位模糊信号得到了有效的抑制。

表 3 图 4 中标注区域虚假目标与真实信号强度比值(单位为 dB)

模糊信号比	单通道	非自适应 DBF	本文方法
左模糊区域	-12.5	-21.4	-40.6
归一化模糊比			
右模糊区域	-11.3	-30.7	-50.1
归一化模糊比			

## 6 结论

偏置相位中心方位多波束(DPC-MAB)SAR 系统可以在保证方位向高分辨率的前提下降低对 PRF 的要求,本文详细推导了 DPC-MAB SAR 回波表达式,并对其空时频特性进行了分析。针对传统解模糊算法的不足与局限性,本文提出了一种基于子空间投影理论和多重约束条件的 MOE 波束形成算法,该算法首先自适应地估计统计自相关矩阵,根据子空间投影理论对理想导向矢量进行修正,然后利用多重约束条件有效抑制相关模糊分量,解模糊性能明显提升。仿真实验和实测数据处理均验证了其有效性。

## 参考文献

- [1] Currie A and Brown M A. Wide-swath SAR[J]. *IEE Proc. F-Radar Signal Process*, 1992, 139(2): 122-135.
  - [2] 邓云凯, 陈倩, 祁海明, 等. 一种基于频域子带合成的多发多收高分辨率 SAR 成像算法[J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(5): 1082-1087.  
Deng Yun-kai, Chen Qian, Qi Hai-ming, et al. A high-resolution imaging algorithm for MIMO SAR based on the sub-band synthesis in frequency domain [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(5): 1082-1087.
  - [3] Gebert N and Krieger G. Azimuth phase center adaptation on transmit for high-resolution wide-swath SAR imaging[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2009, 6(4): 782-786.
  - [4] 邵参观, 邓云凯, 冯锦. 通道不平衡对偏置相位中心多波束 SAR 性能影响的理论分析[J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(8): 1828-1832.  
Gao Can-guan, Deng Yun-kai, and Feng Jin. Theoretical analysis on the mismatch influence of displaced phase center multiple-beam SAR systems[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(8): 1828-1832.
  - [5] 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.
  - [6] Liu Guang-yan, Wang You-lin, and Lin You-quan. Unambiguous reconstruction and imaging of nonuniform sampling SAR signals[C]. *Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar*, Beijing, China, 2007: 253-256.
  - [7] Jing Wei, Xing Meng-dao, Qiu Cheng-wei, et al. Unambiguous reconstruction and high-resolution imaging for multiple-channel SAR and airborne experiment results[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2009, 6(1): 102-106.
  - [8] 齐维孔, 禹卫东. 基于滤波器组的星载 SAR DPC-MAB 技术方位向非均匀采样信号的重构 [J]. *系统工程与电子技术*, 2008, (7): 1218-1222.  
Qi Wei-kong and Yu Wei-dong. Reconstruction of non-uniform azimuth sampling signals of space borne SAR DPC-MAB technique based on filter banks [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2008, (7): 1218-1222.
  - [9] Zhou B L, Zhang S S, Zhang W, et al. A novel spectrum reconstruction algorithm based on FrFT for multiple azimuth beam SAR[C]. *IEEE International Conference on Information and Automation*, Harbin, China, 2010: 1218-1222.
  - [10] Feng Y, Zhu T, Yong X, et al. Impacts of velocity deviation on spaceborne high-resolution DPCA SAR[C]. *International Conference on Computational Problem-Solving*, Napoca, Romania, 2010: 442-445.
  - [11] 马仑, 李真芳, 廖桂生. 一种稳健的利用分布式小卫星获取宽域、高分辨 SAR 图像的方法[J]. *航空学报*, 2007, 28(5): 1190-1194.  
Ma Lun, Li Zhen-fang, and Liao Gui-sheng. Robust approach to achieve wide swath and high resolution SAR image by using distributed small satellites [J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2007, 28(5): 1190-1194.
  - [12] Gebert N, Krieger G, and Moreira A. Multichannel azimuth processing in ScanSAR and TOPS mode operation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(7): 2994-3008.
  - [13] Capon J. High-resolution frequency-wave number spectrum analysis[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1969, 57(8): 1408-1418.
  - [14] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 130-133.
- 陈倩: 女, 1986 年生, 博士生, 研究方向为多发多收合成孔径雷达系统与信号处理。  
邓云凯: 男, 1962 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为星载 SAR 系统总体设计。  
刘亚东: 男, 1983 年生, 博士, 研究方向为星载 SAR 系统设计。  
尚秀芹: 女, 1983 年生, 博士, 研究方向为自适应目标检测及阵列信号处理。