

## 多普勒频谱模糊情况下的星载方位向多通道 高分宽幅SAR-GMTI杂波抑制方法

张双喜<sup>\*①</sup> 乔宁<sup>①</sup> 邢孟道<sup>②</sup> 吴亿峰<sup>③</sup> 吴玉峰<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(西北工业大学电子信息学院 西安 710129)

<sup>②</sup>(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

<sup>③</sup>(雷华电子技术研究所 无锡 214063)

**摘要:** 该文提出了一种在多普勒频谱模糊情况下的星载方位向多通道高分宽幅合成孔径雷达地面运动目标检测(SAR-GMTI)系统的杂波抑制方法。首先,利用方位解线性调频对方位向多通道(HRWS) SAR-GMTI系统中的回波进行处理,得到杂波和动目标的粗聚焦图像。然后,将多通道SAR系统的粗聚焦图像表示为矩阵形式,并估计出相应的协方差矩阵。之后,用杂波协方差矩阵构造杂波空间的正交矢量,即最小特征值对应的特征向量。该方法需要一个冗余的通道自由度。由于杂波空间的正交矢量与杂波空间向量是正交的,因此可以用来抑制杂波。最后,通过仿真和实测数据实验结果验证该文所提杂波抑制方法的有效性。

**关键词:** 星载方位向多通道合成孔径雷达; 杂波抑制; 高分宽幅(HRWS); 方位解线性调频; 正交矢量

**中图分类号:** TN95

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2095-283X(2020)02-0295-09

**DOI:** 10.12000/JR20005

**引用格式:** 张双喜, 乔宁, 邢孟道, 等. 多普勒频谱模糊情况下的星载方位向多通道高分宽幅SAR-GMTI杂波抑制方法[J]. 雷达学报, 2020, 9(2): 295-303. doi: 10.12000/JR20005.

**Reference format:** ZHANG Shuangxi, QIAO Ning, XING Mengdao, *et al.* A novel clutter suppression approach for the space-borne multiple channel in the azimuth high-resolution and wide-swath SAR-GMTI system with an ambiguous Doppler spectrum[J]. *Journal of Radars*, 2020, 9(2): 295-303. doi: 10.12000/JR20005.

## A Novel Clutter Suppression Approach for the Space-borne Multiple Channel in the Azimuth High-resolution and Wide-swath SAR-GMTI System with an Ambiguous Doppler Spectrum

ZHANG Shuangxi<sup>\*①</sup> QIAO Ning<sup>①</sup> XING Mengdao<sup>②</sup>

WU Yifeng<sup>③</sup> WU Yufeng<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

<sup>②</sup>(National Key Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

<sup>③</sup>(Leihua Electronic Technology Research Institute, Wuxi 214063, China)

**Abstract:** A low pulse repetition frequency is required and an ambiguous Doppler spectrum should be considered to obtain a high-resolution and wide-swath Synthetic Aperture Radar-Ground Moving Target Indication (SAR-GMTI) system in the azimuth direction. In this study, we have proposed a novel clutter suppression approach, where the Doppler spectrum of the single channel echo is ambiguous, with respect to the

收稿日期: 2020-01-13; 改回日期: 2020-02-24; 网络出版: 2020-03-07

\*通信作者: 张双喜 zhangsx@nwpu.edu.cn \*Corresponding Author: ZHANG Shuangxi, zhangsx@nwpu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61801387); 中国博士后科学基金(2019M653741); 航空科学基金(ASFC-20172053018)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61801387), The Postdoctoral Science Foundation of China (2019M653741), The Aeronautical Science Foundation of China (ASFC-20172053018)

责任编辑: 朱岱寅 Corresponding Editor: ZHU Daiyin

space-borne multiple channels in an azimuth high-resolution and wide-swath SAR-GMTI system. Initially, the azimuth deramping operation is utilized to compress the ambiguous Doppler spectrum, where the signal of clutter or the moving target is focused toward only some azimuth Doppler-frequency bins. Further, a covariance matrix corresponding to the clutter is estimated in the azimuth deramping and range compression domain. Subsequently, the matrix eigenvalue decomposition technique is employed to obtain an eigenvector corresponding to the minimum eigenvalue. Herein, we intend to achieve redundant channel freedom to ensure the suppression of clutter. The obtained eigenvector can be considered to be the orthogonality vector of the clutter space, which denotes the orthogonality with respect to the signal space vector. Hence, we adopt the obtained eigenvector to appropriately suppress the clutter. Simultaneously, the signal of the moving target can be appropriately preserved. Finally, some experiments are conducted to validate the proposed clutter suppression approach.

**Key words:** Space-borne multi-channel in azimuth SAR; Clutter suppression; High-Resolution and Wide-Swath (HRWS); Azimuth Deramped operation; Orthogonality vector

## 1 引言

随着星载多通道合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)成像技术的发展,具有高分宽幅成像和地面动目标检测(Ground Moving Target Indication, GMTI)功能的星载雷达系统越来越受到重视<sup>[1-6]</sup>。目前,方位向多通道技术可用于准确重建非模糊多普勒频谱,有效解决距离宽幅与方位向高分辨率之间的冲突,获得星载高分辨宽测绘带(High-Resolution and Wide-Swath, HRWS) SAR图像<sup>[3-6]</sup>。在GMTI处理中,可以利用方位向多通道SAR系统中的冗余通道自由度来抑制杂波<sup>[7,8]</sup>。因此,星载多通道方位向HRWS SAR系统具有GMTI能力。

对于单平台星载多通道SAR系统,GMTI处理的关键问题是杂波抑制。典型的杂波抑制方法是位移相位中心天线(Displaced Phase Center Antenna, DPCA)算法<sup>[9,10]</sup>。采用DPCA技术抑制主瓣杂波时,在多级延迟行抵消器的第I级引入校正信号。然后,两个经过仔细校正的SAR数据或图像进行相干减除得到杂波抑制结果,用于检测动目标。在DPCA条件难以达到的情况下,提出了空时自适应处理方法(Space-Time Adaptive Processing, STAP)。空时滤波响应是根据输出信干噪比(Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR)最大化进行自适应

调整的,提高了雷达探测性能<sup>[11]</sup>。

针对方位向多通道HRWS SAR-GMTI系统中的实际杂波,本文提出了一种有效的杂波抑制方法。对于经典多信号分类(MULTIPLE SIGNAL CLASSIFICATION, MUSIC)<sup>[12-14]</sup>算法,用于信号处理的观测空间可分为信号子空间和噪声子空间,其中噪声子空间与信号子空间正交。受MUSIC方法的启发,星载方位向多通道SAR-GMTI系统中的杂波协方差矩阵可以用于构造杂波空间的正交矢量。然后,利用正交矢量在杂波方向形成的凹口来进行杂波抑制。这种方法至少需要一个冗余通道自由度,对于多通道系统,则要求通道数大于多普勒谱模糊数。

## 2 信号模型

本章将讨论方位向多通道HRWS SAR-GMTI系统的信号模型,其中包含杂波、动目标、系统的几何特性和调频傅里叶变换。

### 2.1 杂波的信号模型

图1表示有 $N$ 个通道的含动目标的SAR系统,接收通道的雷达以速度 $V$ 沿 $X$ 轴运动。对于单平台方位向多通道雷达系统,中间的通道用于发射信号, $N$ 个通道都可以接收回波。发射天线的坐标为 $(x_0 + d_n + Vt_m, 0, H)$ ,目标杂波的坐标为 $(x_i, y_i, 0)$ ,两者之间的斜距可以表示为

$$R_n(t_m) = \sqrt{R_0^2 - 2R_0V \left( t_m - \frac{x_i}{V} - \frac{d_n}{V} \right) \sin \theta + V^2 \left( t_m - \frac{x_i}{V} - \frac{d_n}{2V} \right)^2} \quad (1)$$

其中, $t_m$ 表示方位慢时间, $\theta$ 表示斜视角。在距离频率和方位慢时间域,第 $n$ 个通道的杂波回波可以表示为

$$S_n^c(f_r, t_m) = \sum_i \left\{ \sigma_i \cdot W_r(f_r) w_a(t_m) \exp \left( -j\pi \frac{f_r^2}{\gamma} \right) \exp \left[ -j4\pi \frac{(f_c + f_r) \cdot R_n(t_m)}{c} \right] \right\} \quad (2)$$

其中, $f_r$ 表示距离频率, $c$ 表示光速, $\sigma_i$ 表示第 $i$ 个目标杂波的散射系数。假设雷达系统工作在小斜视

模式,经过距离压缩后,斜距被近似扩展为II阶,第 $n$ 个通道的回波可以表示为

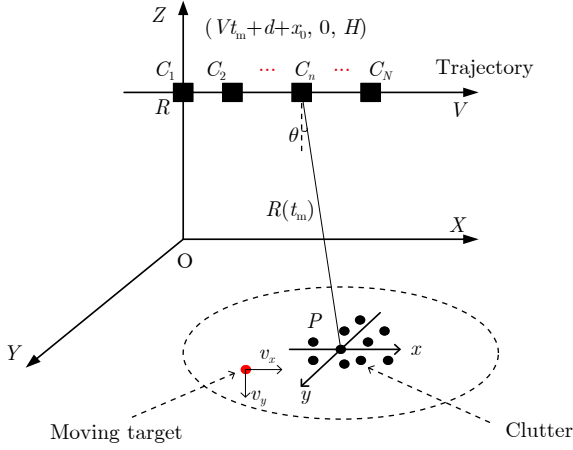


图1 方位向多通道HRWS SAR-GMTI系统的几何模型

Fig. 1 The geometry for the multi-channel in azimuth HRWS SAR-GMTI system

$$S_n^c(f_r, t_m) = \sum_i \sigma_i \cdot W_r(f_r) w_a(t_m) \exp \left[ -j4\pi \frac{(f_c + f_r) \cdot R_0}{c} \right] \cdot \exp \left[ -j4\pi \frac{(f_c + f_r) \cdot \left( -V_r \sin \theta_r \cdot \left( t_m - \frac{d_n}{2V} - \frac{x_i}{V} \right) \right)}{c} \right] \cdot \exp \left[ -j4\pi \frac{(f_c + f_r) \cdot \frac{V_r^2 \cos^2 \theta_r}{2R_r} \cdot \left( t_m - \frac{d_n}{2V} - \frac{x_i}{V} \right)^2}{c} \right] \quad (3)$$

然后, 通过调频傅里叶变换得到粗聚焦的SAR图像<sup>[7,15]</sup>, 调频傅里叶变换的相位补偿函数为

$$H_{n,1}(f_r, t_m) = \exp \left[ j2\pi \frac{(f_c + f_r) \cdot \left( -2V \sin \theta \left( t_m - \frac{d_n}{2V} \right) \right)}{c} \right] \exp \left[ j4\pi \frac{(f_c + f_r) \cdot \left( \frac{V^2 \cos^2 \theta}{2R_0} \left( t_m - \frac{d_n}{2V} \right)^2 \right)}{c} \right] \quad (4)$$

经过调频傅里叶变换之后, 可以得到模糊多普勒谱

$$S_n^c(f_r, f_a) = \sum_{k=-I}^I \left\{ S S^c(f_r, f_a + k \cdot \text{PRF}) \exp \left( -j2\pi (f_a + k \cdot \text{PRF}) \cdot \left( \frac{d_n}{2V} \right) \right) \right\} \quad (5)$$

其中

$$S^c(f_r, f_a) = \sum_i \sigma_i \cdot W_r(f_r) w_a(t_m) \exp \left[ -j2\pi \frac{(f_c + f_r) \cdot (-2 \sin \theta \cdot x_i)}{c} \right] \exp \left[ -j4\pi \frac{(f_c + f_r) \cdot R_0}{c} \right] \cdot \exp \left( -j4\pi \frac{(f_c + f_r) \cdot V^2 \cos^2 \theta}{2R_0} \left( \frac{x_i}{V} \right)^2 \right) \text{sinc} \left( f_a + \frac{2(f_c + f_r) \cdot V \cos^2 \theta}{c} x_i \right) \quad (6)$$

假设该多普勒谱的模糊数为 $2I + 1$ 。

## 2.2 动目标的信号模型

假设动目标沿发射平台运动轨迹的速度为 $v_a$ , 沿发射波束中心方向的速度为 $v_r$ 。与杂波回波类似, 第 $n$ 个通道接收到动目标回波为

$$S_n^{\text{mov}}(f_r, t_m) = W_r(f_r) w_a(t_m) \exp \left( -j\pi \frac{f_r^2}{\gamma} \right) \exp \left[ -j2\pi \frac{(f_c + f_r) \cdot 2R_0}{c} \right] \exp \left[ -j2\pi \frac{(f_c + f_r) \cdot 2v_r \left( t_m - \frac{x_i}{V} \right)}{c} \right] \cdot \exp \left[ -j2\pi \frac{(f_c + f_r) \cdot \left( -2(V + v_a) \sin \theta_r \left( t_m - \frac{d_n}{2V} - \frac{x_i}{V} \right) \right)}{c} \right] \cdot \exp \left[ -j4\pi \frac{(f_c + f_r) \cdot \frac{(V + v_a)^2 \cos^2 \theta}{2R_0} \left( t_m - \frac{d_n}{2V} - \frac{x_i}{V} \right)^2}{c} \right] \quad (7)$$

经过方位向调频傅里叶变换后, 动目标信号可以表示为

$$S_n^{\text{mov}}(f_r, f_a) = \sum_{k=-I}^I \left\{ S_n^{\text{mov}}(f_r, f_a + k \cdot \text{PRF}) \exp \left( -j2\pi (f_a + k \cdot \text{PRF}) \cdot \left( \frac{d_n}{2V} \right) \right) \exp(j\varphi_n) \right\} \quad (8)$$

其中

$$S^{\text{mov}}(f_r, f_a) = W_r(f_r) W_a(f_a) \exp\left[-j4\pi \frac{(f_c + f_r) \cdot R_0}{c}\right] \exp\left[j4\pi \frac{(f_c + f_r) \cdot v_r \frac{x_i}{V}}{c}\right] \exp\left[-j4\pi \frac{(f_c + f_r)}{c} \cdot (V + v_a)\right] \\ \cdot \sin\theta\left(\frac{x_i}{V_r}\right) \exp\left(-j4\pi \frac{(f_c + f_r)}{c} \frac{V^2 \cos^2\theta}{2R_0} \left(\frac{x_i}{V}\right)^2\right) \sin c\left(f_a + 2 \frac{(f_c + f_r)}{c} \frac{V \cos^2\theta}{R_0} x_i - \frac{(f_c + f_r) \cdot 2v_r}{c}\right) \quad (9)$$

并且

$$\varphi_n = -4\pi \frac{(f_c + f_r) \cdot v_r}{c} \cdot \left(\frac{d_n}{2V}\right) \quad (10)$$

### 3 基于正交矢量技术的杂波抑制

本章中将重点研究杂波抑制方法。首先，用矩阵形式表示出杂波和动目标的粗聚焦SAR图像，然后提出基于正交矢量技术的杂波抑制方法。

#### 3.1 粗聚焦SAR图像的矩阵表示

对于星载方位向多通道HRWS SAR系统，为了避免出现严重的距离模糊，要求方位向采样频率低于奈奎斯特采样频率<sup>[1]</sup>，即雷达发射端的脉冲重复频率(Pulse Repetition Rate, PRF)要求低于多普勒谱的带宽 $B_a$ 。令 $S^c(f_a)$ 表示在进行方位向采样之前，雷达回波经过调频傅里叶变换得到的方位信号； $P_n(f_a)$ 是低通滤波器，即第 $n$ 个通道的传递函数，可以表示为

$$\mathbf{Q}_n(f_a) = [Q_{n1}(f_a), \dots, Q_{nk}(f_a + k \cdot \text{PRF}), \dots, Q_{nK}(f_a + (K-1) \cdot \text{PRF})]_{1 \times K} \quad (11)$$

其中

$$Q_{nk}(f_a + k \times \text{PRF}) = \exp\left(-j2\pi (f_a + k \cdot \text{PRF}) \cdot \left(\frac{d_n}{V_r}\right)\right) \quad (12)$$

令

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} Q_{11}(f_a) & Q_{12}(f_a + \text{PRF}) & \dots & Q_{1K}(f_a + (K-1) \text{PRF}) \\ Q_{21}(f_a) & Q_{22}(f_a + \text{PRF}) & \dots & Q_{2K}(f_a + (K-1) \text{PRF}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Q_{N1}(f_a) & Q_{N2}(f_a + \text{PRF}) & \dots & Q_{NK}(f_a + (K-1) \text{PRF}) \end{bmatrix} \quad (13)$$

由于杂波分散在整个场景中，并且杂波回波来自于所有波束方向，因此，杂波的调频傅立叶频谱分布于整个频域 $\left[-\frac{\text{PRF}}{2}, \frac{\text{PRF}}{2}\right]$ 。由式(5)和文献[1]可知，粗聚焦SAR图像的多通道总输出为

$$\begin{bmatrix} S_1^c(f_a) \\ S_2^c(f_a) \\ \vdots \\ S_N^c(f_a) \end{bmatrix} = \mathbf{Q} \cdot \begin{bmatrix} S^c(f_a) \\ S^c(f_a + \text{PRF}) \\ \vdots \\ S^c(f_a + (K-1) \text{PRF}) \end{bmatrix} \quad (14)$$

杂波协方差矩阵可以表示为

$$\mathbf{R} = \mathbf{Q}_{N \times K} \cdot \text{diag}[r(f_a), \dots, r(f_a + k \cdot \text{PRF}), \dots, r(f_a + (K-1) \cdot \text{PRF})] \cdot \mathbf{Q}_{N \times K}^H \quad (15)$$

其中， $r(f_a + \text{PRF}) = E(S^c(f_a + \text{PRF}) S^{c*}(f_a + \text{PRF}))$ ， $\text{diag}[\cdot]$ 表示对角化操作。通常情况下，成像场景中只有少数动目标。与杂波相比，动目标的回波信号只来自于少数波束方向，则动目标只占据部分调频傅里叶频率和模糊分量。由式(14)可知，动目标的多通道总输出可以表示为

$$\begin{bmatrix} S_1^{\text{mov}}(f_a) \\ S_2^{\text{mov}}(f_a) \\ \vdots \\ S_N^{\text{mov}}(f_a) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \exp(j\varphi_1) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \exp(j\varphi_2) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \exp(j\varphi_N) \end{bmatrix} \cdot \mathbf{Q} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ S^{\text{mov}}(f_a + k \cdot \text{PRF}) \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

### 3.2 零空间构造与杂波抑制

对于方位向多通道HRWS SAR系统, 用空间采样代替了方位慢时间采样。根据奈奎斯特采样定理, 要求通道数大于多普勒频谱的模糊数, 即  $N > K$ 。零空间  $\mathbf{R}$  可以表示为

$$\mathbf{U} = [\mathbf{u}_1 \ \cdots \ \mathbf{u}_i \ \cdots \ \mathbf{u}_{N-K}] \quad (17)$$

其中

$$\mathbf{u}_i = [u_{1,i} \ \cdots \ u_{k,i} \ \cdots \ u_{N,i}]^H \quad (18)$$

可得

$$\mathbf{U}^H \cdot \mathbf{Q} = 0 \quad (19)$$

对于杂波而言:

$$\mathbf{U}^H \cdot \begin{bmatrix} S_1^c(f_a) \\ S_2^c(f_a) \\ \vdots \\ S_N^c(f_a) \end{bmatrix} = \mathbf{U}^H \cdot \mathbf{Q} \cdot \begin{bmatrix} S^c(f_a) \\ S^c(f_a + \text{PRF}) \\ \vdots \\ S^c(f_a + (K-1)\text{PRF}) \end{bmatrix} = 0 \quad (20)$$

式(20)表示杂波可以得到抑制, 说明零空间可以用来抑制杂波。对于动目标, 可以得到

$$\mathbf{U}^H \cdot \begin{bmatrix} S_1^{\text{mov}}(f_a) \\ S_2^{\text{mov}}(f_a) \\ \vdots \\ S_N^{\text{mov}}(f_a) \end{bmatrix} = \mathbf{U}^H \cdot \begin{bmatrix} \exp(j\varphi_1) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \exp(j\varphi_2) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \exp(j\varphi_N) \end{bmatrix} \cdot \mathbf{Q} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ S^{\text{mov}}(f_a + k \cdot \text{PRF}) \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

因为等效通道相位失配是由于动目标速度引起的, 则  $\varphi_n \neq 0$ , 此外

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \exp(j\varphi_1) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \exp(j\varphi_2) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \exp(j\varphi_N) \end{bmatrix} \neq 0 \quad (22)$$

因此

$$\mathbf{U}^H \cdot \begin{bmatrix} \exp(j\varphi_1) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \exp(j\varphi_2) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \exp(j\varphi_N) \end{bmatrix} \cdot \mathbf{Q} \neq 0 \quad (23)$$

并且

$$\mathbf{U}^H \cdot \begin{bmatrix} S_1^{\text{mov}}(f_a) \\ S_2^{\text{mov}}(f_a) \\ \vdots \\ S_N^{\text{mov}}(f_a) \end{bmatrix} \neq 0 \quad (24)$$

将式(22)与式(19)进行对比, 得到由动目标速度引起的等效相位失配。这意味着动目标信号被保留, 即星载方位向多通道雷达系统可以用零空间方法进行杂波抑制。

### 3.3 零空间划分与正交矢量选择

通常平台运动速度、系统的天线波束宽度和 PRF 是已知的, 由此可以来计算杂波的多普勒带宽

和多普勒模糊数。假设接收天线的波束宽度为  $\psi$ , 杂波回波的多普勒带宽为

$$B_a = 2 \cdot \frac{2V \cdot \sin\left(\frac{\psi}{2}\right)}{\lambda} \approx \frac{2V \cdot \psi}{\lambda} \quad (25)$$

多普勒模糊次数定义为

$$K = \left\lceil \frac{B_a}{\text{PRF}} \right\rceil \quad (26)$$

其中  $\lceil \cdot \rceil$  表示向上取整。

在实际数据处理过程中, 杂波的协方差矩阵可以直接利用回波数据进行估计。对估计得到协方差进行特征值分解, 最小的  $N - K$  个特征值分别对应的特征向量为  $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_{N-K}$ 。这些特征值构造的空间对应零空间  $\mathbf{R}$ 。

以下将讨论在零空间中选择杂波空间正交矢量进行杂波抑制:

(1) 当  $N - K = 1$  时, 零空间  $\mathbf{R}$  的维度为 1, 即最小特征值对应特征向量构造零空间。因此, 特征向量即为正交矢量, 利用该特征向量可以有效对杂波进行抑制。

(2) 当  $N - K \geq 2$  时, 考虑到杂波存在非平稳特性, 杂波子空间信号会泄露到零空间, 为了尽可能避免非平稳杂波对正交矢量的影响, 选择最小特征对应的特征向量为正交矢量, 并进行杂波抑制。

在本方法中选择协方差矩阵最小特征值对应的特征向量为正交矢量进行杂波抑制，需要指出的是当  $N - K$  值越大，越能有效地克服杂波非平稳特性对正交矢量的影响，进而提升杂波抑制性能。

### 4 实验

本节通过仿真实验和实测数据验证了基于零空间技术的星载方位向多通道HRWS SAR系统的杂波抑制方法。

#### 4.1 单平台SAR系统的仿真实验

(1) 数据描述：首先，用单平台方位向多通道HRWS SAR系统对回波进行仿真，系统的主要参数如表1所示。系统的通道数是7，多普勒模糊数是6，冗余通道自由度是1，使用以上参数构造杂波抑制的零空间。除此之外，当第4条通道发射线性调频信号时，所有通道同时接收回波。为了分析杂波抑制方

法的有效性，在仿真实验中加入运动速度为15 m/s的动目标，同时只考虑一个杂波目标。

(2) 结果与分析：一个通道接收的回波如图2(a)所示，经过方位傅里叶变换，相应的多普勒频谱如图2(b)所示。由于多普勒模糊数是6，因此动目标和杂波的多普勒谱占据了所有的多普勒频率单元。如图2(c)所示，通过CFT获得动目标和杂波的粗聚

表 1 单平台方位向多通道HRWS SAR系统的主要仿真参数  
Tab. 1 Main system parameters for the simulation single-platform multi-channel in azimuth HRWS SAR system

参数	数值	参数	数值
载波频率	5.4 GHz	通道数	7
SAR的有效速度	7552 m/s	平台高度	600 km
中心线距离	800 km	多普勒模糊数	6
脉冲重复频率(PRF)	400 Hz	发送信号的带宽	200 MHz

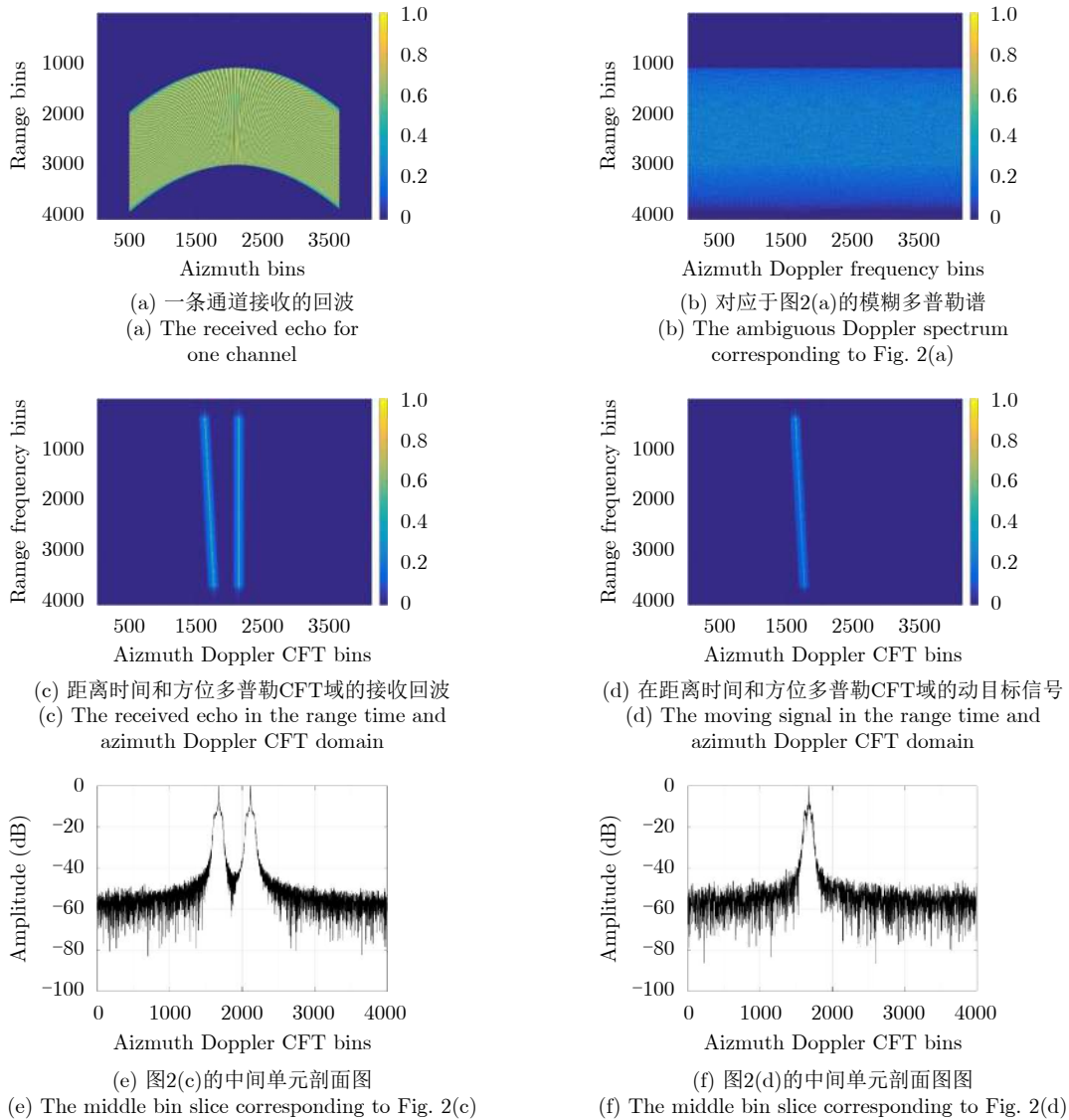


图 2 单平台多通道HRWS SAR系统的杂波抑制

Fig. 2 Clutter suppression for the single-platform multi-channel HRWS SAR system

焦图像, 只有部分多普勒CFT单元被多普勒谱占据。图2(e)是中间距离单元对应的方位剖面图。然后, 用本文提出的杂波抑制方法, 通过式(23)构造零空间。经过杂波抑制后, 距离时间和方位多普勒CFT域的结果如图2(d)所示。图2(f)是与图2(d)对应的方位剖面图, 结果说明杂波的方位向多普勒CFT谱被抑制, 动目标信号被保留。

#### 4.2 单平台MC-HRWS SAR的验证实测数据

(1) 数据描述: 由于星载方位向多通道高分宽幅SAR-GMTI系统实测数据缺乏, 本实验采用该体制下的机载验证系统的数据进行分析。在机载验证系统的回波实测数据采集过程中, 机载单平台方位向多通道HRWS SAR系统工作正侧视模式, 载波为C波段, 系统的主要参数如表2所示。通道数

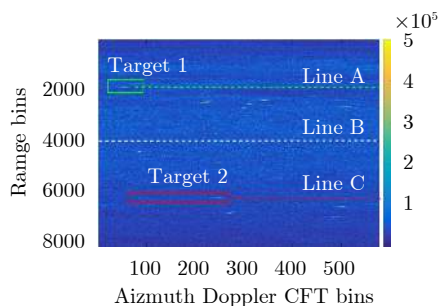
是6, 多普勒模糊数是5, 这意味着有一个冗余通道自由度被用来构造杂波抑制的零空间。此外, 成像场景中有3个不相关的动目标。

(2) 结果与分析: 图3(a)是机载单平台方位向

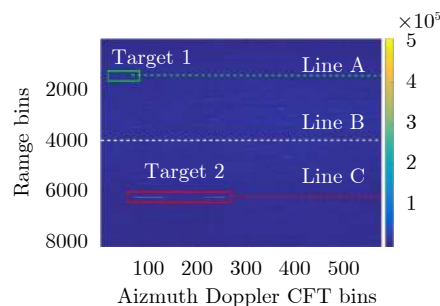
表2 实际机载验证系统(单平台方位向多通道HRWS SAR系统)主要参数

Tab. 2 Main system parameters for the airborne real single-platform multi-channel in azimuth HRWS SAR system

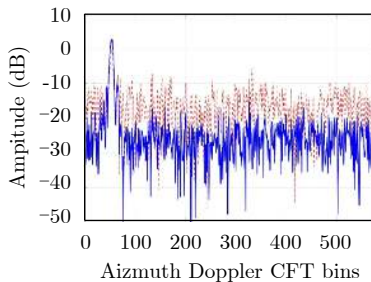
参数	数值	参数	数值
载波频率	5.0 GHz	通道数	6
SAR的有效速度	110 m/s	平台高度	5.5 km
中心线距离	15 km	多普勒模糊数	5
PRF	200 Hz	发送信号的带宽	150 MHz



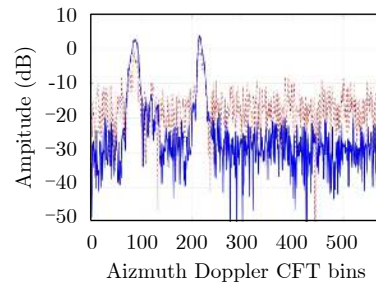
(a) 在距离压缩和方位多普勒CFT域接收的回波  
(a) The received echo in range compression and azimuth Doppler CFT domain



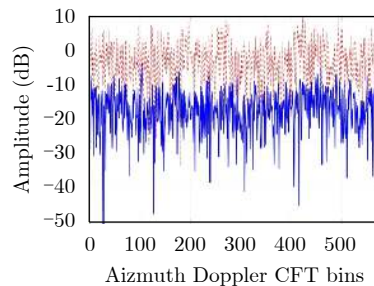
(b) 杂波抑制后距离压缩和方位多普勒CFT域的动目标回波  
(b) The moving target echo in range compression and azimuth Doppler CFT domain after clutter suppression using the proposed approach



(c) 图3(a)和图3(b)中线段A对应的距离单元信号的对比  
(c) A comparison between the range bin signal corresponding to Line A in Fig. 3(a) and Fig. 3(b)



(d) 图3(a)和图3(b)中线段B对应的距离单元信号的对比  
(d) A comparison between the range bin signal corresponding to Line B in Fig. 3(a) and Fig. 3(b)



(e) 图3(a)和图3(b)中线段C对应的距离单元信号的对比  
(e) A comparison between the range bin signal corresponding to Line C in Fig. 3(a) and Fig. 3(b)

图3 基于单平台MC-HRWS SAR实测数据的杂波抑制

Fig. 3 The clutter suppression processing for the real measured single-platform MC-HRWS SAR data

多通道HRWS SAR系统的原始数据, 将其转换到距离压缩和方位多普勒CFT域, 然后用冗余通道自由度构造杂波抑制的零空间。经过杂波抑制后, 距离压缩和方位多普勒CFT域的回波如图3(b)所示。为了方便分析杂波抑制方法的性能, 将图3(a)中分别用线段A, B, C标记的信号进行对比。图3(a)和图3(b)中线段A分别对应两个距离单元信号, 两个信号的对比如图3(c)所示。在图3(c)中, 将幅度转化为dB单位, 对杂波抑制前的最大信号幅度进行归一化处理。图3(d)是图3(a)和图3(b)中线段B对应信号的对比结果, 图3(c)和图3(d)显示杂波被抑制了10 dB。在杂波抑制时, 不同通道的动目标信号相互累加, 因此, 经过杂波抑制的动目标信号幅度高于0 dB, 如图3(c)和图3(d)所示。然后, 用线段C标记的信号进行杂波抑制性能的量化分析, 该信号中不含动目标。结果如图3(e)所示, 抑制前杂波的平均杂波幅度为-11.57 dB, 抑制后杂波的平均幅度为-22.86 dB, 则杂波抑制率为11.29 dB, 说明基于零空间技术的杂波抑制方法能够有效抑制杂波。

## 5 结束语

本文研究了单平台方位向多通道HRWS SAR系统的SAR-GMTI性能。当多通道系统具有冗余信道自由度时, 可以得到杂波的正交矢量空间。考虑到正交矢量与杂波对应的信号空间向量是正交的, 因此采用杂波正交矢量来抑制杂波。由于动目标的速度变化会带来相位变化, 因此在杂波抑制过程中可以保留动目标信号。最后, 通过方位向多通道SAR-GMTI数据仿真和实测实验, 验证了本文方法的准确性和有效性。

## 参 考 文 献

- [1] GEBERT N. Multi-channel azimuth processing for high-resolution wide-swath SAR imaging[D]. [Ph.D. dissertation], Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, 2009.
- [2] 邢孟道, 林浩, 陈溅来, 等. 多平台合成孔径雷达成像算法综述[J]. 雷达学报, 2019, 8(6): 732–757. doi: 10.12000/JR19102. XING Mengdao, LIN Hao, CHEN Jianlai, *et al.* A review of imaging algorithms in multi-platform-borne synthetic aperture radar[J]. *Journal of Radars*, 2019, 8(6): 732–757. doi: 10.12000/JR19102.
- [3] KIM J H, YOUNIS M, PRATS-IRAOLA P, *et al.* First spaceborne demonstration of digital beamforming for azimuth ambiguity suppression[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(1): 579–590. doi: 10.1109/TGRS.2012.2201947.
- [4] LI Zhenfang, WANG Hongyang, SU Tao, *et al.* Generation of wide-swath and high-resolution SAR images from multichannel small spaceborne SAR systems[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2005, 2(1): 82–86. doi: 10.1109/LGRS.2004.840610.
- [5] SIKANETA I, GIERULL C H, and CERUTTI-MAORI D. Optimum signal processing for multichannel SAR: With application to high-resolution wide-swath imaging[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(10): 6095–6109. doi: 10.1109/TGRS.2013.2294940.
- [6] 邓云凯, 赵凤军, 王宇. 星载SAR技术的发展趋势及应用浅析[J]. 雷达学报, 2012, 1(1): 1–10. doi: 10.3724/SP.J.1300.2012.20015. DENG Yunkai, ZHAO Fengjun, and WANG Yu. Brief analysis on the development and application of spaceborne SAR[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(1): 1–10. doi: 10.3724/SP.J.1300.2012.20015.
- [7] SJÖGREN T K, VU V T, PETERSSON M I, *et al.* Suppression of clutter in multichannel SAR GMTI[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(7): 4005–4013. doi: 10.1109/TGRS.2013.2278701.
- [8] ZHANG Shuangxi, XING Mengdao, XIA Xianggen, *et al.* Robust clutter suppression and moving target imaging approach for multichannel in azimuth high-resolution and wide-swath synthetic aperture radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(2): 687–709. doi: 10.1109/TGRS.2014.2327031.
- [9] WANG H S C. Mainlobe clutter cancellation by DPCA for space-based radars[C]. The 1991 IEEE Aerospace Applications Conference Digest, Crested Butte, USA, 1991: 1–128. doi: 10.1109/AERO.1991.154520.
- [10] 王肖洋, 高贵, 周石琳, 等. 一种基于双通道DPCA的SAR-GMTI杂波抑制方法[J]. 雷达学报, 2014, 3(2): 241–248. doi: 10.3724/SP.J.1300.2014.13121. WANG Xiaoyang, GAO Gui, ZHOU Shilin, *et al.* A clutter suppression approach for SAR-GMTI based on dual-channel DPCA[J]. *Journal of Radars*, 2014, 3(2): 241–248. doi: 10.3724/SP.J.1300.2014.13121.
- [11] KLEMM R. Introduction to space-time adaptive processing[J]. *Electronics & Communication Engineering Journal*, 1999, 11(1): 5–12. doi: 10.1049/eej:19990102.
- [12] TENNETI S V and VAIDYANATHAN P P. iMUSIC: A family of MUSIC-like algorithms for integer period estimation[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2019, 67(2): 367–382. doi: 10.1109/TSP.2018.2879039.
- [13] 张兴良, 王可人, 樊甫华. 典型阵列快速MUSIC算法研究[J]. 雷达学报, 2012, 1(2): 149–156. doi: 10.3724/SP.J.1300.2012.20026. ZHANG Xingliang, WANG Keren, and FAN Fuhua. Study on fast MUSIC algorithm with typical array[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(2): 149–156. doi: 10.3724/SP.J.1300.2012.



20026.

- [14] 蒋柏峰, 吕晓德, 向茂生. 基于广义MUSIC 算法的低仰角估计新方法[J]. 雷达学报, 2103, 2(4): 422–429. doi: [10.3724/SP.J.1300.2013.13090](https://doi.org/10.3724/SP.J.1300.2013.13090).

JIANG Baifeng, LÜ Xiaode, and XIANG Maosheng. A new low-elevation estimation method based on a general MUSIC algorithm[J]. *Journal of Radars*, 2103, 2(4): 422–429. doi:

[10.3724/SP.J.1300.2013.13090](https://doi.org/10.3724/SP.J.1300.2013.13090).

- [15] ZHANG Shuangxi, XING Mengdao, XIA Xianggen, *et al.* A robust imaging algorithm for squint mode multi-channel high-resolution and wide-swath SAR with hybrid baseline and fluctuant terrain[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2015, 9(8): 1583–1598. doi: [10.1109/jstsp.2015.2464182](https://doi.org/10.1109/jstsp.2015.2464182).

### 作者简介



张双喜(1984–), 男, 福建东山县人, 现为西北工业大学电子信息学院副教授, 硕士生导师。2014年获西安电子科技大学博士学位, 2014年至2016年在新加坡国立大学从事博士后研究工作。博士论文获得中国电子教育学会首届优秀博士学位论文和陕西省优秀博士学位论文。主要研究: 星载高分辨宽测绘带雷达成像、雷达预警。获2020年“陕西省青年科技新星”。任《雷达学报》青年编委, APSAR-2019分会场主席, APMC-2019分会场主席, ACES-china 2017分会场主席及召集人。

E-mail: [shuangxizhang1984@163.com](mailto:shuangxizhang1984@163.com)



乔宁(1997–), 女, 河南洛阳人, 西北工业大学本科生。研究方向为空时二维信号处理, 雷达预警。

E-mail: [qning@mail.nwpu.edu.cn](mailto:qning@mail.nwpu.edu.cn)



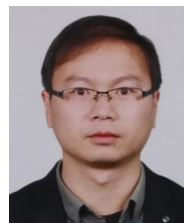
邢孟道(1975–), 男, 浙江嵊州人, 博士生导师、教授, 现任西安电子科技大学前沿交叉研究院副院长。2002年获西安电子科技大学工学博士学位并留校工作, 2004年破格评为教授。2018年成为中国电子学会会士。曾获国家杰出青年科学基金、国防科技卓越青年人才基金、中青年科技创新领军人才。曾获陕西省科学技术奖一等奖、陕西省创新团队。主要研究雷达成像, 侧重于精细成像、灵活成像和大斜视成像等。先后主持国家973、863计划以及预研等多个项目。近五年在TGRS和JSTAR等国际遥感期刊发表论文113篇, SCI他引1617次, H因子42。培养和协助培养“百优”和“省优”博士论文6篇。任IEEE TGRS副主编、IEEE Fellow等。近五年连续入选Elsevier电子和电气工程领域“中国高被引学者榜单”。

E-mail: [xmd@xidian.edu.cn](mailto:xmd@xidian.edu.cn)



吴亿锋(1988–), 男, 中国航空工业集团公司雷华电子技术研究所高级工程师, 主要从事自适应信号处理、人工智能等相关研究。

E-mail: [yifengw@126.com](mailto:yifengw@126.com)



吴玉峰(1985–), 男, 浙江衢州人, 博士, 高级工程师。现为中国航空工业集团公司雷华电子技术研究所系统设计师, 主要研究方向为SAR系统设计、SAR成像算法。

E-mail: [wyf1176@163.com](mailto:wyf1176@163.com)