

# SAR 图象自动目标识别研究

匡纲要 计科峰 粟毅 郁文贤

(国防科技大学电子科学与工程学院, 长沙 410073)

**摘要** 目前, SAR 已经成为一种不可或缺的对地观测和军事侦察手段. 面对不断增长的 SAR 图象数据收集能力, 如何对这些图象进行自动或半自动快速、准确地解译已经越来越引起人们的关注和重视. 自动目标识别(ATR)是自动或半自动 SAR 图象解译研究的一个重要方面. SAR ATR 过程可概述为: 从观测得到的 SAR 图象中, 找到感兴趣的区域(ROI), 并计算出每个 ROI 的种类. 为此, 介绍了 SAR ATR 的含义及其一般流程, 对 SAR ATR 系统按照它所采用的分类方法进行了归纳分类, 分析了 SAR ATR 的难点, 介绍了国内外 SAR ATR 的研究现状和发展趋势.

**关键词** 图象处理(510·4050) 合成孔径雷达图象 自动目标识别

**中图分类号**: TN957.52 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2003)10-1115-06

## A Survey of Researches on SAR ATR

KUANG Gang-yao, JI Ke-feng, SU Yi, Yu Wen-xian

(School of Electronic Science and Engineering, NUDT, Changsha 410073)

**Abstract** Recently, SAR (Synthetic Aperture Radar) is evolving to become an indispensable tool for earth observation and military reconnaissance. The collection capacity for SAR images is growing rapidly, and along with that growth is the expanding need for automated or semi-automated exploitation of SAR images accurately and efficiently. Automatic target recognition (ATR) is an important aspect of automatic or semi-automatic SAR imagery interpretation. An ATR algorithm finds target like regions (regions-of-interest (ROIs)) within a SAR image and computes a class for each ROI. The meaning of SAR ATR is explained, and the general architecture of SAR ATR system is introduced in this paper. SAR ATR systems are analyzed and classified according to their classification methods. The main difficulty of SAR ATR is analyzed, the present state and the future direction of SAR ATR research are also introduced.

**Keywords** Image processing, Synthetic aperture radar(SAR) image, Automatic target recognition (ATR)

## 0 引言

作为一种利用微波进行感知的主动传感器, 和光学、红外等其他传感器相比, SAR 成像不受天气、光照等条件的限制, 可对感兴趣的目标进行全天候、全天时的侦察. 另外, 利用微波的穿透特性, 还可实现对隐蔽目标的探测(UWB 穿透叶簇 SAR). 目前, SAR 已经成为一种不可或缺的对地观测和军事侦察手段. 一个典型机载 SAR 系统可在 1 分钟内对大约 100km<sup>2</sup> 的范围进行高分辨成像获得 1m×1m 分

辨率的 SAR 图象, 这相当于每秒产生一幅 100 多万像素的 SAR 图象<sup>[1]</sup>, 面对不断增长的 SAR 图象收集能力, 如何对这些图象进行自动或半自动快速、准确地解译已经引起人们的关注和重视. 自动目标识别(ATR)是自动或半自动 SAR 图象解译研究的一个重要方面.

## 1 SAR ATR 的含义及一般流程

### 1.1 SAR ATR 的含义

SAR 图象目标识别过程可概述为从观测得到

的 SAR 图象中,找到类似目标的区域(ROIs (Regions of interest)),并计算出每个 ROI 的种类(例如:T72 或 BTR70)<sup>[1]</sup>. 目标种类按从粗到细的顺序划分为敌、我类;主战坦克类、自推进火炮类、卡车类等;T72 类、M1 类、M109 类等;T72A 类、T72B 类、T72C 类等,对应于这些层次的分类分别叫做:敌我识别(IFF)、目标种类识别(Classification)、目标类型识别(Identification)、目标型号识别(Recognition). 目前,典型的 SAR ATR 系统像林肯实验室基于模板的 SAR ATR 系统和 MSTAR 基于模型的 SAR ATR 系统,实际上都是目标类型级的识别(Identification),因此严格来讲应该叫做 ATI(Automatic Target Identification). 但在实际中,一般不加严格区分,还是将对应目标类型级的识别称为 ATR.

## 1.2 SAR ATR 的一般流程

由于 SAR 一次观测得到的 SAR 图象对应的场景一般比较大,因此,SAR 图象目标识别一般采用一种分层次的方法,即首先,从整个 SAR 图象中提取出感兴趣的区域(ROIs),也即可能包含目标的小区域;然后,对这些感兴趣的区域进行进一步处理,以去除那些不可能是目标的区域;最后,再对剩下的最可能是目标的小区域进行更复杂的、计算量更大的处理,以达到对战术目标分类、识别的目的. 在这种分层的方法中,数据处理虽然一步一步复杂,也即计算量越来越大,但同时,需要处理的数据量却是在逐步减少的,这样就大大提高了目标识别系统的效率. 典型的自动目标识别系统的结构如图 1 所示<sup>[3]</sup>,它包括:检测(Prescreener)、鉴别(Discrimination)、分类(Classification)3 个阶段. 检测阶段从输入的原始 SAR 图象中提取 ROI,最常用的检测器是 CFAR 检测器;鉴别阶段对检测阶段得到的 ROI 进行处理,以去除只包含自然杂波虚警的 ROI;分类阶段对余下的 ROI 进一步处理,以去除

非目标的人造虚警,并给出目标种类、位置、姿态等信息<sup>[2-4]</sup>.

## 2 SAR ATR 系统的分类

SAR ATR 系统一般都包括分类器. 根据 SAR ATR 系统分类器输入对象的不同,可将 SAR ATR 系统分为以下两大类:

(1) 直接基于图象分类的 SAR ATR 系统. 它通过直接比较两幅图象的像素值,达到目标分类的目的.

(2) 基于特征分类的 SAR ATR 系统. 首先从图象提取特征矢量,然后,通过对提取的特征矢量的比较达到目标分类的目的. 特征可以是对提取的峰值、边缘或分割得到的图象区域的描述或基函数分解,也可以是其他任何能够将 ROI 压缩成几个特征参数的描述<sup>[4]</sup>.

由于 SAR ROI 图象的维数一般很高(典型的为  $128 \times 128$  像素),因此,和直接基于图象的分类方法相比,基于特征的分类方法效率更高. 但是,对基于特征的分类方法来说,如何有效选择并快速提取可用于分类的最优特征,仍然是一个需进一步深入研究的问题.

另外,不管是基于图象的分类方法还是基于特征的分类方法,一般情况下,分类都是通过 ROI 图象或由它提取的特征矢量和目标数据库预存的样本相比较完成的. 根据该数据库的结构和实现方式,SAR ATR 系统又可分为以下两类:

(1) 基于模板分类的系统. 它需要存储目标各种条件下的模板图象或特征矢量,每个模板提供了一种分类假设,分类是通过选择候选目标的图象或特征矢量与模板的最佳匹配来完成的.

(2) 基于模型分类的系统. 数据库中存储的是目标物理或概念的模型,通过对这些模型的处理和操作可以(实时、近实时)预测目标任意姿态、配置条件,观测几何下的图象或特征矢量. 分类是通过智能地修正目标类型、姿态等的假设直到它和测量图象或由测量图象提取的特征矢量匹配得足够好为止.

由于 SAR 图象(或 SAR 图象特征矢量)对目标方位角、姿态角的变化很敏感,另外,目标本身结构的变化、遮挡、隐蔽、以及背景、成像参数的变化等等,都会引起目标 SAR 图象或 SAR 图象特征矢量发生变化,因此,对实际的目标识别问题,若采用基

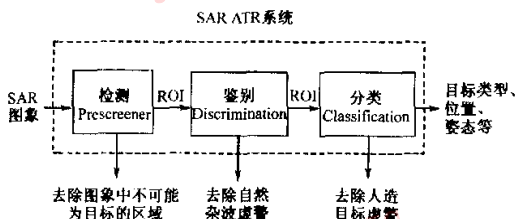


图 1 一个典型的 SAR 自动目标识别系统的结构示意图

于模板的方法,则需要存储大量模板.和基于模板的方法相比,基于模型的方法不需要存储大量模板.另外,在分类假设的选择上,基于模型的方法能够连续地、更精确地选择目标姿态和配置条件等信息.相反,基于模板的方法受模板数目的限制只能离散地选择目标姿态和配置条件等信息.但是,长期以来,基于模板的分类方法却比基于模型的方法用得更广,这在很大程度上是因为基于模型的分类型概念上和计算上的复杂性,为了对目标分类,它需要高水平的推理,对模型的操作,以及实时(近实时)的 SAR 图象或 SAR 图象特征矢量预测模块.近年来,由于计算水平的提高,高保真、快速电磁预估软件的发展,基于模型的分类型系统正越来越引起人们的关注和重视<sup>[5]</sup>.

利用上面介绍的 4 类 SAR ATR 系统,可以组合得到以下的几种 SAR ATR 系统:

- (1) 利用图象基于模板的 SAR ATR 系统;
- (2) 利用特征基于模板的 SAR ATR 系统;
- (3) 利用图象基于模型的 SAR ATR 系统;
- (4) 利用特征基于模型的 SAR ATR 系统.

### 3 SAR ATR 的难点

SAR ATR 最难以解决的问题是很难把 SAR ATR 的试验结果推广到一般的实际情况中,因为,无法得到实际问题的随机样本<sup>[2]</sup>.虽然可以从一个特定图象集得到随机样本,但由于源图象集本身并不是实际问题的随机样本,因此,该样本本质上也不是随机的.即使对 MSTAR 这种包括成千上万个图象的样本集来说,由于有大量子集是在完全相同的背景下,被同一种传感器,在同一天针对完全相同的地面目标、完全相同的结构、配置以及连接状态所获得的图象,因此它也不是随机的.因为,对完全随机的样本集来说,其中任何两个条件都应该是完全不同的.样本非随机性的影响是很显然的,因为如果是随机样本的话,那么只要几百幅图象就可以评价识别系统的性能了,但是,虽然目前 MSTAR 已对成千上万的图象进行了 ATR 性能测试,但遗憾的是,到目前为止,仍没有人能预测在实际情况下,它的性能到底会如何!

根据 MSTAR 的观点,SAR ATR 问题可视为系统成本、操作条件以及系统性能 3 项的函数<sup>[2]</sup>,实际上就是这 3 项使得很难把 SAR ATR 的试验结果

推广到一般的实际情况中,比如如何比较操作条件;对于实验和实际应用来说什么样的相对代价是允许的;在实际应用中,哪一级的性能是真正需要的等等.

系统性能包括检测(进行目标、非目标的决策)性能和分类性能(进行目标种类的决策);系统成本包括系统的研发成本和实际运行成本;操作条件分为目标的变化、环境的变化以及成像参数的变化.一般而言,对一种给定的技术,当操作条件变化或成本受限制时,系统性能肯定是要降低的.就操作条件而言,目标包括 ATR 系统要发现和识别的物体的数目、类型以及特性(主要指它的变化);环境包括目标和传感器周围的情况以及气候因素,但是对 SAR 更多要考虑的是遮蔽、层叠以及背景等因素;成像参数包括成像几何、传感器的类型和特性以及 ATR 预处理(例如:运动补偿).

目标按大的方面可分为类,每个类又可以进一步分为几个不同的型号,每个型号又包括许多不同的版本,版本包括:模型版本的变体和功能版本的变体<sup>[2]</sup>.即使两个目标的版本相同,它们之间仍可能存在差异,这些差异主要可分为:结构和连接的变体.另外,还有其他的目标变体,例如,目标损坏、被泥泞覆盖以及包含有运动的部件等.这些变体既可以单独出现也可同时组合出现(例如同时包含连接变体和损害变体),所有这些目标的变体均可以引起目标图象或图象特征的变化.

除目标本身的变化之外,目标周围的环境对 SAR 图象也会产生很大的影响<sup>[2]</sup>.广义的环境效应包括:6 自由度的姿态、遮挡、层叠、邻接、背景、天气、伪装、隐蔽、欺骗(CC&D)、电磁干扰(EMI)以及电子对抗(ECM).

另外,成像参数的变化对 SAR 图象的影响并不比目标的变化和环境的变化引起的影响小<sup>[2]</sup>.成像参数的变化包括:俯仰角、斜视角、所用的波形(频率、脉冲重复频率 PRF、带宽)、极化、单/多视、分辨率、噪声水平、传感器的异常、运动补偿和聚焦中的人为误差以及成像的条带/聚束模式等.

上面所有这些因素都会影响 SAR ATR 的性能,因此 SAR ATR 是一个非常复杂的问题.虽然 MSTAR 数据是目前公认的对目标识别算法进行测试的较完备的数据集,但是和实际情况相比,还远远不够,而实际中某些因素对 SAR 目标识别性能的影响又很难预测或建模,因此,就目前而言,SAR ATR 距离实用还有相当大一段距离.

#### 4 SAR ATR 研究现状

由于 SAR ATR 的重要军事意义,目前世界各国都非常重视这方面的研究,典型的包括:美国、俄罗斯、法国、德国、加拿大、日本、瑞典、意大利、南非等国家,其中尤以美国在这方面的研究处于国际领先地位。

美国在 SAR ATR 方面的研究工作最早始于 20 世纪 70、80 年代,其主要工作体现在下面两个典型系统中。

林肯实验室是最早开展高分辨 SAR 图象自动目标识别研究的单位之一。它利用 33 GHz (Ka-波段) 的高分辨 ( $0.3\text{m} \times 0.3\text{m}$ )、全极化 SAR 数据 (ADTS 数据) 进行目标识别的研究工作<sup>[1,3,6]</sup>。其基线 (base-line) SAR ATR 系统的结构如图 1 所示。在早期的基线 SAR ATR 系统中,研究了极化白化滤波器 (PWF) 以及目标检测、鉴别、分类的各个阶段。对战术目标得到了较好的正确分类率,并且很好地去除了自然杂波和人造目标虚警。而后,对该基线系统的各个阶段进行了一系列改进研究,以提高它的性能。另外,还详细研究了极化和分辨率对 SAR 自动目标识别性能的影响,通过引入 HDVI (High definition vector imaging) 的超分辨率成像方法<sup>[1]</sup>,提出了一种对中等分辨率 ( $1\text{m} \times 1\text{m}$ ) SAR 图象进行可靠地基于模板的目标分类方法,得到了较好的分类性能。最后,用该系统对 MSTAR 目标<sup>[6]</sup>进行了分类实验。基于模板的 SAR ATR 分类方法,是 SAIP (Semi-Automated IMINT (Image Intelligence) processing system) 研究计划<sup>[1]</sup>的早期目标,它原理简单,理论上比较容易实现,在限制的条件 (测试图象和训练图象的条件比较接近的情况下),能得到较好的分类性能。但对于实际中大量存在的无限制的广义操作条件 (EOC, Extended operating conditions)<sup>[7]</sup>,由于所需的模板库的样本很难得到,因此,实现起来非常困难。

MSTAR 基于模型的 SAR 图象自动目标识别系统,是 SAIP 第 2 步的研究目标。MSTAR 系统是 DARPA (The Defense Advanced Research Projects Agency) 和 AFRL (Air Force Research Laboratory) 联合开发的一个基于模型的、先进的 SAR ATR 系统。它利用 X 波段,单极化,  $0.3\text{m} \times 0.3\text{m}$  的高分辨 SAR 图象数据,重点研究广义操作条件 (EOC)

下<sup>[7]</sup>,也即训练数据的条件和测试数据的条件不同的情况下的目标识别。该系统的结构如图 2 所示<sup>[8]</sup>。

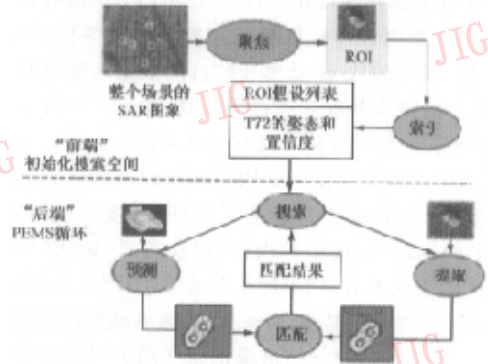


图 2 MSTAR SAR ATR 系统的结构示意图

MSTAR 基于模型的 ATR 系统包括前端和后端两部分<sup>[8]</sup>。前端包括聚焦 (Focus of attention) 模块和索引 (Index) 模块。聚焦模块从一幅场景较大的 SAR 图象中提取出 ROI。索引模块进一步减小非目标的虚警并对每个 ROI 产生一系列关于目标类型、姿态、连接、结构等信息的初始假设。索引模块本质上是一个粗分类器<sup>[9]</sup>。目前, MSTAR SAR ATR 索引模块利用图象的峰值 (Peak)、凹陷 (Pit)、谷 (Ravine) 以及鞍点 (Saddle point) 等特征实现 ROI 切片的粗分类。MSTAR 系统的后端是一个迭代的分类器<sup>[8,10]</sup>,它包括特征预测、特征提取、特征匹配以及搜索模块,也即常说的 PEMS (Predict、Extract、Match、Search) 循环。特征预测模块给出索引模块产生的每个假设的特征矢量及其不确定性<sup>[11]</sup>;特征提取模块从 ROI 提取测量的特征矢量及其不确定性;特征匹配模块计算每个预测的特征矢量集和提取的特征矢量集之间的似然比<sup>[12]</sup>;搜索模块对假设进行改进,以得到似然比匹配的局部极大值,并根据该局部极大值决定是否需要继续迭代,以及如何修正目标假设。一旦搜索决定继续对假设进行改进并产生新的假设,则要求预测产生该新假设的预测的特征矢量及其不确定性,然后匹配模块再计算该新的预测的特征矢量和提取的特征矢量之间的似然比。在 MSTAR PEMS 循环中,搜索是迭代的控制器,对每次分类,提取模块只运行一次,但是按搜索模块的要求,每迭代一次预测和匹配模块就重新运行一次。目前, MSTAR 迭代分类器主要利用峰值位置、标注的区域 (Labeled region) 以及灰度 (Grayscale) 这 3 种图象特征进行匹配<sup>[13]</sup>。峰值位置

是预测和提取的灰度图象上局部极大值的位置;标注的区域是对预测和提取的灰度图象分割得到的目标、背景、阴影 3 个局部;灰度是实际的灰度图象本身。

除上面两个典型系统之外,华盛顿大学电子技术系 O'Sullivan 等利用条件高斯模型和 Rician 模型对 SAR 图象进行建模,然后采用最大似然估计或最大后验概率估计联合估计目标的类别和姿态,也得到了较好的正确分类率<sup>[14,15]</sup>。斯坦福大学 Binford 等利用目标峰值特征,基于一般的车辆模型,对 3 种战术目标进行了分类实验<sup>[16]</sup>。佛罗里达大学 Principe 等提出的利用姿态信息的 SAR ATR 分类系统<sup>[17,18]</sup>,首先对输入图象进行姿态估计,然后再分类。该系统本质上是一种利用特征基于模板的分类系统。另外,还有其他基于支撑矢量机(SVM, Support Vector Machine)<sup>[19]</sup>及隐马尔可夫模型<sup>[20,21]</sup>(HMM, Hidden Markov Model)的 SAR 目标分类识别系统。

目前国内也有很多单位在积极开展 SAR ATR 的研究工作,并取得了一些重要的研究成果<sup>[22~24]</sup>。

## 5 SAR ATR 发展趋势

从目前国内外,特别是国外 SAR ATR 方面的研究工作,可以发现:和直接利用 SAR 图象进行分类的方法相比,利用特征的分类方法正越来越引起人们的关注和重视和基于模板的分类方法相比,基于模型的分类方法正越来越引起人们的关注和重视;利用特征基于模型的 SAR 目标分类方法代表着 SAR ATR 的发展趋势。

在利用特征基于模型 SAR ATR 研究中,基于三维模型的 SAR 目标识别正越来越引起人们的重视。基于三维模型 SAR 目标识别的基本思路是:直接由测量 SAR 图象重构目标的三维模型,然后,再通过该三维模型和数据库中存储的已知目标的三维 CAD 模型的匹配达到目标分类、识别的目的。目前,基于三维模型 SAR 目标识别的研究正在积极地进行当中:Ling Hao 等研究了三维散射中心特征提取方法<sup>[25]</sup>;Vince Velten 等在研究目标和其 SAR 图象几何关系的基础上<sup>[26~29]</sup>,正试图利用此关系实现基于三维模型的目标识别,并得到了一些初步的研究成果;林肯实验室的 Richards 等详细研究了从多个 SAR 图象构造目标三维模型的方法<sup>[4]</sup>。

## 参 考 文 献

- Novak L M, Owirka G J, Weaver A L. Automatic target recognition using enhanced resolution SAR data [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1999, 35(1):157~175.
- Ross Timothy D, Bradley Jeffrey J, Hudson Lanson J, Michael P. O'connor. SAR ATR-So What's the problem? An MSTAR Perspective[A]. In: Algorithm for Synthetic Aperture Radar Imagery W [C], Orlando, FL, 1999, SPIE 3721:662~672.
- Novak Leslie M, Owirak Gregory J, Nestishen Christine M. Radar target identification using spatial matched filters [J]. Pattern Recognition, 1994, 27(4) 607~617.
- Richards John A. Target model generation from multiple synthetic aperture radar images [D]. MA; Department of Electrical Engineering and Computer Science at the Massachusetts Institute of Technology, 2001.
- Chiang Hung-Chih, Moses Randolph I., Potter Lee C. Model-Based classification of radar Images [J]. IEEE Transactions on information theory, 2000, 46(5):1842~1854.
- Novak Leslie M, Owirak Gregory J, Irving William W. Performance of 10-and 20-target MSE classifiers [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2000, 36(4):1279~1289.
- Keydel Eric R. MSTAR extended operating conditions; A tutorial [A]. In: Algorithm for Synthetic Aperture Radar image [C], Orlando, FL, 1996, SPIE 2757:228~242.
- Diemunsch Joseph, Wissinger John. Moving and stationary target acquisition and recognition (MSTAR) model-based automatic target recognition; Search technology for a robust ATR [A]. In: Algorithm for Synthetic Aperture Radar Imagery V [C], Proceedings, Orlando, FL, 1998, SPIE, 3370:481~492.
- Ryan Thomas W, Egaas Brian. SAR target indexing with hierarchical distance transform [A]. In: Algorithm for Synthetic Aperture Radar image [C], Orlando, FL, 1996, SPIE 2757: 243~252.
- Wissinger J, Washburn R, Morgan D *et al.* Search algorithm for model-based SAR ATR [A]. In: Algorithm for Synthetic Aperture Radar image [C], Orlando, FL, 1996, SPIE 2757: 279~293.
- Keydel Eric R. Signature prediction for model-based automatic target recognition [A]. In: Algorithm for Synthetic Aperture Radar image [C], Orlando, FL, 1996, SPIE 2757:306~317.
- Ettinger Gil J, Klanderma Gregory A, Wells William M *et al.* A probabilistic optimization approach to SAR feature matching [A]. In: Algorithm for Synthetic Aperture Radar image [C], Orlando, FL, 1996, SPIE 2757:318~329.
- Irving William, Ettinger Gil. Classification of target in synthetic aperture radar imagery via quantized grayscale matching [A]. In: Algorithm for Synthetic Aperture Radar Imagery W [C],

- Orlando, FL, 1999, SPIE 3721:320~331.
- 14 O'Sullivan J A, DeVore M D, Kedia V *et al.* Automatic target recognition performance for SAR imagery using a conditionally Gaussian model [EB/OL]. <http://www.essrl.wustl.edu/~mdd2>, 2003-06-10.
- 15 DeVore Michael D, Lanterman Aaron D, O'Sullivan Joseph A. ATR performance of a rician model for SAR images [EB/OL]. <http://www.essrl.wustl.edu/~mdd2>, 2003-06-10.
- 16 Binford Thomas O, By-Her wang, Tod S. Levitt, Context and Quasi-invariant in ATR with SAR Imagery [EB/OL]. <http://robotics.stanford.edu/groups/reality/binford.html>, 2003-06-10.
- 17 Xu D X, Fisher J W, Principe J C. Pose estimation in SAR using an information theoretic criterion [A]. In: Algorithm for Synthetic Aperture Radar Imagery V [C], Orlando, FL, 1998, SPIE 3370:228~229.
- 18 Principe J, Zhao Q, Xu D. A novel ATR classifier exploiting pose information [A]. In: Proceedings of Image Understanding Workshop [C], Monterey, CA., USA, 1998:833~836.
- 19 Bryant M L, Garber F D. SVM classifier applied to the MSTAR public data set [A]. In: Algorithm for Synthetic Aperture Radar Imagery VI [C], Orlando, FL, 1999, SPIE 3721:355~361.
- 20 Nilubol, Chanin, Two-dimensional HMM classifier with density perturbation and data weighting techniques for pattern recognition problems [D]. GA: Georgia institute of technology, 2000.
- 21 Kottke Dane P, Fiore Paul D, Brown Kathy I. *et al.* A design for HMM-based SAR ATR [A]. In: Algorithm for Synthetic Aperture Radar Imagery V [C], Orlando, FL, 1998, SPIE 3379:541~551.
- 22 付琨. 高分辨率单视单极化 SAR 图像地物分类方法研究 [D]. 长沙: 国防科技大学研究生院, 2002.
- 23 祁文杰. 星载合成孔径雷达的军事应用研究 [A]. In: 星载合成孔径雷达军事应用研究论文集 [C], 北京, 1996:1~6.
- 24 王运峰, 王建国, 赵志钦等. 数学形态学在 SAR 目标识别中的应用 [J]. 系统工程与电子技术, 2001, 23(3):23~27.
- 25 Bhalla R, Ling H. Three-dimension scattering center extraction using the shooting and bouncing ray technique [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1996, 37(11):1445~1453.
- 26 Verbout S M, Irving W W, Hanes A S. Improving a templated based classifier in a SAR automatic target recognition system by using 3-D target information [J]. Lincoln Laboratory Journal, 1993, 6(1):53~76.

- 27 Arnold D Gregory, Claypool Rifka, Velten Vince *et al.* Synthesizing invariant 3-D Rigid Scattering Centers [A]. In: Algorithm for Synthetic Aperture Radar Imagery VII [C], Orlando, FL, 2001, SPIE 4382:395~403.
- 28 Velten Vincent J. Synthetic aperture radar (SAR) geometric invariants; Experimental results [A]. In: Algorithm for Synthetic Aperture Radar Imagery VI [C], Orlando, FL, 1999, SPIE 3721:520~531.
- 29 Velten Vincent J. Geometric invariants for synthetic aperture radar (SAR) sensors [A]. In: Algorithm for Synthetic Aperture Radar Imagery V [C], Orlando, FL, 1998, SPIE 3370:176~187.



**匡纲要** 1966年生, 1995年获国防科技大学博士学位, 现为国防科技大学电子科学与工程学院副教授, 主要从事军用遥感方面的研究工作, 发表论文30多篇。



**计科峰** 1974年生, 1999年获国防科技大学硕士学位, 现为国防科技大学电子科学与工程学院博士研究生, 主要从事 SAR 图象解译以及 SAR ATR 方面的研究工作。



**栗毅** 1962年生, 2000年获国防科技大学博士学位, 现为国防科技大学电子科学与工程学院教授, 博士生导师, 主要从事空间信息获取与处理方面的研究工作, 发表论文40多篇。



**郝文贤** 1964年生, 1992年获国防科技大学博士学位, 现为国防科技大学电子科学与工程学院教授, 博士生导师, 国家863-13组组长, 主要从事信息获取与处理方面的研究工作, 发表论文60多篇。