

# 可适应阵列误差和非均匀杂波环境的多通道 SAR 图像域 STAP 方法

常玉林,黄晓涛,周红,周智敏

国防科学技术大学 电子科学与工程学院,湖南 长沙 410073

**摘要:** 多通道 SAR 图像域 STAP 方法是一种利用了长相干积累时间的 STAP 方法,其杂波抑制和运动目标检测能力强。但是,目前的多通道 SAR 图像域 STAP 方法均是在理想条件下给出的,没有考虑阵列误差和非均匀杂波环境对其性能的影响。文中分析了阵列误差和非均匀杂波环境的影响,提出了一种可适应阵列误差和非均匀杂波环境的多通道 SAR 图像域 STAP 方法。基于实测杂波数据的实验验证了所提方法的正确性。

**关键词:** STAP,图像域 STAP 方法,阵列误差,非均匀杂波环境

**中图分类号:** TN957.5 **文献标识码:** A

## 1 引言

目前利用多通道 SAR 实现 GMTI 的技术包括顺轨干涉(along track interferency, ATI)技术(Soumekh, 1997; Yang Soumekh, 2005)、天线相位偏置(displaced phase center arrays, DPCA)技术(Fielding, 2002)、空时自适应处理(space time adaptive processing, STAP)技术(Melvin, 2008; 王永良 & 彭应宁, 2000; Pettersson, 2004; Ender, 1999)等,其中 DPCA 技术和 ATI 技术对载机飞行速度和通道均衡提出了较高的要求,相比较而言,STAP 技术对这些不理想情况的适应性更好,且具有较强的杂波抑制能力,因而受到了更多的关注。

与基于相控阵雷达的传统 STAP 技术不同,基于多通道 SAR 的 STAP 技术有其自身的特点。由于多通道 SAR 系统具有的通道数目较少(一般为 3—5 个),为了达到更好的杂波对消能力,基于多通道 SAR 的 STAP 技术一般需要采用较长的长相干积累时间(Melvin, 2008; Pettersson, 2004; Ender, 1999; Yegulalp, 2004; Rosenberg, 2007; 李真芳, 2006; Bucciarelli *et al.*, 2008),其具体实现思路分为两类:一是将 SAR 成像过程和 STAP 处理过程相结合,在多通道 SAR 成像过程中进行 STAP 处理

(Pettersson, 2004; Ender, 1999; Bucciarelli *et al.*, 2008);二是将 SAR 成像作为 STAP 处理的预处理手段,在配准后的多通道 SAR 图像域进行 STAP 处理(Yegulalp, 2004; Rosenberg, 2007; 李真芳 2006)。图像域 STAP 方法的优点是能够利用较长的长相干积累时间,得到很高的杂波改善因子,对慢速运动目标的检测效果很好。但是,目前的图像域 STAP 方法均是在理想条件下给出的,没有考虑非均匀杂波环境和阵列误差(位置误差、幅度误差、相位误差)等非理想因素的影响。

首先分析了阵列误差和非均匀杂波环境对图像域 STAP 方法性能的影响,指出非均匀杂波使得图像域杂波噪声协方差阵的估计出现偏差,而阵列误差使得运动目标的图像域导向矢量无法精确给出,这些非理想因素的存在使得图像域 STAP 滤波器不能达到最优的杂波改善能力。本文提出了一种可适应阵列误差和非均匀杂波环境的图像域 STAP 方法,为了适应非均匀杂波环境,该方法对训练数据的选取方法作了改进,即采用功率选择训练法选择功率较大的数据作为训练样本,以抑制杂波的功率非均匀,采用改进采样矩阵求逆法剔除训练数据里的干扰运动目标,以抑制干扰运动目标引起的杂波非均匀;为了适应阵列误差,该方法根据杂波噪声协方差阵估计通道间的幅相误差的方法,并

收稿日期:2008-07-09;修订日期:2008-09-01

基金项目:教育部新世纪优秀人才支持计划(编号:NCET-07-0223)。

第一作者简介:常玉林(1980—),男,湖北宜昌人,现为国防科学技术大学电子科学与工程学院在读博士研究生,主要从事多通道 SAR 运动目标指示、自适应信号处理、SAR 图像后处理(特征提取、图像配准、信息融合)等方面的研究,已发表论文 10 余篇。

将误差校正过程结合到 STAP 处理中。基于实测杂波数据的实验验证了所提方法的正确性。

## 2 非均匀杂波和阵列误差对图像域 STAP 方法的性能影响分析

### 2.1 多通道 SAR 图像域 STAP 方法原理

基于多通道 SAR 图像域的 STAP 方法是一种长相干积累时间的 STAP 方法(Yegulalp, 2004; 李真芳, 2006), 它先进行多通道 SAR 成像和配准处理, 将杂波局域化到一个像素之内; 然后联合相同位置的多通道像素进行空域自适应处理抑制杂波。

下面对多通道 SAR 图像域 STAP 方法的原理进行分析。设飞行平台以速度  $v_a$  做匀速直线运动, 飞行高度为  $h$ , 多通道 SAR 系统收发天线沿航迹向排列, 并构成了  $N$  个间距为  $d$  的等效相位中心, 每一通道 SAR 图像的距离向点数为  $L$ , 方位向点数为  $M$ 。为检测  $(x, r)$  处是否存在距离向速度为  $v_y$  的运动目标信号, 可将  $(x, r)$  处的多通道观测矢量  $\mathbf{X}(x, r)$  记为:

$$\mathbf{X}(x, r) = [x_1(x, r), x_2(x, r), \dots, x_N(x, r)]^T \quad (1)$$

将  $\mathbf{X}(x, r)$  简记为  $\mathbf{X}$ 。在  $H_0$  (无运动目标信号, 只有杂波和噪声信号) 和  $H_1$  (既有运动目标信号, 又有杂波和噪声信号) 二元假设下,  $\mathbf{X}$  可以表示为:

$$\mathbf{X} = \begin{cases} b\mathbf{S} + \mathbf{C} + \mathbf{Q} & H_1 \text{ 假设} \\ \mathbf{C} + \mathbf{Q} & H_0 \text{ 假设} \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $b$  为运动目标回波幅度,  $\mathbf{C}$  和  $\mathbf{Q}$  为杂波和噪声矢量,  $\mathbf{S}$  为距离向速度为  $v_y$  的运动目标所对应的导向矢量, 其表达式如下:

$$\mathbf{S}(x, r) = \left[ 1, \exp\left(jk_c \times d \times \sin\varphi \times \frac{v_y}{v_a}\right), \dots, \exp\left(jk_c \times (N-1)d \times \sin\varphi \times \frac{v_y}{v_a}\right) \right]^T \quad (3)$$

式中,  $v_y$  为运动目标的距离向速度,  $k_c = 4\pi f_c/c$ ,  $\sin\varphi = \sqrt{r^2 - h^2}/r$ ,  $f_c$  为中心频率,  $c$  为光速。

经过 SAR 成像将杂波局域化到一个像素之后, 图像域 STAP 实际上对每一  $(x, r)$  位置的  $\mathbf{X}(x, r)$  进行空域自适应处理, 使得输出信杂噪比达到最大。设自适应权矢量为  $\mathbf{W}$ , 满足输出信杂噪比最高准则的最优滤波器权系数为:

$$\mathbf{W} = \arg \left\{ \min_{\mathbf{w}} \left( \frac{\mathbf{W}^H \mathbf{R}_{x|H_0} \mathbf{W}}{\mathbf{W}^H \mathbf{S} \mathbf{S}^H \mathbf{W}} \right) \right\} \quad (4)$$

满足(4)式的最优权值为:

$$\mathbf{W}_{\text{opt}} = \mu \mathbf{R}_{x|H_0}^{-1} \mathbf{S} \quad (5)$$

式中,  $\mathbf{R}_{x|H_0}$  代表  $H_0$  假设下观测样本的协方差矩阵, 即观测样本中杂波和噪声期望的协方差矩阵,  $\mathbf{R}_{x|H_0} = E[(\mathbf{C} + \mathbf{N})(\mathbf{C} + \mathbf{N})^H]$ 。  $\mu$  为常数, 为保证输出的检验统计量是恒虚警的, 此处  $\mu$  取作  $\sqrt{\mathbf{S}^H \mathbf{R}_{x|H_0}^{-1} \mathbf{S}}$ 。在实际中, 需要对  $\mathbf{R}_{x|H_0}$  进行估计。对于均匀杂波环境, 可假设所有观测样本中统计独立, 且服从统一分布, 此时可沿距离向和方位向选择相邻的样本估计  $\mathbf{R}_{x|H_0}$ :

$$\hat{\mathbf{R}}_{x|H_0} = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P \mathbf{X}_p \mathbf{X}_p^H \quad (6)$$

式中,  $\mathbf{X}_p$  表示和  $\mathbf{X}$  相邻的观测样本。

对  $\mathbf{X}$  做自适应滤波后,  $(x, r)$  处的自适应滤波器输出为:

$$Y(x, r) = \mathbf{W}^H \mathbf{X} \quad (7)$$

给定虚警概率  $P_{FA}$ , 则可确定检测门限  $\beta_T = -\sqrt{\ln P_{FA}}$ , 将输出检验统计量  $Y(x, r)$  的绝对值和检测门限  $\beta_T$  进行比较, 则可判定是否存在运动目标:

$$\left| Y(x, r) \right| \begin{cases} \geq \\ < \end{cases} \beta_T \quad (8)$$

检测概率  $P_D$  可表示为:

$$P_D = \int_{\beta_T}^{\infty} \mu \exp\left(-\frac{\mu^2 + \alpha^2}{2}\right) I_0(\alpha\mu) d\mu \quad (9)$$

式中,  $I_0(\cdot)$  为第一类修正的零阶 Bessel 函数。  $\alpha$  为输出信杂噪比的均方根,  $\alpha^2 = 2 \sin R_{\text{out}}$ 。

### 2.2 非均匀杂波和阵列误差对多通道 SAR 图像域 STAP 方法性能的影响

上一节给出的多通道 SAR 图像域 STAP 方法是在理想条件下得到的, 它要求不存在阵列误差, 且杂波环境为均匀的。在实际中, 这 2 个假设较难得到满足, 因此需要考虑阵列误差和非均匀杂波的影响。

#### 2.2.1 非均匀杂波对多通道 SAR 图像域 STAP 方法性能的影响

当杂波非均匀时, 训练样本和待检测样本中的杂波分布特性不同, 由非均匀样本得到的估计结果不能够全面正确地反映待检测像素中杂波噪声的真实分布特性, 此时无法准确的估计协方差阵  $\mathbf{R}(x, r)$ , 故杂波抑制性能就会受到严重影响。

本文对图像域 STAP 方法中的杂波非均匀现象进行了分析, 发现可将其杂波非均匀现象分为功率非均匀、干扰目标、孤立干扰 3 类, 这和传统的短 CPI STAP 方法类似(谢文冲, 2006)。

### 功率非均匀

图像域 STAP 方法中杂波的功率非均匀是指不同像素间杂波功率的变化。功率非均匀往往导致杂波功率估计不准, 杂噪比估计过低时, 形成的自适应权不能形成足够深的凹陷, 杂波得不到充分抑制, 最终导致干扰剩余功率增大(虚警率增加), 为了防止虚警必须提高检测器的门限, 而这又会降低目标检测性能; 当杂噪比估计过高时, 形成的自适应权形成的凹陷过深, 此时, 往往造成慢速运动目标的信号被错误滤除, 使得最小可检测速度下降。

### 干扰目标

干扰目标是指存在于训练样本中的运动目标。干扰目标的存在会使得自适应方向图在干扰目标处也形成凹口, 从而引起目标相消; 同时, 自适应方向图也会发生畸变, 从而降低了运动目标检测性能。

### 孤立干扰

干扰目标是指存在于训练样本中的运动目标, 孤立干扰是指存在于观测数据中但和导向矢量不匹配的运动目标。由于多通道 SAR 图像的分辨率较高, 故可认为在待检测像素上只存在一个运动目标, 因此图像域 STAP 方法可不考虑孤立干扰的影响。

### 2.2.2 阵列误差对多通道 SAR 图像域 STAP 方法性能的影响

阵列误差一般包括阵元位置误差、通道间的幅度误差、相位误差。本文假定阵元之间的相对位置可以精确测得(对于多个相位中心相对位置固定的多通道 SAR 系统而言, 这一假设通常是能够得到满足的), 且通道间的幅度和相位误差为固定值, 即可将阵列误差表示为:

$$\mathbf{g} = [g_1 \exp(-j\zeta_1), g_2 \exp(-j\zeta_2), \dots, g_N \exp(-j\zeta_N)]^T \quad (10)$$

当存在阵列误差时, 运动目标实际对应的导向矢量  $S_c(x, r)$  可以表示为:

$$S_c(x, r) = [s_{c1}(x, r), s_{c2}(x, r), \dots, s_{cN}(x, r)]^T \quad (11)$$

其中,

$$s_{cn}(x, r) = g_n \exp(-j\zeta_n) \times \exp \left[ jk_c \times (n-1) d \sin \varphi \times \frac{v_y}{v_a} \right] \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (12)$$

可以看出, 当存在幅相误差时, 运动目标的导向矢

量发生了变化。此时若根据 2.1 给出的方法设计 STAP 处理器, 不能保证 STAP 处理器在待检测距离向速度处的响应达到最大, 即不能使输出信杂噪比达到最大, 从而降低了检测性能。

## 3 可适应非均匀杂波和阵列误差的多通道 SAR 图像域 STAP 方法

### 3.1 非均匀杂波下的多通道 SAR 图像域 STAP 方法

#### 3.1.1 功率非均匀抑制方法

传统短 CPI STAP 中, 抑制功率非均匀的方法包括 PST(power selected training)法(谢文冲, 2006; Rabideau & Steinhardt 1996)、PVT(power variable training)法(Pulsone, 2003)、PCT(power comparable training)法(Melvin, 2008)等, 其中最有效的方法是 PST 法, 其主要思想是选择杂波功率较强的一些样本来估计杂波噪声协方差阵, 在实际中该方法存在的主要问题是可供功率选择的训练样本数目往往不足。

对于图像域 STAP 方法, 由于 SAR 图像的分辨率较高, 并可沿距离向和方位向选取样本, 不存在可供功率选择的辅助样本数目太足的问题, 因此, 可将短 CPI STAP 中提出的 PST 法推广用于图像域 STAP 方法。此时, 训练样本的功率可以定义为:

$$P(x, r) = \mathbf{X}^H(x, r) \times \mathbf{X}(x, r) \quad (13)$$

式中,  $\mathbf{X}(x, r)$  为  $(x, r)$  处对应的多通道像素观测值。选择像素功率较高的多通道数据构成训练样本, 估计杂波和噪声的协方差阵, 即可抑制功率非均匀现象。

#### 3.1.2 干扰目标抑制方法

本文采用非均匀检测器(non-homogeneity detector, NHD)抑制图像域 STAP 中干扰目标引入的非均匀问题, 即从备选训练样本中检测出含有干扰目标的样本并剔除。目前传统短 CPI STAP 中已提出的非均匀检测器(王永良 & 彭应宁, 2000)包括: 广义内积 NHD(Melvin, 2008)、关联维数 NHD、采样矩阵求逆(sample matrix inversion, SMI) NHD(Melvin, 1997)等, 其中应用较多的 SMI NHD 检测器, 但给方法需要计算多次采样矩阵求逆检验统计量, 才能检测出不同参数的所有干扰运动目标, 运算量较大。

本节提出了一种改进的采样矩阵求逆检验统计量(improved sample matrix inversion, ISMI) NHD 检测器, 该方法首先将检验协方差矩阵  $\mathbf{R}$  进行特征

值分解:

$$\mathbf{R} = \sum_{k=1}^K \lambda_k \boldsymbol{\beta}_k \boldsymbol{\beta}_k^H + \sum_{k=K+1}^N \lambda_k \boldsymbol{\beta}_k \boldsymbol{\beta}_k^H \quad (14)$$

式中,  $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_k \gg \lambda_{k+1} > \dots > \lambda_N$ , 第  $1-k$  个特征值较大, 代表了杂波对应的特征值,  $\boldsymbol{\beta}_1, \boldsymbol{\beta}_2, \dots, \boldsymbol{\beta}_k$  构成了杂波子空间的基; 第  $k+1$  到  $N$  个特征值较小, 代表了噪声对应的特征值,  $\boldsymbol{\beta}_{k+1}, \boldsymbol{\beta}_{k+2}, \dots, \boldsymbol{\beta}_N$  构成了噪声子空间的基。当前样本  $X_i$  在噪声子空间上的投影  $Y_i$  可表示为:

$$Y_i = \sum_{k=K+1}^N \boldsymbol{\beta}_k^H X_i \quad (15)$$

由于噪声子空间和杂波子空间正交,  $Y_i$  中不包含杂波信号, 但包含和噪声子空间不正交的所有运动目标信号。实际上,  $Y_i$  可看作是一非最优自适应 STAP 滤波器的输出, 该非最优自适应 STAP 滤波器只考虑了如何保证有效地抑制杂波, 而没有约束运动目标信号的增益, 但它的优点是无需确定运动目标的导向矢量。

ISMI 检验统计量定义为  $Y_i$  的功率:

$$\eta = \left| Y_i \right|^2 = \left| \sum_{k=K+1}^N \boldsymbol{\beta}_k^H X_i \right|^2 \quad (16)$$

ISMI NHD 检测器可以用下式表示:

$$\begin{cases} \eta > \eta_0 & \text{当前样本存在运动目标} \\ \eta \leq \eta_0 & \text{当前样本不存在运动目标} \end{cases} \quad (17)$$

ISMI NHD 检测器相对 SMI NHD 检测器的优点是可一次检测出所有速度参数的干扰运动目标, 从而加快了干扰目标检测速度。

当同时存在非均匀杂波和干扰目标时, 可先采用 PST 法中选取功率较大的样本作为训练数据, 再用 NHD 检测器剔除含有干扰目标的训练样本, 并基于剔除干扰目标后的训练样本估计杂波协方差阵。

需要说明的是, 本文的方法对均匀杂波背景也完全适用, 且不会造成任何性能损失, 这是因为本文所提方法仅增加了“PST 法中选取功率较大作为训练数据”和“NHD 检测器剔除含有干扰目标的训练样本”两步骤, 并没有改变训练数据, 只是改变了训练数据的选择方式。

### 3.2 可适应阵列误差的多通道 SAR 图像域 STAP 方法

本节提出一种包含了幅相误差校正的图像域 STAP 方法, 该方法包括两部分内容:

(1) 幅相误差的估计。该方法将杂波噪声协

方差阵进行特征分解, 将最大特征值对应的特征向量作为幅相误差的估计;

(2) 幅相误差的补偿。该方法将幅相误差的补偿和图像 STAP 处理相结合, 在 STAP 处理过程中补偿幅相误差。

首先证明可基于杂波噪声协方差阵的最大特征值所对应的特征向量估计幅相误差。设配准后的多通道 SAR 图像上某像素内包含了  $I$  个独立的静止地杂波单元, 于是该像素对应的多通道杂波信号可以表示为:

$$\mathbf{c} = \mathbf{g} \sum_{i=1}^I \mathbf{a}_i \quad (18)$$

式中,  $\mathbf{a}_i$  为第  $i$  个静止地杂波单元的随机复幅度。该像素对应的多通道杂波协方差矩阵  $\mathbf{R}_c$  可以表示为:

$$\mathbf{R}_c = E[\mathbf{c}\mathbf{c}^H] = E\left[\left(\sum_{i=1}^I \mathbf{a}_i\right) \times \left(\sum_{i=1}^I \mathbf{a}_i\right)^H\right] \times \mathbf{g}\mathbf{g}^H \quad (19)$$

于是:

$$\mathbf{R}_c \times \mathbf{g} = E\left[\left(\sum_{i=1}^I \mathbf{a}_i\right) \left(\sum_{i=1}^I \mathbf{a}_i\right)^H\right] \times \mathbf{g}^H \mathbf{g} \times \mathbf{g} \quad (20)$$

记

$$\lambda \triangleq E\left[\left(\sum_{i=1}^I \mathbf{a}_i\right) \left(\sum_{i=1}^I \mathbf{a}_i\right)^H\right] \times \mathbf{g}^H \mathbf{g} \quad (21)$$

于是:

$$\mathbf{R}_c \times \mathbf{g} = \lambda \times \mathbf{g} \quad (22)$$

$\lambda$  可以看作  $\mathbf{R}_c$  的特征值,  $\mathbf{g}$  为  $\lambda$  对应的特征向量。同时不难看出:  $\text{Rank}(\mathbf{R}_c) = 1$ , 于是幅相误差  $\mathbf{g}$  为  $\mathbf{R}_c$  唯一非零特征值对应的导向矢量。

在实际中, 已知的往往是杂波和噪声的协方差阵  $\mathbf{R}_{cn}$ , 且有  $\mathbf{R}_{cn} = \mathbf{R}_c + \mathbf{R}_n$ 。设  $\mathbf{R}_{cn}$  的最大特征值为  $\hat{\lambda}$ ,  $\hat{\lambda}$  对应的特征向量为  $\hat{\mathbf{g}}$ , 由于图像域杂波比非常高, 于是有:  $\hat{\lambda} \approx \lambda$ ,  $\hat{\mathbf{g}} \approx \mathbf{g}$ 。

以上分析表明: 杂波噪声协方差阵最大特征值对应的特征向量可作为幅相误差的估计。幅相误差估计性能受杂波协方差矩阵估计精度的影响, 杂波协方差估计精度越高, 幅相误差估计精度越高。

接下来给出可校正幅相误差的图像域 STAP 处理器。设估计出的幅相误差矢量为:

$$\hat{\mathbf{g}} = \left[ \hat{g}_1 \exp(-j\hat{\zeta}_1^2), \hat{g}_2 \exp(-j\hat{\zeta}_2^2), \dots, \hat{g}_N \exp(-j\hat{\zeta}_N^2) \right]^T \quad (23)$$

若将该运动目标的导向矢量作相应变化,使之包含幅相误差分量,则可在 STAP 处理过程中校正幅相误差,此时运动目标的导向矢量  $\hat{S}_c(x, r)$  可以表示为:

$$\hat{S}_c(x, r) = [\hat{s}_{c1}(x, r), \hat{s}_{c2}(x, r), \dots, \hat{s}_{cN}(x, r)]^T \quad (24)$$

其中:

$$\hat{s}_{cn}(x, r) = \hat{g}_n \exp(-j\hat{\zeta}_n) \times \exp \left[ jk_c \times (n-1) d \sin\varphi \times \frac{v_y}{v_a} \right] \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (25)$$

相应地,可校正幅相误差的图像域 STAP 自适应权

值应为:

$$W(x, r) = uR_{cn}^{-1}(x, r)\hat{S}_c(x, r) \quad (26)$$

这样即给出了可校正幅相误差的多通道 SAR 图像域 STAP 处理器。

### 3.3 非均匀杂波和阵列误差同时存在时的多通道 SAR 图像域 STAP 处理方法

在实际情况下,阵列误差和各种非均匀杂波现象可能同时存在。本节在前两节的基础上,提出了一种可同时适应非均匀杂波和阵列误差的多通道 SAR 图像域 STAP 处理方法,其流程图如图 1。

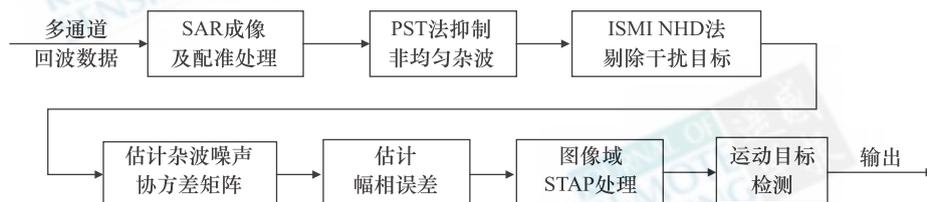


图 1 可同时适应非均匀杂波和阵列误差的图像域 STAP 方法处理流程

Fig. 1 The processing diagram of the proposed image domain STAP method that can cope with heterogeneous clutter environment and array distortion

## 4 实验

### 4.1 基于单通道实测回波数据的多通道回波数据仿真

由于目前还没有可利用的实测多通道 UWB SAR 回波数据,本文利用已有的单通道实际回波数据抽样模拟多通道杂波,然后在模拟得到的多通道杂波的基础上叠加仿真产生的多通道运动目标信号和噪声信号,得到包含了运动目标信号、杂波信号、噪声信号的多通道 SAR 回波数据。

选取一段载机飞行平稳的单通道 P 波段 SAR 实测回波数据抽取产生 5 通道杂波数据。该段数据对应的信号及几何参数如表 1。将第 1, 6, 11, 16, …… 个脉冲构成的脉冲串作为第 1 个通道的杂波数据,将第 5, 10, 15, …… 个脉冲构成的脉冲串作为第 2 个通道的杂波数据,将第 9, 14, 19, …… 个脉冲构成的脉冲串作为第 3 个通道的杂波数据,将第 13, 18, 23, …… 个脉冲构成的脉冲串作为第 4 个通道的杂波数据,将第 17, 22, 27, …… 个脉冲构成的脉冲串作为第 5 个通道的杂波数据,根据空时等效原理,这 5 个通道的杂波数据可等效为沿航向放置

且基线长度为 0.416 m 的 5 通道空域采样杂波数据,等效杂波数据的 PRF 降为 200 Hz。然后根据 5 通道回波数据所确定的多通道 SAR 系统和回波录取参数,通过仿真生成包含 4 个运动目标的 5 通道回波数据,目标 1—4 的距离向速度分别为 2, 6, -3, -7 m/s, 方位向速度均为零。将 5 通道杂波数据和运动目标回波数据叠加,然后对叠加后的每一通道数据添加 -35 dB 独立同分布的高斯白噪声,得到包含了运动目标信号、杂波、噪声的 5 通道回波数据。最后对每一通道数据添加一定幅相误差,即可得到包含了幅相误差的 5 通道回波数据。

表 1 单通道 P 波段 SAR 实测回波数据参数

Table 1 Single-channel P band SAR real data parameters

信号 频段	信号带 宽/MHz	PRF/Hz	主波 束角/(°)	载机速 度/(m/s)	载机 高度/m	中心 地距/m
P 波段	200	1000	30	104	5400	11320

### 4.2 基于多通道回波数据的实验

基于产生的 5 通道 P 波段回波数据,对本文方法进行验证。首先对 5 通道 P 波段 SAR 回波数据进行成像处理(方位向分辨率为 4 m),其中通道 1 SAR 回波数据成像后的结果显示如图 2,图中圆圈

内的目标为运动目标。在杂波抑制前的 SAR 图像

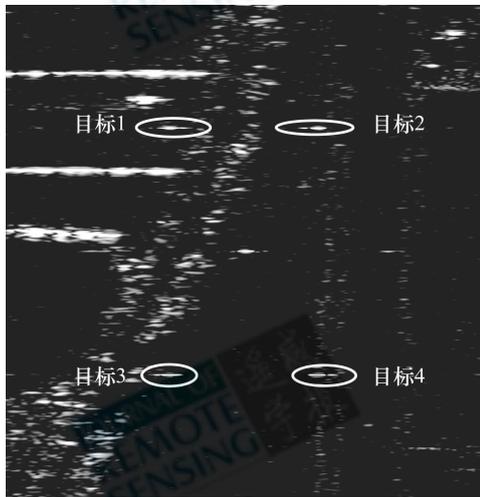


图2 通道1 SAR 图像

Fig. 2 The first channel SAR image

采用 PST 方法选择功率较大的目标构成训练样本,其中通道1 SAR 图像经 PST 选择后保留的像素显示如图3。基于该训练样本集估计杂波噪声协方差矩阵,进行图像域 STAP 处理,所得的输出信杂噪比损失(SINRLoss)曲线如图4(a),可看出由于训练样本集包含了干扰运动目标,SINRLoss 曲线在运

上,运动目标和杂波峰值能量之比为  $-5\text{dB}$ 。



图3 PST 选择后的通道1 SAR 图像

Fig. 3 The first channel SAR image after PST

动目标处也形成了一定程度的凹陷。采用本文提出的 ISMI NHD 方法从训练样本集中剔除运动目标信号,基于剩余的训练样本估计杂波噪声协方差矩阵,并进行图像域 STAP 处理,所得的 SINRLoss 曲线如图4(b),可看出经过 ISMI NHD 之后,克服了干扰目标的影响。

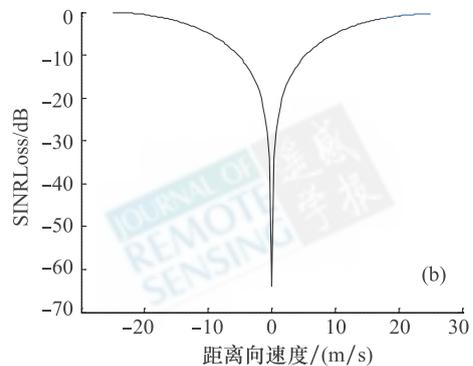
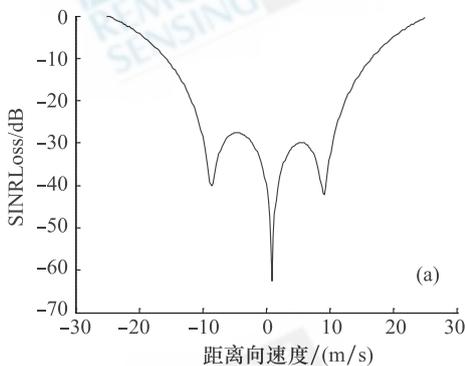


图4 干扰目标抑制前后所得的图像域 STAP SINRLoss 曲线

(a) 干扰目标抑制前;(b)干扰目标抑制后

Fig. 4 The SINR loss curve of image domain STAP before and after eliminating TSD

(a) before eliminating TSD; (b) after eliminating TSD

表2 多通道间的幅相误差及其估计结果

Table 2 Magnitude and phase error of multi-channel and the corresponding to estimators

	通道1	通道2	通道3	通道4	通道5
幅度误差实际值 $g_n$	1	0.8	0.9	1.1	1.2
幅度误差估计值	1.0000	0.8011	0.8996	1.1010	1.2010
幅度误差估计偏差	0	0.0011	-0.0004	0.001	0.001
相位误差实际值 $\theta_n/(\circ)$	0	40	110	230	310
相位误差估计值/ $(\circ)$	0	39.8747	110.0027	229.9790	309.9734
相位误差估计偏差/ $(\circ)$	0	-0.1253	0.0027	-0.021	-0.0266

当通道间存在幅相误差时,需要估计幅相误差并对其进行校正。根据杂波噪声协方差阵最大值对应的特征向量,可以估计幅相误差矢量。设置的5个通道间的幅相误差及其估计结果如表2,可看出幅度和相位估计均达到了较高精度。

需要说明的是,若估计杂波噪声协方差阵的训练样本中包含运动目标,幅相误差矢量的估计会出现一定的偏差,因此幅相误差的估计必须放在干扰目标抑制之后进行。

在实际中,由于事先不知道运动目标的距离向速度,需要在一定范围确定多个待检测的距离向速度进行 STAP 处理。将不同速度下每一像素位置输出能量的最大值取出,所得杂波抑制后的 SAR 图像显示如图 5,其中 4 个运动目标的峰值功率分别为  $-10.6$ ,  $-2.0$ ,  $-6.9$ ,  $0$  dB, 而杂波的功率低于  $-20$  dB, 此时运动目标检测已非常简单,故不再赘述。

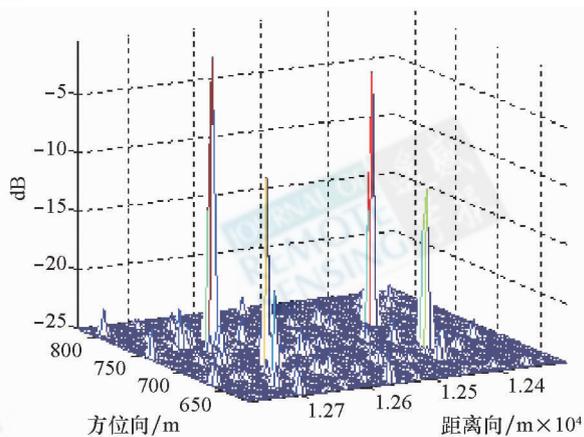


图 5 基于本文方法进行图像域 STAP 处理后的 SAR 图像  
Fig. 5 The output "clutter free" image after image domain STAP

## 5 结 论

本文分析了阵列误差和非均匀杂波环境对图像域 STAP 方法性能的影响,指出非均匀杂波使得图像域杂波噪声协方差阵的估计出现偏差,而阵列误差使得运动目标的图像域空时导向矢量无法精确给出,这些非理想因素的存在使得图像域 STAP 滤波器不能达到最优的杂波改善能力。本文提出了一种可适应阵列误差和非均匀杂波环境的图像域 STAP 方法。该方法通过功率选择训练法选择功率较大的辅助数据构成训练样本,并通过提出的 ISMI NHD 检测器剔除可能存在的运动目标的训练样本,并根据剔除包含运动目标的训练样本集估计出图像域杂波噪声协方

差阵;当存在阵列误差时,提出通过将图像域杂波噪声协方差阵进行特征值分解,根据特征向量估计阵列误差,并补偿阵列误差对空时导向矢量的影响。在此基础上,给出了同时存在阵列误差和非均匀杂波的图像域 STAP 处理方法。基于实测杂波数据的实验验证了本文所提方法的正确性。

虽然本文的方法仅基于单像素图像域 STAP 方法进行了讨论,但本文的方法不难推广用于基于多像素的图像域 STAP 方法,使之可适应非均匀杂波和阵列误差的情况。

## REFERENCES

- Bucciarelli M, Sedehi M, and Lombardo P. 2008. Wideband adaptive antenna nulling schemes for synthetic aperture radar. *IEEE Radar Conference*
- Ender J H G. 1999. Space-time processing for multichannel synthetic aperture radar. *Electronics & Communication Engineering Journal*
- Fielding P. J. 2002. GMTI performance estimation for airborne E-SCAN radar employing DPCA motion compensation. *IEEE Proceedings: Radar Sonar and Navigation* 286—290
- Li Z F. 2006. Approaches to SAR-InSAR-GMTI for Distributed Small Satellite SAR Systems. doctor dissertation, the Xidian University
- Soumekh M. 1997. Moving target detection in foliage using along track monopulse synthetic aperture radar imaging. *IEEE Transactions on Image Processing*. 6(8):1148—1163
- Melvin W L, Showman G A and Hersey R K. 2008 Adaptive radar: beyond the RMB rule. *IEEE Radar Conference*
- Melvin W L. 1997. Improving practical space-time adaptive radar. *IEEE National Radar Conference*
- Pettersson M I. 2004. Detection of moving targets in wideband SAR. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 40(3): 780—795
- Pulsone N. 2003. Improving ground moving target indication performance. *Proc. 2003 KASSPER Workshop*
- Rabideau D J and Steinhardt A O. 1996. Improving the performance of adaptive arrays in nonstationary environments through data-adaptive training. *Proc. of the 30th Asilomar Conf. On Signals, Systems and Computers*, Pacific Grove, CA, USA
- Rosenberg, L. 2007. Multichannel Synthetic Aperture Radar. doctor dissertation, The University of Adelaide, Australia
- Wang Y L and Peng Y N. 2000. *Space-Time Adaptive Processing*. Beijing: Tsinghua University Press
- Xie W C. 2006. STAP and Target Detection Technique for Airborne Radar in Nonhomogeneous Environments. doctor dissertation, National University of Science and Technology, Changsha, China
- Yang Z F and Soumekh M. 2005. Adaptive along-track multi-channel SAR interferometry for moving target detection and tracking. *IEEE International Radar Conference*
- Yegulalp A F. 2004. Wideband, Long-CPI GMTI. in 12th Annual ASAP

Workshop. Lincoln Laboratory, Lexington, Massachusetts.

王永良,彭应宁.2002.空时自适应信号处理.北京:清华大学出版社

### 附中文参考文献

李真芳.2006.分布式小卫星 SAR-InSAR-GMTI 的处理方法.西安:西安电子科技大学博士学位论文

谢文冲.2006.非均匀杂波环境下的机载雷达 STAP 方法与目标检测技术研究.长沙:国防科技大学博士学位论文

## A new image domain STAP method for multi-channel SAR with array distortion and non-homogeneity environments

CHANG Yu-lin, HUANG Xiao-tao, ZHOU Hong, ZHOU Zhi-min

*School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Hunan Changsha 410073, China*

**Abstract:** The multi-channel SAR image domain STAP methods, with a long coherent processing time, can achieve very high performance of clutter restrain and moving target detection. However, the array distortion and non-homogeneity environments have not been taken into consideration in the existing image domain STAP methods. This paper studies their influence on the performance of the image domain STAP, and then proposes a new multi-channel SAR image domain STAP method that can cope with array distortion and non-homogeneity environments. The introduced method first applies the Power Selection and Training (PST) method to select the training data, and then proposes a new Improved Sample Matrix Inversion (ISMI) method to remove the moving targets in the training data. With the training data eliminating the moving targets, the covariance matrix of the clutter is estimated. Afterwards the array distortion is estimated based on the covariance matrix, and the array distortion is calibrated later during the image domain STAP processing. The experiments based on real clutter data prove the validity of the introduced method.

**Key words:** STAP, image domain STAP, array distortion, non-homogeneity