

L 波段微波辐射计冷空定标源亮温分析

马冠男, 吴 季, 刘 浩

(中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100080)

摘要:欧空局 SMOS 任务的塔克拉玛干沙漠地面定标实验, 采用 L 波段微波辐射计测量塔克拉玛干沙漠的土壤亮温。此辐射计的定标采用冷空作为低温定标源。由于冷空的情况比较复杂, 在 L 波段, 其亮温受到诸多因素的影响。根据日地关系、太阳与天线的位置关系, 建立太阳辐射模型, 得出了任意时刻太阳进入天线视场范围内的影响亮温值, 并简要分析了月球、其它星球、中性氢原子分立谱发射和热源连续谱发射对辐射亮温的影响, 为选取冷空作为低温定标源提供了理论及数据参考。

关 键 词: L 波段微波辐射计; 定标源; 冷空; 亮温分析

中图分类号: TP 732.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0323(2008)02-0219-05

1 引 言

微波辐射计的定标精度不仅反映了仪器研制水平的高低, 而且也影响微波辐射图像解译和判读的准确度, 是实现量化微波遥感的前提。

欧空局 SMOS 任务的塔克拉玛干沙漠地面定标实验采用地基 L-band 微波辐射计测量土壤亮温, 对于它的定标, 由于其自身天线尺寸等因素, 我们不能采用传统的以液氮为冷源的定标方案, 而是采用周期性地观测冷空作为冷源的方法^[1]。NASA 利用 COBE 探测到宇宙冷空的背景辐射亮温为稳定的 $2.73\text{ K}^{[5]}$, 但在实际观测过程中, 由于存在绝对的外界影响, 冷空定标源并没有理想的那么精确。在 L 波段, 大气对辐射测量的影响目前已经有比较成熟的研究结果, 可以认为稳定在 $2.3 \pm 0.2\text{ K}$, 随着天气的变化略有不同^[1], 此问题在本文中不再涉及。由于辐射计的天线通过步进电机控制方位角和俯仰角的角度连续变化, 同时在观测冷空的过程中, 太阳在某些时刻可能进入天线的旁瓣甚至主瓣, 一旦进入就会对测量结果产生很大的影响, 所以必须对这一误差源进行分析。对于此误差源的分析方法不仅适用于本文中 L 波段微波辐射计塔克拉玛干沙漠地面定标实验, 也可推广用于分析地基微波辐射计在其它测量地点太阳辐射的影响。

本文通过日地关系、太阳与天线的位置关系建立了太阳辐射模型, 得出了任意时刻太阳进入天线视场范围内的影响亮温值。同时, 也简单分析了月亮、其它星球、中性氢原子分立谱发射和热源连续谱发射对冷空定标源亮温的影响。

2 太阳辐射的影响

2.1 太阳的辐射状态

太阳射电辐射来自太阳的外层大气等离子体, 其波长范围遍及地面上能够接收到的整个无线电波段。由于 SMOS 任务塔克拉玛干沙漠地面定标实验是在 2008 年, 处于太阳活动极小年, 因此, 主要考虑宁静太阳射电和太阳变发射电产生的总辐射。现在, 还无法获得实地观测时的太阳辐射流量, 本文中 1987 年 9 月 23 日的日环食观测资料中的太阳辐射总流量数据作为分析依据^[2]。在获得实际太阳辐射流量的数值之后, 以下的分析方法还是适用的。在已知太阳总辐射流量的情况下, 通过计算得到太阳辐射产生的天线口面输入亮温, 然后根据 L-band 辐射计的观测点与太阳的相对位置计算太阳对于天线的方位角, 再通过对对应天线的辐射方向图得出太阳辐射对冷空定标源产生的亮温影响。

2.2 天线口面输入亮温

天线单位频率的接受功率可以用下式表示:

收稿日期: 2007-12-05; 修订日期: 2008-02-21

作者简介: 马冠男(1982—), 女, 硕士研究生, 主要从事 L 波段微波辐射计系统数控单元电路设计及定标分析工作。E-mail: maguannan05@yahoo.com.cn。

$$P = SA \tag{1}$$

其中：S 为太阳的辐射流量，以单位频率单位面积的辐射功率为单位；A 为天线的有效面积。而天线有效面积 A 与天线增益 G 存在如下的关系^[3]：

$$A = \frac{\lambda^2}{4\pi}G \tag{2}$$

由此可得：

$$P = \frac{1}{2}S\frac{\lambda^2}{4\pi}G \tag{3}$$

将其转化为天线口面的输入亮温即为：

$$T = P/k = S\frac{\lambda^2}{8\pi \cdot k}G \tag{4}$$

其中：k = 1.38 × 10⁻²³ J/K 为 Boltzmann 常量。2008 年与 1987 年太阳活动均处于极小年。因此，采用 1987 年的太阳观测数据作为参考依据^[2]。本文采用接近辐射计频段的太阳总流量值，天线的增益由 $G = \frac{4\pi}{\Omega_P} \approx 0.78 \frac{4\pi}{\beta_{rx}\beta_{yz}}$ 近似得到，β_{rx}β_{yz} 为半功率波束宽度。频段的波长、增益、天线有效面积和计算所得的天线口面输入亮温列于表 1。

表 1 计算天线温度的各参数

Table 1 Parameters of calculating the brightness temperature of antenna

频率 f(GHz)	太阳总流量 S(s. f. u)	波长 λ (cm)	增益 G(dB)	天线有效 面积 A(m ²)	天线口面等效 亮温 T(K)
1.4	59	21.1	21.55	0.505 8	108.1

由于目前此 L 波段微波辐射计的天线还没有实际完成，所以本文采用模拟的带有旁瓣的矩形天线方向图。假设天线半功率波束宽度是 15°，此与实际设计的天线一致。

2.3 观测模型

图 1 为太阳、地球与辐射计观测点的位置示意图。A 点为辐射计的放置地点，AB 为观测时的天

线方向，S 点为太阳。S 点在 +X 轴、+Y 轴、-X 轴和 -Y 轴时分别对应春分、夏至、秋分、冬至。当太阳进入到冷空定标天线的视场时，称观测点指向太阳的向量 AS 与 AB 的夹角为太阳的方位角。本文只讨论辐射计天线垂直于地平面的情况，对于天线指向其它位置的情况可以同理建立模型。同时以地球坐标系计算太阳的方位角，由图中可得为 π - θ，θ 为 AS 与观测点指向地心的向量 AO 之间的夹角。

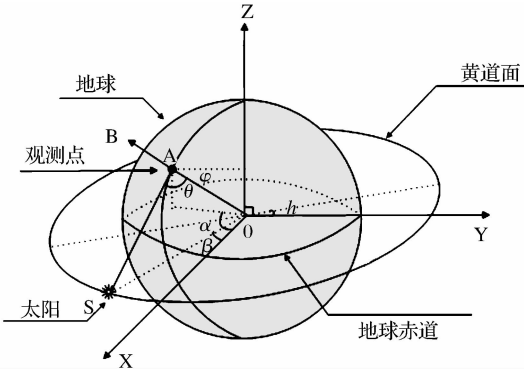


图 1 太阳、地球与辐射计观测点的位置关系
Fig.1 Location relationship of the sun, the earth and the placement of radiometry

辐射计将架设在塔克拉玛干沙漠的中心位置，设为 A(X_A,Y_A,Z_A)，坐标为 (83.40°E,39.00°N)。设 α 为 OA 在 XOY 面上的投影与 X 轴的夹角。假设地球为规则圆形，r 为 OA 的距离，r = 6 371 km，即地球半径。φ 为 A 点的纬度角，可得：

$$\mathbf{OA} = (r\cos\varphi\cos\alpha, r\cos\varphi\sin\alpha, r\sin\varphi) \tag{5}$$

太阳相对地球运动轨迹为 S(X_S,Y_S,Z_S)，假设其轨迹为正圆，半径为 R_S，R_S = 1.5 × 10⁸ km，β 为太阳轨迹与 X 轴的夹角，h 为黄赤交角。考虑到黄赤交角的影响：

$$\mathbf{OS} = (R_S\cos\beta, R_S\sin\beta\cosh, R_S\sin\beta\sinh) \tag{6}$$

$$\mathbf{AS} = (R_S\cos\beta - r\cos\varphi\cos\alpha, R_S\sin\beta\cosh - r\cos\varphi\sin\alpha, R_S\sin\beta\sinh - r\sin\varphi) \tag{7}$$

由此可得：

$$\cos\theta = \frac{r - R_S(\cos\beta\cos\varphi\cos\alpha\sin\beta\sin\alpha\cosh + \sin\beta\sin\varphi\sinh)}{\sqrt{R_S^2 + r^2 - 2R_Sr(\cos\beta\cos\varphi\cos\alpha + \sin\beta\cos\varphi\sin\alpha\cosh + \sin\beta\sin\varphi\sinh)}} \tag{8}$$

由于其它参数均已知，由公式(8)可得 θ 与 α 和 β 的关系，继而得出太阳的方位角与 α 和 β 的关系，再对应天线方向图，与天线口面等效亮温加权得到加权后的亮温 ΔT 与 α 和 β 的关系。

2.4 结果分析

通过分析 ΔT 的变化，我们得到以下几个结论：

(1) ΔT 在 α = 90°、β = 90° 时出现峰值，变化类似一座山峰，平地区就是基本可忽略影响的大部分

区域。峰值为 50.840 8 K,此时太阳辐射对冷空定标源的影响最大,所以应避免在此时段进行观测。如天线在旋转过程中太阳进入了视场,太阳的影响可以通过此辐射模型得出。

(2) α 与地球自转有关,由于地球自转一周即 α 从 $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 约为 24 h,每一时刻均对应一特定 α 值,因此,我们可以得出当地时间与 ΔT 的关系,可以看出,当 A 处于地方时正午时 ΔT 是当日最大值,这与经验相符。由于 A 点的经度约为 90°E ,而北京位于 120°E ,相差约为 30° ,所以 A 点地方时比北京时间晚 2 h,即地方时的正午其实是北京时间的 14 点,同样可推出 A 点的其它地方时对应的北京时间。

(3) β 与地球公转有关,由于地球公转一周即 β 从 $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 约为 365 d,每一天均对应一特定 β 值。图 2(见图版 V)中, $\beta=0^{\circ}, 90^{\circ}, 180^{\circ}, 270^{\circ}$ 分别对应春分、夏至、秋分、冬至。因此,我们可以得出日期与 ΔT 的关系。

(4) 利用正午太阳高度角的概念验证前文结果。正午太阳高度角为正午时太阳光线与地平面的交角,某地正午太阳高度角等于 90° 减去直射点与该地的纬度差,得 A 点的正午太阳高度角范围为 $27^{\circ}34' \sim 74^{\circ}26'$,所以,太阳光线与天线的夹角为 $15^{\circ}34' \sim 62^{\circ}26'$ 。利用前文假设的天线方向图,可得太阳光线与天线的夹角(这里用 θ' 表示)和太阳辐射

产生的影响(这里用 $\Delta T'$ 表示)的关系图如图 3。
可以看出,当 θ' 为 $15^{\circ}34'$ 时, $\Delta T'=50.844\ 5\ \text{K}$,达到最大值。此时,太阳直射北回归线,为夏至日,即前面所分析的 $\beta=90^{\circ}$ 时 ΔT 达到最大值 50.840 8 K 的情况,两结果吻合,也符合我们的生活经验。

由于黄赤交角的存在,可得太阳光线与天线夹角 θ' 与 β 有如下关系:

$$\theta' = \varphi - \arcsin \beta \sin h \tag{10}$$

根据 β 计算得到表 2 中 θ' ,再根据图 3 得对应的 $\Delta T'$,同时重列对应的 ΔT 于表 2。

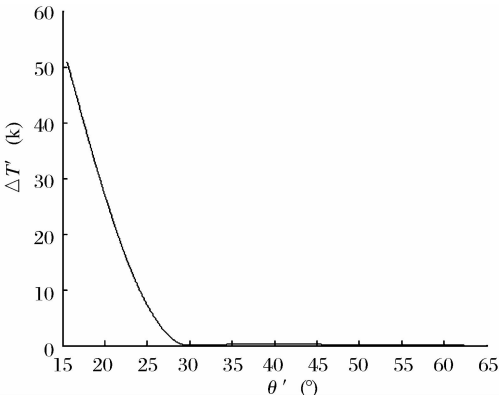


图 3 太阳光线与天线夹角(θ')和太阳辐射产生的影响($\Delta T'$)的关系

Fig.3 Ralationship between θ' and $\Delta T'$
The x axis is the angle between sun light and antenna.
The y axis is the effect of solar radiation

表 2 ΔT 与 $\Delta T'$ 的比较列表
Table 2 Comparison of ΔT and $\Delta T'$

$\beta(^{\circ})$	60	70	80	90	100	110	120
$\theta'(^{\circ})$	18.85	17.06	15.94	15.57	15.94	17.06	18.85
$\Delta T'(\text{K})$	32.844 2	42.480 4	48.738 1	50.825 7	48.738 1	42.480 4	32.844 2
$\Delta T(\text{K})$	32.330 6	42.180 8	48.616 5	50.840 8	48.616 5	42.180 8	32.330 6

由表 2 可以得出,太阳位于其它位置时所得的 $\Delta T'$ 与相应的 ΔT 基本相同,可见前面的分析是符合实际情况的。

(5) 本文中所用的为假设的天线方向图,实际应用时要采用实际天线的辐射方向图、筑波图等加以分析。

(6) 此太阳辐射模型具有广泛的适用性,仅需要对某些参数(如纬度、天线指向角度)进行调整就可以得出地球其它位置的太阳辐射影响状况,所以,此方法为地基微波辐射计冷空定标分析提供了理论参考。

3 月球及其它星球的影响

月球的 L 波段微波辐射主要来自黑体热发射。在 L 波段月亮的温度大约是 200 K,随着月相的变化有微小改变。如前文假设天线增益为 21.55 dB,表面反射率 $R=1$,利用公式^[4]:

$$T_{Ar} = T_{moon} \frac{\Omega_i}{4\pi} |R|^2 G \tag{11}$$

可以得到反射的月亮发射的天线视在亮温。其中, Ω_i 为月亮立体角。

$$\Omega_i = \frac{\pi R_{\text{月亮}}^2}{r_{\text{月地}}^2} \tag{12}$$

$R_{\text{月亮}} = 1.7382 \times 10^3 \text{ km}$, $r_{\text{月地}} = 3.84 \times 10^5 \text{ km}$, 计算可得 $T_{\text{Ar}} = 0.1429 \text{ K}$ 。

对于太阳系中其它星球的辐射影响, 由于其立体角非常小, 通过类似前面的计算可知基本可以忽略。

4 银河噪声的影响

在 L 波段, 还要考虑中性氢原子的分立线性发射和热源的连续谱发射^[6]影响。

中性氢原子在 $21.106 \text{ cm}(1.4124 \text{ GHz})$ 由于跃迁产生辐射, 主要集中于银道面周围。热源的连续谱辐射类似于黑体辐射。在 L 波段, Rayleigh-Jeans 近似适用。目前, 已经对 1.4 GHz 的连续辐射作了若干研究。

在常见的被动式微波遥感中, 我们把对地观测表面看作热源, 并且接收设备是一个窄带系统。在 Rayleigh-Jeans 近似中, 这种测量的结果等效为亮温。利用现代先进的设备我们可以实现 L 波段的射电天文测量, 并且把所得数据转化为能应用于被动微波遥感的等效热源。通过亮温 T_B 的图表示这些数据, 等效热源的总功率用 $P = K T_B \Delta B$, 如果假设带宽 $\Delta B = 20 \text{ MHz}$, 则亮温图如图 4(a)、(c) (见图版 V)^[6] (去除了 2.7 K 的宇宙背景噪声)。

由于天线对接收辐射的平滑作用, 实际测得的视在亮温与图 4 有很大区别, 在银道面尤其明显。图 4(b)、(d) (见图版 V) 是经过半波束宽度为 15° 的高斯波束的天线平滑过的等效亮温图^[6] (去除了 2.7 K 的宇宙背景噪声)。

本文所假设的天线半波束宽度为 15° , 与图 4 所用天线相同, 所以, 可以利用上图得出经天线平滑后分立氢原子和连续谱所产生的亮温影响。由于 A 的纬度为 39°N , 从图 4 可知, 经天线平滑后中性氢原子分立谱发射对应的亮温为 $0 \sim 1 \text{ K}$, 连续谱发射对应的亮温为 $0.5 \sim 3 \text{ K}$ 。

5 结 语

地基 L 波段微波辐射计的定标可以采用冷空作为低温定标源。天线指向冷空获取宇宙背景辐射亮温时可能受到太阳辐射、月球及其它星球辐射、分立氢原子和连续谱发射的影响。

对于太阳辐射的影响, 本文采用 1987 年 9 月 23 日日环食观测的研究数据作为依据, 通过计算得到太阳与天线的方位角, 按照假设的天线辐射方向图得到太阳辐射影响随着地球自转角度 α 和太阳相对黄道面角度 β 的变化趋势。结果显示, 太阳辐射对冷空定标源的影响在 $\alpha = 90^\circ, \beta = 90^\circ$ (即夏至日的正午) 时最大, ΔT 的极大值为 50.8408 K 。

月球的影响利用假设的同样的天线方向图可得约为 0.1429 K , 其它星球的影响由于其自身立体角的限制与太阳相比也很小。

中型氢原子的分立谱发射和热源的连续谱发射的影响, 可以利用已有的射电天文学数据^[5] 经过天线平滑后得到, 中性氢原子分立谱发射对应的亮温为 $0 \sim 1 \text{ K}$, 连续谱发射对应的亮温为 $0.5 \sim 3 \text{ K}$ 。

本文对冷空定标时太阳、月球等其它因素的影响作了定量及定性分析, 其结果为大口径天线的地基辐射计利用冷空作为冷源定标的数据处理提供了参考。

参考文献:

- [1] Lemaitre F, Poussière J C, Kerr Y, *et al.* Design and Test of the Ground Based L-band Radiometer for Estimating Water in Soils (LEWIS)[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(8): 1666-1676.
- [2] Huang T C, Tao S Y. The Annular Eclipse Observation on September 23, 1987[M]. Beijing: Science Press, 1990. [黄天锡, 陶诗言. 1987 年 9 月 23 日中国日环食观测研究文集[M]. 北京: 科学出版社, 1990.]
- [3] Zhao R Y, Jin S Z, Fu Q J. Solar Radio Microwave Burst[M]. Beijing: Science Press, 1997. [赵仁扬, 金声震, 傅其骏. 太阳射电微波爆发[M]. 北京: 科学出版社, 1997.]
- [4] Yueh S H, West R, Wilson W J, *et al.* Error Sources and Feasibility for Microwave Remote Sensing of Ocean Surface Salinity [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 2001, 39(5): 1049-1060.
- [5] Le Vine D M, Abraham S. Galactic Noise and Passive Microwave Remote Sensing from Space at L-Band[J]. IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(1): 119-129.
- [6] Le Vine D M, Abraham S, Kerr Y H, *et al.* Comparison of Model Prediction with Measurements of Galactic Background Noise at L-Band [J]. IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43(9): 2018-2023.

Analysis of the Cold Sky Brightness Temperature of L-band Radiometry Calibration

MA Guan-nan, WU Ji, LIU Hao

(Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: The ground calibration experiment for ESA's SMOS Mission will use an L-band radiometry to measure soil brightness temperature of Takelamagan Desert. This radiometry's calibration "cold" target is cold sky. Because of the complex condition, in L-band, many factors have effect on brightness temperature of cold sky. This issue establishes a sun radiation model to calculate real-time brightness temperature when it crosses the view field of antenna to the position relationship between sun and earth, also between sun and antenna. It analyzes briefly the radiometric temperature under the influences of moon, planets in our solar system and galactic radio emission. This issue provides theoretical and numerical reference for choosing the cold sky as "cold" target in calibration.

Key words: L-band radiometry; Calibration target; Cold sky; Brightness temperature analysis