

WAS-GMTI 模式下基于 Relax 算法的杂波抑制和参数估计方法

闫贺* 朱岱寅 张劲东 王旭东 李勇 毛新华 吴迪
(南京航空航天大学电子信息工程学院 南京 210016)

摘要: 该文提出一种基于 Relax 算法的杂波抑制和参数估计方法。该方法适用于多通道广域监视 GMTI 系统。在分析广域监视模式回波组成的基础上, 结合 Relax 算法, 设计了进行杂波抑制的迭代方法。相对于降维空时自适应处理(STAP), 该方法不需要估计杂波加噪声的协方差矩阵, 因此可以在非均匀杂波环境下取得较优的杂波抑制效果。该文同时指出, 在杂波抑制的基础上, 针对存在动目标的距离-多普勒单元继续进行迭代, 可实现动目标参数的精确估计。仿真结果验证了上述方法的有效性。

关键词: SAR; 地面动目标识别; Relax 算法; 杂波抑制; 参数估计

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2016)12-3042-07

DOI: 10.11999/JEIT160859

Clutter Suppression and Parameter Estimation Method in WAS-GMTI Mode Based on Relax Algorithm

YAN He ZHU Daiyin ZHANG Jindong WANG Xudong
LI Yong MAO Xinhua WU Di

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

Abstract: This paper proposes a clutter suppression and parameter estimation method based on Relax algorithm. The method is fit for the multi-channel Wide Area Surveillance (WAS) GMTI system. After analyzing the components of radar echoes in WAS-GMTI mode, an iterative clutter suppression method based on Relax algorithm is designed. Compared with the reduced-dimension Space Time Adaptive Processing (STAP) algorithm, the proposed method achieves better clutter suppression results in the nonhomogeneous environment since it has no need to estimate the clutter plus noise covariance matrix. Besides, based on the clutter suppression results, precision parameters of moving targets can be obtained if the iterations are continued in the range-Doppler cells with the detected moving targets. The proposed method is validated by digital simulations.

Key words: SAR; Ground Moving Target Identification (GMTI); Relax algorithm; Clutter suppression; Parameter estimation

1 引言

广域监视模式借助波束沿航迹方向的快速、周期性扫描, 可实现大面积区域监视。该模式重访率较高, 能够从不同角度发现动目标, 进而提高动目标的检测概率。此外, 由于能够在不同时刻多次扫

描到动目标, 使得对动目标轨迹的描述成为可能, 可实现动目标跟踪。该工作模式可以快速提供存在于宽广区域内的动目标信息, 因此在民用和军事上都有巨大的应用价值, 已成为机载侦察雷达不可缺少的工作模式之一。

从广域监视模式的回波中提取动目标需要对回波中的杂波成分进行有效的抑制。国外具有广域监视功能的雷达系统, 其杂波抑制算法大多都处于保密状态, 已知的有美国的 JSTARS 系统采用的是杂波抑制干涉算法(CSI)^[1]和德国的 PAMIR 系统采用的是 Scan-MTI 算法^[2-5]。CSI 算法本质上是一种通道对消方法, 其杂波抑制能力有限, 而且在对消过程中, 动目标的能量也会受到不同程度的对消(取决于动目标的径向速度和方位角等)。Scan-MTI 算法

收稿日期: 2016-08-22; 改回日期: 2016-11-22; 网络出版: 2016-12-14

*通信作者: 闫贺 yanhe@nuaa.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61501231), 江苏省自然科学基金(BK20150759), 航空科学基金(20152052027), 中央高校基本科研业务费专项资金(3082016NJ20160006)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61501231), The Jiangsu Provincial Natural Science Foundation (BK20150759), The Aeronautical Science Foundation of China (20152052027), The Fundamental Research Funds for the Central Universities (3082016NJ20160006)

本质上是降维 STAP 中的 1-DT 算法^[6-8],其杂波抑制性能在非均匀杂波环境下会大大下降。这是因为 STAP 算法在实际应用中需要借助邻近单元的信息来估计本单元的杂波加噪声协方差矩阵,在非均匀杂波环境下这种估计的协方差矩阵往往会存在较大的误差,从而导致杂波滤波器的性能下降。因此本文提出一种基于 Relax 算法的杂波抑制方法,它不需要估计杂波加噪声协方差矩阵,在非均匀环境下具有较优的杂波抑制效果。同时在杂波抑制的基础上,对检测到动目标的距离-多普勒单元继续使用 Relax 算法进行迭代处理,可以获得动目标方位角度的精确估计。

本文的安排如下:第 2 节分析了多通道广域监视模式下的回波模型以及回波的各个组成成分在通道间的变化关系;第 3 节提出一种基于 Relax 算法的杂波抑制和参数估计方法,根据第 2 节的回波模型并结合 Relax 算法,推导了相应的递推公式;第 4 节仿真了波束正侧视方向非均匀场景的回波,并采用空时 1-DT 算法和本文提出的杂波抑制方法分别对回波进行处理,仿真结果显示了基于 Relax 算法的杂波抑制方法在处理非均匀杂波时的有效性,接着采用 Relax 算法对杂波抑制后的动目标参数进行估计,通过和动目标的实际参数进行对比,显示了基于 Relax 算法的参数估计方法的精确性;在第 5 节中得出结论。

2 广域监视模式下回波模型

在机载条带 SAR/GMTI 模式下^[9-14],对于某动目标的观测只能维持在一个合成孔径时间之内,当波束完全掠过该动目标时,它的信息将无法获取。所以在条带 SAR/GMTI 模型下,我们获得的关于场景动目标的信息具有很大的局限性和片面性。而广域监视模式通过天线在方位向的周期性电扫描,可实现感兴趣区域动目标的反复观测,并提供动目标在整个观测时间内的状态信息。此外,广域监视模式天线电扫描时,系统在每个波束指向上都会发射相同数量的脉冲序列,而且每个波束指向上的回波也是单独处理的。

多通道 WAS-GMTI 模式的空间几何关系图如图 1 所示。这里分析一个单发多收(SIMO)的广域监视雷达系统,接收通道的个数为 K ,平台沿方位向(Y 轴)以速度 V 运动。假设选择第 1 个通道为参考通道, $d_k(k=1, 2, \dots, K)$ 表示第 k 个通道相对参考通道的距离,因此 $d_1 = 0$ 。

对各个通道接收的回波进行距离压缩、距离走动校正、方位 De-chirp 处理后,经方位向 FFT 变换到距离-多普勒域,在距离-多普勒域进行杂波抑制

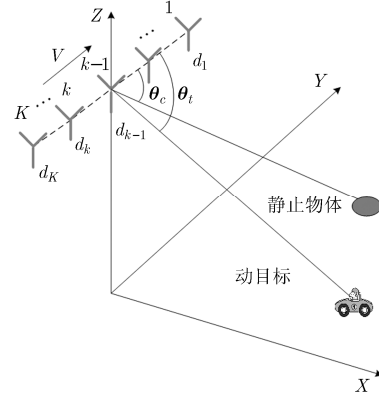


图 1 广域监视的几何关系图

和动目标检测。为了简化分析,这里认为经过通道均衡处理后,通道间的幅相误差可以忽略。经过上述处理后,第 k 个通道的回波可以表示为

$$\mathbf{Z}_k(m, n) = \mathbf{C}_k(m, n) + \mathbf{T}_k(m, n) + \mathbf{N}_k(m, n) \quad (1)$$

其中, m 表示多普勒单元序号, n 表示距离单元序号。 $\mathbf{C}_k(m, n)$ 表示第 k 个通道的杂波信息,可进一步写成(以第 1 个通道作为参考通道,如图 1 所示)

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_k(m, n) &= \mathbf{A}_c(m, n) \cdot \exp\{j \cdot \Phi_c(m, n)\} \\ &\quad \cdot \exp\{j \cdot \Phi_{kc}(m, n)\} \\ &= \mathbf{C}_a(m, n) \cdot \exp\{j \cdot \Phi_{kc}(m, n)\} \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{C}_a(m, n) = \mathbf{A}_c(m, n) \cdot \exp\{j \cdot \Phi_c(m, n)\}$ 表示参考通道中的第 m 个多普勒单元第 n 个距离单元的杂波分量($\mathbf{A}_c(m, n)$ 表示幅度, $\Phi_c(m, n)$ 表示相位), $\Phi_{kc}(m, n)$ 表示第 k 个通道和参考通道间的杂波相位差。

$\mathbf{T}_k(m, n)$ 表示第 k 个通道的动目标信息,可进一步写成

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_k(m, n) &= \mathbf{A}_t(m, n) \cdot \exp\{j \cdot \Phi_t(m, n)\} \\ &\quad \cdot \exp\{j \cdot \Gamma_{kt}(m, n)\} \\ &= \mathbf{T}_a(m, n) \cdot \exp\{j \cdot \Gamma_{kt}(m, n)\} \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $\mathbf{T}_a(m, n) = \mathbf{A}_t(m, n) \cdot \exp\{j \cdot \Phi_t(m, n)\}$ 表示参考通道中的第 m 个多普勒单元第 n 个距离单元的动目标分量($\mathbf{A}_t(m, n)$ 表示幅度, $\Phi_t(m, n)$ 表示相位), $\Gamma_{kt}(m, n)$ 表示第 k 个通道和参考通道间的动目标相位差。

$\mathbf{N}_k(m, n)$ 表示第 k 个通道的噪声信息。

则根据图 1 中所示的几何关系可知, $\Gamma_{kc}(m, n)$,

$\Gamma_{kt}(m, n)$ 可以表示为

$$\Gamma_{kt}(m, n) = -(2\pi/\lambda)d_k \cdot \cos\theta_t(m, n) \quad (4)$$

$$\Gamma_{kc}(m, n) = -(2\pi/\lambda)d_k \cdot \cos\theta_c(m) \quad (5)$$

其中, λ 表示系统发射信号波长, d_k 表示第 k 个通道和参考通道之间的距离($d_1 = 0$), $\theta_t(m, n)$ 表示第

m 个多普勒单元第 n 个距离单元内动目标的方位斜视角, 如果该距离-多普勒单元内不含有动目标, 则 $\theta_t(m, n) = 0$ 。 $\theta_c(m)$ 表示第 m 个多普勒单元对应的杂波方位斜视角, 由广域扫描时多普勒单元和方位斜视角的一一对应关系可知:

$$\mathbf{f}(m) = \frac{2 \cdot V}{\lambda} \cdot \cos \theta_c(m) \Rightarrow \theta_c(m) = \arccos \frac{\mathbf{f}(m) \cdot \lambda}{2 \cdot V} \quad (6)$$

式中, $\mathbf{f}(m)$ 表示第 m 个多普勒单元对应的多普勒频率。

将这 K 个通道的第 m 个多普勒单元第 n 个距离单元的回波写成列向量的形式:

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}(m, n) &= [\mathbf{Z}_1(m, n) \quad \mathbf{Z}_2(m, n) \quad \cdots \quad \mathbf{Z}_K(m, n)]^T \\ &= \mathbf{C}_a(m, n) \cdot \mathbf{a}_c(\theta_c(m)) + \mathbf{T}_a(m, n) \\ &\quad \cdot \mathbf{a}_t(\theta_t(m, n)) + \mathbf{N}(m, n) \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $\mathbf{a}_c(\theta_c(m)) = [1 \quad \exp\{-(2\pi/\lambda) \cdot d_2 \cdot \cos \theta_c(m)\} \quad \cdots \quad \exp\{-(2\pi/\lambda) \cdot d_K \cdot \cos \theta_c(m)\}]$ 和 $\mathbf{a}_t(\theta_t(m, n)) = [1 \quad \exp\{-(2\pi/\lambda) \cdot d_2 \cdot \cos \theta_t(m, n)\} \quad \cdots \quad \exp\{-(2\pi/\lambda) \cdot d_K \cdot \cos \theta_t(m, n)\}]$ 分别表示杂波分量和动目标分量的空域导向矢量, 而 $\mathbf{N}(m, n) = [\mathbf{N}_1(m, n) \quad \mathbf{N}_2(m, n) \quad \cdots \quad \mathbf{N}_K(m, n)]^T$ 表示噪声分量。在上述推导过程中, 如果该距离-多普勒单元不含有动目标的信息, 则可以认为与动目标相关的所有物理量均为零。

3 基于 Relax 算法的杂波抑制和参数估计方法

Relax 算法是一种基于非线性最小方差准则的谱估计算法^[15]。根据前面的分析, 当 WAS-GMTI 模式的回波变换到距离-多普勒域后, 每个距离-多普勒单元的数据是由杂波分量、动目标分量和噪声分量组成的, 可以将杂波分量和动目标分量等效成两个信号源。这样, 问题就转化为在噪声干扰下对这两个信号源的估计问题, 如果能够成功地分离出动目标的信号源也就等效实现了杂波抑制。正是基于这一思路, 本节采用 Relax 算法进行杂波抑制。借助 Relax 算法并根据式(7)的推导, 对 $\mathbf{C}_a(m, n)$, $\mathbf{T}_a(m, n)$ 和 $\theta_t(m, n)$ 的估计可以通过最小化式(8)的代价函数实现^[15]:

$$\begin{aligned} F[\mathbf{C}_a(m, n), \mathbf{T}_a(m, n), \theta_t(m, n)] \\ = \|\mathbf{Z}(m, n) - \mathbf{C}_a(m, n) \cdot \mathbf{a}_c(\theta_c(m)) \\ - \mathbf{T}_a(m, n) \cdot \mathbf{a}_t(\theta_t(m, n))\|^2 \end{aligned} \quad (8)$$

其中, $\|\cdot\|$ 表示 Frobenius 范数。如果可以较准确地估计出 $\mathbf{T}_a(m, n)$, 即可实现动目标和杂波的有效分离, 完成杂波抑制。多通道 WAS-GMTI 模式下基

于 Relax 算法的杂波抑制迭代过程可以借助 Matlab 语言概括描述, 如表 1 所示。

表 1 基于 Relax 算法的迭代过程

For $m=1:M$
For $n=1:N$
%遍历所有的距离-多普勒单元(其中 M 表示多普勒单元的个数, N 表示距离单元的个数)
$\mathbf{C}_e(m, n) = \frac{\mathbf{a}_c^H(\theta_c(m)) \mathbf{Z}(m, n)}{M}$ %初始化操作
If 未满足收敛条件或者未达到指定的迭代次数
动目标信息估计部分:
$\mathbf{Z}_b(m, n) = \mathbf{Z}(m, n) - \mathbf{a}_c(\theta_c(m)) \mathbf{C}_e(m, n)$
$\theta_{te}(m, n) = \arg \max_{\theta_t(i, k) = \theta_s - \frac{\theta_{3dB}}{2}}^{\theta_s + \frac{\theta_{3dB}}{2}} \mathbf{a}_t^H(\theta_t(m, n)) \mathbf{Z}_b(m, n) ^2$
% θ_s 为波束的电扫角, θ_{3dB} 为相应扫描角的 3 dB 主瓣宽度(动目标来自波束 3 dB 主瓣宽度内)
$\mathbf{T}_e(m, n) = \frac{\mathbf{a}_t^H(\theta_{te}(m, n)) \mathbf{Z}_b(m, n)}{K}$
杂波信息估计部分:
$\mathbf{Z}_c(m, n) = \mathbf{Z}(m, n) - \mathbf{a}_t(\theta_{te}(m, n)) \mathbf{T}_e(m, n)$
$\mathbf{C}_e(m, n) = \frac{\mathbf{a}_c^H(\theta_c(m)) \mathbf{Z}_c(m, n)}{K}$
End
End
End

表 1 中, \mathbf{C}_e 表示估计的杂波分量, \mathbf{T}_e 表示估计的动目标分量, θ_{te} 表示估计的动目标方位斜视角。

通过仿真发现, 采用 Relax 算法进行杂波抑制处理时, 通过不断的迭代处理(通常 1~2 次迭代即可, 如果动目标 SNR 较低或者存在较大的通道误差可能需要更多的迭代次数), 可获得较好的杂波抑制效果。这时可以对杂波抑制后的结果进行 2 维 CA-CFAR(单元平均恒虚警检测)处理, 实现动目标检测。

从表 1 中可以看出, 在进行 Relax 迭代实现杂波抑制的过程中, 有针对动目标的方位斜视角 θ_{te} 进行估计的步骤。在进行杂波抑制的 Relax 迭代过程中, 对动目标方位斜视角的估计会比较粗略。如果对检测到动目标的距离-多普勒单元, 使用 Relax 算法继续进行迭代, 可实现动目标方位斜视角的精确估计, 直到动目标的方位斜视角保持不变后终止迭代。然后根据估计的动目标方位斜视角和动目标落入的多普勒单元, 可以计算动目标的径向速度, 实现动目标参数估计。整个处理流程如图 2 所示。

4 算法仿真及分析

为了验证上述基于 Relax 的杂波抑制算法的有



图 2 基于 Relax 算法的杂波抑制和参数估计流程图

效性, 本文在计算机上进行了仿真实验, 系统的仿真参数和 PAMIR 系统基本类似, 见表 2 所示。

表 2 场景仿真系统参数

PRF	6 kHz
载频	9.45 GHz
载机飞行速度	100 m/s
通道数目	5
每个波位上发射固定脉冲数	128

为了简化问题, 这里仿真波束指向为 90° (正侧视) 情况下场景的回波 (假设地面后向散射系数服从高斯分布)。利用多普勒单元和方位角度的一一对应关系, 在每个多普勒单元对应的方位角上布置 1 个点目标, 所以在每个距离单元上都布置了 128 个点。同时, 在回波中加入高斯分布的噪声分量。仿真实验中截取 300 个距离单元 (第 1000~1299 距离单元) 的回波数据进行分析。为了模拟实际场景中杂波的非均匀性, 仿真了 3 个不同功率的杂波区, 其沿距离向的变化曲线如图 3(a) 所示。另外, 在场景回波中加入了幅值相同的 6 个动目标, 经过距离压缩和方位向 FFT 后的 SNR ≈ 23 dB, 他们的径向速度、所处距离单元和方位斜视角分布如表 3 所示。其中, 通道 3 的回波在距离-多普勒域的幅度归一化分布图如图 3(b) 所示。

为了便于比较, 杂波抑制后的结果都统一进行了幅度归一化处理。图 4 给出了不存在通道误差时的杂波抑制和 CFAR 检测结果图。图 4(a) 所示为采用空时 1DT-SAP 算法进行杂波抑制的结果。从图中可以看出, 受到杂波非均匀性的影响, 杂波加噪

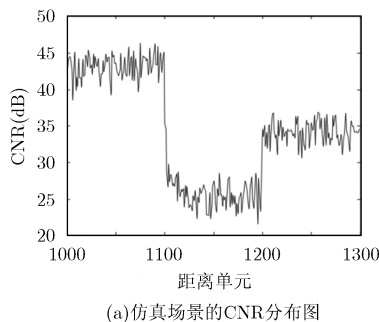


表 3 回波中的动目标信息

动目标序号	1	2	3	4	5	6
距离单元	1045	1075	1105	1195	1225	1255
径向速度 (m/s)	3.8	3.0	2.3	-2.3	-3.0	-3.8
方位斜视角 ($^\circ$)	89.0	90.0	89.5	90.0	90.5	91.0

声的协方差矩阵无法得到有效的估计, 从而导致杂波抑制性能下降。图 4(b) 和图 4(c) 分别为 Relax 算法进行第 1 次和第 2 次迭代后的杂波抑制结果。相比图 4(a), 其杂波剩余大大减小, 因此非均匀环境下基于 Relax 算法的杂波抑制结果要优于空时处理结果。这要归因于基于 Relax 算法的杂波抑制过程不需要估计杂波加噪声协方差矩阵, 因而不会受到杂波非均匀性的影响。同时, 对比图 4(b) 和图 4(c) 可以看出, 这里提出的方法在第 1 次迭代已经达到了比较好的杂波抑制效果, 第 2 次迭代相比于第 1 次迭代的改进非常小。上述仿真结果表明: 采用 Relax 算法进行杂波抑制处理时, 通常 1~2 次迭代后即可获得较好的杂波抑制效果。在实际应用中, 如果目标的 SNR 比较低或者具有更大的通道误差等条件时, 可能会需要更多的迭代次数。图 4(d) 为进行 Relax 算法杂波抑制后的 CA-CFAR 检测结果图, 图中的 6 个动目标均得到有效检测。

为了验证本文算法的稳健性, 在上述 5 个通道间加入幅度和相位误差, 以通道 1 为参考, 具体误差幅度及相位分布见表 4 所示。

图 5 给出了存在通道误差时的杂波抑制和 CFAR 检测结果图。图 5(a) 所示为采用空时 1DT-SAP 算法进行杂波抑制的结果图, 图 5(b) 和图 5(c) 分别为 Relax 算法进行第 1 次和第 2 次迭代后的杂波抑制结果, 可见采用 Relax 算法进行杂波抑制的时候对通道误差具有较强的适应能力。图 5(d) 为进行 Relax 算法杂波抑制后的 CA-CFAR 检测结果图, 6 个动目标均得到有效检测。

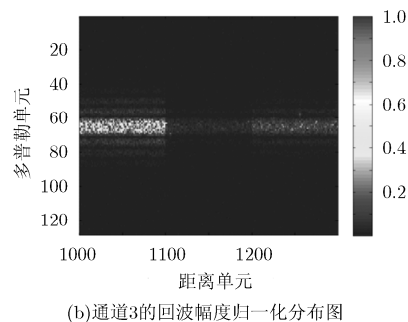


图 3 仿真场景的回波信息

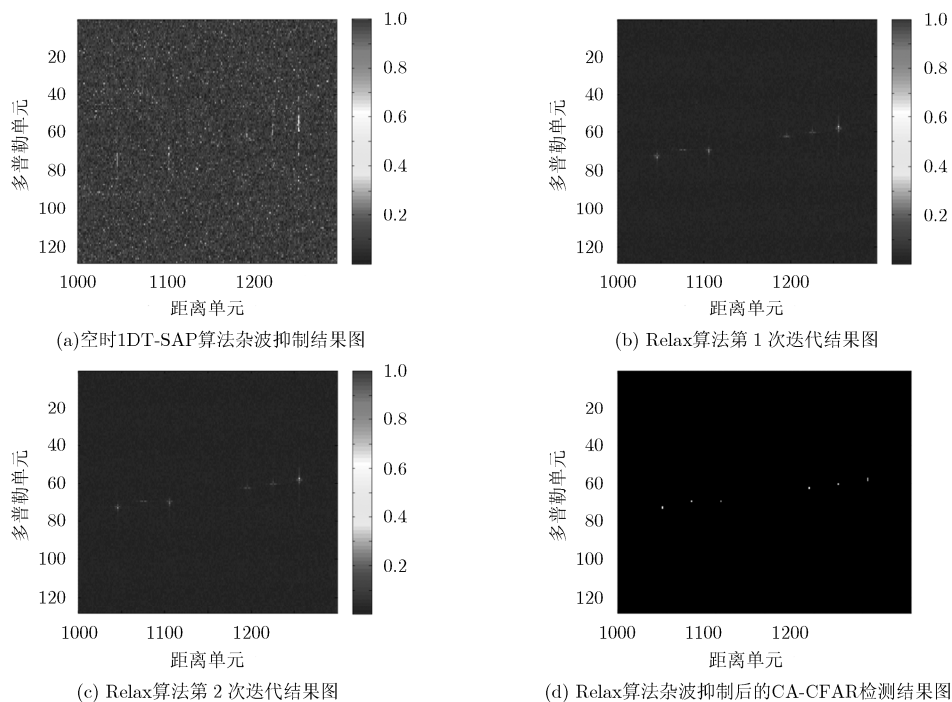


图 4 不存在通道误差时的杂波抑制(幅度归一化)及 CFAR 检测结果图

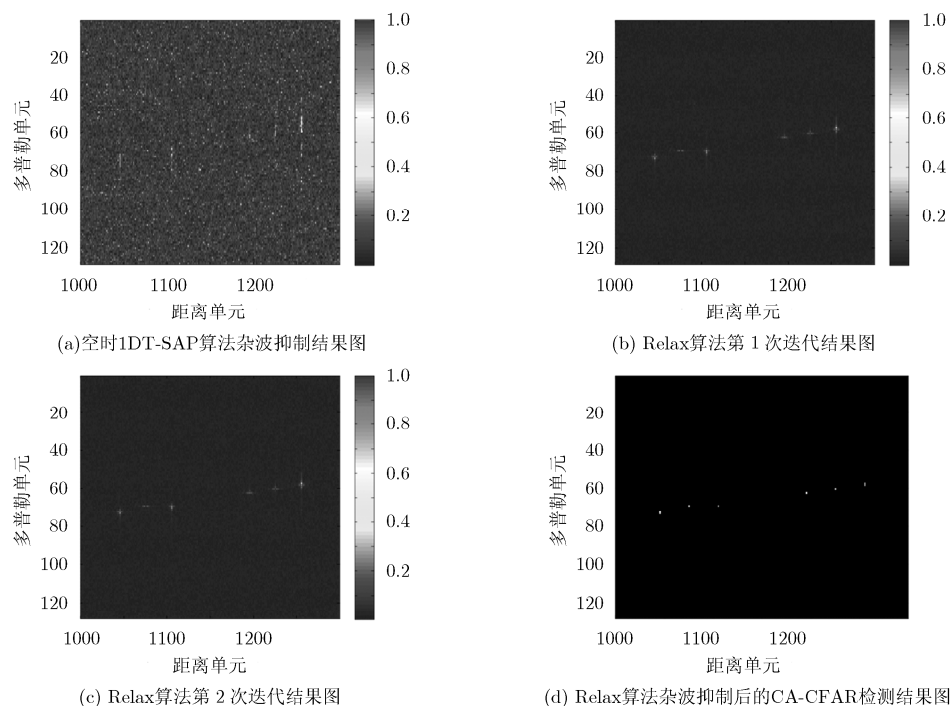


图 5 存在通道误差时的杂波抑制(幅度归一化)及 CFAR 检测结果图

表 4 通道间的幅度和相位误差分布

通道序号	1	2	3	4	5
幅度误差(dB)	0	-0.9151	0.8279	-0.9151	0.8279
相位误差(°)	0	5	5	-5	-5

下面验证基于 Relax 算法的参数估计方法。对

检测到动目标的距离-多普勒单元, 采用 Relax 算法继续进行迭代, 如果经过若干次迭代后动目标的方位斜视角保持不变, 则终止迭代。根据估计的动目标方位斜视角, 结合动目标落入的多普勒单元可以计算出动目标的径向速度。表 5 给出了采用 Relax 算法进行动目标参数估计的结果。对比表 5 可以看

表 5 动目标参数估计结果

动目标序号	1	2	3	4	5	6
仿真 1	不存在通道误差情况下的估计结果					
径向速度(m/s)	3.46	2.98	2.21	-2.18	-2.83	-3.60
方位斜视角(°)	89.00	90.00	89.56	90.03	90.51	90.92
终止迭代次数	3	3	3	3	3	3
仿真 2	存在通道误差情况下的估计结果					
径向速度(m/s)	3.46	2.98	2.23	-2.20	-2.85	-3.60
方位角斜视(°)	89.00	90.00	89.57	90.02	90.50	90.92
终止迭代次数	6	9	16	16	10	6

出,即使在有通道误差的情况下,采用 Relax 算法估计的结果依然具有较高的精度,只是迭代次数要高于不存在通道误差时的情况。上述结果证明了采用 Relax 算法进行 WAS-GMTI 模式动目标参数估计的有效性和稳健性。

5 结论

本文首先分析了多通道 WAS-GMTI 模式回波的组成及各通道间回波的相互关系,据此提出了基于 Relax 算法的杂波抑制和参数估计方案。该方案首先对每个距离-多普勒单元进行迭代处理,实现杂波抑制,然后对杂波抑制的结果进行 2 维单元平均 CFAR 检测,最后对检测到动目标的距离-多普勒单元继续进行迭代处理,以获取动目标的参数信息。在仿真实验部分,利用设计的方法处理仿真的非均匀场景回波,并对对比时 1-DT 算法的处理结果,验证了本文方法在处理非均匀环境回波时的有效性;通过在回波中加入通道幅相误差,验证了本文方法在存在通道误差时的稳健性。

参考文献

- [1] ENTZMINGER J N, SENIOR JR, FOWLER C A, *et al.* JointSTARS and GMTI: Past, present and future[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(2): 748-761. doi: 10.1109/7.766956.
- [2] YAN H, ZHU D Y, WANG R, *et al.* Practical signal processing algorithm for wide-area surveillance-GMTI mode[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2016, 9(8): 991-998. doi: 10.1049/iet-rsn.2014.0452.
- [3] CERUTTI-MAORI D, KLARE J, BRENNER A R, *et al.* Wide-area traffic monitoring with the SAR/GMIT system PAMIR [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(10): 3019-3030. doi: 10.1109/TGRS.2008.923026.
- [4] CERUTTI-MAORI D, GIERULL C H, and ENDER J H G. Experimental verification of SAR-GMTI improvement through antenna switching[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(4): 2066-2075. doi: 10.1109/TGRS.2009.2037010.
- [5] WILDEN H and BRENNER A R. The SAR/GMTI airborne radar PAMIR: technology and performance[C]. *IEEE Microwave Symposium Digest*, Anaheim, CA, USA, 2010: 534-537. doi: 10.1109/MWSYM.2010.5518080.
- [6] ENDER J H G, BERENS P, BRENNER A R, *et al.* Multi channel SAR/MTI system development at FGAN: From AER to PAMIR[C]. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Toronto, Canada, 2002: 1697-1701. doi: 10.1109/IGARSS.2002.1026225.
- [7] WARD J. Space-time adaptive processing for airborne radar [R]. *NASA STI/Recon Technical Report N*, 1994: 109-119.
- [8] 张晓光, 刘祥峰, 付琨. 基于 MIMO-SAR 体制的空频域自适应动目标检测技术研究[J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(8): 1997-2001.
ZHANG X G, LIU X F, and FU K. Study on ground moving target indication of multiple input multiple output space-borne SAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(8): 1997-2001.
- [9] ENDER J H G. Space-time processing for multichannel synthetic aperture radar[J]. *Electronics & Communication Engineering Journal*, 1999, 11(1): 29-38. doi: 10.1049/ecej:19990106.
- [10] ENDER J H G. Detection and estimation of moving target signals by multi-channel SAR[C]. *European Conference on Synthetic Aperture Radar*, Königswinter, Germany, 1996: 411-417.
- [11] 韦北余, 朱岱寅, 吴迪. 一种基于动目标聚焦的 SAR-GMTI 方法[J]. *电子与信息学报*, 2016, 38(7): 1738-1774. doi: 10.11999/JEIT151036.
WEI B Y, ZHU D Y, and WU D. A SAR-GMTI approach based on moving target focusing[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(7): 1738-1774. doi: 10.11999/JEIT151036.

- [12] EDUARDO M, ANTONI B, JOSEP R, *et al.* A performance evaluation of SAR-GMTI missions for maritime applications [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(5): 2496–2509. doi: 10.1109/TGRS.2014.2360989.
- [13] LIU B C, YIN K Y, LI Y K, *et al.* An improvement in multichannel SAR-GMTI detection in heterogeneous environments[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(2): 810–827. doi: 10.1109/TGRS.2014.2328712.
- [14] EDUARDO M, STEFAN V B, MARC J, *et al.* Multichannel SAR-GMTI in maritime scenarios with F-SAR and terraSAR-X sensors[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 8(11): 5052–5067. doi: 10.1109/JSTARS.2015.2438898.
- [15] 张贤达. 现代信号处理[M]. 第 2 版, 北京: 清华大学出版社, 2002: 177–188.
- ZHANG X D. Modern Signal Processing[M]. Second edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 177–188.
- 闫 贺: 男, 1985 年生, 讲师, 研究方向为合成孔径雷达信号处理.
- 朱岱寅: 男, 1974 年生, 教授, 研究方向为合成孔径雷达信号处理.
- 张劲东: 男, 1981年生, 副教授, 研究方向为雷达信号处理.
- 王旭东: 男, 1979年生, 副教授, 研究方向为雷达信号处理及硬件实现.
- 李 勇: 男, 1976 年生, 副教授, 研究方向为合成孔径雷达信号处理.
- 毛新华: 男, 1979 年生, 副教授, 研究方向为合成孔径雷达信号处理.
- 吴 迪: 男, 1983 年生, 副教授, 研究方向为合成孔径雷达信号处理.