论文

基于月球实时加权平均辐射亮度温度的星载毫米波湿度仪的定标

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

* 通讯作者, E-mail: yqjin@fudan.edu.cn

收稿日期: 2020-06-01; 收修改稿日期: 2020-10-19; 接受日期: 2020-11-10; 网络版发表日期: 2021-01-29

摘要 太空环境的变化会给在轨运行的星载有效载荷定标造成一定的不确定性, 因此需要一个长期稳定可靠的定标辐射源. 2005年, 美国NOAA-18卫星搭载了多类微波辐射有效载荷, 其中包括工作在毫米波频段的微波湿度仪(MHS). 卫星在轨运行中, 对冷空观测时MHS的深空视野(deep space view, DSV)有时会观测到月球. 由于没有大气与多变的环境影响, 稳定的月表面微波辐射是一个可利用的定标辐射源. 文章用实时的太阳辐射强度和日下点位置, 基于月球勘测轨道飞行器LRO Diviner红外辐射亮温数据反演的热物性参数, 由一维热传导方程计算月球正面的月壤温度廓线; 结合“嫦娥二号”微波辐射亮温数据反演得到的月壤层正切损耗, 用辐射传输积分方程仿真计算了2011年内89、157、183GHz频段月球正面的加权平均辐射亮温. 将月球视为一个圆盘目标, 而非一个点目标, 用仿真的月球正面辐射亮温来修正拟合深空视野中实际的辐射强度半峰全宽(full width at half maximum, FWHM). 仿真分析了卫星与月球的距离、月相、辐射计的FWHM对数据拟合的影响, 将修正后的辐射亮温数据与仿真结果进行比较. 文章提出了月球正面实时的加权平均辐射亮温模型, 为在轨气象卫星微波辐射计的在轨定标技术提供了一个新设计方案.

关键词 微波湿度仪, 辐射定标, 月球热辐射, FWHM

1 引言

2005年, 美国发射的NOAA-18卫星上搭载有多类微波辐射有效载荷, 其中包括工作在毫米波频段的微波湿度仪(MHS). 卫星在轨运行时太空环境造成的影响会导致辐射计有效载荷的系统辐射响应发生变化, 因此需要在轨再定标(Burgdorf等, 2019). 卫星有效载荷通常携带在轨内定标源, 但辐射亮温数据的定标与验证(calibration/validation)始终是定量遥感的关键问

题. 月球没有大气, 也没有诸如水文、生物等环境因素的影响, 其物理与化学特性能保持长期的稳定(柳钮滔和金亚秋, 2020). 在太阳光照下, 月表面的热辐射呈现周期性的变化. 因此, 月球辐射可以作为一个稳定可靠的热辐射定标源(Liu等, 2018).

中国“嫦娥一号”在世界上第一次对月球正面和背面进行了星载4通道微波热辐射的遥感观测(宫晓蕙和金亚秋, 2011). 月壤层具有非均匀的密度与物理温度廓线分布, 由于不同频率的微波透射深度能力不同, 各

中文引用格式: 柳钮滔, 金亚秋. 2021. 基于月球实时加权平均辐射亮度温度的星载毫米波湿度仪的定标. 中国科学: 地球科学, 51(4): 621–631, doi: 10.1360/SSTe-2020-0136

英文引用格式: Liu N, Jin Y. 2021. Calibration of the space-borne microwave humidity sounder based on real-time thermal emission from lunar surface. Science China Earth Sciences, 64(3): 494–502, <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9701-1>

频率通道的昼夜微波辐射亮温是不同的, 各辐射亮温峰值也存在明显的时相偏移(Wang等, 2008; 李芸等, 2009).

多年来, 通过月壤样本的测试, 月壤层热物理特征参数化表征(Hayne等, 2017), 特别是对月球勘测轨道飞行器(LRO)的Diviner红外探测数据的分析, 为月壤的密度分布、热容、导热率等热物理参数, 月壤温度分布, 以及月球表面特征等提供了相关的参数化模型. 中国“嫦娥一号”、“嫦娥二号”卫星搭载的微波辐射计又提供了4通道的微波辐射亮温数据, 具有透射深度的微波辐射能够用于研究月壤层的介电常数等物理特性(Liu等, 2018; 柳钮滔和金亚秋, 2020; Liu和Jin, 2020a).

根据在轨运行过程中NOAA-18 MHS的对月观测数据, Burgdorf等(2019)将月球作为一个点目标, 通过拟合得到MHS各通道实际观测过程中天线辐射方向图的半峰全宽(full width at half maximum, FWHM), 基于MHS观测的计数点值、波束效率、FWHM和单位谱辐射强度对应的计数点数, 计算了89、157和183GHz的月表面平均辐射亮温随月相的变化(Burgdorf等, 2019).

在深空视野(deep space view, DSV)中月球是逐渐进入与逐渐离开的, 应当将月球视为一个有大小的圆盘目标, 而非一个点目标. 本文把月球正面剖分为 30×30 块子区域, 每块区域经纬度跨度 $6^\circ \times 6^\circ$, 计算了实时的日月距离和太阳辐射强度、日下点位置, 由Clementine 750nm反射率数据, 能得到归一化的月表面反照率 A_0 , 并作为一维热传导方程的上边界条件的输入参数(Vasavada等, 2012). 用时域有限差分法(finite-difference time-domain, FDTD)求解一维热传导方程, 得到月表面每块子区域的温度廓线及其随月相的变化. 根据每块区域相对于卫星的辐射角度, 用辐射传输积分方程计算出辐射亮度温度. 根据MHS的天线响应函数及其FWHM, 计算出月球位于DSV中心时的加权平均辐射亮温及其随月相的变化. 以2011年为例, 分析了地球位于近日点和远日点附近时仿真的月球平均辐射亮温的差别并与MHS观测数据对比. 此外, 本文仿真了DSV扫过月球时的天线温度变化, 用于修正由观测数据拟合的FWHM (Liu和Jin, 2020b), 并讨论了星月距离、月相、各个通道的FWHM分别对数据拟合的FWHM产生的影响.

2 实时的月球正面温度模型

2.1 实时的太阳辐射强度和日下点

按照VSOP82行星理论和Chapront ELP-2000/82月球理论, 将日期写为儒略日(Julian day)的形式, Meeus (1991)拟合了日月距离以及日下点位置随时间的变化. 从公元前4712年开始以连续的天数来表示时间, 输入拟合的多项式, 可以计算得到日下点位置、日月距离等. 图1a中给出了2011年间日月距离的变化, 与太阳的距离决定了月球表面的太阳辐射强度(total solar intensity, TSI), 距离为1AU (astronomical unit)时, TSI的平均值为 1371 W m^{-2} (Racca, 1995), 1AU是地球和太阳之间的平均距离, 假设月球和太阳之间的距离为 d_{ms} (单位为AU), 月球表面实时的TSI为(金亚秋和法文哲, 2019)

$$TSI = 1371 / d_{\text{ms}}^2. \quad (1)$$

图1b中给出了2011年间太阳辐射强度的变化. 由于月球自转轴存在微小的倾斜, 日下点的纬度会在南北纬 1.54° 之间变化(Mutch, 2000), 这会在高纬度的极区产生明显的季节性温度变化. 图1c、1d给出了2011年间日下点经纬度的变化.

月表面太阳光的局部入射角 θ_i 由日下点位置、目标区域经纬度与月表面地形决定. 本文将月球正面剖分成 30×30 个子区域, 每块区域经纬度跨度 $6^\circ \times 6^\circ$, 如图2所示. 每块区域都视为平坦面, 即不考虑每一块区域内的起伏地形. 假设日下点经度 λ , 纬度 φ , 目标区域中心经度 λ_0 , 纬度 φ_0 , 月球视为圆球, 其半径1737.4km. 建立月球全局坐标系, 其中 $\mathbf{z}$ 表示从月心指向北极的单位向量, $\mathbf{x}$ 表示从月心指向月面经纬度都为 0° 处的单位向量.

$\mathbf{z}_i$ 是从月心指向目标点的单位向量, 也就是每块平坦月表面的法向量(Liu和Jin, 2020a):

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

从月心指向日下点的单位向量可以写为

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

$\mathbf{z}_i$ 和 $\mathbf{s}$ 的夹角就是该区域太阳光照的局部入射角:

$$\cos \theta_i = \mathbf{z}_i \cdot \mathbf{s}. \quad (4)$$

2.2 月球正面实时温度

根据月壤样本的测量结果, 浅表层月壤导热率在

图 1 实时信息

(a) 日月距离变化; (b) 太阳辐射强度变化; (c) 日下点经度; (d) 日下点纬度

图 2 月球正面区域剖分

$9 \times 10^{-4} \sim 1.5 \times 10^{-3} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, 而深层月壤导热率约为 $1 \times 10^{-2} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (Hayne等, 2017), 月壤的导热率非常小, 在绝大部分地区, 月壤的横向温度梯度也非常小, 所以横向传导的热量几乎可以忽略, 可以用一维热传导方程来模拟月壤层的温度变化(Yu和Fa, 2016):

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

其中 C 是热容, 单位是 $\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$; K 是导热率, 单位是 $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$; $\rho(z)$ 是月壤密度廓线, 单位是 kg m^{-3} ; $T(z)$ 是月壤物理温度廓线. 热传导方程(5)的左侧表示单位体积的物体在一个时间步长内由于温度改变所需要的能量, 方程右侧表示单位体积的物体在单位时间内由于纵向温差所传导的能量.

Apollo 11、12、14~17任务中采集到的月壤样本给出了月壤密度的变化范围(Heiken等, 1991), 在此范围内, Hayne等(2017)根据Diviner红外亮温数据, 拟合了月壤的密度廓线:

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

其中 $\rho_s = 1100 \text{ kg m}^{-3}$, $\rho_d = 1800 \text{ kg m}^{-3}$, H 被设为 6 cm (Vasavada等, 2012).

从月壤样本热容的实测值可以发现热容主要与温度有关(Ledlow等, 1992; Hemingway等, 1981), 月壤的热容关于温度的拟合公式可以写为(Hayne等, 2017)

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

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

由于月表夜间温度主要来自深处的传导热流来维持, 月壤导热率对月表夜间温度影响巨大, 月壤导热

率 $K(T)$ 由固体导热率和辐射导热率两部分组成(Hayne等, 2017; Fountain和West, 1970):

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

其中辐射传输参数 χ 取为2.7, 固体导热率 K_c 为(Hayne等, 2017)

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

其中 $K_s = 7.4 \times 10^{-4} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 是表面的导热率, $K_d = 3.4 \times 10^{-3} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 是深层月壤的导热率.

月表面白天的温度主要取决于太阳光照射, 热传导方程的边界条件可以写为(Yu和Fa, 2016)

$$K(z, T) \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = TSI(1-A)\cos^+\theta_i - e\sigma_0 T_s^4 - J_0, \quad (10a)$$

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

式(1)给出了实时的 TSI , θ_i 是太阳光的入射角. 这里月球被视为一个圆球, 在夜间, $\mathbf{z}_i \cdot \mathbf{s} < 0$, $\cos^+\theta_i$ 为0. 在白天, 每块子区域的实时太阳光入射角可以由式(4)计算得到, 纬度越高, 入射角越大, 温度越低. 月表面的宽频段半球平均辐射率 e 设为0.95 (Bandfield等, 2015), T_s 是月表面温度, J_0 是内部热流, 这里设为 0 W m^{-2} , σ_0 为Boltzmann常数($5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$).

月表面反照率与太阳光入射角 θ_i 有关, 其经验公式可写为(Keihm, 1984)

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

其中 A_0 是归一化后的月表面太阳光反照率, 可以由Clementine 750nm反射率数据除以1.3得到(Vasavada等, 2012), 这里的 A_0 选取每块子区域内的平均值, 输入上边界条件来求解表面温度. 参数 a 和 b 是两个经验参数, 分别为0.06和0.25 (Hayne等, 2017).

在计算月壤层温度廓线 $T(z)$ 分布时, 首先从上边界条件中计算出表面温度 T_s , 式(10a)是 T_s 的一元四次方程, 式(10a)左侧的表面导热率是 T_s 的三次函数, 表面的热传导与剖分后紧邻表面的第二层剖分层的温度有关, 这里可以用Newton迭代法求解 T_s . 接着由热传导方程式(5)模拟热传导的过程, 计算深处月壤的温度.

本文调用2000年1月1日~2011年12月31日的月表面日下点位置和日月距离, 来计算实时的太阳辐射强

度和每个区域的太阳光入射角, 求解出月壤温度廓线 $T(z)$ 随时间的变化. 计算得到的表面温度和月壤深处温度分别可以用Diviner红外亮温数据和Apollo热流实验中测量得到的深处温度数据来验证(Liu等, 2018), 以确保本文的物理温度廓线可以用于微波辐射亮温的计算.

图3仿真了中心经度为 3°W , 中心纬度分别为 3°N 、 33°N 和 63°N 的子区域在2011年间的表面温度物理变化. 在2011年1月, 这3个区域的最高温度分别是391.1、372.5和300K, 而在2011年7月, 这3个不同纬度的区域最高温度分别为384.7、364.5和289.5K, 由图1可知, 7月时地球位于远日点附近, 太阳辐射强度小于1月, 所以7月的最高温度小于1月. 1月的日下点位于北半球, 7月的日下点位于南半球, 纬度越高的地方, 日下点位置的影响越明显(Liu和Jin, 2020a).

3 实时辐射亮度温度

微波辐射能够穿透一定深度的月壤, 月壤可以视为一层非均匀耗散介质, 基于辐射传输积分方程(Jin, 1993; Ulaby等, 1981), 观测得到的辐射亮温可以写为

$$T_B(\theta_0) = [1 - \Gamma(\theta_0)] \int_0^\infty \sec\theta_1 \kappa_a(z) T(z) e^{-\int_0^z \kappa_a(z') \sec\theta_1 dz'} dz, \quad (12)$$

其中 θ_0 为辐射角, θ_1 是月壤中的折射角, θ_0 和 θ_1 满足Snell定律. 月球在围绕地球运行的过程中, 总是以其正面朝向地球, 在计算每个子区域到卫星的辐射角 θ_0 时, 忽略了天平动的影响.

月表面起伏的粗糙度会影响表面反射率. 由粗糙面散射的Kirchhoff大尺度切平面近似(KA)、小扰动近似(SPA)或者电磁场积分方程法(IEM), 可得到解析的散射系数, 用来计算月表面的反射率和辐射率(金亚秋和法文哲, 2019). He等(2013)用电磁场矩量法计算粗糙月表面辐射率, 金亚秋和法文哲(2010)用三角面片剖分月表面陨石坑地形, 计算了每块面片的菲涅尔(Fresnel)反射率和月表面地形的平均辐射率, 并与平坦月表面的辐射率比较, 发现在微波辐射观测的数十公里的空间分辨率条件下实际月表面形对平均微波亮温的影响小于1K. 在垂直入射时, 电磁波的回波能量主要集中于镜像方向, 由于实际月表面准确的粗糙度

图3 2011年不同纬度处的表面温度
经度357°

未知, 这里用菲涅尔反射率来近似表示观测区域内的平均值. Liu等(2018)证明菲涅尔反射率与实际观测数据能取得一致.

假设月球赤道中心(0°N, 0°E)指向卫星, 月壤的反射率 $\Gamma(\theta_0)$ (水平和垂直反射率的平均值)可以写为

$$\Gamma(\theta_0) = (\Gamma_h(\theta_0) + \Gamma_v(\theta_0)) / 2, \quad (13)$$

其中极化反射率为

$$\begin{aligned} \Gamma_h(\theta_0) &= \left(\frac{\sqrt{\varepsilon_0} \cos \theta_0 - \sqrt{\varepsilon_s} \cos \theta_1}{\sqrt{\varepsilon_0} \cos \theta_0 + \sqrt{\varepsilon_s} \cos \theta_1} \right)^2, \\ \Gamma_v(\theta_0) &= \left(\frac{\sqrt{\varepsilon_s} \cos \theta_0 - \sqrt{\varepsilon_0} \cos \theta_1}{\sqrt{\varepsilon_s} \cos \theta_0 + \sqrt{\varepsilon_0} \cos \theta_1} \right)^2, \end{aligned} \quad (14)$$

ε_s 是表面($z=0$)相对介电常数, $\varepsilon_0=1$ 是真空的相对介电常数.

月壤的吸收系数 κ_a 写为(Ulaby等, 1981; Jin, 1993)

$$\kappa_a = \frac{2\pi\nu\varepsilon''(z)}{c\sqrt{\varepsilon'(z)}}, \quad (15)$$

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

金亚秋和法文哲(2010)给出了准晶体近似-相干势(QCA-CP)下的等效介电常数和强起伏理论一阶近似下的等效介电常数. 作为混合物的月壤的等效介电常数与其孔隙度、颗粒分布等参数有关. Fa和Wieczorek(2012)拟合了月壤样本介电常数实部和正切损耗与铁钛含量的关系, Liu等(2018)指出采样、测量过程中对月壤结构、孔隙度的改变可能导致了实测的正切损耗变化范围过大, 使得仿真得到的微波亮温与实测值差别太大. 相比于正切损耗, 介电常数实部对微波亮温

的影响相对较小. 由于月壤孔隙度、颗粒分布等参数都是未知的, 这里用全月球的铁钛含量来拟合介电常数实部.

根据Maxwell-Garnett公式, 拟合月壤孔隙度 $n(z)$ 、颗粒密度 G 与介电常数实部 $\varepsilon'(z)$ 的关系为(Fa和Wieczorek, 2012)

$$\frac{1}{\langle \rho \rangle} \cdot \frac{\langle \varepsilon \rangle - 1}{\langle \varepsilon \rangle + 2} = \frac{1}{(1 - n(z))G} \cdot \frac{\varepsilon'(z) - 1}{\varepsilon'(z) + 2}, \quad (16)$$

其中 $\langle \varepsilon \rangle = 2.75$, $\langle \rho \rangle = 1.7 \text{ g cm}^{-3}$, 月壤颗粒的密度 G (kg m^{-3})用月壤样本的矿物含量来拟合(Huang和Wieczorek, 2012):

$$G = 27.3\text{FeO} + 11\text{TiO}_2 + 2773, \quad (17)$$

其中FeO和TiO₂表示氧化铁和二氧化钛的质量百分比, 可以由Clementine数据计算得到(Lucey等, 2000). 月壤孔隙度廓线 $n(z)$ 由不同深度处月壤样本测量值拟合得到, 可以写为(Fa和Wieczorek, 2012)

$$n(z) = 1 - \frac{1.919}{G_0} \frac{z + 0.122}{z + 0.18}, \quad (18)$$

其中 $G_0 = 3.1 \text{ g cm}^{-3}$.

月壤介质的正切损耗决定了电磁波的透射深度, 微波辐射亮温是透射过程中月壤物理温度加权求和的结果. Liu等(2018)用“嫦娥二号”测量得到月表面赤道正午37GHz微波辐射亮温的数据, 反演了该区域的正切损耗分布, 拟合其与TiO₂含量的关系, 并用其他纬度的数据验证了拟合结果. 拟合得到的正切损耗公式为

$$\tan\delta = 3.516 \times 10^{-4} \text{TiO}_2 + 0.0087, \text{ TiO}_2 > 1\%, \quad (19a)$$

$$\tan\delta = -8.945 \times 10^{-5} \text{TiO}_2 + 0.0097, \text{ TiO}_2 < 1\%. \quad (19b)$$

这里用每块子区域内平均的铁钛含量来计算该区域的介电常数和正切损耗. 拟合过程中正切损耗的均方根误差为0.001, 对应辐射亮温的不确定性小于3.2K (183GHz)和3.8K (89GHz) (Liu等, 2018), 计算月球平均微波亮温时, 这项误差会在一定程度上被抵消, 另外一项可能的误差是“嫦娥二号”微波数据的定标误差, 据报道在地面定标实验中, “嫦娥二号”微波辐射计误差的均方根在0.5K以内(Wang等, 2010).

图2中同一纬度的子区域面积大小相同, 但每块子区域在卫星视野中的大小 M_i 与其朝向有关, 这决定了

每块子区域辐射亮温的贡献。通过积分可以写出子区域*i*在卫星视野中的大小 M_i (Liu和Jin, 2020b):

$$\begin{aligned} M_i &= \frac{R^2}{D^2} \int_{\varphi_{i2}}^{\varphi_{i1}} (\sin \lambda_{i2} - \sin \lambda_{i1}) \cos \varphi \cdot d(\sin \varphi) \\ &= \frac{R^2}{D^2} \cdot |\sin \lambda_{i2} - \sin \lambda_{i1}| \\ &\quad \cdot \left[\frac{1}{2}(\varphi_{i1} - \varphi_{i2}) + \frac{1}{4}(\sin(2\varphi_{i1}) - \sin(2\varphi_{i2})) \right], \end{aligned} \quad (20)$$

其中 $R=1737.4\text{km}$ 是月球半径, D 是卫星和月球之间的距离, λ_{i1} 和 λ_{i2} 是区域*i*左右边界的经度, φ_{i1} 和 φ_{i2} 是区域*i*上下边界的纬度, 单位为弧度。

月球正面加权平均辐射亮温可以写为

$$\bar{T}_{\text{BW}} = \frac{\sum_i T_{Bi}(\theta_{0i}) G_i \cdot M_i}{\sum_i G_i \cdot M_i}, \quad (21)$$

其中 $T_{Bi}(\theta_{0i})$ 是第*i*块区域的辐射亮温, θ_{0i} 是该区域的观测角度, G_i 是对应的天线响应函数, Burgdorf等(2019)用Gauss函数来表示 G_i , 可以写为

$$G_i = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x_i^2 + y_i^2}{2\sigma^2}}, \quad (22)$$

其中

$$\sigma = \frac{\text{FWHM}}{2\sqrt{2\ln(2)}}, \quad (23)$$

其中 σ 的单位是弧度, 当月球正面的中心和DSV的中心重叠时, 有

$$x_i = \frac{R}{D} \cdot \cos\left(\frac{\varphi_{i1} + \varphi_{i2}}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\lambda_{i1} + \lambda_{i2}}{2}\right), \quad (24a)$$

$$y_i = \frac{R}{D} \cdot \sin\left(\frac{\varphi_{i1} + \varphi_{i2}}{2}\right). \quad (24b)$$

仿真 $\bar{T}_{\text{BW}}$ 时使用Burgdorf等(2019)拟合得到的89、157和183GHz的FWHM (分别为 1.2° 、 1.09° 和 1.25°)来计算式(23)中的 σ 。

图4给出了2011年月球正面的89、157和183GHz加权平均辐射亮温。频率越高, 透射深度就越小, 浅表层温度对辐射亮温的影响更大。这样, 白天的辐射亮温峰值更高, 而夜间的辐射亮温更低。由于157和183GHz的频率相差较小, 两者的辐射亮温相差不大, 183GHz的最高的辐射亮温比157GHz高了约2.5K, 而89GHz的辐射亮温峰值比157GHz低了约13K。

图4 2011年月球正面加权平均亮温

在计算图2月表面剖分后的每块子区域辐射亮温时, 没有考虑各子区域内部地形起伏。由于每块子区域跨度非常大, 内部也可能包含了较为复杂的地形变化, 为此Liu和Jin(2020b)根据月表数字高程模型(DEM), 计算了每块子区域内部地形起伏对辐射率的影响, 发现这样计算的地形对平均亮度温度的影响并不大, 小于1K。

4 微波湿度仪亮温定标

4.1 FWHM和亮温数据修正

Burgdorf等(2019)用MHS的观测数据推算月球正面的加权平均亮度温度, 他们假设天线的响应函数为Gauss函数, 当DSV扫过被当作点目标的月球时, 计数点的变化与Gauss函数一致, 月球中心与DSV中心重合时的观测结果用于计算月球的谱辐射强度, 可以写为

$$B_v^{\text{Moon}} = \frac{S}{G_A \eta F_{ch}} + B_v^{\text{CMB}}, \quad (25)$$

其中 s 是月球出现在DSV中心时的计数点与宇宙背景计数点的差, G_A 是单位谱辐射强度对应的计数点数, η 是天线效率, 通过地面试验获得; B_v^{CMB} 是宇宙背景的微波谱辐射强度, 由Planck函数可以将月球的谱辐射强度转化为辐射亮温。NOAA-18 MHS观测的月相范围为 $-80^\circ \sim 50^\circ$ 。 F_{ch} 是月球覆盖区域天线响应函数的积分, 可以写为(Burgdorf等, 2019)

$$\begin{aligned} F_{ch} &= \frac{1}{2\pi\sigma^2} \int_0^{r_{\text{Moon}}} \int_0^{2\pi} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} r dr d\omega \\ &= 1 - e^{-4\ln 2 \cdot r_{\text{Moon}}^2 / \text{FWHM}_{ch}^2}, \end{aligned} \quad (26)$$

其中 r_{Moon} 是月球半径的张角, 可以写为 R/D , R 是月球的半径, D 是卫星和月球之间的距离。Burgdorf等

(2019)用MHS观测到的计数点数据拟合出每个通道的FWHM, 这里将由数据直接拟合得到的结果写为 FWHM_{ch} .

F_{ch} 对于式(25)中月球谱辐射强度和辐射亮温的计算是一个关键的参数. Burgdorf等(2019)把月球当作一个点目标, 也就是用计数点曲线的形状拟合FWHM, 这会使得拟合的FWHM大于实际的FWHM. Burgdorf等(2019)拟合得到的89、157和183GHz的FWHM分别为 1.2° 、 1.09° 和 1.25° .

我们仿真了月球正面各个子区域的辐射亮温. 通过模拟DSV扫描经过月球过程中的天线温度, 来比较每个通道实际的FWHM, 以及由计数点拟合的FWHM之间的差别. 式(25)中 $s/(G_A \cdot \eta)$ 表示到达辐射计的月球谱辐射强度(减去宇宙背景微波辐射), 其中 $G_A \cdot \eta$ 是常数. 根据Rayleigh-Jeans定理(Ulaby和Long, 2014), $s/(G_A \cdot \eta)$ 正比于天线温度, Liu和Jin(2020b)通过模拟DSV扫描经过月球过程中的天线温度, 来研究实际的FWHM和观测到的FWHM之间的联系. 天线温度可以写为(Liu和Jin, 2020b)

$$T_a(\phi) = \iint_{A_{\text{Moon}}} (T_B(x, y) - T_{BC}) \cdot G(x, y, \phi) dx dy. \quad (27)$$

上式与 s 的定义一样, 需要减去宇宙背景微波辐射 T_{BC} , 所以月球覆盖范围之外的区域没有贡献. 这里 T_{BC} 设为 2.73K , A_{Moon} 表示DSV内月球覆盖的区域面积, ϕ 是卫星到月球中心和DSV中心的张角, 单位是弧度, 将式(27)写成离散形式为

$$T_a(\phi) = \sum_i (T_{B_i}(\theta_{0i}) - T_{BC}) \cdot G_{id}(\phi) \cdot M_i. \quad (28)$$

天线响应函数可以写为

$$G_{id}(\phi) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x_i - \phi)^2 + y_i^2}{2\sigma^2}}, \quad (29)$$

其中 σ 的定义在式(23)中给出, x_i 和 y_i 在式(24)中给出. 通过改变式(29)中的夹角 ϕ 来模拟DSV扫描经过月球的过程, 如图5所示, 在月球进入DSV之前, 天线温度保持平稳, 当月球边缘部分刚进入DSV时, 天线温度就开始缓慢上升, 随着月球靠近DSV的中心, 天线温度不断上升, 直到月球出现在DSV中心附近, 天线温度达到峰值, 随后下降. 由于月球是一个拓展目标而不是一个点目标, 月球边缘刚进入DSV时天线温度就开始变化, 所

图5 DSV扫过月球时的天线温度

以Burgdorf把月球作为一个点拟合的FWHM大于实际的FWHM. MHS几个通道的FWHM都小于 2° , ϕ 在 $\pm 1^\circ$ 范围内变化时, 就能测量出仿真数据的FWHM, 所以这里假设在DSV扫描经过月球的过程中每个区域的辐射角 θ_{0i} 和亮度温度 T_{B_i} 均不改变.

假设天线响应函数是一个二维Gauss函数(Burgdorf等, 2019), 给Gauss分布设置一个FWHM, 记为 FWHM_{ch}^c . 也就是真实的FWHM, 由MHS数据拟合的FWHM记为 FWHM_{ch} . 由式(28)计算得到当DSV扫描经过月球中心过程中 $T_a(\phi)$ 随 ϕ 的变化, 可以测量出仿真数据的FWHM. 用遍历法计算出能够使得仿真数据测量的FWHM与由MHS数据拟合的FWHM相同时的 FWHM_{ch}^c , 也就是辐射计真实的FWHM. Liu和Jin(2020b)给出了89、157和183GHz三个通道修正后的 FWHM_{ch}^c 分别为 1.162° 、 1.046° 和 1.213° , 均小于Burgdorf等(2019)的FWHM.

式(25)用MHS计数值计算得到谱辐射强度, 由Planck函数可以得到月球平均微波亮温. 根据Rayleigh-Jeans定理, 用MHS观测到的计数值计算得到的月球谱辐射强度正比于微波亮温, 也就是式(25)中的计数点 s 正比于月球微波亮温, FWHM的修正仅仅改变式(25)分母上的 F_{ch} , 对式(25)中月球谱辐射强度有一个线性的影响, 也就是对微波亮温有一个线性的影响, 这里直接对微波亮温进行修正(Liu和Jin, 2020b):

$$T_B^c = (T_B^M - T_{BC}) \cdot \frac{F_{ch}}{F_{ch}^c} + T_{BC}, \quad (30)$$

其中 T_B^M 是Burgdorf等人计算得到的平均亮温数据, 将由MHS数据拟合的 FWHM_{ch} 代入式(26)可以得到 F_{ch} , 而 F_{ch}^c 可以由 FWHM_{ch}^c 和式(26)计算得到.

由MHS观测数据推导月球平均亮度温度的困难在于月球直径张角远小于DSV的张角. MHS观测到的计数点值取决于DSV的天线响应函数(FWHM)和月球在DSV中的位置等因素. Burgdorf等人通过DSV指向的计算和相邻通道计数值的比较, 找到了月球出现在DSV中心的时刻, 拟合得到的FWHM的偏差影响式(25)中 F_{ch} 的计算. MHS计数点 s 取决于辐射计真实的FWHM (不受拟合得到的FWHM的影响), 所以FWHM的偏差对式(25)计算得到的月球谱辐射强度影响较大, 以89GHz的 $FWHM_{ch}=1.2^\circ$ 和 $FWHM_{ch}^c=1.16^\circ$ 为例, 假设卫星和月球的距离为380000km, 对应的 $F_{ch}=0.1238$ 和 $F_{ch}^c=0.1319$, $F_{ch}/F_{ch}^c=0.9386$, 由式(30)可得修正后的亮温比原来的亮温低了约6%.

在加权平均亮温的仿真计算中, 式(21)分子上的天线温度(对应计数点 s)和分母上的 F_{ch} 都会受到Gauss响应函数真实的FWHM的影响, FWHM的微小变化使得式(21)的分子分母同时改变, 作用相互抵消. 并且, 辐射计的FWHM远大于月球直径的张角, 所以FWHM的偏差对仿真得到的 T_{BW} 影响可以忽略, 以89GHz的加权平均亮温为例, 仿真中取 $FWHM=1.2^\circ$ 和 $FWHM=1.16^\circ$ 对 T_{BW} 的影响不大于0.1K (Liu和Jin, 2020b).

4.2 星月距离的影响

基于Burgdorf等人由MHS观测数据拟合得到的 $FWHM_{ch}$, Liu和Jin(2020b)反推了辐射计实际的 $FWHM_{ch}^c$, 他们发现卫星和月球之间的距离 D 会对修正的 $FWHM_{ch}^c$ 产生影响, 这里以89GHz的月球亮度温度为例, 太阳辐射强度设为 $TSI=137W\ m^{-2}$, 在89GHz的加权平均亮温达到峰值时, DSV扫过月球, Burgdorf等(2019)由观测数据拟合到的 $FWHM_{ch}=1.2^\circ$, 假设星月距离在364500~405000km范围内变化, 图6给

图6 $FWHM_{ch}-FWHM_{ch}^c$ 与星月距离的关系

出了 $FWHM_{ch}-FWHM_{ch}^c$ 随距离 D 的变化关系.

Burgdorf等(2019)反演得到89和183GHz亮温的最大值分别为288和303K, 假设卫星到月球的距离不同, 修正后的 $FWHM_{ch}^c$ 也不一样, 这会对最后观测数据的修正产生影响, 表1给出了不同星月距离下反推得到的 $FWHM_{ch}^c$ 和修正后的89、183GHz亮温峰值数据, 星月距离对89和183GHz辐射亮温峰值修正的影响最大约为3K.

图7a给出了2011年1月和7月间仿真的89GHz辐射亮温, 与修正后的MHS观测亮温对比(Liu和Jin, 2020b), 仿真得到的89GHz辐射亮温峰值在264.2~268.3K, 仿真与观测数据一致. 图7c中仿真得到的183GHz辐射亮温峰值在279.3~283.8K, 与修正后的MHS观测亮温数据较为一致. 而修正后的157GHz辐射亮温数据峰值却远低于仿真结果, 如图7b所示.

4.3 月相的影响

Liu和Jin(2020b)发现用不同月相的辐射亮温分布反推得到的 $FWHM_{ch}^c$ 也是不同的. 以89GHz为例, 假设星月距离为380000km, 图8给出了 $FWHM_{ch}-FWHM_{ch}^c$ 随月相的变化关系, Burgdorf等(2019)提供的月球观测数据的相角大部分在 $-50^\circ\sim50^\circ$, 在这个范围内, 月相对FWHM的影响约在 0.001° 之内, 可以忽略. 在修正观测

表1 89与183GHz辐射亮温修正

星月距离 (km)	FWHM _{ch} ^c (°)		修正后的亮温峰值 (K)	
	89GHz	183GHz	89GHz	183GHz
364500	1.1580	1.2103	269.8±4	285.4±5
387000	1.1629	1.2150	271.7±4	287.4±5
405000	1.1662	1.2181	273.1±4	288.7±5

图 7 2011年1月和7月月球正面加权平均辐射亮温和MHS观测数据计算得到的辐射亮温

(a) 89GHz, (b) 157GHz, (c) 183GHz

图 8 $FWHM_{ch} - FWHM_{ch}^c$ 与月相的关系

数据时, 最好使用月相在 $-50^\circ \sim 50^\circ$ 的结果来反推 $FWHM_{ch}^c$.

4.4 FWHM对 $FWHM_{ch} - FWHM_{ch}^c$ 的影响

在地基观测中, Xu等(2020)发现从观测数据中得到的FWHM与实际的 $FWHM_{ch}^c$ 有一定的差别, 他们用解卷积的方法计算得到 $FWHM_{ch} - FWHM_{ch}^c \approx 0.02^\circ$, Liu和Jin(2020b)的结果约为 0.04° , 这可能因为辐射计自身的 $FWHM_{ch}^c$ 也会对 $FWHM_{ch} - FWHM_{ch}^c$ 产生影响. 以89GHz的月球辐射亮温为例, 假设星月距离为380000km, 图9给出了 $FWHM_{ch} - FWHM_{ch}^c$ 与 $FWHM_{ch}^c$

的关系. 可以发现, 随着 $FWHM_{ch}^c$ 的增大, $FWHM_{ch} - FWHM_{ch}^c$ 会明显变小. Xu等(2020)的 $FWHM_{ch}^c$ 约为 1.58° , 明显大于MHS的 1.2° .

5 结论

本文提出了月球正面加权平均的微波毫米波段辐射亮度温度的实时计算模型, 用于微波毫米波通道的辐射亮度温度的计算与定标. 首先将月球正面剖分成 30×30 块区域, 每块经纬度跨度 $6^\circ \times 6^\circ$, 根据实时的太阳辐射强度和日下点位置, 由Clementine数据计算出每块区域的平均太阳反照率, 求解一维热传导方程, 计算所有子区域在2011年的物理温度变化. 结合每块区域内平均的铁钛含量以及相对于卫星的辐射角, 计算得到每块区域的辐射亮度温度. 根据每个通道的FWHM, 计算出月球位于DSV中心时的加权平均亮度温度随月相的变化.

Burgdorf等(2019)在用MHS观测数据反推月球正面加权平均亮温时, 把月球当作一个点目标, 拟合的FWHM偏大. 本文将月球视为一个拓展的圆盘目标, 仿真计算月球正面的加权辐射亮温, 修正了FWHM,

图9 $\text{FWHM}_{ch} - \text{FWHM}_{ch}^c$ 与 FWHM_{ch}^c 的关系

分析了卫星和月球之间的实时距离、月相, 以及MHS毫米波各通道本身的FWHM对修正偏差的影响。

在月表面CE微波辐射和MHS观测数据研究基础上, 本文提出基于月球实时加权平均辐射亮度温度的星载毫米波湿度仪的定标的新设计方案。月表面辐射对卫星有效载荷在轨内定标是一个补充参考或可替代的方案, 尤其对于定标需求更复杂的静止轨道微波探测仪和本身定标条件较差的微小卫星微波探测仪特别有意义。

本文中月壤的正切损耗来自天底点观测的37GHz微波亮温数据, 在更高频率的毫米波段和非天底点观测的情况下可能需要更精细的建模。但是随着频率的增高, 月壤层的物理参数不确定性的影响会变弱。对于本文的月壤物理参数, 如正切损耗、月表面辐射率等与全月球平均加权微波毫米波亮温的计算应有更深入的研究, 有待更多的特定目的观测数据的修正与验证, 来完善新设计方案。

参考文献

- 宫晓蕙, 金亚秋. 2011. “嫦娥一号”微波辐射计观测月球虹湾地区表面物理温度昼夜时间分布. *科学通报*, 56: 1877–1886
- 金亚秋, 法文哲. 2010. “嫦娥一号”对环形山起伏非均匀月表层微波辐射观测的理论建模分析. *科学通报*, 55: 2040–2046
- 金亚秋, 法文哲. 2019. 行星微波遥感的理论方法与应用. 北京: 科学出版社. 206–222
- 李芸, 王振占, 姜景山. 2009. 月表温度剖面对于“嫦娥一号”卫星微波探测仪探测亮温影响的模拟研究. *中国科学: 地球科学*, 39: 1045–1058
- 柳钮滔, 金亚秋. 2020. 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*, 65: 185–193
- Bandfield J L, Hayne P O, Williams J P, Greenhagen B T, Paige D A. 2015. Lunar surface roughness derived from LRO Diviner Radio-

- meter observations. *Icarus*, 248: 357–372
- Burgdorf M J, Buehler S A, Hans I, Prange M. 2019. Disk-integrated lunar brightness temperatures between 89 and 190 GHz. *Adv Astron*, 2019: 1–8
- Fa W, Wicczorek M A. 2012. Regolith thickness over the lunar nearside: Results from Earth-based 70-cm Arecibo radar observations. *Icarus*, 218: 771–787
- Fountain J A, West E A. 1970. Thermal conductivity of particulate basalt as a function of density in simulated lunar and Martian environments. *J Geophys Res*, 75: 4063–4069
- Hayne P O, Bandfield J L, Siegler M A, Vasavada A R, Ghent R R, Williams J P, Greenhagen B T, Aharonson O, Elder C M, Lucey P G, Paige D A. 2017. Global regolith thermophysical properties of the Moon from the Diviner Lunar Radiometer Experiment. *J Geophys Res Planets*, 122: 2371–2400
- He L, Lang L, Li Q, Zheng W. 2013. Effect of surface roughness on microwave brightness temperature from lunar surface: Numerical analysis with a hybrid method. *Adv Space Res*, 51: 179–187
- Heiken G H, Vaniman D T, French B M. 1991. Lunar Sourcebook. Cambridge: Cambridge University Press. 75–594
- Hemingway B S, Krupka K M, Robie R A. 1981. 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*, 66: 1202–1215
- Huang Q, Wicczorek M A. 2012. Density and porosity of the lunar crust from gravity and topography. *J Geophys Res*, 117: E05003
- Jin Y Q. 1993. Electromagnetic Scattering Modelling for Quantitative Remote Sensing. Singapore: World Scientific. 310
- Keihm S J. 1984. Interpretation of the lunar microwave brightness temperature spectrum: Feasibility of orbital heat flow mapping. *Icarus*, 60: 568–589
- Ledlow M J, Burns J O, Gisler G R, Zhao J H, Zeilik M, Baker D N. 1992. Subsurface emissions from Mercury-VLA radio observations at 2 and 6 centimeters. *Astrophys J*, 384: 640–655
- Liu N, Fa W, Jin Y Q J. 2018. Brightness temperature of lunar surface for calibration of multichannel millimeter-wave radiometer of geosynchronous FY-4M. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 57: 3055–3063
- Liu N, Jin Y Q. 2020a. A real-time model of the seasonal temperature of lunar polar region and data validation. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 58: 1892–1903
- Liu N, Jin Y Q. 2020b. Average brightness temperature of lunar surface for calibration of multichannel millimeter-wave radiometer from 89 to 183 GHz and data validation. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 59: 1345–1354

- Lucey P G, Blewett D T, Jolliff B L. 2000. Lunar iron and titanium abundance algorithms based on final processing of Clementine ultraviolet-visible images. *J Geophys Res*, 105: 20297–20305
- Meeus J. 1991. *Astronomical Algorithms*. Virginia: Willmann-Bell Inc. 314–347
- Mutch T A. 2000. *Geology of the Moon: A Stratigraphic View*. Princeton: Princeton University Press. 26
- Racca G D. 1995. Moon surface thermal characteristics for moon orbiting spacecraft thermal analysis. *Planet Space Sci*, 43: 835–842
- Ulaby F T, Long D G. 2014. *Microwave Radar and Radiometric Remote Sensing*. Ann Arbor: University of Michigan Press. 231–232
- Ulaby F T, Moore R K, Fung A K. 1981. *Microwave Remote Sensing Active & Passive I: Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry*. Massachusetts: Addison-Wesley. 229–230
- Vasavada A R, Bandfield J L, Greenhagen B T, Hayne P O, Siegler M A, Williams J P, Paige D A. 2012. Lunar equatorial surface temperatures and regolith properties from the Diviner Lunar Radiometer Experiment. *J Geophys Res*, 117: E00H18
- Wang Z, Li Y, Jiang J, Zhang X. 2008. Microwave transfer models and brightness temperature simulations of MWS for remote sensing lunar surface on CE-1 satellite, 2008. 2008 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. 1683–1686
- Wang Z, Li Y, Zhang D, Jiang J, Zhao J, Hua F, Zhang X. 2010. Prelaunch Calibration of Chang'E-2 Lunar Microwave Radiometer. 2010 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. 1551–1554
- Xu Z, Brewer M, Rojas P, Li Y, Osumi K, Pradenas B, Ali A, Appel J W, Bennett C L, Bustos R, Chan M, Chuss D T, Cleary J, Couto J D, Dahal S, Datta R, Densi K L, Dunner R, Eimer J R, Hileman T E, Harrington K, Iuliano J, Marriage T A, Miller N J, Nunez C, Padilla I L, Parker L, Petroef M A, Reeves R, Rostem K, Watts D J, Weiland J L, Wollack E J. 2020. Two-year cosmology large angular scale surveyor (CLASS) observations: 40 GHz telescope pointing, beam profile, window function, and polarization performance. <https://arxiv.org/pdf/1911.04499.pdf>
- Yu S, Fa W. 2016. Thermal conductivity of surficial lunar regolith estimated from Lunar Reconnaissance Orbiter Diviner Radiometer data. *Planet Space Sci*, 124: 48–61

(责任编辑: 傅绥燕)