

采用双参考温度自动增益补偿体制的机载/陆基13mm成像微波辐射计的研制

何 明 张俊荣 赵仁宇 宋家驹

(中国科学院长春地理研究所)

1989年7月26日收稿

摘 要

本文对双参考温度自动增益补偿型微波辐射计的工作原理、性能及参数指标进行了详细分析,提出了对于双参考温度辐射计的定标特性进行校正的方法。设计研制出了用于实时遥感大气水汽含量及有关参数的机载/陆基13mm成像微波辐射计系统,采用微型计算机实现天线的扫描控制、实时数据采集、人机对话、假彩色成像及用磁盘记录数据。

关键词: 双参考温度 自动增益补偿 成像辐射计

一、引 言

微波辐射计通过接收目标的微波辐射获取关于目标的信息,具有全天候、全天时的工作能力,可以实时、动态地获得大气、海洋、陆地的具体参数,在空间遥感中起着重要的作用。

提高微波辐射计的灵敏度一直是研制工作中所要解决的主要问题,它最终归于辐射计因噪声起伏引起的测量不定性和因系统增益波动引起的测量不定性的改善问题^[1]。辐射计由于有效输入噪声温度起伏产生的测量不定性表示为:

$$\Delta T_{rms} = a \cdot \frac{T_{eff}}{\sqrt{B_{HF} \cdot \tau}} \quad (1)$$

其中: a ——辐射计常数,对于全功率型, $a = 1$; 对于迪克型, $a = 2$ 。

T_{eff} ——有效输入噪声温度。包括天线温度 T_A 和辐射计系统内部噪声折合到天线输入端口的等效输入噪声温度 T_{REC} ;

B_{HF} ——高频噪声带宽,主要由中放带宽决定。

τ ——低频噪声带宽的等效积分时间常数。

因系统增益波动产生的测量不定性,是指辐射计由于系统诸参数、主要是高频系统诸参数的不稳定引起的输出不定性。对于全功率型辐射计,它可表示为:

$$\Delta T_{ST} = T_{eff} \cdot \frac{\Delta G_s}{G_s} \quad (2)$$

其中： G_s ——辐射计高频系统的总增益；

ΔG_s ——增益 G_s 的变化。

ΔT_{rms} 和 ΔT_{ST} 是统计无关的。因而辐射计的最小可检测温度信号，即灵敏度为：

$$\Delta T_{min} = \sqrt{\Delta T_{rms}^2 + \Delta T_{ST}^2} \quad (3)$$

借助于调制比较的方法，迪克型辐射计的 ΔT_{ST} 有了根本性的改善，其原理是使用微波开关周期地比较天线温度 T_A 与内置参考源的温度 T_C ，从而消除了 T_{REC} 对于 ΔT_{ST} 的影响，提高了辐射计的灵敏度。迪克型辐射计的 ΔT_{ST} 和 ΔT_{rms} 分别为：

$$\Delta T_{ST} = (T_A - T_C) \cdot \frac{\Delta G_s}{G_s} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \Delta T_{rms} &= \sqrt{\frac{(T_A + T_{REC})^2 + (T_C + T_{REC})^2}{B_{HF} \cdot \tau / 2}} \approx 2 \cdot \frac{T_A + T_{REC}}{\sqrt{B_{HF} \cdot \tau}} \\ &= 2 \cdot \frac{T_{eff}}{\sqrt{B_{HF} \cdot \tau}} \end{aligned} \quad (5)$$

进而，又出现了零平衡型和双参考温度型^[2]的迪克辐射计，它们都具有 $\Delta T_{ST} \rightarrow 0$ 的特点。前者是通过使 $T_A = T_C$ ，而后者是设法使 $\Delta G_s = 0$ ，从而达到提高辐射计灵敏度的目的。

为了适应我国航空航天对微波遥感技术的要求，在采用负反馈零平衡体制研制成功多台不同频段的微波辐射计¹⁾并用于航空、陆地、海面的一系列微波遥感实验的基础上^[3]，我们参考国内外的成果，又研制成功了双参考温度自动增益补偿型的 13 mm 成像微波辐射计系统，并进行了一些初步的大气野外观测实验。

二、双参考温度自动增益补偿微波辐射计的工作原理

图 1 为所研制的 13 mm 双参考温度自动增益补偿微波辐射计的主机方框图。

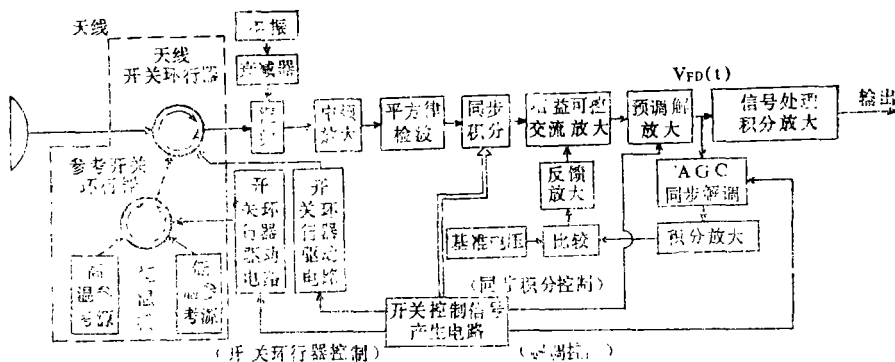


图 1 双参考温度自动增益补偿微波辐射计的主机方框图

Fig. 1 Block diagram of the microwave radiometer using two reference temperatures with automatic gain compensation

1) 张俊荣,零平衡微波辐射计的研制,新疆哈密地区航空遥感试验论文集,1980年。

该辐射计工作时,通过开关控制信号对系统各部分的控制,使得在一个测量周期内,接收机按顺序依次观测 T_A , T_H , T_A , T_L , 经过高频放大和平方律检波后,信号可表示为:

$$V(t) = k \cdot B_{HF} \cdot G \cdot C_d \cdot \begin{cases} T_A + T_{REC} & 0 \leq t < \tau_{s/4} \\ T_H + T_{REC} & \tau_{s/4} \leq t < \tau_{s/2} \\ T_A + T_{REC} & \tau_{s/2} \leq t < 3\tau_{s/4} \\ T_L + T_{REC} & 3\tau_{s/4} \leq t < \tau_s \end{cases} \quad (6)$$

其中,系统的高频噪声带宽 B_{HF} 、增益 G 、平方律检波器的功率灵敏度 C_d 都是可能产生随机变化的量,它们的变化构成了系统总增益的波动 ΔG_s , k 为玻尔兹曼常数。

信号 $V(t)$ 经过增益 g_0 可控的后置放大器放大后,做预解调处理。它的作用是使放大后的 $V(t)$ 的直流电平发生变化,使其对应于低温参考信号期间的电平箝位到地电平,而不改变整个辐射计信号的形状,以便于作进一步的 AGC 同步检波和信号处理积分放大。预解调后的信号可以表示为:

$$V_{PD}(t) = g_0 \cdot V(t) - K \cdot B_{HF} \cdot G \cdot C_d \cdot g_0 \cdot (T_L + T_{REC}) \quad (7)$$

然后,分别进行 AGC 同步检波和信号处理积分放大。其过程可分别表示为:

$$A_{agc} = (g_{agc}/\tau_s) \cdot \int_{\tau_{s/4}}^{\tau_{s/2}} V_{PD}(t) \cdot dt \quad (8)$$

$$A_{sig} = (g_{sig}/\tau_s) \cdot \left[\int_0^{\tau_{s/4}} V_{PD}(t) \cdot dt + \int_{\tau_{s/2}}^{3\tau_{s/4}} V_{PD}(t) \cdot dt \right] \quad (9)$$

其中, g_{agc} , g_{sig} 分别为 AGC 同步检波和信号处理积分放大的放大倍数。在一个周期内,假定 B_{HF} , G , C_d 是稳定的,于是有:

$$A_{agc} = \frac{1}{4} g_{agc} \cdot K \cdot B_{HF} \cdot G \cdot C_d \cdot g_0 \cdot (T_H - T_L) \quad (10)$$

$$A_{sig} = \frac{1}{2} g_{sig} \cdot K \cdot B_{HF} \cdot G \cdot C_d \cdot g_0 \cdot (T_A - T_L) \quad (11)$$

由式(10)可以看出,AGC 同步检波的输出 A_{agc} 与天线温度信号 T_A 和接收机系统噪声温度 T_{REC} 无关,而只与系统系数 B_{HF} , G , C_d , g_0 , g_{agc} 以及参考温度 T_H 和 T_L 有关。 T_H , T_L 和 g_{agc} 是稳定的, g_0 是可控量,只有在系统参数 B_{HF} , G 和 C_d 产生随机变化、或存在外来干扰时, AGC 同步检波的输出 A_{agc} 才发生变化。因此, A_{agc} 表明了接收机的稳定情况,可以用其作为反馈信号,通过控制后置放大器的增益 g_0 , 使得 $A_{agc} = V_R$ 保持不变,以补偿系统参数的随机变化并抑制外来干扰的影响,保持系统的稳定。这种自动增益补偿作用就是通过系统中的反馈环路实现的。在这种情况下,信号处理积分放大的输出 A_{sig} 为:

$$A_{sig} = 2V_R \cdot (g_{sig}/g_{agc}) \cdot (T_A - T_L)/(T_H - T_L) \quad (12)$$

式中,基准电压 V_R , 参考温度 T_H , T_L 以及 g_{sig} , g_{agc} 都是稳定的, A_{sig} 只由 T_A 决定,具有线性关系,于是天线温度信号为:

$$T_A = \frac{g_{agc} \cdot (T_H - T_L)}{2 \cdot g_{sig} \cdot V_R} \cdot A_{sig} + T_L \quad (13)$$

通过定标就可以得到 T_A 与 A_{sig} 的关系。

考虑到信号处理积分放大,即(9)式所表述的工作过程,双参考温度自动增益补偿微辐射计的灵敏度 ΔT_{min} 可用其 ΔT_{rms} 表示:

$$\Delta T_{rms} = \sqrt{\frac{4}{1 + \frac{\tau_{agc}}{\tau_{sig}} \left(\frac{T_A - T_L}{T_H - T_L} \right)^2} [(T_H + T_{REC})^2 + (T_L + T_{REC})^2 + 2(T_A + T_{REC})^2]} B_{HF} \cdot \tau_{sig} \quad (14)$$

其中, τ_{agc} , τ_{sig} 分别是 AGC 同步检波器和信号处理积分放大的低频噪声带宽的等效积分时间常数。当 τ_{agc}/τ_{sig} 之比较大时,双参考温度自动增益补偿微辐射计的灵敏度近似等于迪克型;但在实际中,为了使增益补偿环节对各种参数的随机变化有足够快的响应,并在信号同步检波中对噪声的起伏有足够的抑制,比值 τ_{agc}/τ_{sig} 又不能取得太大,因此,灵敏度比迪克型略差。

系统自动增益补偿环节的方框图如图 2 所示,假定后置放大器具有线性增益控制特性时,可画出其等效方框图如图 3。其中,把 $K_V \cdot \Delta V(s)$ 看做环路的放大环节,而把 $K_0 \cdot \Delta V(s)$ 看做输入。

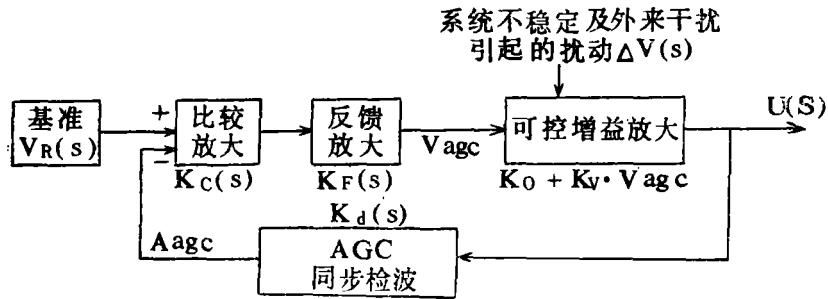


图 2 系统增益补偿环节方框图

Fig. 2 Block diagram of system AGC unit

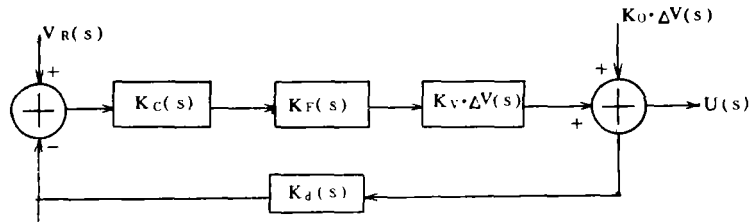


图 3 系统增益补偿环节等效方框图

Fig. 3 Equivalent block diagram of system AGC unit

由叠加原理可以得到:

$$U(s) = K_0 \cdot \Delta V(s) / [1 + K_d(s) \cdot K_c(s) \cdot K_F(s) \cdot K_V \cdot \Delta V(s)] + K_c(s) \cdot K_F(s) \cdot K_V \cdot \Delta V(s) \cdot V_R(s) / [1 + K_d(s) \cdot K_c(s) \cdot K_F(s) \cdot K_V \cdot \Delta V(s)] \quad (15)$$

若 $K_d(s) \cdot K_c(s) \cdot K_F(s) \cdot K_V \cdot \Delta V(s) \gg 1$, 则有:

$$U(s) = K_0 / [K_d(s) \cdot K_c(s) \cdot K_F(s) \cdot K_V] + V_R(s) / K_d(s) \quad (16)$$

可见输出 $U(s)$ 与扰动量 $\Delta V(s)$ 无关, 而仅与基准 $V_R(s)$ 以及自动增益补偿环节的参数有关, 从而补偿了系统的变化。为了提高 $V_R(s)$ 的控制作用, 应该设法减少上式中第一项的影响。这可以通过加深反馈来实现。

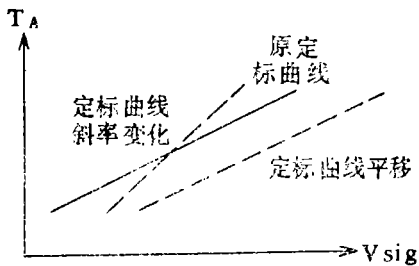


图 4 辐射计输入—输出关系变化示意图
Fig. 4 Change of the radiometer calibration line

以上分析表明, 双参考温度小环反馈自动增益补偿微波辐射计, 通过对系统参数变化以及外来干扰影响的自动增益补偿, 提高了系统的稳定性, 并且具有线性的特点。在具体实现时, 为了得到满意的结果, 除了高频系统的低噪声性能和宽带特性外, 关键是力求保证参考温度噪声源温度 T_H, T_L , 低频信号电路中的同步检波, 信号处理积分放大部分以及反馈回路中基准信号 V_R 在各种环境工作条件下的稳定。另外, 对于同步检波、信号处理积分放大及反馈回路的电路参数有可能出现的非稳定性漂

移, 还可利用机内的参考温度源加以校准。

由式 (13) 可知, 双参考辐射计的输入—输出具有严格的线性关系, 可表为:

$$T_A = a \cdot V_{sig} + b$$

由于前面所述的电路参数的漂移, 有可能使上式变化, 其变化又可具体分解为曲线的平移和斜率的变化(图 4)。对于这种变化, 通常只能采取重复定标的方法克服, 而双参考型辐射计则可利用其内部的参考温度源加以校准。在辐射计的动态范围内, 选取两个固定温度点 T_L 和 $(T_H + T_L)/2$ 作为定标点, 通过改变图 1 中开关控制信号产生电路的工作状态, 使系统分别在工作周期按 T_L, T_H, T_L, T_L 的顺序和 T_L, T_H, T_H, T_L 的顺

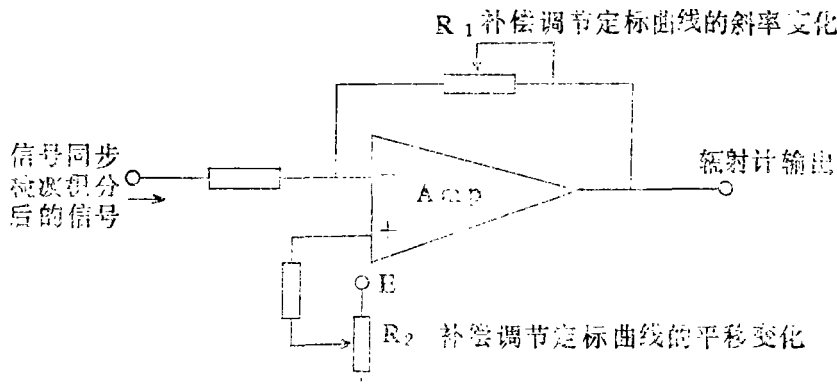


图 5 信号处理积分后放大器示意图
Fig. 5 Amplifier after signal proceeding and integral

序观测, 实现低温 (T_L) 和平均值 ($\frac{T_H + T_L}{2}$) 定标。根据定标点的对应输出, 调节信号处理积分之后的放大器(图 5), 就可以判断并消除定标曲线可能出现的变化, 对定标关系加以校准。这种方法的突出优点是不需要使用可变温度噪声源, 在测量中可以实时进行, 并避免了系统重复定标中由于高频器件安装连接的失配而可能引入的误差。

三、13 mm 成像微波辐射计系统

图 6 是研制的 13 mm 双参考温度自动增益补偿型成像微波辐射计系统的方框图。系统由辐射计主机、计算机控制的天线扫描驱动、数据采集处理部分以及可以适应机载/陆基不同用途的电源系统组成。

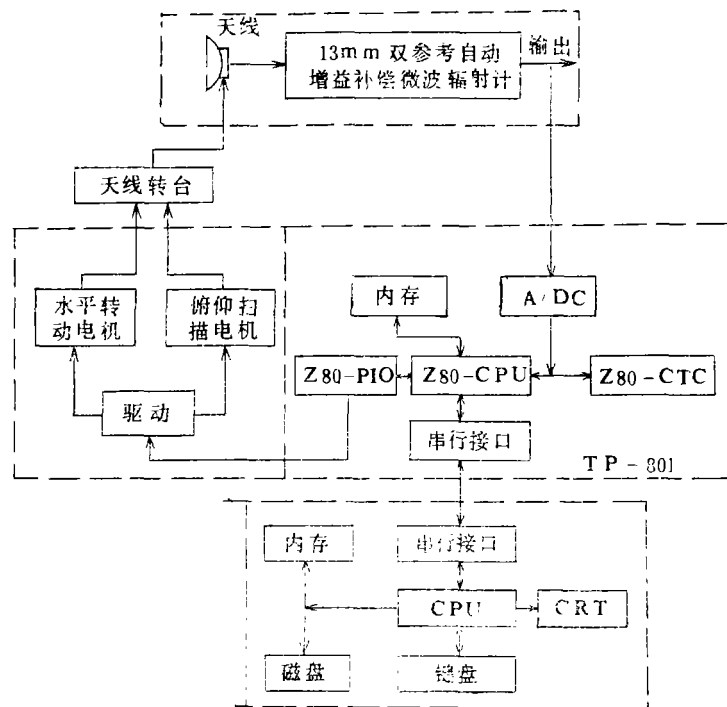


图 6 13 mm 双参考温度自动增益补偿成像微波辐射计系统方框图

Fig. 6 Block diagram of 13 mm Imaging microwave Radiometer System using two Reference Temperatures with AGC

辐射计主机采用背负式结构, 将所有的高频部件和信号处理电路背负在天线上, 随天线一起扫描转动, 避免了过长的天馈线对信号的衰减以及外来干扰的串入。辐射计主机的主要指标见表 1。

天线扫描驱动控制及数据采集处理部分采用双计算机主从式结构。主机采用 IBM-PC/XT 微型机, 负责完成人机对话、接受控制指令以及数据处理、假彩色图像显示, 用磁盘记录数据。从机采用 TP-801 单板机, 它根据主机传来的指令, 完成天线转动的实时

控制及辐射计输出的实时数据采集，同时将天线方位状态及相应的辐射计测量值送入主计算机。主机可将回送的方位及测量数据存盘并在屏幕上显示，或经处理后显示假彩色图像。

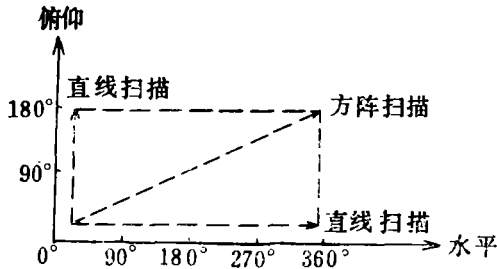


图 7 天线扫描示意图

Fig. 7 Diagram of Antenna Scanning

控制天线纵、横方向转动的两台步进电机的控制驱动相互独立，步进速度、步进角度可变，可以根据不同情况经组合进行直线扫描或方阵扫描(图 7)。

为适应机载/陆基的不同要求，我们编写了两套应用程序，主机的源程序采用以 TURBO PASCAL 为主程序，以

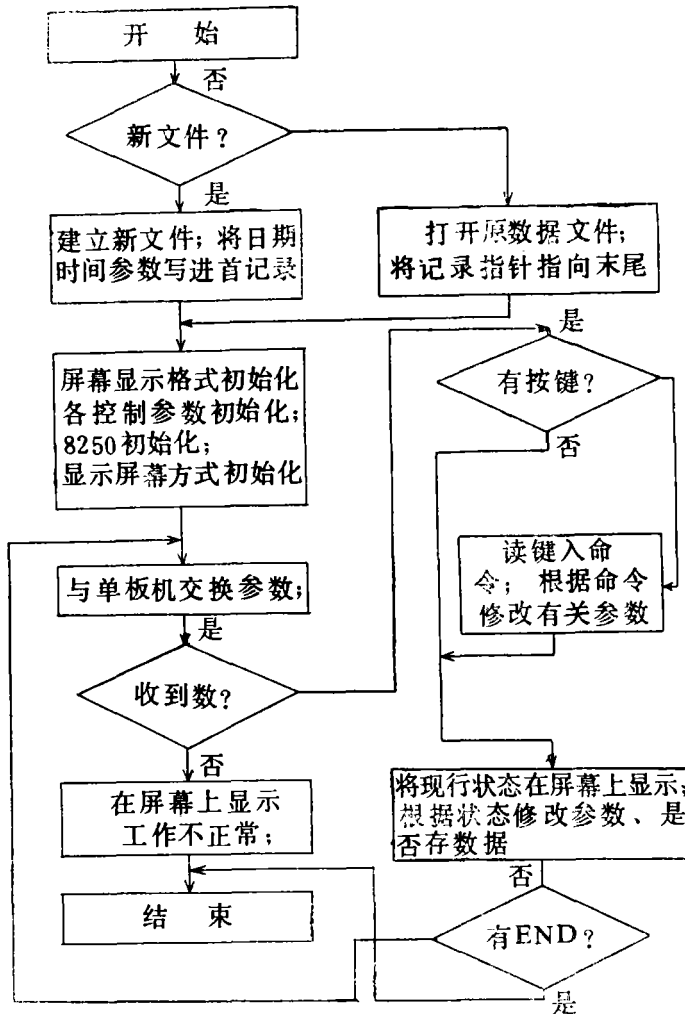


图 8 IBM-PC/XT 主机地面、海面工作模式流程图

Fig. 8 Block diagram of IBM-PC/XT main program for ground-based and sea-surface operation mode

表 1 13 mm 双参考温度微波辐射计主机性能指标

Table 1 Performance index of the 13 mm two Reference temperatures microwave radiometer

项 目	性能指标
中心频率	22.235 GHz
中频带宽	30—400MHz
天线口径	400 mm
动态范围	20—360 K
灵敏度	<0.3 ($\tau_{sig} = 1s$)
线性相关系数	>0.99
功率 主机	45W
天线转台	200W

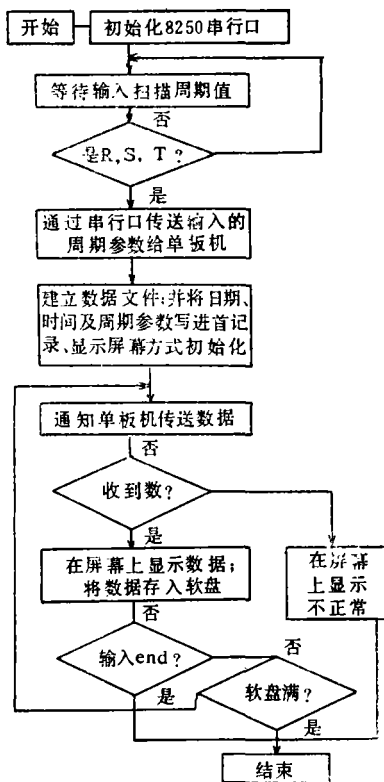


图 9 IBM-PC/XT 主机飞行工作模式流程图

Fig. 9 Block diagram of IBM-PC/XT main program for airborne operation mode

8086 汇编语言为面向机器的子程序的方式编写,从机中固化的程序用 Z80 汇编语言编写。图 8 和图 9 分别示出了在地面、海面工作模式下和在飞行工作模式下的主程序流程图。

该仪器研制完成后,于 1988 年 11 月通过了分院级鉴定。之后进行了多次的地面观测,得到了较好的效果。目前正在使用提高中。

参 考 文 献

- [1] F. T. Ulaby, R. K. Moore, A. K. Fung, Microwave Remote Sensing: Active and Passive, Vol. 1: Microwave Remote Sensing Fundamental and Radiometry, p. 367, Addison-Wesley Publishing Company, 1981.
- [2] J. P. Hach, A Very Sensitive Airborne Microwave Radiometer Using Two Reference Temperatures, IEEE Trans. Micro. Theory and Techniques, Vol. MTT16, No. 9, pp. 629—636, Sep. 1968.
- [3] 张俊荣、赵仁宇等,航空无源微波遥感器的研制,环境遥感,1(4),1986。

The Development of Airborne/ground-based 13mm Imaging Microwave Radiometer Using Two Reference Temperatures with Automatic Gain Compensation

He Ming Zhang Junrong Zhao Renyu Shong Jiaju

(Changchun Institute of Geography, Academia Sinica)

Abstract

In this paper, detailed analysis on the principle, functions and characteristics of microwave radiometer using two reference temperatures with automatic gain compensation is made, and proposes a method of correcting calibration characteristic of two reference temperatures microwave radiometer. It also concerns to develop a airborne/ground based 13 mm microwave imaging radiometer with micro-computer control of antenna scanning, real-time data collecting and processing, falsecolour imaging, man-computer dialogue, and data recording on diskette.

Key words Two Reference Temperature Automatic Gain Compensation Imageing Radiometer