

基于月基观测几何的地球辐射能量模拟研究

黄靖^{1,2}, 郭华东^{1,2}, 刘广¹, 邓玉³

(1. 中国科学院 空天信息创新研究院, 北京 100094; 2. 中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100049;
3. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871)

摘要: 月基平台以其整体性、多角度、长周期等特点, 可望实现对地球整体辐射收支进行精确估算。为了评估月基平台对地球辐射能量的观测能力, 建立了基于地月几何关系的一一映射算法, 使用戈达德地球观测系统模型第五版(Goddard Earth Observation System model version 5, GEOS-5)数据作为模型输入, 用以模拟月基视场地球向外辐射能量, 从而形成对月基观测的地球辐射能量规律性认识。结果表明: 月基传感器可以观测包括极区在内约178°跨度的经纬度区域; 月球变轨道倾角将为地球高纬度地区提供更好的观测条件, 极区观测高度角可达到60°。该模拟方法可以为观测地球向外辐射提供有效支持, 为后续研究打下坚实的基础。

关键词: 月基对地观测; 地球向外辐射; 模拟研究; 几何模型

中图分类号: V11

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2022)03-0278-07

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2022.20210078

引用格式: 黄靖, 郭华东, 刘广, 等. 基于月基观测几何的地球辐射能量模拟研究[J]. 深空探测学报(中英文), 2022, 9(3): 278-284.

Reference format: HUANG J, GUO H D, LIU G, et al. Geometric simulation of Earth's outgoing radiation viewed from a Moon-based platform[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2022, 9(3): 278-284.

引言

地球系统科学强调地球各圈层(包括大气圈、水圈、生物圈等)之间的动态作用^[1-3]。作为地球系统科学的重要组成部分之一, 由太阳入射能量和地球出射能量组成的地球辐射收支可以很好地回答地球是在释放能量还是在积累能量这一问题。而获取全球尺度无偏测量绝对校准地球辐射能量数据是回答这一问题的关键。

目前地球辐射收支的直接探测方式主要是通过星载平台观测。最初是在“雨云号”(Nimbus)6和7上布设宽视场和窄视场的地球辐射收支仪等设备测量地球大气系统的能量收支^[4]。在空间分辨率方面, 宽视场辐射计的视场大小为几千km, 而窄视场辐射计可以获得10~100 km的空间分辨率。但是窄视场辐射计无法直接测量辐射通量, 需要借助角度分布模型将测量到的辐射亮度转化为辐射通量, 从而获得各种地球辐射收支产品^[5]。20世纪80年代, 美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)等研制的新一代地球辐射收支实验仪器(Earth Radiation Budget Experiment, ERBE)搭载在地球辐射收支卫星、NOAA 9、NOAA 10上来观测地球

辐射收支, 每颗卫星都通过机载扫描仪和辐射计分别测量了长波和短波辐射^[6-7]。1997年以来, 云和地球辐射能量系统(Clouds and the Earth's Radiant Energy System, CERES)为地球辐射提供了新的数据。每一台CERES都设计有短波波段(0.2~5 μm)和总波段(0.2~100 μm), 长波波段的辐射由总波段减去短波波段得到^[8]。为了得到高精度测量的数据, 仪器在地面和飞行中都进行了校准^[9-10]。与早期测量地球辐射能量的仪器相比, CERES提供了更高的空间分辨率、精度和长时间序列的数据^[5,8,11]。在中国, 测量地球向外辐射能量也是“风云三号”的主要任务之一, 其上携带的仪器可以观测地球反射的太阳短波辐射和地球发射的长波辐射, 开辟了极轨气象卫星观测地球向外辐射能量之路^[12]。2015年, 深空气候观测台(Deep Space Climate Observatory, DSCOVR)发射, 它位于距离地球150万km的日地L1拉格朗日点的Lissajous轨道上, 可以连续观测到地球受太阳光照面, 提供地球臭氧、云层、植被和气候数据, 为观测地球提供了全新的视场^[13-14], 其上布设了国家标准与技术研究所辐射计(National Institute of Standards and Technology

Advanced Radiometer, NISTAR)和地球多色成像仪(Earth Polychromatic Imaging Camera, EPIC),其中NISTAR将地球视为一个像素,可测量太阳光照面辐照度,帮助量化地球辐射收支^[3]。纵观地球向外辐射能量探测历程,获得更高精度的测量数据是其目标所在。为了尽可能实现这一目标,一种策略是减少传感器校准误差^[15],另一种是尽可能实现全球观测,如利用卫星星座进行协同观测^[16-17]。

月球是地球的一颗天然卫星,相比其他人造卫星,月球有许多独特之处^[1]。首先,地月之间具有“潮汐锁定”效应加之地月之间距离很远,在月球上布设传感器可以看到几乎整个地球半球,获取到观测范围内地球系统的关键参数。其次,月球表面有充足的空间可布设传感器,科学家们已经研究了月球表面环境对于传感器的影响以及在何种位置布设传感器最适合对地观测^[18-19]。另外,因月球轨道的特殊性,可使得月球以更多的角度观测地球。这些独特性使得月球成为观测地球辐射能量绝佳的平台。

月基观测地球辐射收支具有一些特性:①其轨道高度达到38万km,月基传感器可以将地球当作类点状辐射源,对几乎整个地球半球的向外辐射能量进行空间一致、角度连续的整体观测,由此,月基平台可以满足其尽可能小的时空采样误差的需求^[1];②变化的月球赤纬角使得在月基对地观测具备观测角度可变的特点,而变化的“日-地-月”位置关系将会给予传感器视场中地物的多样观测角度组合,由此,月基平台可以满足其多样化角度采样需求^[20];③月面具有广袤的传感器布设空间,寿命也远超于普通人造卫星,因此月基传感器能够提供长期、一致的时间序列观测数据,这将有利于揭示地球向外辐射能量的长期变化规律^[1]。

以往主要的卫星平台都未提供完整的地球半球同步视图。低轨道卫星平台每隔几h对地球采样一次,采样范围为2 000~3 000 km宽的条带状^[8]。通过把条带拼接在一起,可实现全球覆盖。地球同步轨道卫星的视场以地球赤道为中心,受地球曲率的影响,南北纬70°以上的区域是无法被其观测到的^[21]。然而,全球尺度视角是相当重要的,它可观测到地球辐射收支随着大气层顶云分布的变化。目前采用的全球观测是将低轨和同步轨道卫星数据结合起来,例如,Doelling等^[22-23]将CERES和GEOs数据产品结合起来获取全球数据。月基平台可实现全球观测,从而填补现有平台的不足,目前最先进的探测地球向外辐射的传感器是搭载在DSCOVR上的NISTAR,它的观测精度为0.1%~1.5%,视场角1°,这类传感器能够满足月基对地观测需求。

为了真正研究月球平台观测地球向外辐射的几何优势,本文进行了模拟研究,生成了地球向外辐射的图像,探索了月球平台的观测能力。

1 地月几何关系及坐标系转换

本节介绍了从月基平台观测地球向外辐射的模拟方法。主要基于地球上地物与月基平台的相对运动,首先介绍了地月之间的几何关系。模拟了大气层顶地面100 km高度地球向外辐射,地球地形可以忽略。由于地月之间距离较大,月基平台的高度所引起的与距离有关的地球辐射能量的模拟误差同样也可以忽略。

1.1 几何关系描述

图1给出了地月之间的几何关系示意图。可看出,从月球可一次观测整个面向月球的地球半球,并且在一个轨道周期可观测到地球全部区域。另外,地球赤道与月球平面轨道夹角为18.3°~28.3°,能够观测整个极地区域。传感器适合观测整个地球的视场是1.79°~1.95°。

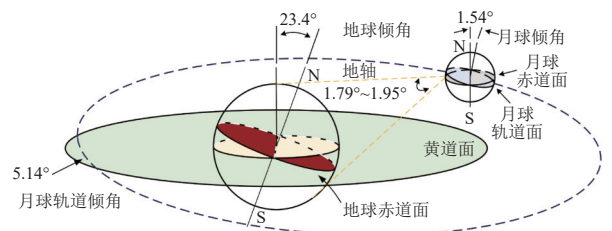


图1 地月几何关系示意图

Fig. 1 Geometry relationship between Earth and Moon

从月球上对地球观测可实现空间连续和时间一致性观测,这种时间一致和空间连续性的大尺度观测和反演无疑为理解地球系统科学提供了新的材料,有助于补充以后的对地观测数据。此外,与星载平台不同的是,因月球表面空间广阔,可选择不同位置布设传感器,随之带来的对地球的能见度、视线向量和观测时间也有所不同。因此,月基平台布设位置需要进行精确计算。

1.2 模拟方法

基于地月几何关系,提出了涉及一系列坐标转换的仿真方法。它的核心是将在地球上在观测视野中的地物位置与图像坐标对应起来,这个过程可分为两步:①通过国际地球参考系(International Terrestrial Reference System, ITRS)到月表站心参考系(lunar topocentric system, LT)的转换,将地球上点的位置转换到LT坐标系中,LT坐标系原点位于月基平台,z轴指向天顶方向,n轴指向月球北极方向,此外传感

器视线向量和在此坐标系下的地球上的点都可用高度角和方位角表示;②一一映射过程本质上是描述传感器视线向量与地面点的几何关系,定义一个图像坐标系,原点是视线向量穿过的点, x 轴平行于当地地平线, y 轴是高度角变化方向。

总之,本文提出的仿真方法是利用月基平台与地面点的几何关系来模拟月基传感器获得的图像,从而对月基对地向外辐射模拟进行更详细的几何分析。

1.3 地面点坐标系转换

地面上的点经历了一系列坐标转换,首先位于ITRS坐标系下,为了将其与月基平台联系起来,需采用美国喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)发展的行星星历,将地面点转化到惯性坐标系下,及地心天球参考系(Geocentric Celestial Reference System, GCRS),之后利用月球天平动欧拉角将其转化到月心天球参考系(Selenocentric Celestial Reference System, SCRS)。此时,地面点已经可以表达为在月心参考系下月球表面某一位置坐标。转换公式如下

$$\begin{bmatrix} x_L \\ y_L \\ z_L \end{bmatrix} = \mathbf{MCL}(\mathbf{PNR}_z\mathbf{WB} \begin{bmatrix} x_T \\ y_T \\ z_T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_M \\ y_M \\ z_M \end{bmatrix}) \quad (1)$$

其中: $(x_T, y_T, z_T)^T$ 是地面点在ITRS坐标系下的表达; $(x_L, y_L, z_L)^T$ 是其在LT坐标系下的表达; $(x_M, y_M, z_M)^T$ 是月球在GCRS下的表达; \mathbf{M} 为月心坐标系到地平坐标系的旋转矩阵; \mathbf{C} 和 \mathbf{L} 是月球姿态矩阵; \mathbf{P} , \mathbf{N} , \mathbf{R}_z , \mathbf{W} , \mathbf{B} 是地球方向的变换矩阵。因此,地面点在月心坐标系下可以表示为另一种形式

$$\begin{cases} \lambda_L = \arctan\left(\frac{y_L}{x_L}\right) \\ \varphi_L = \frac{z_L}{\sqrt{x_L^2 + y_L^2 + z_L^2}} \end{cases} \quad (2)$$

1.4 一一映射过程

为实现地面点到图像点的一一映射,需建立图像坐标系。如图2所示,图像坐标系是场景映射到传感器镜头上的部分,假设地球上的点到传感器观测视场这个过程经历了日晷投影,投影中心就是视线向量的方向,将视线向量 \mathbf{l} 用高度角和方位角表示成 (λ_c, φ_c) ,从图2中可以看出,点的位置向量记为 \mathbf{p} ,其坐标为 (λ_L, φ_L) 。

当映射到图像平面上时,图像坐标系上的位置取决于月基传感器镜头和投影中心之间的距离以及视线向量于地面上的点位置向量之间的夹角。因此,月心坐标系下的坐标到图像坐标系下的转换可以表示为

$$\begin{cases} x = \frac{\cos(\varphi_L)\sin(\lambda_L - \lambda_c)}{\sin(\varphi_c)\sin(\varphi_L) + \cos(\varphi_L)\cos(\varphi_c)\cos(\lambda_L - \lambda_c)} \\ y = \frac{\sin(\varphi_c)\sin(\varphi_L) - \cos(\varphi_L)\cos(\varphi_c)\cos(\lambda_L - \lambda_c)}{\sin(\varphi_c)\sin(\varphi_L) + \cos(\varphi_L)\cos(\varphi_c)\cos(\lambda_L - \lambda_c)} \end{cases} \quad (3)$$

其中, (x, y) 代表图像坐标系中的坐标。

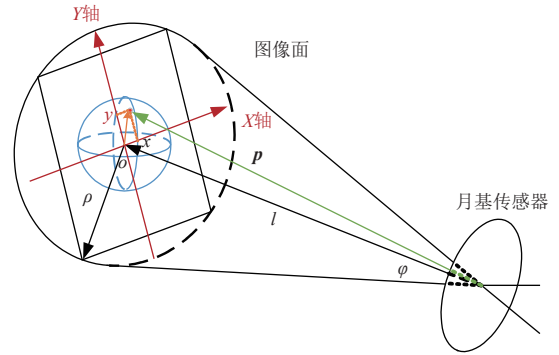


图2 映射关系示意图

Fig. 2 Diagram of mapping relationship

2 月基地球向外辐射能量模拟

本节建立了实验模拟月基传感器观测到的地球向外辐射能量。使用戈达德地球观测系统模型第五版(Goddard Earth Observing System model version 5, GEOS-5)数据集作为模型的输入。其空间分辨率为 0.25° ,时间分辨率可达每小时。在 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 格网中,观测天顶角变化非常小。因此,本文将 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 格网数据集成为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。空间聚集使用气候数据存储工具箱完成。

2.1 月基对地观测空间覆盖特性

本文要模拟的参数是GEOS-5得到的地球向外长波和短波辐射。在此之前,作为衡量观测性能的重要参数,计算月基对地观测空间覆盖是模拟的基础,而月球轨道的特殊性导致了其空间覆盖多样性。利用仿真方法,可得到月球平台观测范围内的覆盖性能,计算流程如图3所示。图4是月基视场观测地球情景,由于地月距离较远,因此观测视场几乎为地球整个半球。从4(b)中可以看出,纬度的覆盖范围为 $71^\circ\text{N} \sim 90^\circ\text{S}$,可以观测到南极和南极洲。当星下点纬度在 28°N 时,如图4(a)所示,月基平台可观测到北极和整个北极地区。从理论上讲,当星下点的纬度大于 23°N 或 23°S 时,可实现整个极圈区域的观测。至于经向覆盖性能,图4(c)表明,一般来说,月基平台可覆盖地球大范围的经度,大约为 $178^\circ\text{E} \sim 178^\circ\text{W}$ 。在一天内,它可覆盖地球的所有经度。由于目前中国探月工程四期相关任务计划在月球南极建立月球科研站,王海荣

等考虑月基传感器布设在月球南极的情况, 从观测时间窗口及观测时长这两方面分析了月基对地观测, 发现月基传感器此时可对地球进行约一半时间的观测且最长观测时长可达150多d。因此, 当月基传感器布设在南极时, 也可对地球进行较好的观测。

子, 通过整合每小时模拟图像来估算每日空间覆盖。结果表明, 由于月球相对于地球的纬向速率约为每天 3° , 观测范围的纬向速率较慢, 而经向速度恒定, 因此, 当星下点移动到地球赤道附近时, 月基平台可在一天内观测几乎整个地球, 包括北半球和南半球的极区。当星下点移动到南北纬 15° 以上时, 情况完全不同, 月基平台不能在一天观测整个地球, 最低的日覆盖面积约为地球的88.8%, 取决于星下点的纬度。然而, 从一个或更长的轨道周期来看, 地球上的所有区域都可以观测到。

中国探月工程四期相关任务计划在月球南极建立月球科研站, 因此在可预见的未来一段时期内, 该月基传感器最可能布设的位置是月球南极附近, 传感器位于月球南极地区对地球南北极进行观测, 观测时间窗口和观测时长如图5及图6:

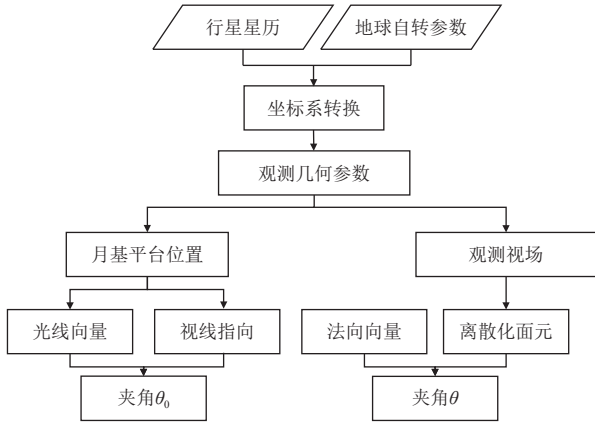
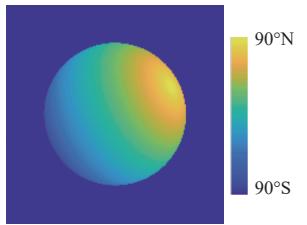
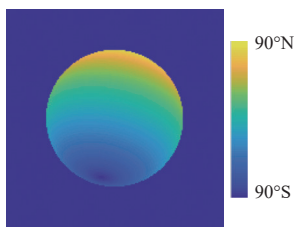


图 3 月基平台观测范围覆盖性能流程图

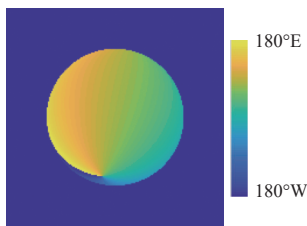
Fig. 3 Flow chart of Moon-based Earth observational coverage performance



(a) 包含整个北极圈情况下的纬度分布



(b) 包含整个南极圈情况下的纬度分布



(c) 经度分布

图 4 月基观测地球视场图

Fig. 4 Earth spatial coverage from a Moon-based platform

另一个表示月基覆盖特征的参数是每日空间覆盖, 星下点位置是月基平台每日覆盖性能的关键因

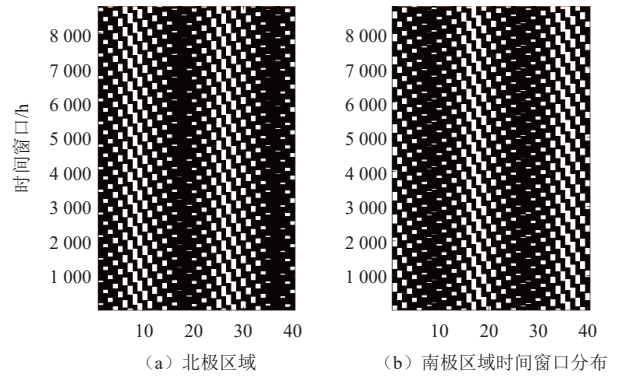


图 5 传感器位于月球南极观测地球^[24]

Fig. 5 Time window of North Pole and South Pole of the Earth when the Moon-based sensor is located at the South Pole of the Moon^[24]

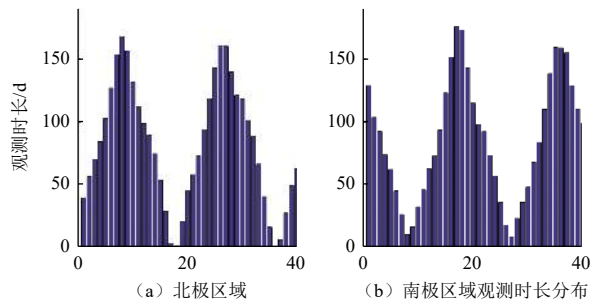


图 6 传感器位于月球南极观测地球^[24]

Fig. 6 Observation duration of North Pole and South Pole of the Earth when the Moon-based sensor is located at the South Pole of the Moon^[24]

图5中黑色代表不可见, 白色代表可见。从图5中可以看出, 当月基传感器布设在月球南极时, 也可以对地球进行约一半时间的观测, 图6为观测时长统计, 可发现最长的观测时长可达150多d。因此, 当月基传感器布设在南极时, 也可以对地球进行较好的观测。

2.2 月基对地观测角度特性

由于地月之间距离较远并且月球轨道倾角不断变化, 因此月基对地观测平台在观测角度上存在特殊性。同样, 地月距离使得月基平台在角度分布方面不同于传统星载平台。为了对此进行研究, 模拟了观测视场瞬时角度分布, 对地观测角度用观测天顶角和观测方位角表示, 如图7 (a) 所示, 可以看出其呈现同心圆状分布, 假设月基传感器直视星下点, 圆心为星下点所在位置, 其观测天顶角为 0° , 其值沿同心圆半径逐渐增大, 在观测视场边缘区域, 观测天顶角达到 90° 。观测方位角的分布如图7 (b) 所示, 其值范围为 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$, 值得注意的是, 图中有一条很明显的线, 为方位角 0° 与 360° 的分界线, 与观测高度角不同的是, 观测方位角 0° 与 360° 是完全重合的。

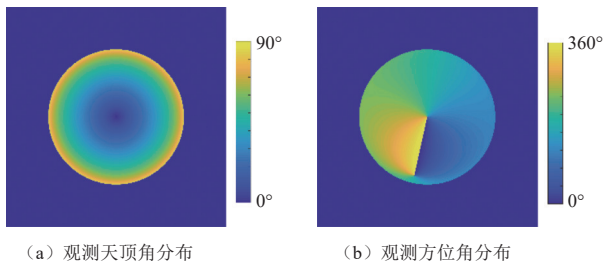


图7 观测天顶角分布及观测方位角分布
Fig. 7 Distribution of zenith angle and azimuth angle

月球轨道倾角的变化会影响星下点的纬度从而影响观测视场边缘区域在纬向上的观测角度。观测方位角主要取决于图像中地球方位, 受轨道倾角的影响不大, 而星下点的位置决定了观测视场内地球各点的观测天顶角。图8分别为星下点纬度 28°N 和 28°S 时观测天顶角的分布, 这是两种极端的情况。由图中可见, 随着经纬度的改变, 观测视中的观测天顶角都会发生改变。尤其这两种特殊情况下, 星下点处天顶角值最小, 随着与星下点距离的增加, 观测天顶角逐渐增大, 由于地月之间距离较大, 其变化速率并不快, 在北纬 70° 的区域, 观测天顶角仍处于一直相对低的数值, 大约为 45° , 而在极区, 观测天顶角值达到 60° 。

2.3 地球向外辐射能量月基模拟

图9显示了月基视场下地球向外辐射随着时间的变化, 分别为长波 (参见图8 (a)) 和短波 (参见图8 (b)) 辐射。需要说明的是, 图中每个时刻对应的辐射数值都是通过模拟图像中地球各格网的平均值计算的。由于GEOS-5数据是由经纬度格网组成的, 因此使用了观测方向加权。从图中可以清楚的看出, 不管是长波还是短波都呈现出明显的周期性。根据月基观测几何可

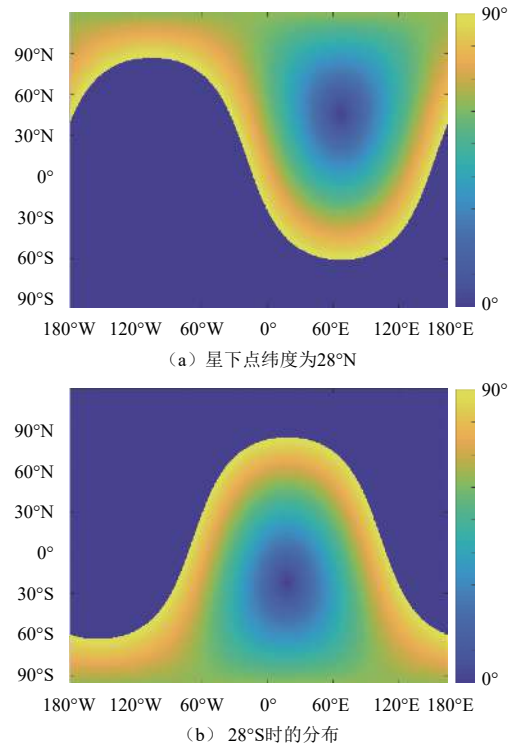


图8 观测天顶角在星下点纬度为 28°N 和 28°S 时的分布
Fig. 8 Distribution of zenith angle when the nadir point is at 28°N and 28°S

知, 星下点位置决定了观测视场的范围, 而观测范围分量变化是周期变化的来源。如图9 (b) 所示, 月基传感器捕捉到的短波辐射随着地球面向月球半球被太阳照射部分的比例变化而变化。当地球大部分圆盘都不可见时, 短波辐射数值较低, 因此短波随时间变化有着较大的变化。尽管有着这些特征, 仍不难看出其

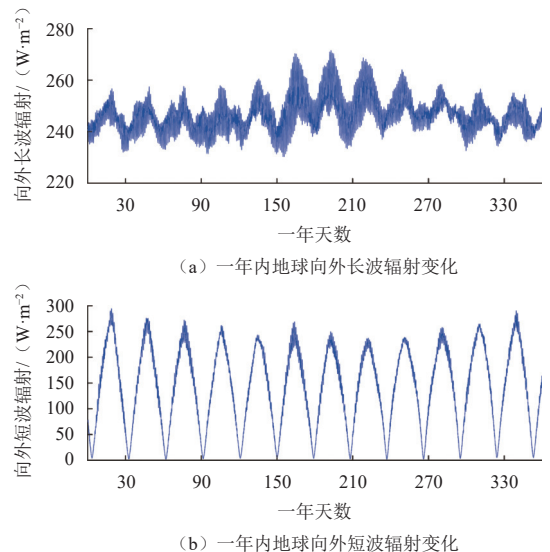


图9 月基观测一年内地球向外长波和短波辐射变化
Fig. 9 Variations of Earth outgoing longwave and shortwave radiation from a Moon-based platform in one year

存在小的周期。短波辐射的日变化部分是由地物的变化引起的。长波辐射的范围为 $230\sim 270\text{ W/m}^2$,符合日周期的变化规律,也是由于地球旋转导致的地物变化引起的。陆地和海洋在观测视场中比例的改变会造成较大的日变化。此外,随着星下点的改变,南半球或北半球高纬度地区逐渐出现在观测视野中。因此,长波辐射呈现出轨道周期性和季节变化。

3 结 论

本文基于月基平台观测到的地面点位置与图像坐标点的一一映射关系,模拟了月基观测地球向外辐射能量。通过地月之间的几何关系和坐标定义,将地球上的点与月基平台统一到相同坐标系下,然后给定传感器指向方向参数(观测高度角和方位角),建立一一映射数学关系。月基平台可以观测到地球大部分区域,一天内地球上至少88.8%的区域可被观测到,在一个轨道周期内,地球上所有区域都可被观测到。月球轨道变倾角使得地球的整个极区都可被月球观测到。为了理解观测视野内被观测点的状态,对观测角度分布进行了分析,结果显示:星下点区域有最小的观测高度角,中高纬度地区观测高度角数值更高,在南/北极地区可以达到 60° 。基于此模拟算法以GOES-5数据为输入,模拟出地球向外辐射长波及短波能量图像,探寻其随时间变化规律。

本文的模拟研究为月基传感器观测到的地球向外辐射提供了一个直观的结果,该模拟结果有助于研究地球向外辐射及其几何关系。目前最先进的探测地球向外辐射的传感器NISTAR其观测精度在 $0.1\%\sim 1.5\%$,随波段变化,现有技术水平能够满足探测需求。总之,与现有星载平台相比,月基平台在观测地球向外辐射方面有独特的几何特征,使其可从观测几何角度对现有对地观测进行补充。一些重要的问题例如校准在本文中未涉及,将在未来进行详尽研究。

参 考 文 献

- [1] GUO H D, LIU G, DING Y X. Moon-based Earth observation: scientific concept and potential applications[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2018, 11(6): 546-557.
- [2] CORNELL S I, COLIN P, JOANNA H, et al. Understanding the Earth system: global change science for application[M]. UK: Cambridge University Press, 2012.
- [3] LORENTZ S R, BRISCOE J S, SMITH A W. NISTAR: continuous total and short wave measurements of the full sunlit Earth disk from L1 [C]//AGU Fall Meeting. [S. l.]: AGU, 2016.
- [4] HOUSE F B, ARNOLD G, GARRY E H, et al. History of satellite missions and measurements of the Earth radiation budget (1957-1984) [J]. *Geophysics*, 1986, 24(2): 357-377.
- [5] JACOBOWITZ H, SOULE H V, KYLE H L, et al. The Earth radiation budget (Erb) experiment - an overview[J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 1984, 89(Nd4): 5021-5038.
- [6] SHRESTHA A K, KATO S, WONG T, et al. Spectral unfiltering of ERBE WFOV nonscanner shortwave observations and revisiting its radiation dataset from 1985 to 1998[C]//International Radiation Symposium. Auckland, New Zealand: AIP Publishing LLC, 2017.
- [7] GOLOVKO V. The Earth radiation budget, 20 years later (1985-2005) [M]. Springer: Berlin Heidelberg, 2009.
- [8] WIELICKI B A, BRUCE R B, EDWIN F H, et al. Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES): an Earth observing system experiment[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 36(4): 1127-1141.
- [9] MATTHEWS G. In-flight spectral characterization and calibration stability estimates for the Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES)[J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2008, 26(9): 1-8.
- [10] FOLKMAN M, JARECKE P, HEDMAN T, et al. Calibration of a shortwave reference standard by transfer from a blackbody standard using a cryogenic active cavity radiometer[C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium, [S. l.]: IGARSS, 1994.
- [11] KATO S, NORMAN G L, DAVID A R, et al. Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) data products for climate research[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2015, 93(6): 597-612.
- [12] QIU H, HU L, ZHANG Y, et al. Absolute radiometric calibration of Earth radiation measurement on FY-3B and its comparison with CERES/aqua data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2012, 50(12): 4965-4974.
- [13] BURT J, SMITH B. Deep space climate observatory: the DSCOVR mission[C]//2012 Ieee Aerospace Conference. [S. l.]: IEEE, 2012.
- [14] VALERO F. Keeping the DSCOVR mission alive[J]. *Science*, 2006, 311(5762): 775-776.
- [15] WIELICKI B A, YOUNG D F, MLYNCZAK M G, et al. Achieving climate change absolute accuracy in orbit[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2013, 94(10): 1519-1539.
- [16] GRISTEY J J, CHRISTINE C, ROBERT J G, et al. Determination of global Earth outgoing radiation at high temporal resolution using a theoretical constellation of satellites[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2017, 122(2): 1-9.
- [17] SWARTZ W H, LARS P D, STEVEN R L, et al. The RAVAN CubeSat mission: advancing technologies for climate observation[C]//The Geoscience and Remote Sensing Symposium. [S. l.]: IEEE, 2015.
- [18] SONG Y T, WANG X Q, BI S S, et al. Effects of solar radiation, terrestrial radiation and lunar interior heat flow on surface temperature at the nearside of the Moon: based on numerical calculation and data analysis[J]. *Advances in Space Research*, 2017, 60(5): 938-947.
- [19] JIA Y, ZOU Y. Research on lunar site selection for lunar based Earth observation[J]. *Spacecraft Engineering*, 2016, 25(6): 116-121.
- [20] YE H L, ZHENG W, GUO H, et al. Effects of temporal sampling interval on the Moon-based Earth observation geometry[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, 99: 1-9.
- [21] HARRIES J E, RUSSELL J E, HANAFIN J A, et al. The geostationary Earth radiation budget project[J]. *Bulletin of the American*

- [Meteorological Society](#), 2005, 86(7): 945-960.
- [22] DOELLING D R, CONOR H, RAJENDRA B, et al. Geostationary visible imager calibration for the CERES SYN1deg edition 4 product[J]. [Remote Sensing](#), 2018, 10(2): 288.
- [23] DOELLING D R, NORMAN G L, DENNIS F K, et al. Geostationary enhanced temporal interpolation for CERES flux products[J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2013, 30(6): 1072-1090.
- [24] WANG H, GUO Q, LI A, et al. Comparative study on the observation duration of the two-polar regions of the Earth from four specific sites on the Moon[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2019(6): 1-14.

作者简介:

黄靖(1996-), 女, 博士生, 主要研究方向: 月基对地观测。

通讯地址: 中国科学院空天信息创新研究院(100094)

电话: (010)82178182

E-mail: huangjing@radi.ac.cn

刘广(1979-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 月基对地观测, 微波遥感对地观测研究。本文通讯作者。

通讯地址: 中国科学院空天信息创新研究院(100094)

电话: (010)82178103

E-mail: liuguang@radi.ac.cn

Geometric Simulation of Earth's Outgoing Radiation Viewed from a Moon-Based Platform

HUANG Jing^{1,2}, GUO Huadong^{1,2}, LIU Guang¹, DENG Yu³

(1. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Space Technology, Beijing 100049, China;

3. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Due to the characteristics of integrity, multi-angle and long period, a Moon-based platform is expected to accurately estimate Earth outgoing radiation. To evaluate this platform's capabilities, this paper established a one-to-one mapping algorithm based on the geometric relationship and used the Goddard Earth Observing System model version 5 (GEOS-5) data as model input to simulate Earth's outgoing radiation viewed from a Moon-based platform, so as to learn about the regularity of Earth outgoing radiation viewed from the Moon-based platform. Results show that a Moon-based platform can cover about 178° both in latitudinal and longitudinal direction in one image, including the polar regions. The changing inclination of the orbit of the Moon gives a better observation condition for high latitude regions, and the viewing zenith angle in polar regions can reach to 60°. These results indicate the simulation method can effectively support the observation of Earth's outgoing radiation observation and lay the foundation for future research.

Keywords: Moon-based Earth observation; Earth outgoing radiation; simulation study; geometric modelling

Highlights:

- A simulation method for Earth outgoing radiation viewed from a Moon-based platform is proposed based on one-to-one mapping method considering observation geometry of the Earth and the Moon.
- Experiments of Earth outgoing longwave and shortwave radiation viewed from a Moon-based sensor in one year are carried out and the regularity is found out according to the characteristics of the lunar orbit.
- The characteristics of spatial coverage and angular distribution are analyzed.
- The simulation method can effectively support the observation of Earth's outgoing radiation and lay the foundation for future research.

[责任编辑: 高莎, 英文审校: 宋利辉]