



时序平滑多尺度叠加动态红外云场景仿真

吴双 李超 高传卫 佟岐

Dynamic infrared cloud scene simulation based on time series smoothing multiscale superposition

Wu Shuang, Li Chao, Gao Chuanwei, Tong Qi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20220656>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

载体平台振动下红外系统成像模糊效应动态仿真

Dynamic simulation of infrared system imaging blur effect caused by carrier platform vibration

红外与激光工程. 2018, 47(9): 904004 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0904004>

基于遥感数据的地球背景中红外场景仿真

Simulation of global mid-infrared background based on remote sensing data

红外与激光工程. 2018, 47(11): 1104004 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.1104004>

无人机红外辐射建模与图像仿真

UAV infrared radiation modeling and image simulation

红外与激光工程. 2017, 46(6): 628002 <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0628002>

基于CUDA并行计算的空中目标红外辐射成像计算

Infrared radiation imaging calculation of aerial target based on CUDA parallel computing

红外与激光工程. 2020, 49(4): 0404003 <https://doi.org/10.3788/IRLA202049.0404003>

光机热集成方法的红外系统应用

Application of optical, mechanical and thermal integration in infrared system

红外与激光工程. 2019, 48(6): 618002 <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0618002>

同轴全反红外光学系统自身热辐射测量方法

Measurement method of self-thermal radiation for coaxial total reflection infrared optical system

红外与激光工程. 2018, 47(1): 104003 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0104003>

时序平滑多尺度叠加动态红外云场景仿真

吴 双, 李 超, 高传卫, 佟 岐

(南京电子设备研究所, 江苏南京 210007)

摘要: 天基红外观测场景中云场景具有几何结构动态变化复杂、尺度变化随机、辐射动态变化不确定的特点且与天基动态探测链路耦合, 对系统探测效能造成极大影响。因此, 开展云场景仿真方法研究对天基红外光学卫星系统设计具有非常重要的意义。针对传统仿真方法在大尺度动态云图像仿真应用中计算效率低、占用内存大的问题, 提出了一种基于时序平滑多尺度叠加方法的动态云图像仿真方法, 在基于多尺度叠加算法进行云层整体位置移动仿真的基础上, 利用帧间插值的方法实现动态云层形状结构变化, 计算效率提高 10 倍以上, 真实模拟云场景的整体移动与内部变化, 实现大尺度动态云图像的仿真。

关键词: 图像仿真; 红外系统; 动态云场景; 多尺度叠加

中图分类号: TP79 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220656

Dynamic infrared cloud scene simulation based on time series smoothing multiscale superposition

Wu Shuang, Li Chao, Gao Chuanwei, Tong Qi

(Nanjing Electronic Equipment Institute, Nanjing 210007, China)

Abstract: The cloud scene in the space-based infrared observation scene has the characteristics of geometric structure dynamic change, scale dynamic change, radiation dynamic change and is coupled with the space-based dynamic detection link, which will have a great impact on the detection efficiency of the system. Therefore, it is very important to carry out research on cloud scene simulation methods for the design of space-based infrared optical satellite systems. This paper proposes a dynamic cloud image simulation method based on the time series smoothing multiscale superposition method to solve the problems of low computational efficiency and large memory usage of traditional simulation methods in large-scale dynamic cloud image simulation applications. The interframe interpolation method is used to realize the change in the shape and structure of the dynamic cloud layer, which improves the computational efficiency by more than 10 times. Realistic simulation of the overall structural change in the position and shape of the clouds realizes the simulation of large-scale dynamic cloud images.

Key words: image simulation; infrared system; dynamic cloud scene; multiscale superposition

收稿日期: 2021-09-09; 修订日期: 2022-05-10

作者简介: 吴双, 女, 助理设计师, 硕士, 主要从事图像仿真方面的研究。

0 引言

天基红外探测系统是实现空中运动飞机、临近空间飞行器等小尺度目标测的有效手段。地面热源及云层背景太阳随机强反射是引起红外探测系统虚警的主要原因。天基红外观测场景中的云场景变化复杂且与天基动态探测链路耦合,会对系统探测效能产生较大影响。因此,有必要开展天基观测条件下的动态云场景和云图像仿真方法研究。

作为红外天空图像仿真中极其重要的组成部分,红外云场景仿真技术已成为天基红外探测中不可或缺的关键技术之一,更是在民用、军用及国防领域上起到了至关重要的作用。天基观测条件下的动态云场景和云图像仿真方法研究为天基红外光学卫星的指标论证、目标检测算法的设计优化等提供数据支撑。云作为天基红外对地探测成像的重要背景源,针对云场景的红外探测图像仿真技术一直是相关领域的国内外研究热点。应充分开展对地面背景及云层背景相结合的仿真,满足天基红外探测系统设计、研制及测试阶段需要。

现有的方法大多只是针对静态云场景图像仿真或局部小场景的动态云图像仿真,对于大尺度的动态云图像仿真方法研究较少。但是,面向真实天基探测条件的大尺度动态云成像特性建模是天基红外对地探测仿真实验任务的紧要需求。为应对上述问题,开展大尺度动态云红外探测图像仿真方法研究,从影响红外探测系统虚警率的需求出发,重点开展运动云场景仿真方法研究。通过比较传统数字图像处理等仿真手段的不足,提出一种基于时序平滑多尺度叠加方法的红外云场景仿真方法:在云的三维空间分布模型的基础上增加时间维,模拟风与气候对云的实时影响,进行动态建模。同时,在时间轴上不连续的多帧图像之间进行连续帧图像仿真,弥补传统的基于多尺度叠加的动态云仿真方法计算量大、内存占用大、耗时长的缺点,提高大尺度动态云图像仿真效率。最后,结合云层的三维辐射场景模型以及经过成像链路主要环节的传递函数退化模型对云辐射图像仿真实验,有效模拟云的整体位置移动和云层形态变化,保证仿真数据的真实性和实效性,为红外探测系统性能验证与测试提供了保证。

1 天基红外探测理论

天基红外探测是基于指定波段的热敏感成像特性,在复杂背景中利用目标和背景的几何、辐射、运动等特性的差异实现信息提取与解算的一项技术;其探测链路由光学系统、探测器、电子学等硬件,以及目标特性、大气传输、复杂背景等地面场景构成。

根据经典红外探测理论,光学系统、探测器、电子学等硬件直接决定了系统的固有能力,目标与大气传输特性^[1-2]是客观存在条件,在简洁背景下可明确系统的探测能力^[3-6]:

$$SNR = \frac{\pi I \times \tau_a \times D_0^2 \tau_0 \times D^* / \sqrt{A_d \cdot \Delta f}}{R_0^2} \quad (1)$$

式中: I 为目标辐射强度,表征目标特性; D_0 为探测系统光学口径,表征光学系统能力; τ_a 为大气透过率; $D^* / \sqrt{A_d \cdot \Delta f}$ 表征探测器能力。

但天基红外探测系统往往面临复杂背景环境,尤其是云层在特定空间尺度上具备与目标类似的运动特征,且在太阳照射、地面强反射等条件下易产生与动目标相似的红外辐射特性,造成高逼真虚警点,给系统探测与目标提取带来巨大困难与挑战^[7]。

因此,开展天基云场景仿真,为系统仿真提供高置信度输入,为系统设计、算法验证等提供依据,具有重要的科学意义与工程价值。

2 基于时序平滑多尺度叠加方法的动态云仿真方法

云场景是天基遥感卫星自上而下对地观测到的,影像中云的运动形式主要有两种,即整体位置移动和形状结构变化^[8-9]。

由于云的边界符合分形特点,可以基于分形理论生成云层结构,进而根据实测云层辐射图像的统计特性建立云背景辐射特性模型^[10]。针对云层纹理构造算法,选择使用多尺度叠加算法^[11],其基本原理如下:

$$V_n(X) = \sum_{k=k_0}^{k_{\max}} \frac{1}{r^{kH}} S_n \left(r^k \frac{X}{l} \right) \quad (2)$$

式中: k_0 、 k_{\max} 分别为空间频率累加上下限; l 为插值分

分辨率; H 为 Hurst 参数; r 为空隙参数。

随机函数在位置 X 的分形数值由随机矩阵 A^n 在位置 $r^k \left(\frac{X}{l}\right)$ 插值叠加获得。

考虑到风向、风速以及气候条件的改变,且随着时间 t 变化,云的整体位置会发生改变。设云层在水平面上的移动速度的矢量可以写为 $\vec{d} = (d_x, d_y)$, 得到分形模型如下:

$$V_4(X(x+d_x t, y+d_y t, z, t)) = \sum_{k=k_0}^{k_{\max}} \frac{1}{r^{kH}} S_4 \left(r^k \frac{X(x+d_x t, y+d_y t, z, t)}{l(x, y, z, t)} \right) \quad (3)$$

在实际应用过程中,采用这种直接在多尺度叠加算法中增加变量维度的方式无法满足大尺度动态云场景的仿真实时性需求。提出一种基于四维多尺度叠加算法的改进算法,根据公式 (3) 得到 t_0 时刻单帧的四维分型模型表达式:

$$V_4(X(x+d_x t_0, y+d_y t_0, z, t_0)) = \sum_{k=k_0}^{k_{\max}} \frac{1}{r^{kH}} S_4 \left(r^k \frac{X(x+d_x t_0, y+d_y t_0, z, t_0)}{l(x, y, z, t_0)} \right) \quad (4)$$

假设离散时间点的间隔为 Δt , 间隔帧的多尺度叠加算法的四维分形模型如下:

$$V_4(X(x+d_x(t_0+i\Delta t), y+d_y(t_0+i\Delta t), z, t_0+i\Delta t)) = \sum_{k=k_0}^{k_{\max}} \frac{1}{r^{kH}} S_4 \left(r^k \frac{X(x+d_x(t_0+i\Delta t), y+d_y(t_0+i\Delta t), z, t_0+i\Delta t)}{l(x, y, z, t_0+i\Delta t)} \right) \quad (5)$$

式中: i 为离散帧序列数, $i = 1, 2, \dots, n$, 离散帧序列总数为 n 。

对时间轴上离散点之间的连续帧进行仿真生成。采用基于数字图像处理的帧间插值方法得到离散点之间的连续帧图像。对于得到的 n 幅间隔帧图像,在第 i 帧和第 $i+1$ 帧图像之间进行插值运算:

$$F_j = F_i + \frac{j}{m+1} \times (F_{i+1} - F_i) \quad 1 \leq j \leq m, 1 \leq i \leq n \quad (6)$$

式中 F_i 、 F_{i+1} 为通过多尺度叠加算法生成的间隔帧图像中两帧相邻像; m 为在第 i 帧和第 $i+1$ 帧图像之间插值图像的总帧数; J 为当前计算的插值图像帧数。

基于时序平滑多尺度叠加方法既可以使不连续的动态云变化过程实现连续平滑变化,又能保证提升整个算法的计算效率。重复公式 (6) 的步骤,得到动

态云的连续变化过程序列图。基于多尺度叠加的间隔帧仿真方案如图 1 所示。

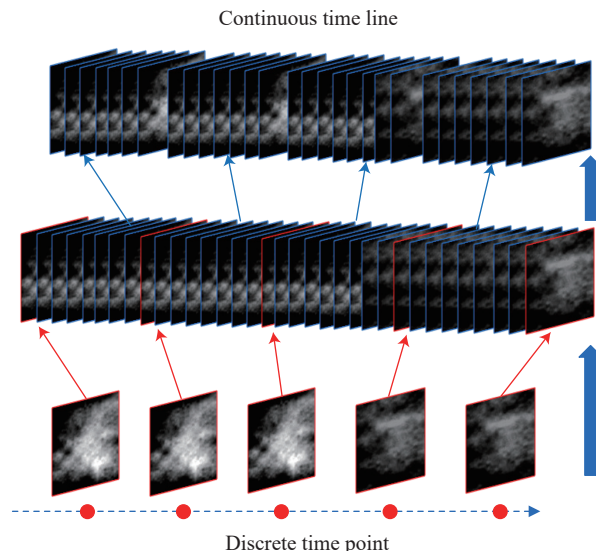


图 1 基于时序平滑多尺度叠加的仿真方案示意图

Fig.1 Schematic diagram of simulation scheme based on time series smoothing and multi-scale superposition

3 实验验证与分析

3.1 实验方法

根据前文原理构建四维云层空间分布模型,代入风向角、云层移动方向参数,开展仿真分析。风向角和云层移动方向示意图如图 2 所示。

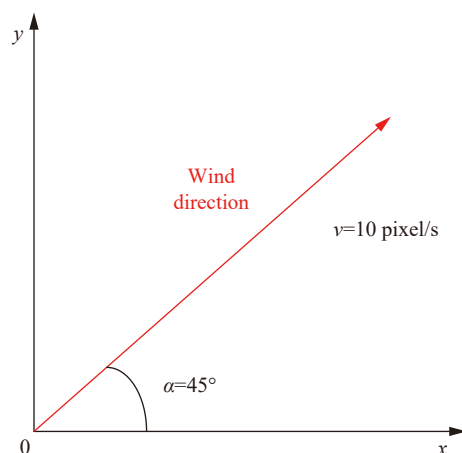


图 2 风向角与云层移动方向示意图

Fig.2 Schematic diagram of wind direction angle and cloud movement direction

对地球静止轨道凝视成像系统进行成像仿真,参数设置如表 1 所示。

表 1 探测系统仿真参数设置

Tab.1 Detection system simulation parameter settings

Parameter	Value	Parameter	Value
Imaging time/min	1	Orbital altitude/km	36 000
Frame rate/Hz	1	Earth radius/km	6 378
Image size/pixel	30 000×30 000	NESR/W·sr ⁻¹ ·m ⁻²	2×10 ⁻⁵
Focal length/mm	2 200	Jitter amplitude/mm	5×10 ⁻²
Cell size/mm	1×10 ⁻²	Average defocus amount/mm	1×10 ⁻³
Integration time/s	5×10 ⁻⁴	Other MTF	0.8
Aperture diameter/mm	500	Wavelength/μm	3-5
Wind angle/(°)	0, 45	Overall cloud speed/pixel·s ⁻¹	0, 10

3.2 实验结果与分析

仿真实验结果示例如图 3(a)~(c) 所示, 其中, 图 3(a) 风向为 0°, 云层的移动速度为 0 pixel/s; 图 3(b) 风向为 0°朝向图片右方, 云层的移动速度为 10 pixel/s; 图 3(c) 风向为 45°朝向图片右上角, 云层的移动速度为 10 pixel/s。

由图 3(a) 可知, 当场景中无风时, 随着时间的推移, 云层的运动只有内部形状结构的变化, 不存在整体的移动; 由图 3(b)、(c) 可知, 当场景中有风时, 随着时间的推移, 云层在整体随着风向移动, 且移动速度与风速有关, 同时云层内部形状结构也在发生变化, 连续帧图像中的动态云变化平滑、过渡自然, 验证了文中动态云仿真方案的可行性和有效性。

比较改进方法与传统方法 (基于多尺度叠加的动态云场景图像仿真) 的计算效率, 实验结果如表 2 所示。

通过对连续 500 帧不同尺寸的大尺度动态云图像仿真对比实验可知, 时序平滑多尺度叠加方法在计算效率上明显优于传统方法: 针对覆盖率 70%、卷云类型的图像, 随着图像尺寸的增大, 该方法在计算效率提升了 14.03 倍、15.33 倍和 16.51 倍; 针对卷云类

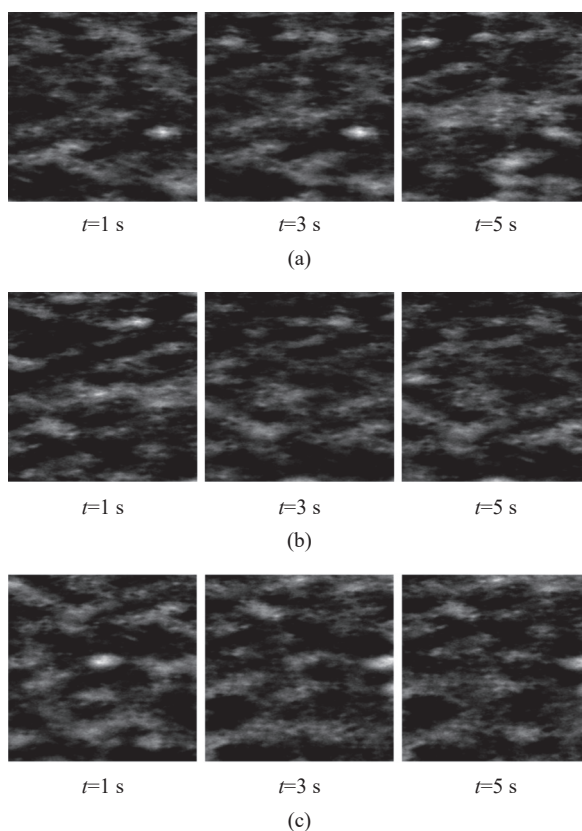


图 3 动态云仿真实验结果示例

Fig.3 Example of dynamic cloud simulation experiment results

表 2 改进方法与传统方法计算效率比较

Tab.2 Results of comparing computational efficiency of improved method and traditional method

Items		Traditional method/s	Improved method/s
Size/pixel	10 000×10 000	4 188.84	298.56
	50 000×50 000	125 655.25	8 196.47
	100 000×100 000	629 365.63	38 113.60
Type	Cirrus	109 915.45	6 581.97
	Cirrocumulus	3 891.56	360.33
	Stratus	65 782.28	4 635.82
Coverage	30%	15 529.43	1 125.32
	50%	62 117.64	3 981.90
	70%	123 438.89	7 261.11

型、云覆盖率分别为 30%、50% 和 70% 的图像, 相对传统方法的计算效率分别提升了 13.80 倍、15.60 倍和 17.01 倍; 针对云覆盖率 70%、云类型分别为卷云、卷积云和层云的图像, 相对于传统方法, 计算效率分别提升了 16.69 倍、10.81 倍和 14.18 倍。基于时序平滑多尺度叠加方法的动态红外云场景仿真方法在计算效率方面的优势更为显著。

4 结 论

文中面向天基红外对地目标探测系统, 针对以云场景为主要内容的探测背景进行仿真一直是天基红外对地探测系统的研究重点。在传统多尺度叠加算法基础上, 增加时间维来模拟风及气候对云的影响, 同时将时间步长调大, 减少四维的高斯分布矩阵所占用的内存, 进而节省计算时间, 提高计算效率。但是, 由于时间步长的增大, 造成了图像的连续性存在损失, 为弥补这一缺陷, 文中创新性的提出一种基于时序平滑多尺度叠加方法的动态红外云场景仿真方法来实现云层的整体移动和内部变化。经验证, 基于时序平滑多尺度叠加方法的动态红外云场景仿真方法对不同尺寸、不同覆盖率、不同云类型均可实现计算效率的 10 倍以上提升, 且真实模拟云层的整体移动与内部变化, 满足大尺度场景仿真需求。为天基红外探测系统指标论证、目标检测算法设计优化等提供重要支撑。

参考文献:

- [1] Chen Xueqi, Wan Minjie, Xu Yunkai, et al. Infrared remote sensing imaging simulation method for earth's limb scene [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(2): 20210896. (in Chinese)
- [2] Song Bo, Cui Wenyu, Du Lili, et al. High-resolution satellite ocean background imaging simulation method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(9): 20200514. (in Chinese)
- [3] Xin Lei, Li Feng, Lu Xiaotian, et al. Efficient coding and reconstruction for optical remote sensing images [J]. *Optical Precision Engineering*, 2021, 29(12): 2956-2963. (in Chinese)
- [4] Xu Fang, Liu Jinghong, Sun Hui, et al. Progress in detection technology of ships on sea surface from optical remote sensing images [J]. *Optical Precision Engineering*, 2021, 29(4): 916-931. (in Chinese)
- [5] Yang Fei, Jin Guang, Xie Jinhua, et al. Modeling and simulation of stereo mapping camera based on physical mechanism of on-orbit imaging [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(6): 971-979. (in Chinese)
- [6] Gong Dun. Review of optical system for space remote sensing surveying and mapping [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(5): 714-724. (in Chinese)
- [7] Liu Y. False alarm source detection in infrared imagery from earth observation[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021: 12. (in Chinese)
- [8] Ding Jinwei, Zhang Bao, Li Yonggang, et al. Design and analysis of infrared imaging system for meteorological cloud measurement [J]. *Optical Precision Engineering*, 2008, 16(12): 2429-2434. (in Chinese)
- [9] Zhang Y. Research on atmospheric background measurement data processing and image simulation technology of space-based infrared camera[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016: 41. (in Chinese)
- [10] Liou K N. An Introduction to Atmospheric Radiation [M]. 2nd ed. Beijing: Academic Press, 2002: 74.
- [11] Turkington R B, Cinaciolo M E, Raffensberger M E. Development of an atmospheric scene simulation model [R]. United States: Air Force Research Laboratory, 1998.