

doi: 10.6046/rzyy.2023202

引用格式: 崔博伦, 李欣, 安宁, 等. 针对起伏异质地表的一体化成像光谱仪成像建模[J]. 自然资源遥感, 2024, 36(4): 165–174. (Cui B L, Li X, An N, et al. Imaging modeling of integrated imaging spectrometers for undulating terrain with uneven surface feature distribution[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2024, 36(4): 165–174.)

针对起伏异质地表的一体化成像光谱仪成像建模

崔博伦¹, 李欣¹, 安宁¹, 仝迟鸣¹, 张家铭¹, 朱军²

(1. 北京空间机电研究所, 北京 100094; 2. 中国东方红卫星股份有限公司, 北京 100094)

摘要: 一体化成像光谱仪能够有效提升陆地生态系统监测能力, 在设计研制阶段开展成像仿真是提升其效能的重要手段, 针对目前成像仿真中场景建模和辐射传输模型的不足, 建立了一套全链路的成像仿真模型, 并利用该模型初步开展了载荷效能评价。首先, 根据载荷观测目标开展了大型场景异构建模; 然后, 推导了包含荧光辐射和热辐射的起伏异质地表辐射传输模型; 最后, 结合光栅光谱仪成像模型, 最终集成为全链路成像仿真模型。为验证起伏异质地表的邻近效应对像元日光诱导叶绿素荧光(solar-induced chlorophyll fluorescence, SIF)空间分布的影响, 对比本光谱仪空间分辨率下, 考虑和未考虑地形邻近效应的模拟 SIF_{red} 和 SIF_{farred} 辐亮度。对于地形起伏明显且地物分布非均一的列数据, SIF 辐亮度差异分别最大达到 22% 和 52%, 未考虑地形邻近效应会导致高分辨率 SIF 仿真的显著误差。本研究的成像建模方法能够用于异质起伏地表场景的高光谱-超光谱成像仿真, 从而分析一体化成像光谱仪生态监测的复合应用的效能。

关键词: 高光谱全链路仿真; 日光诱导叶绿素荧光; 陆地生态监测; 高光谱成像

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2024)04-0165-10

0 引言

陆地生态环境中包含了陆表植被、内陆水体、土壤和大气等多种要素, 生态红线划定、碳交易估值等都需要对以上要素进行同时相连续探测。针对不同要素, 探测的物理量存在明显差异, 卫星需要同时具备多种体制的载荷。2022 年我国发射的首颗陆地生态系统碳监测卫星“句芒号”配备了多波束激光雷达、多角度多光谱相机、超光谱探测仪和多角度偏振成像仪, 可通过监测株高、郁密度和光合作用效率服务全球森林碳汇核算^[1]。同年, 中国东方红卫星股份有限公司也提出多种成像体制载荷进行多要素探测的卫星设计, 以实现对于陆地生态环境中各种要素的综合监测。

对于光学遥感观测手段, 植被冠层的色素含量、木质部含量、叶面积指数等常采用多/高光谱成像仪进行反演^[2], 株高和森林的郁密度常采用激光雷达反演^[3]。二类水体的水质参量^[4]和土壤成分^[5]多利用高光谱成像仪反演。近年来生态领域对植被荧光辐射的应用研究证明, 植被冠层日光诱导叶绿素荧光(solar-induced chlorophyll fluorescence, SIF)参

量能够更及时和高精度地反映植被光合作用的速率, 从而对生态环境变化进行更及时和精确的监测^[6]。高光谱数据优秀的分类能力则能够有效实现植被类型的识别, 应用于不同类型植被 SIF 辐射对环境胁迫响应的差异性研究^[7]。同时, 利用高光谱数据反演的光化学指数(photochemical reflectance index, PRI)^[8]是分离 SIF 辐射的 2 个因素光化学猝灭(photochemical quenching, PQ)和非光化学猝灭(Non-Photochemical Quenching, NPQ)过程^[8]的关键数据, 对精确评价光合作用效率至关重要。由于 SIF 辐射的信号仅为冠层反射能量的百分之一, 须采用超光谱分辨率光谱仪在大气吸收线或太阳夫琅禾费线内测量^[6]。同时利用高光谱成像和超光谱探测系统进行探测在综合植被、水体、土壤和土地利用等多个要素、评价和监测陆表生态系统健康状况和碳汇能力等方面具有巨大的潜力。计划于 2025 年发射的 FLEX 卫星的主载荷 FLORIS^[8]就采用了该形式。在遥感载荷设计研制中, 硬件和软件研制是 2 条同步开展的研究路线, 甚至由于算法反演精度对载荷应用效能的决定作用使得软件研制中的相关算法研究要提前开始, 并与载荷指标设计相互迭代。这就需要研究团队通过缩比系统的飞行试验或

收稿日期: 2023-07-11; 修订日期: 2023-12-07

基金项目: 民用航天项目(编号: D010206)资助。

第一作者: 崔博伦(1988-), 男, 博士, 工程师, 研究方向为高光谱载荷总体设计与量化反演。Email: boluncui@qq.com。

遥感成像仿真获取大量的基础数据。受限于飞行试验的成本和可操作性,其可获取的数据量通常有限,为此在 Landsat8, HySpIRI^[9], Enmap^[10], GF-5^[11] 和 FLEX^[12-13] 等卫星的载荷指标分析和算法研制中广泛使用了高光谱成像仿真的遥感数据。尽管在相关型号研制中,高光谱成像仿真系统逐渐成熟,但受限于载荷应用需求,仅 FLEX 的 E2ES 仿真系统被应用于植被荧光探测的仿真。根据 Tenjo 等^[14] 的研究, E2ES 针对植被覆盖场景设计,植被光学特性采用 SCOPE 辐射传输模型建模,土壤采用 BSM 模型,水体可采用 HydroLight 模型,其他类型地表则直接采用类别的光谱曲线。这导致 E2ES 系统仅能满足植被生态参量反演和部分水体参量反演的研究需求。另外,对起伏地形的影响仅考虑了单一像元双向反射分布函数 (bidirectional reflectance distribution function, BRDF) 辐射效应, SIF 与地形的耦合^[14], 而根据 Mousivand 等^[15] 的研究,周围地物散射作用对地表 BRDF 反演具有显著影响。荧光超光谱数据空间分辨率普遍较低,目前可用于荧光探测的载荷中,空间分辨率最高的是“句芒号”卫星超光谱探测器,其空间分辨率为 1.2 km^[1],低空间分辨率条件下地形邻近效应影响较小^[8]。而未来载荷的空间分辨率将进一步提高, FLEX-FLORIS 的空间分辨率将提升到 300 m, 本文将面向中高空间分辨率荧光探测与高分辨率高光谱探测相结合的一体化成像光谱仪开展成像建模。随着空间分辨率进一步提高,地形邻近效应的影响会逐渐凸显,为此,本文将引入地形邻近效应影响,并集成多种地物光学特性建模方法构建异构场景数据集,研制面向多种应用的起伏异质地表一体化成像光谱仪全链路仿真模型。

1 仿真系统设计

1.1 系统总体结构

全链路仿真通常分为场景仿真、大气辐射传输仿真、遥感器成像仿真 3 个部分^[13,16-18]。利用场景仿真模型构建地表光学反射、辐射特性。利用大气辐射传输模型仿真遥感器入瞳辐亮度。利用遥感器成像仿真模型对光学系统的光谱、辐射、几何退化过程进行仿真,最终获得探测器的 DN 值。将场景仿真分为参数设定和仿真计算 2 个环节,将大气辐射传输仿真分为起伏地表的几何参数计算和辐射传输计算 2 个环节,一体化成像光谱仪成像的仿真系统结构如图 1 所示。

场景仿真中需考虑大面积复合类型场景的快速建模需求及针对植被和土壤定量化反演应用的目标

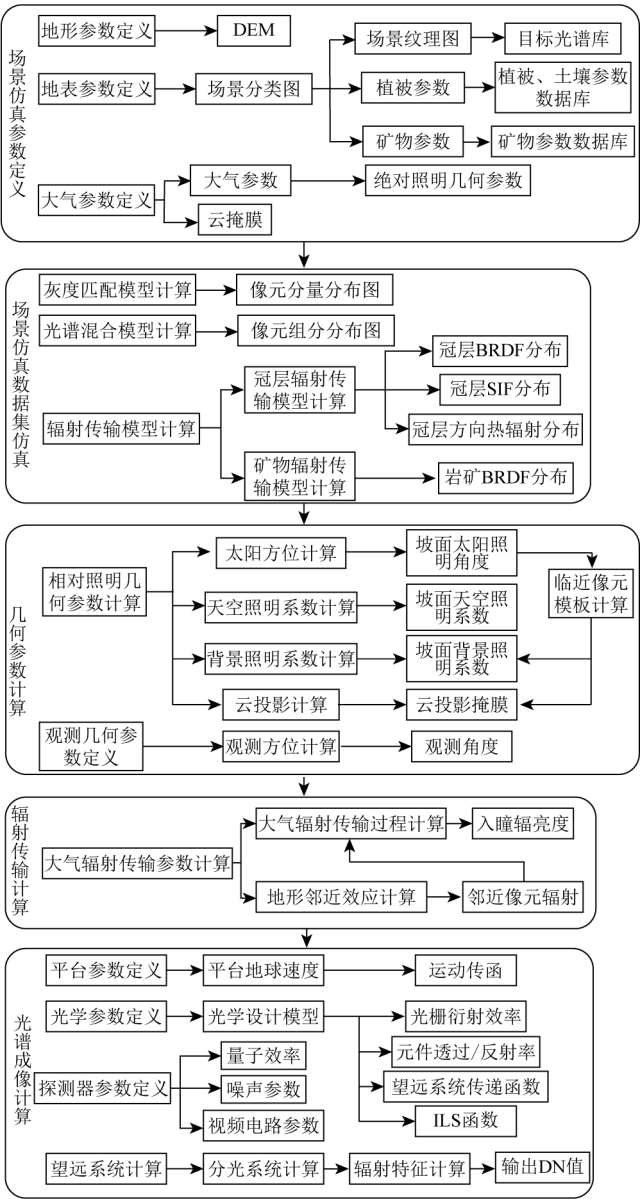


图 1 紧凑型一体化生态监测光谱仪全链路仿真系统
Fig.1 Simulation system of compact economical hyperspectral imager

光谱混合和光谱各向异性建模的需求。为此,场景仿真集成了灰度匹配模型、光谱混合模型及辐射传输模型。与之相对应,场景仿真参数中包括场景的分类图、灰度匹配模型和光谱混合模型所需的场景纹理图和目标光谱库,地物辐射传输模型对应的植被参数、矿物参数和大气参数。除此之外,由于大气辐射传输过程中需要考虑地表起伏作用,因此地面场景仿真参数还包含了数字高程模型 (digital elevation model, DEM)。大气辐射传输仿真采用四流近似模型,输入参数包括大气上行、下行辐射参量及地表坐标系下的太阳方位、观测方位及云层投影像元。大气辐射传输仿真得到入瞳辐亮度后,利用光谱成像模型进行一体化成像光谱仪数据的仿真计算。其中分别针对平台运动、光谱仪光谱成像和探测器光

电效应等分别进行建模。最终得到系统的探测器视频电路读取的 DN 值。

1.2 场景仿真模型

针对一体化成像光谱仪空间分辨率高、光谱分辨率高、幅宽较大等成像特点和陆表生态系统量化反演需同时兼顾多种目标的应用特点,开展场景仿真建模。目前常用的高光谱全链路成像仿真系统中,对地表场景的建模方式包括对几何模型或分类图直接赋光谱^[16-17],根据多谱段的灰度关系对光谱特征进行建模^[17-18],根据对地表光谱特性进行线性混合模型建模^[19],以及直接对地表 BRDF 模型进行辐射传输建模^[13]。其中,对几何模型赋光谱的方式适用于点目标,对于大范围场景效率过低,而直接利用对分类图赋光谱忽略了同类地物由于不同照明关系和组分差异造成的光谱变异,场景失真较严重。线性混合模型适用于大范围复杂目标的快速建模,因此目前使用广泛,但这种方式由于仅考虑物质的线性混合组分占比,缺乏对矿物孔隙度、土壤含水量和植被生理参量等的考虑,难以覆盖本载荷的全部应用实验^[19]。基于 BRDF 模型能够根据典型地物的理化参数、结构参数或组分进行精确的光谱特性仿真,目前植被辐射传输建模主要采用的模型包括 SCOPE^[20],DART^[21],FluorWPS^[22]和 SIFT^[23]等,岩矿主要采用 Hapke 模型^[24]。考虑到逐像元计算 BRDF 的效率低,难以满足星载高光谱遥感成像仿真的需求,E2ES 在植被仿真中采用了基于水平均匀冠层假设的 SCOPE 模型,并设计植被覆盖区的叶面积指数(leaf area index, LAI)服从均一、径向、正态分布等分布^[13]。采用辐射传输模型建模一方面难以模拟组分复杂的目标;另一方面建模过程中通常难以获取足够的输入参数。为此,针对一体化成像光谱仪的植被生态监测能力验证,本文采用如下线性混合模型对裸土、水体、人工地物等进行快速大范围建模。对于矿物光谱,基于朗伯体假设将矿物反射率光谱取倒数后,进行线性混合后再取倒数作为混合光谱^[25]。建模过程中以典型地物的光谱作为端元光谱,利用式(1)对多光谱纹理图进行最小二乘法解混,对应类别地物每个像元的丰度。其表达式为:

$$\frac{\int_{\lambda} R_k(\lambda) \rho(\lambda)}{\int_{\lambda} R_k(\lambda)} = \sum_i a_i \frac{\int_{\lambda} R_k(\lambda) \rho_i(\lambda)}{\int_{\lambda} R_k(\lambda)}, \quad (1)$$

式中: $R_k(\lambda)$ 为纹理的波段 k 的光谱响应函数; $\rho(\lambda)$ 和 $\rho_i(\lambda)$ 分别为像元光谱反射率和第 i 个组

分的反射率; a_i 为第 i 个组分的丰度。采用 SCOPE 2.0 模型进行大范围植被 BRDF, SIF 和热辐射方向特性建模^[20]。根据 Yang 等^[20]的研究, SCOPE2.0 模型的冠层辐射传输过程采用能量平衡模型建模, 本文建模涉及的输入、输出参数如图 2 所示。

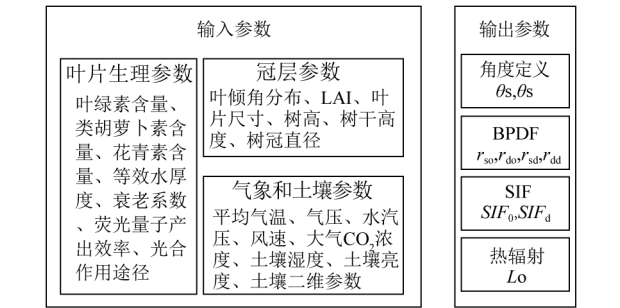


图 2 冠层辐射传输建模输入输出参数
Fig.2 Input and output parameters of the canopy RTM

针对上述模型,仿真场景需要同时存储场景的 BRDF, SIF 和热辐射的方向特性,随场景空间分辨率、光谱分辨率的迅速提升,难以确保足够的存储空间进行逐像元光谱信息存储。为此场景仿真模型不输出地表逐像元的光学特性,而改为输出图 3 所示的异构数据集,以压缩场景数据尺寸,便于大气辐射传输。以本文第 2 节模拟场景为例,2.5 m 空间分辨率、21 km 幅宽的场景,若直接存储 BRDF 光谱数据量大于 57 TB。采用异构数据集的方式存储场景文件尺寸小于 2.5 GB。

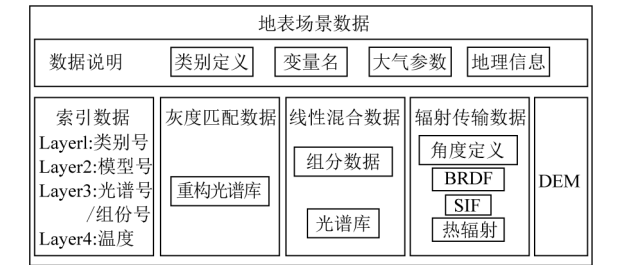


图 3 地表场景异构数据集组成
Fig.3 Framework of scene simulating data

1.3 大气辐射传输模型

大气辐射传输模型是全链路仿真的核心环节,由于一体化成像光谱仪量化反演中受地形影响较大,其主要观测目标,植被冠层的 BRDF 特性明显,在大气辐射传输建模过程中必须考虑场景 BRDF、荧光的方向发射辐亮度及起伏地表对辐射传输的综合影响。本文在 Mousivand 等^[15]的起伏地表辐射传输模型的基础上引入了冠层 SIF 散射、SIF 方向发射辐亮度和地表发射辐亮度,于是大气层顶和大气层底部的上行和下行辐射照度可表示为:

$$\begin{cases} E_s(b) = \tau_{ss} E_s(t) \\ E^-(b) = \tau_{sd} E_s(t) + \rho_{dd} E^+(b) + \pi L_a(b) \\ E^+(b) = \overline{r_{sd}} E_s(b) + \overline{r_{dd}} E^-(b) + \pi \overline{SIF_d} + (1 - \overline{r_{dd}}) \pi L_s \\ E_o(b) = r_{so} F_{sun} E_s(b) + F_{sky} r_{do} E^-(b) + E_{terr}(b) r_{do} + \pi SIF_s + (1 - r_{do}) \pi L_s \\ E_o(t) = \rho_{so} E_s(t) + \tau_{do} E^+(b) + \tau_{oo} E_o(b) + \pi L_a(t) \end{cases}, \quad (2)$$

式中: t 和 b 分别为大气层顶和大气层底; $+$ 和 $-$ 分别表示上行和下行; τ_{ss} , τ_{sd} , τ_{do} 和 τ_{oo} 分别为太阳直射方向大气透过率、太阳直射的大气散射透过率、散射照明的大气观测方向透过率、观测方向大气透过率; ρ_{dd} 和 ρ_{so} 分别为大气双向半球反射率因子、大气二向反射率因子; L_a 为大气黑体辐射亮度; r_{so} , r_{sd} , r_{do} 和 r_{dd} 分别为地表二向反射率因子、地表方向半球反射率因子、地表半球方向反射率因子和地表双向半球反射率因子; SIF_s 和 SIF_d 分别为地表观测方向 SIF 辐射亮度和地表半球 SIF 辐射出射度; L_s

地表场景的黑体热辐射亮度; E_s , E_o , E_{terr} , $E^+(b)$ 和 $E^-(b)$ 分别为太阳直射辐照度、观测方向辐照度、背景辐照度和大气层底的上、下行辐照度, 如图 4 所示^[25]。 F_{sun} 和 F_{sky} 分别为太阳可见系数和天空光可见系数, 计算方法详见文献[15]。为简化计算, 对邻近地物散射用半球反射率因子的均值 $\overline{r_{sd}}$, $\overline{r_{dd}}$ 和半球 SIF 辐出度的均值 $\overline{SIF_d}$ 近似。求解式(2) 得到大气层顶入瞳辐亮度 $L_o(t)$, 表达式为:

$$L_o(t) = F_{sun} \tau_{ss} \tau_{oo} r_{so} \frac{E_s(t)}{\pi} + \tau_{oo} SIF_s + \tau_{oo} (1 - r_{do}) L_s + \frac{\tau_{do} (\tau_{ss} \overline{r_{sd}} + \tau_{sd} \overline{r_{dd}}) \frac{E_s(t)}{\pi} + \tau_{do} (1 - \overline{r_{dd}}) L_s + \tau_{do} \overline{r_{dd}} L_a(b) + \tau_{do} \frac{\overline{SIF_d}}{\pi}}{1 - \overline{r_{dd}} \rho_{dd}} + \frac{\tau_{oo} (\tau_{sd} + \rho_{dd} \tau_{ss} \overline{r_{sd}}) \frac{E_s(t)}{\pi} + \left[\frac{\overline{SIF_d}}{\pi} + (1 - \overline{r_{dd}}) L_s \right] \tau_{oo} \rho_{dd} + \tau_{oo} L_a(b)}{1 - \overline{r_{dd}} \rho_{dd}} - r_{do} F_{sky} + \tau_{oo} r_{do} \frac{E_{terr}}{\pi} + \rho_{so} \frac{E_s(t)}{\pi}。 \quad (3)$$

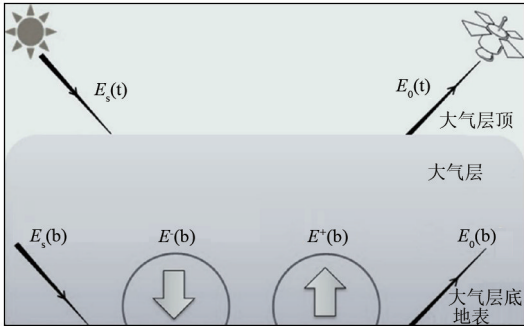


图 4 大气辐射传输辐照度定义

Fig.4 Defined of radiation transformation irradiance

严格的背景辐射计算需要追迹观测像元与邻近像元的多次散射。根据 Proy, 背景辐射照度可表示为目标像元 M 周围 N 个背景像元 P 辐亮度的积分, 表达式为:

$$E_{terr}(b) = V_{terr} \left[\frac{\tau_{dd} (\tau_{sd} + \overline{r_{sd}} \tau_{ss} \rho_{dd}) E_s(t) + \pi \rho_{dd} \overline{SIF_d} + \pi (1 - \overline{r_{dd}}) \rho_{dd} L_s + \pi L_a(b)}{1 - \rho_{dd} \overline{r_{dd}}} + \pi \overline{SIF_d} + \pi (1 - \overline{r_{dd}}) L_s \right], \quad (5)$$

式中: $\overline{r_{dd}}$, $\overline{SIF_d}$ 和 $(1 - \overline{r_{dd}}) L_s$ 分别为背景像元对应分量的加权平均; V_{terr} 为背景可见系数^[15]。为确定像元数量 N , 计算权重模板如图 5 所示。 X/Y 轴分

$$E_{terr} = \sum_{i=1}^N \frac{\cos \theta_p \cos \theta_M dS_p dS_M}{R^2} L_{P \rightarrow M}(b), \quad (4)$$

式中: $L_{P \rightarrow M}(b)$ 为像元 P 对像元 M 的辐亮度; R 为 2 个像元间距; θ_p 和 θ_M 分别为 P 和 M 这 2 点连线分别对于像元 P 和像元 M 的天顶角; S_p 和 S_M 分别为像元 P 和像元 M 的面积, 由于 $L_{P \rightarrow M}(b)$ 中包含式(2)第 2 行的全部分量, 会导致计算中出现大量的迭代, 难以满足大范围场景计算的要求。实际应用中, 将背景辐射照度近似为目标光学特性的加权平均与地形可视因子的乘积, 权重为 $1/R_{pix}^2$, R_{pix} 为像元距离。计算过程中仅需要一个提前计算的权重模板。带入式(2)中的第 2 行的变量得到背景辐射照度表达式为:

别为背景像元到目标像元的距离, 取值为等高线对应权重, 可见背景像元距离目标像元为 3 个像元时权重小于 0.1。本文后续计算中仅考虑邻近 3 个像元的背景辐射。

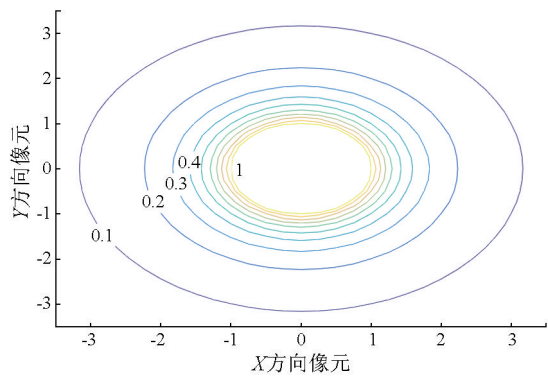


图 5 不同距离像元权重系数

Fig.5 Weight of pixels at different distances

根据上述模型,一体化成像光谱仪辐射传输建模首先根据 DEM 计算坡面坐标系下的太阳天顶角、方位角、观测天顶角、方位角、 F_{sun} , V_{sky} , V_{terr} 和 $1/R_{\text{pix}}^2$ 等几何参数,之后索引场景中的 BRDF, SIF 和温度等参数,计算邻近地物的 $\overline{r_{\text{sd}}}$, $\overline{r_{\text{dd}}}$ 和 $\overline{\text{SIF}_d}$,再利用式(4)计算背景辐射 E_{terr} ,最后带入式(3)计算得到逐像元的入瞳辐亮度,完成大面积高分辨率超光谱场景的全谱段大气辐射传输建模。

1.4 光谱成像模型

一体化成像光谱仪的光谱成像主要涉及望远系统、中继系统、光谱分光成像组件和探测器焦面组件等,参考 Tao 等^[26]对 Offner 高光谱成像仪的建模方法和 ESA FLEX 计划中 FLEX-E 仿真系统的设计^[12],光谱成像过程中可通过对入瞳辐亮度数据进行延轨、穿轨、光谱维传递函数的卷积,再对成像数据进行空间-光谱维重采样,进行光谱系统成像的空间-光谱域退化建模,具体流程如图 6 表示。

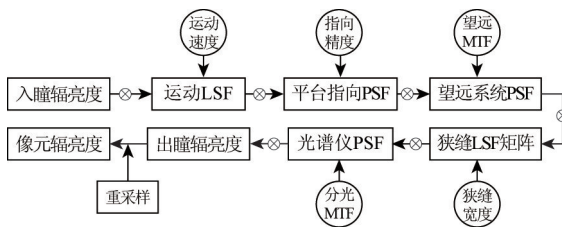


图 6 光学系统成像退化过程模型

Fig.6 Flowing chart of the imaging distortion model

辐射特性建模计算公式为:

$$n_s = \frac{\pi L(\lambda) A_d \tau_o(\lambda) t_{\text{int}} \eta_q(\lambda) \Delta \lambda}{4 F^2 (hc/\lambda)} \quad (6)$$

$$\tau_o(\lambda) = \prod_i \rho(\theta_i, \lambda) \cdot \prod_i \tau(\theta_i, \lambda) \cdot \eta_d(\lambda) \quad (7)$$

式中: n_s 为探测器像元产生的光电子数; $L(\lambda)$ 为像元辐亮度; $\eta_q(\lambda)$ 为探测器光谱量子效率; F 为系

统 F 数; A_d 为像元面积; t_{int} 为积分时间; $\tau_o(\lambda)$ 为光学系统总透过率,即由每个光学件入射角 θ_i 的反射率 ρ 和透过率 τ 及光栅衍射效率 $\eta_d(\lambda)$ 计算得到; h, c 分别为普朗克常数和光速。

分别计算探测器光子噪声 $\sqrt{n_s}$ 、暗电流电子数 n_d 、读出噪声 σ_r 、视频电路噪声 σ_c 、量化噪声 σ_q 等,系统总电子数 n_o ^[26] 计算公式为:

$$n_o = n_s + n_d + rnd \sqrt{n_s + n_d + \sigma_r^2 + \sigma_c^2 + \sigma_q^2} \quad (8)$$

式中: n_s 为暗电流电子数; rnd 为噪声随机数。最后,根据文献[26]计算输出 DN 值,其表达式为:

$$DN = (2^b - 1) \frac{n_o R_c}{V_{\text{ref}}} \quad (9)$$

式中: b 为量化位数; R_c 为电荷转换系数; V_{ref} 为参考电压,取典型值 3V。

2 一体化成像光谱仪建模结果

本文的一体化成像光谱仪同时具备高分辨率高光谱探测通道和中高分辨率超光谱探测通道。根据 Jacobs 等^[27]和 Tao 等^[28]的研究,要实现真实度超过 0.95 的成像仿真,需要场景数据的空间/光谱分辨率分别达到光谱仪的 3 倍。相应需要空间分辨率达到 3 m 的高空间分辨率地表纹理和分类图。但由于 1.2 节中采用的基于线性混合模型的地表场景仿真建模,其模拟精度与谱段的跨度和数量有关,权衡地表采样间隔的影响和光谱混合精度的影响,本文采用基于 10 m 空间分辨率的哨兵 2A 影像的地面分类数据和多光谱地面纹理作为场景的输入数据。其中地面场景的分类数据为 ESA WorldCover2020 地表分类数据集^[29]。考虑模拟场景的地形变化缓慢,采用 ASTER GDEM 地形数据。为满足光谱成像仿真建模对空间-光谱维退化和重采样计算的要求,对纹理数据、地物分布和 DEM 数据进行重采样,空间采样间隔为 2.5 m。输入场景数据如图 7 所示。输入表 1 所示参数,利用 MODTRAN6.0 计算大气参量^[30],利用 1.3 节的模型完成大气辐射传输建模,得到空间分辨率 2.5 m、光谱分辨率 0.1 nm 的入瞳辐亮度。

根据探测器选型和光学系统设计利用 1.4 节所述的光谱成像模型对 2 通道成像数据进行仿真得到 DN 值数据。根据 DN 值数据和大气辐射传输的入

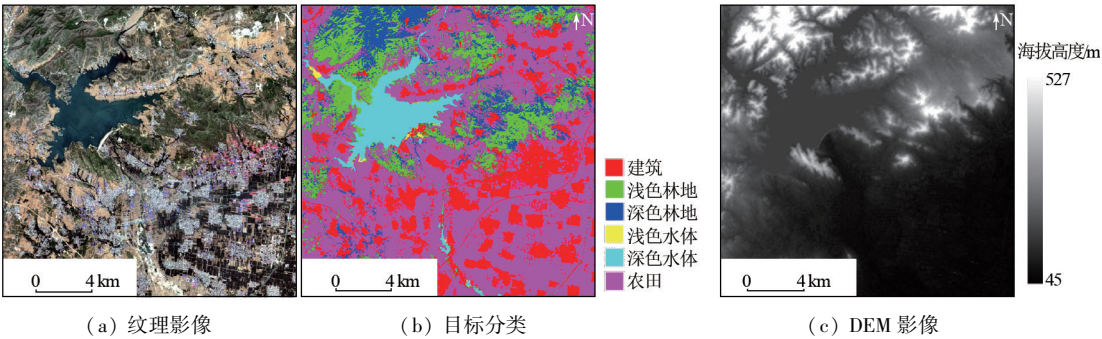


图 7 模拟场景输入影像数据

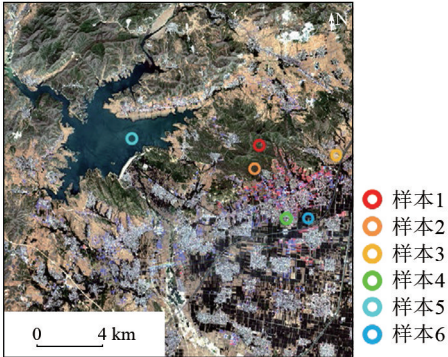
Fig.7 Input data of scene simulation

表 1 大气辐射传输建模参数

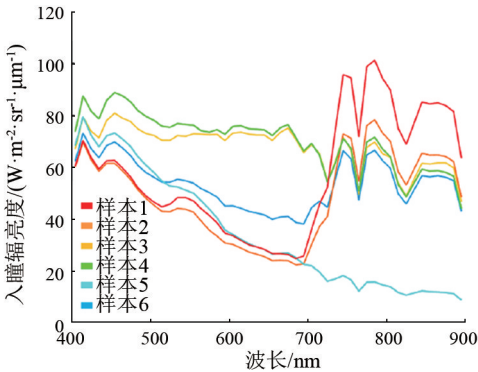
Tab.1 Parameters of atmospheric radiative transformation

大气参数	取值
大气类型	中纬度夏季
气溶胶模型	Rural
CO ₂ 浓度/ ppmv	390
太阳天顶角/(°)	45
太阳方位角/(°)	180
成像天顶角/(°)	0
成像方位角/(°)	0
海拔高度/ km	0.4
轨道高度/ km	550
光谱分辨率/ cm ⁻¹	1

瞳辐亮度建立辐射定标方程,将仿真 DN 值数据反演为入瞳辐亮度,如图 8 和图 9 所示。对比图 7(a) 和图 8(a) 数据色彩一致,山区植被深浅由植被辐射传输模型中叶绿素含量、LAI 和地形共同导致。对比山区的细节纹理与对应的 DEM(图 10 所示),向阳面和背阴面辐亮度存在明显差异。提取图 10(a) 中山谷裸地光谱,从山脚向山谷延伸 1-7 个像元(图中红-紫色点),输入的光谱反射率如图 10(c) 所示,对应入瞳辐亮度光谱如图 10(d) 所示,坡底像元中越靠近坡面位置的像元植被光谱特征越明显,大气辐射传输仿真反映了地形邻近效应。



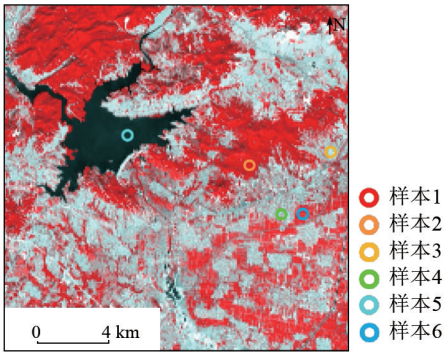
(a) 真彩色合成影像



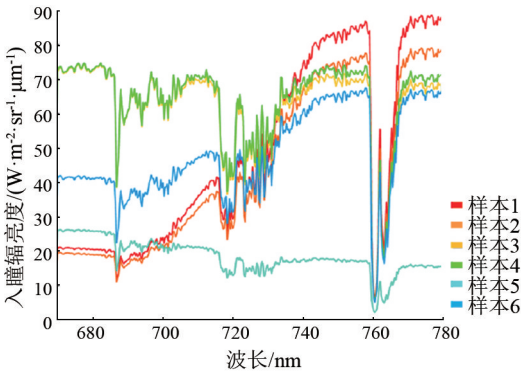
(b) 典型地物入瞳辐亮度

图 8 高光谱通道仿真结果

Fig.8 Simulated data of hyperspectral channel block



(a) 伪彩色合成影像



(b) 典型地物入瞳辐亮度

图 9 荧光通道仿真结果

Fig.9 Simulated data of SIF channel block

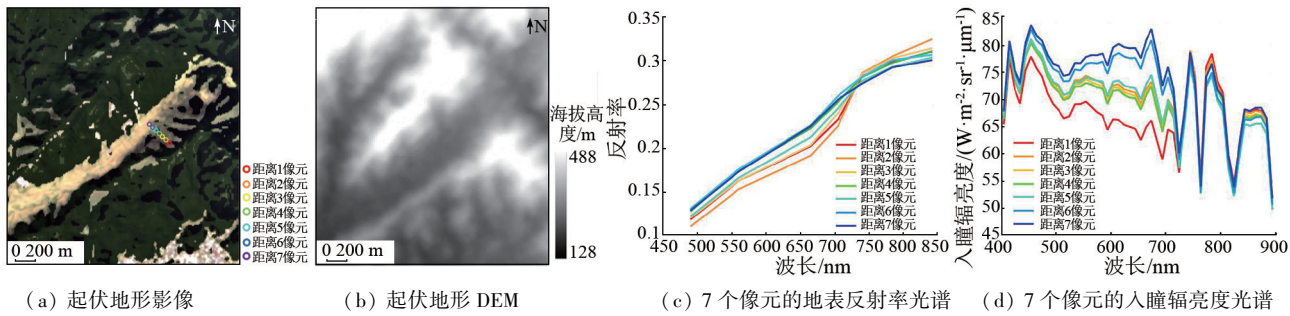


图 10 起伏地形不同位置光谱

Fig.10 Spectral radiance of different places in rugged terrain

为进一步验证像元荧光数据受起伏异质地表的作用,在大气辐射传输建模中,提取荧光辐射项,并按照空间分辨率对入瞳 SIF 辐亮度重采样,对比山区荧光辐亮度随地形的分布,其中未考虑和考虑地形邻近效应的模拟 SIF_{farred} 和 SIF_{red} 分布分别如图 11—12 所示。在未考虑地形邻近效应的情况下,

SIF 方向分布仅考虑冠层日照和观测方向影响,导致 SIF 随起伏地表的空间分布变化被低估。引入地形邻近效应后,冠层接收的天空光照明、背景辐射照明及地气耦合辐射均受地形影像,图 11 (b) 所示, SIF 散射项随空间分布显著,最终导致 SIF 总体随地形分布明显。图 12 表示出同样的结果。

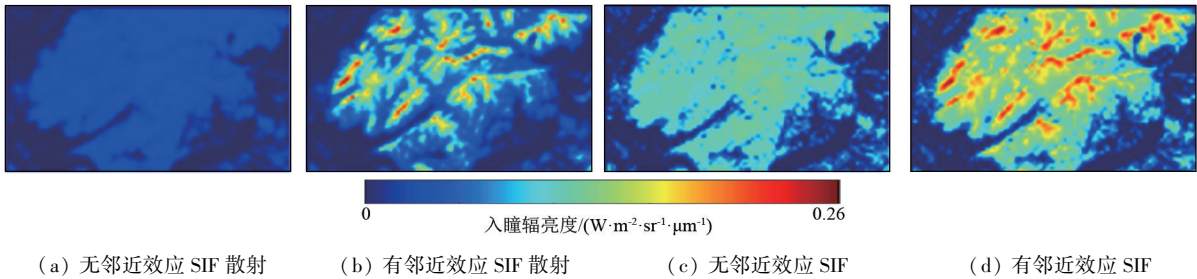


图 11 不同模式 SIF_{farred} 入瞳辐亮度对比

Fig.11 TOA SIF_{farred} with/without terrain effect

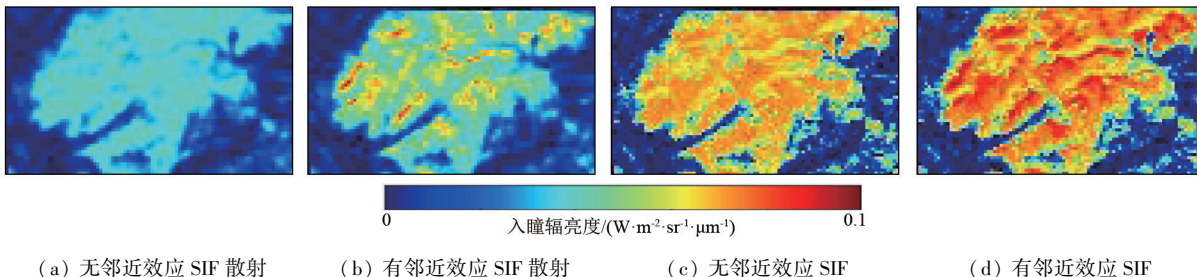


图 12 不同模式 SIF_{red} 入瞳辐亮度对比

Fig.12 TOA SIF_{red} with/without terrain effect

为量化分析地形邻近效应对 SIF 建模精度的影响,根据山体走向选择第 44 列和第 70 列 2 条纵

向剖面,对比有无地形邻近效应条件下, SIF 沿行方向的分布。 SIF_{red} 和 SIF_{farred} 行方向分布分别如图 13

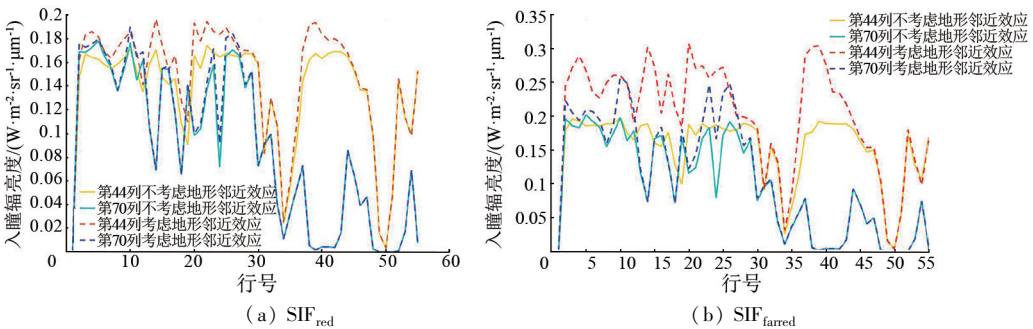


图 13 SIF_{red} 和 SIF_{farred} 行分布对比

Fig.13 Line distribution of SIFred and SIFfarred

所示。 SIF_{red} 第 44 列建筑用地南北两侧的山区和第 70 列中北侧山区被明显低估,第 44 列被低估了最大超过 17.5%,第 70 列被低估了最大超过 22%; SIF_{farred} 第 44 列被低估了最大超过 46%,第 70 列被低估了最大超过 52%。

3 仿真数据应用演示

一体化成像光谱仪的数据同时采集高光谱数据和荧光超光谱数据。为初步验证光谱仪在轨成像的应用效能,对光谱仪数据进行双通道联合应用处理。具体来说对于高光谱数据进行辐射校正、大气校正、光谱分类和植被光谱指数提取等处理,荧光超光谱数据进行辐射校正、大气参数提取和荧光参量提取。

最后验证荧光参量提取精度。为不失一般性,大气校正采用基于平坦地表假设辐射传输模型的 FLAASH 大气校正算法^[31]。光谱分类采用匹配滤波(matched filter, MF)算法^[32]和光谱信息散度(spectral information divergence, SID)算法^[33]结合,以二维阈值分类,结果如图 14(a) 所示。根据分类结果,对植被覆盖区计算光谱植被指数,选择应用最广泛的归一化光谱指数(normalized difference vegetation index, NDVI)^[2]和与荧光指数配合评价光合作用效率的 PRI^[10]作为一体化光谱仪生产的数值产品,反演结果如图 14(b)–(c) 所示,对比山区 NDVI 分布和 PRI 分布, PRI 对地形更敏感,与实际情况一致。

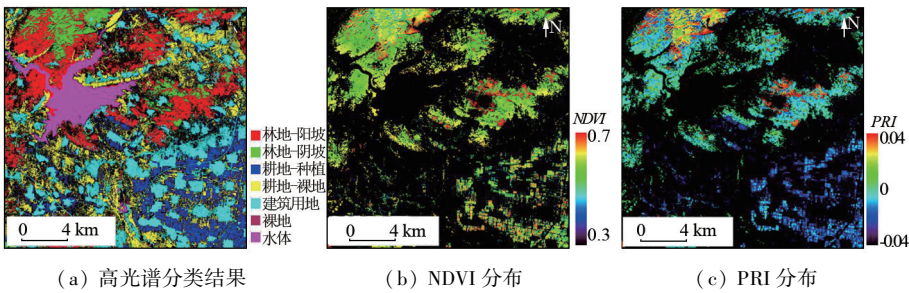


图 14 光谱通道数值产品

Fig.14 Products of hyperspectral channel block

SIF 参量反演采用数据驱动算法,首先利用影像中非植被覆盖区的数据开展大气参数反演,得到等效透过率的主成分,之后利用最小二乘拟合得到植被覆盖区 SIF_{red} 和 SIF_{farred} 参量,具体方法和参数

见文献^[34]。由图 15 山区 SIF 反演结果可见,起伏地表对 SIF 反演的影响较大,反演结果中阳坡 SIF 远大于阴坡,仿真时由于 2 类植被荧光量子产效率接近,坡面造成的 SIF 幅值差异超过植被类型差异。

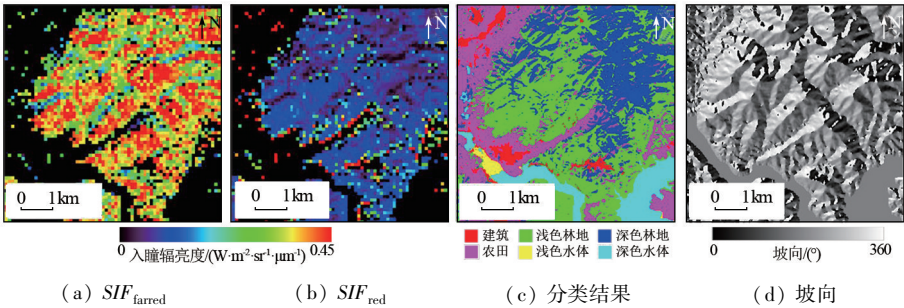


图 15 地形起伏区 SIF 分布

Fig.15 SIF distribution on rugged terrain

4 结论

生态环境监测和碳通量评估中,需要采用同时相、不同类型的数据进行综合评价,这对卫星载荷的数据获取能力提出了挑战。采用高光谱+荧光超光谱的一体化成像光谱仪能够有效解决这一问题,实现多维度生态数据获取。在载荷设计和处理算法研究中,需要仿真大量的在轨数据。目前的全链路仿

真模型不能满足数据生产要求,一方面表现在场景仿真模式单一,未考虑土壤分类、组分反演、土地利用识别等应用的数据要求;另一方面表现在目前的辐射传输模型没有考虑荧光信号在起伏异质场景中受到的地形邻近效应影响。为此,本文提出了一种集成异构地物光谱模型与一种包含地物 SIF 辐射和热辐射的起伏地表辐射传输模型,光谱仪成像仿真模型相结合的起伏异质地表的一体化成像光谱仪成像模型。通过对起伏地形场景的模拟,未考虑地形

邻近效应的建模方式,其 SIF_{red} 被低估了超过 22%, SIF_{farred} 被低估了超过 52%,采用本文所述方式能够有效提升 SIF 卫星数据建模的精度。在此基础上,应用本文的模型对一体化成像光谱仪数据进行了仿真,证明本模型能够模拟在轨数据生产包括地表覆盖类型产品、NDVI 指数、PRI 指数和 SIF_{red} 和 SIF_{farred} 产品在内的多种数值产品,有效服务于载荷性能论证、设计及算法研究。

参考文献 (References) :

[1] 王伟刚,胡 斌,杜国军,等.陆地生态系统碳监测卫星日光诱导叶绿素荧光超光谱探测仪设计与验证[J].航天返回与遥感,2022,43(6):68-78.
Wang W G, Hu B, Du G J, et al. The solar-induced chlorophyll fluorescence imaging spectrometer (SIFIS) onboard the terrestrial ecosystem carbon inventory satellite: Design and verification[J]. Spacecraft Recovery and Remote Sensing, 2022, 43(6): 68-78.

[2] Zeng Y, Hao D, Huete A, et al. Optical vegetation indices for monitoring terrestrial ecosystems globally[J]. Nature Reviews Earth and Environment, 2022, 3: 477-493.

[3] Bergen K M, Goetz S J, Dubayah R O, et al. Remote sensing of vegetation 3-D structure for biodiversity and habitat: Review and implications for LiDAR and Radar spaceborne missions[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2009, 114(G2): G00E06.

[4] Sagan V, Peterson K T, Maimaitijiang M, et al. Monitoring inland water quality using remote sensing: Potential and limitations of spectral indices, bio-optical simulations, machine learning, and cloud computing[J]. Earth-Science Reviews, 2020, 205: 103187.

[5] Nayak A K, Rahman M M, Naidu R, et al. Current and emerging methodologies for estimating carbon sequestration in agricultural soils: A review[J]. Science of the Total Environment, 2019, 665: 890-912.

[6] Gu L, Han J, Wood J D, et al. Sun-induced Chl fluorescence and its importance for biophysical modeling of photosynthesis based on light reactions[J]. New Phytologist, 2019, 223(3): 1179-1191.

[7] Du S, Liu L, Liu X, et al. Response of canopy solar-induced chlorophyll fluorescence to the absorbed photosynthetically active radiation absorbed by chlorophyll[J]. Remote Sensing, 2017, 9(9): 911.

[8] Coppo P, Pettinato L, Nuzzi D, et al. Instrument predevelopment activities for FLEX mission[J]. Optical Engineering, 2019, 58(7): 075102.

[9] Clark M L. Comparison of simulated hyperspectral HypIRI and multispectral Landsat8 and Sentinel-2 imagery for multi-seasonal, regional land-cover mapping[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 200: 311-325.

[10] Segl K, Guanter L, Rogass C, et al. EeteS—The EnMAP end-to-end simulation tool[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2012, 5(2): 522-530.

[11] Liu Y, Li N, Ren H, et al. Emissivity image simulation for thermal infrared bands on Gaofen-5 using airborne hyperspectral data[C]//2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). IEEE, 2017: 2093-2096.

[12] Rivera J P, Sabater N, Tenjo C, et al. Synthetic scene simulator for hyperspectral spaceborne passive optical sensors. Application to ESA's FLEX/sentinel-3 tandem mission[C]//2014 6th Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS). IEEE, 2014: 1-4.

[13] Vicent J, Sabater N, Tenjo C, et al. FLEX end-to-end mission performance simulator[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54(7): 4215-4223.

[14] Tenjo C, Rivera-Cacedo J P, Sabater N, et al. Design of a generic 3-D scene generator for passive optical missions and its implementation for the ESA's FLEX/Sentinel-3 tandem mission[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018, 56(3): 1290-1307.

[15] Mousivand A, Verhoef W, Menenti M, et al. Modeling top of atmosphere radiance over heterogeneous non-lambertian rugged terrain[J]. Remote Sensing, 2015, 7(6): 8019-8044.

[16] Cathala T, Douchin N, Latger J, et al. The coupling of MATISSE and the SE-WORKBENCH: A new solution for simulating efficiently the atmospheric radiative transfer and the sea surface radiation[C]//Proc. SPIE 7300, Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XX, 2009, 7300: 188-199.

[17] Börner A, Wiest L, Keller P, et al. SENSOR: A tool for the simulation of hyperspectral remote sensing systems[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2001, 55(5/6): 299-312.

[18] Goodenough A A, Brown S D. DIRSIG5: Next-generation remote sensing data and image simulation framework[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2017, 10(11): 4818-4833.

[19] Heylen R, Parente M, Gader P. A review of nonlinear hyperspectral unmixing methods[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2014, 7(6): 1844-1868.

[20] Yang P, Prikaziuk E, Verhoef W, et al. SCOPE 2.0: A model to simulate vegetated land surface fluxes and satellite signals[J]. Geoscientific Model Development, 2021, 14(7): 4697-4712.

[21] Gastellu-Etchegorry J P, Lauret N, Yin T, et al. DART: Recent advances in remote sensing data modeling with atmosphere, polarization, and chlorophyll fluorescence[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2017, 10(6): 2640-2649.

[22] Zhao F, Dai X, Verhoef W, et al. FluorWPS: A Monte Carlo ray-tracing model to compute sun-induced chlorophyll fluorescence of three-dimensional canopy[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 187: 385-399.

[23] Shi H, Xiao Z. SIFT: Modeling solar-induced chlorophyll fluorescence over sloping terrain[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2021, 19: 3002405.

[24] Hapke B. Bidirectional reflectance spectroscopy: 1. Theory[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1981, 86(b4): 3039-3054.

[25] Verhoef W, Bach H. Simulation of hyperspectral and directional radiance images using coupled biophysical and atmospheric radiative transfer models[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 87(1): 23-41.

[26] Tao D, Jia G, Yuan Y, et al. A digital sensor simulator of the pushbroom Offner hyperspectral imaging spectrometer[J]. Sensors, 2014,

14(12):23822–23842.

[27] Jacobs E L, Edwards T C. Sampling criteria for sensor simulation [J]. Optical Engineering 1999, 38(5):827–835.

[28] Tao D, Zhao H, Jia G, et al. Analyzing the effect of synthetic scene resolution, sampling interval, and signal-to-noise ratio on hyperspectral imaging sensor simulations [J]. Applied Optics, 2014, 53(28):6375–6381.

[29] Zanaga D, Van De Kerchove R, De Keersmaecker W, et al. ESA WorldCover 10 m 2020 v100[DB], 2021.

[30] Berk A, Conforti P, Kennett R, et al. MODTRAN® 6: A major upgrade of the MODTRAN® radiative transfer code [C]//2014 6th workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing Evolution in Remote Sensing (WHISPERS). IEEE, 2014:1–4.

[31] Felde G W, Anderson G P, Cooley T W, et al. Analysis of Hyperion data with the FLAASH atmospheric correction algorithm [C]//2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings. Toulouse, IEEE, 2003:90–92.

[32] DiPietro R S, Manolakis D, Lockwood R B, et al. Hyperspectral matched filter with false-alarm mitigation [J]. Optical Engineering, 2012, 51(1):016202.

[33] Du Y, Chang C I, Ren H, et al. New hyperspectral discrimination measure for spectral similarity [J]. Proc. SPIE 5093, Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery IX, 2003, 5093:430–439.

[34] Du S, Liu L, Liu X, et al. The solar-induced chlorophyll fluorescence imaging spectrometer (SIFIS) onboard the first terrestrial ecosystem carbon inventory satellite (TECIS-1): Specifications and prospects [J]. Sensors, 2020, 20(3):815.

Imaging modeling of integrated imaging spectrometers for undulating terrain with uneven surface feature distribution

CUI Bolun¹, LI Xin¹, AN Ning¹, TONG Chiming¹, ZHANG Jiaming¹, ZHU Jun²

(1. Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, Beijing 100094, China; 2. China Spacesat Co., Ltd., Beijing 100094, China)

Abstract: Integrated imaging spectrometers can effectively improve the monitoring capability of terrestrial ecosystems. Imaging simulation in the design and development of spectrometers is identified as an important means to improve their efficiency. To overcome the shortcomings of current imaging simulation in scene modeling and radiation transport models, this study developed a full-link hyperspectral imaging simulation model. Using this model, this study conducted preliminary assessments of load efficiency. First, heterogeneous modeling for large-scale scenes was conducted according to the observation targets of loads. Then, a surface radiation transport model containing fluorescence radiation and thermal radiation was derived for undulating terrain with uneven surface feature distribution (also referred to as unevenly undulating surface). Finally, by integrating the imaging model of grating spectrometers, this study established a full-link imaging simulation model. To determine the impacts of the adjacency effect of the unevenly undulating surface on the spatial distribution of solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF), this study compared the radiance of red and far-red SIF derived with and without considering the adjacency effect of terrain under the spatial resolution of the used integrated imaging spectrometer. For data on significantly undulating terrain with uneven surface feature distribution, the SIF radiance exhibited differences of up to maxima of 22% and 52%, respectively, and ignoring the adjacency effect led to significant errors in the high-resolution SIF simulations. The imaging modeling method developed in this study can be used for hyperspectral imaging simulation of unevenly undulating surfaces, thus allowing for analyzing the efficiency of integrated imaging spectrometers for composite applications in ecological monitoring.

Keywords: hyperspectral imaging simulation; solar-induced chlorophyll fluorescence; terrestrial ecological monitoring; hyperspectral imaging

(责任编辑: 陈庆)