

多源弱小目标探测系统在海上应急救援中的应用和实现

王国庆, 娄越, 陈栋, 李鑫, 王然, 赵琪

中国船舶工业系统工程研究院, 北京 100094

摘要: 海洋资源的开发利用促进了人类社会的快速发展, 海上运输的兴起增强了人与人之间物质的交换、共享。但复杂的海洋环境常常会给频繁的海上作业带来难以预知的危险及严重的海难事故, 海上应急救援工作的开展旨在降低因自然的或人为的因素而导致的突发性事故的危害。多源弱小目标探测系统采用多维传感器对弱小目标不同特征的实时、快速、无接触获取手段, 有效提高海上应急救援的效率。该系统包括微波雷达、红外系统、激光雷达、水下成像系统。微波雷达可实现全天时、全天候大范围搜索探测海上弱小目标; 红外系统可高效识别非海洋原自身热源, 提升应急救援的针对性; 激光雷达系统可主动有效呈现弱小目标三维细节特征, 便于制定应急救援具体方案; 水下成像扩展救援人员对水下目标的观测识别距离, 并提供水下影响, 降低水下搜救打捞危险。研究多源弱小目标探测系统在海上应急救援中的应用, 可以为海上应急救援工作提供救援目标的多频谱、多光谱、水上水下多位一体的信息, 进行多源数据融合, 有效提升救援效率, 降低海难事故损失。

关键词: 海上应急救援; 弱小目标探测; 微波雷达; 红外系统; 激光雷达; 水下成像; 多源数据融合。

引言

随着信息化全球化的发展, 人与人之间信息的交互和交流变得简单、便利、快捷和廉价, 作为信息价值体现的物质的发掘、交换、运输和传递也逐渐受到重视。海洋蕴含大量人类发展必需的资源, 同时也作为一种不可或缺的运输路径, 更适用于物质全球化的发展。海洋自身的特性使得海洋经济迅速发展, 海上作业迅速增长。

人类参与海洋活动, 带来大量经济效益的同时, 也不可避免会遭遇海上钻探平台事故、船舶碰撞、搁浅、沉船, 航班失踪坠海、油井着火、爆炸, 台风海啸等事故, 近十年, 海上事故频繁发生。2010年07月16日在中国黄海海域大连新港发生溢油事故造成严重的经济损失和环境污染; 2011年7月10日, 俄罗斯“布加尔”号游轮在伏尔加河段沉没, 122人遇难; 2014年03月08日凌晨, 马航MH370失去联系, 乘载227名旅客; 2014年04月16日, 韩国一艘载着476人的客船在珍岛附近的海面发生侧翻, 造成300人遇难; 2017年09月06日“GUE 环球水下探索”组织的河北唐山潘家口水下长城探索项目中, 两名专业潜水员失踪。据不完全统计, 全球每年不低于10万人死于海洋事故, 造成的巨额财产损失不低于万亿, 除此之外还造成了海洋环境的严重污染^[1], 不利于生态环境的可持续发展。海上应急救援活动就是对可能会发生的海洋事故发生前进行预防, 对发生中的海洋事故进行应急处理避免其扩大化, 对发生后的海洋事故进行有效的补救和修复, 最大限度的保证海上作业人员生命和财产安全, 并恢复周边正常的海洋环境, 降低海洋灾难的恶劣影响^[2]。

地球上海洋总面积约为3.6亿平方公里, 约占地球表面积的71%。海洋的辽阔加上复杂的海清海况, 给海上应急救援带来了很大的挑战, 尤其是落水人员、小船只事故, 溢油事故等弱小目标的搜救、探测、回收工作需要动用大量的人力、物力和时间^[3-4]。传统的搜救手段比较落后, 使得搜救的成功较低, 而多源弱小目标探测系统基于多维传感器对应急救援目标不同特征的探测、收集, 经过数据融合, 即使在恶劣的天气和海况下也可以快速准确地提供搜救方位和方法, 可以实现全天时、全天候、全方位、无人值守进行海上弱小目标探测, 极大程度上节约了人力、物力和时间^[5]。研究多源弱小目标探测系统在海上应急救援中的使用具有重要意义。

1 多源弱小目标探测系统的基本组成和工作原理

多源弱小目标探测系统采用微波、红外、激光等多种手段对目标进行主动或被动式的探

测, 获取其微波反射特性、红外辐射特性及三维体貌等特征, 实现在面、点、质多个维度的信息获取, 进行实时有效整合和采集, 依据关联规则分析和聚类分析进行数据融合, 为海上应急救援工作预测预警、方案制定和效果评估提供依据。

多源弱小目标探测系统主要包括微波雷达设备、红外探测设备、激光雷达设备和水下成像设备, 其主要特点见图 1。

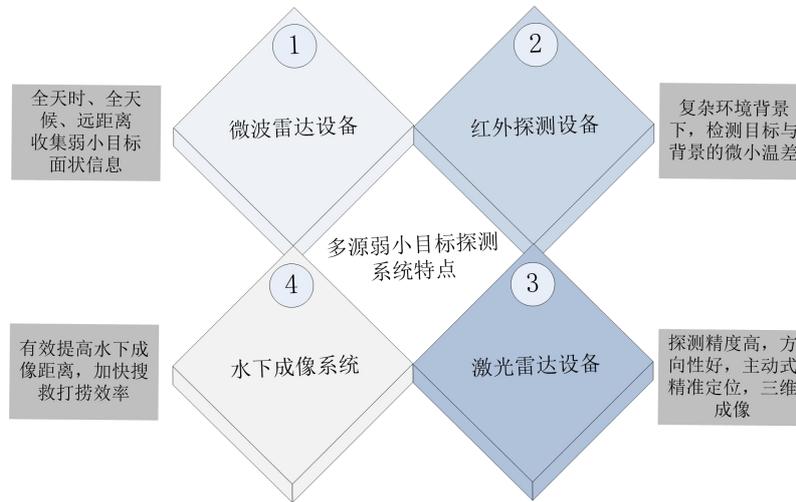


图 1 多源弱小目标探测系统特点

1.1 微波雷达设备弱小目标探测原理

微波雷达设备采用 X 波段, 该波段雷达具有最佳的抗干扰性, 能够很好的克服雾、云、雨等恶劣天气因素对电磁波回波的影响, 可以实现全天候、全天候工作, 同时具有较大的探测距离。微波雷达设备可用于对弱小目标进行探测^[6], 除了微波雷达自身的优势外, 还需要在传统的微波雷达的图像采集、处理上进行改进和优化。

常规的微波雷达显示是二值显示, 局限于其较低的采集频率, 适用于常规的航海导航活动。海上弱小目标对微波雷达的回波效应较弱, 常规的航海导航雷达无法显示识别。采用高采样率采集卡对雷达回波进行高频采样, 并对生产的雷达图像进行图像叠加处理, 平均处理、滤波处理、二值化处理及傅里叶变换等操作后, 可有效识别弱小目标。通过此种方法, 已成功识别几十 μm 厚的溢油油膜带^[7]和对雷达散射截面积 (RCS) 为 0.1 m^2 , 物标 30cm 的极小目标有效探测^[8]。

1.2 红外探测设备弱小目标探测原理

红外探测设备是被动式探测, 将入射的红外辐射信号转换为电信号输出, 形成红外热成像。只要物体的温度大于绝对零度, 就源源不断进行红外辐射。红外探测设备主要适用于目标与背景之间的温差和发射率差形成的红外辐射特性进行探测, 识别伪装目标的能力较强, 且在夜间和恶劣气候下也可以工作^[9]。

海上应急救援的目标一般为落水人员或者人造物体, 自身或具备能量源、或比热容小于水, 受外界环境温度的影响大于水, 目标自身的温度与海水存在一定的差异, 目前红外探测器的测温灵敏度, 已达到 40mK 即两者的温度差别在 0.04° 以上, 便可以监测出。将红外探测设备假设在具备俯仰和方位二维转台上, 设置好一定的虚警率, 便可以实现海上弱小目标的全天时无值守自动监测和预警的功能^[10]。

1.3 激光雷达设备弱小目标探测原理

激光雷达设备是以发射激光束, 采用光电探测技术手段的主动遥感设备, 包括发射系统、

接收系统、信息处理和显示等部分。与普通的微波雷达相比，激光雷达使用的是激光束，可以获得极高的角度、距离和速度分辨率，意味着可以利用多普勒成像技术来获得目标的清晰图像。激光直线传播、方向性好、光束非常窄并且在自然界中的干扰源很少，所以激光雷达设备具有较高的抗干扰性。区别于红外探测设备的被动式探测，激光雷达是主动成像，只要被照射的目标均会产生反射，方向针对性强。

激光雷达设备以激光束进行无接触、远程快速探测。海水对激光具有吸收、透射、反射和散射作用，当激光束投射至海面时，基本没有回波；只有投射至目标物上时，才会产生可被探测到的激光回波。将激光束进行整形扩束准直以后，角分辨率便可以到 0.1mrad 即可以在 2Km 处分辨相距 0.2m 的两个目标；激光束的波长一般在 μm 左右，距离分辨率可以达到 cm 级精度，可以有效探测识别海上弱小目标，应用于海上应急救援活动。

1.4 水下成像设备弱小目标探测原理

传统的水下成像设备是声呐，可以对水中目标进行警戒、搜索、定性和跟踪。但声呐设备的体积和重量较大，且分辨率低。水下成像设备对弱小目标的探测是基于海水存在“蓝绿窗口”即海水对蓝光和绿光的透过率较高。采用蓝绿激光作为光源，增强电荷耦合成像器（ICCD）或者阵列光电倍增管（PMT）作为接收装置，可以大大增强水下目标成像距离，且具有较高的分辨率。

蓝绿激光在水下具有较强的透过率，ICCD 和 PMT 对微光具有较高的反应效率（单光子探测能级），加上距离选通技术，可以将水下成像距离提升至 5 倍海水的衰减长度（水质的倒数）。当海水的水质为 0.1 时，水下成像距离可以达到 25m，加上图像增强技术和模糊识别理论可以将数值提升至 100m 左右，适用于水下潜水打捞工作^[11]。

2 多源弱小目标探测系统的搭载平台和组合使用

多源弱小目标探测系统包含的微波雷达设备、红外探测设备、激光雷达设备、水下成像设备。各设备具有自身对弱小目标的探测特点，平台适装性较好，可以架设在不同的平台上进行工作；设备之间的相干性较小，可以独立或者组合使用。

2.1 搭载平台

多源弱小目标探测系统的搭载平台根据高度和所处位置的不同可以分为岸基、船基、空基和天基，见图 2。

1) 岸基平台为在海岸附近一定高度架设探测系统，对沿海状况进行监测，成本较低可以对可观测的海域进行 24 小时不间断监测，但存在观测点固定，观测范围有限等缺点，近几年沿海开始发展组网式监测，扩大了监测范围，但仍局限于沿海地带。

2) 船基平台是将探测设备架设在船只上，以船只为中心，对船周边一定范围内进行探测。该平台相较于岸基平台具有一定的灵活性，综合探测范围较大，但船基平台的架设高度影响系统的探测距离。单只船基平台的架设探测设备具有一定的随机性，该设备主要应用于海上事故发生时的应急处理，海上事故发生后的弥补恢复。但多船基平台可以实现组网式探测，信息共享，提升对海上应急救援活动的信息支援。

3) 空基平台是将探测设备架设在巡航飞机上，在距离海面较近的高度进行巡查。此种手段和船基平台具有一定的相识性，机动性强，但搭载设备的能力较弱，且成本高，无法进行全天时全天候严策，受飞机续航能力的影响，只能对近海情况进行探测，同时受天气影响较大。

4) 天基平台是指将探测设备架设在太空的人造卫星上，此监测平台的优点是监测范

围广，但成本较高，对传感器对环境的适应性要求较高，且容易受到天气影响，且人造卫星绕地球旋转，对同一地点的监测存在一定的周期性，无法实时连续监测。

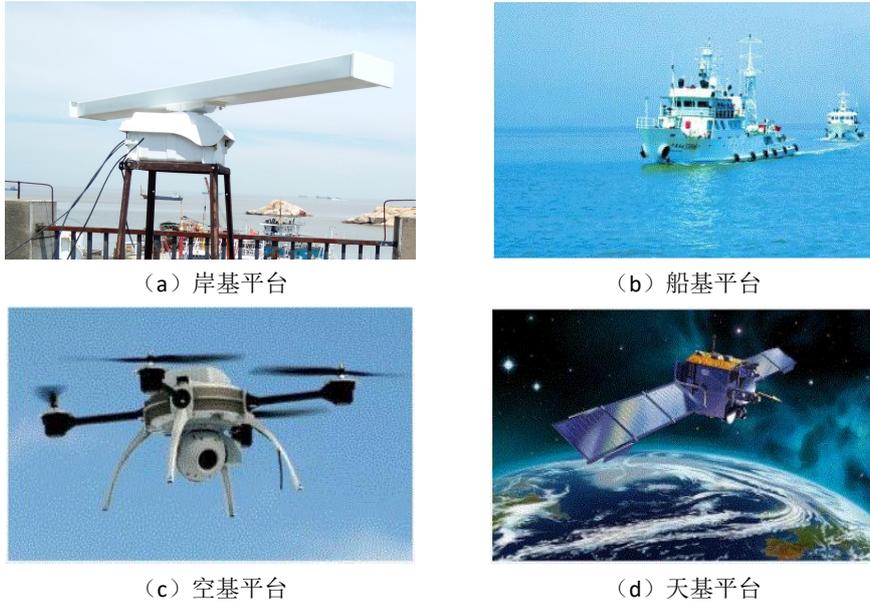


图 2 多源弱小目标探测系统搭载平台

2.2 组合使用

多源弱小目标探测系统包含不同的探测设备，基于不同的探测原理获取目标不同的特征信息，可以根据搭载平台的不同、任务使命的不同、应急救援对象定义的不同进行有效的选择，组合使用见表 1。

1) 岸基平台可以采用微波雷达设备、红外探测设备和激光雷达设备对近海目标进行由面到点，由点到质的探测；船基平台可以架设微波雷达设备、红外探测设备、激光雷达设备外还可以在水下部分搭载水下成像设备，监测水下情况；鉴于空基平台有限的载重负荷可以架设质量体积较小的红外探测系统和激光雷达设备；天基平台目前常用的探测设备为微波雷达系统。

2) 大范围开阔海域海上事故搜救，宜使用微波雷达设备和红外探测设备；复杂海域海上事故搜救，微波雷达设备虚警率较高，宜采用微波雷达设备结合红外探测设备和激光雷达设备进行探测；对目标进行精准定位定性判断，宜采用红外探测设备和激光雷达设备；对水下目标进行成像，宜采用水下目标成像设备。

3) 应急救援对象为搁浅、触礁船只时，应采用微波雷达设备、红外探测设备和激光雷达设备；应急救援对象为落水人员时，应采用红外探测设备和激光雷达设备；应急救援对象为油井或油轮泄露时，应采用微波雷达雷达和红外探测设备；应急救援对象为沉船打捞或潜水员失踪应采用水下成像设备。

表 1 多源弱小目标探测设备组合使用

搭载平台	设备	任务使命	设备	救援对象	设备
岸基平台	Radar, IR, Lidar	空旷海域	Radar, IR	搁浅触礁船只	Radar, IR, Lidar
船基平台	Radar, IR, Lidar UnderwaterImaging	复杂海域	Radar, IR, Lidar	落水人员	IR, Lidar
空基平台	IR, Lidar	精准定位	IR, Lidar	油井油轮 泄漏	Radar, IR
天基平台	Radar	水下搜索	Underwater Imaging	沉船打捞 潜水失踪	Underwater Imaging

备注：微波雷达：Radar；红外探测：IR；激光雷达：Lidar；水下成像：Underwater Imaging

2.3 数据融合

多源弱小目标探测系统获取了探测目标的多维度特征，将信息数据进行有效的整合，为海上应急救援活动提供决策依据。微波雷达可以获取海上弱小目标距离监测点的方位和距离信息；红外探测系统可以获取目标的红外辐射特性，根据历史数据和样本库对比可以预判目标现存状态；激光雷达设备可以对目标进行精确的成像，便于进一步的方案决策；水下成像设备的探测可以对目标救援的提供进一步具体工作步骤。

多源信息丰富了目标的特征，但同时有可能引入相互矛盾的特征，所以数据融合是十分有必要的。所谓的数据融合就是对不同传感器获取的目标的不同特征进行融合，相同特征进行置信度对比、选择。只有经过数据融合后，多源弱小目标探测系统的数据才是可靠的。

3 多源弱小目标探测系统工作流程分析

3.1 海上事故发生基本假定

假定某天夜晚在中国东海某远离海岸线的海域有油轮经过，不小心触礁造成原油泄漏并有若干船员落水，该油轮离开事故发生地时才发现该事故，并向中国国家海上应急救援指挥中心发出求救信号，应急救援中心派遣架设有微波雷达设备、红外探测设备、激光雷达设备和水下成像系统的搜救船前往事故发生海域展开人员搜救和溢油回收行动。

3.2 多源弱小目标探测系统工作流程分析

搜救船根据事故船上报的事故发生地经纬度信息，行驶至相关海域。搜救船到达事故发生地后，开启微波雷达设备和红外探测设备进行周边海域的人员搜救和溢油检测。微波雷达设备对周边 2-6 海里的海域进行溢油检测，相对于人员搜救，微波雷达发现大范围的溢油油膜的概率更大，红外探测设备主要应用于人员搜救，刚落水的人员自身体温相较于海水较高，红外辐射特性明显；等待雷达发现溢油油膜带后，将方位信息传递给红外探测设备的伺服结构，针对性的多落水人员进行搜索；等待搜救船只进入溢油区域 2 公里以内时，开启激光雷达设备，对人员搜救进行精确成像，便于进一步的人员救援工作的开展；如果事故发生时间较长，有人员失踪，可以开启水下成像系统对水下进行探测，搜索落水人员；落水人员解救成功后，溢油回收船根据微波雷达探测的溢油区域进行布设围油栏进行溢油油膜回收工作，加快对海洋环境的恢复工作，具体的工作流程见图 3：

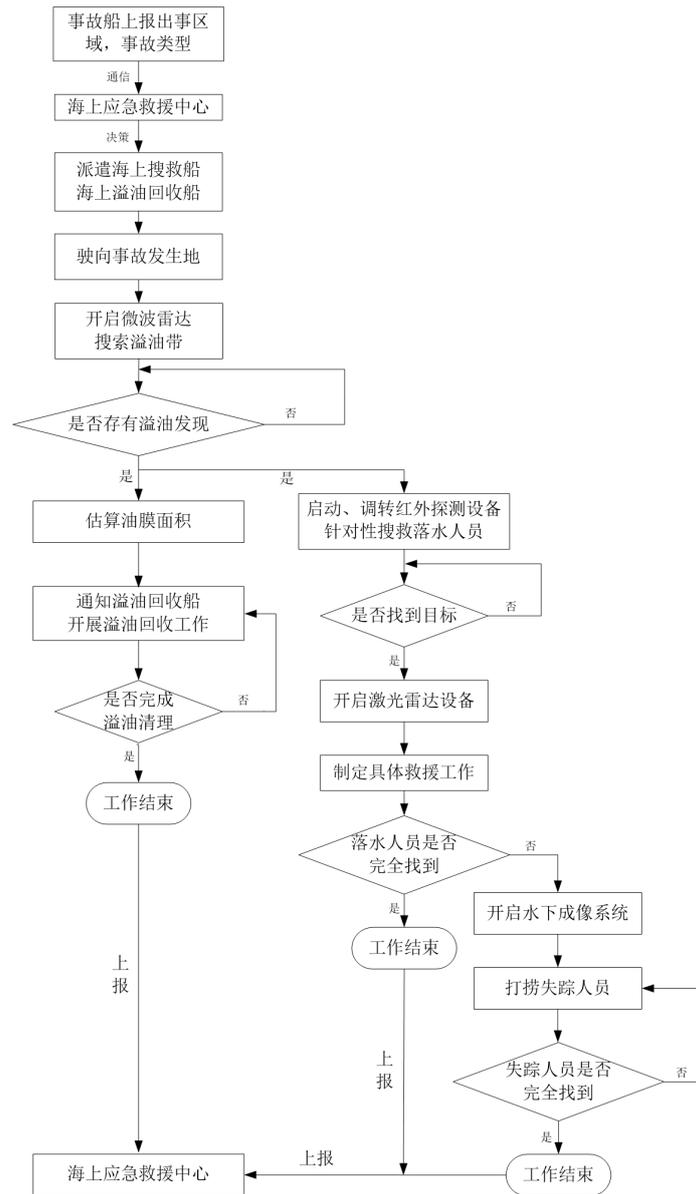


图 3 多源弱小目标探测系统工作流程

搭载平台的不同，任务使命的不同，工作流程会有所差异，对组成多源弱小目标探测系统的设备进行合理组合使用，可以实现良好的海上应急救援效果。

4 多源弱小目标探测系统实现的难点和关键技术

多源弱小目标探测系统是采用现代较为先进的技术和设备进行高效的海上应急救援工作，其实现的难点为微波雷达弱小目标探测，红外探测系统点目标检测和识别，激光雷达三维成像和水下选通成像等，其中的关键技术如下：

1) 微波雷达弱小目标探测技术，常规的微波雷达往往通过天线的极化方式或后端数据的处理，将海杂波信息进行抑制，但弱小目标的雷达回波信息往往夹杂在随机的海杂波信号中，通过改变雷达天线的极化方式，可以加强雷达弱小目标的回波特性；另外可以通过对雷达回波进行高频采样，获取雷达的原始图像，进行多帧累加和平均处理，减弱随机信号的影响，凸显弱小目标的成像^[12]；高频采样意味着大量的数据进行处理，对处理单元的挑战较大，选用先进的 FPGA+DSP 处理芯片完成雷达图像的重构、插值、处理和显示。

2) 红外探测系统点目标检测和识别技术, 目标在红外探测设备的成像分为面目标、线目标和点目标。远处的目标一般为点目标, 且在海天线附近, 对点目标的检测受外界环境及红外探测设备自身坏点簇的影响较大^[13-14], 可以通过航迹关联将获取的点目标痕迹与微波雷达上的目标航迹进行对比, 可以降低虚警率提供检测的准确性; 识别技术是基于目标具有一定的轮廓后, 脱离点目标范围, 与原有的样本库进行体积、形状和红外辐射特性等特征比对后, 得到的结论信息。

3) 激光雷达三维成像技术, 传统的单点扫描激光雷达需要高频多点进行对物体成效率较低; 而常规的激光雷达三维成像技术又局限于采用的 APD 探测阵列成像分辨率低且探测距离较近, 需采用新型的 PMT 或 SMT 阵列作为探测传感器, 具有较高的量子效率和光子灵敏度提升探测距离, 将回波进行小比例分束, 一束用来成像, 另外一束用来获取图像的距离信息, 一次探测, 便可以获取目标的三维特征图像, 大大提高了成像效率, 难点在于大面阵探测器的制作和拼接。

4) 水下选通成像技术, 蓝绿激光在水下具有一定透过窗口, 但仍然存在较大的发射, 且不同距离发射回来的激光光束到达探测器的时间不同, 需要对探测器的成像进行快门选通, 消除大部分后向散射光的影响, 保证一定距离的有效反射光被探测器接收, 难点在于如果要获取物体的三维信息, 需要对探测器的像元进行不同的延迟时间设置获取物体在不同距离层次的信息, 进而重构水下物体的三维信息^[15]。关键技术在于严格控制激光器发射脉冲和光电探测器选通脉冲之间的时序关系。

5 结语

实施海上应急救援行动对降低海洋突发状况造成的人员生命财产损失具有巨大意义。多源弱小目标探测系统是海上应急救援工作获取信息的有机组成部分, 研究该系统在海上应急救援工作中的应用和实现, 提升海上应急救援工作开展速度, 有效履行海上应急救援任务, 为国家海洋战略提供有力支撑, 加快海洋装备的研制推广。

参考文献

- [1] 海上大数据应急救援指挥系统设计与实现[J]——胡志强, 申翔. 指挥与控制学报, 2016年1期:26-32.
- [2] 海上通道突发事件应急方案选择[J]——朱乐群, 吕靖. 大连海事大学学报, 2016年2期: 51-57.
- [3] Research on the Equitable Apportionment of Marine Salvage Reward Based on Collaborative Rescue at Sea[J]——Wang Jun, Wang Meirong, Qu Ranlin. Chinese Journal of Management Science, 2014, No. 9:23-26.
- [4] Safety Analysis Methodology in Marine Salvage System Design[C]——Liu Yanhong, Chen Liyuan, Huang Xingling, et al. 3rd International Conference on Mechatronics, Robotics and Automation (ICMRA 2015), 2015. Published by Atlantis Press: 155-159.
- [5] Weak target detection based on complex Duffing oscillator for HFSWR[C]——Zhang Ling, Zeng Liping, Li Ming, et al. Control Conference (CCC), 2016 35th Chinese, 2016. Published by IEEE:115-120.
- [6] Laser range profiling for small target recognition[J]——Steinvall O, Tulldahl M. Optical Engineering, 2017, 56(3): 031206-031206.
- [7] Review of oil spill remote sensing[J]——Fingas M, Brown C. Marine pollution bulletin, 2014, 83(1): 9-23.
- [8] A new method for radar high-speed maneuvering weak target detection and imaging[J]——Zhu Shengqi. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(7): 1175-1179.
- [9] A fast detection method for small weak infrared target in complex background[C]——Lei Bo. SPIE/COS Photonics Asia. International Society for Optics and Photonics, 2016. Published by SPIE: 120-125.
- [10] A local contrast method for small infrared target detection[J]——Chen, CL Philip. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(1): 574-581.
- [11] Imaging systems for advanced underwater vehicles[J]——Bonin, F., Burguera, A., Oliver, G. Journal of Maritime Research, 2014, 8(1): 65-86.
- [12] 航海雷达溢油信息采集分析模型[J]——徐进, 李颖, 杨文玉, 等. 海洋环境科学, 2016, 35(2): 264-269.
- [13] 基于局部特性实现单帧图像小目标检测的研究[J]——吕建明, 牛燕雄, 刘海霞, 等. 红外, 2014, 35(2): 37-43.
- [14] 基于运动模糊复原技术的红外弱小目标检测方法[J]——李思俭, 樊祥, 朱斌, 等. 光学学报, 2017, 37(6): 65-71.
- [15] 激光水下成像的图像复原算法研究[J]——邓娟, 马小雨. 激光杂志, 2016, 37(4): 69-72.