

文章编号:1001-5078(2014)07-0745-04

· 红外技术及应用 ·

基于三角面元波面分割的海面红外成像仿真

熊艳飞¹, 石志广², 郭建¹, 李吉成²

(1. 湘潭大学材料与光电物理学院, 湖南 湘潭 411105; 2. 国防科学技术大学 ATR 重点实验室, 湖南 长沙 410073)

摘要:从海面小波面法线出发, 采用海浪谱模型模拟海面的形态, 提出一种新的简便算法, 将海面各小波面划分成三角面元, 通过求三角面元的法向量来计算海面发射率, 大大降低了计算的难度。其次, 综合考虑海面自身热辐射及海面反射天空、太阳辐射和探测器与海面之间的大气路径光谱辐射, 建立海面红外辐射模型。最后, 生成海面红外辐射的灰度图像, 并给出在不同探测器天顶角下的仿真结果。通过结果分析, 该方法可以有效地模拟海面红外辐射特性, 仿真的红外图像对于舰船红外仿真研究及红外探测具有重要意义。

关键词:海浪谱; 三角面元; 海面发射率; 红外辐射模型

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2014.07.008

Simulation of the infrared image of sea surface based on the triangular facet of surface segmentation

XIONG Yan-fei¹, SHI Zhi-guang², GUO Jian¹, LI Ji-cheng²

(1. Faculty of Materials Optoelectronics and Physics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China;

2. Key Laboratory of ATR, National University of Defence Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Starting from the normal vector of wavelet planes of the sea surface, the morphology of sea surface was simulated by the ocean wave spectrum model. A new and simple algorithm was put forward, each wavelet plane of sea surface is divided into two triangular facets, and the normal vector of triangular facet is determined to calculate the emissivity of sea surface, which can greatly reduce the computation difficulty. Then, considering the thermal self-radiation of sea surface, the radiation that the sea surface reflects the sky and the sun, and the atmospheric path radiation between the sensor and the sea surface, the infrared radiation model of sea surface was established. Finally, the gray image of the infrared radiation of sea surface was generated, and the simulation results are given under the different zenith angles. The simulation results show that the method can effectively simulate the infrared radiation characteristics of sea surface, and the simulated infrared images are very important for ship infrared image simulation and infrared detection.

Key words: ocean wave spectrum; triangular facet; sea surface emissivity; infrared radiation model

1 引言

作为海面目标的主要背景, 海面的红外辐射特性以舰船红外辐射特性仿真、掠海飞行反舰巡航弹的红外辐射特性研究及杂波背景中目标检测与识别等研究具有重大意义。红外辐射特性的研究以其强烈的需求和特殊的应用背景, 已成为国内外有关研究机构的重要研究领域之一。研究海面红外辐射特

性, 需计算出海面发射率, 由于电磁波在“海水-天空”界面上的反射、折射特性以及受到海面波浪起伏的影响, 海面发射率通常是探测天顶角、海水折射率、海面风速等影响因素的函数, 其计算比较复杂。

基金项目:国家自然科学基金(No. 61101185)资助。

作者简介:熊艳飞(1988-), 女, 硕士研究生, 主要研究领域为红外图像仿真。E-mail: xiongyanfei1218@126.com

收稿日期:2013-10-31; **修订日期:**2013-11-29

对于海面发射率的研究相对来说较少,邢强和任海刚等人计算了海面的发射率^[1],并对海面三种辐射模型的应用进行了分析比较;毛宏霞等计算了海面反射率随着风速的变化^[2],得出了入射角和风速是影响海面反射特性的主要因素。文献中计算海面发射率的方法都比较复杂,难度比较大,本文在海面仿真领域的经验模型上,提出一种新的简便算法,先计算出海面各小波面的法线向量,再利用向量叉积公式计算出探测器方向与海面波面法线之间夹角的余弦,再根据平静海面模型计算海面发射率,最后集成探测器所接收到的海面红外辐射总能量,生成海面红外辐射仿真灰度图像。海面红外图像对于海上目标的红外识别、检测、跟踪与制导等方面具有重要意义。

2 海浪谱模拟海面

海面形态的模拟,采用 Longuet-Higgins 海浪谱理论模型^[3],将海浪看成由不同频率、不同振幅和含有随机相位的简谐波叠加而成的,其数学模型如下:

$$H(x, z, t) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a_{ij} \cos(k_i(x \sin \theta_j + z \cos \theta_j) + \omega_i t + \varphi_{ij}) \quad (1)$$

式中, x 和 z 为水平面上的点, $H(x, z, t)$ 为时间 t 时在平面 (x, z) 位置处的浪高; a_{ij} 表示振幅,是 ω_i 且与 X 轴成 θ_j 角方向传播的组成波的波幅; ω_i 表示组成波的角频率; k_i 表示组成波的角波数; θ_j 是组成波相对于 x 轴的传播方向角; φ_{ij} 为组成波的初始相位角,是 $0 \sim 2\pi$ 之间的随机变量。

3 红外辐射模型

3.1 基于三角面元的海面波面法线计算

根据海浪谱建立海面模型之后,由于海面可以被看作是许多高低起伏的海面小波面组成的,可以将每个小波面看成是由两个三角面元组成的,从而分别计算每个小三角面元的法线向量,从而计算出各个小波面法线。

将小波面看成一平面,先计算小波面各点 (A, B, C, D) 的坐标值,以 A 为起点,分别与各点形成向量,即 $\vec{AB}$, $\vec{AC}$ 和 $\vec{AD}$, 根据三点共面原理,利用向量叉积分别求得各法向量: $\vec{n}_1 = \vec{AB} \times \vec{AC}$, $\vec{n}_2 = \vec{AB} \times \vec{AD}$, 通过求平均得到每个小波面法线向量: $\vec{n} = (\vec{n}_1 + \vec{n}_2)/2$ 。

3.2 海面发射率

海面发射率各矢量关系示意图如图1所示,其中 ω 为探测器视线方向与小波面法线之间的夹角,

给定探测器天顶角 θ_f 可以计算出探测器高低角 φ , 即: $\varphi = \pi/2 - \theta_f$, 探测器视线方向可表示为: $\vec{n}_f = (\cos\varphi \cos\varphi_f, \cos\varphi \sin\varphi_f, \sin\varphi)$, 为了方便计算,可以假设探测器方位角 $\varphi_f = 0$, 因而可以简化为: $\vec{n}_f = (\cos\varphi, 0, \sin\varphi)$ 。根据余弦定理即可求出 $\cos\omega$ 的值,其公式^[4]如下所示:

$$\cos\omega = (\vec{n} \cdot \vec{n}_f) / (|\vec{n}| \cdot |\vec{n}_f|) \quad (2)$$

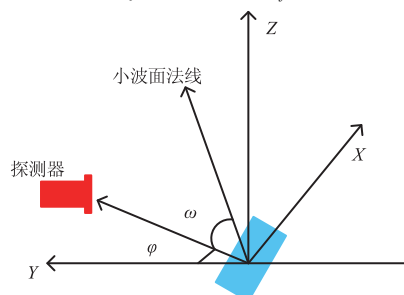


图1 计算海面发射率各矢量关系示意图

Fig. 1 The diagram of sea surface emissivity of each vector

平静海面模型是根据研究者的经验来计算的,忽略海面波浪的影响,将海面作为镜面反射处理,利用经验公式^[5-6]即可求出海面发射率:

$$\varepsilon = 0.98 \times [1 - (1 - \cos\omega)^5] \quad (3)$$

3.3 海面红外波段辐射方程

计算出海面斜率及海面发射率之后,就可以利用太阳、天空和海面小波面的特定几何关系来确定小波面反射的太阳和天空辐射,进而可计算出海面背景的红外辐射值。探测器所接收的海面红外辐射总能量如图2所示。红外辐射总能量计算公式^[7]如下所示:

$$L_t = \tau \cdot (L_{sea} + L_{sky} + L_{sun}) + L_{path} \quad (4)$$

其中, τ 为海面与探测器之间的辐射透过率; L_{sea} 为海面自身光谱辐射; L_{sky} 为天空光谱辐射; L_{sun} 为太阳光谱辐射; L_{path} 为探测器与海面之间的大气路径光谱辐射。

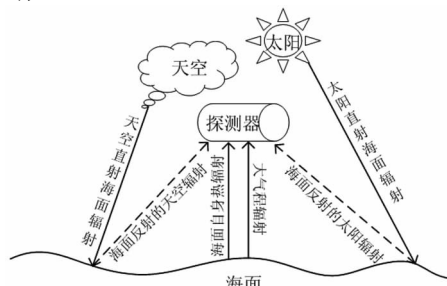


图2 海面红外辐射示意图

Fig. 2 Schematic diagram of infrared radiation of the sea surface

3.3.1 海面自身辐射

海面自身辐射可以根据斯蒂芬-波尔兹曼定律来计算,为简化计算将海面当作黑体处理,海面自身

热辐射可表示为:

$$L_{sea} = \varepsilon' L_{bb}(T_{sea}) = \varepsilon' \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} c_1 / (\lambda^5 \cdot e^{c_2 / (\lambda T_{sea})} - 1) d\lambda \quad (5)$$

其中, ε' 为考虑遮挡效应的海面发射率; c_1 为第一辐射常数; c_2 为第二辐射常数; T_{sea} 为海面热力学温度; $L_{bb}(T_{sea})$ 为海面黑体辐射出射度。

3.3.2 海面对天空反射的辐射

由于天空背景辐射^[8]来自各个方向,若要精确计算海面对天空背景辐射的反射,计算量很大。在精度要求不高的情况下,采用 45° 的天空天顶角计算整个天空背景辐射,可以极大地减小计算量。天空背景辐射亮度随着天顶角的增大而增大,水平方向即海天附近时达到最大值,因为随着天顶角增大,大气辐射路径越长,辐射越强。 $T(\theta_z)$ 为天空温度,天空光谱辐射公式如下所示:

$$L_{sky} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} c_1 / (\lambda^5 \cdot e^{c_2 / (\lambda T(\theta_z))} - 1) d\lambda \quad (6)$$

3.3.3 海面对太阳反射的辐射

由于给定时刻的太阳直射方向是确定的,从而可以利用太阳光的入射方向矢量计算出太阳光谱辐照度为 L_{sun_A} ,则在某一波段内海面所接收到的太阳辐射亮度^[8]为:

$$L_{sun} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{sun_A} d\lambda \quad (7)$$

3.3.4 探测器与海面间大气路径光谱辐射

红外辐射到达探测器之前,必须经过大气传输介质,就会受到由大气对红外辐射的吸收和散射等作用引起的衰减。大气路径光谱辐射计算公式^[9]如下所示:

$$L_{path} = (1 - \tau) \cdot L_{bb}(T_{air}) \quad (8)$$

其中, T_{air} 是水平线上的辐射温度,等同于空气周围环境温度。 $L_{bb}(T_{air})$ 由黑体辐射公式计算。

4 仿真结果分析

仿真条件:波段 $8 \sim 12 \mu\text{m}$,探测器天顶角为 45° ,探测器方位角为 0° ,太阳天顶角为 70.9° ,太阳方位角为 127° ,探测器距海面距离为 10 km ,海面平均温度为 200 K ,海面风速为 9 m/s 下,图 3 是探测器天顶角的取值分别为 15° 、 45° 、 65° 及 90° 时,海面红外成像仿真灰度图像随探测器天顶角变化的情况。

将计算得到的图像用 256 级灰度级表示探测器像平面上接收到的辐射总能量,横坐标轴和纵坐标轴代表图像像素,色标上的数值代表的是辐射能量,单位 $(\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Sr}))$ 。红外图像是海面红外辐射的

反映,其灰度分布对应于海面的温度和发射率分布,灰度的大小对应着海面红外辐射强度。从图 3(a)、(b)、(c) 和 (d) 中可以看出,随着探测器天顶角的增加,海面中某一部分灰度值越大,图像变亮,则海面红外辐射总能量也是随之增加。图 3(a)、(b) 和 (c) 中图像灰度变化不明显,主要原因是在探测器天顶角小于 65° 时,海面发射率基本上保持不变;当大于 65° 时,海面发射率随着天顶角的增大急剧下降。

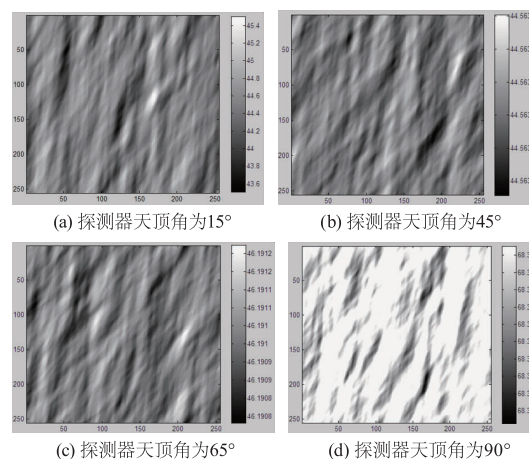


图 3 海面红外成像仿真图像

Fig. 3 Simulation of sea surface images in the infrared

5 结论

采用海浪谱理论模型建立海面,根据三角面元算法简化海面发射率的计算,集成海面自身的热辐射、海面对太阳与天空辐射的反射辐射以及海面与探测器之间的大气路径辐射,得到探测器接收的总的海面红外辐射能量,最终生成 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 红外波段的海面仿真灰度图像。海面是对海上目标进行红外探测识别的重要背景,海背景红外辐射特性建模研究在海洋遥感、精确制导和目标识别等领域有极其重要的作用。

参考文献:

- [1] XING Qiang, REN Haigang. Study on directional emissivity of rough sea surface[J]. Laser & Infrared, 2006, 36(4): 2-6. (in Chinese)
邢强,任海刚. 漫射海面的方向发射率研究[J]. 激光与红外, 2006, 36(4): 2-6.
- [2] MAO Hongxia. The study of the reflection feature of the sea[J]. Journal of East China Normal University: Natural Science, 2000, 9(3): 3-6. (in Chinese)
毛宏霞. 海面反射特性研究[J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2000, 9(3): 3-6.
- [3] YANG Huaiping, SUN Jiaguang. Wave simulation based on ocean wave spectrums[J]. Journal of System Simula-

- tion, 2002, 4(9): 1175 – 1178. (in Chinese)
- 杨怀平, 孙家广. 基于海浪谱的波浪模拟[J]. 系统仿真学报, 2002, 4(9): 1175 – 1178.
- [4] LIU Yunfei, WANG Fuheng. Theoretical calculation of the radiance of the infrared sea and sky background radiation [J]. Systems Engineering and Electronics, 1990, 1: 28 – 35. (in Chinese)
- 刘云飞, 王福恒. 红外海天背景辐射亮度的理论计算[J]. 系统工程与电子技术, 1990, 1: 28 – 35.
- [5] ZHANG Sijiang, BAI Yudong, LI Zhiguo. Infrared scene simulation of sea wave [J]. Laser & Infrared, 2013, 43(6): 636 – 638. (in Chinese)
- 张思将, 白玉栋, 李志国. 动态海面红外视景仿真研究[J]. 激光与红外, 2013, 43(6): 636 – 638.
- [6] I Wilf, Y Manor. Simulation of sea surface images in the infrared [J]. Appl. Opt. 1984, 23(18): 3174 – 3180.
- [7] JIANG Jin, SHEN Guotu, YANG Baocheng. Simulation of sea surface images in the infrared in the wave band of 3 – 5 micron [J]. Journal of East China Normal University: Natural Science. 2003, 4: 49 – 54. (in Chinese)
- 姜瑾, 沈国土, 杨宝成, 等. 海面 3 – 5 μm 红外热像的模拟[J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2003, 4: 49 – 54.
- [8] LOU Shuli, LÜ Junwei, ZHOU Xiaodong. The calculation of infrared radiation of rough sea surface [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2011, 31(4): 196 – 199. (in Chinese)
- 娄树理, 吕俊伟, 周晓东. 粗糙海面的红外辐射计算[J]. 弹箭与制导学报, 2011, 31(4): 196 – 199.
- [9] F Schwenger, E Repasi. Sea surface simulation in the infrared modeling and validation [C]. Proceeding of SPIE, 2006.