

## 海面环境中红外偏振成像系统作用距离模型

夏润秋, 王霞, 金伟其, 梁建安, 刘敬

(光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京理工大学光电学院, 北京 100081)

**摘要:** 诸多实验证明海面辐射具有偏振特性, 目前还没有有效的红外偏振成像系统的海面目标探测能力的相关理论。利用 T. Elfouhaily 提出的海浪方向谱模型反演出海浪高度分布; 通过一种基于 Monte-Carlo 光线逆追踪的方法分析了海面的红外偏振辐射特性; 根据 Stokes 矢量分量的噪声特性建立了 Stokes 矢量各分量的最小可分辨温差值(MRTD)计算方法; 并在此基础上, 利用 Stokes 矢量分量的 MRTD 与场景的表观温差(ATD)的差异建立了海面环境中的红外偏振成像系统作用距离模型。

**关键词:** 红外偏振成像; Stokes 矢量; 海面探测; 探测识别距离

**中图分类号:** O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0304007

## Distance model of infrared polarization imaging system used in sea-surface environment

Xia Runqiu, Wang Xia, Jin Weiqi, Liang Jian'an, Liu Jing

(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education of China, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The fact that infrared radiation of sea surface is polarized has been proved by many experiments. Searching and detecting ability of infrared polarization imaging systems in sea-surface environment was a major concern for polarization imaging research. Sea surface was realized by using a statistical model of oceanographic literature which originated from the spectrum for long and short wind-driven waves proposed by Elfouhaily. A Monte Carlo reverse ray-tracing method was used to investigate the behavior of mid/long-wave infrared Stokes radiance which included the information of radiance intensity, degree of polarization and angle of polarization, at the realized wind roughed sea surface. The minimum resolvable temperature difference (MRTD) parameters for Stokes-vector components were proposed based on standard error propagation method. Finally, detectable range of infrared polarization imaging used in sea surface environment was analyzed by comparing apparent-temperature differences (ATD) between target and sea background with the MRTD of Stokes-vector components.

**Key words:** infrared polarization imaging; Stokes vector; sea surface detection; detectable range

收稿日期: 2015-07-05; 修订日期: 2015-08-10

基金项目: 国家 863 项目(2013AA7031068A)

作者简介: 夏润秋(1986-), 男, 博士生, 主要从事偏振成像、红外成像及图像处理方面的研究。Email: xrq@bit.edu.cn

导师简介: 金伟其(1961-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事夜视与红外技术、光电图像处理、光电测试与仪器等方面的研究。  
Email: jinwq@bit.edu.cn

通讯作者: 王霞(1972-), 女, 副教授, 博士生导师, 主要从事光电成像技术方面的研究。Email: angelniuniu@bit.edu.cn

## 0 引言

文中描述了一种分析红外 Stokes 偏振成像系统在海面环境中最大探测识别距离的估算方法。对海面背景成像时,海面杂波是不可避免的影响因素之一。Cox 等人之前的研究表明,海面的风浪存在符合一定统计特性的斜率分布,并且在大多数的情况下来自海面的红外辐射存在着较为明显的偏振特性<sup>[1-2]</sup>。基于该现象,使用偏振成像系统有望能够抑制海面杂波,提高在海面环境中的目标探测识别能力。

目前常用的分析海面偏振特性的方法主要有两种:数值方法与 Monte-Carlo 方法。前者基于海面斜率的统计特性接近于高斯分布,利用积分方法计算海面的发射及反射特性,过程需要对海面的遮蔽效应及存在的多次反射光线对结果造成的影响进行修正<sup>[2-3]</sup>;后者则更为直观易于理解,该方法的要点在于如何获得较为真实的海面高度分布,以及如何提高计算效率。文中将采用一种基于 Monte-Carlo 的光线逆追踪算法分析海面的红外偏振特性。

红外图像中的对比度主要由目标与背景的表现温差(黑体等效温差)决定。最小可分辨温差(MRTD)是分析红外成像系统的探测识别能力的重要参数之一。文中将 MRTD 作为红外强度成像系统能够探测识别目标的指标参数,由于 Stokes 矢量并非为直接探测所得,其计算过程将会使其的探测识别指标有别与强度探测。文中将分析该过程并计算针对 Stokes 矢量的 MRTD,结合海面偏振辐射特性计算得出海面环境中 Stokes 偏振成像系统的最大探测识别距离。

## 1 海面 Stokes 矢量红外偏振辐射的仿真计算

海面几何特征通常表示为一种统计模型。在该统计模型中,海面高度被认为是一个与位置以及时间相关的函数  $h(\vec{x}, t)$ <sup>[4]</sup>。在水平面上任意点  $\vec{X}=(x, z)$  处的高度可以通过对高度谱的反傅里叶变换得到,其可以表示为与时间相关的一系列带有复数部分的不同振幅的正弦曲线之和:

$$h(\vec{x}, t) = \sum_{\vec{k}} \tilde{h}(\vec{k}, t) \exp(i\vec{k} \cdot \vec{x}) \quad (1)$$

式中:  $t$  为时间;  $\vec{k}$  为包含两个方向的波数矢量  $\vec{k}=(k_x,$

$k_z)$ 。  $\tilde{h}(\vec{k}, t)$  表示波数为  $\vec{k}$ 、时间为  $t$  时傅里叶级数所对应的振幅,其值大小取决于不同风速下的海浪方向谱分布,它决定了海浪的最终外形。若给定一个扩散关系  $\omega(\vec{k})$ ,则海面风浪场的傅里叶振幅可以表示为:

$$\tilde{h}(\vec{k}, t) = \tilde{h}_0(\vec{k}) \exp[i\omega(\vec{k})t] + \tilde{h}_0^*(-\vec{k}) \exp[-i\omega(\vec{k})t]$$

$$\tilde{h}_0(\vec{k}) = \frac{1}{\sqrt{2}} (\varepsilon_r + i\varepsilon_i) \sqrt{\Psi(\vec{k})} \quad (2)$$

式中:  $\varepsilon_r$  与  $\varepsilon_i$  为满足均值为 0、方差为 1 的高斯分布的随机数。  $\Psi(\vec{k})$  为 Elfouhaily 的海浪方向谱<sup>[1]</sup>,图 1 为风速 5 m/s 时海浪高度反演结果。

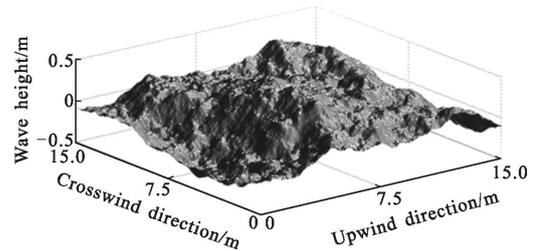
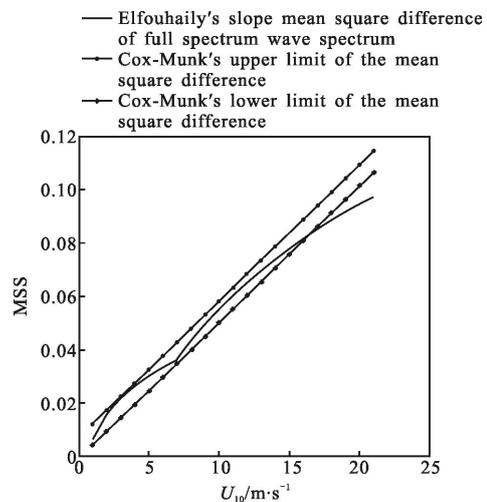


图 1 仿真海面(风速 5 m/s; 区域 15 m×15 m)

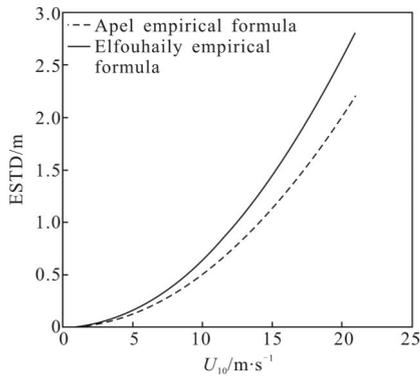
Fig.1 Simulated sea surface (wind speed:5 m/s; region:15 m×15 m)

仿真所得海面斜率及海浪高度的特性应该满足 Cox-Munk 的海面斜率分布<sup>[2]</sup>以及 Apel 给出的海浪高度经验公式<sup>[5]</sup>。通过计算海面斜率均方值(MSS)来验证 Elfouhaily 谱与 Cox-Munk 的海面斜率分布经验公式的有效性;通过计算海面浪高标准差(ESTD)来验证 Elfouhaily 谱与 Apel 的海浪高度经验公式的有效性。 $U_{10}$  为海平面上方 10 m 处风速。图 2(a)给出



(a) Elfouhaily 谱与 Cox-Munk 的海面斜率均方值

(a) MSS of Elfouhaily spectrum and Cox-Munk



(b) Elfouhaily 谱与 Apel 的海面浪高标准差

(b) ESTD of Elfouhaily spectrum and Apel

图 2 不同风速下 Elfouhaily 谱对应海浪的几何特性

Fig.2 Geometrical characteristics of Elfouhaily spectra at different wind speeds

了 Elfouhaily 谱和根据 Cox-Munk 经验公式计算的在不同风速下的斜率均方差分布，可以看出 Elfouhaily 谱与 Cox-Munk 的经验公式所得斜率具有很好的一致性。图 2(b)给出了 Elfouhaily 谱和根据 Apel 经验公式计算的在不同风速下的海面浪高标准差，可以看出尽管在风速较高时两者之间存在一定差异，但是两者的变化趋势基本一致。

文中采用了光线逆追踪的方法计算海面的红外偏振辐射特性，原理如图 3 所示。被追踪光线由探测

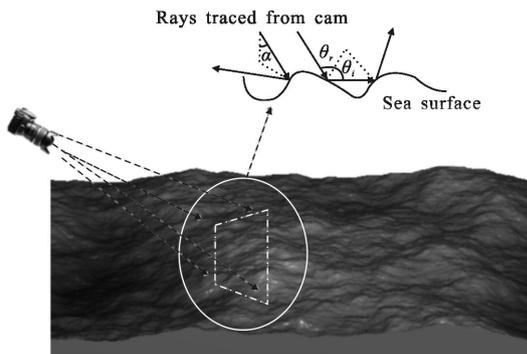


图 3 光线逆追踪方法计算海面偏振辐射特性

Fig.3 Ray-tracing method used for calculating Stokes vector radiance from sea surface

器出发，指向在设定视场内的随机方向射向生成的仿真海面。首先若光线被判定与海面相交，不相交则舍弃该光线，否则计算出其反射方向并继续跟踪；再次判断其是否与水面相交，若不相交则认为其进入大气中，若相交则按与上述相同的步骤循环计算直

至光线进入大气，最后保存光线追迹所求得路径，保存内容包括反射点位置与光线方向矢量。根据所得路径，即可重新按光线传播正方向逐反射点计算海面的反射及自身矢量辐射。

图 4 为风速为 3 m/s 时，利用该方法计算的海面 Stokes 矢量的分布状况。计算中设定为无日照环境，沿风向观测，0°偏振角沿水平方向，采样波段为长波大气窗口 8.9 μm<sup>[8]</sup>。可以看出 Q 分量的极值出现在观测天底角 70°左右，最大偏振度 1.8%。由于此时海面斜率整体较小，基本不存在多次反射即不存在椭圆偏振，因此其辐射中的 U 分量可以忽略不计。

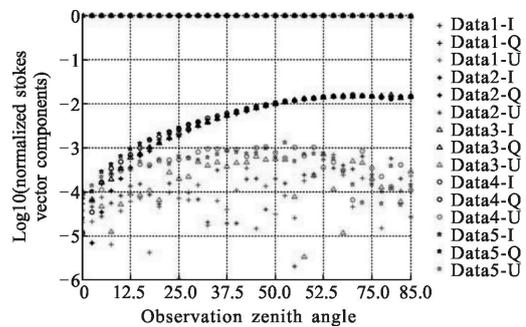


图 4 海面风速 3 m/s 仿真所得 5 组 Stokes 矢量

Fig.4 Five groups of Stokes-vector components of 3 m/s wind-wave sea surface

## 2 Stokes 矢量的 MRTD

MRTD 是评价红外成像系统探测能力的标准之一，其值大小主要受红外探测器的灵敏度以及目标的空间频率影响。MRTD 有多种计算方法，其中凝视型焦平面探测器的 MRTD 可以表示为：

$$MRTD(f) = \left[ \frac{\pi^2 SNR_{th} \sigma_{nh} K_c(f)}{8 MTF(f)} \right] (E_i E_h(f) E_v(f))^{1/2} \quad (7)$$

式中：SNR<sub>th</sub> 为能够探测到一定目标的信噪比阈值；σ<sub>nh</sub> 为焦平面探测器的空间时间噪声 K<sub>c</sub>(f) 为噪声修正函数；MTF(f) 为系统的空间调制传递函数；E<sub>i</sub> 为人眼的时间积分函数；E<sub>h</sub>(f) 与 E<sub>v</sub>(f) 为人眼的空间积分函数。

由于偏振成像系统获取的最终参数一般表示为 Stokes 矢量形式，因此若忽略配准误差以及检偏器对系统空间调制传递函数的影响，计算 Stokes 分量的 MRTD 时，上式中除了 σ<sub>nh</sub> 的其他参数基本可以认为不变。以改进型的 Pickering 结构的偏振成像系统为例，其获得的 Stokes 矢量可以表示为<sup>[6]</sup>：

$$\begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (E_0+E_{90}+E_{45}+E_{135})/2 \\ (E_0-E_{90}) \\ (E_{45}-E_{135}) \end{bmatrix} \quad (8)$$

使用标准误差传递方法<sup>[7]</sup>。若强度图像的空间时间噪声为  $\sigma_{nh}$ , 则  $I$ 、 $Q$ 、 $U$  分量的噪声可分别表示为:

$$\sigma_{nh_I} = \sigma_{nh} \quad (9)$$

$$\sigma_{nh_Q} = \sqrt{2} \sigma_{nh} \quad (10)$$

$$\sigma_{nh_U} = \sqrt{2} \sigma_{nh} \quad (11)$$

从而可得  $I$ 、 $Q$ 、 $U$  分量的 MRTD 分别为:

$$\text{MRTD}_I(f) = \text{MRTD}(f)_{\text{intensity}} \quad (12)$$

$$\text{MRTD}_Q(f) = \sqrt{2} \text{MRTD}(f)_{\text{intensity}} \quad (13)$$

$$\text{MRTD}_U(f) = \sqrt{2} \text{MRTD}(f)_{\text{intensity}} \quad (14)$$

### 3 探测距离分析

随着观测距离的增加, 大气衰减以及大气程辐射会随之提高<sup>[9]</sup>。当目标与背景的温差衰减至于 MRTD 相等时可视为偏振成像系统达到了最大探测距离。为了分析偏振成像系统对具有一定偏振特性背景中的目标最大探测距离, 作了如下几点假设:

(1) 当观测距离为  $l_0$  时, 目标与背景的表现温差为  $\Delta T_0$ , 此时目标对应的空间频率为  $f_0$ ;

(2) 目标的偏振度为 0, 背景的偏振度设定为  $p$ , 线偏振角为  $\alpha$ ;

(3) 大气在路径长度为  $l$  的距离上的透过率为  $\tau_l$ , 且忽略大气的退偏影响, 透过率使用 Mortran 计算获得;

(4) 探测器的信号传递函数为 SiTF。

目标的空间频率与观测距离成反比  $f_l \propto 1/l$ 。在距离  $l$  处的目标与背景表现温差为:

$$\Delta T_l = \Delta T_0 \cdot \tau_l \quad (15)$$

式中:  $\tau_l$  为大气的透过系数。该距离处的目标空间频率表示为  $f_l = f_0 \cdot l/l_0$ 。显然, 可以通过  $\Delta T_l$  与  $\text{MRTD}(f_l)$  值的大小来分辨目标是否能够探测到。若在探测距离  $l$  处刚好满足  $\Delta T_l = \text{MRTD}(f_l)$ , 则此时刚好达到最大探测距离。根据上述所作假设 Stokes 矢量 3 个分量的表现温差分别为:

$$\text{ATD}_I(l_0) = \Delta T_0 \quad (16)$$

$$\text{ATD}_Q(l_0) = p \cdot I_b \cos 2\alpha / \text{SiTF} \cdot \tau_{l_0} \quad (17)$$

$$\text{ATD}_U(l_0) = p \cdot I_b \sin 2\alpha / \text{SiTF} \cdot \tau_{l_0} \quad (18)$$

式中:  $I_b$  为背景辐射对应的探测器响应信号强度。最

大探测距离  $l_{\max}$  应满足方程:

$$\text{ATD}(l_{\max}) = \text{MRTD}(f_{l_{\max}}) \quad (19)$$

公式(19)即为偏振成像系统所获得的 Stokes 矢量的最大探测距离模型, 根据上述  $I$ 、 $Q$ 、 $U$  分量的表现温差值以及其对应的 MRTD 值可以获得各自的最大探测距离。若其中参数设置如表 1 所示, 则  $I$ 、 $Q$  分量的探测距离如图 5 所示。

表 1 探测距离计算参数设置

Tab.1 Parameters set of detectable range calculation

Variables	Values
$l_0/\text{m}$	500
$f_{T_0}/\text{cyc} \cdot \text{mrad}^{-1}$	0.02
$I_{\text{background}}/\text{SiTF}/\text{K}$	290
$\alpha$	90°
DoLP	1.5%
Observation Zenith	85°
$\Delta T_0/\text{K}$	3.87

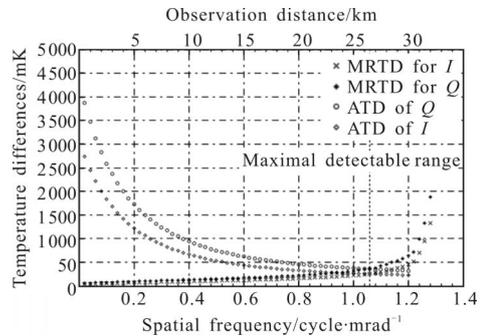


图 5 最大探测识别距离计算

Fig.5 Calculation of maximal detectable ranges

可见此时若背景偏振度为 1.5%, 当温差设定为 3.87 K 时  $I$ 、 $Q$  分量的最大探测距离刚好相等。显然, 若  $\Delta T_0 < 3.87$  K, 即:

$$\Delta T_0 < \text{DoLP} \cdot I_b / \text{SiTF} \cdot \tau_{l_0} / \sqrt{2} \quad (20)$$

时, 则  $Q$  相对于  $I$  分量可以获得更大的探测距离。

### 4 结论

文中首先对海面波形进行了仿真, 并在此基础上利用基于光线逆追迹的方法建立了面红外偏振辐射模型, 然后建立了海面环境下的红外偏振成像系

统的作用距离模型,分析了红外偏振成像系统的海面探测能力,最后指出了偏振成像探测的优势作用范围。

#### 参考文献:

- [1] Elfouhaily T, Chapron B, Katsaros K, et al. A unified directional spectrum for long and short wind-driven waves [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1997, 102 (C7): 15781–15796.
- [2] Cox Charles, Walter Munk. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter [J]. *JOSA*, 1954, 44(11): 838–850.
- [3] Nicholas R Nalli, William L Smith, Bormin Huang. Quasi-specular model for calculating the reflection of atmospheric-emitted infrared radiation from a rough water surface [J]. *Applied Optics*, 2001, 40(9): 1343–1353.
- [4] Tessendorf, Jerry. *Simulating Nature: Realistic and Interactive Techniques Simulating Ocean Water*[M]. New York: Special Interest Group on Computer Graphics, 2001.
- [5] Apel John R. An improved model of the ocean surface wave vector spectrum and its effects on radar backscatter [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1994, 99 (C8): 16269–16291.
- [6] Schott, John Robert. *Fundamentals of polarimetric remote sensing*[C]//SPIE Press, 2009, 81: 38–40.
- [7] Bevington, Philip R, D Keith Robinson. *Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences* [M]. New York: McGraw–Hill, 1969: 39–49.
- [8] Berdahl, Paul, Richard Fromberg. The thermal radiance of clear skies[J]. *Solar Energy*, 1982, 29(4): 299–314.
- [9] Zou Xiaofeng, Wang Xia, Jin Weiqi, et al. Atmospheric effectsonin frared polarization imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 304–308. (in Chinese)