

# 海洋溢油观测网络性能评价方法研究

吴庚坤<sup>1</sup>, 刘善伟<sup>2</sup>, 杨 敏<sup>3</sup>, 鲁法明<sup>1</sup>, 李蓟涛<sup>1</sup>

(1. 山东科技大学 计算机科学与工程学院计算机科学与技术系, 山东 青岛 266590; 2. 中国石油大学(华东) 地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580; 3. 国家海洋局北海海洋技术保障中心, 山东 青岛 266033)

**摘要:** 海上溢油事故对海洋生态环境污染严重, 溢油监测对于溢油事故的有效处理具有重要作用。本文从空、天、海、地的空间维度对现有的海上溢油事故监测平台进行分类, 对常见的溢油信息监测传感器进行对比分析, 对多平台、多传感器的海上溢油观测组网技术进行分析。建立了海上观测网络评价指标体系, 并以机动性指标为例, 给出了具体观测方案特定指标的定性和定量评价方法。

**关键词:** 海上溢油; 观测网络; 网络性能评估

中图分类号: TE991.8 文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2018)01-0166-00

DOI: 10.11759/hyxx20171011011

随着全球贸易和世界经济形势的发展, 各国对石油能源的需求也越来越大。海洋石油作为一种重要的战略战备资源, 其在开采及运输过程中极易发生泄漏。近年来, 海上重大溢油事故频频发生, 水域环境的污染也引发了世人的普遍关注。根据国家海洋局的统计, 我国沿海地区平均每 4 d 就会发生一起海上溢油事件, 并且平均每年都会发生至少 2 起溢油量达到 50 t 以上的重大海上溢油事故<sup>[1]</sup>。频繁发生的海上溢油事件对海洋环境造成了极大的污染: 其在海洋表面形成面积广大的油膜层能够阻碍水体与大气之间的气体交换, 石油可以黏附于藻类、鱼类、浮游生物上, 致使海洋生物大量死亡, 并且破坏海鸟的栖息环境, 导致其种群数量锐减; 同时, 石油污染还会致使水产品质量下降, 直接造成严重的经济损失, 甚至危害人类健康。海洋溢油事故可以分为两大类: 石油开发运输溢油和海洋事故溢油。前者包括海底开采溢油、河流及排污口注入到海洋中的含油废水污染及溢入大气的石油烃沉降污染等; 而后者主要包括海上平台倾覆溢油、油轮碰撞沉没溢油、海底输油管道破裂溢油等。海上溢油事件具有突发性、瞬时性和偶然性, 其事故的发生没有固定方式及地点。此外, 海洋溢油层在风浪潮流的作用下极易发生漂移。因此海洋溢油事故所污染的区域极为广阔, 包括河口、远洋、海湾、海滩浴场、海洋保护区、水产养殖区及滨海旅游区等<sup>[2]</sup>。

鉴于海上溢油事件发生频率越来越高且危害越来越大, 世界各国都采取了一些监测方法来探测、预警海上溢油事件的发生。作为溢油应急响应中的重

要内容, 应急监测包括定点监测和动态监测两个方面内容, 具体分为: 溢油突发性污染事故监测、溢油事故对环境造成自然灾害的监测和污染源监测及环境质量监测过程中发现异常现象后采用的应急监测等三个方面。其主要监测内容包括油膜面积、位置信息、溢油量等溢油监测因子, 海况、气象、水质等环境监测因子和船舶位置信息等其他监测因子。

## 1 海上溢油监测技术

海上溢油事件的发生极具复杂性和偶然性, 因此, 对于海上溢油事故处理部门而言, 对石油管道、溢油船只及钻井平台等事故发生源的监测及溢油事故发生海域、面积和溢油量的监测估算就显得非常紧急、重要。随着各种观测系统和雷达组网技术的

收稿日期: 2017-10-11; 修回日期: 2017-12-20

基金项目: 山东科技大学人才引进科研启动基金项目资助(2017RCJJ046); 山东省自然科学基金资助项目博士基金(ZR2018BD029); 国家自然科学基金(61602279); 山东省博士后创新专项资金项目(201603056); 山东科技大学优秀科研团队计划资助项目(2015TDJH102); 山东科技大学计算机学院杰出青年基金

[Foundation: Scientific Research Foundation of Shandong University of Science and Technology for Recruited Talents, No.2017RCJJ046; Shandong Provincial Natural Science Foundation, China (ZR2018BD029); Project supported by the National Natural Science Foundation of China, No.61602279; Shandong Province Postdoctoral Innovation Project, No.201603056; the SDUST Research Fund, No.2015TDJH102; the College of Computer Science and Engineering Outstanding Youth Fund of SDUST]

作者简介: 吴庚坤(1987-), 男, 山东莱芜人, 汉族, 讲师, 博士, 主要从事物理海洋和电磁物理等方面的教学与研究, 电话: 0532-86057891, E-mail: wugengkun@sdust.edu.cn; 杨敏, 通信作者, 高级工程师, 主要从事海洋测绘与海洋地址方向的研究, 电话: 18669819550, E-mail: yangmin@bhj.gov.cn

发展,海上溢油监测组网系统的研究也越来越受到国内外学者的广泛关注<sup>[3-4]</sup>。目前,海上溢油监测组网模式按照空间区域划分主要包括地(固定点传感器监测和 CCTV(Closed-Circuit Television)监测)、海(船舶遥感监测、海洋浮标浮筒跟踪监测)、空(航空遥感监测)、天(卫星遥感监测和星载 SAR(Synthetic Aperture Radar)监测)四个维度,此外,无线传感网络技术也逐步应用于最新的溢油监测。

### 1.1 固定点传感器和 CCTV 监测

固定点监测,是将传感器固定在码头桥梁等固定位置或者海域浮标浮筒等被监测水域中,对溢油事故进行监测。按照所使用的传感器类型,可以分为激光荧光传感器和电磁能量吸收传感器。这种方法主要应用于排水口和油品作业码头,可以实现 24 h 在线网络监测。激光荧光传感器的主要原理是,石油中的多环芳香烃物质在吸收紫外线时会处于激发状态而产生荧光,通过测量荧光波长就可以监测水面是否被石油污染。其监测过程中需要通过光谱监测得到荧光能量-波长关系图即荧光光谱图,由于油类光谱与其他物质相比具有显著差异性,其荧光峰值位于 440~490 nm<sup>[5]</sup>,这一指标可以作为海上溢油监测标准。电磁能量吸收传感器是通过建立油污厚度与电磁能量吸收率的数学模型来对海上溢油事故进行监测的方法(海水、原油、空气三种介质对高频电磁波能量的吸收率不同)。这种监测方法主要通过衡量电磁波在传播过程中的衰减强度和油污厚度间的线性关系<sup>[6]</sup>来监测溢油事故。

CCTV 监测即工业电视系统,主要是基于可见光/反射红外波的遥感技术来安装监控摄像头、照相机等实现监测。这种方法一般是依靠肉眼来人工观测溢油现象,其很难通过仪器自动处理识别,也无法进行定量监测,多用于特殊港口的溢油预警系统。

### 1.2 船舶遥感、海洋浮标跟踪监测

船舶遥感监测利用雷达反射信息处理系统和航海雷达监测系统来实现海面溢油事故的遥感监测。紫外光谱波段为 0.01~0.4  $\mu\text{m}$ ,紫外遥感利用油膜在紫外波段的反射率比海水高的特点来监测溢油(在影像上其为白色色调),其探测高度有限(波长短绕射差)且难以区分太阳耀斑及海洋生物等虚假信息从而致使其难以描述溢油边界;高光谱遥感具有图谱合一特点,可以通过传统光学遥感处理技术(图象增强及波段组合运算)来实现溢油监测,能有效区分溢油

干扰目标;偏振遥感主要是衡量目标物辐射能量的偏振特征来实现溢油监测,主要衡量指标为同一探测角下油膜与背景水面反射光偏振特性差值(溢油在偏振影像上色调较亮)<sup>[7-10]</sup>。

海洋浮标作为现代化的海洋观测设备,利用 GPS 定位通过 GSM/CDMA 网络传输数据,能够稳定可靠地收集全天候海洋环境资料参数,同时可以实现自动采集、发送、指示功能。海洋浮标由水上、水下两部分构成,主要收集气象数据(风速、风向、气温、气压、温度)和海洋水文数据(波浪、潮位、海流、海温、盐度),通过以上参数建立水动力海浪潮流模型估算海上溢油面积及溢油量等。通过浮标监测能够实现溢油跟踪及定位,掌握溢油扩散、漂移等动态信息<sup>[2]</sup>。

### 1.3 航空遥感监测

航空遥感监测主要是通过飞机携带传感器在空中实现连续、同步、大范围海洋溢油事故监测。常用的遥感监测仪器有:机载侧视雷达(Side-looking Airborne Radar, SLAR)、红外紫外扫描器、航空摄像机、微波辐射计、电视摄像机等。其多采用能够实时图像处理功能的传感器控制系统。其研究内容主要集中在雷达、可见光、热红外等重要的溢油成像波段,通过对图像采取拉伸灰度范围、对像元灰度值进行变换的方法进行图像增强,从而衡量溢油区与背景海面的图像对比度、灰度值等参数来实现溢油监测。

### 1.4 卫星遥感和星载雷达 SAR 监测

卫星遥感(传感器)监测海上溢油主要依据背景海水和油膜层之间的波谱特性差异。对遥感图像预处理后分析遥感图像的灰度值,其灰度值本身就代表波谱特征,通过其识别地物特征,进而分析色调(反映直接的载负信息)、几何分辨率、影像时空特征等来实现溢油监测。

SAR 包括机载雷达和星载雷达两种。其具有的显著优点使其成为公认的最有效的空间传感器。海面油膜对产生散射的海面毛细波及短重力波具有显著的阻尼作用。在油膜海面上,油膜受波浪作用而收缩,增大了波浪阻尼动力弹性,有海风时油膜能极大降低表面张力波的生长率,表面张力波及短重力波反射雷达波所形成的海杂波在雷达图像上色度呈现为光亮。同时,有油膜海面的波浪阻尼作用大,海面粗糙度变小,从而降低了油膜区域对雷达波的发

射性, 对应 SAR 图像灰度级降低, 呈现灰暗颜色, 所以海面溢油 SAR 图像往往呈现为较暗的条纹或者斑点。这是 SAR 监测法识别海上溢油的重要指标<sup>[2]</sup>。确定油膜边界(黑暗区域)后测量周长、面积、油膜雷达散射、油膜外部雷达散射、油膜标准偏差、梯度、外形要素等参数从而进行海上溢油监测估算。

## 1.5 无线传感网络技术

无线传感网络技术是目前阶段最新的溢油监测技术, 其基于物联网技术依靠传感器节点间的相互协作, 依靠无线多跳方式实现信息交互, 而非依赖于任何的载体或者固定设施。其具有显著的自管理和自组织特性。

# 2 溢油监测手段的评价指标及监测组网性能评价指标的计算方法

## 2.1 溢油监测手段的评价指标分析

就地、海、空、天各方面监测技术的优缺点进行分析。

地面监测方面: 固定点传感器监测中激光荧光传感器的准确性极强(很少物质有荧光特性或者其发出的荧光波长与油类物质差异明显, 几乎不受虚景背景影响)、受天气状况影响小、抗干扰性较强、具有通过扫描海面的石油污染分布来绘制二维分布图的优点, 也能获取油膜 20  $\mu\text{m}$  内的厚度信息。然而其造价昂贵, 体积大不易装备, 灵活性较差且观测面积有限; 而电磁能量吸收传感器的抗干扰能力较强, 耗电小、成本低, 然而测量却不精确且很难形成统一的溢油评价指标; CCTV 监测主要是人工定性监测, 很难通过仪器自动处理识别也无法进行定量监测, 仅仅适用于特殊港区监测, 因此其对海上溢油监测发展贡献不大。

海上监测方面: 船舶遥感监测具有较强机动性、灵活性, 可以在雾天、雨雪天实现海上溢油事故监测, 弥补了光学监测的不足; 然而, 受恶劣海况及夜间限制出航的影响, 具体应用也受到一定限制, 因此其抗干扰性较差。海洋跟踪浮标定位监测能够自动地获取海洋溢油动态信息, 其时效性很强, 而且这种人工放置浮标的方法具有较强的机动灵活性, 并且能够掌握监测面积, 成本相对低廉; 然而, 国内缺少专门用于溢油监测的浮标产品的研究技术和设备。

航空监测方面: 航空遥感机动灵活、能够实现实时连续监测, 具有较强时效性, 是海洋环境监测的重要手段之一, 然而航空遥感受限于飞机的飞行距

离(溢油事故发生在远海时)和飞行高度, 无法保证监测覆盖面积, 并且其使用费用高且易受天气环境影响。

航天监测方面: 航天遥感监测范围大、监测全天候时效性, 并且随着遥感智能化发展, 其监测的准确性也得到保障, 航天遥感 SAR 所发射的电磁波能够穿透云层不受光照影响, 能够在黑夜及恶劣天气状况下工作, 虽然受限于工作轨道(机载 SAR 则不受轨道限制), 难以在固定区域实现连续时间观测, 却可以通过大范围连续获得资料的显著优势来弥补, 这一点保证了航天监测的抗干扰性, 此外, 在一定的条件下能计算出油膜的相对厚度信息。因此, 航天检测在大范围获取海洋信息方面有重要的应用前景, 在海上溢油监测组网系统中具有重要作用。

无线传感网络技术方面: 这种新兴的技术单体能耗小成本低廉、对水体环境影响小、适应性抗干扰性强、测量精度高、时效性强, 但实现无线网络布局却需要大量布控点, 消耗大量人力物力, 其监测范围受到投入成本制约。

综上所述, 海上溢油监测系统的评价指标可以概括为: 时效性、准确性(岸线、水草、太阳耀斑等虚景背景影响)、机动灵活性、抗干扰性(天气影响、海况干扰)、成本投入、监测覆盖面积、能否获取油膜厚度信息等 7 个方面。就监测组网系统性能评价而言, 航空监测能够保障组网监测系统的时效性; 固定传感器监测(红外、电磁能量吸收传感器等)能够保障组网系统的准确性, 有利于准确计算油膜面积和厚度; 浮标跟踪检测、航空航海监测则能够极大地增强组网检测系统的机动灵活性, 便于指导排油降灾; 而航天监测的抗干扰能力极强, 保证了组网监测系统的全天候、大范围监测; 比较而言, 航空、航天监测成本投入较大、浮标跟踪监测及定点监测成本较低。综合来看, 航天监测在未来组网监测研究领域有着广阔的应用前景<sup>[11-15]</sup>。

表 1 给出了主要遥感技术特点<sup>[2]</sup>。

上述传感器都需要附着搭载于某个载体或者平台才能进行使用, 汇总溢油雷达组网观测系统所有技术(按遥感方法和非遥感方法区分), 其评价指标及适用场所如表 2 所示。

## 2.2 溢油监测组网性能评价指标的计算方法

结合上述溢油监测网络系统的 8 个评价标准, 以“机动性”为例, 给出其指标衡量办法, 其评价图如图 1 所示。

表 1 溢油监测传感器的比较

Tab. 1 Comparison of oil spill monitoring sensors

|                 | 成本<br>(千美元) | 虚警              | 厚度信息         | 空间分辨率   | 天气要求          | 全天<br>时 | 幅宽(高度<br>为 300m) | 专用飞<br>行器 | 油膜<br>类型 |
|-----------------|-------------|-----------------|--------------|---------|---------------|---------|------------------|-----------|----------|
| 可见光             | 0.25~20     | 水草、较暗岸线         | 无            | 高       | 无云、纯净         | 否       | 中等               | 否         | 否        |
| 红外              | 1~200       | 水草、岸线           | 相对厚度         | 高       | 少云少雾          | 是       | ±250m            | 否         | 否        |
| 紫外              | 100~300     | 风、太阳耀斑、<br>水草   | 无            | 高       | 纯净大气          | 否       | ±250m            | 否         | 否        |
| 雷达              | 1200~8000   | 许多干扰            | 相对厚度<br>一定条件 | 高       | 仅对风速有要<br>求   | 是       | ±30km            | 是         | 否        |
| 微波辐射计           | 400~2000    | 无明显干扰           | 50μm~<br>几毫米 | 低       | 除大雨外的所<br>有天气 | 是       | ±250m            | 是         | 否        |
| 荧光激光<br>雷达      | 300~2000    | 可在任何背景<br>下识别油膜 | <20μm        | 高, 线性剖面 | 无法穿透云雾        | 是       | ±75m             | 是         | 是        |
| 激光超声油膜<br>厚度传感器 | 昂贵          | 低               | 绝对厚度         | 高, 线性剖面 | 无法穿透云雾        | 是       | 小                | 是         | 否        |

表 2 溢油监测网络系统评价标准

Tab. 2 Evaluation criteria of oil spill monitoring network system

| 平台及方法      |            |         | 评价指标    |         |         |          |          |          |          |          | 适于溢油监测场所及特殊性说明                    |
|------------|------------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------------------------------|
| 是否遥<br>感方法 | 搭载平台<br>类型 | 传感<br>器 | 时效<br>性 | 准确<br>性 | 机动<br>性 | 抗干<br>扰性 | 成本<br>投入 | 监测<br>面积 | 厚度<br>监测 | 油膜<br>类型 |                                   |
| 遥感<br>平台   | 岸基<br>遥感   | A       | 中       | 低       | 低       | 低        | 低        | 中        | 无        | 否        | 适用于港口、码头、近岸的小范围溢<br>油监测           |
|            |            | B       | 高       | 低       | 低       | 中        | 低        | 低        | 中        | 否        |                                   |
|            |            | C       | 中       | 低       | 低       | 低        | 低        | 低        | 无        | 否        |                                   |
|            |            | D       | 高       | 低       | 低       | 中        | 高        | 中        | 低        | 否        |                                   |
|            |            | E       | 高       | 中       | 低       | 中        | 中        | 低        | 高        | 否        |                                   |
|            |            | F       | 高       | 高       | 低       | 中        | 中        | 低        | 中        | 是        |                                   |
|            |            | G       | 高       | 高       | 低       | 中        | 高        | 低        | 高        | 否        |                                   |
|            | 船舶<br>遥感   | A       | 中       | 低       | 高       | 低        | 低        | 中        | 无        | 否        | 适用于近距离、港口、操作事故溢油,<br>不能监测大范围溢油    |
|            |            | B       | 高       | 低       | 高       | 中        | 低        | 低        | 中        | 否        |                                   |
|            |            | C       | 中       | 低       | 高       | 低        | 低        | 低        | 无        | 否        |                                   |
|            |            | D       | 高       | 低       | 高       | 中        | 高        | 中        | 低        | 否        |                                   |
|            |            | E       | 高       | 中       | 高       | 中        | 中        | 低        | 高        | 否        |                                   |
|            |            | F       | 高       | 高       | 高       | 中        | 中        | 低        | 中        | 是        |                                   |
|            |            | G       | 高       | 高       | 高       | 中        | 高        | 低        | 高        | 否        |                                   |
|            | 航空<br>遥感   | A       | 中       | 低       | 高       | 低        | 中        | 中        | 无        | 否        | 适于近海范围内溢油监测, 不适用于<br>恶劣天气和云层, 费用高 |
|            |            | B       | 高       | 低       | 高       | 中        | 中        | 低        | 中        | 否        |                                   |
|            |            | C       | 中       | 低       | 高       | 低        | 中        | 低        | 无        | 否        |                                   |
|            |            | D       | 高       | 低       | 高       | 中        | 高        | 高        | 低        | 否        |                                   |
|            |            | E       | 高       | 中       | 高       | 中        | 高        | 低        | 高        | 否        |                                   |
|            |            | F       | 高       | 高       | 高       | 中        | 高        | 低        | 中        | 是        |                                   |
|            |            | G       | 高       | 高       | 高       | 中        | 高        | 低        | 高        | 否        |                                   |
|            | 卫星<br>遥感   | A       | 中       | 低       | 中       | 低        | 中        | 中        | 无        | 否        | 适于远、近海大小溢油事故, 不适用于<br>短时间内动态监测    |
|            |            | B       | 低       | 低       | 中       | 中        | 中        | 中        | 中        | 否        |                                   |
|            |            | C       | 中       | 低       | 中       | 低        | 中        | 中        | 无        | 否        |                                   |

续表

| 平台及方法  |          |     | 评价指标 |     |     |      |      |      |      |      | 适于溢油监测场所及特殊性说明                     |
|--------|----------|-----|------|-----|-----|------|------|------|------|------|------------------------------------|
| 是否遥感方法 | 搭载平台类型   | 传感器 | 时效性  | 准确性 | 机动性 | 抗干扰性 | 成本投入 | 监测面积 | 厚度监测 | 油膜类型 |                                    |
| 遥感平台   | 卫星遥感     | D   | 低    | 低   | 中   | 中    | 高    | 高    | 低    | 否    | 适于远、近海大小溢油事故, 不适用于短时间内动态监测         |
|        |          | E   | 低    | 中   | 中   | 中    | 高    | 中    | 高    | 否    |                                    |
|        |          | F   | 低    | 高   | 中   | 中    | 高    | 中    | 中    | 是    |                                    |
|        |          | G   | 低    | 高   | 中   | 中    | 高    | 中    | 高    | 否    |                                    |
| 非遥感方法  | 海洋浮标跟踪监测 | --- | 高    | 高   | 高   | 高    | 中    | 中    | 中    | 否    | 适于全天候、远近海、大小范围的动态实时监测, 但技术难度高, 应用少 |
|        | 固定点浮标法   | --- | 高    | 高   | 低   | 高    | 高    | 低    | 中    | 否    | 适于排水口、油品作业码头等小范围溢油监测               |
|        | 无线传感网络   | --- | 高    | 高   | 高   | 高    | 高    | 中    | 高    | 否    | 适于近海、中小范围监测, 监测精度高, 监测面积受成本影响      |

A: 可见光; B: 红外; C: 紫外; D: 雷达; E: 微波辐射计; F: 荧光激光雷达; G: 激光超声油膜厚度传感器

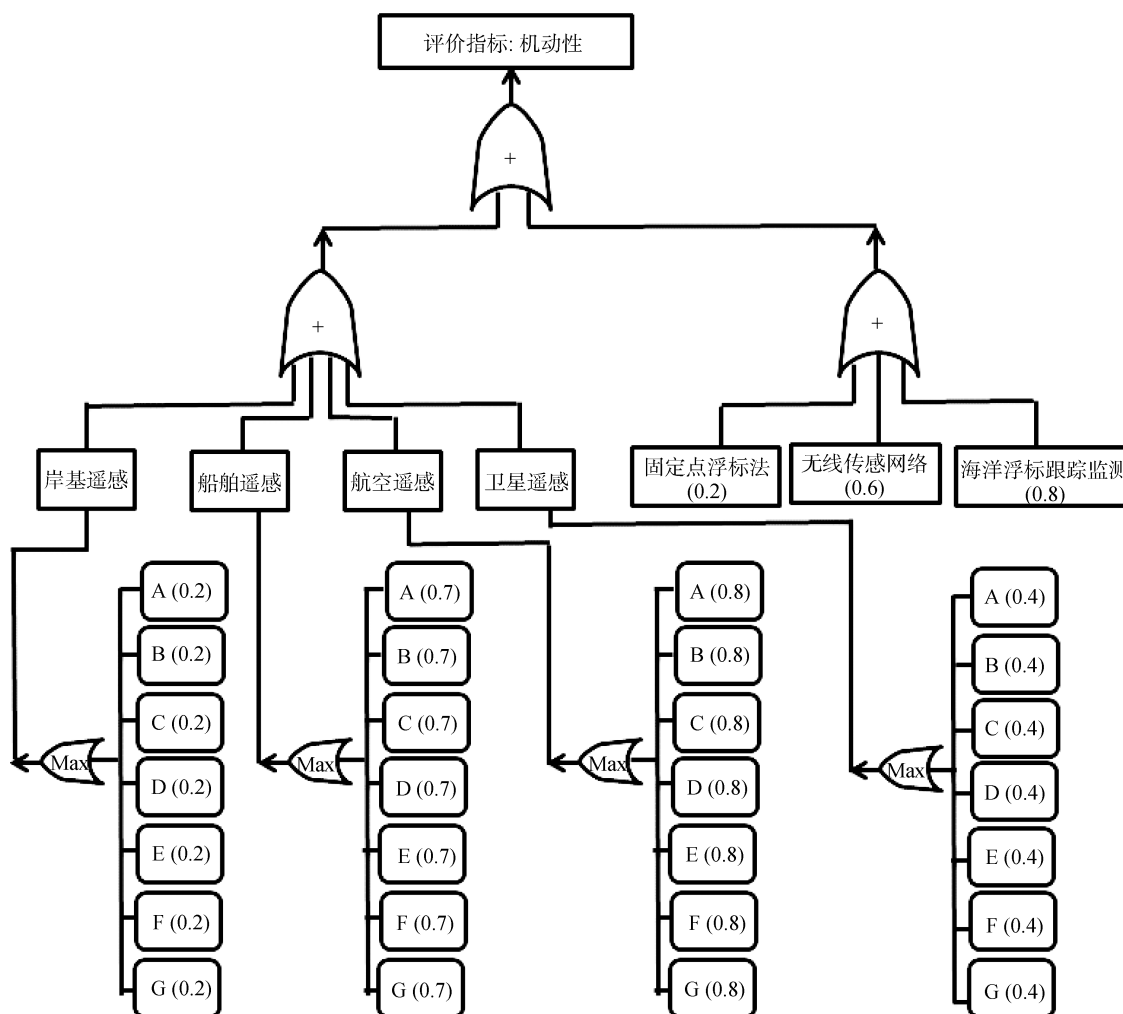


图 1 溢油监测网络系统机动性评价取值

Fig. 1 Calculation method of mobile oil spill monitoring network system

A: 可见光; B: 红外; C: 紫外; D: 雷达; E: 微波辐射计; F: 荧光激光雷达; G: 激光超声油膜厚度传感器; +: 加和; Max: 取最大值

A: Visible light; B: Infrared; C: Ultraviolet; D: Radar; E: Microwave radiometer; F: Ocean fluorescence lidar; G: Laser ultrasonic oil film thickness sensor; +: Summation; max: Take the maximum value

结合图 1, 监测网络“机动性”的定量计算如公式 (1)和公式(2)所示。

$$I_{\text{motility}} = \frac{(1-0)}{3.7-0.2} \times \left\{ \left[ (M_c + M_b + M_a + M_s) + (M_f + M_w + M_o) \right] - 0.2 \right\} + 0 \quad (1)$$

即:

$$I_{\text{motility}} = \frac{2 \times \left\{ \left[ (M_c + M_b + M_a + M_s) + (M_f + M_w + M_o) \right] - 0.2 \right\}}{7} \quad (2),$$

其中,  $M_c = \text{Max}(M_{ca}, M_{cb}, M_{cc}, M_{cd}, M_{ce}, M_{cf}, M_{cg})$ ;  $M_b = \text{Max}(M_{ba}, M_{bb}, M_{bc}, M_{bd}, M_{be}, M_{bf}, M_{bg})$ ;  $M_a = \text{Max}(M_{aa}, M_{ab}, M_{ac}, M_{ad}, M_{ae}, M_{af}, M_{ag})$ ;  $M_s = \text{Max}(M_{sa}, M_{sb}, M_{sc}, M_{sd}, M_{se}, M_{sf}, M_{sg})$ 。

上述  $M_c$ 、 $M_b$ 、 $M_a$ 、 $M_s$ 、 $M_f$ 、 $M_w$ 、 $M_o$  分别表示图 1 中岸基遥感、船舶遥感、航空遥感、卫星遥感、固定点浮标法、无线传感网络法、海洋浮标跟踪监测法的机动性评价取值(如果不采用相应方法, 则取值为 0)。通过公式(1)将评价取值映射到(0, 1)范围内(即公式(2)), 从而得到“机动性”的评价参考指标  $I_{\text{motility}}$ 。

### 3 结论

随着各种溢油观测技术的进步, 研究和发海上溢油监测组网系统对实现溢油事故监测、预警、事故降灾解灾、保障人们生命财产安全及保护生态环境具有重要意义。与此同时, 在海上溢油观测组网系统环境下, 各种观测手段的评价指标和性能效率等研究内容也日益凸显其重要性。建立和健全有关时效性、准确性(岸线、水草、太阳耀斑等虚景背景影响)、机动灵活性、抗干扰性(天气影响、海况干扰)、成本投入、监测覆盖面积、能否获取油膜厚度信息、能否监测出油膜类型等 8 个参考指标的溢油监测网络性能评价体系, 对海上溢油立体监测组网预警系统的研究发展有着实际应用价值。

#### 参考文献:

- [1] 刘晋川, 杨瑞, 李海波, 等. 基于北斗卫星定位通信的海上溢油跟踪浮标研究[J]. 航海技术, 2009, 2(2): 35-37.  
LIU Jinchuan, YANG Rui, LI Haibo, et al. Research on the offshore oil spill tracking buoy based on beidou satellite positioning communication[J]. Marine Technology, 2009, 2(2): 35-37.
- [2] 郑洪波, 张树深. 溢油环境污染事故应急处置实用技术[M]. 北京: 中国环境出版社, 2015: 45-81.  
ZHENG Hongbo, ZHANG Shushen. Practical technology for emergency disposal of oil spill pollution accidents[M]. Beijing: China Environmental Science Press,

- 2015: 45-81.
- [3] McNutt M, Camilli R, Guthrie G, et al, Assessment of flow rate estimates for the deepwater horizon oil spill[R]. US: Department of the Interior, 2011: 8-20.
- [4] 于春艳, 梁斌, 韩庚辰, 等. 海洋溢油生态损害评估程序及方法探讨[J]. 海洋开发与管理, 2015, 32(1): 92-96.  
YU Chunyan, LIANG Bin, HAN Gengchen, et al. Evaluation procedure and method of Marine oil ecological damage assessment[J]. Ocean Development and Management, 2015, 32(1): 92-96.
- [5] 魏志强. 机载海洋激光荧光雷达测量海表层叶绿素浓度的实验和算法研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2004.  
WEI Zhiqiang. Experiments and Algorithmic Research for Measuring Chlorophyll-a Concentration in the Sea Surface Layer by Using Airborne Ocean Fluorescence Lidar[D]. Qingdao: Ocean university of China, 2004.
- [6] Chakraborty U, Tewary T, Chatterjee R P. Exploiting the loss-frequency relationship using RFcommunication in underwater communication networks [C]//IEEE. 4th International Conference on Computers and Devices for Communication. Piscataway: IEEE, 2009: 1-4.
- [7] 胡佳臣, 王迪峰. 基于遥感的海洋溢油监测方法[J]. 环境保护科学, 2014, 40(1): 68-73.  
HU Jiachen, WANG Difeng. Marine oil monitoring method based on remote sensing[J]. Environmental Protection Science, 2014, 40(1): 68-73.
- [8] 刘伟峰, 臧家业, 刘玮等. 海洋溢油生态损害评估方法研究进展[J]. 水生态学, 2014, 35(1): 96-100.  
LIU Weifeng, ZANG Jiaye, LIU Wei, et al. Progress of Assessment Methods of Ecosystem Damage of Oil Spills in the Ocean[J]. Journal of Hydroecology, 2014, 35(1): 96-100.
- [9] 吴庚坤, 姬光荣, 姬婷婷, 等. 基于文氏改进谱的二维粗糙海面模型及其电磁散射研究[J], 物理学报, 2014, 63(13): 134203(1)-134203(13).  
WU Gengkun, JI Guangrong, JI Tingting, et al. Study of electromagnetic scattering from two-dimensional rough sea surface based on improved Wen's spectrum[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(13): 134203(1)-134203(13).
- [10] 吴庚坤, 樊伟, 宋金宝. 畸形波电磁散射特性分析及其特征识别标识的研究[J]. 物理学报, 2017, 66(13): 134302(1)-134302(10).  
WU Gengkun, FAN Wei, SONG Jinbao. Electromagnetic scattering characteristics analysis of freak waves and characteristics identification[J]. Acta Physica Sinica,

- 2017, 66(13): 134302(1)-134302(10).
- [11] Shaw A, Al-Shamma'a A I, Wylie S R, et al. Experimental investigations of electromagnetic wave propagation in seawater[C]//IEEE. Microwave Conference, 2006. European: IEEE, 2006: 572-575.
- [12] 陈红霞, 华锋, 袁业立. 中国近海及临近海域海浪的季节特征及其时间变化[J]. 海洋科学进展, 2006, (4): 407-415.  
CHEN Hongxia, HUA Feng, YUAN Yeli. Seasonal Characteristics and Temporal Variations of Ocean Wave in the Chinese Offshore Waters and Adjacent Sea Areas[J]. Advances in Marine Science, 2006, (4): 407-415.
- [13] 白彬人, 宋家喜. 中国近海沿岸海温多时间尺度变率及影响其变化的天气气候因素[J]. 海洋预报, 2005, (4): 78-88.  
BAI Binren, SONG Jiayi. Multi-temporal sea temperature variability in the coastal areas of china and their affecting atmospheric and climatic factors[J]. Marine Forecast, 2005, (4): 78-88.
- [14] Chakraborty U, Tewary T, Chatterjee R P. Exploiting the loss-frequency relationship using rf communication in underwater communication networks[C]//CODEC. 2009 4<sup>th</sup> International Conference on Computers and Devices for Communication. IEEE, 2009: 1-4.
- [15] Dworak V, Augustin S, Gebbers R. Measurements: Initial results[J]. Sensors, Application of terahertz radiation to soil, 2011, 11(10): 9973-9988.

## Investigation of performance evaluation methods in marine oil-spill monitoring networks

WU Geng-kun<sup>1</sup>, LIU Shan-wei<sup>2</sup>, YANG Min<sup>3</sup>, LU Fa-ming<sup>1</sup>, LI Ji-tao<sup>1</sup>

(1. College of Computer Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. China university of petroleum (east China) school of earth science and technology, Qingdao 266580; 3. North China Sea Marine Technical Support Center, SOA, Qingdao 266033, China)

**Received:** Oct. 11, 2017

**Key words:** marine oil spill; monitoring network; network performance evaluation

**Abstract:** Marine oil-spill accidents seriously pollute the marine ecological environment and oil-spill monitoring plays an important role in the effective cleanup of oil-spill accidents. In this paper, we classify existing marine-oil-spill monitoring platforms with respect to the spatial dimensions of space, sky, sea, and land. We compare common oil-spill-information monitoring sensors and analyze multi-platform and multi-sensor technologies in the oil-spill monitoring network. We then establish an evaluation index system for the monitoring network. Taking the mobility index as an example, we present our qualitative and quantitative methods for evaluating the specific indicators of specific observation schemes.

(本文编辑: 李晓燕)