

谷松岩, 卢乃锰, 吴琼, 等. FY-3 气象卫星降水探测能力分析 with 展望[J]. 海洋气象学报, 2022, 42(2): 1-10.  
GU Songyan, LU Naimeng, WU Qiong, et al. Analysis and prospect of precipitation detection capability of FY-3 meteorological satellites[J]. Journal of Marine Meteorology, 2022, 42(2): 1-10. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2022.02.001. (in Chinese)

## FY-3 气象卫星降水探测能力分析 with 展望

谷松岩<sup>1,2,3</sup>, 卢乃锰<sup>1,2,3</sup>, 吴琼<sup>1,2,3</sup>, 尹红刚<sup>1,2,3</sup>, 商建<sup>1,2,3</sup>, 孙逢林<sup>1,2,3</sup>, 陈林<sup>1,2,3</sup>, 张鹏<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 北京 100081; 2. 国家卫星气象中心, 北京 100081; 3. 许健民气象卫星创新中心, 北京 100081)

**摘要:** 降水是全球能量/水循环中的重要过程。本文着重分析 FY-3 气象卫星降水探测能力, 展望风云卫星后续规划中降水探测技术的发展前景。分析表明, 以 FY-3 降水星为主星, 与其他 FY-3 极轨卫星组成的 FY-3 气象卫星降水探测体系, 在设计层面上, 从载荷类型、数量、通道设置等方面均优于由美国发起并已在轨运行的全球降水测量 (Global Precipitation Measurement, GPM) 计划核心星的设计性能。FY-3 降水星设计装载 Ka/Ku 双频降水测量雷达, 卫星轨道设计覆盖南北纬 50° 范围内的中低纬地区, 对影响我国区域的台风暴雨等强对流天气系统结构具有三维探测能力。FY-3 气象卫星星座的降水探测能力为气象防灾减灾提供了基础支撑。

**关键词:** FY-3 气象卫星; FY-3 降水星; 风云降水星座; 双频降水测量雷达; 微波成像仪

**中图分类号:** P414.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2022)02-0001-10

**DOI:** 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2022.02.001

## Analysis and prospect of precipitation detection capability of FY-3 meteorological satellites

GU Songyan<sup>1,2,3</sup>, LU Naimeng<sup>1,2,3</sup>, WU Qiong<sup>1,2,3</sup>, YIN Honggang<sup>1,2,3</sup>,  
SHANG Jian<sup>1,2,3</sup>, SUN Fenglin<sup>1,2,3</sup>, CHEN Lin<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Peng<sup>1,2,3</sup>

(1. Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China; 2. National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China; 3. FengYun Meteorological Satellite Innovation Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

**Abstract** Precipitation is an important process in the global energy/water cycle. This paper focuses on the analysis of the precipitation detection capability FY-3 meteorological satellites, and looks forward to the development prospect of precipitation detection technology in the follow-up planning of FengYun satellites. The analysis shows that the precipitation detection system of FY-3 meteorological satellites, which is composed of FY-3 precipitation measurement satellite as the main star and other FY-3 polar orbiting satellites, is superior to the design performance of the in-orbit operation core satellite of Global Precipitation Measurement (GPM) mission initiated by the U.S. in terms of load type, quantity, and channel setting. The FY-3 precipitation satellite is designed to be loaded with Ka/Ku dual-frequency precipitation measurement radar. The satellite orbit design covers the middle and low latitudes between 50°N and 50°S. It has three-dimensional detection capability for synoptic systems of strong convective

收稿日期: 2022-01-27; 修订日期: 2022-03-09

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFB0504900, 2018YFB0504902); 国家自然科学基金项目 (41775020)

第一作者: 谷松岩, 女, 博士, 研究员, 主要研究方向为微波大气遥感应用, gusy@cma.gov.cn。

通信作者: 卢乃锰, 男, 研究员, 主要研究方向为大气遥感应用, lunm@cma.gov.cn。

weather such as typhoon-induced rainstorms affecting China. The precipitation detection capability of FY-3 meteorological satellites provides basic support for meteorological disaster prevention and mitigation.

**Key words** FY-3 meteorological satellite; FY-3 precipitation measurement satellite; FengYun precipitation satellite constellation; dual-frequency precipitation measurement radar; Microwave Radiation Imager

## 引言

降水是全球能量/水循环中的重要过程。在气候变化背景下气象灾害频发,对降水系统瞬时结构和全球分布特征的认识,成为人们实现气象防灾减灾、理解全球气候变化的重要内容。气象卫星可以有效获取海洋、山区和沙漠等广袤无人居住区域的降水信息,是实现全球降水探测唯一有效的技术手段<sup>[1-8]</sup>。

风云气象卫星历经50年发展,中国已成为拥有极轨和静止两个系列业务卫星的气象大国。随着应用需求和载荷研制技术的发展,风云气象卫星降水探测先后经历了从图像定性分析、红外降水估计到被动微波降水遥感等多个技术发展阶段,目前进入星载主动降水测量的新阶段<sup>[8-13]</sup>。

目前规划中的FY-3系列气象卫星包含2颗降水星和5颗业务极轨气象卫星,组成星座体系,其中2颗降水星均设计装载Ka/Ku双频降水测量雷达及微波成像仪,5颗业务极轨气象卫星设计装载微波成像仪或微波探测仪。2026年前后,FY-3气象卫星将形成星座体系下主被动微波联合探测降水的业务能力。本文在介绍FY-3卫星规划的基础上,分析FY-3卫星降水探测能力。

## 1 FY-3气象卫星及微波载荷配置

FY-3气象卫星是为了满足我国天气预报、气候预测和环境监测等方面的迫切需求建设的第二代极轨气象卫星,由四个批次10颗卫星组成<sup>[10]</sup>。FY-3气象卫星应用目标是获取地球大气环境的三维、全球、全天候、定量、高精度资料。FY-3气象卫星01批为试验批次,含FY-3A/B两颗卫星,装载了微波大气探测仪和微波成像仪,2008年5月27日FY-3A首发成功,建立了风云卫星星载被动微波定量遥感。FY-3气象卫星后续02、03、04批次均为业务批次:02批包括FY-3C/D两颗卫星,分别于2013年和2017年发射投入业务使用,实现了红外高光谱大气探测;03批含FY-3E/F/G/H四颗卫星,首发星FY-3E于

2021年发射,其中FY-3G为FY-3首颗降水星,设计装载双频降水测量雷达,实现星载主动微波降水探测;04批将业务运行到2028年前后,延续FY-3高质量遥感探测业务能力,并接续第三代风云极轨气象卫星新的业务探测体系。FY-3气象卫星规划中卫星发射计划见图1。

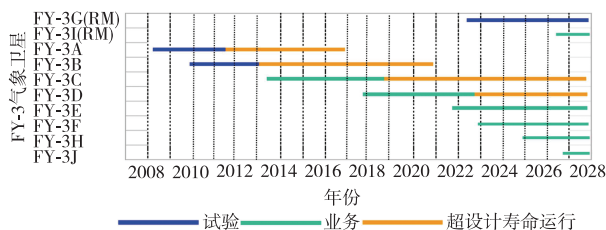


图1 FY-3气象卫星发射运行计划

Fig.1 Launch and operation plan of FY-3 meteorological satellites

FY-3气象卫星主被动微波载荷是降水探测的主要载荷,包括微波成像仪、微波探测仪和双频降水测量雷达。微波成像仪利用大气窗区,以圆锥扫描方式遥感地气系统地球物理参数;微波大气探测仪以切轨扫描方式,利用大气气体吸收特性,探测大气温湿度廓线。从2008年FY-3首发星(FY-3A)成功发射,到目前为止FY-3气象卫星已完成三个批次(01/02/03批)五颗卫星(FY-3A/B/C/D/E)的发射和业务运行,均装载有被动微波载荷,包括微波成像仪(FY-3A/B/C/D/MWRI)、微波温度计(FY-3A/B/MWTS, FY-3C/D/MWTS-II, FY-3E/MWTS-III)和微波湿度计(FY-3A/B/MWHS, FY-3C/D/E/MWHS-II)<sup>[14-16]</sup>。FY-3后续卫星也都设计装载有被动微波辐射计。利用FY-3卫星上装载的主被动微波载荷,不仅能探测大气降水参数,而且能探测得到降水系统的三维结构。

FY-3 01批卫星装载的微波温度计其探测能力与美国NOAA卫星上搭载的微波大气探测仪(Microwave Sounding Unit, MSU)相当,在50~60GHz的氧气吸收频段设计有4个通道;微波湿度计与当时美国业务运行的NOAA卫星搭载的先进的大气垂直探测器(Advanced TIROS-N Operational Vertical Sounder, ATOVS)中先进的微波探测装置B

(AMSU-B)相当,除了在 183 GHz 水汽吸收线附近设置了 3 个通道外,在 150 GHz 微波窗区频段设置有双极化探测通道,成为当时国际上在轨业务运行独具特色的探测载荷,其探测资料成功同化应用到欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)、英国气象局和我国自主研发的数值天气预报模式中<sup>[17-19]</sup>。在 FY-3 01 批星载大气垂直探测系统成功经验基础上, FY-3 02 批根据风云卫星发展的应用需求,增加温度计探测通道数量同时细化水汽探测通道,提升 FY-3 微波大气探测系统能力。FY-3 02 批业务批次的两颗卫星 FY-3C/D 星发射后,因其独具特色的通道设置,而受到欧美同行的广泛关注。其中微波温/湿度计在常规氧气和水汽吸收频点上的通道设置与美国当代业务卫星 SNPP(Suomi National Polar-orbiting Partnership)上装载的大气探测载荷 ATMS 探测通道一致,同时 FY-3 增加了 118 GHz 氧气吸收

线一组 8 个探测通道的设计<sup>[20-22]</sup>。目前正在实施的 FY-3 03 批工程建设,规划有 4 颗卫星,其中上下午和晨昏 3 颗卫星上均设计装载探测通道与 02 批保持一致的微波大气探测载荷,同时在微波温度计上增加了低频 23 GHz 和 31 GHz 两个窗区通道以及吸收峰的两个通道,星载微波大气垂直探测系统性能进一步提升。

FY-3 01/02 批 4 颗卫星上装载的微波成像仪采用相同的频点设置和独特的扫描成像体制,利用设置在 10 GHz 到 89 GHz 的 5 个频点双极化窗区通道获取地气系统微波辐射,反演地球物理参数。后续 FY-3 03 批微波成像仪将通过增加大气氧气和水汽吸收通道提升降水探测能力,频点将覆盖 10 GHz 到 183 GHz 的多频段。FY-3 气象卫星微波载荷配置情况可以简示如表 1,主动微波载荷技术指标见表 2,被动微波载荷通道频点配置见表 3。

表 1 FY-3 气象卫星微波载荷配置情况

Table 1 Microwave load configuration of FY-3 meteorological satellites

批次	卫星	轨道	发射时间	仪器类别			
				被动			主动
				微波温度计	微波湿度计	微波成像仪	降水测量雷达
01 批	FY-3A 星(01 星)	上午轨道	2008-05-27	MWTS	MWHS	MWRI	
	FY-3B 星(02 星)	下午轨道	2010	MWTS	MWHS	MWRI	
02 批	FY-3C 星(03 星)	上午轨道	2013	MWTS-II	MWHS-II	MWRI	
	FY-3D 星(04 星)	下午轨道	2017	MWTS-II	MWHS-II	MWRI	
03 批	FY-3E 星(05 星)	晨昏轨道	2021	MWTS-III	MWHS-II		
	FY-3F 星(06 星)	上午轨道	2022	MWTS-III	MWHS-II	MWRI-II	
	FY-3G 星(07 星)	非太阳同步低倾角	2023			MWRI-RM	PMR
04 批	FY-3H 星(08 星)	下午轨道	2024	MWTS-III	MWHS-II	MWRI-II	
	FY-3I 星(09 星)	非太阳同步低倾角	2027			MWRI-RM	PMR
	FY-3J 星(10 星)	晨昏轨道	2028	MWTS-III	MWHS-II		

表 2 FY-3 气象卫星降水测量雷达技术指标

Table 2 Technical specification of precipitation measurement radar of FY-3 meteorological satellites

参数	指标	
中心频率	13.35±0.01 GHz(Ku)	35.55±0.01 GHz(Ka)
极化	HH	HH
脉冲体制	短脉冲	短脉冲/脉冲压缩
天线峰值旁瓣	≤-30 dB	≤-30 dB
最小可检测降水强度	0.5 mm·h <sup>-1</sup> (18 dBZ)	0.2 mm·h <sup>-1</sup> (12 dBZ)
6 dB 距离分辨率	≤ 250 m	
单程 3 dB 波束宽度	0.7° ± 0.02°(对应星下点分辨率 5 km)	
扫描角度范围	正常观测模式:± 20.3°	
	外定标模式:± 3°	

续表

参数	指标
扫描方式	跨轨方向一维扫描
波束指向精度	正常扫描模式: $\pm 0.05^\circ$ ; 外定标模式: $\pm 0.025^\circ$
距离方向观测范围	18 ~ -5 km ASL
距离方向采样间隔	50 m
波束匹配精度	$\leq 0.1^\circ$
独立样本数	$\geq 64$
测量动态范围	$\geq 70$ dB
辐射精度	$\leq \pm 1$ dB ( $3\sigma$ )

注:“ASL”表示平均海平面,下同。

表3 FY-3气象卫星被动微波载荷通道设置

Table 3 Passive microwave load channel setting of FY-3 meteorological satellites

FY-3A/B/C/D/MWRI	FY-3F/H/MWRI-II	FY-3G/I/MWRI-RM	FY-3A/B/MWTS	FY-3C/D/MWTS-II	FY-3E/F/H/J/MWTS-III	FY-3A/B/MWHS	FY-3C/D/E/F/H/J/MWHS-II
10.65 GHz(H/V)	10.65 GHz(H/V)	10.65 GHz(H/V)			23.80 GHz		89.00(QV)GHz
18.70 GHz(H/V)	18.70 GHz(H/V)	18.70 GHz(H/V)			31.40 GHz		118.75 $\pm$ 0.08 GHz
23.80 GHz(H/V)	23.80 GHz(H/V)	23.80 GHz(H/V)	50.30 GHz	50.30 GHz	50.30 GHz		118.75 $\pm$ 0.2 GHz
36.50 GHz(H/V)	36.50 GHz(H/V)	36.50 GHz(H/V)		51.76 GHz	51.76 GHz		118.75 $\pm$ 0.3 GHz
	50.30 GHz(V)	50.30 GHz(V)		52.80 GHz	52.80 GHz		118.75 $\pm$ 0.8 GHz
	52.61 GHz(V)	52.61 GHz(V)			53.246 $\pm$ 0.08 GHz		118.75 $\pm$ 1.1 GHz
	53.24 GHz(V)	53.24 GHz(V)	53.596 $\pm$ 0.115 GHz	53.596 GHz	53.596 $\pm$ 0.115 GHz		118.75 $\pm$ 2.5 GHz
	53.75 GHz(V)	53.75 GHz(V)			53.948 $\pm$ 0.081 GHz		118.75 $\pm$ 3.0 GHz
89.00 GHz(H/V)	89.00 GHz(H/V)	89.00 GHz(H/V)	54.94 GHz	54.40 GHz	54.40 GHz		118.75 $\pm$ 5.0 GHz
	118.750 3 $\pm$ 3.2 GHz(V)	118.750 3 $\pm$ 3.2 GHz(V)		54.94 GHz	54.94 GHz	150.00 GHz	166.00 GHz
	118.750 3 $\pm$ 2.1 GHz(V)	118.750 3 $\pm$ 2.1 GHz(V)		55.50 GHz	55.50 GHz	150.00 GHz	
	118.750 3 $\pm$ 1.4 GHz(V)	118.750 3 $\pm$ 1.4 GHz(V)	57.290 GHz	57.290 344( $f_0$ )GHz	57.290 344( $f_0$ )GHz	183.31 $\pm$ 1.0 GHz	183.31 $\pm$ 1.0 GHz
	118.750 3 $\pm$ 1.2 GHz(V)	118.750 3 $\pm$ 1.2 GHz(V)		$f_0\pm 0.217$ GHz	$f_0\pm 0.217$ GHz		183.31 $\pm$ 1.8 GHz
		165.5 GHz(H/V)		$f_0\pm 0.322 2\pm 0.048$ GHz	$f_0\pm 0.322 2\pm 0.048$ GHz	183.31 $\pm$ 3.0 GHz	183.31 $\pm$ 3.0 GHz
		183 $\pm$ 1 GHz(V)		$f_0\pm 0.322 2\pm 0.022$ GHz	$f_0\pm 0.322 2\pm 0.022$ GHz		183.31 $\pm$ 4.5 GHz
		183 $\pm$ 3 GHz(V)		$f_0\pm 0.322 2\pm 0.010$ GHz	$f_0\pm 0.322 2\pm 0.010$ GHz	183.31 $\pm$ 7.0 GHz	183.31 $\pm$ 7.0 GHz
		183 $\pm$ 7 GHz(V)		$f_0\pm 0.322 2\pm 0.004 5$ GHz	$f_0\pm 0.322 2\pm 0.004 5$ GHz		

注:“QV”表示等效极化,“ $f_0$ ”表示边带中心频点,“H”表示水平极化,“V”表示垂直极化,下同。

## 2 FY-3气象卫星降水探测能力分析

FY-3气象卫星降水参数反演和降水系统三维结构探测主要依托FY-3气象卫星装载的主被动微波载荷。FY-3降水星装载的降水测量雷达能监测台风暴雨等灾害性天气系统,提供全球中低纬度地区降水系统的三维结构,弥补国内地基雷达观测范围受限的探测弱点;同时降水测量雷达还能校准同星装载的宽刈幅被动微波成像仪降水测量精度,并向FY-3以及风云其他型号卫星传递降水测量结果。

### 2.1 降水星载荷配置分析

降水星是专门用来测量热带、亚热带降水的气象卫星。FY-3降水星是继美、日联合发射专用降水测量卫星之后的中国首颗降水测量专用气象卫星。

1997年美、日联合实施了热带降水测量计划

(Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM),发射了装载降水雷达(Precipitation Radar, PR)的TRMM卫星<sup>[23]</sup>。除PR外,TRMM卫星还装载了微波成像仪(TRMM Microwave Imager, TMI)、光学成像的可见光红外扫描仪(Visible and Infrared Scanner, VIRS)、云和地球辐射能量测量系统(Clouds and the Earth's Radiant Energy System, CERES)以及闪电成像仪(Lightning Imaging Sensor, LIS),多种探测器联合实现降水的星载探测。

TRMM之后美、日又于2014年提出全球降水测量(Global Precipitation Measurement, GPM)计划,多个国家和组织加入了这一计划<sup>[24]</sup>。GPM核心卫星上装载了由Ku(13.6 GHz)和Ka(35.5 GHz)组成的双频降水测量雷达(Dual-frequency Precipitation Radar, DPR),DPR与同星配置的微波成像仪(GPM

Microwave Imager, GMI) 以及同期在轨的其他欧美极轨气象卫星上装载的微波辐射计配合,完成全球降水测量任务。

FY-3 气象卫星规划有两颗降水星,首颗降水星 FY-3G 是 03 批的 07 星,计划 2022 年发射,配置装载双频降水测量雷达、微波成像仪、降水型中分辨率光谱成像仪和 GNSS (Global Navigation Satellite System) 掩星大气探测仪,以及试验载荷近红外偏振

成像仪和高精度定标器。表 4 列出了 FY-3 降水星、GPM 核心卫星以及下一代欧美业务极轨气象卫星 NPP (National polar-orbiting operational environmental satellite system Preparatory Project) 和欧洲下一代极轨业务气象卫星 EPS-SG (Eumetsat Polar System-Second Generation) 上的降水测量载荷配置情况<sup>[25]</sup>。FY-3 降水星整体降水探测设计能力不仅优于 NPP 和 EPS-SG,也优于 TRMM 和 GPM。

表 4 低轨卫星降水测量载荷配置比较

Table 4 Comparison of precipitation measurement load configuration of low earth orbit (LEO) satellites

卫星	降水测量载荷	可测关键地球物理参量
FY-3G	双频降水测量雷达 (DPR)	降水三维结构、降雨率、混合层特性、水凝物、大气可降水、大气温湿度廓线、地表温湿度等
	微波成像仪 (MERI-RM)	
	中分辨率光谱成像仪 (MERSI-RM)	
	GNSS 掩星探测仪 (GNOS-II)	
	近红外偏振成像仪 (MAPI)	
TRMM	高精度定标器 (HAOC)	降水三维结构、降雨率、混合层特性、水凝物、大气可降水、地表温湿度
	降水测量雷达 (PR)	
	TRMM 微波成像仪 (TMI)	
	可见光红外扫描仪 (VIRS)	
GPM	云和地球辐射能量系统 (CERES)	降水三维结构、降雨率、混合层特性、水凝物、大气可降水、地表温湿度
	双频降水雷达 (DPR)	
	微波成像仪 (GMI)	
NPP	先进技术微波探测仪 (ATMS)	降雨率、水凝物、大气可降水、大气温湿度廓线等
	可见光红外成像辐射计 (VIIRS)	
EPS-SG-A/B	微波成像仪 (MWI)	降雨率、水凝物、大气可降水等
	微波探测仪 (MWS)	

FY-3 降水星和 GPM 核心卫星的主载荷都是双频降水测量雷达 (Ku/Ka),能探测台风暴雨等强对流降水系统的三维结构,识别降水类型、获取降水层高度等信息,反演得到准确的降水强度。而 FY-3 降水星上装载的另一个重要载荷是微波成像仪,利用设置在大气窗区和氧气及水汽吸收线附近的微波通道,协和反演降水参数。

主被动微波降水测量具有很强的互补性,降水测量雷达能得到降水的廓线信息,而微波成像仪可以得到整个路径上的总降水;降水测量雷达的观测刈幅较窄但精度高,微波成像仪的宽刈幅能够大大提高降水测量的地面覆盖率。同时,降水测量雷达为被动微波反演提供丰富的云/辐射数据库,支撑 FY-3 气象卫星星座多星装载的被动微波辐射计在统一框架下建立反演模型,得到全球高时效降水产品。

FY-3 降水星装载的降水型中分辨率光谱成像仪保留了原 FY-3 气象卫星中分辨率光谱成像仪中用于云和降水探测的通道,略去了海洋水色探测通道,除用于获取可见光/红外云图外,还可获取云顶温度、有效粒子半径和云形态学方面的参数,辅助检测降水云,改进微波降水反演结果。另外,由于目前静止轨道风云气象卫星上还没有微波遥感仪器,静止气象卫星使用红外通道来进行降水估计,所以 FY-3 降水星上的降水型中分辨率光谱成像仪还是联系极轨卫星微波降水测量结果和静止轨道卫星红外降水估计结果的桥梁。此外 FY-3 降水星还装载了带有海反功能的 GNSS 掩星探测仪 GNOS,能够获得高垂直分辨率的大气温度和湿度廓线,以及海面风场信息。

## 2.2 降水探测载荷性能分析

星载降水雷达是卫星降水探测的主载荷。星载

降水主动探测始于1997年美、日联合实施的热带降水测量计划 TRMM<sup>[23]</sup>, TRMM 卫星上装载的单频降水测量雷达 PR, 是由128个单元组成的有源相控阵系统, 工作在13.8 GHz, 使用了频率捷变技术在固定脉冲重复频率下获得64个独立样本。TRMM 之后美、日的全球降水测量计划 GPM 核心卫星上装载了由 Ku(13.6 GHz) 和 Ka(35.5 GHz) 组成的双频降水测量雷达 DPR 提升降水探测能力<sup>[24]</sup>。FY-3 降水星上装载的降水雷达也是 Ka/Ku 双频雷达, 是单极化一维相控阵降水测量雷达 (Precipitation Measurement Radar, PMR), 在轨可以进行侧摆机动观测。

降水测量雷达是降水测量卫星的核心载荷, 表5归纳了国内外星载降水雷达特性。FY-3 PMR 和 GPM/DPR 相比 TRMM/PR 都增加了 Ka 频段雷达, 能够获得比单频雷达更高精度的降水测量结果。在水平分辨率相当的情况下, FY-3 降水测量雷达的刈幅宽度要大于 PR 和 DPR, 从而可以捕捉到更多的降水事件。另外, FY-3 降水测量雷达的天线旁瓣电平低于 DPR 和 PR, 有利于抑制地面杂波的影响、减小测量误差。对比分析表明, FY-3 降水测量雷达与在轨的 GPM/DPR 降水探测能力相当, 优于 TRMM 卫星 PR 的降雨测量能力<sup>[12, 25-26]</sup>。

表5 降水测量雷达主要性能参数对比

Table 5 Comparison of main performance parameters of precipitation measurement radars

雷达系统	频段	地面 刈幅/km	水平分辨率/ km(天底点)	距离 分辨率/m	观测 距离/km	脉冲 重复 技术	最小可检测 降水强度/ (mm·h <sup>-1</sup> )	动态 范围/ dB	测量 精度/ dB	波束匹配 精度/(°)	独立 样本数	天线峰值 旁瓣 电平/dB
FY-3 RM/PMR	双频(Ku, Ka)	303	5	250	18~-5 ASL	可变	0.5(Ku), 0.2(Ka)	≥70	≤±1	≤0.1	≥64	≤-30
GPM/DPR	双频(Ku, Ka)	245(Ku), 115(Ka)	5	250(Ku), 250/500(Ka)	18~-5 ASL(Ku), 18~-3 ASL(Ka)	可变	0.5(Ku), 0.2(Ka)	≥70	≤±1	≤0.14	≥96	≤-25
TRMM/PR	单频(Ku)	245	5	250	15~-5 ASL	固定	0.7	≥70	≤±1	无	≥64	≤-25

微波成像仪是星载降水探测的重要载荷。FY-3 系列微波成像仪包括 MWRI、MWRI-II 和 MWRI-RM 三种型号, 其中 MWRI-II 在 10~118 GHz 频段设置了双极化通道, 装载在综合卫星平台上; MWRI-RM 在 10~183 GHz 频段设置了双极化通道, 装载在降水测量卫星平台上。气象卫星上装载的微波成像仪为降水测量提供了宽刈幅观域, 表6给出了目前和未来即将在轨的代表性微波成像仪的频点设置参数, 包括 FY-3/MWRI-II/MWRI-RM、GPM/GMI 和 EPS-SG 上装载的用于降水测量的微

波成像仪 MWI (MicroWave Imager)<sup>[27]</sup>。FY-3G/MWRI-RM 相比 GPM/GMI 多了 52.0 GHz 和 118.0 GHz 两组大气氧气吸收线附近的 8 个探测通道, 双氧吸收通道联合对陆地弱降水探测, 以及融化层位置及厚度的探测等具有探测优势。FY-3G/MWRI-RM 相比 EPS-SG/MWI 多了低频 10.6 GHz 的窗区通道, 对陆地强降水探测具有优势。分析表明 FY-3/MWRI-RM 与未来在轨的 EPS-SG/MWI 的性能相当, 优于 GPM/GMI。

表6 微波成像仪通道频点设置

Table 6 Channel frequency point setting of microwave radiation imager

频点序号	FY-3/MWRI-RM/GHz	FY-3/MWRI-II/GHz	GPM/GMI/GHz	EPS/MWI/GHz
1	10.65(V/H)	10.65(V/H)	10.65(V/H)	
2	18.00(V/H)	18.00(V/H)	18.70(V/H)	18.70(V/H)
3	23.80(V/H)	23.80(V/H)	23.80(V)	23.80(V/H)
4	31.40(V/H)	31.40(V/H)	36.50(V/H)	31.40(V/H)
5	50.30(V/H)	50.30(V/H)		50.30(V/H)
6	52.61(V/H)	52.61(V/H)		52.61(V/H)
7	53.24(V/H)	53.24(V/H)		53.24(V/H)

续表

频点序号	FY-3/MWRI-RM/GHz	FY-3/MWRI-II/GHz	GPM/GMI/GHz	EPS/MWI/GHz
8	53.75(V/H)	53.75(V/H)		53.75(V/H)
9	89.00(V/H)	89.00(V/H)	89.00(V/H)	89.00(V/H)
10	118.7503±3.2(V)	118.7503±3.2(V)		118.7503±3.2(V)
11	118.7503±2.1(V)	118.7503±2.1(V)		118.7503±2.1(V)
12	118.7503±1.4(V)	118.7503±1.4(V)		118.7503±1.4(V)
13	118.7503±1.2(V)	118.7503±1.2(V)		118.7503±1.2(V)
14	166.00(V)			165.5±0.75(V)
15	183.31±2.0(V)			183.31±2.0(V)
16			183.31±3.4(V)	183.31±3.4(V)
17	183.31±3.4(V)			183.31±4.9(V)
18				183.31±6.1(V)
19	183.31±7.0(V)		183.31±7.0(V)	183.31±7.0(V)

陆地弱降水是星载微波降水反演难题。来自地表复杂强大的背景微波辐射会完全掩盖大气弱降水的发射/吸收信号。晴空背景差、极化亮温差等方法都试图利用辐射变化量反演降水,但也都遇到了地表极化差强弱不一、晴空亮温推算误差大等问题的困扰。FY-3 微波成像仪分别在 50~54 GHz 和 118 GHz 大气氧气吸收线附近设置了两组探测通道,对于同一中心频点的一组通道而言,地表比辐射率相同,降低了反演方程的非适定性,可以反演得到陆地弱降水。

FY-3 微波探测仪主要用于探测大气温湿廓线,支撑数值预报同化应用,包括 MWTS-II/III 和 MWHS-I/II 两类多种型号。MWTS-II/III 通过在 50~60 GHz 氧气吸收频段设置的一组 13 或 15 个通道探测大气温度廓线;MWHS-II 在 118 GHz 氧气线设置了一组 8

个通道用于大气温度廓线探测,同时在 183 GHz 频段设置了一组 5 个通道用于大气湿度廓线探测。后续 FY-3 规划中,MWTS-III 和 MWHS-II 均装载在 FY-3 气象卫星综合平台上,为降水测量提供宽刈幅观域。表 7 给出了目前和未来即将在轨的国际上代表性微波探测仪的频点设置参数,包括 FY-3/MWTS-II/MWTS-III、FY-3/MWHS-II、JPSS/ATMS 和 EPS-SG 上装载的微波探测仪 MWS。FY-3/MWTS-III/MWHS-II 除了具有 ATMS 相同的探测频点外,在 118 GHz 增设了一组 8 个探测通道,能够提高大气温度探测精度;同时在 50~60 GHz 吸收峰增加了 2 个通道,改善高层大气温度探测精度。相比 EPS-SG/MWS, FY-3 微波探测缺少高频 229 GHz 通道。但 FY-3 的双氧通道联合对陆地弱降水,以及融化层位置及厚度的探测等具有优势。

表 7 微波探测仪通道频点设置

Table 7 Channel frequency point setting of microwave sounder

通道序号	中心频点/GHz	EPS/MWS	JPSS/ATMS	FY-3(02)/MWTS-II+MWHS-II	FY-3(03)/MWTS-III+MWHS-II
1	23.80	✓	✓	—	✓
2	31.40	✓	✓	—	✓
3	50.30	✓	✓	✓	✓
4	51.76	—	✓	✓	✓
5	52.80	✓	✓	✓	✓
6	53.246±0.08	✓	—	—	✓
7	53.596±0.115	✓	✓	✓	✓
8	53.948±0.081	✓	—	—	✓
9	54.40	✓	✓	✓	✓
10	54.94	✓	✓	✓	✓
11	55.50	✓	✓	✓	✓
12	57.290 344( $f_0$ )	✓	✓	✓	✓
13	$f_0 \pm 0.217$	✓	✓	✓	✓

续表

通道序号	中心频点/GHz	EPS/MWS	JPSS/ATMS	FY-3(02)/MWTS-II+MWHS-II	FY-3(03)/MWTS-III+MWHS-II
14	fo±0.322 2±0.048 0	✓	✓	✓	✓
15	fo±0.322 2±0.022 0	✓	✓	✓	✓
16	fo±0.322 2±0.010 0	✓	✓	✓	✓
17	fo±0.322 2±0.004 5	✓	✓	✓	✓
18	89.00	✓	✓	✓	✓
19	118.75±0.08	—	—	✓	✓
20	118.75±0.20	—	—	✓	✓
21	118.75±0.30	—	—	✓	✓
22	118.75±0.80	—	—	✓	✓
23	118.75±1.10	—	—	✓	✓
24	118.75±2.50	—	—	✓	✓
25	118.75±3.00	—	—	✓	✓
26	118.75±5.00	—	—	✓	✓
27	166.00	✓	✓	✓	✓
28	183.31±1.0	✓	✓	✓	✓
29	183.31±1.8	✓	✓	✓	✓
30	183.31±3.0	✓	✓	✓	✓
31	183.31±4.5	✓	✓	✓	✓
32	183.31±7.0	✓	✓	✓	✓
33	229.00	✓	—	—	—

注：“✓”表示有此频点，“—”表示无此频点。

### 2.3 星座降水探测能力分析

在FY-3系列卫星规划中,2028年之前将有5颗卫星发射,加上目前正在轨的FY-3D/E 2颗卫星,FY-3将有7颗卫星在轨,其中只有1颗超设计寿命,其余6颗均在8年设计寿命内,其中有2颗为非太阳同步轨道低倾角降水测量卫星,5颗太阳同步极地轨道气象卫星,这7颗卫星将组成FY-3降水测量星座。这些卫星一天内过境的交点地方时情况大致如图2所示,其中2颗降水测量卫星如果按照伴飞的方式来考虑,整个FY-3降水测量星座除下午到傍晚时段外,其他时段可得到优于3h的降水探测结果,如果再融合静止轨道红外降水估计结果,可以得到0.5h时间分辨率的降水数据。按卫星计划目前美国GPM降水测量星座中只含有5颗卫星,如果后续欧美没有新的降水测量卫星发射计划,未来2028年前后FY-3降水测量星座的降水探测能力将超过GPM计划,届时将为全球降水测量提

供风云解决方案。

在FY-3降水测量体系中,专用降水测量卫星的轨道特性决定了降水测量雷达的地域覆盖能力。FY-3降水星着力于台风等灾害性天气系统的强降水监测,提供中国区域降水系统三维结构信息,弥补国内地基雷达观测范围受限的弱点。为了实现这一目标,FY-3降水测量卫星的轨道高度设计为407km,倾角50°,探测范围可以有效覆盖我国受台风暴雨影响主要区域。TRMM卫星重点关注热带地区降水,轨道高度为350km,倾角35°,只能覆盖南北纬38°之间的区域;GPM卫星轨道高度为407km,倾角65°,可覆盖地球表面90%的区域。图3是FY-3降水星轨道覆盖情况,佳木斯、喀什和广州三站接力接收FY-3降水星资料,确保资料的完整性;同时通过中继卫星回传数据,提高降水探测数据的时效。在FY-3降水测量体系中,其他太阳同步轨道综合业务卫星包括上下午和晨昏三条轨

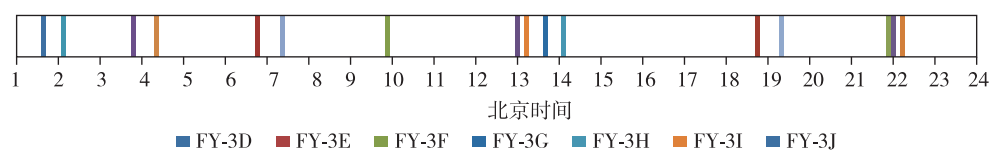


图2 FY-3系列卫星交点地方时

Fig.2 Local ECT (equatorial crossing time) of FY-3 satellite series



道,均能覆盖全球,综合业务平台上装载的微波探测仪轨道刈幅宽度可达 2 400 km,微波成像仪轨道刈幅宽度超过 1 000 km,而降水测量卫星上装载的微波成像仪刈幅宽度为 800 km,降水测量雷

达刈幅宽度为 300 km(表 8),这些系列卫星可通过携带的被动微波辐射计测量降水,同时传递降水测量卫星的高精度降水测量结果,实现 FY-3 卫星全球降水测量。

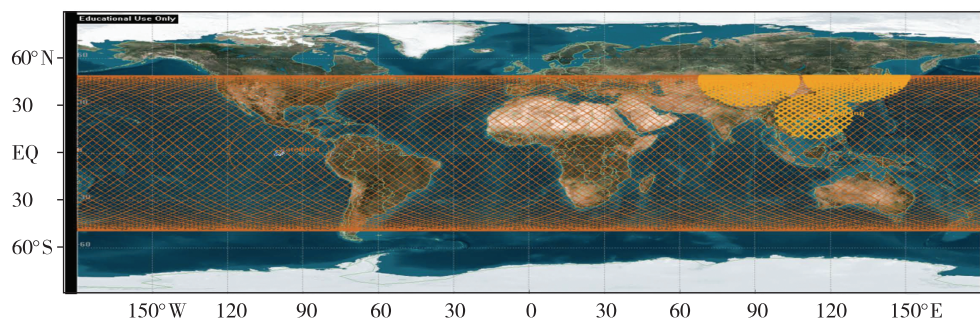


图 3 FY-3 降水星轨道覆盖及地面站有效接收覆盖区域

Fig.3 Orbit coverage of FY-3 precipitation measurement satellite and effective receiving coverage area of ground stations

表 8 FY-3 卫星降水测量载荷轨道刈幅宽度

Table 8 Track clipping width of precipitation measurement load of FY-3 satellites

载荷	卫星	扫描刈幅宽度/km
PMR	FY-3G/I	300
MWRI-RM	FY-3G/I	800
MWRI-II	FY-3D/F/H	1 400
MWTS-III	FY-3D/E/F/H/J	2 400
MWHS-II	FY-3D/E/F/H/J	2 400

### 3 后续风云卫星计划降水探测技术发展

后续风云卫星计划包括 FY-5 气象卫星、FY-4 微波星和 FY-6 卫星。其中 FY-5 气象卫星将继续保持上下午、晨昏和低倾角降水测量星座体系,降水测量雷达将在 PMR 基础上,增加多极化和偏振探测能力,同时发展多普勒测量技术获取降水系统内部流场结构信息;在 FY-5 规划中还将利用极轨核心业务平台和降水测量卫星平台上装载的 5~183 GHz 宽刈幅多谱段高分辨率微波成像仪,获取全球降水分布信息;利用微波高光谱大气探测仪获取大气降水参数;利用亚毫米波冰云探测仪获取大气冰云信息及冰水路径参数;利用云雷达获取降水前期物云粒子的特性参数;利用短波近红外偏振成像仪获取气溶胶及云参数;利用红外高光谱大气探测仪获取大气不稳定信息;借助高分辨率气象合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR),获取暴雨气象灾害监测信息。这些新的探测手段将进一步提高气象防灾减灾能力。

新一代静止轨道风云卫星包括静止轨道微波

星和 FY-6 卫星,静止轨道微波星将获取高时间分辨率的中国及周边区域台风暴雨等灾害性天气系统内部结构和地面瞬时雨强的探测结果;同时继续利用静止轨道光学成像仪,获取高时间分辨率降水估计结果。

总之,在后续风云卫星计划中,将通过高低轨互联和协同观测,充分发挥低轨的高空间分辨率和高轨的高时间分辨率的优势,形成台风暴雨等灾害性天气系统从初生、发生发展演变到消亡全生命周期,以及灾后地面灾情监测的全链条星载探测。而主动云雨测量、微波高光谱、亚毫米波/太赫兹探测、短波近红外偏振测量等新技术将是支撑后续风云卫星实现高质量降水探测的核心技术。

### 4 小结

降水是全球能量/水循环中的重要过程。FY-3 以降水星为专用降水测量卫星,与其他极轨业务星组成 FY-3 气象卫星降水探测体系,经分析得到如下结论:

(1)FY-3 降水星装载的降水测量雷达设计性能与在轨的 GPM 核心星第二代降水雷达 DPR 的性能相当,结合微波成像仪通道及其他载荷配置,FY-3 降水星整星降水探测能力优于 GPM 核心卫星。

(2)2028 年前后 FY-3 降水星由上下午、晨昏和低倾角四条轨道组成的星座体系的综合降水测量能力将超过美国降水测量星座计划。

(3)后续风云卫星通过高低轨互联和协同观测,将形成台风暴雨等灾害性天气系统从初生、发生发展演变到消亡的全生命周期,以及从灾前到灾

后地面灾情的全链条星载探测。

风云卫星将通过不断提升星载降水探测能力,促进我国降水探测及预报准确性的提高,加深对水量水循环系统的认识,进而增强我国应对全球极端天气和气候变化的能力。

**致谢:**在成文过程中得到 FY-3 降水星技术团队的大力支持,在此致谢!

### 参考文献:

- [1] KIDD C. Satellite rainfall climatology: a review[J]. *Int J Climatol*, 2001, 21(9): 1041-1066.
- [2] 刘元波,傅巧妮,宋平等.卫星遥感反演降水研究综述[J].*地球科学进展*, 2011, 26(11): 1162-1172.
- [3] 卢乃锰,吴蓉璋.强对流降水云团的云图特征分析[J].*应用气象学报*, 1997, 8(3): 269-275.
- [4] 卢乃锰,谷松岩.气象卫星发展回顾与展望[J].*遥感学报*, 2016, 20(5): 832-841.
- [5] 秦思,姚美,任福民,等.强台风“菲特”(1323)极端降水研究进展[J].*海洋气象学报*, 2021, 41(1): 11-18.
- [6] 马艳,董海鹰,郝燕,等.登陆青岛的热带气旋及其降水特征分析[J].*海洋气象学报*, 2021, 41(1): 109-118.
- [7] 周冠博,董林,柳龙生,等.2007号台风“海高斯”快速加强的成因分析[J].*海洋气象学报*, 2021, 41(1): 100-108.
- [8] 吴泽铭,张冬娜,胡春迪,等.西北太平洋热带气旋频数及生成位置的气候变化研究进展[J].*海洋气象学报*, 2020, 40(4): 1-10.
- [9] 范天锡.风云三号气象卫星的特点和作用[J].*气象科技*, 2002, 30(6): 321-327.
- [10] 杨军,董超华,卢乃锰,等.中国新一代极轨气象卫星:风云三号[J].*气象学报*, 2009, 67(4): 501-509.
- [11] 尹红刚,商建,吴琼,等.风云三号降水测量雷达技术性能分析[J].*气象科技*, 2017, 45(5): 795-803.
- [12] 尹红刚,吴琼,谷松岩,等.风云三号(03)批降水测量卫星探测能力及应用[J].*气象科技进展*, 2016, 6(3): 55-61.
- [13] 陈洪滨,尹红刚,何文英.星载主动微波遥感云和降水技术与应用[M].北京:科学出版社,2020.
- [14] YANG Z D, LU N M, SHI J M, et al. Overview of FY-3 payload and ground application system[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2012, 50(12): 4846-4853.
- [15] 张鹏,杨虎,邱红,等.风云三号卫星的定量遥感应用能力[J].*气象科技进展*, 2012, 2(4): 6-11.
- [16] ZHANG P, LU Q F, HU X Q, et al. Latest progress of the Chinese meteorological satellite program and core data processing technologies [J]. *Adv Atmos Sci*, 2019, 36(9): 1027-1045.
- [17] 陆其峰.风云三号 A 星大气探测资料数据在欧洲中期天气预报中心的初步评价与同化研究[J].*中国科学:地球科学*, 2011, 41(7): 890-894.
- [18] ZOU X, WANG X, WENG F, et al. Assessments of Chinese FengYun microwave temperature sounder (MWTS) measurements for weather and climate applications [J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 2011, 28(10): 1206-1227.
- [19] ZOU X L. Studies of FY-3 observations over the past 10 years: a review[J]. *Remote Sens*, 2021, 13(4): 673.
- [20] 郭杨,卢乃锰,谷松岩,等.FY-3C 微波湿温探测仪辐射测量特性[J].*应用气象学报*, 2014, 25(4): 436-444.
- [21] 郭杨,卢乃锰,漆成莉,等.风云三号 C 星微波湿温探测仪的定标和验证[J].*地球物理学报*, 2015, 58(1): 20-31.
- [22] GUAN L, ZOU X, WENG F, et al. Assessments of FY-3A microwave humidity sounder measurements using NOAA-18 microwave humidity sounder (MHS) [J]. *J Geophys Res*, 2011, 116 (D10): D10106.
- [23] KUMMEROW C, SIMPSON J, THIELE O, et al. The status of the tropical rainfall measuring mission (TRMM) after two years in orbit [J]. *J Appl Meteor*, 2000, 39(12): 1965-1982.
- [24] DRAPER D W, NEWELL D A, WENTZ F J, et al. The global precipitation measurement (GPM) microwave imager (GMI): instrument overview and early on-orbit performance [J]. *IEEE J-STARS*, 2015, 8(7): 3452-3462.
- [25] 吴琼,商建,仰美霖,等.基于滴谱分布的机载雷达波束匹配情况研究[J].*气象学报*, 2013, 71(3): 547-554.
- [26] 吴琼,杨虎,商建,等.星载双频测雨雷达航空校飞试验降水反演分析[J].*气象学报*, 2013, 71(1): 159-166.
- [27] MWS Science Advisory Group. EPS-SG microwave sounder (MWS) science plan [EB/OL]. (2019-01-23) [2022-01-27]. <https://www.eumetsat.int/media/43204>.