

# 风云三号C星微波大气探测载荷性能分析

谷松岩 郭杨 游然 卢乃锰 吴雪宝

(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, 国家卫星气象中心, 北京 100081)

**摘要:** 风云三号C星是我国第二代极轨气象卫星的首发业务星, 星上装载了3个被动微波遥感载荷(微波成像仪、微波温度计 II 型和微波湿温探测仪), 其中微波成像仪完全延续了风云三号A/B星的设计, 两个微波大气探测载荷微波温度计 II 型和微波湿温探测仪是在风云三号A/B星微波温度计和微波湿度计成功在轨运行和应用的基础上, 根据应用需求在功能和性能两个方面从设计层面实现了大幅提升。本文重点介绍风云三号C星微波温度计 II 型和微波湿温探测仪的功能、性能和设计指标, 综述风云三号C星星载微波大气探测能力。风云三号C星星载微波大气探测系统, 通过通道细分、探测频点增加和空间采样技术优化, 突破了我国星载微波探测载荷技术瓶颈, 提升了大气温湿度廓线的综合探测能力。

**关键词:** 风云三号C星, 微波温度计 II 型, 微波湿温探测仪, 星载大气探测系统, 大气参数反演

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.01.011

## The Performance of Microwave Sounders Board on FY-3C Satellite

Gu Songyan, Guo Yang, You Ran, Lu Naimeng, Wu Xuebao

(Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites; China Meteorological Administration; National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081)

**Abstracts:** FY-3C is the first satellite of Chinese second generation operational polar orbiting meteorological satellite series. Three passive microwave instruments are on board the FY-3C satellite: MWRI is just following the design of FY-3A/B, MWTS-II has made great progress on channels splitting at the oxygen absorbing lines, and MWHTS has not only made more channels at vapor absorbing line, but also designed a new sounding frequency at 118GHz. All those have made great progress at the design stage. In this paper, we give some key points on FY-3C/MWTS-II and MWHTS, introduce the performance and design parameters of them. And finally we make an analysis on retrieval and sounding.

**Keywords:** FY-3C, MWTS-II, MWHTS, sounding system, atmosphere parameter profile retrieval

### 0 引言

风云三号C星(FY-3C)是我国第二代极轨气象卫星的首发业务星, 主要任务之一就是获取全球全天候高精度大气参数为数值天气预报提供初始场信息。FY-3C装载了3个被动微波遥感载荷(微波成像仪、微波温度计 II 型和微波湿温探测仪), 其中微波成像仪完全延续了风云三号A/B试验星的设计, 两个微波大气探测载荷(微波温度计 II 型和微波湿温探测仪)在风云三号A/B星微波温度计和微波湿度计的基础上, 借鉴在轨运行和应用的成功经验, 根据数值天气预报和台风暴雨强对流天气系统监测分析等不断提升的应用需求, 在功能和性能两个方面从设计层面实现了跨越式提升。

风云三号A/B两颗试验卫星上的微波温度计在50~60GHz强氧气吸收带设计了4个探测通道, 用于获取从地面到平流层下部的大气温度垂直结构分布信息; 微波湿度计在150~191GHz频段内设计了5个通道获取大气湿度的垂直结构分布信息。风云三号A星在轨超过5年和B星在轨超过3年的成功运行和应用, 在星载微波大气探测载荷研制和遥感信息应用两个方面都取得了突破性成果, 但面对日益增长的应用需求, 凸显出微波温度计通道个数少、带宽过宽、空间分辨率低等不足; 而微波湿度计尽管在探测能力上与欧美同类载荷(AMSU-B、MHS等)相当, 但由于缺少89GHz窗区通道, 使得降水检测和微波背景辐射探测能力受到抑制。同时针对我国遭受台风暴雨等强对流天气袭击的特点, 迫切需要提升星载大气探测系统对对流层上部热力结构和大气降水结构的探测能力。为此, 在考虑我国星载微波大气探测载荷的设计研制技术能力的前提下, 根据应用需求完成了FY-3C星微波

收稿日期: 2013年11月1日; 修回日期: 2014年6月12日  
第一作者: 谷松岩(1963—), Email: gusy@cma.gov.cn  
资助信息: 国家自然科学基金(41201360)

温度计 II 型和微波湿温探测仪的指标设计。

本文重点介绍FY-3C星微波探测载荷的功能、性能和设计指标,综述FY-3C星载微波大气探测载荷新增的大气探测能力,推进新型微波遥感信息在天气预报业务中的应用。

## 1 星载微波大气探测载荷

### 1.1 国内外主要星载微波大气探测载荷介绍

星载微波大气探测载荷指用于大气温湿度廓线探测的星载被动微波辐射计,一般利用大气氧气吸收线进行大气温度廓线探测,利用大气水汽吸收线进行大气湿度廓线探测。星载微波大气探测载荷发展可以追溯到20世纪60年代的前苏联,当时苏联发射的“宇宙卫星”,利用4通道微波辐射计开展了大气探测试验。后来,美国在20世纪70年代发射了“海洋卫星”,进一步在航天这一高度上实现了对地球海洋环境的被动微波遥感探测。继海洋卫星之后,美国在雨云卫星及国防卫星上都成功装载了被动微波探测仪,进一步将被动微波遥感从理论研究向应用研究推进。

美国1972年发射的雨云卫星装载了电扫描微波辐射计,利用50~60GHz的氧气吸收带探测大气温度结构。1978年美国发射了业务环境卫星泰罗斯系列,装载了专门用于大气探测的微波探测器(MSU),与红外大气探测器(HIRS)结合,实现了大气垂直温度廓线的遥感探测,形成TOVS体系。为满足军事气象需要,美国从1987年开始实施DMSP计划,陆续发射的卫星装载有用于大气温度廓线探测的特种微波温度探测仪SSM/T和用于大气湿度廓线探测的SSM/T-2。DMSP计划提高了空间微波对地遥感探测能力。在当代DMSP计划中,SSMIS取代了SSM/I、SSM/T和SSM/T-2,实现了垂直探测和成像遥感的有机结合<sup>[1]</sup>。

美国在业务环境卫星NOAA-K系列上,发展了20通道先进微波探测器(AMSU),取代MSU形成了新一代大气探测系统ATOVS<sup>[2-3]</sup>。其中,AMSU-A利用50~60GHz的氧气吸收带探测大气温度廓线,AMSU-B利用183GHz的水汽吸收线探测大气湿度廓线,后来MHS取代AMSU-B继续利用183GHz的水汽吸收线探测大气湿度廓线。

2002年升空的NASA EOS系列卫星上,载有与AMSU性能相当的先进微波大气探测器,其中包括巴西研制的湿度探测仪HSB和欧洲研制的微波湿度探测器MHS。欧洲极轨气象卫星MetOp上的大气探测系统与美国业务环境卫星上的系统相同。

美国目前国家极轨业务环境卫星系统SNPP上的星载大气探测系统是ATMS<sup>[3]</sup>,用两副天线完成

了AMSU系统中三副天线的探测任务,在仍然沿用50~60GHz氧气吸收带进行大气温度廓线探测的同时,在183GHz水汽吸收线附近增加了探测通道数,提升了大气湿度场的探测能力。

我国星载微波遥感技术起步较晚,FY-3A星装载的微波温度计和微波湿度计是我国星载微波大气探测载荷首次升空并实现定量应用的里程碑。经过A/B两颗试验星的应用,发展了FY-3C星的微波温度计II型(MWTS-II)和微波湿温探测仪(MWHTS),在原探测频点附近细化增加通道数量,同时增加了118GHz新的探测频点,提升对流层上部大气温度廓线探测精度,提升风云三号业务星的大气探测能力。

### 1.2 关键性能指标对比

目前在轨运行的星载大气探测载荷包括美国NOAA、EOS卫星和欧洲极轨业务气象卫星MetOp上的AMSU-A、AMSU-B和MHS,以及SNPP卫星上将大气温湿度探测合为一体的ATMS。表1给出了微波大气探测载荷频点设置对比,从表中可以看到风云三号微波大气探测载荷(MWTS-II和MWHTS)覆盖了ATMS在50~60GHz氧气吸收带和183GHz水汽吸收线附近的所有大气探测通道,同时增加了118GHz氧气吸收线附近的一组大气温度廓线探测通道;而对于大气窗区辅助探测通道,FY-3C星设置了89和150GHz两个高频通道,受卫星平台资源限制,缺失了低频23和31GHz两个窗区通道,但FY-3C同星装载的微波成像仪设置有23.6和36.5GHz两个相近频点,弥补了MWTS-II的不足,因此综合FY-3C微波遥感探测载荷的频点配置资源,FY-3C具有了与ATMS相当的大气探测资源。

星载大气探测载荷与定量应用密切相关的关键性能参数除通道的中心频点外,主要有灵敏度、定标精度和波束宽度。表2给出了MWTS-II、MWHTS和ATMS的关键性能设计指标,可以看到两颗业务星大气探测载荷相同探测频点(50~60GHz和183GHz)的波束宽度一致,这表明它们具有相同的水平空间分辨率;通道数相同,说明它们空间垂直分辨能力相当。50~60GHz频段大气温度廓线探测通道的定标精度相同,灵敏度MWTS-II的指标略低于ATMS;183GHz大气湿度廓线探测通道FY-3C星的定标精度为1.5K,优于ATMS的2.0K;灵敏度也是略低于ATMS。窗区通道89GHz,FY-3C星的MWHTS波束宽度为2.0°,优于ATMS的2.2°;经过遥感信息反卷积重采样处理后,结合MWHTS中心频点位于118GHz氧气吸收线的大气温度探测通道,将得到更高水平分辨率的大气温度廓线探测数据,为获取到更精细的大气温度廓线结构带来

新的能力提升空间。

风云三号卫星从试验星A/B发展到业务首发星C, 仪器性能指标得到稳步提升。图1是与定量应用密切相关的通道灵敏度指标在轨实测结果与设计指标的对比, 可以看到从B星开始, 微波大气探测载荷通道灵敏度指标就有显著提升, C星仪器进一步保持了高灵敏度水平, 为星载大气探测载荷的定量应用和数值预报同化应用奠定了基础。

## 2 FY-3C星大气探测能力分析

### 2.1 通道权重函数分析

星载微波大气探测仪器的通道权重函数曲线反映了大气中各个气压层的辐射对探测器接收到的来自整个大气层辐射的贡献大小, 即大气向上的辐射主要是来自哪一层大气的贡献。每个通道权重函数曲线的峰值代表大气对向上辐射贡献最大的气层。

定义中心波数为 $\nu^*$ 的权重函数为

$$W = \frac{\partial \tau(\nu^*, p, \theta)}{\partial \ln p}, \quad (1)$$

$$\tau(\nu^*, p, \theta) = \exp(-u), \quad (2)$$

式中,  $\tau(\nu^*, p, \theta)$ 是中心波数为 $\nu^*$ 的通道透过率,  $u$ 是光学厚度。

本文利用VDISORT模式计算美国标准大气在FY-3C星通道频点的每层光学厚度, 根据式(2)计算出每层的透过率, 然后根据式(1)计算出各个通道的权重函数。

图2是MWTS-II氧气吸收带50~60GHz的一组通道权重函数计算结果, 可以看到FY-3C星MWTS-II的13个通道的权重函数峰值分布均匀, 覆盖了从地面一直到大气上层2hPa的整层大气, 吸收带中心通道权重函数峰值位置较高, 吸收带远翼通道权重函数峰值位置较低, 窗区通道权重函数可达地面, MWTS-II的权重函数峰值分布特征为大气温度廓线的精确探测奠定了基础。

图3是MWHTS在118GHz氧气吸收线附近和183GHz水汽吸收线附件的两组探测通道权重函数计算结果。从图3a中可以看到FY-3C星MWHTS在118GHz氧气

吸收线附近8个探测通道权重函数的峰值分布均匀, 覆盖了从地面到大气上层30hPa的整层大气, 吸收带中心通道权重函数峰值位置较高, 吸收带远翼通道权重函数峰值位置较低, 窗区通道权重函数可达地面, 为提高大气温度廓线的精确探测奠定了基础。从图3b中可以看到FY-3C星MWHTS在183GHz水汽吸收线附近5个探测通道权重函数的峰值均匀覆盖了从地面到400hPa的大气层, 吸收带中心通道权重函数峰值位置较高, 吸收带远翼通道权重函数峰值位置较低, 为大气湿度廓线的精确探测奠定了基础。

### 2.2 新增探测频点和通道特性

相对于风云三号A/B试验卫星上装载的MWTS和MWHS而言, FY-3C星的MWTS-II和MWHTS新增探测频点是118GHz氧气吸收频点和89GHz的窗区探测频点; 新增的探测通道包括118GHz附近的一组8个探测通道、50~60GHz波段的9个通道、89GHz一个通道和183GHz附近的2个通道。

对于氧气吸收通道而言, 根据分子微波波谱学理

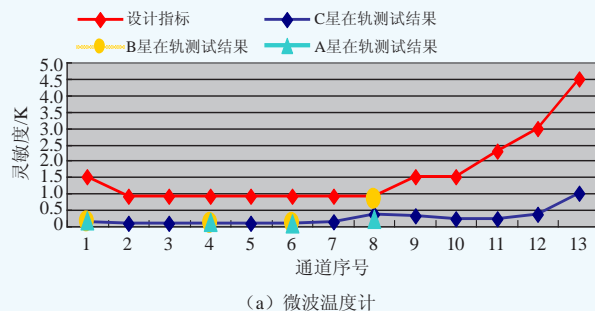
表1 微波大气探测载荷通道中心频率对比

Table 1 Center frequency analysis for microwave atmospheric sounders

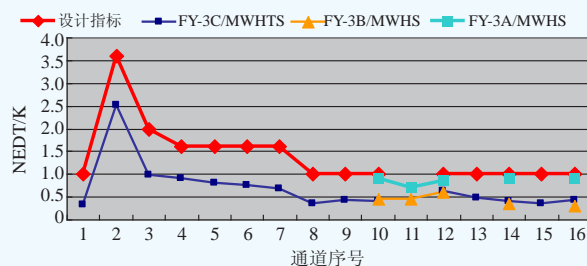
中心频率 (GHz)	AMSU	MHS	ATMS	MWTS	MWHS	MWTS-II	MWHTS	主要用途
23.80	通道1		通道1					大气窗区
31.4	通道2		通道2					大气窗区
50.3	通道3		通道3	通道1		通道1		大气窗区
51.76			通道4			通道2		大气窗区
52.8	通道4		通道5			通道3		地表层大气温度
53.596	通道5		通道6	通道2		通道4		700 hPa温度
54.40	通道6		通道7			通道5		400 hPa温度
54.94	通道7		通道8	通道3		通道6		250 hPa温度
55.50	通道8		通道9			通道7		180 hPa温度
57.290344(fo)	通道9		通道10	通道4		通道8		90 hPa温度
fo ± 0.217	通道10		通道11			通道9		50 hPa温度
fo ± 0.3222 ± 0.048	通道11		通道12			通道10		25hPa温度
fo ± 0.3222 ± 0.022	通道12		通道13			通道11		10 hPa温度
fo ± 0.3222 ± 0.010	通道13		通道14			通道12		6 hPa温度
fo ± 0.3222 ± 0.0045	通道14		通道15			通道13		3 hPa温度
89.0	通道15/16	通道1	通道16				通道1	大气窗区
118.75 ± 0.08							通道2	hPa温度
118.75 ± 0.2							通道3	hPa温度
118.75 ± 0.3							通道4	hPa温度
118.75 ± 0.8							通道5	hPa温度
118.75 ± 1.1							通道6	hPa温度
118.75 ± 2.5							通道7	hPa温度
118.75 ± 3.0							通道8	hPa温度
118.75 ± 5.0							通道9	hPa温度
150.0	通道17	通道2			通道1/2		通道10	大气窗区
165.5			通道17					大气窗区
183.31 ± 1	通道18	通道3	通道22		通道3		通道11	hPa湿度
183.31 ± 1.8			通道21				通道12	hPa湿度
183.31 ± 3	通道19	通道4	通道20		通道4		通道13	hPa湿度
183.31 ± 4.5			通道19				通道14	hPa湿度
183.31 ± 7	通道20	通道5	通道18		通道5		通道15	hPa湿度

表2 星载微波大气探测载荷关键性能指标  
Table 2 Key specifications of microwave atmospheric sounders

通道序号	中心频率 (GHz)	灵敏度 (K)	定标精度 (K)	波束宽度 (°)
MWTS-II				
1	50.3	1.5	1.5	2.2
2	51.76	0.9	1.5	2.2
3	52.8	0.9	1.5	2.2
4	53.596	0.9	1.5	2.2
5	54.40	0.9	1.5	2.2
6	54.94	0.9	1.5	2.2
7	55.50	0.9	1.5	2.2
8	57.290344(fo)	0.9	1.5	2.2
9	fo±0.217	1.5	1.5	2.2
10	fo±0.3222±0.048	1.5	1.5	2.2
11	fo±0.3222±0.022	2.3	1.5	2.2
12	fo±0.3222±0.010	3.0	1.5	2.2
13	fo±0.3222±0.0045	4.5	1.5	2.2
MWHTS				
1	89	1.0	2.0	2.0
2	118.75±0.08	3.6	2.0	2.0
3	118.75±0.2	2.0	2.0	2.0
4	118.75±0.4	1.6	2.0	2.0
5	118.75±0.65	1.6	2.0	2.0
6	118.75±1.1	1.6	2.0	2.0
7	118.75±2.1	1.6	2.0	2.0
8	118.75±3.0	1.0	2.0	2.0
9	118.75±5.0	1.0	2.0	2.0
10	150	1.0	1.5	2.0
11	183±1	1.0	1.5	1.1
12	183±1.8	1.0	1.5	1.1
13	183±3	1.0	1.5	1.1
14	183±4.5	1.0	1.5	1.1
15	183±7	1.0	1.5	1.1
ATMS				
1	23.80	0.9	2.0	5.2
2	31.4	0.9	2.0	5.2
3	50.3	1.2	1.5	2.2
4	51.76	0.75	1.5	2.2
5	52.8	0.75	1.5	2.2
6	53.596	0.75	1.5	2.2
7	54.40	0.75	1.5	2.2
8	54.94	0.75	1.5	2.2
9	55.50	0.75	1.5	2.2
10	57.290344(fo)	0.75	1.5	2.2
11	fo±0.217	1.2	1.5	2.2
12	fo±0.3222±0.048	1.2	1.5	2.2
13	fo±0.3222±0.022	1.5	1.5	2.2
14	fo±0.3222±0.010	2.4	1.5	2.2
15	fo±0.3222±0.0045	3.6	1.5	2.2
16	89.0	0.5	2.0	2.2
17	165.5	0.6	2.0	1.1
18	183.31±7	0.8	2.0	1.1
19	183.31±4.5	0.8	2.0	1.1
20	183.31±3	0.8	2.0	1.1
21	183.31±1.8	0.8	2.0	1.1
22	183.31±1	0.9	2.0	1.1



(a) 微波温度计



(b) 微波湿度计

图1 FY-3C较FY-3A/B卫星仪器灵敏度指标提升情况  
Fig. 1 Noise Equivalent Differential Temperature (NEDT) of sounders on FY-3C in comparison with those on FY-3A/B: (a) Microwave Temperature Sounder; (b) Microwave Humidity Sounder

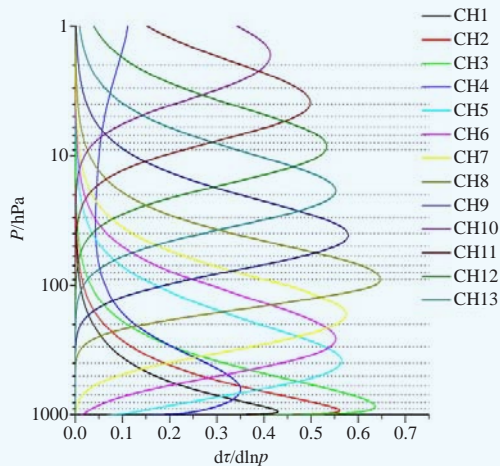


图2 MWTS-II 通道权重函数分布  
Fig. 2 Weighting function for MWTS-II

论, 气体对微波的吸收和发射主要是分子转动能级之间的量子跃迁, 氧分子在微波波段共产生46条共振吸收线, 其中有45条位于风云三号微波温度计的50~60GHz波段内, 随着气压的不同, 这些谱线产生不同程度的加宽, 形成吸收带, 是进行大气温度层结探测的最佳微波频段; 另外一条孤立的共振吸收线位于风云三号微波湿度探测仪的118GHz, 可用于大气温度层结的辅助探测。在进行大气温度层结探测时, 118GHz高频微波可以提供比50~60GHz更高的空间分辨率。因此将两个频段结合更有利于大气的

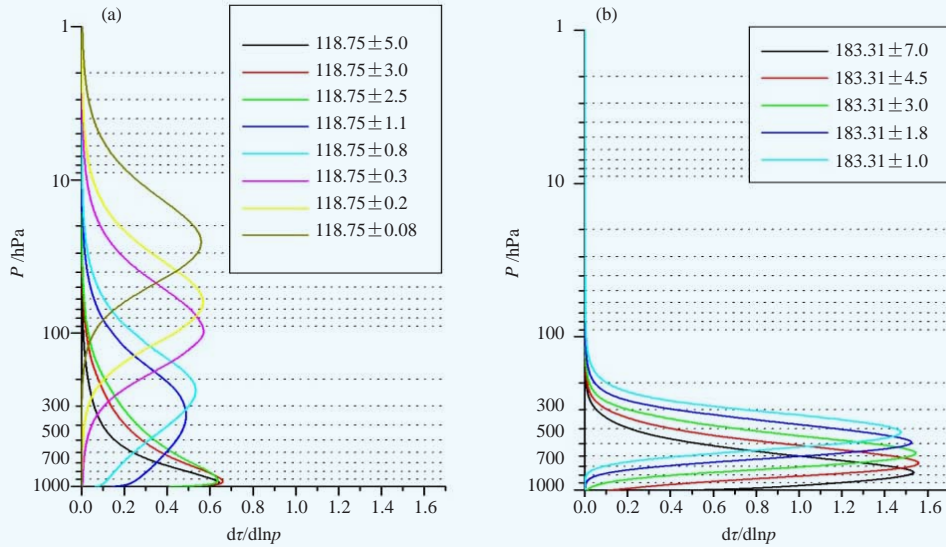


图3 MWHTS在118GHz氧气吸收线 (a) 和在183GHz水汽吸收线 (b) 附近通道权重函数  
Fig. 3 Weight function of MWHTS (a) for O<sub>2</sub> absorption line at 118GHz; (b) for H<sub>2</sub>O absorption line at 183GHz

温度层结探测。

这些新增探测频点和探测通道对云雨大气粒子辐射特性有明显响应，选择Katrina台风登录前，发展最为旺盛的2005年8月28日的数据进行辐射模拟。台风模拟数据来自威斯康星大学的非流体静力学中尺度模式系统（University of Wisconsin-Non-hydrostatic Model System，简称UWNMS）。这一模式是Gregory Tripoli教授开发的多重嵌套的中尺度模式，该模式是为反演系统提供基础数据而开发出来的<sup>[4-5]</sup>。UWNMS是目前较先进的中尺度数值预报模式之一，已被广泛应用于各种中尺度现象的研究<sup>[6-9]</sup>。Mugnai等<sup>[10]</sup>曾将UWNMS的模拟结果与MM5的模拟结果进行了对比，结果表明，两模式在风暴组织特性的模拟上非常相近，且由这两个模式构建的数据集所反演出降水率的统计特性有很好的 consistency。FY-3C星微波大气探测载荷新增探测频点和通道辐射特性分析，利用UWNMS分析场结果，首先选择穿过Katrina台风眼的一条竖剖面（位置见图4）共252个点的数据作为正演辐射传输模式的输入，数据代表了剖面经过的台风螺旋云带、云墙和眼区的大气廓线和云中微物理廓线的特征。

模拟计算结果（图5）表明台风云系中液态和冰态粒子含量较多的云墙区对吸收线远翼通道影响较大，亮温衰减明显，且越远离吸收峰，亮温衰减的越剧烈。而在台风云系中液态和冰态粒子含量较少的台风眼区和外围螺旋云带，对各通道亮温影响小。与台风云系冰态粒子峰值浓度对应的亮温变化中118GHz频点远翼通道和吸收峰通道的亮温差比183GHz和

50~60GHz的大，这表明风云三号卫星微波大气探测载荷新增的118GHz探测频点对识别台风云系中冰相粒子分布具有潜在的应用能力。图5c中与台风云墙区冰粒子含量峰值对应的亮温衰减变化，反映了云墙区的对流结构，183GHz各通道代表了不同高度湿度场结构，各通道亮温峰谷位置有向右的倾斜趋势，表明云墙区分析点的对流轴倾斜；而118GHz各通道亮温峰谷位置比较一致，表明各层冷中心一致，没有明显倾斜。尽管所有这些模拟分析结果都有待实际探测资料的验证，但FY-3C星大气探测载荷在台风监测分析中的应用前景让人鼓舞。

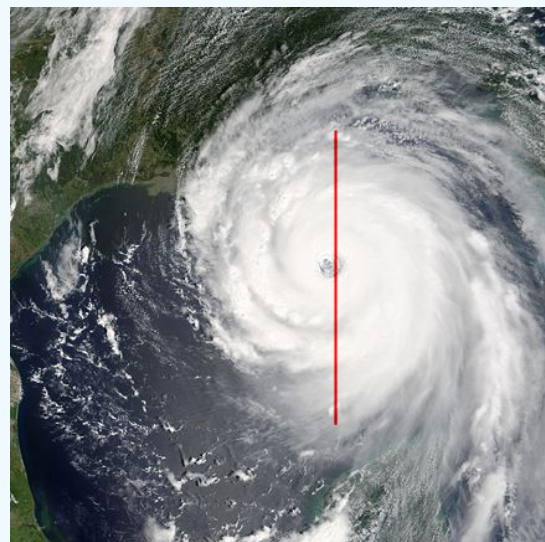


图4 Katrina台风可见光云图  
Fig. 4 Katrina imager of visible band

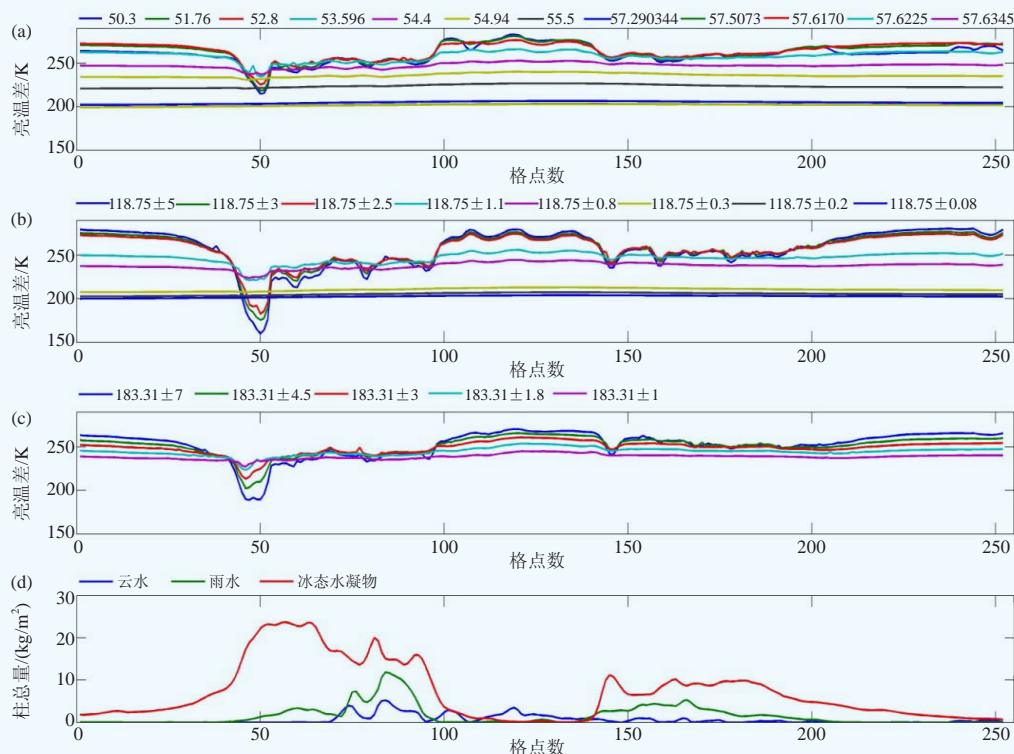


图5 MWTS-II和MWHTS吸收通道辐射响应模拟分析

(a) MWTS-II在50~60GHz频点吸收通道模拟亮温；(b) MWHTS在118GHz频点吸收通道模拟亮温；(c) MWHTS在183GHz频点吸收通道的模拟亮温；(d)与图a、b和c对应位置的冰态水、雨水和云水的等效柱含水量

Fig. 5 Analysis of channels brightness temperature character for MWTS-II and MWHTS

(a) MWTS-II at 50~60GHz; (b) MWHTS at 118GHz; (c) MWHTS at 183GHz; (d) equivalence water content for ice, rain and cloud

### 2.3 大气温湿廓线参数反演分析

大气温度和湿度是天气预报的两个基本要素。大气参数的垂直探测是通过对具有吸收特征的谱区进行观测完成的。这种观测得到了不同高度大气的微波辐射，然后，利用这些观测的辐射值通过反演可以获得大气参数垂直廓线。例如，如果要探测温度，先选择一个光谱区域，在这个谱区，大气的吸收是由一种在大气中充分混合的气体造成的，因而这种气体的浓度是已知因子，辐射的变化只是反映吸收气体的温度变化，代表了在某一高度范围内的加权平均温度，其权重是由大气透射率随高度变化而决定的，这个量就是权重函数，它取决于该气体的浓度、温度和压力垂直分布。

为了分析FY-3C星大气探测载荷大气温湿度廓线反演能力，选择统计反演方法来进行模拟分析。统计反演方法的关键是建立回归方程，计算相应的回归系数。一旦给定回归系数，根据卫星观测通道的亮度温度可以反演出大气温度和湿度廓线。该方法的优点是反演过程本身不需要计算复杂的大气透过率，因此计算速度快，结果稳定；其缺点是反演结果不能很好地

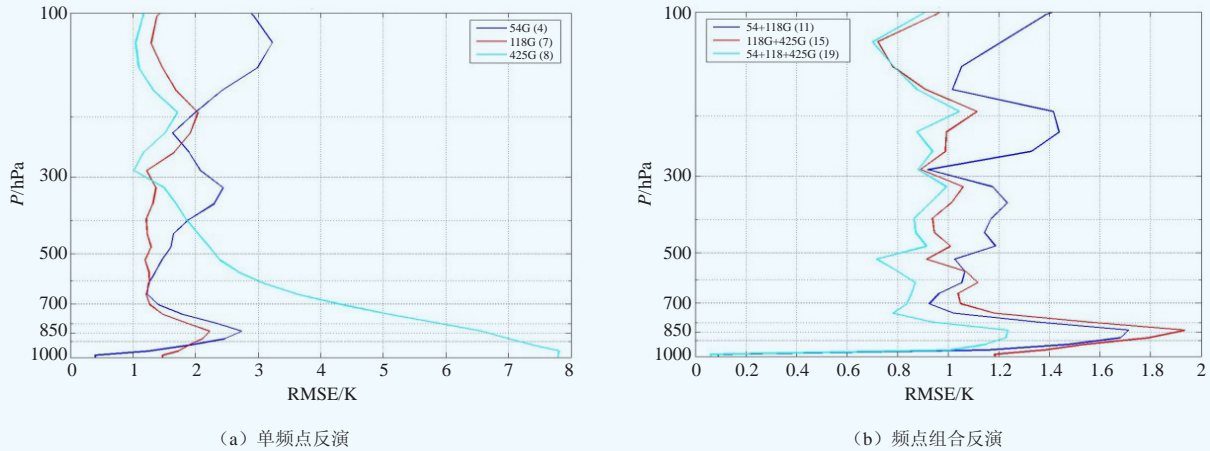
反映局部特征。对于统计反演方法而言，建立统计回归方程和计算回归系数是关键，而且必须选取具有代表性的统计样本库，这里根据气候数据集和辐射传输模式计算产生统计样本库。

大气温度和湿度廓线反演样本库是利用TIGR3（1125条大气廓线）和微波辐射模式首先计算出每条大气廓线的各个通道的大气透过率，进而利用辐射传输模式转换成辐射亮度温度而生成的。其中TIGR3的90%样本主要用于大气温度和湿度廓线反演回归系数的计算，而TIGR3的10%廓线主要用于独立样本的精度检验。

为了正确评价统计反演方法，本文利用TIGR3的10%廓线作为独立样本对大气温度和湿度反演廓线进行误差统计分析。图6a给出了单独使用54GHz和118GHz时温度廓线的反演精度，可以清楚地看出，尽管54GHz频点附近的辐射信号比118GHz频点的辐射信号要强许多，但辐射模拟时只考虑了风云三号A/B星的54GHz频点的4个通道辐射亮温进行计算，与118GHz的7个通道反演结果相比，118GHz附近7个通道的反演结果优于54GHz附近FY-3A/B-MWTS 4个通

道的反演结果。图6b给出了使用54GHz、118GHz和高频氧气吸收参考频点425GHz3个频点的3种组合的温度反演精度，从图中可以清楚地看出，无论在大气的低层，还是中高层，联合使用3个频点，能够获得最佳

的温度反演结果，平均而言，118GHz与54GHz频点组合后大气温度廓线反演误差比单频点反演精度高，在1.0K左右。多频点大气温度探测通道的联合使用能够改善大气各个层次上的反演精度。



(a) 单频点反演

(b) 频点组合反演

图6 大气温度反演的RMSE误差

Fig. 6 Retrieval RMSE of atmospheric temperature profile (a) for single frequency retrieval; (b) for multi-frequency retrieval

### 3 结语

FY-3C星大气探测载荷的功能、性能和设计指标，都优于风云三号A/B星。FY-3C星载微波大气探测系统，通过通道细分、探测频点增加和空间采样技术优化等，突破了我国星载微波探测载荷技术瓶颈，星载大气探测能力大为提升。

118GHz新探测频点的设计能改善对流层顶附近大气温度廓线反演精度，提升台风热力结构的星载微波探测能力，同时能改进微波湿温探测仪对大气湿度的探测精度。氧气和水汽吸收通道数量的增加，能有效改善FY-3C大气探测系统大气参数垂直探测精度，仪器测量精度的提高也保障了星载微波大气探测载荷的在轨探测精度。

与风云三号A/B星相比，FY-3C星微波湿温探测仪增加的89GHz窗区探测通道在完善了地气系统背景微波辐射探测的同时，也提升了星载微波大气探测载荷大气降水参数的探测能力。FY-3C星载大气探测载荷的遥感信息在未来业务应用中将发挥巨大作用。

#### 参考文献

[1] Yan B H, Weng F Z. Intercalibration between special sensor microwave imager/sounder and special sensor microwave imager. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2008, 46: 984-995.  
[2] JPL. AIRS project algorithm theoretical basis document Part 3: Microwave instruments. JPL D-17005, Version 2.1, 2000.

[3] NOAA KLM User's Guide (Satellite and data description of NOAA's Polar orbiting satellites from NOAA-15 and later), Feb 2009.  
[4] Tripoli G J. A Nonhydrostatic mesoscale model designed to simulate scale interaction. *Mon Wea Rev*, 1992, 120: 1342-1359.  
[5] Tripoli G J, Smith E A. Introducing Variable-Step Topography (VST) coordinates within dynamically constrained Nonhydrostatic Modeling System (NMS). Part 1: VST formulation within NMS host model framework. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 2014, 66: 28-57.  
[6] Hitchman M H, Buker M L, Tripoli G J, et al. Nonorographic generation of Arctic polar stratospheric clouds during December 1999. *J Geophys Res*, 2003, 108, 8325, doi:10.1029/2001JD001034.  
[7] Hitchman M H, Buker M L, Tripoli G J, et al. A modeling study of an East Asian convective complex during March 2001. *J Geophys Res*, 2004, 109, D15S14, doi:10.1029/2003JD004312.  
[8] Buker M L, Hitchman M H, Tripoli G J, et al. Long-range convective ozone transport during INTEX. *J Geophys Res*, 2008, 113, D14S90, doi:10.1029/2007JD009345.  
[9] Mehta A V, Smith E A, Tripoli G J. Relating convective and microphysical properties to large-scale dynamical and thermodynamical processes within Tropical Cyclones. *American Geophysical Union, Fall Meeting 2008*.  
[10] Mugnai A, Smith E A, Tripoli G J, et al. Explaining discrepancies in passive microwave cloud-radiation databases in microphysical context from two different cloud-resolving models. *Meteor Atmos Phys*, 2008, 101: 127-145.  
[11] Li J, Zhang S W, Jiang J S, et al. In-orbit performance of Microwave Humidity Sounder (MWHs) of the Chinese FY-3 meteorological satellite. *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2010 IEEE International. Honolulu, HI, 25-30 July 2010.  
[12] Wang Z Z, Li J, Zhang S W, et al. Pre-launch calibration of Microwave Humidity Sounder on China's FY-3A meteorological satellite. *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, *Geoscience and Remote Sensing Letters*, IEEE, 2011, 8: 29-33.  
[13] 谷松岩, 王振占, 李靖, 等. 风云三号A星微波湿度计主探测通道辐射特性. *应用气象学报*, 2010, 21(3): 335-342.