

月基对地观测图像模拟与应用研究

邓玉^{1,2}, 郭华东^{1,2}, 刘广², 叶罕霖², 黄靖²

(1. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094)

摘要: 针对现有模拟系统只是定性描述月基对地观测图像的问题, 提出了一种基于严格成像模型的月基对地观测图像模拟方法, 建立了像点和物点之间的定量关系, 并将其应用于月基对地观测几何图像和辐射能量图像的模拟中。基于长时间序列的模拟结果, 进一步分析和归纳了月球特有的轨道特性对几何图像以及辐射能量图像各自属性的影响。结果表明: 基于严格成像模型的月基对地观测图像模拟算法具有可行性, 准确地表达了图像特性随着月球轨道特性变化而变化的规律。该方法为月基对地观测图像的应用奠定了基础, 对于后续月基不同类型的传感器的参数设计具有较大的参考意义。

关键词: 月基对地观测平台; 图像模拟; 严格成像模型

中图分类号: V11

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2022)03-0269-09

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2022.20210073

引用格式: 邓玉, 郭华东, 刘广, 等. 月基对地观测图像模拟与应用研究[J]. 深空探测学报(中英文), 2022, 9(3): 269-277.

Reference format: DENG Y, GUO H D, LIU G, et al. Simulation and application of Moon-based Earth observation image[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2022, 9(3): 269-277.

引言

与人造卫星不同, 月基对地观测平台具有独特的特点^[1-2]。首先, 由于潮汐锁定, 搭载在朝向地球的月表上的传感器可以实时监测地球^[3]。由于地球和月球之间的平均距离远达38万km, 因此月基传感器可以获得半球尺度的地球观测影像^[4]。尽管地月距离较远, 但月基对地观测理论上可以实现1 km甚至100 m的空间分辨率, 这足以用于研究大规模地球科学问题^[5]。其次, 月基对地观测平台具有可变的轨道高度和倾角, 它可以提供多角度的全球采样数据, 从而提高全球变化敏感因子的测量精度^[6-10]。最后, 作为地球的天然卫星, 月球提供了广袤的区域, 可以通过安装不同类型的传感器来获取同一时刻不同类型的观测数据, 进行相对校准^[11]。

由于目前月基对地观测研究还处于理论研究阶段, 并没有实际的遥感图像, 因此获取月基对地观测的模拟图像成为研究的重要基础之一。早期学者们主要对月球对地观测的几何模型进行了初步的研究。Pallé和Goode^[12]讨论了在月球上搭载的可见光/热红外传感器参数的设计, 提出月基对地观测传感器可以达

到几十km或更好的空间分辨率, 且覆盖范围将远远大于在轨人造卫星上的传感器。Moccia和Renga^[13]介绍了月基合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)的几何结构, 总结了星载SAR和月基干涉合成孔径雷达的区别。Ye等^[14]建立了月基对地观测几何模型, 提出了3个关键参数, 即通视条件、星下点和视场角, 并将朝向地球的月表划分为4个观测区域, 包括完整观测区域和不完整观测区域。Ren等^[15]定义了用于评估月基地球观测光学覆盖能力的有效覆盖参数, 并分析了地球表面不同位置的每日总可见时间和重复次数。Huang等^[16]考虑了地形对月球平台与地球观测点之间的通视条件的影响, 分析了地球半球观测的时空特征, 并进一步推导出了可视球冠公式, 为精确计算月基对地观测时间提供了支持。Sui等^[17]和Wang等^[18]分别分析了地球北极和南极区域的月基观测特征。然而, 这些早期研究只是针对单个地球观测点对月基观测平台的性能进行评价, 本文通过建立月基对地观测的严格成像模型, 不再针对单个地球观测点, 而是建立像点和物点的定量关系来获取模拟图像。

本文针对月基对地观测图像模拟问题, 提出了基于严格成像模型的图像模拟的新方法。该方法基于星

收稿日期: 2021-08-30 修回日期: 2021-09-22

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFE0202100); 国家自然科学基金资助项目(41590852); 中国航天科技集团钱学森青年创新基金资助项目(Y-KC-JT-QXS-014)

历和地球定向参数(Earth Orientation Parameters, EOP)等数据,准确地建立了像点和地球观测点的数学关系,来解决现有模拟系统只能定性描述月基对地观测影像的问题。在此基础上,本文实现了几何图像和辐射能量图像的模拟,结果表明该模型可以有效实现月基对地观测图像的模拟,具有较强的应用前景。同时,该模型对不同传感器理论上是普适的,因此对于不同传感器的参数设计同样具有借鉴意义。

1 数据及坐标系

1.1 数据

本文主要采用两种数据源,分别是行星历表和EOP。其中行星历表提供了月球、太阳以及地球的轨道位置以及姿态等信息,以便建立日-地-月相对位置关系,而EOP描述了地球在惯性空间中的不规则变化,利用EOP可以实现地球参考框架与地心天球参考框架的转换关系,有利于更准确地获取地球姿态信息。

行星历表主要分成两大类,分别是数值历表和半解析历表。随着观测数据的增加以及观测精度的不断提高,以数值积分为基本方法的精密行星历表成为目前应用最为广泛的星历种类。目前,世界上主要行星历表有美国喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)的DE(Development Ephemeris)系列星历、法国巴黎天文台(Observatoire de Paris)天体力学与历算研究所(Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides, IMCCE)的INPOP(Intégrateur Numérique Planétaire de l'Observatoire de Paris)系列星历以及俄国科学院(Russian Academy of Sciences, RAS)应用天体物理研究所的EPM(Ephemeris of Planets and the Moon)系列星历。其中DE系列星历是世界主流的星历种类之一,包括DE405、DE421以及DE430等。由于DE430基于月球动力学模型,考虑了流体核心与地幔旋转之间的相互作用,可以获取更为精确的月球姿态参数,因此,本文选用DE430来获取日-地-月的相对位置以及姿态。

国际上通常使用的EOP由国际地球自转与参考系统服务组织(International Earth Rotation and Reference Systems Service, IERS)提供,通过对各种空间观测技术如甚长基线干涉测量(Very Long Baseline Interferometry, VLBI)、卫星激光测距(Satellite Laser Ranging, SLR)和全球定位系统(Global Position System, GPS)进行数据综合得到。IERS提供的EOP包括:天极补偿主要用于对岁差/章动模型进行

补偿;(UT1-UTC)用于描述地球自转的不规则性;极移主要用于描述地球自转轴相对于地球本体的旋转。

1.2 坐标系

严格定义各坐标系并实现它们之间的精确转换,是进行图像数据几何定位的关键。不同于传统星载平台,月基平台涉及日-地-月的相对位置关系。传感器定义在传感器相关坐标系下,月基平台定义在月球相关坐标系下,地球观测点定义在地球相关空间坐标系,而太阳则定义在天球相关坐标系下,因此本文将分别介绍以上3类相关坐标系。

1) 地球相关空间坐标系

大地坐标系(Geodetic Coordinate System, GCS)是以参考椭球面为基准面构建的右手坐标系,以地球质心为原点,坐标表达为大地经度、大地纬度和大地高。其中大地经度表示零度经线所在子午面与观测点所在子午面的夹角,以 L 表示;大地纬度是观测点在子午面的法线与赤道面的夹角,以 B 表示;大地高表示观测点沿着参考椭球法线方向至参考椭球面的距离,以 H 表示,以天顶方向为正,以天底方向为负。

地心空间直角坐标系的原点位于地球质心,以地球赤道面为基本平面, Z 轴与基本平面垂直指向地球北极, X 轴指向格林尼治平子午面与地球赤道面的交点,与 Y 轴成右手坐标系。由于地球的自转轴存在极移现象,因此地心空间直角坐标系分为瞬时地心坐标系和协议地固坐标系。目前世界范围内使用最为广泛的、精确的一种协议地固参考系是国际地球参考系(International Terrestrial Reference System, ITRS),它的原点位于涵盖地球海洋和大气在内的整个地球的质心, Z 轴从地心指向国际时间服务机构(Bureau International de l'Heure, BIH)1984.0定义的协议地球极(Conventional Terrestrial Pole, CTP), X 轴指向与协议地极垂直的赤道面和格林尼治平子午面的交点, Y 轴垂直于 X 轴和 Z 轴,构成右手系。

2) 月球相关空间坐标系

月心月固坐标系(Moon-center Moon-fixed Reference System, MCMF)主要为了描述月基平台在月面的位置,以月球质心为原点,参考平面为月球的赤道面, X 轴指向赤道面的零度经度, Z 轴指向月球的北极,与 Y 轴成右手坐标系。按照坐标轴定向的差异,月心月固坐标系可以分为Mean Earth(ME)和Principal Axis(PA)月球坐标系。其中,ME月球坐标系定义 Z 轴为月球平均旋转轴,而对于 X 轴,由于地球方向受到月球轨道偏心率、倾角变化的影响,定义 X 轴指向地球平均方向。PA月球坐标系是一个由月球的惯

性主轴作为定向定义的与月球固连的参考系。由于月球不是一个同步旋转的三轴标准椭球体, PA月球坐标系和ME月球坐标系的轴并不重合。

月球地理坐标系 (Selenographic Coordinate System, SCS) 是基于月球参考椭球面构建的右手坐标系。以月球质心为原点, 以月球赤道面为基本平面, 坐标表达为月心经度、月心纬度和高程。月心经度为过月表某点的天文子午面与本初子午面之间的夹角, 月心纬度是参考椭球面法线与赤道面的夹角, 高程表示月表某点沿着参考椭球法线方向至参考椭球参考面的距离。

月球站心坐标系主要包括月球站心直角坐标和月球站心极坐标系。其中, 月球站心直角坐标系以月表某点为原点, 以天顶方向为Z轴, 以指向月球北极方向为N轴构成右手笛卡尔坐标系。而月球站心极坐标则以球坐标的形式来表达。

3) 天球相关空间坐标系

天球赤道参考系是一种近似的惯性参考系, 以天球赤道为基本平面, Z轴指向北天极, X轴指向春分点位置。考虑到地球的自转轴不固定, 约定在参考历元 t_0 时刻, Z轴指向经过章动改正后的瞬时自转轴, X轴指向对应的春分点方向, 与Y轴构建协议天球右手坐标系。根据原点的不同, 月基对地观测几何模型主要涉及以太阳系质心为原点的质心天球参考系 (Barycentric Celestial Reference System, BCRS)、以地球质心为原点的地心天球参考系 (Geocentric Celestial Reference System, GCRS)、以月球质心为原点的月心天球参考系 (Selenocentric Celestial Reference System, SCRS)。图1表示了天球空间坐标系、地球空间坐标系和月球空间坐标系之间的转换关系。

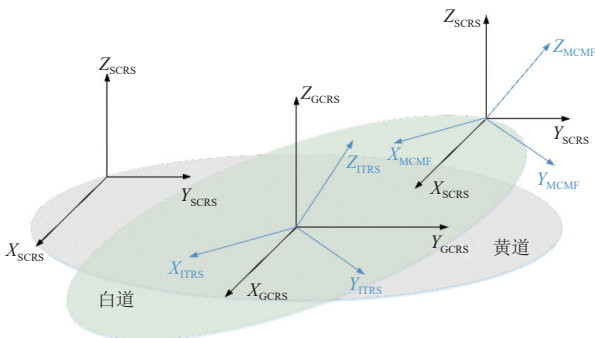


图1 月基坐标系转换示意图

Fig. 1 Moon-based coordinate system transformation

4) 传感器坐标系

确定了月基平台和传感器的安装参数后, 可以在月球站心坐标系的基础上进一步定义传感器坐标系。主要坐标系如下。

像平面坐标系用以表示像点在像平面的位置。摄影方向与像平面的交点为像主点。像平面坐标系的原点位于像主点, X和Y轴与面阵电荷耦合器件 (Charge-Coupled Device, CCD) 的行和列分别平行。

相机坐标系是用来表示相机的指向。坐标系以相机的投影中心为原点, 相机的主光轴为相机坐标系的Z轴, 相机坐标系X和Y轴分别与像平面坐标系的X和Y轴平行。

本体坐标系是与月基平台固联的坐标系, 以月基平台的质心为原点, 平台3个主惯量轴为X、Y和Z轴, 构成右手系, 它主要用于月基共台上各种仪器设备的安装。

像空间辅助坐标系作为过渡坐标系, 以摄影中心为原点, 在月基对地观测研究中, 定义像空间辅助坐标系的X、Y和Z轴分别与月基平台在月球的星下点处的站心坐标系的X、Y和Z轴平行。

2 月基对地观测严格成像模型

根据第1节建立的坐标系, 基于行星历表以及EOP, 可以建立月基对地观测严格成像模型, 流程见图2。

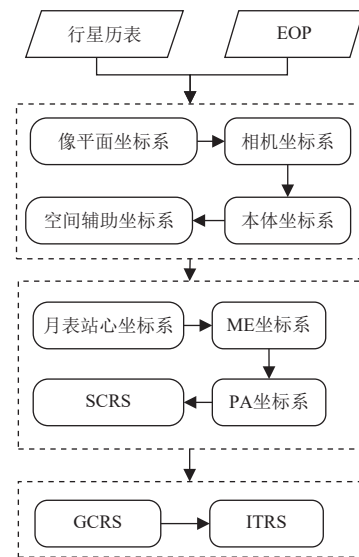


图2 月基对地观测的严格成像模型

Fig. 2 Rigorous imaging model for Moon-based Earth observation

以下详细介绍模型建立的步骤。

1) 设定相机焦距为 f , 像点 p 在像平面坐标系下坐标为 (x, y) , 则在相机坐标系下的观测矢量 (x_c, y_c, z_c) 为

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} \quad (1)$$

2) 根据相机与月基平台的相对安装关系, 构建相

机坐标系与月基平台本体坐标系的旋转矩阵 $\mathbf{R}_{\text{camera}}^{\text{body}}$ 和平移矩阵 (d_x, d_y, d_z) , 则像点 p 在本体坐标系下坐标为

$$\begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix} + \mathbf{R}_{\text{camera}}^{\text{body}} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)以及后文所涉及的旋转矩阵均为正交矩阵, 定义为绕某空间坐标系的 X 、 Y 和 Z 轴旋转一定角度 θ 。利用该旋转矩阵, 可以得到原始坐标系中某矢量在目标坐标系中的坐标转换结果。以下分别定义绕 X 轴、 Y 轴和 Z 轴的旋转矩阵

$$\begin{cases} \mathbf{R}_X(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \\ \mathbf{R}_Y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \\ \mathbf{R}_Z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (3)$$

3) 根据月基平台的安装参数, 构建月基平台本体坐标系与像空间辅助坐标系的旋转矩阵 $\mathbf{R}_{\text{body}}^{\text{topocentric}}$, 以及像空间辅助坐标系和站心坐标系的平移矩阵 (D_x, D_y, D_z) , 则像点 p 在像空间辅助坐标系下坐标为

$$\begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{\text{body}}^{\text{topocentric}} \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

4) 假设月基平台质心相对月球的星下点 p_m 的在SCS坐标系下经纬度为 (λ_m, ϕ_m) , 月球半径为 R_m , 则 p_m 在ME坐标系下坐标为

$$\begin{bmatrix} x_{p_m} \\ y_{p_m} \\ z_{p_m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_m \cos\lambda_m \cos\phi_m \\ R_m \cos\lambda_m \sin\phi_m \\ R_m \sin\lambda_m \end{bmatrix} \quad (5)$$

像点 p 在ME坐标系下的坐标为

$$\begin{bmatrix} x_{\text{ME}} \\ y_{\text{ME}} \\ z_{\text{ME}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{p_m} \\ y_{p_m} \\ z_{p_m} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\sin\lambda_m \cos\phi_m & -\sin\phi_m & \cos\lambda_m \cos\phi_m \\ -\sin\lambda_m \sin\phi_m & \cos\phi_m & \cos\lambda_m \sin\phi_m \\ \cos\lambda_m & 0 & \sin\lambda_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{bmatrix} \quad (6)$$

5) 由于ME坐标系与PA坐标系存在细微的差别, 构建ME坐标系转换至PA坐标系的旋转矩阵, 则像点 p 在PA坐标系下的坐标为

$$\begin{bmatrix} x_{\text{PA}} \\ y_{\text{PA}} \\ z_{\text{PA}} \end{bmatrix} = \mathbf{C} \begin{bmatrix} x_{\text{ME}} \\ y_{\text{ME}} \\ z_{\text{ME}} \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中

$$\mathbf{C} = \mathbf{R}_z(C_1) \mathbf{R}_y(C_2) \mathbf{R}_x(C_3) \quad (8)$$

其中, C_1 、 C_2 和 C_3 是ME坐标系轴与PA坐标系轴的旋转角, 由星历中获取。

6) 为了将像点表达在地球相关坐标系下, 首先将构建PA坐标系转换至SCRS的旋转矩阵 \mathbf{L} , 设定 t 时刻, 则像点 p 在SCRS下的坐标为

$$\begin{bmatrix} x_{\text{SCRS}} \\ y_{\text{SCRS}} \\ z_{\text{SCRS}} \end{bmatrix} = \mathbf{L}(t) \begin{bmatrix} x_{\text{PA}} \\ y_{\text{PA}} \\ z_{\text{PA}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中

$$\mathbf{L}(t) = \mathbf{R}_z[-\omega(t)] \mathbf{R}_x[-I(t)] \mathbf{R}_z[-\Omega(t)] \quad (10)$$

其中: $\omega(t)$ 、 $I(t)$ 和 $\Omega(t)$ 为月球的天平动欧拉角, 由星历中获取; \mathbf{R}_z 和 \mathbf{R}_x 分别表示绕 Z 轴和 X 轴旋转相应角度的旋转矩阵。

7) 假设 t 时刻下月球质心在GCRS下的坐标为 (X_m, Y_m, Z_m) , 可由星历中获取, 同时, 构建比例系数 ρ , 则像点 p 在GCRS下的坐标为

$$\begin{bmatrix} X_{\text{GCRS}} \\ Y_{\text{GCRS}} \\ Z_{\text{GCRS}} \end{bmatrix} = \rho \begin{bmatrix} x_{\text{SCRS}} \\ y_{\text{SCRS}} \\ z_{\text{SCRS}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{bmatrix} \quad (11)$$

8) 由于GCRS为惯性坐标系, 而目前遥感应用中普遍使用的是ITRS, 因此为了与应用接轨, 最后构建GCRS转ITRS的旋转矩阵

$$\begin{bmatrix} X_{\text{ITRS}} \\ Y_{\text{ITRS}} \\ Z_{\text{ITRS}} \end{bmatrix} = \mathbf{W}_t^{-1} \mathbf{R}_t^{-1} \mathbf{Q}_t^{-1} \begin{bmatrix} X_{\text{GCRS}} \\ Y_{\text{GCRS}} \\ Z_{\text{GCRS}} \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中, \mathbf{W}_t 、 \mathbf{R}_t 和 \mathbf{Q}_t 分别对应极移、自转和岁差章动转换矩阵, 由EOP获取。

3 几何图像模拟结果和分析

为了验证上述月基对地观测图像模拟方法的有效性, 本文首先模拟了2015年月基对地观测几何图像, 如图3所示。几何模拟图像较为清晰地展示了地月之间的位置关系。考虑到地月距离最大值和最小值相差4万km, 为了保证模拟图像尽可能覆盖可视地球球冠, 实验设定视场角为 2.5° , 图像大小为2 048像素 \times 2 048像素, 星下点的分辨率为10 km。值得注意的是, 本文的模拟结果主要基于月基对地观测的严格成像模型, 并不考虑实际的云变化情况。

从模拟结果中可以发现, 与传统低轨平台不同, 对于月基对地观测几何图像, 地球在图像上呈现半球大小的圆盘, 图像同时覆盖了地球中低纬度区域、高纬度区域以及极地区域, 且其细部纹理清晰, 不同地

物相对位置关系准确, 清楚地展示了地球晨昏线附近的光照和阴影区域。同时, 随着时间变化, 月基对地观测的几何图像发生变化, 且覆盖范围的变化与对应时刻的月基平台的轨道特性有关。而本文建立的月基对地观测的严格成像模型中考虑了不同时刻月球的准确轨道高度和轨道倾角信息, 这进一步证明了本文基于日-地-月相对位置关系、通过建立严密的月基对地观测严格成像模型进行图像模拟的优势所在。

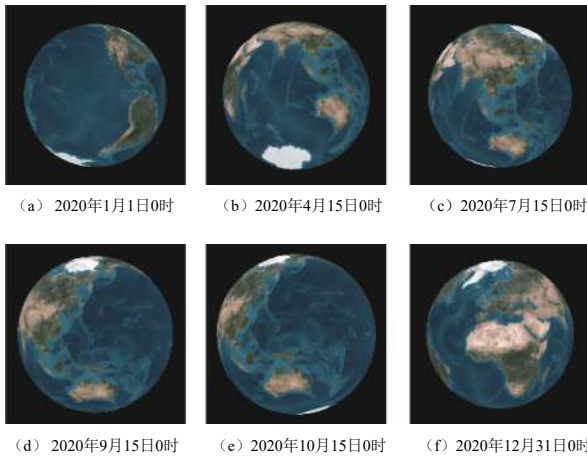


图 3 一年内不同时刻对应的月基几何模拟图像

Fig. 3 Geometrical images for Moon-based Earth observation corresponding to different moments in a year

月基对地观测图像模拟结果受到对应时刻月球轨道特性的影响, 具体来说, 主要与月球的轨道高度和轨道倾角有关。由于月球轨道的离心率约为0.0549, 因此在一个轨道周期内, 随着时间变化, 月球轨道高度也会发生变化。同时, 月球轨道和地球赤道平面的倾角也不是固定的。考虑到黄赤交角和黄白交角, 月球轨道和地球赤道平面的夹角的极值变化范围主要在 $18.35^{\circ} \sim 28.65^{\circ}$ 。因此, 图4表示在一个轨道周期中, 月球分别经过了4个关键位置点, 分别为星下点最北、最南点以及远地点、近地点。为了更好地分析月基对地观测图像的模拟结果, 分别模拟了4个关键位置点对应时刻的月基对地观测几何图像, 如图5所示。首先, 轨道高度的差异影响了空间分辨率, 通过对比月基平台在近地点和远地点的几何图像, 发现在远地点成像的地球圆盘仅为近地点成像的地球圆盘大小的88.8%, 这也意味着, 在一个轨道周期内, 月基对地观测成像的地球圆盘的大小随着从近地点到远地点逐渐减小。其次, 对星下点最北最南点对应时刻月基对地观测几何图像进行了比较, 星下点最北点对应时刻获取的影像可以观测到地球的整个北极, 类似地, 星下点最南点对应时刻月基平台可以观测到地球的南极区域, 这为地球南北极感兴趣目标如南极冰川的变化等观测提

供了长期有效的平台。因此, 随着星下点由最北朝着最南运动, 月基平台可观测的地球优势区域也随之变化, 根据研究对象的位置属性, 可选择较为合适的月基平台观测时间区间。

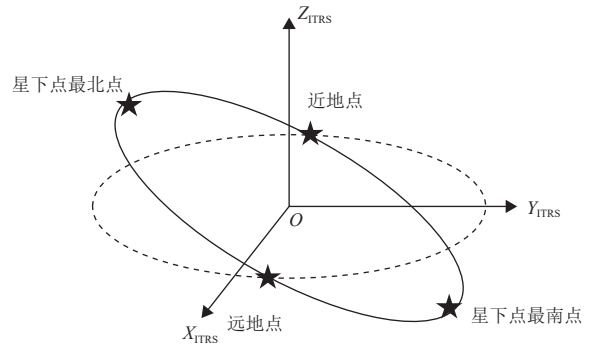


图 4 月球轨道关键位置点

Fig. 4 Key position points of lunar orbit

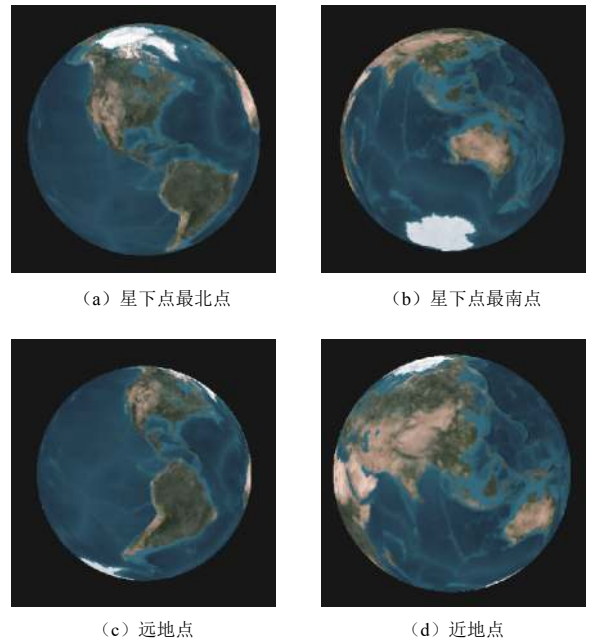


图 5 4个关键位置点对应时刻的月基几何模拟图像

Fig. 5 Geometrical images for Moon-based Earth observation corresponding to four key position points of lunar orbit

此外, 本文进一步将模拟结果与现有模拟系统的图像模拟结果进行对比。现有的模拟系统只是从计算机视觉算法出发, 以定性的角度描述不同时刻下地球可观测到的区域范围, 并没有严格建立从像点到物点成像的物理模型, 因此, 模拟图像本身不具有严密的物理意义, 这也导致了它对地球不同区域的投影产生不同程度的变形, 特别是边缘区域的区分度不清晰, 而由于不同位置并没有进行地理定位, 这种变形也无法进行严格纠正。受限于此, 现有模拟系统的模拟结果往往只能应用在目视展示等方面。而本文建立了从

像点到物点的严格成像模型,模拟得到的几何图像每一像元均具有严格的地理信息,这也进一步保证了本文获取的模拟图像可直接应用于感兴趣的研究对象,例如后文提及的地球辐射能量的模拟。

综上,月基对地观测几何图像呈现以下特征:

1) 不同于传统星载传感器,月基对地观测几何图像主要表现为半球尺度类凝视成像,地球上的地物可以被凝视观测平均8 h,观测时间长短视地物纬度高低而定。

2) 地月距离随着时间变化,而对于月基搭载的传感器,在视场角不变的情况下,可视地球球冠的大小随着地月距离变化而变化。

3) 月球的轨道倾角随时间变化,随着星下点由最北朝着最南运动,月基平台可观测的地球优势区域也随之变化。

4 辐射能量图像模拟结果和分析

第3节提到本文基于建立的严格成像模型进行成像模拟,严格地实现了从像点到物点的直接定位,因此每个像点都具有特定的地理信息。基于该模型,可进一步对地球辐射能量进行几何模拟。需要提及的是,实验仍然只是基于严格成像模型对地球可视球冠的辐射能量进行几何模拟,而不涉及地月之间辐射传输过程。

地球辐射能量主要包括两大参量,分别为长波辐射(Outgoing Longwave Radiation, OLR)和短波辐射(Outgoing Shortwave Radiation, OSR)。在进行月基对地观测辐射能量几何模拟之前,需要利用现有的地球辐射能量模式数据提供地球辐射能量的信息。本文采用了Goddard Earth Observing System Model Version 5(GEOS-5)瞬时数据集,分辨率为 $0.3125^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,时间分辨率为3 h,数据集提供了地球发射的长波辐射以

及大气层顶入射短波辐射、大气层顶净短波辐射等数据。

图6和图7分别展示了一个轨道周期内月基平台获取的OLR和OSR模拟图像。首先,无论是OLR模拟图像还是OSR模拟图像,月基对地观测获取的模拟图像均可以清晰地描述视场内能量的分布,对于连续时间序列的模拟图像,还可以进一步观察不同区域的能量流动以及变化,这表明了基于本文建立的严格成像模型进行地球辐射能量的几何模拟是可行且有效的。具体来说,对于地球的OLR模拟图像,图像清晰地展示了天气系统对OLR的响应,OLR主要受到地物类型、地表温度以及云覆盖等因素影响。在模拟图像中,地球圆盘的中低纬度区域整体上OLR数值高于高纬度区域,这是因为中低纬度区域较高纬度区域来说地表温度较高。同时,受到云的制冷效应,具有较多云覆盖的区域均呈现了较低的OLR数值。第3节提及月基对地观测几何图像主要受到月球轨道高度和轨道倾角等轨道特性的影响,类似地,在一个轨道周期内,随着时间变化,OLR模拟图像也随着变化。具体来说,随着地月距离增大,观测视场内获取OLR数值逐渐减小,因此OLR在后续应用中应去除地月距离对其的影响。而随着轨道倾角的变化,观测视内地物类型发生变化,OLR模拟图像结果也因此发生变化,当星下点达到最南或最北时,由于观测视场内高纬度低温区域面积增加,OLR呈现一定程度的削弱。但事实上,云覆盖也极大地影响了OLR的分布变化。此外,由于地月的相对关系不断发生变化,地球辐射能量模拟图像也存在周期性的变化。由于地球的自转,导致观测视内地物类型的变化呈现类日周期的特性,同时考虑到在一个轨道周期内月球沿轨道围绕地球连续运动,OLR还呈现了以月球轨道周期变化的特性。

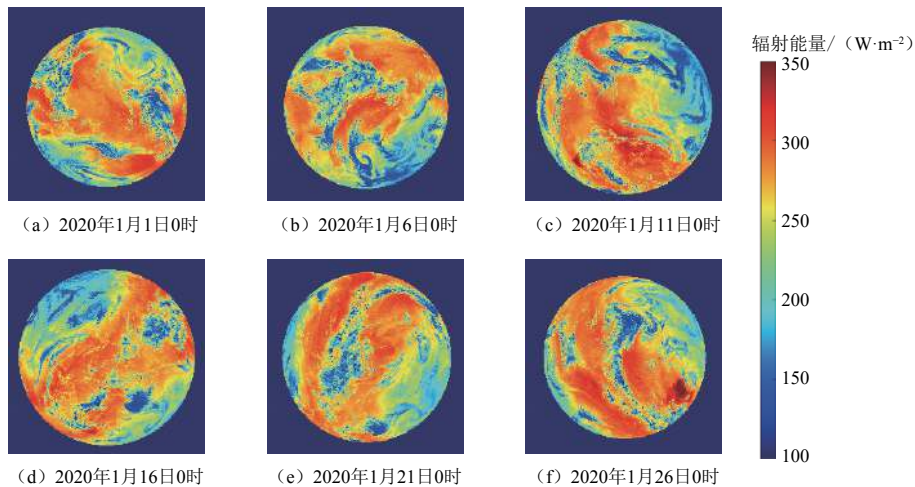


图6 一个轨道周期内不同时刻对应的月基OLR模拟图像

Fig. 6 OLR images for Moon-based Earth observation corresponding to different moments in an orbital period

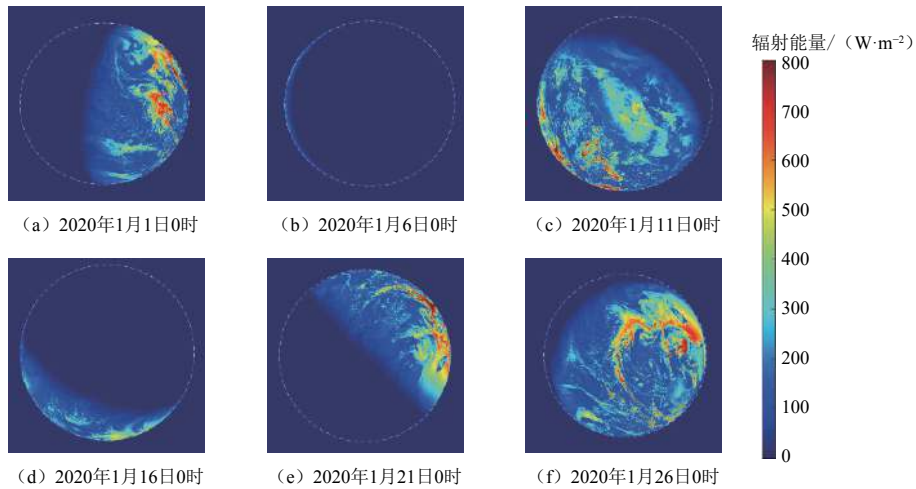


图7 一个轨道周期内不同时刻对应的月基OSR模拟图像

Fig. 7 OSR images for Moon-based Earth observation corresponding to different moments in an orbital period

与OLR不同,对于OSR的模拟图像,OSR为地球反射太阳的能量,因此还需要考虑太阳和地球、月球的相对位置关系。除了受到地物类型、云覆盖等因素的影响,OSR主要受到地相的影响,如图7所示,其中虚线区域内图像区域为地球的光照范围,无数据区域为阴影区域。在光照区域,OSR主要和地物反照率以及云覆盖有关,对于低反照率的海洋区域,OSR均呈现了较低的数值,而对于多云覆盖区域,由于云的反射率较高,OSR急剧增大。和OLR类似的是,随着时间变化,OSR模拟图像同样也受到对应时刻的日-地-月关系变化的影响,具体体现在观测视场内光照区域面积以及光照区域内地物类型、云覆盖的变化。随着太阳以及月球星下点的变化,观测视场内的OSR观测图像呈现周期性的变化,例如,在一个月球轨道周期内,月球星下点环绕地球运动,观测视场覆盖的地球纬度区域也相应发生变化,而随着太阳星下点的变化,观测视场内地相也随之变化。

综上,月基对地观测辐射能量图像呈现以下特征:

1) 基于本文建立的严格成像模型以及模式数据,辐射能量几何模拟图像能较为准确地反映地表类型、云覆盖等因素与地球自身发射辐射能量和反射太阳辐射能量的关系,有助于地球整体辐射能量的后续深入研究。

2) 地月距离、轨道倾角等轨道特性变化主要体现在观测视场内星下点的变化,其极大地影响了观测视场内地物类型以及云覆盖的组成。因此,无论是OLR还是OSR,其模拟图像均呈现一定程度的周期性变化。特殊地,OSR模拟图像还极大程度地受到地相的影响。

5 结论

月基对地观测平台作为崭新的平台,现有模拟系统往往只从定性的角度对其进行描述,这极大限制了模拟结果的科学应用性,而其量化图像模拟还鲜有研究。本文通过建立严格成像模型,建立了像点和物点之间的定量关系,并将其应用于月基对地观测几何图像和辐射能量图像的模拟中。模拟结果表明,基于严格成像模型的月基对地观测图像模拟算法具有可行性,准确地表达了图像特性随着月球轨道特性变化而变化的规律。基于长时间序列的模拟结果,本文进一步分析和归纳了月球特有的轨道特性对几何图像以及辐射能量图像各自属性的影响。综上,本文建立的基于严格成像模型的月基图像模拟方法是可行且有效的,其对于后续月基不同类型的传感器的参数设计具有较大的参考意义,具有较强的应用前景。

参 考 文 献

- [1] SHEN G Z, GUO H D, LIU G. The geometry numerical simulation and analysis for Moon-based Earth observation[C]//2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. [S. l.]: IEEE, 2018.
- [2] YE H L, GUO H D, LIU G, et al. Observation scope and spatial coverage analysis for Earth observation from a Moon-based platform[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2018, 39(18): 5809-5833.
- [3] 欧阳自远. 月球科学概论[M]. 北京:中国宇航出版社, 2005.
- [4] OUYANG Z Y. Lunar science conspectus[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2005.
- [5] YE H L, GUO H D, LIU G, et al. Impacts of platform's position errors on geolocation for a Moon-based sensor[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2019, 17(1): 112-116.
- [6] YE H L, GUO H D, LIU G. Observation parameters design of Moon-

- based Earth observation sensors for monitoring three-polar regions[C]// 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. [S. l.]: IEEE, 2017.
- [6] NIE C W, LIAO J J, SHEN G Z, et al. Simulation of the land surface temperature from Moon-based Earth observations[J]. *Advances in Space Research*, 2019, 63(2): 826-39.
- [7] HUANG S P, LIAO J J, JIE G, et al. Towards Moon-based monitoring of energy budget of the Earth climate system[C]// 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. [S. l.]: IEEE, 2016.
- [8] GUO H D, DING Y X, LIU G, et al. Conceptual study of lunar-based SAR for global change monitoring[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2014(8): 1771-1779.
- [9] GUO H D, LIU G, DING Y X, et al. Conceptual Research of lunar-based Earth observation for global environmental change[C]// 39th Cospar Scientific Assembly. Mysore, India: [s. n.], 2012.
- [10] HUANG S P. Surface temperatures at the nearside of the Moon as a record of the radiation budget of Earth's climate system[J]. *Advances in Space Research*, 2008, 41(11): 1853-1860.
- [11] REN Y Z, GUO H D, LIU G, et al. Simulation of Moon-based observation for large-scale Earth science phenomena[C]//2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Beijing, China: IEEE, 2016.
- [12] PALLÉ A, GOODE P R. The lunar terrestrial observatory: observing the Earth using photometers on the Moon's surface[J]. *Advances in Space Research*, 2009, 43(7): 1083-1089.
- [13] MOCCIA A, RENG A. Synthetic aperture radar for Earth observation from a lunar base: performance and potential applications[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2010, 46(3): 1034-1051.
- [14] YE H L, GUO H D, LIU G, et al. Observation duration analysis for Earth surface features from a Moon-based platform[J]. *Advances in Space Research*, 2018, 62(2): 274-287.
- [15] REN Y Z, GUO H D, LIU G, et al. Simulation study of geometric characteristics and coverage for Moon-based Earth observation in the electro-optical region[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017(6): 1-10.
- [16] HUANG J, GUO H D, LIU G, et al. Spatio-temporal characteristics for Moon-based Earth observations[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(17): 2848.
- [17] SUI Y, GUO H D, LIU G, et al. Analysis of long-term Moon-based observation characteristics for Arctic and Antarctic[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(23): 2805.
- [18] 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:

邓玉(1997-),女,博士生,主要研究方向:月基对地观测几何、月基对地观测辐射能量。

通讯地址:北京大学地球与空间科学学院(100871)

电话:15071423345

E-mail: yudeng@pku.edu.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。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

Simulation and Application of Moon-Based Earth Observation Image

DENG Yu^{1,2}, GUO Huadong^{1,2}, LIU Guang², YE Hanlin², HUANG Jing²

(1. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;

2. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: To solve the problem that the existing simulation system only qualitatively describes the Moon-based observation image, an image simulation method based on rigorous imaging model for Moon-based platform was proposed, and the quantitative relationship between image point and object point was established. The method was applied to the simulation of observation geometric image and radiation energy image. Based on long-time series simulation results, the effect of lunar orbit on geometric images and radiation energy images was further analyzed and summarized. The results show that this image simulation method based on the rigorous imaging model is feasible, and accurately expresses the image characteristics that vary with the characteristics of the lunar orbit. This method lays a foundation for the application of Moon-based observation images, and has great significance for the subsequent parameter design of different types of Moon-based sensors.

Keywords: Moon-based platform; image simulation; rigorous imaging model

Highlights:

- An image simulation method for Moon-based Earth observation is proposed based on rigorous imaging model.
- Experiments of geometrical and radiation energy simulation images are carried out and analyzed according to the characteristics of the lunar orbit.
- The influence of four key points of the lunar orbit on the characteristics of the simulated image is analyzed.
- The method is theoretically universal for different sensors and can also be used as a reference for parameter design of different sensors.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 宋利辉]