

海洋战场环境下天空的红外图像生成研究

娄树理, 周晓东

(海军航空工程学院控制工程系, 山东 烟台 264001)

摘要: 红外成像仿真已成为红外成像制导武器设计和评估的重要方法, 具有重大的军事和经济意义。仿真的关键环节在于红外图像的生成。提出了基于分形技术的天空背景红外图像生成的技术方法, 综合考虑海洋战场环境下天空背景辐射的各个因素, 对晴空条件下的天空辐射分量进行了分析计算, 并根据视点建立了云的红外辐射模型, 计算出云的各个辐射分量, 得到天空及云的红外辐射亮度。将天空及云的辐射亮度量化为灰度等级, 并利用分形技术实现天空红外图像生成。天空背景的红外图像生成方法可行, 结果可信。

关键词: 云; 红外图像; 计算机图像生成; 分形

中图分类号: TP751.1 **文献标识码:** A

Sky IR image generation in ocean battlefield environment

LOU Shu-li, ZHOU Xiao-dong

(Department of Control Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: IR scene simulation is an important way for designing and assessing the IR guided missile, and the key of simulation is the generation of IR scene image. A method of generating sky background IR images based on fractal technology is proposed. The infrared models of sky and clouds are constructed based on physics analysis. The irradiance of sky background can be computed according to the viewpoint. To simulate infrared image of sky and clouds, irradiances of sky and clouds are mapped to gray levels, and clouds are generated with fractal method. This method of generating sky infrared image is applicable, and the results prove to be reliable.

Key words: cloud; IR image; computer image generation; fractal

1 引言

红外成像制导提供了丰富的目标/背景信息, 有利于目标的搜索识别与跟踪, 具有很强的抗干扰性能, 特别是具有目标选择和命中点选择能力, 是导弹精确制导的重要发展方向之一。红外成像制导技术的发展促进了红外成像仿真技术的研究, 红外成像仿真目前主要采用半实物仿真, 不管是景象投影方式还是信号注入方式, 仿真的关键是红外图像生成^[1]。

海洋战场环境红外图像生成中很重要的一类研究对象是天空背景, 天空背景除了由地球大气散射和辐射形成的天空背景之外, 还包括云、雾、雪、雨等自然物, 由于背景外形的不规则和随意性, 以及与其他辐射之间相互作用的复杂性, 因此天空背景的红

外图像生成一直是一个难题。1991年, Lévesque^[2]提出了一种在不同天气环境下红外天空场景图像的生成模型, 但由于光线追踪的大量计算, 很难生成红外实时场景。Eckel提出的红外云模型是利用简单的视线辐射量计算, 且许多地方是基于假定, 模型反映了视线方向上的辐射量随着视角和厚度的变化^[3]。模型产生了合理的结果, 对于训练有价值, 但缺乏物理基础, 且没有与实测结果或基于物理的模型相比较。浙江大学王章野等人^[4]提供了一个

基金项目: 国家“863”课题基金项目(No. 2008AA809121)资助。
作者简介: 娄树理(1976-), 男, 讲师, 博士研究生, 研究方向为光电制导, 图像处理, 红外图像生成。E-mail: shulilou@sina.com
收稿日期: 2010-08-17; 修订日期: 2010-11-16

实时红外天空图像生成模型,基于大气光学、红外物理和硬件加速技术进行实时生成,但是天空辐射仅作为黑体处理,实际应用时精度可能不够。

本文提出一种天空背景及云的辐射计算及红外图像生成方法,首先对天空辐射分量进行分析计算,然后根据视点的位置,建立云的红外模型,计算出天空及云的辐射亮度,采用分形技术实现天空背景的红外图像生成。

2 海洋环境下天空背景红外辐射计算

晴空条件下,天空红外辐射主要来自晴空大气的热辐射和散射辐射,而在有云情况下还要考虑云层的辐射。

2.1 晴空条件下的天空红外辐射亮度计算

海洋环境下晴空无云天空背景的辐射为向空中垂直或斜程的路径上的大气的辐射,主要包括大气分子、气溶胶本身的红外辐射和对太阳、海面等入射辐射的散射辐射,其中海面入射辐射包括海面自身热辐射和海面对太阳光等辐射的反射辐射。

白天,天空的红外辐射是散射辐射和大气热辐射的组合,波长小于 $3 \mu\text{m}$ 的天空辐射主要为散射的太阳光,包括直射和海面反射的太阳光,波长大于 $5 \mu\text{m}$ 时以大气热辐射为主,在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 之间,天空的热辐射最小。太阳散射在白天影响较大,主要集中在波长小于 $3 \mu\text{m}$ 的波段内。海面上风速的变化对天空背景的辐射亮度也有很明显的影 响,风速越大,海表面起伏越大,海面粗糙度变大,反射率降低,因而导致海面反射太阳辐射减弱。

夜晚,因为不存在散射的太阳光,天空的红外辐射主要为大气的热辐射,大气的热辐射在波长大于 $4 \mu\text{m}$ 波段内全天候存在。由于海面大气中水蒸气含量丰富,在 $6.27 \mu\text{m}$ 处有较强辐射。

探测器所接收的天空红外辐射为:

$$L_{\text{sky}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (L_a(\lambda) + L_{\text{sun}}(\lambda) + L_{\text{sea}}(\lambda)) d\lambda \quad (1)$$

其中, λ_1, λ_2 是红外探测器的工作波段; L_{sky} 是红外探测器所接收到天空背景的红外辐射亮度; $L_a(\lambda)$ 是天空背景的热辐射; $L_{\text{sun}}(\lambda)$ 是散射的太阳辐射; $L_{\text{sea}}(\lambda)$ 是散射的海面辐射。

由于各个分量计算时考虑的因素非常多,计算的精度受到很大的限制,目前一般采用大气传输软件 Lowtran 或 Modtran 计算天空背景辐射亮度,精度较高^[5],在此使用 Modtran 进行计算。

2.2 云的红外辐射计算

云的红外辐射包含着诸多因素的影响,主要有云自身的热辐射、大气的热辐射、太阳辐射以及云自

身热辐射等,最后到达探测器的辐射是这些辐射的叠加。本文中要计算的量是探测器在穿过云的视线上接收到的红外辐射亮度,根据探测器与云、太阳的位置,云红外辐射亮度计算如下:

$$L_{\text{cloud}} = [L_{\text{sun}} + L_{\text{sky}} + L_{\text{cloud}} + L_{\text{sea}}] \cdot \tau_{\text{path}} + L_{\text{path}} \quad (2)$$

其中, L_{sky} 为天空辐射经过云的透射到达云底的辐射; L_{cloud} 为视线上云自身的辐射; L_{sea} 为海面辐射经过云反射的辐射; τ_{path} 为云底到探测器的大气透过率; L_{path} 为云底到探测器的大气路径辐射; L_{sun} 为太阳辐射经过云的透射或者反射到达云底的辐射,当探测器和太阳在云的同侧时为反射辐射,当探测器和太阳在云的两侧时为透射的辐射。

对于云自身的热辐射 L_{cloud} ,通常采用灰体近似的方法来计算。云的辐射亮度计算公式为:

$$L_{\text{cloud}} = \varepsilon_c L_b(T_{\text{cloud}}) \quad (3)$$

其中, ε_c 是云的发射率,即把云看作是一个灰体。 $L_b(T_{\text{cloud}})$ 是与云温度相同的黑体辐射亮度; T_{cloud} 为云温度, $L_b(T_{\text{cloud}})$ 可根据普朗克公式进行计算。

对于 L_{sun} 有许多的反射模型可以用来计算,但是考虑到云的多重散射,最好的、最简单的模型仍然是 Lambertian 模型^[2]。当探测器和太阳在云的一边时,太阳可以看作一个点源并且辐射计算如下:

$$L_{\text{sun}} = \varepsilon_c \rho_c \frac{E_{\text{sun}}}{\pi} \cos\theta \quad (4)$$

当探测器和太阳在云的两侧时,透过的太阳辐射为:

$$L_{\text{sun}} = \tau_c \frac{1}{4\pi} E_{\text{sun}} \cos\theta \quad (5)$$

其中, E_{sun} 可以由 Modtran 计算而得, θ 为太阳辐射传输方向与云表面法向的夹角。

$$\cos\theta = \frac{\vec{E} \cdot \vec{n}}{|\vec{E}| \cdot |\vec{n}|} \quad (6)$$

式中, E 为太阳辐射传输方向; n 为云上反射面的法线方向。

计算云对海面辐射的反射也可由朗伯体公式导出,有^[2]:

$$L_{\text{sea}} = \varepsilon_c \rho_c \frac{E_{\text{sea}}}{\pi} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos\theta \right) \quad (7)$$

其中, E_{sea} 是海面对云的辐照度,可根据下式计算^[2]:

$$E_{\text{sea}} = \pi \varepsilon_{\text{sea}} \tau_a L_{bb}(\lambda, T_{\text{sea}}) \quad (8)$$

式(8)只考虑了海面自身的热辐射,忽略了海面对天空和太阳辐射的反射,其中 $L_{bb}(\lambda, T_{\text{sea}})$ 是黑体在 T_{sea} 温度时的辐射, τ_a 是海面到云底的辐射传输透过率,可由 Modtran 软件计算得到, ε_{sea} 是海面

的发射率,可根据海水温度、波长经验获得^[6]。

其他分量包括大气的路径辐射、天空的辐射、大气传输透过率,可以由 Modtran 软件获得。

由于云的发射率、反射率和透射率是随波长和云的厚度变化的,计算过程非常复杂,在此根据光学厚度与波长和云厚度的经验关系^[7-8],得到云在不同波长处的光学厚度值,建立起云的反射率和透射率与光学厚度的关系,使用前人拟合的经验数据公式进行计算^[9-10],计算公式详见文献^{[7]~[11]}。

3 基于分形技术的红外图像计算机生成

海洋战场环境的天空背景中,十分重要的景物是云,由于云外形的无规则性和随意性,云的图像生成一直是研究的难点,因此对于天空背景的红外图像生成主要是考虑对云的图像生成。目前有许多方法可以用来进行天空及云的图像生成,如基于体过程的方法、基于分形的方法、基于文法的方法、粒子系统模型方法、内隐面建模方法等^[11],然而,分形方法建造的物体模型结构精细、算法控制简单,适合于绘制云、雪、树等结构精细的物体^[12]。云的分形生成常使用二维随机中点偏移算法^[13-14],本文基于二维随机中点偏移算法提出一种生成天空背景红外图像的方法,具体步骤如下:

- (1) 建立二维网格,并对于网格的四个角点赋高度值;
- (2) Diamond 步:取四个角点连线构成正方形,在正方形的中点生成一个随机值,中点为两对角线的交点,中点值为四个角点平均值再加上一个随机量。
- (3) Square 步:取正方形中点和任意一条边的两个端点,求平均再加上一个偏移量,分别得到四条边的中点值。
- (4) 重复(2)、(3)步,直到达到希望的迭代次数。
- (5) 天空及云的红外图像生成。

这一步骤是天空及云红外图像生成的关键,由于红外图像反映在计算机屏幕上的是灰度图像^[15],红外图像中天空及云的灰度值对应于天空及云的红外辐射亮度,因此首先需要建立分形高度值到天空及云的灰度值的映射关系,在此是通过两个映射实现的,一是二维数据场生成的高度值到光学厚度的映射。

近似认为分形高度值到光学厚度的映射是线性的关系,假设前面计算得到的云的光学厚度为 τ ,采用如下的映射关系将分形高度值映射到光学厚度:

$$H(z) = \begin{cases} \tau \frac{z - z_{avg}}{z_{max} - z_{avg}} & z > z_{avg} \\ 0 & z \leq z_{avg} \end{cases} \quad (9)$$

其中, z_{max} 是高度值的最大值; z_{avg} 是所有高度值的平均值。这样,分形高度场中所有高度值大于 z_{avg} 的像素点认为是云的像素点,小于 z_{avg} 的像素点为无云天空背景的像素点;云中每一个像素点具有了相应的云光学厚度信息,根据每个云像素点的光学厚度,就可以计算出每个云像素点的红外辐射亮度,而无云天空背景像素点具有相应的无云天空背景辐射亮度信息,这样分形图像上每个像素点都具有了对应的红外辐射亮度信息。

二是云的红外辐射亮度到灰度值的映射。

设红外图像灰度下限为 G_{min} , 上限为 G_{max} , 则灰度范围为 $Grange = G_{max} - G_{min}$ 。然后找出每帧图像中最大辐射亮度值 R_{max} 和最小辐射亮度值 R_{min} , 在此 R_{min} 是无云天空的辐射亮度,计算各辐射亮度值对应的量化灰度级:

$$G = \frac{R - R_{min}}{R_{max} - R_{min}} Grange + G_{min} \quad (10)$$

并取整即可获得不同高度值的灰度等级。

通过两个映射,可将图像中每一像素点的分形高度值与该点的灰度值建立对应关系,云中不同高度值的像素点具有云的不同灰度值,无云天空背景的像素点具有天空背景灰度值。渲染输出时,不同的像素点赋予不同的灰度值,可得到天空背景的红外图像生成。

4 计算及仿真结果分析

对于海洋战场环境下, cumulus clouds, 探测器方位角为 60° , 太阳天顶角为 45° , 探测器天顶角为 30° , 天气状态为晴朗, 计算结果及计算机生成图像为图 1~图 4 所示, 经与实拍天空的红外图像图 5 和测量数据比较, 计算和仿真结果可信。

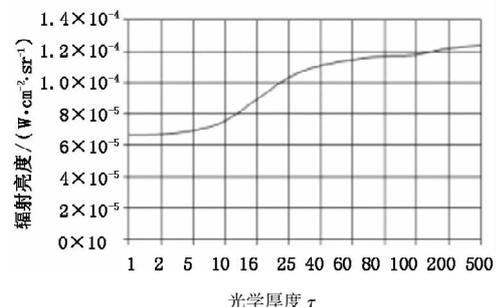


图 1 探测器和太阳在云两侧时 3~5 μm 计算结果
Fig. 1 the result of radiance between 3 and 5 microns when sun and detector are on the different side of cloud

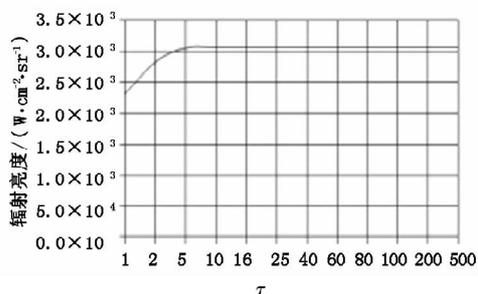


图2 探测器和太阳在云两侧时8~12 μm 计算结果

Fig. 2 the result of radiance between 8 and 12 microns when sun and detector are on the different side of cloud

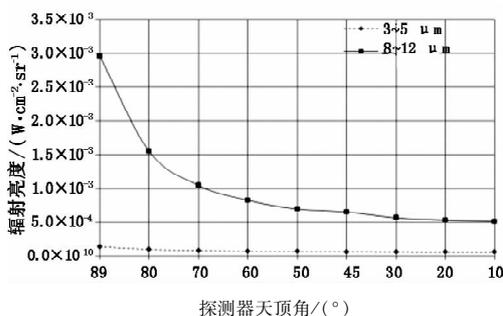


图3 天空辐射亮度随探测器天顶角变化情况

Fig. 3 radiance of sky as a function of zenith of detector

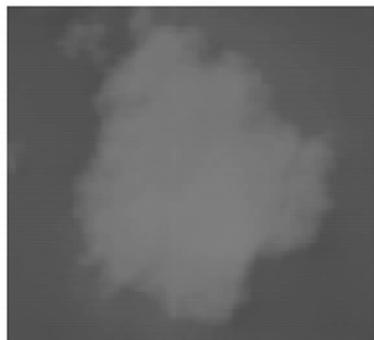


图4 当探测器和太阳在云不同侧时云的红外图像生成(8~12 μm)

Fig. 4 generated infrared image of cloud from 8 to 12 microns



图5 实拍8~12 μm 云的红外图像

Fig. 5 the photograph of cloud from 8 to 12 microns

5 结论

本文对天空辐射进行分析计算,根据视点的位置,建立云的红外模型,计算出天空及云的辐射

亮度,并采用分形技术实现天空背景的红外图像生成。该方法可有效提供红外成像制导评估系统使用的红外图像源,目前在实验室内已经完成对红外成像系统的信号注入式仿真评估,实验证明效果较好。

参考文献:

- [1] Timothy A Palmer, David E King. Low-cost Real-time IR Scene generation for image projection and signal Injection [C]. Proceeding of SPIE, 1996, 2741: 179 - 188.
- [2] M P Lévesque. Generation of synthetic IR sky background images [C]. SPIE, 1991, 1486: 200 - 209.
- [3] Susan A Triantafillou, Guy P Seeley. Two models for predicting the probability of a cloud-free line-of-sight [C]. ADA419420, 2002.
- [4] Shiguang Liu, Zhangye Wang, Zheng Gong, et al. Real-time generation of infrared dynamic sky scene [C]. SPIE, 2005, 6045: 021 - 0210.
- [5] Shen Tongsheng, Xiong Zhang, Wang Xuewei, et al. Calculating the energy obtained by an infrared guide using Lowtran7 [J]. Laser & Infrared, 2000, 30 (6): 349 - 351. (in Chinese)
沈同圣,熊璋,王学伟,等.用 Lowtran7 计算红外导引头的接收能量 [J]. 激光与红外, 2000, 30 (6): 349 - 351.
- [6] Christopher J, Zappa. Infrared field measurements of sea surface temperature; analysis of wake signatures and comparison of skin layer models [C]. ADA288579, 1994.
- [7] A Slingo. A GCM parameterization for shortwave radiative properties of water clouds [J]. American Meteorological Society, 1989, 46 (10): 1419 - 1427.
- [8] T H Lindner, J Li. Parameterization of the optical properties for water clouds in the infrared [J]. American Meteorological Society, 2000, 13: 1797 - 1805.
- [9] Graene L Stephens. A shortwave parameterization revised to improve cloud absorption [J]. Journal of the Atmosphere Sciences, 1984, 41: 687 - 690.
- [10] G L Stephens. Radiation profiles in extended water clouds. II: parameterization schemes [J]. American Meteorological Society, 1978, 35: 2123 - 2132.
- [11] Zhu Changzheng, Chen Haixin. Cloud modeling methods: state, evolution trend and usage in military area [J]. Computer Applications, 2003, 23 (9): 22 - 25. (in Chinese)
朱长征, 湛海新. 云建模方法现状, 发展趋势及在军事领域的应用 [J]. 计算机应用, 2003, 23 (9): 22 - 25.
- [12] Zhang Yan, Ding Shaojun, Zhan Shouyi. Study of cloud effect based on fractals method [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2004, 24 (6): 533 - 536. (in

- Chinese)
张艳,丁少君,战守义. 基于分形技术的云彩特效研究[J]. 北京理工大学学报,2004,24(6):533-536.
- [13] Huang Tiayun,Zhang Chuanwu. On use of fractal interpolation algorithm to generate natural scenery[J]. Computer Engineering and Design,2007,28(16):3994-3997. (in Chinese)
黄天云,张传武. 分形插值算法在分形自然景物模拟中的应用[J]. 计算机工程与设计,2007,28(16):3994-3997.
- [14] Ruan kun,Fan yin,Li Huijun,et al. Modeling cloud based on midpoint deflection algorithm[J]. Journal of PLA University of Science and Technology,2003,4(1):99-102. (in Chinese)
阮鲲,范茵,李汇军,等. 基于中点偏移算法的云的模型设计[J]. 解放军理工大学学报:自然科学版,2003,4(1):99-102.
- [15] Lu Bin. Method of making real time IR image of anti-aircraft missile in battle environment[J]. Laser & Infrared, 2003,33(4):285-287. (in Chinese)
陆斌. 防空导弹红外成像环境的动态图像制作方法[J]. 激光与红外,2003,33(4):285-287.