

Calibration of a multichannel millimeter wave radiometer of FY-4M based on the real-time brightness temperature along the lunar equator

柳钮滔 and 金亚秋

Citation: 科学通报; doi: 10.1360/TB-2019-0200

View online: <http://engine.scichina.com/doi/10.1360/TB-2019-0200>

Published by the [《中国科学》杂志社](#)

Articles you may be interested in

[Calibration and brightness temperature algorithm of CE-1 Lunar Microwave Sounder \(CELMS\)](#)

SCIENCE CHINA Earth Sciences **53**, 1392 (2010);

[Analysis of microwave brightness temperature of lunar surface and inversion of regolith layer thickness: Primary results of Chang-E 1 multi-channel radiometer observation](#)

SCIENCE CHINA Information Sciences **53**, 168 (2010);

[On real-time teleoperation of lunar rover](#)

SCIENTIA SINICA Informationis **44**, 461 (2014);

[Influence of variables on the system of real-time measurement of temperature field with ICCD as sensor](#)

Science in China Series E-Technological Sciences **42**, 21 (1999);

[Real-time measurement of temperature field with ICCD as sensor \(I\)—— Principle and method for division of temperature range](#)

Science in China Series E-Technological Sciences **41**, 295 (1998);





基于月表面赤道区域实时辐射亮度温度的风云4号毫米波热辐射定标

柳钮滔, 金亚秋*

复旦大学电磁波信息科学教育部重点实验室, 上海 200433

* 联系人, E-mail: yqjin@fudan.edu.cn

2019-06-17 收稿, 2019-08-26 修回, 2019-08-26 接受, 2019-11-19 网络版发表

摘要 中国计划发射的地球同步卫星风云4号微波星(FY-4M)将搭载多通道的毫米波辐射计. 工作频率从50~430 GHz, 能实现区域高频重访气象观测, 极大地提高了天气变化的监测与预报能力. 在轨辐射定标是FY-4M辐射数据定量化应用的关键因素, 由于月球表面物理与化学性质长期稳定, 没有大气层等环境变化的影响, 是FY-4M毫米波辐射计一个理想的定标源. 本研究提出根据实时的日下点位置和日地距离, 建立实时的太阳辐射强度模型; 依据由克莱门汀750 nm数据得到月表面太阳反射率, 以及月壤热物理参数廓线分布, 求解一维热传导方程, 推算月壤层物理温度廓线; 用嫦娥2号37 GHz微波辐射亮度温度拟合, 得到月表面正切损耗参数; 用起伏逸散定理, 计算FY-4M各毫米波频段的月表面辐射亮度温度. 以此, 给出月球赤道中心区域(0°N, 0°E)的表面物理温度和毫米波辐射亮度温度在2010年间随时间变化的关系, 也比较了近日点和远日点附近月表面毫米波辐射亮度温度的差别. 本研究提出的月表面实时毫米波辐射模型, 可用于FY-4M毫米波辐射计数据的定标研究与应用.

关键词 风云4号微波星定标, 月球毫米波亮温, 热传导方程, 实时月表温度

中国在1997和2016年分别发射了风云2和风云4系列地球同步轨道气象遥感卫星. 计划发射的风云4号毫米波星(FY-4M, FengYun-4 millimeter)有6通道的毫米波辐射计, 工作频率为55, 89, 118, 166, 183和425 GHz. FY-4M作为地球同步轨道卫星, 能实现地球同一区域的高频次重访观测, 极大地提高天气变化监测与气象预报能力. 卫星观测的热辐射亮度温度(亮温)定量化水平取决于定标技术. 在卫星发射前, 在热真空腔中进行预定标, 来获得辐射计的定标参数. 在卫星运行中, 还需要在轨定标. 一般地, 选取冷空作为低温定标源, 卫星自带的定标黑体作为热定标源. 但是, 定标黑体的稳定性极易受到太空恶劣环境的影响, 影响定标数据的准确性. 而月球由于没有大气干扰, 也没有水文、气候、生物等月表环境因素影响, 月表面物理与化学性

质能保持长期的稳定. 因此, 月表面的热辐射随其围绕地球与太阳的旋转具有稳定的周期变化特性, 可以作为一个稳定可靠的热定标源^[1].

对月球的辐射亮温观测可以追溯到20世纪40年代^[2], 但是由于当时对月球表面热物理性参数和介电参数等认知有限, 定量水平低. 近几十年内, 先进的月球遥感卫星使得人们对月表面物理化学等特征参数有了更深入的了解, 月球勘测轨道飞行器(LRO)的红外探测仪获取了全月球昼夜不同时间的月球表面太阳光反射率和表面温度数据^[3]. 月球表面月壤层的密度、导热率等热物理参数分布, 月壤层热传导方程求解红外热辐射, 及其与红外辐射数据验证等都有了研究^[4,5]. 中国在2007和2010年先后发射的嫦娥1, 2号探月卫星搭载有4通道微波辐射计, 是世界上第一次对月球的星载微

引用格式: 柳钮滔, 金亚秋. 基于月表面赤道区域实时辐射亮度温度的风云4号毫米波热辐射定标. 科学通报, 2019, 64

Liu N T, Jin Y Q. Calibration of a multichannel millimeter wave radiometer of FY-4M based on the real-time brightness temperature along the lunar equator (in Chinese). Chin Sci Bull, 2019, 64, doi: [10.1360/TB-2019-0200](https://doi.org/10.1360/TB-2019-0200)

波辐射观测^[6,7]. 由于微波对月壤的透射, 月壤的介电常数(特别是其虚部正切损耗)廓线有了多通道微波辐射数据验证的可能. Liu等人^[8]用赤道正午的嫦娥2号37 GHz亮温数据来拟合月壤层的正切损耗, 由月球另外区域的微波亮温加以验证. 由此拟合得到的正切损耗来计算风云4号毫米波段亮度温度, 以用于热定标. 在文献^[8]中, 太阳与月球间距离曾假定为1 AU, 但是在一整年中这个距离约有 ± 0.015 AU的变化, 可以产生约几K的亮温差别. 本研究用2010年的实例, 提出在一整年间实时的太阳光辐照下, 月球表面毫米波频段的辐射亮度温度的计算与定标分析.

FY-4M气象卫星将位于赤道上空35800 km, 经度约在99.5°~123.5°E区域. 发射前进行预定标确定相关的定标参数, 同时也配有定标源进行在轨定标^[9]. 月球与地球之间的距离在363400(近地点)和405400 km(远地点)之间^[10]. FY-4M卫星对着月球表面赤道中心区域可以看作垂直观测. FY-4M各通道的波束张角范围分别为0.097°~0.027°. 在远地点, 计算得到各通道观测区域直径分别为750 km(55 GHz), 480 km(89, 118 GHz), 300 km(166, 183 GHz)和210 km(425 GHz). 在选取月表面的太阳光反射率、铁含量和钛含量这些参数时, 以月球赤道中心(0°N, 0°E)为观测中心, 计算远日点时对应观测区域内参数的平均值.

通过实时的日下点的位置及实时的太阳辐射强度, 结合月壤密度、导热率、热容量等热物理特性参数廓线, 计算月壤层物理温度廓线, 来数值仿真这些条件下FY-4M毫米波段亮度温度, 以用于定标.

1 实时的月表面温度模型

1.1 实时的太阳辐射强度

到达月球表面的太阳辐射强度 TSI (total solar intensity)主要由太阳和月球间的距离决定. 当日月距离1 AU(astronomical unit)时, TSI 的平均值为1371 W/m²^[11], 地球和太阳之间的距离约为 1 ± 0.015 AU, 而月球和地球之间的距离约为0.0025 AU, 这里就不考虑月球和地球之间的距离. 由日地距离来确定实时的 TSI 为

$$TSI = 1371 / d_{se}^2, \quad (1)$$

其中 d_{se} 是日地距离, 单位是AU, 当地球位于远日点和近日点时, TSI 分别为1326和1418 W/m². 在月球赤道附

近低纬度区域, TSI 随日地距离的变化对月表面温度产生显著的影响.

由VSOP82行星理论和Chapront ELP-2000/82月球理论^[10], 可计算得到整年期间的日下点位置以及日地距离. 图1(a), (b)给出了2010~2012年间日地距离的变化和太阳辐射强度的变化.

此外, 由于月球自转轴存在微小的倾斜, 日下点的纬度也会变化. 按文献^[12]的3条经验定律: (1) 月球向东自转, 自转速率恒定, 与公转速率一样; (2) 月球赤道平面和黄道平面的夹角为1°32'; (3) 黄道法向量、月球轨道平面法向量与月球自转轴位于同一平面^[12]. 由于月球自转轴的倾斜, 不同季节的太阳光入射角不同, 赤道附近正午太阳光入射角 θ_i 约为0°, 单位面积上的太阳光辐射强度可以表示为 $TSI \times \cos \theta_i$. 假设月表面平坦, 当自转轴的倾斜使得不同季节入射角从0°变为1.5°时, 由于满足余弦关系, 正午时候月球赤道区域单位面积上的太阳光辐射强度几乎不变, 所以月球自转轴的倾斜对赤道附近低纬度区域的太阳光辐射强度影响很小. 但是, 微小的入射角变化在高纬度极区会产生极大的温度变化. 月球轨道和黄道平面的升交点逆行周期约为18.6 a^[10], 月球自转轴的进动周期也是18.6 a, 这会导致月球季节的周期性变化.

太阳光辐照对月表面的局部入射角 θ_i 由月表面日下点位置、目标区域位置与其表面斜坡决定. 根据LRO的月球轨道激光高度计(LOLA)^[13]采集的数字高程模型(DEM)数据(ldem_4_float), 月球赤道中心区域地形都较为平坦, 可视为平面地形. 假设日下点经度为 λ , 纬度为 φ , 目标区域经度为 λ_0 , 纬度为 φ_0 , 月球视为圆球, 其半径为1737.4 km. 图2是月球的正交坐标系, 其中 \hat{z} 表示从月心指向北极的单位向量, \hat{x} 表示从月心指向月面经纬度都为0°处的单位向量.

在目标区域建立局部坐标系, \hat{x}_l 轴与目标点的纬线平行, 从北极上方看指向逆时针方向; \hat{y}_l 轴与目标点的经线平行, 从南极指向北极; \hat{z}_l 是从月心指向目标点的单位向量, 月表面法向量可以写为

$$\hat{z}_l = \cos \varphi_0 \cdot \cos \lambda_0 \cdot \hat{x} + \cos \varphi_0 \cdot \sin \lambda_0 \cdot \hat{y} + \sin \varphi_0 \cdot \hat{z}. \quad (2)$$

从月心指向日下点的单位向量可以写为

$$\hat{s} = \cos \varphi \cdot \cos \lambda \cdot \hat{x} + \cos \varphi \cdot \sin \lambda \cdot \hat{y} + \sin \varphi \cdot \hat{z}. \quad (3)$$

其太阳光照的局部入射角为

$$\cos \theta_i = \hat{z}_l \cdot \hat{s}. \quad (4)$$

实时的 TSI 和局部入射角作为热传导方程的输入

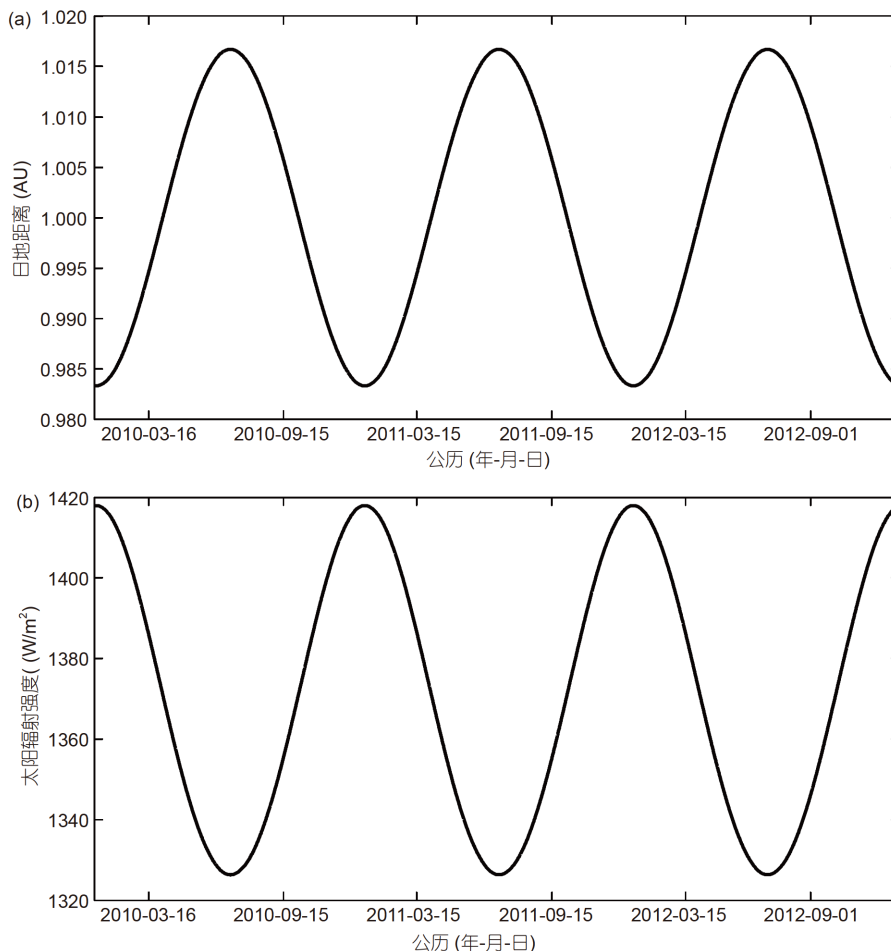


图1 太阳光辐射强度与日地距离关系. (a) 日地距离随时间的变化; (b) 太阳光辐射强度随时间的变化

Figure 1 The relationship between the solar irradiance and the Sun-Earth distance. (a) The distance between the Sun and the Earth at different time; (b) the solar irradiance variation with time

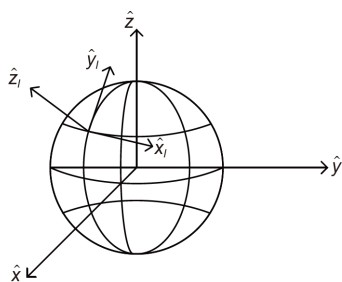


图2 月球主坐标系

Figure 2 The main coordinate of the Moon

参数, 来计算月壤层的实时物理温度廓线 $T(z)$ 的变化.

1.2 求解月壤层的一维热传导方程

求解一维热传导方程, 获得月壤的物理温度廓线^[14]:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (5)$$

其中月壤的热物理参数包括: 热容 C 、导热率 K 、密度廓线 $\rho(z)$ 和温度廓线 $T(z)$.

由Apollo月壤样本和Diviner数据拟合, 得到密度廓线^[5]:

$$\rho(z) = \rho_d - (\rho_d - \rho) e^{-z/H}, \quad (6)$$

其中 $\rho_s = 1100 \text{ kg m}^{-3}$, $\rho_d = 1800 \text{ kg m}^{-3}$, H 被设为 6 cm ^[4].

由月壤样本实测值^[15,16], 月壤的热容写为

$$C = C_0 + C_1 T + C_2 T^2 + C_3 T^3 + C_4 T^4, \quad (7)$$

其中, $C_0 = -3.6125 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $C_1 = +2.7431 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-2}$, $C_2 = +2.3616 \times 10^{-3} \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-3}$, $C_3 = -1.2340 \times 10^{-5} \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-4}$, $C_4 = +8.9093 \times 10^{-9} \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-5}$.

月壤导热率 $K(T)$ 由固体导热率和辐射导热率两部分组成^[17]:

$$K = K_c \left[1 + \chi \left(\frac{T}{350} \right)^3 \right], \quad (8)$$

其中辐射传输参数 χ 取为2.7, 固体导热率 K_c 与密度成线性关系^[5]:

$$K_c = K_d - (K_d - K_s) \frac{\rho_d - \rho}{\rho_d - \rho_s}, \quad (9)$$

其中 $K_s = 7.4 \times 10^{-4} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 和 $K_d = 3.4 \times 10^{-3} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 分别是表面和深处的导热率.

热传导方程的边界条件可以写为

$$K(z, T) \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = TSI(1-A)\cos^+\theta_i - \epsilon\sigma T_s^4 - J_0, \quad (10a)$$

$$K(z, T) \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=-\infty} = -J_0, \quad (10b)$$

其中实时的 TSI 由式(1)得到, θ_i 是太阳光的入射角. 在夜间, $\hat{z}_i \cdot \hat{s} < 0$, 没有阳光, $\cos^+\theta_i$ 为0. 在白天时, 实时的局部入射角由式(4)计算得到: 当 $\cos\theta_i < 0$ 时, 斜坡背阴, 没有阳光照射, $\cos^+\theta_i$ 为0; 其他情况下, $\cos^+\theta_i = \cos\theta_i$. 月表的红外辐射率 ϵ 设为0.95^[18], T_s 是表面温度, J_0 是内部热流, 这里设为 0.018 W/m^2 ^[8], Boltzmann常数 σ 为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

月表面各地的光反射率与太阳光入射角 θ_i 有关, 其经验公式为^[19]

$$A(\theta) = A_0 + a(\theta_i/45)^3 + b(\theta_i/90)^8, \quad (11)$$

其中 A_0 是归一化后的月表面太阳光反照率. 由于可见光波长极小, 无法穿入月壤, 太阳光反射率受月壤表面本身的物理化学性质, 如月壤物质组成、月壤颗粒、月壤表面粗糙度等因素的影响. 通常由克莱门汀750 nm数据除以1.3得到^[4]. 参数 a 和 b 是两个经验参数, 分别为0.06和0.25^[5].

这里调用2000年1月1日~2011年12月31日的月表面日下点位置和日地距离, 来获得实时的 TSI 和太阳光入射角, 运行时域有限差分数值方法(FDTD)计算求解, 超过100个月昼来确保收敛. 一维热传导方程假设在各水平方位上是均匀的, 计算得到了观测区域的平均物理温度廓线 $T(z)$. 由此得到该区域表面物理温度及其随时间的变化, 再由Diviner红外亮温数据验证. 月表面夜间物理温度主要受月壤层热物理特性影响, 也通过Diviner夜间亮温数据验证, 这样确保所选取的热物理特

性参数合理. 验证过程中月表面红外辐射率通常取1, 即红外亮度温度等于表面物理温度, 验证过程可参见文献[8]. 同时, 在Apollo热实验中曾测量得到的月壤深度1.3 m处的物理温度也与计算得到的温度廓线进行对比验证, 结果是一致的^[8], 从而本研究将这样计算得到的物理温度廓线用于微波亮度温度的计算.

根据克莱门汀数据, 月球赤道中心(0°N , 0°E)附近 $\pm 13^\circ$ 范围内, 式(11)的 A_0 平均值为0.11. 仿真计算得到2010年月球赤道中心月表面温度, 如图3(a)所示. 图3(b)是月球赤道中心在2010年近日点(1月附近)和远日点(6月附近)附近的月表面物理温度. 近日点处, 月表面正午最高温度能达到390 K; 而在远日点处, 正午最高温度为384 K, TSI 的变化最大会产生6 K的表面温差.

夜间月表面没有太阳光照射, 月表面对外辐射热量使得月壤热能量不断输出, 总热能量的下降使得一夜过后清晨的表面物理温度低于前一天傍晚的温度. 太阳光辐射能量可以写为 $TSI(1-A)\cos^+\theta_i$, 在正午附近, 这一项远大于月壤层本身热能量的传输, 这时月表面温度取决于太阳的入射角, 在正午月表面温度达到峰值.

2 实时的辐射亮度温度

毫米波具有一定的月壤层透射深度. 月壤被视为一层非均匀耗散介质, 基于起伏逸散定理和WKB解^[20,21], 天底观测(0°)时的辐射亮温可以写为

$$T_B(0^\circ) = [1 - R(0)] \int_0^\infty \kappa_a(z) T(z) e^{-\int_0^z \kappa_a(z') dz'} dz, \quad (12)$$

其中 $R(0^\circ)$ 是天底点观测时的平表面反射率, 可以写为

$$R(0^\circ) = \left(\frac{1 - \sqrt{\epsilon(z=0)}}{1 + \sqrt{\epsilon(z=0)}} \right)^2, \quad (13)$$

其中 $\epsilon(z=0)$ 是表面($z=0$)介电常数.

用Maxwell-Garnett(M-G)公式计算混合物月壤的介电常数实部 $\epsilon'(z)$ ^[22,23]:

$$\frac{1}{\langle \rho \rangle} \cdot \frac{\langle \epsilon \rangle - 1}{\langle \epsilon \rangle + 2} = \frac{1}{(1 - n(z))G} \cdot \frac{\epsilon'(z) - 1}{\epsilon'(z) + 2}, \quad (14)$$

其中 $\langle \epsilon \rangle = 2.75$, $\langle \rho \rangle = 1.7 \text{ g/cm}^3$, 月壤颗粒的密度 G 用月壤样本的矿物含量来拟合^[24]:

$$G = 27.3\text{FeO} + 11\text{TiO}_2 + 2773, \quad (15)$$

其中 G 的单位是 kg/m^3 , FeO和 TiO_2 表示氧化铁和二氧化钛的质量百分比^[25], 由Apollo采样的样本密度拟和得

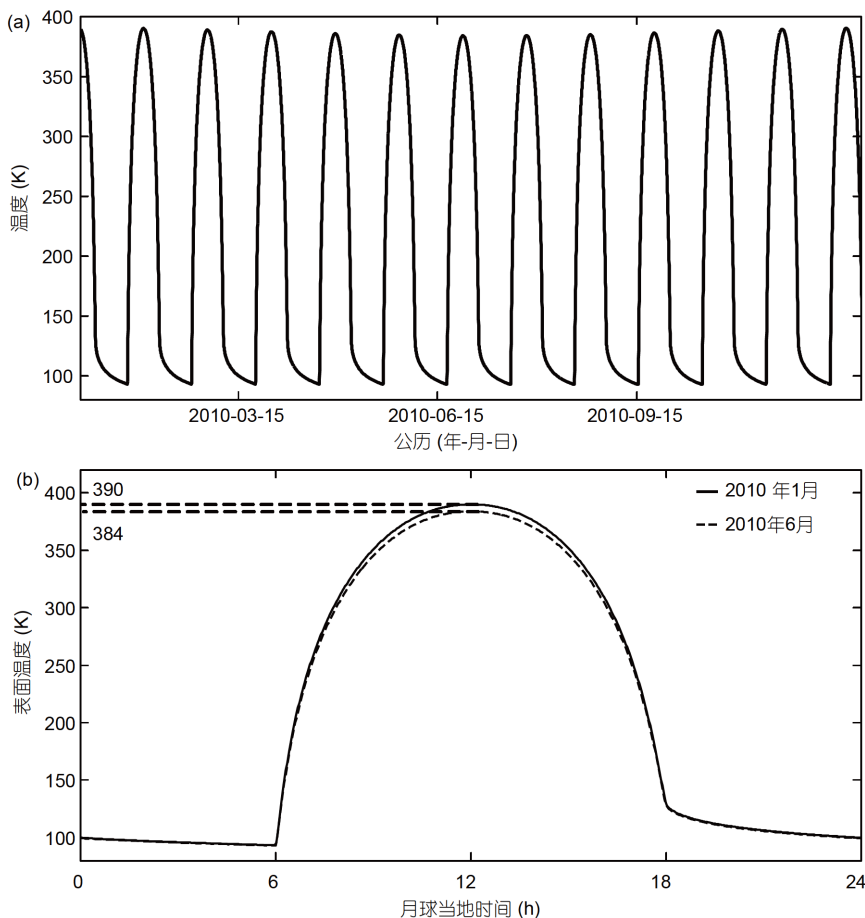


图 3 月球赤道中心(0°N, 0°E)表面物理温度. (a) 2010年月球赤道中心(0°N, 0°E)表面温度; (b) 2010年近日点(1月)和远日点(6月)附近表面温度
Figure 3 The surface temperature of the center of the lunar equator. (a) The surface temperature of the equator center (0°N, 0°E) in 2010; (b) the surface temperature at the perihelion (January) and the aphelion (June)

到的月壤孔隙度廓线 $n(z)$ 可以写为^[26]

$$n(z) = 1 - \frac{1.919}{G_0} \times \frac{z+0.122}{z+0.18}, \quad (16)$$

其中 $G_0=3.1 \text{ g/cm}^3$ 是采样样本月壤颗粒密度的标称值.

通过月壤样本的正切损耗及其矿物含量的关系, 可以发现, TiO_2 含量对正切损耗起着决定性作用, 其影响远大于其他矿物含量^[23]. 正切损耗用 TiO_2 含量拟合 CE-2微波辐射亮温 TB_{37} 数据, 得到关系式^[8]:

$$\tan\delta = 3.516 \times 10^{-4} \text{TiO}_2 + 0.0087, \quad (17a)$$

其中 $\text{TiO}_2 > 1\%$,

$$\tan\delta = -8.945 \times 10^{-5} \text{TiO}_2 + 0.0097, \quad (17b)$$

其中 $\text{TiO}_2 < 1\%$.

月壤的吸收系数 κ_a 写为^[20,22]

$$\kappa_a = \frac{2\pi\nu\epsilon''(z)}{c\sqrt{\epsilon'(z)}}, \quad (18)$$

其中 ν 是频率, c 是真空中光速, $\epsilon'(z)$ 和 $\epsilon''(z)$ 分别是深度 z 处的介电常数实部和虚部, 比值 $\epsilon''(z)/\epsilon'(z) \doteq \tan\delta$ 定义为正切损耗.

3 FY-4M毫米波辐射亮温定标

FY-4M不同频率通道对月球表面观测的张角及其观测区域面积范围是不同的^[8]. 所采用的在远地点时, 各通道在月球赤道中心观测区域的平均太阳光反照率 A_0 , TiO_2 , FeO 等参数如表1所示.

表1用于计算FY-4M各通道月球赤道中心区域的毫米波亮度温度. 以55 GHz为例, 其观测区域中 TiO_2 的均值为2.6%, FeO 的均值为11.9%. 由式(17)可以得到其正切损耗为0.0096, 由式(14)计算得到其介电常数廓线

表 1 观测区域平均参数

Table 1 The average parameters in the observation region

频率 (GHz)	A_0	TiO ₂ (wt.%)	FeO (wt.%)
55	0.11	2.6	11.9
89	0.12	2.0	11.4
118	0.12	2.0	11.4
166	0.12	2.0	12.0
183	0.12	2.0	12.0
425	0.11	2.2	12.9

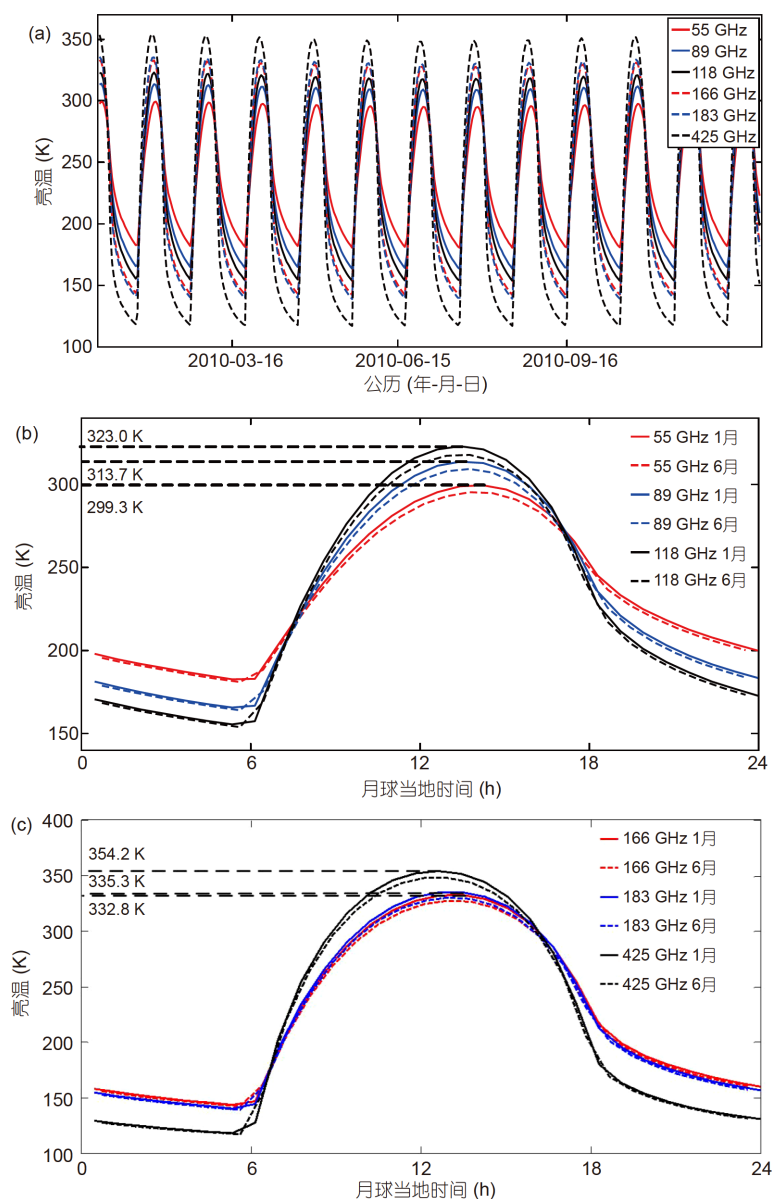


图 4 FY-4M各通道亮度温度. (a) 2010年间月球赤道中心FY-4M各通道亮温; (b) 55, 89, 118 GHz亮温; (c) 166, 183, 425 GHz亮温

Figure 4 Brightness temperature of FY-4M channels. (a) The brightness temperatures of the equator center at FY-4M channels in 2010; (b) the brightness temperature at 55, 89 and 118 GHz; (c) the brightness temperature at 166, 183 and 425 GHz

后,由式(12)可以计算该通道的辐射亮度温度。

图4(a)是月球赤道中心区域2010年FY-4M各毫米波通道的辐射亮度温度。图4(b), (c)是近日点和远日点附近FY-4M各通道亮度温度。近日点处,其55, 89, 118, 166, 183, 425 GHz频率亮温最大值分别为299.3, 313.7, 323.0, 332.8, 335.3, 354.2 K。对应近日点与远日点间的亮温峰值差分别为4.2, 4.6, 5.3, 5.2, 5.0和6.0 K。频率越高,电磁波透射深度越浅,正午时候表面高温的贡献越大,正午亮温越高。而在夜间,月表层温度远低于月壤深层温度,频率越高,夜间亮温更低。此外,毫米波频段亮度温度达到峰值的时间都晚于当地的正午。正午过后,太阳光入射角开始增大,表面的物理温度开始缓慢下降,但仍然高于下面的月壤。在正午过后的一段时间内,浅层月壤的温度仍然会持续上升,使得毫米波亮度温度继续上升。频率越低,到达峰值的时间越晚。

此外,月壤中 TiO_2 含量会影响正切损耗,从而影响

透射深度和亮度温度。由克莱门汀号数据反演得到的月海 TiO_2 一般大于1,式(17a)中,正切损耗随着 TiO_2 的增大而增大,月海的正切损耗一般高于高原。

4 结论

本研究提出了太阳光辐照月表面赤道区域的实时计算模型,用于FY-4M毫米波通道辐射亮度温度的计算与热定标分析。根据克莱门汀数据给出的月表面赤道区域的太阳光反射率,计算实时的月表面日下点位置及其当时的太阳光辐射强度;结合月表面月壤层的热物理特性参数,求解一维热传导方程,得到月球月壤层物理温度廓线。由嫦娥2号对于月表面赤道正午的37 GHz微波亮温数据反演与拟合,得到赤道区域月壤层的正切损耗。依据这些参数与计算,计算了一整年间FY-4M各毫米波通道辐射亮度温度,以用于FY-4M利用稳定的月表面毫米波热辐射进行在轨热辐射定标。

参考文献

- 1 Kieffer H H. Photometric stability of the lunar surface. *Icarus*, 1997, 130: 323–327
- 2 Piddington J, Minnett H. Microwave thermal radiation from the Moon. *Aust J Chem*, 1949, 2: 63–77
- 3 Paige D A, Foote M C, Greenhagen B T, et al. The lunar reconnaissance orbiter diviner lunar radiometer experiment. *Space Sci Rev*, 2010, 150: 125–160
- 4 Vasavada A R, Bandfield J L, Greenhagen B T, et al. Lunar equatorial surface temperatures and regolith properties from the Diviner Lunar Radiometer Experiment. *J Geophys Res Planets*, 2012, 117: E00H18
- 5 Hayne P O, Bandfield J L, Siegler M A, et al. Global regolith thermophysical properties of the Moon from the Diviner Lunar Radiometer Experiment. *J Geophys Res Planets*, 2017, 122: 2371–2400
- 6 Fa W, Jin Y Q. A primary analysis of microwave brightness temperature of lunar surface from Chang-E 1 multi-channel radiometer observation and inversion of regolith layer thickness. *Icarus*, 2010, 207: 605–615
- 7 Jin Y Q, Fa W. The modeling analysis of microwave emission from stratified media of nonuniform lunar cratered terrain surface for Chinese Chang-E 1 Observation. *IEEE Geosci Remote Sens Lett*, 2010, 7: 530–534
- 8 Liu N, Fa W, Jin Y Q J. Brightness temperature of lunar surface for calibration of multichannel millimeter-wave radiometer of geosynchronous FY-4M. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2018, 57: 3055–3063
- 9 Wang Z, Li J, Zhang S, et al. Prelaunch calibration of microwave humidity sounder on China's FY-3A meteorological satellite. *IEEE Geosci Remote Sens Lett*, 2010, 8: 29–33
- 10 Meeus J. *Astronomical Algorithms*. Richmond: Willmann-Bell Inc, 1991. 314–347
- 11 Smith R E, West G S. *Space and Planetary Environment Criteria Guidelines for Use in Space Vehicle Development*. NASA TM 82478, MSFC, Alabama, January 1983
- 12 Mutch T A. *Geology of the Moon: A Stratigraphic View*. Princeton: Princeton University Press, 2000. 26
- 13 Smith D E, Zuber M T, Jackson G B, et al. The lunar orbiter laser altimeter investigation on the lunar reconnaissance orbiter mission. *Space Sci Rev*, 2010, 150: 209–241
- 14 Yu S, Fa W. Thermal conductivity of surficial lunar regolith estimated from Lunar Reconnaissance Orbiter Diviner Radiometer data. *Planet Space Sci*, 2016, 124: 48–61
- 15 Ledlow M J, Burns J O, Gisler G R, et al. Subsurface emissions from Mercury: VLA radio observations at 2 and 6 centimeters. *Astrophys J*, 1992, 384: 640–655
- 16 Hemingway B S, Krupka K M, Robie R A. Heat capacities of the alkali feldspars between 350 and 1000 K from differential scanning calorimetry, the thermodynamic functions of the alkali feldspars from 298.15 to 1400 K, and the reaction quartz + jadeite=anabite. *Am Miner*, 1981, 66: 1202–1215

- 17 Fountain J A, West E A. Thermal conductivity of particulate basalt as a function of density in simulated lunar and Martian environments. *J Geophys Res*, 1970, 75: 4063–4069
- 18 Bandfield J L, Hayne P O, Williams J P, et al. Lunar surface roughness derived from LRO Diviner Radiometer observations. *Icarus*, 2015, 248: 357–372
- 19 Keihm S J. Interpretation of the lunar microwave brightness temperature spectrum: Feasibility of orbital heat flow mapping. *Icarus*, 1984, 60: 568–589
- 20 Jin Y Q. Electromagnetic Scattering Modelling for Quantitative Remote Sensing. Singapore: World Scientific, 1993. 310
- 21 Ulaby F T, Moore R K, Fung A K. Microwave Remote Sensing: Active and Passive, Volume 1: Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry. Massachusetts: Addison-Wesley, 1981. 229–230
- 22 Fang T, Fa W. High frequency thermal emission from the lunar surface and near surface temperature of the Moon from Chang'E-2 microwave radiometer. *Icarus*, 2014, 232: 34–53
- 23 Fa W, Wicczorek M A. Regolith thickness over the lunar nearside: Results from Earth-based 70-cm Arecibo radar observations. *Icarus*, 2012, 218: 771–787
- 24 Huang Q, Wicczorek M A. Density and porosity of the lunar crust from gravity and topography. *J Geophys Res Planets*, 2012, 117: E05003
- 25 Lucey P G, Blewett D T, Jolliff B L. Lunar iron and titanium abundance algorithms based on final processing of Clementine ultraviolet-visible images. *J Geophys Res*, 2000, 105: 20297–20305
- 26 Jin Y Q, Fa W Z. Theoretical Methods and Applications in Planetary Microwave Remote Sensing (in Chinese). Beijing: Science Press, 2019. 200–400 [金亚秋, 法文哲. 行星微波遥感的理论方法与应用. 北京: 科学出版社, 2019. 200–400]

Summary for “基于月表面赤道区域实时辐射亮度温度的风云4号毫米波热辐射定标”

Calibration of a multichannel millimeter wave radiometer of FY-4M based on the real-time brightness temperature along the lunar equator

Niutao Liu & Yaqiu Jin^{*}

Key Laboratory of Information Science of Electromagnetic Waves, Ministry of Education, Fudan University, Shanghai 200433, China

^{*} Corresponding author, E-mail: yqjin@fudan.edu.cn

Chinese FY-4M is a new-generation geosynchronous satellite, which will be launched in the near future. It is equipped with multichannel millimeter wave radiometers, which operate in the range of 50–430 GHz. This satellite will increase revisit time and significantly improve the monitoring and weather variation forecasting capabilities. Calibration is an important issue for the quantitative analysis and application of brightness temperature observations. Calibration is first conducted in a thermal/vacuum chamber prior to the launch. A hot target onboard the satellite is used to provide relative irradiance for onboard calibration, and the cold cosmos is used as a cold target. However, complicated space conditions may result in many uncertainties and instabilities during calibration. A new method is required to evaluate the performance of the instruments during long-term operation. Because of the non-existence of atmospheric and other environmental interferences, the lunar surface maintains its physical and chemical stability. Thus, it is an ideal source for thermal calibration.

The earliest ground-based observation of thermal microwave emission of the Moon dates back to the early 1940s. At that time, the temperature profile and dielectric constant of the lunar surface had not been studied in detail. Thus, interpreting the observed microwave brightness temperature was difficult. In recent years, many studies of the lunar surface have been performed owing to the advances in satellite-borne remote sensing programs. The Diviner Lunar Radiometer Experiment onboard the Lunar Reconnaissance Orbiter investigated the global solar reflectance and mid-IR irradiance. These infrared measurements contribute to the quantitative description of the thermophysical properties of the superficial lunar regolith media. Chinese probes, Chang'e-1 and Chang'e-2, carried four-channel microwave radiometers to observe the microwave thermal emission of the lunar regolith media, which may provide information on superficial dielectric properties of the lunar surface. These advances created a foundation for the millimeter channel observation of the lunar surface.

In this study, a real-time model of the sub-solar position and total irradiance of the lunar surface was developed. The altitude of FY-4M is 35800 km. The distance between the Moon and the Earth is between 363400 km (perigee) and 405400 km (apogee). This large distance enables nadir observation from the FY-4M radiometer toward the center region of the lunar equator. The observation beam angle ranges from 0.097° to 0.027°. The diameters of the observation regions at different channels are 750 km (55 GHz), 480 km (89, 118 GHz), 300 km (166, 183 GHz), and 210 km (425 GHz) at apogee. Based on the surface albedo derived from the Clementine data and the constrained thermophysical parameters of the lunar regolith media obtained from the Diviner infrared brightness temperature, the one-dimensional thermal transfer equation is solved to obtain the physical temperature profile of the lunar regolith media. Using the 37-GHz brightness temperature from Chang'e-2 observations, the loss tangent of the regolith media is inverted. Using the fluctuation dissipation theorem, the brightness temperature of the lunar surface in FY-4M millimeter channels is calculated. The thermophysical profile of the regolith can be validated using the Diviner infrared brightness temperature data. The calculated temperature at a depth of 1.3 m is consistent with the measurements obtained in the Apollo heat flow experiment. The surface temperature and millimeter brightness temperature on the lunar equator (0°N, 0°E) during the entire year of 2010 are simulated. The peak value of the brightness temperature is attained after that of the surface physical temperature peak value. In the low frequency channel, the penetration depth increases, its peak value is typically small, and the peak appears later. This study thus presents an effective model for FY-4M calibration and data analysis.

FY-4M calibration, lunar millimeter brightness temperature, heat conductivity equation, real-time lunar surface temperature

doi: [10.1360/TB-2019-0200](https://doi.org/10.1360/TB-2019-0200)