doi:10.3799/dqkx.2014.158

# 基于嫦娥二号卫星微波辐射计亮温 数据反演月壤介电常数

连 懿1,陈圣波1,孟治国1,张 锋2,张 莹1

吉林大学地球探测科学与技术学院,吉林长春 130026
 中国科学院国家天文台,北京 100012

**摘要:** 月壤介电常数是当前月球微波遥感探测的基础,是月壤厚度、成分等信息提取不可或缺的参数.为了实现全月介电常数 反演,通过对嫦娥二号卫星微波辐射计亮温数据进行时角校正,得到同一时角的全月微波亮温图. 全月微波亮温表现出随月 球地形、月壤成分及纬度变化的特征. 基于校正后的微波辐射亮温,结合辐射传输模型,通过解算相关参数,反演得到 3 GHz 频率下全月介电常数分布. 其中,月海地区的介电常数实部高于月陆地区,且月球极地区域介电常数实部偏低;而介电常数虚 部则在月海区域和艾肯盆地较高. 通过模拟月表介电常数实验对反演结果进行温度校正,得到 22 ℃下全月介电常数. 将反演 结果和月壤真实样品的介电常数测量值进行比较评价. 结果表明介电常数实部相对误差都低于 11%;虚部相对误差偏大,但 其差值最大仅为 0.02. 因此,基于嫦娥二号卫星微波辐射计亮温数据反演月表介电常数的方法是可行的. 关键词: 嫦娥二号卫星;亮温;辐射传输模型;月壤介电常数;地球物理.

**中图分类号:** P407 **文章编号:** 1000-2383(2014)11-1644-07

收稿日期: 2014-03-21

## Dielectric Constant of Lunar Soil Derived from Chang'E-2 Passive Microwave Radiometer Measurements

Lian Yi<sup>1</sup>, Chen Shengbo<sup>1</sup>, Meng Zhiguo<sup>1</sup>, Zhang Feng<sup>2</sup>, Zhang Ying<sup>1</sup>

1. College of Geoexploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China

2. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China

**Abstract**: Dielectric constant of lunar soil is the basis of lunar microwave remote sensing detection and it is an indispensable parameter for information extraction of lunar regolith layer thickness and composition. With the aim to simulate dielectric constant for the whole moon, the correction of time angle on brightness temperature data captured by microwave radiometer on board of Chang'E-2 is carried out in the paper and the distribution map of the whole lunar surface microwave brightness temperature under the same time angle with various lunar terrains is obtained, soil compositions and latitudes is obtained. By applying the radiative transfer model to the corrected microwave temperature brightness, the distribution of dielectric constants for 3 GHz channel in the whole moon is obtained. The real part of dielectric constant in the lunar mare region is higher than that in highland and this value is low in polar region. The imaginary part in lunar mare and Aitken basin are relatively higher. The dielectric constant data have been calibrated in the experiment to obtain dielectric constant temperature at 22 °C. To compare the electric constant of real lunar soil samplings under normal temperature on Earth with inversed results, the results show as follows: the relative error of the real part of dielectric constant is less than 11%; the relative error of the imaginary part of dielectric constant is higher, but the maximum difference is below 0. 02. So it is feasible to derive the dielectric constant inversion in the manner of utilizing brightness temperature data of microwave radiometer on board of Chang'E-2.

Key words: Chang'E-2; temperature brightness; radiative transfer model; dielectric constant of lunar soil; geophysics.

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 41372337).

作者简介:连懿(1986-),男,博士研究生,主要从事月球微波遥感研究. E-mail: fishlice@163. com

### 0 引言

在新一轮月球探测高潮中,搭载了系列月球微 波探测器,包括 Clementine 卫星双站雷达、Chandrayaan-1 卫星 Mini-SAR、Lunar Reconnaissance Orbiter 卫星 Mini-RF、Selene 卫星月球雷达探测仪 和 Chang'E 卫星微波辐射计,主要应用于月壤厚 度、月球表结构、表面温度和月球资源等问题的研究 (Shkuratov and Bondarenko, 2001; 王振占等, 2009;Fa and Jin, 2010;Meng *et al.*, 2011).而月壤 介电常数是月球微波遥感探测的基础,为未来我国 月球探测中微波辐射计、雷达等微波遥感器件参数 的选取及其数据应用提供支持(姜景山等, 2008).

目前直接测量是获取月壤介电常数的最准确方 法.利用直接测量数据,Lucey通过对月壤样品的数 据进行拟合和回归分析,得到月壤介电常数和其密 度之间的拟合关系及月壤相对介电常数的虚部与密 度(ρ)和成分(FeO+TiO<sub>2</sub>)含量的关系式(Lucey et al.,1995,2000);Shkuratov et al.(1999)基于实验 室数据和模拟结果以及几何光学模型,建立了成分 (FeO+TiO<sub>2</sub>)含量、密度、月占空比和月壤相对介电 常数的关系.

在微波遥感对介电常数的研究中,孟治国等 (2008)研究了模拟月壤介电常数随温度和频率的变 化情况.结果表明,月壤介电常数是随频率和波长变 化的;但在高频条件下,这种变化幅度很小.对可见 光、近红外及高频的微波研究来说,可近似认为月壤 介电常数是不变的(Meng et al., 2011b).Berlin et al.(1986)和 Tyler(1968)的研究结果表明,不同频 率条件下,得到的介电常数是可探深度范围内综合 的月壤介电常数信息,月壤介电常数是随月壤厚度 变化的.而在月球表层月壤中不同波长的电磁波穿 透特性也不同,月壤介电常数是穿透深度的决定因 素.前人通过对雷达回波以及月表物质的微波发射 分析,揭示了月壤相对介电常数是频率和密度的函数 (Matveev et al., 1966).

嫦娥卫星搭载的微波辐射计首次获取了全月的 亮温数据,在数据覆盖度上满足了反演全月介电常 数的需求.微波辐射计测量的月表亮温不仅与探测 器的频率相关,而且直接与其介电常数相关(孟治国 等,2008). 王振占等(2009)采用嫦娥1号微波辐射 计37.0 GHz通道下的数据,通过模拟月球表面温度 剖面反演了全月介电常数. 但在之前的研究中,只是通过嫦娥1号微波辐射计数据对月壤表层的介电常数进行研究.本研究 将通过对更成熟的嫦娥2号微波辐射计3GHz通道 下亮温数据进行处理,建立针对不同纬度的时角亮 温模型,得到了3GHz下同一月球时(时角)的全月 亮温图像.通过对辐射传输模型的解算实现了全月 介电常数实部和虚部的反演,通过模拟月壤介电常 数实验,研究了介电常数随温度变化的规律,对反演 结果进行温度校正,并结合地面常温测量月壤真实 样品的介电常数,对其进行比较评价.

### 1 数据处理

### 1.1 嫦娥微波辐射计数据

嫦娥微波辐射计探测频率为 3.00、7.80、19.35 和 37.00 GHz,其探测灵敏度为 0.5 K,空间分辨率 为 35 km. 微波辐射计(MRM)亮温数据以 PDS (Planetary Data System)标准存储,2C级轨道数据 包括了 4 个频率通道的亮温、数据采样时间、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.

#### 1.2 时角计算

月球表面温度受月球时间影响较大,由于温度 随月球时间的变化会引起亮温的剧烈变化,进而会 掩盖其他诸如地理位置、地形、月表物质介电性能等 对亮温的影响.为了更加准确地表达月表亮温的空 间变化,研究中引入了时角的概念来表示月球的时 间,其计算公式(Zheng,2012)为:

 $\tan \varphi = \sin a \cdot \tan i / (\cos \lambda - \sin \lambda \cdot \cos a \cdot \tan i)$ ,(1) 其中,*i*是太阳入射角,取值范围在[0, $\pi$ ];*a*是太阳方 位角,取值范围是[0,2 $\pi$ ]; $\theta$ 是极角用来表示极距,取 值范围是[0, $\pi$ ]; $\varphi$ 是负极角[ $-\pi$ , $\pi$ ]; $\lambda$ 是纬度,取值 范围是[ $-\pi/2$ , $\pi/2$ ];*h*则表示时角,*h*= $-\varphi$ .

#### 1.3 亮温日变化模型

为了获取全球范围内特定时刻的亮温分布,文 中将分别提取每 20°纬度区域的中心纬度的亮温数 据,建立不同纬度的亮温日变化的高斯拟合模型.为 了降低地形、热属性和介电特性对于同一纬度的影 响,文中从计算速度和数据代表性两方面考虑,选择 每个区域中心纬度±0.1°的数据进行高斯拟合.研 究中,利用3次高斯拟合模型来拟合嫦娥2号的亮 温数据,即:

$$TB_{\text{model}} = a_1 \cdot e^{\langle -((l_1-b_1)/c_1)^2 \rangle} + a_2 \cdot e^{\langle -((l_1-b_2)/c_2)^2 \rangle} + a_3 \cdot e^{\langle -((l_1-b_3)/c_3)^2 \rangle} , \quad (2)$$



图 1 正午时刻 3 GHz 全月亮温

Fig. 1 Lunar bright temperature image at Midday at 3 GHz

其中,h 表示时角,取值范围是[-180°,180°];a、b、c 分别是高斯模型的拟合参数;TB<sub>model</sub>是通过模型计 算不同时角的亮温值.

为了构造正午时刻的全月亮温图像,需要将所 有时间段下的亮温数据转化为正午时刻,即时角为 0°时的亮温值.月球表面上每个点都根据高斯拟合 模型(公式(2))并结合了差分(公式(3))的方法剔除 不同模型的边界效应,得到正午时刻亮温值,即:

$$TB_{noon} = TB_{h(measured)} \bullet TB_{noon(mod elup)} \bullet$$

$$\frac{lat_{(center)} - lat_{(up)}}{20} / TB_{h(mod elup)} + TB_{noon(mod eldown)} \bullet$$

$$\frac{lat_{(down)} - lat_{(center)}}{20} / TB_{h(mod eldown)} .$$
(3)

基于圆锥投影和 GCS\_MOON\_2000 坐标系, 并采用转化后亮温值对 0.5°分辨率的网格进行填 图,得到正午时刻 3 GHz 下全月亮温图(图 1).

### 2 辐射传输模型

通过模拟月壤中的辐射传输过程,建立月表亮 温与月壤介电常数之间的关系.已知月表亮温,可反 演月壤介电常数.研究中,根据前人研究,建立考虑 介电常数分布、月壤层温度分布、月表有效反射率的 双层模型(Shkuratov and Bondarenko, 2001; Fa and Jin, 2007, 2010; 孟治国, 2008; Meng *et al.*, 2011a).模型中只考虑以 $\theta_0$ 发射到自由空间部分的 能量,并且假设月壤各部分的辐射是各向同性的.月 表亮温  $T_{\rm B}$  由来自月壤的辐射  $T_{\rm BI}$  (包括上行辐射  $T_{1up}$ 和下行辐射  $T_{1dn}$ )和来自月岩的辐射  $T_{\rm B2}$ (包括 上行辐射 上行辐射  $T_{2up}$ )组成(图 2),则有:

$$T_{\rm B} = T_{\rm Bl} + T_{\rm B2} = T_{\rm 1up} + T_{\rm 1dn} + T_{\rm 2up}$$
. (4)  
各个辐射分量的表达式为:



#### 图 2 月壤中辐射传输机理



$$T_{1up} = \int_{0}^{d} \frac{1 - r_{p1}}{1 - L} k'_{1} T_{1} \sec\theta_{1} e^{-k'_{1} \sec\theta_{1} z} dz = \frac{1 - r_{p1}}{1 - L} T_{1} (1 - e^{-k'_{1} \sec\theta_{1} d}) , \qquad (5a)$$

$$T_{\rm ldn} = \int_{0}^{d} \frac{1 - r_{\rm pl} r_{\rm p2}}{1 - L} k'_{\rm l} T_{\rm l} \sec\theta_{\rm l} e^{-k'_{\rm l} \sec\theta_{\rm l}(z+d)} dz = \frac{(1 - r_{\rm pl}) r_{\rm p2}}{1 - L} T_{\rm l} (e^{-k'_{\rm l} \sec\theta_{\rm l}d} - e^{-2k'_{\rm l} \sec\theta_{\rm l}d}), \quad (5b)$$

 $T_{2....} =$ 

$$\int_{d}^{\infty} \frac{(1-r_{\rm p1})(1-r_{\rm p2})}{1-L} k_2' T_2 \sec\theta_2 e^{-k_2' \sec\theta_2(z-d)} dz \cdot e^{-k_1' \sec\theta_1 d} = \frac{(1-r_{\rm p1})(1-r_{\rm p2})}{1-L} e^{-k_1' \sec\theta_1 d} .$$
(5c)

$$\begin{aligned} &\mathcal{H}_{2} \mathcal{L}_{1}(5) \mathcal{H}_{1} \mathcal{L}_{2} \mathcal{L}_{1}(4) \mathcal{L}_{2} \mathcal{H}_{1} \mathcal{H}_{2} :\\ &T_{B} = T_{B1} + T_{B2} = T_{1up} + T_{1dn} + T_{2up} = \\ &\frac{1 - r_{p1}}{1 - L} (1 - e^{-\dot{k_{1}} \sec\theta_{1} d}) (1 + r_{p2} e^{-\dot{k_{1}} \sec\theta_{1} d}) T_{1} + \\ &\frac{1 - r_{p1}}{1 - L} (1 - r_{p2}) e^{-\dot{k_{1}} \sec\theta_{1} d} T_{2} . \end{aligned}$$

$$\end{aligned}$$

其中, $\theta_1$  是月壤中的出射角, $\theta_2$  是月岩中的出射角; 1/(1-L)为多次反射系数; f 是频率,为 3 GHz; $\epsilon_1$  是 月壤的介电常数, $\epsilon_2$  是月岩的介电常数;  $r_{p1} =$ 0.035 60,为基于光滑界面得到的真空一月壤界面 的反射率; $r_{p2}=0.044$  40,为月壤一月岩界面的反射 率(Lawson *et al.*, 2000);  $T_1$  为月壤层温度, $T_2$  为 月岩层温度; d 表示月壤厚度;  $k'_1 = 2\pi f \epsilon''_i / (c \sqrt{\epsilon'_i})$ ,  $k'_i (i=1,2)$ 分别代表月壤(i=1)和月岩(i=2).

这里,考虑微波辐射计为垂直观测,观测方向角  $\theta_0 = 0$ ,因此 $\theta_1 = \theta_2 \ge 0$ . $L = r_{\text{pl}} r_{\text{p2}} e^{-2k_1' \sec \theta_1 d} < 0.001$ . 假设多次反射系数1/(1-L) = 1.将1/(1-L) = 1,  $\theta_1 = 0$ , $k_1' = 2\pi f \varepsilon_1'' / (c \sqrt{\varepsilon_1})$ 带入公式(6)可得,  $T_{\text{B}} = (1 - r_{\text{pl}})(1 - e^{-2\pi f \varepsilon_1' / (c \sqrt{\varepsilon_1}) d}) 1 + r_{\text{p2}} e^{-2\pi f \varepsilon_1' / (c \sqrt{\varepsilon_1}) d}) T_1 + (1 - r_{\text{pl}})(1 - r_{\text{p2}}) e^{-2\pi f \varepsilon_1' / (c \sqrt{\varepsilon_1}) d}) T_2$ . (7)

7.

为了建立亮温和介电常数实部的函数关系,将 引入介电损耗角正切概念来表示介电常数实部与虚 部之间的关系,其表示形式为:

$$\tan_{\alpha} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon} \,. \tag{8}$$

通过公式(9)将2个未知量 $\epsilon'$ 和 $\epsilon'$ 化简为 tan $\alpha \cdot \epsilon'$ 和 $\epsilon'$ .将公式(8)带人公式(7)可化简辐射传 输模型来表示介电常数实部和亮温之间的函数关 系,即:

$$T_{\rm B} = (1 - r_{\rm pl})(1 - e^{-2\pi f \tan \sqrt{e_1}/c \cdot d})1 + r_{\rm p2} e^{-2\pi f \tan \sqrt{e_1}/c \cdot d})T_1 + (1 - r_{\rm pl})(1 - r_{\rm p2})e^{-2\pi f \tan \sqrt{e_1}/c \cdot d}T_2.$$
(9)

化简后的辐射传输模型(公式(9))表明,为了结合嫦娥卫星微波辐射计获得的亮温( $T_B$ )数据实现介电常数实部的反演,需要对 $T_1$ 、 $T_2$ 、d、tan $\alpha$ 等参数进行解算.

(1)月壤温度(T<sub>1</sub>)和月岩温度(T<sub>2</sub>).为了获得 公式(9)中月壤温度(T<sub>1</sub>)和月岩温度(T<sub>2</sub>)的全月分 布,需要建立一个适用于时角坐标系的温度梯度模 型.研究中将采用 Lawson 根据 Clementine 全月球 红外数据建立的温度梯度模型,其不仅代表全月的 温度分布,同时也不需要对月表热物理参数进行解 算(Lawson *et al.*, 2000),其分布公式为:

 $T = T_{\rm H} \cos^{1/4}(i)$ . (10) 其中,T 是模拟温度,T<sub>H</sub> 是最高温度,*i* 是纬度.在 月壤温度模型中,月壤的最高温度( $T_{\rm H}$ )为 390 K; 在月 岩 温 度 模 型 中,月 岩 的 最 高 温 度 ( $T_{\rm 2H}$ ) 为 240 K.

(2)月壤厚度(d).研究中将利用全月 DEM 数 据获得公式(9)中月壤厚度(d)值.通过对 Apollo 着 陆点的高程以及实验测量的月壤厚度构造得到月壤 厚度和高程关系,进而获得月壤厚度图(Fa and Jin, 2007).通过 Apollo 数据构造的月壤厚度与月球表 面高程之间的关系为:

$$d = 9.5 + 8.5 \tanh(\frac{h+1\ 200}{1\ 632.5}) , \qquad (11)$$

其中,d(m)为月壤厚度,h为月球表面高程(m).结 合美国国家航天局(NASA)提供的 DEM 数据 Clementine 重力和地形数据(http://pds-geosciences. wustl.edu/missions/clementine/gravtopo.html)得 到月壤厚度分布.

(3)介质损耗角正切(tanα).辐射传输模型(公式(9))中的介电损耗角正切参数,主要是通过 Apollo计划中采集的月壤真实样品在450 MHz频 率下的介电常数等相关参数测量得到的月壤相对介质损耗角正切与密度和成分(FeO+TiO<sub>2</sub>)含量的关系来进行求解(孟治国,2008),即:

$$\tan \alpha = 10^{0.038S + 0.312\rho - 3.260} , \qquad (12)$$

其中, $tan\alpha$  是介电损耗角正切,密度 $\rho=2.3(g/cm^3)$ (孟治国,2008),S(%)是 FeO+TiO<sub>2</sub> 的含量.

公式(12)中的 S 值需要利用 Clementine 可见 光和近红外波段数据反演得到,其反演算法为 (Lucey *et al.*, 1995, 2000):

$$S_{\text{FeO}} = 17.427 \cdot (-\arctan(\frac{R_{950}/R_{750}-1.19}{R_{750}-0.08})) - 656$$
, (13a)

$$S_{\text{TiO}_2} = 3.708 \cdot (\arctan(\frac{R_{415}/R_{750} - 0.42}{R_{750}}))^{5.979}$$
.  
(13b)

其中, S<sub>FeO</sub> 是 FeO 的含量, S<sub>TiO2</sub> 是 TiO2 的含量, R<sub>415</sub>、R<sub>750</sub>、R<sub>950</sub>分别为波长为 415 mm、750 mm 和 950 mm 的 Clementine UVVIS 数据.

### 3 介电常数反演

### 3.1 介电常数反演

基于嫦娥二号卫星微波辐射计测量的全月亮温 (T<sub>B</sub>)数据,基于辐射传输模型(公式(9))实现全月 介电常数实部的初步反演,将介电常数实部的反演 结果结合介电损耗角正切的全月分布可以实现介电 常数虚部的反演(图 3 和图 4).

图 3 是反演的 3 GHz 通道下全月介电常数实 部. 从图 3 看出,月球正面的介电常数比背面的介电 常数整体值大,这与克莱门汀光学遥感测量结果一 致(Lucey *et al.*, 1998). 而月陆地区介电常数相对



图 3 反演 3 GHz 全月介电常数实部

Fig. 3 Inversion of real part of dielectric constant of the lunar for 3 GHz channel





Fig. 4 Inversion of imaginary part of dielectric constant of the lunar for 3 GHz channel

克莱门汀光学遥感测量结果偏大,但这一趋势和嫦 娥1号反演结果却是一致的(王振占等,2009),这 是由于该区域月壤厚度较大,深层月壤相对于表层 月壤密度更大,其介电常数实部也越大.微波遥感相 对于克莱门汀光学遥感来说穿透性更强,探测深度 也更深,因此这一不同于克莱门汀光学遥感的反演 结果也反映了该地区深层月壤的介电特性.

图 4 是反演的全月介电常数虚部.图 4 中介电 常数虚部与介电常数实部分布是相似的,在月陆地 区介电常数虚部反演结果相对实部而言,与克莱门 汀光学遥感数据反演结果更加一致,这是由于随密 度增加而介电常数虚部一般不发生变化.

### 3.2 介电常数的温度校正

同一月球时间下月表温度是随纬度变化的,而 介电常数是随温度变化的.因此需要对同一月球时 间下介电常数进行温度校正,才能将温度校正后的 介电常数与相同温度条件下测量的真实月壤样品介 电常数进行比较验证.

研究中,通过研究温度和介电常数的相关关系, 得到同一温度下的介电常数分布.实验采用吉林省 辉南县采集的火山渣作为模拟月壤,使用安捷伦微 波网络分析仪 85070E 高温探头测量 3 GHz 频率 下,测量了模拟月壤不同温度(-35~30°C)条件下 介电常数实部,得到了介电常数实部随温度变化曲 线(图 5).结果表明,介电常数实部随温度增加而线 性增加,对实验数据进行线性拟合,得到了温度和介 电常数实部的相关关系为:

 $\mathbf{\epsilon}' = 0.007\ 3T + 3.525\ 2.$  (14)

根据温度和介电常数实部相关关系公式(14), 结合温度梯度模型公式(10),对同一时角下的介电 常数实部进行温度校正,得到全月球相同温度



图 5 3 GHz 介电常数实部随温度变化

Fig. 5 Real part of dielectric constant versus temperature for 3 GHz channel



图 6 22 °C下月球表面介电常数实部

Fig. 6 Real part of dielectric constant of the lunar for 3 GHz channel at 22  $^\circ\!\mathrm{C}$ 



图 7 22℃下月球表面介电常数虚部



(22°C)下的介电常数实部分布图(图 6).另外,根据 3GHz下同一温度下的全月介电常数实部,结合 3GHz下全月介质损耗角正切,利用公式(8)得到 3GHz下同一温度条件下的全月介电常数虚部分布 图(图 7).结果表明,其介电常数分布与之前同一时 角下反演结果的变化趋势基本一致,但在低纬太阳

#### 表 1 MRM 反演结果与月壤真实样品测量结果比较

Table 1 Comparison between the experimental results from real lunar soil and MRM inversion results

	月壤真实样品		MRM 反演结果		相对误差(%)	差值(%)
	έ	έ	έ	ε	έ	έ
Apollo 11	2.530	0.0428	2.47	0.0560	2.55	-30.84
Apollo 12	2.280	0.0315	2.45	0.0336	-7.38	-6.80
Apollo 14	2.620	0.0220	2.40	0.0347	8.22	-57.73
Apollo 15	2.375	0.0196	2.48	0.0185	-4.30	5.61
Apollo 16	2.440	0.0076	2.18	0.0137	10.65	-80.26
Apollo 17	2.810	0.0158	2.94	0.0231	-4.62	-46.20

入射角低的高温区域反演结果有降低的趋势,而其 高纬度太阳入射角高的低温区域反演的介电常数较 同一时角下反演结果升高.

### 3.3 验证

为了验证利用微波辐射计反演介电常数的准确 性,将在常温下(22℃)Apollo登月点采集的月壤真 实样品介电常数测量结果(孟治国,2008),与反演 并经温度校正后的介电常数进行比较(表1).

从表1中看出,文中反演的介电常数实部(ε) 与月壤真实样品测量值的相对误差都低于 11%.从 表1中看出文中介电常数虚部( $\epsilon$ )的反演结果和月 壤真实样品在 Apollo 11、14、16、17 登月点处,相对 误差在 30%以上,但差值都在 0.02 以下,误差来源 于仪器误差和模型误差,模型误差主要是由于建立 辐射传输模型时没有考虑介电常数随月壤深度变化 而变化的规律.此外, Apollo 计划中采集是月壤表 面的样品,通过 MRM 反演的介电常数反映的是深 层月壤的介电特性,因此月壤成分上存在的差异也 是误差产生的原因.和其他位于月海的登月点不同, 位于月陆的 Apollo 16 登月点的地形复杂,而 MRM 的探测结果受到地形的影响也较大,因此造成测量 误差也较大.由于介电常数虚部(ε)的数值较小,细 微的差异都会造成相对误差的增大.因此,基于微波 辐射计数据反演介电常数的方法是可行的,至少反 演的介电常数实部是可靠的.

### 4 结论

本文在前人对嫦娥1号微波辐射计数据处理的 基础上,首次利用高斯拟合方式对数据量更加丰富 的嫦娥2号微波辐射计数据进行同一时角的标定, 对分轨的嫦娥2号微波辐射计2级数据进行拼接, 得到同一时间点下嫦娥2号3GHz通道下的全月 微波亮温图像,表现了月表亮温随月球地形、月壤成 分及纬度变化的特征.

基于嫦娥2号微波辐射计亮温数据,结合辐射 传输模型,通过解算相关参数,对3GHz下的全月 介电常数实部和虚部进行初步反演.结果表明在月 海地区的介电常数实部高于月陆地区,月球极地区 域介电常数实部偏低;而介电常数虚部则在月海区 域和艾肯盆地表现出较高的数值,其整体趋势和前 人光学遥感探测的结果一致.

由于温度变化对介电常数的影响,在现有的实 验条件下,尝试对反演的介电常数进行温度校正,得 到了相同温度(22℃)下的全月3GHz介电常数分 布.将温度校正后的反演结果与月壤真实样品的介 电常数测量值进行比较评价:介电常数实部相对误 差基本都在11%以下;而介电常数虚部相对误差虽 在 Apollo11、14、16、17登月点较高,但其数值的偏 差都在0.02以内.

因此,基于嫦娥2号微波辐射计亮温数据,通过 建立辐射传输模型,反演得到月表介电常数是可行 的,特别是反演的介电常数实部是可靠的,这将为月 球微波遥感数据处理以及通过微波遥感反演月壤厚 度、成分等信息奠定基础.

#### References

- Berlin, G. L., Tarabzouni, M. A., Al-Naser, A. H., et al., 1986. SIR-B Subsurface Imaging of a Sand-Buried Landscape: Al Labbah Plateau, Saudi Arabia. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-24 (4): 595-602. doi:10.1109/TGRS.1986.289676
- Fa, W. Z., Jin, Y. Q., 2007. Quantitative Estimation of Helium-3 Spatial Distribution in the Lunar Regolith Layer. *Icarus*, 1990; 15 - 23. doi: 10. 1016/j. icarus. 2007. 03. 014
- Fa, W. Z., Jin, Y. Q., 2010. A Primary Analysis of Microwave Brightness Temperature of Lunar Surface from Chang-E 1 Multi-Channel Adiometer Observation and Inversion of Regolith Layer Thickness. *Icarus*, 207:

605-615. doi:10. 1016/j. icarus. 2009. 11. 034

- Jiang, J. S., Wang, Z. Z., Li, Y., 2008. Study on Theory and Application of CE-1 Micronave Sounding Lunar Surface. *Engineering Sciences*, 10(6):16-22 (in Chinese with English abstract). doi: 10. 3969/j. issn. 1009-1742. 2008. 06. 003
- Lawson, S. L., Jakosky, B. M., Park, H. S., 2000. Brightness Temperature of the Lunar Surface: Calibration and Global Analysis of the Clementine Long-Wave Infrared Camera Data. *Journal of Geophysical Research*, 105: 4273-4290. doi:10.1007/s11432-010-0020-1
- Lucey, P. G., Blewett, D. T., Hawke, B. R., 1998. Mapping the FeO and TiO<sub>2</sub> Content of the Lunar Surface with Multispectral Imagery. *Journal of Geophysical Research*, 103:3679-3699. doi:10.1029/97JE03019
- Lucey, P. G., Blewett, D. T., Jollifff, B. L., 2000. Lunar Iron and Titanium Abundance Algorithms Based on Final Processing of Clementine Ultraviolet-Visible Images. *Journal of Geophysical Research*, 105:20297-20305. doi:10.1029/1999JE001117
- Lucey, P. G., Taylor, G. J., Malaret, E., et al., 1995. Abundance and Distribution of Iron on the Moon. Science, 268:1855-1858. doi:10.1126/science.268.5214.1150
- Matveev, Y. G., Suchkin, G. L., Troitskii, V. S., 1966. Change of Lunite Density with Depth in the Surface Layer. Soviet Astronomy, 9(4):626-631.
- Meng, Z. G., 2008. Lunar Regolith Parameters Retrieval Using Radiative Transfer Simulation and Look-up Technique (Dissertation). Jilin University, Changchun (in Chinese with English abstract).
- Meng, Z. G., Chen, S. B., Du, X. J., et al., 2011a. Influence of Temperature and Frequency on Microwave Dielectric Properties of Lunar Regolith Stimulant. *Chinese Geographical Science*, 21 (1): 94 – 101. doi: 10. 1007/ s11769-011-0443-7
- Meng, Z. G., Chen, S. B., Liu, C., et al., 2008. Simulation on Passive Microwave Radiative Transfer in Inhomogeneous Lunar Regolith. *Journal of Jilin University* (*Earth Science Edition*), 38(6):1070-1074 (in Chi-

nese with English abstract).

- Meng, Z. G., Chen, S. B., Lu, P., et al., 2011b. Research on the Distribution and Content of Water Ice in Lunar Pole Regions Using Clementine UVVIS Data. Journal of Earth Science, 22(5):595-600. doi:10.1007/s12583-011-0210-9
- Shkuratov, Y. G., Bondarenko, N. V., 2001. Regolith Layer Thickness Mapping of the Moon by Radar and Optical Data. *Icarus*, 149: 329 - 338. doi: 10. 1006/icar. 2000. 6545
- Shkuratov, Y. G., Kaydash, V. G., Opanasenko, N. V., 1999. Iron and Titanium Abundance and Maturity Degree Distribution on the Lunar Nearside. *Icarus*, 137: 222-234. doi:10.1006/icar.1999.6046
- Tyler, G. L. , 1968. Brewster Angle of the Lunar Crust. *Nature*, 219(B):1243-1244. doi:10.1038/2191243a0
- Wang, Z. Z., Li, Y., Jiang, J. S., et al., 2009. Lunar Surface Dielectric Constant, Regolith Thickness and Helium-3 Abundance Distributions Retrieved from Microwave Brightness Temperatures of CE-1 Lunar Microwave Sounder. Science in China (Series D), 39(8): 1069-1084 (in Chinese).
- Zheng, Y. C., Tsang, K. T., Chan, K. L., et al., 2012. First Microwave Map of the Moon with Chang'e-1 Data: The Role of Local Time in Global Imaging. *Icarus*, 219: 194-210. doi:10.1016/j.icarus.2012.02.017

### 附中文参考文献

- 姜景山,王振占,李芸,2008. 嫦娥1号卫星微波探月技术机 理和应用研究.中国工程科学,10(6):16-22.
- 孟治国,2008. 月壤参数的辐射传输模拟和查找反演技术研 究(博士学位论文). 长春:吉林大学.
- 孟治国,陈圣波,刘财,等,2008. 非均匀月壤介质中的被动微 波辐射传输模拟. 吉林大学学报(地球科学版),38(6): 1070-1074.
- 王振占,李芸,姜景山,等,2009.用"嫦娥一号"卫星微波探测 仪亮温反演月壤厚度和<sup>3</sup>He资源量评估的方法及初步 结果分析.中国科学(D辑),39(8):1069-1084.