

中国空间辐射测量基准技术

卢乃锰¹, 丁雷², 郑小兵³, 叶新⁴, 李传荣⁵, 吕达仁⁶, 张鹏¹,
胡秀清¹, 周成虎⁷, 尤政⁸, 房建成⁹, 龚建雅¹⁰, 蒋兴伟¹¹,
李建军³, 马灵玲⁵, 徐娜¹

1. 国家卫星气象中心, 北京 100081;

2. 中国科学院 上海技术物理研究所, 上海 200083;

3. 中国科学院 安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031;

4. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;

5. 中国科学院 空天信息创新研究院, 北京 100094;

6. 中国科学院 大气物理研究所, 北京 100029;

7. 中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101;

8. 清华大学, 北京 100084;

9. 北京航空航天大学, 北京 100083;

10. 武汉大学, 武汉 430000;

11. 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081

摘要: 为确保数据的定量化应用, 国际航天遥感大国始终围绕定标技术开展研究, 定标精度不断提高。在经历数十年发展之后, 受传统的遥感载荷定标系统设计与地面辐射校正技术理论极限的制约, 目前遥感卫星辐射定标停留在太阳反射谱段 2%, 红外谱段 0.2 K 的不确定性水平, 其精度难以继续提高。进入 21 世纪, 气候变化问题成为全球关注的热点, 全球气候变化研究对遥感卫星辐射测量精度提出了前所未有的要求。ASIC³ (Achieving Satellite Instrument Calibration for Climate Change) 报告指出, 为了有效检测全球气候变化信号, 准确预测气候变化, 遥感卫星观测必须长期保持在太阳反射谱段 0.3%、红外谱段 0.1 K, 太阳总辐射 0.01% 的不确定性水平。为了迎接这一挑战, 欧洲和美国相继提出了 CLARREO 计划和 TRUTHS 计划, 试图通过发射具有超高辐射测量精度的基准卫星, 在监测气候变化信号的同时, 标定其他遥感卫星, 提升全球遥感卫星整体定标精度。同期, 中国也提出了空间辐射测量基准技术的概念, 并在“十二五”和“十三五”, 通过国家高技术研究发展计划和国家重点研发计划持续支持星上相变固定点黑体、空间低温辐射计等尖端技术的研发, 进而逐渐形成发射空间辐射测量基准卫星的路线图。从目前发展态势上看, 中国有可能成为第一个建立空间辐射测量基准的国家, 率先实现卫星平台辐射观测直接向国际单位 (SI) 的溯源。

关键词: 空间辐射测量, 基准, 卫星, 溯源, 技术

引用格式: 卢乃锰, 丁雷, 郑小兵, 叶新, 李传荣, 吕达仁, 张鹏, 胡秀清, 周成虎, 尤政, 房建成, 龚建雅, 蒋兴伟, 李建军, 马灵玲, 徐娜. 2020. 中国空间辐射测量基准技术. 遥感学报, 24(6): 672-680

Lu N M, Ding L, Zheng X B, Ye X, Li C R, Lyu D R, Zhang P, Hu X Q, Zhou C H, You Z, Fang J C, Gong J Y, Jiang X W, Li J J, Ma L L and Xu N. 2020. Introduction of the radiometric benchmark satellite being developed in China for remote sensing. Journal of Remote Sensing(Chinese), 24(6): 672-680[DOI: 10.11834/jrs.20200011]

回顾过去 60 年的发展, 从定标技术角度看, 遥感卫星经历了“感知辐射——发现目标”到“测量辐射——获取参数”, 再到“溯源辐射——认知变化”的发展历程。以气象卫星为例, 早期的遥感

收稿日期: 2020-01-19; 预印本: 2020-03-30

基金项目: 国家重点研发计划(编号: 2018YFB0504700, 2018YFB0504600, 2018YFB0504900, 2018YFB0504800); 中科院国际大科学计划培育专项“全球遥感定标基准网”(编号: 181811KYSB20160040)

第一作者简介: 卢乃锰, 1963 年生, 男, 研究员, 研究方向为辐射校正技术。E-mail: lunm@cma.gov.cn

通信作者简介: 李传荣, 1956 年生, 男, 研究员, 研究方向为遥感地面系统工程。E-mail: crli@aoe.ac.cn

载荷采用模拟信号, 无辐射定标系统设计, 所得到的电视云图(图1)主要用于发现天气系统, 无法依此计算云顶温度、有效离子半径等大气参数。这一时期的遥感卫星处在“感知辐射——发现目标”的阶段。

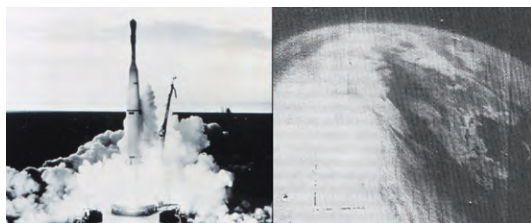


图1 第一颗气象卫星的发射和第一幅卫星云图

Fig.1 Launch of the first meteorological satellite and its cloud imagery

随着数字信号时代的到来和星上定标系统的建立, 遥感卫星进入“测量辐射——获取参数”的定量遥感阶段。经典的范例是大气参数反演。如图2所示, 利用风云三号气象卫星大气温度探测仪氧气吸收通道组合, 可以反演得到台风暖心结构, 以此估算水成物潜热释放, 进而预报台风强度变化。通过遥感手段定量获取目标参数, 这在模拟信号年代难以想象(卢乃锰和谷松岩, 2016)。

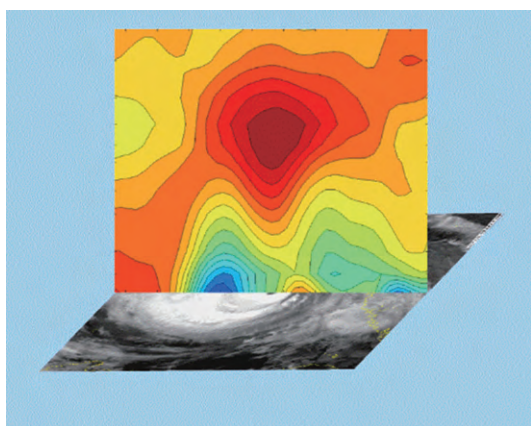


图2 利用风云三号星载微波资料反演台风内部温度距平(等值线间隔0.5 K, 浅黄色值为0)

Fig. 2 Anomaly of temperature profile within Typhoon with FY-3 (0.5 K between contour lines, light yellow is zero)

进入21世纪, 深层次的遥感应用对卫星观测提出了更高要求。Ohring等(2004)被广为引用的示意图(图3)揭示了遥感观测的准确性与稳定性对数据应用的影响。从图3中可以看出, 若要认

知地球长期变化就需要同时具有高准确性(Accuracy)和高稳定性(Stability)的观测。这种观测不仅要确保短期数据之间可比, 还要确保跨越数十年甚至更长时间段的数据可比。实现这个目标的技术手段是在太空建立空间辐射测量基准, 通过发射空间辐射测量基准卫星完成观测向SI的溯源。“溯源辐射——认知变化”代表着遥感卫星未来的发展方向。

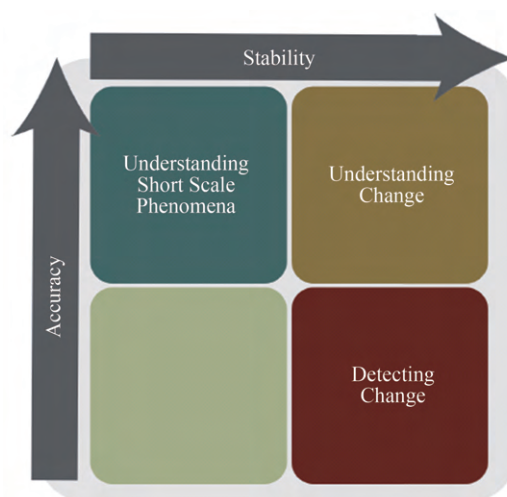


图3 不同应用对遥感卫星观测精度和稳定性的要求示意图(Ohring等, 2004)

Fig.3 Diagram showing the demand of stability and accuracy varies with different data application(Ohring, et al., 2004)

1 空间辐射测量基准概念的缘起

在经历了持续快速发展之后, 近十余年来, 传统的载荷定标与辐射校正技术进入平台期, 遥感载荷辐射定标精度难以显著提高。从载荷设计角度看, 现有卫星遥感载荷或因自身稳定性不足, 或因溯源链路的误差难以进一步降低, 导致观测数据存在不确定性。即便国际最高定标水平的业务载荷, 在太阳反射谱段也存在2%, 红外发射谱段0.2 K左右的观测不确定性。红外载荷星上黑体温度的不均匀性、温度测量误差以及杂散光等因素的影响, 导致按照现有技术难以继续大幅提高载荷定标精度。而辐射传输计算、大气光学参数观测、地面均匀性以及地面探空观测空间代表性等误差因素的存在, 也使传统的地面辐射校正技术停留在红外0.5 K、可见光5%的不确定性水平。为了进一步提升遥感卫星辐射定标精度, 将地面计量基准技术应用于太空, 建立空间辐射测量基

准,是遥感技术发展的必然(Ohring等,2007)。

将地面计量手段应用到太空的技术挑战巨大。低温辐射计、相变黑体等一些列尖端技术的使用,将使定标系统的造价超过载荷本身。为每个载荷配备昂贵的定标系统不具备经济可行性。针对这一问题,国家高技术研究发展计划地球观测与导航专家组于2006年先于美国,提出空间辐射测量基准卫星计划的概念,即发射一颗具有溯源能力的超高精度辐射测量基准卫星,通过它与其他遥感卫星轨道交叉时刻的同步观测,将自身的辐射

观测基准传递到其他卫星之上。这一概念的提出与欧洲2003年提出的TRUTHS计划(Fox等,2003,2014)以及2007年美国提出的CLARREO计划(Wielicki等,2013)在彻底解决遥感卫星辐射观测无法直接溯源的问题上不谋而合。除欧洲尚未考虑红外载荷之外,中国、美国和欧洲在载荷配置、主要指标方面的基本考虑相近,中国对观测模式考虑更加充分(表1)。目前3方科学家正在同步攻关,向着在太空建立辐射测量基准的方向努力。

表1 中国空间辐射测量基准卫星、美国CLAERRO和欧洲TRUTHS对比

Table 1 Comparison among radiometric benchmark satellite, CLAERRO and TRUTHS

	空间辐射测量基准星	CLAERRO	TRUTHS
波段范围	太阳总辐射	200—3500 nm	全光谱
	太阳光谱辐射	380—2500 nm	200—2000 nm
	反射光谱	380—2500 nm	320—2300 nm
	红外光谱	600—2700 cm^{-1}	200—3000 cm^{-1}
不确定度	太阳总辐射	0.01%	0.01%
	太阳光谱辐射	0.3%	0.1%
	反射光谱	<0.6%	0.3%
	红外光谱	0.1K	0.1K
光谱分辨率	太阳光谱辐射	3—8 nm	0.5 nm (200—1000 nm); 1 nm (1000—2500 nm)
	反射光谱	10 nm	8 nm
	红外光谱	0.25 cm^{-1}	0.5 cm^{-1}
观测模式	4	2	2

2 建立中国空间辐射测量基准的需求

2.1 气候变化研究对超高精度辐射观测的需求

尽管主流科学家认为以增暖为主要特征的全球气候变化是不争的事实,但从地面站点观测结果看,全球变暖速率不尽相同,一些地方甚至在变冷。全球变暖过程的机理,以及这一过程中自然变率与人类活动影响分离等关键科学问题尚未得到很好解决。一些气候研究理论甚至质疑全球百年持续变暖的趋势是否会继续。图4是利用树木年轮和植物孢子等手段,辅之以近代器测获得的千年尺度北半球气温变化曲线,从图4中可以看出,一千年来,全球温度涨落很小,即便是工业革命导致二氧化碳排放、温室效应倍增的近100年,全球气温上升也不超过1 K。政府间气候变化委员会(IPCC)第5次评估报告指出,超过百年尺度的

全球气温变化幅度仅有0.8 K左右。如此微弱的信号检测对遥感卫星辐射观测精度提出挑战。

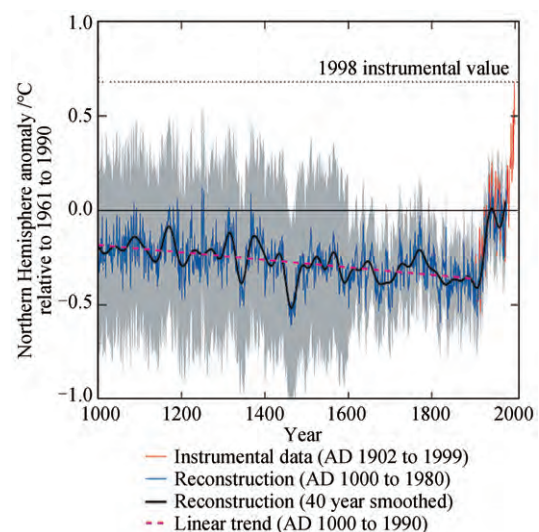
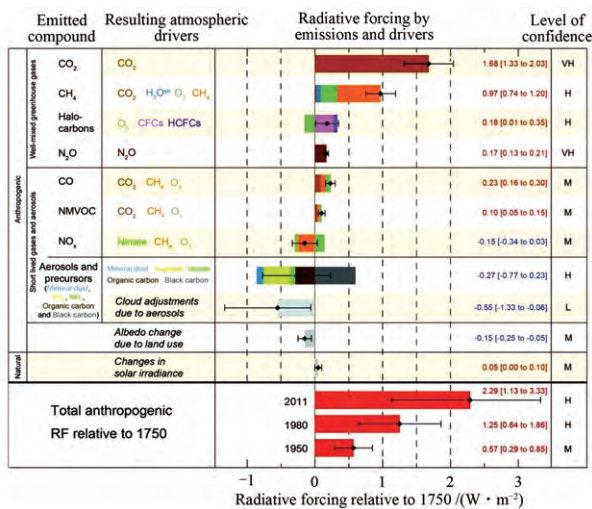


图4 千年尺度北半球气温变化及其不确定性(IPCC,2001)
Fig.4 Temperature change in northern hemisphere and its uncertainty (IPCC,2001)

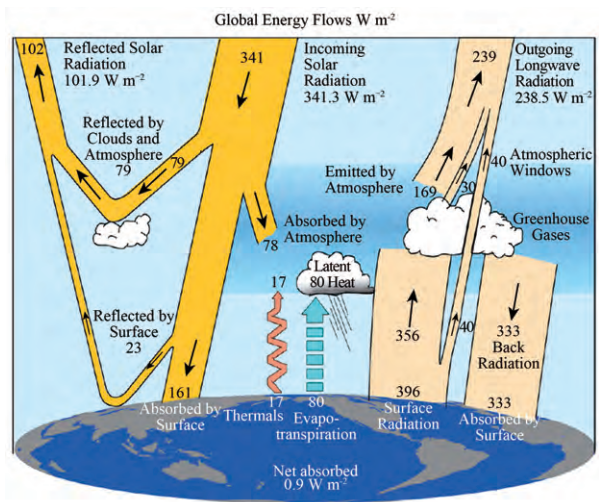
气候变化的另一个特征是其过程的复杂性。图5来自2013年IPCC评估报告以及Trenberth等的分析结果,展示了地气系统辐射收支过程的复杂性以及人类活动影响带来的辐射强迫认知的不确定性。尽管科学家们对地气系统辐射收支概念模型的认识一致,但不同科学研究团队以及同一科学家不同时期对地球气候系统辐射强迫过程的量化描述存在差异。而这种差异足以改变不同气候

系统模式对气候变化预测的结论,对此气候研究者早有论述(Murphy等,2004)。地气系统辐射传输过程尚且如此,其他的物理、化学、生物过程就更为复杂。澄清这些过程、准确确定相关参数的有效方法就是为地球系统研究提供长期稳定和准确的观测,而卫星观测具有长期连续和全球覆盖的特点,是气候诊断的重要观测工具。



(a) 与1750年相比的辐射强迫(IPCC,2014)

(a) Radiative forcing relative to 1750(IPCC,2014)



(b) 大气中的辐射传输过程(Trenberth和Fasullo,2010)

(b) Processes of radiation transmission through the atmosphere(Trenberth & Fasullo,2010)

图5 地球辐射收支与辐射强迫的不确定性

Fig.5 Earth radiation budgets and the uncertainty of radiation forcing

2.2 确保多源同类遥感数据可比以及高精度产品生成的需要

由于目前星上载荷定标系统无法实现辐射基准溯源,导致不同国家,同一国家不同系列以及同一系列不同卫星之间观测数据缺乏可比性。图6是不同卫星对太阳总辐射的长期观测结果(<http://spot.colorado.edu/~kopp/TSI/> [2020-01-19])。图6中可以看到,星-星观测的搭接存在明显的阶梯,而谁是真值不得而知。观测的误差同样会带来遥感产品的误差。诸如海洋水色等需要借助通道之间细微差异,生成相应产品的算法,观测误差会被放大,造成产品精度严重下降,直接导致不同卫星所生成的产品难以比较。建立空间辐射测量基准是确保多源遥感数据和产品可比的根本手段。

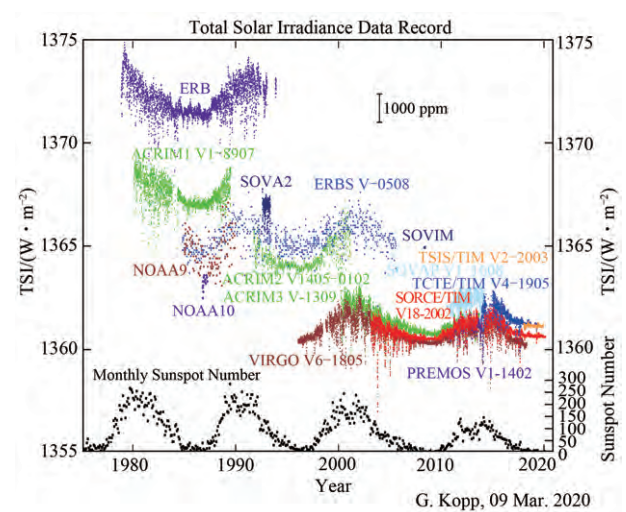


图6 不同卫星对太阳总辐射的长时间观测(Kopp,2017)

Fig.6 Total solar irradiance data record with different satellites (Kopp,2017)

2.3 国家空间对地高精度遥感的需求

为解决国产遥感卫星辐射定标问题,自“九五”开始实施了遥感卫星辐射校正场发展计划,2002年建成了中国遥感卫星辐射校正场。它为中国气象、海洋、资源、环境与减灾、军事、神舟等多系列近百颗遥感卫星提供了在轨辐射校正服务,并在2012年获得国家科技进步二等奖。然而,借助辐射校正场提升遥感载荷辐射定标精度的技术接近理论极限。近年来,又相继实施“高分辨对地观测系统”、“空间基础设施”等多个重大空间观测计划和气象、海洋、资源、环境减灾等业务卫星观测计划,部署的遥感载荷数目大幅度增加,载荷的功能和科学使命出现前所未有的细分和多样化。突破地面辐射校正场技术局限,在空间段建立空间辐射测量基准,是确保最大限度发挥中国遥感卫星效益的必要手段,对确保国产遥感卫星更高品质数据产出具有重要意义。

3 中国空间辐射测量技术发展的战略部署

国家高技术研究发展计划地球观测与导航领域专家组2006年提出了空间辐射测量基准卫星的概念。经技术论证,“十二五”末期,国家高技术研究发展计划针对空间辐射基准卫星核心技术,部署了前瞻性项目“空间辐射测量基准源研制”。项目围绕国产卫星定标精度和稳定度难以满足气候变化研究的问题,力图突破星载超高精度可见光和红外辐射源研制以及月球定标等关键技术,研制红外绝对辐射基准源系统、可见光自校准辐射基准源系统、太阳光谱辐射基准源系统以及可见光谱段月球定标系统。

2015年8月,中国遥感卫星辐射校正场办公室召开高层研讨会,13名院士联名呼吁发展中国的空间辐射测量基准卫星技术。会议明确了中国空间辐射测量基准卫星发展路线图,确定了基准源攻关、原理样机突破、平台载荷研制“三步走”的发展战略。至2017年底,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、中国科学院安徽光学精密机械研究所、中国科学院上海技术物理研究所以及国家卫星气象中心分别突破了低温电替代(Ye等,2018)、参量下转换辐射源、相变固定点黑体以及月球辐照度模型等关键技术。期间围绕

空间辐射测量基准源的研制,取得的重大突破包括:

(1) 高精度空间红外绝对辐射基准源。突破了高精度温度国际单位制溯源、空间微型温度固定点研制、空间环境温度超高精度测量、比辐射率在线测试等关键技术,提出了基于控制辐射的在轨比辐射率测量方法和基于微型铯相变固定点的温度传感器在轨校准方法;研制了不确定度 $<10\text{ mK}$ 的水、镓、镓—铟、镓—锡、镓—锌、丁二腈和水杨酸苯脂等微型相变固定点、不确定度达到 2.9×10^{-3} 的光谱比辐射率测量装置以及 50 mm 微型相变固定点红外基准辐射源原型机,比辐射率达到0.9989,控温稳定性优于 0.01 K ,温度不确定度为 0.084 K (Hao等,2017,2018;宋健等,2015)。初步建立了计量院、实验室、在轨定标器的红外辐射基准传递技术链路,形成定标传递体系。

(2) 可见光—近红外波段自校准光谱辐射源。提出了相关光子辐射基准源设计理论并研制出桌面原理样机,解决了高通量相关光子源制备和宽谱段相位匹配等关键技术,有效校正死时间和后脉冲的影响,实现了高精度多通道符合测量(Hu等,2020;Xia等,2015;高冬阳等,2016;汤琪等,2019)。在国际上率先实现了相关光子基准源与辐射测量仪器的一体化设计,实现了对系统光电衰变不敏感的绝对辐射测量,实验验证了优于0.3%的绝对辐亮度测量不确定度,为进一步研发基于相关光子的宽谱段辐射基准载荷技术提供了依据。

(3) 可溯源至SI的高精度天基太阳总辐射基准。突破了高灵敏吸收腔、超低温精确控温、绝对辐射接收器组件研制等关键技术,实现了低温辐射计向太阳总辐照度测量的量值传递,相对标准不确定度达到0.03%。研制的脉冲管制冷空间低温辐射计原理样机工作温度达到 20 K ,通过与国家计量院低温辐射计的直接和间接比对,实现了测量结果向国际单位(SI)的溯源(Ye等,2018;吴铎等,2019;衣小龙等,2016;宋宝奇等,2015;王玉鹏等,2015)。

为实施“三步走”的战略,科技部地球观测与导航重点专项2018年设立了空间辐射测量基准与传递技术项目群,持续支持国内优势单位开展原理样机研发,项目群计划在2022年完成原理样

机的研制，建立太阳总辐照度和光谱辐照度、地球反射辐亮度和辐射亮温的绝对测量能力。

空间辐射测量基准系列项目的实施也提升了多种国产核心部件制备与工艺集成水平。空间辐射基准项目支持研发的航天级深低温大冷量制冷机、超高吸收比腔体、单光子探测组件、多波长高稳定泵浦激光器、多路低噪声高速符合测量电路、微型固定点、超高灵敏度甚长波红外探测器等部件，均属国内前沿技术。一些部件打破封锁，指标达到国际领先水平。这些技术瓶颈的突破，对于提高我国遥感载荷自主研发能力，产生了重要的影响。

4 中国空间辐射测量基准卫星计划

4.1 基准卫星布局与发展路线图

为进一步推进中国空间辐射测量技术的发展，中国遥感卫星辐射校正场办公室2019年8月召开了由20位院士参加的第二次中国空间辐射测量技术发展战略研讨会。国家卫星气象中心、中国科学院上海技术物理研究所、中国科学院安徽光学精密机械研究所、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所联合提出的空间辐射基准卫星计划实施路线图。从提高基准星与现有太阳同步轨道遥感卫星时空匹配效率的角度分析，未来的空间辐射测量基准卫星将重点考虑近90°倾角太阳同步轨道设计，并优先装载红外和可见光谱段辐射基准载荷。鉴于巨大的技术挑战性，中国空间辐射测量基准卫星计划采取两步走的战略。第一阶段发射技术验证卫星，以期将空间辐射基准观测的长期不确定性控制在红外辐射温度0.15 K，太阳总辐射0.03%、太阳光谱辐射0.6%、地球反射光谱辐亮度1%的水平。第二阶段继续将上述指标提高到0.1 K、0.01%、0.3%和0.6%。此外，为便于交叉比对，空间辐射测量基准卫星还将考虑搭载GNSS等遥感载荷，并在轨道优化设计的基础上，增加敏捷观测能力，以提高与其他遥感卫星轨道交叉时的空间匹配度。

4.2 载荷基本配置

为有效诊断地球辐射收支以及为其他遥感卫星传递辐射测量基准，空间辐射测量基准卫星将配置太阳总辐照度测量仪、太阳光谱辐照度测量

仪、地一月成像光谱仪和红外干涉光谱探测仪四台基本载荷，分别用于地气系统入射辐射、反射辐射和发射辐射的观测。载荷主要指标如表2所示。

表2 空间辐射测量基准载荷主要指标

Table 2 Specifications of radiometric benchmark instruments

	太阳总辐照度测量仪	太阳光谱辐照度测量仪	地一月成像光谱仪	红外干涉光谱探测仪
空间分辨率	整个太阳视场	整个太阳	100 m (对地)	17 km/10 km
光谱分辨率	宽带	3—8 nm	10 nm	优于0.5 cm ⁻¹
测量不确定性	0.03 %/0.01% (k=2)	0.6%/0.3% (k=2)	1% /0.6% (k=2)	0.15 K/0.1 K (k=2)
光谱范围	0.2—35 m	0.38—2.5 m	0.38—2.5 m	600—2700 cm ⁻¹

注：“/”分割了第一阶段指标和第二阶段指标，k为置信度。

4.3 观测模式的考虑

基准星与其他遥感卫星同时间、同视角观测同一区域是实现辐射测量基准传递的前提条件。未来实现两颗卫星时空同步的观测模式将包括：

(1) 轨道交叉模式。当空间辐射测量基准卫星与其他遥感卫星轨道交叉时，在观测时差极小的情况下，可以认为两颗卫星从同一方向、同一时间观测到地球同一目标。

(2) 静止随动模式。当36000 km高度的静止遥感卫星进行全圆盘观测时，飞过其下方观域的基准星通过不断改变姿态，便可做到与静止遥感卫星沿同一方向观测地球同一目标。协调静止卫星的观测时间，便可以实现两颗卫星观测的时间准同步。当利用基准卫星完成对静止卫星的标定后，又可以利用静止卫星的轨道特点，对飞过其观域的其他遥感卫星进行标定。

(3) 同步观月模式。通常情况下，地月之间的距离远远大于遥感卫星与地面的距离。当通过卫星控制手段使遥感卫星和基准卫星同时观测月球时，可以认为它们的观测角度完全一样。由此便可以获取用于基准传递的时空匹配数据。

(4) 拉格朗日模式。将基准星置于拉格朗日点，利用其天体引力平衡点的特点，获取基准星的对日、对地或对月观测数据。将其与待标定卫星的数据相匹配，用于辐射基准的传递。

上述4种观测模式中，轨道交叉模式和静止随动模式是最为基本的观测模式，其辐射基准传递

不确定性最小。基准星与极轨卫星逢轨道交叉必观测,以确保匹配频次,而与静止卫星则根据其稳定性,每日择优选择2—7次观测。同步观月模式的实现涉及待标定卫星的测控,是非定常模式,而拉格朗日模式的工程可行性尚在论证中。无论哪种模式,地一月成像光谱仪和红外干涉光谱探测仪都是空间辐射测量基准传递的主要观测载荷,观测数据直接用于对其他遥感卫星的标定。而太阳总辐照度测量仪和太阳光谱辐照度测量仪在卫星飞行过程中,始终保持着对太阳的观测。

除上述观测模式之外,空间辐射测量基准卫星还可以在其生命期内积累对地球稳定目标多角度观测数据和月球观测数据,用于其他在轨遥感卫星载荷定标系统的状态监测和辐射校正。

4.4 辐射测量基准卫星数据处理技术

尽管上述复杂的观测模式在很大程度上保证了基准卫星与其他遥感卫星观测的时空同步性,但视场匹配误差和时间匹配误差依然存在。基准星与遥感星的光谱匹配偏差、空间分辨率差异等因素也都会影响辐射基准传递精度。需要研究特定方法减小匹配误差,减小传递过程中的精度损失。

(1) 空间匹配。选择辐射均匀的匹配区可以有效地减小因像元之间视场错位、载荷空间分辨率差异等空间失配因素所带来的误差。南极冰盖、戈壁和沙漠以及深对流云(DCC)等大尺度平坦自然目标将成为基准传递的首选匹配区。

(2) 时间匹配。设定严苛的时间匹配阈值可以减小时间失配所带来的辐射基准传递误差,但也将减少有效匹配点的数量。分析匹配区地物的时空变化特征,采用动态阈值法优化时间匹配阈值将可以提高匹配效率。

(3) 光谱匹配。在利用光谱卷积等方法进行光谱匹配时,目标区的光谱复杂性影响着匹配精度。空间辐射基准传递过程在控制由光谱响应所产生的误差时,需要选择平坦光谱目标,以减小光谱匹配误差。

(4) 偏振影响。在进行辐射基准传递时,还需要根据载荷偏振响应特征,考虑偏振效应的影响,通过入瞳总能量约束,完成基准传递。

4.5 观测数据的应用方向

太阳辐射是地气系统辐射过程的能量来源,准确观测太阳辐射对于气候变化研究具有特别重要的意义。从载荷原理上讲,太阳总辐照度测量仪比太阳光谱辐照度测量仪具有更高的观测精度,而地气系统辐射传输过程的光谱依赖决定着研究地球辐射收支必须获取太阳辐射的光谱信息。太阳总辐照度测量仪和太阳光谱辐照度测量仪在空间辐射测量基准卫星上联合工作,能够在获取高精度的太阳总辐射的同时,通过总能量的约束,减小太阳光谱辐照度测量仪的系统偏差,进一步提升太阳的分谱观测精度。

地一月成像光谱仪和红外干涉光谱探测仪将直接测量地气系统和月球表面的反射和发射辐射。其观测结果一方面用于地气系统辐射过程的光谱诊断,另一方面也为星—星之间同步观测的交叉比对提供着关键数据。通过空间辐射测量基准卫星的光谱数据与待标定卫星通道光谱响应的卷积,分析待标定卫星的观测偏差,并进行标定,即可实现基准传递。

5 结 语

回顾中国遥感卫星的发展历程,首颗气象卫星风云一号A星1988年发射,与美国相比相差28年。2002年中国遥感卫星辐射校正场投入运行,使中国遥感卫星辐射校正技术与美国相比仅有10年的差距。现在,中国卫星遥感技术在追赶欧美的同时,部分载荷在轨指标水平上已经与美国和欧洲同类仪器相当。与欧洲美国站在同一个起跑线上,共同思考如何发展新一代空间遥感技术,彻底解决遥感卫星高精度长期稳定观测的问题,满足全球气候变化研究的新需求。

按照“统筹规划,分步实施”的原则,“十二五”国家863计划和“十三五”重点研发计划持续支持空间辐射测量基准技术研究,突破了星载超高精度可见光和红外辐射源研制关键技术,预计“十四五”中期可以突破可见光自校准、电替代绝对辐射测量以及星上相变点黑体定标辐射基准载荷集成技术,完成可见光—红外谱段的辐射基准载荷原理样机研制,实现性能指标的全面验证。

中国空间辐射测量基准卫星计划与美国CLARREO和欧洲TRUTHS计划并驾齐驱。在国家

科技计划以及其他专项计划的支持下, 工作进展顺利。中国有望发射国际首颗空间辐射测量基准试验卫星, 在此基础上, 建立全新的空间辐射测量基准技术体系, 先于欧美实现辐射观测的星上SI溯源, 降低遥感产品的不确定性, 显著提升在轨遥感卫星辐射测量精度。这将成为中国从遥感卫星大国迈向遥感卫星强国的标志。

参考文献 (References)

- Fox N, Green P, Brindley H, Russell J, Smith D, Lobb D, Cutter M and Barnes A. 2014. Traceable radiometry underpinning terrestrial and heliostudies (TRUTHS): a benchmark mission for climate//Proceedings of the SPIE 10563, International Conference on Space Optics. Tenerife: SPIE: 1056325 [DOI: 10.1117/12.2304220]
- Fox N P, Aiken J, Barnett J J, Briottet X, Carvell R, Frohlich C, Groom S B, Hagolle O, Haigh J D, Kieffer H H, Lean J, Pollock D B, Quinn T, Sandford M C W, Schaepman M, Shine K P, Schmutz W K, Teillet P M, Thome K J, Verstraete M M and Zalewski E. 2003. Traceable Radiometry Underpinning Terrestrial- and Heliostudies (TRUTHS). *Advances in Space Research*, 32(11): 2253-2261 [DOI: 10.1016/S0273-1177(03)90551-5]
- Gao D Y, Hu Y B, Liu Y, Guo Y Y, Xia M P, Li J J and Zheng X B. 2016. Photoelectric detection efficiency calibration of double channel self-calibration radiation reference source. *Acta Optica Sinica*, 36(11): 1130001 (高冬阳, 胡友勃, 刘岩, 郭园园, 夏茂鹏, 李健军, 郑小兵. 2016. 双通道自校准光谱辐射源光电探测效率的定标. *光学学报*, 36(11): 1130001) [DOI: 10.3788/AOS201636.1130001]
- Hao X P, Sun J P, Gong L Y, Song J, Gu J M and Ding L. 2018. Research on H500-type high-precision vacuum blackbody as a calibration standard for infrared remote sensing. *International Journal of Thermophysics*, 39(4): 51 [DOI: 10.1007/s10765-018-2371-6]
- Hao X P, Sun J P, Xu C Y, Wen P, Song J, Xu M, Gong L Y, Ding L and Liu Z L. 2017. Miniature fixed points as temperature standards for *in situ* calibration of temperature sensors. *International Journal of Thermophysics*, 38(6): 90 [DOI: 10.1007/s10765-017-2223-9]
- Hu Y B, Li J J, Gao D Y and Zheng X B. 2020. Absolute radiance measurement based on correlated photons calibration. *The European Physical Journal D*, 74(1): 8 [DOI: 10.1140/epjd/e2019-100294-7]
- IPCC. 2001. Climate Change 2001: the Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press: 881
- IPCC. 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC: 151
- Lu N M and Gu S Y. 2016. Review and prospect on the development of meteorological satellites. *Journal of Remote Sensing*, 20(5): 832-841 (卢乃锰, 谷松岩. 2016. 气象卫星发展回顾与展望. *遥感学报*, 20(5): 832-841) [DOI: 10.11834/jrs20166194]
- Murphy J M, Sexton D M H, Barnett D N, Jones G S, Webb M J, Collins M and Stainforth D A. 2004. Quantification of modelling uncertainties in a large ensemble of climate change simulations. *Nature*, 430(7001): 768-772 [DOI: 10.1038/nature02771]
- Ohring G, Tansock J, Emery W, Butler J, Flynn L, Weng F Z, Germain K S, Wielicki B, Cao C Y, Goldberg M, Xiong J, Fraser G, Kunkel D, Winker D, Miller L, Ungar S, Tobin D, Anderson J G, Pollock D, Shipley S, Thurgood A, Kopp G, Ardanuy P and Stone T. 2007. Achieving satellite instrument calibration for climate change. *Transactions American Geophysical Union*, 88(11): 136 [DOI: 10.1029/2007EO110015]
- Ohring G, Wielicki B, Spencer R, Emery B and Datla R (eds), 2004, Satellite Instrument Calibration for Measuring Global Climate Change, Report of a Workshop, NIST Publication NISTIR 7047, 101 pp.
- Song B Q, Ye X, Yang D J, Jiang M and Fang W. 2015. Precise measurement of voltages in space cryogenic radiation temperature system. *Editorial Office of Optics and Precision Engineering*, 23(7): 1903-1910 (宋宝奇, 叶新, 杨东军, 姜明, 方伟. 2015. 空间低温辐射计中的精密电压测量系统. *光学精密工程*, 23(7): 1903-1910) [DOI: 10.3788/OPE.20152307.1903]
- Song J, Hao X P, Yuan Z D, Liu Z L, Xu M and Ding L. 2015. Blackbody source emissivity measurement method based on controlling surroundings radiation. *Chinese Journal of Lasers*, 42(9): 0908005 (宋健, 郝小鹏, 原遵东, 刘曾林, 许敏, 丁雷. 2015. 基于控制环境辐射的黑体辐射源发射率测量方法研究. *中国激光*, 42(9): 0908005) [DOI: 10.3788/LOP42.0908005]
- Tang Q, Li J J, Li C, Zhai W C, Hu Y B and Zheng X B. 2019. Optomechanical design of self-calibration Radiometric reference source prototype based on spontaneous parametric down-conversion. *Acta Photonica Sinica*, 48(2): 0222002 (汤琪, 李健军, 李琛, 翟文超, 胡友勃, 郑小兵. 2019. 基于参量下转换自校准辐射基准源原理样机的光机设计. *光子学报*, 48(2): 0222002) [DOI: 10.3788/gzxb20194802.0222002]
- Trenberth K E and Fasullo J T. 2010. Tracking Earth's energy. *Science*, 328(5976): 316-317 [DOI: 10.1126/science.1187272]
- Wang Y P, Hu X Q, Wang H R, Ye X and Fang W. 2015. Standard transfer chain for radiometric calibration of optical sensing instruments with traceability in solar reflective bands. *Editorial Office of Optics and Precision Engineering*, 23(7): 1807-1812 (王玉鹏, 胡秀清, 王红睿, 叶新, 方伟. 2015. 可在轨溯源的太阳反射波段光学遥感仪器辐射定标基准传递链路. *光学精密工程*, 23(7): 1807-1812) [DOI: 10.3788/OPE.20152307.1807]
- Wielicki B A, Young D F, Mlynarczyk M G, Thome K J, Leroy S, Corliss J, Anderson J G, Ao C O, Bantges R, Best F, Bowman K, Brindley H, Butler J J, Collins W, Dykema J A, Doelling D R, Feldman D R, Fox N, Huang X, Holz R, Huang Y, Jin Z, Jennings D, Johnson D G, Jucks K, Kato S, Kirk-Davidoff D B, Knuteson R, Kopp G, Kratz D P, Liu X, Lukashin C, Mannucci A J, Phojanamongkolkij N, Pilewskie P, Ramaswamy V, Revercomb H,

- Rice J, Roberts Y, Roithmayr C M, Rose F, Sandford S, Shirley E L, Smith W L, Soden B, Speth P W, Sun W, Taylor P C, Tobin D and Xiong X. 2013. Achieving climate change absolute accuracy in orbit. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(10): 1519-1539 [DOI: 10.1175/BAMS-D-12-00149.1]
- Wu D, Wang K, Ye X, Wang Y P and Fang W. 2019. Space cryogenic absolute radiometer. *Chinese Journal of Luminescence*, 40(8): 1015-1021 (吴铎, 王凯, 叶新, 王玉鹏, 方伟. 2019. 空间低温绝对辐射计研究. *发光学报*, 40(8): 1015-1021)
- Xia M P, Li J J, Hu Y B, Sheng W Y, Gao D Y, Pang W W and Zheng X B. 2015. Spectral properties of entangled photon pairs generated via quasi-phased-matched spontaneous parametric down-conversion. *Chinese Optics Letters*, 13(11): 113001
- Ye X, Yi X L, Fang W, Wang K, Luo Y, Xia Z W and Wang Y P. 2018. Design and investigation of absolute radiance calibration primary radiometer. *IET Science, Measurement and Technology*, 12(8): 994-1000 [DOI: 10.1049/iet-smt.2018.5127]
- Yi X L, Fang W, Li Y F, Ye X and Wang Y P. 2016. New calibration method of solar irradiance absolute radiometer. *Infrared and Laser Engineering*, 45(9): 0917001 (衣小龙, 方伟, 李叶飞, 叶新, 王玉鹏. 2016. 太阳辐照度绝对辐射计的定标新方法. *红外与激光工程*, 45(9): 0917001) [DOI: 10.3788/IRLA201645.0917001]

Introduction of the radiometric benchmark satellite being developed in China for remote sensing

LU Naimeng¹, DING Lei², ZHENG Xiaobing³, YE Xin⁴, LI Chuanrong⁵, LYU Daren⁶, ZHANG Peng¹, HU Xiuqing¹, ZHOU Chenghu⁷, YOU Zheng⁸, FANG Jiancheng⁹, GONG Jianya¹⁰, JIANG Xingwei¹¹, LI Jianjun³, MA Lingling⁵, XU Na¹

1. National Meteorological Satellite Center, Beijing 100081, China;
2. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
3. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
4. Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
5. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;
6. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;
7. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
8. Tsinghua University, Beijing 100084, China;
9. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;
10. Wuhan University, Wuhan 430000, China;
11. National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China

Abstract: In the demand of the quantitative use of satellite data, the accuracy of instrument calibration improved significantly because of the efforts of major satellite operators. However after decades of development, the current premium uncertainty of radiometric calibration of remote sensing satellites stays at 2% in visible, 0.5 k in infrared spectrum, due to the design restrains of on-board calibration devices, and also the theoretical limitation of vicarious techniques. Since the beginning of 21 st century, global climate change has become the common concern of international community. Global climate research placed an unprecedented need on the accuracy of radiometric calibration for remote sensing satellites. According to ASIC3 report, in order to detect climate change signals effectively and make accurate predictions, the acceptable uncertainty of radiometric calibration is 0.3% for solar reflective spectrum, 0.1 k for infrared spectrum, and 0.01% for total solar irradiance. Living up to the challenge, EU and US proposed TRUTHS and CLARREO plans, with the common goal of launching benchmark satellites. The benchmark satellites, with their extreme accuracy, designed to monitor climate change, could also calibrate other remote sensing satellites in orbit, raising the observation accuracy of the whole global satellite system to a new level. Meanwhile, China also advocated the concept of space radiometric observation benchmark system and launched two five-years projects to develop cutting-edge techniques such as phase-change warm load blackbody and on-orbit cryogenic absolute radiometer etc., aiming at establishing the absolute radiometric reference in space. With the support of these projects, the spaceborne SI-traceable calibrators for Reflective Solar Bands (RSBs) and Thermal Emissive Bands (TEBs) is developing. In the middle of the next five years, we can complete the development of the principle prototype of the radiometric benchmark instruments, and then achieve a comprehensive performance verification. Comparing to its counterparts, China could more likely become the first country to launch radiometric benchmark satellite, which leads remote sensing satellites to a SI-traceable era.

Key words: space radiometric measurement, benchmark, satellite, traceable, technique

Supported by National Key Research and Development Program of China (No.2018YFB0504700, 2018YFB0504600, 2018YFB0504900, 2018YFB0504800)