

航空无源微波遥感器的研制

张俊荣 赵仁宇 滕叙充

(中国科学院长春物理研究所)

1986年4月7日收到

一、引言

为了进一步提高遥感技术的效益,国内外遥感界一直致力于研究提高遥感器的几何分辨率。图像取得率和获得感兴趣对象的特征信息,以及加强图像处理和地物波谱特征的理论实验工作。

遥感器可分为两大体系:光学体系,即用照相机和胶片记录下图像的遥感器;和电子学体系,即把图像变换为模拟电信号或数字电信号记录下来的遥感器。航天飞机的成功飞行,大大降低了回收胶片箱的成本,使光学体系遥感器的作用得以发挥。因为在目前的技术情况下,还没有比胶片图像分辨率更高的材料,也就是说,在卫星高度,用长焦距相机、高分辨率胶片,可以判读出地面上几米大小的物体,能够作成1:5万的地形图。电子学体系的MSS的分辨率是80米,RBV为40米,TM为30米,海洋卫星的SAR是25米,Spot的CCD是10米。值得注意的是SAR的分辨率是其天线长度的一半,所以确信能得到小于1米的分辨率。

十多年来,遥感技术的发展和运用,是以可见光和红外光为主的,其致命的弱点是必须有日照条件和没有云雾遮挡。这样,在可见光和红外波段遥感的图像取得率就很低,使遥感的实时动态监测等优点不能充分发挥。然而,微波波段的遥感器却能够在有云雾和黑夜条件下取得地物的图像和资料。例如,10GHz频率通过干燥的大气层到卫星的衰减约为0.05dB。这样的衰减是微不足道的。所以,遥感界人士一直致力于发展微波波段的遥感器。NIMBUS-7卫星的微波辐射计,6天观测全地球一次,实现了实时动态监测的愿望。

可见光和近红外光遥感器是检测物体对太阳光的散射量,只反映物体的极表层状况,故所带被测物体的特征信息不够丰富。微波波段的遥感器所取得的信息与被观测物体的结构、电学特性及其表面状态有关。微波有一定的穿透能力,能获得较深层的信息。也就是说,微波遥感能得到更丰富的被测对象的特征信息。

微波遥感的研究和应用比可见光和红外光遥感晚,对遥感器的技术要求较高,人们对所得图像资料的先验知识较少,理论研究还不够充分,但是由于它有上述的优点,当前在世界上正处于大力开发研究中。

中国科学院长春物理所1977年研制成机载三厘米微波辐射计,并在新疆哈密飞行试验中成功地得到了地面微波辐射等亮度温度图,铁矿露头、断裂带、干枯河沟的明显反应表明微波辐射计能够找矿找水^[1]。后来又将其发展成机载三厘米扫描微波辐射计,长春、

青岛的飞行试验表明,无源微波遥感能够检测土壤含水量、划分水陆分界、海岸带调查、检测油膜污染、区分地面典型物体^[2,3]。1980年研制成功机载十厘米微波辐射计,经天津-渤海湾地区环境遥感飞行试验表明,微波辐射计能取得地物的丰富信息,可以区分出不同质底的桥梁、不同农作物、建筑群、池塘、河沟以及海上船只等^[4]。1983年研制成机载十厘米及机载三厘米扫描微波辐射计二型机,参加了1984年春的黄、淮、海航空遥感试验和东海的海洋动力状态试验(船载)。取得了黄河流域的农田等微波辐射图像和资料,两台辐射计同步测得海面动力状态特性^[5]。1983年研制成机载八毫米成像微波辐射计,先后对陆地、海洋进行五次航空飞行作业,为资源调查、环境遥感提供有效手段^[6,7]。1985年研制成机载1.35厘米成像微波辐射计。这些遥感试验结果证明了微波遥感的优点。

二、无源微波遥感原理和微波辐射计

自然界的一切物体,只要它处在绝对零度以上,就在所有的频率上吸收外部电磁能量,同时向外辐射电磁能量,温度为 T 的黑体的辐射强度在微波频率($f = 300\text{MHz} - 300\text{GHz}$)内,由下式给出:

$$B(\lambda, T) = \frac{2kT(\theta, \varphi)}{\lambda^2} [W \cdot m^{-2} \cdot \text{立体弧度}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}] \quad (1)$$

如接收天线的有效开口面积是 $A_{eff}(\theta, \varphi)$,并只接收一个方向极化能量,则天线在 df 频带内接收到黑体的电磁能功率是:

$$P_a = \oint \frac{k \cdot T(\theta, \varphi)}{\lambda^2} df \cdot A_{eff}(\theta, \varphi) d\Omega \quad (2)$$

Ω 为天线座标的立体角。天线有效开口面积是

$$A_{eff}(\theta, \varphi) = \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot G(\theta, \varphi) \quad (3)$$

当天线损失可忽略不计时,其增益可表示为:

$$G(\theta, \varphi) = \frac{D(\theta, \varphi) \cdot D^*(\theta, \varphi)}{\frac{1}{4\pi} \oint D(\theta, \varphi) \cdot D^*(\theta, \varphi) \cdot d\Omega} \quad (4)$$

其中, $D(\theta, \varphi)$ 为天线指向性特性函数。将(3)、(4)式代入(2)式得:

$$P_a = k \cdot df \cdot \frac{\oint T(\theta, \varphi) \cdot D(\theta, \varphi) \cdot D^*(\theta, \varphi) \cdot d\Omega}{\oint D(\theta, \varphi) \cdot D^*(\theta, \varphi) \cdot d\Omega} = k \cdot T_A \cdot df \quad (5)$$

其中: $T_A = \frac{\oint T(\theta, \varphi) \cdot D(\theta, \varphi) \cdot D^*(\theta, \varphi) \cdot d\Omega}{\oint D(\theta, \varphi) \cdot D^*(\theta, \varphi) \cdot d\Omega} \quad (6)$

它是天线指向特性为加权函数,射到天线上的物体辐射温度的加权平均, T_A 叫天线温度,当物体温度各向均匀时,天线温度等于物体温度;当指向特性足够窄时,在波束指向上,亦可认为天线温度等于物体温度;然而要知道物体温度的足够高的精确值,必须对(6)式反算出物体温度^[8,9]。

当用一个已知温度去定标辐射计,例如用改变接在辐射计输入端的匹配电阻的温度来实现定标,就使辐射计变成以温度为指示,它和辐射计带宽无关,只指示出天线温度,

$T_A \cdot k$ 是被测黑体在单位频率上辐射功率的强度。一般物体的发射率 ϵ 是小于 1 的量, 黑体的 $\epsilon = 1$, 与物体的性质、温度、表面粗糙度及观测角度、极化方向、波长有关, 是表示物体特性的重要物理量。

微波辐射计的灵敏度表示为:

$$\Delta T_{rms} = a \frac{T_{eff}}{\sqrt{B_{HF} \cdot \tau}} \quad (7)$$

其中: B_{HF} ——高频噪声带宽, 由中放带宽决定,

τ ——低频噪声带宽的等效积分时间常数,

a ——辐射计常数, 全功率接收机 $a = 1$,

T_{eff} ——有效噪声温度, 它包括天线接收的目标温度和接收机本身噪声折合到天线上的温度。

稳定度表示为:

$$\Delta T_{ST} = T_{eff} \cdot \frac{\Delta G}{G} \quad (8)$$

其中: G ——和波器前的增益, ΔG ——增益的变化。辐射计最小可检测信号为:

$$\Delta T_{min} = \sqrt{\Delta T_{rms}^2 + \Delta T_{ST}^2} \quad (9)$$

可见降低本机噪声和提高系统稳定度都可以改善全功率微波辐射计的最小可检测信号。当采用相关技术和信号调制技术时, 可使微波辐射计发生根本性变化。因为将所检测的

表 1*

Table 1

	$\Delta T_{rms} = a \frac{T_{eff}}{\sqrt{B_{HF} \cdot \tau}}$	稳定度 ΔT_{ST}
相干辐射计	$a = \frac{1}{\sqrt{2}}$	$T_{eff} \cdot \frac{\Delta G}{G}$
全功率辐射计	$a = 1$	$T_{eff} \cdot \frac{\Delta G}{G}$
Dicke 辐射计, 方波调制, 方波放大	2	$(T_A - T_C) \frac{\Delta G}{G}$
Dicke 辐射计, 方波调制, 正弦放大	$\frac{\pi}{\sqrt{2}} \approx 2.22$	$(T_A - T_C) \frac{\Delta G}{G}$
Dicke 辐射计, 正弦调制, 正弦放大	$2\sqrt{2} \approx 2.83$	$(T_A - T_C) \frac{\Delta G}{G}$
Graham 双通道辐射计	$\sqrt{2} \approx 1.41$	$(T_A - T_C) \frac{\Delta G}{G}$
Dicke 相关辐射计	1.41	$T_{eff} \frac{\Delta G}{G}$
零平衡式 Dicke 辐射计	2	$\Delta T_{ST} \rightarrow 0$ 只取决于参考源的稳定
双参考温度小环反馈辐射计	接近 Dicke 型	$\Delta T_{ST} \rightarrow 0$ 只取决于参考源的稳定

* 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文集》, 中国科学院遥感应用研究所, 1980年。

噪声信号通过几个通道, 然后进行相关处理时, 由于信号相关, 而各通道噪声不相关, 所以提高了检测弱信号的能力。由(8)式可看到, 稳定度与有效噪声温度成正比, 而 T_{eff} 是一个较大的量。Dicke 用单刀双掷微波开关, 以比较目标辐射的和内置参考辐射源的微波辐射功率, 使(8)式变为:

$$\Delta T_{ST} = (T_C - T_A) \frac{\Delta G}{G} \quad (10)$$

其中: T_C ——参考源温度, T_A ——天线温度。

$(T_C - T_A)$ 比 T_{eff} 小 1 到 2 个数量级, 即当系统稳定度相同时, Dicke 式辐射计要有高 1—2 个数量级的灵敏度。表 1 列出了各种型式微波辐射计的灵敏度常数和稳定度。

三、航空无源微波遥感器的研制

长春物理所在微波遥感窗口和水蒸汽吸收峰^[10]的四个频段上, 研制成多台机载微波辐射计, 现介绍如下。

1. 机载八毫米成像微波辐射计

该机采用脉冲调制噪声注入的负反馈零平衡狄克型方案, 宽带系统等先进技术, 高频、中频部件背负在天线之后一起进行扫描运动, 接收的地物微波辐射在终端成像。

反馈信号经过 V/F 变换, 驱动 PIN 调制器, 向天线信号中注入脉冲式噪声, 构成负反馈环。

采用时间地址——对应的方法定位。辐射计的图像标记着时间地址, 电视摄像机的图像也标记着时间地址, 以便于判读。

机载八毫米成像微波辐射计系统方框图如图 1 所示。天线接收目标的亮度温度 T_A , 通过馈线及方向耦合器到开关环行器的 1 端, 参考温度源的噪声温度 T_R 到开关环行器的 2 端。反馈支路经方向耦合器送到环行器 1 端的噪声温度为 T_{in} 。开关环行器在其驱动信号驱动下, 交替地将环行器 1 端 2 端的噪声信号送到环行器 3 端, 当 $T_A \approx T_R$ 时, 经混频、中放、平方律检波, 同步积分、交流放大、相减处理, 输出误差信号, 经放大后变换成与其大小成线性关系的脉冲, 去调制 PIN 调制器, 控制固体噪声源送向方向耦合的噪声能量, 能使 $T_A + T_{in} \approx T_R$, 即零平衡。经过积分器的输出信号计量地物的亮度温度。

采用 MDR-Z80 型微机实现对整机的控制、数据采集、实时显示、存储, 其系统方框图如图 2 所示。

微机发给天线控制系统扫描指令信号, 天线控制系统使天线按规定的扫描周期及摆角进行平面扫描。数据采集系统、摄像系统、计时系统同步工作。

天线扫描周期为 1 或 2 秒, 正扫、回扫时间相等。正扫行程中采集地面辐射数据 20 个, 回扫时把此数据存入内存器, 与此同时在监视器上显示出此刻的时间信号(时、分、秒)和数据, 实现实时监视。当整个航线结束时, 按结束按钮, 采集过程结束, 微机命令把内存数据存入数字磁带中, 存完数据自动进入待采集状态。由于电视摄像、计时与数据采集同步进行, 得到的微波辐射图像、电视摄像、计时——对应, 便于判读。

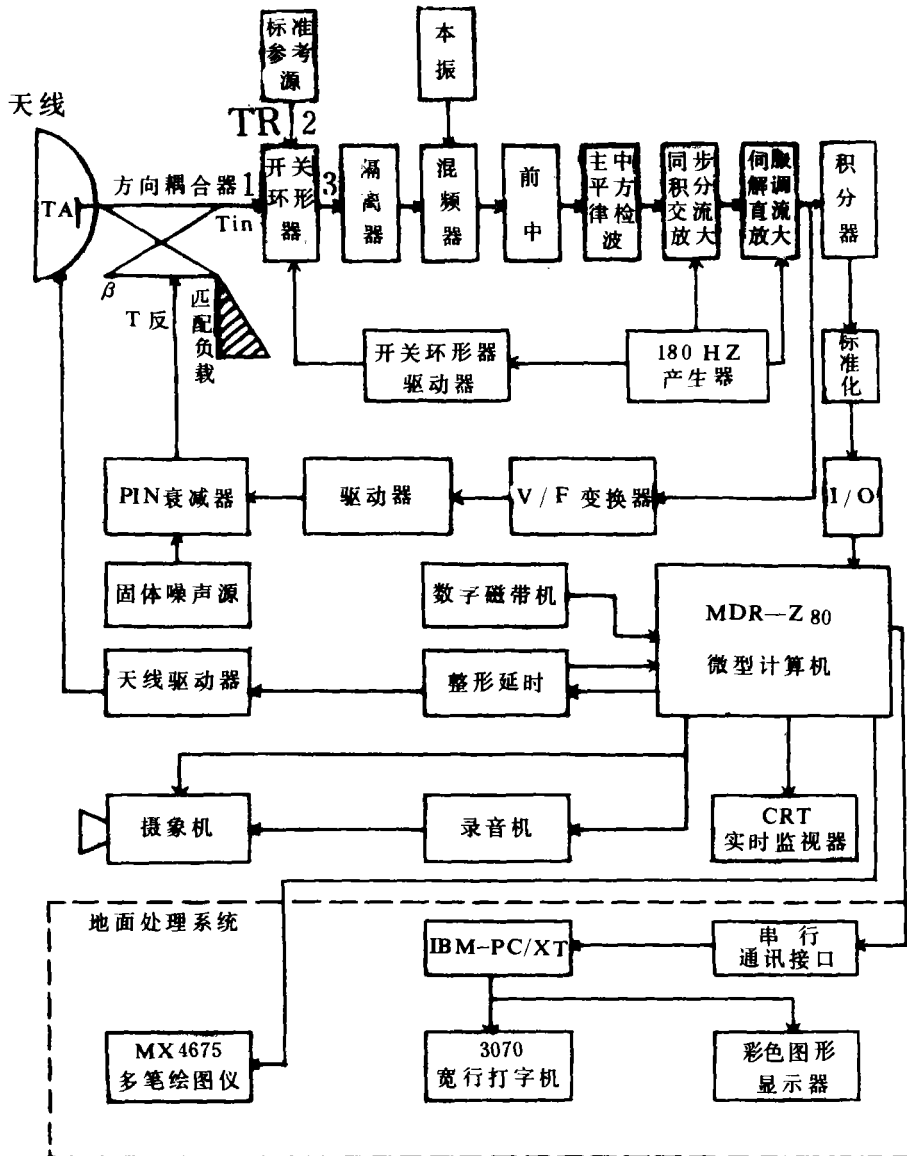


图 1 机载 8 毫米成像微波辐射计系统方框图

Fig. 1 Diagram of Airborne 8-mm Microwave Imaging Radiometer System

图像处理系统的方框图如图 3 所示。成像微波辐射计的图像可以用密度分割、假彩色合成、边缘加强、几何纠正、辐射校正等方法处理。数字磁带机记录的数字图像数据,经过校正处理得到直观图像。

机载八毫米成像微波辐射计主要技术指标:

工作频率: 36GHz,

中频带宽: 50Hz—400MHz,

灵敏度: 0.6K($\tau = 1$ 秒),

D 4

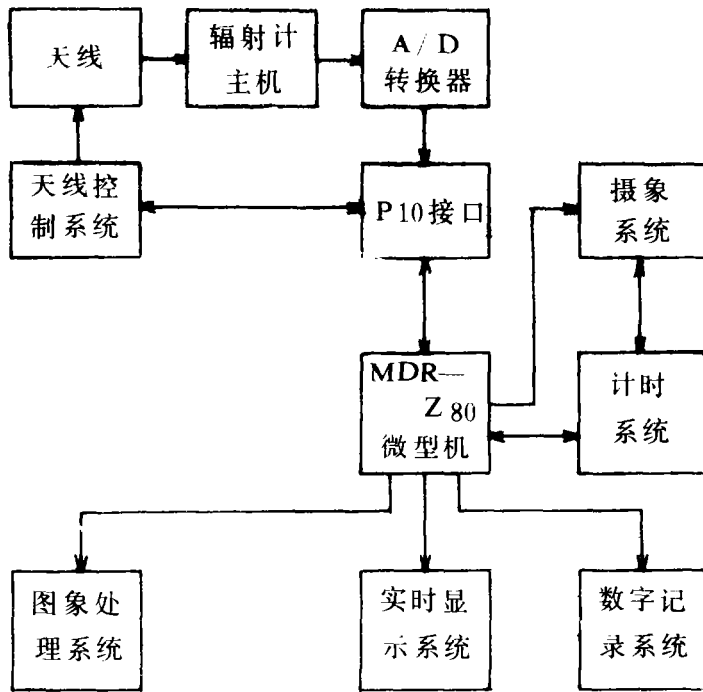


图2 利用微机对整机控制、数据采集、实时显示、存储、处理系统方框图

Fig. 2 Diagram of Micro-Computer Control Data Collection, Real-time display, Storage and Processing System

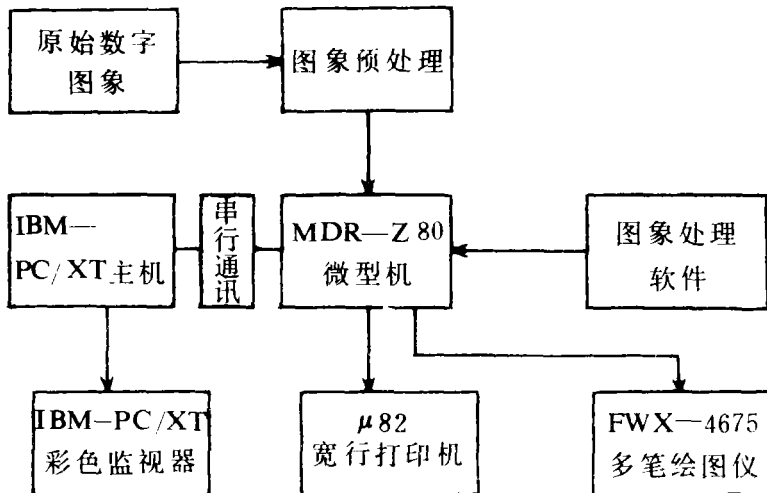


图3 图像处理原理方框图

Fig. 3 Image Processing Principle Diagram

动态范围：100—300K，

天线孔径：400mm，(双模圆口径喇叭前馈抛物面天线)

天线波束宽度：E面1.6°，H面1.6°，

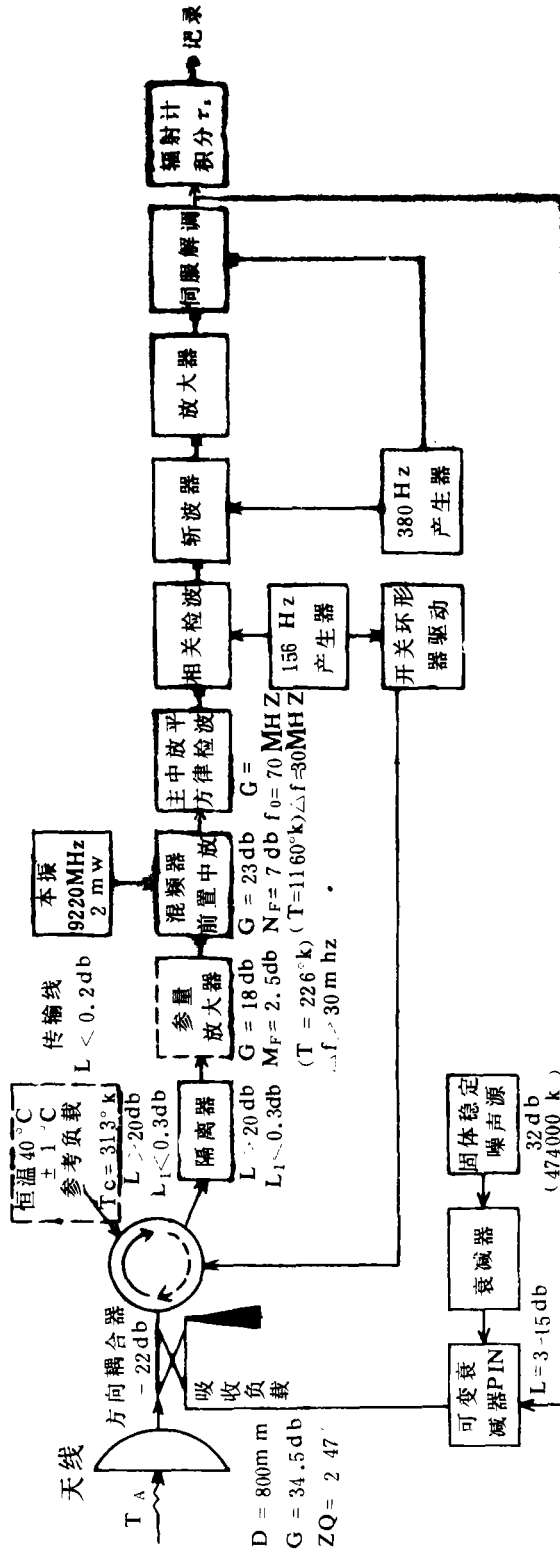


图 4 机载 3 厘米微波辐射计方框图
Fig. 4 Diagram of Airborne 3-cm Microwave Radiometer

天线增益: 41dB

主波束效率: $\approx 90\%$,

极化方式: 垂直、水平,

扫描方式: 微机控制平面扫描

扫描范围: $\pm 20^\circ$,

扫描周期: 1秒, 2秒,

线性度: 相关系数 > 0.9996 ,

记录方式: 12英寸监视器实时显示, 数字磁带记录,

图像: 黑白、数字和假彩色图像, 32个色度级

该机1985年7月通过院级鉴定。

2. 机载3厘米扫描微波辐射计

1977年研制成机载三厘米微波辐射计, 1979年将其天线作机械扫描, 加上数码显示和灰度照像, 变成为机载三厘米扫描微波辐射计, 其主机系统方框图及各部份指标如图4所示, 扫描部份由扫描控制电路控制天线作平面机械扫描, 并同步控制数码显示器和灰度显示器的像机摄下地面微波辐射强度的数字信号和灰度照片。

三厘米扫描微波辐射计的主要技术指标:

工作频率: 9200MHz,

中频频率: 70MHz,

中频带宽: 30MHz,

灵敏度: $1K(\tau = 1\text{秒})$,

动态范围: 100—300K,

天线口径: 800mm, (皱纹喇叭馈源卡塞格伦抛物面天线)

天线增益: 34.5dB,

波束宽度: $2^\circ 47'$,

极化方式: 水平、垂直,

扫描方式: 平面机械扫描,

扫描范围: $0-45^\circ$,

扫描周期: 0.5—2.5秒,

显示方式: 数码(16位像元, 20阶码)、灰度照片, X—Y记录仪。

该机1981年6月通过院级鉴定, 获中国科学院1982年科技成果二等奖。

3. 机载十厘米微波辐射计

1980年研制成机载十厘米微波辐射计。其方框图及各部份指标如图5所示。记录仅记下地物微波辐射强度, PIN调制器以脉冲个数形式输出地物微波辐射强度, 由数字打印机打印下来。终端同步系统将秒、分信号送到记录仪和打印机中记录下来, 当启动照像机时, 经终端同步系统记入记录仪和打印机照像信号, 便于判读。

机载十厘米微波辐射计主要技术指标:

工作频率: 3090MHz,

中频频率: 100MHz,

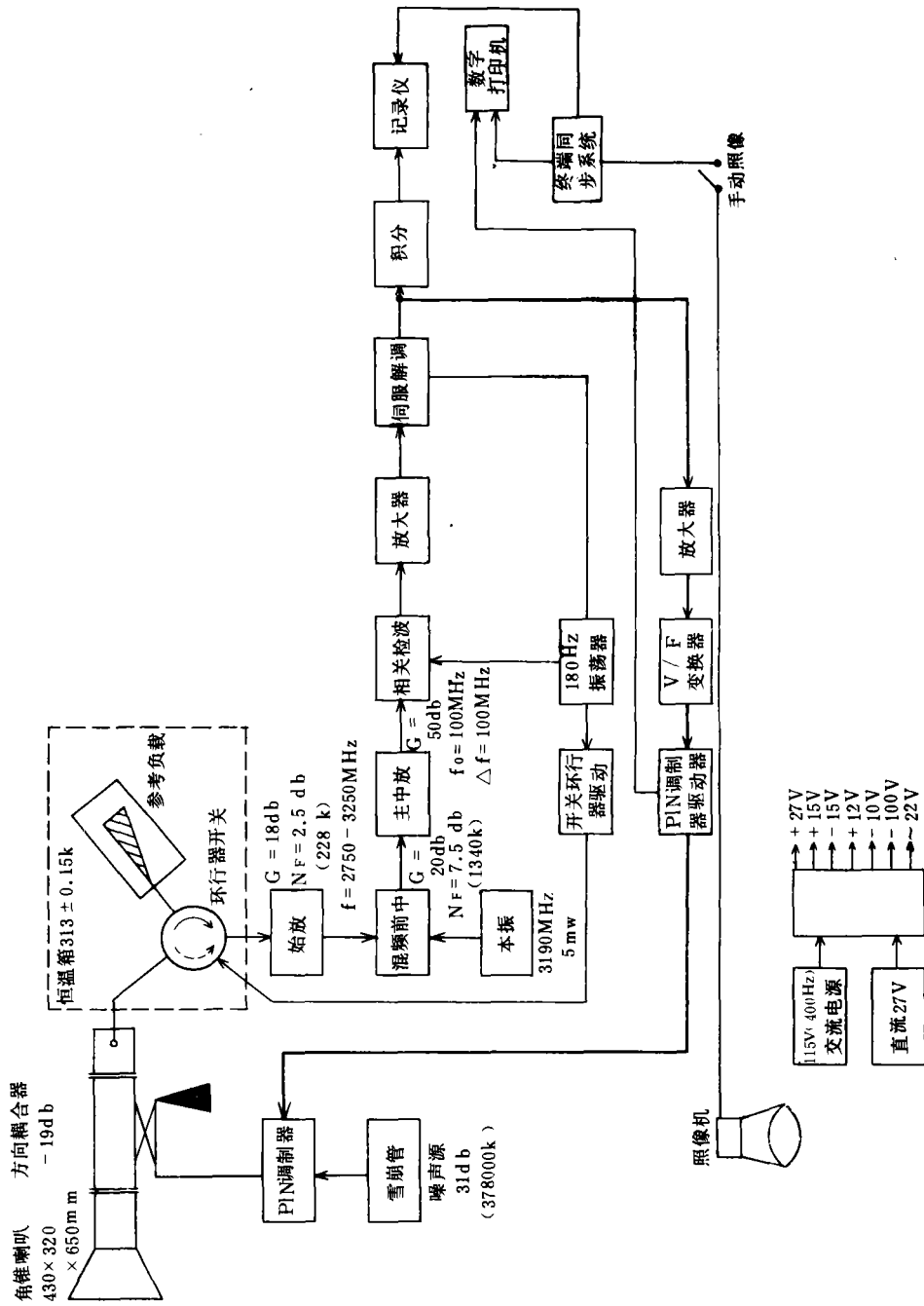


图 5 机载 10 厘米微波辐射计系统方框图

Fig. 5 Diagram of Airborne 10-cm Microwave Radiometer

中频带宽: 100MHz,

灵敏度: $<1K(\tau = 1 \text{ 秒})$,

反馈环的响应时间: $<10\text{ms}$,

动态范围: 100—300K,

角锥喇叭口径尺寸: $430 \times 320 \times 650 \text{ mm}$,

半功率点波束宽度: $2\theta_{0.5E} = 16.5^\circ, 2\theta_{0.5H} = 18.5^\circ$,

极化方式: 水平或垂直,

显示方式: 记录曲线, 数字打印, 给出记录仪、打印机、照像机的同步时标标志。

该机 1982 年 10 月通过技术鉴定。

4. 机载三厘米扫描微波辐射计二型机

1983 年 2 月把原机载三厘米扫描微波辐射计改为由微型计算机控制天线扫描、数据采集、存贮、实时显示, 图像处理, 同步录像、同步摄像, 配有同步时间信号, 便于解译判读的二型机, 扫描周期为 1 秒、2 秒, 扫描角度 $\pm 15^\circ$, 12 英寸监视器实时显示数字图像, 数字磁带记录, 黑白、数字和假彩色图像, 配有时间地址标志信号, 其他指标如原机。

5. 机载 1.25 厘米成像微波辐射计

为了从海面上测量大气参数, 以提高遥感海面的精度, 研制成了机载 1.25 厘米成像微波辐射计。其主要技术指标如下:

工作频率: 22.2GHz,

中频带宽: 50Hz—400MHz,

灵敏度: $<1K(\tau = 1 \text{ 秒})$,

动态范围: 100—300K。

天线: 双模圆口径喇叭前馈抛物面天线、孔径: 400mm,

扫描方式: 微机控制平面扫描,

扫描范围: $\pm 20^\circ$,

扫描周期: 1 秒、2 秒,

线性度: 相关系数 >0.9996 ,

记录方式: 12 英寸监视器实时显示, 数字磁带记录, 黑白、数字和假彩色图像。

上述微波辐射计经过 11 次航空遥感飞行试验或作业, 证明采用负反馈零平衡 Dicke 型先进方案和高频、微机等一系列先进技术后, 无论有无云雾, 还是在白天黑夜, 均能够取得清楚的图像。

参 考 文 献

- [1] Teng Xuyan, Xiao Jinkai, Shi Changqing, Lai Zhaosheng, Peng Hongxian, Yang Bolin, Passive Microwave Radiometry in the Gobi-Desert Region, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 15, No.1, P.37-46.
- [2] Teng Xuyun, Xiao Jinkai, Shou Yuanfu, Zou Xingchang Shi Changqing, Passive Microwave Radiometry for Soil Moisture and Marine Oil Spills, Proceedings of the Second Asian Conference on Remote Sensing, P.63 1-10. Beijing, China, 1981.
- [3] Shou Yuanfu, Zheng Quanan, Teng Xuyan Monitoring Marine Pollution by Airborne Remote Sensing, Papers Selected for Presentation at the Sixteenth International Symposium on Remote Sensing of Environment, Vol.1, p.239-248, 1982.

- [4] 彭洪先、金惠琴、杨广林,天津渤海湾地区微波辐射计遥感试验,天津-渤海湾地区环境遥感论文集,76—79,中国科学院环境科学委员会,天津市环境保护局编,科学出版社,1985.
- [5] 郑全安、孙元福、徐承德、滕叙究、杨广林、赵仁宇,海面毛细-重力波谱非线性特性对微波发射率影响的研究,中国科学(A辑),(5),511—517,1986年.
- [6] 佟明远、杜碧兰、袁小军,渤海海冰航空遥感试验,海洋技术,4(4)1—6,1985.
- [7] 赵仁宇、杨春林、郭凤莲、张玉谦、赵凯,用机载八毫米成像微波辐射计探测海冰,海洋技术,4(4),9—15,1985.
- [8] Bracewell, R.N., Radio Astronomy Techniques, Hand, der physik, Vol. LIV, Springer, Berlin, 1962.
- [9] Twoney, C.H., The Application of Numerical Filtering to the Solution of Integral Equations Encountered in Indirect Sensing Measurements, J.Frank, Inst. 279,95,1965.
- [10] 张俊荣、赵仁宇、刘凤玉、滕叙究,多波段微波辐射计频率的选择,中国空间学会空间探测委员会第一次年会论文集,知识出版社,210—226,1982年.

DEVELOPPING OF AIRBORNE PASSIVE MICROWAVE SENSOR

Zhang Junrong, Zhao Renyu and Teng Xuyan

(Changchun Institute of Physics, Academia Sinica)

Abstract

This paper demonstrates as compared with the visible and infrared sensor that microwave sensor possesses unique advantages on resolution of images imaging rate and signatures within the image. It is enough to prove that the microwave sensor is the current focal point for developping new sensor in progress of remote sensing techniques. The principle of passive microwave remote sensing is discussed. Some characteristics and quality indexes of the different microwave radiometers are compared also. Design plans, key techniques and primary specifications of various airborne microwave radiometers are given. These radiometers were developed by Changchun institute of physics, Chinese Academy of Sciences, Especially, the design specifications of the Dicke type radiometer systems with negative feedback and null-balancing mode are deliberated as well. These sensors have four frequency band and are suitable for applications of remote sensing on land. ocean and atmosphere. In addition, the paper deals with the scanning of the antenna, the collecting of the data controlled by microcomputer, the processing and correcting of the digital microwave radiometric imagery; and the method of synchronous video recording. In the pass nine years, the passive microwave sensors as mentioned above were put into the flight tests for surveying earth's resouces and monitoring natural environment. It has been proved that these sensors are sensitive, stable and reliable. In short, the microwave remote sensing has a vast prospect in applications.