

# 一种基于极化线栅的 微波辐射计变温定标源研究

董 帅<sup>1,2</sup>, 王振占<sup>1</sup>, 王新彪<sup>1</sup>, 贺秋瑞<sup>1,3</sup>, 李骄阳<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190; 2. 北京无线电测量研究所, 北京 100854; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 根据极化线栅的准光学的极化分离原理, 设计了由极化线栅、人造黑体和冷空构成的新型线栅定标源。定标源通过极化线栅的旋转混合人造黑体和冷空的辐射能量, 从而输出亮温变化可控的微波辐射, 为微波辐射计外定标提供人造变温源, 解决了低频段大口径天线辐射计的外定标难题。通过定标实验验证, 极化线栅在 L 波段的透过率优于 99.3%, 反射率达到 98.4%, 线栅定标源的亮温呈正弦规律变化, 变化范围为 8 ~ 248K, 实验结果与设计目标相吻合。

**关键词:** 辐射计; 定标; 极化线栅; 准光技术

**中图分类号:** TP732.1, TN015

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112 (2018)01-0185-05

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.01.025

## Study on Polarized Wire Grid for Microwave Radiometer Calibration

DONG Shuai<sup>1,2</sup>, WANG Zhen-zhan<sup>1</sup>, WANG Xin-biao<sup>1</sup>, HE Qiu-rui<sup>1,3</sup>, LI Jiao-yang<sup>1,3</sup>

(1. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Beijing Radio Institute of Measurement, Beijing 100854, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The quasi optical polarization separation principle is introduced. The new type of wire grid calibration source consisting of polarized wire grid, artificial black body, and cold sky signal is designed. Through the rotation of the polarized wire grid, the radiation energy of artificial black body and cold sky is mixed. The wire grid calibration source provides varying temperature signals, and solves the problem of low-frequency radiometer calibration. A measured reflectivity of 98.4% and transmittance of 99.9% at L-band is demonstrated. The brightness temperature dynamic range of wire grid calibration source is between 8K and 248K, which meets the design goal.

**Key words:** radiometer; calibration; polarized wire grid; quasi-optical technology

## 1 引言

微波辐射计是一种被动式微波遥感器, 其没有发射机发射电磁信号, 而是通过接收机被动接收天线观测到的视场微波辐射, 因此, 微波辐射计的本质是高灵敏度微波噪声接收机。微波辐射计观测到的噪声功率以亮度温度的方式表示, 由于辐射计的高灵敏度特性, 其可探测到的亮度温度可低至几 K (如上世纪六十年代 Penzias 和 Wilson 利用射电望远镜发现了 3K 宇宙微波背景辐射)<sup>[1]</sup>。微波辐射计是微波辐射测量的有效手段, 在微波遥感领域具有重要地位。除了作为独立分支的射电望远镜应用之外, 微波辐射计已在大气温湿度

廓线探测、海表风场温盐遥感、植被农林与冰盖监测等多个领域发挥有重要作用<sup>[2,3]</sup>。

微波辐射计应用中需要定标, 即确定辐射计输出电压与观测目标亮度温度之间的函数关系。现有辐射计多设计为线性系统, 因而采用两点确定直线的两点定标法为辐射计定标, 即测量两个微波辐射特性精确已知的噪声源的输出电压以建立亮温-电压直线方程<sup>[4]</sup>。两个定标源通常为高温源和低温源, 两源亮温差应覆盖微波辐射计常用的测量范围 0 ~ 350K<sup>[5]</sup>, 以减小两点定标误差。目前的工程实际中, 低温定标源多采用制冷源。然而以制冷源作为定标源受到使用条件的强约束: 一方面, 对制冷剂 and 制冷装置的依赖使得其在野

外环境下很难应用;另一方面,以目前热控技术,大口面制冷源的温度梯度不可控,因而制冷源的有效口面普遍较小.上述现象严重影响了低频段大尺寸天线辐射计的实时定标,而以 L 波段和 S 波段为代表的微波低频段又是海表盐度及土壤湿度遥感的关键频段,其精确定标问题亟待解决<sup>[6]</sup>.本文设计了以极化线栅为核心部件的变温定标源,在常温环境下产生 10K 到室温间的连续变化亮温,可对大口径天线微波辐射计进行精确的野外实时定标.

## 2 极化线栅原理与定标源设计

极化线栅由一系列等间距平行排列的金属丝构成,是一种根据准光学原理对电磁波进行极化分离的设备,具有宽频带、低损耗等特点,在微波、毫米波、亚毫米波以及远红外波段有广泛应用价值<sup>[7-9]</sup>.理想情况下,当入射波极化方向与线栅金属丝方向平行时,线栅将入射波全反射;当入射波极化方向与线栅金属丝方向垂直时,线栅将入射波全透过<sup>[10-12]</sup>.

在此原理上,赫尔辛基科技大学的 Lahtinen 等人采用钼丝栅网、聚四氟乙烯的相位延迟板、人造黑体构成的冷热源,设计了全极化微波辐射计定标方案<sup>[13-15]</sup>,对全极化微波辐射计的定量观测具有重要意义.但液氮冷源、钼丝栅网与相位延迟板等结构限制住了定标源的有效口径,无法解决大口径天线的低频辐射计系统定标需求,为此,本文设计了一种由极化线栅、人造黑体噪声源和冷空组成的微波辐射计外定标源,用于解决低频段辐射计由于天线口径过大造成的外定标难题.

根据极化线栅的工作原理,经过极化线栅混合后输出的亮度温度  $T_h$  和  $T_v$  与黑体温度  $T_{\text{HOT}}$ 、冷空温度  $T_{\text{COLD}}$  和极化网格旋转角度之间的关系为:

$$\begin{bmatrix} T_h \\ T_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_{\parallel} & t_{\parallel} & L_{\parallel} \\ r_{\perp} & t_{\perp} & L_{\perp} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_{\text{HOT}} \\ T_{\text{COLD}} \\ T_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中,  $T_{\text{HOT}}$  和  $T_{\text{COLD}}$  分别是热源和冷源的亮温,  $T_c$  是线栅的物理温度;  $r_{\parallel}$ 、 $t_{\parallel}$ 、 $L_{\parallel}$  是线栅和电磁波极化方向平行时线栅的反射系数、传输系数和欧姆损耗.  $r_{\perp}$ 、 $t_{\perp}$ 、 $L_{\perp}$  分别为二者垂直时的反射系数、传输系数和欧姆损耗;  $\theta$  为线栅排列方向和天线口面垂直极化方向的夹角<sup>[16]</sup>.为了将竖直面上冷空信号与水平面上黑体信号混合,设计极化线栅所在的平面和辐射计天线口面之间呈  $45^\circ$  夹角.计算中需要将极化网格平面上的角度投影到天线口面处.

根据式(1)进行仿真,得到变温源输出亮温随线栅旋转角度变化如图 1.仿真中假设热源亮温 300K,冷源亮温 5K,图中实线为 V 极化仿真曲线,虚线为 H 极化仿真曲线.

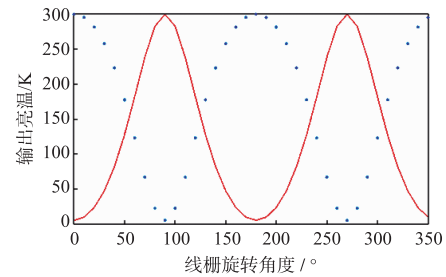


图1 极化线栅混合后的输出亮温随角度变化模拟图

极化线栅性能主要由金属丝半径  $a$ 、间距  $g$ 、波长  $\lambda$  三者之间的关系共同决定,为达到兼顾 X 波段以下频段的设计目标,线栅定标源的线间距为 0.3cm,线径为 0.3mm,有效口径 1.2m.极化线栅固定于与地面呈  $45^\circ$  角的外框上,背面大口径黑体与天顶冷空辐射经过极化线栅混合后的水平分量辐射至天线口面,图 2 为研制的极化线栅实物图.大气扰动会使冷空亮温产生偏差,在传统的定标过程中这一偏差是无法估计的.而在本定标源设计中,由于每一对冷热源对应着唯一的输出亮温变化曲线,因此,当热源亮温可以精确控制时,通过对比实测与仿真曲线,可以反向修正测量过程中的天顶冷空亮温,有效提高了定标精度.



图2 大口径极化线栅实物图

## 3 线栅定标源测试实验

实验使用了 L 波段微波辐射计、L 波段有源微波冷噪声源 (ACNS)、匹配负载等设备,以测试线栅定标源在 L 波段的性能.实验用到的 L 波段微波辐射计中心频率 1.414GHz,带宽 27MHz,灵敏度优于 0.2K,在多次岸基和机载试验中表现了稳定的性能<sup>[17,18]</sup>.测试采用该辐射计的 V 极化通道,实验装置如图 3 所示.

实验设计极化线栅每隔  $10^\circ$  旋转,天线观测极化线栅不同角度下混合的辐射信号.由于装置限制,实时定标时天线和内定标源需要经过不同的馈线接入接收机系统,实验设计了标定馈线网络的步骤,提高测量准确度.整个实验过程中常温黑体定标源通过四个测温点实时监测其物理温度.总结实验过程为以下七步,各步分时进行:

(1) 对制冷匹配负载加注液氮,通过馈线网络 2 观测高低温匹配负载,用于校准 ACNS;

(2) 通过馈线网络 1 观测 ACNS 和高温噪声源,用于与下面进行的第(3)步对比修正馈线亮温贡献;

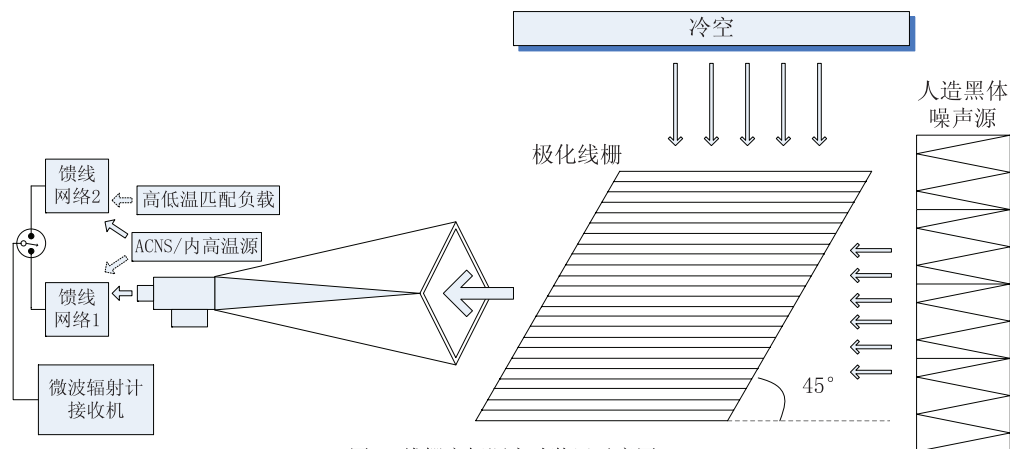


图3 线栅定标源实验装置示意图

(3)通过馈线网络2观测L波段ACNS和高温噪声源,在进行(4)~(7)步的同时作为内定标源进行实时定标;

(4)通过馈线网络1接天线观测极化线栅,极化线栅每旋转 $10^\circ$ 测量一次,共旋转 $180^\circ$ ,测量一个周期内的极化线栅输出亮温特征;

(5)撤掉极化线栅,通过馈线网络1接天线观测位置不变的黑体定标源(两者间隔为极化线栅的物理尺寸150cm),与(4)步中 $90^\circ$ 测量结果对比分析极化线栅透过特性;

(6)通过馈线网络1接天线观测紧贴天线口面的黑体定标源,此时测量值相比(5)可以更好的排除杂波干扰,作为外定标热源;

(7)通过馈线网络1接天线观测冷空,作为外定标冷源,并与(4)步中 $180^\circ$ 处测量结果对比分析极化线栅反射特性。

根据两点定标原理,(4)~(7)步的定标方程为:

$$T_{TAG} + T_A + T_{X1} = aV + b \quad (2)$$

第(2)步的定标方程为:

$$T_{TAG} + T_{X1} = aV + b \quad (3)$$

第(1)、(3)步的定标方程为:

$$T_{TAG} + T_{X2} = aV + b \quad (4)$$

其中, $T_{TAG}$ 表示测量目标的实际亮温, $T_A$ 表示天线馈源网络的亮温贡献, $T_{X1}$ 表示馈线网络1的亮温贡献, $T_{X2}$ 表示馈线网络2的亮温贡献。

根据定标实验可以得到方程参数如表1所示。

表1 定标方程参数表

参数	数值
$a$	20.212
$b - T_{X2}$	257.693
$T_{X1} - T_{X2}$	27.494
$b - T_{X1}$	230.199
$T_A$	28.541

## 4 测试结果分析

以表1各参数确定的定标方程为极化线栅定标,图4为各测量点对应的统计值.图中以线段连接的蓝色圆圈为辐射亮温均值随极化线栅旋转角度变化情况,三个红色星号分别表示150cm外黑体、紧贴天线口面处黑体、以及天线直接对准冷空观测时的测量均值.由此可见,极化线栅在 $90^\circ$ 处达到247.9K的最大辐射亮温,在 $180^\circ$ 处产生8.2K的亮温最小值.实验过程中实时监测黑体定标源物理温度为301.7K,与计算得到的天线口面处黑体301.4K的辐射亮温均值相一致,表明了实验的准确度.忽略误差干扰的情况下,整个极化线栅旋转过程的测量结果与仿真得到的曲线特征吻合,验证了以极化线栅作为外定标源的可行性。

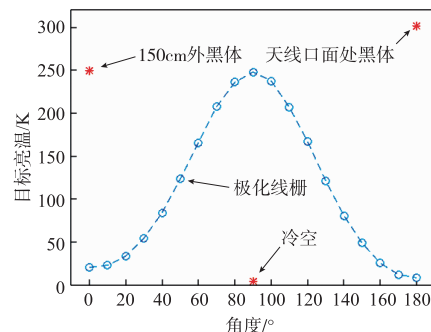


图4 线栅定标源测试结果

图5表示了各角度处亮温标准差,即辐射计灵敏度.标准差曲线的整体形状大致与理论相吻合,即辐射计观测低亮温目标时灵敏度高,观测高亮温目标时灵敏度低.部分点的标准差出现了偏离曲线趋势的抖动,这在一定程度上反映了辐射计的稳定性指标。

由测量数据可以发现,黑体在150cm处的辐射亮温249.6K明显小于黑体移至天线口面处的301.4K.这是由于天线口面的菱形形状使本实验使用的黑体有效

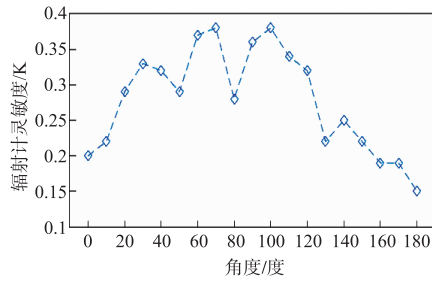


图5 辐射计灵敏度测试结果

口面降低至 0.707m,不足以在在 150cm 处覆盖整个天线视场,测量值混入了背景杂波信号导致.而  $0^\circ$  与  $180^\circ$  处的亮温差异,则由于实验在下午观测,太阳高度角随时间推移变小进而减小了对亮温的干扰.

本次试验为 V 通道实验结果,极化线栅在  $180^\circ$  处产生 8.2K 的亮温最小值.根据线栅的极化分离理论,线栅旋转至  $180^\circ$  时使得垂直极化分量全反射,根据图 3,冷空 V 极化分量由上向左反射至天线口面,而黑体 V 极化分量则由右向下反射至地面,辐射亮温达到最小,实测与理论相吻合.

$$T_{\text{冷空}} \cdot \alpha_{\text{反}} + T_{\text{黑体}}(1 - \alpha_{\text{反}}) = T_{180} \quad (5)$$

由式(5)计算得线栅反射率为 98.4%,与 98.7% 的理论值相吻合.

同样根据线栅的极化分离理论,线栅旋转至  $90^\circ$  时使得垂直极化分量全透过.此时,冷空 V 极化分量自上向下透过至地表,而黑体 V 极化分量自右向左透过至天线口面,此时辐射亮温达到最大,实测结果与理论相吻合.

$$T_{\text{黑体}} \cdot \alpha_{\text{透}} + T_{\text{冷空}}(1 - \alpha_{\text{透}}) = T_{90} \quad (6)$$

由式(6)计算得线栅透过率为 99.3%,与理论透过率(100%)存在差异,其可能原因为:由于背面黑体有效口径不足混入了杂波,而背景杂波是时变的,导致计算所得透过率有误差,极化线栅的真实透过率应当优于 99.3%.

定标实验具有较高的准确度和一致性,实测结果与理论仿真结果吻合良好,8K ~ 248K 的亮温变化范围达到了较好的效果,验证了设计的变温定标源的可行性.同时,实验也表明本次研制的极化线栅定标源还存在一些问题,如配套常温黑体定标源的有效口面还不够大,导致引入杂波干扰,为今后的设备改进和工程应用奠定了基础.

## 5 结论

极化线栅是一种低损耗的准光学极化分离网络,广泛应用于微波至红外频段.本文利用极化线栅的极化分离原理,设计了由极化线栅、人造黑体、冷空组成的微波辐射计外定标变温源,解决了低频段辐射计外

定标低点不易获得的难题.实验测试表明研制的极化线栅平行反射率为 98.4%,垂直透过率优于 99.3%,达到了设计要求.整个外定标源的亮温输出范围为 8K ~ 248K,输出亮温随极化线栅的旋转按理论规律变化,验证了线栅定标源的可行性.今后将在此基础上研制更加符合工程应用的实用化设备.

## 参考文献

- [1] 李靖,张俊荣,邹彤.数字增益补偿及实时定标微波辐射计[J].电子学报,1999,27(3):49-51.  
LI Jing, ZHANG Jun-rong, ZOU Tong. Computer Gain Compensative and Continuously Calibrated Microwave Radiometers[J]. Acta Electronica Sinica, 1999, 27(3): 49-51. (in Chinese)
- [2] 何杰颖.微波毫米波大气温湿度探测定标与反演的理论和方法研究[D].北京:中国科学院空间科学与应用研究中心,2012.1-3.
- [3] 陆浩,王振占,刘憬怡,等.全极化微波辐射计系统中高速数字相关器设计[J].电子学报,2011,39(12):2831-2835.  
LU Hao, WANG Zhen-zhan, LIU Jing-yi, et al. Design of High-Speed Digital Correlator in Fully Polarimetric Microwave Radiometer[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(12): 2831-2835. (in Chinese)
- [4] 赵瑾.固定波束指向星载微波辐射及定标方法研究[D].北京:中国科学院空间科学与应用研究中心,2010.
- [5] Sebastian D, Ernst W, Hermann M, et al. A W-band monolithic integrated active hot and cold noise source[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2014, 62(3): 623-630.
- [6] 卢红丽,王振占,殷晓斌.利用 SMOS 卫星数据反演海洋盐度方法研究[J].遥感技术与应用,2014,29(3):401-409.
- [7] 程岳云.毫米波天馈系统的准光学分析和近场测量方法研究[D].中国科学院空间科学与应用研究中心,2010.6-9.
- [8] Larsen T. A survey of the theory of wire grids[J]. IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1962, 10(3): 191-201.
- [9] Goldsmith P F. Quasi-Optical Systems: Gaussian Beam Quasi-Optical Propagation and Applications[M]. New York: Wiley-IEEE Press, 1998. 192-193.
- [10] Chambers W G, Costley A E, Parker T J. Characteristic curves for the spectroscopic performance of free-standing wire grids at millimeter and sub-millimeter wavelengths[J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1988, 9(2): 157-172.
- [11] 李彬,王振占,张升伟,等.一种大口微波/毫米波极

- 化线栅研制的新方法[J]. 电波科学学报, 2015, 30(3): 565 - 570.
- LI Bin, WANG Zhen-zhan, ZHANG Sheng-wei, et al. A new method to fabricate large aperture free-standing polarized wire grids at microwave/millimeter wavelengths[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2015, 30(3): 565 - 570. (in Chinese)
- [12] 王新彪, 李靖, 张升伟. 毫米波/亚毫米波临边探测仪准光技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, (4): 595 - 600.
- [13] Lahtinen J, M Hallikainen. HUT fully polarimetric calibration standard for microwave radiometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(3): 603 - 611.
- [14] Lahtinen J, Gasiewski A J, Klein M, Corbella I. A calibration method for fully polarimetric microwave radiometers[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(3): 588 - 602.
- [15] Jinzheng Peng, Christopher S R. Calibration method for fully polarimetric microwave radiometers using the correlated noise calibration standard[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(10): 3087 - 3097.
- [16] 王新彪. Ka 波段模拟型全极化微波辐射计研究[D]. 北京: 中国科学院空间科学与应用研究中心, 2011. 1 - 4.
- [17] Ernst W, Axel T, Michael S, et al. Active load modules for W-band radiometer calibration [A]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) [C]. Munich, 2012. 2945 - 2948.
- [18] Ernst W, Arnulf L, Michael S, et al. Highly integrated switching calibration front-end MMIC with active loads for W-band radiometers [A]. Proceedings of the 7th European Microwave Integrated Circuits Conference [C]. Amsterdam, NL: IEEE Press, 2012. 203 - 206.

#### 作者简介



**董 帅** 男, 1988 年 8 月出生, 山东烟台人. 2011 年、2016 年分别在北京理工大学、中国科学院大学获得工学学士、工学博士学位. 现为北京无线电测量研究所设计师, 主要从事微波遥感技术研究, 包括微波辐射计系统及定标研究、毫米波天气雷达系统研究等.  
E-mail: dongshuaihy@sina.com



**王振占** 男, 1969 年 12 月出生, 河北秦皇岛人. 研究员, 博士生导师, 中国科学院“百人计划”引进人才. 2005 年于中国科学院获得理学博士学位. 现为中科院空间中心微波遥感技术重点实验室研究员, 主要从事微波遥感新技术及应用技术研究, 重点包括全极化微波辐射测量技术研究、海洋大气参数的反演应用研究、微波遥感器的定标/检验技术研究等.