

风云3号卫星微波湿度计的系统设计与研制

张升伟, 李靖, 姜景山, 孙茂华, 王振占

(中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100080)

摘要: 微波湿度计(MWHS)是风云3号卫星的主要有效载荷之一,其频率为150GHz(双极化)和183.31GHz(三通道),采用垂直于飞行方向的交轨扫描方式,科学目标是探测大气湿度的垂直分布。本文简要介绍微波大气湿度探测的基本原理,阐述了微波湿度计的系统构成及工作原理;描述了微波湿度计的性能指标要求。测试结果表明,微波湿度计性能指标满足设计要求。

关键词: 风云3号卫星;有效载荷;微波湿度计;大气湿度探测

中图分类号: TP702

文献标识码: A

1 引言

风云3号卫星是中国新一代极轨气象卫星,有效载荷包括光学、红外、微波遥感器及空间环境监测器等,旨在实现全球全天候、多光谱、三维定量探测以及云和降水参数的探测,监视大范围的自然灾害和生态环境变化。

利用被动微波遥感器探测大气湿度的垂直分布始于1987年。美国发射的军事气象卫星(DMSP)上装载了特种微波大气垂直探测仪(SSM/T),其中用于大气湿度探测的SSM/T-2频率为91.5,150和183.31GHz。183.31GHz包括三个探测通道,频率分别为 183.31 ± 1 , 183.31 ± 3 和 183.31 ± 7 GHz。DMSP搭载的SSM/T科学数据的应用,使得气象卫星微波遥感仪器有了长足的进步;并在气象保障、天气预报、强对流监测和洪涝灾害监测等方面发挥了很大的作用。此后,美国发射的NOAA系列气象卫星都装载了用于大气湿度垂直探测的先进微波探测单元(AMSU-B),频率为89,150和183.31GHz(三通道)^[1]。从2005年5月发射的NOAA-18(NOAA-NN')开始,先进微波探测单元(AMSU-B)被微波湿度探测仪(MHS)代替,MHS仍然包括5个探测通道,但150GHz通道频率改为157GHz,183.31 \pm 7GHz通道频率改为190.31GHz^[2,3]。

风云3号卫星是中国第一颗搭载微波湿度探测辐射计的卫星,但风云3号卫星微波湿度计探测频率为150和183.31GHz,其中150GHz为双极化(水平极化和垂直极化)设计;183.31GHz包括三个通道,频率分别为 183.31 ± 1 , 183.31 ± 3 和 183.31 ± 7 GHz。本文主要介绍风云3号卫星微波湿度计的探测原理与设计方案,并对微波湿度计设计指标与测试结果进行了分析对比。

2 微波辐射计探测大气湿度的基本原理

星载微波辐射计在对地观测时,穿透地球大气,测量来自地球的特定频率的微波辐射。由于大气中的湿气(冰、云、雨、雪等)对来自地球表面的微波辐射具有衰减作用,因此作为探测大气湿度的微波辐射计之微波湿度计,其不同通道的观测数据包含了地球大气层不同高度的湿度信息,从微波湿度计的亮度温度中不仅可以反演得到大气湿度的垂直分布,也可以得到地球表面的温度信息。

大气微波传输的不透明度谱如图1^[4],图中显示了氧和水汽的大气不透明度。在0—280GHz频率范围内,分别有两条氧气吸收线和两条水汽吸收线,氧气吸收线可用于大气温度廓线测量,而水汽吸收线可用于大气湿度廓线测量。其中第一条水

收稿日期:2006-11-01;修订日期:2007-04-26

作者简介:张升伟(1963—),男,研究员,硕士,1991年毕业于中国科学院长春地理研究所。现主要从事陆基、机载和星载微波遥感器研制及应用研究。已发表论文20余篇。E-mail: zsw@nmrs.ac.cn。

汽吸收线中心位于 22.235GHz, 第二条位于 183.31GHz。在这两条水汽吸收线之间, 水汽的连续能谱随频率升高吸收缓慢增加。第一条水汽吸收线对于进行阔线测量而言衰减太低, 而且其部分透明性被用于获取水汽总量。为了在不同高度上

获取对湿度的最大敏感度, 在 183.31GHz 吸收线内选择不同的频率进行探测。SSMT-2 和 AMSU-B 在 183.31GHz 吸收线上有 3 个通道 (± 1 , ± 3 和 ± 7 GHz), 而且有 150GHz 和 89GHz 两个窗区通道, 窗区通道可以给出地球表面和较低大气的信息。

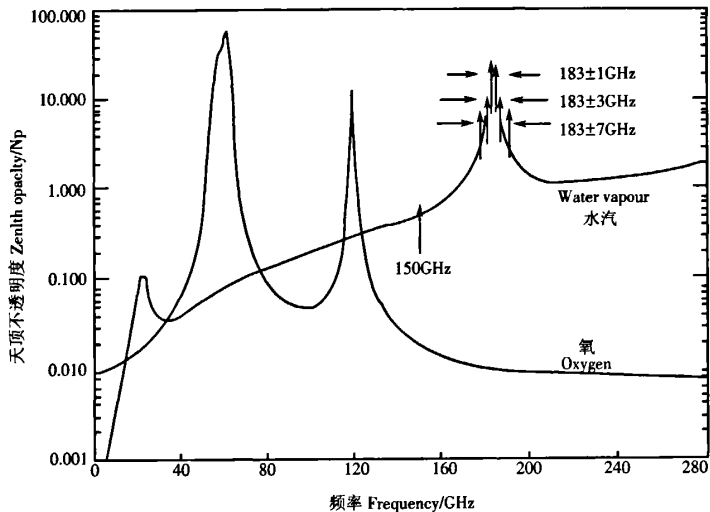


图 1 大气的不透明度谱

Fig. 1 The atmospheric opacity spectrum

风云 3 号卫星微波湿度计基于相同的探测原理。通道频率在图 1 中标出, 窗区通道为 150GHz, 可以用来探测云中含水量和强降雨、卷云等大气参数; 吸收线内的频率与 AMSU-B 相同, 用于探测大气湿度的垂直分布。

3 微波湿度计的功能描述与系统设计

3.1 功能描述

风云 3 号卫星微波湿度计是一套基于超外差接收机的全功率型微波辐射计, 水汽垂直廓线, 是通过测量位于 183.31GHz 水汽吸收线的三个不同通道的亮度温度所获得的。系统由天线与接收机单元、数据处理单元和电源单元组成, 系统框图如图 2。

微波湿度计接收到的信号来自于地球大气层的自由空间辐射, 通过一个垂直于卫星飞行轨迹进行扫描的天线反射面所获取。为标定接收机的增益与噪声, 消除信道增益波动的影响, 每个扫描周期进行一次高低温两点定标。高温源为湿度计内部的吸收体, 其物理温度由一组高精

度的温度传感器实时测量获得, 低温源为宇宙冷空间背景的微波辐射 (约 3K)。接收机采用直接混频方式, 接收到的信号聚焦于馈源, 然后通过本振和混频器实现双边带下变频, 由中频处理器进行放大、滤波、检波和积分。数据处理单元进行数据采集与量化处理, 并通过 1553B 总线与卫星进行通讯。

3.2 系统设计

3.2.1 天线与扫描驱动机构

天线与扫描驱动机构集成于一体, 扫描是通过旋转反射面实现的, 反射面与轴成 45° 角, 由一个电机带动两个天线反射面进行扫描。卫星高度、地面顺轨方向速度、空间分辨率 (足印尺寸) 及积分时间等要素决定了扫描周期为 2.667s。为提高对地观测时间, 采用变速扫描方式, 其中对地观测入射角范围相对于天底点为 $\pm 53.35^\circ$, 用时 1.71s; 冷空间定标角度距天地点为 73° , 用时 0.1s; 热源定标角度位于天顶点, 0.1s; 剩余时间用于快速空运转。

天线与扫描驱动机构如图 3。

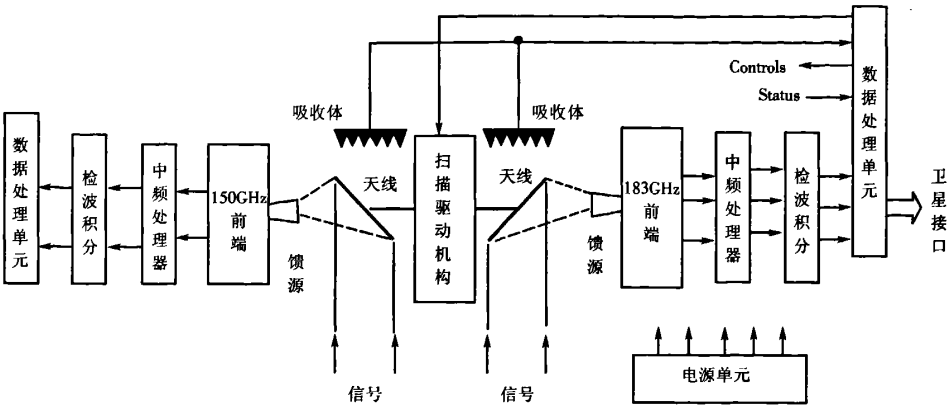


图 2 微波湿度计系统框图

Fig. 2 Black diagram of microwave humidity sounder

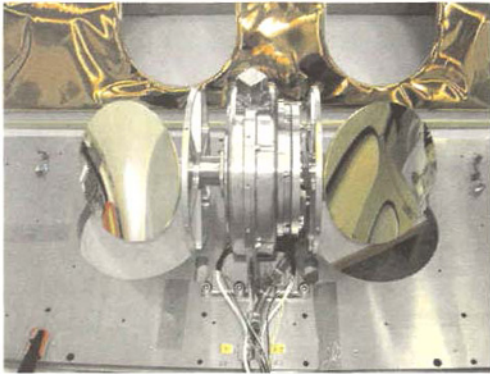


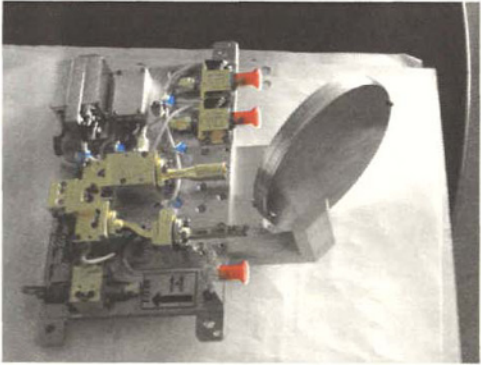
图 3 天线与扫描驱动机构

Fig. 3 Antenna and scanning mechanism

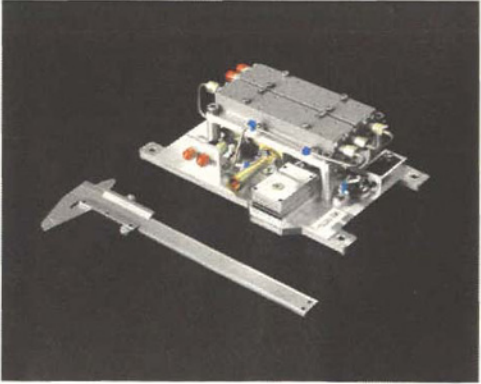
3.2.2 接收机

接收机由高频前端、中频处理器、检波和积分电路组成。其中高频前端包括馈源、混频器、本振和宽带低噪声放大器。由于重量与功耗的条件约束,只选择了 150GHz 一个窗区通道。150GHz 和 183.31GHz 前端如图 4(a)和(b),高频前端是辐射计接收机的重要组成部分,其性能决定了辐射计整机的系统性能。

150GHz 接收机框图如图 5(a),183.31GHz 接收机框图如图 5(b)。150GHz 通道利用准光学技术(极化栅网),将信号分为水平极化和垂直极化,馈入各自通道与本振进行混频下变频处理及前置放大,两个通道共用一个本振信号,滤波以后信号的频率范围为 0.4—1.4 GHz。中频处理器对信号进行放大和滤波,经过检波及积分处理后,输出至数据处理单元。



(a)



(b)

图 4 接收机前端

Fig. 4 Frontends of the receivers

(a) 150GHz; (b) 183.31GHz

183.31GHz 馈源将天线反射器收集到的自由空间辐射进行聚焦,接收到的信号与本振进行混

频之后被前置放大,产生的信号频率范围为 0.1—8GHz;功分器将信号分为三个中频通道;中频处理器对信号进行滤波和放大,滤波器将三个通道的

信号频率分别限制为各通道的标称频率: 1 ± 0.25 , 3 ± 0.5 和 7 ± 1 GHz;经过检波、低频放大及积分处理后,输出至数据处理单元。

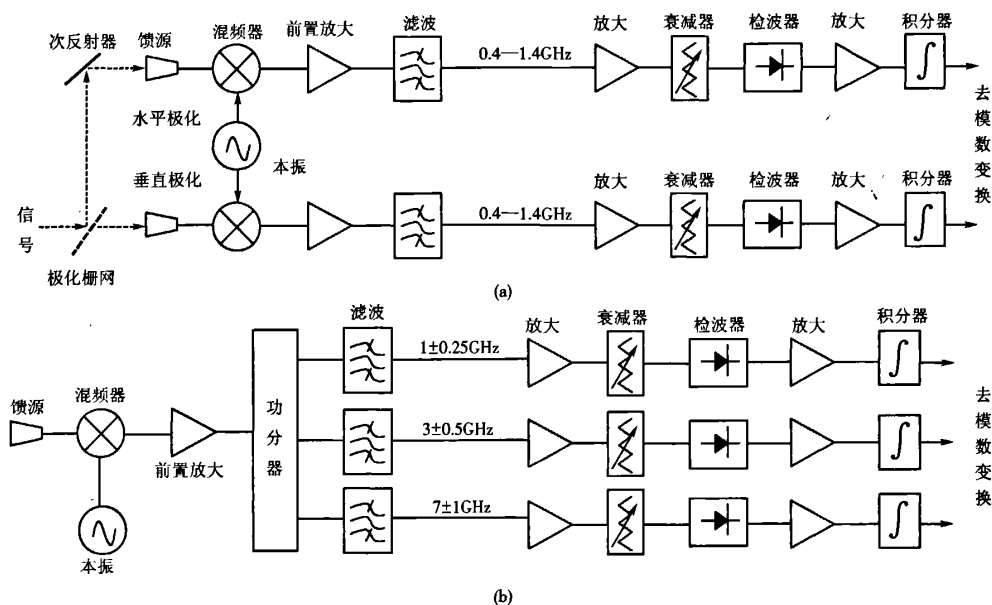


图 5 接收机框图

Fig. 5 Block diagrams of the receivers

(a) 150GHz; (b) 183.31GHz

3.2.3 定标源

微波湿度计采用在轨实时周期定标,低温源为宇宙冷空间的背景辐射,而高温源为仪器内部的定标体,高低温定标源与目标微波辐射信号经过相同光学路径进入接收机,具有较高的定标精度。

热定标源由 3 部分构成,即微波定标体、测温电路和屏蔽罩,天线每旋转一周,定标一次。吸收体由高发射率的单晶硅尖劈阵组成,其面积分布覆盖天线投影口径,黑体外有圆筒状屏蔽罩,消除来自周围环境的杂散辐射,屏蔽罩采用复合材料内壁金属化以减轻重量。

定标体采用与 AMSU-B 相同的被动温控方式,温度测量采用铂电阻作温度传感器。铂电阻分别分布在黑体的中心、边缘等不同位置,根据测温点的实际测量值及吸收材料的温度梯度分布,加权计算得到黑体的物理温度。

热定标源如图 6。

3.2.4 电源单元和数据处理单元

电源单元由二次电源变换器(DC/DC 变换)和电源分配器两部分组成。为提高可靠性,采取主/备份冗余设计,其主要功能是将卫星母线电压转换

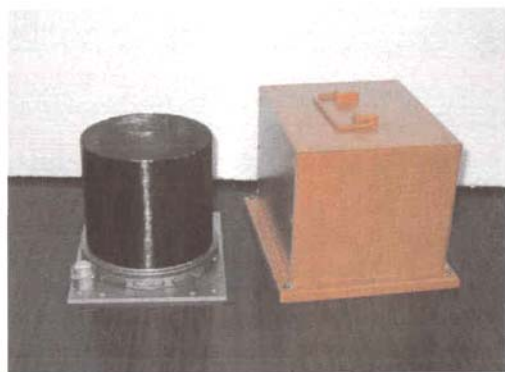


图 6 热定标源

Fig. 6 High brightness temperature calibrator

为系统所需要的直流电压品种;数据处理单元由天线驱动接口、系统测控模块和总线通讯模块组成,通过系统软件控制天线扫描模式和接收机工作状态,完成数据采集、执行遥控指令及遥测数据管理;通过 1553B 总线与卫星进行通讯,接收卫星发出的遥控指令及卫星姿态、时间码等辅助信息,将科学数据与辅助数据打包下传。

在物理结构上,风云3号卫星微波湿度计由3个独立的单元组成:电源单元如图7,数据处理单元如图8,天线与接收机单元如图9,3个单元之间通过电缆网连接起来。



图7 电源单元
Fig. 7 Power supply unit



图8 数据处理单元
Fig. 8 Data processing unit



图9 天线与接收机单元
Fig. 9 Antenna and receiver unit

4 微波湿度计的工作模式与成像参数

4.1 工作模式

为提高系统工作的灵活性,并满足某些特定观测需求,微波湿度计扫描模式分为变速扫描、匀速扫描和定点观测3种工作模式。匀速扫描模式周期为2.667s,与变速扫描周期相同;定点观测模式可以根据需要固定任意角度进行观测;扫描模式的选择及切换,通过地面数据注入遥控指令完成。

变速扫描模式为默认的对地观测工作模式。微波湿度计采用机械扫描,结合卫星运动(顺轨方向)和天线窄波束的交轨方向扫描,如图10(a)。为增加对地观测时间,电机带动天线进行360°的连续变速圆周扫描,扫描周期2.667s,对地观测扫描张角为 $\pm 53.35^\circ$ (以天底点为中心)。高温定标源位于天顶点位置,冷空定标角度 287° (距离天底点 73°),扫描过程如图10(b)。

为保证足够小的辐射测量灵敏度,必须尽可能增加对地观测时间。因此在对地观测期间降低电机速度进行匀速扫描,对地观测时间1.71s,此值是根据卫星地面速度、天底点像元尺寸及两条连续的扫描线之间天底点像元相邻而不重叠的要求计算出来的。

变速扫描模式扫描周期时间分配:

- (1) 对地观测: $\pm 53.35^\circ$,用时1.71s,匀速扫描;
- (2) 对地观测终止至热源定标起始角: $53.35^\circ - 178^\circ$,用时0.357s,加速/减速;
- (3) 热源定标: $180 \pm 2^\circ$,用时0.1s,匀速扫描;
- (4) 热源定标终止至冷空定标起始角: $182^\circ - 285^\circ$,用时0.3s,加速/减速;
- (5) 冷空定标: $287 \pm 2^\circ$,用时0.1s,匀速扫描;
- (6) 冷空定标终止至对地观测起始角: $289^\circ - 306.65^\circ$,用时0.1s,加速/减速。

4.2 成像参数

风云3号卫星轨道高度836km,卫星地速约7.5km/s,扫描角度范围(相对于天底点)为 $\pm 53.35^\circ$,天线3dB波束宽度为 1.1° 。

根据以上参数,微波湿度计刈幅像元如图11。

- (1) 刈幅宽度:2645km;
- (2) 像元数:每条扫描线有98个像元;
- (3) 刈幅间隔:20km;
- (4) 空间分辨率:天底点像元为圆形,直径16km;

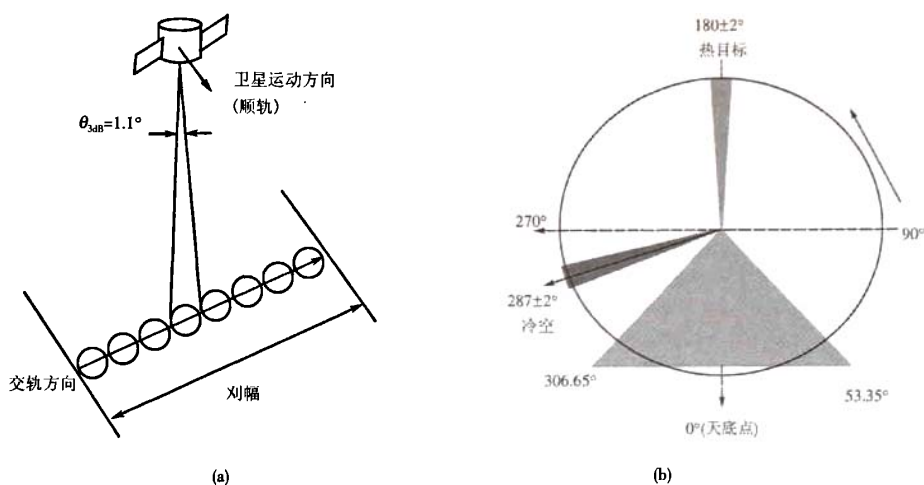


图10 扫描模式示意图

(a) 成像示意图;(b) 扫描周期示意图

Fig. 10 Imaging geometry and scanning period

(a) Imaging geometry of MWHS;(b) Scanning description

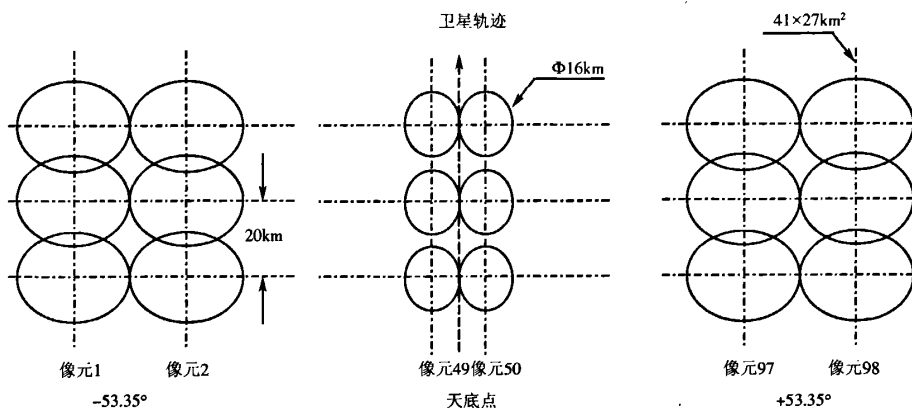


图11 刈幅像元示意图

Fig. 11 Footprints from nadir to swath limit

随着入射角增大,地面像元逐渐变化为椭圆形,而且尺寸变大,最远端像元尺寸 $41\text{km} \times 27\text{km}$;

(5) 每个像元驻留时间:17.4ms。

5 系统测试与性能分析

微波辐射计最重要的指标是亮温灵敏度。亮温灵敏度 ΔT (辐射分辨率), 又称“噪声等效亮温差 NEDT”, 定义为微波辐射计接收机能够检测到的最小天线温度的变化, 用公式(1)表示:

$$\Delta T = T_{\text{sys}} \cdot \sqrt{\frac{1}{B\tau} + \left(\frac{\Delta G}{G}\right)^2 + X^2} \quad (1)$$

式中, B 为检波前带宽, τ 为积分时间, G 为检波前

增益, $\Delta G/G$ 表示一个扫描周期内两点定标之间的增益稳定度, T_{sys} 为天线温度 T_A 与接收机等效温度 T_{rec} 之和。 X 表示量化处理过程的噪声贡献。对于实时两点定标的辐射计系统, 增益波动的影响基本消除。

系统测试按照微波湿度计正常在轨运行模式进行, 在一个扫描周期内分别对高温参考源、低温参考源和目标进行观测以及数据采集和记录。其中, 微波湿度计内部的吸收体作为高温参考源, 位于天顶点位置; 液氮制冷的吸收体作为低温参考源, 置于在轨运行时的冷空定标方向; 目标源为实验室环境状态下的吸收体, 置于天底点观测方向。参考源和目标源的发射率已知, 物理温度在吸收体的多个不同位置经过精

密测量,因此其亮度温度可以准确计算出来。

微波湿度计的噪声功率/电压转换采用平方律检波方式,因此被观测的目标亮度温度与输出电压之间为线性关系,即 $V = a \cdot T + b$,那么:

$$V_H = a \cdot T_H + b \tag{2}$$

$$V_L = a \cdot T_L + b \tag{3}$$

式中, a 和 b 为常数, T_H 和 T_L 分别为高温参考源和低温参考源的亮度温度, V_H 和 V_L 为对应输出。假定目标源对应输出为 V_0 ,那么根据高低温参考源确定的线性关系,可以推导出目标源的亮度温度 T_0 :

$$T_0 = \frac{T_H - T_L}{V_H - V_L} \cdot V_0 + \frac{T_L V_H - T_H V_L}{V_H - V_L} \tag{4}$$

对一定时间内的目标源的测量数据进行统计,其平均值为亮度温度的测量值,与亮度温度计算值的差即为测量的准确度,测试结果表明,测量准确度小于 1.4K;其方差统计值为 σ ,那么灵敏度为:

$$\Delta T = \sigma \cdot (T_H - T_L) / (V_H - V_L) \tag{5}$$

150GHz 接收机的灵敏度如图 12(a) 和 (b), 183.31GHz 接收机的灵敏度如图 13(a), (b) 和 (c)。微波湿度计性能指标要求、测试结果及 AMSU-B 的指标对比见表 1。可以看出,微波湿度计性能指标满足设计要求,主要性能指标与 AMSU-B 基本一致。

表 1 性能指标要求与测试结果及 AMSU-B 的指标对比
Table 1 Comparison of MHS characteristics with requirements and AMSU-B

项目	指标要求	测试结果	AMSU-B 指标
扫描角度范围	$\pm 53.35 \pm 0.3^\circ$ (相对天底点)	$\pm 53.373^\circ$	$\pm 48.95^\circ$
扫描刈幅	约 2700km	2645km	2343km
成像像元数	98/每条扫描线	98	90
空间分辨率*	$15\text{km} \pm 10\%$ (天底点直径)	16km	16.3km (850km 轨道)
在轨定标	冷空间 与吸收体	冷空间 与吸收体	冷空间与 吸收体
指向精度	$\leq 0.1^\circ$	0.06°	0.1°
扫描周期	2.667s	2.667s	8/3s
灵敏度	150GHz(V)	$\leq 1.1\text{K}$	0.9K
	150GHz(H)	$\leq 1.1\text{K}$	0.7K
	183±1GHz	$\leq 1.2\text{K}$	1.0K
	183±3GHz	$\leq 1.1\text{K}$	1.0K
	183±7GHz	$\leq 1.2\text{K}$	1.2K
动态范围**	3—340K	3—340K	3—300K
定标精度	$\leq 1.5\text{K}$	1.4K	1.0K
数据率	7.5kb/s(最大)	6kb/s	7.5 kb/s
重量	$44 \pm 0.2\text{kg}$	43.8kg	60kg
功耗	$\leq 65\text{W}$	57W	90W

* 空间分辨率根据轨道高度(836km)和天线 3dB 波束宽度进行计算。

** 3K 和 340K 对应的输出值利用外推法进行计算。

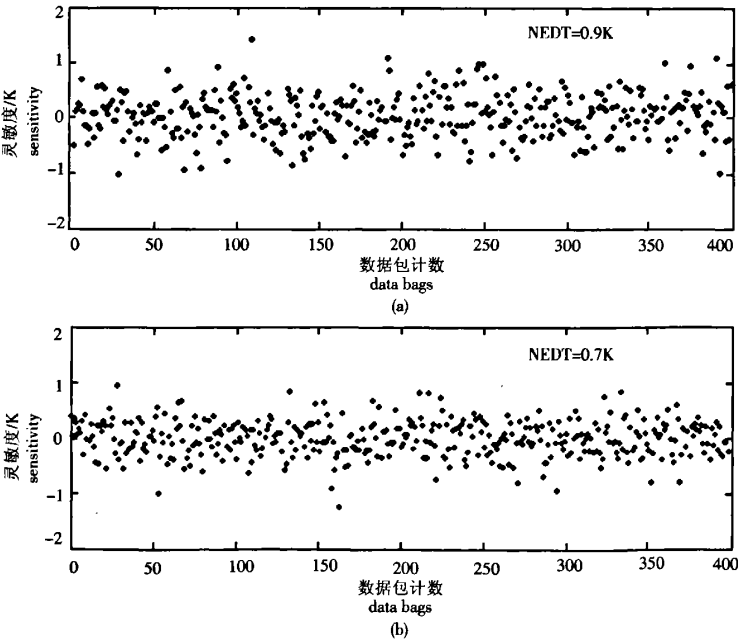


图 12 150GHz 接收机灵敏度
(a) 垂直极化;(b) 水平极化
Fig. 12 Sensitivity of the 150GHz Receiver
(a) Vertical polarization ;(b) Horizontal polarization

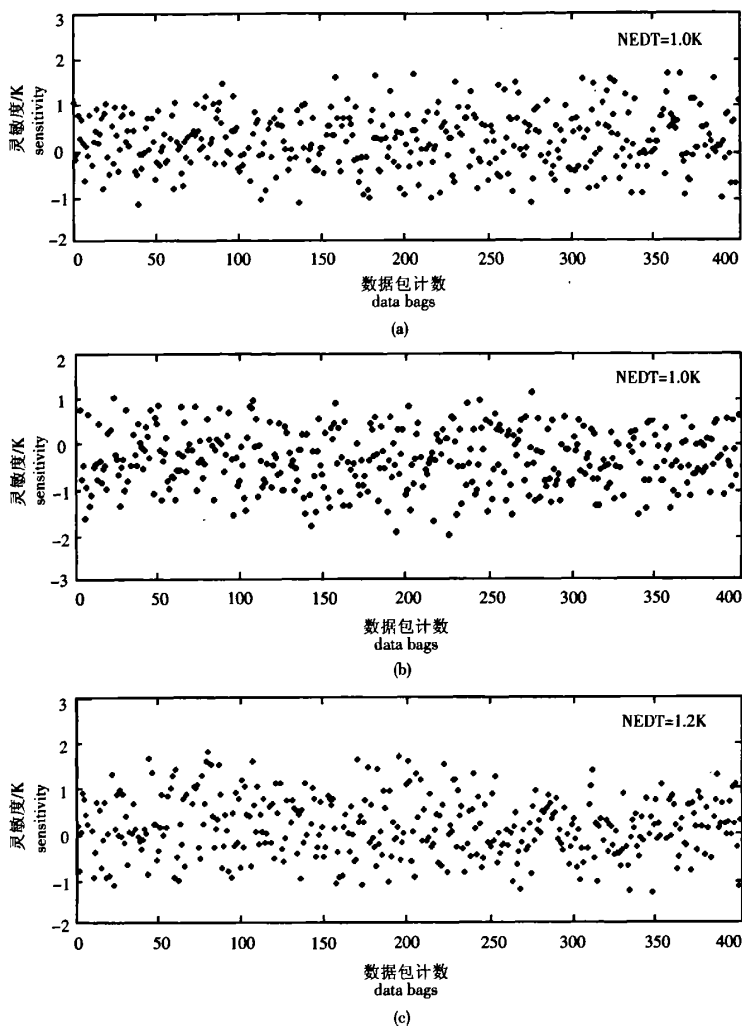


图13 183.31GHz接收机灵敏度

Fig.13 Sensitivity of the 183.31GHz receiver

(a) $183.31 \pm 1\text{GHz}$; (b) $183.31 \pm 3\text{GHz}$; (c) $183.31 \pm 7\text{GHz}$

6 结束语

毫米波辐射计在大气探测中具有重要作用。风云3号卫星微波湿度计可以全天时、全天候地观测大气湿度的垂直分布(水汽廓线)、水汽含量和降雨量等空间气象资料,为数值天气预报、气候变化研究和环境监测提供重要参数,目的是提高中、长期数值天气预报,以及天气预报的准确性。地面测试结果表明,微波湿度计性能指标满足设计要求。风云3号微波湿度计的研制将为中国空间大气湿度探测技术的后续研究与发展奠定技术基础。

参考文献 (References)

- [1] Wei Y Z, Xu J M, Zhou X M. Application of NOAA-AMSU Microwave Soundings to Typhoon Dujuan[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2005, 21(4): 359—368. [魏应植, 许健民, 周学鸣. 台风“杜鹃”的 AMSU 卫星微波探测资料分析[J]. *热带气象学报*, 2005, 21(4): 359—368.]
- [2] Costes Laurent, Bushell Chris, Buckley Michael J, et al. Microwave Humidity Sounder (MHS) antenna[A]. *Proceeding of SPIE-The International Society for Optical Engineering* [C]. 1999, (3870): 412—426.
- [3] Grant N A, Edgar D L, Thayne I G. Advanced Technology Microwave Multi-channel Temperature and Humidity Sounder for the 21st Century[A]. *Microwave and Optoelectronics Conference*, 1999. SBMO/IEEE MTT-S, APS and LEOS-IMOC apos; 99.

- [C]. International Volume 1, Issue, 1999, 1: 332—335.
- [4] Pardo Juan R, Encrenaz Pierre J, Breton Daniel. Utilization of the Radiofrequency Spectrum above 1GHz by the EES (Passive) and Interference Criteria [A]. Preserving the Astronomical Sky, Proceedings of IAU Symposium [C]. Vienna, Austria. 196: 255—263. 12—16 July 1999.

Design and Development of Microwave Humidity Sounder for FY-3 Meteorological Satellite

ZHANG Sheng-wei, LI Jing, JIANG Jing-shan, SUN Mao-hua, WANG Zhen-zhan

(Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences P. O. Box 8701, Beijing 100080, China)

Abstract: FY-3 meteorological satellite is the 2nd generation of China's polar-orbit meteorological satellite, and the Microwave Humidity Sounder (MWS) is one of its main payloads. The basic principle of atmospheric humidity sounding by microwave radiometer and the technical specifications of MWS onboard FY-3 satellite are briefly introduced in this paper. The block diagram and operating modes of MWS are presented. MWS is a dual-frequency, five-channel millimeter wave radiometer which is a total power type microwave radiometer based on a heterodyne receiver, and performs cross-track scanning. The frequencies of MWS include both the atmospheric transparent windows of 150GHz and water vapour absorption lines around 183.31GHz. The 150GHz radiometer has two polarizations of V and H, and the 183.31GHz radiometer has three channels of $183.31 \pm 1\text{GHz}$, $183.31 \pm 3\text{GHz}$ and $183.31 \pm 7\text{GHz}$, respectively.

The swath width of about 2700km is implemented by cross-track scanning of the antenna beams. Final testing verifies that the performance of MWS satisfies technical requirements of specifications.

MWS consists of three units: antenna and receiver unit, electronic unit and power supply unit. Antenna and receiver unit collects emission from the atmosphere. The received signal is focused to the horn-feed and the first element of the high frequency front end, and then down-converted by a double side band mixer to Intermediate Frequency; IF signal is been down-converted to Low Frequency (LF) by a detector, and then integrated. The electronic unit digitizes the LF signal, controls the scanning mechanism and measures physical temperature of the on-board hot target for calibration, and communicates with satellite through a 1553B data bus. The power supply unit performs DC/DC conversion, distributes the DC lines to the various sub assemblies and switches between the nominal and the redundant unit.

One motor drives two separated reflectors for the 150GHz and the 183.31GHz channels, the scanning period is 2.667s. Main beams of the antenna scan over the observing swath ($\pm 53.35^\circ$ from nadir) in the cross-track direction at a constant periodicity of 1.71s. During each period, two-point calibration are performed to calibrate the receiver gain and noise. The calibration is implemented by observing an onboard hot target and the background emission of the cold sky.

Key words: FY-3 meteorological satellite; payload; microwave humidity sounder; atmospheric humidity sounding