

动态海面红外视景仿真研究

张思将,白玉栋,李志国

(中国人民解放军91404部队,河北秦皇岛066000)

摘要:动态海面红外视景仿真在战场红外视景重构以及红外跟踪制导装备研究方面有着极其重要的作用。为提高海面红外仿真效果,采用 Gerstner 波进行海浪波面建模,采用基于 PM 谱和 SWOP 方向扩展函数的海浪方向谱进行波面参数计算,根据海面辐射特性进行海面红外辐射效果模拟,实现了动态海面高逼真度红外视景仿真。仿真结果表明,该方法符合实际情况,具有较高的应用价值。

关键词:视景仿真;海浪模拟;红外;Gerstner 波;海浪谱

中图分类号:TP391 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2013.06.009

Infrared scene simulation of sea wave

ZHANG Si-jiang, BAI Yu-dong, LI Zhi-guo

(Unit 91404 of PLA, Qinhangdao 066000, China)

Abstract: Infrared scene simulation of sea wave plays a very important role in battlefield situation visualization and research of infrared search and track systems. To improve infrared scene simulation effect of sea wave, sea wave surface was modeled by using Gerstner wave, and wave surface parameters were computed by directional ocean wave spectrum based on PM and SWOP direction expanding equation. According to sea wave surface infrared radiation characteristics, infrared radiation effect was simulated, and high fidelity infrared scene simulation of sea wave was achieved. The simulation results show that this method has a high application value in some areas.

Key words: scene simulation; ocean wave simulation; infrared; Gerstner wave; ocean wave spectrum

1 引言

动态海面红外视景仿真主要进行三维海浪动态波动模拟和海面红外辐射效果仿真方面的研究,作为目标特性分析与建模研究的重要方向之一,对战场红外视景重构以及红外跟踪制导装备研究有着极其重要的作用。

三维海浪动态波动模拟从方法上一般分为两类^[1]:一类是基于求解流体 N-S 方程的物理建模方法,另一类是通过参数曲面拟合计算波面高度场的波面造型建模方法。其中,前一种方法求解过程较为复杂,难以达到实时性要求;后一种方法应用较为广泛,相应的实际计算算法也出现多种,如基于随机三角函数叠加、反演海浪频谱合成等算法。

本文主要采用 Gerstner 波进行海浪波面建模,

采用基于 PM 谱和 SWOP 方向扩展函数的海浪方向谱进行波面参数计算,根据海面辐射特性进行海面红外辐射效果模拟,实现了动态海面红外视景仿真。本文最后的仿真结果表明,该方法模拟效果逼真,具有较高的应用价值。

2 基于 Gerstner 波的海浪模型

经典的 Gerstner 模型从动力学的角度描述了海浪各质点的运动,于 1986 年被 Fournier 首次引入计算机图形图像领域,其后被广泛采用^[2]。Gerstner 波函数为^[3]:

作者简介:张思将(1980-),男,硕士,工程师,主要研究方向为光电测量。E-mail:zhangsijiang@126.com

收稿日期:2012-11-27;修订日期:2012-12-14

$$P(y,t) = \sum a_{i,j} \sin[k_i x \cos(\theta_p + \theta_j) + k_i z \sin(\theta_p + \theta_j) - \omega_i t + \varepsilon_{i,j}] \quad (1)$$

其中, $a_{i,j}$ 为子波波幅; θ_p 为风速方向; θ_j 为子波与风速方向的夹角; k_i 为子波波数; ω_i 为子波波频; $\varepsilon_{i,j}$

$$P(x,z,t) = \left(\begin{matrix} x + \sum (Q_i a_{i,j} \times k_i x \cos(\theta_p + \theta_j) \times \cos[k_i x \cos(\theta_p + \theta_j) + k_i z \sin(\theta_p + \theta_j) - \omega_i t + \varepsilon_{i,j}]) \\ z + \sum (Q_i a_{i,j} \times k_i z \sin(\theta_p + \theta_j) \times \cos[k_i x \cos(\theta_p + \theta_j) + k_i z \sin(\theta_p + \theta_j) - \omega_i t + \varepsilon_{i,j}]) \end{matrix} \right) \quad (2)$$

其中, $Q_i = Q/(\varphi_i A_i)$, $Q \in 0 \sim 1$, 为波形控制参数。通过控制 Q , 即可以得到完全平滑的波到最尖锐的波。由于风是引起海浪的最常见的原因, 并且仿真海浪环境一般为深水波, 因此将海面简化为风浪深水波。根据线性波理论, 对深水波^[4]有 $k_i = \omega_i^2/g$ 。

海浪方向谱描述了海浪内部能量相对于频率和方向的分布, 一般由频谱 $S(\omega)$ 和方向扩展函数 $D(\omega, \theta)$ 组成:

$$S(\omega, \theta) = S(\omega) D(\omega, \theta) \quad (3)$$

其中, θ 为海浪子波与风向的夹角。对于式(1)中的每一个分量, 有:

$$S(\omega, \theta) = \frac{1}{\Delta\omega \times \Delta\theta} \sum_{\omega}^{\omega+\Delta\omega} \sum_{\theta}^{\theta+\Delta\theta} \frac{1}{2} a_{i,j}^2 \quad (4)$$

根据式(4)即可求出每个分量对应的子波波幅 $a_{i,j}$ 为:

$$a_{i,j} = \sqrt{2S(\omega_i) G(\omega_i, \theta_j) \Delta\omega \Delta\theta} \quad (5)$$

3 海浪方向谱

由公式(3), 海浪方向谱包括频谱和方向扩展函数, 通过组合不同的频谱和方向扩展函数可获得不同的方向谱。

3.1 海浪谱

海浪谱提出于 20 世纪 50 年代, 它将海浪运动视为平稳随机过程, 具有平稳性和各态历经性, 通过随机过程理论讨论各种情况下海浪运动的统计性质。目前常用的海浪谱有 Neumann 谱^[5]、P-M 谱^[1,6]、JONSWAP 谱^[7-8]、文氏谱等, 这些海浪谱都是以风要素为参量, 用以描述海面风浪状态。其中, 又以 P-M 谱较为常用。

Pierson 和 Moscowitz 于 1964 年对在北大西洋充分成长状态下的风浪记录进行谱估计, 将得到的 54 个谱依风速分成 5 组并将各组谱进行了平均, 得到 P-M 谱有因次的拟合式:

$$S(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} \exp\left[-\beta \left(\frac{g}{U\omega}\right)^4\right] \quad (6)$$

式中, $\alpha = 8.1 \times 10^{-3}$, $\beta = 0.74$, U 为海面上 19.5 m 高处的平均风速; $g = 9.8 \text{ m/s}^2$, 为重力加速度。由 $\frac{\partial S(\omega)}{\partial \omega} = 0$, 可得频谱的峰值频率为 $\omega_p = 8.565/U$ 。

P-M 谱是以风速为参量的充分成长状态的海浪频谱, 与其他谱相比, P-M 谱数据基础和准确性

为子波初始相位。

为了更逼真模拟海浪, 形成较尖的浪头和较宽的浪槽, 对 Gerstner 波的 (x, z) 坐标进行修正, 加入控制波陡度的参数:

较好, 而且符合 Fourier 谱的定义, 因此被更为广泛地采用。

3.2 方向扩展函数

目前, 常用的方向扩展函数主要有 ITTC^[9-10], ISSC^[7], SWOP^[7] 和 Donelan^[6] 等方向扩展函数。其中, 又以 SWOP 方向扩展函数较为常用。

SWOP 方向扩展函数公式如下:

$$D_{\text{swop}}(\omega, \theta) = \frac{1}{\pi} [1 + p \cos(2\theta_j) + q \cos(4\theta_j)], \quad (|\theta_j| \leq \pi/2) \quad (7)$$

其中:

$$p = 0.5 + 0.82 \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^4\right]$$

$$q = 0.32 \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^4\right]$$

通过将式(6)、式(7)代入式(3)组成海浪方向谱, 根据式(5)计算出子波波幅 $a_{i,j}$, 并将其代入式(1)、式(2), 即可计算出三维海浪动态顶点数据。

4 海面红外辐射效果模拟

海平面可近似为一个非黑体表面, 它的红外辐射是由海面本身的红外辐射和对环境辐射的反射两部分组成。红外传感器获得的海面辐射量包括: 海面自发红外辐射量, 对太阳(或月亮)、天空和云层等红外辐射的反射量, 以及从传感器到海面路径大气红外辐射量^[11-12]。

当天空无云, 并且不考虑太阳光照射效果时, 则整个辐射量为:

$$L_t = \tau(\varepsilon \cdot L_{bb}(T_{\text{sea}}) + \rho \cdot L_{\text{sky}}) + L_A \quad (8)$$

式中, τ 为海面到传感器间红外辐射透过率; ε 为海面红外辐射的发射率; L_{bb} 为黑体辐射量; T_{sea} 为海水温度; ρ 为海面红外辐射的反射率; L_{sky} 为天空在海平面上辐射值; L_A 为传感器到海面的大气路径辐射值。

根据 Kirchoff 模型, 在水天分界处有:

$$\varepsilon + \rho = 1 \quad (9)$$

由于海面发射率的方向异性, 根据 Wilson 公式:

$$\varepsilon(\theta_f) = 0.98 \cdot [1 - (1 - \cos\theta_f)^5] \quad (10)$$

根据 Saunders 研究, 晴朗天空辐射量可近似为半经验表达式:

$$L_{\text{sky}}(\mu) = A - B \cdot e^{-C(Z-1)} \quad (11)$$

式中, μ 为天空辐射在海面反射方向的天顶角; $A, B,$

C 为与大气温度相关的参数; Z 为大气质量。

根据式(8)~式(11)可计算出海面质点到探测器的辐射量,结合探测器效应,即可实现海面红外辐射效果的模拟。

5 仿真效果

根据本文算法通过仿真计算,可实现不同风速、风向和温度下的动态海面红外效果模拟。仿真视景如图1所示。

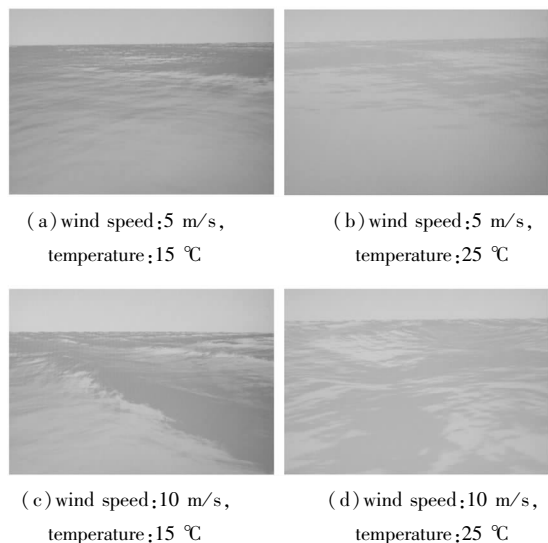


图1 动态海面红外仿真效果

Fig. 1 infrared simulation effect of sea wave

6 结论

本文采用基于 Gerstner 波进行海面模型建模,采用基于 PM 谱和 SWOP 方向扩展函数的海浪方向谱进行波面参数计算,实现以风速为参数动态海面模拟;通过分析海面辐射原理,建立海面辐射量计算方法,实现了海面红外辐射效果的模拟。论文仿真结果符合实际情况,效果逼真,具有较高的应用价值。

参考文献:

- [1] Luo Yu, Zhong Luo, et al. 3D wave simulation based on spectrum of ocean waves[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2008, 32(2): 323-326. (in Chinese)
罗玉,钟路,等.基于海浪谱的3D海浪模拟[J].武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2008,32(2): 323-326.
- [2] Nie Weidong, Kang Fengju, et al. Linear ocean wave simulation[J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(5): 1037-1039. (in Chinese)
聂卫东,康凤举,等.基于线性海浪理论的海浪数值模拟[J].系统仿真学报,2005,17(5):1037-1039.
- [3] Yao Yong, Wang Xiaoqin. GPU gems-programming techniques, tips, and tricks for real-time graphics [M]. Beijing: Posts & Telecommunications Press, 2006: 8-10. (in Chinese)
姚勇,王小琴. GPU 精粹—实时图形编程的技术,技巧和技艺[M].北京:人民邮电出版社,2006:8-10.
- [4] Xu Bin. The research and realization of animation the ocean wave [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2006: 19-23. (in Chinese)
徐彬.海洋波浪的动态可视化研究与实现[D].青岛:中国海洋大学,2006:19-23.
- [5] Lin Qiaomu, Zhang Yonggang, et al. Visual simulation of ocean wave based on ocean wave spectrum [J]. Ocean Technology, 2010, 29(1): 109-111. (in Chinese)
林乔木,张永刚,等.基于海浪谱的海浪视景仿真技术[J].海洋技术,2010,29(1):109-111.
- [6] Zhu Jiayong, Zhou Bo, et al. Sea wave simulation based on GPU [J]. Applied Energy Technology, 2009, 4: 48-51. (in Chinese)
朱加勇,周波,等.基于GPU的海浪仿真[J].应用能源技术,2009,4:48-51.
- [7] Hou Xuelong, Shen Peizhi, et al. Method of ocean wave synthesis based on directional spectrum [J]. Journal of System Simulation, 2010, 22(1): 130-134. (in Chinese)
侯学隆,沈培志,等.基于方向谱的海浪合成方法[J].系统仿真学报,2010,22(1):130-134.
- [8] Wang Baolong, Kang Fengju, et al. A 3D random ocean wave real time simulation method [J]. Computer Simulation, 2008, 25(9): 208-210. (in Chinese)
王宝龙,康凤举,等.三维随机海浪实时模拟方法研究[J].计算机仿真,2008,25(9):208-210.
- [9] Liu Jie, Zou Beiji, et al. Modeling gerstner waves based on the ocean wave spectrum [J]. Computer Engineering & Science, 2006, 28(2): 41-44. (in Chinese)
刘洁,邹北骥,等.基于海浪谱的 Gerstner 波浪模拟[J].计算机工程与科学,2006,28(2):41-44.
- [10] Hou Xuelong, Huang Qilai, et al. Ocean wave real-time simulation method based on FFT [J]. Computer Engineering, 2009, 35(22): 256-258. (in Chinese)
侯学隆,黄启来,等.基于FFT的海浪实时仿真方法[J].计算机工程,2009,35(22):256-258.
- [11] Jiang Wangqiu, Zhao Yunfeng, Yan Shuiping. Modeling and open GL simulation of sea surface infrared images [J]. Electronics Optics & Control, 2009, 16(11): 19-21. (in Chinese)
蒋万秋,赵云峰.海面背景红外图像建模与 OpenGL 仿真[J].电光与控制,2009,16(11):19-21.
- [12] Ren Haigang, Chen Hanping, et al. Sea surface emissivity models in infrared image simulation [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(1): 36-38. (in Chinese)
任海刚,陈汉平,等.红外仿真中的海面发射率模型[J].红外与激光工程,2007,36(1):36-38.