

中波段动态海洋红外视景仿真

王彦¹, 谢晓方¹, 孙海文¹, 杨健¹, 徐从安²

- (1. 海军航空工程学院 兵器科学与技术系, 山东烟台 264001;
2. 海军航空工程学院 电子信息工程系, 山东烟台 264001)

摘要: 大面积动态海洋红外视景仿真是三维红外海战场环境仿真的重要内容, 具有重要的应用价值。引入法线贴图, 采用 GPU 着色器技术, 提出了一种中波段动态海洋视景的生成方法, 实现了逼真的红外海面视景实时仿真。基于矩形平面构建海洋模块, 利用海面纹理的法线图, 在 GPU 着色器中计算海面像素的辐射特性、辐射强度和方向。采用了一种基于纹理坐标操作的动态波浪模拟着色器算法实现海面法线的动态变化。提出了基于视点和视场检测的海洋模块调度策略以提高系统渲染效率。实验结果表明, 该方法生成的红外海面视景渲染速度可达到 80 帧/s 以上, 满足实时仿真的要求, 并能逼真地仿真中波段海面的“光斑”现象。

关键词: 红外海洋模块; 着色器编程; 红外特性; 法线图; 光斑现象

中图分类号: TP79; P407 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)12-3604-06

Simulation of dynamic infrared sea scene in mid band

Wang Yan¹, Xie Xiaofang¹, Sun Haiwen¹, Yang Jian¹, Xu Cong'an²

- (1. Department of Ordnance Science and Technology, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China;
2. Department of Electronic and Information Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: The dynamic simulation of IR sea scene with large area is an important part of simulation of 3D sea battlefield environment, which has great application value. Using the GPU shader technique, a simulation method of dynamic infrared sea scene was presented, which introduced texture of normal map, and achieved a lifelike sea infrared real-time simulation. Constructing the infrared sea module with rectangular plane, and the radiation character, radiation intensity and direction of sea surface with normal map in GPU shader were calculated. The dynamic wave simulational shader algorithm based on texture operation was used to realize the dynamic change of normal of pixel. In order to improve the real-time rendering efficiency, view point based scheduling and view field detecting technique were proposed. The experiment shows that the rendering speed of infrared sea scene created by the method can achieve 80 frame/s, meets the requirement of real-time simulation, and can simulate the effect of facula on mid band sea surface.

Key words: infrared sea module; shader programming; infrared characteristic; normal map; effect of facula

收稿日期: 2015-04-09; 修订日期: 2015-05-10

基金项目: 国家自然科学基金(61471383)

作者简介: 王彦(1982-), 男, 工程师, 博士生, 主要研究方向为红外技术、虚拟现实技术。Email: wangyan101712@163.com

导师简介: 谢晓方(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为火力控制、虚拟现实、红外技术。

0 引言

海洋的红外视景仿真是红外导引头战场环境仿真研究中的重要领域之一。美国在红外海洋仿真领域起步较早并且技术成熟,如美国空军研究室军品管理局(AFRL/MN)负责开发的 IRMA 模型^[1];密执安环境研究所(ERIM)研发的“船只和海洋表面图像模拟包”。MultiGen_Paradigm 公司的 Vaga Prime 软件的红外传感器模块可逼真的生成海洋实时红外场景并已经广泛应用于大规模红外视景仿真中。

近年来,国内学者在红外视景仿真方面做了大量工作^[2-4]。任海霞等^[5]研制了实时海面舰船红外热像仿真平台(RIS)。王学伟等^[6]采用从红外灰度数据库中读取灰度并使用 OpenGL 产生动画的方法模拟飞机的动态红外效果。石坤、郝颖明^[7]利用 2D FFT 技术计算海面的几何模型数据,并使用 Geomipmap 技术进行优化,使用平静海面模型生成了动态红外海面。

实际上,从视觉角度上讲,在真实的海洋红外视景成像中,海面波浪的几何特征并不明显。文中提出了一种新的动态红外海洋视景生成方法,实现了高效、逼真的海洋红外视景仿真。

1 海面红外辐射模型与辐射特性

1.1 海面红外辐射模型

海面的红外辐射主要包括海洋的自身辐射和海面对环境辐射的反射。将海面视为灰体,则海面自身辐射可由公式(1)计算。

$$I_{\text{self}} = \frac{\varepsilon}{\pi} E_b(T) \quad (1)$$

式中: $E_b(T)$ 为温度为 T 的黑体辐照度; ε 为海面发射率。环境辐射主要考虑天空辐射和太阳辐射。由于天空辐射方向来自四面八方,文中采用参考文献[8]的方法简化天空辐射计算,如公式(2)所示。

$$I_{\text{sea-sky}} = \frac{1}{\pi} \bar{\rho} E_{\text{sky}} \quad (2)$$

式中: $\bar{\rho}$ 为海面平均反射率; E_{sky} 为天空辐照度,可由天空辐亮度经半球积分得到。太阳辐射是自然界中最强的辐射源,海面反射的太阳辐亮度可由公式(3)计算。

$$I_{\text{sea-sun}} = \rho I_{\text{sun}} \quad (3)$$

式中: ρ 为海面反射率; I_{sun} 为海面元接收的太阳入射辐亮度。这样,探测器实际接收的海面红外辐亮度如公式(4)所示,其中 τ 为大气的透过率。

$$I_{\text{sea}} = \tau(I_{\text{self}} + I_{\text{sea-sky}} + I_{\text{sea-sun}}) \quad (4)$$

1.2 海面的红外辐射特性

海面红外辐射特性(发射率和反射率)对海面红外辐亮度计算影响较大。实际中,海浪的起伏、风速等因素都会对海面辐射特性产生影响。在海面作为目标背景的情况下,这种影响不能忽略^[9],此时漫反射灰体模型和平静海面模型等简化模型是不够准确的^[10]。文中采用 Cox-Munk 海面反射率模型^[11],如图 1 所示。

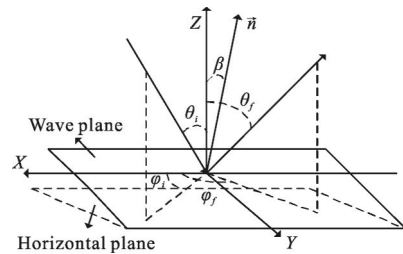


图 1 海面微面元反射

Fig.1 Reflection of surface element of the sea

图 1 中, θ_i 与 θ_r 分别是入射和反射天顶角, ϕ_i 和 ϕ_r 分别为入射和反射方位角。 \vec{n} 为海面面元法向矢量; β 为面元与水平面夹角。根据 Cox-Munk 模型,海面微元在 x 和 y 方向的斜率分别表示为:

$$s_x = -\tan \beta \cos \phi_i, s_y = \tan \beta \sin \phi_i \quad (5)$$

式中: β 是微面元和水平面夹角,数值上等于微面元法线与水平面法线的夹角; ϕ_i 为入射的方位角。一级近似的 s_x 和 s_y 满足

$$P = (\pi \sigma^2)^{-1} \exp\left[-\frac{s_x^2 + s_y^2}{\sigma^2}\right] \quad (6)$$

微面元的 Cox-Munk 反射率可表示为:

$$\rho(\vec{n}_i, \vec{n}_r) = \frac{1}{2}(\rho_{\perp} + \rho_{\parallel})PS^* \cdot \frac{1 + \cos \theta_i \cos \theta_r + \sin \theta_i \sin \theta_r \cos(\phi_r - \phi_i)}{(\cos \theta_i + \cos \theta_r)^3} \quad (7)$$

式中: ρ_{\perp} 、 ρ_{\parallel} 分别为水平极化和垂直极化时的 Fresnel 反射系数,可由 Fresnel 反射定理求得; θ_i 、 θ_r 为入射和反射方向的天顶角,且反射光线在面元上遵守 Fresnel 定律; ϕ_r 为反射方位角; S^* 为遮蔽效应系数。公式(7)中

$$2\sigma^2=0.003+0.00512w \quad (8)$$

$$\rho_{\perp}=\frac{(q-\cos\chi)^2+p^2}{(q+\cos\chi)^2+p^2} \quad (9)$$

$$\rho_{\parallel}=\frac{[(n^2-k^2)\cos\chi-q]^2+(2nk\cos\chi+p)^2}{[(n^2-k^2)\cos\chi+q]^2+(2nk\cos\chi+p)^2} \quad (10)$$

$$p^2=\frac{1}{2}[-(n^2-k^2)+\sin\chi+\sqrt{4n^2k^2+(n^2-k^2)\sin^2\chi}] \quad (11)$$

$$q^2=\frac{1}{2}[n^2-k^2-\sin\chi+\sqrt{4n^2k^2+(n^2-k^2)\sin^2\chi}] \quad (12)$$

$$S^{\circ}=2\{1+\operatorname{erf}(v)+(v\sqrt{\pi})^{-1}\exp(-v^2)\}^{-1} \quad (13)$$

$$v=\sigma^{-1}\tan\eta \quad (14)$$

$$\operatorname{erf}(v)=\frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^v\exp(-t^2)dt \quad (15)$$

上述公式中, n 和 k 为海水折射率的实部和虚部; χ 为入射光方向与海面微元的夹角; σ 为坡度标准差。对于 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段, n 取 1.364 4, k 取 0.074 7; η 为探测器的高低角。在风速 $w\leq 13\ \text{m/s}$ 时, Cox-Munk 反射率模型具有较高的精度^[12]。

显然, Cox-Munk 反射率函数是双向反射分布函数, 在入射辐射已知时, 它与反射天顶角 θ_r 、方位角 ϕ_r 和微面元与水平面的夹角 β 有关。由于 θ_r 、 β 角都可据微面元法线求解, 因此海面微元的辐射特性又可认为与面元的法线方向有关。由于海面存在动态起伏, 面元的法线方向是动态变化的, 这将动态改变面微元的辐射特性。因此, 精确计算海面辐射必须考虑海面微元的法线方向变化的影响。

将海洋作为不透明体, 对于每一个面元, 其发射率可由公式(16)计算:

$$\varepsilon=1-\rho \quad (16)$$

2 海洋红外场景生成

2.1 动态红外海面模块生成

国内研究文献多采用计算机生成海面几何波形, 进而根据红外理论计算并渲染面元的红外灰度来实现海面红外仿真的。这类方法将生成大量的三角形, 且海面模型越精细, 三角形数量越多。对于大面积海洋仿真, 这将产生较大的系统开销。实际上, 从计算机视觉角度上讲, 人眼对带有凹凸特性的海面纹理更为敏感。文中基于法线图技术和 GPU 着色器编程, 实现了动态的中波段海洋红外视景仿真。

法线图(normal map)是凹凸贴图^[13](Bump map)的

一种, 最早由 Jim blinn 于 1978 年提出。它的每个像素中直接存储了对应像素的法线向量值(如图 2 所示), 在视觉上能够较好地表现物体表面的凹凸起伏状态和程度。基于海面法线图, 采用着色器编程动态计算海面的红外辐射特性和进入探测器视景的辐亮度值, 并实时渲染。海面几何结构采用矩形平面, 大大减少三角形数量。着色器基于 GPU 运算, 可大大提高视景的渲染效率。

海面的波浪起伏对应了海面某点法线的动态改变。这种变化改变了海面微元的辐射特性和方向, 最终导致探测器接收的辐射强度发生变化, 进而产生红外波浪效果。

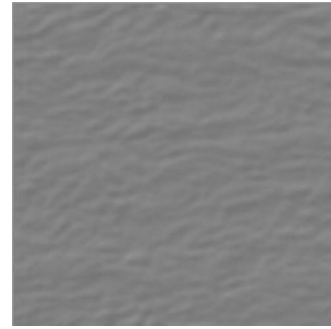


图 2 海面法线图

Fig.2 Normal map of sea surface

提出了一种基于法线图的动态波浪模拟着色器算法实现了红外海面的动态仿真, 其核心思想是: 在顶点着色器的一次访问中, 根据一个每帧更新的控制变量, 同时计算两组不同的纹理坐标。如果根据这两组坐标, 以法线图作为纹理, 每帧分别进行渲染, 海面纹理将产生向两个方向持续的相对运动效果(实际不渲染); 将这两组纹理坐标作为易变变量(varying)传给片元着色器, 在片元着色器中, 使用 2D 纹理采样器, 根据这两组纹理坐标采样法线图像素, 并进行混叠计算, 最终结果作为海面像素的法线向量; 根据海面元的法线向量和红外辐射理论计算像素的红外辐射特性、方向和辐亮度, 最终得到海面像素的红外灰度。需要注意的是, 由于法向量的取值范围是 $[-1, 1]$, 而法线图像素值(RGB)的范围是 $[0, 1]$, 因此, 在采样时必须进行数值转换, 转换关系为:

$$\text{norsample}_i=2x_i-1, i=0, 1, 2 \quad (17)$$

式中: x 为法线图像素的 RGB 值。根据以上算法, 即可生成动态的红外海面矩形模块。

2.2 红外海面模块的场景调度

在工程仿真中,可能需要生成较为广阔的红外海面视景。对于单个海面模块,为保证海面仿真的尺度和逼真度,海面越大,需要的海面纹理尺寸也越大,这将给着色器渲染带来较大的计算负荷,进而可能影响仿真的实时性。因此在工程中,面积较大海面的可由多个矩形海面模块拼接生成。为进一步减小仿真的系统开销,制定了一种海面模块的调度策略,具体如下:

(1) 当探测器水平运动或探测器视线方向存在水平旋转时,海面在视场中的面积不变,此时要对模块进行位移变换。为海洋模块添加 transform 节点,并实时检测视点和场景中心点的位置。根据位置的变化,通过计算转移矩阵更新 transform 节点,从而实现模块位移。

(2) 当探测器高度发生改变或探测器视野存在俯仰旋转量时,海面在视场中的面积可能发生变化。此时除了需要对模块进行位移变换外,还应实时检测视场边界是否超出海洋模块边界。一旦视场边界超出模块边界,则以当前模块为中心在其周围添加模块进行海面扩展。为防止扩展的模块在渲染时“突然出现”,在边界检测时,阈值设置应该有提前量,即视场边界快要超出模块边界时就进行模块扩展。扩展后的模块同样根据视点和场景中心点的位置变化进行位移变换。

模块调度的流程图如图 3 所示。当视场边界小于边界检测阈值时,使用 RemoveChild()命令销毁扩展模块。

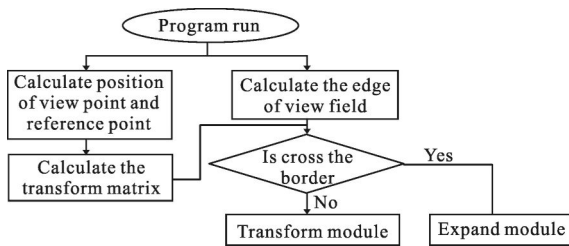


图 3 模块调度流程图

Fig.3 Flow chart of module scheduling

3 海面太阳“光斑”仿真

对于中波段海面,由于波浪面的反射和散射,太阳辐射在海面的一定区域可能形成“光斑”。而由于太阳的长波辐射基本被大气吸收,在长波红外视景

中,这种现象并不显著^[14]。“光斑”多呈不规则圆形,中间灰度高而均匀,边缘亮点散布并呈逐渐稀疏趋势,亮点随波浪起伏而闪烁,这种闪烁又称为“鱼鳞波”。“光斑”和“鱼鳞波”现象在中波段弹载红外探测器成像中比较普遍,对目标识别影响很大,因此在海战场红外视景仿真中,应考虑这种海面对太阳辐射反射作用的影响。

由于三维红外视景仿真以探测器的实时位置为视点,因此在仿真太阳“光斑”时,必须考虑太阳光反射方向与视线方向的关系。考虑到红外探测器视景仿真的动态性要求,同样基于着色器编程实现海面的“光斑”仿真。

在 GLSL 着色语言中,光源向量在视景空间中定义,不随视景角度和视点位置变化而变化。而在三维场景中,太阳光可视为固定方向的平行光源,是在世界坐标下定义的。考虑到法线图存储的法线向量是切线空间向量,在辐射方向及其与视线的夹角计算时,太阳光线以及视线方向都应转换到切线空间。在世界坐标下定义太阳的光源位置,并将其作为一致变量(uniform)传给顶点着色器和片元着色器。在顶点着色器中将其转换为切线空间向量,并作为易变变量(varying)传给片元着色器进行反射向量计算。在片元着色器中计算像素的辐射特性时,太阳光向量作为入射光向量不进行坐标系转换,同时反射向量应转换到世界坐标系中。根据计算机视觉原理,当太阳反射光方向与视线方向夹角小于 1/2 视场宽时,认为太阳反射进入探测器视场。“光斑”的动态仿真效果如图 4 所示。

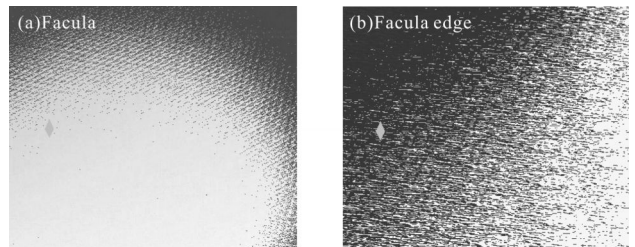


图 4 光斑仿真

Fig.4 Simulation of facula

4 仿真实验

对海面红外视景的渲染速度和仿真效果进行了

仿真评价。仿真验证程序基于 OSG3.0 引擎开发,硬件平台为: Intel Core 2(2.4 GHz), 内存 2 GB, 显卡为 NVIDIA GeForce 8800 GT(1 GB)。

表 1 给出了探测器静止和运动时的系统帧速对比, 显然帧速满足实时性要求, 但探测器运动时的帧速要小于静止时的帧速。主要原因是探测器运动时将进行海洋模块的调度计算, 这会消耗一部分系统资源。

表 1 海面背景渲染帧速

Tab.1 Frame rate of sea surface rendering

Detector state	Band/ μm	Frame rate/frame \cdot s $^{-1}$
Static	3-5	84-86.8
Moving	3-5	82.8-85.9

图 5 给出了红外海面的波浪仿真效果, 并引入舰艇为波浪尺度的参照物。图 5 中, 探测器高度为 50 m。根据图 5, 海面的波浪效果较为逼真。

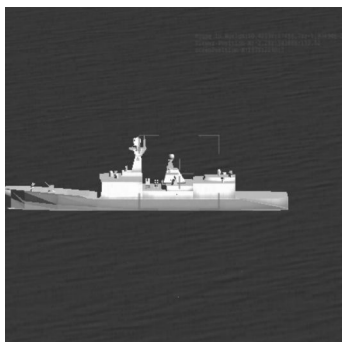
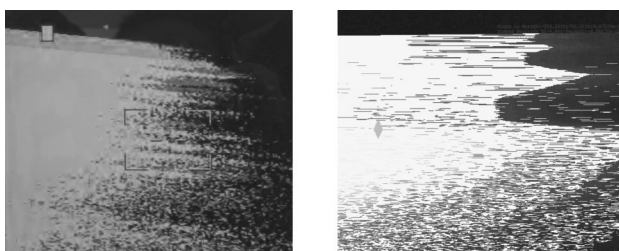


图 5 红外海洋波浪

Fig.5 Wave of sea surface

参照某次实弹射击时的弹载红外探测器视频, 行了海面“光斑”仿真, 仿真条件与该次实弹射击条件一致: 太阳天顶角 82° , 方位角(正北为准, 逆时针为正向) 63.5° 。图 6 给出了相同俯仰角和航向角条件



(a) 真实视景光斑

(b) 仿真视景光斑

(a) Real facula of sea scene

(b) Simulation facula of sea scene

图 6 光斑仿真效果

Fig.6 Results of facula simulation

下, 海面真实“光斑”和仿真“光斑”效果的对比。由于弹载探测器视场较窄, 视景只能显示“光斑”的右半部分。

根据图 6, 仿真“光斑”区域面积与出现的位置与实际情况接近, 形状相似。“光斑”中心位置区域为“实心高亮”区域, “鱼鳞波”部分位于“光斑”边缘, 这与真实情况相符。表 2 给出了仿真海面与真实海面的局部方差相似度^[15]、结构相似度(SSIM)^[16]及相关系数评价。其中, 局部方差相似度可评价图像细节结构信息的相似程度。结构相似度是图像整体灰度、方差和结构度相似程度的评价指标。

表 2 仿真结果评价

Tab.2 Evaluation of simulation result

Local variance	SSIM	Correlation coefficient
0.876 1	0.868 5	0.703 2

根据表 2, 仿真“光斑”海面与真实“光斑”海面的相似度较好。

5 结 论

文中提出了一种新的红外海洋视景生成方法, 核心是引入法线图 and GPU 着色器参与海面红外辐射特性和红外辐射的计算, 实现了动态的红外海面效果。海面场景基于矩形海洋红外模块构建, 避免了复杂的海面几何模型建模, 并通过一种海洋模块的调度策略, 保证了仿真场景的实时性。基于文中研究的仿真视景可以根据太阳光方向动态仿真海面的“光斑”和“鱼鳞波”现象, 具有较高的逼真度和较强的真实感。文中研究是弹载红外导引头战场视景仿真训练系统的重要组成部分, 具有重要的工程应用价值。

参考文献:

- [1] James Savage, Charles Coker, Dave Edwards, et al. Irma5.0 multi-sensor signature prediction model [C]//SPIE, 2006, 6239: 62390C.
 - [2] Tan Gaijuan, Xie Jijiang, Zhang Laiming, et al. Recent progress in mid-infrared laser technology[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(4): 501-512. (in Chinese)
- 谭盖娟, 谢冀江, 张来明, 等. 中波红外激光技术最新进展[J]. *中国光学*, 2013, 6(4): 501-512.

- [3] Guan Muqiang, Li Yan, Huang Mei, et al. Infrared image simulation injection system based on FPGA [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(3): 277–282. (in Chinese)
管目强, 李岩, 黄梅, 等. 基于 FPGA 的红外图像仿真注入系统[J]. 中国光学, 2011, 4(3): 277–282.
- [4] Zhou Yuren, Geng Aihui, Zhang Qiang, et al. Fusion of infrared and visible images based on compressive sensing[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23 (3): 855–863. (in Chinese)
周渝人, 耿爱辉, 张强, 等. 基于压缩感知的红外与可见光图像融合[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(3): 855–863.
- [5] Ren Haixia, Ren Haigang, Xu Gao. Real-time infrared simulator of marine ship [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(2): 202–206. (in Chinese)
任海霞, 任海刚, 徐杲. 实时海面舰船红外热像仿真平台[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(2): 202–206.
- [6] Wang Xuwei, Zhang Weiguo. Computer generation of dynamic infrared images of a plane [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1999, 28(4): 21–24. (in Chinese)
王学伟, 张卫国. 飞机目标动态红外图像的计算机生成[J]. 红外与激光工程, 1999, 28(4): 21–24.
- [7] Shi Kun, Hao Yingming, Wang Mingming. Real-time simulation method of IR sea background[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(14): 25–291. (in Chinese)
石坤, 郝颖明, 王明明. 海面背景红外实时仿真[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(14): 25–291.
- [8] Vaitekunas D A, Alexan K, Lawrence O E, et al. SHIPIR/NTSC: a naval ship IR signature countermeasure and threat engagement simulator[C]//SPIE, 1996, 2744: 411–424.
- [9] Ren Haigang, Chen Hanping, Xu Gao. Sea surface emissivity models in IR image simulation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 36–38. (in Chinese)
任海刚, 陈汉平, 徐杲. 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.
- [10] Ren Haigang, Xing Qiang, Chen Hanping, et al. Sea surface radiation models in IR image simulation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(1): 19–22. (in Chinese)
任海刚, 邢强, 陈汉平, 等. 红外仿真中的海面辐射模型[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(1): 19–22.
- [11] Shi Jiabao, Wu Zhensen, Cao Yunhua. Study on reflection of sea surface in mid-IR [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38 (8): 2372–2375. (in Chinese)
施加宝, 吴振森, 曹运华. 海面中波段红外反射率特性研究[J]. 光子学报, 2009, 38(8): 2372–2375.
- [12] Cox C S, Munk W H. Statistics of the sea surface derived from sun glitter[J]. *J Mar Res*, 1954, 13: 198–227.
- [13] Blinn J F. Simulation of wrinkled surfaces [J]. *Computer Graphics*, 1978, 12(3): 286–292.
- [14] Liu Junchi, Li Hongwen, Wang Jianli, et al. Measurement of mid-infrared total atmospheric transmittance and its error analysis[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(6): 1547–1557. (in Chinese)
刘俊池, 李洪文, 王建立, 等. 中波红外整层大气透过率测量及误差分析[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(6): 1547–1557.
- [15] Wang Yuqing, Liu Weiya, Wang Yong. Image quality assessment based on local variance and structure similarity [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2008, 19 (11): 1546–1553. (in Chinese)
王宇庆, 刘维亚, 王勇. 一种基于局部方差和结构相似度的图像质量评价方法[J]. 光电子·激光, 2008, 19(11): 1546–1553.
- [16] Zhou Wang, Eero P Simoncelli. Stimulus synthesis for efficient evaluation and refinement of perceptual image quality metrics[C]//SPIE, 2004, 5292: 18–22.