

风云三号(03)批降水测量卫星探测能力及应用

尹红刚 吴琼 谷松岩 卢乃锰 商建 窦芳丽

(国家卫星气象中心, 中国气象局, 北京 100081)

摘要: 风云三号(03)批是我国第二代极轨业务气象卫星的第三个批次, 由上午、下午、晨昏和降水测量四颗业务卫星组成。其中, 我国首发的降水测量卫星计划装载双频降水测量雷达、微波成像仪、GNSS掩星探测仪和光学成像仪。通过仿真技术, 分析风云三号降水测量卫星的功能、性能和设计指标, 探讨其降水探测能力。分析表明, 风云三号降水测量卫星装载的降水测量雷达从设计层面分析, 与美日第二代降水测量卫星GPM搭载的降水雷达DPR性能相当; 风云三号降水测量卫星的轨道设计覆盖了南、北纬50°范围内的热带和中纬地区, 对影响我国区域的台风系统结构具有三维探测能力; 风云三号降水测量卫星上装载的被动微波辐射计相比GPM搭载的微波成像仪增加了50~60和118GHz双氧吸收通道, 对陆地弱降水反演等具有应用潜力。总之, 风云三号降水测量卫星加上同星配置的其他载荷, 整星的降水探测能力优于美日第二代降水测量卫星GPM。

关键词: 风云三号(03)批, 降水测量卫星, 降水测量雷达, 微波成像仪

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.03.007

Analysis of Rainfall Measurement Power in the FY-3(03) Rain Measurement Satellite

Yin Honggang, Wu Qiong, Gu Songyan, Lu Naimeng, Shang Jian, Dou Fangli

(National Satellite Meteorological Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract: As the third pitch of Chinese second generation operational meteorological satellites on polar orbits, FengYun-3 (03) pitch satellites consist of one early morning orbit satellite, one morning orbit satellite, one afternoon orbit satellite and one rain measurement satellite. The primary instruments being loaded on the FengYun-3 rain measurement satellite (FY3-RM) are the dual-frequency precipitation measuring radar (PMR), the microwave imager (MWRI), the simple type median resolution spectral imager (MERSI-S) and the global navigation satellite system (GNSS) radio occultation sounder. This article analyze the function, performance and the designed characteristics of the FY3-RM by using simulation technology, and discusses its power of measuring precipitation. The analysis results show that, 1) the PMR has the same precipitation measuring ability as the Global Precipitation Measurement (GPM) dual-frequency precipitation radar (DPR); 2) the FY3-RM can detect the three dimension structure of the typhoons effected on China; 3) the additional channels between 50 GHz and 60 GHz and channels around 118 GHz increase the MWRI sensitivity to light precipitation over land, comparing to the GPM microwave imager. Therefore, the whole power of precipitation measurement of the FY3-RM, altogether with other instruments onboarded, is better than that of the GPM satellite.

Keywords: FengYun-3 (03) pitch satellites, rain measurement satellite, precipitation measuring radar, microwave imager

0 引言

降水是全球能量/水循环中的重要过程。在台风、暴雨和强对流等灾害性天气过程中, 对降水的监测和预报是业务天气预报最重要的内容之一。在气象卫星出现之前, 气象业务中对降水监测的主要手段包括地面雨量计和地基天气雷达, 两种观测技术对揭示降水的区域结构和分布特征具有重要意义。进入20世纪, 对降水系统的瞬时结构特征和全球分布特征的认

识成为人们实现减灾防灾、理解全球气候变化的重要内容。气象卫星等天基降水测量技术带来新的观测视角, 具有地基测量所无法比拟的优势, 可以有效地获取海洋、山区和沙漠等广大无人值守区域的降水信息, 成为全球覆盖的降水观测的唯一有效手段。

1988年我国第一颗气象卫星风云一号A星升空。经过近三十年的发展, 主动测量成为星载降水测量的发展方向^[1], 相应的星载降水反演算法技术也在不断发展^[2]。

星载降水主动探测始于1997年, 日美联合实施了热带降水测量计划(TRMM), 发射了装载降水雷达(precipitation radar, PR)的TRMM卫星^[3]。PR的工

收稿日期: 2015年9月18日; 修回日期: 2015年11月24日

第一作者: 尹红刚(1979—), Email: yinhg@cma.gov.cn

作频率为13.8GHz，是由128个单元组成的有源相控阵系统，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。除PR外，TRMM卫星还装载了微波成像仪（TMI）、可见光红外扫描仪（VIRS）、云和地球辐射能量测量系统（CERES）和闪电成像仪（LIS），多种遥感器联合实现降水的星载探测。

继TRMM计划后，美国和日本又进一步提出了全球降水测量计划（GPM），已有多个国家和组织加入了这一计划^[4]。GPM核心卫星上装载双频降水雷达（DPR），DPR由Ku波段（13.6GHz）降水雷达KuPR和Ka波段（35.55GHz）降水雷达KaPR组成。在已经发射的GPM核心卫星上，DPR与同星配置的微波成像仪GMI（GPM Microwave Imager）配合，完成全球降水测量任务。

发展风云三号降水测量卫星（FengYun-3 Rain Measurement, FY-3 RM），旨在通过提升我国星载降水探测能力，促进提高我国降水预报的准确性，进而增强我国应对全球极端天气和气候变化的能力，并加深对地球能量/水循环系统的认识。为此，我国风云三号（03）批计划发展风云降水测量卫星，设计装载Ka和Ku频段组合的双频、单极化一维相控阵降水测量雷达（precipitation measurement radar, PMR），与微波成像仪联合实现降水探测，同星装载的光学成像仪和GNSS掩星大气探测仪可同时提供大气云和温湿廓线等信息。

表1归纳了国内外主要的降水测量卫星的探测能力。可以看到，风云三号降水测量卫星整体降水探测能力要远优于TRMM，部分关键探测能力也要优于GPM。本文将对风云三号降水测量卫星的探测能力和应用展开详细描述。

1 风云三号降水测量卫星轨道设计

降水测量卫星的轨道设计决定了卫星测量降水的地域覆盖能力。TRMM卫星重点关注热带地区降水，

轨道高度350km，倾角35°，只能覆盖以赤道为中心南北、纬38°之间的区域，无法满足我国北方广阔地区的降水测量需求^[3]；GPM核心卫星轨道高度407km，倾角65°，可覆盖地球表面90%的区域^[4]。风云三号降水测量雷达卫星着力于台风等灾害性天气系统强降水的监测，提供全球中低纬度地区降水的三维结构信息，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，需要科学设计风云三号降水测量卫星的轨道高度和倾角。

1.1 轨道高度设计

卫星轨道高度和星上载荷对地视场角确定后，卫星对地观测的幅宽就确定下来了，卫星轨道高度越高，星上载荷的观测幅宽越宽。降水测量卫星主载荷降水测量雷达设计上将进行约±20.3°的交轨方向扫描，其观测幅宽与卫星轨道高度间在小视场角条件下近似呈线性关系（图1）。

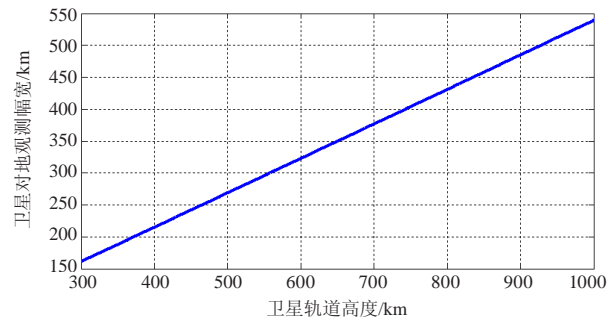


图1 降水雷达观测幅宽与卫星轨道高度的关系
Fig. 1 The relationship between the observation swaths and the altitudes of FY-3 RM

卫星轨道高度不仅决定了载荷的观域，还会影响降水的测量精度。对于星载降水测量雷达而言，地表的后向散射回波要比降水粒子的回波强很多。当降水测量雷达进行交轨方向扫描时，地面杂波会通过天线主瓣和旁瓣污染降水回波。卫星轨道高度越高，降水回波受地面杂波的干扰就越严重。

表1 FY-3 RM、GPM和TRMM卫星降水探测能力对比

Table 1 Comparisons of measurement power between FY-3 RM, GPM and TRMM

卫星	FY-3 RM	GPM	TRMM
平台	50°倾角，覆盖包括中国全境的中低纬度地区	65°倾角，覆盖全球绝大部分地区	35°倾角，覆盖热带等低纬度地区
降水测量载荷	降水测量雷达 微波成像仪 中分辨率光谱成像仪（简化） GNSS掩星探测仪	DPR GMI	PR VIRS CERS LIS
关键探测能力	降水测量雷达： 300km刈幅 双频，反演精度更高 天线旁瓣电平≤-30dB 微波成像仪： 两组氧气吸收通道，可探测陆地弱降水 150GHz以上高频通道，可探测固态降水	DPR： 245km刈幅 双频，反演精度更高 天线旁瓣电平≤-25dB，易受地面杂波干扰 GMI： 150GHz以上高频通道，可探测固态降水 无氧气吸收通道	PR： 245km刈幅 单频，无法反演微物理参数 天线旁瓣电平≤-25dB 微波成像仪： 无氧气吸收通道和高频通道

图2给出了Ku波段降水测量雷达在不同轨道高度时杂波的干扰情况。图中横坐标表示天线扫描角度，纵坐标表示计算点沿天线视轴方向到海面的倾斜距离（即倾斜高度），图2a右侧的色标表示降水回波与杂波比值（SCR）的色彩值映射关系。一般认为SCR值大于0dB就能够测量到降水，从图中可以看到0dB对应的等值线高度以上区域降水测量基本不受地表杂波干扰。风云三号降水测量雷达天线扫描角最大约为20.3°，卫星的轨道高度越高，地表杂波干扰层的高度也越高，为了尽可能提高近地面降水测量精度，卫星轨道高度不宜设计过高。表2给出了卫星轨道高度和地表杂波干扰高度之间的关系。

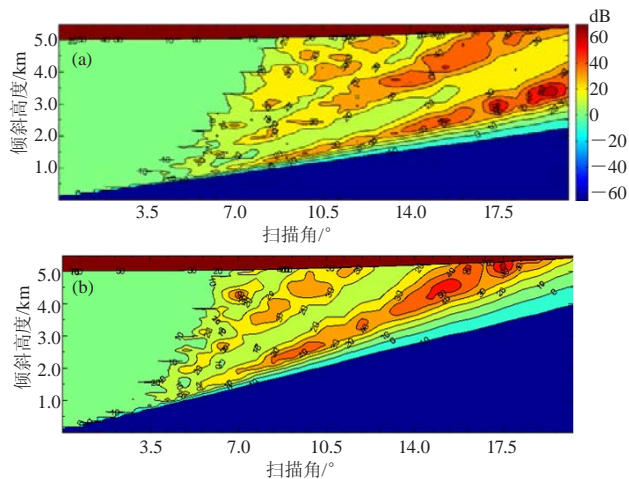


图2 Ku波段400km (a) 和700km (b) 卫星轨道高度对应的SCR比值

Fig. 2 The SCR values for Ku band PMR at different altitudes of the FY-3 RM: (a) 400km; (b) 700km

由于星载降水测量雷达所测量的降水的最大等效反射率因子通常出现在3km左右，因此需要地表杂波的干扰要低于3km，这意味着此时卫星的轨道高度应低于500km。

另外，当降水测量雷达进行交轨方向的扫描时，在扫描刈幅的边缘展开的天线波束会造成同一扫描单元（即雷达分辨体积）涵盖了不同高度的降水层，形成所谓的分辨率垂直拖影。风云三号降水测量雷达的天线半功率波束宽度约为0.71°，最大扫描角为20.3°，不同轨道高度情况下计算得到的最大扫描角时的分辨率垂直拖影如图3所示。通常最薄的层状云降水

只有3km左右，而融化层的厚度最厚可以达到1km。在这种极端情况下，如果分辨率的垂直拖影高度大于2km，那么此时地表附近的雷达分辨体积内就会包含多种相态的水凝物，甚至无法识别出融化层，同时较强的地表杂波干扰也会直接从天线主瓣进入，从而造成降水反演的难度，加大反演误差。因此，需要分辨率垂直拖影的高度低于2km，这意味着在0.71°的波束宽度下，卫星的轨道高度不能超过420km。综合分析并考虑卫星轨道高度的漂移，风云三号降水测量卫星的标称轨道高度设计为407km。

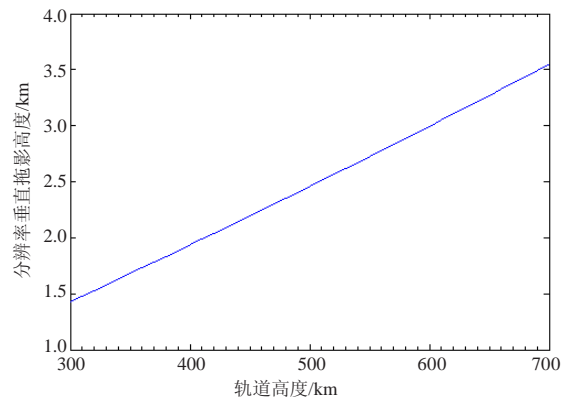


图3 分辨率垂直拖影高度与轨道高度的关系
Fig. 3 The relationship between the vertical resolution smearings and the altitudes of FY-3 RM

1.2 轨道倾角设计

风云三号降水测量卫星的重要科学目标是探测台风强降水，揭示台风降水内部的三维物理结构，为预测和评估台风灾害提供服务。因此，降水测量卫星轨道倾角的设计原则是降水测量卫星的观测范围应覆盖我国受台风影响的绝大部分区域。

为分析影响我国的台风登陆路径和影响范围，收集了2001—2008年我国登陆台风的相关数据，对台风移动路径进行了统计分析（图4）。影响我国的绝大部分台风都在40°N以南消亡，少数可以发展到45°W附近。但是，对台风降水的研究表明，在东北一些高纬度地区受台风影响程度也日趋严重，台风暴雨占当地强降雨比例较高^[5]。

为使风云三号降水测量卫星的有效探测范围覆盖我国北方广大受台风暴雨影响的区域，风云三号降水测量卫星轨道倾角最终设计为50°，以测量南、北纬50°范围内降水系统的三维结构。

2 降水测量卫星探测能力分析

2.1 载荷配置分析

风云三号降水测量卫星的主要科学应用目标是提高天基降水测量能力，加深对台风暴雨结构、降水微

表2 卫星轨道高度与地表杂波干扰高度的关系

Table 2 The Relationship between the clutter effected heights and the altitudes of FY-3 RM

轨道高度/km	350	400	450	500	550	600	650	700
倾斜高度/km	2.24	2.56	2.88	3.21	3.54	3.87	4.21	4.56
垂直高度/km	2.08	2.38	2.67	2.98	3.28	3.58	3.89	4.21

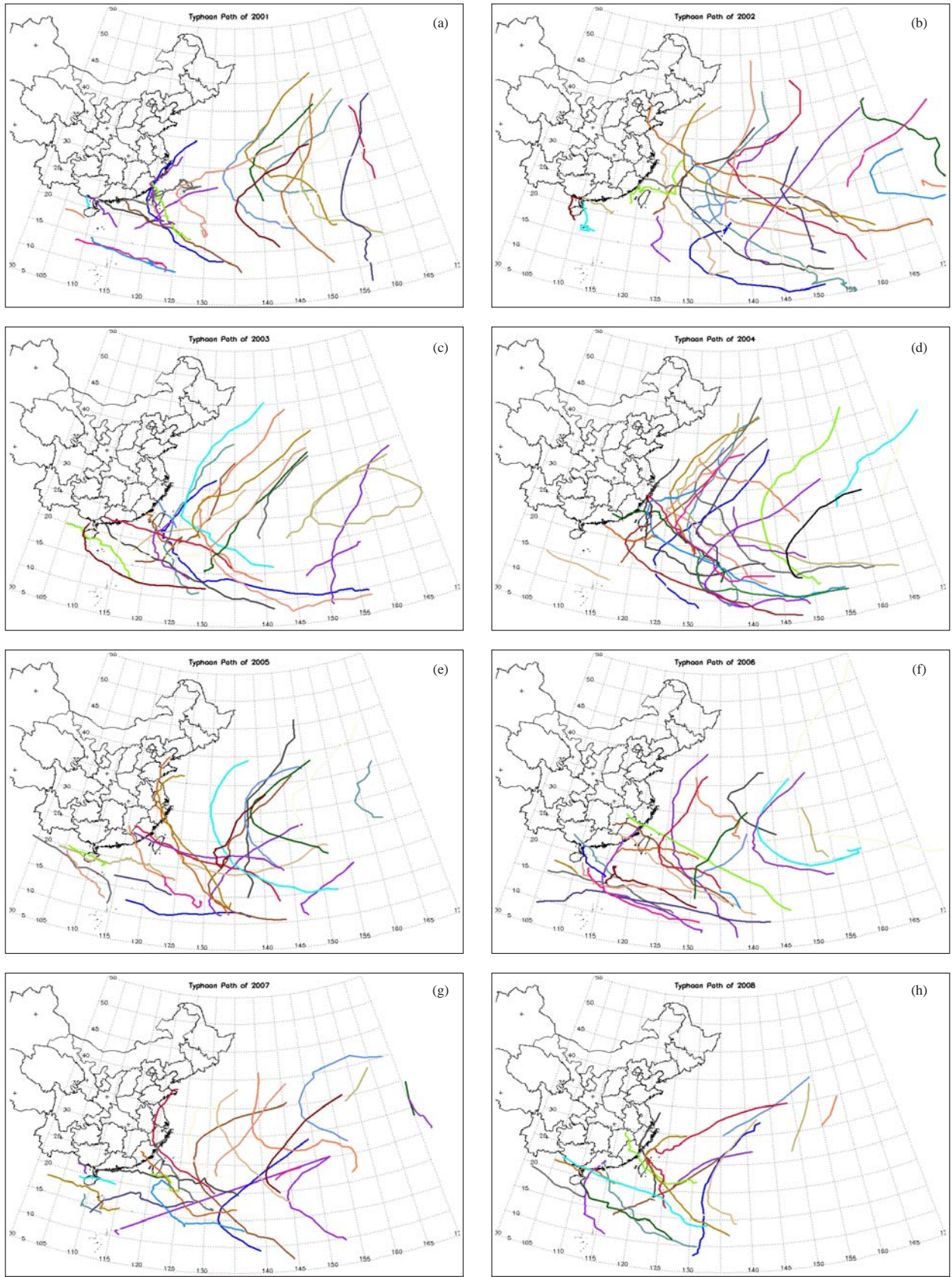


图4 2001—2008年影响我国的台风登陆路径和影响范围

Fig. 4 The landing route and effected regions of all the typhoons effected on China during years 2001–2008

物理特征参数等的理解。根据这一科学应用目标，风云三号降水测量卫星配置了双频降水测量雷达、微波成像仪、可见光红外扫描成像仪和GNSS掩星大气探

测仪。表3列出了风云三号降水测量卫星、GPM核心卫星以及下一代欧美业务极轨气象卫星NPP和EPS-SG上的降水测量载荷配置的情况。

表3 低轨卫星降水测量载荷配置比较
Table 3 The payloads of various low orbit precipitation measuring satellites

卫星	FY-3 RM	GPM	NPP	EPS-SG
降水测量载荷	双频降水测量雷达 微波成像仪 中分辨率光谱成像仪(简化) GNSS掩星探测仪	双频降水雷达(DPR) 微波成像仪(GMI)	先进技术微波探测仪(ATMS)	微波成像仪(MWI)
可测关键地球物理参数	降水三维结构, 降雨率, 混合层特性, 水凝物, 大气可降水量, 大气温湿度廓线, 地表温、湿度等	降水三维结构, 降雨率, 混合层特性, 水凝物, 大气可降水量, 地表温、湿度	降雨率, 水凝物, 大气可降水量, 大气温, 湿度廓线等	降雨率, 混合层特性, 水凝物, 大气可降水量, 地表温湿度

风云三号降水测量卫星和GPM核心卫星的主载荷都是一部Ku和Ka波段双频降水测量雷达^[4]。双频降水测量雷达能观测台风、暴雨、暴雪等大气降水的三维滴谱特性, 其测量参数独立于背景辐射且与降水直接相关, 反演得到比被动遥感更准确的降水强度, 还可以获得降水类型、降水层高度等其他丰富的降水信息。

风云三号降水测量卫星上的另一个重要载荷是微波成像仪, 将设置在大气窗区和吸收线附近的微波通道有机结合起来使用, 能有效地降低被动微波降水反演的不确定性。被动的微波辐射计和主动的降水测量雷达在降水测量上具有很强的互补性, 降水测量雷达能得到降水的廓线信息, 而微波辐射计得到的是整个传播路径上的总降水; 降水测量雷达的观测刈幅较窄但精度高, 微波辐射计的宽刈幅能够大大提高降水测量的地面覆盖率。同时, 降水测量雷达和微波辐射计的联合测量为被动微波反演提供了共同的云/辐射数据库, 这对将风云三号极轨气象卫星星座多星装载的微波成像仪和微波大气探测仪在统一的框架下建立反演模型并得到全球一致的降水产品来说非常关键。

风云三号降水测量卫星搭载的简化型中分辨率光谱成像仪主要用于获取可见光/红外云图、云顶温度、云顶高度、有效粒子半径和云形态学方面的参数, 进而辅助判断降水云的存在, 并可以改进微波降水的反演结果。另外, 由于目前静止轨道气象卫星上还没有配备微波遥感仪器, 静止气象卫星使用红外通道来估计降水, 所以风云三号降水测量卫星上的光学辐射计还是联系低轨道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。

风云三号降水测量卫星还搭载了GNSS掩星探测仪, 能够获得高垂直分辨率的大气温度和湿度廓线。高垂直分辨率的大气参数廓线可以用来判断降水粒子的相态和融化层的位置, 有助于区分对流/层状降水结构, 从而提高后续降水测量雷达反演降水的精度。

2.2 降水测量雷达探测能力分析

降水测量雷达是降水测量卫星的核心载荷, 表4比较了风云三号降水测量卫星降水测量雷达和TRMM卫星PR^[3]以及GPM核心卫星DPR^[4]的主要性能参数。风云三号降水测量雷达和DPR相比PR都增加了Ka频段的雷达, 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, 风云三号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, 风云三号降水测量雷达的天线旁瓣电平要比DPR和PR的低, 有利于抑制地面杂波的影响、减小测量误差。对比分析表明, 风云三号降水测量雷达与在轨的GPM卫星的DPR降水探测能力相当, 优于TRMM卫星PR的降雨测量能力。

表4 FY-3 RM PMR与PR、DPR主要性能参数
Table 4 The main characteristics of the PMR, PR and DPR

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

2.3 微波成像仪降水探测能力分析

降水测量卫星上装载的微波成像仪为降水测量提供了宽刈幅降水测量观域, 表5列出了风云三号降水测量卫星上微波成像仪(MWRI)、GPM核心星上的

微波成像仪GMI和欧洲下一代极轨业务卫星EPS-SG上装载的用于降水测量的微波成像仪(MWI)的通道频点设置参数。FY3-RM/MWRI相比GPM/GMI多了52.0GHz和118.0GHz两组大气氧气吸收线附近的8个探测通道,对陆地弱降水探测和融化层位置及厚度的探测具有优势;FY-3/MWRI相比EPS-SG/MWI多了低频10.6GHz的窗区通道,对陆地强降水探测具有优势。对比分析表明,FY-3/MWRI与未来在轨的EPS-SG/MWI的性能相当,优于GPM/GMI。

表5 MWRI、GMI和MWI通道频点设置

Table 5 The frequency channels of the MWRI, GMI and MWI

频点序号	FY-3/MWRI	GPM/GMI	EPS-SG/MWI	探测目的
1	10.65(V/H)	10.65(V/H)		强降雨
2	18.0(V/H)	18.70(V/H)	18.70(V/H)	洋面降雨
3	23.8(V/H)	23.8(V)	23.8(V/H)	水汽校正
4	31.4(V/H)	36.5(V/H)	31.4(V/H)	洋面降雨
5	50.30(V/H)		50.30(V/H)	
6	52.61(V/H)		52.61(V/H)	降水热力结构、 陆表弱降水
7	53.24(V/H)		53.24(V/H)	
8	53.75(V/H)		53.75(V/H)	
9	89.0(V/H)	89.0(V/H)	89.0(V/H)	区分对流和层状 降水
10	118.7503±3.2(V)		118.7503±3.2(V)	
11	118.7503±2.1(V)		118.7503±2.1(V)	区分卷云和层状 降水、弱降水
12	118.7503±1.4(V)		118.7503±1.4(V)	
13	118.7503±1.2(V)		118.7503±1.2(V)	
14	166(V)		165.5±0.75(V)	弱降水
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±4.9(V)		183.31±4.9(V)	降水热力结构、 小雨和陆地降雪
18			183.31±6.1(V)	
19	183.31±7(V)	183.31±7(V)	183.31±7.0(V)	

3 风云三号降水测量卫星应用

3.1 大气双氧吸收通道联合探测陆地弱降水分析

陆地弱降水反演是降水反演中最为困难的问题。以云中液态水为主的弱发射/吸收信号淹没在纷杂的强地表热辐射背景中,使得我们很难区分它们。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^[6]。风云三号降水测量卫星上装载的微波成像仪分别在50~54和118GHz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通道而言,地表比辐射率相同,将这些通道的辐射传输方程联立,降低了方程组中未知变量的个数,有效抑制了方程组的非适定性,使得陆地弱降水的物理反演成为可能^[7]。

3.2 星载降水测量雷达反演应用

按照星载降水测量雷达系统的配置,即用的是单参数雷达还是多参数(双参数)雷达,有关的反演算法可以分为单频和双频两类^[8,9]。单频反演的算法主要基于统计的雷达反射率因子和降水强度(Z-R)关系,由于在推导该关系过程中使用了大量的假设,它一般只适用于平均情况。星载降水测量雷达的工作频率较高,在使用Z-R关系反演降水强度时,通常都要考虑衰减的影响。通过假设衰减与降水强度(k-R)的关系,就可以得到R的解析解,这种衰减校正的方法最早是Hitschfeld和Bordan依据工作在衰减频率的地基雷达提出的^[10]。Z-R关系与k-R关系都存在着很大的不确定性,地面参考技术(surface reference technique, SRT)可以利用星载雷达的一个独立测量值——路径积分衰减来克服数值不稳定的问题。当衰减较小时,地面衰减截面的测量就会出现较大的误差。为此,可以在衰减较小时使用Hitschfeld-Bordan解法,而在衰减较大时使用SRT方法,TRMM/PR的降水反演算法就使用了这样一种改进的方法^[11]。

双频降水测量雷达的优势在于通过双频测量可以获得粒子谱参数(drop size distribution, DSD)的信息,从而提高降水反演的精度。目前的双频反演算法主要有两大类,包括前向方法和后向方法。前向方法是从距离库顶开始反演,逐库往下直到距离库底。后向方法则相反,是从距离库底开始反演,逐库往上直到距离库顶。除了个别反演方法以外,大部分双频的反演算法都依赖于双频反射率比和中体积直径之间的关系,最终既能重现双波长上的雷达反射率剖面结构,同时还能反演出作为推导DSD剖面分布约束条件的路径衰减。然而,基于该关系反演降水的中体积直径时可能存在两个解^[12-13]。因此,如何通过一些数学物理手段确定最优解是目前双频反演算法面临的最大问题。

3.3 星载多传感器联合反演降水能力分析

星载降水遥感技术始于静止轨道的红外/可见光降水估计,随着遥感技术的进步,逐步发展起来极轨被动微波降水反演技术。大量对比研究^[2,14-15]发现,在反演瞬时降水方面,极轨星载被动微波辐射计反演降水的算法精度要高于光学成像仪算法^[16-17]。2007年,世界气象组织倡导并实施了卫星遥感降水反演评估计划^[18]。在项目执行过程中,发现目前的所有被动遥感产品都还无法很好地反映陆地弱降水和极强降水的特征。

风云三号降水测量卫星装载的降水测量型微波成像仪,在52.0和118GHz两个氧气吸收线附近设置了

两组探测通道,能弥补陆地弱降水星载探测能力的不足。同时,风云三号降水测量卫星装载的降水测量雷达能活动比被动微波精度更高的降水估计,而主动雷达的双频设置,也拓展了对弱降水和极强降水的探测能力。但是,降水测量雷达受技术等因素限制,观测刈幅较窄,降低了降水事件的捕获概率。结合不同传感器的优势,进行多传感器联合反演可以弥补单一传感器反演算法的不足。和单一传感器相比,主被动联合反演是通过联合主动双频雷达和被动多通道微波辐射计的探测信息来进行降水的估计,基于集合Kalman滤波与变分方法的混合方法是目前主被动联合反演的主要算法。这种算法获得的降水产品精度较高,对1mm/h的降雨率,反演的偏差小于50%,10mm/h的降雨率,偏差小于25%,具有更加广阔的发展前景^[19]。

风云三号降水测量卫星上同时装载了光学和主被动微波遥感器,为将高时间分辨率的静止轨道光学遥感器降水反演结果与高精度的极轨主被动微波降水反演的融合建立了桥梁,具有深远的应用意义。

4 小结

风云三号降水测量卫星已列入我国第二代极轨业务气象卫星风云三号(03)批,计划装载双频降水测量雷达、微波成像仪、GNSS掩星大气探测仪和光学成像仪。经本文分析得到如下结论:

1) 从设计层面分析,风云三号降水测量卫星装载的降水测量雷达与在轨的GPM核心星第二代降水雷达DPR的性能相当。从载荷配置来看,风云三号降水测量卫星整星降水探测能力优于GPM核心星;

2) 风云三号降水测量卫星的轨道设计覆盖了南50°N范围内的热带和中纬地区,对影响我国区域的台风系统结构具有三维探测能力;

3) 风云三号降水测量卫星上装载的被动微波辐射计中50~60和118GHz双氧吸收通道的等权配置,对陆地弱降水反演和融化层位置及厚度探测等具有应用潜力,同时为空中雪晶粒子的遥感探测带来希望,而高频水汽吸收线183GHz附近的一组探测通道可用于诊断分析强对流中心位置并反演云冰厚度信息。

总之,风云三号降水测量卫星通过提升我国星载降水探测能力,将促进我国降水预报准确性的提高,

进而增强我国应对全球极端天气和气候变化的能力,加深对能量水循环系统的认识。

参考文献

- [1] 杨军. 气象卫星及其应用. 北京: 气象出版社, 2012.
- [2] 刘元波, 傅巧妮, 宋平, 等. 卫星遥感反演降水研究综述. 地球科学进展, 2011, 26(11): 1162-1172.
- [3] Kozu T, Kawanishi T, Kuroiwa H, et al. Development of precipitation radar onboard the TRMM satellite. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 2001, 39(1): 102-116.
- [4] Iugchi T, Oki R, Smith E A, et al. Global precipitation measurement program and the development of dual-frequency precipitation radar. J Commun Res Lab 2002, 49(2): 37-45.
- [5] 王咏梅, 任福民, 李维京, 等. 中国台风降水的气候特征. 热带气象学报, 2008, 24(3): 233-238.
- [6] Gasiewski A J, Staelin D H. Statistical precipitation cell parameter estimation using passive 118-GHz O₂ observations. Geophys Res: Atmos, 1990, 94(D15): 18367-18378.
- [7] Tang L, Tian Y, Lin X. Validation of precipitation retrievals over land from satellite-based passive microwave sensors. Geophys Res: Atmos, 2014, 119(8): 4546-456.
- [8] Marzoug M, Amayenc P. A class of single- and dual-frequency algorithms for rain-rate profiling from a spaceborne radar. part I: principle and tests from numerical simulations. Atmos Ocea Techn, 1994, 11: 1480-1506.
- [9] Marzoug M, Amayenc P. A class of single- and dual-frequency algorithms for rain-rate profiling from a spaceborne radar. part II: tests from airborne radar measurements. J Atmos Ocea Tech, 1994, 13: 142-164.
- [10] Hitschfeld W, Bordan J. Errors inherent in the radar measurement of rainfall at attenuating wavelengths. J Meteorol, 1954, 11: 58-67.
- [11] Meneghini R, Iuguchi T, Kozu T, et al. Use of the surface reference technique for path attenuation estimates from the TRMM precipitation radar. J Appl Meteorol, 2000, 39: 2053-2070.
- [12] 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. 气象学报, 2013, 71(1): 159-166.
- [13] 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. 气象学报, 2013, 71(3): 547-554.
- [14] Kummerow C, Barnes W. The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) sensor package. J Atmos Ocea Techn, 1998, 15(3): 809-817.
- [15] Kidd C. Satellite rainfall climatology: a review. Inter J Clima, 2001, 21(9): 1041-1066.
- [16] Ebert E E, Manton M J. Performance of satellite rainfall estimation algorithms during TOGACOARE. J Atmos Sci, 1998, 55(9): 1537-1557.
- [17] Bauer P, Schanz L. Outlook for combined TMI/VIRS algorithms for TRMM: lessons from the PIP and AIP projects. J Atmos Scie, 1998, 55(9): 1714-1729.
- [18] Turk F J, Arkin P, Ebert E E, et al. Evaluating high resolution precipitation products. Bull Amer Meteor Soc, 2008, 89: 1911-1916.
- [19] Michaelldes S, Levizzani V, Anagnostou E, et al. Precipitation: measurement, remote sensing, climatology and modeling. Atmos Rese, 2009, 94(4): 512-533.