

文章编号:1006-1630(2017)04-0052-10

FY-3 卫星大气湿度微波探测技术发展

张 瑜^{1,2}, 张升伟^{1,2}, 王振占^{1,2}, 姜景山^{1,2}, 李 靖²

(1. 中国科学院 微波遥感技术重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院 国家空间科学中心, 北京 100190)

摘要:介绍了风云三号(FY-3)卫星大气湿度微波探测技术及其发展。阐述了大气湿度微波探测原理。给出了微波湿度计(MWHS)的组成,以及变速扫描、匀速扫描和定点观测三种工作模式。从FY-3卫星01批到03批,MWHS从单一的湿度探测发展为大气温湿度同步探测,灵敏度和定标精度不断提高。其中:A、B星MWHS有150,183.31 GHz两个探测频率,150 GHz在国际上首次采用准光技术实现了极化分离,有垂直和水平通道2个,183.31 GHz与国际同类设备相同,有通道3个;C、D星MWHS增加了118.75 GHz探测通道8个,183.31 GHz探测通道增加到5个,并增加了150 GHz窗区频率,显著提升了微波湿度计的探测能力,实现了多通道的细分探测,并具有大气温度、湿度同步探测的功能,且118 GHz首次实现了星载非临边大气探测;03批MWHS将包括探测频率4个、探测通道15个,窗区探测频率由150 GHz更改为166 GHz,并大幅提高灵敏度、定标精度等系统性能指标。性能比较表明:FY-3卫星MWHS的系统灵敏度优于其他国际同类载荷。给出了FY-3卫星MWHS在台风监测、全球亮温图获取等大气探测和灾害性天气预报与跟踪监测中的应用成果。

关键词:风云三号卫星;有效载荷;微波湿度计;微波探测;温湿度探测;天气预报;大气湿度;水汽含量

中图分类号:V474.24;P414.4

文献标志码:A

DOI:10.19328/j.cnki.1006-1630.2017.04.007

Technology Development of Atmospheric Humidity Sounding of FY-3 Satellite

ZHANG Yu^{1,2}, ZHANG Sheng-wei^{1,2}, WANG Zhen-zhan^{1,2}, JIANG Jing-shan^{1,2}, LI Jing²

(1. Key Laboratory of Microwave Remote Sensing, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The technology and development of atmospheric microwave humidity sounding of FY-3 meteorological satellite were introduced in this paper. The composition of the microwave humidity sounder (MWHS) was presented, and so were the three operation modes of variable speed scanning, uniform velocity scanning and pointing observation. MWHS has been developed from single humidity sounding to humidity/temperature sounding simultaneously and the sensitivity and calibration accuracy of MWHS have been improved continuously from 01 batch to 03 batch. MWHS of FY-3A,B satellite has two detection frequency at 150 and 183.1 GHz. The frequency 150 GHz has two channels which realizes the polarization separation by quasi-optics first in the world, and the frequency 183.31 GHz has three channels which are similar to the same type equipment in the world. MWHS of FY-3C,D satellite has increased 8 channels at 118.75 GHz, 3 channels at 183.31 GHz and window frequency at 150 GHz. It realizes the fine detection with multi-channel, and has the function of humidity/temperature sounding simultaneously, and it also realizes onboard limb atmospheric detection at 118 GHz. MWHS of FY-3 03 batch will include 4 detection frequency and 15 channels. The window detection frequency will change from 150 GHz to 166 GHz. The sensitivity and calibration accuracy will be improved greatly. The comparison results show that the system sensitivity of FY-3 MWHS is better than that of the same type equipments in the world. The application of FY-3 MWHS in atmospheric forecasting and disaster weather prediction and tracking of global brightness

收稿日期:2017-05-16;修回日期:2017-06-24

作者简介:张 瑜(1984—),女,硕士,主要研究方向为被动微波遥感、系统控制及信号处理。

temperature images and typhoon monitoring were given.

Keywords: FY-3 meteorological satellite; payload; MWHS; microwave sounding; humidity and temperature sounding; weather forecast; atmospheric humidity; water vapor

0 引言

大气温度和湿度是影响全球气象与气候变化的重要参数。每年热带风暴、台风等灾害性天气给多国带来了巨大的生命和财产损失,因此大气温度和湿度探测在全球天气预报和气候变化研究中发挥的作用越来越重要。美国、欧洲、俄罗斯等的极轨气象卫星先后搭载了大气温湿度微波探测仪。美国的NOAA系列极轨气象卫星搭载的先进微波湿度探测单元AMSU-B,频率为89 GHz(垂直极化)、150 GHz(垂直极化)和183 GHz(水平极化,三通道)^[1]。从2005年5月发射的NOAA-18卫星开始,AMSU-B被微波湿度计(MHS)取代,探测频率更改为89,157,190.31 GHz,探测通道仍为5个^[2-3]。欧洲系列气象卫星MHS频率设置与AMSU-B相同;俄罗斯发射的气象卫星频率范围为6.6~183.31 GHz。上述国际上先进的大气微波探测仪在天气预报、中长期气候研究和灾害天气预警方面发挥了重要作用。

FY-3卫星是我国第二代极轨系列气象卫星,有效载荷包括光学、红外、微波遥感器及空间环境监测器等,其目标是实现全球全天候、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^[4]。微波湿度计(MWHS)是FY-3卫星上一个重要的有效载荷,可全天时、全天候探测全球大气湿度的垂直分布、水汽含量和降雨量等空间气象资料,在大气探测中的作用重要。FY-3卫星分为01,02,03三个批次,计划发射卫星8颗。其中:01批包括A,B两颗卫星;02批包括C,D两颗卫星;03批包括E,F,G,R(降雨星)四颗卫星。FY-3A,B星微波湿度计包括150,183.31 GHz两个探测频率,其中150 GHz与国际同类设备不同,分为垂直(V)和水平(H)极化两个通道;183.31 GHz与国际同类设备相同,包括 (183.3 ± 1) , (183.31 ± 3) , (183.31 ± 7) GHz三个通道。FY-3A,B星分别于2008年5月27日和2010年11月5日发射,在轨运行期间提供全球、全天候大气湿度廓线,水汽含量和降雨量等空间气象资料,获取了全球与台风暴雨等强对流天气现象密切相关的云雨大气参数,为数值天气预报业务和灾害性天气预警

预报提供支持。2014年9月29日,欧洲中期气象预报中心(ECMWF)开始在其业务预报模式中使用FY-3B星MWHS的资料,改进了模式中对对流层中层和高层湿度场的分析,增强了卫星观测系统的鲁棒性。在01批次A,B星微波湿度计的基础上,02批C,D星微波湿度计实现了升级换代,增加了89,118.75 GHz两个探测频率,探测通道也由5个增加到15个。02批微波湿度计命名为微波湿度计II型(MWHS-II),能同步观测大气湿度和温度,且实现了多通道的细分探测。FY-3C星于2013年9月23日发射,MWHS-II经过在轨测试,各项指标均优于FY-3A,B星的MWHS。

MWHS-II在国际上首次将118.75 GHz用于星载下视大气探测,同时由于增加了探测通道,垂直分辨率和冰云探测能力显著提高,对改善数值天气预报模型,提高中长期全球气候预报准确度是一次非常有意义的探索。本文主要介绍了FY-3卫星微波湿度计的探测原理、技术方案和发展,以及在台风、热带气旋等灾害性天气中的应用。

1 大气湿度微波探测原理

星载微波辐射计对地观测时,能穿透地球大气测量来自地球特定频率的微波辐射^[5]。因大气中的冰、云、雨、雪等对来自地球表面的微波辐射有衰减作用,故微波湿度计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,通过微波湿度计的亮度温度能反演得到大气湿度的垂直分布,以及地球表面的温度信息。

大气微波吸收谱如图1所示^[6]。图1中显示了氧气和水汽的大气吸收谱线,可发现在频率0~280 GHz范围内分别有氧气吸收谱线2条(50~60,118.75 GHz)和水汽吸收谱线2条(22.235,183.31 GHz)。通常利用50~60,118.75 GHz探测大气温度廓线,利用183.31 GHz探测大气湿度廓线。因22.235 GHz水汽吸收线对廓线测量衰减太低,且部分透明性被用于获取水汽总量。通常设置89,150 GHz两个窗区通道用于探测地球表面和较低大气的信息,并辅助测量大气温湿度廓线、卷云、强降雨等。

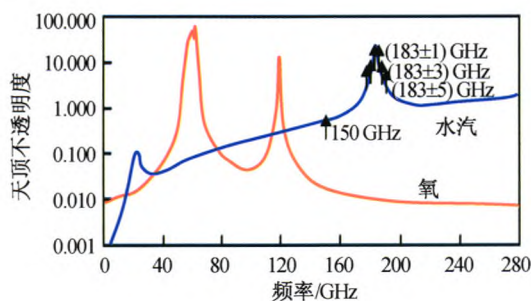


图1 大气微波吸收谱

Fig. 1 Atmospheric opacity spectrum

2 微波湿度计总体设计

2.1 总体方案及系统组成

FY-3 卫星 MWS 是一套基于超外差接收机的全功率型微波辐射计,由天线与接收机单元、控制与数据处理单元和电源单元组成。

MWS 接收到的信号来自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^[7]。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,低温源为宇宙冷空背景的微波辐射。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。

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为系统所需的直流电压。

控制与数据处理单元由天线驱动接口、系统测控模块和总线通信模块组成,系统软件控制天线扫描模式、接收机工作状态,完成数据采集、执行遥控指令及测测数据管理;由 1553B 总线与卫星进行通信,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。其中:天线与扫描驱动机构集成为一体,通过旋转反射面实现周期扫描,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、空间分辨率和积分时间等要素决定了扫描周期为 2.667 s。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天底点为

$\pm 53.35^\circ$,用时 1.71 s,冷空间定标角度距天地点为 73° ,用时 0.1 s;热源定标角度位于天顶点,用时 0.1 s;剩余时间用于快速空运转。天线与扫描驱动机构如图 2 所示。

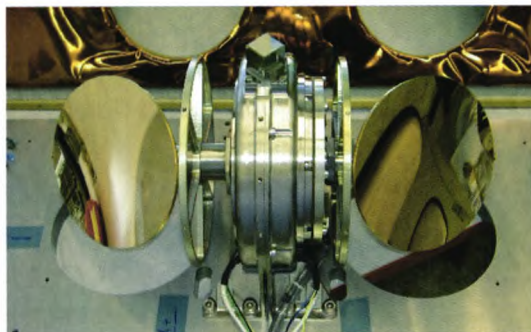


图2 天线与扫描驱动机构

Fig. 2 Antenna and scanning mechanism

FY-3A,B 星 MWS 的 150,183 GHz 接收机各自采用独立的反射面天线,150 GHz 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;FY-3C,D 星 MWS 的 89,118.75 GHz 接收机共用一个反射面,采用准光学器件实现两个频率的极化分离,用各自的馈源接收微波信号;150 GHz (或 166 GHz)和 183.31 GHz 接收机采用相同方式共用另外一个反射面。为防止卫星表面杂散电磁辐射的影响,两副天线都设计有天线罩,天线罩活动部分与天线反射面固定在一起旋转,固定部分与馈源固定在一起。

2.2 扫描方式

MWS 扫描方式有变速扫描、匀速扫描和定点观测三种工作模式。匀速扫描模式周期 2.667 s,与变速扫描周期相同;定点观测模式可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。MWS 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。为增加对地观测时间,电机带动天线进行 360° 连续变速圆周扫描,扫描周期 2.667 s,对地观测扫描张角 $\pm 53.35^\circ$ (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 3 所示。

为保证足够小的辐射测量灵敏度,应尽可能增加对地观测时间。因此,在对地观测期间降低电机

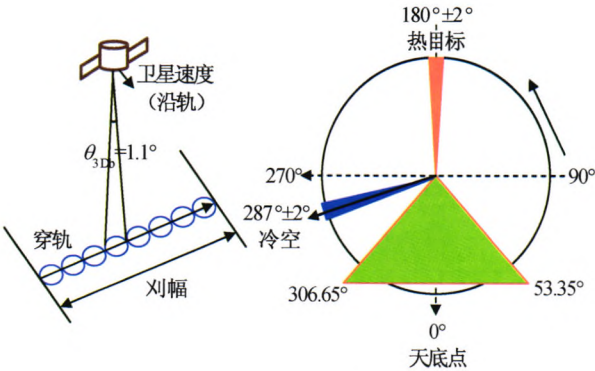


图 3 FY-3 卫星微波湿度计成像及扫描周期

Fig. 3 Imaging geometry and scanning period of FY-3 MWS

速度进行匀速扫描,对地观测时间 1.71 s,此值是根据卫星地面速度、天底点像元尺寸,以及两条连续的扫描线间天底点像元相邻而不重叠的要求算出的。

变速扫描模式扫描周期时间分配如下。

- a)对地观测: $\pm 53.35^{\circ}$,用时 1.71 s,匀速扫描。
- b)对地观测终止至热源定标起始角: $53.35^{\circ} \sim 178^{\circ}$,用时 0.357 s,加速/减速。
- c)热源定标: $180^{\circ} \pm 2^{\circ}$,用时 0.1 s,匀速扫描。
- d)热源定标终止至冷空定标起始角: $182^{\circ} \sim 285^{\circ}$,用时 0.3 s,加速/减速。

- e)冷空定标: $287^{\circ} \pm 2^{\circ}$,用时 0.1 s,匀速扫描。
- f)冷空定标终止至对地观测起始角: $289^{\circ} \sim 306.65^{\circ}$,用时 0.1 s,加速/减速。

FY-3 卫星轨道高度 836 km,卫星地速约 7.5 km/s,扫描角度范围 $\pm 53.35^{\circ}$,150/183.31 GHz 天线 3 dB 波束宽度 1.0° ,89 GHz/118.31 GHz 天线 3 dB 波束宽度 2.0° 。

由以上参数可知:刈幅宽度 2 645 km;像元数,每条扫描线有 98 像元;刈幅间隔 20 km;空间分辨率,天底点像元为圆形,直径 16 km,随着入射角增大地面像元逐渐变化为椭圆形,且尺寸变大,最远端像元尺寸 41 km \times 27 km;每个像元驻留时间 17.4 ms。

3 微波湿度计技术发展

3.1 探测指标提升

FY-3 卫星 MWS 从 01 批到 03 批不断进行升级换代,性能指标大幅提高,从单一的湿度探测发展为大气温湿度同步探测,灵敏度及定标精度不断提高,三个批次及国外同类仪器性能指标对比见表 1,通道特性参数对比见表 2。

表 1 FY-3 卫星微波湿度计及国外同类仪器性能指标比较

Tab. 1 Comparison of technical specifications of FY-3 MWS and AMSU-B

指标	参数要求				说明
	FY-3A,B 微波湿度计	FY-3C,D 微波湿度计	FY-3E,F,G 微波湿度计	NOAA AMSU-B	
对地扫描张角	$\pm 53.35^{\circ}$	$\pm 53.35^{\circ}$	$\pm (53.35^{\circ} \pm 0.1^{\circ})$	$\pm 48.95^{\circ}$	03 批提高
扫描成像点数	98 个/每条扫描线	98 个/每条扫描线	98 个/每条扫描线	90 个/每条扫描线	—
在轨定标	周期性两点定标	周期性两点定标	周期性两点定标	周期性两点定标	—
扫描周期	(2 667 \pm 5) ms	2 667 ms	周期 8/3 s; 对地观测 1.71 s; 热源观测 0.1 s; 冷空观测 0.1 s	8/3 s	02,03 批提高
两副天线间配准精度	0.1°(方位、俯仰)	0.1°(方位、俯仰)	0.1°(方位、俯仰)	—	—
天线指向精度	—	$\pm 0.1^{\circ}$	$\pm 0.08^{\circ}$	0.1°	02,03 批提高
量化等级	14 b	14 b	14 b	—	—
光轴星下点指向偏差	—	$< \pm 0.2^{\circ}$	$< \pm 0.2^{\circ}$	—	02,03 批新增
扫描时序精度	—	—	1.763 ms	—	03 批新增

表 2 FY-3 卫星微波湿度计通道特性指标比较
Tab. 2 Comparison of channel characteristic specifications of FY-3 MWS

性能指标		01 批 使用要求	02 批 使用要求	03 批 使用要求	NOAA/AMSU-B 使用要求	说明
中心频率及 单边带宽/ MHz	89.0 GHz	—	1 500	1 500	1 000	02 批新增
	(118.75±0.08) GHz	—	20	20	—	02 批新增
	(118.75±0.2) GHz	—	100	100	—	
	(118.75±0.3) GHz	—	165	165	—	
	(118.75±0.8) GHz	—	200	200	—	
	(118.75±1.1) GHz	—	200	200	—	
	(118.75±2.5) GHz	—	200	200	—	
	(118.75±3.0) GHz	—	1 000	1 000	—	
	(118.75±5.0) GHz	—	2 000	2 000	—	
	150/166 GHz	1 500	1 500	1 500	1 000	03 批变化
	(183.31±1) GHz	500	500	500	500	—
	(183.31±1.8) GHz	—	700	700	—	02 批新增
	(183.31±3) GHz	1 000	1 000	1 000	1 000	—
	(183.31±4.5) GHz	—	2 000	2 000	—	02 批新增
	(183.31±7) GHz	2 000	2 000	2 000	2 000	—
中心频率 稳定度/MHz	89 GHz	—	50	50	—	—
	118.75 GHz	—	30	20	—	03 批提高
	150/166 GHz	50	50	50	—	—
	183.31 GHz	30	30	30	—	—
通道极化要求	89/118 GHz	—	≤-17.5 dB	≤-17.5 dB	—	—
	150/166/183 GHz	≤-17.5dB	≤-17.5 dB	≤-17.5 dB	—	
动态范围/K		3~340	3~340	3~340	3~300	—
3 dB 波束 宽度	89/118 GHz	—	2.0°	2.0°	—	—
	150/166/183 GHz	1.1°	1.1°	1.1°	—	—
主波束效率	89/118 GHz	—	>92%	>92%	—	—
	150/166/183 GHz	>95%	>95%	>95%	—	—
使用寿命		4 年设计 3 年考核	5 年设计 4 年考核	在轨 8 年	—	02,03 批提高

辐射指标要求

灵敏度及 定标精度/ K	通道	灵敏度			定标精度			AMSU-B 灵敏度/定标精度	说明
	89.0 GHz	—	1.0	0.4	—	1.3	1.0/0.8	—	03 批提高
	(118.75±0.08) GHz	—	3.6	2.2	—	2.0	2.4/2.2	—	03 批提高
	(118.75±0.2) GHz	—	2.0	1.0	—	2.0	1.2/1.0	—	03 批提高
	(118.75±0.3) GHz	—	1.6	0.8	—	2.0	1.2/1.0	—	03 批提高
	(118.75±0.8) GHz	—	1.6	0.8	—	2.0	1.2/1.0	—	03 批提高
	(118.75±1.1) GHz	—	1.6	0.8	—	2.0	1.0/0.8	—	03 批提高
	(118.75±2.5) GHz	—	1.6	0.8	—	2.0	1.0/0.8	—	03 批提高
	(118.75±3.0) GHz	—	1.0	0.5	—	2.0	1.0/0.8	—	03 批提高
	(118.75±5.0) GHz	—	1.0	0.5	—	2.0	1.0/0.8	—	03 批提高
	150/166 GHz	1.0	1.0	0.4	—	1.3	1.0/0.8	0.84K/1.0K	03 批提高
	(183.31±1) GHz	1.0	1.0	0.6	—	1.3	1.0/0.8	1.06K/1.0K	03 批提高
	(183.31±1.8) GHz	—	1.0	0.6	—	1.3	1.0/0.8	—	03 批提高
	(183.31±3) GHz	1.0	1.0	0.5	—	1.3	1.0/0.8	0.7K/1.0K	03 批提高
	(183.31±4.5) GHz	—	1.0	0.5	—	1.3	1.0/0.8	—	03 批提高
	(183.31±7) GHz	1.0	1.0	0.5	—	1.3	1.0/0.8	0.6K/1.0K	03 批提高

3.2 微波湿度计探测方案发展

FY-3A,B星微波湿度计包括150,183.31 GHz两个探测频率^[8]。其中:150 GHz在国际上首次采用准光技术实现了极化分离,分为垂直(V)和水平(H)极化两个通道;183.31 GHz与国际同类设备相同,包括 (183.3 ± 1) , (183.31 ± 3) , (183.31 ± 7) GHz三个通道,系统组成如图4所示。

02批C,D星微波湿度计是01批A,B星的继承和发展,在保留原全部功能外,增加了118.75 GHz探测通道8个,183.31 GHz探测通道由原来的3个增加到5个,并增加了150 GHz窗区频率,显著提升了微波湿度计的探测能力^[9]。02批的MWHS-II实现了多通道的细分探测,并具有大气温度、湿度同步探测的功能,且118 GHz首次实现了星载非临边大气探测。其中:温度廓线是通过测量位于118.75 GHz氧气吸收线的8个通道的亮度温度获得;水汽廓线是通过测量位于183.31 GHz水汽吸收线的5个不同通道的亮度温度获得。FY-3C,D星微波湿度计系统组成如图5所示,实物如图6

所示。

与01批相比,02批(C,D)星微波湿度计研制的关键技术有:

a)集成度大幅提高,系统复杂。

b)多频及多通道的电磁兼容性。系统接收机采用高次混频、双边带接收,共有射频通带30个、本振4个,谐波分量丰富,故采取了有效的电磁兼容措施控制谐波干扰。

c)寿命提高。系统寿命由3年考核提高至4年,提高了器件等级。

FY-3卫星03批卫星是02批卫星的继承和发展,计划发射晨昏星、上午星、下午星和降雨星4颗卫星。其中清晨星、上午星和下午星将搭载微波湿度计(II型)。

与02批相同,03批星微波湿度计(II型)也包括探测频率4个、探测通道15个,但根据用户需求,窗区探测频率由150 GHz更改为166 GHz,并大幅提高了灵敏度、定标精度等系统性能指标。目前,03批05星微波湿度计已完成正样设计。

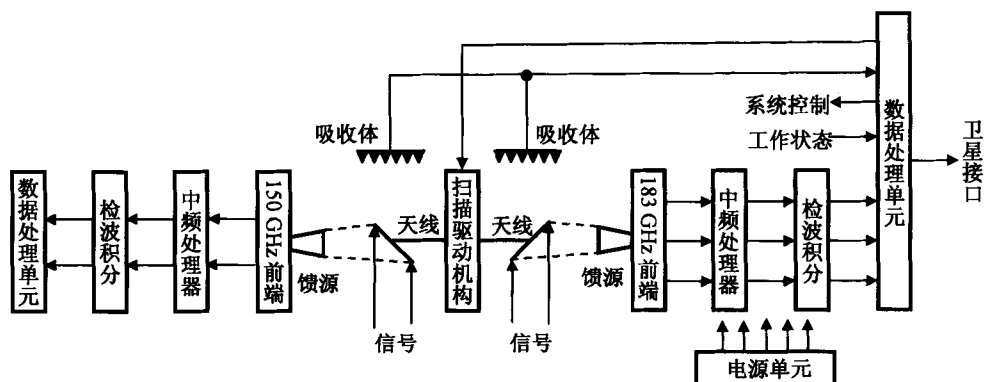


图4 FY-3A,B星微波湿度计系统组成

Fig. 4 Block diagram of FY-3A,B MWHS

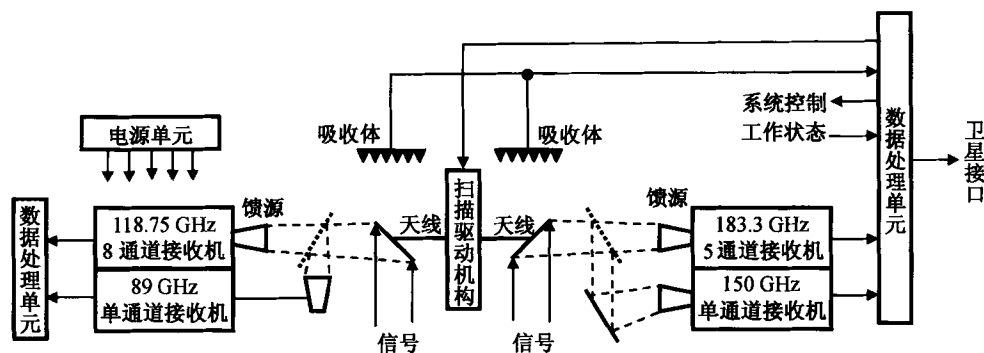


图5 FY-3C,D星微波湿度计系统组成

Fig. 5 Block diagram of FY-3C,D MWHS

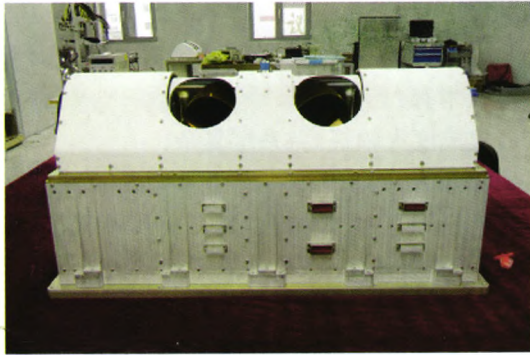


图6 FY-3C,D星微波湿度计

Fig. 6 FY-3C,D MWHRS

4 微波湿度计性能分析及在轨应用

4.1 微波湿度计性能分析

微波湿度计重要的性能指标包括系统灵敏度和定标精度。系统灵敏度 ΔT ，又称辐射分辨率，定义为微波辐射计能检测到的最小天线温度变化，有

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

式中： B 为检波前带宽； τ 为积分时间； G 为检波前增益； $\Delta G/G$ 为一个扫描周期内两点定标间的增益

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 为量化处理过程的噪声贡献。对实时两点定标的微波辐射计系统，增益波动的影响基本消除。

经在轨测试，可获得微波湿度计各通道的灵敏度和定标精度指标，结果与国际同类载荷灵敏度指标在轨对比见表3^[10-11]。由表3可知：FY-3C星微波湿度计的灵敏度优于其他同类载荷。

4.2 微波湿度计在轨应用

FY-3A星发射后，微波湿度计于2008年6月4日开机工作正常，开机后第一轨探测数据图像层次分明，信息量丰富，并且反映了大气中水汽分布和不同高度层的量温特征。2008年，我国台湾及东南沿海地区台风及热带风暴频发，FY-3A星微波湿度计在监测海鸥、凤凰、森拉克、黑格比、蔷薇等台风和热带风暴的形成、发展和衰落过程中发挥了重大作用，显示出其全天候大气湿度的探测能力。

2008年7月下旬，强台风凤凰过境时微波湿度计的监测图像如图7所示^[12]。由于强台风恰好处于星下点，数据质量良好，台风眼区监测清晰直观，对台风的强度分布、发展趋势提供了有价值的参考信息，为判别台风未来发展提供了有利依据。

表3 与同类载荷灵敏度和定标精度指标在轨对比

Tab. 3 In-orbit sensitivity comparison with international similar payloads

通道号	频率/GHz	MWHS(FY-3C) (灵敏度/定标精度)/ K	AMSU-B (NOAA-18) (灵敏度/定标精度)/K	MHS(NOAA-19) 灵敏度/K	MHS(Metop-B) 灵敏度/K	ATMS(NPP) 灵敏度/K
1	118.75±0.08	1.36/0.41	—	—	—	—
2	118.75±0.2	0.50/0.31	—	—	—	—
3	118.75±0.3	0.42/0.53	—	—	—	—
4	118.75±0.8	0.41/0.31	—	—	—	—
5	118.75±1.1	0.41/0.31	—	—	—	—
6	118.75±2.5	0.37/0.26	—	—	—	—
7	118.75±3.0	0.25/0.31	—	—	—	—
8	118.75±5.0	0.32/0.26	—	—	—	—
9	89.0	0.20/0.45	0.37/1.0	0.23	0.22	0.29
10	150.0	0.27/0.31	0.84/1.0	0.37	0.34	0.44
11	183.31±1	0.35/0.21	1.06/1.0	0.55	0.51	0.62
12	183.31±1.8	0.28/0.21	—	—	—	0.49
13	183.31±3	0.27/0.21	0.70/1.0	0.42	0.40	0.48
14	183.31±4.5	0.24/0.5	—	—	—	9.39
15	183.31±7	0.27/0.41	0.60/1.0	0.35	0.46	0.34

FY-3B 星微波湿度计自 2010 年 11 月 5 日发射以来,至今已稳定运行超过 6 年,灵敏度等在轨性能优于 A 星,且在轨定标结果系统偏差小于 NOAA-18 星 AMSU-B 和 FY-3A 星 MWHS。B 星在 2010 年 11 月 11 日 23:52 获取的第一幅单轨图像如图 8 所示,在轨运行期间获得的全球亮温图如图 9 所示。

FY-3C 星微波湿度计自 2013 年 9 月 23 日发射以来,在轨工作已超过 3 年,能同步观测大气湿度和温度,并实现了多通道的细分探测。FY-3A,B,C 星组网运行,为 2013 年圣帕、菲特等台风在太平洋上生成过程和发展路径,以及台风路径的发展走势预判提供了技术手段,提高了短时灾害性天气预报的时效性。FY-3C 星微波湿度计 118,183 GHz 探测通道监测的台风菲特的内部结构如图 10 所示。

FY-3A,B,C 星微波湿度计在轨运行期间获取了全球与台风暴雨等强对流天气现象密切相关的

云雨大气参数,为数值天气预报业务和灾害性天气预警预报提供支持。其中,从 2014 年 9 月 24 日开始,欧洲中期天气预报中心(ECMWF)开始在其业务预报模式中使用 FY-3B 星微波湿度计资料,C 星微波湿度计资料也于 2016 年 4 月被同化使用,ECMWF 认为微波湿度计资料改善了模式对对流层中层和高层湿度场的分析,增强了卫星观测系统的鲁棒性。这些表明 FY-3 卫星微波湿度计辐射测量精度和观测稳定性已获得了国际用户的认可,能与欧洲、美国共同在气象卫星数据提供方面发挥主导作用。

03 批 FY-3E,F,G 三颗卫星将搭载微波湿度计 II 型,并进一步提高系统性能指标,计划于 2018 年后发射;届时将与 FY-3A,B,C,D 星组网作为系列化、业务化运行的气象卫星进一步为全球气象预报及灾害预警服务。

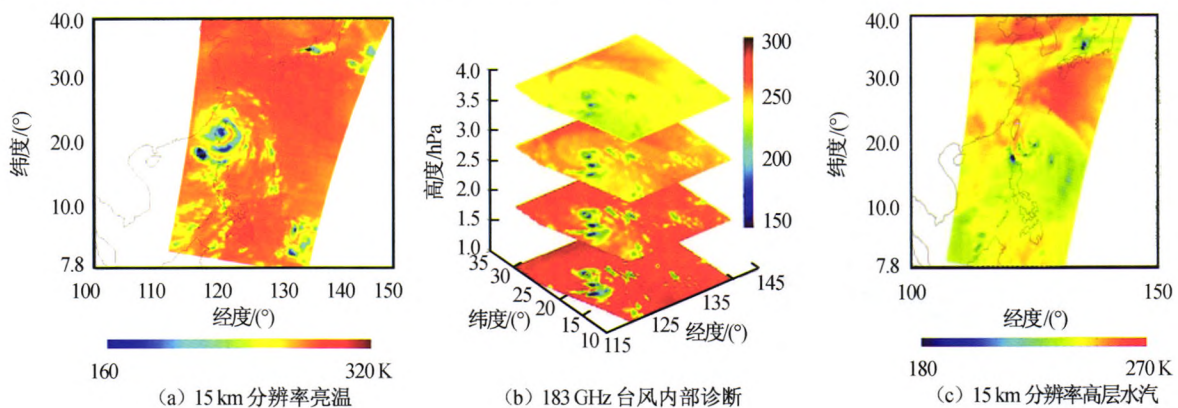


图 7 FY-3A 星台风凤凰监测图像

Fig. 7 Monitoring images of typhoon Fung-Wong

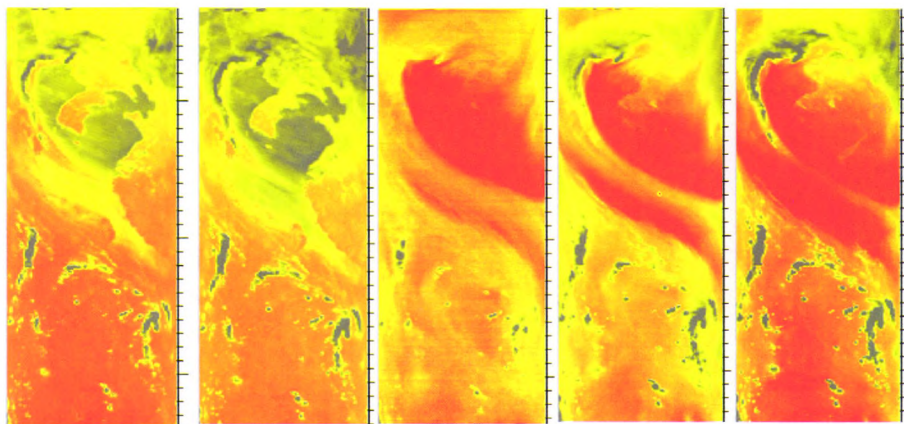


图 8 FY-3B 星微波湿度计第一幅单轨图像

Fig. 8 The first orbit images of FY-3B MWHS

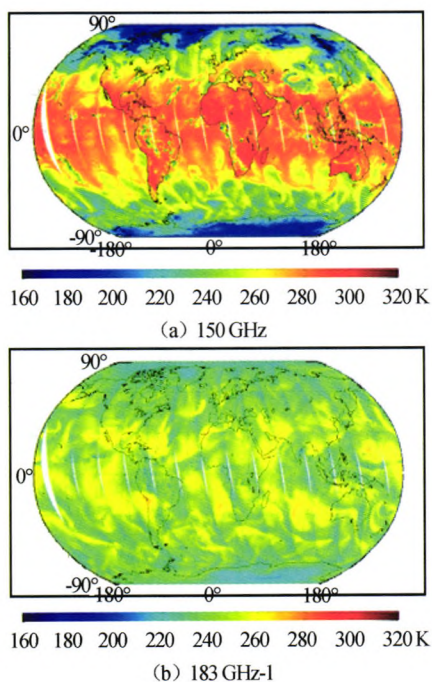


图9 FY-3B星微波湿度计全球亮温图

Fig. 9 Global brightness temperature images of FY-3B MWHS

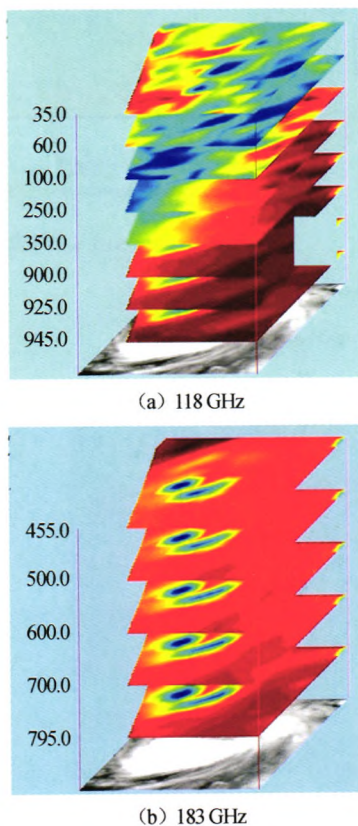


图10 FY-3C星118,183 GHz台风菲特内部结构

Fig. 10 Typhoon Fitow inner thermal structure of FY-3 118 GHz/183 GHz

5 结束语

经过近十多年的发展,我国FY-3气象卫星大气湿度微波探测技术从无到有,从单一湿度探测发展到湿度/温度多通道同步探测,取得长足的进步。我国地处亚洲季风区,气象灾害频发,FY-3卫星微波湿度计利用其微波探测优势,能全天时、全天候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了重要参数,在大气探测领域特别是灾害性天气的预报和跟踪监测等方面发挥了重大作用。FY-3卫星微波湿度计代表了目前中国星载微波辐射计的最高频率,在轨表现良好,在国际气象组织中产生了积极影响。FY-3 03批卫星计划发射晨昏星、上午星、下午星和降雨星。其中:晨昏星、上午星和下午星三颗卫星上搭载微波湿度计(II型)。03批星微波湿度计系统性能指标将在02批的基础上大幅提高,计划于2018年后陆续发射,并将与01批、02批组网运行,共同为大气探测提供服务。

参考文献

- [1] 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] GRANT N A, EDGAR D L, THAYNE I G. Advanced technology microwave multi-channel temperature and humidity sounder for the 21st century[C]// Microwave and Optoelectronics Conference, 1999. [S. l.]: SBMO/IEEE, 1999: 1, 332-335.
- [3] LAURENT C, CHRIS B, MICHAEL B J, et al. Microwave Humidity Sounder (MHS) antenna[J]. Proceeding of SPIE, the International Society for Optical Engineering, 1999, 3870: 412-426.
- [4] 董瑶海, 孙允珠, 王金华, 等. FY-3A 极轨气象卫星[J]. 上海航天, 2008, 25(5): 1-11.
- [5] SKOU N, LE VINE D. Microwave radiometer systems design and analysis[M]. 2 ed. Boston: Artech House, 2006: 99-114.
- [6] JUAN R P, PIERRE E J, DANIEL B. Utilization of the radiofrequency spectrum above 1 GHz by the EES (passive) and interference criteria[C]// Preserving the Astronomical Sky, Proceedings of IAU Symposium. Vienna: [n. l.], 1999: 196, 255-263.
- [7] LAHTINEN J, GASIEWSKI A J, KLEIN M. A calibration method for fully polarimetric microwave

- radiometers[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 41(3): 588-602.
- [8] 张升伟,李靖,姜景山,等. 风云三号卫星微波湿度计系统设计与研制[J]. 遥感学报, 2008, 2(12): 199-207.
- [9] 张升伟,王振占,孙茂华,等. 风云三号卫星先进微波大气探测系统设计与研制[J]. 中国工程科学, 2013, 15(7): 81-87.
- [10] GOODRUM G, KIDWELL K B, WINSTON W. NOAA KLM user's guide[M]. Washington D. C.: National Oceanic and Atmospheric Administration, 2000.
- [11] KARBOU F, AIRES F, PRIGENT C, et al. Potential of Advanced Microwave Sounding Unit-A (AMSU-A) and AMSU-B measurements for atmospheric temperature and humidity profiling over land[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2005, 110(D7): 1275-1287.
- [12] ZHANG Sheng-wei, LI Jing, JIANG Jing-shan, et al. In-orbit performance of microwave humidity sounder (MWHS) of Chinese FY-3 meteorological satellite[J]. IGARSS, 2010, 38(5): 574-577.