

FY-3C 微波湿温探测仪 118 GHz 和 183 GHz 通道辐射特性仿真分析

郭杨^{1,2}, 卢乃锰^{2*}, 谷松岩²

(1. 南京信息工程大学 大气物理学院, 江苏 南京 210044;

2. 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 中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要:我国第二代极轨气象卫星的第三颗星——风云三号 C 星(FY-3C)已于2013年9月发射。为探讨微波湿温探测仪大气探测通道对大气参数的探测能力,采用威斯康星大学的非流体静力学中尺度模式系统(UW-NMS)模拟 Katrina 飓风的基础数据集,结合微波辐射传输模式,正演模拟分析了微波湿温探测仪 118 GHz 和 183 GHz 通道的辐射特性。仿真结果表明 118 GHz 和 183 GHz 通道作为星载亚毫米波大气探测通道,能够提供更加精细的大气温度和湿度廓线信息;冰态粒子的散射作用可使(118.75 ± 5.0)GHz 和(183.31 ± 7.0)GHz 通道亮温分别下降 108 K 和 76 K,新增的探测频点和通道能提升对云雨大气的探测能力;118 GHz 和 183 GHz 通道亮温对云中各种水凝物粒子响应的模拟分析结果证明了这两组通道在云中水凝物分布特性反演方面的潜在探测能力;大气中雨水含量的增加可以导致(118.75 ± 5.0)GHz 通道亮温下降 4.5 K,118 GHz 对液态粒子特有的响应能力,显示了其作为降水反演频点的优势;大气中雪粒子含量的增加会使(118.75 ± 5.0)GHz 通道亮温下降 10 K,可利用该通道探测云中的雪晶含量。

关键词: FY-3C 微波湿温探测仪; 118 GHz; 183 GHz; 通道特性分析; 辐射模拟
中图分类号: P412.27 **文献标识码:** A

Simulation of the radiometric characteristics of 118 GHz and 183 GHz channels for FY-3C new microwave radiometer sounder

GUO Yang^{1,2}, LU Nai-Meng^{2*}, GU Song-Yan²

(1. School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

2. Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, China Meteorological Administration, National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China)

Abstract: The third satellite of new generation polar orbit meteorological satellite of China (FY-3C) was successfully launched on September 2013. In order to analyze the capability of the microwave humidity and temperature sounder's sounding channels in atmospheric parameters detection, the basic atmospheric parameters data of Katrina provided by the "University of Wisconsin-Non-hydrostatic Model System" (UW-NMS) were combined with the microwave radiative transfer model to simulate the radiometric characteristics of 118 GHz and 183 GHz. The results show that fine structure of atmosphere humidity and temperature profile can be achieved by using 118 GHz and 183 GHz which are the millimeter-submillimeter sounding channels. The brightness temperature of (118.75 ± 5.0) GHz and (183.31 ± 7.0) GHz decrease about 108 K and 76 K, respectively, due to the scattering of frozen hydrometeors. This result indicates that these channels data can be used to detect the cloudy atmosphere. The different kinds of hydrometeors can significantly affect the brightness temperature of 118 GHz and 183 GHz channels and it will be used in hydrometeors retrieval. When mixing ratios of rain drops increase, only the brightness temperature of (118.75 ± 5.0) GHz decreases about 4.5 K. The responsiveness reveals that 118 GHz is an important band for precipitation retrieval. The brightness temperature of (118.75 ± 5.0) GHz decreases about 10 K when mixing ratio of snow at middle layers increase. This result shows the channel can be used to detect the snow particle.

收稿日期:2013-05-09, 修回日期:2014-07-03

Received date: 2013-05-09, revised date: 2014-07-03

基金项目:气象公益性行业专项(GYHY201206002);国家自然科学基金(41201360,41475030) Foundation items: Supported by China's Research and Development Special Fund for Public Welfare Industry (Meteorology GYHY201206002), and National Natural Science Foundation of China (41201360,41475030)

作者简介(Biography):郭杨(1984-),女,四川人,中国气象局国家卫星气象中心助理研究员,2012年南京信息工程大学在职博士,从事微波仪器定标及微波资料应用研究。E-mail: guoyang@cma.gov.cn

* 通讯作者: E-mail: lunm@cma.gov.cn

Key words: FY-3C microwave humidity and temperature sounder, 118 GHz, 183 GHz, channel radiometric characteristics, radiative simulation

PACS: 93. 85. Pq

引言

利用卫星遥感获得全球大气温度和湿度分布及变化,对数值天气预报和气候变化研究具有重要意义.随着星载被动微波遥感技术的发展,微波载荷探测大气温度和湿度的优势受到广泛重视.1978年美国发射了业务环境卫星 TIROS-N 系列,装载了专门用于大气探测的微波探测器 MSU,与红外遥感仪器 HIRS 结合,实现了大气垂直温度廓线的遥感探测形成了 TOVS 体系.之后美国于 1987 年在其国防气象卫星 DMSP 上搭载了大气温度垂直探测仪器 SSM/T,继而又增加了湿度探测仪 SSM/T-2,提升了大气参数垂直探测能力,未来 DMSP 计划中,SSMIS 将取代 SSM/I、SSM/T 和 SSM/T-2,实现垂直探测和成像遥感的有机结合^[1].美国在 NOAA-K 系列卫星(NOAA-15、NOAA-16 和 NOAA-17)上,装载了 20 个通道的先进微波探测器 AMSU,取代 MSU,形成了新一代大气探测系统 ATOVS,空间分辨率提高到 15 km^[2].之后美国在 NOAA 业务卫星和 EOS 科学实验卫星上发展了 HSB 和 MHS 微波湿度探测器,将星载大气探测应用频段拓展到亚毫米波段^[3].在美国新一代极轨环境卫星 Soumi/NPP 的大气探测系统中用天线系统结构与 FY-3A/B 相同的 ATMS 取代了 AMSU,在 183 GHz 高频水汽吸收频点增设了 2 个通道提升大气湿度探测能力,仍只利用 50 ~ 60 GHz 的氧气吸收带探测大气温度廓线.

风云三号气象卫星是实现全球、全天候、多光谱、三维、定量遥感的我国第二代极轨业务系列气象卫星,该系列的前两颗卫星 FY-3A 和 FY-3B 星已经分别于 2008 年 5 月 27 日和 2010 年 11 月 5 日成功发射.目前已经获取了丰富的地球大气探测数据,被广泛应用于国内外天气、气候、环境和灾害监测中,取得了显著的社会经济效益^[4-7].微波湿度计(MWHS)是“风云三号”系列气象卫星的主载荷之一^[8-9],能全天候获取全球大气水汽垂直分布,获取与台风、暴雨等强对流天气现象密切相关的云雨大气参数,为数值天气预报提供大气湿度初始场信息.

2013 年 9 月发射的风云三号 C 星装载微波湿温探测仪,同时在 118 GHz 的氧气吸收线和 183 GHz 的水汽吸收线设计了两组探测通道,其中 118 GHz

探测频点是目前国际上业务卫星首次使用的大气探测应用频点,可获得与 183 GHz 频点探测空间分辨率相近的高精度的大气温度廓线信息^[10],与 183 GHz 大气湿度探测频点联合探测,FY-3C 微波湿温探测仪将进一步提升我国星载大气探测能力.

为了使卫星微波观测资料更好的用于大气参数反演和数值预报同化,国内外学者对 AMSU 通道以及高频微波通道进行了正演模拟研究,分析了从 50 ~ 425 GHz 在晴空和有云情况下的亮温变化^[11-15].本文基于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)^[16]模拟热带气旋 Katrina 的结果,利用矢量微波辐射传输模式 VDISORT,模拟分析微波湿温探测仪主探测通道——118 GHz 和 183 GHz 对大气湿度变化,云中液态粒子和冰态粒子含量及其分布的亮温响应特征,为微波湿温探测仪探测资料在大气参数反演、台风监测和数值预报同化应用等方面做准备.

1 风云三号 C 星微波湿温探测仪介绍

风云三号 C 星微波湿温探测仪与 FY-3A/B 星 MWHS 的技术体制相同,为全功率型微波辐射计,两副偏置抛物面天线在扫描机构驱动下以切轨变速扫描方式完成周期对地观测,将地气系统的微波辐射反射到圆锥形波纹喇叭馈源,其中 89 GHz 和 118 GHz 两个频点共用一副天线,150 GHz 和 183 GHz 两个频点共用另一副天线,之后地气系统的微波辐射经准光学系统的分频得到以计数形式表示的各通道观测值,利用仪器内部黑体和宇宙背景作为稳定的高低温定标参考源,实现定标,完成大气温度、湿度廓线的定量遥感探测.

星载微波大气探测系统一般利用大气水汽吸收线来探测水汽垂直分布廓线,利用氧气吸收线来探测大气温度廓线,但吸收线远翼已相当于窗区,受吸收气体的影响相对较弱,同时又对大气中的水凝物粒子较敏感,给云雨大气探测带来希望.

风云三号 C 星微波湿温探测仪在 FY-3A/B 星微波湿度计的基础上在高频微波波段不仅设计增加了新的探测频点,同时增加了原有探测频点的通道数量,进一步提升并拓展了风云卫星的星载微波大

气探测能力. 其通道的具体设置见表 1, 118 GHz 和 183 GHz 通道的权重函数见图 1. 从各通道权重函数分布可见, 靠近 118 GHz 吸收线中心的各通道(通道 2-通道 6)权重函数峰值高度在 600 hPa 以上分层分布, 利用这些通道将有望改善中高层大气温度垂直分布廓线的反演精度; 183 GHz 新增的两个通道(通道 12 和通道 14)权重函数峰值高度分别在 500 hPa 和 700 hPa, 提高了 400 hPa 以下大气湿度垂直分布信息的探测能力, 可获得更加精细的大气湿度廓线结构信息.

表 1 微波湿温探测仪通道设置

Table 1 The microwave humidity and temperature sounder channel specifications

通道序号	中心频率 (GHz)	极化	带宽 (MHz)	主要应用目的
1	89.0	V	1 500	背景微波辐射探测、降水检测.
2	118.75 ± 0.08	H	20	大气温度和降水参数垂直结构探测.
3	118.75 ± 0.2	H	100	
4	118.75 ± 0.3	H	165	
5	118.75 ± 0.8	H	200	
6	118.75 ± 1.1	H	200	
7	118.75 ± 2.5	H	200	
8	118.75 ± 3.0	H	1 000	背景微波辐射探测、降水检测.
9	118.75 ± 5.0	H	2 000	
10	150.0	V	1 500	
11	183.31 ± 1.0	H	500	大气湿度垂直结构探测.
12	183.31 ± 1.8	H	700	
13	183.31 ± 3.0	H	1 000	
14	183.31 ± 4.5	H	2 000	
15	183.31 ± 7.0	H	2 000	

2 资料 and 正演模式

2.1 热带气旋基础数据集

威斯康星大学的非流体静力学中尺度模式系统 (UW-NMS) 模拟 Katrina 飓风的基础数据集资料包括: 各层温度 (T)、水汽混合比 (q)、五种微物理量的混合比 (云水 q_c 、雨水 q_r 、冰粒子 q_i 、雪粒子 q_s 、霰

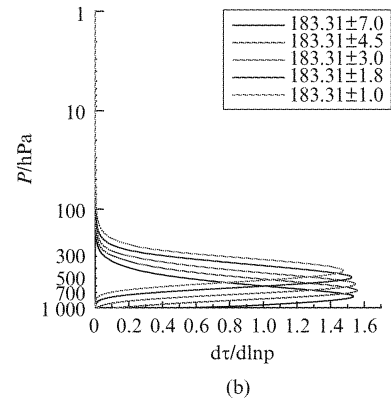
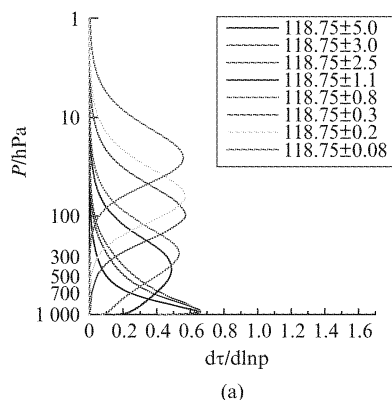


图 1 微波湿温探测仪 118 GHz (a) 和 183 GHz (b) 权重函数分布图

Fig. 1 Weighting functions for the bands 118 GHz (a) and 183 GHz (b) on the microwave humidity and temperature sounder

qq). 液态云雨粒子和冰态粒子的空间分布图如图 2 所示, 其中液态云雨粒子 (图 2a) 包括云中的云水和雨水, 冰态粒子 (图 2b) 包括云中的冰晶, 雪, 霰. 液态粒子高浓度区位于 4 km 左右, 冰态粒子高浓度区位于 6 km 左右.

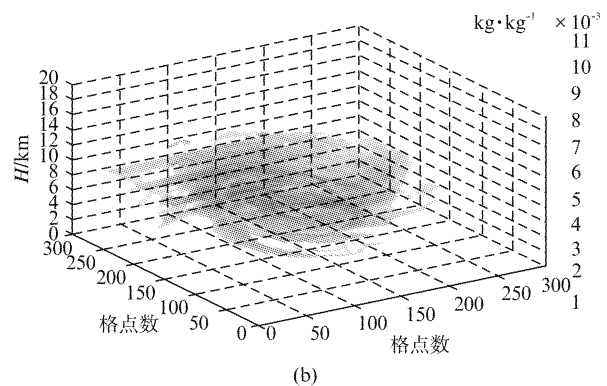
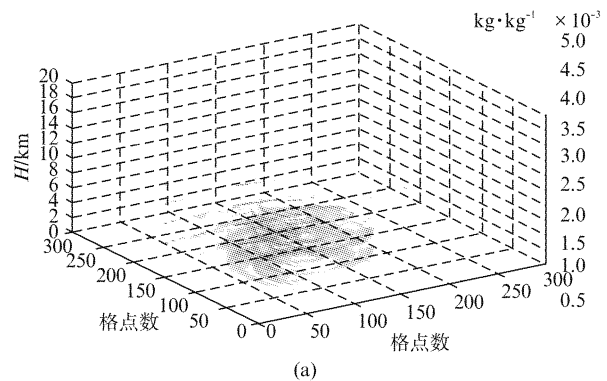


图 2 基础数据集中各种成分在空间中的分布 (a) 液态粒子混合比空间分布 (b) 冰态粒子混合比空间分布

Fig. 2 The distribution of various compositions in the data base. (a) Spatial distribution of liquid particle mixing ratio. (b) Spatial distribution of ice particle mixing ratio

本文第四节的敏感性试验中所用的温湿度廓线以及五种水凝物廓线如图 3 所示.

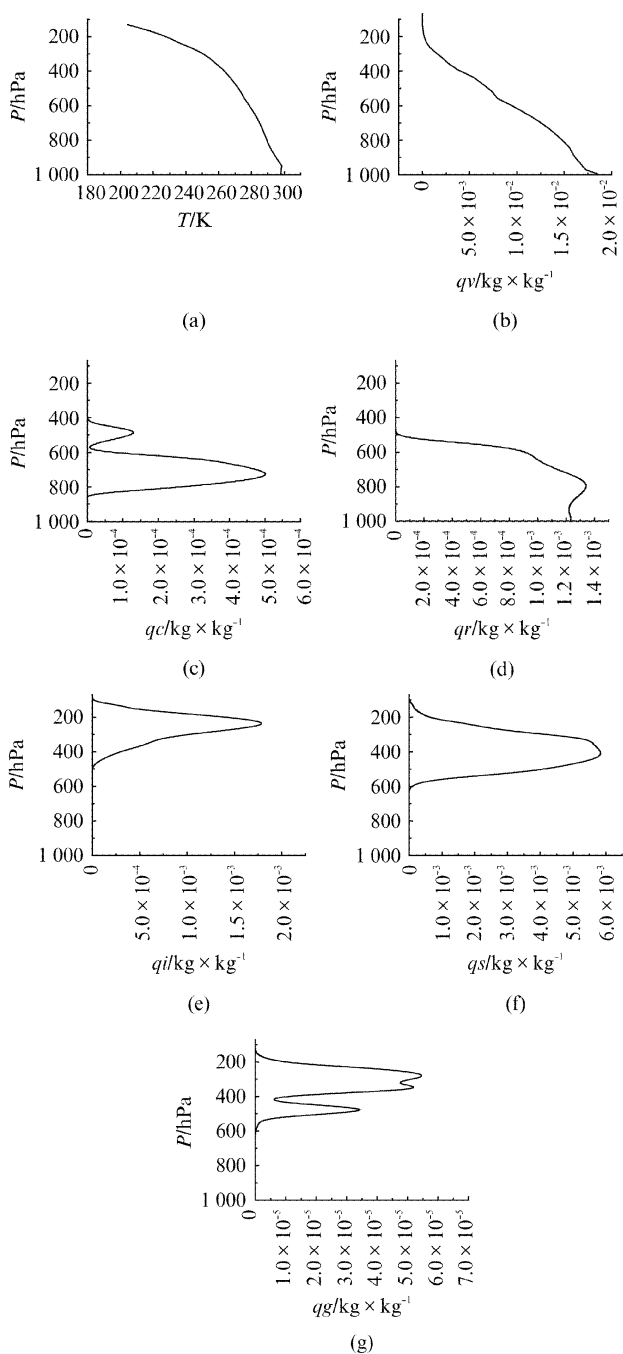


图 3 敏感性试验所用基础廓线数据 (a) 温度廓线 (b) 水汽混合比廓线 (c) 云水混合比廓线 (d) 雨水混合比廓线 (e) 冰晶粒子混合比廓线 (f) 雪粒子混合比廓线 (g) 霰粒子混合比廓线

Fig. 3 Atmosphere profiles used in sensitivity analysis, (a) temperature profile, (b) water vapor profile, (c) cloud water profile, (d) rain water profile, (e) ice particle profile, (f) snow particle profile, and (g) graupel particle profile

2.2 VDISORT 辐射传输模式

VDISORT (Vector DIScrete Ordinate Transfer) 模

式是由 Weng (1992)^[17] 利用离散纵标方法开发的向量形式的辐射传输计算模式. 利用 VDISORT 模型可以方便得到大气各层各方向上的 4 个斯托克斯参量, 微波辐射通量或强度以及微波极化亮温. VDISORT 模型既适用于吸收无散射晴空大气的微波辐射传输模拟分析, 同时也适用于散射介质云雨条件下的大气微波辐射传输模拟分析. 一般大气微波辐射的主要贡献来自氧气、水汽以及云中的液态水成物的微波辐射. VDISORT 模型中对大气中氧气、水汽的吸收特性的描述与 Liebe (1992)^[18] 提出的模式相同.

文中进行正演模拟计算时, VDISORT 模式的下垫面参数设为海洋下垫面, 卫星为星下点观测, 具体参数设置见表 2. 把 Katrina 飓风基础数据集中的大气温湿状况和五种微物理量作为 VDISORT 模式的输入, 进行各通道上行辐射亮温模拟计算和敏感性试验, 分析微波湿温探测仪主探测通道的辐射特性.

表 2 VDISORT 模式参数设置

Table 2 Parameter setting within VDISORT model

参数	设置值
卫星高度	836 (km)
天顶角	180 (度)
Lamber	. true.
Albedo	0.35

3 微波湿温探测仪主探测通道辐射亮温模拟

为分析微波湿温探测仪 118 GHz 和 183 GHz 通道对云中液态粒子和冰态粒子的探测能力, 首先对各通道进行了上行辐射亮温模拟计算. 模拟计算分水汽和液态云雨粒子同时存在, 以及水汽、液态和冰态粒子同时存在两种情况. 通过正演模拟, 分析 118 GHz 氧气吸收通道和 183 GHz 水汽吸收通道在两种情况下的辐射亮温变化.

选择 Katrina 飓风 2005 年 8 月 28 日登陆前, 过台风眼的一条竖剖面共 252 个点的数据作为辐射传输模式的输入. 该剖面上的数据代表了热带气旋的螺旋云带、云墙区和台风眼的大气廓线和云中微物理廓线的特征.

(1) 考虑液态云雨粒子的情况

液态粒子 (云水和雨水) 存在时, 在 118 GHz 和 183 GHz 通道所得的亮温曲线及对应的液态水凝物柱含量如图 4 所示. 由图可见, 大粒子的散射作用使得亮温的峰值温度降低, 在云雨粒子含量最大的两

个峰值区, 118 GHz和183 GHz吸收峰的远翼通道(微波湿温探测仪通道7~9和通道14, 15)亮温有所衰减, 而其他通道对液态云雨粒子的存在几乎没有响应. 结合图2可以看出, 由于液态云雨粒子主要分布在4 km即600 hPa附近, 而权重函数峰值高度在600 hPa左右的通道, 当云雨粒子处于权重函数峰值高度层和卫星之间时, 其散射作用使得路径的透过率减小, 从而使卫星接收到的能量减少, 故这些通道的亮温下降. 而靠近118 GHz和183 GHz吸收峰的通道权重函数峰值高度较高, 云雨粒子处于其权重函数峰值高度层以下, 对这些通道不会产生衰减作用.

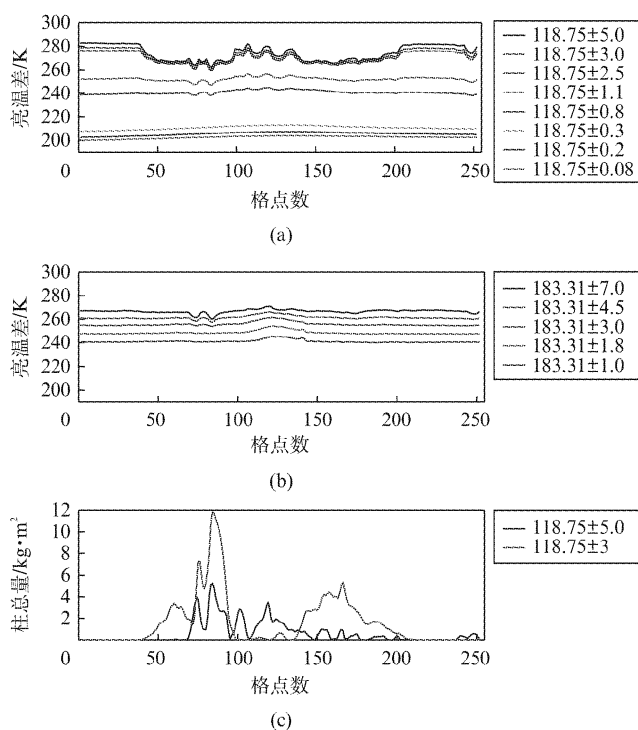


图4 考虑液态云雨粒子存在时微波湿温探测仪118 GHz和183 GHz相关通道亮温曲线.(a)118 GHz通道模拟所得的亮温;(b)183 GHz通道模拟所得的亮温;(c)与图a、b对应位置的雨水和云水的等效柱含水量

Fig. 4 The brightness temperature curve around 118 GHz and 183 GHz on the microwave humidity and temperature sounder, considering liquid water. (a) The brightness temperature simulated at 118 GHz. (b) The brightness temperature simulated at 183 GHz. (c) The equivalent column water content of rain particle and cloud particle corresponding (a) and (b)

(2) 同时考虑冰态粒子的情况

冰态粒子(冰晶、雪和霰)的散射作用, 会对微波湿温探测仪主探测通道的观测亮温产生影响. 图5是118 GHz和183 GHz通道的亮温曲线及对应的液态水凝物和冰态水凝物的柱含量图. 在液态和冰

态粒子含量较多的云墙区, 远翼频点的亮温衰减明显, 且越远离118 GHz和183 GHz吸收峰, 亮温衰减的越剧烈; 在粒子含量较少的台风眼区和外围螺旋云带, 各通道亮温没有变化. 图中亮温曲线的两个明显下降区, 都正好与冰态粒子含量最大值以及次大值区相对应. 液态和冰态散射粒子的存在只会对权重函数峰值高度层比它低的那些通道有影响, 使卫星接收到的辐射强度减小. 图2中可知冰态粒子的高值区在6 km即400~500 hPa左右, 微波湿温探测仪主探测通道的远翼频点权重函数峰值位置都在这一高度以下, 因此, 受到散射作用非常明显, 上行辐射亮温显著下降. 可见, 对云雨大气进行探测时, 应该关注这些远翼通道.

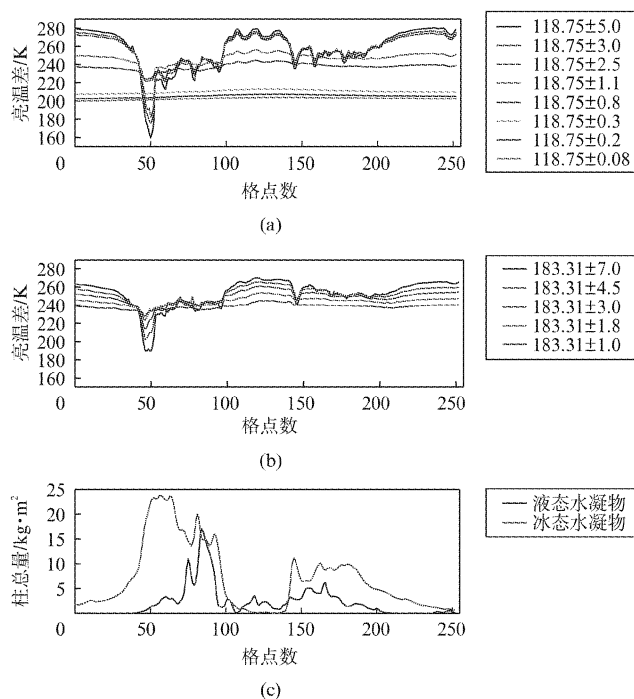


图5 考虑液态云雨粒子和冰态粒子存在时微波湿温探测仪118 GHz和183 GHz相关通道亮温曲线.(a)118 GHz通道模拟所得的亮温;(b)183 GHz通道模拟所得的亮温;(c)与图a、b对应位置的冰态水和液态水的等效柱含水量

Fig. 5 The brightness temperature curve around 118 GHz and 183 GHz on the microwave humidity and temperature sounder, considering liquid water and ice particle. (a) The brightness temperature simulated at 118 GHz. (b) The brightness temperature simulated at 183 GHz. (c) The equivalent column water content of liquid particle and ice particle corresponding to (a) and (b)

(3) 两种情况下亮温差值分析

把考虑水汽和液态云雨粒子同时存在的情况下模拟得到的亮温记为TB1, 考虑水汽、液态和冰态粒子同时存在的情况下模拟得到的亮温记为TB2. 对

应频点的 TB2—TB1 代表了冰态粒子对各通道上行辐射亮温的影响情况. 微波湿温探测仪 118 GHz 和 183 GHz 通道所得的亮温差曲线如图 6 所示. 亮温差值曲线进一步表明, 冰态粒子的散射作用使通道亮温有明显衰减. 118 GHz 氧气吸收通道除了对大气温度分布敏感外, 对热带气旋中存在的冰态粒子也有很好的响应, 甚至和 183 GHz 通道相比, 在 118 GHz 的远翼频点亮温衰减更为剧烈, 表明 118 GHz 通道更容易受到云中冰态粒子的影响.

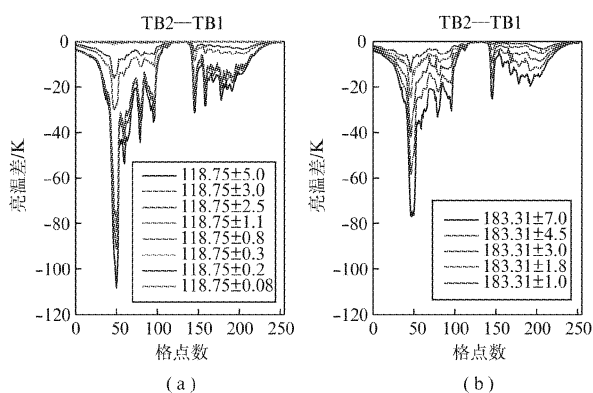


图 6 微波湿温探测仪 118 GHz 和 183 GHz 相关通道对应亮温差 (a) 考虑冰态粒子存在时, 118 GHz 通道对应频点的亮温差 (b) 考虑冰态粒子存在时, 183 GHz 通道对应频点的亮温差

Fig. 6 Difference in brightness temperature around 118 GHz and 183 GHz on the microwave humidity and temperature sounder. (a) Difference in brightness temperature around 118 GHz considering ice particle. (b) Difference in brightness temperature around 183 GHz considering ice particle.

表 3 列出了在 118 GHz 和 183 GHz 相关通道所对应的 TB2—TB1 最大差值. 亮温差值数据直观显示了在考虑冰态粒子后, 各个通道的亮温衰减大小. 离吸收线中心越远的通道, 其亮温受到冰态粒子衰减作用越强烈, 亮温下降越显著. (118.75 ± 5.0) GHz 通道和 (183.31 ± 7.0) GHz 通道的亮温分别衰减了近 110 K 和 80 K, 表明这两个吸收线的远翼通道能够非常好的反映出云中冰态粒子的存在, 如果与光学遥感探测结果结合, 为云相态识别带来新的希望.

上述的亮温模拟分析表明, 微波湿温探测仪 118 GHz 和 183 GHz 远翼通道的微波辐射亮温受云雨粒子的影响显著. 它们的权重函数峰值高度较低, 穿透性较强, 具有对云中液态和冰态粒子的探测能力. 一般热带气旋中冰粒子高浓度区与下面的强降水区有着某种物理联系, 因此, 利用微波湿温探测仪主探测通道观测信息分析得到的冰粒子分布特征对

表 3 两种情况下微波湿温探测仪 118 GHz 和 183 GHz 相关通道亮温差值

Table 3 The difference of brightness temperature around 118 GHz and 183 GHz on the microwave humidity and temperature sounder

通道序号	中心频率 (GHz)	TB2-TB1 的极值 (K)	通道序号	中心频率 (GHz)	TB2-TB1 的极值 (K)
2	118.75 ± 0.08	-0.159 9	11	183.31 ± 1.0	-13.580 9
3	118.75 ± 0.2	-0.583 7	12	183.31 ± 1.8	-24.686 7
4	118.75 ± 0.3	-1.487 6	13	183.31 ± 3.0	-41.775 4
5	118.75 ± 0.8	-16.089 7	14	183.31 ± 4.5	-58.475 2
6	118.75 ± 1.1	-30.150 8	15	183.31 ± 7.0	-76.865 6
7	118.75 ± 2.5	-83.442 2			
8	118.75 ± 3.0	-91.411 5			
9	118.75 ± 5.0	-108.361 8			

确定强降水落区的分析预报具有一定指导意义.

4 微波湿温探测仪主探测通道敏感性试验

卫星探测到的亮温受到大气温度、水汽以及云中水凝物的影响, 不同通道对大气温度湿度以及云中水凝物的变化有不同的响应. 为了进一步研究微波湿温探测仪主探测通道对大气温度湿度及水凝物的探测能力, 选择在台风发展阶段, 云墙区的温度、湿度以及水凝物廓线数据开展敏感性试验. 温度、水汽以及水凝物都分为高 (300 hPa ~ 最高层)、中 (300 hPa ~ 700 hPa)、低 (700 hPa ~ 最底层) 三层, 分别在各层原始廓线数据的基础上进行扰动, 通过 VDISORT 模式模拟计算微波湿温探测仪 118 GHz 和 183 GHz 各通道亮温. 首先开展晴空条件下温度和湿度的敏感性试验, 接着通过水凝物敏感性试验进一步探讨这两组通道对云中水凝物粒子的响应能力. 敏感性试验中所用基础数据廓线见图 3.

4.1 温度敏感性分析

大气各层温度对卫星观测到的亮温有直接影响. 在 VDISORT 模式中扰动原始的大气温度廓线数据, 其扰动范围在 $-10 \text{ K} \sim 10 \text{ K}$ (步长 2 K). 图 7 是不考虑云中水凝物影响的晴空情况下, 分别改变低层、中层和高层大气温度所带来的亮温偏差. 图的上半部分是微波湿温探测仪通道 2 ~ 9 即氧气吸收线 118 GHz 附近的通道, 下半部分是微波湿温探测仪通道 11 ~ 15 即水汽吸收线 183 GHz 附近的通道. 从图中可以看出, 对各层大气温度进行扰动时, 各个通道上行辐射亮温随着大气温度的变化而呈现正相关的变化, 即大气温度越高, 亮温越高. 具体而言, 对低层温度进行扰动时, 118 GHz 远翼通道亮温有响应, 通道 9 亮温变化可达 4 K 左右, 而 183 GHz 通道亮温响应小于 0.2 K. 这是由于 (118.75 ± 5.0) GHz 的

权重函数峰值高度比 (183.31 ± 7.0) GHz通道低,对低层温度的变化更加敏感.改变中层大气温度时,118 GHz远翼通道亮温变化约5 K,183 GHz各个通道上行辐射亮温都有响应, (183.31 ± 7.0) GHz通道亮温变化约10 K(通道15),这是因为183 GHz通道的权重函数峰值高度在400~800 hPa左右,对中层大气温度变化敏感.只扰动高层大气温度时,118 GHz和183 GHz各通道亮温都有响应,靠近吸收线中心的通道亮温变化约10 K,这是由于靠近吸收峰的通道权重函数峰值高度高,其亮温变化的幅度比远翼通道大.

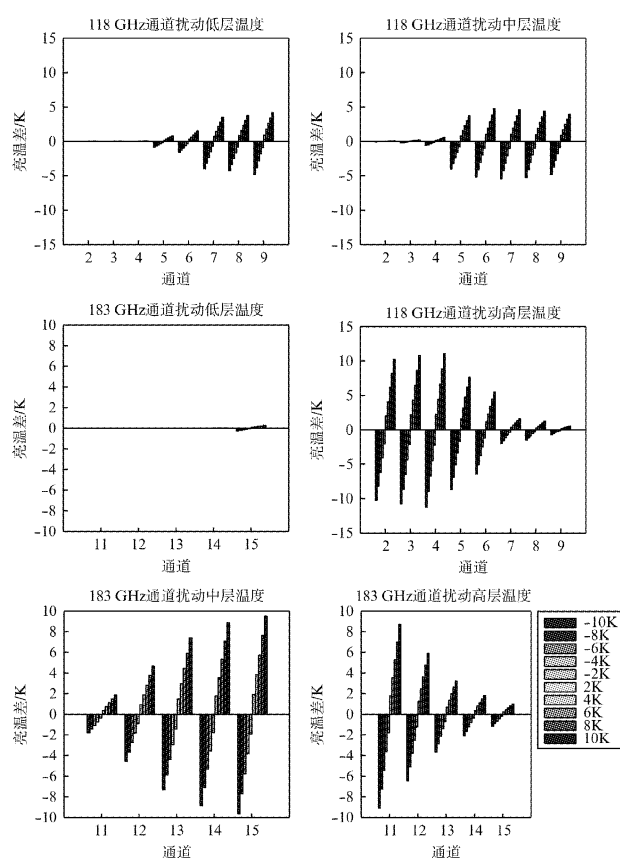


图7 微波湿温探测仪118 GHz和183 GHz通道扰动各层大气温度的亮温偏差

Fig.7 Brightness temperature bias brought by adjustment of vertical profile of atmosphere temperature around 118 GHz and 183 GHz on the microwave humidity and temperature sounder

上述分析清楚地表明,118 GHz通道作为首次使用的大气探测通道,能够很好地反映大气中各层温度的变化,尤其是对对流层中上层大气系统的温度变化更为敏感.而183 GHz湿度探测通道也会对各气层温度的变化有明显反映(尤其是在中层),这意味进行大气温湿度廓线反演时,温度反演的误差

会引入到湿度反演之中,即准确的温度反演是确保湿度反演精度的前提.

4.2 水汽敏感性分析

微波湿温探测仪主探测通道的上行辐射亮温也受到大气中水汽含量的影响,各层水汽含量的变化对各通道的亮温影响不同,反映了各通道对大气中水汽含量的敏感性.对水汽廓线分低、中、高三层进行扰动,扰动时在原始大气水汽含量基础上减少80%和增加100%,以步长0.2变化.水汽的变化带来的辐射亮温偏差如图8所示.总的来看,各通道上行辐射亮温的变化和水汽含量呈现负相关.具体来看,低层水汽含量改变时,作为湿度探测的183 GHz各通道亮温几乎没有响应,而 (118.75 ± 5.0) GHz通道的亮温变化可达3 K,可见118 GHz远翼通道对低层大气水汽含量的变化有一定敏感性.扰动中层大气水汽含量时,118 GHz远翼通道和183 GHz各通道的亮温都有响应.随着中层水汽含量的改变, (118.75 ± 5.0) GHz通道亮温的变化在5 K左右.183 GHz通道亮温在水汽含量减小时,变化得较为明显;而增加水汽含量时,变化得比较缓慢:水汽含量减少80%时, (183.31 ± 7.0) GHz通道亮温增加约10 K;水汽含量增加一倍时, (183.31 ± 7.0) GHz通道亮温减少约5 K.只扰动高层大气的水汽含量时,118 GHz通道亮温几乎没变化,183 GHz各通道的亮温随高层大气水汽含量的增加而减小,可见这些频点对高层大气水汽含量很敏感.由于权重函数峰值高度的影响,靠近183 GHz吸收峰的通道亮温变化幅度越大,水汽含量减少80%,在 (183.31 ± 1.0) GHz通道亮温增加约10 K.

通过微波湿温探测仪主探测通道对各层水汽敏感性分析显示,183 GHz通道对中、高层大气湿度结构的探测具有优势;低层大气水汽的变化对118 GHz的温度探测结果会有影响,这说明水汽的存在对氧气通道产生了“污染”,即大气温度廓线反演的精度也会受到大气湿度状态的影响,但在高层118 GHz受大气湿度廓线的影响就很小,这也进一步说明了118 GHz在高层的高精度温度探测能力.

4.3 水凝物敏感性分析

微波湿温探测仪主探测通道在有效探测大气热力结构的同时,也期望其能够对降水系统如热带气旋有一定的监测能力.而实际上台风云系中云水和雨水的发射和散射作用,以及冰态粒子:冰晶、雪和霰的散射作用会影响卫星观测到的亮温.试验中,各种水凝物分别在各自原始含量的基础上增减

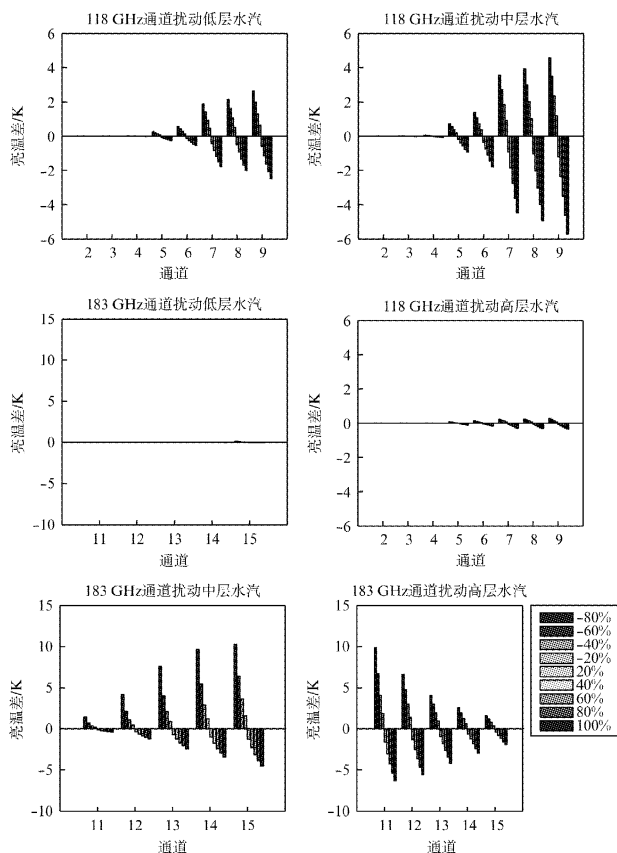


图 8 微波湿温探测仪 118 GHz 和 183 GHz 通道扰动各层大气中水汽的亮温偏差
Fig. 8 Brightness temperature bias brought by adjustment of vertical profile of atmosphere humidity around 118 GHz and 183 GHz on the microwave humidity and temperature sounder

100%, 以步长 20% 变化. 改变一种水凝物的同时, 温度、水汽以及其他水凝物的含量都保持不变.

4.3.1 液态水凝物敏感性分析

液态水凝物——云水和雨水都主要分布在 400 hPa 以下的中低层, 故对它们的中层 (300 hPa ~ 700 hPa) 和低层 (700 hPa 以下) 分别进行扰动, 开展敏感性试验, 结果如图 9 (云水扰动) 和图 10 (雨水扰动) 所示. 由图可以看出, 云水粒子的存在对通道上行辐射亮温的影响以发射作用为主, 随着云水含量的增加, 通道亮温增加. 雨水粒子以散射作用为主, 随着雨水含量的增加, 通道亮温减小. 低层液态粒子扰动时, 主探测通道的辐射亮温均无响应. 改变云雨大气中层云水含量时, 只有 118 GHz 远翼通道的亮温随着云水含量的增加而增加, (118.75 ± 5.0) GHz 通道亮温增加约 1.5 K, 可见通道 7 - 通道 9 对云雨大气中层云水的存在有一定敏感性. 改变云雨大气中层雨水含量时, 183 GHz 通道的亮温变化不超过 0.5 K. 减少中层雨水含量时, ($118.75 \pm$

5.0) GHz 远翼通道的亮温增加约 4.5 K, 增加雨水含量时的亮温减少不超过 1 K.

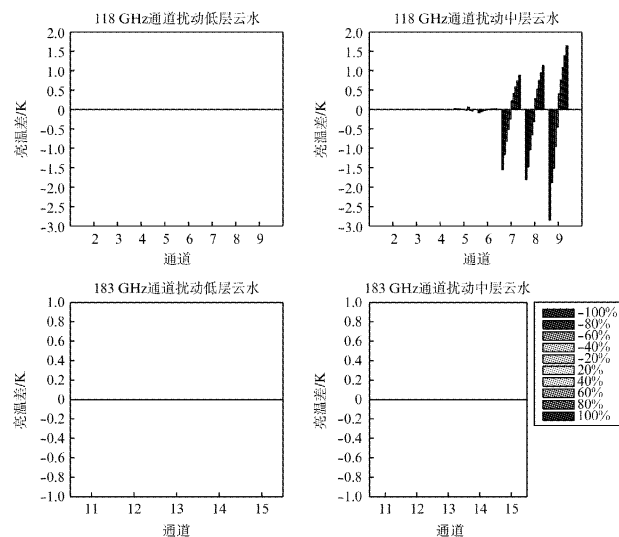


图 9 微波湿温探测仪 118 GHz 和 183 GHz 通道云水扰动的亮温偏差
Fig. 9 Brightness temperature bias brought by adjustment of vertical profile of cloud water around 118 GHz and 183 GHz on the microwave humidity and temperature sounder

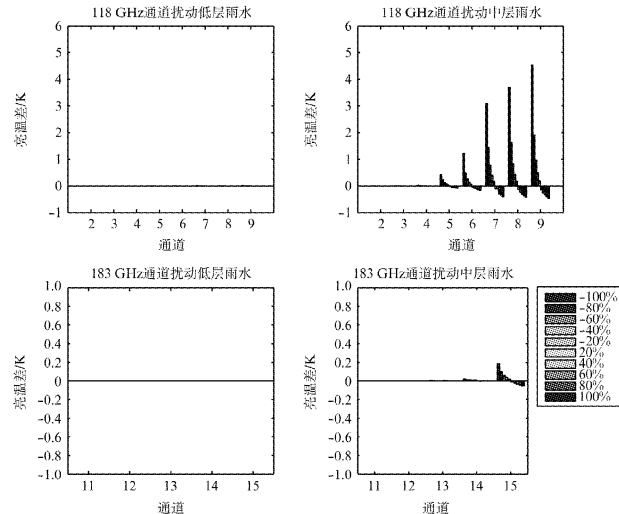


图 10 微波湿温探测仪 118 GHz 和 183 GHz 通道雨水扰动的亮温偏差
Fig. 10 Brightness temperature bias brought by adjustment of vertical profile of rain water around 118 GHz and 183 GHz on the microwave humidity and temperature sounder

4.3.2 冰态水凝物敏感性分析

冰态水凝物——冰晶、雪和霰都主要分布在 600 hPa 之上的中高层, 故只对水凝物的中、高层进行扰动, 开展敏感性试验. 冰晶粒子的存在对各通道的亮温影响很小, 故只给出雪粒子 (图 11) 和霰粒子 (图 12) 的结果.

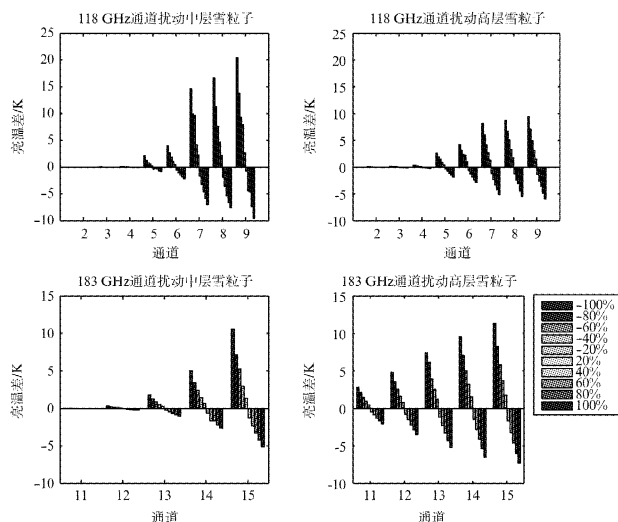


图 11 微波湿温探测仪 118 GHz 和 183 GHz 通道雪粒子扰动的亮温偏差

Fig. 11 Brightness temperature bias brought by adjustment of vertical profile of snow particle around 118 GHz and 183 GHz on the microwave humidity and temperature sounder

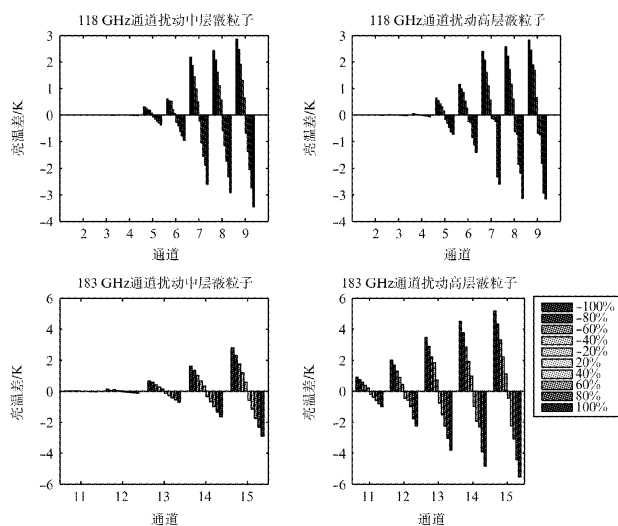


图 12 微波湿温探测仪 118 GHz 和 183 GHz 通道霰粒子扰动的亮温偏差

Fig. 12 Brightness temperature bias brought by adjustment of vertical profile of graupel particle around 118 GHz and 183 GHz on the microwave humidity and temperature sounder

由图 11 可以看出,改变云雨大气中层雪粒子含量时,118 GHz 和 183 GHz 通道远翼频点的亮温变化与中层雪含量的变化呈负相关,即雪含量越高,亮温越低. 118 GHz 通道比 183 GHz 通道亮温变化的更加剧烈,且离吸收线中心频率越远,亮温变化的幅度越大. (118.75 ± 5.0) GHz 通道随中层雪粒子含量的增加,亮温减少了约 10 K,可见该通道对中层大气中雪粒子探测独具优势. 随着高层雪粒子含量

的增加,118 GHz 和 183 GHz 通道的亮温减少. 118 GHz 通道对高层雪粒子含量的敏感性降低,而 183 GHz 各个通道对高层雪粒子都有响应. 对中层和高层霰粒子含量进行扰动时(图 12 所示),各通道亮温差趋势与扰动雪粒子时相同,然而和雪的扰动相比,这些通道对霰粒子的敏感性减弱,这主要是由于霰含量很低而造成. 与 118 GHz 通道相比,高层霰粒子的存在使得 183 GHz 通道亮温变化幅度更大, (183.31 ± 7.0) GHz 通道亮温随高层霰粒子含量增加而下降了约 6 K,即 183 GHz 通道对霰粒子更具敏感性.

5 热带气旋微波成像模拟

利用云模式输出的热带气旋 Katrina 的大气温湿廓线以及水凝物廓线数据,通过 VDISORT 模式在微波湿温探测仪的 118 GHz 和 183 GHz 远翼通道(通道 9 和通道 15),对热带气旋 Katrina 进行微波成像模拟. 所得图像如图 13 所示. 在这两个通道,热

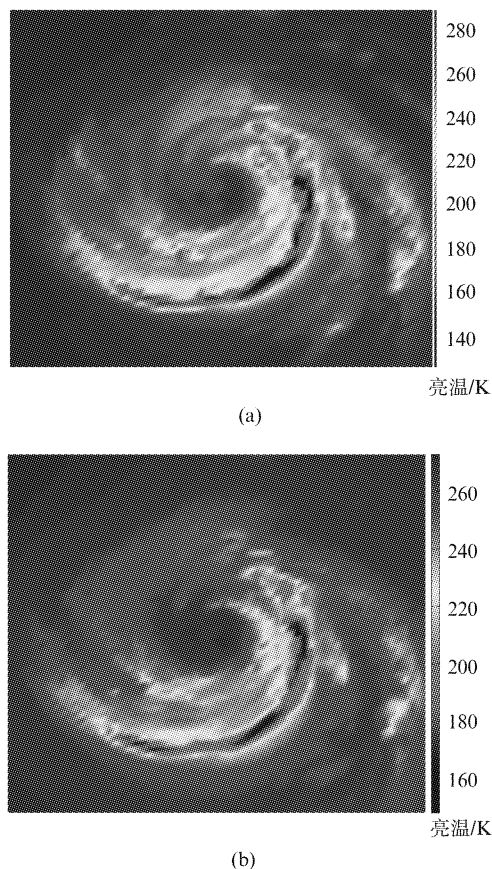


图 13 热带气旋 Katrina 在微波湿温探测仪的通道 9(a)和通道 15(b)的模拟成像

Fig. 13 The simulations of microwave imaging at the channel 9(a) and channel 15 (b) on the microwave humidity and temperature sounder

带气旋的结构可以通过亮温的分布很好的反映出来. 在中心亮温的红色高值区对应着热带气旋的眼区, 蓝色的亮温低值区显示热带气旋的雨带. 台风眼区、云墙区和外围螺旋云带都反映在微波成像图上. 由此可见, FY-3C 在轨业务运行以后, 微波湿温探测仪主探测通道在热带气旋监测方面的潜力.

6 结论

FY-3C 上装载的微波湿温探测仪将具有同时探测大气温度和大气湿度的能力, 增设的 118 GHz 频点是世界首次星载使用的毫米/亚毫米波探测通道. 为了给 FY-3C 微波湿温探测仪在轨业务大气廓线反演和降水参数反演做准备, 本文正演模拟分析了 118 GHz 和 183 GHz 通道观测亮温对大气温湿度和水凝物变化的响应, 分析了主探测通道的辐射特性. 正演模拟结果表明:

(1) FY-3C 微波湿温探测仪 118 GHz 通道可以改善对中高层大气温度垂直分布的探测能力, 和 183 GHz 通道联合, 可以提供更加精细的大气温度和湿度垂直分布结构.

(2) 云中冰态水凝物的存在使得 FY-3C 微波湿温探测仪通道 9 和通道 15 的亮温分别下降 108 K 和 76 K, 云中冰态粒子的存在影响了氧气吸收通道的上行辐射亮温, 表明氧气吸收通道不仅能反映各层温度的分布, 还对云中冰态粒子的存在有探测能力; 183 GHz 作为湿度探测通道, 其远翼通道也具有探测云中冰态水凝物的潜能.

(3) 通过晴空条件下敏感性试验看出, 118 GHz 通道在探测大气温度结构时, 低层大气湿度的变化对其响应较大; 118 GHz 与 183 GHz 两个频点组合会对大气湿度变化有更好的响应, 这也表明在 118 GHz 频点探测结果的配合下, 有望提高大气湿度廓线的探测精度.

(4) 在对云中各种水凝物进行敏感性试验分析后可见, 液态粒子的存在只对 118 GHz 的远翼通道亮温产生了明显影响, 通道 9 的亮温随中层雨水含量的增加下降了约 4.5 K, 即只有 118 GHz 通道能够反映出云雨大气中层云水和雨水含量的变化. 也就是说, 对于降水反演而言, 118 GHz 通道的信息更为重要, 这些通道可作为降水反演的候选通道. 冰态水凝物的散射作用会对 FY-3C 微波湿温探测仪主探测通道的亮温产生影响, 尤其是中层雪粒子的增加可使通道 9 亮温下降 10 K, 这为空中雪晶的探测带来希望.

(5) FY-3C 微波湿温探测仪主探测通道敏感性试验结果也意味着大气温度反演的精度和湿度反演的精度会互相影响, 需要采取同步反演的方法综合反演大气参数.

FY-3C 微波湿温探测仪设置的 183 GHz 探测通道已在 AMSU-B, MHS 和 ATMS 上使用, 文章模拟分析结果也再次证明了这些通道在大气水汽探测方面的应用优势. 对首次极轨星载使用的 118 GHz 通道, 模拟结果显示了其作为大气温度探测通道和云中水凝物探测的潜能. 依据前文分析, FY-3C 微波湿温探测仪具有更强的大气温、湿度廓线探测能力, 和云中雪晶探测能力. 其资料将广泛用于高精度大气温湿度廓线和水凝物廓线反演、降水参数反演、台风监测以及数值预报同化.

本研究的结果主要是基于晴空和洋面的台风系统, 并未进行陆面的正演模拟. 此外, FY-3C 微波湿温探测仪是跨轨扫描方式, 而文中只是对星下点进行了模拟. 在接下来的工作中, 可在这两方面开展进一步的方针分析, 为利用 FY-3C 微波湿温探测仪实际探测资料进行大气参数反演研究奠定基础.

References

- [1] Wilheit, Thomas T. Some comments on passive microwave measurement of rain[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1986, **67**(10): 1226-1232.
- [2] Staelin D H, Chen F W. Precipitation observations near 54 and 183 GHz using the NOAA-15 satellite [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, **38**(5): 2322-2332.
- [3] Chen F W, Staelin D H. AIRS/AMSU/HSB Precipitation Estimates[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, **41**(2): 410-417.
- [4] YANG Jun, DONG Chao-Hua, Lu Nei-Meng, et al. FY-3A: the New Generation Polar-Orbiting Meteorological Satellite of China[J]. *Acta Meteorol. Sinica* (杨军, 董超华, 卢乃锰, 等. 中国新一代极轨气象卫星——风云三号. *气象学报*), 2009, **67**(4): 501-509.
- [5] Dong C, Yang J, Zhang W, et al. An Overview of a New Chinese Weather Satellite FY-3A[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2009, **90**(10): 1531-1544.
- [6] LU Qi-Feng, Initial evaluation and assimilation of FY-3A atmospheric sounding data in the ECMWF System [J]. *Scientia Sinica Terrae* (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. *中国科学地球科学*), 2011, **41**(7): 890-894.
- [7] LI Xiao-Qing, YANG-Hu, YOU-Ran, et al. Remote sensing typhoon Songda's rainfall structure based on Microwave Radiation Imager of FY-3B satellite [J]. *Chinese Journal of Geophysics* (李小青, 杨虎, 游然, 等. 利用风云三号微波成像仪资料遥感“桑达”台风降雨云结构. *地球物理学报*), 2012, **55**(9): 2844-2853.
- [8] Zhang Sheng-Wei, Li Jing, Jiang Jing-Shan, et al. Design and development of microwave humidity sounder for FY-3

- meteorological satellite [J]. *Journal of Remote Sensing*, (张升伟, 李靖, 姜景山, 等. 风云 3 号卫星微波湿度计的系统设计与研制. *遥感学报*), 2008, **12**(2): 199–207.
- [9] He Jie-Ying, Zhang Sheng-Wei. Humidity retrieval in mid-latitude and tropical regions using FY-3 MWHS [J]. *Journal of Remote Sensing*, (何杰颖, 张升伟. FY-3A 星 MWHS 反演中纬度和热带大气水汽. *遥感学报*), 2012, **16**(3): 562–578.
- [10] Chen Hong-Bin, Lin Long-Fu. Numerical Simulation of Temperature Profile Retrievals from the Brightness Temperatures in 6 Channels near 118.75 GHz [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (陈洪滨, 林龙福. 从 118.75 GHz 附近六通道亮温反演大气温度廓线的数值模拟研究. *大气科学*), 2003, **27**(5): 894–900.
- [11] Chen Hong-Bin. Remote sensing of the atmosphere with the millimeter and sub-millimeter wave radiometry from the space [J]. *Remote Sensing Technology and Application* (陈洪滨. 利用高频微波被动遥感探测大气. *遥感技术与应用*), 1999, **14**(2): 49–54.
- [12] Evans K F, Walter S J, Heymsfield A J, *et al.* Modeling of Sub-millimeter Passive Remote Sensing of Cirrus Cloud [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1998, **37**: 184–205.
- [13] Evans K F, Evans A H, Marshall B T, *et al.* The Prospect for Remote Sensing of Cirrus Clouds with a Sub-millimeter-wave Spectrometer [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1999, **38**(5): 514–525.
- [14] Leslie R V, Staelin D. NPOESS Aircraft Sounder Testbed-M: Observations of Clouds and Precipitation at 54, 118, 183, and 425 GHz [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, **42**(10): 2240–2247.
- [15] Catherine Prigent, Juan R Pardo, William B Rossow. Comparisons of the Millimeter and Submillimeter Bands for Atmospheric Temperature and Water Vapor Soundings for Clear and Cloudy Skies [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2006, **45**(12): 1622–1633.
- [16] Tripoli, Gregory J. A nonhydrostatic mesoscale model designed to simulate scale interaction [J]. *Monthly Weather Review*, 1992, **120**(7): 1342–1359.
- [17] Weng Fuzhong. A multi-layer discrete-ordinate method for vector radiative transfer in a vertically-inhomogeneous, emitting and scattering atmosphere—I. Theory [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1992, **47**(1): 19–33.
- [18] Liebe, H J, Rosenkranz P W, *et al.* Atmospheric 60-GHz oxygen spectrum: New laboratory measurements and line parameters [J]. *Journal of quantitative spectroscopy and radiative transfer*, 1992, **48**(5): 629–643.