

空间辐射基准传递不确定性的光谱敏感性分析

陈申玮¹, 徐娜^{2,3}, 戴铁⁴, 周心易¹, 吕浩¹, 程越茗¹

¹南京信息工程大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210044;

²中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081;

³中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 北京 100081;

⁴中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

摘要 空间辐射基准对卫星观测气候变化的研究具有重要意义,空间辐射基准的建立不仅可以提高卫星自身观测的相对精度,而且还能通过基准传递来满足其他卫星的在轨溯源需求,用于基准传递的空间高光谱基准遥感器的光谱分辨率对传递相对精度有重要影响。分别利用 MODTRAN 模式和 AER LBL 模式的模拟结果作为高光谱遥感器的太阳反射波段和地球热发射波段的代理数据,分析了光谱采样对光谱辐射观测结果的影响以及光谱采样差异引起的辐射基准传递的不确定性。考虑 5 种下垫面和 6 种大气条件,对比了不同光谱采样间隔下光谱辐射的差异,并利用敏感性实验的方法,以 MERSI-II 为目标传感器,评估了空间辐射基准交叉传递的光谱不确定性。结果表明:光谱采样间隔越大,光谱辐射的差异越大,在气体吸收区、绝对辐射低信号区、近紫外太阳光谱暗线区的最大辐射差异可达 100%;在大气窗区,当太阳反射波段的光谱采样间隔优于 4 nm 时,基准传递的不确定性小于 0.3%,当地球热发射波段光谱的采样间隔优于 2 cm⁻¹时,不确定性可小于 0.1 K;在近紫外太阳光谱暗线区和气体吸收区,太阳反射波段的基准传递对光谱采样十分敏感,当采样间隔为 4 nm 时,中心波长为 1.38 μm 的通道的不确定性可达 40%,当地球热发射波段在 7.2 μm 水汽弱吸收区时,光谱采样间隔优于 0.8 cm⁻¹才能满足不确定性小于 0.1 K 的需求。

关键词 遥感; 光谱敏感性; 空间辐射基准; 不确定性; 基准传递; 光谱采样

中图分类号 TP722; V474.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0128004

Sensitivity of Intercalibration Uncertainty on Spectral Sampling of Space-Based Radiance Standard

Chen Shenwei¹, Xu Na^{2,3}, Dai Tie⁴, Zhou Xinyi¹, Lü Hao¹, Cheng Yueming¹

¹School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China;

²National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;

³Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;

⁴State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

Abstract The space-based radiance standard is of great significance for the study of the satellite observing climate change. The establishment of the space-based radiance standard can not only improve the relative accuracy of satellite observations, but also meet the traceable needs of other satellites through intercalibration. The spectral resolution of the hyperspectral standard remote sensor in space for intercalibration has a significant effect on the intercalibration relative accuracy. The simulations of spectral radiances by modes of MODTRAN and AER LBL are used as proxy data of the hyperspectral remote sensor in reflective solar bands and thermal emissive bands,

收稿日期: 2017-06-26; 收到修改稿日期: 2017-09-11

基金项目: 国家自然科学基金(41471304,41505029,41475031)、国家 863 计划(2015AA123703)

作者简介: 陈申玮(1992—),男,硕士研究生,主要从事星载遥感器定标方面的研究。E-mail: csw@lasg.iap.ac.cn

导师简介: 徐娜(1982—),女,博士,副研究员,主要从事卫星定量遥感及星载遥感器定标等方面的研究。

E-mail: xuna@cma.gov.cn(通信联系人)

respectively. The influence of spectral sampling on the observation of spectral radiation and the uncertainty of the radiation standard intercalibration caused by the spectral sampling are analyzed. Considering five kinds of underlying surfaces and six kinds of atmospheric conditions, the difference of spectral radiation under different spectral sampling frequencies is compared, and the spectral uncertainty of the space-based radiance standard intercalibration is evaluated with the utilization of the sensitivity experiment method with MERSI-II as the target remote sensor. The results show that the larger the spectral sampling frequency, the greater the difference in spectral radiation. The maximum radiation difference is up to 100% in atmospheric absorption spectra, low signal spectra, and near ultraviolet solar dark-line spectra. In the atmospheric window, the spectral sampling frequency better than 4 nm can produce radiance to meet the on-orbit intercalibration standard with an uncertainty less than 0.3% in reflective solar bands, and the spectral sampling frequency better than 2 cm^{-1} can also produce radiance temperature to meet the on-orbit intercalibration standard with an uncertainty less than 0.1 K in thermal emissive bands. In the near ultraviolet solar dark-line spectra and the atmospheric absorption region, the intercalibration of reflective solar bands is very sensitive to the spectral sampling. The uncertainty of intercalibration is up to 40% at a sampling frequency of 4 nm in the channel with a central wavelength of 1.38 μm . The spectral sampling of 0.8 cm^{-1} can produce radiance temperature to meet the on-orbit intercalibration standard with an accuracy of 0.1 K in the weak atmospheric absorption channel with a central wavelength of 7.2 μm in thermal emissive bands.

Key words remote sensing; spectral sensitivity; space-based radiance standard; uncertainty; intercalibration; spectral sampling

OCIS codes 280.4788; 120.0280; 010.0280; 120.4570

1 引 言

气候变化一直是人们密切关注的话题。不少数据和研究证明,气候变化对人类生存环境和社会经济发展的影响十分显著,但气候变化的原因和未来气候变化的趋势还有待进一步研究。对于气候变化来说,气象卫星可以发挥重要的作用。因为气候变化是全球性的,全球站点的代表性以及观测数据质量的均一性在很大程度上限制了对全球尺度气候变化的深入认知,而卫星遥感则可以实现全球范围的连续、统一观测,所以利用卫星不仅可以对气候变化敏感的因子开展全球范围的时空分布特征和长期变化趋势的研究,而且可以对气候变化造成的影响进行评估。但是,气候变化的信号是非常微弱的,比如,每 10 a 地气系统温度的变化仅约为 0.1 $^{\circ}\text{C}$,臭氧的变化约为 1%,太阳输出的变化约为 0.1%^[1],从太空中观测这些微弱变化要求遥感器具备极高的相对观测精度以及长期的稳定性。卫星资料的定标相对精度直接影响其定量应用的能力^[2],而目前公认定标最可靠的遥感器,如中分辨率成像光谱仪(MODIS),其相对精度仅为 2%~3%^[3-4],并且不同的卫星观测结果的相对精度和一致性相差很大^[5]。可见,现阶段所有在轨运行的卫星遥感器达不到气候变化观测要求的绝对精度,更不具备相当的稳定性^[6-8]。为了解决这个问题,需要提供一个可溯源至国际单位(SI)的空间辐射基准,从根本上提高定标相对精度。该基准遥感器在实现自身高相对精度观测的同时,又可通过交叉定标的方法来满足其他遥

感卫星的溯源要求,进而提升全球卫星观测结果的一致性^[9]。

建立空间辐射基准一直是国际地球观测领域发展的前沿热点之一。为了建立一个可溯源至 SI 的高相对精度空间辐射基准,国际上已经提出了 TRUTHS 计划^[5]和气候绝对辐射、折射观测(CLARREO)计划^[10-12],并经过了多轮发展计划的修改和原型样机改良。TRUTHS 计划是英国国家物理实验室(NPL)在 2001 年提出的,其核心思想是希望在空间建立太阳反射波段的国际基准实验室,通过将低温辐射应用于太空重现地面实验室的基准溯源链路,以实现地对地太阳总辐照度、太阳光谱辐射和地球反射太阳辐射光谱的高相对精度测量。CLARREO 计划是美国国家航空航天局(NASA)在 2007 年提出的,其目标是为地面观测系统提供红外以及太阳反射波段的基准定标源。CLARREO 计划对 SI 溯源主要体现在红外波段,即使用镱元素融点的黑体作为在轨参考标准,使用相变器件高精度地监测黑体温度,以实现溯源至温度基本单位的辐射基准。目前 TRUTHS 计划主要关注太阳反射波段,负责对地观测的地球观测光谱仪的光谱范围为 380~2500 nm,光谱分辨率为 10 nm,光谱辐射相对精度为 0.3%^[5]。CLARREO 计划可以实现对太阳反射和地球热发射波段的观测,前者的光谱范围为 320~2300 nm,光谱采样间隔为 4 nm,光谱辐射相对精度为 0.3%($k=2$)(用 k 代替 σ 作为气候科学和计量研究界的严格联系),后者的光谱范围为 200~2000 cm^{-1} ,光谱采样间隔为 1 cm^{-1} ,光谱辐射相对

精度为 $0.1 \text{ K}(k=3)^{[11-12]}$ 。我国在近几年开始关注该领域的研究,2015年,科技部资助批复了《空间辐射测量基准源研制》项目,开始了空间辐射基准源研制的先期技术公关,目标是能够在地面实现基准源的原型样机研制,解决空间辐射基准遥感器研制核心技术问题。郝小鹏等^[13]研制了红外遥感亮度温度标准装置,实现了我国红外遥感亮度温度的有效溯源。Zhao等^[14]、赵维宁^[15]对一种可溯源至SI的高相对精度在轨绝对光谱辐亮度定标传递方法进行研究,给出了由光纤耦合单色仪(FBM)配合积分球传递辐射计(ISTR)组成的ISTR系统,建立了以太阳光为定标光源,以在轨低温辐射计为初级基准,以ISTR系统为工作标准的高相对精度定标传递链。Li等^[16]、高冬阳等^[17]将自参量下转换(SPDC)产生的相关光子作为绝对光谱辐射源,实现了不依赖于外部标准传递的光电探测器绝对量子效率定标,并研究了相关光子的光谱辐射特性及时间相关特性。邹鹏等^[18]成功研制了基于陷阱探测器的辐亮度探测器,对建立绝对光谱辐亮度与实验室初级基准之间的溯源关系进行了研究。

辐射基准的对外传递是空间辐射基准的一个重要目标,而不同的空间分辨率、光谱采样都会影响传递的相对精度。通常情况下,空间分辨率的差异可以通过选择均匀目标来缩小影响,但光谱采样差异的影响很难避免。光谱采样间隔直接影响辐射定标和定量遥感。在大气中分布有水汽、二氧化碳、臭氧等吸收气体,只有当光谱采样间隔足够精细时才能测量出这些吸收气体的影响,因此光谱采样间隔是一个重要的测量参数^[19];但是受到信噪比和空间分辨率等因素的约束,仪器光谱采样间隔不可能太精细。如果光谱采样间隔太大,就会丢失光谱信息,导致观测结果不具有代表性;如果光谱采样间隔太小,仪器的稳定性和信噪比等指标就会下降,从而影响测量的相对精度。虽然TRUTHS和CLARREO等国际计划已经提出了相应的观测指标,但这些指标也在随着研究的深入而不断地修改;国内的研究起步相对较晚,目前还没有提出明确的观测指标。

本文将中分辨率大气辐射传输模式(MODTRAN)^[20]和美国大气与环境研究中心的逐线积分模式(AER LBL)^[21]在不同观测条件下的光谱辐射模拟结果作为太阳反射波段和地球热发射波段的高光谱空间辐射基准遥感器的代理数据,选用风云三号中分辨率光谱成像仪II型(MERSI-II)作为基准传递的目标遥感器,通过敏感性实验方法,模

拟并分析了不同观测条件下,光谱采样间隔对光谱辐射观测结果以及空间辐射测量基准交叉传递不确定性的影响,并分析了引起传递误差的具体原因,进而给出了满足卫星观测气候变化高相对精度需求的基准遥感器的光谱采样指标。

2 资料和方法

2.1 代理数据

现阶段没有在轨空间辐射基准遥感器的观测结果,但为了实现空间辐射基准传递不确定性的光谱敏感性分析,分别选用MODTRAN模式和AER LBL模式的模拟结果作为太阳反射波段和地球热发射波段基准遥感器的代理数据。MODTRAN模式是美国空军地球物理实验室(AFGL)开发并研制的中等分辨率辐射传输模式,在反射波段能达到 20 cm^{-1} 的光谱分辨率,在地球热发射波段能达到 2 cm^{-1} 的光谱分辨率。MODTRAN模式采用中分辨率大气分子吸收快速算法,比AER LBL模式的计算量更小,模拟的效率更高。AER LBL模式逐条计入大气气体吸收谱线的贡献,是国际上公认的最精确的辐射传输算法,具有高分辨率、高精度的特点,对气体吸收更敏感,可以计算出给定波数区间内所有吸收线的贡献,但它花费的计算机CPU时间太多。在反射波段,由于空间辐射基准对光谱采样间隔的要求相对较低,为了实现更高的计算效率,选用MODTRAN模式进行模拟。在地球热发射波段,气体的线吸收贡献更为显著,空间辐射基准对光谱采样间隔的要求更高,MODTRAN模式不能满足模拟的需求,因此选用AER LBL模式的模拟结果作为地球热发射波段的代理数据。

利用MODTRAN模式模拟不同观测条件下的高光谱数据。模拟数据的光谱范围为 $0.32 \sim 2.30 \mu\text{m}$,涵盖可见光、近红外和短波红外波段。考虑雪、森林、沙漠、海洋、云5种不同下垫面的情况。当模拟下垫面为森林、沙漠、海洋、云时,使用1976年美国标准大气廓线;当模拟下垫面为雪时,使用亚北极区冬季大气廓线。考虑到气体的尺度很小,且多为线性吸收气体^[22],而大气气溶胶与云的尺度则大很多,对不同光谱采样间隔的影响相对不敏感,因此不考虑大气气溶胶与云的影响。由于极地轨道遥感器之间的轨道交叉多发生在高纬度地区,因此设定太阳天顶角为 60° 。卫星观测天顶角和相对方位角设为 15° ,模拟近似星下点观测情况。所有与辐射传输相关的地表和大气参数均采用MODTRAN模式

提供的默认配置文件。在上述每种观测条件下,设置线型为高斯分布函数,半峰全宽为采样间隔的2倍,设置的光谱数据原始采样间隔为0.5 nm,分别使用1~8 nm的光谱采样间隔来测试不同光谱采样间隔对观测结果相对精度的影响。所选择的采样间隔范围足以测试不同采样间隔光谱辐射的不确定性。

AER LBL 模式模拟地球热发射波段的光谱范围为560~3030 cm^{-1} 。分别模拟晴空和有云条件下的卫星高光谱观测结果,设置地表压强为1013 hPa。晴空分为热带晴空、中纬度夏季晴空、中纬度冬季晴空,对应不同地域和不同季节的大气条件,分别采用热带晴空、中纬度夏季晴空、中纬度冬季晴空的典型大气廓线。在热带大气情况下,分别在200, 500, 700 hPa高度加入不透光厚云,代表高、中、低层云的观测条件。同样不考虑气溶胶与云的影响。仪器线型假设与太阳反射波段一致,以0.25 cm^{-1} 为原始采样间隔,分别使用0.5, 0.625, 0.8, 1.2, 2 cm^{-1} 的采样间隔进行敏感性实验。

2.2 中分辨率光谱成像仪

考虑到光谱通道设置的多样性,选用搭载在风云三号D星上的MERSI-II作为基准传递的目标遥感器。通过敏感性实验定量分析光谱采样间隔对MERSI-II通道模拟辐射的影响,进而实现空间辐射基准传递的光谱不确定性评估。MERSI-II是中国风云三号D星的主要遥感器之一,是MERSI-I^[23]的升级版,共配备25个通道,编号分别为CH1~CH25,包括16个可见光-近红外通道(0.4~1.0 μm)、3个短波红外通道(1.4~2.1 μm)和6个中长波红外通道(3.8~12.0 μm)。在25个通道中,设置2种地面分辨率,分别为250 m和1000 m。其中,星下点空间分辨率为250 m的通道有6个,地面分辨率为1000 m的通道有19个。MERSI可以动态监测地球的海洋、陆地、大气等环境要素,是重要的大气和环境监测遥感器,在天气预报、气候变化研究和地球环境监测等方面发挥着重要作用^[24]。图1所示为MERSI-II在可见光、近红外、短波红外、中长波红外波段的光谱响应函数分布与晴空大气层顶(TOA)大气透过率和典型目标光谱(海水、植被、沙地、雪)的对比,其中SRF为MERSI通道的响应函数。由图1可以清晰地看到MERSI-II每一个通道处的太阳光谱、大气层顶大气透过率和各典型目标光谱的变化。MERSI-II在MERSI-I的基础上重点加强了红外观测能力。这里虽然以MERSI-II作

为代理目标遥感器,但在研究过程中仅用到了它的光谱响应函数,因此研究结论同样适用于其他遥感器的相近通道。

3 结果与分析

3.1 太阳反射波段

3.1.1 光谱辐射差异

图2为使用MODTRAN模式模拟晴空沙漠地表不同采样间隔的大气层顶光谱辐射差异。图2(a)为不同采样间隔的光谱辐射分布,其中光谱采样间隔为1, 2, 4 nm,原始采样间隔为0.5 nm。由图2(a)可知,随着光谱采样间隔增大,辐射曲线的波动变小,导致辐射观测结果出现差异。图2(b)和图2(c)分别为1, 2, 4 nm光谱采样间隔与原始采样间隔(0.5 nm)光谱辐射的绝对差异和相对差异。可以看出,随着采样间隔增大,光谱波动信息损失越来越多,与原始采样间隔为0.5 nm时辐射的绝对差异和相对差异都明显变大。光谱辐射的差异主要是由气体的吸收引起的。在可见光区,臭氧、氧气和水汽的吸收导致光谱辐射的绝对差异很大,臭氧吸收区位于440~740 nm,氧气吸收区位于690, 760 nm,水汽吸收区位于720 nm。由此可知,在图2(b)中的760 nm附近,氧气吸收影响导致辐射的绝对差异很大,最大差异达到 $15 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{Sr}\cdot\text{nm}^{-1}$ 。太阳光谱夫琅禾费线的削弱作用导致太阳光谱在特定波段剧烈变化,进而导致卫星观测到的太阳反射光谱辐射存在差异。最大影响主要位于400 nm附近的近紫外太阳光谱暗线区,差异可达 $15 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{Sr}\cdot\text{nm}^{-1}$ 。近红外和短波红外波段主要受水汽吸收的影响,水汽的吸收带主要位于940, 1100, 1380, 1870 nm。虽然水汽吸收对绝对辐射影响不大,但是由于光谱辐射在近红外波段自身能量很小,受不同光谱采样间隔的影响,光谱辐射的相对差异很大,在940, 1100, 1380, 1870 nm附近,光谱辐射相对差异达到100%。

3.1.2 交叉传递的不确定性

因为不同采样间隔的光谱数据会造成辐射光谱的差异,所以为了准确、定量地得到辐射差异的大小,将上述不同采样间隔的光谱数据与对应通道的光谱响应函数进行卷积,计算出MERSI-II各个通道处的辐射值。光谱采样间隔越大,光谱波动损失的信息越多。当采样间隔大于8 nm时,光谱丢失的信息过多,导致观测结果不具有代表性。因此,将不同光谱采样间隔(1~8 nm)时计算的辐射结果与

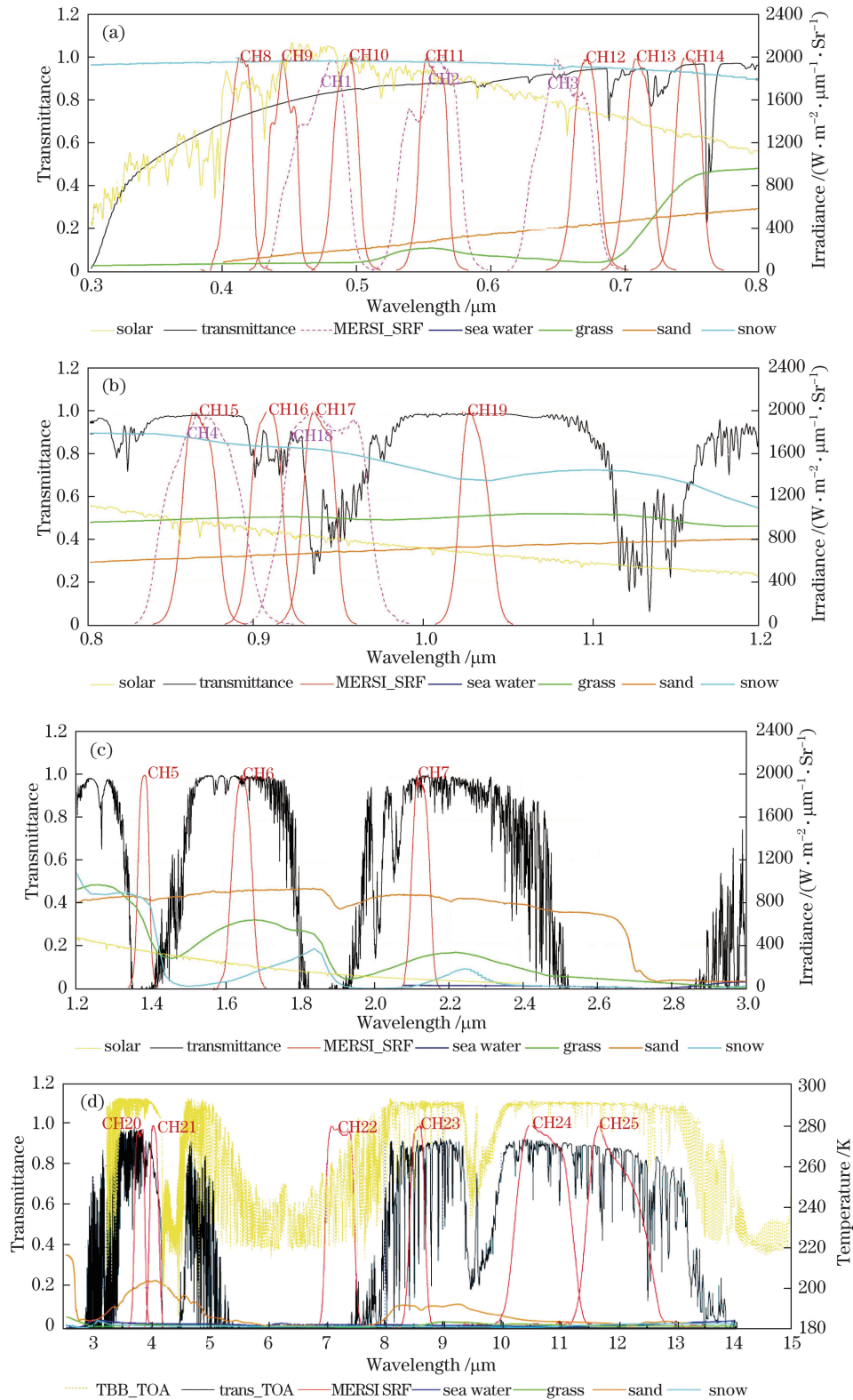


图 1 MERSI-II 光谱响应分布与晴空 TOA 大气透率及典型目标光谱。(a)可见光波段；
(b)近红外波段；(c)短波红外波段；(d)中长波红外波段

Fig. 1 Spectral response distributions of FY-3D/MERSI-II and simulated TOA spectra of transmittance over clear sky, as well as typical target spectra. (a) Visible band; (b) near infrared band; (c) short-wave infrared band; (d) mid-wave to long-wave infrared band

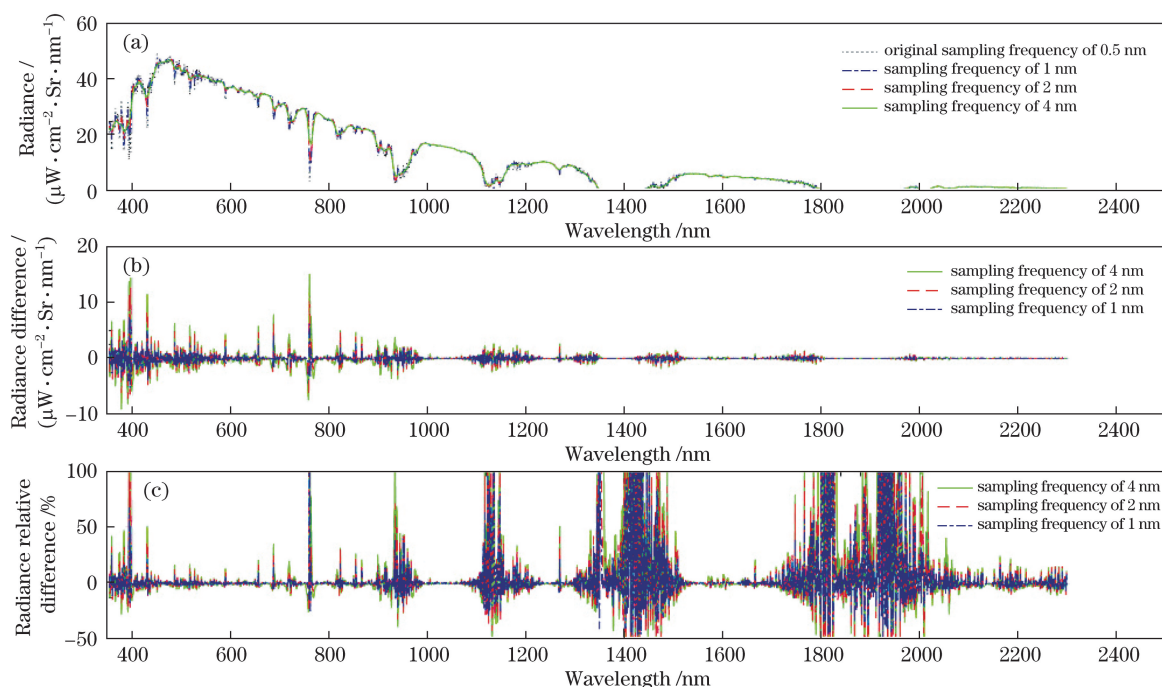


图2 晴空沙漠地表不同采样间隔的 TOA 光谱辐射差异。(a)光谱辐射分布;
(b)光谱辐射的绝对差异;(c)光谱辐射的相对差异

Fig. 2 Differences of TOA spectral radiance at different sampling frequencies in desert of clear sky.

(a) Spectral radiance distribution; (b) absolute difference of spectral radiation; (c) relative difference of spectral radiance

原始采样间隔为 0.5 nm 时计算的辐射结果进行对比,以验证光谱采样间隔的影响。针对 5 种不同的下垫面(雪、森林、沙漠、海洋、云),以 0.5 nm 采样光谱辐射为参考,可见光、近红外和短波红外波段不同光谱采样间隔对 MERSI-II 不同光谱通道辐射模拟结果的影响如图 3~5 所示。

由图 3 可知:在可见光波段中,中心波长为 $0.470 \mu\text{m}$ (CH1)、 $0.550 \mu\text{m}$ (CH2)、 $0.650 \mu\text{m}$ (CH3)、 $0.490 \mu\text{m}$ (CH10)和 $0.555 \mu\text{m}$ (CH11)的光谱辐射在采样间隔为 4 nm 时都对采样间隔不敏感;CH1 和 CH10 在采样间隔大于 6,7 nm 时,光谱辐射才变得逐渐敏感起来,辐射差异大于 0.3%;CH2、CH3 和 CH11 在采样间隔为 8 nm 时的辐射相对差异都小于 0.3%;中心波长为 $0.412 \mu\text{m}$ (CH8)、 $0.443 \mu\text{m}$ (CH9)、 $0.670 \mu\text{m}$ (CH12)、 $0.709 \mu\text{m}$ (CH13)和 $0.746 \mu\text{m}$ (CH14)的光谱辐射对采样间隔较为敏感,随着光谱采样间隔增大,辐射相对差异逐渐变大。结合图 1 可知,虽然这些通道均为窗区通道,但仍存在不同程度的气体吸收的贡献,以及太阳光谱变化的影响。CH8 和 CH9 主要受到近紫外太阳光谱暗线区太阳光谱剧烈变化的影响;CH12 和 CH14 主要受到氧气吸收的影响;CH13 主要受到水汽吸收带翼的影响。CH8 比 CH9 受到 400 nm 处近紫

外太阳光谱暗线区太阳光谱变化的影响更大,CH8 处 8 nm 光谱采样间隔的辐射相对差异达到 4%;CH12 受到 690 nm 处氧气吸收带翼的影响较小;CH14 受到 760 nm 处氧气吸收带翼的影响较大,8 nm 光谱采样的辐射相对差异达到了 4%。

各通道主要用途的差异导致每个通道对不同下垫面的敏感性不同。随着采样间隔变大,CH3、CH10、CH14 的不同下垫面的辐射相对差异越来越明显。结合图 1(a)可以看出,CH3 的光谱辐射对雪最为敏感,CH14 对沙漠、云和森林敏感,而 CH10 对海洋最为敏感。

由图 4 可知,在近红外波段中,中心波长为 $0.865 \mu\text{m}$ (CH4)、 $0.865 \mu\text{m}$ (CH15)和 $1.03 \mu\text{m}$ (CH19)的光谱辐射在采样间隔为 4 nm 时的相对差异较小。虽然 CH4 和 CH15 的中心位置相同,但是由于通道的宽度不同,因此对光谱采样的敏感性也不同。其中,窄通道的光谱敏感性高于宽通道。当采样间隔大于 5 nm 时,CH4 的光谱辐射相对差异大于 0.3%,对光谱采样间隔变得敏感,8 nm 光谱采样间隔的辐射相对差异约为 0.6%。大气中水汽的吸收作用使得中心波长为 $0.905 \mu\text{m}$ (CH16)、 $0.936 \mu\text{m}$ (CH17)和 $0.940 \mu\text{m}$ (CH18)的光谱辐射对采样间隔很敏感。其中,CH17 的光谱辐射对采样间隔最

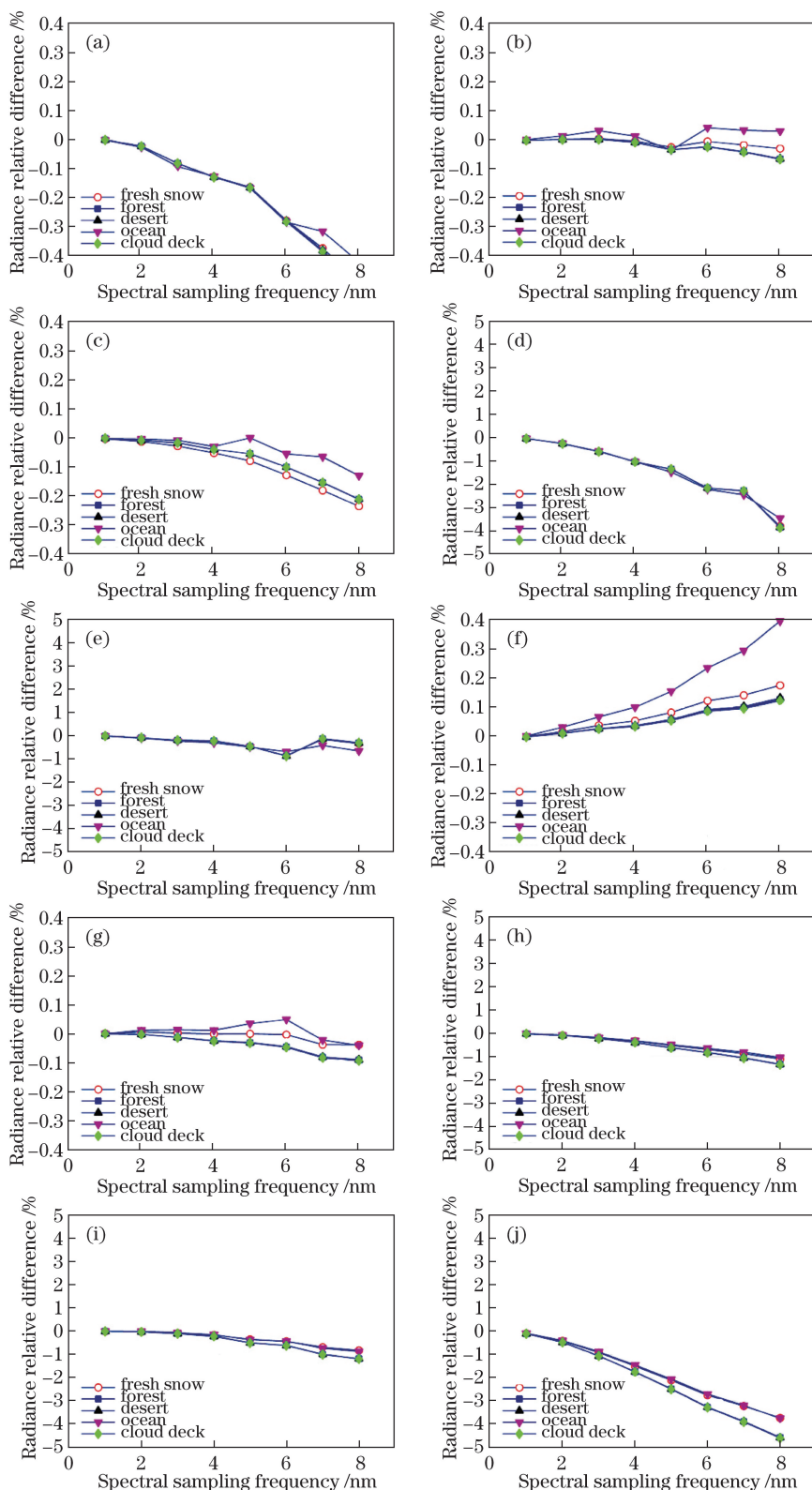


图 3 可见光波段 10 个通道处不同光谱采样间隔时的辐射相对差异。(a) CH1 ($0.470 \mu\text{m}$)；(b) CH2 ($0.550 \mu\text{m}$)；(c) CH3 ($0.650 \mu\text{m}$)；(d) CH8 ($0.412 \mu\text{m}$)；(e) CH9 ($0.443 \mu\text{m}$)；(f) CH10 ($0.490 \mu\text{m}$)；(g) CH11 ($0.555 \mu\text{m}$)；(h) CH12 ($0.670 \mu\text{m}$)；(i) CH13 ($0.709 \mu\text{m}$)；(j) CH14 ($0.746 \mu\text{m}$)

Fig. 3 Radiance relative differences for ten channels at different sampling frequencies in visible bands.

(a) CH1 ($0.470 \mu\text{m}$)；(b) CH2 ($0.550 \mu\text{m}$)；(c) CH3 ($0.650 \mu\text{m}$)；(d) CH8 ($0.412 \mu\text{m}$)；(e) CH9 ($0.443 \mu\text{m}$)；(f) CH10 ($0.490 \mu\text{m}$)；(g) CH11 ($0.555 \mu\text{m}$)；(h) CH12 ($0.670 \mu\text{m}$)；(i) CH13 ($0.709 \mu\text{m}$)；(j) CH14 ($0.746 \mu\text{m}$)

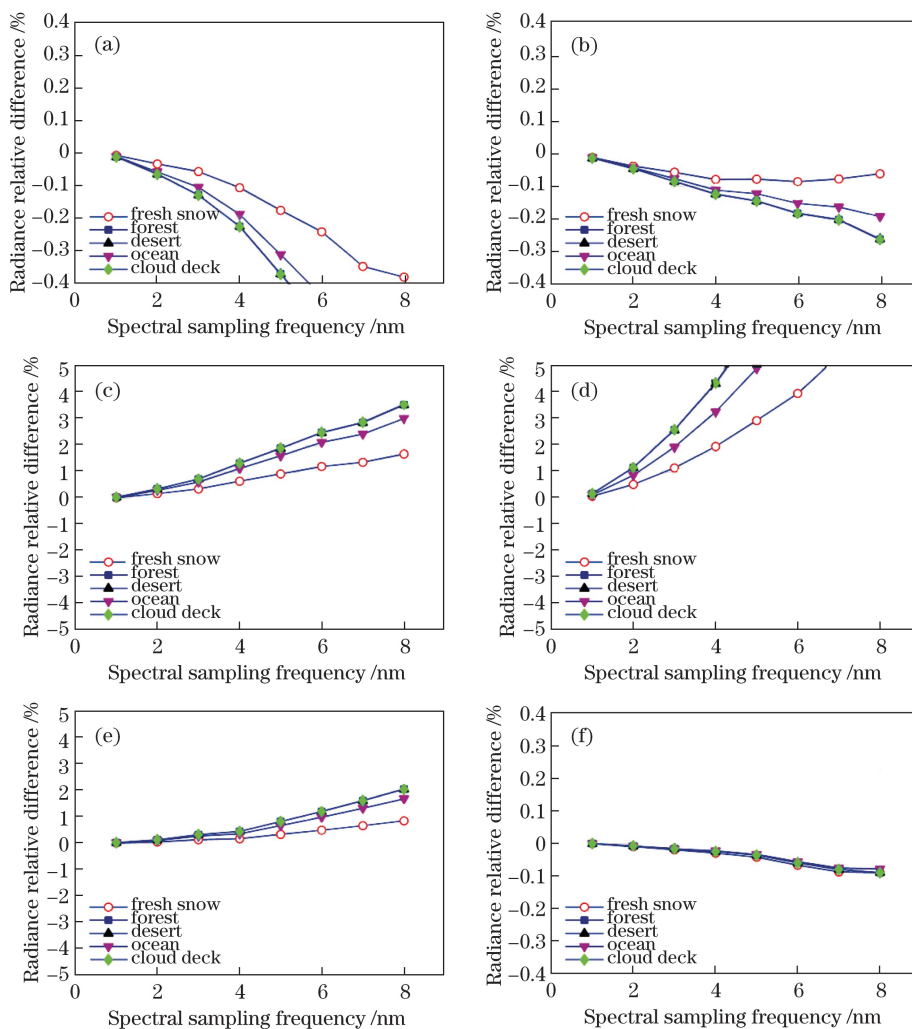


图 4 近红外波段 6 个通道处不同光谱采样间隔的辐射相对差异。(a) CH4 (0.865 μm); (b) CH15 (0.865 μm); (c) CH16 (0.905 μm); (d) CH17 (0.936 μm); (e) CH18 (0.940 μm); (f) CH19 (1.03 μm)

Fig. 4 Radiance relative differences for six channels at different sampling frequencies in near infrared band.
(a) CH4 (0.865 μm); (b) CH15 (0.865 μm); (c) CH16 (0.905 μm); (d) CH17 (0.936 μm); (e) CH18 (0.940 μm); (f) CH19 (1.03 μm)

为敏感,在采样间隔为 8 nm 时光谱辐射的相对差异达到 10% 以上。

各通道对下垫面的敏感性不同, CH4、CH15、CH16、CH17、CH18 对不同下垫面的辐射相对差异明显。结合图 1(b) 可知, CH4 的光谱辐射对云最为敏感, CH15、CH16、CH17、CH18 对沙漠、云和森林敏感。

由图 5 可知,在短波红外波段中,中心波长为 1.64 μm (CH6) 和 2.13 μm (CH7) 的光谱辐射在采样间隔为 4 nm 时的相对差异对采样间隔不敏感。CH7 在采样间隔大于 6 nm 时,光谱辐射才变得逐渐敏感。中心波长 1.38 μm (CH5) 处为水汽吸收通道,光谱辐射对光谱采样间隔很敏感,同时此处的自身能量很小,因此相对辐射差异很大,在 8 nm 光谱

采样间隔时的辐射相对差异接近 100%。这 3 个通道处的光谱辐射对下垫面都很敏感。结合图 1(c) 可以明显看出, CH5、CH7 的光谱辐射对云最敏感,而 CH6 对雪最敏感。

综上所述,当光谱采样间隔小于 4 nm 时,大部分通道的辐射都对光谱采样间隔不敏感,少部分通道只有当采样间隔大于 4 nm 时,辐射相对差异才开始变大。图 6 所示为光谱采样间隔为 4 nm 时,太阳反射波段各个通道辐射基准传递的不确定性。从图 6 中可以直观地看出:当光谱采样间隔为 4 nm 时,大多数通道处辐射传递的不确定性都小于 0.3%; CH8、CH14、CH16 处的不确定性约为 1%~2%;水汽吸收通道 CH5、CH17 处的不确定性可达到 5%。

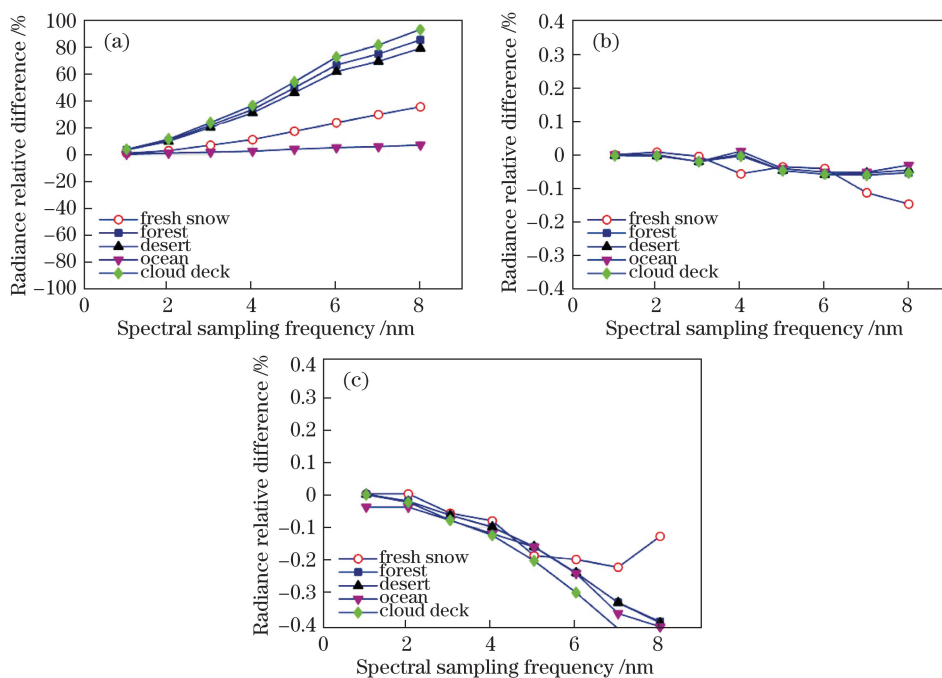


图 5 短波红外波段 3 个通道处不同光谱采样间隔的辐射相对差异。(a) CH5 (1.38 μm); (b) CH6 (1.64 μm); (c) CH7 (2.13 μm)
 Fig. 5 Radiance relative differences for three channels at different sampling frequencies in short-wave infrared band.

(a) CH5 (1.38 μm); (b) CH6 (1.64 μm); (c) CH7 (2.13 μm)

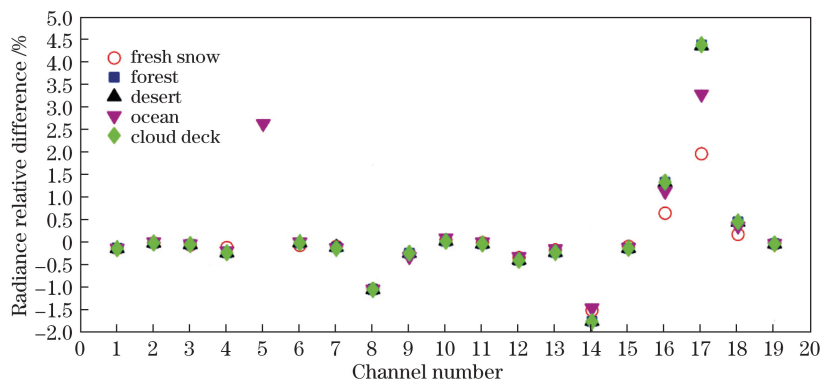


图 6 太阳反射波段光谱采样间隔为 4 nm 时所有 19 个通道处的 TOA 辐射相对差异

Fig. 6 TOA radiance relative differences for nineteen channels at sampling frequency of 4 nm in reflective solar bands

3.2 地球热发射波段

3.2.1 光谱采样的影响

基于 AER LBL 模式模拟光谱结果。图 7 为 AER LBL 模式模拟在热带晴空区不同采样间隔的高光谱数据的辐射差异。图 7(a)为光谱采样间隔为 $0.625, 2 \text{ cm}^{-1}$ 和原始采样间隔为 0.25 cm^{-1} 时的辐射分布。由图 7(a)可知,采样间隔越大,光谱辐射曲线的波动越小,因此导致不同采样间隔的光谱辐射观测结果出现差异。图 7(b)和图 7(c)分别为光谱采样间隔为 $0.625, 2 \text{ cm}^{-1}$ 与原始采样间隔为 0.25 cm^{-1} 时光谱辐射的绝对差异和相对差异。可以看出,随着采样间隔变大,光谱波动信息损失越来越多,光谱辐射绝对差异和相对差异越

来越大。在中长波红外波段,光谱辐射的差异主要受水汽、二氧化碳、臭氧等吸收气体的影响。其中,水汽的吸收几乎覆盖了地球大气红外辐射的整个波段,吸收作用最强的是 1595 cm^{-1} 水汽吸收带和 $50 \sim 833 \text{ cm}^{-1}$ 水汽吸收带。二氧化碳有 2 个强吸收带,分别位于 $667, 2350 \text{ cm}^{-1}$ 处。臭氧在 $2128, 1042, 709 \text{ cm}^{-1}$ 处有较强吸收。在图 7(b)中, $550 \sim 800 \text{ cm}^{-1}$ 波段附近光谱辐射的绝对差异很大,最大差异达到了 $40 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Sr} \cdot \text{cm}$ 。在图 7(c)中, $1400 \sim 2300 \text{ cm}^{-1}$ 波段和 3000 cm^{-1} 波段附近的绝对差异很小,但相对差异达到了 100%,这是因为这些波段自身的能量很小,不同光谱采样引起的辐射相对差异很大。

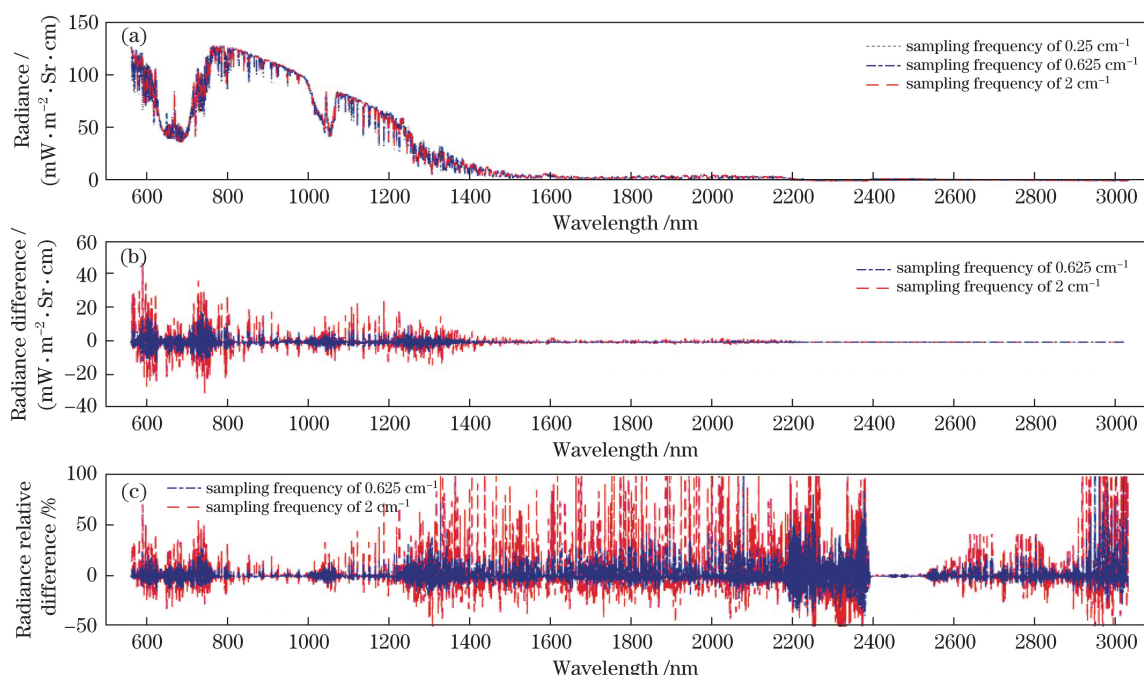


图 7 热带晴空区不同采样间隔的 TOA 光谱辐射差异。(a)光谱辐射分布；
(b)光谱辐射的绝对差异；(c)光谱辐射的相对差异

Fig. 7 Differences of TOA spectral radiance at different sampling frequencies in clear sky of tropic.

(a) Spectral radiance distribution; (b) absolute difference of spectral radiance; (c) relative difference of spectral radiance

3.2.2 光谱采样的敏感性分析

将不同光谱采样间隔 ($0.5, 0.625, 0.8, 1.2, 2 \text{ cm}^{-1}$) 时计算的辐射和亮度温度分别与原始采样间隔为 0.25 cm^{-1} 时的结果进行对比来分析光谱采样间隔的影响。图 8 为热带晴空、热带低云、热带中云、热带高云、中纬度夏季晴空、中纬度冬季晴空 6 种不同大气条件下, 对应通道处不同光谱采样间隔的辐射与原始采样间隔的辐射相对差异(左)和亮度温度绝对差异(右)。由图 8 可知, $3.8 \mu\text{m}$ (CH20)、 $4.050 \mu\text{m}$ (CH21)、 $10.8 \mu\text{m}$ (CH24)和 $12.0 \mu\text{m}$ (CH25) 处于大气窗区, 当采样间隔小于 2 cm^{-1} 时, 辐射和亮度温度的差异都很小, 辐射的相对差异小于 0.1% , 亮度温度的绝对差异小于 0.1 K , 但当光谱采样间隔较大时, CH20、CH25 处部分大气条件辐射的相对差异和亮度温度的绝对差异变得明显。CH20 的光谱辐射受到水汽弱吸收的影响较大, 当采样间隔达到 2 cm^{-1} 时, 热带晴空和中纬度夏季晴空辐射的相对差异最大可达 0.8% , 热带晴空亮度温度的绝对差异超过 0.18 K 。CH25 受到 $50 \sim 833 \text{ cm}^{-1}$ 水汽吸收带翼连续吸收的影响较小, 热带晴空和中纬度夏季的水汽含量丰富, 当采样间隔达到 2 cm^{-1} 时, 光谱辐射的相对差异达到了 0.13% 左右, 亮度温度的绝对差异小于 0.1 K 。 $7.2 \mu\text{m}$ (CH22)

和 $8.550 \mu\text{m}$ (CH23) 处于大气水汽的吸收带, 这 2 个通道辐射的相对差异和亮度温度的绝对差异对光谱采样很敏感。当光谱采样间隔达到 2 cm^{-1} 时, 辐射的相对差异和亮度温度的绝对差异都很大, 辐射的最大相对差异为 1% 左右, 亮度温度的最大绝对差异接近 0.5 K 。当光谱采样小于 0.8 cm^{-1} 时, 辐射的相对差异小于 0.18% , 亮度温度的绝对差异小于 0.1 K 。

在热带有云的条件下, 利用 3 种不同高度云层的观测条件 ($700, 500, 200 \text{ hPa}$) 得到模拟观测的结果, 从图 8 中 CH20、CH22、CH23、CH25 通道处的结果差异可以得到以下结论: 随着光谱采样间隔增大, 200 hPa 热带高云区辐射的相对差异和亮度温度的绝对差异非常小, 500 hPa 热带中云区的差异逐渐增大, 700 hPa 热带低云区的差异最大。因为模拟的热带高、中、低云都在对流层内, 对流层大气中的水汽含量随着高度的增大而减少, 所以热带高云处的光谱辐射受到大气中水汽吸收的作用较小, 热带低云处的光谱辐射受到水汽吸收的作用大。

在晴空条件下, 从图 8 中 CH20、CH22、CH23、CH25 处 3 种不同季节, 以及热带、中纬度夏季、中纬度冬季不同区域所对应的光谱辐射的相对差异和亮度温度的绝对差异可以看出, 在相同地表高度 (1013 hPa) 条件下, 夏季气温高, 水汽含量大, 大气

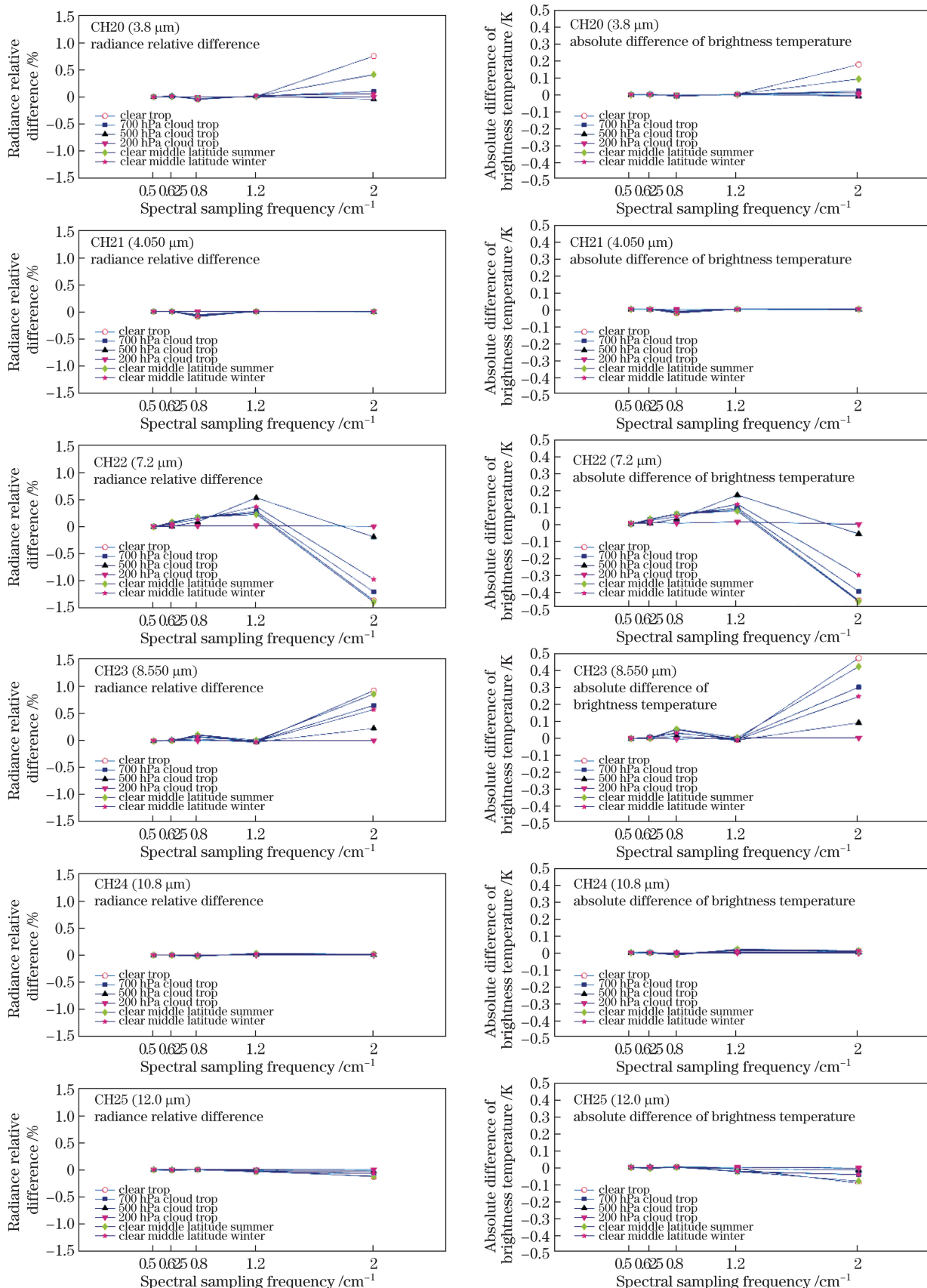


图 8 地球热发射波段 6 个通道处不同采样频率的辐射相对差异和辐射亮度温度的绝对差异
 Fig. 8 Radiance relative differences and absolute differences of brightness temperature for six channels at different sampling frequencies in thermal emissive bands

中气体的吸收作用强,中纬度夏季晴空区辐射的相对差异和亮度温度的绝对差异比中纬度冬季晴空区的差异大。同样,低纬度大气中的水汽含量更大,水汽吸收作用更强。因此,热带晴空条件下所观测的光谱辐射的相对差异和亮度温度的绝对差异比中纬度夏季晴空区和中纬度冬季晴空区观测结果的相对差异要大。

4 结 论

通过建立空间辐射基准来提高卫星观测结果的准确性和一致性,这对于卫星监测气候变化的研究具有重要的借鉴意义。对空间辐射基准传递不确定性进行了光谱敏感性分析,分别利用 MODTRAN 模式和 AER LBL 模式的模拟结果作为太阳反射波段和地球热发射波段的空间辐射测量基准的高光谱遥感器代理数据,模拟了太阳反射波段 5 种不同下垫面和地球热发射波段 6 种不同大气条件下的光谱辐射,研究了不同采样间隔的光谱辐射的差异,分析了受不同光谱采样影响的光谱辐射在传递过程中的不确定性。

通过分析不同光谱采样间隔引起的辐射波动的差异可知,气体吸收区、绝对辐射低信号区、近紫外太阳光谱暗线区在不同采样间隔时的光谱辐射差异很大。在太阳反射和地球热发射波段中,光谱辐射的最大相对差异都超过了 100%。选用 MERSI-II 作为辐射基准传递的目标遥感器,根据 MERSI-II 的光谱响应函数,通过卷积计算得到不同观测条件下各通道处的辐射值。通过对比不同采样间隔光谱辐射的差异,得到以下辐射基准传递不确定性的结论:在太阳反射波段,当采样间隔为 4 nm 时,窗区通道处的传递不确定性优于 0.3%;近紫外太阳光谱暗线 CH8、气体吸收通道 CH14、CH16、CH18 处的不确定性约为 1.6%;水汽强吸收窄通道 CH17 处的不确定性约为 2%~5%;CH5 对光谱采样异常敏感,此处传递不确定性可达 40%以上。根据各通道定量应用需求的差异,每个通道对不同下垫面的敏感性也不同,因此部分通道对敏感下垫面也表现出较大的不确定性:CH3、CH6 对雪目标最敏感,CH4、CH5、CH6 对云目标最敏感,CH10 对海洋目标最敏感,CH14、CH15、CH16、CH17、CH18 对沙漠、云和森林目标很敏感。在地球热发射波段,采样间隔小于 0.8 cm^{-1} ,MERSI-II 所有通道处辐射亮度温度的不确定性低于 0.1 K,其中窗区的光谱采样间隔只需小于 2 cm^{-1} ,辐射亮度温

度的不确定性即可优于 0.1 K。在热带有云区,低云区的亮度温度差异比高、中云区的大。在晴空区,热带观测的亮度温度差异最大,其次是中纬度夏季的亮度温度差异,中纬度冬季亮度温度的差异最小。

为了使全球卫星观测结果的相对精度符合长期气候监测的要求,结合 TRUTHS 和 CLARREO 计划制定的指标可以看出:在太阳反射波段中,为了达到 0.3%的光谱辐射相对精度,大气窗区的光谱采样间隔优于 4 nm 时即可满足要求;在近紫外太阳光谱暗线区和气体吸收区中,例如 412,746,905 nm 处的通道,光谱采样间隔需优于 2 nm;940 nm 处的通道虽然包含水汽的强吸收,但是由于通道较宽,相对于其他水汽吸收通道,此通道对光谱的敏感性比较低,因此光谱采样间隔只需优于 3 nm;中心波长为 936 nm 的通道处于强水汽吸收带,光谱采样间隔需优于 1 nm;中心波长为 $1.38 \mu\text{m}$ 的通道处于水汽吸收通道,同时此处的自身能量很小,因此,现有光谱采样间隔无法满足要求,需要进一步提高光谱采样间隔或发展光谱精细化订正方法,以满足卫星观测气候变化的要求。在地球热发射波段中,以 MERSI-II 为例,窗区和弱气体吸收区所有通道处光谱采样间隔只要满足 0.8 cm^{-1} 即可满足 0.1 K 的辐射相对精度要求,可见现有高光谱探测器的采样间隔基本都能满足。

本研究成果不仅可以获得不同波段光谱采样间隔对空间基准传递的不确定性,而且对基准遥感器指标的研究具有指导意义,有助于未来更精确地观测气候变化,使卫星提供更加精准的卫星资料,从而确定全球气候变化的真正影响。虽然在气体吸收区空间辐射基准的传递相对精度对光谱辐射的采样间隔非常敏感,具有较高的光谱不确定性,但是这不代表在这些波段无法实现精准的辐射基准传递。基于本研究发展精细化的光谱订正方法可以减少光谱不确定性的影响。

参 考 文 献

- [1] Ohring G, Wielicki B, Spencer R, *et al.* Satellite instrument calibration for measuring global climate change: report of a workshop[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2005, 86(9): 1303-1313.
- [2] Xu N, Wu R H, Hu X Q, *et al.* Integrated method for on-orbit wide dynamic vicarious calibration of FY-3C MERSI reflective solar bands[J]. Acta Optica

- Sinica, 2015, 35(12): 1228001.
- 徐娜, 吴荣华, 胡秀清, 等. FY-3C MERSI 反射波段在轨宽动态综合辐射定标方法[J]. 光学学报, 2015, 35(12): 1228001.
- [3] Wu A S, Xiong X X, Doelling D R, *et al.* Characterization of Terra and Aqua MODIS VIS, NIR, and SWIR spectral bands' calibration stability[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(7): 4330-4338.
- [4] Xiong X X, Chiang K F, Wu A S, *et al.* Multiyear on-orbit calibration and performance of Terra MODIS reflective solar bands[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(1): 535-546.
- [5] Fox N, Aiken J, Barnett J J, *et al.* Traceable radiometry underpinning terrestrial- and helio- studies (TRUTHS)[J]. Advances in Space Research, 2003, 32(11): 2253-2261.
- [6] Trenberth K E, Anthes R A, Belward A, *et al.* Challenges of a sustained climate observing system [M]// Asrar G R, Hurrell J W. Climate science for serving society. Netherlands: Springer, 2013: 13-50.
- [7] Trenberth K E, Fasullo J T. Tracking earth's energy[J]. Science, 2010, 328(5976): 316-317.
- [8] Ohring G, Tansock J, Emery W, *et al.* Achieving satellite instrument calibration for climate change[J]. Eos, 2007, 88(11): 136.
- [9] Han Q J, Liu L, Fu Q Y, *et al.* Vicarious calibration of multiple sensors based on reanalysis data of pseudo-invariant site[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1128002.
- 韩启金, 刘李, 傅俏燕, 等. 基于稳定场地再分析资料的多源遥感器替代定标[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1128002.
- [10] Wielicki B A, Young D F, Mlynchak M G, *et al.* Achieving climate change absolute accuracy in orbit[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2013, 94(10): 1519-1539.
- [11] Wu A S, Xiong X X, Jin Z H, *et al.* Sensitivity of intercalibration uncertainty of the CLARREO reflected solar spectrometer features[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(9): 4741-4751.
- [12] Sandford S P, Young D F, Corliss J M, *et al.* CLARREO: cornerstone of the climate observing system measuring decadal change through accurate emitted infrared and reflected solar spectra and radio occultation[C]. SPIE, 2010, 7826: 782611.
- [13] Hao X P, Song J, Sun J P, *et al.* Vacuum radiance temperature national standard facility for infrared remote sensors of Chinese Fengyun meteorological satellites[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(7): 1845-1851.
- 郝小鹏, 宋健, 孙建平, 等. 风云卫星的红外遥感亮度温度国家计量标准装置[J]. 光学精密工程, 2015, 23(7): 1845-1851.
- [14] Zhao W N, Fang W, Sun L W, *et al.* Calibration chain design based on integrating sphere transfer radiometer for SI-traceable on-orbit spectral radiometric calibration and its uncertainty analysis[J]. Chinese Physics B, 2016, 25(9): 090701.
- [15] Zhao W N. Research on transfer chain for SI-traceable absolute spectral radiance calibration on-orbit with high accuracy[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016.
- 赵维宁. 高精度可溯源 SI 在轨绝对光谱辐亮度定标传递链路研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
- [16] Li J J, Zheng X B, Lu Y J, *et al.* Quantum efficiency calibration of opto-electronic detector by means of correlated photons method[J]. Chinese Optics Letters, 2008, 6(7): 472-475.
- [17] Gao D Y, Hu Y B, Liu Y, *et al.* Photoelectric detection efficiency calibration of double channel self-calibration radiation reference source[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(11): 1130001.
- 高冬阳, 胡友勃, 刘岩, 等. 双通道自校准光谱辐射源光电探测效率的定标[J]. 光学学报, 2016, 36(11): 1130001.
- [18] Zou P, Zheng X B, Wu H Y, *et al.* Research on calibration of radiance detector based on trap detector[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0712002.
- 邹鹏, 郑小兵, 吴浩宇, 等. 基于陷阱探测器的辐亮度探测器定标方法研究[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0712002.
- [19] Xu N, Hu X Q, Chen L. Evaluation and correction of atmosphere contamination on the measurement of the spectral response of FY-2 water vapor channels[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(8): 2325-2330.
- 徐娜, 胡秀清, 陈林. FY-2 水汽通道光谱响应测量大气污染评估和订正[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(8): 2325-2330.
- [20] Berk A, Bernstein L S, Anderson G P, *et al.* MODTRAN cloud and multiple scattering upgrades with application to AVIRIS[J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 65(3): 367-375.
- [21] Clough S A, Shephard M W, Mlawer E J, *et al.* Atmospheric radiative transfer modeling: a summary of the AER codes[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2005, 91(2): 233-244.
- [22] 石广玉. 大气辐射学[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [23] Ding L. Flight model (Z01-2) development review of

FY-3A medium resolution spectral imager (MERSI) [R].
Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics of
the Chinese Academy of Sciences, 2005.
丁雷. FY-3 卫星中分辨率光谱成像仪正样(Z01-2)
研制总结报告[R]. 上海: 中国科学院上海技术物理

研究所, 2005.

[24] Dong C H, Yang J, Zhang W J, *et al.* An overview
of a new Chinese weather satellite FY-3A[J].
Bulletin of the American Meteorological Society,
2009, 90(10): 1531-1544.