

8mm 测量辐射计定标方法的研究* TN015

彭树生 李兴国 TN859

(南京理工大学毫米波光波近感技术研究所, 江苏, 南京, 210094)

摘要 提出一种新的绝对测量定标方法, 并作了误差分析. 这种方法基本上具有口面定标法的优良性能; 消除了分体定标法的诸多误差项, 提高了定标精度. 而且在使用中既经济又方便.

关键词 辐射计, 定标法, 误差.

微波辐射计 误差分析

引言

定标是微波辐射计进行绝对测量的重要步骤之一, 通过定标确定辐射计输出电压与输入噪声温度之间的线性关系式. 在天体射电流量测量, 大地和大气遥感测量, 目标微波辐射特性测量等许多方面, 都得通过定标确定未知量. 由于定标精度直接影响测量精度, 因此提高定标精度成为绝对测量研究的主要课题. 定标的研究主要包括两个方面: 一是定标方法研究, 二是提高定标设备的精度和稳定度. 在定标过程中, 采用一些技术途径尽量减小环境因素和定标设备引入的误差, 特别是在有些因素无法避免的境况下, 通过定标使它们相互消除或补偿, 以致不影响定标结果, 这是定标方法发展的方向. 在现在应用中, 主要采用的定标方法有两种: 一种是分项定标法^[1], 另一种是口面定标法^[2]. 由于口面定标法具有比较优良的性能^[3], 在遥感测量中得到了广泛的应用. 定标设备(如定标源)的参数精度和稳定度直接影响定标精度, 提高这些参数的精度也是定标研究的主要内容之一.

在本文 8mm 测量辐射计中, 采用一种新的定标方式, 由噪声源通过定向耦合器给接收机注入一跳变的噪声温度, 得到“增量标尺”; 此外, 用标准匹配负载作基准标尺. 两者结合构成绝对定标标尺. 从本文的分析可见, 这种定标方法可消除辐射计系统中一些不利因素的影响, 提高了定标精度.

1 辐射计系统组成

8mm 测量辐射计的原理框图如图 1 所示. 它由天线、定标子系统、接收机和控制与数据采集子系统等构成. 辐射计采用全功率型. 定标子系统由参考负载、PIN 开关、定向耦合器和噪声源等组成. 控制与数据采集子系统由 A/D 变换器、D/A 变换器和 PC 计算机等组成. 控制与数据采集子系统采集接收机输出电压, 并进行数字积分和数据处理等. 此外, 由它实现中频放大器增益控制、本机噪声直流自动补偿、噪声源点灭、PIN 开关控制等功能.

* 国家博士后科学基金资助项目, 编号中博基[1996]2号
本文 1996 年 12 月 17 日收到, 修改稿 1997 年 5 月 9 日收到

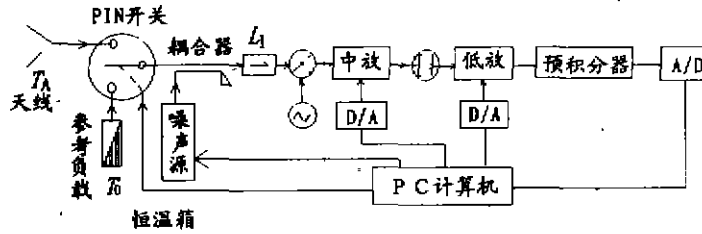


图1 8mm 测量辐射计
Fig. 1 8mm radiometer

天线接收到的信号和参考负载信号通过由PC机控制的PIN开关可交替地接入到接收信道,在定向耦合器中与噪声源注入的噪声(当噪声源点燃时,注入的是高温噪声,而当噪声源熄灭时,注入的是低温噪声)叠加一起,然后经隔离器传输给混频器.混频器输出的中频信号经过中频放大器放大、检波器检波、低频放大器放大及直流补偿、预积分,最后由A/D转换成数字量传输到PC机,在PC机中进行数字积分和处理,反演视场的天线温度.

由于辐射计采用全功率型接收机,且接收机工作在线性状态,以隔离器的输入端为参考面,辐射计的输出电压与输入的噪声温度关系为^[4]:

$$U = G_s(T_{in} + T_{rec}) - U_{offset} \quad (1)$$

式(1)中 U 为辐射计的输出电压(单位:V), G_s 是辐射计的增益因子, T_{in} 是它的输入噪声温度(单位:K), T_{rec} 是接收机的等效噪声温度(单位:K), U_{offset} 是直流补偿电压(单位:V).当输入噪声温度为基准信号 T_s ,辐射计输出电压为:

$$U_s = G_s(T_s + T_{rec}) - U_{offset} \quad (2)$$

在测量 T_{in} 时注入一噪声温度 ΔT_N 增量,辐射计输出电压为:

$$U_N = G_s(T_{in} + \Delta T_N + T_{rec}) - U_{offset} \quad (3)$$

由式(3)、式(2)和式(1)可得:

$$T_{in} = T_s + \frac{U - U_s}{U_N - U_s} \Delta T_N \quad (4)$$

由式(4)可见,利用一基准噪声温度 T_s 和一噪声温度增量 ΔT_N ,可定标未知的输入噪声温度 T_{in} .

2 定标分析

8mm 测量辐射计的定标分两步进行,第一步利用噪声源的点燃和熄灭,给接收机注入一噪声温度增量,它引起辐射计输出电压跳变一增量,得到“增量标尺”;第二步利用参考负载作为基准标尺,它与“增量标尺”一起构成绝对定标标尺.为了保证定标精度,需用冷热口面源置于天线口面,标定“增量标尺”的温度增量.

2.1 增量标尺

当 PIN 开关接通天线时, 辐射计输出有两种状态, 一种是噪声源点燃状态, 另一种为噪声源熄灭状态. 在噪声源点燃时, 辐射计的输出电压 U_{Aon} 为:

$$U_{\text{Aon}} = G_s \left\{ \left[\left(\frac{T_A(1 - \Gamma_1^2) + \Gamma_1^2 T'_{\text{out}}}{L_1} + \frac{T_r(1 - \Gamma_2^2) + \Gamma_2^2 T'_{\text{out}}}{L_{21}} + \left(1 - \frac{1}{L_1} - \frac{1}{L_{21}}\right) T_0 \right) \left(1 - \frac{1}{L_c}\right) + T'_{\text{on}} \right] (1 - \Gamma_{\text{con}}^2) + \Gamma_{\text{con}}^2 T_{\text{out}}^2 + T_{\text{rec}} \right\} - U_{\text{offset}}, \quad (5)$$

式(5)中 T_A 是天线温度(单位:K), L_1 和 Γ_1 分别是 PIN 开关 1(连接天线端的开关)的插入损耗和电压反射系数的幅值, T_r 是参考负载的等效噪声温度(单位:K), L_{21} 是 PIN 开关 2(连接参考负载端的开关)断开时的隔离度, T_0 是室温(单位:K), L_c 是定向耦合器的耦合系数, T'_{on} 是噪声源点燃时耦合到接收信道的噪声温度(单位:K), T'_{1out} 和 T'_{2out} 是在开关 1 开而开关 2 断状态下的开关口逆向辐射噪声温度(单位:K), T_{out} 是辐射计在参考面的逆向辐射噪声温度(单位:K), Γ_{con} 是噪声源点燃时定向耦合器输出端(参考面)的电压反射系数, 在定向耦合器理想和它的输入端匹配的情况下, 它的表达式为:

$$\Gamma_{\text{con}} = \Gamma_{\text{Non}} / L_c, \quad (6)$$

式(6)中 Γ_{Non} 为噪声源点燃时的电压反射系数.

同理, 当噪声源熄灭时, 辐射计的输出为:

$$U_{\text{Aoff}} = G_s \left\{ \left[\left(\frac{T_A(1 - \Gamma_1^2) + \Gamma_1^2 T'_{\text{1out}}}{L_1} + \frac{T_r(1 - \Gamma_2^2) + \Gamma_2^2 T'_{\text{2out}}}{L_{21}} + \left(1 - \frac{1}{L_1} - \frac{1}{L_{21}}\right) T_0 \right) \left(1 - \frac{1}{L_c}\right) + T'_{\text{off}} \right] (1 - \Gamma_{\text{coff}}^2) + \Gamma_{\text{coff}}^2 T_{\text{out}}^2 + T_{\text{rec}} \right\} - U_{\text{offset}}, \quad (7)$$

式(7)中 U_{Aoff} 是噪声源熄灭时的辐射计输出电压(单位:V), T'_{off} 是噪声源熄灭时耦合到接收信道的噪声温度, Γ_{coff} 是噪声源熄灭时定向耦合器输出端(参考面)的电压反射系数, 它的表达式为:

$$\Gamma_{\text{coff}} = \Gamma_{\text{Noff}} / L_c, \quad (8)$$

式(8)中 Γ_{Noff} 为噪声源熄灭时的电压反射系数.

从式(5)、式(6)、式(7)和式(8)可看出噪声源两种状态的反射系数对辐射计输出的影响. 系统设计时选取两种状态反射系数差别小的噪声源和耦合系数大的定向耦合器, 以减小噪声源反射系数对接收机的影响. 固态噪声源的 Γ_{Non} 为 0.13(驻波比为 1.3), Γ_{Noff} 认为 0, 超噪比为 25dB. 选取耦合系数为 30dB 的定向耦合器, 由式(6)和式(8)计算得 $\Gamma_{\text{con}} = 0.00013$ 和 $\Gamma_{\text{coff}} = 0$, $\Gamma_{\text{con}}^2 = 1.69 \times 10^{-8}$. 可见 Γ_{con}^2 的值很小, 这样可忽略 Γ_{con} 和 Γ_{coff} 的不同, 认为都为 0 (在以下的分析中认为 $\Gamma_{\text{con}} = \Gamma_{\text{coff}} = 0$).

由式(5)和式(7)得噪声源点燃和熄灭两种状态下辐射计输出差值为:

$$\Delta U_N = U_{\text{Aon}} - U_{\text{Aoff}} = G_s (T'_{\text{on}} - T'_{\text{off}}) = G_s \Delta T_N, \quad (9)$$

式(9)中 ΔT_N 为噪声源在点燃和熄灭两种状态下耦合到接收信道的噪声温度差值.

为了提高定标精度,在实际应用中采用口面定标法标定出噪声源在点灭状态时的噪声温度差值 ΔT_N 等效到天线口面的温度差值 $\Delta T'_N$. 将高低温口面定标源分别放置在天线口面,在噪声源熄灭的状态下,用 U_H 表示对应高温口面定标 T_H 时的辐射计输出,用 U_L 表示对应于低温定标 T_L 时的辐射计输出,按口面定标原理,参考式(7)可得到:

$$U_H - U_L = \frac{G_s(1 - \Gamma_1^2)}{L_1} \left(1 - \frac{1}{L_c}\right) (T_H - T_L), \quad (10)$$

式(10)表明对应于天线温度差 $(T_H - T_L)$, 辐射计输出电压差值为 $(U_H - U_L)$. 已知 $(T_H - T_L)$ 、 $(U_H - U_L)$ 和 ΔU_N , 可得对应于 ΔU_N 的等效噪声温度:

$$\Delta T'_N = \frac{\Delta U_N}{(U_H - U_L)} (T_H - T_L), \quad (11)$$

$\Delta T'_N$ 即为 ΔT_N 等效到天线口面的温度值(单位:K), 作为辐射计的输入温度“增量标尺”. 式(11)的物理意义为: 噪声源在点燃和熄灭的两种状态下辐射计输出电压的差值 ΔU_N , 对应一个天线温度增量 $\Delta T'_N$. 如果定标噪声源具有优良的长期稳定性, 用口面定标法得出增量标尺 $\Delta T'_N$ 可长期使用.

2.2 定标方程

把 PIN 开关接至参考负载端, 引入一个参考基准信号 T_r (参考负载的噪声温度), 在噪声源熄灭的状态下, 这时辐射计的输出为:

$$U_s = G_s \left\{ \left[\left(\frac{T_1(1 - \Gamma_2^2)}{L_2} + \frac{\Gamma_2^2 T''_{2out}}{L_2} + \frac{T_A(1 - \Gamma_1^2)}{L_{12}} + \frac{\Gamma_1^2 T''_{1out}}{L_{12}} + \left(1 - \frac{1}{L_2} - \frac{1}{L_{12}}\right) T_0 \right) \left(1 - \frac{1}{L_c}\right) + T'_{off} \right] + T_{rec} \right\} - U_{offset}, \quad (12)$$

式(12)中 L_2 和 Γ_2 分别是 PIN 开关 2 的插入损耗和电压反射系数的幅值, L_{12} 是 PIN 开关 1 断开时的隔离度, T''_{1out} 和 T''_{2out} 是在开关 2 开而开关 1 断状态下的开关口逆向辐射噪声.

同样, 通过口面定标法将参考负载的噪声温度等效到天线口面. 在口面定标中, 已知 $(T_H - T_L)$ 、 $(U_H - U_L)$ 和 U_s , 可得到:

$$T'_r = \frac{T_H(U_s - U_L) - T_L(U_s - U_H)}{U_H - U_L}, \quad (13)$$

T'_r 即为对应 U_s 的天线口面等效温度. 保持参考负载恒温, 且辐射计的高频部分也在恒温箱里, 则 T'_r 可作为一个恒量. 由“增量标尺” $\Delta T'_N$ 和 T'_r 构成辐射计测量的绝对定标标尺.

在辐射计观测时得到天线温度 T_A , 当噪声源熄灭时辐射计输出为 U_{Aoff} , 然后点燃噪声源以得到对应于“增量标尺” $\Delta T'_N$ 的辐射计输出差值 ΔU_N , 最后将 PIN 开关接至参考负载, 在噪声源熄灭状态下辐射计输出为 U_s (对应 T'_r , 天线口面温度). 这样, 可以得到:

$$\frac{U_{Aoff} - U_s}{T_A - T'_r} = \frac{\Delta U_N}{\Delta T'_N}, \quad (14)$$

即:

$$T_A = \frac{\Delta T'_{N}}{\Delta U_N}(U_{\text{Aoff}} - U_s) + T'_s \quad (15)$$

式(15)即为 8mm 测量辐射计的定标方程. 从上面的分析可得出, 式(15)具有口面定标法的优良性能.

3 定标误差分析

用定标方程式(15)反演天线温度 T_A , 引入误差的因素即为等式右边各参数. 各参数引入的误差是互为独立的, 因此,

$$\begin{aligned} \Delta T_A = & \left\{ \left(\frac{\partial T_A}{\partial (\Delta T'_{N})} \Delta (\Delta T'_{N}) \right)^2 + \left(\frac{\partial T_A}{\partial (\Delta U_N)} \Delta (\Delta U_N) \right)^2 \right. \\ & \left. + \left(\frac{\partial T_A}{\partial (U_{\text{Aoff}})} \Delta U_{\text{Aoff}} \right)^2 + \left(\frac{\partial T_A}{\partial U_s} \Delta U_s \right)^2 + (\Delta T'_s)^2 \right\}^{1/2}, \quad (16) \end{aligned}$$

式(16)中 $\Delta T'_s$ 是参考负载等效温度误差; ΔU_{Aoff} 和 ΔU_s 是辐射计的输出误差, 由辐射计灵敏度 ΔT_{min} 引起的输出误差和 A/D 的量化误差组成; $\Delta (\Delta U_N)$ 是噪声源点燃和熄灭时辐射计输出差值的误差, 它约为辐射计输出误差的 $\sqrt{2}$ 倍; $\Delta (\Delta T'_{N})$ 是等效噪声增量误差. 由式(11)可得到:

$$\begin{aligned} \Delta (\Delta T'_{N}) = & \left\{ \left(\frac{\partial (\Delta T'_{N})}{\partial (\Delta U_N)} \Delta (\Delta U_N) \right)^2 + \left(\frac{\partial (\Delta T'_{N})}{\partial U_H} \Delta U_H \right)^2 + \left(\frac{\partial (\Delta T'_{N})}{\partial U_L} \Delta U_L \right)^2 \right. \\ & \left. + \left(\frac{\partial (\Delta T'_{N})}{\partial T_H} \Delta T_H \right)^2 + \left(\frac{\partial (\Delta T'_{N})}{\partial T_L} \Delta T_L \right)^2 \right\}^{1/2}, \quad (17) \end{aligned}$$

式(17)中 ΔU_H 和 ΔU_L 分别是在高低温口面定标时辐射计的输出误差; ΔT_H 和 ΔT_L 分别是高低温口面定标源的辐射温度误差. 由式(13)可得:

$$\begin{aligned} \Delta T'_s = & \left\{ \left(\frac{\partial T'_s}{\partial T_H} \Delta T_H \right)^2 + \left(\frac{\partial T'_s}{\partial T_L} \Delta T_L \right)^2 + \left(\frac{\partial T'_s}{\partial U_s} \Delta U_s \right) \right. \\ & \left. + \left(\frac{\partial T'_s}{\partial U_H} \Delta U_H \right)^2 + \left(\frac{\partial T'_s}{\partial U_L} \Delta U_L \right)^2 \right\}^{1/2}, \quad (18) \end{aligned}$$

由式(18)、式(17)和式(16), 计算得到反演天线温度的误差为:

$$\begin{aligned} \Delta T_A = & \left\{ \left(\frac{U_{\text{Aoff}} - U_s}{\Delta U_N} \right)^2 \left[\left(\frac{\Delta T'_{N}}{\Delta U_N} \right)^2 + \left(\frac{T_H - T_L}{U_H - U_L} \right)^2 \right] (\Delta (\Delta U_N))^2 + \left(\frac{\Delta T'_{N}}{\Delta U_N} \right)^2 (\Delta U_{\text{Aoff}})^2 \right. \\ & + \frac{(T_H - T_L)^2 + [(\Delta U_N)^2 + (U_s - U_L)^2]}{(U_H - U_L)^4} (\Delta U_H)^2 \\ & + \frac{(T_H - T_L)^2 + [(\Delta U_N)^2 + (U_s - U_H)^2]}{(U_H - U_L)^4} (\Delta U_L)^2 \\ & \left. + \frac{[(\Delta U_N)^2 + (U_s - U_L)^2]}{(U_H - U_L)^2} (\Delta T_H)^2 + \frac{[(\Delta U_N)^2 + (U_s - U_H)^2]}{(U_H - U_L)^2} (\Delta T_L)^2 \right\}^{1/2}, \quad (19) \end{aligned}$$

由式(19)可见,天线温度的误差 ΔT_A 由六项误差组成:噪声点燃和熄灭两种状态下的辐射计输出电压差值的误差 $\Delta(\Delta U_N)$,辐射计天线对准观测视场时的输出电压误差 ΔU_{Act} ,口面定标中高温定标源和低温定标源的温度误差 ΔT_H 和 ΔT_L ,以及高温定标和低温定标时的辐射输出电压误差 ΔU_H 和 ΔU_L .

4 结语

从上面的分析可见,文中所述的定标方法基本具有口面定标法的优越性,可消除分项定标中诸多误差项,提高了定标精度;而且在确定噪声源的等效温度差 $\Delta T'_N$ 后不要使用液态的冷源,这在使用中既经济又方便.由于测量和定标几乎同时进行,且测量前后都可定标,因此可使接收机增益漂移的影响小到可以忽略.如果条件许可,用一口面基准源代替参考负载,可省去 PIN 开关,这种定标法的优越性就更明显了.

参考文献

- 1 Ulaby F T. Moore R K. Fung A K. *Microwave Remote Sensing, Volum 1, Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry*, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts, 1981, 410—418. 侯世昌,马锡冠等译,微波遥感——第1卷:微波遥感基础和辐射测量学,北京:科学出版社,1988,267—278
- 2 中国紫金山天文台太阳射电绝对测量小组,天文学报,1982,23(3):110—112
- 3 彭树生,提高微波辐射计绝对测量精度的研究,博士学位论文,中科院紫金山天文台,1995
- 4 Tiuri M E. *et al.*, Radio-Telescope Receivers, Chapter 7 in RADIO ASTRONOMY, edited by John D. Kraus, 2nd edition, London, McGraw-Hill, 1986

STUDY ON THE CALIBRATION METHOD OF 8mm MEASURING RADIOMETER*

Peng Shusheng Li Xingguo

(Institute of MMW and Lightwave Technology, Nanjing University
of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract A new calibration method was presented for 8mm measuring radiometer. The error of antenna temperature was analyzed in this method. As in the aperture calibration method, the calibration precision is improved when errors are removed. It is economical and convenient for use.

Key words radiometer, calibration method, error

* The project supported by the Postdoctoral Science Foundation of China