

## 一种基于多级维纳滤波的多通道 SAR 动目标检测算法

田斌\* 朱岱寅 吴迪 朱兆达  
(南京航空航天大学电子信息工程学院 南京 210016)

**摘要:** 该文针对机载多通道 SAR-GMTI 系统及实测数据, 提出一种新的地面慢动目标检测算法。新算法利用多级维纳滤波器实现多通道 SAR 系统杂波抑制, 同时结合对角加载技术和非均匀检测器, 进一步改善 SAR 系统在非均匀环境下的动目标检测性能。实测数据实验结果表明: 与常规的自适应检测方法相比, 新算法能够明显提高系统对杂波的抑制能力及非均匀环境下系统的动目标检测性能。

**关键词:** 动目标检测; 多级维纳滤波器; 对角加载; 非均匀检测器; 恒虚警检测; 自适应功率剩余

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)10-2420-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.01138

## Multi-channel SAR Ground Moving Target Detection Based on Multistage Wiener Filter

Tian Bin Zhu Dai-yin Wu Di Zhu Zhao-da

(College of Electronics and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,  
Nanjing 210016, China)

**Abstract:** A novel approach to moving target detection is proposed for multi-channel SAR system. This approach utilizes multistage Wiener filter to suppress clutter. To improve performance of moving target detection in heterogeneous clutter environment, this new approach also combines diagonal loading techniques and non-homogeneity detector. Experimental results on measured SAR data are presented to demonstrate that compared to conventional adaptive SAR/GMTI method, the proposed method shows better clutter suppression capability and moving target detection performance in heterogeneous clutter environment.

**Key words:** Moving target detection; Multistage Wiener Filter (MWF); Diagonal loading; Non-Homogeneity Detector (NHD); Constant False Alarm Rate (CFAR) detection; Adaptive Power Residual (APR)

### 1 引言

以机载 SAR 技术为基础, 解决机载雷达对地面慢速运动目标的检测和定位问题, 是目前雷达信号处理领域的一个重要方向, 也是当前 SAR 领域的一个研究热点。所谓的慢动目标是指在空、时、频域上都落入主瓣杂波区的运动目标。提高运动目标信杂比是进行目标可靠检测的关键, 目前常用的技术途径主要有两类, 即单通道方法和多通道方法。单通道 SAR 系统对硬件需求较低, 运算量相对较小, 但它只能检测到频谱全部或部分落在杂波谱之外的运动目标。对频谱淹没在杂波谱之内的慢动目标的检测, 单通道方法一般难以实现。相对于单通道 SAR 系统, 多通道 SAR 系统增加了系统的空间自由度, 从而可利用多个空间自由度抑制展宽的主瓣杂波,

提高慢速运动目标的信杂比, 获得较好的检测性能。目前常用的多通道 SAR/GMTI 数据处理技术包括: 沿航迹干涉 (Along-Track Interferometry, ATI) 技术, 相位中心偏置 (Displaced Phase Center Antenna, DPCA) 技术和空时自适应处理 (Space Time Adaptive Processing, STAP) 技术等<sup>[1-5]</sup>。

由于系统误差和外部环境的未知性, 实际应用中杂波抑制往往通过自适应算法实现。自适应算法的基本原理是根据自适应滤波器自由度和训练样本数目的要求从待检测单元的相邻单元中选取若干单元作为训练样本, 来估计待检测单元杂波的协方差矩阵, 再用估计得到的协方差矩阵形成自适应权矢量处理待检测单元数据, 最后由所得结果与自适应门限比较得到检测结果。为了全面精确估计待检测单元中杂波的统计特性, 自适应方法要求训练样本和待检测样本中的杂波应该是独立同分布 (Independent and Identically Distributed, IID) 的。然而, 机载雷达面临的真实环境往往是非均匀的,

2010-10-25 收到, 2011-06-27 改回

国家自然科学基金(61071165)和教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-09-0069)资助课题

\*通信作者: 田斌 Tianbin218@163.com

由非均匀训练样本估计的结果不能准确反映待检测单元杂波的真实统计特性，从而导致常规自适应算法的性能显著下降。为了避免干扰目标污染样本，Melvin 等人<sup>[6]</sup>提出了一种简单的处理方案——用非均匀检测器来检测和删除训练样本中的干扰目标。非均匀检测器(Non-Homogeneity Detector, NHD)可有效地剔除干扰目标，但它同时又减小了训练样本数目，使得常规自适应算法难以快速收敛到正确权值。因此，研究新型非均匀环境下的多通道 SAR 动目标检测算法具有重要的现实意义。本文在多级维纳滤波器<sup>[7,8]</sup>的基础上，结合对角加载技术和非均匀检测器，提出了一种适用于非均匀环境下的多通道 SAR 动目标检测算法。实测数据实验结果表明：与常规的自适应检测方法相比，新算法能够明显提高系统对杂波的抑制能力及非均匀环境下系统的动目标检测性能。

## 2 基于对角加载的多级维纳滤波器工作原理

### 2.1 多级维纳滤波器的工作原理

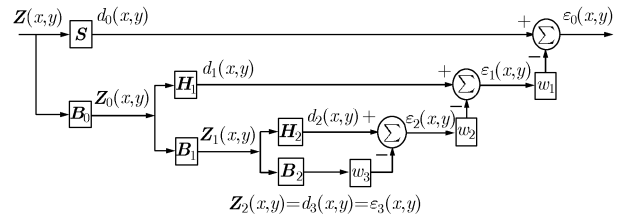
首先分析多通道 SAR 系统的信号模型。假设多通道 SAR 系统沿航迹方向等间隔排布  $N$  个接收孔径(通道)，位于中心的孔径发射信号，所有孔径同时接收回波数据。在完成对各通道回波数据 SAR 成像处理后(各通道 SAR 图像的运动补偿是对同一成像区中心点进行的)，构造空域采样信号矢量  $\mathbf{Z}(x, y) = [z_1(x, y), z_2(x, y), \dots, z_N(x, y)]^T$ ，其中  $n(n = 1, 2, \dots, N)$  为通道序号， $z_n(x, y)$  表示第  $n$  个接收通道的 SAR 图像像素， $x, y$  分别表示距离单元与方位(多普勒)单元序号。在  $H_0$  (无目标信号，只有杂波和热噪声)和  $H_1$  (既有目标信号，又有杂波和噪声)二元假设下，可将  $\mathbf{Z}(x, y)$  表示成如下形式：

$$\mathbf{Z}(x, y) = \begin{cases} b\mathbf{S}(x, y) + \mathbf{C}(x, y) + \mathbf{N}(x, y), & H_1 \text{ 假设} \\ \mathbf{C}(x, y) + \mathbf{N}(x, y), & H_0 \text{ 假设} \end{cases} \quad (1)$$

其中  $b$  表示目标回波幅度， $\mathbf{C}(x, y)$ ， $\mathbf{N}(x, y)$  分别表示杂波分量和噪声分量， $\mathbf{S}(x, y)$  为目标信号的导引矢量。

为了对图像中的动目标信号进行检测，通常先要对杂波分量进行抑制，从而达到提高动目标的信杂比(SCR)的目的。空域自适应处理的杂波对消实际上是矢量维纳滤波的过程。多级维纳滤波器(MWF)是 Goldstein 等人<sup>[7,8]</sup>提出的一种新型的滤波器结构。MWF 利用一系列正交子空间投影变换将矢量维纳滤波器进行逐级分解，把对权矢量的求解分解成求若干个标量权，最后综合出矢量维纳滤波器的输出误差信号。MWF 用一系列标量维纳滤波

代替求解矢量维纳滤波器，有效避免了协防矩阵估计及求逆。与此同时，利用 MWF 还可直接进行降秩，对 MWF 作  $r$  级截断，即得到秩为  $r$  的降秩 MWF。与基本特征分解的降秩算法<sup>[9]</sup>相比，MWF 的降秩性能更好，收敛所需要的样本数更少。因此，多通道 SAR 系统采用 MWF 抑制主杂波，可有效减少估计权矢量所需的样本数目及系统的运行时间。图 1 给出了降秩 MWF 实现原理图。图中  $\mathbf{S}$  为归一化信号导引矢量， $\mathbf{B}_0$  为  $\mathbf{S}$  的零空间； $\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2$  为多级维纳滤波器各级的匹配滤波器， $\mathbf{H}_i$  通过归一化前一级期望信号  $d_{i-1}(x, y)$  和数据信号  $\mathbf{Z}_{i-1}(x, y)$  的互相关矢量得到； $\mathbf{B}_1, \mathbf{B}_2$  分别为对  $\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2$  的阻塞矩阵， $\mathbf{B}_i$  的列矢量形成  $\mathbf{H}_i$  零空间的正交基，即  $\mathbf{B}_i^H \mathbf{H}_i = 0$ ； $w_i$  为标量权系数， $\varepsilon_i(x, y)$  为估计误差。



结构提出了3种有效实现对角加载的方法:(1)  $\mathbf{R}_d$  加载; (2) 标量加载; (3) 误差加载。其中,  $\mathbf{R}_d$  为输入矢量经 MWF 转换矩阵分解后新数据矢量的自相关矩阵。仿真实验结果表明: 在加载因子一定的条件下,  $\mathbf{R}_d$  加载和标量加载的作用效果是一样的; 对于误差加载, 由于其最终加载结果总是小于期望的加载值, 使得该加载算法的输出信杂噪比略低于前两种加载算法。本文在实测数据处理时采用  $\mathbf{R}_d$  加载。该算法是通过修正 MWF 前向递推公式中的参量  $\sigma_{d_i}^2$  实现 MWF 的对角加载, 其具体修正如下:

$$\bar{\sigma}_{d_i}^2 = \sigma_{d_i}^2 + \alpha \quad (2)$$

其中  $\alpha$  为加载因子, 其经验取值为背景噪声的 5-10 dB。

### 3 干扰目标检测

实际处理中, 样本中包含干扰目标往往是难以避免的, 例如当某一单元存在目标信号, 而在检测其它单元用其作为训练样本时, 目标信号就成为干扰信号。干扰目标的存在使得估计出来的权矢量严重偏离了其期望值, 进而导致处理器的性能显著下降。对此可采用一种简单有效的处理方案——用非均匀检测器来检测和剔除训练样本中的干扰目标, 目前常用的非均匀检测器包括广义内积 (Generalized Inner Product, GIP) 和自适应功率剩余 (Adaptive Power Residual, APR) 非均匀检测器等。广义内积非均匀检测器 (GIP-NHD) 是根据样本数据白化矢量的内积值来判别样本的均匀与非均匀性。由于该检测器没有抑制杂波而且没有用到导引矢量, 一些能量大的杂波样本很容易被误判为非均匀样本, 从而导致杂波功率估计偏低, 相应的自适应凹口变浅, 杂波得不到充分抑制。下面主要讨论自适应功率剩余非均匀检测器 (APR-NHD)。

APR-NHD 检验统计量为

$$\text{APR}_i = \left| \mathbf{S}^H \hat{\mathbf{R}}_M^{-1} \mathbf{Z}(x+i, y) \right|^2, \quad i = -M/2, \dots, M/2, \text{ 且 } i \neq 0 \quad (3)$$

其中  $\hat{\mathbf{R}}_M$  是由训练样本估计出的协方差矩阵。  $M$  表示参与估计的样本数。它的物理解释是先对样本  $\mathbf{Z}(x+i, y)$  中的杂波作白化抑制后再对主瓣方向待检测信号作相干积累。一般情况下, 若  $\mathbf{Z}(x+i, y)$  的协方差矩阵结构与  $\hat{\mathbf{R}}_M$  相同或相似, 则  $\mathbf{Z}(x+i, y)$  是均匀的; 否则, 若  $\mathbf{Z}(x+i, y)$  的协方差矩阵结构与  $\hat{\mathbf{R}}_M$  显著不同, 则  $\mathbf{Z}(x+i, y)$  是非均匀的。在  $\hat{\mathbf{R}}_M$  未被强干扰目标污染时, 由于 APR-NHD 杂波剩余较小, 其性能相当理想; 然而, 当  $\hat{\mathbf{R}}_M$  被强干扰目标污染时, 由强干扰目标造成的协方差矩阵的估计误

差, 会导致杂波剩余增加, 而干扰目标输出减小, 从而使得 APR-NHD 无法有效识别出较弱的干扰目标。为此, 本文对原有的 APR-NHD 进行了改进。

在改进型 APR-NHD 中, 检测之前需要对多通道 SAR 图像进行一些预处理。首先根据 SAR 成像几何关系及惯导系统提供的平台运动参数逐像素补偿由接收天线位置不同引起的固定相位差; 其次, 利用基于回波数据的通道均衡算法<sup>[11]</sup>校正由各种非理想因素导致的通道误差。经以上两步补偿处理后, 每一个像素单元的杂波空域采样信号可近似为<sup>[12]</sup>

$$\mathbf{C}(x, y) = c[1, 1, \dots, 1]^T \quad (4)$$

其中  $c$  为此像素单元中杂波的复幅度。此时, 不同像素单元的杂波协方差矩阵均近似具有如下形式:

$$\mathbf{R}'(x, y) = \sigma_c^2 \mathbf{1}_{N \times N} + \sigma_n^2 \mathbf{I}_{N \times N} \quad (5)$$

其中  $\mathbf{1}_{N \times N}$  为阵元均全 1 的  $N \times N$  矩阵,  $\mathbf{I}_{N \times N}$  为  $N \times N$  单位矩阵,  $\sigma_c^2$ ,  $\sigma_n^2$  分别为杂波与噪声的功率。此补偿的目的是使不同方位像素单元的杂波协方差矩阵具有相似的形式, 从而便于改进型 APR-NHD 分块剔除处理。

APR-NHD 具体改进如下:

(1) 在未做补偿处理之前, 由于不同方位像素单元杂波的协方差矩阵不同, APR-NHD 算法的样本剔除过程一般只能通过局部剔除方法实现, 即沿距离维选取  $P$  个备选训练样本, 利用式(3)计算得到每个备选样本对应的 APR 值, 根据计算结果从中挑出  $M$  ( $M < P$ ) 个均匀样本用于滤波器权矢量估计。在实际的工作应用中, 为了降低强干扰目标对检测器性能的影响, 通常会增加备选训练样本的个数  $P$ 。然而, 当  $P$  增加时, 由于备选样本涉及距离范围大, 备选样本自身的非均匀性也将随之增大, 这在一定程度上会给协方差矩阵估计带来额外的误差。在改进的 APR-NHD 中, 样本的剔除过程是通过分块剔除方法实现的。由于经过了先前的图像补偿, 因此在作样本剔除时, 我们可将 SAR 图像分成若干个子块, 每个子块中既包含距离单元又包含方位单元, 分别进行 APR-NHD 检测。分块剔除有效减小了备选样本涉及的距离范围, 降低了其非均匀性; 此外, 为了减小强干扰目标造成的协方差矩阵估计误差, 分块时应确保每个子块的样本数目足够多, 本文在实测数据处理时所选子块的大小为  $20 \times 20$  个像素。在对所有子块进行完 APR-NHD 处理后, 便可利用 MWF 抑制杂波, 估计权矢量所用的样本要避免那些被检测出的非均匀样本。

(2) 为了提高 APR-NHD 对弱干扰目标的识别能力, 在改进的 APR-NHD 中, 我们借助探针向量来判别样本的均匀与非均匀性。在估计各子块协方差矩阵之前, 预先在初始训练样本中设定一样本作

为探针向量，该探针向量的形式为  $v_p \mathbf{S}$ ，其中  $\mathbf{S}$  为归一化信号导引矢量， $v_p$  为预定的幅度值，其取值控制在高于噪声能量的 10-15 dB；在作样本剔除时，若样本对应的 APR 值小于探针向量对应的 APR 值，则认为该样本是均匀样本，应当保留，否则为非均匀样本，应当剔除。探针向量的引入，有效保证了能量高于  $v_p$  的干扰目标通过 APR 检测，增强了检测器对弱干扰目标的识别能力。

### 4 多通道 SAR 动目标检测流程

图 2 以 3 通道 SAR 系统为例给出了本文所提的动目标检测算法的基本流程，其实现过程可概括为：

第 1 步 对 3 通道的回波数据进行 SAR 成像处理<sup>[13]</sup>；

第 2 步 SAR 图像匹配。由于 3 幅 SAR 图像分别来自 3 个不同的接收孔径，因此，在做进一步处理前，需对 3 幅 SAR 进行像素位置的配准。这里，按照相关系数最大<sup>[14]</sup>的准则对 3 幅图像进行了像素位置的配准；

第 3 步 通道误差校准。由于受到各种非理想因素的影响，各个通道之间往往存在响应差异。为了得到较好的检测性能，必须对通道误差进行有效的补偿。试验中，采用 Ender 提出的两维频域迭代的方法校正通道误差；

第 4 步 构造空域采样信号矢量  $\mathbf{Z}(x, y) = [z_1(x, y), z_2(x, y), z_3(x, y)]^T$ ；

第 5 步 干扰目标检测。将 SAR 图像分成若干个子块，采用改进的 APR-NHD 检测和剔除每个子块样本中的干扰目标，直到所有子块检测完毕；

第 6 步 空域自适应滤波处理。利用 MWF 杂波抑制方法进行杂波抑制，估计权矢量所用的样本要避开那些被检测出的非均匀样本。为了提高滤波器的输出信杂噪比，同时将对角加载应用于 MWF 中。在确定最优加载因子时，本文所采用的方法是 L-曲线法<sup>[15]</sup>；

第 7 步 CFAR(Constant False Alarm Rate) 检测。对空域自适应滤波处理后的输出结果进行单元平均 CFAR<sup>[16]</sup>检测，给出最终的 CFAR 检测结果。

### 5 实测数据处理

本节，为验证新算法的杂波抑制性能，本文对某型机载 3 通道沿航迹干涉 SAR 的试飞数据进行了处理。试验中，雷达工作在 X 波段，飞机高度为 5300 m，飞行速度为 110 m/s，天线相位中心到成像区中心的距离为 22464 m，发射 LMF 信号带宽 180 MHz，脉冲重复频率 1250 Hz，孔径之间距离 0.7 m。地面场景中，5 个地面配合目标行驶在一段车辆相对较少且笔直的乡间小道上，其中有两辆车的方向与另外 3 辆的方向相反，5 辆车的车速控制在 1~7 m/s。图 3 给出了经过通道误差校正、位置配准后的地面成像区域的 SAR 图像，由于 3 个通道的 SAR 图像相似，因此只给出了中心通道的图像。

有了上述配准后的 3 幅 SAR 图像，便可按照上节所述流程对 SAR 图像进行空域自适应滤波处理。图 4 给出了结合 DL 的 MWF 抑制杂波方法的输出结果图(训练样本由与待检测单元上、下、左、右相邻的像素单元组成)。图中，白色的阿拉伯数字标识出试验中的运动目标，经过确认后，其中 1, 2, 3, 4, 5 为 5 个地面配合车辆，6 为试验时出现在场景内的其它过往车辆。从图 5 中可以看出，SAR 图像中的大部分杂波已经被充分抑制，然而当处理与目标距离相邻的像素单元时，由于训练样本中包含了目标信号，使得估计得到的权矢量严重偏离了其期望值，从而造成目标周围杂波的大量残留。当训练样本增加时，上述这种情况将有所改善，但单纯的增加训练样本并不能从根本上解决样本的非均匀问题。另外，过多的训练样本也会导致运算量的增加，给实时处理带来更大的负担。图 5 给出了结合 DL 和 GIP 的 MWF 抑制杂波方法的输出结果图，对比图 4 和图 5 可以看出，目标周围的杂波剩余已经被有效地抑制，然而由于一些强杂波数据也被误认为是干扰

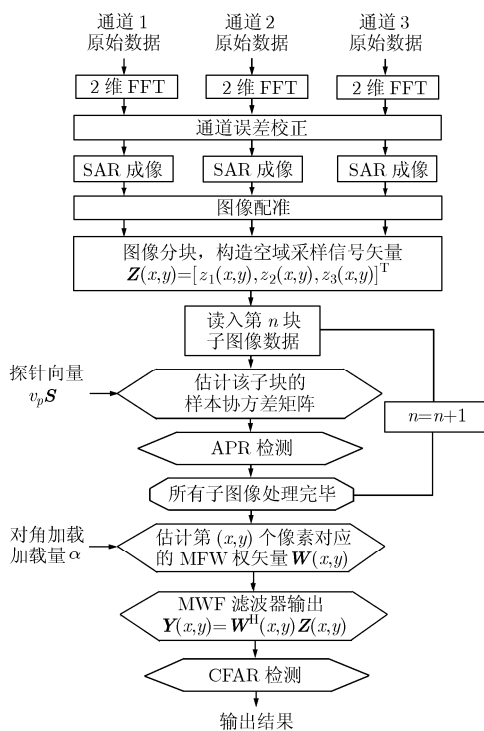


图 2 本文所提算法的动目标检测流程图

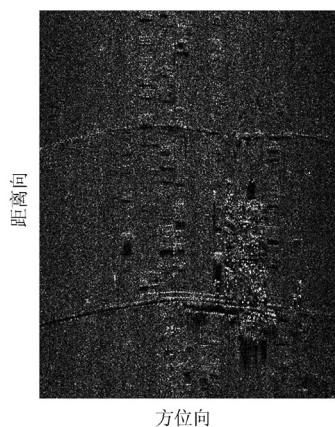


图3 目标区域 SAR 图像

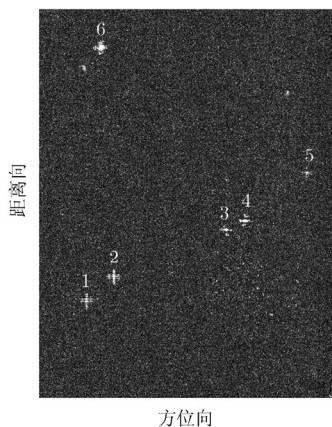


图4 结合 DL 处理的输出结果图

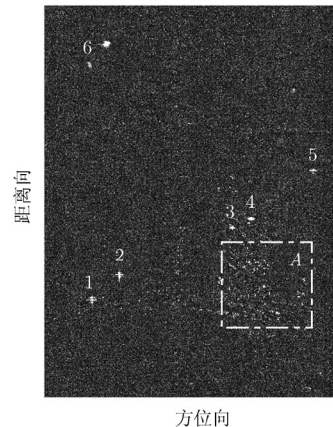


图5 结合 DL 和 GIP 处理的输出结果图

目标,从而导致部分区域的杂波得不到充分的抑制(图中 A 区所示)。图 6 给出了结合 DL 和 APR 的 MWF 抑制杂波方法的输出结果图,从图中明显看出,目标 6 周围还留有部分杂波能量残余。图 7 是本文所提算法的处理结果,观察可知,本文所提算法不但可以有效地抑制杂波,同时还消除了目标周围杂波能量残余较大的问题。

为了进一步对改进型 APR-NHD 进行验证,并与原有的 APR-NHD 进行比较,本文在这块数据中新添加了 5 个运动参数不同的仿真动目标,其中 2 个动目标的能量较大(目标 1', 目标 2' 的信噪比分别为 35 dB, 30 dB), 剩余 3 个动目标的能量较小(目标 3', 目标 4', 目标 5' 的信噪比分别为 10.5 dB, 11 dB, 11.5 dB), 5 个目标的径向速度控制在 1.5~6 m/s。图 8(a)和 8(b)分别给出了结合传统 APR-NHD 和结合改进型 APR-NHD 的 MWF 抑制杂波方法的输出结果图。从输出结果中容易看出,图 8(a)中 3 个能量较弱的动目标周围仍存在着不同程度的杂波能量残余,而图 8(b)中并不存在目标周围杂波能量残余较大的问题,该仿真实验进一步验证了改进型

APR-NHD 对弱干扰目标的强识别能力。

在完成上述杂波抑制处理后,作为对比分析,本文同时采用了结合 DL 和 APR(改进后)的样本矩阵求逆(SMI)算法对数据进行了处理。为了直观地比较两种方案的杂波抑制及信杂噪比改善效果,图 9 给出了当训练样本分别为 6, 12 时,动目标 4 所在方位单元空域滤波后的输出能量的剖面图。从图中容易看出,本文所提动目标检测算法的杂波抑制能力优于常规的 SMI 算法。除此之外,本文还对两种算法的运算量进行了对比分析。假设雷达天线数目为  $N$ , 训练样本数目为  $L$ , 降秩 MWF 的维数为  $M$ , 常规的 SMI 算法计算一个权矢量所需的运算量为  $(N)^3 + L(N)^2$ , 而降秩 MWF 的运算量为  $L[(N)^2 - (N - M)^2]$ 。由此可见,降秩 MWF 的运算量小于 SMI 算法。

空域自适应滤波处理完成后,对两种算法的输出结果图分别进行了单元平均 CFAR 检测,虚警概率设为  $10^{-6}$ ,动目标 CFAR 检测结果如图 10 所示(标数字的为目标,其余为虚警)。图中,仅给出了训练

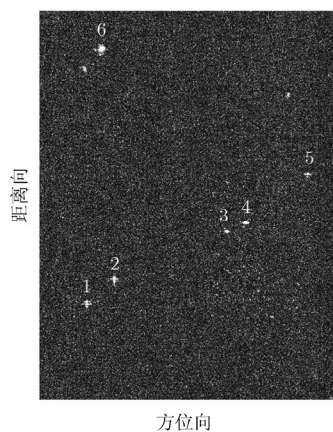


图6 结合 DL 和 APR 处理的输出结果图

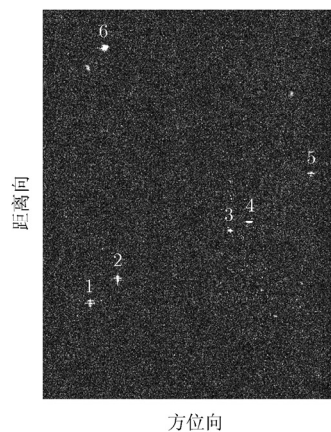


图7 本文所提方法的输出结果图

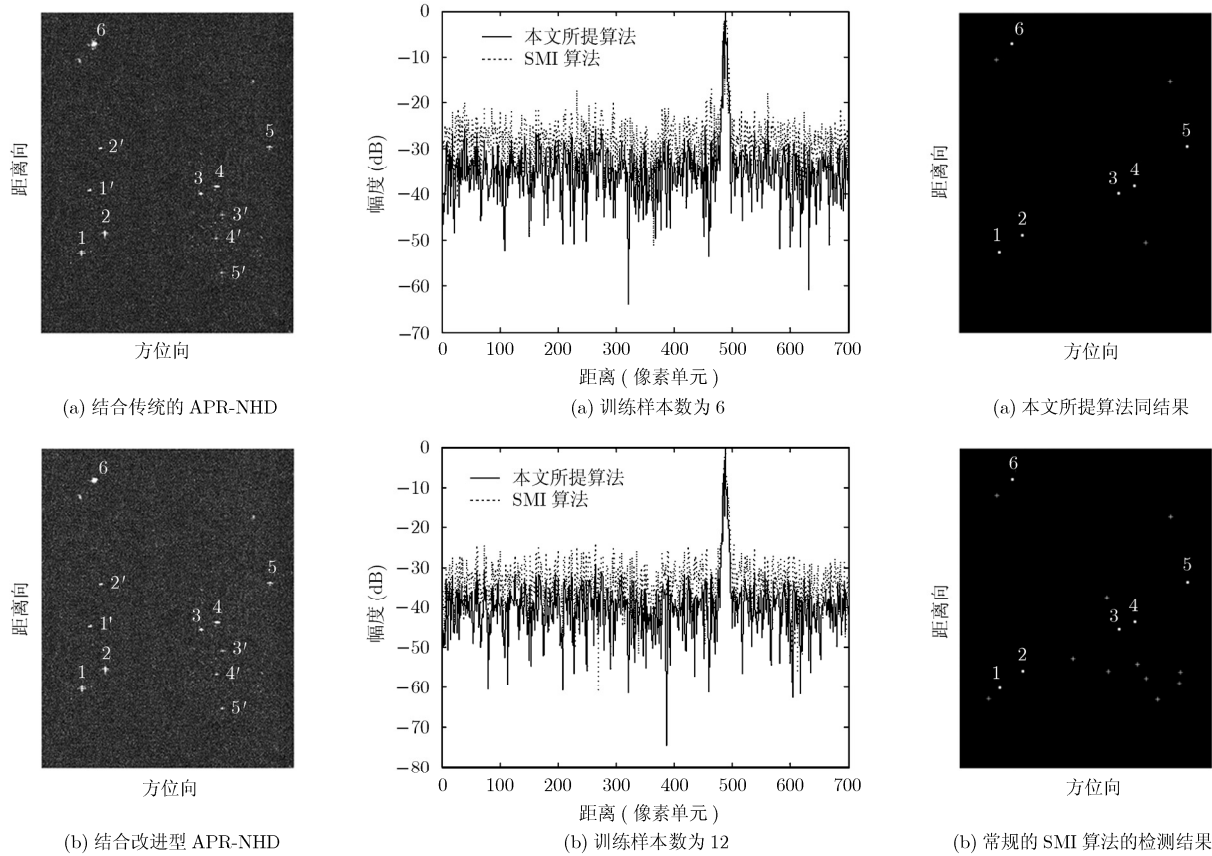


图 8 存在仿真动目标时的输出结果图

图 9 空域滤波后动目标 4 所在距离单元方位剖面图

图 10 SAR 图像的动目标的检测结果

样本为 12 且采用改进型 APR-NHD 时两种算法的检测结果，限于篇幅，我们将其它各次实验的检测结果列于表 2。从图 10 和表 2 中的检测结果可以看出，与常规的 SMI 算法相比，本文所提算法大大降低了系统的虚警概率，有效提高了系统对动目标的检测性能。此外，从表 2 中两种非均匀检测器的对比结果不难发现，对于同一杂波抑制算法而言，采用改进型 APR-NHD 剔除干扰目标可以减少 CFAR 检测结果的虚警数，其原因是改进型 APR-NHD 能有效提高系统对弱干扰目标的识别能力，确保权矢量估计的准确性，从而降低目标周围的杂波剩余，减少检测结果中出现的虚警数。

### 6 结论

本文针对非均匀环境对多通道 SAR/GMTI 动目标检测性能的影响，提出了一种新的动目标检测算法。该算法将多级维纳滤波器用于多通道 SAR 系统杂波抑制，同时结合对角加载技术和非均匀检测器，提高 SAR 系统在非均匀环境下的动目标检测性能。实测数据实验结果证明了该算法的有效性和优越性。

表 2 动目标 CFAR 检测结果

采用算法	采用的 NHD	训练样本数	检测数	虚警数
常规的 SMI 算法	常规的 APR	6	6	24
	改进的 APR		6	19
	常规的 APR	12	6	14
	改进的 APR		6	11
本文所提算法	常规的 APR	18	6	8
	改进的 APR		6	6
	常规的 APR	6	6	11
	改进的 APR		6	8
	常规的 APR	12	6	5
	改进的 APR		6	3
	常规的 APR	18	6	2
	改进的 APR		6	1

### 参考文献

[1] Barber B C and Barker J E. The use of SAR-ATI for maritime surveillance and difficult target detection [C]. Proc. of 2009 IEEE National Radar Conf. Bordeaux, France, 2009: 1-6.

- [2] Chapin E and Chen C W. Airborne along-track interferometry for GMTI [J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2009, 24(5): 13–18.
- [3] Banahan C P, Perks D, Baker C, *et al.* GMTI clutter cancellation using real non-ideal data [J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2009, 4(2): 302–314.
- [4] Shackelford A K, Gerlach K, and Blunt S D. Partially adaptive STAP using the FRACTA algorithm [J]. *IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems*, 2009, 45(1): 58–69.
- [5] Wang Ling, Zhen Lu-gui, and Guan Ya-lin. Novel space-time processing method for airborne SAR to detect and image the slowly moving targets [C]. The Third International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization, Huangshan, China, 2010: 435–439.
- [6] Melvin W L and Wicks M C. Improving practical space-time adaptive radar [C]. Proc. of 1997 IEEE National Radar Conf., Syracuse, New York, 1997: 48–53.
- [7] Goldstein J S, Reed I S, and Zulch P A. Multistage partially adaptive STAP CFAR detection algorithm [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(2): 645–661.
- [8] Goldstein J S, Reed I S, and Scharf L L. A multistage representation of the Wiener filter based on orthogonal projections [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1998, 44(7): 2943–2959.
- [9] Sud S, Myrick W L, and Goldstein J S. Tri-diagonalization of the covariance matrix generated by the multistage Wiener filter for whitening blind signals [C]. Proc. of 2003 IEEE WCNC, New Orleans, USA, 2003: 627–631.
- [10] Hiemstra J D. PHD thesis proposal: Robust implementations of the multistage wiener filter [D]. [Ph.D. dissertation], Virginia Polytechnic Institute and State University, USA, 2003.
- [11] Ender J H G. The airborne experimental multi-channel SAR-system AER-II [C]. 1996 EUSAR Conf Proceedings, Königswinter, Germany, 1996: 49–52.
- [12] Wu Di, Zhu Dai-yin, and Zhu Zhao-da. Knowledge-aided multichannel adaptive SAR/GMTI processing: algorithm and experimental results [J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing: Special Issue on Advances in Multidimensional Synthetic Aperture Radar Signal Processing*, 2010, 2010: 1–12.
- [13] Zhu Dai-yin, Nie Xin, and Zhu Zhao-da. Polar format algorithm using chirp scaling for spotlight SAR image formation [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2008, 44(4): 1433–1448.
- [14] Fornaro G and Franceschetti G. Image registration in interferometric SAR processing [J]. *IEE Proceedings Radar, Sonar and Navigation*, 1995, 142(6): 313–320.
- [15] Hiemstra J D, Weippert M E, Goldstein J S, *et al.* Application of the L-curve technique to loading level determination in adaptive beamforming [C]. The 36th Asilomar Conference on Signals, System and Computers, Chantilly, USA, 2002, Vol.2: 1261–1266.
- [16] 何友, 关键, 彭应宁等. 雷达自动检测与恒虚警处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995, 第 6 章.
- 田 斌: 男, 1983 年生, 博士生, 研究方向为地面慢动目标检测.
- 朱岱寅: 男, 1974 年生, 教授, 研究方向为雷达成像与信号处理.
- 吴 迪: 男, 1982 年生, 博士生, 研究方向为地面慢动目标检测.
- 朱兆达: 男, 1939 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达信号检测与处理.