



图1 毫米波定标负载
Fig.1 MMW calibration load

通过 A/D 卡采集进入计算机。

软件系统运行在 Windows 操作平台上,采用 VC++6.0 开发. 操作界面模拟了数字示波器的面板划分为 4 个区域: 波形显示区、知识介绍区、操作面板区和数据显示区. 它可以完全取代数据记录仪, 定标过程的各个重要波形可以直接显示在屏幕上. 由于要求能显示极为微小的变化情况, 所以系统在图形显示上设置了二级控制, 一是整体波形的放大显示, 二是数据细微变化放大显示. 最终, 将所有测试数据与辐射计特性参数、定标议程都存入了 Access 数据库.

2 定标实验与精度分析

2.1 定标方程的计算原理

由于辐射计接收机一般是线性的(线性度大于 0.999), 所以可以利用两点定标法得出定标方程

$$T_A = \frac{T_A^h - T_A^c}{V_{out}^h - V_{out}^c} (V_{out} - V_{out}^c) + T_A^c, \quad (1)$$

其中 T_A 表示天线温度, V_{out} 表示辐射计输出电压, 上标 h, c 分别代表高温定标点与低温定标点.

为了减小环境辐射的影响, 将辐射计天线紧贴定标源隔热层, 在这种情况下, 天线温度主要由两部分组成, 其一为定标源辐射亮温的贡献 T_{A1} , 其二为辐射计逆向传输的噪声经天线—定标源参考面反向后的 T_{A2} .

以定标源表面为水平面($x-y$), 垂直定标源表面指向天线的方向为 z 轴构造直角坐标系. 引入球坐标系, θ 为仰角(在定标问题中常称为观测角), φ 为水平面的方位角.

$$T_{A1} = \frac{\iint_{4\pi} T_{AP1}(\theta, \varphi) \cdot F_n(\theta, \varphi) d\Omega}{\iint_{4\pi} F_n(\theta, \varphi) d\Omega},$$

$T_{AP1}(\theta, \varphi) = T_B(\theta, \varphi)[1 - \Gamma_e(\theta, \varphi)]$; $F_n(\theta, \varphi)$ 为天线的近场方向图; $\Gamma_e(\theta, \varphi)$ 为天线—定标源参考面的有效反射率; $T_B(\theta, \varphi)$ 为定标源的辐射亮温.

严格计算 T_{A1} 比较困难, 从工程实用的角度考虑, 可以做如下简化: 道德在定标源问题中, $T_B(\theta, \varphi) = T_B, \theta = 0^\circ \sim 60^\circ$ 的范围内, $T_B(\theta)$ 变化不大, 可以近似认为就是 $T_B(0)$. 其次, 忽略天线 $\pm 60^\circ$ 以外接收的能量对 T_{A1} 的影响, 则可得

$$T_{A1} \approx T_{AP1}(0) \approx T_B(0)[1 - \Gamma_e(0)]. \quad (2)$$

这种近似使天线温度的精度分析与天线特性无关, 从而在工程上使用起来极为方便. 系统测得吸收体的物理温度可以用文献^[2]所介绍的仅基于功率的非相干算法或考虑了相位影响的相干算法来计算考虑了隔热层影响的 $T_B(0)$. 在需要考虑隔热层散射粒子相干条件下的多次散射效应时, 也可以使用 DVRT 迭代算法^[3]

$$T_{B-co}(\theta_3; P) = \frac{1 - \Gamma_2}{|1 + R_1 R_2 \exp(-2jk_2 d \cos\theta_2)|^2} \cdot \left\{ \int_d^0 K_{a2} \cos\theta_2 T(z) \exp(k_{a2} z \cos\theta_2) dz + \Gamma_1 \exp(-k_{a2} d \cos\theta_2) \cdot \int_d^0 k_{a2} \cos\theta_2 T(z) \exp(-k_{a2} (z + d) \cos\theta_2) dz \right\} + \frac{(1 - \Gamma_1)(1 - \Gamma_2)}{|1 + R_1 R_2 \exp(-2jk_2 d \cos\theta_2)|^2} \cdot \exp(-k_{a2} d \cos\theta_2) T_1. \quad (3)$$

记吸收体为媒质 1, 隔热层为媒质 2, 定标源外的空气为媒质 3, 这样就把定标源划分成了 3 层结构. 则式中 T_B 为定标源向媒质 3 辐射的亮温; θ_3 为电磁波从媒质 2 入射到媒质 3 的折射角, P 为极化方式; R_1, R_2 分别为边界 1(吸收体与隔热层的边界)与边界 2(隔热层与空气的边界)处的电压反向系数; Γ_1, Γ_2 分别为边界 1 与边界 2 处的功率反射系数, $\Gamma_1 = |R_1|^2, \Gamma_2 = |R_2|^2$; θ_2 为电磁波从媒质 1 入射到媒质 2 的折射角; k_2 为媒质 2 的波数; ka_2 为媒质 2 的吸收系数; T_1 为媒质 1 的物理温度, $T(z)$ 为媒质 2 的剖面温度分布.

根据相同的近似, 可以认为: $T_{A2} = T_{inc}(0) \Gamma_e(0)$, 式中 $T_{inc}(0)$ 为辐射计逆向传输的噪声. 最终

$$T_A = T_B(0)[1 - \Gamma_e(0)] + T_{inc}(0) \Gamma_e(0). \quad (4)$$

2.2 定标实验

实验中,环境 $T_0 = 299\text{K}$, 气压 $P = 1.013 \times 10^5 \text{N/m}^2$; 8mm 辐射计的工作频率为 36.5GHz. 当定标源处于液氮温度时,吸收体 $T_1 = 77.36\text{K}$. 隔热层厚度 $d = 60\text{mm}$, 介电常数 $\epsilon_{2r} = 1.03 - j0.0001$, 它的温度廓线假设为线性分布, 即 $T_z = (T_0 - T_1)z/d + T_0$; 吸收体与隔热层的边界上的电压反射系统 $R_1 = 0.03$.

限于篇幅, 仅列出决定定标方程所需要的定标测试数据见表 1.

计算出来的定标方程为 $T_A = 77.936996 + (-51.296970 V_{out} - 4.660079)$. 辅以其他测试数据, 测得该狄克辐射计特性指标如下: 线性度为 0.99011, 灵敏度为 0.183532K, 稳定度为 0.628112K 积分时间为 1.01s.

2.3 精度分析

从定标方程(1)可以看到系统有几个误差源: 计算 T_A^h 与 T_A^c 的误差 ΔT_A^h 与 T_A^c , 辐射计接收高、低温定标源与待测目标的辐射信号的波动误差 V_{out}^h 、 ΔV_{out}^c 与 ΔV_{out} . 系统不确定度的平方为

$$\begin{aligned} \Delta T_A^2 = & \left(\frac{\partial T_A}{\partial T_A^h}\right)^2 (\Delta T_A^h)^2 + \left(\frac{\partial T_A}{\partial T_A^c}\right)^2 (\Delta T_A^c)^2 \\ & + \left(\frac{\partial T_A}{\partial V_{out}^h}\right)^2 (\Delta V_{out}^h)^2 + \left(\frac{\partial T_A}{\partial V_{out}^c}\right)^2 (\Delta V_{out}^c)^2 \\ & + \left(\frac{\partial T_A}{\partial V_{out}}\right)^2 (\Delta V_{out})^2, \end{aligned} \quad (5)$$

由定标方程, 有 $\frac{\partial T_A}{\partial V_{out}^h} = \frac{V_{out} - V_{out}^c}{V_{out}^h - V_{out}^c}$. V_{out} 可能有两种情况 $V_{out}^c \leq V_{out} \leq V_{out}^h$ 或者 $V_{out}^h \leq V_{out} \leq V_{out}^c$. 无论哪一种, 都有 $0 \leq \frac{\partial T_A}{\partial T_A^h} \leq 1$, 显然当 $\frac{\partial T_A}{\partial T_A^h} = 1$ 时, ΔT_A^h 对系统精度影响最大, 是最坏的情况, 类似地, 当 $\frac{\partial T_A}{\partial T_A^c} = 1$ 时, ΔT_A^c 对系统精度影响最大.

ΔV_{out}^h 由两部分组成: 由于接收到的高温定标源的信号是噪声信号以及接收机内部存在的噪声而引发的输出的波动, 它等于最小可检测到的输入的变化(即灵敏度 T_{min}^h)引起的输出变化($\frac{\partial V_{out}^h}{\partial T_A^h} \Delta T_{min}^h$); 辐射计输出电压从模拟信号变换为数字信号引进的量化误差 ΔQ . ΔV_{out}^c 、 ΔV_{out} 的情况类似处理.

考虑最坏情况下的式(5)变为

$$\begin{aligned} \Delta T_A^2 = & (\Delta T_A^h)^2 + (\Delta T_A^c)^2 + (\Delta T_{min}^h)^2 \\ & + (\Delta T_{min}^c)^2 + \left[\left(\frac{\partial T_A}{\partial V_{out}^h}\right)^2 + \left(\frac{\partial T_A}{\partial V_{out}^c}\right)^2\right. \\ & \left. + \left(\frac{\partial T_A}{\partial V_{out}}\right)^2\right] (\Delta Q)^2. \end{aligned} \quad (6)$$

1) 计算 ΔT_A^h , ΔT_A^c 对天线温度不确定度的贡献

由方程(4)可知 ΔT_A^h , ΔT_A^c 的误差 ΔT_A^h , ΔT_A^c 与 $T_B(0)$ 、 $T_{inc}(0)$ 、 $\Gamma_c(0)$ 有关.

$$\begin{aligned} (\Delta T_A^h)^2 = & \left[\frac{\partial T_A^h}{\partial T_B(0)}\right]^2 [\Delta T_B(0)]^2 \\ & + \left[\frac{\partial T_A^h}{\partial \Gamma_c(0)}\right]^2 [\Delta \Gamma_c(0)]^2 \\ & + \left[\frac{\partial T_A^h}{\partial T_{inc}(0)}\right]^2 [\Delta T_{inc}(0)]^2 \end{aligned}$$

表 2 在方程(3)中各项误差源对亮温的贡献

Table 2 The Contributions of error sources in equation (3) to brightness temperature

误差来源	T_1	D	$T(z)$	Γ_1	R_1 的相应	ϵ_{2r} 实部	ϵ_{2r}
波动范围或精度	$\pm 0.1\text{K}$	$60 \pm 0.5\text{mm}$	$T_1 \sim T_0$	$-40 \sim -27\text{dB}$	$-\pi \sim \pi$	1.03 ± 0.01	0.0001 ± 0.00005
对 $\Delta T_B(0)$ 的贡献(K)	0.1	5.4294×10^{-3}	0.50079	0.16	0.18	0.05	0.5
对 $\Delta T_{inc}^h(0)$ 的贡献(K)	0.1	4.8513×10^{-3}	4.5846×10^{-6}	0.64	0.27	0.16	0.004151

$$= [1 - \Gamma_e(0)]^2 [\Delta T_B^h(0)]^2 + [T_{inc}^h(0) - T_B^h(0)]^2 [\Delta \Gamma_e(0)]^2 + [\Gamma_e(0)]^2 [\Delta T_{inc}^h(0)]^2, \quad (7)$$

同理可得 $(\Delta T_A^c)^2$.

① 计算逆向传输的噪声 $T_{inc}(0)$ 的数值和误差

实验中所使用的狄克辐射计逆向传输的噪声的数值和误差可由如下分析求出: 因为该辐射计天线和接收机之间装有环行器, 其反向隔离大于 25 ± 0.5 dB, 再考虑到天线有些难以计算的损耗, 故从混频器向天线口面传输的总衰减为 $L = 25 \pm 1$ dB. 辐射计的噪声系数为 $F = 6 \pm 1$ dB, 前端温度为 $T_0 = 299 \pm 0.5$ K. 故算得

$$T_{inc}^h(0) = (F - 1) \cdot 290 \cdot \frac{1}{L} + (1 - \frac{1}{L}) T_0 = 300.79 \text{ (K)},$$

$$[\Delta T_{inc}(0)]^2 = \left[\frac{\partial T_{inc}(0)}{\partial F} \right]^2 (\Delta F)^2 + \left[\frac{\partial T_{inc}(0)}{\partial L} \right]^2 (\Delta L)^2 + \left[\frac{\partial T_{inc}(0)}{\partial T_0} \right]^2 (\Delta T_0)^2 = 1.5813 \text{ (K}^2\text{)},$$

② 计算天线定标源参考面的有效反射率 $\Gamma_e(0)$ 的数值和误差 $\Gamma_e(0)$ 的数值可以用 FDTD 算法进行数值计算也可以通过测试得到有效反射率. 经过实际测试, 得: $\Gamma_e(0) = 0.0007$, 误差 $\Delta \Gamma_e(0) = 0.0005$.

③ 计算定标源在高 [与低] 温定标点的辐射亮温 $T_B^h(0)$ [与 $T_B^c(0)$] 的数值与误差

据表 1 物理温度数据, 计算得到水平极化状态下 $T_B^h(0) = 297.939812$ K, $T_B^c(0) = 77.780890$ K; 垂直极化状态下 $T_B^h(0) = 298.059031$ K, $T_B^c(0) = 77.812013$ K.

要求各个误差来源因子 x_i (如 T_1 、 d 、 $T(z)$ 、 R_1 、 ϵ_2 , 等) 对 T_B 的误差 ΔT_B 的贡献, 也即求 $\frac{\partial T_B}{\partial x_i} \Delta x_i$,

Δx_i 是 x_i 可能的波动. 由于 $\frac{\partial T_B}{\partial x_i}$ 的解析式不能求出, 所以可以采用如下两种近似方法: 其一是用数值方法求 $\frac{\partial T_B}{\partial x_i}$; 其二是把 $x_i + \Delta x_i$ 代入式 (3), 从而近似求出各项贡献 ΔT_{B-x_i} , 见表 2.

当各个误差来源是非相关的时候, 有: $\Delta T_B =$

$$\sqrt{\sum_{x_i} (\Delta T_{B-x_i})^2}, \text{ 求得 } \Delta T_B^c(0) = 0.7559 \text{ K}, \Delta T_B^h(0) = 0.7198 \text{ K. 水平极化状态下利用式 (7) 计算得到}$$

$\Delta T_A^h(0) = 0.7193$ K. 同理, 可得 $\Delta T_A^c(0) = 0.7555$ K. 垂直极化状态下的值可以类似地计算.

2) 计算 ΔT_{min} 、 ΔT_{min}^h 各 ΔT_{min}^c 对天线温度不确定度的贡献.

如果不考虑增益起伏的影响, 零平衡狄克辐射

$$\text{计的灵敏度 } \Delta T_{min} = \frac{T_{REC} + T_A}{\sqrt{B\tau}} \times 2$$

$T_{REC} = (F-1) \cdot 290$ 是辐射计的本底噪声, F 是噪声系数, 实验所用的辐射计 $F = 6$ dB; 带宽 $B = 500$ MHz; τ_e 和 τ_s 分别是定标和测量目标时的积分时间, 都取为 1 s; $T_A = 299$ K, $T_A^h = 298.66$ K, $T_A^c = 77.87$ K; $T_{REC} = 864.49$ K. 计算得到: $\Delta T_{min} = 0.104$ (K), $\Delta T_{min}^h = 0.1039$ (K), $\Delta T_{min}^c = 0.0843$ (K).

3) 计算量化误差 ΔQ 对天线温度不确定度的贡献

同样考虑最坏的情况, 即 $V_{out} - V_{out}^c = V_{out}^h - V_{out}^c$,

$V_{out}^h - V_{out}^c = V_{out}^h - V_{out}^c$, 有

$$\frac{\partial T_A}{\partial V_{out}^h} = \frac{\partial T_A}{\partial V_{out}^c} = \frac{\partial T_A}{\partial V_{out}} = \frac{T_A^h - T_A^c}{V_{out}^h - V_{out}^c} = \frac{dT_A}{dV_{out}},$$

(8)

$\frac{dT_A}{dV_{out}}$ 是实验时测得的定标直线的斜率. 例如, 实验中

测得 $\frac{dT_A}{dV_{out}} \approx -51.296970$ K/V

A/D 卡的精度为 12 位, 在输入量程为 0 ~ 5V 的情况下, $\Delta Q = 0.6$ mV.

最终利用式 (6) 求出 $\Delta T_A = 1.0582$ (K). 满足了辐射计通常的 1.5 K 的精度要求.

3 结语

本文设计与研制了一套地基小口径天线毫米辐射计自然变温智能定标系统, 该系统实现了所有数据的自动采集与分析. 对 8mm 狄克式辐射计进行了定标实验, 得到了毫米波辐射计线性度、积分时间、灵敏度、稳定度等性能指标和定标方程. 论文对该定标源进行了精度分析, 表明该定标系统的天线温度不确定度为 1.0582 K, 能满足辐射计 1.5 K 的精度要求.

REFERENCES

- [1] Hardy N Wlatter. Precision temperature reference for microwave radiometry, *IEEE Trans. MTT-21*, MAR. 1973; 149—150
- [2] Lu Y, Zhang Z Y, Guo W. Brightness temperature emitted by layered media with nonuniform temperature profile. *Int. J. Infrared and Millimeter Waves*, 1996, 17(9): 1567—1571
- [3] Xiao Zhi-Hui, Zhang Zu-Yin, Guo Wei. Brightness temperature emitted by radiometer calibration load at millimeter wave band. *Int. J. Infrared and Millimeter Waves*, 2001, 22(4): 553—569