

# 微机在微波辐射计中的应用

张祖荫 吕颖

(华中理工大学电信系 武汉 430074)

**摘要** 本文讨论了微机在微波辐射计中应用的发展情况,并以周期定标全功率辐射计为例,叙述了其技术优势,工作原理,分析方法以及实验结果。

**关键词** 微机应用;微波辐射计;定标

## 1 引言

微波辐射计具有全天候、全天时的工作能力,隐蔽性好,因而在遥感和制导等方面获得了日益广泛的应用。目前,大多采用传统的狄克比较式辐射计探测目标,输出接计算机进行信号采集和处理。这样,不仅计算机的功能没有充分发挥,而且微波辐射计的电路也过于复杂,影响了系统的性能。特别是由于辐射计不能直接输出被测目标的天线温度,需要事先定标,求得定标方程,然后根据辐射计的输出信号按定标方程进行换算,使用中很不方便。随着计算机技术的发展,不仅为信号处理提供了有力的工具,而且上述问题也均可解决。

## 2 微波辐射计的工作原理

早期采用的全功率微波辐射计虽然结构最简单,理论灵敏度最高,但由于增益波动和干扰的影响,工作很不稳定,实际灵敏度达不到实用的要求。目前经常采用的是狄克比较式辐射计,其电路框图如图1所示。

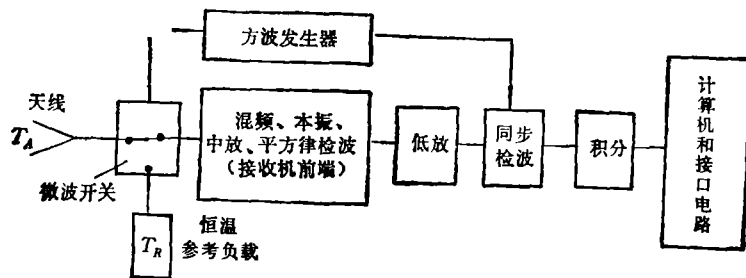


图1 狄克辐射计的电路框图

1992-08-14 收到,1992-12-12 定稿

张祖荫 男,1939年生,副教授,现从事微波遥感方面科研工作。

吕颖 女,1972年生,博士研究生。

微波辐射计用于接收被测场景或目标自身辐射的微波信号。根据瑞利-金斯定律,辐射计天线接收到的被测场景或目标辐射的功率可用天线温度  $T_A$  表示

$$T_A = \frac{\iint_{4\pi} T_{AP}(\theta, \phi) F_n(\theta, \phi) d\Omega}{\iint_{4\pi} F_n(\theta, \phi) d\Omega}, \quad (1)$$

其中  $T_{AP}(\theta, \phi)$  是被测场景或目标的视在温度分布,  $F_n(\theta, \phi)$  是天线归一化功率方向图。图 1 中方波发生器驱动微波开关周期地接通天线和恒温参考负载。当被测场景或目标的视在温度变化导致  $T_A$  变化时,  $T_R - T_A$  亦发生变化。这一差值信号经辐射计电路处理后得到一个相应的直流输出电压  $V_0$ , 送入计算机采样并计算成天线温度, 完成探测任务。很明显, 不仅图 1 中的一部分电路可以由计算机完成以充分发挥计算机的功能, 而且为了算出天线温度  $T_A$ , 必须先对辐射计定标, 得到定标方程  $T_A = f(V_0)$ , 并将此方程送入计算机贮存待用。由于精度的要求, 定标工作需要频繁地进行, 而这又是一个十分麻烦而细致的工作。因此, 根据遥感和制导的要求, 充分发挥计算机的功能, 解决频繁定标的关键技术, 并尽可能简化电路, 减小体积和重量, 成为当前必须解决的课题。

### 3. 方案综述

为了解决上述问题, 目前已经发展了两种方案<sup>[1,2]</sup>。这两种方案中低频电路虽然比狄克比较式辐射计简单, 并具备自定标功能, 但辐射计的微波电路反而更复杂, 而且没有进行过理论分析。本文提出图 2 所示的周期定标全功率辐射计。其工作程序如下<sup>[3]</sup>:

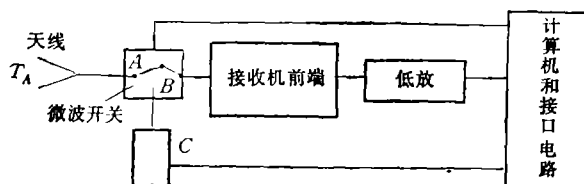


图 2 周期定标全功率辐射计  
(图中 C 为标准噪声源)

受计算机输出开关信号控制, 微波开关首先接通 A, 辐射计输出直流电压  $V_A$ , 进行天线温度  $T_A$  的测量, 然后开关接通 B, 且计算机不送信号到 C, 标准噪声源不工作, 输出噪声温度为  $T_l$ , 接近于室温, 辐射计输出直流电压  $V_l$ ; 随后, 计算机送出信号到 C, 使标准噪声源工作, 输出噪声温度  $T_k$ , 辐射计输出直流电压  $V_k$ , 进行两点定标。计算机对上述电压进行采样、积分, 然后按(2)式计算出天线温度  $T_A$ :

$$T_A = \frac{T_k - T_l}{V_k - V_l} (V_A - V_k) + T_k, \quad (2)$$

然后再重复上述过程。这个方案的微波电路与狄克辐射计基本相同, 但低频电路简化了很多, 而且通过机内的周期定标, 直接给出天线温度的精确数值。

### 4 理论分析

图 2 所示的周期定标全功率辐射计, 按照以上所述的方式工作时, 其主要技术指标——灵敏度可按以下步骤导出。

由于辐射计接收的目标辐射和标准噪声源的噪声温度均为随机信号, 辐射计内部还存在各种噪声和增益波动。因而辐射计输出的电压  $V_A, V_I, V_S$  都是波动的, 从而  $T_A$  也是一个随机信号。定义  $T_A$  的标准差  $\Delta T_A$  为辐射计的灵敏度, 它表征一台辐射计能够检测的天线温度的最小变化值。

如上所述, 这种辐射计输出电压的时序如图 3 所示。图中  $\tau_b = \tau_I = \tau_C$  为定标采样的积分时间,  $\tau_A$  为测量采样的积分时间,  $\bar{V}_b, \bar{V}_I, \bar{V}_A$  为相应的均值电压。  $t_c$  为定标周期,  $t_s$  为定标到测量的时间。如果定标周期数为  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ , 令  $t_N = nt_c$ , 则辐射计输出天线温度  $T_A$  为

$$T_A(t) = \frac{T_b - T_I}{\bar{V}_b(t_N) - \bar{V}_I(t_N)} [\bar{V}_A(t) - \bar{V}_b(t_N)] + T_b. \quad (3)$$

根据定义,  $\Delta T_A$  为  $T_A(t)$  的标准差

$$(\Delta T_A)^2 = E\{[T_A(t) - \bar{T}_A(t)]^2\}, \quad (4)$$

其中  $E$  表示取数学期望。将(3)式中  $\frac{T_b - T_I}{\bar{V}_b(t_N) - \bar{V}_I(t_N)}$  在  $E\{\bar{V}_b(t_N)\} - E\{\bar{V}_I(t_N)\}$  处展成泰勒级数并略去高次项, 如果仅考虑  $\bar{T}_A(t) = T_b$  这种最恶劣的情况, 可得

$$(\Delta T_A)^2 = C^2 E\{[\bar{V}_A(t) - \bar{V}_b(t_N)]^2\}, \quad (5)$$

其中

$$C = \frac{T_b - T_I}{E\{\bar{V}_b(t_N)\} - E\{\bar{V}_I(t_N)\}}. \quad (6)$$

设测量和定标两种积分状态的冲激响应分别为

$$h_A(t) = \frac{1}{\tau_A} \int_{-\frac{\tau_A}{2}}^{\frac{\tau_A}{2}} \delta(t) dt = \begin{cases} \frac{1}{\tau_A}, & |t| \leq \frac{\tau_A}{2}, \\ 0, & |t| > \frac{\tau_A}{2}, \end{cases}$$

$$h_C(t) = \frac{1}{\tau_C} \int_{-\frac{\tau_C}{2}}^{\frac{\tau_C}{2}} \delta(t) dt = \begin{cases} \frac{1}{\tau_C}, & |t| \leq \frac{\tau_C}{2}, \\ 0, & |t| > \frac{\tau_C}{2}. \end{cases}$$

可以得出

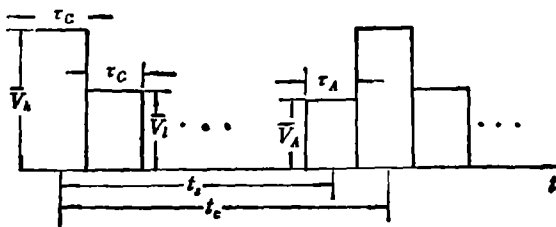


图 3 辐射计输出电压示意图

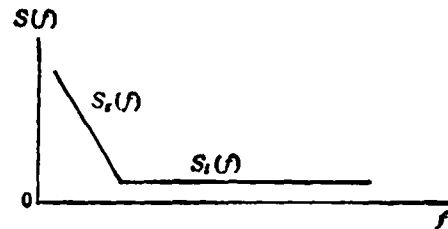


图 4  $v(t)$  的功率谱密度

$$(\Delta T_A)^2 = C^2 \int_{-\infty}^{\infty} dt' [h_A(t-t') - h_C(t_N-t')] \cdot \int_{-\infty}^{\infty} dt'' E\{v(t')v(t'')\} \cdot [h_A(t-t'') - h_C(t_N-t'')], \quad (7)$$

其中  $v(t)$  是辐射计接收机输出到计算机的随机电压, 其功率谱密度如图 4 所示. 它由两部分组成.  $S_s(f)$  对应于接收机的系统噪声, 具有白噪声特性,  $S_e(f)$  对应于接收机的增益波动及其它不稳定特性. 故有  $S_r(f) = S_s(f) + S_e(f)$ . 设接收机带宽为  $B$  并满足

$$\int_0^B S_r(f) df < \infty, \quad (8)$$

则有

$$E\{v(t')v(t'')\} = \int_0^\infty df S_r(f) \cos[2\pi f(t' - t'')]. \quad (9)$$

将(9)式代入(7)式得出

$$(\Delta T_A)^2 = C^2 \int_0^\infty df S_r(f) H(f), \quad (10)$$

$$H(f) = \left| \frac{\sin(\pi f \tau_A)}{\pi f \tau_A} - \frac{\sin(\pi f \tau_c)}{\pi f \tau_c} \exp[-j2\pi f(n\tau_c - t)] \right|^2. \quad (11)$$

全功率辐射计接收机的系统噪声满足<sup>[4]</sup>

$$S_s(f) = \frac{2T_{sys}}{C^2 B}, \quad (12)$$

其中  $T_{sys}$  是系统的噪声温度. 将(11),(12)式代入(10)式并利用帕伐色尔能量定理求出积分. 可得

$$\left(\frac{\Delta T_A}{T_{sys}}\right)^2 = \frac{1}{B\tau_A} + \frac{1}{B\tau_c} + \left(\frac{\Delta G}{G}\right)^2, \quad (13)$$

$$\left(\frac{\Delta G}{G}\right)^2 = \left(\frac{C}{T_{sys}}\right)^2 \int_0^\infty df S_e(f) H(f). \quad (14)$$

(13)式中的  $1/(B\tau_A)$  项表示测量积分时间对灵敏度的影响,  $1/(B\tau_c)$  项, 表示定标积分时间对灵敏度的影响,  $\Delta G/G$  项表示接收机增益起伏对灵敏度的影响. (13) 和 (14)式还表明,  $\tau_A, \tau_c$  越大, 辐射计的灵敏度越高, 定标周期  $t_c$  越短,  $\Delta G/G$  越小, 辐射计的灵敏度也越高. 这些结论与下述实验结果是完全一致的.

## 5 实验结果

将图 2 中的天线用 300K 的恒温匹配负载代替, 即可检测辐射计的灵敏度和稳定性. 利用软件采样求均值, 完成对噪声的积分平滑功能. 辐射计按照计算机编制的程序周期运行,  $t_c, \tau_A, \tau_c$  和  $t_s$  均可通过计算机输入要求的指令而改变. 实验过程中每个定标周期内只测量一次恒温匹配负载的温度, 并根据 (3) 式计算出  $T_A$  的数值. 在规定的运行时间内, 将各个周期测得的  $T_A$  记录下来并按(15)式计算辐射计的灵敏度

$$(\Delta T_A)^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left( T_{Ai} - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_{Ai} \right)^2, \quad (15)$$

其中  $N$  为定标的周期数. 全部实验结果列于表 1. 每次运行时间为 2h.

表 1 说明:  $t_c$  缩短,  $\tau_c$  增加,  $\tau_A$  增加, 辐射计的灵敏度均会提高.

为了检验辐射计的稳定性和可靠性, 我们选择  $t_c = 60s$ ,  $\tau_A = \tau_c = 0.5s$ , 运行 2h, 测出的天线温度  $T_A$  列于表 2. 表 2 数据表明其结果是稳定可靠的.  $\Delta T_A = 0.5K$ ,  $\bar{T}_A = 301.06K$ . 同一个辐射计的接收机, 如果不按照周期定标的方式工作, 只是在开始时定标

表 1 灵敏度的实验结果

实验次数	$t_c(s)$	$\tau_A(ms)$	$\tau_c(ms)$	$\Delta T_A(K)$
1	300	27	27	17.9
2	60	27	27	11.3
3	30	27	27	8.5
4	0.6	27	27	2.2
5	0.6	27	270	1.0
6	0.003	0.54	0.54	12.2

表 2 稳定性的实验结果

测量时间 (min)	5	10	15	20	25	30	35	40
$T_A(K)$	301.4	301.4	301.1	301.1	300.9	301.2	301.4	300.5
测量时间 (min)	45	50	55	60	65	70	75	80
$T_A(K)$	301.4	301.3	301.0	301.4	301.1	300.8	301.6	301.7
测量时间 (min)	85	90	95	100	105	110	115	120
$T_A(K)$	300.5	300.6	301.1	301.9	300.6	299.6	301.6	300.4

一次,然后每隔 5min 采样并按开始时的定标方程计算出天线温度一次,同样运行 2h,并选用同样的积分时间  $\tau_A$ 。其结果  $T_A$  在 300K 到 340K 内变化,  $\bar{T}_A = 320.6K$ ,  $\Delta T_A = 14.4K$ 。这说明,由于增益波动的影响,不按周期定标方式运行的全功率辐射计,测得的天线温度随时间变化太大,达不到实际使用的要求

## 6. 结论

本文在比较了采用计算机控制和解调的各种方式之后,提出了图 2 所示的周期定标全功率辐射计。分析了定标参数对辐射计灵敏度的影响,并与实验结果完全相符。这套实验系统运行方便,结果可靠。当辐射计输入端接 300K 的恒温匹配负载时,在两小时的运行时间内,测得天线温度的均值  $\bar{T}_A = 301.06K$ ,灵敏度  $\Delta T_A = 0.5K$ ,积分时间为 0.5s。

## 参 考 文 献

- [1] Zhao Conglong. Advances in Atmospheric Sciences, 1986, 3(2):189-198.
- [2] 徐培源. 微波、毫米波辐射计的两项新技术. 上海电子学会 1991 年学术年会论文集. 上海: 1991 年 9 月,第 1-4 页.
- [3] Zhang Zuyin. 8mm Total Power Radiometer with Periodic Calibration. Conference Digest, 16th IC. on IR. &MMW. August 1991, pp. 220-221.
- [4] Tiuri M G. IEEE Trans. on AP, 1964. AP-12(4):930-938.

## APPLICATION OF MICROCOMPUTER TO MICROWAVE RADIOMETER SYSTEM

Zhang Zuyin Lu Ying

*(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)*

**Abstract** Developments of the microcomputer applications to the microwave radiometer system is reviewed. A microcomputer controlled and demodulated 8mm total power radiometer with periodic calibration is realized. Its operation principle, analysis method, technique superiority and test results are also described.

**Key words** Microcomputer application; Microwave radiometer; Calibration