

基于改进 FRACTA 算法的多通道 SAR 动目标检测技术

吴迪 朱岱寅 朱兆达

(南京航空航天大学信息科学与技术学院 南京 210016)

摘要: 该文针对实际非均匀杂波环境对多通道 SAR/GMTI 动目标检测性能的影响, 提出了一种改进型 FRACTA 算法。该算法将 STAP 中的 FRACTA 算法引入多通道 SAR 系统中, 并进行改进, 提高了其在多通道 SAR 系统中的检测性能和运算速度。实测数据处理结果表明, 与传统的检测方案相比, 该文算法能够在非均匀环境中明显地提高检测性能, 是一种非均匀环境中鲁棒的多通道 SAR 动目标检测算法。

关键词: 合成孔径雷达; 地面动目标指示; FRACTA 算法; 恒虚警检测

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)09-2201-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.01218

Moving Target Detection for Multi-channel SAR Based on Improved FRACTA Algorithm

Wu Di Zhu Dai-yin Zhu Zhao-da

(College of Information Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: According to the performance loss of moving target detection for a multi-channel SAR/GMTI system caused by the heterogeneous clutter environments, this paper proposes a new improved FRACTA algorithm. It arises from the improvements of the FRACTA algorithm and is proved to be more effective and computationally efficient for a multi-channel SAR system. As is verified by experimental results, this algorithm greatly overperforms the traditional detection method and shows robust in heterogeneous environments.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); Ground Moving Target Indication (GMTI); FRACTA algorithm; Constant False Alarm Rate (CFAR) detection

1 引言

合成孔径雷达地面动目标指示技术(SAR/GMTI)^[1]作为 SAR 技术的扩展, 是多年来雷达领域的研究热点。其中, 多通道 SAR 系统不仅具备对地面高分辨率成像的功能, 还同时具备良好的主瓣杂波抑制能力和较小的最小可检测速度(MDV), 是一项实际可行的 SAR/GMTI 技术。在多通道 SAR 处理中, 成像往往和偏置相位中心天线(DPCA)技术^[2]、沿航迹干涉(ATI)技术^[3]以及空时自适应处理(STAP)^[4,5]等技术相结合, 实现杂波的抑制, 从而在 SAR 图像中实现对弱小动目标的检测。近些年来, 国外在多通道 SAR 技术的研究与应用中投入了大量的工作, 其中美国已经在其 E-8C 预警机上搭载了三接收孔径的 JSTARS 系统^[6], 并于海湾战争中实现了对伊拉克装甲部队检测、定位功能。除此之外, 近些年各个型号的多通道 SAR 系统也纷纷进行了试飞实验, 如加拿大的双通道多模 X 波段雷达^[7],

德国应用科学研究所(FGAN)的 AER 系统^[8], PAMIR 系统^[9]。国内, 多个高校与研究机构也长期致力于此项技术的研究, 特别是近几年的三通道 SAR 系统的试飞实验, 极大地推动了此项技术的发展^[10-12]。

在实际处理中, 由于内部系统与外部环境的未知性, 杂波的抑制往往通过自适应算法实现, 通过数据中独立同分布(i.i.d)的训练样本估计杂波及噪声的属性, 自适应地形成空域滤波器, 最大程度抑制非目标分量, 随后对杂波抑制后的 2 维图像进行恒虚警(CFAR)检测, 从而实现运动目标的检测^[3]。然而, 实际杂波环境的非均匀性以及各种干扰目标的存在使得参与估计样本的 i.i.d 条件难以满足, 从而导致检测性能下降, 使得多通道 SAR 系统无法达到满意的检测率, 并且检测结果中往往伴随着大量虚警目标的存在。因此, 研究非均匀环境中有效的动目标检测方案具有重要的现实意义。本文在重点研究 Gerlach 等提出的针对空时自适应处理(STAP)的 FRACTA 算法^[13]及其增强型算法(FRACTA.E)^[14]的基础上, 将其引入多通道 SAR 系

统中, 并对原有算法进行了改进, 提出了一种适于多通道 SAR 系统的改进型 FRACTA 算法。实测数据处理结果表明, 与传统的多通道 SAR 动目标检测算法相比, 改进型 FRACTA 算法能够在非均匀环境中有效地提高动目标检测性能, 与原有的 FRACTA 算法相比, 改进型 FRACTA 算法在多通道 SAR 处理中能够得到更高的检测概率和运算效率, 是一种鲁棒的多通道 SAR/GMTI 动目标检测方案。

2 多通道 SAR 信号模型

设多通道 SAR 系统各个接收孔径沿航迹等间隔排列, 间隔为 d 。位于中心的孔径用于发射信号, 所有孔径同时接收。首先对各个通道的回波信号分别进行 SAR 成像处理, 且各通道的成像运动补偿都是对同一成像区中心点进行。经成像处理后, 令 $\mathbf{z}(m, n) = [z_1(m, n), z_2(m, n), \dots, z_K(m, n)]^T$ 表示 SAR 图像中某一像素单元的空域采样信号矢量, 其中 $k(k = 1, 2, \dots, K)$ 为通道序号, m, n 分别表示距离单元与方位(多普勒)单元序号, 上标 T 为转置运算。根据信号检测理论中的两种假设, 可将 $\mathbf{z}(m, n)$ 表示为

$$\mathbf{z}(m, n) = \begin{cases} \mathbf{s}(m, n) + \mathbf{c}(m, n) + \mathbf{n}(m, n), & H_1: \text{目标存在} \\ \mathbf{c}(m, n) + \mathbf{n}(m, n), & H_0: \text{目标不存在} \end{cases} \quad (1)$$

其中 $\mathbf{c}(m, n)$ 表示杂波分量, $\mathbf{n}(m, n)$ 表示加性噪声分量, $\mathbf{s}(m, n)$ 为目标信号。为了对图像中的动目标信号进行检测, 首先需要对杂波与噪声分量进行抑制, 从而达到提高动目标的信杂噪比(SCNR)的目的。对于某一像素单元, 使得动目标输出 SCNR 最大的最优权矢量可表示为^[4,5]

$$\mathbf{w}(m, n) = \alpha \mathbf{R}^{-1}(m, n) \mathbf{s}_{\text{steer}} \quad (2)$$

其中 $\mathbf{s}_{\text{steer}}$ 为动目标的导引矢量, α 为任意常数, $\mathbf{R}(m, n)$ 为杂波与噪声的协方差矩阵, 由 H_0 假设时的输入矢量求得

$$\mathbf{R}(m, n) = E \{ \mathbf{z}_{H_0}(m, n) \mathbf{z}_{H_0}^*(m, n) \} \quad (3)$$

式中 $E \{ \bullet \}$ 表示统计平均, 上标 * 为共轭转置运算。实际中, 由于杂波与噪声环境的未知, $\mathbf{R}(m, n)$ 必须从样本中估计得出, 当参与估计的样本服从零均值复高斯分布, 且与检测单元信号服从独立同分布(i.i.d)时, 其极大似然估计形式为^[4,5]

$$\hat{\mathbf{R}}(m, n) = \frac{1}{L} \sum_{l=m-L/2, l \neq m}^{m+L/2} \mathbf{z}(l, n) \mathbf{z}^*(l, n) \quad (4)$$

将此协方差矩阵估计值代替式(2)中的真实值便可完成权矢量的计算, 实现杂波的抑制。经过杂波抑制处理后的输出图像中, 每个像素单元的输出

信号可表示为

$$z_{\text{out}}(m, n) = \mathbf{w}^*(m, n) \mathbf{z}(m, n) \quad (5)$$

现有的多通道 SAR 检测方案通常对此输出图像进行单元平均的恒虚警(CA-CFAR)检测, 通过周围单元的输出功率和预先设定的虚警概率来计算待检测单元的检测门限, 高于门限的像素单元被认为是目标存在的单元。随后, 对检测到的目标进行速度与真实方位的估计, 从而完成 SAR/GMTI 处理。

在实际处理中, 上述动目标检测方案很难到达令人满意的效果。导致其检测性能下降的一个重要原因在于实际中杂波环境的非均匀性, 参与估计的样本与检测单元信号的 i.i.d 条件难以满足。杂波的非均匀性可由许多因素引起, 如地貌的区域变化引起的功率非均匀, 各种干扰目标的存在, 以及动目标自身的存在等。这些因素直接导致了利用式(4)估计的协方差矩阵偏离真实值, 从而引起了权矢量的错误计算, 使得后续检测性能下降。因此, 设计适合非均匀环境下的多通道 SAR 动目标检测算法是急需解决的问题。

3 FRACTA 算法简述

为了在实际的非均匀杂波环境中更精确地检测运动目标, Gerlach 等人于 2004 年提出了用于空时自适应处理(STAP)的 FRACTA 算法^[13], 并于 2005 年提出了其增强型算法 FRACTA.E^[14], 2009 年, 又将其运用于降维的 STAP 处理中^[15]。作为一种非均匀检测算法, FRACTA 算法分别经过了 MCARM、KASSPER I 数据的验证, 是一种非均匀环境中性能良好的动目标检测算法。

作为一种组合式算法, FRACTA 算法由以下 6 种算法和方案组成, 即快速极大似然(FML)算法、反复剔除(RC)算法、自适应功率剩余(APR)检验、并行块处理(CBP)、两种加权法(TWM)、自适应相关估计(ACE)检测, FRACTA 即为这 6 种算法英文名称首字母的组合。

作为一种多层的检测器, FRACTA 依次通过以下 3 层检测来产生最终的检测结果:

在第 1 层检测中, 系统首先读入 S 个与检测单元相邻的训练样本作为初始样本集合(ITD), 并用其进行协方差矩阵的估计, 估计时采用了 FML 算法, 以增加估计的收敛速度, 用 $\hat{\mathbf{R}}$ 表示协方差矩阵的估计值。随后, 对每一个训练样本的 APR 进行计算:

$$\text{APR} : \left| \mathbf{z}_i^* \hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{s}_{\text{steer}} \right|^2, \quad i=1, 2, \dots, S \quad (6)$$

最大的 APR 值对应的样本被认为是非均匀样本(干扰、目标等), 从集合 ITD 中剔除, 同时进入

另一个集合——剔除样本集合(CTD), 此时, ITD 中剩余的样本也组成了一个集合——非剔除样本集合(UTD), 并且满足关系 $ITD=CTD \cup UTD$ 。将这一过程进行循环, 每次循环中的 ITD 集合由上次循环的 UTD 集合组成, 则每次循环系统将剔除一个非均匀的样本。最终, 当某个停止条件满足时循环结束, 以上的非均匀样本剔除过程即为反复剔除(RC)算法。经过 RC 处理, 系统将初始样本集合分为了均匀和非均匀样本两个集合。由于 RC 算法运算量较大, 故在数据处理中, FRACTA 算法采用了并行块处理(CBP)方案, 而不是用传统的滑窗处理(SWP)方案。在 SWP 方案中, 每个检测单元的权矢量均由其相邻的距离门估计得出, 系统逐距离门处理数据, 而 CBP 处理的核心思想是相邻若干个检测单元采用同一个相同的权矢量进行处理, 从而有效的减低计算量。

经过 APR-RC 处理后, 为了使目标显著地从抑制后的噪声背景中显现出来, 最大程度地改善低 RCS 目标的检测性能。算法对 CTD 与 UTD 中的样本分别进行两种加权处理(TWM), 即用于 CTD 集合中样本加权的权矢量 w_c 由 UTD 中的样本训练得出, 而 UTD 集合中样本的权矢量 w_u 由 ITD 中的样本训练得到。经过加权处理后, CTD 集合中样本的输出值将作为下一层检测中的待检测量, 而 UTD 集合中样本的输出值将用于计算检测门限。

第 2 层检测采用了单元平均恒虚警检测(CA-CFAR), 待检测单元为 CTD 中样本单元, 检验统计量为其加权输出功率, 检测门限由周围 UTD 中样本的加权输出功率和预先设定的虚警概率确定。

第 3 层检测中, 待检测单元为第 2 层检测中通过检测门限的单元, 这一层的检测统计量为样本的自适应相关估计(ACE)值:

$$ACE : \left| z_i^* \hat{R}^{-1} s_{steer} \right|^2 / \left(z_i^* \hat{R}^{-1} z_i \right) (s_{steer}^* \hat{R}^{-1} s_{steer}), \quad (7)$$

$$i=1,2,\dots,S_{CFAR}$$

其中 S_{CFAR} 表示通过第 2 层 CFAR 检测的单元数, \hat{R} 同样由周围的 UTD 集合中样本估计得出。计算每个检测单元的 ACE 值, 如果高于预先设定的门限, 则此单元最终被认为是动目标存在的单元。

综上所述, FRACTA 算法通过 RC 处理, CA-CFAR 检测, ACE 检测逐层处理, 最终有效地检测场景中的运动目标。图 1 给出了 FRACTA 算法的处理流程图, 从图中可以更加清晰的看出 FRACTA 算法的全部检测机制。

FRACTA.E 算法作为增强型 FRACTA 算法, 对原有的算法提出了 3 点改进, 分别为: 全局剔除

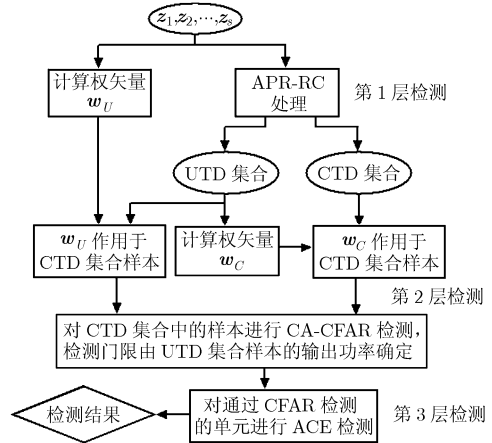


图 1 FRACTA 算法检测流程图

法, 反复剔除停止准则的引入, 对角加载样本矩阵求逆(LSMI)法代替 FML 算法实现快速剔除。从而进一步的增强了 FRACTA 算法的运算效率以及弱目标的检测性能。

4 用于多通道 SAR 系统的改进型 FRACTA 算法

鉴于 FRACTA 算法在非均匀环境中的良好检测性能, 本文将引入多通道 SAR/GMTI 动目标检测处理中。然而, 经过对其算法的仔细研究, 我们发现 FRACTA 及 FRACTA.E 算法(以下统称 FRACTA 算法)在多通道 SAR 检测处理中存在一些不足, 因此, 对其进行了改进, 从而提出了一种适于多通道 SAR 处理的改进型 FRACTA 算法。

在改进型 FRACTA 算法中, 检测之前需要对多通道 SAR 图像进行一些预处理。首先是对通道误差进行校正, 并且逐像素补偿了由接收位置引起的相位差。经过补偿后, 每一个像素单元的杂波空域采样信号可近似为

$$c(m, n) = c[1, 1, \dots, 1]^T \quad (8)$$

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:

$$R'(m, n) = \sigma_c^2 \mathbf{1}_{K \times K} + \sigma_n^2 \mathbf{I}_{K \times K} \quad (9)$$

其中 $\mathbf{1}_{K \times K}$ 为阵元均全 1 的 $K \times K$ 矩阵, $\mathbf{I}_{K \times K}$ 为 $K \times K$ 单位矩阵, σ_c^2 , σ_n^2 分别为杂波与噪声的功率。此补偿的目的是使 SAR 图像中每个像素单元中杂波的协方差矩阵具有相似的形式, 从而便于后续处理。

随后改进型 FRACTA 算法针对原算法中的缺陷, 分别进行了 3 点改进:

(1)在原有的 FRACTA 算法中, 样本的反复剔除过程是通过全局剔除方法实现的, 即将某一多普勒通道中的所有距离单元样本作为初始训练样本

(ITD), 逐多普勒通道进行 RC 处理, 如图 2(a)所示。全局剔除法能够在一定程度上增强检测能力, 并减少运算量。然而, 由于每个多普勒通道的初始训练样本涉及整个距离范围, 区域跨度很大, 故样本具有较强的非均匀性, 在一定程度上影响了协方差矩阵的估计, 从而导致了剔除样本增多, 计算量增加, 并容易造成弱小目标的漏检现象。

针对这一情况, 本文在保留全局剔除算法优点的同时, 针对其样本选择区域跨度大的问题进行了改进。在改进的算法中, 将 SAR 图像的进行分块, 每一块子图像均包含若干距离与方位(多普勒)单元, 分别进行 RC 处理, 由于经过了先前的图像补偿, 处理时初始训练样本集合(ITD)为子图像中所有像素单元的样本, 如图 2(b)所示。初始样本的区域跨度被有效地减小, 降低其非均匀性, 从而提高了 RC 处理性能。

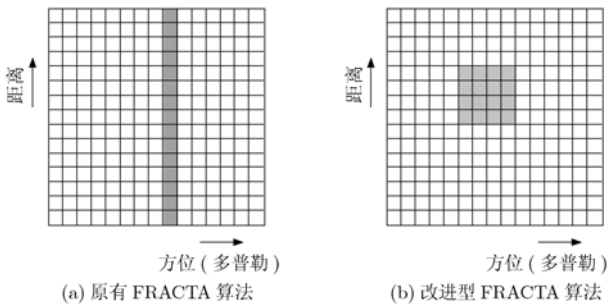


图 2 初始样本选择区域示意图(阴影部分表示初始样本选择区域)

(2)FRAC TA 算法在处理杂波分界区, 或建筑与道路交错区等杂波能量变化较大的区域时(如下文图 4, 图 6 所示), 由于初始训练样本选自整个区域, 则由此样本训练的空域滤波器对能量较强的样本存在凹口深度不足的问题, 使得其 APR 值高于实际值, 因此导致了能量较大的杂波样本通过 APR 检测, 在一定程度上增加了虚警出现的概率, 同时提高了 RC 次数, 增加了运算量; 而对能量较弱的杂波样本存在凹口过深的问题, 由于这些样本的加权输出值用于后续 CFAR 门限的估计, 因此过小的输出能量必然导致 CFAR 门限降低, 使得 CFAR 检测的虚警率提高, 造成 ACE 检测的运算负担, 除此之外, 凹口过深同样会对低速目标造成额外的抑制, 从而引起目标的漏检。

针对这种情况, 本文提出了一种能量分层处理的 RC 方案, 即首先将初始输入样本进行能量分级, 将不同能量范围的样本分至不同的子集中, 分别对各个子集进行 APR-RC 处理, 从而在一定程度上弥补杂波能量变化引起的检测性能下降, 运算量提高

的问题。由于要保证每个能量集合具有足够的样本, 在处理中可以适当扩大子图像的区域。

(3)在原有 FRAC TA 算法中, RC 的循环停止条件需要通过一个检测向量来判断, 即在初始训练样本集合中加入一个预先设定的样本作为检测向量, 当此检测向量的 APR 输出为样本中最大时, RC 循环结束, 此检测向量的形式为: $\alpha_p \mathbf{s}_p$ 。其中 $\mathbf{s}_p = \mathbf{s}_{\text{steer}}$, 为动目标的导引矢量, α_p 为预先设定的幅度值, 往往设定为高于噪声能量 10 ~ 15 dB, 从而保证能量高于 α_p 的动目标可以通过 APR 检测。

在多通道 SAR 处理时, 不仅对检测向量的能量进行了设置, 同时对 \mathbf{s}_p 的形式进行了设定, 本文将其设置为

$$\mathbf{s}_{\text{steer}} = \left[1, \exp\left(j \frac{2\pi f_{d\min}}{\text{PRF}}\right), \dots, \exp\left(j \frac{2\pi f_{d\min}}{\text{PRF}}(K-1)\right) \right]^T \quad (10)$$

其中 $f_{d\min}$ 为系统最小可检测速度对应的多普勒频率, PRF 为脉冲重复频率。这样, 此检测向量的引入, 可以保证速度高于系统最小可检测速度, 且能量高于 α_p 的运动目标均可通过 APR 检测, 增强了弱小目标与慢速目标的检测能力。

在下一节中, 将采用本节提出的改进型 FRAC TA 算法对 3 通道 SAR 实测数据进行处理, 从而验证其在实际的非均匀杂波背景中的动目标检测效果。

5 实测数据处理结果

本节, 为验证改进型 FRAC TA 算法的动目标检测效果, 将利用其对机载 3 通道 SAR 实测数据进行动目标检测处理。表 1 给出了部分实验参数, 图 3 给出了实测数据处理流程图, 其中虚线方框中为改进型 FRAC TA 算法检测流程。作为对比, 我们同样采用了传统的检测方案(杂波抑制后单元平均 CFAR 检测)对数据进行了处理。

表 1 主要系统参数列表

系统参数	参数值
发射带宽	180 MHz
脉冲重复频率	1250 Hz
相干处理脉冲数	1024
接收孔径间距	0.7 cm
载机地速	110 m/s
载机高度	5.3 km
成像区中心点距离	24 km

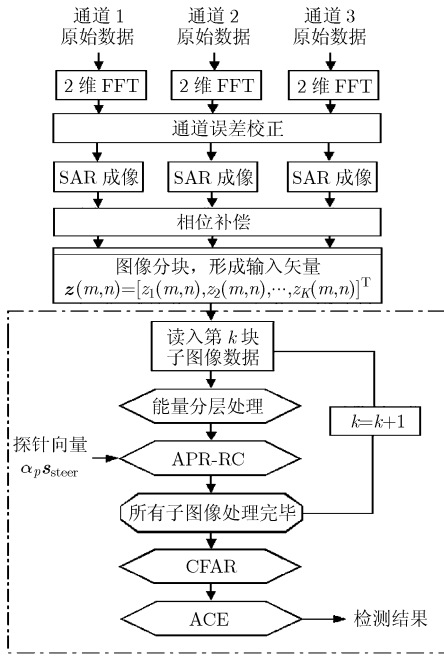


图3 改进型FRACTA算法实测数据处理流程图

首先,对仅存在配合目标的数据进行处理,图4给出了3通道对地面同一区域的SAR成像图,由于3个通道的SAR图像相似,我们只给出了中心通道的图像。从图中可以直观地看出实际的杂波背景中样本较强的非均匀性,为了方便后续的比较,用白色的箭头和阿拉伯数字在图像中标志出配合目标(6辆速度不同的汽车)的位置。首先,利用传统的检测方案对此场景进行动目标的检测,其中CFAR检测的恒虚警概率设为 10^{-6} ,检测结果如图5(a)所示。图中,白色的亮点表示正确的检测点,白色的叉号表示虚警点,可以看出,传统检测方案对此区域的检测并不能达到令人满意的效果,一个配合目标出现了漏检,并且区域中出现了一个虚警目标。同样,采用了本文提出的改进性FRACTA算法进行了处理,恒虚警率同样设为 10^{-6} ,检测结果如5(b)所示。

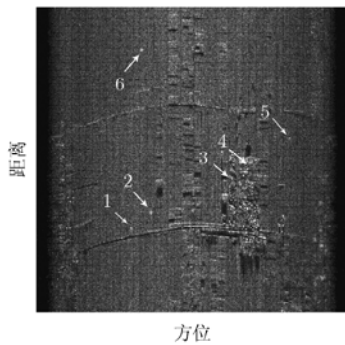
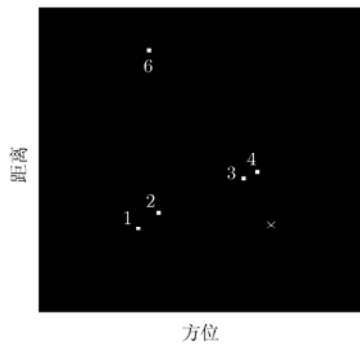
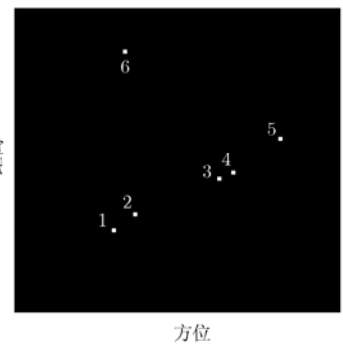


图4 配合目标区域SAR图像



(a) 传统方案检测结果



(b) 改进型FRACTA算法检测结果

可以看出,改进型FRACTA算法成功地检测出了区域中的所有配合目标,且没有出现虚警点。从这一点可以看出,改进型FRACTA算法在实际非均匀杂波环境中的检测性能优于传统的检测方案。

为了进一步对改进型FRACTA算法进行验证,并与原有的FRACTA算法进行比较,本文选取了一块杂波非均匀性较强,且没有运动目标存在的3通道SAR数据,图6给出了其SAR成像图,图中像素单元为 2000×1024 个。每次实验时,均在此区域中添加240个运动参数不同的仿真动目标,分别利用不同的算法进行检测,图7给出了一次实验的检测结果图,与上文的相同,白色的亮点与叉号分别表示正确的检测点和虚警点,而图7(c)中白色箭头所指的检测点表示改进型FRACTA算法多于原有FRACTA算法的正确检测点,限于篇幅,我们将其余各次实验结果列于表2。从图7和表2中可以看出,无论从虚警概率或检测概率上看,在实际的非均匀杂波环境中,改进型FRACTA算法的检测性能要明显优于传统的检测方案,且与原有的FRACTA算法相比,改进型算法每次实验中在保持虚警点不变的情况下,能够多检测1-4个目标,故其检测性能要优于原有的FRACTA算法。此外,改进型FRACTA算法在运算效率方面也优于原有的FRACTA算法,由于实际操作时RC循环次数无法确定,无法给出运算速度的具体值,作为比较,我们在表2中标出同等实验条件下每次实验中改进型FRACTA算法运算时间与原有FRACTA算法运算时间的比值。因此,从检测效率和运算速度上看,改进的FRACTA算法是一种适于多通道SAR系统的非均匀检测算法,其检测效果对实际的非均匀杂波环境具有更好的鲁棒性。

6 结束语

本文针对非均匀环境下多通道SAR系统动目

图5 配合目标区域检测结果对比图

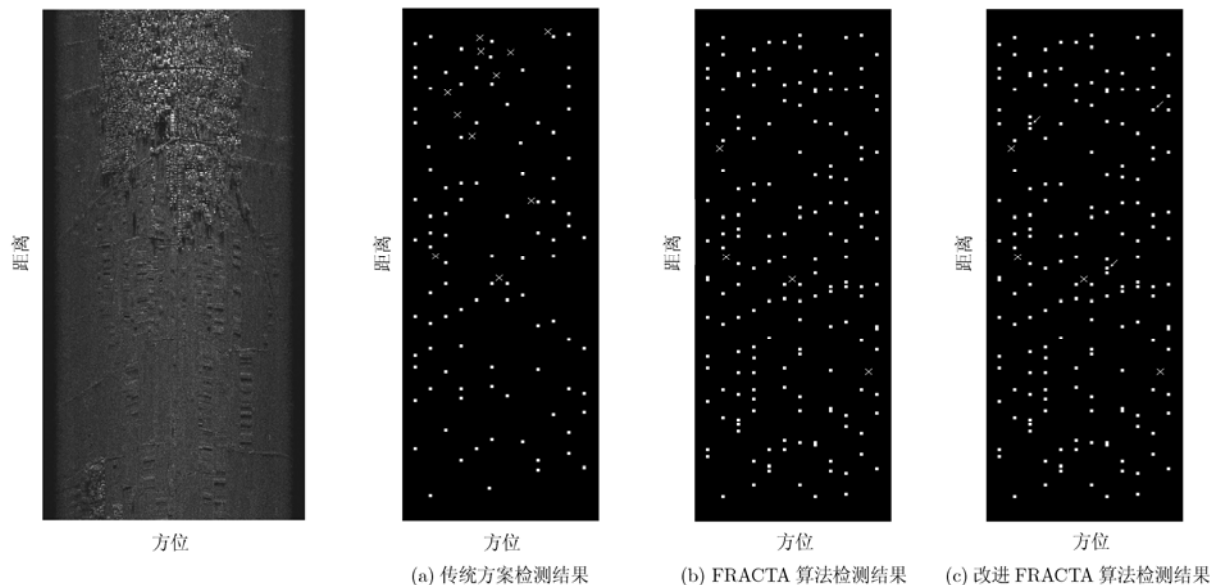


图 6 仿真目标背景图

图 7 仿真目标检测结果图

表 2 仿真目标检测结果

实验序号	目标 SNR (dB)	目标径向速度(m/s)	检测算法	检测数	虚警数	运算时间比
1	10-20	2-4	传统算法	33	9	—
			FRACTA 算法	54	5	1
			改进型 FRACT 算法	56	5	0.660
2	10-20	4-6	传统算法	42	10	—
			FRACTA 算法	85	4	1
			改进型 FRACT 算法	87	4	0.752
3	20-30	2-4	传统算法	75	12	—
			FRACTA 算法	135	3	1
			改进型 FRACT 算法	139	3	0.744
4	20-30	4-6	传统算法	110	11	—
			FRACTA 算法	171	4	1
			改进型 FRACT 算法	173	4	0.699
5	30-40	2-4	传统算法	148	9	—
			FRACTA 算法	197	4	1
			改进型 FRACT 算法	198	4	0.701
6	30-40	4-6	传统算法	167	10	—
			FRACTA 算法	210	3	1
			改进型 FRACT 算法	211	3	0.663

标检测能力降低的问题,提出了一种适用于多通道 SAR 系统的非均匀检测方案——改进型 FRACTA 算法。该算法将用于 STAP 的 FRACTA 算法引入多通道 SAR 处理中,针对原算法的不足,在样本选择区域,RC 处理方案以及循环停止准则三方面对其进行了改进。文中大量的实测数据处理结果表明,

与传统的检测方案相比,改进型 FRACTA 算法在非均匀环境中,在大量的干扰目标存在的情况下,能够显著地提高动目标的检测性能;而与原有的 FRACTA 算法相比,此算法在多通道 SAR 系统中不仅能够有效地减少计算量,而且可以进一步提高系统的检测能力。因此,此算法在实际的非均匀环

境中具有较强的鲁棒性,是一种实际可行的多通道SAR/GMTI动目标检测方案。

参考文献

- [1] Fennel M T and Wishner R P. Battlefield awareness via synergistic SAR and MTI exploitation [J]. *IEEE Aerospace Electronic System Magazine*, 1998, 13(2): 39-45.
- [2] 王永良, 陈建文, 吴志文. 现代DPCA技术研究[J]. 电子学报, 2000, 28(6): 118-121.
Wang Yong-liang, Chen Jian-wen, and Wu Zhi-wen. Research on modern DPCA techniques [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2006, 28(6): 118-121.
- [3] Yadin E. A performance evaluation model for a two port interferometer SAR-MTI [C]. IEEE National Radar Conference, Ann Arbor, Michigan, 1996: 261-266.
- [4] Ward J. Space-time adaptive processing for airborne radar [R]. Technical Report ESC-94-109, Lincoln Laboratory, Dec. 1994.
- [5] Klemm R. Principles of Space-time Adaptive Processing [M]. London, UK, IEE Press, 2002, Sec. 1-3.
- [6] Entzminger J N, Fowler C A, and Kenneally W J. Joint STARS and GMTI: past, present and future [J]. *IEEE Transactions on Aerospace Electronic System*, 1999, 35(2): 748-761.
- [7] Damini A, Balaji B, Haslam G, and Goulding M. X-band experimental airborne radar-phase II: synthetic aperture radar and ground moving target indication [J]. *IEE Proceedings Radar, Sonar & Navigation*, 2006, 153(2): 144-150.
- [8] Ender J, Berens P, and Brenner A, *et al.* Multi channel SAR/MTI systems development at FGAN: from AER to PAMIR [C]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Sydney, Australia, 2002: 1617-1701.
- [9] Cerutti-Maori D, Klare J, Brenner A R, and Ender J H G. Wide-area traffic monitoring with the SAR/GMTI system PAMIR [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(10): 3019-3030.
- [10] 张绪锦, 张长耀, 朱兆达, 邓海涛. 基于CSI处理的三通道机载SAR地面动目标检测[J]. 电子学报, 2008, 36(4): 789-793.
Zhang Xu-jin, Zhang Chang-yao, Zhu Zhao-da, and Deng Hai-tao. Three aperture airborne SAR-GMTD based on CSI processing [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, 36(4): 789-793.
- [11] 邓海涛, 张长耀. 一种机载三通道GMTI实时信号处理方法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(2): 370-373.
Deng Hai-tao and Zhang Chang-yao. A real-time signal processing method for air-born three-channels GMTI [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(2): 370-373.
- [12] 曾操, 廖桂生, 杨志伟, 刘聪锋. 基于样本加权的三通道SAR-GMTI机载数据处理及性能分析[J]. 电子学报, 2009, 37(3): 506-512.
Zeng Cao, Liao Gui-sheng, Yang Zhi-wei, and Liu Cong-feng. Airborne data processing and performance analysis based on three-aperture SAR-GMTI system using weighted sample [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(3): 506-512.
- [13] Gerlach K, Blunt S D, and Picciolo M L. Robust adaptive matched filtering using the FRACTA algorithm [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2004, 40(3): 929-945.
- [14] Blunt S D and Gerlach K. Efficient robust AMF using the FRACTA algorithm [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2005, 41(2): 537-548.
- [15] Shackelford A K, Gerlach K, and Blunt S D. Partially adaptive STAP using the FRACTA algorithm [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2009, 45(1): 58-69.
- 吴迪: 男, 1982年生, 博士生, 研究方向为机载雷达地面动目标检测.
- 朱岱寅: 男, 1974年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达成像与雷达信号处理.
- 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.