

doi:10.3788/gzxb20174610.1012002

基于双向反射率函数分布的海洋溢油紫外反射光谱特性研究

丛海芳

(长春理工大学 电子信息工程学院, 长春 130022)

摘 要:为实现利用紫外波段对海水溢油污染进行监测,采用了回转半径为 1 500 mm 的双向反射分布函数测量装置和工作波段为 300~400 nm 的大视场紫外成像仪,对海水溢油紫外反射光谱特性进行研究.对三种油样品进行了外场试验,试验结果表明:海水溢油紫外光谱双向反射分布函数测量装置不确定度为 3.68%;在天顶角 0°和 30°,相对太阳方位角 0°和 45°时,原油样品与海水的双向反射分布函数在紫外波段差别较大.因此,可利用此状态下 300~380 nm 工作波段的紫外光学遥感仪器监测海水溢油状态.

关键词:海洋溢油;双向反射函数;紫外成像;大视场;光学传递函数

中图分类号:TH74

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)10-1012002-9

Characteristics of UV Reflection Spectra of Oil Spill Based on Bidirectional Reflectance Distribution Function

CONG Hai-fang

(Changchun University of Science and Technology, College of Information and Electrical Engineering, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to monitor the marine oil spill state used ultraviolet band, the Bi-Directional Reflectance Distribution Function (BRDF) measurement device which the turning radius is 1500mm and the large field of view ultraviolet imager which the working band is from 300nm to 400nm are used to study the spectral characteristics of oil spill ultraviolet reflection. The datas are measured by three kinds of oil samples through the field test, the results is showed that the uncertainty of the ultraviolet reflectance distribution function measurement device is 3.68%; There is different between the oil samples target and sea water BRDF in the ultraviolet wave range under the condition of the zenith angle of 0° and 30° degrees, relative azimuth angle of 0° and 45°. So the conclusion can be used to monitor marine oil spill states with the ultraviolet optical remote sensor from 300 nm to 380nm band.

Key words: Marine oil spill; Bi-directional reflectance distribution function; UV imaging; Wide FOV; Modulation transfer function

OCIS Codes: 120.0280; 120.4530; 300.6540

0 引言

获取海水、溢油海水的光谱反射特性及对海水溢油区域进行识别和监测是海洋资源光学遥感研究的主要内容之一.海水溢油污染区域识别和监测的重要手段是利用遥感监测平台上的光学遥感仪器监测海水溢油状况,目前常见的海洋遥感观测平台为可见光、热红外与紫外遥感仪器.采用机载紫外成像光谱技术对溢

基金项目:国家自然科学基金(No.41527806)资助

第一作者:丛海芳(1980—),女,讲师,博士,主要研究方向为光电技术,Email: haifangcong@163.com

收稿日期:2017-05-08;录用日期:2017-06-27

<http://www.photon.ac.cn>

油区域进行监测具有如下技术优点:一是可以将海岸线与海水区分开;二是可探测到较薄的海面溢油(最小油膜厚度约 $0.1 \mu\text{m}$),这是可见光和红外遥感仪器在海洋环境监测方面所无法比拟的^[1-3].

关于原油样品各波段的双向反射分布函数(Bi-Directional Reflectance Distribution Function, BRDF)测试方法研究和采用不同波段的成像光谱仪器对海洋溢油的监测和遥感技术研究已经开展多年^[4,5],并已研制出相关机载可见光和近红外波段的成像光谱仪器,并形成商品化陆续应用在海事装备领域.反射式能量轮廓仪(The Mapping Reflected-energy Sensor)的光栅型光谱仪和机载棱镜探测器(Airborne Prism Experiment)的棱镜式光谱仪为典型设备^[6,7],均可安装在机载平台上进行海洋溢油监测任务.而紫外波段的海洋溢油光谱特性的研究,国外也还处于研究阶段.在国内,可见光和红外波段的机载光谱仪器也日趋成熟,同样应用于海事监测任务.但是,紫外波段的海洋溢油光谱特性的研究还未见过相关报道.

本文主要针对紫外波段海水及溢油海水的光谱反射特性进行研究,通过外场测试获得了海水溢油紫外光谱 BRDF 特性,并对三种油样品在不同工作波段和天顶角状态下的光谱特性进行测试.在天顶角 0° 和 30° 时,相对太阳方位角 0° 和 45° 时,溢油目标与海水的 BRDF 在紫外波段差别较大,因此可以利用 $300\sim 380 \text{ nm}$ 工作波段的光学遥感仪器监测海水溢油,为紫外光学遥感仪器监测海水溢油研究奠定了理论和实验基础.

1 海水及溢油海水的光谱特性

海水溢油的存在会改变海水本身对太阳光的反射、折射等光学特性,其光谱反射曲线与纯净海水的光谱特性曲线有明显差异.因此对海水溢油光学特性研究,获取溢油-海水的反射光谱信息是关键,同时它也对遥感获取溢油区域起到关键作用,可为今后遥感识别海水溢油状况,对不同类型的油膜进行分类以及科学估算光学遥感仪器的信噪比具有重要作用.

1.1 海水及溢油海水的辐射传输特性

海水及溢油海水的辐射传输理论主要从光学辐射在海水环境中的传输规律出发,利用海水光学特性来模拟溢油海水的光谱反射特性.海面的上行辐亮度主要来自三方面,见图 1(a)^[8-10].图中大气路径辐亮度 L_{path} 与海水光学特性无关,大气路径辐亮度可通过遥感仪器数据分析时消除,因此不考虑;反射辐亮度 L_{wr} ,天空漫反射光以及太阳光经海面反射的辐亮度,容易形成镜面反射;离水辐亮度 L_{wl} -海水溢油的有效辐亮度信息,图中 $0+$ 表示大气-海面或者大气-油膜表面的上界面处.因此由探测器所探测到海水的上行辐亮度可表示为

$$L'_{\text{wv}}(\theta_s, \theta_v, \phi, \lambda) = r_w L_d(\theta_s, \theta_v, \phi, \lambda) + L_{\text{wl}}(\theta_s, \theta_v, \phi, \lambda) \quad (1)$$

式中, λ 为工作波长,相对太阳方位角 $\phi = \phi_s - \phi_v$, ϕ_s 和 ϕ_v 分别为太阳天顶角和方位角, θ_s 和 θ_v 分别为探测器的探测天顶角和方位角, $L_d(\theta_s, \theta_v, \phi, \lambda)$ 为下行辐亮度, $L_{\text{wl}}(\theta_s, \theta_v, \phi, \lambda)$ 为太阳光经过水面反射后的离开水面的辐亮度, r_w 是海面的 Fresnel 反射系数.

同理,溢油覆盖海水的上行辐亮度的贡献如图 1(b)所示,其上行辐亮度可表示为

$$L'_{\text{ov}}(\theta_s, \theta_v, \phi, \lambda) = r_o L_d(\theta_s, \theta_v, \phi, \lambda) + L_{\text{ol}}(\theta_s, \theta_v, \phi, \lambda) \quad (2)$$

式中, $L_{\text{ol}}(\theta_s, \theta_v, \phi, \lambda)$ 为太阳光经过被油膜覆盖的海水反射后离开水面的辐亮度, r_o 是油膜的 Fresnel 反射系数.

图 1 中,海水和溢油海水的反射辐亮度分别为 L_{wr} 和 L_{or} ,它们的值分别为式(1)和(2)中等号右边的第一项.根据 Straubel 不变量表达式^[11],如图 1(b)中实线所示,下行太阳光和天空光透过油膜并经海面反射进入到探测器的入瞳辐亮度可表示为

$$L'_{\text{or}}(\theta_s, \theta_v, \phi, \lambda) = t_{\text{ao}}^2(\theta_s, \lambda) r_{\text{ow}}(\theta_s, \lambda) L_d(\theta_s, \theta_v, \phi, \lambda) \quad (3)$$

式中, r_{ow} 为溢油-海面的 Fresnel 反射系数, t_{ao} 为空气-溢油处的透过率.

利用探测器对海水或溢油海水光谱反射测量时,探测器所接收到的总辐亮度包含一些无用信号(如路径辐亮度和镜面反射辐亮度)和离水辐亮度.但是当研究目标的双向性反射特性时,可能引起探测器信号值急剧增大或者信号饱和的镜面反射辐亮度也会成为总的辐亮度的一部分,对双向反射特性研究时可剔除该信号值.

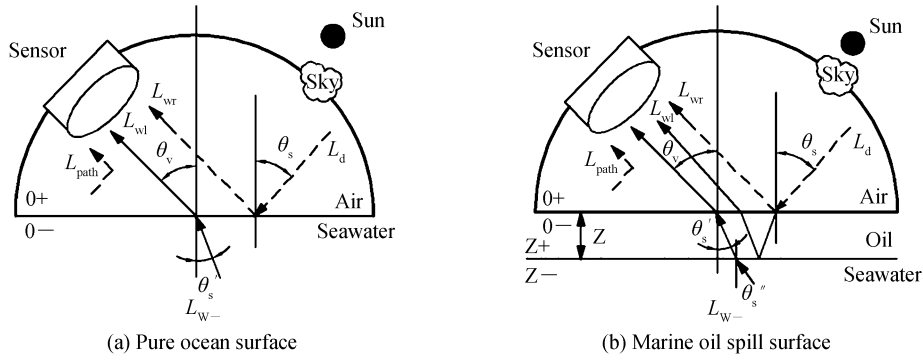


图1 探测器入瞳处上行辐亮度

Fig.1 The sketch of radiance at the entrance pupil

1.2 溢油-海水对照度

溢油-海水对照度是决定溢油目标能否被遥感仪器探测到的重要指标,其值的大小影响着光学遥感仪器的信噪比,因此对溢油-海水对照度的研究有利于提升溢油监测能力.在波长 λ 处,所探测到的溢油水面的上行辐亮度 $L_{ov}(\theta_s, \theta_v, \phi, \lambda)$ 与纯净海水的上行辐亮度值 $L_{wv}(\theta_s, \theta_v, \phi, \lambda)$ 之比即为溢油-海水对照度

$$c(\theta_s, \theta_v, \phi, \lambda) = \frac{L_{ov}(\theta_s, \theta_v, \phi, \lambda) - L_{wv}(\theta_s, \theta_v, \phi, \lambda)}{L_{wv}(\theta_s, \theta_v, \phi, \lambda)} \quad (4)$$

溢油-海水对照度与太阳天顶角、方位角、探测器的天顶角、方位角、波长、光照条件、油膜厚度、溢油-海水的特性等因素有关.

2 溢油覆盖海水的双向反射特性

自然目标大部分表现为非朗伯性^[12],即它们的光谱反射特性随着太阳天顶角、方位角,探测器探测天顶角、方位角以及入射波长的变化而改变,通常用BRDF来描述.在大多数遥感应用中,常假设待测目标为朗伯体,但这种假设与实际情况严重不符.如图2为探测器测量位置与太阳位置之间的关系, ϕ_s 和 θ_v 如前述定义, ϕ_s 和 ϕ_v 分别为太阳方位角和探测器探测方位角^[13].

BRDF 的定义为^[14-15]

$$r(\theta_s, \phi_s, \theta_v, \phi_v, \lambda) = \frac{dL_v(\theta_v, \phi_v, \lambda)}{L_s(\theta_s, \phi_s, \lambda) \sin\theta_s \cos\theta_s d\theta_s d\phi_s d\lambda} \quad (5)$$

式中分子表示所测量到的目标上行辐亮度 L_v 的无穷小(单位: $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot nm^{-1}$),分母表示入射辐照度的无穷小,该入射辐照度是由太阳天顶角 θ_s 和方位角 ϕ_s 的入射辐亮度产生的,即为入射方向的照度 E_s (单位: $W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$).在室外测量目标的BRDF时,为了尽可能保证测量过程中总的下行辐亮度保持恒定,要求实验周期尽可能短,即在一个实验周期内,认为太阳天顶角和方位角保持恒定.为了简化计算与分析,一般将太阳主平面置于 xoz 面, x 轴方向指向太阳在此平面内的投影,即 $\phi_s = 0$,因此式(5)可简化为

$$r(\theta_s, \theta_v, \phi, \lambda) = \frac{dL_v(\theta_v, -\phi, \lambda)}{L_s(\theta_s, \lambda) \sin\theta_s \cos\theta_s d\theta_s d\phi d\lambda} \quad (6)$$

在利用BRDF测量装置获取海水和溢油海水的BRDF时,辐照度测量相对困难,通常测量待测目标的反射辐亮度值 L_v 和标准漫反射板的反射辐亮度值 L_{ref} 得到目标的双向反射因子(BRF).利用同一测量仪器以及相同测量条件下,目标的反射亮度与理想朗伯体反射亮度之比 BRF 为

$$R(\theta_s, \theta_v, \phi, \lambda) = \frac{L_v(\theta_s, \theta_v, \phi, \lambda)}{L_{ref}(\theta_s, \theta_v, \phi, \lambda)} R_{ref}(\theta_s, \theta_v, \phi, \lambda) \quad (7)$$

通过公式推导可得到BRDF与BRF两者之间的关系为

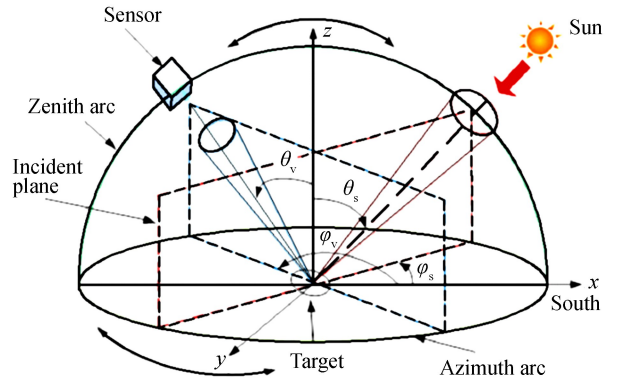


图2 探测器与太阳几何位置

Fig.2 The sketch geometry of the detector and the sun

$$r(\theta_s, \theta_v, \phi, \lambda) = \frac{R(\theta_s, \theta_v, \phi, \lambda)}{\pi} \quad (8)$$

为了便于分析天顶角反射率随着遥感观测方向之间的关系,引入各向异性因子(ANIF),它是 BRDF 在某观测方向上的值与天顶 BRDF 值之比,定义为

$$\text{ANIF} = \frac{R(\theta_s, \theta_v, \phi, \lambda)}{R_0(\theta_s, \theta_v=0, \phi, \lambda)} \quad (9)$$

式中 $R_0(\theta_s, \theta_v=0, \phi, \lambda)$ 是天底观测方向上的反射因子,尽管 ANIF 可呈现出天底反射因子随着探测观测位置的变化,但是它并不能反映主要观测方向上的波长变化。

3 紫外波段海洋溢油 BRDF 测试系统

海水及溢油海水紫外光谱反射测量实验是模拟海水环境下的不同溢油种类、探测天顶角和方位角变化时测量目标反射光谱变化过程,通过该实验可获取海水及溢油海水环境下的 BRDF、BRF、ANIF 太阳几何位置、探测器几何位置之间的关系,同时利用该测量系统得到的 BRDF 和 BRF 可得到测量目标的 Albedo。为了完成溢油海水双向反射特性的测量工作,根据国内外 BRDF 测量系统的结构形式、天顶与方位运动方式、定位精度等技术指标,设计适用于海水及溢油海水双向反射特性测量的 BRDF 测量系统。该系统由高精度的 BRDF 测量装置与大视场紫外成像仪组成,紫外成像仪它可获取波段 300~380 nm 内测量目标的光谱辐亮度值。

3.1 高精度 BRDF 测量装置

为保证所搭载的紫外成像仪与太阳高度角相对位置的定位精度及精确的安装位置,在确保 BRDF 测量系统测量几何定位精度高的同时,又要保证天顶运动与方位运动机构的定位精度与重复精度高,设计了 BRDF 测试装置,该装置采用测试范围为 3 000 mm 的二维转动机构,如图 3。

该装置主要分为两部分:1)天顶单元,包括天顶弧,天顶驱动电机、天顶驱动部件、光纤光谱仪支撑结构;2)方位单元,包括方位环,方位驱动电机和方位驱动部件。方位驱动部件通过驱动加强筋驱动天顶弧绕着方位环从方位 -90° 沿顺时针方向转动 90° 位置,而天顶驱动部件通过天顶电机驱动天顶部件沿着天顶弧 $-75^\circ \sim 75^\circ$ 运动。在传动方式上,此处采用直流伺服驱动电机与同步带轮轴孔配合方式连接,通过同步带轮驱动天顶部件/方位部件沿着改进型圆弧齿同步带周向运动。天顶和方位运动速度为 $4^\circ/\text{s}$ 时,单次采样时间 4s,稳定时间 1s,则测量周期约为 9.25 min,装置回转半径 1 500 mm,中心指向精度为 ± 10 mm。

3.2 大视场紫外成像仪

在紫外波段处,较薄油膜处紫外图像的亮度比海水的图像亮度大,而较厚油膜处图像亮度较前述两者的图像亮度暗。选用适用于机载的大视场成像光谱仪进行测试,工作高度 $H = 3\ 000$ m,空间分辨率为 2.5 m 以下。在对近海岸海洋溢油目标进行监测时,紫外波段在大气-海洋环境中的能量值较低,因此采用相对孔径中等以上的成像结构、大像元尺寸探测器来满足信噪比要求^[16]。大视场紫外成像仪使用日本滨松的 N-MOS 线阵探测器,像元数为 1 024 个像元。

大视场紫外成像仪的波段范围选取 300 nm~400 nm,视场 40° 。利用 ZEMAX 光学设计软件进行像差校正与平衡,最终的光学设计如图 4 所示,光学传递函数、能量集中度曲线图分别如图 5 和图 6 所示。各视场的光学传递函数(Optical Transfer Function, MTF)在 Nyquist 频率 20 lp/mm 时 >0.82 ,满足设计要求;均方根值(RootMeanSquare, RMS)半径不大于 $6.3\ \mu\text{m}$,远小于单个像元尺寸;最大视场的垂轴色差值为 $2.184\ \mu\text{m}$;成像点 90%的能量集中在半径 $10\ \mu\text{m}$ 以内。

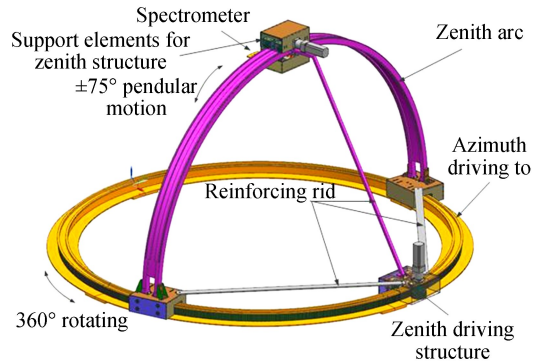


图 3 高精度 BRDF 测试装置

Fig.3 The structure of highprecision BRDF testing device

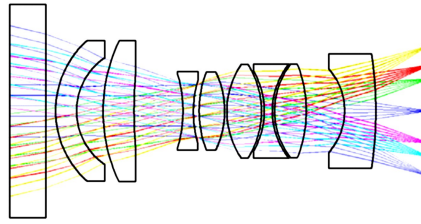


图4 大视场紫外成像仪光学结构

Fig.4 The structure of optical structure of large field of view ultraviolet imager

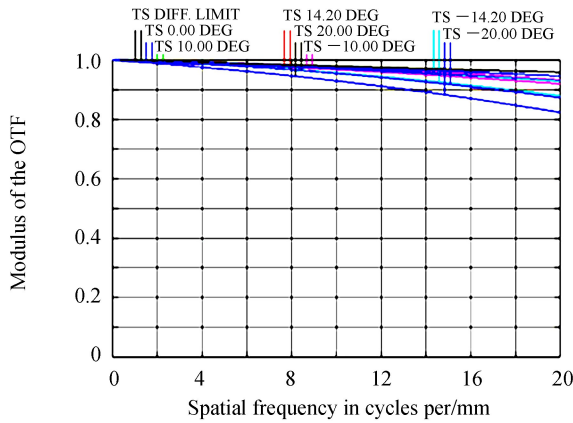


图5 系统传递函数

Fig.5 The results of system MTF

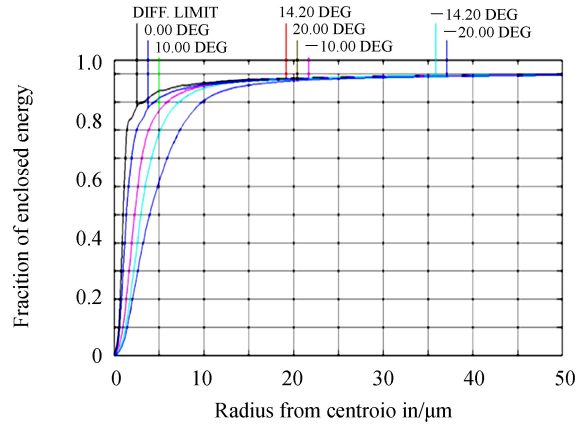


图6 能量集中度曲线

Fig.6 The curve of energy concentration

4 试验

4.1 紫外成像系统性能检测

大视场紫外成像作为海水溢油 BRDF 测试系统中的重要设备,系统的光学指标决定着系统成像质量的好坏,因此需要对系统的关键性能进行精确检测.

4.1.1 焦距测量

在平行光管焦面上放置玻罗板,玻罗板是在平板玻璃上刻划已知间距的几组平行分化线对的标准测试版,线对的间距为 $2y$.将紫外成像镜头放置在平行光管和显微镜之间,利用显微镜读取玻罗板上各线之间的距离 $2y'$.根据平行光管焦距 f' 、物距 $2y$ 和像距 $2y'$ 计算得到 $f' = 34.87$ mm,相对误差为 0.37%,满足设计要求.

4.1.2 整机光学传递函数测试

紫外成像系统的光学传递函数测量方法是在平行光管焦面上放置黑白等间隔条纹的鉴别率板,利用氙灯漫射照明鉴别率板,正对着平行光管出口处放置机载紫外成像系统(含滤光片),通过底部转台驱动紫外成像系统以不同的视场对鉴别率板靶标目标呈现不同的信号响应曲线,即可得到像的调制传递函数,测试光路如图 7.

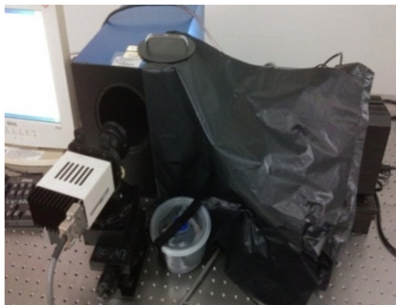


图7 光学传递函数测试

Fig.7 The picture of optical MTF test

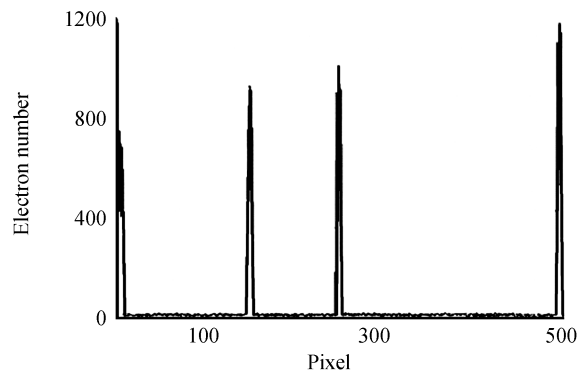


图8 各视场三靶标相应函数

Fig.8 The picture of target function of three field of view

图 8 是紫外成像系统 0° 、 10° 和 20° 视场对鉴别率版 1-4 三条靶标像的信号响应曲线, 轮廓显示均有三个波峰和两个波谷. 表 1 是整机不同视场传递函数值, 大视场紫外成像系统整机传递函数各视场的值均大于 0.198, 满足光学测量的需求.

表 1 紫外成像系统各个视场传递函数

Field of View/ $(^\circ)$	0	5	10	14	20
MTF	0.278	0.245	0.220	0.205	0.198

4.2 BRDF 测量系统实验

实验日期在 2016 年秋季 290~294 天, 实验地点长春, 纬度 43.84° , 经度 125.4° , 实验时间在 11:30~12:30 之间, 太阳天顶角 $32.02^\circ\sim 30.87^\circ$, 太阳相对正南的方位角 $-2.04^\circ\sim 12.50^\circ$. 大视场紫外成像仪初始探测位置为探测天顶角 75° 、相对太阳方位角 -90° , 由于所设计的 BRDF 测量系统工作周期较短, 因此在认为在一个测量周期内太阳天顶角和太阳方位角保持恒定.

将海水盛入口径较大、深度较深的黑色容器内来模拟真实的海水光谱特征, 对溢油海水进行光谱数据采集, 图 9 为室外条件下利用 BRDF 测量系统测量漫反射板和马瑞原油反射特性实验. 选用 4 种带宽为 10 nm 的窄带滤光片, 分别为 300 nm、320 nm、380 nm 和 400 nm 放置在大视场紫外成像仪器前端进行测量. 实验针对阿曼原油、马瑞原油和润滑油等油品, 建立它们在紫外光谱 BRDF 随着探测天顶角、相对太阳方位角的关系. 根据所测量目标的辐亮度, 研究特定探测天顶角和相对太阳方位角下的溢油-海水对照度, 计算不同测量目标的反照率.

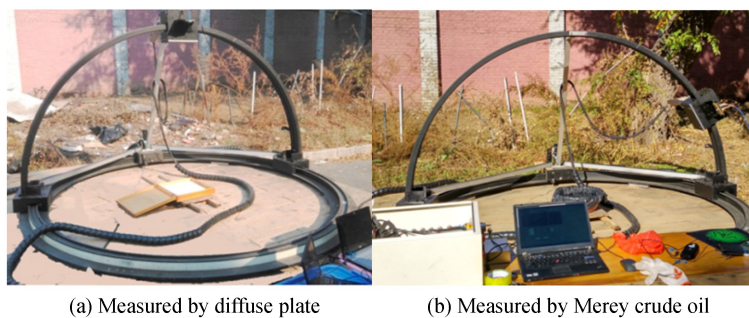
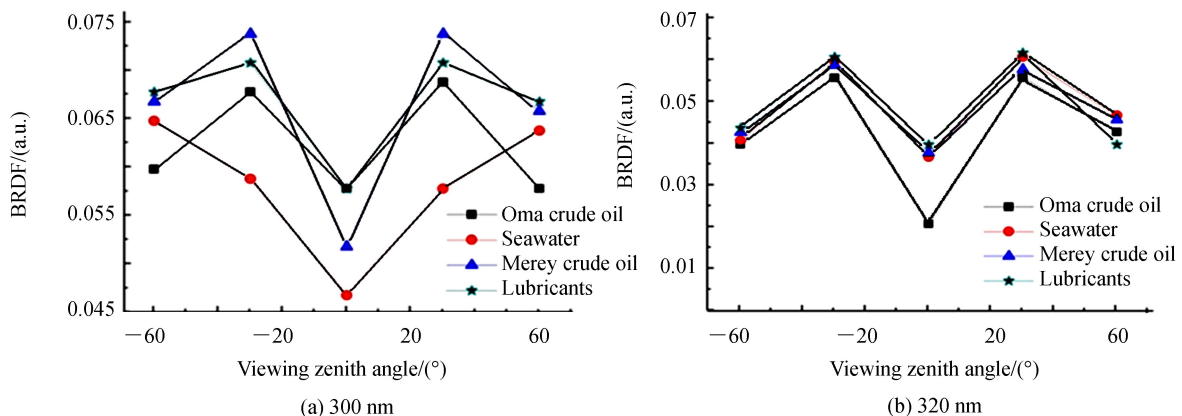


图 9 BRDF 测量系统室外测量漫反射和原油反射特性

Fig.9 The diffuse reflectance and the reflection characteristics of crude oil measured by BRDF system

图 10 是太阳天顶角 31° 、相对太阳方位角 -90° , 油膜厚度 $200\ \mu\text{m}$, 不同波长处, BRDF 与探测天顶角的关系. 由图得知: 在峰值波长 320 nm 滤光片状态下, 被测目标的 BRDF 在不同探测天顶角下值比较大, 且原油比海水的 BRDF 值大, 而润滑油在天顶角 $\pm 60^\circ$ 处比海水 BRDF 要小; 而在峰值波长 400 nm 滤光片状态下, 海水与溢油样品的 BRDF 值均很小, 若利用此波长对海水溢油识别, 则海面溢油信噪比较低. 同时, 在探测天顶角 0° 和 30° 时, 溢油目标与海水的 BRDF 在紫外波段差别较大, 因此在利用遥感仪器监测海水溢油时, 探测天顶角选择 0° 和 30° 较佳, 而一般不采用 -30° 、 $\pm 60^\circ$ 的观测位置.



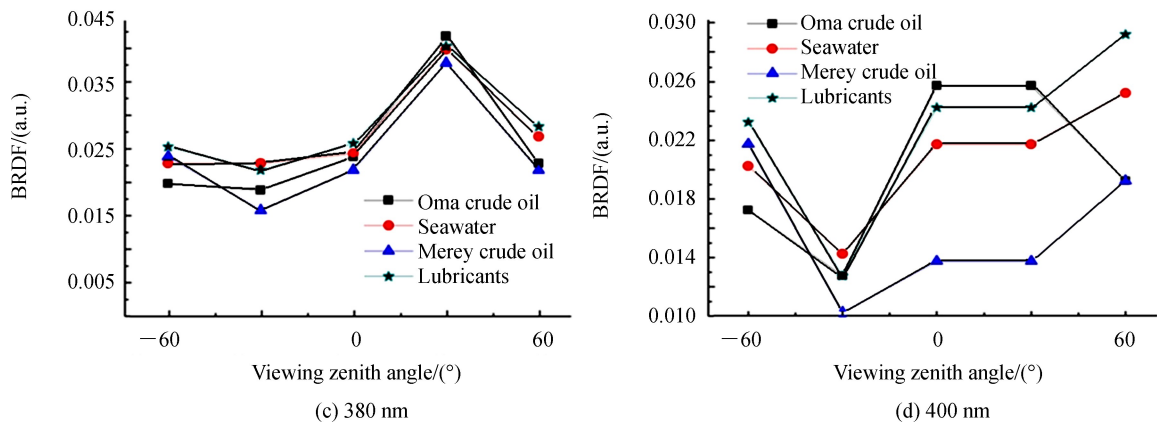


图 10 不同波长处 BRDF 与探测天顶角之间的关系(油膜厚度 $200 \mu\text{m}$, $\theta_s = 31^\circ$, $\Delta\phi = -90^\circ$)
 Fig.10 The results of the relationship between BRDF and the zenith angle at different wavelengths
 (The thickness of oil film is $200 \mu\text{m}$, $\theta_s = 31^\circ$, $\Delta\phi = -90^\circ$)

图 11 是太阳天顶角 31° 、探测天顶角 30° 、油膜厚度 $200 \mu\text{m}$ 、不同波长处, BRDF 与相对太阳方位角的关系. 当相对太阳方位角 0° 和 45° 时, 几乎在所有波段处, 海水与三种溢油样品的 BRDF 差值较大. 此外, BRDF 随着相对太阳天顶角变化规律并不是特别明显.

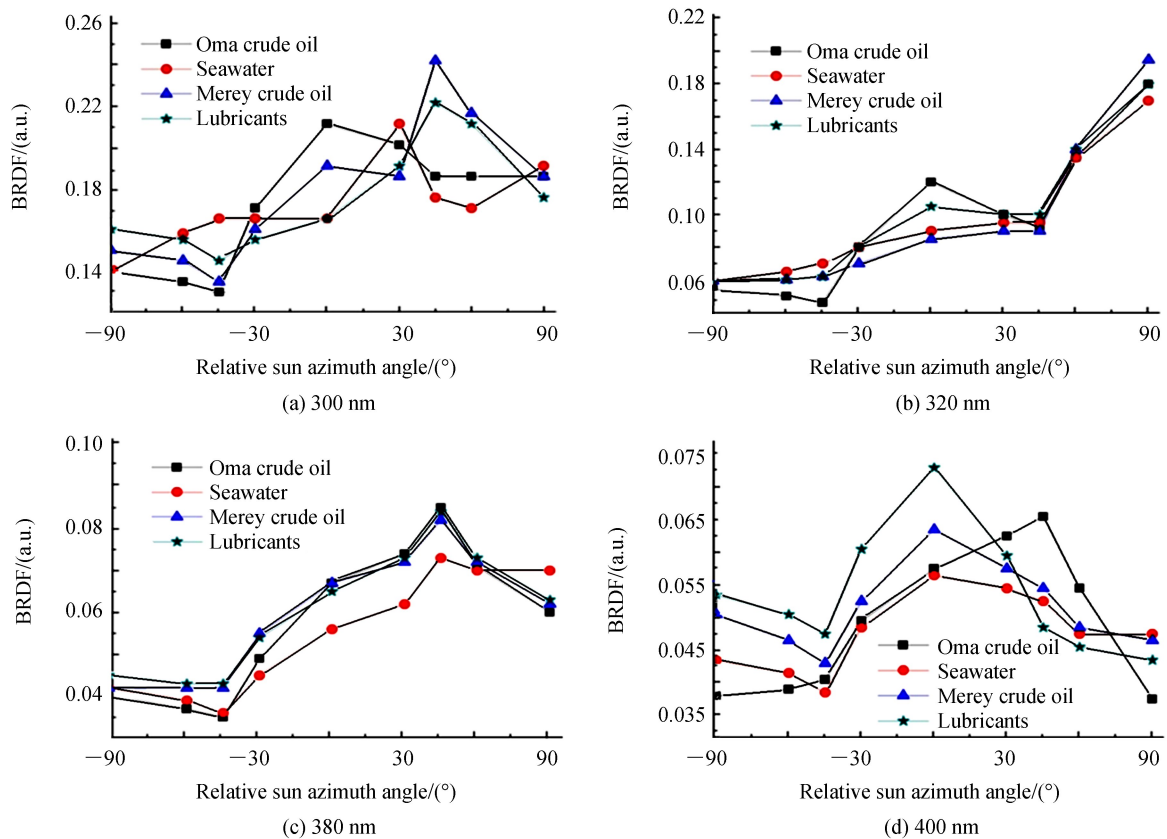


图 11 不同波长处 BRDF 与相对太阳方位角之间的关系
 Fig.11 The results of the relationship between BRDF and relative solar azimuth at different wavelengths

4.3 不确定度分析

利用 BRDF 测量系统测量目标辐亮度时, 测量误差和不确定来源于大视场紫外成像仪、BRDF 测量系统、外部光场和溢油自身^[17-18]四部分. 大视场紫外成像仪在实验周期内长期稳定性的最差值保持 2%, 该值在实验中对仪器不确定度影响最大. 同时, 有 1% 的非理想余弦响应和 1.5% 的外界温度变化补偿所引起的不确定度; BRDF 测量系统定位精度在 0.211° , 误差值 0.28%; 外部背景光场的急剧变化(如突然云层遮挡测量目标)引起的, 对 BRDF 的最大影响估计在 2%^[19]. 由于溢油海水在测量过程中不可能一直维持静止状态, 受

外界风力、自身“吸附”等原因,会在一个测量周期内聚集成团,尤其薄油膜变化较快,因此在实际测量过程中,仅测量部分探测天顶角和相对太阳方位角下的 BRDF,而对较厚油膜(如 200 μm),整个油膜聚集成“大团”,随着时间的推移它变化很小,它对 BRDF 的影响估计在 1.5%。综上分析,BRDF 总的测量的不确定度为上述不确定度平方和的均方根,即 $\sigma=3.68\%$ 。

5 结论

设计了高精度海水溢油紫外光谱双向反射测量系统,该系统由高精度大型 BRDF 测量装置和大视场紫外成像仪组成。通过模拟室外海水环境下不同溢油种类、探测天顶角和方位角变化,实时测量目标紫外反射光谱变化,得出结论:1)高精度的海水溢油紫外光谱双向反射测量系统的不确定度为 3.68%;2)在天顶角 0° 和 30° 时,相对太阳方位角 0° 和 45° 时,溢油目标与海水的 BRDF 在紫外波段差别较大,因此可以利用 300~380 nm 工作波段的光学遥感仪器监测海水溢油;3)在 400 nm 处,不同厚度溢油样品与海水的 BRDF 较接近,不适于利用此波段进行溢油监测。采用高精度的海水溢油紫外光谱双向反射装置,对海洋溢油紫外光谱特性的进行了初步研究,可以为今后机载或地面光学遥感设备的研制奠定理论和实践的基础。

参考文献

- [1] MILLARD J P, ARVESEN J C. Airborne optical detection of oil on water [J]. *Applied Optics*, 1972, **11**(1): 102-107.
- [2] Jha M N, LEVY J, GAO Y. Advances in remote sensing for oil spill disaster management: state-of-the-art sensors technology for oil spill surveillance [J]. *Sensors*, 2008, **8**(1): 236-255.
- [3] LAN Guo-xin, LI Ying, LIU Bing-xin. Echnology of marine oil spill monitoring based on multisource remote sensing [J]. *Navigating of China*, 2013, **36**(1): 115-120.
兰国新,李颖,刘丙新.基于多源遥感的海上溢油检测研究 [J]. 中国航海,2013, **36**(1): 115-120.
- [4] HAN Zhong-zhi, WAN Jian-hua, LIU Jie, et al. Multispectral imaging detection using the ultraviolet fluorescence characteristics of oil [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, **36**(11): 1335-1341.
韩仲志,万剑华,刘杰,等.利用油品紫外荧光特性的多光谱成像检测 [J]. 发光学报,2015, **36**(11): 1335-1341.
- [5] WAN Jian-hua, HAN Zhong-zhi, SONG Xin-xin, et al. Oil spills identification using hyperspectral imaging based on multi-pattern method [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, **37**(4): 473-480.
万剑华,韩仲志,宋欣欣,等.多模式融合下的海洋溢油高光谱成像油种识别方法 [J]. 发光学报,2016, **37**(4): 473-480.
- [6] MICHAEL E. SCHAEPMAN, MICHAEL J. Advanced radiometry measurements and earth science application with the airborne prism experiment (APEX) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, **158**: 207-219.
- [7] MILES T, PFEIFFER J. Advanced airborne hyperspectral imaging system (AAHIS) [C]. SPIE, 2002, **4816**: 1-11.
- [8] MOBLEY C D. Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements [J]. *Applied Optics*, 1999, **38**(36): 7442-7455.
- [9] DUAN Ming-zheng, WU Bei-ying. A radiative transfer model in the atmosphere-ocean system [J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1997, **21**(6): 734-742.
段民征,吴北婴.海洋-大气耦合辐射传输模式 [J]. 大气科学,1997, **21**(6): 734-742.
- [10] VALBORG B, SIMON R B. Thickness estimates and classification of surface oil using passive sensing at visible and near-infrared wavelengths [C]. IEEE, 1999, **99**: 1475-1477.
- [11] MOBLEY C D. Light and water: radiative transfer in natural waters [M]. Academic Press, 1994.
- [12] SONG Fang-ni, FAN Wen-jie, LIU Qiang. A method of acquiring BRDF of objects in the field [J]. *Journal of Remotesensing*, 2007, **11**(3): 296-302.
宋芳妮,范闻捷,刘强.一种获取野外实测目标物 BRDF 的方法 [J]. 遥感学报,2007, **11**(3): 296-302.
- [13] LI Xin, ZHENG Xiao-bing, XUN Li-na. Realization of field BRDF acquisition by multiangular measurement system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(1): 66-70.
李新,郑小兵,寻丽娜.多角度测量系统实现室外 BRDF 测量 [J]. 光电工程,2008, **35**(1): 66-70.
- [14] ZBIGNIEW O. Modeling the bidirectional reflectance distribution function (BRDF) of seawater polluted by an oil film [J]. *Optics Express*, 2004, **12**(8): 1671-1676.
- [15] ZBIGNIEW O. Modeling of the optical contrast of an oil film on a sea surface [J]. *Optics Express*, 2001, **9**(8): 411-416.
- [16] JIA Hui, LOU Jian-ming, DING Zhi-qun. Study on the detecting system of single photon counting spectrometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(1): 1-5.
贾辉,楼建明,丁志群,等.单光子计数光谱仪探测系统的研究 [J]. 光子学报,2013, **42**(1): 1-5.
- [17] LI Ming, ZONG Xiao-ying. In lab system level BRDF measurement method of calibration diffuser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, **46**(1): 0117004.

- 李明,宗肖颖. 定标漫反射板实验室系统级 BRDF 测量方法 [J]. 红外与激光工程,2017,**46**(1): 0117004.
- [18] HEATHER J, PATRIC K, CLARENCE J, *et al.* The NIST robotic optical scatter instrument (ROSI) and its application to BRDF measurements of diffuse reflectance standards for remote sensing [C]. SPIE, 2013, **8866**: 1501-1502.
- [19] PAYNE R E. Albedo of the sea surface [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **1972**, 29(5): 959-970.