

文章编号: 1007-4619(2004)04-0362-08

机载 W 波段毫米波辐射计扫描成像研究

孔德才, 李 靖, 张升伟, 孙茂华, 刘和光, 姜景山

(中国科学院 空间科学与应用研究中心, 国家 863 计划微波遥感技术实验室, 北京 100080)

摘 要: 通过机载试验, 本文进行了 W 波段毫米波辐射计(RADW92)扫描成像研究, 取得了黄河、渭河部分水域的微波辐射图像。试验结果表明, RADW92 基本满足星载应用的要求。文中分析了影响图像质量的各种误差因素, 并且提出了相应的解决方案。RADW92 工作的中心频率为 92GHz, 带宽 2GHz, 积分时间 60ms, 系统灵敏度 0.6K, 线性度 0.999, 天线为卡塞格伦(Cassegrain)天线。

关键词: W 波段; 毫米波辐射计; 机载扫描成像; 机载试验

中图分类号: TP722.6 **文献标识码:** A

1 引 言

毫米波辐射计在对地观测, 特别是在大气、海洋探测方面有非常重要的地位。在大气探测中不但可以对大气温度、大气湿度和臭氧进行探测, 还可用于对微量气体的探测研究。另外, 在无线电波谱中 80—100GHz 的微波辐射刚好处于大气窗口区域, 此频段的地表辐射可以有效地穿透大气层。研究表明, 在晴空条件下, 沿垂直方向大气层的透射率在 60%以上, 92GHz 的透射率则接近 80%。因此利用 W 波段辐射计, 可以从空间对地球进行有效的观测, 包括土壤含水量、植被分布、水域分布等。而这些资料对气象预报、环境监测、洪涝灾害预防及监测等方面具有极其重要的意义。

1987 年美国发射的国防气象卫星 DMSP 就装载了 91.5GHz 的特种微波大气垂直探测仪, 它在气象预报、天气预报、强对流检测和洪涝灾害监测等方面发挥了很大的作用。从 NOAA-15 开始, 20 个通道的先进微波遥感探测装置(AMSU)取代了原来低分辨率微波探测装置(MSU), W 波段的 89GHz 的微波探测仪用于对大气水汽的探测。AMSU 的空间分辨率为 15km, 可提供全球大气水汽分布信息^[1, 3]。2000

年 12 月发射的 EOS-PM 卫星除了装有 AMSU 外, 还装载了大气探测器, 这一探测器包括三个频段, 其中之一有 89GHz。由此可以看出, 对 W 波段辐射计的研究与应用已经受到世界各国的普遍重视。人们已经越来越认识到开展毫米波辐射计应用技术研究, 对国民经济发展、军事、国防的重要战略意义。

2 RADW92 系统简介

RADW92 为全功率微波辐射计系统, 是先进模块化微波遥感器(由双频高度计、微波散射计和 W 波段微波辐射计组成)的一个组成部分, 采用模块化设计, 集成度高。具有较高的空间分辨率、系统灵敏度和线性度。它主要由天线、混频器、本振、中频放大器、检波器、直流放大器、积分器、数据处理、显示、转台、电源等单元组成, 如图 1。数据流和控制流方向如图中箭头所示。由工控机完成数据采集与扫描成像控制。天线控制信号由工控机发送到天线转台, 再通过天线转台承载天线完成扫描动作。

2.1 主要参数

RADW92 的主要性能参数如表 1。

收稿日期: 2002-06-10; 修订日期: 2003-11-10

基金项目: 本课题得到了国家 863-2 的支持, 课题编号: 974113。

作者简介: 孔德才(1974—), 男, 1997 年毕业于大庆石油学院机电一体化专业, 获得工程学士学位, 2000 年毕业于石油大学(北京)机电一体化专业并获得工程硕士学位。现在国家 863 计划微波遥感技术实验室工作, 主要从事微波辐射计的设计、定标方面的研究。

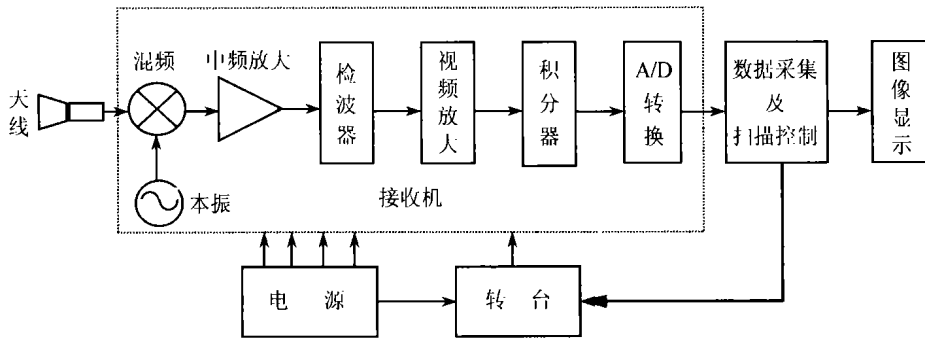


图 1 RADW92 系统框图

Fig 1 RADW92 system schematic diagram

表 1 RADW92 主要性能参数

Table 1 Key function parameters

参数类型	参数值
工作中心频率/GHz	92
中频带宽/GHz	2
积分时间/ms	60
系统灵敏度/K	0.6
线性度	0.999
天线类型	卡塞格伦天线
天线口面直径/mm	120
3dB 波束宽度/(°)	1.8

放大器特性曲线如图 3, 横坐标起始频率为 200MHz, 终止频率为 4GHz, 纵坐标每格 5dB。图 4 为中频滤波器特性曲线, 横坐标起始频率为 600MHz, 终止频率为 2.98GHz, 纵坐标每格 10dB。

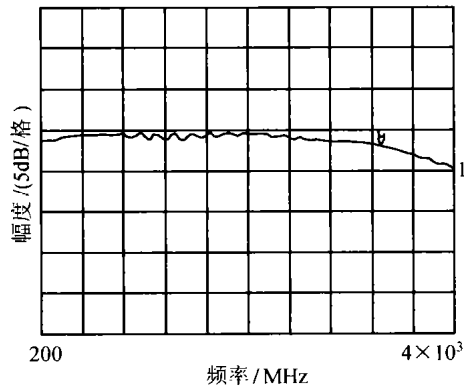


图 3 中频放大器特性曲线

Fig 3 Performance of IF amplifier

接收机采用单边带直接混频设计, 本振中心频率为 92GHz, 前端噪声系数为 8.7dB, 前端特性曲线如图 2, 横坐标起始频率为 90.5GHz, 终止频率为 94GHz, 纵坐标每格 5dB。混频后输出为中频, 中频

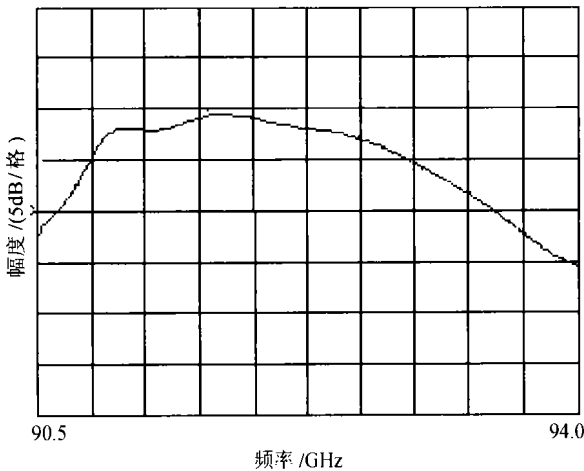


图 2 前端特性曲线

Fig 2 Front-end performance

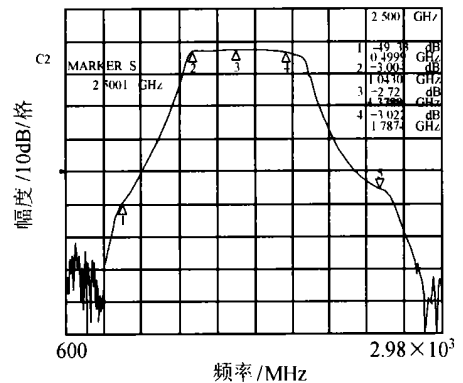


图 4 中频滤波器特性曲线

Fig 4 Performance of IF filter

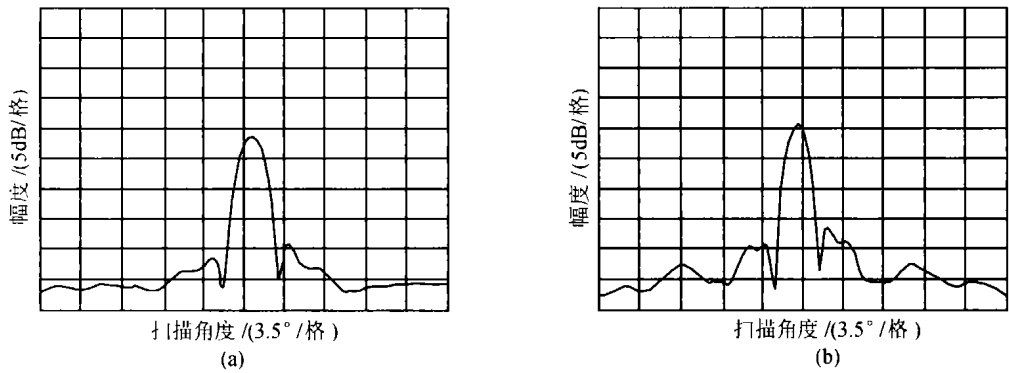


图 5 卡赛格伦天线方向图

(a) E 面方向图; (b) H 面方向图

Fig 5 Radiation pattern of Cassegrain antenna

(a) Radiation pattern of E plane; (b) Radiation pattern of H plane

天线系统采用卡塞格伦(Cassegrain)天线,口面直径为 120mm,天线方向图如图 5。第一副瓣电平为 -18dB, 3dB 波束宽度为 1.8° 。

2.2 定标

目前辐射计定标主要有两种方法,即分步定标法和整体定标法。分步定标法是把定标过程分为接收机定标和天线定标两个环节。接收机定标比较容易;但天线定标比较困难,因为它需要较大的暗室和相应的专用测试设备来测定天线的方向图及天线辐射效率,实现起来比较困难;另外,分步定标法需要测试的中间参数较多,容易引入更多的测试误差,定标精度较低。

整体定标是天线定标和接收机定标同时进行。在辐射计接收机具有良好的线性度后,便可用两点定标法进行整体定标。具体方法是让天线主波束指向定标源,调节衰减器的衰减量,便可得到不同的输入噪声温度,只要分别测试与每个输入噪声温度相对应的辐射计输出即可。整体定标因为没有中间测试环节,误差来源少,定标精度较高。因此我们采用整体定标法。

接收机安装调试后进行了定标实验,定标实验示意图如图 6。低温定标源是从俄罗斯进口的标准噪声计量设备 HWU-200。衰减器为精密衰减器,精度为 0.01dB。通过改变衰减器的衰减量,来改变接收机的输入有效噪声温度,通过测量接收机相应的输出电压便可对其进行线性度的测量。图 7 为线性度曲线,线性度大于 0.999,图 8 为其非线性曲线,其非线性小于 0.8K。图 9(a) 为 1h 的工作稳定性,其

标准差为 22.1mV,图 9(b) 为 10min 的工作稳定性,其标准差为 16.9mV,辐射计的灵敏度为 0.6K,在标准积分时间为 1s 时,其灵敏度小于 0.4K。

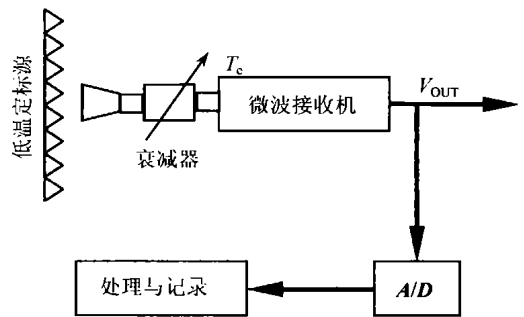


图 6 RADW92 系统定标框图

Fig 6 Schematic diagram RADW92 calibration

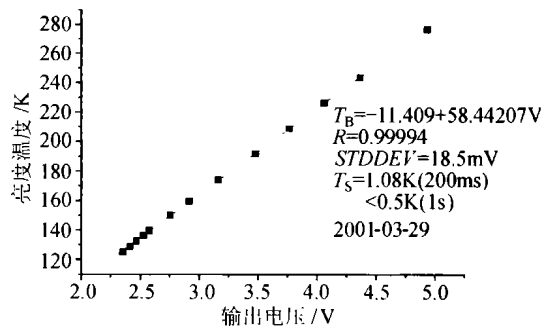


图 7 线性度曲线

Fig 7 Linearity curve

3 机载试验

3.1 机载飞行参数

RADW92 采用圆锥扫描方式,主波束指向前下

方,与过天底点的铅垂线形成 45° 圆锥半角,如图 10。根据平台高度、速度及积分时间之间的约束关系,在系统积分时间一定的情况下,平台运动速度与

高度成正比。平台越高,则速度越快。已知天线波束宽度 $\theta_{3dB}=1.8^\circ$,系统积分时间 $\tau=60\text{ms}$,飞行高度为 1000m 时,可确定试验参数如表 2。

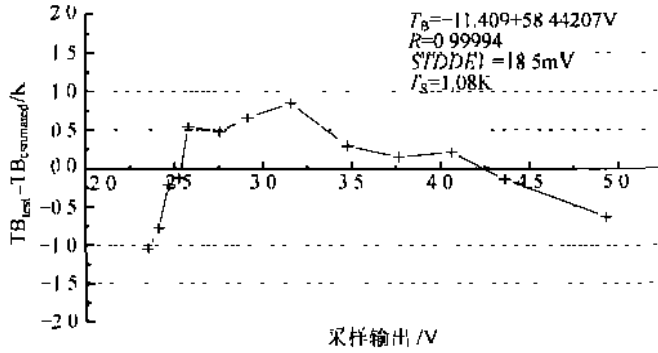


图 8 非线性曲线

Fig 8 Non-linearity curve

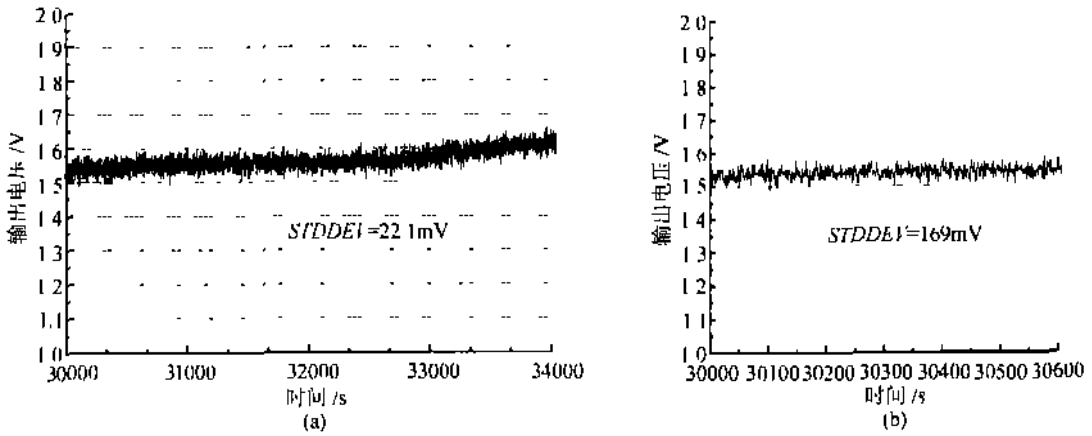


图 9 稳定性曲线

(a) 工作 1h; (b) 工作 10min

Fig 9 Stability curve

(a) For 1 h; (b) For 10 min

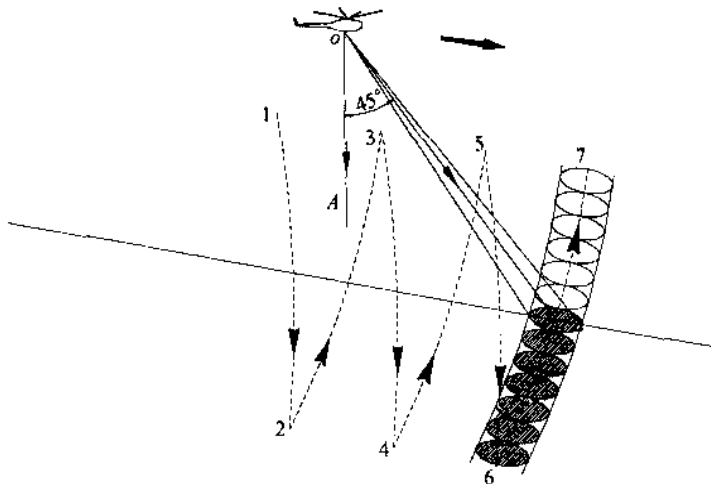


图 10 RADW92 机载扫描成像示意图

表 2 试验参数
Table 2 Test parameters

参数类型	参数值
飞行高度 H/m	1000
圆锥半角 $\theta/(\circ)$	45
空间分辨率 m	交轨方向: 44.5 顺轨方向: 63.0
每行成像点数 $N/\text{个}$	31
扫描角度 $\alpha/(\circ)$	± 27.9
刈幅 SW/m	1059.0
面元处理时间 T_d/ms	86
每行扫描时间 T/ms	2666
扫描速度 $\omega/((\circ)/s)$	20
飞行速度(地速) $V/(km/s)$	80

天线转台角度精度为 0.36° , 天线每扫过 1.8° 辐射计采样一次。飞机在试验区内作直线往返飞行, 每条飞行轨迹间隔为 1000m, 飞机的俯仰、侧滚不超过 1.5° 。每次飞行可以得到一个条带的微波辐射图像。扫描区域顺序覆盖整个试验区后, 将各个条带的图像作拼接处理, 便得到了整个试验区的微波辐射图像。试验区选择在西安市附近, 试验区内有黄

河或渭河贯穿流过, 河流周围有裸土和植被, 地物目标丰富、特征变化比较明显, 能够满足检验 RADW92 的灵敏度和空间分辨率的要求。

3.2 试验结果及分析

图 11 是黄河水体的微波遥感图像。图中大面积的绿色部分为黄河, 黄河两侧为裸土或植被。由图像我们可以清晰地看出黄河的轮廓。黄河水域较宽, 可以分辨出河中的沙洲。图 12 是渭河的微波遥感图像, 贯穿整幅图像的绿色曲线便是渭河。渭河的宽度仅为 30—120m, 但同样可以清晰地看出它的走势。图像的底部绿蓝色相间的圆形区域是一水库。其它部分是裸土或者植被。可以看出, 图像中两条河流的走势与参考地图是一致的, 而且分辨率较高。

图 11 和图 12 都是未经过任何修正处理的原始图像。与参考地图比较可以发现, 虽然走势一致, 但两条河流的几何形状都存在程度不同的失真。分析表明, 失真是由多方面原因造成的, 包括扫描轨迹近似处理误差、经纬度定位误差、飞行高度及速度误差、姿态角误差等。下面我们对上述误差作简单的分析。

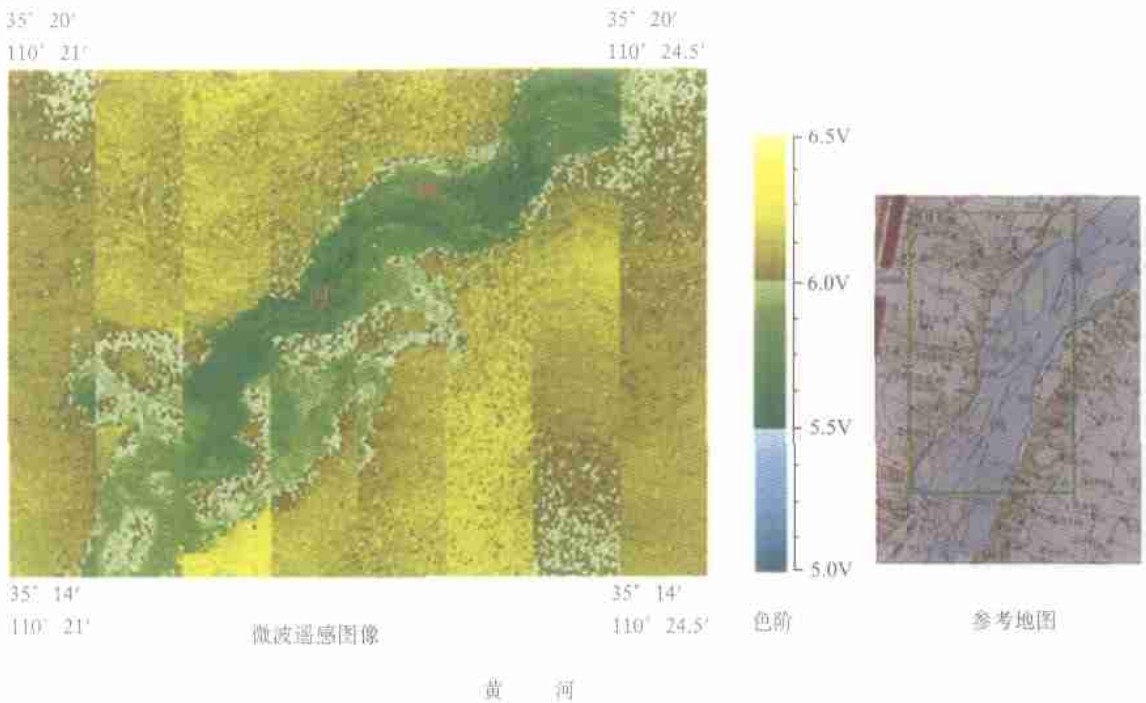


图 11 黄河微波辐射图像

Fig 11 Microwave radiation image of the Yellow River

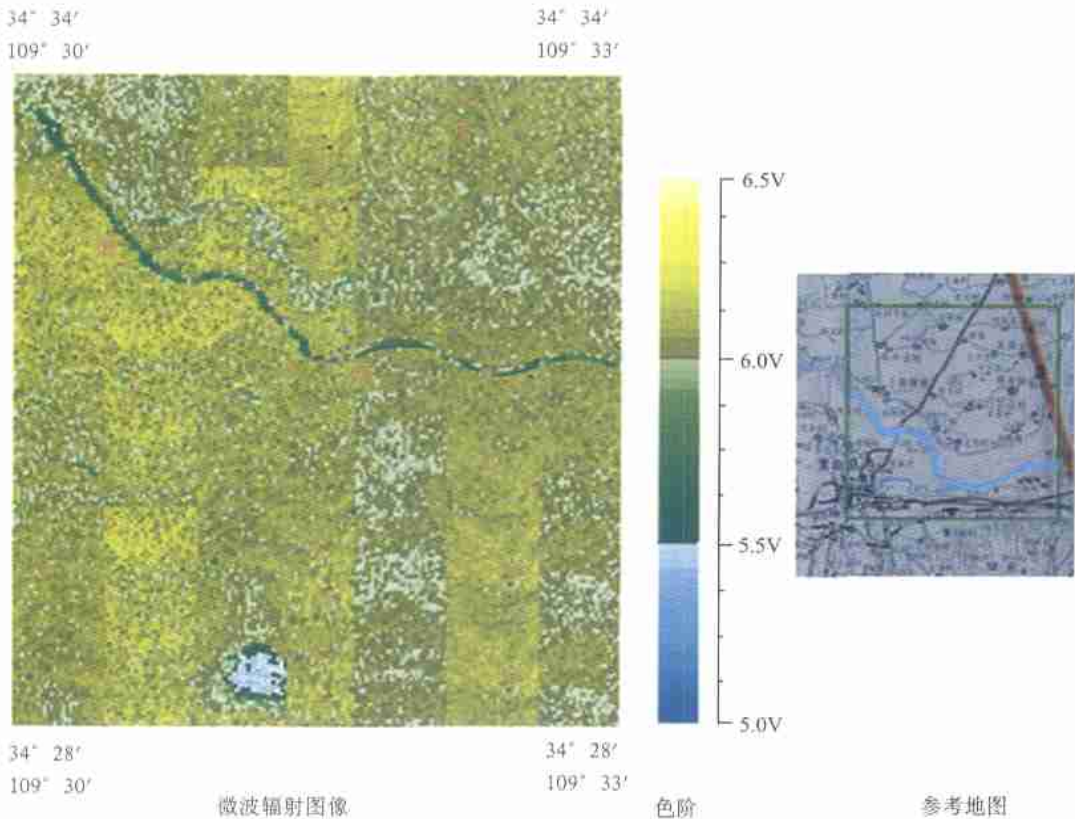


图12 渭河微波辐射图像

Fig 12 Microwave radiation image of the Weihe River

扫描轨迹近似处理误差 确定像点在平面内的位置时,为了简化处理过程,我们采用了一点假设,即假设天线在扫描过程中,飞机处于悬停状态,当天线扫描过一个边界后开始反向扫描之前,飞机在瞬间向前移动一个顺轨方向分辨率的距离,然后继续处于悬停状态等待扫描完成直到换向。这样所得到的图像便是一系列等曲率圆弧的无间隔、无重叠顺序排列。然而实际上每条扫描轨迹是匀速圆周运动与匀速直线运动合成的结果,如图10中1—2,2—3,3—4等轨迹所示。这样势必会造成图像的几何失真。如果不考虑其他误差因素,这种误差的大小是有规律可寻的。因此如果在成像算法中添加几何矫正功能,以软件的方法是可以减少或者消除这种几何失真的。但几何矫正可能会占用大量的CPU时间,对于实时扫描成像来说,系统的时间资源比较紧张,需要合理分配。

平台引入的误差 经纬度定位、飞行高度及速度、姿态角等误差都是由成像平台引起的。从图13、图14便可看出这些误差是确实存在的。它可能

导致观测区域、视角或者空间分辨率的改变。通常这种误差的大小是不确定的,因此无法用软件进行修正。但是如果结合成像平台的位置参数、姿态参数、运动参数等相关信息进行数据处理,误差是可以减小的,减小的幅度与成像平台各项参数的精度有关。在星上应用时应实现这种数据匹配处理。

另外,在同一条带内,有些相邻像点的颜色变化不够平缓。这主要是由于软件的颜色匹配算法中存在颜色突变点。如何改进颜色匹配算法,既能保证足够的颜色分辨率、不占用过多的CPU时间,又能使颜色变化比较平缓合理,还有待于进一步研究。

4 结 论

通过RADW92机载试验,本文获得了较高分辨率的黄河、渭河微波遥感图像。机载条件下接收机的空间分辨率达到了60m,系统灵敏度小于1K。通过试验,我们看到成像平台各项参数的精确度对扫描成像具有很大影响,软件对扫描轨迹的近似处理

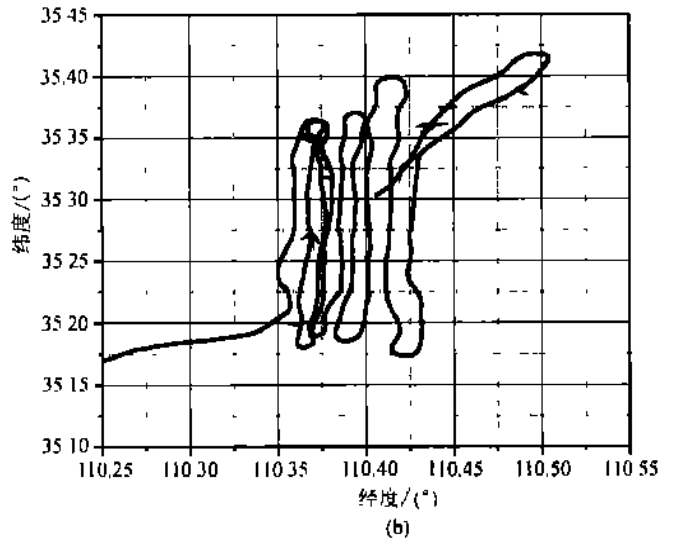
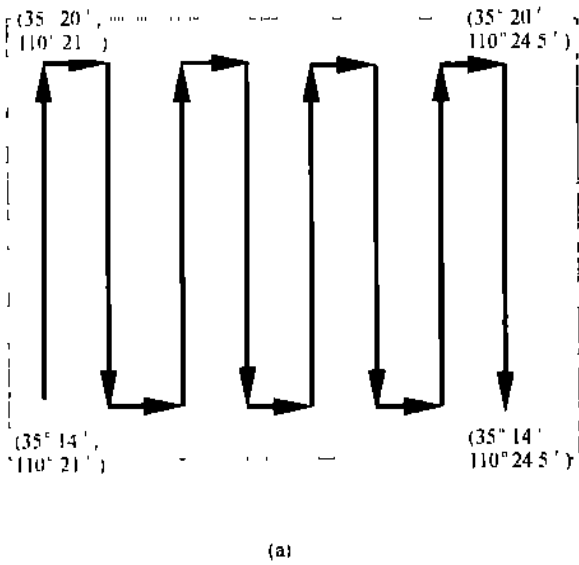


图 13 对黄河成像飞行轨迹图

(a) 设计飞行轨迹; (b) 实际飞行轨迹

Fig 13 Flying track above the Yellow River while imaging

(a) Expected flying track; (b) Actual flying track

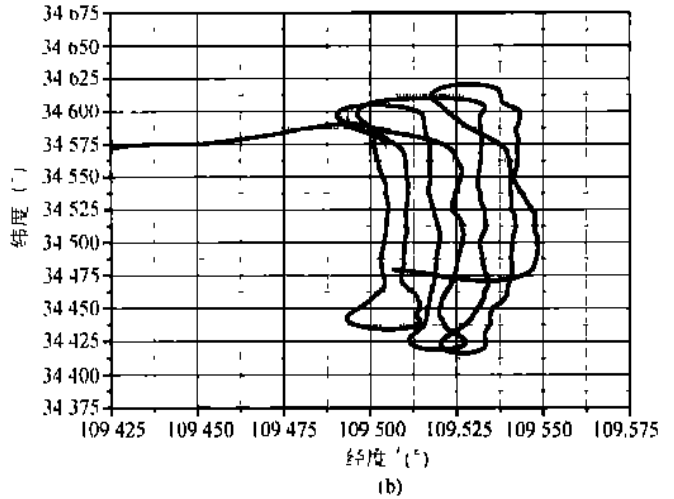
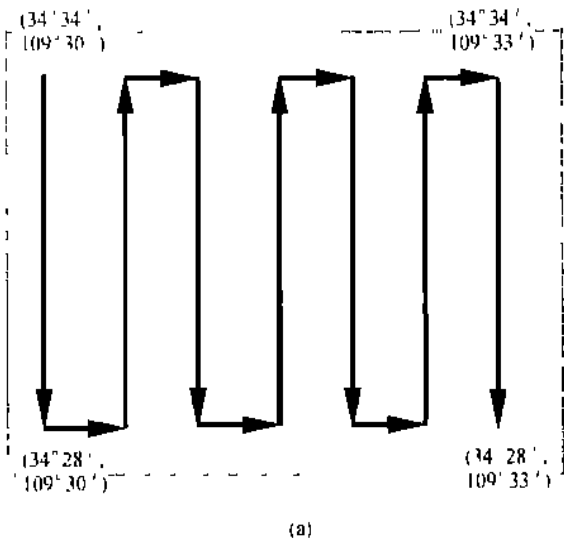


图 14 对渭河成像飞行轨迹图

(a) 设计飞行轨迹; (b) 实际飞行轨迹

Fig 14 Flying track above the Weihe River while imaging

(a) Expected flying track; (b) Actual flying track

也是影响图像质量的重要因素。为此,在星载扫描成像时应该把观测数据与成像平台的各项参数进行实时匹配处理,并且对图像进行几何矫正。

参 考 文 献(References)

[1] Rogers, RW, Hewison, T.J, Atkinson N.C, et al. The Radiometric

Characterization of AMSU-B [J] . IEEE Trans Microwave Theory Tech., 1995, 43: 760—771.

[2] Mo T. Prelaunch Calibration of the Advanced Microwave Sounding Unit-A for NOAA-K [J] . IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1996, 44: 1460—1469.

Study on Imaging with Airborne Scanning W-band Millimeter Wave Radiometer

KONG De-cai, LI Jing, ZHANG Sheng-wei, SUN Mao-hua, LIU He-guang, JIANG Jing-shan

(*Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences,*

National Microwave Remote Sensing Laboratory, Beijing 100080, China)

Abstract: Through the airborne experiment, a research on the W-band Millimeter Wave Radiometer (RADW92) is introduced in this article. Microwave remote sensing images of parts of the Yellow River and the Weihe River were acquired, which were the first batch images produced from scanning W-band Millimeter Wave Radiometer in China. The experiment shows that RADW92 is adequate for space use. The analysis of some factors influencing the image quality as well as the solutions to them are included in this article. The RADW92 works with operating frequency at 92GHz, the bandwidth 2GHz, the integration time 60ms, the system sensitivity 0.6K and the linearity better than 0.999. Cassegrain Antenna was designed for conical scanning and imaging.

The two images presented in the paper are both original results without any correction. Compared to the reference map, both rivers on the images have the identical trends with the reference maps. The geometrical form of both rivers has distortion to some extent. Many reasons can result in the distortion including scanning track approximation, longitude and latitude approximation, altitude error, velocity and attitude approximation, etc. Moreover, the algorithm of software is also an important factor that affects image qualities. According to that, the observed data for spaceborne imaging should be matched with the parameters of the imaging platform for the geometrical correction.

Key words: W-band, millimeter wave radiometer; imaging through airborne scanning; airborne experiment