

文章编号:1001-9014(2007)04-0289-04

微波辐射计接收机两点定标法误差 分析及准确性验证

栾卉^{1,2}, 赵凯¹

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130012; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:介绍了微波辐射计接收机两点定标法,并进行了误差分析.对自行研制的 23.8GHz 数字增益自动补偿微波辐射计进行了定标,计算定标误差范围.对接收机两点定标法得到的定标方程进行了验证实验,结果表明采用两点定标法对辐射计接收机进行定标有良好的准确性.

关键词:微波辐射计;接收机;定标;两点定标法

中图分类号:TP 732.1 **文献标识码:**A

ERROR ANALYSIS AND ACCURACY VALIDATION OF TWO-POINT CALIBRATION FOR MICROWAVE RADIOMETER RECEIVER

LUAN Hui^{1,2}, ZHAO Kai¹

(1. Northeast Institute of Geography and Agriculture Ecology, CAS, Changchun 130012, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Two-point calibration technique of microwave radiometer receiver was presented and its errors were analyzed. 23.8GHz digital auto gain compensative microwave radiometer was calibrated and the calibration error range was calculated then. The accuracy of the calibration equation was verified by experiment. The results show that two-point calibration has favorable veracity for microwave radiometer receiver calibration.

Key words: microwave radiometer; receiver; calibration; two-point calibration

引言

微波辐射计的定标是标定微波辐射计输出电压物理量与输入噪声温度之间的定量关系^[1].微波辐射计接收机定标对辐射计整体定标以及测量使用有十分重要的意义,因为只有当接收机具有良好线性时,才可用两点定标法对辐射计进行整体定标.经过大量辐射计接收机实验,发现两点定标法同回归直线法得到的定标方程的标准差大致相同,得出在辐射计接收机线性度很好的条件下,在辐射计的动态范围内,可以应用两点定标法得到接收机的定标方程^[2].本文对微波辐射计接收机的两点定标方法进行了介绍,并对自行研制的 23.8GHz 的数字增益自动补偿型微波辐射计^[3]进行了接收机定标.经过数

据处理,得到定标方程.对数据进行误差分析,得到修正的方程.为了验证辐射计的定标方程的准确性,利用微波辐射计及温度探测仪器,在室外进行了连续一个昼夜的观测,经过对原始数据的处理,得到与温度曲线相同的趋势,说明定标方程是准确的.两点定标方法对地基、机载微波辐射计接收机非常适用,星载微波辐射计由于卫星在太空中受到的干扰因素太多,需要进行发射后在轨定标.星载辐射计在轨定标方法文献[4,5]中有详细叙述.

1 辐射计接收机定标

1.1 辐射计接收机两点定标方法

微波辐射计接收机是一个线性系统,即输出电压 V_{out} 与输入噪声温度 T_B 成线性关系:

收稿日期:2006-08-21,修回日期:2007-01-11

基金项目:国家 863 基金(AA630308)资助项目

作者简介:栾卉(1979-),女,吉林白山人,中国科学院东北地理与农业生态研究所微波遥感专业博士研究生,主要研究领域为微波辐射计应用等.

Received date: 2006-08-21, revised date: 2007-01-11

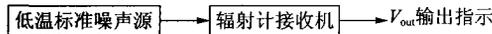


图1 辐射计接收机定标原理图

Fig1 Block diagram of receiver calibration for microwave radiometer

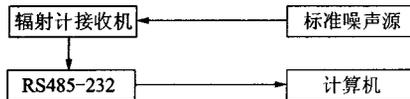


图2 辐射计接收机定标实验仪器连接框图

Fig2 Connection diagram for receiver calibration experiment

$$T_B = A + B \times V_{out} \quad (1)$$

为了确定式(1)的系数 A 和 B ,对已知的两点温度值为 T_1 、 T_2 测量其对应的输出电压 V_{out} 便可。两点位置的选择应尽量靠近辐射计动态工作范围的边缘,以提高两点定标的准确性。

为了减少定标系统中的误差源,我们仅使用低温标准噪声源来进行接收机的定标。这种方法特点是使用部件少,结构简单,误差因素少。缺点是它不能提供高于环境温度的温度值。

图1中低温标准噪声源和微波辐射计输入端口相连,它的噪声温度为 T_{CAL}^h 和 T_{CAL}^c 时所对应的接收机输出电压分别为 V_{out}^h 和 V_{out}^c ,有关系式

$$T_{CAL}^h = A + B \times V_{out}^h \quad (2)$$

$$T_{CAL}^c = A + B \times V_{out}^c \quad (3)$$

上述2个方程的解为

$$B = \frac{T_{CAL}^h - T_{CAL}^c}{V_{out}^h - V_{out}^c} \quad (4)$$

$$A = \frac{T_{CAL}^c V_{out}^h - T_{CAL}^h V_{out}^c}{V_{out}^h - V_{out}^c} \quad (5)$$

1.2 辐射计接收机定标实验

1.2.1 实验仪器及参数

23.8GHz 数字增益自动补偿微波辐射计一台, RS485-232 转换器一个,计算机一台,1.25cm 热冷标准噪声源一台(输出噪声温度 $80.3\text{K} \pm 0.1\text{K}$),电源线两根,数据线一根,温度计一个。

实验仪器连接框图如图2所示。

1.2.2 定标实验步骤

1. 按照图2连接实验仪器。
2. 将温度计伸入标准噪声源中。
3. 待机器稳定后读取温度计读数,作为高温数据点。
4. 在标准噪声源中倒入液氮,待稳定一段时间后记录时间,作为低温数据点。

表1 辐射计接收机定标实验数据

Table 1 Receiver calibration data of microwave radiometer

序号	辐射计平均输出电压数码值	标准差	温度值(K)
1	1773.795	4.940	80.3
2	3413.259	4.731	294.6

1.3 实验数据处理

实验所得数据经平均处理后列于表1中。

由之前的实验验证了接收机的线性度很好,其线性相关系数 $R = 0.9977$,因此应用两点定标法计算接收机的定标方程得到:

$$T_B = -151.5156 + 0.1307 \times V_{out} \quad (6)$$

1.4 实验误差分析

1.4.1 由系统增益产生的误差

辐射计接收机增益的起伏直接影响测量的精度。以全功率辐射计为例,由于输出电压 V_{out} 与系统增益 G_s 及系统噪声温度 T_{sys} 之间是线性关系,因此系统增益 G_s 增加 ΔG_s ,输出端会误认为是 T_{sys} 增加 $\Delta T_{sys} = T_{sys} (\frac{\Delta G_s}{G_s})$,因此得到的输出电压 V_{out} 与实际数据不符,影响了测量的精度。

本实验使用的是数字增益自动补偿微波辐射计,由文献[6]中对数字增益自动补偿微波辐射计的分析可以得出,无论系统增益如何变化,经过补偿后系统的增益始终保持不变,系统的增益可以保持稳定。

1.4.2 失配误差

在定标方程的计算中都是假设辐射计与噪声源的每个部件,都是十分匹配的,也就是说没有由于阻抗不匹配而产生的反射。而在实际中连接天线时,通过使用阻抗匹配技术能使反射减少到最小,但不能总是全部消除反射。因此辐射计整体定标时需要对于天线与辐射计输入端之间阻抗不匹配引起的定标误差进行校正。

设接收机输入端口面的电压驻波比为 $VSWR_0$,则接收机口面的反射系数 Γ 为

$$|\Gamma| = \left| \frac{VSWR_0 - 1}{VSWR_0 + 1} \right| \quad (7)$$

功率传输系数 T 为

$$T = 1 - |\Gamma|^2 \quad (8)$$

设噪声源的输出噪声温度为 T_N ,则接收机接收的噪声温度为

$$T'_N = (1 - |\Gamma|^2) T_N \quad (9)$$

由接收机口面的失配引起的噪声温度偏差为

$$\Delta T_N = T'_N - T_N = -|\Gamma|^2 T_N \quad (10)$$

在本实验中接收机口面的电压驻波比为 1.20, 功率反射系数为 0.0083, 当 $T_N = 80.3\text{K}$ 时, $\Delta T_N = -0.7\text{K}$; $T_N = 300\text{K}$ 时, $\Delta T_N = -2.5\text{K}$. 从结果可以看出在高温端由于失配引起的误差较大, 因此在高温端选择匹配负载 (50Ω , 电压驻波比 $VSWR \leq 1.05$) 作为噪声源, 其物理温度既是输出的噪声温度, 消除了失配引起的误差, 用两点定标的方法可以避免累积误差对定标的影响.

1.4.3 定标过程中测量参数变化所产生的误差

定标过程中测量参数变化所产生的误差, 即由于 $T_{CAL}^h, T_{CAL}^c, V_{out}^h, V_{out}^c$ 的不确定度所产生的误差 $dT_B^{[7]}$. 由式(1)、式(4)和式(5)可知

$$T_B = f(T_{CAL}^h, T_{CAL}^c, V_{out}^h, V_{out}^c, V_{out}) \\ = \frac{T_{CAL}^h - T_{CAL}^c V_{out}^c}{V_{out}^h - V_{out}^c} + \frac{V_{out}^h T_{CAL}^c - V_{out}^c T_{CAL}^h}{V_{out}^h - V_{out}^c} \quad (11)$$

根据误差传输理论, 有

$$dT_B = \frac{\partial T_B}{\partial T_{CAL}^h} dT_{CAL}^h + \frac{\partial T_B}{\partial T_{CAL}^c} dT_{CAL}^c + \frac{\partial T_B}{\partial V_{out}^h} dV_{out}^h \\ + \frac{\partial T_B}{\partial V_{out}^c} dV_{out}^c + \frac{\partial T_B}{\partial V_{out}} dV_{out} \quad (12)$$

在式(12)中, 第一项为高温点定标时的辐射计输出指示器读数引入的误差, 用 δ_1 表示. 第二项为低温点定标时的输出指示器读数引入的误差, 用 δ_2 表示. 第三项为定标时的高温点的不确定度引入误差, 用 δ_3 表示. 第四项为定标时的低温点的不确定度引入的误差, 用 δ_4 表示. 第五项为实际应用时的辐射计输出指示器读数引入的误差, 用 δ_5 表示.

令 $V_{out} = V; V_{out}^h = V_h; V_{out}^c = V_c; T_{CAL}^h = T_h; T_{CAL}^c = T_c$

$$\text{则 } \delta_1 = \frac{V_c - V}{(V_h - V_c)^2} (T_h - T_c) dV_h,$$

$$\delta_2 = \frac{V - V_h}{(V_h - V_c)^2} (T_h - T_c) dV_c,$$

$$\delta_3 = \frac{V - V_c}{V_h - V_c} dT_h, \quad \delta_4 = \frac{V_h - V}{V_h - V_c} dT_c,$$

$$\delta_5 = \frac{T_h - T_c}{V_h - V_c} dV.$$

所以, 由式(11)定标直线所得到的亮度温度 T_B 的标准误差 σ 为

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2 + \sigma_5^2} \quad (13)$$

对于数字显示终端而言 $\delta_1, \delta_2, \delta_5$ 可以忽略. 所以将式(13)中各项代入后, 经整理可得

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{V_h - V}{V_h - V_c} dT_c\right)^2 + \left(\frac{V - V_c}{V_h - V_c} dT_h\right)^2} \quad (14)$$

下面根据式(14), 确定在辐射计动态工作范围内, 标准误差 σ 的变化范围.

设

$$Y = \left(\frac{V_h - V}{V_h - V_c} dT_c\right)^2 + \left(\frac{V - V_c}{V_h - V_c} dT_h\right)^2 \quad (15)$$

则

$$\frac{\partial Y}{\partial V} = 2\left(\frac{V_h - V}{V_h - V_c}\right) \frac{-dT_c}{V_h - V_c} + 2\left(\frac{V - V_c}{V_h - V_c}\right) \frac{dT_h}{V_h - V_c} \quad (16)$$

$$\frac{\partial^2 Y}{\partial V^2} = \frac{2dT_c^2}{(V_h - V_c)^2} + \frac{2dT_h^2}{(V_h - V_c)^2} \quad (17)$$

$\therefore \partial^2 Y / \partial V^2 > 0 \therefore$ 在 $[V_c, V_h]$ 范围内, Y 为上凹曲线.

令 $\frac{\partial Y}{\partial V} = 0$, 得

$$V = \frac{V_h dT_c^2 + V_c dT_h^2}{dT_c^2 + dT_h^2} \quad (18)$$

将式(18)中计算的 V 值代入式(14)中即可得到最小标准误差 σ_{\min} .

将测量数据 $V_h = 3413.259; V_c = 1773.795; T_h = 294.56; T_c = 80.3; dT_h = \pm 0.1; dT_c = \pm 1$ (主要由液氮制冷的噪声源精度决定). 以上各值代入式(18), 得 $V = 3397$ 时, T_B 的标准差 σ 最小. 将式(13)中各项值及 $V = 3397$ 代入式(13), 可得最小标准误差 σ_{\min} 为: $\sigma_{\min} = 0.0995\text{K}$.

当 $V = V_c$ 时, $\sigma = \sqrt{dT_c^2} = 1(\text{K})$, 当 $V = V_h$ 时, $\sigma = \sqrt{dT_h^2} = 0.1(\text{K})$. 所以, 在辐射计的动态工作范围内, 辐射计接收机定标的亮度温度 T_B 的绝对定标误差范围为 $0.1\text{K} \leq |\sigma| \leq 1\text{K}$.

2 验证实验

为了验证定标结果的准确性, 应用辐射计接收机及温度探测仪器进行了室外测量, 测量时间长达一个昼夜. 实验开始时间为 2006 年 6 月 30 日 11:23h, 结束时间为 2006 年 7 月 1 日 15:40h. 温度探测仪器的温度分辨率为 0.05K. 辐射计接收机定标验证实验仪器连接框图如图 3 所示.

由于实验进行的时间较长, 数据量较大, 所以对

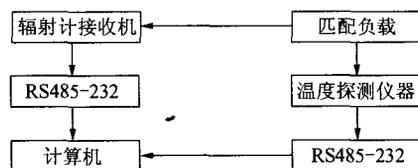


图 3 辐射计接收机定标验证实验仪器连接框图
Fig.3 Connection diagram for receiver calibration validation experiment

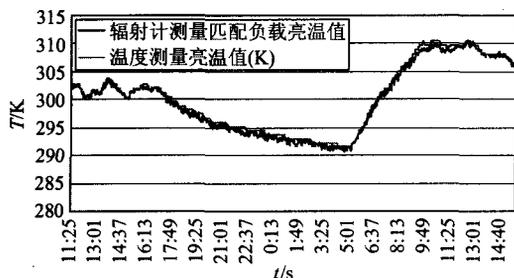


图4 接收机获取的亮温值与温度测量值比较

Fig.4 Comparison of receiver temperature and temperature meter's

每一分钟获得的数据量进行了平均处理,平均值作为该分钟的测量值。

接收机的定标系数用前面实验所得定标方程:

$$T_B = -151.5156 + 0.1307 \times V_{out} \quad (16)$$

图4是微波辐射计获取的匹配负载噪声温度的变化与温度测量仪测量的匹配负载物理温度变化的比较结果。

由图4可以看出辐射计接收的亮温值基本上与测量的温度值变化吻合,两条直线的方差平均值为0.41101,这进一步说明定标方程的正确性。

3 结语

文章详细介绍了微波辐射计接收机两点定标的方法,经实验证明两点定标法同回归直线法得到的定标方程的标准差大致相同,所以在辐射计接收机线性度很好的条件下,在辐射计的动态范围内,可以应用两点定标法得到接收机的定标方程^[2]。当不考虑测量数据随系统增益变化而引起的变化时,接收机两点定标法的主要误差就来源于失配误差及测量数据的不确定度,经分析得出定标总误差的公式。利用室外测量实验得到的数据,经过温度修正处理,得

到与温度测量数据很好的吻合,这进一步证明了定标方程的准确性,说明两点定标法对于接收机的定标是非常好的一种定标方法。

REFERENCES

- [1] PENG Shu-Sheng, LI Xing-Guo. Study on the calibration method of 8mm measuring radiometer [J]. *Journal of Infrared and Millim. Waves* (彭树生,李兴国. 8mm 测量辐射计定标方法的研究. *红外与毫米波学报*), 1997, 16(4): 280—284.
- [2] LUAN Hui. Research for receiver calibration of microwave radiometer[R]. Changchun: Northeast Institute of Geography and Agriculture Ecology, CAS(栾卉. 微波辐射计接收机定标实验研究. 长春:中科院东北地理与农业生态研究所), 2006, 7.
- [3] ZHANG Jun-Rong, ZHAO Kai. Digital auto gain compensative microwave radiometer[P]. (张俊荣,赵凯. 数字增益补偿微波辐射计. 专利号:96220486. 2).
- [4] RONG Zhi-Guo, ZHANG Yu-Xiang, WANG Yu-Hua, et al. Calibration method for water wapor channel of scanning-radiometer carried by FY-2B satellite[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (戎志国,张玉香,王玉花,等. 风云二号B 星星载扫描辐射计水汽通道定标方法. *红外与毫米波学报*), 2005, 24(5):357—365.
- [5] TONG Jin-Jun, QIU Kang-Mu, LI Xiao-Wen. New method of in-flight absolute calibration for thermal infrared channels of satellite sensors[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (童进军,邱康睦,李小文. 一种卫星遥感仪器热红外通道在轨绝对辐射定标新方法. *红外与毫米波学报*), 2005, 24(4):277—280.
- [6] LI Jing. Design and analysis of new type microwave radiometer[D]. Institute of Electronics, CAS, Beijing(李靖. 新型微波辐射计设计与研制. 博士论文,中国科学院电子学研究所), 1997, 7.
- [7] ZHANG Yu-Qian, ZHANG Jun-Rong, ZHAO Ren-Yu. The calibration research of 8mm on-board scanning microwave radiometer[R]. Institute of Physics, CAS, Changchun(张玉谦,张俊荣,赵仁宇. 八毫米机载扫描微波辐射计定标研究[R]. 中国科学院长春物理研究所), 1985, 5.