

# 基于特征分解的 SAR 射频干扰抑制方法

于春锐 张永胜 董 臻 梁甸农

(国防科技大学电子科学与工程学院, 长沙, 410073)

**摘 要:** 合成孔径雷达容易受到射频干扰的影响, 严重影响成像质量。本文针对合成孔径雷达面临的射频干扰问题, 分析了射频干扰(RFI)的信号特性和信号模型, 根据 RFI 信号功率高、频带窄的特点, 提出了基于特征分解的干扰抑制方法。其基本思想是: 通过对观测数据矩阵进行特征分解, 根据特征值分布构造干扰子空间和信号子空间, 利用二者的正交性抑制干扰信号。本文首先介绍了特征分解方法的基本原理, 在此基础上, 基于 MDL 准则判断主特征值的个数, 提出了基于特征值分布的 RFI 检测方法, 并进一步, 利用特征向量构造相应的干扰子空间和信号子空间, 给出了基于特征分解的 RFI 抑制方法。基于 SAR 实测数据的仿真实验表明该方法可以有效的抑制 RFI, 且尽可能的保留目标回波。

**关键词:** 合成孔径雷达; 射频干扰抑制; 特征分解

**中图分类号:** TN97      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1003-0530(2011)11-1696-05

## RFI suppression for SAR based on Eigen-decomposition method

YU Chun-rui ZHANG Yong-sheng DONG Zhen LIANG Dian-nong

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The performance of synthetic aperture radar (SAR) may be affected by all kinds of radio frequency interference (RFI). Based on the RFI characteristics of high power and narrow band, a novel RFI suppression method based on eigen-decomposition is proposed for SAR. This method decomposes the eigenvectors of the received signal with RFI into interference subspace and signal subspace, and the orthogonality of the two subspaces is used to suppress the RFI signals. This paper describes the characteristics of the basic principles of eigen-decomposition, and proposes a new RFI detection method based on the MDL criterion to determine the number of main eigenvalues, and further, the eigenvectors are used to construct the corresponding interference subspace and signal subspace, and the eigen-decomposition based method for RFI suppression are proposed. The experimental results based on SAR real data shows that are also shown to verify the proposed algorithm.

**Key words:** synthetic aperture radar; radio frequency interference suppression; eigen-decomposition

## 1 引言

合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 具有全天时、全天候工作能力, 在资源勘察、环境监测、海洋和地壳观测、灾害预警和军事侦察等领域发挥着越来越大的作用。但是, 一些研究表明在某些地区射频干扰 (Radio Frequency Interference, RFI) 对 SAR 系统的影响是非常严重的<sup>[1]</sup>。

RFI 作为一种无意干扰, 是和平时期星载 SAR 系统面临的主要干扰威胁。工作频段较低的 SAR 系统特别容易受到 RFI 的影响, 以 L 波段 SAR 为例, 该频段被

国际电信联盟分配给地面通信系统、GPS、军民用地基监视雷达使用, 这些都会对 SAR 系统造成影响。根据日本和其它国家对 JERS-1 SAR 的成像处理结果的统计, 27% 的成像结果由于受到 RFI 的影响造成图像质量下降<sup>[2]</sup>。

RFI 的存在会显著降低 SAR 图像质量, 导致 SAR 图像对比度的下降, 从而影响 SAR 对目标探测检测和识别。能量较大的 RFI 会在 SAR 图像中产生近似沿距离向的亮线, 遮盖真实的地面场景; 能量较小的 RFI 在 SAR 图像中的表现可能不明显, 但是它对此为基础的 InSAR 系统的干涉相位的影响很大<sup>[3, 4]</sup>。

为了获得高质量的 SAR 图像产品,最好的方法是在成像处理以前抑制 RFI 信号。为了消除 RFI 的影响,国内外研究人员相继提出了一些 RFI 抑制算法。对于时间上相对连续的窄带 RFI,通过在距离频域使用陷波器就可以有效的抑制干扰的影响<sup>[2,5]</sup>。但频域陷波类 RFI 抑制方法,需要干扰频率的先验信息或者对于干扰频率进行估计,文献<sup>[6]</sup>提出了一种基于通道均衡的 RFI 抑制方法,该方法简单稳定,并且巧妙的避免了上述问题。但是在相对复杂的电磁环境中,RFI 在 SAR 各脉冲之间是时变的,上述基于陷波思想的方法会造成较大的有用信号的损失,进而影响 SAR 成像质量。针对这种时变 RFI,相关文献研究了基于干扰估计抵消滤波的参数化 RFI 抑制方法<sup>[7-10]</sup>,这一类方法的基本思想是:对 RFI 进行建模,将回波信号和系统噪声之和作为观测噪声,按照一定的准则估计干扰,再从接收信号中消去干扰。基于干扰估计抵消滤波的 RFI 抑制方法的效果依赖于干扰模型的准确性,但是建模的过程一般比较繁琐,并且在模型存在误差时会导致对 RFI 的估计不准确,同时计算量一般比较大,实时性不好。文献<sup>[11]</sup>提出一种基于特征子空间滤波的 RFI 抑制方法,可以有效的抑制时变 RFI,但是该方法在实现过程中的计算复杂度随距离向采样点数的增加而变大,并且主要适用于干扰功率远大于回波功率的情况。

本文首先分析了 RFI 的特性,建立了受到 RFI 影响的 SAR 信号模型;然后介绍了特征分解的基本原理,提出了基于特征值分布的 RFI 检测方法,并在此基础上给出了基于特征分解的 RFI 抑制方法;最后通过仿真实验验证了方法的有效性。

## 2 RFI 的特性与信号模型

虽然 SAR 成像处理器通过二维匹配滤波对回波进行相干处理,对干扰成份起到一定程度的抑制作用,但如果 RFI 信号具有远高于系统背景噪声的功率电平,仍会对 SAR 图像造成不同程度的影响。通过对大量实测数据的分析,可以发现 RFI 信号有以下特性:

(1) 信号功率高。通过对 SAR 工作频段内各种无线电业务的分析,RFI 辐射源主要来自于各种地面雷达和通信系统,而这些辐射源一般都具有很大的发射功率。同时,相对于 SAR 回波的双程延迟,RFI 信号可以占据单程延迟的优势。尽管由于雷达天线与 RFI 辐射源的相对位置变化以及 RFI 持续时间的长短不同,RFI 的绝对功率很难确定,但是通常情况下 RFI 的功率会高于目标回波和热噪声。

(2) 信号带宽窄。虽然 SAR 工作频段同时被大量

的无线电业务使用,但是根据无线电管理规则<sup>[12,13]</sup>的分配,各种无线电系统的带宽都被限制在比较窄的范围。相对于 SAR 系统带宽,RFI 信号在频域呈现尖峰状,表现出极强的窄带特性,而 SAR 目标回波信号为宽带信号,与干扰信号相比具有类似噪声的平坦功率谱。

对于一条距离线,SAR 接收信号  $\mathbf{x} = \{x_k | k=1, \dots, N\}$  可以表示为<sup>[6]</sup>:

$$\mathbf{x} = \mathbf{s} + \mathbf{n} + \mathbf{j} \quad (1)$$

其中  $\mathbf{s} = \{s_k | k=1, \dots, N\}$ 、 $\mathbf{n} = \{n_k | k=1, \dots, N\}$ 、 $\mathbf{j} = \{j_k | k=1, \dots, N\}$  分别代表理想的目标回波信号、系统噪声以及 RFI 信号, $N$  为距离向采样点数。在雷达接收机频带内,系统噪声  $\mathbf{n}$  可以近似为同分布的零均值复高斯随机过程;而由于沿距离向的地物目标一般是不相关的、分布不均匀的,目标回波信号  $\mathbf{s}$  具备类似白噪声的平坦功率谱。SAR 接收数据  $\mathbf{x} = \{x_k\}$  的采样频率一般仅略大于系统带宽(即  $\mathbf{n}$  和  $\mathbf{s}$  的功率谱宽度近似相等),可以近似认为  $\mathbf{n}$  和  $\mathbf{s}$  为白噪声序列。从而公式(1)可写为:

$$\mathbf{x} = \mathbf{j} + \mathbf{w} \quad (2)$$

其中  $\mathbf{w} = \mathbf{s} + \mathbf{n}$ 。根据上述分析, $\mathbf{w} = \{w_k\}$  近似为独立同分布的高斯白噪声,假设其平均功率为  $\sigma_w^2$ 。

根据 RFI 的窄带特性,则一条距离线中的窄带 RFI 可近似视作复正弦信号的叠加,假设在雷达接收机频带内存在  $P$  个 RFI 分量,则  $\mathbf{j}$  是这  $P$  个 RFI 分量的和,具有如下形式:

$$j_k = \sum_{p=1}^P A_p e^{j(2\pi f_p k + \theta_p)} \quad (3)$$

其中  $A_p$ 、 $f_p$ 、 $\theta_p$  分别代表第  $p$  个复正弦信号的复振幅、中心频率和相位。

## 3 基于特征分解的 RFI 抑制方法

### 3.1 特征分解的原理

假设观测数据矩阵为

$$\mathbf{X} = \mathbf{J} + \mathbf{W} = [X_1, X_2, \dots, X_n] \in \mathbb{C}^{m \times n} \quad (4)$$

其中  $\mathbf{J}$  代表干扰数据矩阵,  $\mathbf{W}$  代表信号数据矩阵。在信号处理和系统科学等领域中,观测数据矩阵的列空间

$$\text{Span}(\mathbf{X}) = \text{Span}\{X_1, X_2, \dots, X_n\} \quad (5)$$

称为观测数据空间。观测数据矩阵的自相关矩阵为

$$\mathbf{R}_{\mathbf{X}\mathbf{X}} = E\{\mathbf{X}^H \mathbf{X}\} = E\{(\mathbf{J} + \mathbf{W})^H (\mathbf{J} + \mathbf{W})\} \quad (6)$$

其中  $E\{\cdot\}$  为取数学期望运算,  $(\cdot)^H$  表示共轭转置。

假设干扰数据矩阵和信号数据矩阵统计不相关,则观测数据矩阵的自相关矩阵可以表示为:

$$\mathbf{R}_{\mathbf{X}\mathbf{X}} = \mathbf{R}_{\mathbf{J}\mathbf{J}} + \mathbf{R}_{\mathbf{W}\mathbf{W}} = E\{\mathbf{J}^H \mathbf{J}\} + E\{\mathbf{W}^H \mathbf{W}\} \quad (7)$$

其中  $\mathbf{R}_{\mathbf{J}\mathbf{J}} = E\{\mathbf{J}^H \mathbf{J}\}$  和  $\mathbf{R}_{\mathbf{W}\mathbf{W}} = E\{\mathbf{W}^H \mathbf{W}\} = \sigma_w^2 \mathbf{I}$  分别代表干扰数据和信号数据的自相关矩阵。令  $\text{rank}(\mathbf{J}) = r$ , 则

(7)可以表示为:

$$\mathbf{R}_{XX} = \mathbf{U}\mathbf{\Lambda}_J\mathbf{U}^H + \sigma_w^2\mathbf{I} = \mathbf{U}\mathbf{\Lambda}\mathbf{U}^H \quad (8)$$

其中

$$\begin{aligned} \mathbf{\Lambda} &= \mathbf{\Lambda}_J + \mathbf{\Lambda}_w \\ &= \text{diag}(\sigma_1^2 + \sigma_w^2, \sigma_2^2 + \sigma_w^2, \dots, \sigma_r^2 + \sigma_w^2, \sigma_w^2, \dots, \sigma_w^2) \\ &= \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_r, \lambda_{r+1}, \dots, \lambda_n) \end{aligned} \quad (9)$$

将自相关矩阵  $\mathbf{R}_{XX}$  的特征值按照从大到小的顺序排列  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_r \geq \dots \geq \lambda_n > 0$ , 其相应的特征向量可以组成特征向量矩阵  $\mathbf{U} = [\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_r, \dots, \mathbf{u}_n]$ 。前  $r$  个明显大的特征值  $\lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_r$  称为主特征值, 相应的特征向量称为主特征向量, 可以表示为矩阵形式  $\mathbf{U}_j = [\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_r]$ 。剩余的  $n-r$  个特征值  $\lambda_{r+1} \dots \geq \lambda_n$  称为次特征值, 相应的特征向量称为次特征向量, 可以表示成矩阵形式  $\mathbf{U}_w = [\mathbf{u}_{r+1}, \mathbf{u}_{r+2}, \dots, \mathbf{u}_n]$ 。

由特征向量  $\mathbf{U}_j$  张成的子空间称为干扰子空间, 可以表示为

$$\text{Span}(\mathbf{J}) = \text{Span}\{\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_r\} \quad (10)$$

由特征向量  $\mathbf{U}_w$  张成的子空间称为信号子空间, 可以表示为

$$\text{Span}(\mathbf{W}) = \text{Span}\{\mathbf{u}_r, \mathbf{u}_{r+1}, \dots, \mathbf{u}_n\} \quad (11)$$

由子空间的构造方法及酉矩阵的特点可知, 干扰子空间和信号子空间互为正交补空间。定义到干扰子空间的投影算子为

$$P_j = \mathbf{U}_j(\mathbf{U}_j^H \mathbf{U}_j)^{-1} \mathbf{U}_j^H = \mathbf{U}_j \mathbf{U}_j^H \quad (12)$$

式中, 矩阵内积  $\langle \mathbf{U}_j, \mathbf{U}_j \rangle = \mathbf{U}_j^H \mathbf{U}_j = \mathbf{I}$ 。则对任一观测数据向量  $\mathbf{x} \in \text{Span}(\mathbf{X})$ ,  $P_j \mathbf{x}$  可视为向量  $\mathbf{x}$  在干扰子空间  $\text{Span}(\mathbf{J})$  的投影,  $(\mathbf{I} - P_j) \mathbf{x}$  可代表向量  $\mathbf{x}$  在信号子空间  $\text{Span}(\mathbf{W})$  上的投影。

### 3.2 基于特征值分布的 RFI 检测

由矩阵特征分解的性质可知, 当 SAR 接收信号中出现强干扰信号时, 观测矩阵的主要分量将增多, 主特征值个数增多, 因此, 可以利用这一特点来检测 SAR 接收信号中是否存在 RFI。

基于特征值分布的 RFI 检测, 其关键是确定主特征值, 主特征值代表了强干扰信号的功率, 主特征值的个数代表干扰源的个数。最小描述长度法 (Minimum Description Length, MDL) [6] 是一种稳健的干扰源的个数估计方法, 可以得出高斯白噪声假设下对干扰源个数的一致性估计。MDL 准则是信息论的一个基本结论, 它基于这样的观点: 用概率模型对物体进行建模, 每一种模型可以被看作是观测数据的编码, 其中最优的模型是具有最小的码长的模型。

假设观测矢量  $\mathbf{x}$  是零均值独立同分布的高斯随机的矢量, 可以证明主特征值的个数可以通过取值  $l \in \{0, 1, \dots, n-1\}$  来估计, 对应的模型为<sup>[7]</sup>

$$\text{MDL}(l) = M(n-l) \lg[\rho(l)] + \frac{1}{2}l(2n-l) \lg M \quad (13)$$

其中,  $M$  是用于估计协方差矩阵  $\mathbf{R}_{XX}$  的数据矢量  $\mathbf{x}$  的个数, 且

$$\rho(l) = \frac{1}{n-l} \sum_{i=l+1}^n \lambda_i \left( \prod_{i=l+1}^n \lambda_i \right)^{\frac{1}{n-l}} \quad (14)$$

是最小的  $n-l$  个特征值的算术平均值和几何平均值的比。

根据式(2)给出的信号模型, 观测矢量  $\mathbf{x}$  近似为独立同分布的高斯随机变量, 因此, 可以采用 MDL 准则估计主特征值的个数, 其估计值  $\hat{l}$  就是使 MDL( $l$ ) 最小的值。确定了  $\hat{l}$ , 也就确定了干扰信号的个数, 如果  $\hat{l} = 0$ , 则观测矢量  $\mathbf{x}$  中不存在干扰, 否则,  $\mathbf{x}$  中存在 RFI。

### 3.3 基于特征分解的 RFI 抑制

基于特征分解的 RFI 抑制方法是一种逐个脉冲处理的自适应方法, 可以用于抑制随时间变化的 RFI 信号。其基本思想是: 通过对观测数据矩阵进行特征分解, 根据特征值分布构造干扰子空间和信号子空间, 然后将观测数据投影到相应的子空间, 可以分别得到干扰分量和信号分量。根据特征分解的原理和式(2)给出的信号模型, 对于每一条距离线, 算法实现的主要步骤如下:

(a) 构建如公式(4)所示的观测数据矩阵  $\mathbf{X}$ 。构建观测数据矩阵是本文方法的基础, 假设要处理的 SAR 回波数据的每一条距离线中含有  $N$  个距离采样点, 则每条距离线可以表示为  $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T$ , 其中  $(\cdot)^T$  表示转置运算,  $x_k (k=1, \dots, N)$  表示第  $k$  个距离采样点。将接收数据矢量  $\mathbf{x}$  可以分为  $n$  个子向量, 每个子向量包含  $m=N/n$  个样本, 则第  $i$  个子向量可以表示为  $\mathbf{X}_i = [x_{m(i-1)+1}, x_{m(i-1)+2}, \dots, x_{m(i-1)+m}]^T \quad i=1, \dots, n \quad (15)$  其中,  $m$  的选取要适中。  $m$  选择过小, 特征分解不充分, 使得频率分辨率过低, 数据投影时会加剧有用信号的损失;  $m$  选择太大, 则会造成计算量增大, 同时会造成用于估计相关矩阵的样本数据减少, 带来相关矩阵的估计误差。根据经验, 一般  $m$  取 8 ~ 128 个距离采样点且同时满足估值条件  $m \leq n/2$ 。

(b) 按照公式(6)计算自相关矩阵  $\mathbf{R}_{XX}$  的估计  $\hat{\mathbf{R}}_{XX}$

$$\hat{\mathbf{R}}_{XX} = \frac{1}{m} \mathbf{X}^H \mathbf{X} \quad (16)$$

(c) 对  $\hat{\mathbf{R}}_{XX}$  进行特征分解, 并将其特征值按照从大到小的顺序排列为  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_n$ ;

(d) 根据特征值分布按照 MDL 准则估计主特征值的个数  $\hat{l}$ , 从而对是否存在 RFI 进行判断;

(e) 如果存在干扰,则转入(f);否则不存在干扰,不需进行干扰抑制,对有用信号数据矩阵的估计为  $\hat{W} = X$ ,直接转入(i);

(f) 根据主特征值的个数确定主特征值和相应的主特征向量,将主特征向量张成的子空间作为公式(10)所示的干扰子空间;

(g) 利用公式(12)给出的投影算子  $P_j$  将观测数据矩阵  $X$  投影到干扰子空间  $Span(J)$ ,得到对于干扰数据矩阵的估计,即

$$\hat{J} = P_j X = U_j U_j^H X \quad (17)$$

(h) 干扰抑制后的回波数据矩阵,即对有用信号数据矩阵的估计为

$$\hat{W} = X - \hat{J} \quad (18)$$

(i) 对于干扰抑制后的回波数据矩阵  $\hat{W}$  (size  $m \times n$ ) 进行重新排列得到新的向量  $\hat{w}$ ,即对向量  $x$  进行干扰抑制的结果;

### 4 仿真实验

为了验证本文提出方法的有效性,这里采用星载 SAR 实测数据做为目标回波,并在其基础上叠加实测的 RFI 数据,从而得到干扰回波数据,具体的仿真实验流程如图 1 所示。SAR 实测数据选取加拿大温哥华地区的 Radarsat-1 实测数据,其发射信号带宽为 30.11 MHz,载频为 5.3 GHz,距离调频率为  $0.721 \text{ MHz}/\mu\text{s}$ <sup>[16]</sup>; RFI 信号主要为窄带信号,其中心频率主要包括 -15 MHz、-6 MHz、3 MHz、11 MHz 等,干信比为 25 dB,为了形成对比,添加干扰的脉冲仅占此景数据脉冲总数的约 1/10。为了对比干扰抑制算法的效果,分别对干扰抑制前后的回波数据进行成像处理,得到被干扰的 SAR 图像和干扰抑制后的 SAR 图像。

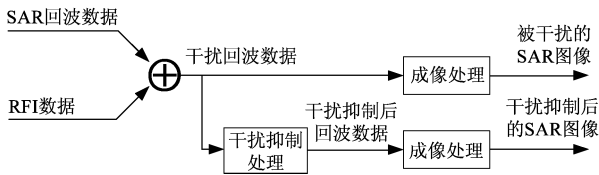


图 1 仿真实验流程图  
Fig. 1 Flow Chart of Simulation

对原始 SAR 回波数据采用距离-多普勒算法(RD 算法)进行成像处理,结果如图 2 所示(水平方向为距离向,垂直方向为方位向,下同),从图中左上角可以看到英吉利海湾中的 6 艘货轮。对于干扰回波数据成像的结果如图 3 所示,可以看出,RFI 在 SAR 图像中表现为近似沿距离向的亮线,由于 RFI 的存在,英吉利海湾等地物目标被噪声掩盖,无法从中获取信息。采用本文

方法进行干扰抑制以后的回波数据成像的结果如图 4 所示,可以看出,图像质量得到很大改善,由 RFI 引起的白色亮线消失,被掩盖的地物目标得以恢复,说明本文方法可以有效的抑制 RFI 信号,同时很好的保留了有用信号的信息。

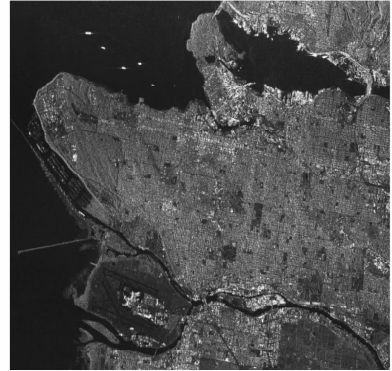


图 2 原始 SAR 图像  
Fig. 2 SAR image of Raw Data

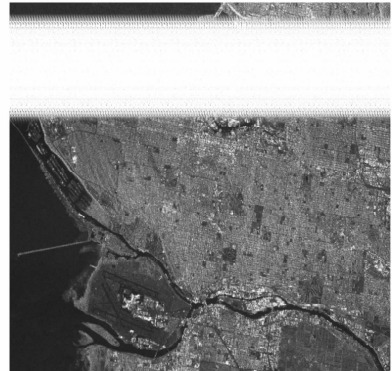


图 3 被干扰的 SAR 图像  
Fig. 3 SAR image of RFI contaminated

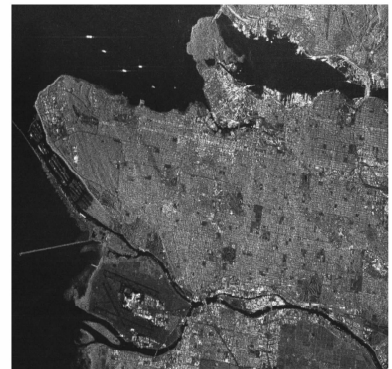


图 4 干扰抑制后的 SAR 图像  
Fig. 4 SAR image of RFI Suppression

通过目视可以看出本文方法的有效性,但是有必要从客观定量的角度评估本文方法的干扰抑制效果。SAR 图像的等效视数和动态范围是 SAR 图像质量评估常用的标准,也常被用于 SAR 干扰效果的评估<sup>[17]</sup>,

这里将它们用于干扰抑制效果的评估。分别计算三幅图像中受到干扰区域的等效视数和动态范围,结果如表 1 所示。可以看出,与原始图像相比,被干扰图像的等效视数变大,动态范围变小;经过干扰抑制处理,干扰抑制后图像的等效视数和动态范围都与原始图像非常接近,说明本文方法达到了良好的干扰抑制效果。

表 1 图像质量指标对比

Tab. 1 comparison of Image quality indicators

参数(单位)	原始图像	被干扰图像	干扰抑制后图像
等效视数	1.35	22.03	1.36
动态范围 (dB)	92.37	82.64	92.80

## 5 结论

RFI 的存在会严重影响 SAR 图像质量。本文分析了 RFI 的特性和信号模型,提出了一种基于特征分解的 RFI 抑制方法。首先介绍了特征分解方法的原理,在此基础上提出了基于特征值分布的 RFI 检测方法,并进一步给出了基于特征分解的 RFI 抑制方法。仿真实验表明该方法可以有效的抑制 RFI 信号,且尽可能保留目标回波信号,同时计算复杂度低,可以适用于 RFI 频率和功率随时间变化的复杂电磁环境中的 SAR 成像处理。

## 参考文献

- [1] Chan S, Spencer M, RFI Study for the SMAP Radar[C]. Proceedings of the IEEE Radar Conference. Pasadena, CA; 2009.
- [2] Shimada M. L-band Radio Interferences Observed by the JERS-1SAR and Its Global Distribution[C]. IGARSS '05. 2005; 4, 2752-2755.
- [3] Reigber A, Ferro-Famil L, Interference Suppression in Synthesized SAR Images[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2005, 2(1): 45-49.
- [4] Rosen P A, Hensley S, Le C, et al. Observations and Mitigation of RFI in ALOS PALSAR SAR data: Implications for the DESDynI mission[C]. Rome, Italy; 2008.
- [5] Cazzaniga G, Monti-Guarnieri A, Removing RF Interferences from P-band Airplane SAR Data [C]. Proc. IGARSS, 1996; 1845-1847.
- [6] 董臻,梁甸农,黄晓涛. VHF/UHF UWB SAR 基于通道均衡的 RFI 抑制方法[J]. 电子与信息学报. 2008, 30(3): 550-553.  
Dong Z, Liang D N, Huang X T, A RFI Suppression Algorithm Based on Channel Equalization for the VHF/UHF UWB SAR [J]. Journal of Electronics & Information

- Technology. 2008, 30(3): 550-553. (in Chinese)
- [7] Le C, Hensley S. RFI Removal from AIRSAR Polarimetric Data [C]. Proceedings AIRSAR 2002 Conference. 2002.
- [8] Lord R T, Inggs M R. Efficient RFI Suppression in SAR Using a LMS Adaptive Filter with Sidelobe Suppression Integrated with the Range-Doppler Algorithm[C]. IGARSS'99. Hamburg, Germany; 1999.
- [9] 黄晓涛,梁甸农. 基于 RELAX 的 UWB-SAR 抑制 RFI 算法[J]. 国防科技大学学报. 2000, 22(2):55-59.  
Huang X T, Liang D N, RFI Suppression in UWB-SAR Based on RELAX [J]. Journal of National University of Defense Technology. 2000, 22(2):55-59. (in Chinese)
- [10] Vu V T, Sjögren T K, Pettersson M I, et al. RFI Suppression in Ultrawideband SAR Using an Adaptive Line Enhancer[J]. IEEE Geoscience And Remote Sensing Letters. 2010, 7(4): 694-698.
- [11] Zhou F, Wu R, Xing M, et al. Eigensubspace-Based Filtering With Application in Narrow-Band Interference Suppression for SAR [J]. IEEE Geoscience And Remote Sensing Letters. 2007, 4(1): 75-79.
- [12] International Telecommunications Union. Radio Regulations [S]. 2008.
- [13] 中华人民共和国工业和信息化部. 中华人民共和国无线电频率划分规定[S]. 2010.
- [14] Broekema P C. Numerical Analysis of the LOFAR Remote Station Beamformer[D]. ASTRON, 2004.
- [15] Wax M, Kailath T. Detection of Signals by Information Theoretic Criteria[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing. 1985, 33: 387-392.
- [16] Ian G C, Wong F H. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and implementation [M]. Norwood, MA: Artech House, 2005.
- [17] 韩国强,吴晓芳,代大海等. 对 SAR 干扰效果的评估方法[J]. 雷达科学与技术. 2010, 8(1):26-31.  
HAN G Q, WU X F, DAI D H, et al. Study on Evaluation Methods of Jamming Effect to SAR [J]. Radar Science And Technology. 2010, 8(1):26-31. (in Chinese)

## 作者简介

于春锐(1982-),男,博士研究生。主要研究方向为合成孔径雷达抗干扰技术、空间信息获取与处理。  
E-mail:ycrzc@163.com

张永胜(1977-),男,博士,讲师。主要研究方向为雷达系统总体设计、空间信息获取与处理。

董臻(1973-),男,研究员,硕士生导师。主要研究方向为合成孔径雷达成像与干涉测高、电子系统仿真等。

梁甸农(1936-),男,教授,博士生导师。主要研究方向为空间信息获取与处理、超宽带雷达系统理论及自适应信号处理等。