

厚度对月壤微波辐射亮温的影响

孟治国^{1,2,3}, 平劲松², 徐 懿³, 陈圣波¹, 陈 思¹

(1. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 长春 130026; 2. 中国科学院国家天文台月球与深空探测重点实验室, 北京 100012; 3. 澳门科技大学太空研究所, 中国 澳门 999078)

摘要: 基于嫦娥系列卫星微波辐射计数据的月壤厚度反演是中国月球科学研究的重要目标之一。基于辐射传输方程, 数值模拟了不同频率、 $(\text{FeO} + \text{TiO}_2)$ 含量和表面温度条件下厚度对月壤微波辐射亮温的影响; 基于嫦娥二号卫星微波辐射计 (Chang'E Lunar Microwave Sounder, CELMS) 数据, 结合 Apollo 计划获取的月壤厚度资料及其他月壤厚度资料, 系统分析了厚度对 CELMS 观测数据的影响。结果表明: 频率、 $(\text{FeO} + \text{TiO}_2)$ 含量、表面温度对亮温的影响远大于厚度对亮温的影响, 是基于 CELMS 数据进行月壤厚度反演的重要影响因素; 低频、低 $(\text{FeO} + \text{TiO}_2)$ 含量、低温条件下, 厚度对 CELMS 数据的影响最大; 利用 3 GHz、凌晨时刻的 CELMS 数据进行月陆地区月壤厚度反演可行。研究结果对基于嫦娥系列卫星 CELMS 数据的月壤厚度反演具有重要参考意义。

关键词: 月壤厚度; CELMS 数据; 辐射传输方程; 数值模拟

DOI: 10.11821/dlyj201406002

1 引言

微波辐射计是中国嫦娥系列卫星的重要载荷之一。自 2007 年 10 月成功发射嫦娥一号卫星以来, 已获取了大量的月球微波发射数据, 在国际探月活动中具有里程碑的意义^[1]。作为基于嫦娥系列卫星 CELMS 数据反演月壤厚度的前提和基础, 有必要深入研究厚度对月壤微波辐射亮温的影响。

基于嫦娥系列卫星 CELMS 数据的月壤厚度反演的关键问题, 是建立亮温与月壤厚度的关系模型, 而辐射传输方程是当前普遍采用的月壤厚度反演模型^[2-11]。金亚秋等^[3]、法文哲等^[5]基于月壤一月岩双层模型, 通过三波段组合模型进行了月壤厚度反演研究。蓝爱兰等^[4]在月壤厚度反演中, 考虑了月壤内部温度梯度等对月壤微波热辐射特性的影响。孟治国等^[8]在研究中进一步考虑了月表温度分布对月壤温度梯度的影响、介电常数随月壤厚度的变化, 同时还考虑了界面粗糙性和月壤一月岩界面倾斜对月壤厚度反演结果的影响。考虑到月壤一月岩模型所涉及的温度梯度、介电常数分布的复杂性, 法文哲等^[6,7]采用月尘一月壤一月岩三层模型, 基于低频通道数据进行了月壤厚度反演研究。由于月壤一月岩模型中月壤温度、介电常数分布复杂, 李芸等^[9]、Wang 等^[10]提出了一个使用多层月壤层模型, 将 6 m 以内的月壤分为 45 层, 并基于非相干方法进行月表亮温模拟和月壤厚度反演研究。周明星等^[11]根据月壤参数随深度的变化情况, 建立了一个 36 层的非均匀月壤分层模型来进行月壤厚度反演研究。

收稿日期: 2014-03-12; 修订日期: 2014-04-28

项目资助: 国家自然科学基金项目 (41371332, 40901159); 吉林大学国家杰出 (优秀) 青年科学基金后备人选培育计划项目; 中国博士后基金项目 (2012M511341)

作者简介: 孟治国(1978-), 男, 河南汝州人, 博士、副教授, 主要从事微波遥感、定量遥感反演研究。

E-mail: mengzg@jlu.edu.cn

然而,不同模型反演得到的月壤厚度相差很大,所使用数据的频率和观测时间也没有固定的要求,其原因是缺少厚度对月壤微波辐射亮温影响的深入分析。因此,本文拟通过辐射传输模拟,数值分析厚度对月壤微波辐射亮温的影响,并结合嫦娥二号卫星 CELMS 数据和 Apollo 计划期间得到的月壤厚度资料,分析厚度对月壤微波辐射的影响,为月壤厚度反演研究寻找合适观测条件下的 CELMS 数据。

2 研究方法

2.1 月壤层辐射传输模型

当前,常用的月壤层模型是月壤—月岩双层模型 (Two-layer model) [2-5,8-11]。根据微波辐射传输理论和二流近似原理^[12],在微波辐射计观测方向角 θ_0 上,亮温 T_B 由来自致密介质的辐射 T_{B1} 和来自下垫面的辐射 T_{B2} 组成

$$T_B = T_{B1} + T_{B2} = T_{1up} + T_{1dn} + T_{2up}, \quad (1)$$

式中:

$$\begin{aligned} dT_{1up} &= \frac{1-r_{p1}}{1-L} k_{a1}(z) T(z) \sec \theta_1 e^{-\int_0^z k_{a1}(z') \sec \theta_1 dz'} dz \\ dT_{1dn} &= \frac{(1-r_{p1})r_{p2}}{1-L} k_{a1}(z) T(z) \sec \theta_1 e^{-\left(\int_z^d k_{a1}(z') \sec(\theta_1 + \theta_2) dz' + \int_0^d k_{a1}(z') \sec \theta_1 dz'\right)} dz \\ dT_{2up} &= \frac{(1-r_{p1})(1-r_{p2})}{1-L} k_{a2}(z) T(z) \sec \theta_2 e^{-\int_d^z k_{a2}(z') \sec \theta_2 dz'} dz \cdot e^{-\int_0^d k_{a1}(z') \sec \theta_1 dz'} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: θ_1 和 θ_2 分别是微波在月壤和月岩中的入射角,满足折射定理; $p=h, v$, 分别代表波的水平和垂直极化; $k_{a1}(z)$ 和 $k_{a2}(z)$ 分别是深度 z 处月壤、月岩的吸收系数,它们与月壤和月岩的介电常数有关,受月壤密度和 (FeO+TiO₂) 含量的影响; r_{p1} 和 r_{p2} 分别为真空—月壤界面和月壤—月岩界面的有效反射率,它们是月壤和月岩的介电常数实部的函数; d 为月壤厚度; $1/(1-L)$ 为多次反射系数; $T(z)$ 是月壤内部的温度梯度函数。

2.2 厚度对亮温影响的数值模拟研究

厚度是月壤微波辐射亮温的影响因素之一。基于数值模拟的月壤微波辐射亮温模拟,也是月壤厚度反演的重要理论基础。(2) 式还表明,除厚度外,观测频率以及温度梯度、成分 (直接影响介电常数) 也是月壤微波辐射亮温的重要影响因素。

亮温对月壤厚度的响应关系是基于 CELMS 数据进行月壤厚度反演的技术关键之一。图 1 是假定月表温度为 390 K、(FeO + TiO₂) 含量为 10% 时,根据 (2) 式得到的亮温随月壤厚度的变化曲线。研究中,温度梯度由热传导模型求解得到。根据 Carrier 等的研究成果,取双曲线型密度模型,并基于 Carrier 模型建立相应的介电常数模型^[13]。图 1 表明,总体上,随着频率的增加,月壤微波辐射亮温增大,但在高频 (19.35 GHz 和 37 GHz),亮温不再随厚度的变化而变化。根据模拟结果,3 GHz 条件下,在一定厚度范围内,随月壤厚度的增加,亮温随厚度的增加而增大,亮温的变化约为 8 K;随着频率的增加,亮温随厚度的变化迅速减小,7.8 GHz 时约为 2 K,19.35 GHz 时约为 0.2 K,而 37 GHz 时仅为 0.002 K。从模拟结果来看,3 GHz 条件下,微波对月壤的穿透可达 5.5 m 左右;随着频率的增加,穿透深度迅速减小,在 7.8 GHz 时约为 3 m;19.35 和 37 GHz 条件下的穿透深度小于 1 m。这表明,在高频条件下,微波在月壤中的穿透深度非常小,此时的 CELMS 数据已不适合月壤厚度的反演研究;在低频条件下,微波对月壤具有一定

的穿透性, 是进行月壤厚度研究的最佳波段, 但可反演的月壤厚度应小于5.5 m。

(2) 式还表明: 除厚度外, $(\text{FeO} + \text{TiO}_2)$ 含量也是月壤微波辐射亮温的影响因素之一。图2是假定月表温度为390 K、 $(\text{FeO} + \text{TiO}_2)$ 含量分别为0%、10%和20%时, 根据(2)式得到的亮温随月壤厚度的变化曲线。图2表明, 当月壤厚度为5 m时, 3 GHz条件下, $(\text{FeO} + \text{TiO}_2)$ 含量分别为0%、10%和20%时的亮温分别为239.8 K、247.2 K和256.3 K, 亮温差达16.5 K; 7.8 GHz条件下的亮温差达27 K, 远大于由于厚度变化造成的亮温差。同时, 从图2还可以看出, 随着 $(\text{FeO} + \text{TiO}_2)$ 含量的增加, 微波可穿透的月壤厚度迅速减小。3 GHz条件下, 随着 $(\text{FeO} + \text{TiO}_2)$ 含量从0%增加到20%, 可穿透的月壤厚度从10.4 m迅速降低到2.5 m左右。这表明, $(\text{FeO} + \text{TiO}_2)$ 含量对亮温的影响远大于月壤厚度对亮温的影响。图2也表明, 低 $(\text{FeO} + \text{TiO}_2)$ 含量条件下, 月壤厚度对亮温的响应较好, 表明低 $(\text{FeO} + \text{TiO}_2)$ 含量区域更适合进行月壤厚度反演研究。

月表昼夜温度变化非常大。图3是假定 $(\text{FeO} + \text{TiO}_2)$ 含量为10%、月表温度分别为390 K、300 K、200 K和100 K时, 根据(2)式得到的亮温随月壤厚度的变化曲线。图3表明, 低频条件下, 随着表面温度的增加, 亮温增大, 但增幅远小于高频条件下的亮温增幅。假定月壤厚度为5 m, 3 GHz时的亮温分别为247.2 K、242.7 K、237.6 K和232.6 K, 亮温差约为14.6 K; 而7.8 GHz时的亮温差达35 K, 远大于由于厚度变化造成的亮温差。这表明表面温度及温度梯度将是基于CELMS数据进行月壤厚度反演的重要影响因素之一。图3还表明, 低温条件下, 亮温的动态变化范围和可穿透深度略大于高温条件下的模拟结果, 表明低温条件下的亮温值更适合用于月壤厚度反演研究。

总之, 模拟结果表明, 低频、低 $(\text{FeO} + \text{TiO}_2)$ 含量、低表面温度条件下的亮温数值比较适合用于月壤厚度反演研究。但是, 探测频率、 $(\text{FeO} + \text{TiO}_2)$ 含量和表面温度对亮温的影响远大于厚度对亮温的影响, 是基于CELMS数据进行月壤厚度反演中必须关注的问题。为了建立精确的月壤厚度—亮温关系, 准确的 $(\text{FeO} + \text{TiO}_2)$ 含量数据和表面温度

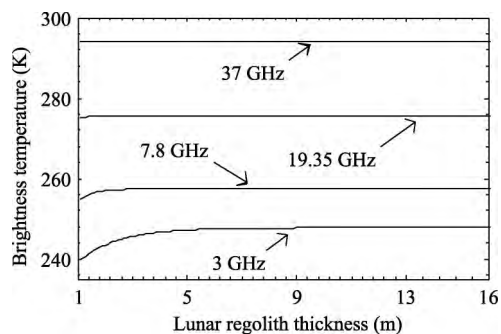


图1 模拟亮温随月壤厚度的变化

Fig. 1 Change of simulated brightness temperature with lunar regolith layer thickness

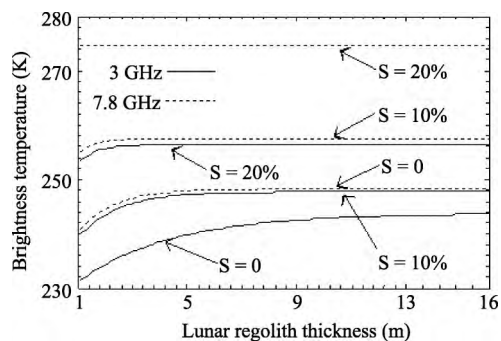


图2 不同 $(\text{FeO} + \text{TiO}_2)$ 含量条件下模拟亮温随月壤厚度的变化

Fig. 2 Change of simulated brightness temperature with the lunar regolith layer thickness

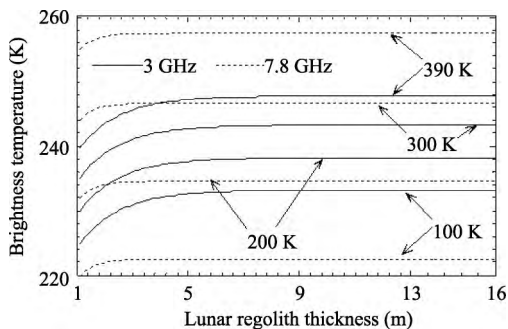


图3 不同表面温度条件下模拟亮温随月壤厚度变化

Fig. 3 Change of simulated brightness temperature with the lunar regolith layer thickness

是必不可少的参数,这也增加了基于CELMS数据进行月壤厚度反演的难度。

3 数据来源与处理

嫦娥卫星微波辐射计 (Chang'E Lunar Microwave Sounder, CELMS) 是人类第一次在月球轨道上对月球表面进行探测的被动微波遥感器,在国际探月活动中具有里程碑的意义^[1]。CEMLS探测频率为3.0 GHz、7.8 GHz、19.35 GHz和37.0 GHz,空间分辨率约为35 km。CELMS数据以PDS (Planetary Data System) 标准存储,包括了数据采样时间、4个频率的亮温值、星下点太阳入射角和方位角、月球表面经纬度以及轨道高度等信息。本文使用了嫦娥二号卫星2C级CELMS数据。

月球表面微波辐射亮温受月球时间影响较大。用不同时刻亮温数据绘制的全球亮温分布图,会引起亮温的剧烈变化,进而会掩盖地理位置、地形、月表物质成分等对亮温的影响,从而极大限制了CELMS数据的应用^[14]。因此,为了消除成像时间(即月表物理温度)对亮温的影响,同时也使厚度对亮温的影响更好地体现出来,需要对CELMS数据进行时间校正处理:

$$\begin{aligned}\cos z &= \sin \phi \sin \phi_0 + \cos \phi \cos \phi_0 \cos (\lambda - \lambda_0) \\ \sin z \cos a &= \sin \phi \cos \phi_0 - \cos z \sin z_0 \cos (\lambda - \lambda_0) \\ \sin z \sin a &= \cos \phi \sin (\lambda - \lambda_0)\end{aligned}\quad (3)$$

式中: z 是太阳高度角; a 是太阳方位角,可以从2C级数据中直接读取; ϕ 和 λ 分别是观测点经度和纬度; (ϕ_0, λ_0) 是太阳直射点位置,可求解(4)式得到; $h = (\phi - \phi_0)$ 是观测点和目标点的经度差,即时角;当 $h = 0^\circ$ 时,即为正午时刻,而 $h = 90^\circ$ 时,为凌晨时刻。

尽管CELMS数据实现了8次全月球覆盖,但在任何一个时角范围内,仅有部分地区有观测数据。因此,为了获取全月球范围内特定时刻的亮温分布,Zheng等^[14]将月球表面按纬度进行分区,分别对每20°纬度区域建立亮温日变化线性拟合模型。对每一个区域,采用七次多项式匹配方法来建立亮温 T_b 与时角 h 的关系:

$$T_b(h) = B + B_1 \times h + B_2 \times h^2 + B_3 \times h^3 + B_4 \times h^4 + B_5 \times h^5 + B_6 \times h^6 + B_7 \times h^7 \quad (4)$$

式中: $B, B_i (i = 1, \dots, 7)$ 是常数^[14]; $T_b(h)$ 是时角为 h 时的亮温值。

假定 h 为 0° , 就可以将所有时间段下的亮温数据转化为正午时刻时的亮温值。

最终利用转化后亮温值进行1°分辨率填图,得到正午时刻的全月微波图。采用同样的方法,得到凌晨时刻的全月微波亮温图。图4是经过时角校正得到的正午和凌晨时刻

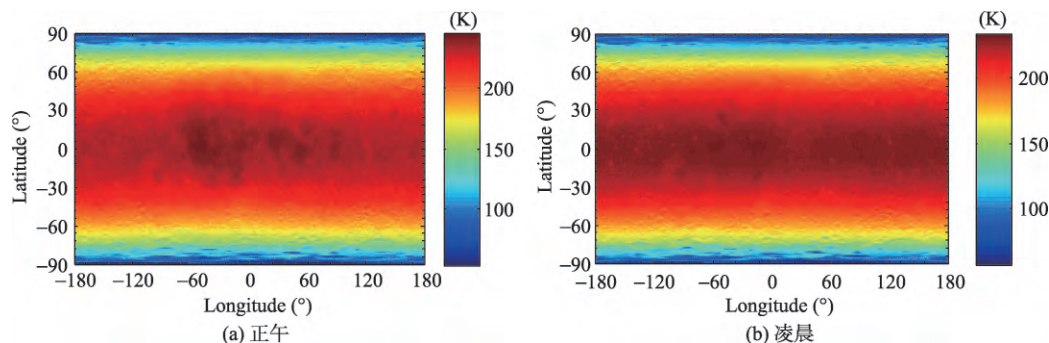


图4 月表亮温分布图 (3GHz)

Fig. 4 Distribution of brightness temperature (3 GHz) over Moon surface: (a) Noon (b) Dawn

的月表亮温分布图,基本消除了成像时间的影响,而更多地反映了月壤物理特征。

研究中,处理得到了在 3.0 GHz、19.35 GHz 和 37 GHz 条件下,正午和凌晨时刻的全月球亮温分布数据。

4 月壤厚度对月壤微波辐射亮温的影响

由于月壤厚度资料的匮乏,本文基于 Apollo 计划期间获取的月壤厚度资料^[13],探讨厚度对月壤微波辐射亮温的影响。

4.1 Apollo 着陆区厚度与亮温的关系

表 1 是 Apollo 着陆区的月壤厚度和相应的亮温数据。其中,使用了 3 GHz、19.35GHz 和 37 GHz、正午(Noon)和凌晨(Dawn)条件下的亮温资料。理论上,月壤厚度越大,在温度、成分相近的条件下,其对应的微波辐射亮温越高。然而,这种关系在表 1 中的表现并不明显。

表 2 是 Apollo 着陆区月壤厚度与亮温的相关系数表。表 2 表明,月壤厚度与亮温之间的相关性并不明显;在高频(19.35 GHz 和 37 GHz)条件下,亮温甚至与厚度呈现负相关关系,表明高频条件下,月壤厚度与亮温没有相关性,其原因就是高频时微波的穿透深度非常小。低频条件下,月壤厚度和亮温之间是正相关关系,尽管相关系数很小,但足以表明低频条件下,厚度对月壤微波热辐射亮温具有一定的影响;凌晨时刻的相关系数大于正午时刻,表明凌晨时刻,月壤微波热辐射对厚度更为敏感。另外,从相关性分析结果来看,Apollo 17 着陆区月壤厚度的比较合理的结果是 4.0 m 或 8.5 m:此时,厚度与亮温之间的相关性仅体现在低频段,且低温条件下亮温对厚度更为敏感,与数值模拟结果一致;当取 32 m 时,月壤厚度与亮温没有相关性,显然是不合理的。

表 1 Apollo 着陆区月壤厚度及相应的亮温数据
Tab.1 Lunar regolith thickness and brightness temperatures at Apollo landing sites

位置	纬度 (°)	经度 (°)	月壤厚度 (m)	3 GHz		19.35 GHz		37 GHz	
				Noon	Dawn	Noon	Dawn	Noon	Dawn
Apollo 11	0.7N	24.3E	4.4 ^a	237.323	226.116	259.670	221.788	275.641	202.9934
Apollo 12	3.2S	23.4W	3.7 ^a	234.562	223.501	256.640	219.544	272.403	201.053
Apollo 14	3.7S	17.5W	8.5 ^b	233.790	222.768	257.297	220.175	272.919	201.523
Apollo 15	26.1N	3.7E	4.4 ^a	228.535	217.651	248.715	216.089	264.027	199.249
Apollo 16	9.0S	15.5E	12.2 ^b	234.992	223.946	254.578	218.541	268.102	198.853
Apollo 17	20.2N	30.8E	4.0 ^b ,8.5 ^c ,32 ^d	232.411	221.539	252.941	218.736	268.621	201.318

注: a. Nakamura 等^[15]利用被动月震数据推算的结果; b. Copper 等^[16]的主动月震测量值; c. Duennebieer 等^[17]的主动月震测量值; d. Strangway 等^[18]利用多频电磁探测数据推算的结果。

表 2 Apollo 着陆区月壤厚度与亮温的相关系数表
Tab. 2 Correlation analysis between lunar regolith thickness and brightness temperatures at Apollo landing sites

月壤厚度(m)	3 GHz		19.35 GHz		37 GHz	
	Noon	Dawn	Noon	Dawn	Noon	Dawn
Apollo 17 处取 4.0	0.225	0.228	0.092	-0.019	-0.099	-0.490
Apollo 17 处取 8.5	0.122	0.135	-0.048	-0.077	-0.209	-0.418
Apollo 17 处取 32	-0.137	-0.118	-0.244	-0.117	-0.237	0.008

4.2 基于 CELMS 数据进行月壤厚度反演的可行性分析

作为基于 CELMS 数据进行月壤厚度反演的前提和基础, CELMS 数据应该与数值模拟结果相吻合。即 CELMS 数据应该大于根据数值模拟得到的最小月壤厚度条件下的亮温值, 小于模拟得到的最大月壤厚度条件下的亮温值。

图 5 是假定月壤厚度分别为 1 m 和 10 m 时, 数值模拟得到的月球赤道方向正午和凌晨时刻的亮温分布曲线及相应的 CELMS 数据。其中 $(\text{FeO}+\text{TiO}_2)$ 含量是基于 Prospect 卫星 γ 谱仪数据得到的^[19]。从图 5 可以看出, 月陆地区的 CELMS 数据与数值模拟结果吻合得很好, 表明基于 CELMS 数据的月壤厚度反演是可行的; 此时, CELMS 观测数据正好落在两个亮温模拟结果区间内。图 5 还表明, 月壤厚度可能比 Shkuratov 等^[20]估计的要小, 与 Wang 等^[10]反演结果相吻合。

而在月海地区, 数值模拟结果普遍高于 (正午) 或低于 (凌晨) CELMS 观测数据。这表明除了成分、表面温度外, 还有其他需要确定的因素制约着该区域月壤厚度的反演研究。

图 5 再次表明, 凌晨时刻的亮温更适合于月壤厚度反演研究。此时, CELMS 观测数据与模拟曲线的区分明显。

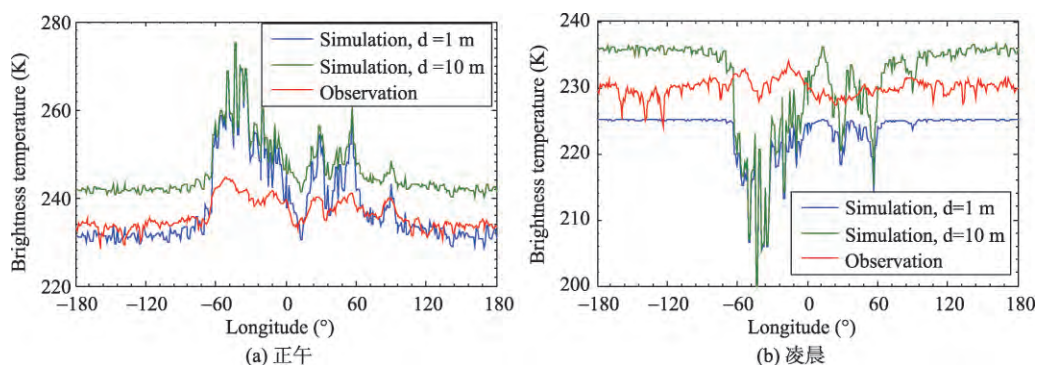


图 5 月球赤道地区亮温分布曲线 (3GHz)

Fig. 5 Distribution of brightness temperature (3GHz) along Moon Equator: (a) Noon (b) Dawn

5 结论与讨论

本文首次基于嫦娥二号卫星微波辐射计数据, 结合月壤辐射传输模拟和 Apollo 计划期间获取的月壤厚度资料, 系统分析了厚度对月壤微波辐射亮温的影响。结果表明: 频率、 $(\text{FeO}+\text{TiO}_2)$ 含量、表面温度对亮温的影响远大于厚度对亮温的影响; 低频、低 $(\text{FeO}+\text{TiO}_2)$ 含量、低温条件下的 CELMS 数据更适合于月壤厚度反演研究; 基于 3GHz、凌晨时刻的 CELMS 数据进行月陆地区月壤厚度反演可行。

然而, 研究中发现, 月海地区的亮温模拟结果普遍高于 (正午) 或低于 (凌晨) CELMS 观测数据, 给该区域的月壤厚度反演研究带来了一定的不确定性; 文中也没有考虑地形起伏和表面粗糙等因素的影响。这些也是下一步研究的重要内容之一。

致谢: 感谢国家天文台郑永春博士提供嫦娥二号卫星微波辐射计数据; 感谢南京大学吴昀昭副教授在 $(\text{FeO}+\text{TiO}_2)$ 数据分析方面提供的帮助。

参考文献(References)

- [1] 姜景山, 金亚秋. 中国微波探月研究. 北京: 科学出版社. 2011. [Jiang Jingshan, Jin Yaqiu. Selected Papers on Microwave Lunar Exploration in Chinese Cheng'E-1 Project. Beijing: Science Press, 2011.]
- [2] Keihm S J, Langseth M G. Microwave emission spectrum of the Moon: Mean global heat flow and average depth of the regolith. *Science*, 1975, 187(4171): 64-66.
- [3] 金亚秋, 颜锋华, 梁子长. 微波辐射计对月面特征参数的遥感理论模拟. *电波科学学报*, 2003, 18(5): 477-486. [Jin Yaqiu, Yan Fenghua, Liang Zichang. Simulation of brightness temperature from the Lunar surface using multi-channels microwave radiometers. *China Journal of Radio Science*, 2003, 18(5): 477-486.]
- [4] 蓝爱兰. 月球表层煤质的被动遥感机理及厚度反演研究. 北京: 中国科学院研究生院硕士学位论文, 2004. [Lan Ailan. Study on the passive microwave remote sensing mechanism and the thickness retrieval of lunar regolith Medium. Beijing: Dissertation for the Master Degree of Chinese academy of Sciences, 2004.]
- [5] 法文哲, 金亚秋. 月球表面多通道辐射亮度温度的模拟与月壤厚度的反演. *自然科学进展*, 2006, 16(1): 86-94. [Fa Wenzhe, Jin Yaqiu. Simulation of multi-channels brightness temperature of the lunar surface and inversion of lunar regolith layer thickness, *Progress in Natural Science*, 2006, 16(1): 86-94.]
- [6] 法文哲, 金亚秋. 三层月壤模型的金通道微波辐射模拟与月壤厚度的反演. *空间科学学报*, 2007, 27(1): 55-65. [Fa Wenzhe, Jin Yaqiu. Inversion of lunar regolith layer thickness using microwave radiance simulation of three layer model and Clementine UV-VIS data. *China Journal of Radio Science*, 2007, 27(1): 55-65.]
- [7] Fa W Z, 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(2): 605-615.
- [8] 孟治国. 月壤参数的辐射传输模拟和查找反演技术研究. 长春: 吉林大学博士学位论文, 2008. [Meng Zhiguo. Lunar regolith parameters retrieval using radiative transfer simulation and look-up table. Changchun: Dissertation for the Doctoral Degree of Jilin University, 2008.]
- [9] Li Y, Wang Z Z, Jiang J S. Influence of lunar surface temperature profiles on brightness temperature of CE-1 lunar microwave sounder. *Science in China: Series D*, 2009, 39(8): 1045-1058.
- [10] Wang Z Z, Li Y, Jiang J S, et al. Lunar surface dielectric constant, regolith thickness, and ^3He abundance distributions retrieved from the microwave brightness temperatures of CE-1 Lunar Microwave Sounder. *Science in China: Series D*, 2010, 53(9): 1365-1378.
- [11] 周明星, 周建江, 汪飞, 等. 非均匀多层月壤微波辐射传输模型与亮温. *系统工程与电子技术*, 2011, 33(2): 276-281. [Zhou Mingxing, Zhou Jianjiang, Wang Fei, et al. Inhomogeneous multilayer microwave transfer model and simulations of brightness temperature for lunar regolith. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(2): 276-281.]
- [12] Ulaby F T, Moore R K, Fung A K. *Microwave Remote Sensing: Active and Passive*. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley, 1981.
- [13] Heiken G H, Vaniman D T and French B M. *A user's Guide to the Moon*. London: Cambridge University Press, 1991.
- [14] Zheng Y C, Tsang K T, Chan K L, et al. First microwave map of the moon with Chang'E-1 data: The role of local time in global imaging. *Icarus*, 2012, 219(1): 194-210.
- [15] Nakamura Y, Dorman J, Duennebier F, et al. Shallow lunar structure determined from the passive seismic experiment. *The Moon*, 1975, 13(1-3): 3-15.
- [16] Cooper M R, Kevach R L, Watkins J S. Lunar near surface structure. *Review of Geophysics*, 1974, 12(3): 291-308.
- [17] Duenneber F K, Watkins J S, Kovach R L. Results from the lunar surface profiling experiment. *Abstracts of the Lunar and Planetary Science Conference*, 1974, 5: 183.
- [18] Strangway D, Pearce G, Olhoeft G. Magnetic and dielectric properties of lunar samples. In: Vinogradov A P. *Kosmochimiya Lunyi Planet*. Moscow: Nauka, 1975: 712-728.
- [19] Prettyman T H, Hagerty J J, Elphic R C, et al. Elemental composition of the lunar surface: Analysis of gamma ray spectroscopy data from Lunar Prospector. *Journal of Geophysical Research: Planets* (1991-2012), 2006, 111(E12): 1-41.
- [20] Shkuratov Y G, Bondarenko N V. Regolith layer thickness mapping of the Moon by radar and optical data. *Icarus*, 2001, 149(2): 329-338.

Influence of layer thickness on microwave emission of lunar regolith

MENG Zhiguo^{1,2,3}, PING Jinsong², XU Yi³, CHEN Shengbo¹, CHEN Si¹

(1. College of Geoexploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China; 2. Key Laboratory of Lunar and Planetary Exploration, National Astronomical Observatories, CAS, Beijing 100012, China; 3. Space Exploration Laboratory, Macau University of Science and Technology, Macau 999078, China)

Abstract: The collection of microwave radiometer data (CELMS data) from Chang'E-2 satellite makes it possible to study the influence of the layer thickness on the microwave thermal emission of the lunar regolith. In this paper, the radiative transfer simulation is employed to study the change of the brightness temperature with the lunar regolith layer thickness in different frequency, (FeO+TiO₂) abundance and surface temperature. The results indicate that the change of the simulated brightness temperature with the thickness is apparent to certain depth in low frequency and the low (FeO+TiO₂) abundance, while the correspondence between the brightness temperature and the thickness is missing if the regolith is thick enough. The influences from the regolith layer thickness is much weaker than that from the frequency, the (FeO+TiO₂) abundance and the surface temperature, which are crucial factors to invert the lunar regolith layer thickness with the CELMS data. Then the influence of the thickness on the microwave thermal emission from the lunar regolith is analyzed with the CELMS data from Chang'E-2 satellite and the measurements from Apollo projects. The results indicate that correlation between the thickness and the microwave thermal emission of the lunar regolith is weak. The microwave emission of the lunar regolith will be a bit more heavily affected by the regolith layer thickness if the observation is in low frequency, the surface temperature is low and low (FeO+TiO₂) abundance of the regolith is low. Moreover, the simulated brightness temperature agrees well with the observed CELMS data in lunar highlands along the Moon Equator in 3 GHz, while it is much bigger at noon or much smaller at dawn than the observed CELMS data in lunar maria. It is feasible to retrieve the lunar regolith layer thickness in lunar highlands using the CELMS data in 3 GHz on dawn. The research is essential for the inversion of the lunar regolith parameters with the microwave radiometer data from Chang'E satellites.

Key words: lunar regolith layer thickness; CELMS data; radiative transfer equation; numerical simulation