

3 mm 波段中频比较辐射计的研究

钟志华 沈辉 张祖荫 郭伟

(华中科技大学图像识别与人工智能研究所,
图像信息处理与智能控制国家教委开放实验室,湖北,武汉,430074)

摘要 叙述了 3 mm 中频比较辐射计的工作原理、电路结构、特性分析及实验结果,研究表明,这种辐射计不需 3 mm 开关,其稳定性优于全功率辐射计,而成本和尺寸均与全功率辐射计相差不大,完全可以满足小型化、实用化的需要。

关键词 毫米波,辐射计,灵敏度,稳定度。

3 MM BAND IF-SWITCH RADIOMETER

ZHONG Zhi-Hua SHEN Hui ZHANG ZU-Yin GUO Wei

(Institute for Pattern Recognition & Artificial Intelligence,
Laboratory of State Education Committee for Image Information Processing and Intelligence Control,
HUST Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract A 3 mm band IF-switch radiometer was proposed. On the basis of discussing the theory as well as circuit structure and features, the performance of experimental prototype was presented. The research and experiment results show that not only its stability is better than that of total power radiometer, but its cost and size are just similar to the latter because of absence of 3 mm band switch. It can surely meet the need of practical use.

Key words millimeter wave, radiometer, sensitivity, stability.

引言

毫米波辐射计具有更高的空间分辨率,因而在遥感和制导中获得了广泛的应用^[1,2].但在 3 mm 波段,微波辐射计的研制工作存在以下困难:如果采用全功率模式,整机增益波动使其工作很不稳定;如果采用传统的狄克比较式,需安装 3 mm 开关,这不仅电路复杂、成本高、体积大、一些应用(例如弹载制

导)无法接受,而且国内尚无 3 mm 商品开关,研制工作根本无法进行.为了解决这些困难,我们研制了 3 mm 中频比较辐射计,采用中频比较和绝对值检波电路,获得了满意的效果.

1 原理

中频比较辐射计电路原理如图 1 所示.

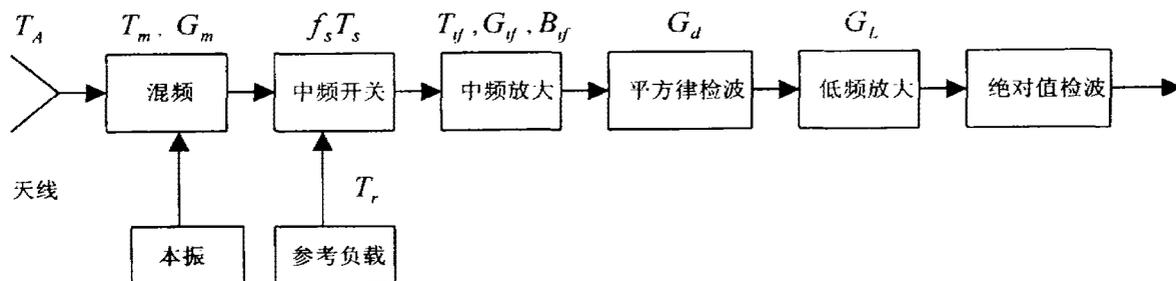


图 1 中频比较辐射计原理框图

Fig. 1 The Principle diagram of IF-switch radiometer

混频器的等效输入噪声温度为 T_m , 增益(损耗)为 G_m ; 中频开关的开关频率为 f_s ; 周期为 T_s ; 参考负载等效输入噪声温度为 T_r ; 中频放大器的等效输入噪声温度为 T_{if} ; 增益为 G_{if} ; 等效噪声带宽为 B_{if} ; 平方律检波的灵敏度为 $G_d(v/\omega)$; 低频放大的增益为 G_L ; 天线接收的噪声信号为 T_A . 忽略中频开关、平方律检波和低频放大部件产生的噪声. 且令 κ 为玻耳兹曼常数.

在开关接通混频器的半个周期内, 天线信号 T_A 经混频、中频放大、平方律检波、低频放大, 得到直流电平 \bar{V}_{LA} 为

$$\bar{V}_{LA} = [(T_A + T_m)G_m + T_{if}]G_{if}\kappa B_{if}G_dG_L, \quad 0 \leq t \leq T_s/2 \quad (1)$$

在开关接通参考负载的半个周期内, 参考负载输出的噪声温度 T_r 经中频放大, 平方律检波, 低频放大, 得到另一直流电平 \bar{V}_{LR} 为

$$\bar{V}_{LR} = (T_r + T_{if})G_{if}\kappa B_{if}G_dG_L, \quad T_s/2 \leq t \leq T_s \quad (2)$$

式(1)和式(2)成立的前提是在一个开关周期内, 系统增益 G_{if} 、 G_d 、 G_L 均未变化, 这表示开关频率 f_s 应高于增益起伏中有效的最高次频谱分量. 绝对值检波的作用是将 \bar{V}_{LA} 和 \bar{V}_{LR} 之差的一半检测出来并作为直流输出信号 V_{OUT} .

$$\begin{aligned} \bar{V}_{OUT} &= \frac{1}{2}(\bar{V}_{LA} - \bar{V}_{LR}) \\ &= \frac{1}{2}[(T_A + T_m)G_m - T_r]\kappa B_{if}G_dG_{if}G_L \\ &= \frac{1}{2}[(T_A + T_m)G_m - T_r]G_{SYS}, \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)中 $G_{SYS} = \kappa B_{if}G_dG_{if}G_L$ 为系统增益. 由于 T_r 是恒定的, 如果系统也是稳定的, 则 \bar{V}_{OUT} 只与 T_A 有关. 通过定标, 可建立 \bar{V}_{OUT} 与 T_A 的定量关系, 从而可以由输出电压 \bar{V}_{OUT} 测定天线接收的信号 T_A .

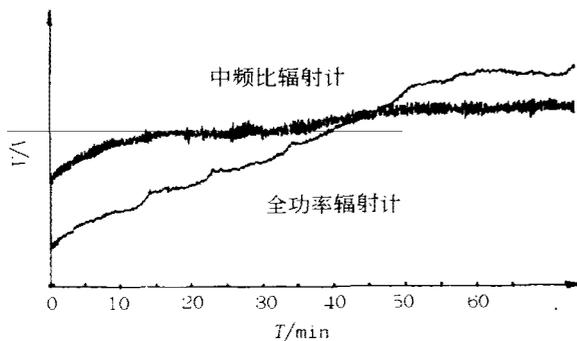


图2 辐射计输出电压与时间的关系

Fig. 2 The time dependence of voltage output of IF-switch radiometer and total power radiometer

2 特性分析与测量

2.1 稳定性

由式(3)可以得出, 如果辐射计不稳定, 设其系统增益变化为 $\Delta G_{SYS}/G_{SYS}$, 则中频比较辐射计输出电压变为

$$\Delta \bar{V}_{OUT1} = \bar{V}_{OUT} \frac{\Delta G_{SYS}}{G_{SYS}} = \frac{1}{2} [(T_A + T_m)G_m - T_r] \Delta G_{SYS} \quad (4)$$

对全功率辐射计而言, 由于没有中频比较开关和参考负载, 其输出电压与式(1)相同. 故其输出电压的变化为

$$\Delta \bar{V}_{OUT2} = [(T_A + T_m)G_m + T_{if}] \Delta G_{SYS} \quad (5)$$

由于 $\frac{1}{2} [(T_A + T_m)G_m - T_r] \ll [(T_A + T_m)G_m + T_{if}]$, 故 $\Delta \bar{V}_{OUT1} \ll \Delta \bar{V}_{OUT2}$. 这表明中频比较辐射计的稳定性优于全功率辐射计. 我们采用同一个混频-本振组件和中频放大器, 具有相同增益的低频放大器分别组装成 3 mm 中频比较辐射计和全功率辐射计. 天线用恒温负载代替, 在开机 0.5 h 后记录它们的输出电压随时间变化曲线(见图 2). 可以看出全功率辐射计需要很长时间才能达到基本稳定状态, 这证明上述分析是完全正确的.

2.2 灵敏度

由于中频比较辐射计与狄克辐射计一样, 在整个测量时间内, 有一半时间是测量参考信号, 而另一半时间是测量天线信号, 即式(3)应写为

$$\bar{V}_{OUT} = \frac{1}{2} \{ [(T_A + T_m)G_m + T_{if}] - (T_r + T_{if}) \} G_{SYS} \quad (6)$$

输出电压的交流变量 $V_{OUT(t)}$ 由以下 3 部分独立的分量组成:

(1) 系统增益变化 $\Delta G_{SYS}/G_{SYS}$ 引起的输出电压不确定性为

$$\Delta T_G = [(T_A + T_m)G_m + T_{if}] \frac{\Delta G_{SYS}}{G_{SYS}}, \quad (7)$$

(2) 在一半的积分时间 τ 内, 辐射计接通混频器, 由噪声引起的输出电压不确定性为

$$\Delta T_m = \frac{(T_A + T_m)G_m - T_{if}}{\sqrt{B_{if} \frac{\tau}{2}}}, \quad (8)$$

(3) 在另一半的积分时间 τ 内, 辐射计接通参考负载, 由噪声引起的输出电压不确定性为

$$\Delta T_r = \frac{T_r + T_{if}}{\sqrt{B_{if} \frac{\tau}{2}}}, \quad (9)$$

表 1 灵敏度测量结果
Table 1 The sensitivity measurement

辐射计类型	T_0 (k)	T_N (k)	V_0 (v)	V_N (v)	$\frac{dV}{dT}(v/k)$	$\delta(v)$	$\Delta T_{min} =$ $\delta/\frac{dV}{dT}(k)$
全功率	285.4	77.3	1.4	0	6.72×10^{-3}	3.225×10^{-3}	0.48
中频比较	285.4	77.3	1.82	0	8.7×10^{-3}	8.374×10^{-3}	0.96

将上述 3 项独立的不确定性平方相加后开方, 得中频比较辐射计的灵敏度为

$$\Delta T_{min} = \left\{ \frac{2[(T_A + T_m)G_m + T_{rj}]^2 + 2(T_r + T_{rj})^2}{B\tau} + [(T_A + T_m)G_m - T_r] \left(\frac{\Delta G_{SYS}}{G_{SYS}} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

由式(10)可见, 灵敏度由两部分组成, 其中一部分是由增益波动对灵敏度的贡献. 研究表明^[4], 增益波动的功率谱与频率的 α 方 (f^α) 成反比, 表明增益波动将会引起辐射计输出缓慢变化. 因此, 影响辐射计的稳定性, 上述有关稳定性的分析已证明了这一点. 另一部分对灵敏度的贡献是系统各部分的噪声温度. 考虑到中频比较辐射计引入了中频开关和开关电路, 它们都会产生噪声. 故系统噪声温度会大于全功率辐射计, 图 2 中全功率辐射计曲线的波动大于中频率比较辐射计曲线正好证实了这一分析. 将全功率辐射计和中频比较辐射计分别用液氮温度 T_N 和室温 T_0 定标负载进行定标, 得出相应的输出电压为 V_N, V_0 , 由此可算出定标曲线的斜率 dV/dT . 再分别测出两种辐射计由噪声引起的输出电压波动的标准差 δ , 最后算出两种辐射计由系统噪声导致的灵敏度 $\Delta T_{min} = \delta/dV/dT$ 如表 1 所列.

2.3 整机结构和尺寸

由于中频比较辐射计的中频开关由一只集成开

关器件完成, 并可以和中频放大器做成一个组件, 而低频放大和绝对值检波也是由一块四运放实现, 因而整机结构及尺寸与全功率辐射计相差不大, 完全可以满足小型化的需要.

3 结语

在目前国内尚无 3 mm 商品开关的条件下, 我们采用中频比较开关和低频绝对值检波电路, 研制成 3 mm 中频比较辐射计. 其稳定性优于全功率辐射计, 而其结构尺寸和全功率计相当, 完全可以满足各种应用的需要.

REFERENCES

- [1] LU Jun, ZHANG Zu-Yin, LIN Shi-Jie, *et al.* View on satellite microwave radiometer. *J. Remote Sensing Tech. and Appl.* (卢军, 张祖荫, 林士杰, 等. 星载微波辐射计的发展与展望. *遥感技术与应用*), 1995, **10**(1): 65—69
- [2] LOU Guo-Wei, LI Xin-Guo, NING Jun. Total power MMW radiometer system with high-speed scan. *J. Infrared Millim. Waves* (娄国伟, 李兴国, 宁军. 高速扫描全功率毫米波辐射计研究. *红外与毫米波学报*), 1998, **17**(4): 241—246
- [3] Ulaby F T, Moore R K, Fung A K, *et al.* *Microwave Remote Sensing*. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1981, **1**: 247
- [4] Micheal, Hersman S. Sensitivity of the total power radiometer with periodic absolute calibration. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech*, 1981, Vol. MTT - **29**(1): 20—24