

文章编号: 2095-4980(2018)01-0110-05

静止轨道微波辐射计在轨冷定标方案初探

李向芹, 谢振超, 姜丽菲, 周 辉, 徐红新

(上海航天电子技术研究所, 上海 201109)

摘 要: 地球静止轨道微波辐射计利用大气吸收频段对温湿度廓线探测, 辐射计在轨采用冷空作为低温定标源。当反射器指向冷空获取宇宙背景辐射亮温时, 太阳或其他星体会进入冷空观测视场, 由于其亮温远远高于冷空辐射亮温 2.73 K, 一旦进入会严重影响冷空观测值。为充分有效利用辐射计观测数据, 本文主要分析最大影响源太阳对冷空观测亮温的影响, 初步给出一种静止轨道微波辐射计冷定标方案, 使冷空观测亮温与背景标准值的最大偏差降低至 0.04 K, 同时也分析了月球和卫星本体等因素对冷空观测亮温的影响。

关键词: 地球静止轨道; 微波辐射计; 冷定标; 太阳辐射

中图分类号: TN015

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201801.0110

Preliminary design of the cold calibration for a millimeter wave radiometer in a stationary orbit

LI Xiangqin, XIE Zhenchao, JIANG Lifei, ZHOU Hui, XU Hongxin

(Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: The earth orbit millimeter wave radiometer detects the temperature and humidity profiles by atmospheric absorption band, using cold air as low temperature calibration source in orbit. When the calibration mirror points to the cold space to obtain the cosmic background radiation brightness temperature, the sun or other star affects the brightness temperature of cold air observation. Since the brightness temperature is much higher than 2.73 K, once entering it will seriously affect the observation values of cold air. In order to make full use of the observation data of radiometer, the influence of the sun on cold space observation brightness temperature is analyzed. A new method for the cold calibration of millimeter wave radiometer in a stationary orbit is presented, which makes the maximum deviation of the brightness temperature being reduced to 0.04 K. Other influence factors are analyzed as well.

Keywords: geostationary orbit; microwave radiometer; cold calibration; solar radiation

我国已在极轨气象卫星上实现微波探测载荷^[1-2], 取得非常有效的探测效果, 可以满足一定天气预报、气候观测和地表监测, 但是由于极轨气象卫星在时间分辨率方面的限制, 还不能满足短临天气预报需求。虽然通过多颗组网, 可以满足一定程度的突发天气监测, 但是在探测范围和时间频次方面, 仍然存在一定的限制。相比极轨气象卫星微波载荷, 地球静止轨道微波遥感载荷拥有极轨载荷所不具备的高频次观测能力, 可对台风、流域性降水进行有效监测, 在静止轨道卫星上实现微波探测将在数值预报和短临天气预报方面具有突出的优势^[3-4]。

国际上对静止轨道微波探测仪的研究从 20 世纪 90 年代到目前一直没有停止过。静止轨道的轨道高度远远大于极轨, 为实现同样的空间分辨率, 需要增大天线口径^[5]或者采用综合孔径探测方式。由于综合孔径所采用的单元天线/接收机数目过于庞大, 系统复杂, 单元一致性要求高, 而且定标困难, 故采用实孔径微波辐射计。美国提出了静止轨道微波辐射计(Geostationary Microwave, GEM)^[6]的方案, 采用孔径为 2 m 的卡塞格伦天线, 频率为 54 GHz, 118 GHz, 183 GHz, 380 GHz 和 424 GHz; 欧洲也采纳了该思想, 提出了名为微波大气探测静止观测平台计划(Geostationary Observatory for Microwave Atmospheric Sounding, GOMAS)^[7]的静止轨道毫米波与亚毫米波探测方案, 天线的口径提高到 3m, 也是采用正馈卡塞格伦天线; 在 GOMAS 的基础上, 欧洲又提出了 Sula 计划, Sula 探测仪采用偏置卡塞格伦天线方案, 提高了天线的主波束效率。

定标是建立微波辐射计的测量输出与地物辐射之间量化关系的过程,是辐射计进行量化应用的前提。辐射计在轨采用热辐射源与冷空作为高温和低温定标源,其中热辐射源外壳采用了保温措施,具有很好的保温性能,其温度稳定性可以得到保证,不会受到太阳照射的影响。美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)利用宇宙背景探索者(Cosmic Background Explorer, COBE)探测到宇宙冷空的背景辐射亮温为稳定的 2.73 K^[8],但在实际观测过程中,存在绝对的外界影响,冷空定标源并不能达到理想值。辐射计在轨随整星作扫描运动,太阳辐射对冷定标的影响最大,会造成观测值与背景亮温产生差异,影响大气参数反演精度和辐射数据同化应用质量,所以必须对这一误差源进行分析。

本文量化分析冷空观测亮温受太阳、月球和卫星本体的影响效应,设计一种静止轨道辐射计冷定标方案,有效避开太阳、月球及卫星本体对冷定标的影响。

1 微波辐射计在轨冷定标受太阳影响分析

1.1 量化分析太阳对冷空观测亮温影响效应

静止轨道微波辐射计在轨定标采用冷空背景辐射作为冷端参考点,辐射计在垂直于卫星行进方向的平面内旋转快速扫描。太阳辐射来自太阳外层大气等离子体,其波长范围遍及地面上能够接收到的整个无线电波段,卫星在行进过程中,太阳光线会进入辐射计冷空观测视场,使辐射计观测到的冷空计数值升高,影响最大的情形是太阳位于辐射计定标天线主波束中心,如图1所示。

根据太阳直径 $D=1.392\times 10^6$ km,太阳距地心平均距离为 $H_1=1.5\times 10^8$ km,静止轨道高度为 $H_2=35\ 800$ km,由式(1)可以计算出太阳对静止轨道辐射计的视张角为 $\theta=0.5^\circ$ 。

$$\theta = 2\arctan \left[\frac{D}{2(H_1-H_2)} \right] \quad (1)$$

太阳射电辐射来自太阳的外层大气,其波长范围遍及整个无线电波段。现在还无法获得卫星在轨飞行时实际的太阳辐射流量,本文以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^[9],在54~425 GHz频段内,太阳辐射亮温约为6 000 K,冷空微波辐射亮温约为2.73 K,辐射计系统冷空观测受到太阳辐射影响,冷空观测结果可按照下述公式描述。

$$T_c = (1-\eta)T_{\cos} + \eta T_e \quad (2)$$

式中: T_c 为实际冷空观测结果; $T_{\cos}$ 为冷空背景辐射亮温; η 为太阳辐射对冷空亮温影响系数; T_e 为太阳射电辐射亮温。

表1 冷空观测亮温受太阳影响
Table1 Cold temperature influenced by solar radiation

frequency/GHz	cold temperature T_c influenced by solar radiation/K	error/K
54	41.20	38.47
89	93.30	90.57
166	152.90	150.17
183	73.24	70.51
425	286.50	283.77

由表1可知,当太阳光线位于辐射计定标天线主波束中心,受影响的冷空观测亮温最高为286.5 K,远远超过2.73 K,导致定标结果严重异常。

1.2 太阳对微波辐射计定标影响机理

通常静止轨道微波辐射计采用平方率检波器^[10],其线性定标公式见式(3)。

$$T = aC_e + b \quad (3)$$

式中: T 为对地观测亮温; a, b 为线性定标系数; C_e 为对地观测计数值。

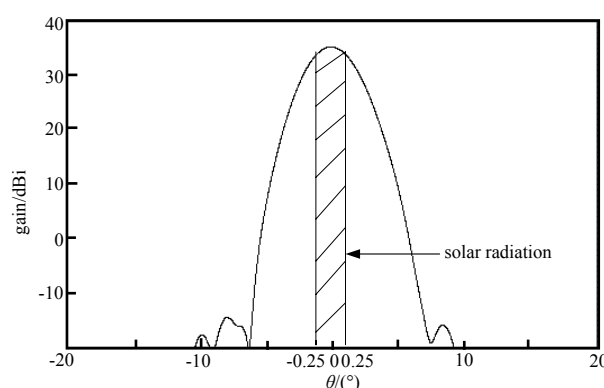


Fig.1 Cold air radiation pattern
图1 冷空辐射方向图

$$a = \frac{T_w - T_c}{C_w - C_c} \quad (4)$$

$$b = \frac{T_c C_w - T_w C_c}{C_w - C_c} \quad (5)$$

式中： C_w 和 C_c 分别为热源和冷定标观测计数的平均值， T_w 和 T_c 为热源和冷空对应的辐射亮温。线性定标过程涉及到4个基础参数，除冷空温度外，其他3个参数都是在轨实测值，包括热源温度、热源观测计数值和冷空观测计数值。

若没有太阳影响，冷空温度和观测计数值匹配，受影响后，冷空实际亮温为 $T_c = T_{c0} + T_{\text{sun}}$ (T_{sun} 为太阳影响造成的附加辐射量， T_{c0} 为冷空背景辐射亮温

2.73 K)，如果仍按照 $T_c = T_{c0}$ ，会导致 T_c 和 C_c 二者失配，如图2所示。

由图2可知，正常定标线为冷空参考点 A (亮温 2.73 K) 和热源参考点 C (假设在轨平均状态下为 300 K) 的连线。当冷空观测过程中受到太阳影响后，其观测计数值会升高，如果冷空仍按照 2.73 K 来进行辐射定标，冷空参考点相当于移到 $A_1(A_2)$ ， $A_1(A_2)$ 与 C 点确定的定标线斜率相对于正常定标线 AC 明显增大，严重影响定标精确度。

2 静止轨道微波辐射计冷定标方案设计

2.1 静止轨道特点

地球静止轨道卫星轨道面与地球赤道面基本重合，处在该轨道上的卫星星下点位置静止不动，卫星相对地面观测目标的方位角和仰角不变，静止轨道微波辐射计观测主天线方向沿卫星本体指向地球。太阳周年视运动如图3所示，太阳和地球中心的连线与地球赤道面的夹角称为太阳赤纬角，赤纬角以年为周期，在北回归线 $+23^\circ 27'$ 与南回归线 $-23^\circ 27'$ 之间移动。

如果将辐射计冷空观测指向设计在地球赤道平面内，太阳光线与冷空观测波束指向随季节变化如图4所示。在春分和秋分某个时刻，太阳光线与冷空观测指向夹角为 0° ，见表2。此时太阳光线直接指向冷空观测波束中心。

表2 太阳光线与冷空观测波束夹角(冷空观测指向在赤道平面内)
Table2 Optimization angle between solar incident and cold air beam in the equatorial plane

state	angle
vernal equinox	0°
summer solstice	$23^\circ 27'$
autumnal equinox	0°
winter solstice	$23^\circ 27'$

2.2 静止轨道微波辐射计冷定标设计

由上述分析可知，避开太阳影响的最佳设计应该是将冷空观测方向设计为垂直于赤道平面，考虑卫星本体影响，现将冷空观测方向设计为与赤道平面夹角为 70° 的方向，并给出不同时刻太阳光线与冷空观测波束之间的夹角，如图5所示。

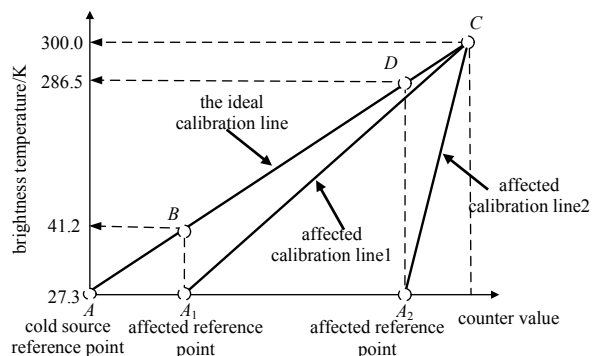


Fig.2 Influence mechanism of solar radiation on millimeter wave radiometer
图2 太阳对辐射计冷定标机理图

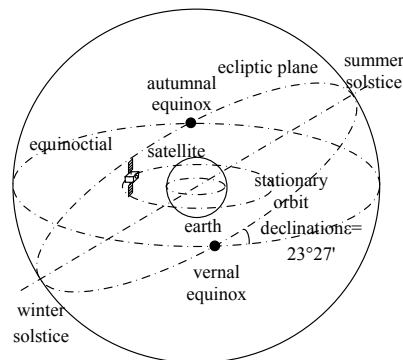


Fig.3 Visual motion of the sun
图3 太阳周年视运动图

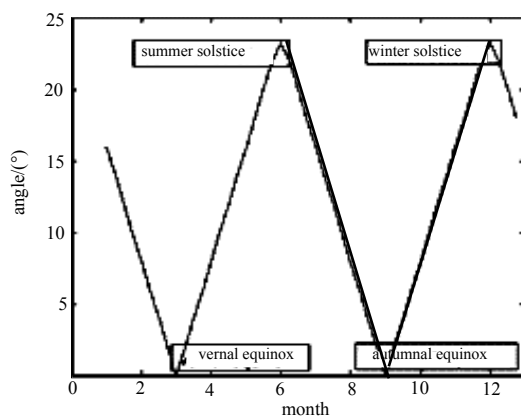


Fig.4 Optimization angle between solar incident and cold air beam in the equatorial plane
图4 太阳光线与冷空观测波束夹角(冷空观测指向在赤道平面内)

由表3可知, 此方案中太阳光线与冷空观测波束最小夹角为 $46^{\circ}73'$, 下面给出此角度下太阳对冷空观测亮温的影响, 如图6所示, 图中阴影区域 $46.5^{\circ}\sim 47^{\circ}$ 范围内是受太阳辐射影响区域, 其他区域都是观测冷空。

由表4可知, 通过将冷定标避开太阳影响设计后, 冷空观测亮温与背景标准值的最大偏差为 0.04 K , 可忽略不计。

3 微波辐射计在轨定标的其他几点考虑

3.1 月球对冷空观测亮温的影响

月球微波段辐射主要来自黑体热发射, 在微波段月亮的温度大约为 200 K ^[11], 随着月相的变化有微小改变, 根据月球与卫星相对位置关系, 即可求出月球对冷空观测亮温影响大约为 $1.4\times 10^{-3}\text{ K}$ 。对于太阳系中其他星球的辐射影响, 由于其立体角非常小, 通过类似上述计算可知基本可忽略。

3.2 卫星本体对冷空观测亮温的影响

星载微波辐射计在轨运行时, 指向冷空方向的定标天线会接收来自星体的辐射, 若把星体看作是一个均匀的辐射体, 根据冷定标天线与星体的相对位置计算卫星本体相对于天线的入射角, 冷定标天线主波束效率最小值为 94.75% , 设星体反射率为 0.99 , 物理温度为 100°C (373 K), 辐射的亮温为 3.73 K , 则副瓣观测星体辐射引起的亮温偏差为 0.05 K , 基本可忽略。

3.3 冷空反射器噪声温度

当均匀平面电磁波斜入射到具有金属涂层的反射面表面时, 反射面的功率传输系数会发生变化。假设涂层采用金属铝, 其电导率 $\sigma=3.82\times 10^7$, 当频率为 $54\sim 425\text{ GHz}$ 时, 反射面的功率传输系数最小值为 0.996 , 当冷空入射信号亮温为 2.73 K , 冷空反射器物理温度为 100°C (373 K)时, 引起冷空观测亮温偏差最大值为 1.48 K , 由于反射器温度在轨可实时监测, 此误差可较正。

4 结论

本文介绍一种太阳辐射对静止轨道辐射计冷定标源亮温影响机理的分析方法, 此方法不仅适用于本文中静止轨道微波辐射计, 也可推广用于未来在静止轨道上工作的一切微波辐射计。结合静止轨道卫星与太阳、月亮之间的关系, 给出了一种静止轨道微波辐射计冷定标方案设计, 有效地避开太阳、月亮和卫星本体对冷空观测亮温的影响。

参考文献:

- [1] 李叶飞, 曹琼, 杨勇. 我国极轨气象卫星的发展[J]. 上海航天, 2012, 29(4): 7-13. (LI Yefei, CAO Qiong, YANG Yong. Development of China polar orbiting meteorological satellite[J]. Aerospace Shanghai, 2012, 29(4): 7-13.)

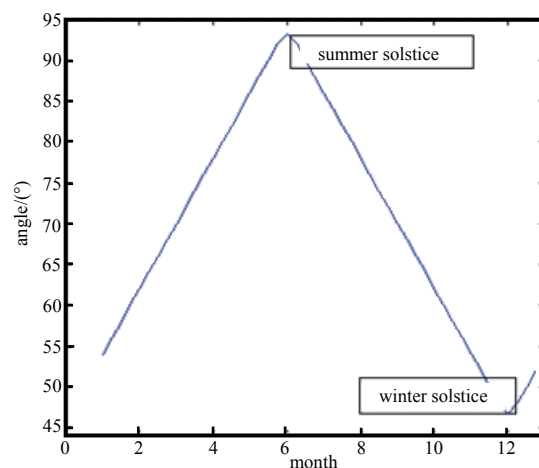


Fig.5 Optimization angle between solar incident and cold air beam
图 5 太阳光线与冷空观测波束夹角(冷空观测指向垂直赤道平面)

表 3 太阳光线与冷空观测波束夹角(冷空观测指向垂直赤道平面)
Table3 Optimization angle between solar incident and cold air beam

state	angle
vernal equinox	70°
summer solstice	$93^{\circ}27'$
autumnal equinox	70°
winter solstice	$46^{\circ}73'$

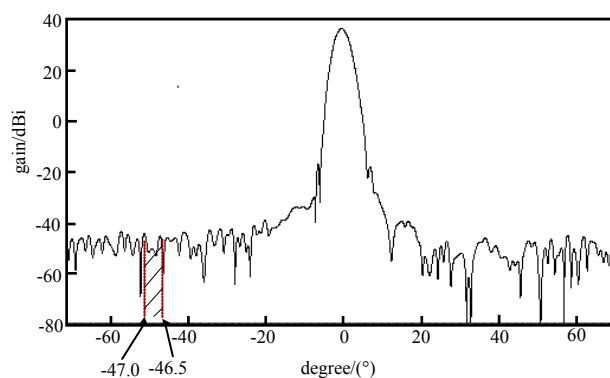


Fig.6 Cold air radiation pattern
图 6 冷定标天线远场辐射方向图

表 4 受太阳辐射影响后的冷空观测亮温

Table4 Optimization brightness temperature observed by cold air after the sun

frequency/GHz	cold air observation brightness temperature/K	error/K
54	2.734 243	0.4×10^{-2}
89	2.730 003	3.2×10^{-6}
166	2.730 005	4.7×10^{-6}
183	2.730 001	1.1×10^{-6}
425	2.730 000	2.9×10^{-8}

- [2] 邹晓蕾. 极轨气象卫星微波温度探测仪资料的分辨率[J]. 气象科技进展, 2012,2(2):38-41. (ZOU Xiaolei. Observation resolutions of microwave temperature sounding instruments onboard polar-orbiting meteorological satellites[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2012,2(2):38-41.)
- [3] 曹广真,张鹏,胡秀清. 静止与极轨气象卫星监测沙尘的融合算法研究[J]. 气象科技进展, 2016,6(1):116-119. (CAO Guangzhen, ZHANG Peng, HU Xiuqing. Study on the fusion of dust products of geostationary and polar-orbiting meteorological satellites based on improved evidence theory algorithm[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2016,6(1):116-119.)
- [4] 董瑶海. 风云四号气象卫星及其应用展望[J]. 上海航天, 2016,33(2):1-8. (DONG Yaohai. FY-4 meteorological satellite and its application prospect[J]. Aerospace Shanghai, 2016,33(2):1-8.)
- [5] 李向芹,谢振超. 基于参数化控制的亚毫米波辐射计天线容差分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(4):508-512. (LI Xiangqin, XIE Zhenchao. Tolerance analysis of millimeter and sub-millimeter wave radiometer antenna based on parametric control method[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(4):508-512.)
- [6] GASIEWSKI A J, VORONOVICH A. Geosynchronous Microwave (GEM) sounder/imager observation system simulation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003(2):1209-1211.
- [7] BIZZARRI B, GASIEWSKI, STAELIN D. Initiatives for millimetre/submillimetre-wave sounding from geostationary orbit[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002(1):548-552.
- [8] LE Vine D M, ABRAHAM S. Galactic noise and passive micro wave remote sensing from space at L band[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004,42(1):119-129.
- [9] 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. (HUANG Tianxi, TAO Shiyan. The annular eclipse observation on September 23, 1987[M]. Beijing: Science Press, 1990.)
- [10] 何杰颖,张升伟,赵瑾. 增益对星载微波辐射计系统线性度的影响分析[J]. 空间科学学报, 2012,32(3):449-454. (HE Jieying, ZHANG Shengwei, ZHAO Jin. Analysis of the system linearity caused by gain variation of spaceborne microwave radiometer, 2012,32(3):449-454.)
- [11] 谷松岩,吴荣华,游然. FY-3A/MWHS 冷空值受月球影响分析及修正[J]. 应用气象学报, 2015,26(4):442-450. (GU Songyan, WU Ronghua, YOU Ran. The analysis and correction of lunar intrusion to space view of FY-3A/MWHS[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2015,26(4):442-450.)

作者简介:



李向芹(1986-), 女, 安徽省宣城市人, 工程师, 主要从事辐射计天线设计. email: xxiahhuarrong@126.com.

谢振超(1982-), 男, 上海市人, 高级工程师, 主要从事辐射计系统、辐射计天线研究工作.

姜丽菲(1983-), 女, 长春市人, 高级工程师, 主要从事辐射计馈电、定标研究工作.

周 辉(1986-), 男, 江苏省南通市人, 工程师, 主要从事辐射计结构研究工作.

徐红新(1978-), 男, 江苏省徐州市人, 高级工程师, 主要从事辐射计系统研究工作.