

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。

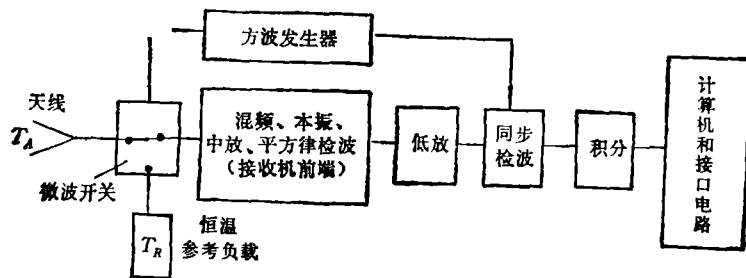


图1 狄克辐射计的电路框图

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^[1,2]。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^[3]:

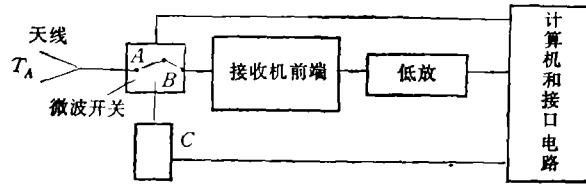


图 2 周期定标全功率辐射计
(图中 C 为标准噪声源)

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 ΔT_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, τ_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, ΔT_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

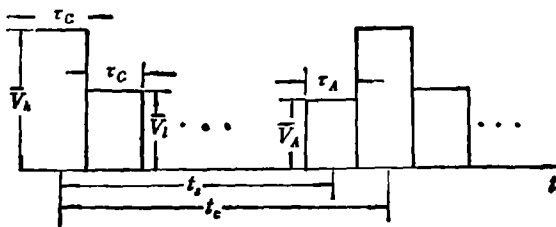


图 3 辐射计输出电压示意图

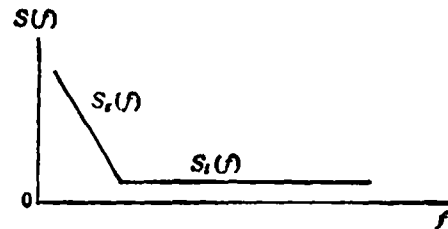


图 4 $v(t)$ 的功率谱密度

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

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. $S_i(f)$ 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 $S_r(f) = S_i(f) + S_e(f)$. 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^[4]

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

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, τ_A, τ_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, τ_A, τ_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, τ_c 增加, τ_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 τ_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