

doi:10.3799/dqkx.2013.088

嫦娥二号卫星微波探测仪数据定标和处理结果

封剑青, 苏彦*, 刘建军, 郑磊, 谭旭, 戴舜, 李俊铎, 邢树果

中国科学院国家天文台月球与深空探测科学应用中心, 北京 100012

摘要: 介绍了嫦娥二号(CE-2)与嫦娥一号(CE-1)搭载的微波探测仪(microwave radiometer, MRM)的不同之处, 给出其亮度温度的算法和地面定标系数, 并得到 CE-2 MRM 获得的全月亮度温度分布图. 分析了亮温的数据规律, 并以此为基础归一化后比较了二者之间的数据差异. 最后比较了不同取值的非线性系数对 CE-2 MRM 亮温定标结果产生的影响. 结果表明: 目前 CE-2 MRM 数据在 3 GHz、19.35 GHz 和 37 GHz 频率符合地基观测结果的范围, 同 CE-1 MRM 结果相比在月球低纬度地区($\leq 50^\circ$)差异在 11 K 以内, 差异的主要原因是 CE-2 定标方法的改进以及定标方程中非线性项的引入, 而 7.8 GHz 通道的数据异常表明该通道存在系统误差.

关键词: 嫦娥二号; 微波探测仪; 亮温规律; 数据比较; 非线性系数; 遥感.

中图分类号: P691

文章编号: 1000-2383(2013)04-0898-09

收稿日期: 2012-11-20

Data Processing and Result Analysis of CE-2 MRM

FENG Jian-qing, SU Yan*, LIU Jian-jun, ZHENG Lei, TAN Xu, DAI Shun, LI Jun-duo, XING Shu-guo

Lunar and Deep Space Exploration Center, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 10012, China

Abstract: The design difference between Chang' E-1 microwave radiometer (CE-1 MRM) and Chang' E-2 microwave radiometer (CE-2 MRM) is presented in this paper, as well as the data processing algorithm and ground calibration coefficients of CE-2 MRM. Based on the data processing results, the distribution of brightness temperature (T_B) of lunar surface is mapped. We propose a normalization model of T_B by analyzing the regularity of the T_B distribution and compare the result T_B obtained by CE-2 MRM with CE-1 MRM. The discrepancy of T_B for CE-2 MRM results from different nonlinear coefficients is presented at last. It is concluded that the CE-2 3 GHz, 19.35 GHz and 37 GHz data coincide with earth-based observation, and the discrepancy between CE-1 and CE-2 MRM is smaller than 11 K. There may be a systematic error on 7.8 GHz channel.

Key words: CE-2; microwave radiometer; brightness temperature; result comparison; nonlinear coefficient; remote sensing.

0 引言

CE-2 卫星发射于 2010 年 10 月 2 日, 星上搭载的有效载荷之一为微波探测仪(MRM). 在科学目标、系统构成、探测原理等方面, CE-2 MRM 与 CE-1 MRM(姜景山等, 2008; 王振占等, 2009; 欧阳自远等, 2002)是相同的: 其科学目标是探测月表亮度温度, 进而反演月壤特性; 系统由 4 个通道组成, 第 1 至第 4 通道分别为 3.0 GHz、7.8 GHz、19.35 GHz 和 37 GHz, 每个通道均由定标支路(包括冷空天线和热源)和观测支路组成; 在轨工作时实时进行两点

定标, 各通道接收机周期性地(一个周期 11.6 s)接收观测信号和定标信号, 输出相应电压值. 地面使用定标数据对接收机标定后, 得到观测信号对应的月面亮温值.

相比于 CE-1 MRM 不同, CE-2 MRM 的 3 GHz 通道定标天线安装方向不是卫星的正 X 轴方向, 而是 X 轴方向偏离 +Z 轴方向 15° , 以此来减小太阳、地球等天体对冷空天线的干扰. 另外, CE-2 轨道高度只有 100 km 左右, 而 CE-1 轨道高度约 200 km, 因此, 天线是印相对 CE-1 较小. 二者的不同之处如表 1 所示.

基金项目: 国家自然科学基金(No. 11173038).

作者简介: 封剑青(1984—), 男, 助理研究员, 主要从事遥感数据的处理和研发.

* **通讯作者:** 苏彦, E-mail: suyan@nao.cas.cn

表 1 CE-1 MRM 和 CE-2 MRM 的不同之处

Table 1 The differences between CE-1 MRM and CE-2 MRM

不同之处	CE-1 MRM	CE-2 MRM
探测轨道高度	200 km	100 km
天线足印	3 GHz 天线足印为 50 km, 其他 3 个通道为 35 km	3 GHz 天线足印为 25 km, 其他 3 个通道为 17.5 km
3 GHz 定标天线安装方向	卫星正 X 轴方向	卫星正 X 轴方向偏离+Z 轴 15°

CE-2 MRM 首次加电时间为 2010 年 10 月 15 日,截止到 2011 年 5 月 20 日离开环月轨道,MRM 总共开机为 282 465 min,获得有效数据共 279 818 min,总计 2 401 轨数据.

关于月球的微波辐射观测研究已经有大量的观测资料,主要是基于地基射电天线.在 CE-2 MRM 的 3 GHz 探测频段,Piddington and Minnett (1951) 在 10 cm 波长处对月球进行过观测,Koshchenko *et al.* (1962) 在 9.6 cm 波长观测发现月球的平均亮温为 230 ± 4.5 K,并且不随月相变化,Medd and Broten (1961) 发表的 3.2 GHz 观测结果也有同样的发现,不过亮温的平均值为 220 K.与 19.35 GHz 相近的是 Zelinskaya *et al.* (1959) 在 1.63 cm 处对月球的观测,其给出了月面中心位置的平均亮温和月相的关系为 $T_c = 224 - 36 \cos(\phi - 40)$,其中 ϕ 表示月相($\phi = 0^\circ$ 表示新月),可以算得最大亮温出现在月相为 220° 时,值为 260 K. Salomonovich and Losovskii (1963) 在 8 mm 对月球亮温度分布进行了观测,使用 22 m 口径天线得到月盘中心亮温 T_c 和月相 ϕ 关系为: $T_c = 211 - 40 \cos(\phi - 40) + 14 \cos(2\phi - 22)$; 较近的则是 2007 年 Keihm 等使用美国 DSS 系列 34 m 望远镜在 S/X/Ka 频段(2.3 GHz、8.4 GHz 和 32 GHz)对月球亮温度进行的观测(Morabito *et al.*, 2008)以及 2009 年我国学

者张喜镇、苏彦等和加拿大 DRAO 天文台合作在 L 波段(1.4 GHz)的观测(Zhang *et al.*, 2012).

地基射电天线观测由于距离较远,分辨率相对于星载辐射计观测要低(DSS 34 m 的 Ka 频段主波束为 0.017° ,对应到月面为 89 km(Morabito *et al.*, 2008)),得到只是月面大范围的亮温平均值,且只能观测月球的正面,所以获得的月面亮温细节比较少. CE-1 MRM 和 CE-2 MRM 所获得的数据则是目前比较详细的分辨率较高的月球微波观测资料,本文在 CE-2 MRM 数据特征和定标结果的基础之上,介绍月面亮温的分布情况,并发掘亮温的数据规律,定量比较 CE-1 MRM 和 CE-2 MRM 的结果差异,为数据使用者提供客观的参考,使用户对数据概况有清晰的认识.

1 数据特征和仪器工作状态

CE-2 是月球极轨卫星,飞行时经过月球两极上空,绕月一周时间约 118 min,相邻两轨间隔在赤道处约 32.7 km. 总的轨道回归周期为一个月左右,约 334 轨(嫦娥一号为 310 轨),期间 MRM 总共可获得 61 万条探测数据. CE-2 MRM 4 个通道天线的月面足印大小:3 GHz 天线月面足印直径为 25 km(对应 CE-1 为 50 km),7.8 GHz、19.35 GHz 和 37 GHz 的足印直径为 17.5 km(对应 CE-1 为 35 km). 在经向方向足印重叠率很高,纬向方向重叠率随着纬度增高而增大. CE-2 MRM 探测获得的亮度温度值,表征的是天线足印范围内月面辐射的微波能量. 图 1 展示了赤道地区相邻两轨 MRM 的观测天线足印.

在轨工作期间,CE-2 MRM 工作环境温度分布在 283~298 K 之间,处于仪器正常工作温度范围

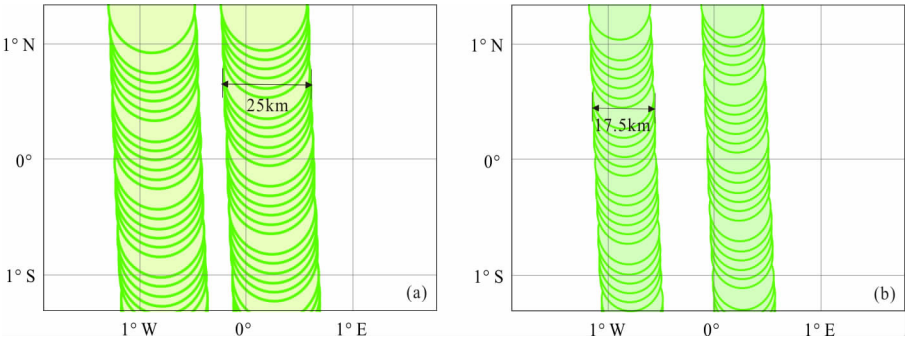


图 1 在月球赤道地区相邻两轨 MRM 的观测天线的月面足印

Fig. 1 Footprints of the CE-2 MRM on lunar surface for two neighbor tracks
a. 3 GHz 观测天线足印; b. 7.8 GHz、19.35 GHz、37 GHz 观测天线足印

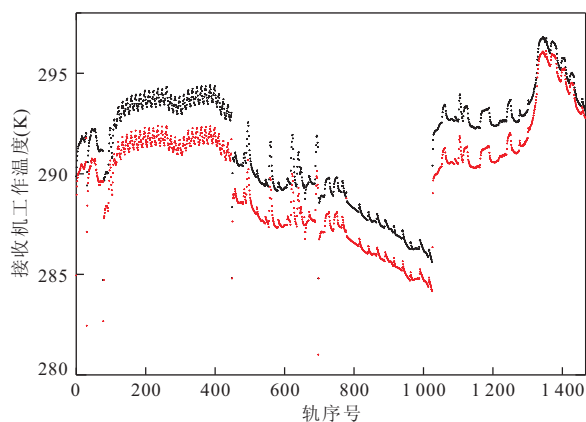


图 2 CE-2 MRM 第一通道接收机工作温度波动情况

Fig. 2 Temperature variation of the MRM channel 1 receiver

图中横坐标表示轨数,纵坐标表示通道接收机中 LNA(低噪声放大器)的物理温度,黑色点表示每轨的温度最大值,红色点表示每轨的温度最小值

内,和 CE-1 MRM 在轨工作情况接近,但是低于地面定标试验时 MRM 所处的环境温度(299~315 K).工作温度主要影响的是接收机增益.图 2 展示了在轨工作时 MRM 第 1 通道的工作温度变化,其他通道的温度和第 1 通道相近.

2 地面定标和定标系数

CE-2 卫星的探测数据由国家天文台月球与深空探测科学应用中心进行接收和处理. MRM 原始数据经过天线温度算法、几何定位算法、亮度温度算法等步骤得到月面的亮度温度值.在 CE-1 MRM 处理模型(王振占等,2009)的基础上,在 CE-2 MRM 数据处理中做了改进:处理模型中引入了非线性系数;对于受到冷空干扰的探测记录,在其质量状态中进行了标定.

CE-2 MRM 硬件传输模型和 CE-1(王振占等,2009)一致,但是在此基础上 CE-2 考虑了系统的非线性,因此天线温度算法公式可以表示为:

$$T_A = \left[\frac{V_A - V_C}{V_H - V_C} T_h + \frac{V_H - V_A}{V_H - V_C} (c_1 T_c + c_2 T_{w-c} + c_3 T_h) - a_2 T_w - a_3 T_s \right] / a_1 + Q / a_1, \quad (1)$$

其中,对月观测支路、冷空支路和热源支路的接收机输出电压分别为 V_A 、 V_C 、 V_H ;而 T_{w-c} 、 T_w 、 T_s 分别是冷空、观测支路波导/电缆以及开关/隔离器的物理温度; T_A 为观测天线的天线温度; T_c 、 T_h 为定标天线输入温度和热源温度,由于热负载安装位置紧贴开关,认为二者温度相同,因此有 $T_h = T_s$; a_1 、

a_2 、 a_3 、 c_1 、 c_2 、 c_3 为定标系数,由地面定标试验估算出.公式中的最后一项 Q 即为非线性项, Q 的表达式(Mo, 1996)为:

$$Q = \mu \left(\frac{T_h - (c_1 T_c + c_2 T_{w-c} + c_3 T_s)}{V_H - V_C} \right)^2 (V_A - V_C)(V_A - V_H), \quad (2)$$

其中 μ 为非线性系数,需由地面的定标试验数据估算出.

(1)式和(2)式中,令 $p_1 = c_1/a_1$, $p_2 = c_2/a_1$, $p_3 = c_3/a_1$, $p_4 = 1/a_1$, $p_5 = a_2/a_1$, $p_6 = a_3/a_1$,则最终的天线温度定标公式可写为:

$$T_A = \frac{V_H - V_A}{V_H - V_C} (p_1 T_c + p_2 T_{w-c} + p_3 T_h) + \frac{V_A - V_C}{V_H - V_C} p_4 T_h - p_5 T_w - p_6 T_h + \mu \left(\frac{p_4 T_h - (p_1 T_c + p_2 T_{w-c} + p_3 T_h)}{V_H - V_C} \right) \left(\frac{T_h - (p_1 T_c + p_2 T_{w-c} + p_3 T_h)/p_4}{V_H - V_C} \right) (V_A - V_C)(V_A - V_H). \quad (3)$$

由(3)式可知,影响最终天线温度结果的是定标系数 p_1 、 p_2 、 p_3 、 p_4 、 p_5 、 p_6 以及非线性系数 μ .不同的定标系数得到的最终结果差异可能较大,而非线性系数对微波探测仪结果的影响可能达到几 K 的量级(Ruf *et al.*, 1995).因此,对定标系数和非线性系数的确定就显得尤为重要.

CE-2 MRM 地面定标试验由载荷研制单位中科院空间中心完成,定标试验在常压条件下的微波暗室中进行.相比于 CE-1 MRM 有所改进的是,CE-2 MRM 的定标试验考虑了星上的工作环境温度,在不同的仪器温度(范围 299~315 K)下进行了试验观测,而 CE-1 MRM 只是在常温下进行的试验观测(王振占等,2009).其他的定标方法和步骤,二者相同.地面定标试验给出的定标系数如表 2 和表 3 所示.

虽然 CE-2 MRM 的地面定标实验有所改进,但仍有局限性.一是试验并未在真空环境下进行;二是卫星在轨运行时,实际的工作温度范围为 285~298 K,而地面定标试验的非线性系数是在环境温度 299~315 K 内获得的,并未包含星上的工作环境温度.因此目前在数据处理的过程中使用温度最接近的非线性系数,即 4 个通道的取值分别为 0.000 35、0.000 178、0.000 409、0.000 359.这样的取值将会导致结果的误差,笔者将在下文讨论其他温度情况时的取值以及和现有取值的比较.

3 CE-2 MRM 数据处理结果

CE-2 MRM 一个月的探测数据分布如图 3 所

表 2 CE-2 MRM 定标试验得到的两个支路的传输系数

Table 2 The calibration coefficients determined by prelaunch calibration test

频率(GHz)	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6
3	1.049 629	0.110 748	0	1.159 119	0.021 71	0.143 442
7.8	1.054 172	0	0.223 788	1.280 389	0.316 347	0
19.35	0.893 143	0.224 638	0	1.113 675	0.078 187	0.041 347
37	0.789 749	0.094 459	0.207 659	1.095 647	0.101 588	0

表 3 CE-2 MRM 定标试验得到的最终的非线性系数 μ 及其最终残差

Table 3 The nonlinear coefficients μ and Rms residual of T_B determined by prelaunch calibration test

频率(GHz)	开关温度(K)	平均 μ	$Rms(K)$
3	299.255	0.000 35	0.365
3	303.252 5	0.000 318	0.320
3	312.757 5	0.000 311	0.225
7.8	303.605	0.000 178	0.095
7.8	308.495	0.000 187	0.130
19.35	299.645	0.000 409	0.165
19.35	304.045	0.000 338	0.100
19.35	309.185	0.000 326	0.195
19.35	314.5	0.000 278	0.230
37	299.58	0.000 359	0.400
37	304.08	0.000 246	0.200
37	315.27	0.000 181	0.130

示,笔者使用第 307~第 640 轨共 334 轨的所有数据进行插值作图,绘制了相应的月球白天的亮温分布图.亮温分布呈现赤道地区高而两极地区低的趋势,亮温的范围在 0~300 K 的范围内,月海地区的亮温要高于月陆地区,这一情况和用地基天线观测月球表面的亮温分布情况是吻合的(Zelinskaya *et al.*, 1959;Koshchenko *et al.*, 1962;Salomonovich and Losovskii, 1963;Morabito *et al.*, 2008).图 3 中横向的亮温分布会有“不连续”情况发生,这种现象是由于此处相邻两轨观测数据刚好相隔一个月,太阳高度角相差较大引起亮温差异所致.

4 CE-2 数据结果分析

4.1 月面亮温分布规律

如图 4 所示,数据处理得到 CE-2 MRM 4 个通道的亮度温度后,相互比较可以发现,在月球白天 4 个通道亮温的大小关系是:37 GHz>19.35 GHz>3 GHz>7.8 GHz;夜晚的亮温大小关系是:3 GHz>19.35 GHz>7.8 GHz>37 GHz(赤道地区).在月面白天的情况下,地基天线观测结果(Ze-

linskaya *et al.*, 1959;Koshchenko *et al.*, 1962;Salomonovich and Losovskii, 1963;Morabito *et al.*, 2008;Zhang *et al.*, 2010)和 CE-1 MRM 探测结果(王振占等,2009)都表明,亮温大小和频率大小成正相关关系,37 GHz、19.35 GHz 和 3 GHz 这 3 个通道的相互关系符合这一规律,而 7.8 GHz 通道的亮温大小有些异常,在图 4 中,白天整体低于 3 GHz,且夜晚时亮温也小于 19.35 GHz,且在两极附近接近 0 K.

由于月球赤道面和太阳黄道面交角很小,太阳基本上直射月球赤道.为了分析 CE-2 获得的月面亮温和太阳光照的变化关系,笔者使用经纬度、太阳入射角、太阳方位角等几何定位数据计算出了每个探测数据所处的“时角”,这样就可以表示月面某个地区在月球“一天”中表面亮温和时间的关系(Chan *et al.*, 2010).图 5 表示出了 CE-2 MRM 和 CE-1 MRM 获得的月面赤道处月面亮温 and 其所处的时角的关系图.图 5 包括了 S1°-N1°范围内所有的数据,时角的 0°对应的是月球“一天”中的正午时刻,时角的 180°对应月球的子夜时分,以此类推,90°~270°为月球夜晚,其余时角为月球白天.

可以看出,在亮温-时角关系上,CE-2 MRM 和 CE-1 MRM 的赤道地区亮温随时间的变化规律非常一致,均表现出一定的周期性,特别是在高频通道:夜晚的亮温变化平缓,呈线性变化,随时角增大而单调下降;白天的亮温变化剧烈,呈曲线变化,亮温的最大值并不在“正午”,而出现在“正午”之后.同样,在月表其他纬度地区,亮温和时角也呈类似的规律.在数值大小上,除 19.35 GHz 亮温比较接近以外,其他 3 个通道二者数值大小有一些差异.

在 CE-1 和 CE-2 之前,研究者们对于月面亮温的研究还通过理论模拟(金亚秋等,2007;Feng *et al.*, 2010)等方法实现,其中 Di Carlofelice and Tognolatti(2009)使用了等效非线性电路的方法来研究月面亮温随时间的变化关系.如图 5 中的模型曲线(频率分别为 3 GHz 和 10 GHz)所示,它们表

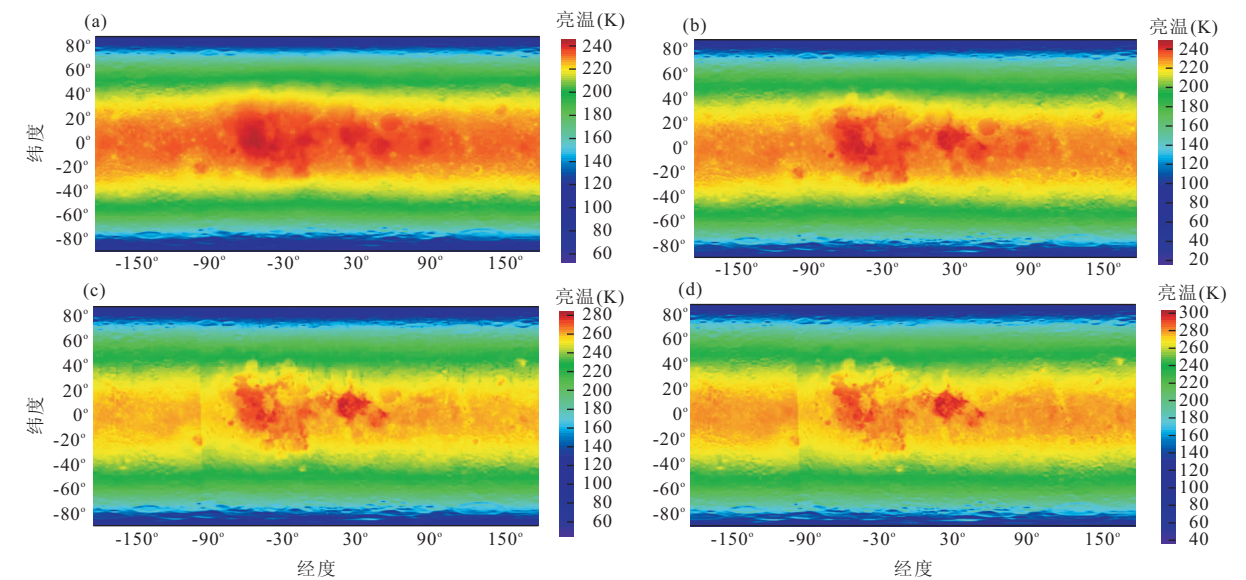


图 3 CE-2 MRM 第一个月获得的全月面白天的亮温分布

Fig. 3 Interpolated maps of the T_B distribution on lunar surface obtained by CE-2 MRM during lunar day

a. 3 GHz, b. 7. 8 GHz, c. 19. 35 GHz, d. 37 GHz 颜色代表亮度温度的大小(单位为 K),采用克里金插值,空间分辨率 18. 2 km,简单圆柱投影

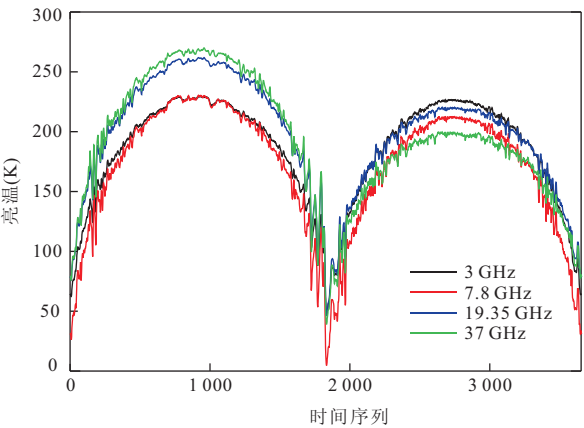


图 4 CE-2 MRM 绕月球一周(118 min)获得的 4 个通道月面亮温比较

Fig. 4 The 4 Channels T_B obtained by CE-2 MRM during an orbit

前半段经过月球阳面(白天),后半段月球阴面(夜晚)

为了更全面地比较两次探测任务获得的亮温的差异,要进行全月球的亮温比较,比较时需要将它们的光照条件统一. 在时角一亮温规律的基础上,笔者对图 5 中的数据拟合了亮温随时角变化的函数,考虑到月球夜晚的亮温受光照影响较小,将二者在月球夜晚获得的月面亮温全部都归一化到子夜时刻(时角为 180°),并用归一化后的 CE-2 结果减去 CE-1 的结果,得到二者探测获得的亮温差异,如表 4 和图 6 所示.

在月面低纬度地区(50°N - 50°S)的范围内,两者的亮温差异趋势平缓. 统计结果如表 4 所示:3 GHz 的 CE-2 MRM 结果平均高出 7. 1 K,7. 8 GHz、19. 35 GHz 和 37 GHz 的结果 CE-2 都比 CE-1 低,其中 7. 8 GHz 平均偏低 25. 8 K. 在月面的高纬度地区,由于太阳高度角低,光照受地形影响较大,归一化的效果不明显,因此差异波动逐渐变大.

从上述统计结果来看,月球低纬度地区,3. 0 GHz、19. 35 GHz、37 GHz 亮温数值大小上二者差异在 11 K 以内,差异随着纬度的增加而逐渐变大. 在 7. 8 GHz 通道上,CE-2 获得的结果比 CE-1 偏低较多.

4. 2 局部区域亮度温度比较

为了更具体的比较 CE-1 MRM 和 CE-2 MRM 探测获取的月面亮温,有必要对局部区域的亮温大小分布进行比较. 前面在比较整体亮温差异时,对 CE-1 和 CE-2 的亮温进行了归一化处理,在局部比

示月球的“一天”的周期中(从“正午”到“夜晚”再到“正午”)赤道地区的亮温变化曲线,不同的曲线表示不同的分层(月壤层/冰层/岩石)厚度情况. 比较图 5 中的曲线和 CE-1、CE-2 数据不难看出,CE-1、CE-2 数据规律和曲线的形状比较接近. 但是 Di Car- lofelice and Tognolatti(2009)为了研究月壤中含冰的可能性,在模型中特意包含了冰层的厚度($0\sim 1\text{ m}$),冰层温度的贡献会降低传输到表面的亮度温度,这使得在亮温数值大小上的模拟值低于 CE-1、CE-2 数据.

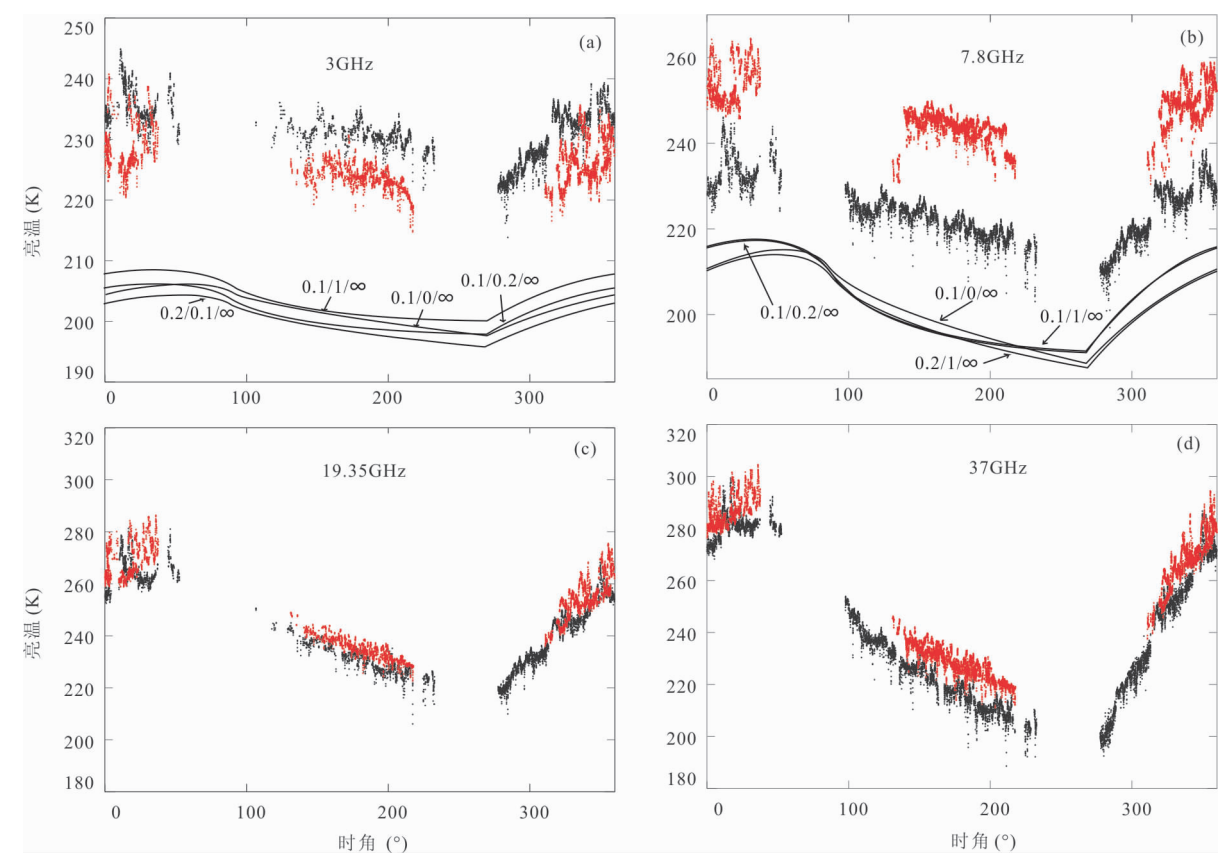


图 5 月面赤道地区的亮温—时角关系
Fig. 5 T_B variation with hour angle
黑色, CE-2 获得的亮温, 红色, CE-1 获得的亮温

表 4 归一化后 CE-2 MRM 和 CE-1 MRM 结果在月面 50°N-50°S 的差异 ΔT_B

Table 4 The statistical results of ΔT_B between CE-2 MRM and CE-1 MRM in 50°N-50°S

通道	平均值(K)	标准差(K)	范围(K)
3 GHz	7.1	1.0	0.8 ~ 16.6
7.8 GHz	-25.8	3.5	-42.6 ~ -16.6
19.35 GHz	-3.5	1.7	-15.2 ~ 15.4
37 GHz	-10.5	1.6	-23.9 ~ 0.0

较时可以选择光照条件接近时的探测结果. 选取 Apollo15 登陆点(3°39′20″E, 26°26′N)附近5°×5°的区域 CE-1 MRM 和 CE-2 MRM 的探测结果进行比较. Apollo15 载人登月舱在哈德利山谷以东着陆, 着陆点位于高出哈德利山谷 4 000 m 以上的山岭与切割深度大于 300 m 的山谷之间(Heiken *et al.*, 1991). CE-1 经过此区域上空时, 太阳入射角为 42.7°, 方位角为 123.9°; 而 CE-2 经过此区域时, 太阳入射角 45.7°, 方位角 116.4°, 二者的光照条件比较相近. 此区域山岭和山谷的高程落差比较大, 会在山岭

西北侧形成阴影区.
从图 7 中 Apollo15 局部地区的亮温分布比较结果可以看出:
(1)CE-2 MRM 和 CE-1 MRM 的亮温低温带都是沿着山谷分布, 但是前者的更能反应地形的影响, 且亮温的波动范围要大, 这是因为嫦娥二号的轨道高度低, 轨间距小, 在相同面积区域获得点更多, 使用相同插值方法后细节更丰富.
(2)在亮度温度大小的比较上, 7.8 GHz 时 CE-2 MRM 的结果较 CE-1 MRM 明显偏低, 19.35 GHz 时 CE-2 比 CE-1 的结果比较接近, 这和前面整体亮温的比较结果一致.

5 非线性项对定标结果的影响

在数据定标过程中, 非线性系数的取值直接关系到最后结果的误差大小, 目前获得的非线性系数的测量是在 299~315 K 内获得的几个值, 要得到在轨工作温度时的, 需使用拟合函数外推法.

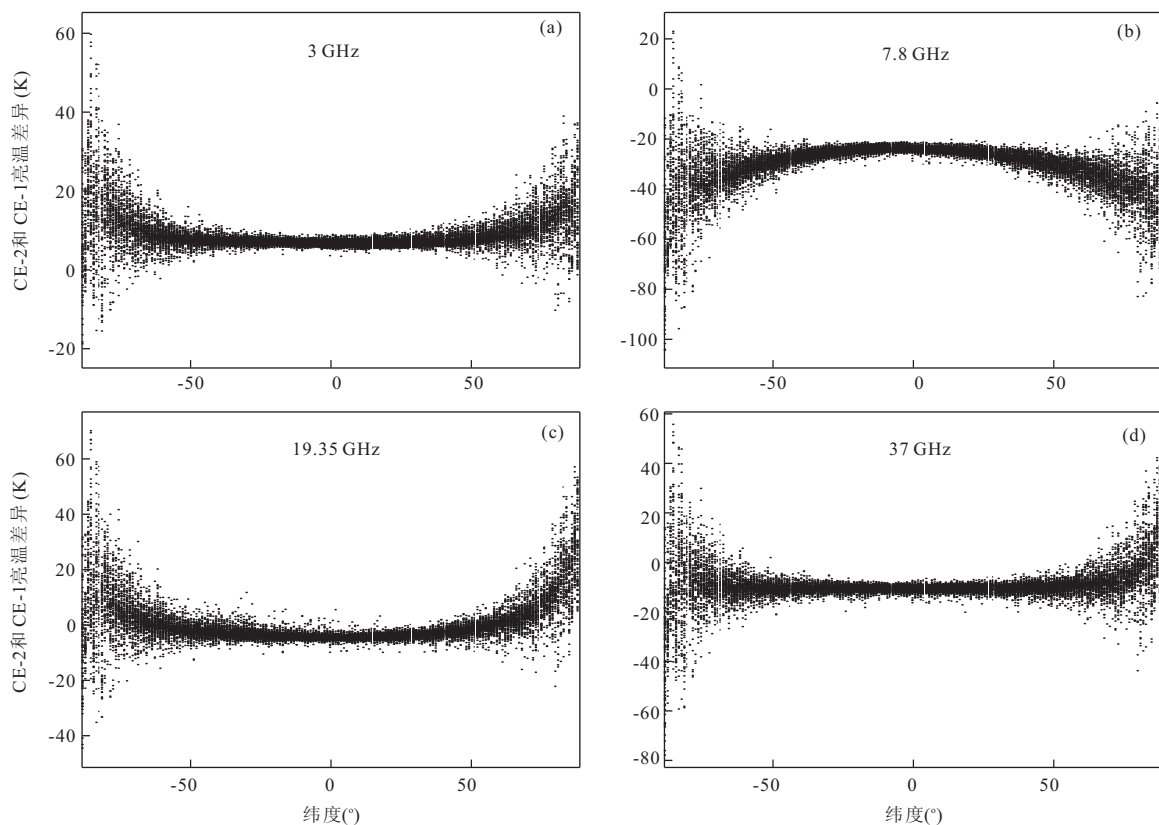


图 6 归一化过后的 CE-2 和 CE-1 月球夜晚 4 个通道亮温的差异随纬度的变化

Fig. 6 The difference between normalized T_B of CE-2 MRM and that of CE-1 MRM in lunar night

为了得到在轨工作时的取值,笔者使用二次曲线拟合了 3.0 GHz、19.35 GHz 和 37 GHz 3 个通道的非线性系数随温度的变化曲线;对于 7.8 GHz,由于数据点不够,没有做拟合,直接使用平均值。从图 2 中可以看出探测仪的工作温度在 285~298 K 之间。因此,笔者使用拟合的曲线进行外推,如图 8 所示,首先求出这两个温度下的 μ 值。得到 285 K 时,3.0 GHz、19.35 GHz 和 37 GHz 3 个通道的 μ 值为:0.000 604、0.000 633 和 0.001 08;298 K 时分别为:0.000 438、0.000 412 和 0.000 425。

参照公式(1),非线性项对月面亮温的影响结果可以用公式(4)表示:

$$T_Q = Q \times p_4 = \mu a^2 (V_A - V_C)(V_A - V_H) \times p_4, \quad (4)$$

T_Q 的取值主要受 μ 、 a 以及 $(V_A - V_C)(V_A - V_H)$ 项的影响;其中 a 为接收机的增益,可以表示为: $a = \frac{T_H - T_C}{V_H - V_C}$,从目前嫦娥二号统计结果来看,37 GHz 通道 a 的范围为 46~48,可以取平均值 47;19.35 GHz 通道 a 的变化较大,平均值取 50;7.8 GHz 通道 a 的值范围为 37~39,取均值 38;3.0 GHz 通

道的 a 值范围为 35~37,取均值 36。式(4)中 $(V_A - V_C)(V_A - V_H) < 0$,其取值最小时 $V_A = \frac{V_C + V_H}{2}$,最小值为 $-\left(\frac{V_H - V_C}{2}\right)^2$ 。若使用外推法得到的 μ 值,相对于目前的 μ 取值,最终月面亮温的最大差异如表 5 所示。

不同温度的下非线性项影响有一定差别,特别是当工作温度降低的时候,非线性项对亮定标结果的影响变大。目前使用的非线性系数 μ 值都是在较高温度测得(>299 K),它的影响不能够代替 285 K 时的非线性项,虽然定标方程中引入了非线性项,但其取值仍是潜在的误差来源。因此,在后续的处理中,可考虑结合仪器的实际工作温度外推 μ 值来计算非线性项。

6 讨论

从目前的数据定标结果来看,CE-2 获得的 4 个通道的亮温规律:亮温的大小受光照的影响较大;同地点白天的亮温大于夜晚的亮度温度;随着纬度的

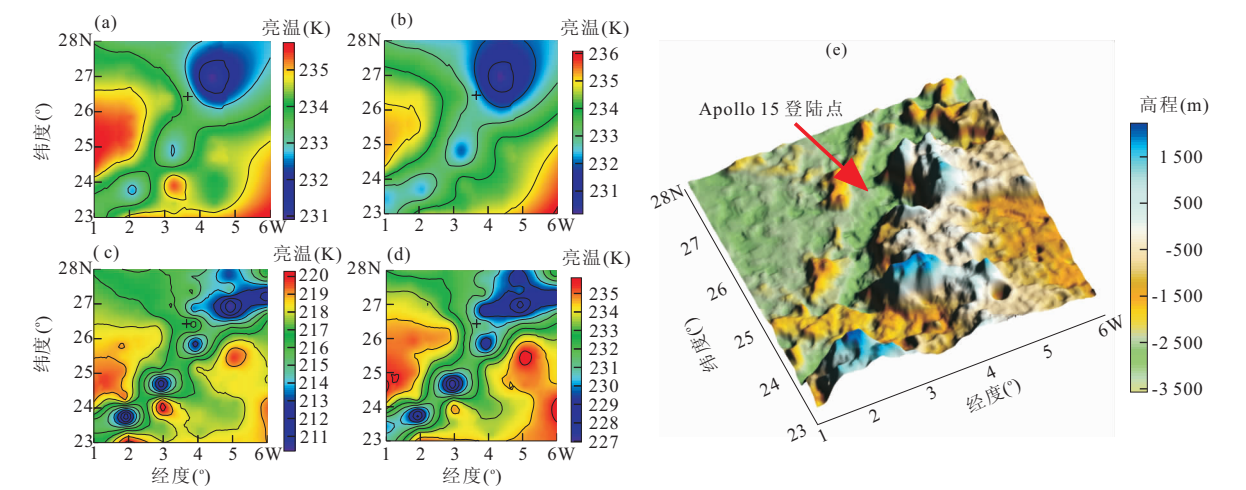


图 7 Apollo15 登陆点附近的亮温和高程

Fig. 7 The T_B distribution and DEM around the Apollo15 landing area

a. CE-1 探测获得的 7.8 GHz 亮温分布;b. CE-1 探测获得的 19.35 GHz 亮温分布;c. CE-2 探测获得的 7.8 GHz 亮温分布;d. CE-2 探测获得的 19.35 GHz 亮温分布;e. Apollo15 登陆点附近的高程信息

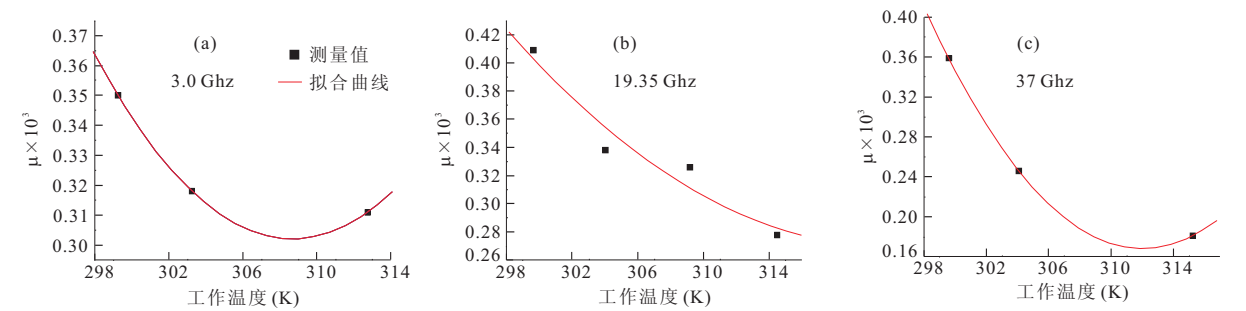


图 8 值随温度变化的拟合曲线

Fig. 8 The fitting curve of variation with temperature

表 5 使用外推法得到的 μ 值和目前 μ 取值在非线性项上的差异

Table 5 The difference between T_B calculated from extrapolated μ and that from current μ

频率	目前取值		外推法 298 K 时取值		外推法 285 K 时取值	
	μ	$T_Q(K)$	μ	$T_Q(K)$	μ	$T_Q(K)$
3 GHz	0.000 35	-3.83	0.000 366	-4.01	0.000 607	-6.64
7.8 GHz	0.000 178	-2.22	0.000 182 5	-2.28	0.000 182 5	-2.28
19.35 GHz	0.000 409	-4.33	0.000 419	-4.43	0.000 639	-6.77
37 GHz	0.000 359	-4.02	0.000 408	-4.57	0.001 07	-11.92

增大,亮温逐渐变小,赤道地区亮温最大,两极地区亮温最小. 这些结果和 CE-1 获得的亮温规律是一致的. 而亮温细节上 CE-2 获得更丰富一些,值得注意的是,月面亮温大小和当地的时角呈周期性函数关系,使用亮温数据时,需要注意它的光照条件.

相对于 CE-1,CE-2 MRM 在地面定标环节做了一些改进:进行了整机定标,并在不同的工作温度下对仪器进行了定标试验,并使用试验数据计算了系统的非线性系数. 从第 5 部分的分析来看,即使在

引入非线性项的前提下,非线性系数取值不同,最后的亮温定标结果能达到 8 K 的差异,而 CE-1 MRM 的定标方程中不包含非线性项. 所以,改进的定标方法以及在定标方程中引入非线性项,应该是造成 CE-2 MRM 和 CE-1 MRM 亮温数据大小差异的主要原因,对于 3 GHz、19.35 GHz 和 37 GHz 通道,CE-2 MRM 获得的定标系数更加准确,定标结果的误差也更小. 而 7.8 GHz 通道无论是从 4 个频率自身大小规律,还是与地基观测和 CE-1 探测结果相

比,都表明有系统偏差存在,这很可能是第二通道的地面定标不充分造成,相同的情况可见 Seasat Scanning Multichannel Microwave Radiometer(SMMR),由于定标不充分,SMMR 的结果存在较大系统误差(Milman and Wilheit, 1985). 因此,对于 7.8 GHz 通道,CE-1 MRM 获得的结果更具参考性。

References

- Chan, K. L., Tsang, K. T., Kong, B., et al., 2010. Lunar Regolith Thermal Behavior Revealed by Chang'E-1 Microwave Brightness Temperature Data. *Earth and Planetary Science Letters*, 295(1–2): 287–291. doi: 10.1016/j.epsl.2010.04.015
- Di Carlofelice, A., Tognolatti, P., 2009. A Non-Linear Circuit Model for Dynamic Evaluation of Microwave Brightness Temperature of the Moon. 39th European Microwave Conference, Rome, Italy, 978–981.
- Feng, J. Q., Zou, Y. L., Bian, W., et al., 2010. Review on Physical Models of Lunar Brightness Temperature. *Chinese Journal of Geochemistry*, 29(2): 204–211. doi: 10.1007/s11631-010-0204-9
- Heiken, G. H., Vaniman, D. T., French, B. M., 1991. Lunar Sourcebook; A User's Guide to the Moon. Cambridge University Press, England, 610.
- Jiang, J. S., Wang, Z. Z., Li, Y., 2008. Study on Theory and Application of CE-1 Microwave Sounding Lunar Surface. *Engineering Science*, 10(6): 16–22 (in Chinese with English abstract).
- Jin, Y. Q., Fa, W. Z., Xu, F., 2007. Modeling Simulation and Inversion for Microwave Active and Passive Remote Sensing of the Lunar Surface. *Remote Sensing Technology and Application*, 22(2): 129–134 (in Chinese with English abstract).
- Koshchenko, V. N., Kuzmin, A. D., Salomonovich, A. E., 1962. Thermal Radio Emission of the Moon at a Wavelength of 10CM. In: Kopal, Z., Mikhailov, Z., eds., *The Moon-IAU Symposium 14*. Academic Press, London and New York, 497–500.
- Medd, W. J., Broten, N. W., 1961. Lunar Temperature Measurements at 3 200 Mc/s. *Planetary and Space Science*, 5(4): 307–313. doi: 10.1016/0032-0633(61)90102-7
- Milman, A. S., Wilheit, T. T., 1985. Sea Surface Temperatures from the Scanning Multichannel Microwave Radiometer on Nimbus 7. *Journal of Geophysical Research*, 90(C6): 11631–11641. doi: 10.1029/JC090iC06p11631
- Mo, T., 1996. Prelaunch Calibration of the Advanced Microwave Sounding Unit-A for NOAA-K. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 44(8): 1460–1469. doi: 10.1109/22.536029
- Morabito, D. D., Imbriale, W., Keihm, S., 2008. Observing the Moon at Microwave Frequencies Using a Large-Diameter Deep Space Network Antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 56(3): 650–660. doi: 10.1109/TAP.2007.915471
- Ouyang, Z. Y., Zou, Y. L., Li, C. L., et al., 2002. Prospect of Exploration and Utilization of Some Lunar Resources. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 27(5): 498–503 (in Chinese with English abstract).
- Piddington, J. H., Minnett, H. C., 1951. Observations of Galactic Radiation at Frequencies of 1 200 and 3 000 Mc/s. *Australian Journal of Chemistry*, 4(4): 459–475. doi: 10.1071/CH9510459
- Ruf, C. S., Keihm, S. J., Janssen, M. A., 1995. TOPEX/Poseidon Microwave Radiometer (TMR). I. Instrument Description and Antenna Temperature Calibration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(1): 125–137. doi: 10.1109/36.368215
- Salomonovich, A. E., Losovskii, B. Y., 1963. Radio-Brightness Distribution on the Lunar Disk at 0.8 cm. *Soviet Astronomy*, 6(6): 833–839.
- Wang, Z. Z., Li, Y., Zhang, X. H., et al., 2009. In-Orbit Calibration of and Antenna Pattern Correction to CE-1 Lunar Microwave Sounder (CELMS). *Science China (Series D)*, 39(8): 1029–1044 (in Chinese with English abstract).
- Zelinskaya, M. R., Troitskii, V. S., Fedoseev, L. I., 1959. Lunar Radio Emissions at 1.63 cm Wavelength. *Soviet Astronomy*, 36(4): 628–632.
- Zhang, X. Z., Gray, A., Su, Y., et al., 2012. New Radio Observations of the Moon at L Band. *Research in Astronomy and Astrophysics (RAA)*, 12(9): 1297–1312.

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.
- 金亚秋,法文哲,徐丰,2007. 月球表面微波主被动遥感的建模模拟与反演. *遥感技术与应用*, 22(2): 129–134.
- 欧阳自远,邹永廖,李春来,等,2002. 月球某些资源的开发利用前景. *地球科学——中国地质大学学报*, 27(5): 498–503.
- 王振占,李芸,张晓辉,等,2009. “嫦娥一号”卫星微波探测仪数据处理模型和月表微波亮温反演方法. *中国科学(D 辑)*, 39(8): 1029–1044.