

地面车辆目标识别研究综述

李开明¹, 张 群^{1,2}, 罗 迎¹, 梁必帅¹, 杨小优¹

(1. 空军工程大学信息与导航学院, 陕西西安 710077; 2. 复旦大学电磁波信息科学教育部重点实验室, 上海 200433)

摘 要: 地面车辆目标是重要的民用和军事目标, 车辆目标的识别研究对于智能交通管制和国防安全具有重要应用价值. 本文对地面车辆目标识别的国内外研究现状和应用背景进行综述, 对现有的地面车辆目标探测手段、特征提取及分类方法进行梳理总结, 最后对地面车辆目标识别技术的发展趋势进行展望, 预期为地面车辆目标的分类和识别研究提供参考和借鉴.

关键词: 地面车辆; 目标识别; 综述

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2014)03-0538-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.03.018

Review of Ground Vehicles Recognition

LI Kai-ming¹, ZHANG Qun^{1,2}, LUO Ying¹, LIANG Bi-shuai¹, YANG Xiao-you¹

(1. School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China; 2. Key Laboratory for Information Science of Electromagnetic Waves (Ministry of Education), Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: Ground vehicles are the important civil and military targets. The research on vehicle recognition has great application values to the intelligent transportation management, national defense and security. The research status at home and abroad and the application background of vehicle recognition were summarized firstly, then the existent detection means, signature extraction and recognition techniques were listed and summarized. The development prospect of vehicle recognition was also analyzed, which may offer some constructive reference to the research on ground vehicle classification and recognition.

Key words: ground vehicles; target recognition; review

1 引言

地面车辆目标识别是智能交通系统的重要任务, 车辆目标识别研究具有重要的学术价值, 同时会产生巨大的社会、经济效益^[1]. 在军事领域, 如何对各种轮式车辆、履带式车辆等进行分类识别, 对现代战争中的地面侦察、战场态势感知、威胁评估、指挥决策及精确打击具有重要价值^[2,3].

目前, 国内针对目标识别的研究综述很多, 特别是雷达目标识别的综述较多, 但大多针对空间目标、空中目标和弹道导弹目标展开, 针对地面车辆目标识别研究的综述文献还比较少. 本文对地面车辆目标识别的国内外研究现状和应用背景进行综述, 对现有的识别技术和分类算法进行归纳总结, 并对其发展趋势进行展望.

2 地面车辆目标识别技术

目前, 对民用车辆的探测识别主要采用光学手

段^[1], 对军事车辆的探测识别主要有声波、地震波和电磁波三种方式, 其中电磁波包括激光、红外和微波等^[3]. 对于光学、激光和红外探测, 主要在图像域进行特征提取; 对于声波和地震波, 主要在信号的时/频域进行特征提取. 对于微波雷达, 可对包含目标的合成/逆合成孔径雷达(SAR/ISAR)图像进行特征提取, 也可以在时/频域进行处理. 下面基于不同的识别特征并结合不同的探测手段, 对现有的车辆识别技术进行综述.

(1) 基于图像特征的识别技术

图像特征是车辆目标的重要识别特征^[4-8]. 通常可得到包含车辆目标的场景图像有红外图像^[9-12]、SAR/ISAR图像^[13-17]、极化图像^[18-20]、激光雷达图像^[21-24]、光学图像^[25-30](包括航空遥感图像和视频图像)等. 其处理分为目标检测、辨识和分类三个阶段^[4-8]. 检测阶段筛选出可能存在目标的感兴趣区域(Region of Interest, ROI); 辨识阶段根据目标特征对所有的ROI进行筛选, 过滤出非目标区域; 分类阶段判定目标所属类别. 目

前,提取的图像特征有^[4~30]:(1)视觉特征.如图像的亮度^[14]、灰度^[25]、对比度^[14]、边缘^[12,21]、长宽比、纹理、区域、全局^[17]、目标轮廓^[1,24,29]、姿态^[28]、形状^[21,27]、空间关系^[17]等;(2)统计特征.如直方图、各种不变矩特征^[26](包括旋转不变矩^[30]、偏心矩^[27]、Zernike 矩^[29]等);(3)变换系数特征.如图像的缩放特征^[30]、镜像特征^[30]、傅立叶描绘子、频谱幅度^[11]、自回归线性模型系数等;(4)代数特征^[4,9,22,23].如图像矩阵的奇异值等.

(a) 基于红外图像特征的识别技术

红外是早期车辆目标识别的常用手段.车辆作为热源,其辐射的一定波长的红外线在大气中传输时存在一定的大气窗口,能够允许红外线通过,这使得车辆的红外识别成为可能.在军事车辆,特别是装甲车辆的红外特征研究方面,美国和俄罗斯从外场试验和理论建模着手,取得了许多代表国际先进水平的成果.以色列、日本和印度也开展了相关研究^[9~11].国内,南京理工大学在军事车辆红外特征的研究方面也取得了一定进展^[9].但基于红外特征的识别技术易受太阳光照、大气辐射、视角、距离及环境背景的综合影响,图像对比度差、噪声大,目标边缘模糊,识别稳健性不高^[9,12].

(b) 基于 SAR 图像特征的识别技术

上世纪 90 年代,美国国防部高级研究计划局(Defense Advanced Research Project Agency, DARPA)提出运动、静止目标获取与识别的 MSTAR(Moving and Stationary Target Acquisition and Recognition)计划,主要内容是利用 1 英尺分辨率的 SAR 图像进行地面军用车辆的识别^[4~8,13,14].文献^[15,16]针对军事车辆的 SAR 图像,提取目标的电磁散射特征进行分类识别.文献^[17]结合 MSTAR 实测数据,提取 SAR 图像中目标的多种特征(全局特征、空间特征和谱特征),完成五种军事车辆的识别.国内基于 SAR/ISAR 图像的车辆识别起步较晚,后期进行了跟进研究^[4,7,8,13].随着高分辨雷达的发展,

SAR/ISAR 图像已成为车辆识别的重要依据^[13].

(c) 基于极化图像特征的识别技术

1985 年,美国研制出世界上第一部机载极化合成孔径雷达(Polarimetric SAR, PolSAR):JPL/CV-900. PolSAR 综合了高分辨成像技术和全极化测量的优点,非常适合对目标的精细刻画.目前,PolSAR 和 PolISAR 已用于 SAR/GMTI(合成孔径雷达/地面动目标检测)和目标识别领域.国内,国防科技大学等院校开展了相关研究^[18,19].随着极化测量技术的发展,从极化图像中提取的车辆目标极化特征,为车辆识别提供了新的途径^[18~20].

(d) 基于激光雷达图像特征的识别技术

随着激光技术的发展,激光成像雷达在现代复杂战场环境逐渐得到广泛应用.激光成像雷达可以同时获得目标的强度像和距离像,通过对目标四维成像大大提高了目标的信息量.强度像和距离像与目标表面的物理结构密切相关,反映了目标的本质特征,可用来对目标进行分类识别.目前,基于激光雷达图像特征的车辆识别已成为研究热点之一^[21~24].

(e) 基于光学/视频图像特征的识别技术

在道路网规划设计和交通管理中,交通流量和车辆类型是重要的参数,自动获取交通信息受到高度重视.目前,基于视频图像的运动车辆识别是民用交通系统智能识别的主要手段,技术上相对成熟,国内外已有大量研究成果^[1,2,25~30].

(2) 基于震动信号特征的识别技术

车辆行驶中对地面的冲击及声波对地面的激励引起地球介质的变形,进而形成地震波.通常将采集的震动信号转化为数字信号进行处理,利用其时/频域的特征差异分辨出车辆目标的类型和速度等信息,为目标识别提供依据^[3,31~35].图 1 为三种燃油类型发动机车辆震动信号频谱图^[32].

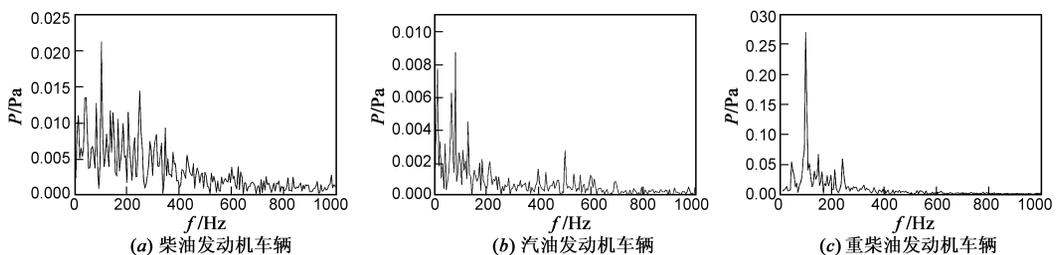


图1 三种发动机类型车辆震动信号频谱图

美国很早就开展了基于震动信号的车辆识别研究,并将其应用于无人值守地面传感器(Unattended Ground Sensor, UGS)系统^[1].越战以来,UGS 系统一直为美军提供全天候昼夜预警,最新研制的“远方哨兵”,在震动/声传感器的基础上附加多种传感器探测手段,可

通过组网扩大监视区域.该系统体积小、重量轻、成本低,能全天候探测识别人员、轮式车辆和履带式车辆,而且能识别出运动目标的数量和运动方向.此外,前苏联、英国、法国、德国、瑞典等国家也深入开展了该方面的研究^[1,3].

我国在基于震动信号的车辆识别研究方面起步较晚^[31,32]. 上世纪 80 年代, 南京理工大学在国内较早展开了相关研究, 并将其应用于地面侦察传感器系统. 聂伟荣教授通过提取震动信号的时域过零数、频谱、功率谱、时频分布等特征, 应用多传感器-多特征融合的方法进行处理, 使用统计建模和神经网络相结合的方法进行分类, 并开发出相应的系统. 该系统可区分人员和车辆, 进一步可区分出轮式车辆还是履带式车辆^[31].

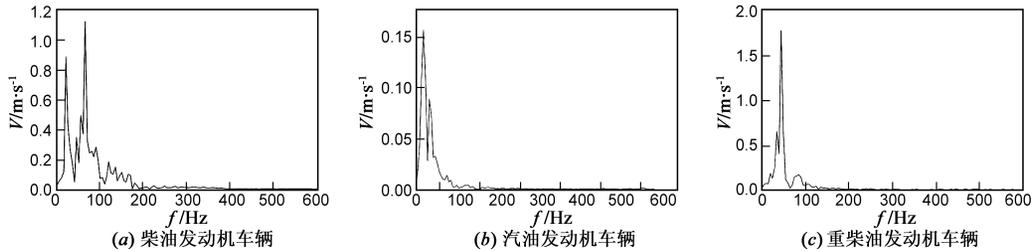


图2 三种发动机类型车辆声信号频谱图

基于声信号的车辆识别是智能传感器网络的重要研究内容. 2000 年以来, 美军经过多次外场实验, 建立了包括 9 种军用车辆、超过 300 个车次的地面目标声信号数据库; 2001 年, 美国国防部研究机构 DARPA 联合多所大学开展了 SensIT Program, 出动各类轮式、履带式车辆, 部署近 20 个传感器节点进行信号采集, 获得近 3G 的原始数据, 为战场环境下的车辆识别提供了充分的实验基础^[3].

在特征提取方面, 声信号是非平稳信号, 传统的分析方法存在一定缺陷, 时频分析方法, 如短时傅立叶变换 (STFT)、Gabor 变换、小波变换等成为声信号处理的主流方法^[36,39,40]. 同时, 由于动物听觉对声音的识别效果无与伦比, 有些学者将仿生学中的模拟听觉系统应用于声目标识别^[36]. 其中, 线性预测倒谱系数、Mel 频率倒谱系数、感知线性预测系数、谐波集、小波能量等是声信号识别常用的描述特征^[36].

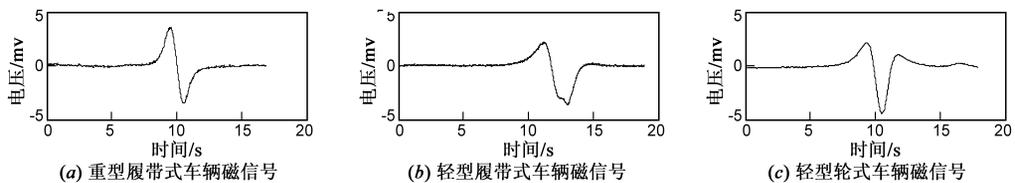


图3 三种类型车辆磁信号时域表示

(3) 基于声信号特征的识别技术

声探测技术利用目标发出或反射的声波进行定位、跟踪和识别. 车辆行进中产生的声音受到车辆机械结构、发动机类型、行驶速度、地形、地质结构等综合因素的影响, 导致不同类型车辆的声信号在时/频域的能量分布存在差异^[36~40]. 对采集的车辆目标声信号同样需转化为数字信号进行处理, 图 2 为三种燃油类型发动机车辆的声信号频谱图^[38].

基于震动/声信号的探测识别具有全天候、抗电磁能力强、隐蔽性好等优点, 能克服光学、无线电、雷达等现代侦察技术的盲区. 经过多年研究已取得很大进展, 但复杂战场环境下车辆目标的信号采集与处理仍十分困难, 有待进一步研究^[3,32,36].

(4) 基于磁信号特征的识别技术

车辆行进中不可避免对大地磁场产生扰动, 而磁场的改变会被磁力仪传感器接收, 形成关于车辆目标的独特磁信号. 相比于传统的传感器, 基于磁信号的车辆识别成本较低, 也不需要传统的“视线”假设, 且识别性能不受多普勒效应、噪声干扰、大气环境、地形地貌等影响, 可在全天候、不同环境下应用, 可越过障碍物进行探测识别^[41,42]. 图 3 为三种类型车辆运动时的磁信号^[42], 可见其时域能量分布存在差异. 基于磁信号特征的车辆识别是新的、较有前途的研究方向^[41,42].

(5) 基于雷达回波信号特征的识别技术

(a) 基于高分辨距离像特征的识别技术

基于高分辨距离像 (High Resolution Range Profile, HRRP) 特征的识别技术是当前雷达目标识别的主流^[43,44]. 其提取的特征包括: 直接距离像特征、频域特征、双谱特征、高阶谱特征、中心矩特征、散射点特征、子空间投影特征、高维空间投影特征及线性预测编码特征等^[43~46]. 针对不同车辆 HRRP 的特征差异, 国防科

技大学开发了具有模块化设计优点的雷达目标识别软件平台^[46]. 基于软件平台和外场实验实现了坦克、卡车、轮式装甲车和假目标的分类, 获得了较高的测试识别率.

相对于二维像和三维像, HRRP 运算量小、实时性好, 工程实现方便高效. 但 HRRP 敏感于目标姿态, 不宜直接提取有效的特征信息, 且识别易受强杂波和各种干扰的影响. 因此, 识别前需对距离像数据进行预处

理,解决距离像的不稳定现象^[43].从现有文献看,基于 HRRP 特征的识别技术大多针对飞机目标展开,针对地面车辆识别研究的还很少,由于技术的敏感性,针对军事车辆识别研究的报道则更少.

(b) 基于多普勒特征的识别技术

对地面车辆而言,由于表面材料的不同导致其对电磁波的散射存在差异;又由于运动、振动等的复合调制,导致回波在多普勒域存在一定差异,可作为识别的依据^[46~55].

早期的车辆目标雷达识别主要利用多普勒信息,多普勒谱的差异是履带式车辆与轮式车辆相区分的本质特征^[46].英国的 MSTAR 单兵作战雷达直接将回波多普勒谱作为识别特征,对战场上的三类目标(轮式车辆、履带式车辆及行人)进行识别,总识别率达 80% 以上^[50].国内,哈尔滨工业大学的冀振元教授较早研究了轮式车辆与履带式车辆的分类问题^[47].文献^[47~49, 51~54]在分析不同目标多普勒谱的基础上,分别采用时频分析(如小波分解^[50]、STFT 等^[51])、现代谱估计^[53]等方法,提取出回波的频域特征(如倒谱系数^[52,54]、线性预测码序列^[54]、双谱特征^[55])、运动目标的周期特征^[49]等作为识别特征,实现了对人员、轮式车辆(如卡车、轿车、公交车)、装甲车等目标的分类.

(c) 基于微动/微多普勒特征的识别技术

2000 年,美国海军实验室的 V. C. Chen 将微动及微多普勒引入雷达领域.目标或目标部件的旋转、振动等微小运动称为微动,微动会产生微多普勒效应^[56].微多普勒是微动目标独一无二的特征,可以精细反映目标的结构和运动特征,且相对于 HRRP,微多普勒对姿态变化不敏感.因此,微动及微多普勒特征被引入到车辆识别中^[56~65].

美国“辐射亡命徒”先期计划的外场实验表明,微多普勒特征提取对于车辆识别具有重要的实用价值^[58].美国联合监视目标攻击雷达系统利用 SAR/GMTI 双模式工作,对坦克、装甲车、移动导弹发射架、人员和动物等进行探测识别^[59].华沙大学研究人员指出,通过微多普勒分析可以识别车辆,通过分析表面振动甚至能诊断引擎状态并识别不同品牌的汽车^[63].

国内针对车辆微多普勒特征提取与识别展开研究的相对较少^[56,64,65].西安电子科技大学的李彦兵博士分析了微多普勒在车辆分类中的作用,并采用谐波分解、小波分解、经验模式分解等方法,提取不同车辆多普勒谱的能量分布和谐波数等作为识别特征,基于实测数据使用相关向量机(Relevance Vector Machine, RVM)和支持向量机(Support Vector Machine, SVM)完成了轮式和履带式车辆的分类^[65].文献^[64]基于不同种类和型号坦克炮塔激励的微多普勒特征差异,提出对坦克参

数估计和精确身份识别的方法.

坦克履带、承重轮、炮塔的转动,轮式车辆车轮的转动,地面防空单元天线的旋转及车身的振动等都是典型的微动,不同微动带来的微多普勒特征存在差异.因此,基于微动/微多普勒特征的识别技术是非常有潜力的研究方向,为军事车辆识别提供了新思路.

(6) 基于多传感器-多特征融合的识别技术

在复杂环境中,单一传感器获取的信息有限且易受干扰,目标搜索和识别能力、抗干扰能力及工作可靠性都将降低.基于多传感器-多特征融合的识别技术将是车辆识别的重要研究方向^[6,27,31,33,37,39,40,66~72].文献^[39]和^[72]采用多特征融合完成车辆目标的分类.文献^[69]针对三维车辆的定位和识别问题,在像素层进行融合处理.文献^[70]针对光学和红外图像,采用多级融合处理实现了小轿车、越野车、轻型卡车和重型卡车的分类.文献^[71]研究了基于雷达和视觉传感器融合的实时车辆检测识别系统,实验表明系统具有良好的鲁棒性和实时性.

(7) 基于知识的识别技术

20 世纪 70 年代末,人工智能和专家系统普遍应用于识别研究,掀起智能识别的研究热潮,形成基于知识的识别技术^[4,73].在目标识别研究中,目标与环境间的关系型知识是主要考虑的知识内容.文献^[74]提出基于知识的雷达目标识别模型,以车辆和坦克的识别为例,说明利用知识可提高识别的可靠性.文献^[75]考虑了军用车辆往往以成组形式驻停于靠近树篱和树林边缘的地方,仿真说明利用上下文信息能提高目标检测识别率.由于样本空间的无限维度特性和应用环境的复杂性,引入知识成为重要的解决途径.

3 地面车辆目标的分类方法

车辆目标识别必须依靠有效、稳健的分类方法.从现有文献看,目前针对车辆目标的分类方法主要有:

(1) 基于模板匹配的分类方法

基于模板匹配的方法是目标识别最常用的分类方法^[19,24,27,30,42,44,46,61,72].文献^[44,46]基于坦克 HRRP 特征,在较小的掠地角下采用模板匹配的方法完成目标识别.文献^[76]针对视频图像中的人和车辆,提取出图像中的关键点,基于模板匹配完成车辆和行人的识别.模板匹配方法计算量小,易于移植.匹配时通常采用最近邻分类器、余弦分类器等,在测试样本与样本库之间进行相关,实现最佳匹配^[66].但该方法对模板库依赖性较高,通常模板越多越精细,匹配效果越好,但计算效能又会下降.同时,该方法难以完成对未知目标的稳健识别.

(2) 基于模型的分类方法

基于模型的分类方法抽取一定的目标特征,并利用这些特征和辅助知识(如目标距离)来标记目标的模型参数,从而选择一些初始假设实现目标特征的预测.它强调利用明确的目标、背景、环境和传感器模型.与统计识别算法相比,它在增加新的目标与环境下,不必重新训练算法,新的模型可直接加入知识库部分^[4,5,73].

高斯混合模型(Gaussian Mixture Model, GMM)和隐马尔可夫模型(Hidden Markov model, HMM)是车辆识别常用的两类模型,能够对车辆目标特征的统计分布进行准确描述. GMM 和 HMM 最初在语音识别中经常使用^[77]. GMM 能够快速训练算法,有效地处理大样本数据,因此适于动态模式分类.文献^[34,52,53,78]分别针对震动信号和雷达信号,在 GMM 模型下实现了车辆的分类识别.考虑到微多普勒特征与语音信号频谱的相似性,文献^[60]研究了语音识别算法中的动态时域变形(Dynamic Time Warping, DTW)模型、HMM 模型及神经网络模型在微动目标识别中的应用,对 10 种场景下微多普勒谱的识别表明:HMM 模型识别效果最好.文献^[15,60,79]基于 HMM 模型实现了人和多种军事车辆的分类识别.

(3) 基于人工神经网络的分类方法

近年来,随着人工神经网络的迅速发展,神经网络分类方法在车辆识别领域得到广泛应用^[1,14,31,40].神经网络具有信息处理的巨量并行、分布存储、自组织和自适应等连接机制特性,且具有很强的容错能力.但同样存在如下缺点:(a)处理小样本问题时易出现过学习现象,算法推广性差;(b)学习性能差,处理非线性问题算法复杂,实验结果不稳定;(c)结构复杂,很难对其进行诊断、检验和证实,实时性欠佳是神经网络工程化应用的又一瓶颈;(d)模型建立困难,模型选择或者训练方法的选择对识别率影响很大.

因此,神经网络与其他分类方法的综合运用是神经网络的重要发展方向.文献^[1]综合神经网络和模糊逻辑的相关算法,构建出车辆识别的多层前向神经网络.文献^[14]在 SAR 图像域提取出车辆目标的 9 种特征,结合神经网络和统计模型的综合算法,完成对坦克、装甲车和卡车的分类识别.文献^[27]基于地面运动目标(车辆、行人、摩托车/自行车)的多样性和不确定性,结合模糊理论构建出可融合多种特征的模糊神经网络.文献^[31]综合运用神经网络和 SVM,达到较好的识别效果.文献^[32,37]将神经网络与遗传算法相结合,完成了三种燃油类型发动机车辆的识别.文献^[40]综合使用神经网络和数据融合算法,识别出两种不同的机车和坦克.

(4) 基于核机器学习的分类方法

核机器学习方法是基于统计学习理论和核函数建立的.以 SVM 为核心的一类统计机器学习方法是当今机器学习领域的热点,在人脸识别、手写识别、指纹识别及三维物体识别方面得到广泛运用^[11]. SVM 实现简单,训练时间短,识别稳定,且在小样本条件下能保持较高识别率,不会出现过学习现象.在车辆识别领域, SVM 已成为重要的分类方法^[11,22,23,42,47,48,64,80].但 SVM 也存在缺陷,当有新的目标数据加入时必须重新训练.近年来, SVM 与其他识别理论的优化结合,如与模糊理论结合形成模糊支持向量机(Fuzzy SVM, FSVM),可进一步改善识别性能.另外,基于模糊集的分类方法也是车辆目标识别的重要方法^[35,38,39].

4 结论与展望

车辆目标识别是集传感器、目标、环境和信号处理技术为一体的系统工程.目前,对地面车辆的识别研究还停留在分类层面,难以完成精确的型号识别.在现有目标识别综述文献的基础上^[3,14,43,56,66,73],可以看出,目前较有潜力的车辆识别技术主要有:

(1) 多传感器融合识别技术

复杂环境下对车辆进行有效识别和稳定跟踪非常困难,仅依靠一种或少数几种识别手段很难准确实现,必须尽可能结合声、震动、红外、激光、雷达、磁等多种传感器所收集到的多种目标属性信息进行融合识别,并将识别结果反馈到各传感器进行优化,达到更高的识别准确率.

(2) 多特征融合目标识别技术

对目标进行稳健识别的关键在于找出具有不变性的特征,或者通过多种不变特征的组合进行分类识别.因此,多特征融合识别是重要的研究方向.对于车辆目标,可以结合同一传感器下得到的特征进行融合识别,如车辆的微多普勒特征,可以结合 HRRP、二维像、三维像等特征进行融合识别.也可以结合不同传感器得到的特征进行融合识别,如综合提取车辆的红外特征、极化特征、磁信号特征、背景知识等进行融合识别.

(3) 多种分类方法的综合识别技术

在复杂环境下,特别是战场环境下的军事车辆识别,用单一分类方法进行识别是困难的,问题的解决有赖于多种分类方法的综合运用,以提高正确识别率.如遗传算法、统计模型算法、神经网络、SVM 等与其他识别理论(如分形与分维几何、模糊集理论、粗糙集理论、D-S 证据理论)的优化结合,都将是有意義的车辆识别的研究方向.

(4) 现代信息处理理论和分类算法相结合

随着新的信息处理理论不断出现,目标识别技

术将得到迅速完善与发展.现代信号处理理论与分类算法的结合使用,如小波变换、Gabor 变换等高分辨时频分析工具、现代谱估计、超分辨算法、PCA(主成分分析)、ICA(独立成分分析)等特征提取算法与现有分类识别算法的综合使用,以提高识别准确性,同时要兼顾实时性,使识别算法在工程应用中发挥作用.

总之,地面车辆目标的识别研究是一个比较前沿的、具有挑战性的课题,具有重要的理论意义和良好的应用前景,对于交通管制和国防安全具有重要的研究价值.

参考文献

- [1] 刘怡光. 车辆识别若干基础算法与技术研究[D]. 成都: 四川大学, 2004.
LIU Yiguang. The Research on Some Basic Algorithms and Technologies About Vehicle Recognition [D]. Chengdu: Sichuan University, 2004. (in Chinese)
- [2] Nipon Theera-Umporn, Mohamed A Khabou. Detection and classification of MSTAR objects via morphological dhar-weight neural networks [A]. Proceedings of SPIE on Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery [C]. Orlando, USA; SPIE, 1998. 530 – 540.
- [3] 张河. 探测与识别技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2003.
- [4] 郦苏丹. SAR 图像特征提取与目标识别方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2001.
LI Sudan. Research on features extraction and targets recognition in SAR images [D]. Changsha: The National University of Defense Technology, 2001. (in Chinese)
- [5] Hummel R, Arlington. Model-based ATR using synthetic aperture radar [A]. Proceedings of International Conference on Radar [C]. Alexandria, USA; IEEE, 2000. 856 – 861.
- [6] Huan Ruohong, Pan Yun. Target recognition for multi-aspect SAR images with fusion strategies [J]. Progress in Electromagnetics Research, 2013, 134(3): 267 – 288.
- [7] 龙泓琳, 皮亦鸣, 等. 基于非负矩阵分解的 SAR 图像目标识别 [J]. 电子学报, 2010, 38(6): 1425 – 1429.
LONG Honglin, PI Yiming, et al. Non-negative matrix factorization for target recognition [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(6): 1425 – 1429. (in Chinese)
- [8] 张静, 王国宏, 等. 基于二维子分类鉴别分析的 SAR 图像识别方法研究 [J]. 电子学报, 2010, 38(4): 798 – 803.
ZHANG Jing, WANG Guohong, et al. An efficient two-dimensional subclass discriminant analysis approach for SAR image recognition [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(4): 798 – 803. (in Chinese)
- [9] 宣益民, 韩玉阁. 地面目标与背景的红外特征 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [10] Kagesawa M, Ueno S, et al. Recognizing vehicle in infra-red images using IMAP parallel vision board [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2001, 2(1): 10 – 17.
- [11] Casasent David, Wang Yuchiang. A hierarchical classifier using new support vector machines for automatic target recognition [J]. Neural Networks, 2005, 18(5): 541 – 548.
- [12] Sun Sungu, Park Junsung, et al. Identification of military ground vehicles by feature information fusion in FLIR images [A]. Proceedings of the 3rd International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis (Vol2) [C]. Rome, Italy; IEEE, 2003. 871 – 876.
- [13] 张天序. 成像自动目标识别 [M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2003.
- [14] Steven K Rogers, John M Colombi, et al. Neural networks for automatic target recognition [J]. Neural Networks, 1995, 8(8): 1153 – 1184.
- [15] Bhanu Bir, Lin Yingqiang. Stochastic models for recognition of occluded targets [J]. Pattern Recognition, 2003, 36(12): 2855 – 2873.
- [16] Ji K F, Xing X W, et al. Feature extraction of ground vehicles from high resolution SAR imagery based on electromagnetic scattering characteristic [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 190(7): 778 – 785.
- [17] Ravichandran B, Gandhe Avinash, et al. Robust automatic target recognition using learning classifier systems [J]. Information Fusion, 2007, 8(3): 252 – 265.
- [18] 代大海. 极化雷达成像及目标特征提取研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2008.
DAI Dahai. Study on polarimetric radar imaging and target feature extraction [D]. Changsha: The National University of Defense Technology, 2008. (in Chinese)
- [19] 吴晓芳, 代大海, 等. SAR 车辆目标散射特性的变化规律 [J]. 雷达科学与技术, 2008, 6(4): 268 – 272.
WU Xiaofang, DAI Dahai, et al. The varying regularity of scattering characteristics of SAR vehicle targets [J]. Radar Science & Technology, 2008, 6(4): 268 – 272. (in Chinese)
- [20] Martorella M, Giusti E, et al. Automatic target recognition of terrestrial vehicles based on polarimetric ISAR image and model matching radar [A]. Proceedings of International Conference on Radar [C]. Adelaide, Aus; IEEE, 2008. 38 – 43.
- [21] 甘志梅, 王春香, 等. 基于激光雷达的车辆跟踪与识别方法 [J]. 上海交通大学学报, 2009, 43(6): 923 – 926.
GAN Zhimei, WANG Chunxiang, et al. A method for vehicle tracking and recognition based on scanning laser radar [J]. Journal of Shanghai University, 2009, 43(6): 923 – 926. (in Chinese)
- [22] 陈晓清, 马君国, 等. 利用奇异值特征的激光成像雷达目标识别 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(9): 1801 – 1805.

- CHEN Xiaoqing, MA Junguo, et al. Target recognition using singular value feature for laser imaging radar[J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2011, 40(9): 1801 – 1805. (in Chinese)
- [23] 陈晓清, 马君国, 等. 基于二维小波变换的激光成像雷达目标识别算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(4): 1 – 4.
- CHEN Xiaoqing, MA Junguo, et al. Target recognition algorithm based on two-dimensional wavelet transform for laser imaging radar[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(4): 1 – 4. (in Chinese)
- [24] Asuman E Koksal, Jeffrey H Shapiro, et al. Model-based object recognition using laser radar range imagery[A]. *Proceedings of SPIE on Signal Processing, Sensor Fusion and Target Recognition*[C]. Orlando, USA: SPIE, 1999. 256 – 266.
- [25] Alessandro Mecocci. Moving object recognition and classification in external environments[J]. *Signal Processing*, 1989, 18(2): 183 – 194.
- [26] Wang Shuai zong, Li Xiao ping, et al. Research on the vehicle recognition based on invariant moment[A]. *Proceedings of the 4th International Conference on New Trends in Information Science and Service Science* [C]. Gyeongju, South Korea: IEEE, 2010. 329 – 332.
- [27] 郑林, 韩崇昭, 等. 基于多特征融合的运动目标识别[J]. *系统仿真学报*, 2004, 16(5): 1081 – 1084.
- ZHENG Lin, HAN Chongzhao, et al. Moving object recognition based on multi-feature fusion[J]. *Journal of System simulation*, 2004, 16(5): 1081 – 1084. (in Chinese)
- [28] Hermiston K J, Booth D M, et al. Pose estimation and recognition of ground vehicles in aerial reconnaissance imagery[A]. *Proceedings of the 14th International Conference on Pattern Recognition*[C]. Brisbane, Australia: IEEE Press. 1998. 578 – 582.
- [29] 钮峰, 俞能海, 等. 航空图片中车辆的检测方法研究[J]. *电路与系统学报*, 2002, 7(4): 80 – 83.
- NIU Feng, YU Nenghai, et al. Vehicle detection in aerial image[J]. *Journal of Circuits and Systems*, 2002, 7(4): 80 – 83. (in Chinese)
- [30] 刘宗昂, 杨莘元, 等. 机载弹对地面目标的识别方法[J]. *系统仿真学报*, 2009, 21(4): 1130 – 1139.
- LIU Zongang, YANG Xinyuan, et al. Recognition method of airborne missile aiming land target[J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(4): 1130 – 1139. (in Chinese)
- [31] 聂伟荣. 多传感器探测与控制网络技术——地面运动目标震动信号探测与识别[D]. 南京: 南京理工大学, 2001.
- NIE Weirong. *Detecting and Controlling Network Technology With Multi-sensor System—Micro-seismic Signals Detecting and Identification of Target Moving on the Ground*[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2001. (in Chinese)
- [32] 邢怀飞. 智能光纤传感器网络地面目标识别若干问题研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2008.
- XING Huaifei. *Ground Target Recognition in Fiber Sensor Network*[D]. Beijing: Institute of Semiconductors Chinese Academy of Sciences, 2008. (in Chinese)
- [33] Lan Jinhui, Nahavandi Saeid, et al. Research on seismic signals for vehicle targets and recognition by data fusion[A]. *Proceedings of the 4th International Conference on Control and Automation*[C]. Montreal, Canada: IEEE, 2003. 733 – 736.
- [34] 陈功, 张雄伟, 等. 基于 ICA-GMM 的混叠振动目标识别[J]. *噪声与振动控制*, 2006, 5(10): 5 – 8.
- CHEN Gong, ZHANG Xiongwei, et al. Approach based on ICA and GMM to identify mixing vibration tTargets[J]. *Journal of Vibration and Noise Control*, 2006, 5(10): 5 – 8. (in Chinese)
- [35] 吴旭宾, 杨波. 地面三维目标的探测识别系统研究[J]. *电光与控制*, 2007, 14(4): 168 – 169.
- WU Xubin, YANG Bo. On detection and recognition system for 3D ground objects[J]. *Electronics Optics & Control*, 2007, 14(4): 168 – 169. (in Chinese)
- [36] 黄琦. 智能传感器网络中的地面目标识别算法研究[D]. 合肥: 中国科技大学, 2006.
- [37] Lan Jinhui, Zhang Zhaohui, et al. Acoustic detection for vehicle targets and recognition by data fusion[A]. *Proceedings on Instrumentation and Measurement Technology Conference* [C]. Ottawa, Canada: IEEE, 2005. 551 – 553.
- [38] Wu H, Mendel J M. Classification of battlefield ground vehicles using acoustic features and fuzzy logic rule-based classifiers[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2007, 15(1): 56 – 72.
- [39] 董伟, 王红亮, 等. 基于多重特征提取的战场车辆声目标识别[J]. *传感器与微系统*, 2010, 29(7): 30 – 32.
- DONG Wei, WANG Hongliang, et al. Battlefield vehicle acoustic identification based on multiple feature[J]. *Transducer & Microsystem Technology*, 2010, 29(7): 30 – 32. (in Chinese)
- [40] 常艳, 冯燕, 等. 基于数据融合的战场声目标识别系统算法研究[J]. *计算机仿真*, 2008, 25(10): 1 – 4.
- CHANG Yan, FENG Yan, et al. An algorithm for acoustic objective identification in battlefield with multi-source information fusion[J]. *Computer Simulation*, 2008, 25(10): 1 – 4. (in Chinese)
- [41] James W Casalegno. All-weather vehicle classification using magnetometer arrays[A]. *Proceedings of SPIE on Unattended Ground Sensor Technologies and Applications IV*[C]. Orlando, USA: SPIE, 2002. 205 – 212.
- [42] Jinhui Lan, Yong Xiang, et al. Vehicle detection and classification by measuring and processing magnetic signal[J]. *Measurement*, 2011, 1(44): 174 – 180

- [43] 刘宏伟, 杜兰, 等. 雷达高分辨距离像识别研究进展[J]. 电子与信息学报, 2005, 27(8): 1328 - 1334.
LIU Hongwei, DU Lan, et al. Progress in radar automatic target recognition based on high range resolution profile[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2005, 27(8): 1328 - 1334. (in Chinese)
- [44] Schmitz J, Greenewald J. Model-based range extent for feature aided tracking[A]. Proceedings of International Conference on Radar[C]. Alexandria, USA: IEEE, 2000. 166 - 171.
- [45] Malas J A, Pasala K M, et al. Automatic target recognition of slow moving ground targets using stap[A]. Proceedings on the International Aerospace Conference[C]. Montana, USA: IEEE Press, 2003. 2021 - 2036.
- [46] 廖东平. 支持向量机方法及其在机载毫米波雷达目标识别中的应用研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2006.
LIAO Dongping. Study on Support Vector Machine Method and Its Application in Target Recognition for Airborne MMW Radar[D]. Changsha: The National University of Defense Technology, 2006. (in Chinese)
- [47] 冀振元, 孟宪德. 轮式车与履带车目标的识别[J]. 现代雷达, 1999, 21(6): 17 - 21.
JI Zhenyuan, MENG Xiande. The identification of wheeler and tracklayer[J]. Modern Radar, 1999, 21(6): 17 - 21. (in Chinese)
- [48] 冀振元, 李晨雷, 等. 支持向量机在车辆目标识别中的应用[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(2): 284 - 286.
JI Zhenyuan, LI Chenlei. Application of SVM in recognition of vehicles[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(2): 284 - 286. (in Chinese)
- [49] 冀振元, 宋迎东, 等. 基于小波变换的人车目标特征提取算法[J]. 微计算机信息, 2009, 25(2): 191 - 193.
JI Zhenyuan, SONG Yingdong, et al. The algorithm for automatic identification of a person and an automobile based on wavelet transformation[J]. Microcomputer Information, 2009, 25(2): 191 - 193. (in Chinese)
- [50] Stove A G, Sykes S R. A doppler-based automatic target classifier for a battlefield surveillance radar[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Radar[C]. Edinburgh, UK: IEEE, 2002. 419 - 423.
- [51] 张彦梅, 于敬波. 坦克目标时频特征分析[J]. 北京理工大学学报, 2009, 29(1): 50 - 53.
ZHANG Yanmei, YU Jingbo. Analysis of the signal characteristics of tank in time and frequency domain[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2009, 29(1): 50 - 53. (in Chinese)
- [52] Eryildirim A, Onaran I. Pulse Doppler radar target recognition using a two-stage SVM procedures[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(2): 1450 - 1457.
- [53] Khlopov, Grigory I. Processing of coherent radar signals in time-frequency domain for recognition of surface targets in millimeter wave band[A]. Proceedings of International Conference on Microwave[C]. Hamburg, German: IEEE, 2008. 131 - 134.
- [54] Igal Bilik, Joseph Tabrikian, et al. GMM-based target classification for ground surveillance Doppler radar[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2006, 42(1): 267 - 277.
- [55] Pavel A M, Jaakko T A, et al. Object recognition in ground surveillance doppler radar by using bispectrum-based time-frequency distributions[A]. Proceedings of the 11th International Radar Symposium[C]. Vilnius, Lithuania: IEEE, 2010. 1 - 4.
- [56] 庄钊文, 刘永祥, 等. 目标微动特性研究进展[J]. 电子学报, 2007, 35(3): 520 - 525.
ZHUANG Zhaowen, LIU Yongxiang, et al. The achievements of target characteristic with micro-motion[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(3): 520 - 525. (in Chinese)
- [57] Ghaleb A, Vignaud J, et al. Micro-Doppler analysis of wheels and pedestrians in ISAR imaging[J]. IET Signal Processing, 2008, 2(3): 301 - 311.
- [58] Wellman R J, Silvius J L. Doppler Signature Measurements of a Mi-24 Hind-D Helicopter at 92 GHz[R]. Adelphi, USA: Air Research Laboratory, 1998.
- [59] Barbaross S. Doppler-rate filtering for detecting moving targets with synthetic aperture radars[A]. Proceedings of the SPIE on Millimeter Wave and Synthetic Aperture Radar[C]. Orlando, USA: SPIE, 1989. 140 - 147.
- [60] Evan Hughes, Mike Lewis. The application of speech recognition techniques to radar target Doppler recognition: A case study[A]. Proceedings of IET Seminar on High Resolution Imaging and Target Classification[C]. London, UK: IEEE, 2006. 147 - 152.
- [61] Smith G E, Woodbridge K, et al. Radar Micro-Doppler signature classification using dynamic time warping[J]. IEEE Transactions Aerospace and Electronic Systems, 2010, 46(3): 1078 - 1096.
- [62] Smith G E, Woodbridge K, et al. Naïve bayesian radar Micro-Doppler recognition[A]. Proceedings of International Conference on Radar[C]. Adelaide, Aus: IEEE, 2008. 111 - 116.
- [63] Kulpa K. Advances in Sensing with Security Applications: Continuous Wave Radars-Monostatic, Multistatic and Network[M]. NATO Security through Science Series, Netherlands: Springer, 2006: 215 - 242.
- [64] 黄健, 李欣, 等. 基于微多普勒特征的坦克目标参数估计与身份识别[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(5): 1050 - 1055.
HUANG Jian, LI Xin, et al. Micro-Doppler features based parameter estimation and identification of tank[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(5): 1050 -

1055. (in Chinese)
- [65] 李彦兵. 基于微多普勒效应的运动车辆目标分类研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
LI Yanbing. Study on Classification of Moving Vehicles Based on Micro-Doppler Effect[D]. Xi'an: The Electronic Technology University, 2012. (in Chinese)
- [66] 余静, 游志胜. 自动目标识别与跟踪技术研究综述[J]. 计算机应用研究, 2005, 22(1): 12 - 15.
YU Jing, YOU Zhisheng. Survey of automatic target recognition and tracking method[J]. Research on Computer Application, 2005, 22(1): 12 - 15. (in Chinese)
- [67] 林岳松, 陈琳, 等. 基于数据驱动的信息融合及其在车辆声辨识中的应用[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(9): 2158 - 2163.
LIN Yuesong, CHEN Lin, et al. A data-driven fusion and its application to acoustic vehicle classification[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(9): 2158 - 2163. (in Chinese)
- [68] Shirmila Mohottala, Shintaro Ono, et al. Fusion of a camera and a laser range sensor for vehicle recognition[A]. Proceedings of IEEE Conference on Computer Society[C]. Miami, USA: IEEE, 2009. 16 - 23.
- [69] 陈莹, 韩崇昭. 基于雷达和图像融合的 3D 车辆定位与识别[J]. 电子学报, 2005, 33(6): 1105 - 1108.
CHEN Yin, HAN Chongzhao. New 3D vehicle location and recognition method fusing radar and image[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(6): 1105 - 1108. (in Chinese)
- [70] Lakshminarayanan. B, Hairong Qi. Civilian target detection using hierarchical fusion[A]. Proceedings of the 34th International Conference on Applied Imagery and Pattern Recognition[C]. Washington, USA: IEEE, 2005. 173 - 178.
- [71] 尚光辉, 孔金生. 基于进化优化与增强特征的车辆识别研究[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(26): 220 - 222.
SHANG Guanghui, KONG Jinsheng. Study on vehicle recognition based on symmetry optimized and boosted features[J]. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(26): 220 - 222. (in Chinese)
- [72] WANG Jianqiang, LIU Zhifeng, et al. Target vehicle selection based on multi-features fusion method[A]. Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium[C]. San Diego, USA: IEEE, 2010. 13 - 19.
- [73] 王晓丹, 王积勤. 雷达目标识别技术综述[J]. 现代雷达, 2003, 25(5): 20 - 26.
WANG Xiaodan, WANG Jiqin. A survey of radar target recognition technique[J]. Modern Radar, 2003, 25(5): 20 - 26. (in Chinese)
- [74] 陶勇, 胡卫东. 基于知识的雷达目标识别研究[J]. 现代雷达, 2009, 31(1): 62 - 68.
TAO Yong, HU Weidong. A study on knowledge-based radar target recognition[J]. Modern Radar, 2009, 31(1): 62 - 68. (in Chinese)
- [75] Blacknell D. Contextual information in SAR target detection[J]. IEE Proceedings: Radar, Sonar and Navigation, 2001, 148(1): 41 - 47.
- [76] Jun Chao Zhu, Jie Zhou, Bao Feng Zhang. Research on moving human and vehicle's recognition algorithm[A]. Proceedings of ICCDA[C]. Qinhuangdao, China: IEEE, 2010. 540 - 544.
- [77] 梁岩, 鲍长春, 等. 基于高斯混合模型的压缩域语音增强方法[J]. 电子学报, 2012, 40(10): 2031 - 2038.
LIANC Yan, BAO Changchun, et al. Compressed domain speech enhancement based on gaussian mixture model[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(10): 2031 - 2038. (in Chinese)
- [78] Bilik I, Tabrikian J, et al. Target classification using gaussian mixture model for ground surveillance doppler radar[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2006, 42(1): 267 - 278.
- [79] M Jahangir, K Ponting, et al. Application of HMM to the classification of ground moving targets[A]. Proceedings of I-GARSS[C]. Hawaii, USA: IEEE, 2000. 156 - 163.
- [80] 方菲菲, 余稳. 基于 PCA-LDA-SVM 的多普勒雷达车型识别算法[J]. 数据采集与处理, 2012, 1(27): 111 - 116.
Fang Feifei, Yu Wen. Vehicle recognition algorithm with doppler radar based on PCA-LDA-SVM[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2012, 1(27): 111 - 116. (in Chinese)

作者简介



李开明 男, 1982 年 12 月生于山西应县. 分别于 2003 年和 2009 年于空军工程大学电讯工程学院获工学学士学位和硕士学位. 现于空军工程大学信息与导航学院攻读博士学位. 目前主要从事雷达成像及目标识别领域的研究工作

E-mail: likaiming1982@163.com



张群 男, 1964 年 11 月生于陕西合阳. 现为空军工程大学信息与导航学院教授博士生导师, IEEE Senior Member, 中国电子学会无线电定位技术分会委员. 发表学术论文 150 余篇, 其中 SCI/EI 检索 100 余篇. 研究方向: 雷达信号处理、雷达成像及电子对抗.

E-mail: zhangqunnus@gmail.com