

面向弹载 SAR 系统精确制导应用的 ROI 智能快速检测

张 军 高 贵 黄英君 杨海滨
(国防科技大学信息系统与管理学院 长沙 410073)

摘 要: 该文针对导弹精确打击的任务需求,以基于“人在回路”合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)图像压缩传输系统的实现为主要目标,根据导弹精确制导所感兴趣目标的非特定性以及强散射性等共同特点,提出了一种基于任务驱动的 SAR 图像目标智能快速检测统一框架。该框架从检测的实用性对检测算法的智能、快速、高性能、可辨识以及对图像分解尺度的鲁棒性等因素出发,以两步 CFAR(Constant False-Alarm Rate)检测为核心步骤实现目标的检测,即用结构分量上的快速预览来指导原始图像上的智能快速检测。理论和实验都证明文中所提框架是一种针对不同目标总体流程相同,局部实现细节相异的检测方案,具有一定的实用性和良好的可扩充性。

关键词: 合成孔径雷达; 人在回路; 压缩传输; 感兴趣目标

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)06-1310-05

Fast and Intelligent Detection of ROI in Precision-Guided Applications of Missile-Borne SAR System

Zhang Jun Gao Gui Huang Ying-jun Yang Hai-bin
(School of Information System and Management, NUDT, Changsha 410073, China)

Abstract: For the needs of precision-guided striking task and to develop an image compression and translation system which based on “man-in-loop” SAR, a general task-drive intelligent and fast detection framework of SAR images is proposed according to the same character of non-specific and strong scattering in ROI of precision guided missiles. Started from practicality of the detection which need the algorithm be intelligent, fast, high performance, this framework takes two-step CFAR detection as the core step, which used the rapid structural component preview to guide the intelligent and rapid detection in original image. Theoretical analysis and experimental results show that this framework is a good detecting scheme which has same overall flow and different local implementation details for different goal, so it has strong practicality and excellent expandability.

Key words: SAR; Human-in-loop; Compression and translation; ROI(Range Of Interesting)

1 引言

由导弹头搭载 SAR 系统进行实时成像的图像精确制导技术是目前的一个研究热点。弹载 SAR 系统通常采用一种飞行数据链构建“人在回路”的控制方式,通过引入人的干预控制来提高打击精度^[1]。为了能在带宽有限的信道中实时或近实时地下传航拍 SAR 图像数据,一种自然的思路是基于图像内容设计智能的图像压缩方案^[2,3]。其实现的一般过程^[4]是:首先针对弹载系统采集的数据开展智能快速的自动目标检测,将图像分为潜在的目标感兴趣区域(ROI)和背景区域,然后针对这两种区域采用不同的图像压缩策略,对潜在目标区域采用无损压缩,对背景区域采用高倍数的有损压缩,这样便可以在保留数据中大量有用信息的同时大大减少需要传输的数据量。由此可见,SAR 图像目标感兴趣区域的

自动检测是基于图像内容的智能压缩方案实现的前提。

包含目标 ROI 检测算法的智能压缩方案近年来引起了广泛地关注,典型的如:Nahm 提出的首先对 SAR 图像采用以 CFAR(Constant False Alarm Rate)为基本算法进行目标感兴趣区域检测,进而实现图像智能压缩的方案^[2];Nasser 提出的对 SAR 图像使用 ATR(Automatic Target Recognition)方法进行目标片与背景图像的分割,进而对背景图像采用高倍率压缩,对目标区域采用无损压缩的方案^[3]等。

以基于“人在回路”SAR 图像压缩传输系统的实现为主要目的,本文研究实用化的 SAR 图像感兴趣目标智能快速检测方法。根据导弹精确制导所感兴趣目标的非特定性以及强散射性等共同特点,第 2 节提出了一种基于任务驱动的 SAR 图像目标智能快速检测统一框架;第 3 节给出了框架中算法的详细流程;第 4 节给出了实验结果;最后为结论部分。

2 基于任务驱动的 SAR 图像目标智能快速检测统一框架

导弹精确打击所针对的多为战略目标^[1],典型的如桥梁、重要交通枢纽、导弹阵地、标志性建筑物、陆地坦克、装甲车、军用卡车编队、海上舰船编队等战略军事目标。这些目标有着共同点,即它们大多由金属材料制成或本身具有较强的雷达散射,在高分辨率 SAR 图像上,表现为较强散射点聚集的“簇”,可以采用点目标检测的方法实现这些目标的检测^[5]。CFAR 检测是目前能够应用于上述目标检测的较有前途的一类方法^[5]。然而,实际的作战环境瞬息万变、变幻莫测,精确打击的任务会随着实际作战任务的需求、战场态势的变化而改变。也就是说,面向精确打击任务的目标自动检测方案不应只针对某一种特定的目标,而应该考虑实际中可能需要打击的所有目标。

前文罗列了多种精确打击的多种强散射目标,这些目标的特性(如电磁散射特性、几何特征^[6]等)、存在的形式(如静止的或是机动^[7]的等)、目标的上下文信息(如桥梁一般处于水域之上,城区之中,舰船位于水体中等)、目标的大小(长、宽、面积等)、形状等均存在差异,表现在检测方法上也存在着差异。因此不能把适用于一种目标检测的方法直接应用于另一种目标的检测上。所以常规的做法是^[8]:对于所有可能需要打击的目标,在算法设计和硬件实现上,每种目标都会采用一套适用于自身检测的方案,然后根据实际精确打击的任务需求,选择相应的检测方案进行感兴趣目标的检测。常规做法造成的一个直接后果是必然会大大增加检测对硬件实现系统的要求。因此,从节省资源的角度出发,设计一种能够对所有感兴趣目标进行检测的统一框架是必要的。

本文提出了一种基于任务驱动的目标智能快速检测统一框架,其总体检测流程如图 1 所示。本文以计算简洁,能够满足目标检测实时性要求的 CFAR 检测算法为基础开展检测框架的设计。图 1 所示的框架适用于精确打击感兴趣的强散射目标的检测,对于不同的作战任务整体思路相同,局部实现细节上可灵活变换,并且具有良好的可扩充能力。

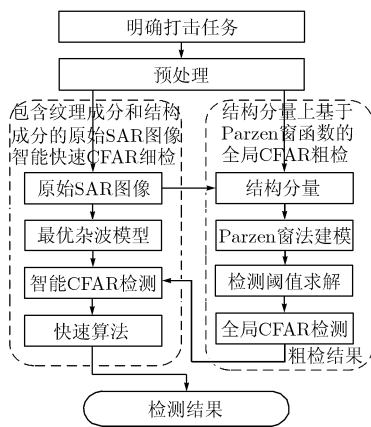


图 1 基于任务驱动的目标智能快速检测统一框架

3 框架中算法的详细流程

3.1 结构分量上基于 Parzen 窗函数的全局 CFAR 粗检

SAR 图像分解后得到的结构分量包含了原始图像中的大尺度几何结构信息^[11],尤其是对检测性能影响较大的强散射地物结构信息,这些信息提供了关于图像内容的先验知识,对于进一步的精细检测是非常有意义的,并且有助于了解图像中存在的非均匀、多目标等区域,以指导进一步的智能检测算法的设计。

文献[12]的理论分析证明了全局 CFAR 算法是一种相对于常规局部滑窗 CFAR 算法效率更高的检测算法,其适合于结构分量上图像的快速预览。

同所有的 CFAR 检测算法一样,全局 CFAR 检测算法需要首先对给定的结构分量进行统计建模。常规的适用于 SAR 图像的统计模型不能用来对结构分量图像进行建模,其原因在于:一是结构分量是原始 SAR 图像分解后的一种成分,适用于原始 SAR 图像的统计模型对结构分量的建模缺乏理论前提的情况;二是在结构分量上采用全局 CFAR 算法需要首先对整幅结构分量图像进行统计建模,常规具有有限个参数的杂波统计模型不足以描述内容丰富的整幅图像^[5]。基于上述考虑,采用基于数据驱动的图像统计建模方法是必要的,Parzen 窗法是一种典型的基于数据驱动的图像统计建模方法。

以 Parzen 窗函数逼近的实际图像概率密度函数的估计公式如式(1):

$$\hat{p}_N(x) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{1}{h_N} \varphi\left(\frac{x-x_j}{h_N}\right), x \geq 0 \quad (1)$$

其中 N 为采样点个数, h_N 是窗函数的宽度, x_j 是采样点,对应于结构分量图像的像素值。 $\varphi(\cdot)$ 为 Parzen 窗函数,满足标准正态分布。

给定理论虚警概率为 p_{fa} , 则对整幅结构分量图像 CFAR 检测的全局门限 T 由式(2)确定:

$$p_{fa} = \frac{1}{2N} \sum_{j=1}^N \operatorname{erfc}\left(\frac{T-x_j}{\sqrt{2}h_N}\right) \quad (2)$$

其中 $\operatorname{erfc}(\cdot)$ 是误差函数补函数。所以对于每一像素 i , 全局 CFAR 检测算法判定为目标像素或背景像素的条件为

$$\begin{cases} \text{像素 } i \text{ 为目标像素, } x_i \geq T \\ \text{像素 } i \text{ 为背景像素, 其它} \end{cases} \quad (3)$$

经过了基于 Parzen 窗函数的图像统计建模、结构分量图像的全局 CFAR 检测和检测后处理,可最终实现结构分量图像上粗检测,完成快速预览。

3.2 原始图像上智能快速 CFAR 检测

结构分量受限于图像的尺度以及分解的平滑效应造成的部门目标可能湮没于背景中以及目标边界模糊等现象,由原始 SAR 图像分解得到的结构分量本身可能丢失了大量的可用于目标检测的信息,因此在结构分量上粗检的精度并不

能保证, 其只适合用于图像的预览。

为了降低分解尺度对目标检测的性能的影响, 同时不损失目标检测的信息, 本节设计原始图像上的 CFAR 检测算法。基本思想是: 利用结构分量上的粗检提供的图像内容的大尺度强散射几何结构信息, 以了解图像中的杂波边缘、多目标等区域, 进而指导在原始图像上的智能算法的设计, 提高目标检测的精度。

本文的智能目标检测算法详细流程如图 2 所示。

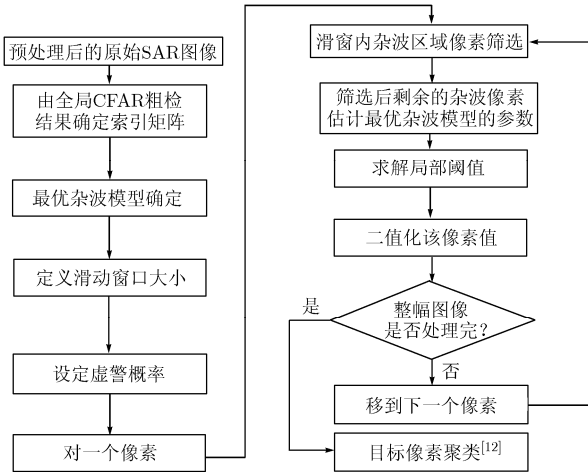


图 2 原始图像上智能快速 CFAR 检测的详细流程

(1) 算法描述

(a)索引矩阵 设全局 CFAR 粗检后的二值图为 f_R , 大小为 $N \times M$, 其中二值图中的亮像素(其值为 1)代表目标部分, 暗像素(其值为 0)代表背景部分, 那么点 (i, j) 处的索引值定义为 $V_{i,j}$, 图像的索引矩阵定义为 \mathbf{V} , 则

$$\mathbf{V} = \{V_{i,j} = f_R(i, j) | 1 \leq i \leq N; 1 \leq j \leq M\} \quad (4)$$

(b)最优杂波统计模型 文献[13]中通过理论分析和大量实测数据的实验得出结论: 在目前已有的应用广泛的统计分布中, G^0 分布最适于描述 SAR 图像杂波统计特性。本文采用 G^0 分布作为最优的杂波统计模型。

考虑强度数据, G^0 分布的强度形式 G_I^0 分布可表示为^[13]

$$p(I) \sim G_I^0(\alpha, \gamma, n) = \frac{n^n \Gamma(n - \alpha) I^{n-1}}{\gamma^\alpha \Gamma(-\alpha) \Gamma(n) (\gamma + nI)^{n-\alpha}}, \quad -\alpha, \gamma, n, I > 0 \quad (5)$$

其中 I 为像素强度值变量, n 为等效视数, α 是形状参数, γ 是尺度参数。

在单视情况下, G_I^0 分布退化为 β' 分布^[13]:

$$p(I) \sim \beta'(\alpha, \gamma) = \frac{-\alpha \gamma^{-\alpha}}{(\gamma + I)^{1-\alpha}}, \quad -\alpha, \gamma, I > 0 \quad (6)$$

(c)检测的局部阈值求解 在滑窗对整幅图像进行遍历的过程中, 设当前测试像素强度值为 I_0 , 在以 I_0 为中心的实心滑窗区域中, 根据索引矩阵, 去掉索引值为 1 的像素,

其个数为 D 个, 则以剩余的 $N_c - D$ 个杂波像素对 G_I^0 分布进行参数估计, 所得估计的表达式为^[13]

$$\hat{\alpha} = -1 - \frac{nE(I^2)}{nE(I^2) - (n+1)E(I^2)} \quad (7)$$

$$\hat{\gamma} = (-\hat{\alpha} - 1)E(I) \quad (8)$$

给定检测的虚警概率 p'_{fa} , 则对应的 CFAR 检测局部阈值 T_l 可由式(9)获得:

$$1 - p'_{fa} = \int_0^{T_l} p(I) dI \quad (9)$$

对于 G_I^0 分布, 上式积分得不到解析表达式, 局部阈值 T_l 可通过二分法获得, 详见文献[14]。

对应地, 在单视情况下, β' 分布的参数估计为

$$\hat{\alpha} = -1 - \frac{E(I^2)}{E(I^2) - 2E(I)} \quad (10)$$

$$\hat{\gamma} = (-\hat{\alpha} - 1)E(I) \quad (11)$$

同样地, 给定检测的虚警概率 p'_{fa} , 则对应的 CFAR 检测局部阈值 T_l 为

$$T_l = \hat{\gamma} \left((p'_{fa})^{1/\hat{\alpha}} - 1 \right) \quad (12)$$

因此, 对当前滑窗所处的测试像素, 做如下的二元假设:

H_1 : 当前测试像素是目标像素; H_0 : 当前测试像素是杂波像素。则二元假设的判决准则是:

$$\begin{matrix} H_1 \\ I_0 > T_l \\ H_0 \end{matrix} \quad (13)$$

以此在图像内逐点自适应确定 T_l 然后进行判断即可实现目标的检测。

(2)快速算法 当滑窗对图像进行遍历时, 滑窗向右或向下平移一个像素, 左右相邻的两个测试单元(上下相邻的情况相同)窗口中杂波像素发生的变化是: 左边测试单元滑窗内的最左边一列中的杂波像素被迁出, 设为 N_1 个, 右边测试单元滑窗内的最右边一列中的杂波像素被迁入, 设为 N_3 个。两者滑窗的重合杂波像素个数设为 N_2 个。可以采用由左边测试单元地杂波统计量迭代计算右边测试单元地杂波统计量, 来设计快速算法, 节省检测地计算量。式(7)、式(8)的智能算法参数估计可通过一、二阶原点矩来计算。以强度图像为例, 设左边滑窗内杂波像素集的平均强度为 μ_{left} , 二阶原点矩为 η_{left} , 相应地, 右边滑窗内杂波像素集的平均强度为 μ_{right} , 二阶原点矩为 η_{right} , 那么有如下迭代关系:

$$\mu_{right} = \frac{N_1 + N_2}{N_2 + N_3} \mu_{left} + \frac{\sum_{i=1}^{N_3} I_{right}}{N_2 + N_3} - \frac{\sum_{i=1}^{N_1} I_{left}}{N_2 + N_3} \quad (14)$$

$$\eta_{right} = \frac{N_1 + N_2}{N_2 + N_3} \eta_{left} + \frac{\sum_{i=1}^{N_3} I_{right}^2}{N_2 + N_3} - \frac{\sum_{i=1}^{N_1} I_{left}^2}{N_2 + N_3} \quad (15)$$

其中 I_{left} 是左边测试单元滑窗内的最左边一列中的杂波像素

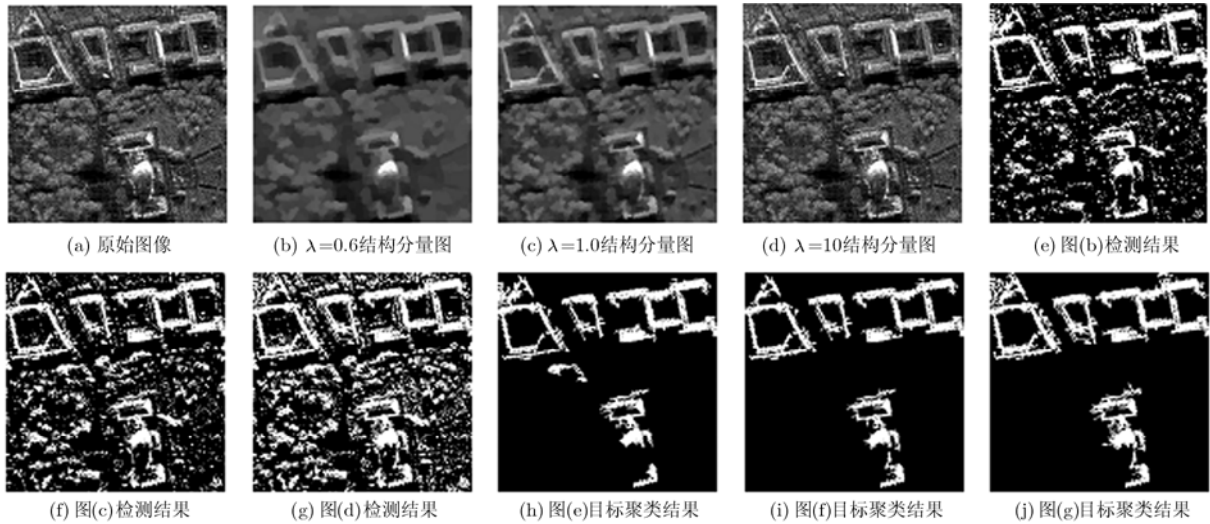


图3 实验结果

强度值, I_{right} 是右边测试单元滑窗内的最右边一列中的杂波像素强度值。

4 实验结果与分析

以导弹精确打击感兴趣的建筑物目标图像为例, 图3给出了应用本文检测算法的检测结果。其中图3(b)、3(c)、3(d)图分别为在分解尺度 $\lambda = 0.6, 1.0, 10.0$ 下的结构分量图像。在分解尺度 $\lambda = 10.0$ 时, 图3(d)的结构分量图像等同于对应的原始 SAR 图像。从图3(a)中可以看出, 对应于上述结构分量图像的原始 SAR 图像是一幅典型且复杂的城区 SAR 图像, 图像中含有较多的人造建筑物以及成片的较强散射的树木, 建筑物的形状、尺寸很不规则, 相互之间的距离很近, 大多属于目标检测的多目标环境, 因此如图3(a)所示的原始 SAR 图像是目标检测应用的典型且较复杂的场景, 对于该场景的检测能够对检测算法的性能进行全面深入的分析。

对图像采用本文的 CFAR 算法检测流程, 其中检测的虚警概率设定为 $p'_{\text{fa}} = 0.1$ 。图3(e)、3(f)、3(g)分别对应图3(b)、3(c)、3(d)结构分量图像粗检作为智能 CFAR 算法索引的检测结果。图3(h)、3(i)、3(j)分别为图3(e)、3(f)、3(g)目标聚类结果。从图3(h)、3(i)、3(j)可以看出, 尽管图像分解的尺度跨度很大, 即从较高的 $\lambda = 0.6$ 到较低的 $\lambda = 10.0$, 但是经过本文 CFAR 算法的处理, 代表强散射的人造建筑物基本上都被检测到, 相应的虚警区域却非常少。仅仅在分解尺度 $\lambda = 0.6$ 时, 最终的目标检测结果中存在1个虚警区域, 这是因为 $\lambda = 0.6$ 的图像分解尺度非常大, 带来的图像平滑效应相应也很大, 造成目标的局部对比度值大为降低。图4的检测结果也说明了本文的智能 CFAR 算法对于图像分解的尺度要求不高, 换句话说, 图像分解尺度选择合适与否或者分解尺度的大范围变化, 对相应的目标检测结果的影响有限。

图4是对图3所示场景对应的原始 SAR 图像直接采用

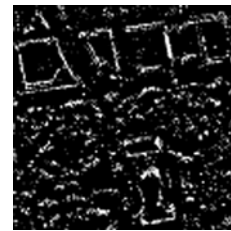


图4 CA-CFAR 算法(Salazar 算法)检测结果

CA-CFAR 算法检测的结果, 检测虚警概率同样设定为 $p'_{\text{fa}} = 0.1$ 。有别于图3检测的处理过程, 图4的处理过程是不引入筛选的过程, 直接对原始 SAR 图像采用基于 G^0 分布的 CA-CFAR 算法(由于是单视图, 所以这里等同于著名的 Salazar 智能算法^[16])。由于如图3所示对应的原始 SAR 场景中大量的人造建筑物相对距离较近, 属于检测的多目标环境, 检测滑窗的目标或强散射地物结构像素污染了对杂波统计特性的估计, 造成了相应的检测阈值增大, 目标检测性能严重降低。从图4的检测结果来看, 在同样的虚警概率条件下, Salazar 算法检测出的目标像素相对较少, 目标的细节很不清楚, 目标的信息损失较大。这说明了本文筛选过程的引入, 确实较大地提升了目标检测的性能。

在 CPU 主频为 2.8GHz, 内存为 1G 的硬件环境下, 采用未优化的 Matlab 代码, 图像大小 256×256 , 滑窗高度取 $h = 13$, 图3的3种情况下直接计算的平均时间是 1.527s, 进一步采用快速算法的计算量是 0.192s, 两者计算量之比是 7.94 倍, 进一步说明了快速算法的性能。

5 结束语

针对导弹精确打击的任务需求, 作为面向“人在回路”SAR 图像压缩传输系统的关键技术之一, 本文研究了导弹制导强散射目标感兴趣区域的智能快速检测方法, 针对精确制

导目标的非特定性、强散射性等共同特点,提出了一种基于任务驱动的 SAR 图像目标智能快速检测统一框架。进而设计框架中的详细算法。实验证明文中所提框架是一种快速、智能、性能好且对分解尺度具有鲁棒性的目标检测方案,而且文中所提框架是一种针对不同目标总体流程相同,局部实现细节相异的检测方案,具有良好的可扩充性。

参 考 文 献

- [1] 常青. 巡航导弹制导系统关键技术研究[D]. [博士学位论文], 西北工业大学, 2003.
Chang Q. Research of guidance techniques on Cruise missile[D]. [Ph.D. dissertation], Northwestern Polytechnic University, 2003.
 - [2] Nahm J W and Smith M J. Optimized encoder design algorithm for joint compression and recognition[J]. Proc. SPIE, Signal Processing, Sensor Fusion, and Target Recognition IV, 07/1995, Vol. 2484: 236-245.
 - [3] Nasser M N, Joseph P S, Heesung K, and Syed A R. High compression of SAR imagery for battlefield surveillance[J]. Proc. SPIE, Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery III, 06/1996, Vol. 2757: 397-408.
 - [4] 宋荣华, 宋建社, 薛文通, 袁礼海. SAR 图像压缩技术的发展与现状[J]. 计算机应用研究, 2005, 22(4): 6-8.
Song Y H, Song J S, Xue W T, and Yuan L H. Development and actuality of SAR image compression techniques[J]. *Application Research of Computers*, 2005, 22(4): 6-8.
 - [5] 高贵. SAR 图像目标 ROI 自动获取技术研究[D]. [博士学位论文], 国防科学技术大学, 2007.
Gao G. The research on automatic acquirement of target's ROI from imagery[D]. [Ph.D. dissertation], National University of Defense Technology, 2007.
 - [6] 曾国奇, 苏东林, 刘焱. 雷达目标特征数据库在雷达组网仿真上的应用[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(7): 1683-1686.
Zeng G Q, Su D L, and Liu Y. The application of radar target characteristic database on the simulation of radar network[J]. *Journal of Electronics & Information*, 2007, 29(7): 1683-1686.
 - [7] Oliver C J and Quegan S. Understanding Synthetic Aperture Radar Images[M]. Boston London: Artech House: Boston, 1998: 88-204.
 - [8] Novak L M, *et al.* The automatic target-recognition system in SAIP[J]. *The Lincoln Laboratory Journal*, 1997, 10(2): 187-202.
 - [9] English R A, *et al.* Development of an ATR workbench for SAR imagery[R]. Technical Report, DRDC, Ottawa, 2005.
 - [10] McConnell I and Oliver C J. A comparison of segmentation methods with standard CFAR for point target detection[C]. Europto Conf. on SAR Image Analysis, Simulation and Modelling IV, SPIE Proc., 1998, 3497: 76-87.
 - [11] Yin W, Goldfarb D, and Osher S. Total variation based image cartoon-texture decomposition[R]. Technical Report CORC TR-2005-01, Columbia University, USA, 2005.
 - [12] 张军, 高贵. SAR 图像目标检测的两种 CFAR 算法对比研究[J]. 信号处理, 2008, 24(1): 78-82.
Zhang J and Gao G. Comparison on two CFAR algorithms of vehicle target detection in SAR Images[J]. *Signal Processing*, 2008, 24(1): 78-82.
 - [13] Frery A C, *et al.* A model for extremely heterogeneous clutter[J]. *IEEE Trans. on GRS*, 1997, 35(3): 648-659.
 - [14] 邹焕新. SAR 图像舰船目标与航迹检测方法研究[D]. [博士学位论文], 国防科技大学, 2003.
Zou H X. Research on detection of ship and ship wakes from SAR image[D]. [Ph.D. dissertation], National University of Defense Technology, 2003.
- 张 军: 女, 1975 年生, 博士, 副教授, 从事 SAR 图像目标的 ROI 自动获取、图像编码的工作。
高 贵: 男, 1981 年生, 博士, 从事基于 SAR 图像的自动目标识别、SAR 目标特征分析的工作。