

文章编号:1001-9014(2007)01-0015-07

基于场景模型的热红外遥感成像模拟方法

杨贵军, 柳钦火, 黄华国, 刘 强, 顾行发

(中国科学院遥感应用研究所, 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101)

摘要:为实现升空后运行的卫星的整体性能处于最佳状态,通常在卫星发射前,采用计算机仿真的方法对从地表到影像获取的整个遥感物理过程进行模拟。针对现有模拟方法不能全部采用辐射传输、成像等物理模型,实现大场景、复杂地表覆盖情况下的热红外遥感成像模拟,在基于场景模型的热红外遥感成像模拟基础上,将模拟系统分为地表场景模拟、大气作用模拟及传感器成像场景,重点对模拟各场景所涉及的物理模型和算法进行了综述和分析,并初步构建了大场景、复杂地表覆盖下模拟的技术框架,是对热红外遥感成像模拟的一种全新而有益的尝试,对相关研究工作也有一定参考价值。

关键词:热红外遥感;场景模型;成像模拟;辐射传输

中图分类号:TP722.5 **文献标识码:**A

METHODS FOR SIMULATING INFRARED REMOTE SENSING IMAGES BASED ON SCENE MODELS

YANG Gui-Jun, LIU Qin-Huo, HUANG Hua-Guo, LIU Qiang, GU Xing-Fa

(State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: In order to make cost-versus-quality of launched satellite trade-offs, computer technology can be used to simulate the physical process of infrared imaging from land surface to archiving images before launching satellite. The available simulating methods are not able to simulate big-footprint scene and complicated land cover types by using thermal radiation transfer models and imaging physical models. Due to this reason, we selected a scene model to setup simulation system which composed land surface scene, atmospheric effect scene and sensor imaging scene. In this study, all kinds of relevant methodology about simulation utilizing scene models were analysed, a proposal of thermal infrared remote sensing simulating system was suggested which could be used to simulate wide area scene and different land cover types. This work is a new approach for infrared imaging simulation and it is helpful for relevant researching works.

Key words: thermal infrared remote sensing; scene model; imaging simulation; radiation transfer

引言

利用计算机进行热红外遥感成像系统的仿真有助于遥感系统的整体设计,也是评价遥感系统性能、载荷的有力工具。同时,良好的仿真模拟系统也会弥补遥感系统在时间分辨率、空间分辨率、光谱分辨率等方面的不足。

鉴于热红外成像重要的应用价值,自上世纪70年代末、80年代初,各发达国家就对热红外成像仿真进行了大量的科研投入,并由此取得了许多卓有

成效的研究进展。最早的热红外仿真主要集中在对近距离、小范围内的单一目标(建筑物、军事目标等)的仿真,仿真的方法大多都是根据目标和背景的热红外物理特性,利用气象学、传热学等理论建立物体表面的热平衡方程,通过求解方程来预测物体表面的温度分布,这种方法被称为第一原理模型^[1]。模拟方法侧重在目标温度的精确获取,较少考虑遥感成像过程中涉及的大气作用、成像系统中的各种影响因素;与热红外遥感图像仿真远距离、宽视场多种复杂目标有着很大差距。

收稿日期:2006-04-05,修回日期:2006-10-31

Received date: 2006-04-05, revised date: 2006-10-31

基金项目:国家自然科学基金项目(植被组分温度分布特征及其时空尺度效应研究,40371087);国防科技工业民用专项科研技术研究项目(航天遥感图像仿真模拟关键技术研究)

作者简介:杨贵军(1976-),男,北京房山人,中科院博士研究生,主要从事定量遥感应用,图像分析处理,3S集成开发及资源遥感监测等相关技术研究。

在远距离、宽视场等热红外遥感图像仿真方面,围绕不同研究目标采用图像处理技术或者物理模型模拟出热红外图像。密歇根大学环境研究中心开发了一个图像模拟系统,可以检验传感器的设计。G. A. Boggione 等组合了 TM 的多波段模拟全色波段。Banon G. J. F. 和 Fonseca L. M. G. 以高分辨率 SPOT 影像为基础模拟了 CBERS 波段 4 图像。Verhoef 对 SPECTRA 项目的高光谱图像和多角度热红外图像进行了仿真模拟,其突出特点是不倚赖高分辨率图像,从植被生理生化参数和气象条件入手,以冠层辐射传输模型为基础,模拟出热红外遥感图像^[2,3]。上述模拟方法不足之处为:(1)虽然某些方法能够模拟不同地表覆盖类型下的热红外图像,但方法的物理意义不明确;(2)采用物理模型的模拟方法仍然局限在植被覆盖区域,不能模拟出裸土、城镇、水体及其混合体的热红外图像。

将地表场景生成、大气作用、光学系统及探测器几何、空间、光谱响应进行综合集成,建立完整的对地观测遥感成像仿真系统成为近年来国内外相关研究工作的热点。王刚等分析了成像链的光谱辐射响应和空间响应特性,提出一种基于图像仿真的对地遥感过程科学可视化方法,建立了完整的成像链分析模型,包括传感器获取的三维场景像元辐亮度、探测器输出信号随机噪声和调制传递函数等数学模型,并导出了包含传感器综合响应特性的遥感数字图像传输方程^[4]。尽管上述方法能较完整的模拟出小范围内详细的三维热辐射传输过程,但由于地表场景建模工作量过大,模拟过程中对经验知识依赖较多,仍难以用于模拟大尺度的热红外遥感图像。吴亚平,张天序根据红外成像理论,分析了各种辐射对成像的影响,给出了辐射计算公式及无源场景温度求解方法,说明了场景模型、大气传输模型和材料的物理特性库在红外图像仿真中的作用,最后采用 SensorVision 软件进行了仿真实验^[5]。方法对入瞳处的辐射计算比较准确,但对于后面成像过程未加以充分考虑,特别是探测器响应、空间响应等。肖亮等分析了影响自然环境和人造建筑航空成像的各种因素,按照大气传输的基本规律,建立了数字影像匹配图模拟生成的数学模型,并针对图像增强型 CCD 相机,研究了其成像机理,完成了基于大气软件 LOWTRAN 7 计算内核的成像仿真系统的研制^[6],其更侧重于建筑物等三维目标的模拟,对其他地表覆盖类型的模拟涉及较少。

针对以上方法在模拟大视场、复杂地表覆盖场

景热红外遥感图像时的不足,研究依据地表不同覆盖类型的热红外辐射传输物理模型,建立复杂地表类型的热红外地表场景,并将其与热红外大气辐射传输模型耦合,实现与大气作用场景的叠加,最终根据传感器成像几何、物理模型获得宽视场、高空间分辨率的热红外遥感图像的相关研究工作亟待展开。本文即围绕上述研究内容查阅大量文献,总结并分析了目前国内外在此领域的最新进展和工作,并将在此基础上建立起适合我国航空航天发展需求的热红外遥感成像模拟系统。

1 基于场景模型的热红外遥感成像模拟总体框架

目前,大多数热红外遥感仿真过程是把成像系统的各个组成单元分开进行分析、仿真,使用的方法及模型趋向多样化,而每一种模型是重点研究其中某一单元或某一物理现象。这样做的好处是,可以根据使用的技术以及所要求的计算精度,对模型中的每个部分进行改进、完善,具有开放、灵活的特点。如图 1 所示,将热红外成像模拟系统分为:(1)地表热红外场景模拟;(2)热红外大气作用场景模拟;(3)传感器成像场景模拟。后面将分别对以上模拟子系统的研究状况进行介绍和分析。

目标和背景组成的场景是辐射源,其辐射经系统形成了反映场景特征的图像。大气的吸收和散射使传输到成像系统的场景辐射削弱,而大气扰动(湍流)会使图像发生畸变,变得模糊。同时大气又是一种重要的辐射源。光学系统对场景信号实施空间滤波,以尽可能小的损失,尽最大可能地将场景辐射会聚到探测器上。由于光学材料对不同波长的吸收以及反射的不同,使得图像产生各种光学效应,如几何效应、辐射效应、空间效应等。探测器是成像系统的核心,它把接收到的辐射转换成电信号,同时它也是最复杂的部分。探测器给图像带来的影响是与其物理结构相关的,物理结构不同所考虑的主导因素也不同。经探测器转换得到的信号通过两种输出通道得到场景的信息,一种是把信号转换成图像,直接在显示器显示或者按照格式存储下来,供观察者使用;而另一种输出通道是把得到的信号直接输入信号处理器,为探测或识别目标以及其它处理算法提供数据。成像模拟系统需要分析每个单元的物理过程,考虑影响图像质量的各种因素,形成一个包含各个组成单元和各种物理现象的完备的、封闭的仿真系统。

参照热红外成像系统的组成,可将从地表场景至信号处理过程等环节采用的仿真方法归结为两类:辐射传输法、调制传递函数(MTF)或点扩散函数(PSF)法^[7,8]。(1)辐射传输法就是从待观察的场景上各个点的辐射出发,研究辐射经过大气、光学系统的变化,经过采样系统和探测器后辐射转换为电信号的过程,建立观察场景上的各点与热红外成像器件输出图像上各点之间的几何位置以及辐射量关系,即建立像素方程;(2)对遥感系统的各个组成单元的调制传递函数进行分析、求解,然后把各个组成单元的信号与其相应的调制传递函数相乘,作为下一单元的输入数据,直到观察者看到结果;(3)点扩散函数法也是一种微观分析法,它的基本思想与调制传递函数法完全一样。实际上,点扩散函数法和调制传递函数的实质是一致的,因为调制传递函数法是在频域内分析信号的,而点扩散函数法是在空域内分析信号的,它们之间存在着傅氏变换关系,即 $MTF(f_x, f_y) = F(PSF(x, y))$ 。

2 地表场景(目标与背景)的仿真生成方法

地表场景仿真的质量对最终模拟出的遥感图像起着决定性作用,只有保证模拟场景向被测系统入瞳处发出的辐射能量分布,与真实场景中对应部分向被测系统入瞳处发出的辐射能量分布一致,才能使被测系统观察模拟场景和真实场景所获得的效果一致,即获得高质量、真实感的地表场景图像。在红外遥感图像仿真过程中地表所有的地物都是同等重要的,之所以用目标与背景来划分地表,其目的是重点的、详细的刻画用户需求的目标,而对用户不太关心的目标加以简单处理。所以,在本文仅论述针对目标的热红外仿真方法,对红外背景的仿真方法不再进行专门的讨论。地表场景的仿真方法大致可以归为两种:利用三维几何模型中光照渲染、热传导及能量

平衡法和基于辐射传输理论的遥感物理方法。

2.1 具体目标的热红外仿真

对具体目标的热红外仿真主要是如何根据目标的热红外特征获得目标的温度分布,并绘制出目标与背景“叠合”的红外图像。1980年 Jacobs 首先展开了具有简单几何外型物体的模拟,如平坦的沥青或混凝土公路、砖墙等的红外仿真研究。1987年 Hiderer 提出了一种绘制战术交通工具红外图形的方法,把物体表面划分成若干面片,根据预先编制的热能数据和直观推断确定每个面片的温度,由此绘制出物体的红外图像。1988年, Cathcart 提出了考虑不同环境条件和不同背景的目标红外仿真的第一原理模型,模型利用各种初始条件和边界条件求解方程组,从而得到物体表面的辐射分布。1996年, Hyum 等人提出了另一个简化的物理模型:用等效热阻把内热源与物体表面联系起来,借以模拟内热源与物体表面间热传导的物理过程。类似的还有:江照意对建筑物红外仿真热模型的传热分析与成像研究;简爱平对红外目标图像建模与仿真;沈国土、杨宝成等对舰船目标经面元分割后,对每个面元可以根据热传递关系建立能量平衡方程,把大气和海面辐射的计算结果作为前述方程组的边界条件,可以求解各面元的表面温度,即船目标的表面温度场。朱华、江照意等采用从气象学和传热学原理出发,首先计算了在某一气象条件下建筑物各部分逐时的日辐射强度,再用一维传热有限差分等方法求解建筑物的顶层、墙壁、窗玻璃、水泥路、沥青路和土壤等不稳定传热而得到的随时间变化的外表面温度,最后绘制出不同时刻、不同俯视角度的建筑物的红外图形^[8]。

可以看出对具体目标的热红外仿真从气象学、传热学等理论出发,考虑内部因素、环境条件以及背景差异都对目标的热红外特征有着直接的影响,建立物体表面的热平衡方程,通过求解方程来预测物体表面的温度分布。到目前根据此原理进行具体目标的热红外仿真已经有很成熟的方法,但由于其计算量大、耗时长,所以并不适合大规模场景中目标的热红外仿真。

2.2 基于三维几何模型的地表场景的建立

在利用三维几何模型建立地表场景过程中目标和背景一般是分别建模的。并且目标和背景的数据库可以预先定义好并存储起来,使用时直接调用。目标几何模型的建立主要有以下两种方法:(1)多幅图片提取法,德国 FGAN-FM 信息处理及模式识别研究所的研究人员利用这种方法对某军用车进行

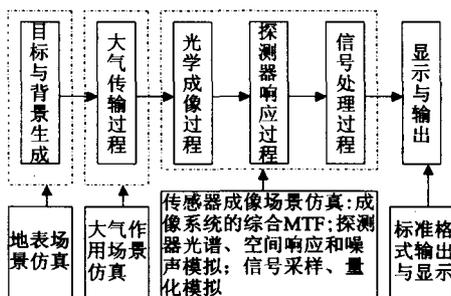


图1 热红外成像模拟系统的基本组成单元

Fig.1 Essential components of infrared simulation imaging system

了测量,所获得的模型可以满足中、远距离的应用。用这种方法获得目标的几何表示比较简单,但需要相关的实验设备进行外场实验以获得大量的实验数据,一般只能获得目标的模糊模型,并且模型生成有一定的局限性。(2)软件生成法,常用的三维建模软件有 AUTOCAD, 3D Studio MAX, Multigen 等。这是一种比较通用的方法,国外的几种典型模型一般都采用这种方法建立几何模型,如美国空军研究室军品管理局 (AFRL/MN) 负责开发的 IRMA 模型;美国洛克希德技术研究所 (RIT) 开发的 DIRSIG 模型等。这种方法的优点是灵活性强,适用面广,可根据需要生成各种模型。不足之处是工作量较大,需要同时提供足够多的材质数据,对所有三维目标都要建立几何模型。

在地表场景的仿真初始阶段需要设定场景高程数据与材料属性数据库:主要包括各种材料的发射率;探测器方位和观察几何数据库:探测器的地理坐标(或经纬度),高度,飞行时刻,观测天顶角和方位角等。利用 DEM 数据、设定的发射率等数据及光照几何模型,赋予每个辐射源的材质应为自发光材质,发光强度就是其对应的灰度值,然后进行光线跟踪。调用三维场景几何数据照明函数以及传感器方位和观测几何数据库,对三维场景进行渲染:其中包括通过调用材料属性数据库和纹理映射;从三维几何场景线框模型生成三维实体场景模型;多边形面片的反射和阴影形成;从三维空间投影到二维平面的基本空间变化换(视点变换、模型变换、投影变换和视口变换),由此得到零气象视距的二维场景数字图像 A。和可见光图像的最大区别是红外图像是物体红外辐射的反映,因此在红外图像中没有由于遮挡造成的明暗效果,这一点在红外图像生成时特别要注意。

2.3 基于辐射传输模型的地表场景建立

基于辐射传输模型建立地表场景的关键是如何给定地表覆盖类型及确定相应的发射率与温度分布,而几何模型中这些都是预先给定的。只要能确定地表所有地物的发射率、温度,即可按照热红外辐射理论(普朗克定律、基尔霍夫定律等)求出地表所对应的每个像元的热红外辐射。所以基于辐射传输理论建立发射率、温度与地表不同覆盖类型理化参量间的遥感物理模型成为地表场景建立的核心任务。Verhoef 在此方面进行了尝试,利用高分率的可见光图像进行分类后,根据不同地类的红外特点,采用辐射传输方法计算冠层的发射特征,采用 SVAT 辐射

传输 (Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer Models) 模型计算冠层温度。最后利用普朗克函数计算地表 (BOA) 的红外辐射。

通常可以将地表分为 4 大类:植被、裸土、水体、建筑物,分别对 4 种地类采用相应的辐射传输机理得到它们的红外温度、发射率等特征。植被是主要地物类型,对陆地和大气的物质能量交换起着重要作用,比如植被影响地表反照率、日夜温差;光合作用影响碳循环和蒸散。因此,必须能够模拟植被不同角度的发射和发射辐射。叶绿素含量, LAI 和叶子倾角分布函数都能改变植被冠层的反射或者发射。为实现给定生化、理化条件(叶子光谱,土壤光谱, LAI, LIDF 等)下和太阳—目标—观测点几何条件的冠层反射辐射模拟,必须选择带有生化、理化及物理参量的辐射传输模型,例如选择 SAIL 模型及其红外扩展 ESAIL 模型^[9], 结合一个土壤光谱模型 (Hapke) 模拟冠层反射率和发射率,再选择 CUPID 模型模拟组分温度和红外辐射,对应到像元上计算就可以得到单个像元冠层顶部的温度分布和冠层的发射率,图 2 所示。

当然,植被中森林进行模拟时,还可以采用扩展的几何光学模型或计算机结构真实模型来模拟冠层的温度,这些方法都在研究之中或尚待充分验证。

土壤 BRDF 模型主要有 Hapke 半经验模型和 Walthall 经验模型。Hapke 模型认为传感器接受的辐射亮度有一次散射和多次散射两部分。由于考虑到土壤热点效应十分明显,所以附加了一个修正项,而多次散射假定满足各向同性,在二流近似方程下获得其解。目前,也有学者从能量平衡的角度出发求解动态过程中的土壤温度,需要输入土壤类型、密度、湿度、初始温度等物理参数;空气温度、风速、太阳辐射等环境参数,可以获得土壤不同深度处的温度,这种方法需要观测大量实地参量,给快速应用带来了困难。目前,SN THERM 是比较成熟的模型,采用的

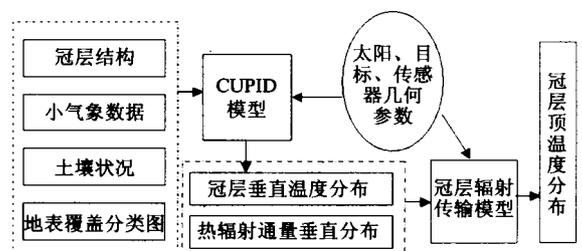


图 2 基于辐射传输的冠层温度模拟

Fig. 2 The simulation of canopy temperature based on radiation transfer models

一维能量平衡方法. 对于土壤的发射率的模拟是比较困难的, 比较好的方法是通过可见光-近红外波段的遥感图像确定土壤的含沙量、含水量及水分吸收因子, 再构建与土壤热红外发射率的经验关系^[10].

对于水体主要针对的是内陆的河流、湖泊. 如果对于水质均匀, 水体温度的模拟可以进行简化, 即可以认为水体在热红外波段温度相同, 发射率也可以认为相同. 若较为准确的模拟水体, 则需要从能量平衡角度出发, 根据空气温度、湿度、风速等环境参量计算水体单位面积上的蒸发, 利用水体净辐射计算其温度, 同样此方法也需要观测相当多的外界参数. 较为成熟的水体温度模型是 Steve Railsback 等开发的 EcoSwarm 系统, 采用的是内流的水体温度模型.

对于建筑物主要是指城镇区域内楼宇、道路等. 由于大量的建筑物难以满足辐射传输理论的一些假设, 几乎无法用辐射传输方法解算出对应一个像元内的温度和发射率, 也很难用基于气象学和传热学模拟单个建筑物热红外的方法模拟大范围的城镇区域. 目前, 比较好的方法是通过能量平衡的方法推导城镇区域的温度分布, Noilhan 等人开发了 ISBA/TEB 模型^[14]. 模型计算屋顶、道路和墙面三种建筑目标, 需要预先定义目标相关的几何参数、辐射传输参数和物理参数等, 采用基于峡谷的方法求解能量平衡方程. 然而, 对于定义像元级的地表发射率仍然没有得到很好的解决. 另外, 可以考虑首先进行单个建筑和土壤的温度分布模拟. 然后通过建筑密度和建筑高度的估计, 得到视场方向的建筑物比例和土壤比例, 忽略多次散射, 计算得到方向亮温.

对以上 4 种地表覆盖类型的地物分别求出温度、发射率后, 即可逐个像元的计算出地表场景的热红外零气象视距辐射亮度值.

3 大气作用场景的仿真生成方法

从地表零气象视距辐射亮度值图像到传感器入瞳处的图像之间一定会受到大气吸收和散射作用以及大气湍流等效应的作用, 造成图像变形和模糊, 影响最终成像的质量. 在红外遥感图像仿真过程中也要对大气作用进行精确的仿真, 这样才能获得与实际获取最佳一致的图像, 为评价遥感系统提供依据. 目前大气作用过程的仿真采用两种方法: (1) 采用大气辐射传输理论, 求解热红外大气辐射传输方程, 根据计算出的大气透过率、大气程辐射、大气下行辐射等逐个像元计算出大气顶层入瞳处 (TOA) 的辐

射亮度值图像, 参数的计算一般采用 LOWTRAN7 或 MODTRAN4 软件; (2) 将大气作用的效果定义为大气调制传递函数, 可将其近似为湍流和气溶胶调制传递函数之积^[11,12].

3.1 基于大气辐射传输的大气作用场景仿真

根据大气辐射传输理论到达入瞳处的辐亮度为 $I_i(\theta, \varphi)$:

$$\begin{cases} I_i(\theta, \varphi) = R_i(\theta, \varphi)\tau_i(\theta, \varphi) + R_{a_i \uparrow}(\theta, \varphi) + R_{s_i \uparrow}(\theta, \varphi) \\ R_i(\theta, \varphi) = \varepsilon_i(\theta, \varphi)B_i(T_s) + (1 - \varepsilon_i(\theta, \varphi)) \frac{R_{a_i \downarrow} + R_{s_i \downarrow}}{\pi} + \rho_{b_i}(\theta, \varphi, \theta_s, \varphi_s)E_i \cos(\theta_s)\tau_i(\theta_s, \varphi_s) \end{cases}, \quad (1)$$

其中: R_i 为地表总辐射; $R_{a_i \uparrow}$ 为大气自身程辐射; $R_{s_i \uparrow}$ 为大气散射的太阳辐射; ε_i 、 T_s 为地表发射率和地表温度; $B_i(T_s)$ 为根据普朗克定律计算的黑体辐射; $R_{a_i \downarrow}$ 为下行的大气自身程辐射; $R_{s_i \downarrow}$ 为下行太阳漫射辐射; ρ_{b_i} 为地表双向反射率; E_i 为大气顶层太阳辐照度; $\theta, \varphi, \theta_s, \varphi_s$ 分别为传感器观测和太阳入射方向的天顶角和方位角. 当求解夜晚红外或热红外 8~13 μm 通道入瞳处辐亮度时, 方程中与太阳有关的辐射项去掉即可, 方程变为式(2):

$$\begin{cases} I_i(\theta, \varphi) = R_i(\theta, \varphi)\tau_i(\theta, \varphi) + R_{a_i \uparrow}(\theta, \varphi) \\ R_i(\theta, \varphi) = \varepsilon_i(\theta, \varphi)B_i(T_s) + (1 - \varepsilon_i(\theta, \varphi)) \frac{R_{a_i \downarrow}}{\pi} \end{cases}. \quad (2)$$

用户提供大气廓线数据(垂直温度廓线、水汽廓线、气压垂直廓线等)、传感器与太阳的几何方位参数、传感器波段响应函数等, 利用 LOWTRAN7 或 MODTRAN 程序即可计算出方程中的大气透过率、大气上行与下行辐射值, 再由前面模拟出的地表温度和发射率图像, 计算出到达入瞳处的图像. 实质上大气辐射传输方法属于光线追踪法.

3.2 基于调制传递函数的大气作用场景仿真

黎云、张天序等从定义大气调制传递函数的途径入手, 指出大气效应主要是由湍流和气溶胶的作用引起的, 继而分别给出了湍流和气溶胶调制传递函数模型及其参数的预测方法, 两调制传递函数相乘即可得到总的大气调制传递函数. 湍流调制传递函数可以表示为: $S_{MTF} = \exp\{-57.53v^{5/3}c_n^2\lambda\}^{-1/3}\{R\}_m[1 - u(\lambda)_m v / \{D\}_m]^{1/3}$, 其中: S_{MTF} 为短时间曝光时湍流调制传递函数; u 为经验系数; D 是成像器孔径; v 是角空间频率; c_n 是折射率结构系数; λ 是射线波长; R 是传输路径长度. 典型的气溶胶调制传递函数近似模型为^[12]:

$$A_{MTF}(v) = \begin{cases} \exp[-A_a\{R\}_m - S_a\{R\}_m(v/v_c)^2] & (v \leq v_c) \\ \exp[-(A_a + S_a)\{R\}_m] & (v > v_c) \end{cases}, \quad (3)$$

其中: S_0 与 A_0 分别为大气的散射和吸收系数; ν_c 为截止频率, $\nu_c = a/\lambda$, a 为气溶胶半径. 对一般的大气条件, ν_c 相当小, 此时气溶胶调制传递函数认为是常数衰减. 在此基础上, 并对气溶胶调制传递函数进行了修正, 采用了式(3)近似的高斯形式, 增大了截止频率, 使模糊半径增大, 充分的考虑了系统参数的影响及气溶胶的吸收作用.

4 传感器成像系统的场景仿真方法

传感器成像系统的场景仿真包括了场景仿真环节中最后 3 个步骤: 光学成像系统的仿真、探测器响应仿真及信号处理仿真, 主要是成像系统的综合 MTF 或 PSF; 探测器光谱响应、空间响应、传感器多元并扫模拟(双眼皮效应模拟)、影像条带噪声和 CCD 噪声模拟; 信号采样、量化与格式化输出等内容.

4.1 光学成像系统的仿真

通常情况下对于光学成像系统都采用调制传递函数(MTF)或点扩散函数(PSF)进行计算. 成像系统调制传递函数包括镜头光学系统 MTF、像增强 MTF、光纤面板 MTF、探测器调 MTF 及电子学系统等各个部件的调制传递函数, 这些函数乘积就是综合的系统 MTF. $MTF_{sys} = MTF_{opt} \cdot MTF_{lc} \cdot MTF_{\pi} \cdot MTF_{fo} \cdot MTF_{CCD} \cdot MTF_{opt}$ 为镜头光学系统的 MTF; MTF_{lc} 为电子学系统 MTF; MTF_{π} 为像增强 MTF; MTF_{fo} 为光纤面板的 MTF; MTF_{CCD} 为 CCD 的 MTF^[6,7,13].

如果将光学成像系统的总体响应看做是一个数学变换, 光学成像系统的作用就是导致图像发生退化, 质量下降. 由未发生退化图像的像元辐照度 $L(x, y)$ 按式(4)变换后, 可以得到经过成像系统作用后的退化图像:

$$I_{Final}(x, y) = [FFT^{-1} \{ \{ FFT(L(x, y) + \sigma_p) \}_{u, v} MTF_{sys} \}_{(x, y)} + \sigma_N] G + B \quad (4)$$

公式(4)中 (x, y) 为空间坐标; (u, v) 为频率坐标; FFT 和 FFT^{-1} 分别表示傅立叶正反变换; σ_p, σ_N 分别表示光子噪声、预置增益噪声; G 表示信号增益; B 表示直流偏置常数; $I_{Final}(x, y)$ 为计算机模拟生成的图像.

4.2 探测器响应的仿真

经过成像系统作用模拟生成的图像并不是最终仿真的结果, 入瞳处的信号虽然经过成像系统的退化作用后到达 CCD 探测器, 但还没有考虑 CCD 自身对光谱、空间响应过程. CCD 对光谱、空间的响应

是与 CCD 物理特性、成像方式、平台几何姿态等密切相关的, 而这些因素决定了最终仿真成像的光谱分辨率、空间分辨率、辐射分辨率等重要参数.

CCD 的光谱响应都是通过实际测量获得的, 由 CCD 物理特性决定, 一般都是以波段响应函数的方式给出的, 所以前面计算中用到的波段辐射值都是每一波段的各通道辐射值的加权平均. 该平均值的意义就是对各通道的响应值和光谱值在波长范围内积分, 再除以相同波长范围的响应函数的积分值得

$$\text{到的, 即: } L = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda} f(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) d\lambda}, L \text{ 就是波段平均辐射亮}$$

度, L_{λ} 就是单通道辐射亮度, $f(\lambda)$ 是该波段的波谱响应函数.

CCD 空间响应主要包括成像方式(推扫或摆扫方式)决定的 CCD 单元与地表的空间对应关系、临近效应等. 最佳的描述传感器与地表空间对应关系的方法应该是数字摄影测量中的共线方程理论^[13,14]. 共线方程精确的描述了构像时刻 CCD 单元与三维地表的空间几何关系, 在已知传感器构像时刻的平台空间姿态、空间位置后, 根据方程可以很容易计算得到带有几何变形仿真的图像.

除考虑 CCD 光谱响应、成像几何变形仿真外, 由于扫描方式带来的多中心投影; 多元并扫引起的双眼皮效应; CCD 噪声、条带噪声等也是需要加以考虑的. 对于 CCD 噪声通常可采用高斯(正态)分布、均匀分布和泊松分布等白噪声模型. 在实际系统中, 随机噪声是对许多随机因素的综合反应, 呈现出高斯分布特性. 因此在仿真系统中, 采用高斯分布白噪声为主. 对双眼皮效应和条带噪声也要按照其产生的机理进行相应的仿真. 此外, 对辐射亮度转换为光子数模拟、光阴极光电发射模拟、光阴极暗电流模拟、MCP 电子倍增模拟、噪声叠加模拟等电子学过程也应该加以考虑.

4.3 信号处理过程的仿真

至此图像仿真的主要工作已经基本完成, 剩下的一步为: 信号的采样、量化(A/D 转换), 只有完成这一步才能将模拟的图像最终按照标准格式在计算机上保存. 重采样的方法很多, 常用的有最近临法、双线性法、三次立方卷积法等, 为最大限度保持数据原貌, 选择最临近像元插值法. 量化方法一般先用波段最大辐射亮度进行拉伸, 然后根据式(5)将模拟辐射亮度图像转化为最终的仿真数字图像^[15].

$$DN(x, y, l) = \text{Nearest Integer} \left\{ \frac{L(x, y, l)}{L_{\max}(l)} \times (2^Q - 1) \right\} \quad (5)$$

式中: (x, y) 为像元位置; l 为波段号; $L(x, y, l)$ 为像元辐亮度值; $L_{\max}(l)$ 为波段最大辐亮度值; Q 为量化级数(辐射分辨率值, 即存储单个像元所占用的字节数目); Nearest Integer $\{\}$ 表示取整运算; $DN(x, y, l)$ 为量化后的数码值, 例如量化级数为 8Bit, 则 DN 值的范围为 $0 \sim 2^8 - 1$ ($0 \sim 255$).

目前图像的存储格式繁多, 传统的遥感图像存储格式还是 BIP、BIL、BSQ 这 3 种方式, 可根据需要选择其中一种, 编写若干行程序代码即可实现. 虽然这三种存储格式都没有对图像进行压缩处理, 会占用较大的计算机存储资源, 但是它们的优势就是存取简便、兼容各种软件、硬件环境下的图像处理, 当然没有压缩也就没有信息的损失. 关于图像的显示是图像处理和计算机图形学成熟的理论, 且对仿真图像的质量不会产生影响, 故不再陈述.

至此就完成了基于场景仿真红外遥感图像的全部工作.

5 结语

本文对基于场景的热红外遥感成像模拟技术进行了综合分析, 并对各环节场景的模拟涉及的技术方法进行了探讨. 虽然该领域已取得不少研究成果, 仍有诸多不足之处, 在以后的研究中将重点围绕以下几个方面开展工作: (1) 目前, 还没有完全实现对大场景、复杂地表覆盖条件下的热红外遥感图像模拟, 以后将从热红外辐射、成像的机理出发逐步建立起适合我国航空航天需求的模拟系统; (2) 建立的模型不仅能从理论上准确地描述物理现象, 而且要建立判断模型准确性的标准. 把模型与实际情况进行比较, 证明模型的合理性; (3) 仿真系统不仅能仿真静止图像的效果, 而且能仿真动态图像的效果. 建立系统的动态模型, 使得仿真图像会随着系统性能瞬时的变化而改变; (4) 系统仿真模型与系统性能模型的有机结合. 成像系统仿真主要针对两个目标: 一是提高获取图像的质量, 另一是优化成像系统的性能参数. 今后, 可以将两个目标有机地结合起来, 形成一个既能增强图像质量, 也能进行性能参数评价的完善系统.

REFERENCES

[1] YU Wei-Jie, LIU Hua, PENG Qun-Sheng, et al. Computer simulation of infrared image[J]. *Computer Applications and Software* (于伟杰, 刘华, 彭群生, 等. 计算机红外成像仿

真. *计算机应用与软件*), 2004, 21(7): 2—4.

- [2] Wout Verhoef Heike Bach. Simulation of hyperspectral and directional radiance images using coupled biophysical and atmospheric radiative transfer models [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 87: 23—41.
- [3] Börner A, Wiest L. SENSOR: a tool for the simulation of hyperspectral remote sensing systems [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2001, 55(6): 299—312.
- [4] WANG Gang, YU Bing-Xi. Study on scientific visualization of earth remote sensing based on imagery simulation [J]. *Journal of System Simulation* (王刚, 禹秉熙. 基于图像仿真的对地遥感过程科学可视化研究. *系统仿真学报*), 2002, 14(6): 755—760.
- [5] WU Ya-Ping, ZHANG Tian-Xu. Simulation of infrared image and the simulation software [J]. *Infrared and Laser Engineering* (吴亚平, 张天序. 红外图像的计算机仿真及仿真软件. *红外与激光工程*), 2000, 29(4): 1—3.
- [6] XIAO Liang, WU Hui-Zhong, LIU Yang, et al. Modeling and simulation of digital scene image synthesis [J]. *Acta Armamentarii* (肖亮, 吴慧中, 刘扬, 等. 数字景象匹配图模拟生成的建模与仿真. *兵工学报*), 2005, 26(1): 113—118.
- [7] Christelle Gamier. Physically-based infrared sensor efforts modeling [J]. *SPIE Proceedings, Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling and Testing.*, 1999, 3701: 81—94.
- [8] ZUO Yue-Ping, ZHANG Jian-Qi. Review of modeling infrared imaging systems [J]. *Infrared and Laser Engineering* (左月萍, 张建奇. 红外成像系统仿真技术的现状与未来. *红外与激光工程*), 2001, 30(4): 282—286.
- [9] LIU Qiang, Chen Liang-Fu, LIU Qin-Huo, et al. A radiation transfer model to predict canopy radiation in thermal infrared band [J]. *Journal of Remote Sensing* (刘强, 陈良富, 柳钦火, 等. 作物冠层的热红外辐射传输模型. *遥感学报*), 2003, 7(3): 161—167.
- [10] XIAO Qing, LIU Qin-Huo, LI Xiao-Wen, et al. A field measurement method of spectral emissivity and research on the feature of soil thermal infrared emissivity [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (肖青, 柳钦火, 李小文, 等. 热红外发射率光谱的野外测量方法与土壤热红外发射率特性研究. *红外与毫米波学报*), 2003, 22(5): 373—379.
- [11] LI Yun, ZHANG Tian-Xu. Simulation for the effect of atmosphere on infrared imaging [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology* (Nature Science Edition) (黎云, 张天序. 红外成像大气作用效果模拟. *华中科技大学学报*), 2002, 30(2): 78—81.
- [12] Sadot D, Kopeika N S. Thermal imaging through the atmosphere: atmosphere MTF theory and verification [J]. *Opt. Eng.*, 1994, 33(3): 880—887.
- [13] ZHOU Hao, WANG Bin. New scheme for decomposition of mixed pixels of remote sensing images [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (周昊, 王斌. 一种新的遥感图像混合像元分解方法. *红外与毫米波学报*), 2005, 24(6): 443—446.
- [14] Noilhan J, Mahfouf J F. The ISBA land surface parameterization scheme [J]. *Global and Plan. Change*, 1996, 13: 145—159.
- [15] Repasi E, Greif H J. Generation of dynamic IR-Scenes for ground-based systems and missile applications [J]. *Proceeding of the SPIE*. 1998, 3436: 460—461.