

文章编号:1001-9014(2007)05-0362-04

## 太阳耀光的偏振分析

刘志刚<sup>1,2</sup>, 周冠华<sup>1,3,4</sup>

(1. 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101; 2. 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875;  
3. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 4. 北京师范大学资源学院, 北京 100875)

**摘要:**在水质遥感中,消除水表的太阳耀光是从遥感数据中获取水体信息的关键步骤。通过计算在不同风速和不同太阳天顶角的条件下太阳耀光的偏振度和反射率,分析了利用平行偏振片消除太阳耀光的效果。计算结果表明,当传感器以较小的天顶角对水面进行观测时,偏振片对太阳耀光的过滤作用有限。但是当太阳天顶角较大,传感器在太阳的镜面反射方向附近对水面进行观测时,平行偏振片可以显著地消除水表的太阳耀光。尤其当风速较大时,太阳耀光散布范围大,难以完全回避,此时平行偏振片可以有效地削弱耀光,凸现离水辐射信号,有望提高水体信息提取的精度。

**关键词:**水质遥感;太阳耀光;偏振;波浪水表

**中图分类号:**TP751.1 **文献标识码:**A

## POLARIZATION OF SUN GLINT

LIU Zhi-Gang<sup>1,2</sup>, ZHOU Guan-Hua<sup>1,3,4</sup>

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Beijing 100101, China;  
2. School of Geography and Remote Sensing Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;  
3. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;  
4. College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** To abstract the information of water body from remotely sensed data, it is important to eliminate the contribution of sun glint reflected by water surface. In this study, the polarization degree and reflectance of sun glint were calculated under different conditions with various wind speeds and sunlight zeniths. These data were used to analyze the effectiveness of parallel polarization plate to eliminate the sun glint. Calculation results show that the effectiveness of parallel polarization plate will be limited when the sensor observes the surface with small zeniths. However, when the sun zenith is large and the sensor observes the water surface near the spectral direction of the sun, a parallel polarization plate can eliminate major part of sun glint. When the wind speed is high, the sun glints will be dispersed in large area and it will be hard to avoid them. Under this condition, using a parallel polarization plate can reduce the contribution of sun glints effectively and increase the contribution of water-leaving radiance relatively. It will be helpful to improve the accuracy of water information abstraction.

**Key words:** water quality remote sensing; sun glint; polarization; wind-ruffled water surface

### 引言

在水质遥感中,传感器的信号中只有离水辐射能反映水体信息,但它对总信号的贡献不足10%<sup>[1]</sup>,为了准确获取水质信息,必须有效地剥离水表反射光等“噪声”。目前对水表太阳直射光的反射光(即太阳耀光)尚无有效的剥离方法,只能采用“回避—剔除”两种策略。所谓“回避”,即使传感器尽可能回避存在严重太阳耀光的区域。例如,SeaW-

iFS的传感器通过侧摆尽可能减少太阳耀光的影响。所谓“剔除”,即将遥感影像中受太阳耀光污染严重的像素剔除,不参与后续信息提取。

由于水表波浪的存在,“回避—剔除”的方法并不能很好地解决太阳耀光的问题。一方面,并不是所有的遥感传感器都带有侧摆功能,例如MODIS和我国的FY卫星与HY-1就缺乏这一功能。即便是SeaWiFS影像也有大量像素因太阳耀光的污染而被剔除;另一方面,在被剔除区域周围依然存在一定的太

收稿日期:2006-12-18,修回日期:2007-05-18

Received date: 2006-12-18, revised date: 2007-05-18

基金项目:中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX-SW-338),863项目(2006aa12z145),长江学者和创新团队发展计划

作者简介:刘志刚(1976-),男,江西南城人,北京师范大学讲师,博士,主要从事遥感分类和信息提取研究。

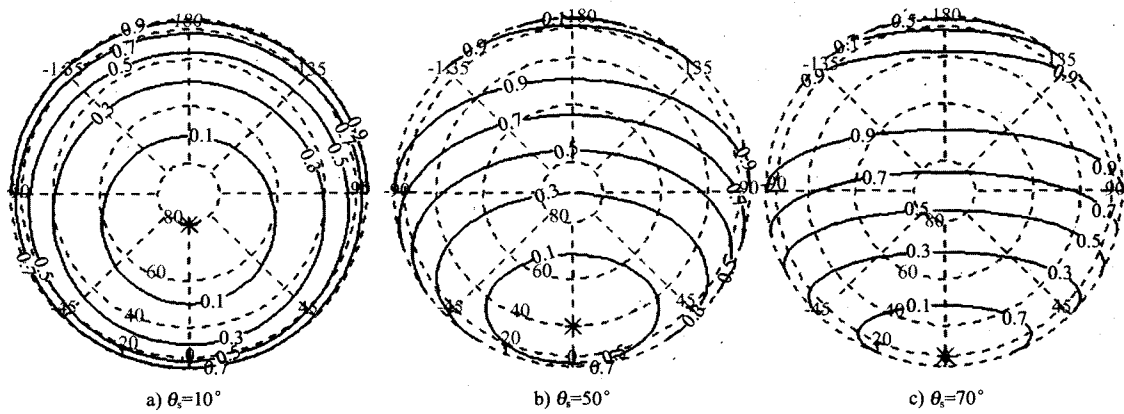


图1 在不同太阳天顶角时,各方向反射光的偏振度(图中虚线表示经纬度,“米”代表太阳的位置,实线表示偏振度)

Fig. 1 The polarization degree of reflected light with different sun zenith angle

阳耀光的污染,将影响后续信息的提取<sup>[2]</sup>.

偏振是一种在遥感中尚未被充分利用的重要信息<sup>[3]</sup>.光经过水表的反射将产生偏振效应.如果光以布儒斯特角照射平静的水表,则其反射光将完全垂直偏振,通过平行的偏振片可以将其完全过滤<sup>[4]</sup>.根据该原理,Fougnie等人(1999)通过模拟计算和测量实验发现采用平行偏振片可以有效地抑制水表状况的变化带来的不确定性,提高水表离水辐射的测量精度.那么在卫星水质遥感中是否也可以利用偏振的手段剥离太阳耀光,提高水体信息提取的精度或效率?Plass和Kattawar等人(1976)在分析波浪水表太阳耀光的强度分布时,简单地描述了太阳耀光的偏振度,但并未对上述问题进行分析<sup>[6]</sup>.本文首先模拟了太阳耀光在不同条件下的反射率和偏振度,然后在此基础上分析了通过偏振方法剥离遥感影像中太阳耀光的有效性.

## 1 太阳耀光的偏振度

任何一束光都可以分解成相互垂直的两个分量.水表的入射光和反射光可以分解成与入射面平行和垂直两个部分.这两部分光在水表的反射率分别为<sup>[4]</sup>:

$$\rho_s = \frac{\sin^2(\theta_i - \theta_r)}{\sin^2(\theta_i + \theta_r)} \quad (1)$$

$$\rho_p = \frac{\tan^2(\theta_i - \theta_r)}{\tan^2(\theta_i + \theta_r)} \quad (2)$$

其中 $\rho_s$ 为垂直部分的反射率, $\rho_p$ 为平行部分的反射率, $\theta_i$ 为入射角, $\theta_r$ 为折射角.根据Snell定律可知<sup>[4]</sup>:

$$n_1 \sin(\theta_i) = n_2 \sin(\theta_r) \quad (3)$$

其中 $n_1$ 为入射光一侧的介质的折射率, $n_2$ 为折射光一侧的介质的折射率.因此 $\rho_s$ 和 $\rho_p$ 只取决于 $n_1$ 、 $n_2$

和 $\theta_i$ .

随着 $\theta_i$ 取值不同,水表反射光将成为偏振程度不同的部分偏振光.部分偏振光可以分解为两部分:完全偏振光和自然光.通常人们用以下公式衡量光的偏振程度—偏振度<sup>[4]</sup>:

$$P = \frac{I_p}{I_p + I_u} \quad (4)$$

其中 $I_p$ 为完全偏振光的强度, $I_u$ 为自然光的强度.对于线性偏振光, $P=1$ ;对于非偏振光(自然光), $P=0$ ;对于部分偏振光, $0 < P < 1$ .假设照射水表的太阳光是自然光,根据公式(4)太阳耀光的偏振度等价于:

$$P = \frac{\rho_p - \rho_s}{\rho_p + \rho_s} \quad (5)$$

其中 $\rho_s$ 为垂直部分的反射率, $\rho_p$ 为平行部分的反射率.

图1给出了不同太阳天顶角( $\theta_s$ )时,各方向的反射光的偏振度.可以看出,当太阳天顶角为 $10^\circ$ 时,只在接近水平面的位置上的反射光才呈现出较强的偏振效应.随着太阳天顶角的增大,偏振效应较强的也不断增大,偏振度大于0.9中心区位置由低纬度区向高纬度区移动.当太阳天顶角为 $50^\circ$ 时,在太阳对面的天空中,纬度 $80^\circ$ 处的偏振度已接近0.5,此时如果采用平行偏振片观测,75%的太阳反射光将被过滤.因此,如果太阳天顶角较大时,采用平行偏振片观测可以以较大比例过滤大范围的太阳耀光.但评价偏振方法的有效性,还必须同时考虑太阳耀光的强度.如果偏振度大的区域太阳耀光恰好强度大,那么通过偏振方法过滤太阳耀光就将具有重要意义.太阳耀光的强度取决于太阳耀光的反射率,下节将计算不同区域

的太阳耀光的反射率。

## 2 波浪水表太阳耀光的反射率

波浪表面可以分解成一个个足够小的平面,每个小平面具有不同的坡度和坡向,光在小平面上的反射可以近似地看作镜面反射.图2描述了太阳光照射一个小平面的几何关系图.图中太阳方位角

$$P(z_x, z_y) = \frac{1}{2\pi\sigma_u\sigma_c} e^{-\frac{\xi^2 + \eta^2}{2}} \left[ 1 - \frac{C_{21}}{2}(\xi^2 - 1) - \frac{C_{03}}{6}(\eta^3 - 3\eta) + \frac{C_{40}}{24}(\xi^4 - 6\xi^2 + 3) + \frac{C_{22}}{4}(\xi^2 - 1)(\eta^2 - 1) + \frac{C_{04}}{24}(\eta^4 - 6\eta^2 + 3) \right], \quad (6)$$

其中  $\sigma_c = (0.003 + 0.00192W)^{1/2}$ ,  $\sigma_u = (0.00316W)^{1/2}$ ,  $C_{21} = 0.01 - 0.0086W$ ,  $C_{22} = 0.12$ ,  $C_{03} = 0.04 - 0.033W$ ,  $C_{40} = 0.4$ ,  $C_{04} = 0.23$ ,  $\xi = z_x/\sigma_c$ ,  $\eta = z_y/\sigma_u$ .  $z_x$  和  $z_y$  可以用以下公式计算:

$$z_x = \frac{\sin\theta_v \sin(\phi_v - \phi_s)}{\cos\theta_s + \cos\theta_v}, \quad (7)$$

$$z_y = \frac{\sin\theta_v \cos(\phi_v - \phi_s) + \sin\theta_s}{\cos\theta_s + \cos\theta_v}. \quad (8)$$

如果风向与太阳入射方向不同,则将坐标旋转至  $y$  轴与风向重合即可.

根据公式(7)、(8)可知,只要给定太阳的入射角和观测角就可以确定反射小面的坡度.

因此,对于特定的太阳入射角,水表各种方向的坡度概率等同于不同观测角接收到太阳反射光的概率.

根据该概率可通过以下公式计算出太阳耀光向不同方向反射的反射率<sup>[7,8]</sup>:

$$R_g = \frac{\rho^P}{4\cos^4(\beta)\cos(\theta_v)}, \quad (9)$$

其中  $\rho$  为非涅尔反射率.根据公式(9),用  $\rho_s$  和  $\rho_p$  可以分别算出太阳耀光的垂直和平行偏振部分的反射率.

图3分别给出了风速为 5m/s 和 10m/s,风向为

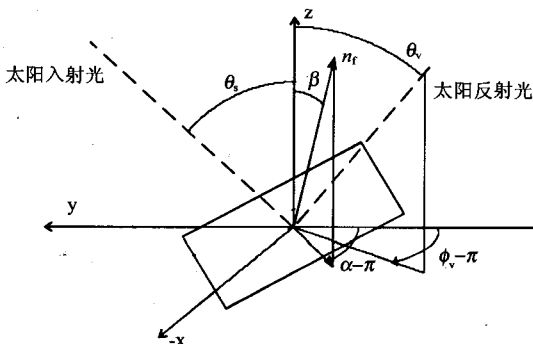


图2 太阳耀光的照射几何  
Fig.2 The geometry of sun glint

( $\phi_s$ ) 为  $0^\circ$ ,  $\theta_s$  为太阳天顶角,  $\theta_v$  为观测天顶角,  $\phi_v$  为观测方位角,  $\alpha$  为小平面的法线方向的方位角,  $\beta$  为小平面的法线方向的天顶角. Cox 和 Munk(1954)的研究发现,假设风向与太阳入射方向相同,风速为  $W$  时,在不受海底影响的波浪表面上,小面在  $x$  轴和  $y$  轴方向的坡度( $z_x$  和  $z_y$ )的出现概率为<sup>[7]</sup>:

$0^\circ$ 时,对应于不同太阳天顶角( $10^\circ$ 、 $50^\circ$ 和 $70^\circ$ )不同观测方向的垂直偏振光反射率.

## 3 讨论

从太阳耀光偏振度的空间分布可以看出,如果传感器观测天顶角较小,太阳天顶角越大,采用平行偏振片过滤的太阳耀光的比例越大(图2).

当传感器观测天顶角等于  $0^\circ$ , 太阳天顶角为  $10^\circ$ , 传感器观测方向的太阳耀光偏振度不足 0.1, 平行偏振片仅能消除不足 55% 的太阳耀光;如果太阳天顶角为  $70^\circ$ , 传感器观测方向的太阳耀光偏振度将接近 0.7, 偏振片能消除约 85% 的太阳耀光.但是从太阳耀光垂直偏振部分的反射率的空间分布可以发现,随着太阳天顶角增大,天顶角较小的传感器所能接受的垂直偏振太阳耀光的反射率将降低(图3).当风速为 5m/s, 风向为  $0^\circ$ , 如果太阳高度角为  $10^\circ$ ,  $0^\circ$  天顶角处的垂直偏振反射率为 0.2 左右;对于同样的风速风向,如果太阳高度角为  $70^\circ$ ,  $0^\circ$  天顶角处的垂直偏振反射率不足 0.01. 因此,当太阳天顶角较大时,尽管在天顶角较小的传感器上安装平行偏振片能够过滤较大比例的太阳耀光,但此时太阳耀光的强度很弱,耀光的剥离作用将不明显.总之,当传感器观测天顶角较小时,无论太阳天顶角的大小,平行偏振片对剥离太阳耀光的作用都将有限.

当太阳天顶角较大,且传感器在阳光的镜面反射方向附近进行观测时,平行偏振片能够有效地消除大量太阳耀光.例如,当风速为 5m/s, 风向为  $0^\circ$ , 太阳高度角为  $50^\circ$ , 传感器在太阳的镜面反射方向( $50^\circ$ ,  $180^\circ$ )附近通过平行偏振片可以过滤 95% 以上的太阳耀光(图2),且此时太阳耀光的垂直偏振反射率高达 0.5 以上(图3).在( $30^\circ$ ,  $180^\circ$ )处的垂直偏振反射率也高达 0.3 左右(图3),平行偏振片

在此方向依然可以剥离约 75% 的太阳耀光。

风速对水表太阳耀光的反射率影响很大,这不仅表现在反射率的高低上,也表现在太阳耀光散布范围的大小上(图 3)。当风速较小时,太阳耀光的反射率高,且集中在太阳的镜面反射方向较小的角度范围内。此时通过调整传感器的观测方向较易避开太阳耀光的影响,或采用掩膜的方法剔除太阳耀光影响区域,范围也不大。随着风速的增加,太阳耀光的反射率减小,但是散布范围不断增大,此时很难通过调整传感器的观测方向完全避开太阳耀光,通过平行偏振片剥离是一种可能的方法。

风向对各方向太阳耀光的反射率也有所影响,但是上述规律基本相同,由于文章篇幅所限,这里不进一步讨论。

#### 4 结论

本文通过计算在不同风速和不同太阳天顶角的

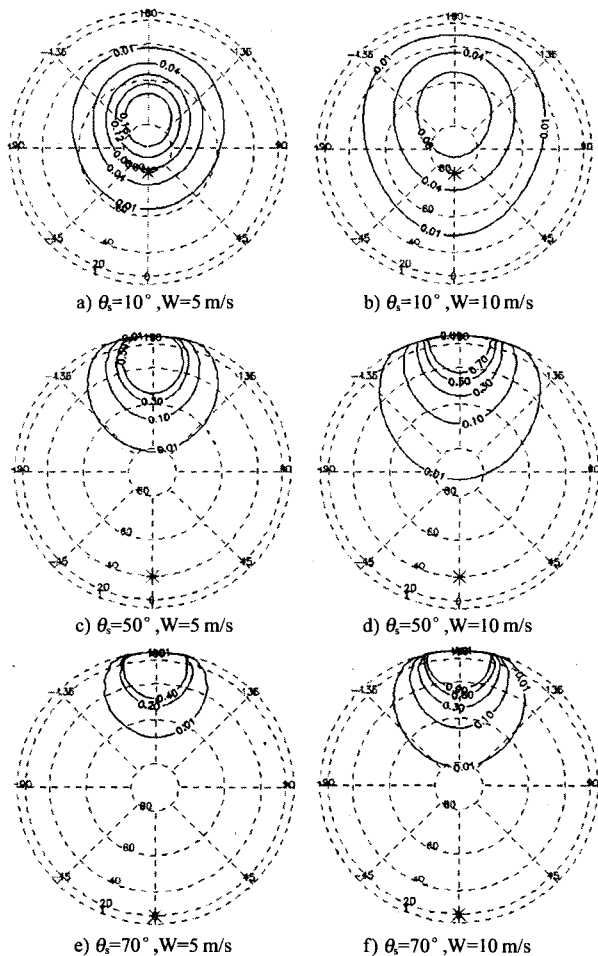


图 3 太阳耀光的垂直偏振反射率(图中虚线表示经纬度,“米”代表太阳的位置,实线表示垂直偏振反射率)

Fig. 3 The perpendicular polarization reflectance of sun light.

条件下,水表反射光的偏振度和反射率,分析了利用平行偏振片消除水表太阳耀光的效果。计算结果表明,当传感器以较小的天顶角对水面进行观测时,平行偏振片对太阳耀光的过滤作用有限。但是当太阳天顶角较大,传感器在太阳光的镜面反射方向附近对水面进行观测时,平行偏振片可以显著地消除水表的太阳耀光。尤其当风速较大时,太阳耀光散布范围大,难以完全回避,此时带平行偏振片的观测可以有效地削弱耀光。大部分水体的离水辐射的偏振很弱<sup>[9]</sup>,通过偏振过滤后,其在传感器信号中的强度仅将大致减半。这样离水辐射在所传感器信号中所占的比重将显著增加,有利于提高水体信息提取的精度。

本文在计算水表反射光的偏振度和反射率时,进行许多简化,例如没有考虑大气对太阳入射光和反射光偏振状态的影响,忽略了水表的多次反射的可能。这些因素需要在进一步的研究中加以考虑。

#### REFERENCES

- [1] Gordon H R, Morel A Y. *Remote Assessment of Ocean Color for Interpretation of Satellite Visible Imagery: A Review* [M]. New York: Springer-Verlag, 1983.
- [2] Menghua Wang, Sean W Bailey. Correction of sun glint contamination on the SeaWiFS ocean and atmosphere products [J]. *Applied Optics*, 2001, **40**(27): 4790-4798.
- [3] ZHAO Yun-Sheng, WU Tai-Xia, HU Xin-Li, et al. Study on quantitative relation between multi-angle polarized reflectance and bidirectional reflectance [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (赵云升,吴太夏,胡新礼,等.多角度偏振反射与二向性反射定量关系初探.红外与毫米波学报), 2005, **24**(6): 43-46.
- [4] Liao Yan-Biao. *Polarized Light* [M]. Beijing: Science Publisher (廖延彪.偏振光学.北京:科学出版社), 2003.
- [5] Fougne B, Frouin R, Lecomte P, et al. Reduction of sky-light reflection effects in the above-water measurement of diffuse marine reflectance [J]. *Applied Optics*, 1999, **38**(18): 3844-3856.
- [6] Plass G N, Kattawar G W, Guinn J A. Isophotes of sunlight glitter on a wind-ruffled sea [J]. *Applied Optics*, 1977, **16**(3): 643-653.
- [7] Cox C, Munk W. Measurements of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1954, **44**(11): 838-850.
- [8] Gregg W W, Chen F C, Mezaache A L, et al. The simulated seaWiFS data set. *NASA Technical Memorandum 104566, SeaWiFS Postlaunch Technical Report Series* [C]. NASA Goddard Space Flight Center: Greenbelt, M D, 1993.
- [9] Chami M, Richard S, Eric D. Radiative transfer model for the computation of radiance and polarization in an ocean-atmosphere system: polarization properties of suspended matter for remote sensing [J]. *Applied Optics*, 2001, **40**(15): 2398-2416.