

水面溢油可见/近红外偏振光检测方法研究

王峰¹ 杨锦宏^{2*} 李小明¹ 叶振良³

¹ 中国人民解放军陆军军官学院军用光电工程教研室, 安徽 合肥 230031;
² 中国人民解放军陆军军官学院基础部物理教研室, 安徽 合肥 230031;
³ 中国人民解放军陆军军官学院研究生系, 安徽 合肥 230031

摘要 在前期水面溢油偏振光检测方法的基础上,分析了液面反射光偏振状态在邦加球中的变化,给出了这种测量方法的物理分析。该方法以线偏振光作为入射光源,在入射光的布儒斯特角附近,利用反射光偏振状态在邦加球中轨迹的不同,达到检测不同种类油、水以及不同厚度油膜的目的。进一步以650,850,1064,1310,1550 nm可见/近红外波长线偏振光以及不同油种做了实验,实验结果与物理分析一致。

关键词 测量;水面溢油;Stokes 矢量;邦加球

中图分类号 TN215 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.051202

Oil Spill Visible/Near-Infrared Polarized Light Detection Method

Wang Feng¹ Yang Jinhong² Li Xiaoming¹ Ye Zhenliang³

¹ Optoelectronic Engineering Laboratory, Army Officer Academy of People's Liberation Army,
Hefei, Anhui 230031, China

² Physics Department, Army Officer Academy of People's Liberation Army, Hefei, Anhui, 230031, China

³ Graduate Department, Army Officer Academy of People's Liberation Army, Hefei, Anhui, 230031, China

Abstract On the basis of previous work that oil spill polarized light detection methods, the polarization station of reflected light in in the Poincare Sphere is analyzed, and physical analysis of the detection methods is given. Using linearly polarized light as incident light, with the incidence angle near the Brewster angle, the trajectory of reflected light polarization state in the poincare sphere is used to identify different types of oil, water, oil film thickness. In further, experiments are conducted with 650, 850, 1064, 1310 and 1550 nm wavelengths linearly polarized light and different oil, and experimental results and physical analysis are well confirmed.

Key words measurement; oil spill; Stockes vector; poincare sphere

OCIS codes 120.4630; 260.5430; 260.3060; 310.6860

1 引言

随着现代工业的发展,越来越多的江、河、湖泊甚至海洋受到油污的污染,检测与防治水面溢油污染成为世界各国普遍关注的共同课题。国外学者已从20世纪80年代开始进行可见光、红外、紫外光学、微波辐射计、激光、荧光探测器等多种水面溢油检测技术的研究^[1~4]。一般认为红外探测器是最为实用的遥感探测器,它主要是在近红外波段利用被污染地物与周围地物反射光谱值的差异来确定被污染的区域^[1]。

然而,目标反射或者辐射的电磁波一般都具有一定的偏振度^[5],其原因是光子振动面受到目标表面的影响从而重新分布,在某些振动方向上的光子反射具有优势,使得反射光具有偏振特性,显然,利用目标的偏振特性有助于更好地检测识别目标。从水面与油面上反射偏振光也反映了水与油的表面特性,早在1973年,Millard等^[6]就提出可利用光的偏振信息来监测水体石油污染。美国通过多次航天飞机平台上的地对地偏振实验,证实了偏振信息在土壤植被分类、大气中气溶胶探测及海水表面状态研究方面所具有的优越性^[4]。我

收稿日期: 2011-11-10; 收到修改稿日期: 2012-01-06; 网络出版日期: 2012-04-01

基金项目: 国家自然科学基金(40876095)资助课题。

作者简介: 王峰(1972—),男,博士,副教授,主要从事偏振成像技术方面的研究。E-mail: wfissky@aiofm.ac.cn

*通信联系人。E-mail: yjh_pbxy@sina.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网(<http://www.opticsjournal.net>)

国自 20 世纪 90 年代以来,相继开展了类似的水面溢油遥感监测方法研究。中国科学院安徽光学精密机械研究所、大连理工大学、东北师范大学等单位研究人员从偏振成像或偏振测量方面对地物做了实验研究,测量的结果显示,这些地物的偏振反射比值与这些地物自身的性质、波段、偏振角度、入射天顶角、探测天顶角以及相对探测方位角有很大的关系^[7~10]。

目前,偏振检测研究大多利用液面反射光偏振度的差异识别目标。可是,由于水面溢油种类、杂质、厚度、背景光的偏振等多种因素的存在,导致油与水的偏振度在很多情况下接近,利用偏振度信息区分水与油的效果有局限性。本文在前期水面溢油可见/近红外偏振光检测方法基础上^[11],增加了不同波长(可见/近红外)光源等实验结果,并对该方法作了物理分析。

2 偏振光检测方法模型

2.1 偏振测量方法介绍

如图 1 所示,以线偏振光作为光源,并且该线偏振光的光振动面可以调节旋转,然后利用偏振分析仪接收液面的反射光,通过分析邦加球中的偏振状态轨迹,得到水面与油的光学参数,从而完成水面溢油的检测。本方法的关键是入射角在布儒斯特角 θ_b 附近($\theta_b \pm 10^\circ$),因为大部分液面反射光的斯托克斯 S_3 分量都非常小,比 $S_1 S_2$ 小几个量级,不利于检测出 S_3 来。但是,当入射角在布儒斯特角附近,旋转的光振动面角接近入射面时,反射光的 $S_1 S_2 S_3$ 的大小处在同一个量级上,因此,通过邦加球中斯托克斯矢量轨迹的分析,容易区分液面的种类与厚度。

2.2 偏振光检测方法的物理分析

具有导电能力的介质不同于透明介质,电磁波会被部分吸收,因介质的电导率而转化为热能,因此油膜及水面具有复折射率, $n' = n - i\chi$ ^[12]。其中 n, χ 与物质常数 ϵ, μ, σ 有关, n, χ 可表示为

$$n^2 = \frac{c^2}{2} \left[\sqrt{\mu^2 \epsilon^2 + \frac{\mu^2 \sigma^2}{\omega^2}} + \mu \epsilon \right], \quad (1)$$

$$\chi^2 = \frac{c^2}{2} \left[\sqrt{\mu^2 \epsilon^2 + \frac{\mu^2 \sigma^2}{\omega^2}} - \mu \epsilon \right], \quad (2)$$

式中 ϵ 为介电常数, μ 为磁导率, σ 为电导率, ω 为电磁波圆频率。

由导电介质表面光反射菲涅耳公式可知,反射光与入射光的垂直入射面分量振幅比为

$$r_{\perp} = \frac{E_{0\perp}^{(r)}}{E_{0\perp}^{(i)}} = \frac{(n_i^2 \cos^2 \theta_i - N^2) - \chi'^2 + 2i\chi' n_i \cos \theta_i}{(n_i \cos \theta_i - N)^2 + \chi'^2}, \quad (3)$$

它们的相位差为

$$\tan \delta_{\perp} = \frac{2\chi' n_i \cos \theta_i}{n_i^2 \cos^2 \theta_i - N^2 - \chi'^2}, \quad (4)$$

反射光与入射光的平行入射面分量振幅比为

$$r_{\parallel} = \frac{(n^2 + \chi^2)^2 \cos^2 \theta_i - n_i^2 (N^2 + \chi'^2) + 2in_i \cos \theta_i [(n^2 - \chi^2)\chi' - 2Nn\chi]}{[(n^2 + \chi^2) \cos \theta_i + n_i N]^2 + (2\chi n \cos \theta_i + \chi' n_i)^2}, \quad (5)$$

它们的相位差为

$$\tan \delta_{\parallel} = \frac{2n_i \cos \theta_i [(n^2 - \chi^2)\chi' - 2Nn\chi]}{(n^2 + \chi^2)^2 \cos^2 \theta_i - n_i^2 (N^2 + \chi'^2)}, \quad (6)$$

式中

$$2N^2 = n^2 - \chi^2 - n_i^2 \sin^2 \theta_i + \sqrt{(n^2 - \chi^2 - n_i^2 \sin^2 \theta_i)^2 + 4n^2 \chi^2},$$

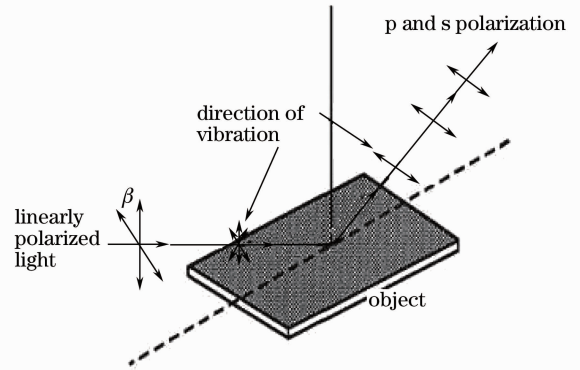


图 1 实验原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the light

$$2\chi'^2 = -(n^2 - \chi^2 - n_i^2 \sin^2 \theta_i) + \sqrt{(n^2 - \chi^2 - n_i^2 \sin^2 \theta_i)^2 + 4n^2 \chi^2},$$

式中 n_i, θ_i 为入射介质的折射率及入射角。

当改变入射光振动面夹角 β 时,从液面反射光的垂直和平行入射面分量以及它们的相位差分别为

$$E_{\perp} = r_{\perp} \cos \beta, \quad (7)$$

$$E_{\parallel} = r_{\parallel} \sin \beta, \quad (8)$$

$$\delta = \delta_{\perp} - \delta_{\parallel}. \quad (9)$$

把(3)~(6)式代入(7)~(9)式计算出斯托克斯的4个分量。因此,由常数 $\epsilon, \mu, \sigma, \omega$ 就可得出各频率偏振光以各种入射角(θ)以及光振动面角(β)在介质面反射光的斯托克斯矢量在邦加球中的轨迹,图2给出了3种计算结果。显然,由检测得到邦加球中的斯托克斯轨迹,与(3)~(9)式计算结果比较,也可反演反射介质的光学常数 ϵ, μ, σ , 因为邦加球中斯托克斯矢量的轨迹可表示为 $S = S(\mu, \epsilon, \sigma, \omega, \theta, \beta)$ 函数,当变量 ω, θ, β 已知时,可以确定参数 ϵ, μ, σ 。

图2中 a, b, c 三条曲线分别表示入射光以不同入射角 $\theta_a, \theta_b, \theta_c$, 当光振动面角 β 旋转一周, $\epsilon, \mu, \sigma, \omega$ 参数相同时,计算所得出的曲线。其中 a, c 轨迹考虑了外界、测量系统或被测介质的一些不可知因素导致的误差,用 δS_3 表示。这种误差考虑是有必要的,在下面实验中将看到需要加上这一项才能与实验结果一致。误差 δS_3 可能是系统误差导致,也可能是反射目标本身的光学属性导致,图2中 b 曲线为没有考虑误差或者外界因素的影响, P, Q 点正好在赤道上。

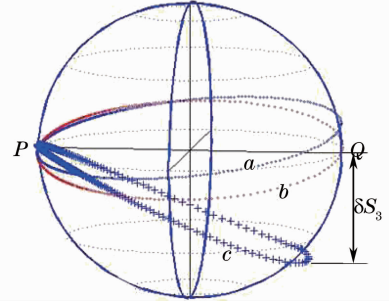


图2 邦加球及斯托克斯矢量轨迹

Fig. 2 Poincaré sphere and the trajectory of Stokes vector

3 实验测量结果及分析

实验光源部分采用了波长分别为 650, 850, 1064, 1310, 1550 nm 的线偏振光源,接收部分采用多波段偏振分析仪,实验介质为自来水、厚食用油(厚 1 mm,下文称食用油)、厚机油(厚 1 mm,下文称机油)、薄食用油(厚 10 μm),这些油层处在水面之上。测量入射角分别为 $49^\circ, 51^\circ, 53^\circ, 55^\circ, 57^\circ$ 。

图3给出了波长为 850 nm 入射角为 53° 时,薄食用油、食用油、机油、水 4 种情况反射光在邦加球中的轨迹。由图3可见,水与机油、食用油、薄食用油的斯托克斯矢量轨迹区别明显,油与水的识别很容易做到。在这种情况下,食用油与机油的区别很小,但是,如果利用不同油面的消偏特性的差异(即偏振度),反射光的轨迹将会在邦加球内部而不是邦加球表面,这将有可能会区别不同种类的油面,以后将进一步做出研究。

图4为波长分别为 650, 850, 1064, 1310, 1550 nm, 入射角为 49° 时,薄食用油面反射光在邦加球中的轨迹

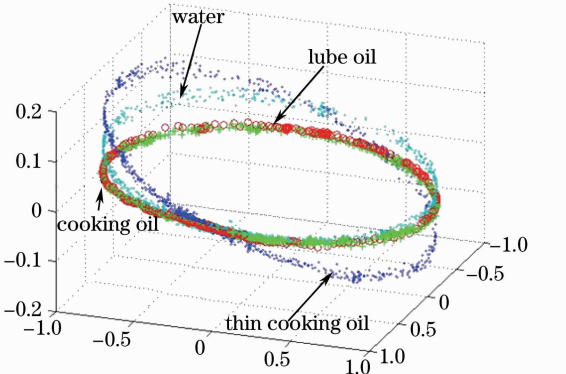


图3 波长 850 nm, 入射角为 53° 时,各种目标反射光的斯托克斯矢量轨迹

Fig. 3 Trajectories of Stokes vector when wavelength is 850 nm and incidence angle is 53°

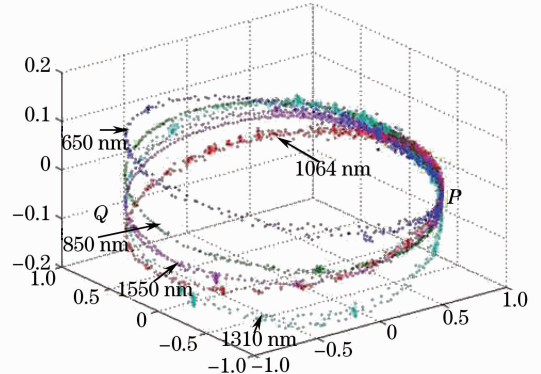


图4 薄食用油、入射角为 49° 、多频段入射光的斯托克斯矢量轨迹

Fig. 4 Trajectories of Stokes vector for thin cooking oil, incidence angle is 49° , multichannel light

迹。与图 2 一样,图 4 中 P 点处在邦加球的赤道上。而相应于 P 点的对称点 Q 点不处在赤道上,对于不同波长的探测光, Q 点偏离赤道的距离 δS_3 不一样。由图 4 可见,650 nm 的偏差 δS_3 为正,随着探测光频率的增大偏差 δS_3 转为负,由此可见, δS_3 不是由系统测量误差导致。

图 5 为波长分别为 650,850,1064,1310,1550 nm,入射角为 49° 时,食用油面反射光在邦加球中的轨迹。与图 4 比较,对于相同的检测条件(入射光的频率、入射角),由于目标(食用油、薄食用油)的不同,检测得的邦加球中的轨迹存在明显区别。

图 6 为波长分别为 650,850,1064,1310,1550 nm,入射角为 57° 时,机油面反射光在邦加球中的轨迹。

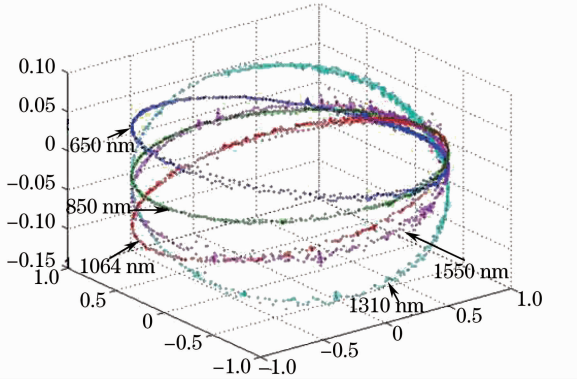


图 5 食用油、入射角 49° 、多频段入射光的斯托克斯矢量轨迹

Fig. 5 Trajectories of Stockes vector for cooking oil, incidence angle is 49° , multichannel light

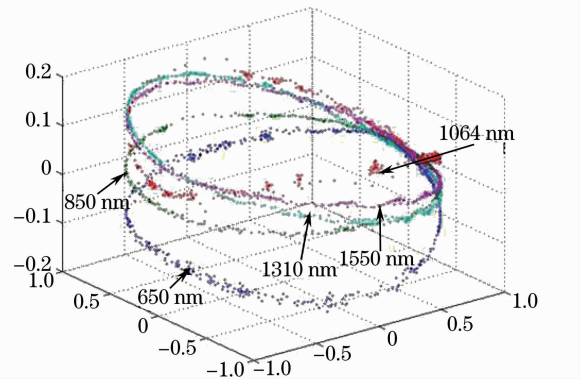


图 6 水、入射角为 57° 、多频段入射光的斯托克斯矢量轨迹

Fig. 6 Trajectories of Stockes vector for lube oil, incidence angle is 49° , multichannel light

图 7 为波长分别为 650,850,1064,1310,1550 nm,入射角为 57° 时,水面反射光在邦加球中的轨迹。与图 6 比较可见,对于相同的入射角,水面与机油面反射光的轨迹在各个频段都不同,因此,本检测方法对于水面与油面的识别有效。

4 结 论

利用偏振光状态在邦加球中斯托克斯矢量轨迹的变化,以及对该偏振光检测方法的物理分析,有效区分了液面的种类与厚度,该方法可用来检测水面溢油现象。实验中对误差项 δS_3 作了初步分析,通过多次实验(改变检测实验器皿、实验环境、接收探头等),都得到相同结论,即 δS_3 不是由偏振分析仪的误差造成的。因此, δS_3 有可能含有与介质有关的信息,以后将继续研究。

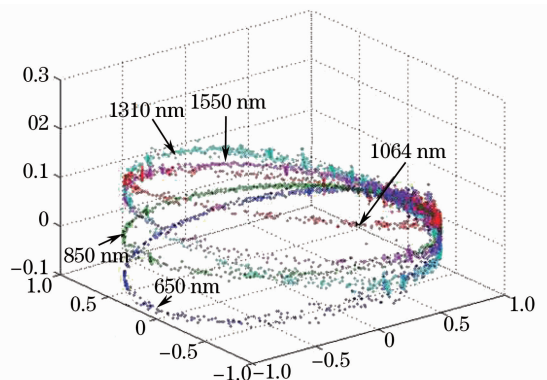


图 7 实验原理图

Fig. 7 Trajectories of Stockes vector for water, incidence angle is 57° , multichannel light

参 考 文 献

- Li Sihai. Application of remote sensing for oil slicks detecting and it's progress[J]. *Remote Sensing Information*, 2007, **74**(2): 53~57
- 李四海. 海上溢油遥感探测技术及其应用进展[J]. *遥感信息*, 2007, **74**(2): 53~57
- S. Taylor. 0.45 to 1.1 μm spectra of prude crude oil and of beach materials in prince William sound. Alaska, CRREL special re-port No.92-5,Cold regions research and engineering laboratory[M]. Hanover, New Hampshire, 1992. 14
- M. F. Fingas, C. E. Brown, J. V. Mullin. The visibility limits of oil on water sensing thickness detection limits[C]. Michigan: Proceeding of the fifth Thematic Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments, Environmental Research Institute of Michigan, Ann Ar-bor, 1998: 411~418
- K. P. Singh. Monitoring of oil spills using airborne and spaceborne sensors[J]. *Adv. Space. Res.*, 1995, **15**(11):

101~110

- 5 Stratton, Electromagnetic theory[M]. He Guoyu Transl. Beijing: Science Press, 1992. 553~557
斯特莱顿. 电磁理论[M]. 何国瑜译. 北京: 科学出版社, 1992. 553~557
- 6 J. P. Millard, J. C. Arvesen. Polarization: A key to an airborne optical system for the detection of oil on water[J]. *Science*, 1973, **180**(4091): 1170~1171
- 7 Ye Song, Fang Yonghua, Sun Xiaobin *et al.*. Polarization method for atmospheric scattering correction of remote sensing image[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 999~1003
叶松, 方勇华, 孙晓兵等. 基于偏振信息的遥感图像大气散射校正[J]. 光学学报, 2007, **27**(6): 999~1003
- 8 Sun Zhongqiu, Zhao Yunsheng, Yan Guoqian *et al.*. Further study on calculating the density of seawater with polarized light technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2452~2458
孙仲秋, 赵云升, 阎国倩等. 利用偏振光技术计算海水密度的深入研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(8): 2452~2458
- 9 Huan Xufeng, Bu Yang, Wang Xianchao. The polarization of scattered sunlight based on Mie scattering theory[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(12): 3002~3006
黄旭锋, 步扬, 王向朝. 基于米氏散射理论的太阳光散射偏振特性[J]. 中国激光, 2010, **37**(12): 3002~3006
- 10 Liu Xiao, Xue Mogen, Wang Feng *et al.*. Water-surface oil spill based on infrared polarization characteristics[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(s2): 597~600
刘晓, 薛模根, 王峰等. 基于红外偏振特性的水面溢油检测实验研究[J]. 红外与激光工程, 2008, **37**(s2): 597~600
- 11 Wang Feng, Yang Jinhong, Ye Zhengliang *et al.*. A method of water-surface oil spill detection on polarization properties [J]. *Infrared Technology*, 2011, **33**(7): 552~557
王峰, 杨锦宏, 叶振良等. 一种基于偏振特性的水面溢油检测方法[J]. 红外技术, 2011, **33**(7): 552~557
- 12 Miao Yanbiao. Polarization Optics[M]. Beijing: Science Press, 2003. 38~43
廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003. 38~43