

# 利用微波探测仪(ATMS)对在轨微波辐射计观测精度的模拟分析

杜明斌<sup>1</sup>, 王超<sup>1</sup>, 安大伟<sup>2</sup>, 李泓<sup>3</sup>, 李雪<sup>4</sup>, 杨何群<sup>1</sup>

(1. 上海市气象科学研究所, 上海 200030; 2. 国家卫星气象中心, 北京 100081;  
3. 中国气象局上海台风研究所, 上海 200030; 4. 上海航天电子技术研究所, 上海 201100)

**摘要:**微波辐射计的观测精度及其对数值模式同化应用的影响评估是微波辐射计观测指标设计的重要参考。基于微波探测仪(ATMS)资料,利用三维变分同化系统模拟分析在轨微波辐射计的观测精度指标。针对ATMS观测误差特征,在其观测基础上增加均值为零、标准偏差分别为0.5,1.0,1.5,2.0 K的正态随机扰动,进而获得不同精度的观测模拟值序列,然后利用Harris和Kelley的辐射资料偏差订正经验方法订正不同精度的观测资料。偏差订正后,利用三维变分同化模式(WRFDA)直接同化ATMS资料。通过2016年6月6h预报场的同化试验,评估了不同观测精度的模拟资料对数值模式的同化影响。

**关键词:**卫星资料;微波辐射计;直接同化;观测模拟;观测精度;质量控制;偏差订正;随机扰动

中图分类号:P412

文献标志码:A

DOI:10.19328/j.cnki.1006-1630.2018.02.008

## Simulation Analysis of Observation Accuracy of In-Orbit Microwave Radiometer Using Advanced Technology Microwave Sounder

DU Mingbin<sup>1</sup>, WANG Chao<sup>1</sup>, AN Dawei<sup>2</sup>, LI Hong<sup>3</sup>, LI Xue<sup>4</sup>, YANG Hequn<sup>1</sup>

(1. Shanghai Institute of Meteorological Science, Shanghai 200030, China;  
2. National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China;  
3. Shanghai Typhoon Institute of China Meteorological Administration, Shanghai 200030, China;  
4. Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201100, China)

**Abstract:** The observation accuracy of microwave radiometer and its influence evaluation of application in numerical model assimilation are important references for the design of microwave radiometer. Based on the data of advanced technology microwave sounder (ATMS), the three-dimensional (3D) variational assimilation system is used to analyze simulation of in-orbit microwave radiometer observation accuracy. According to the observation error characteristics of ATMS, the normal random perturbations with zero mean and standard deviations of 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 K are added to the satellite observation, so simulated observation sequences of different accuracies are obtained. Then, Harris and Kelley's radiometric data deviation correction method is used for observation data. After deviation correction, ATMS data are directly assimilated based on 3D variational assimilation model WRFDA. The assimilation of numerical models is evaluated by assimilation experiments of the 6 h forecast field in June, 2016, and the simulation data of different observation accuracies are evaluated.

**Keywords:** satellite data; microwave radiometer; direct assimilation; observation simulation; observation accuracy; quality control; deviation correction; random perturbation

收稿日期:2017-10-15;修回日期:2018-02-02

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41475040);上海市浦江人才计划项目(17PJ1403400);公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506022)

作者简介:杜明斌(1983—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为GNSS气象和卫星遥感的应用。

## 0 引言

卫星资料不仅覆盖范围广、空间分辨率高,而且具有定标系统稳定的特点,极大地改善了常规观测站稀少地区的资料状况,在很大程度上弥补了海洋和高原区域常规观测资料的不足。星载微波辐射计相比于红外、可见光等卫星探测载荷,具有能够穿透薄云的优点,在全球各大天气数值预报中心的观测资料应用改善贡献评估中均位居前列。星载微波大气探测载荷为美国国家海洋和大气管理局(NOAA)成熟的业务卫星系列上携带 2 通道先进微波探测器(AMSU)的大气探测系统(ATOVS)。其中,AMSU-A 利用 50~60 GHz 的氧气吸收带探测大气温度廓线,AMSU-B/MHS 利用 183 GHz 的水汽吸收线探测大气湿度廓线。美国新一代国家极轨业务环境卫星系统(S-NPP)上的星载大气微波探测系统(ATMS)利用 2 副天线完成 AMSU 系统中 3 副天线的探测任务,ATMS 将大气温度/湿度探测合为一体,在沿用 50~60 GHz 氧气吸收带探测大气温度廓线的同时,在 183 GHz 水汽吸收线附近增加探测通道数,提升了大气湿度场的探测能力<sup>[1-3]</sup>。

中国星载微波遥感技术起步较晚,但发展较快。2008 年 5 月 27 日 FY-3A 卫星搭载微波温度计和微波湿度计的成功发射对我国气象卫星微波资料定量应用具有里程碑意义。先后发射的 FY-3A 和 FY-3B 两颗试验卫星所搭载的微波温度计(MWTS),在 50~60 GHz 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;所搭载的微波湿度计(MWHS)在 150~191 GHz 频段内设计了 5 个通道,用于获取大气湿度的垂直结构分布信息。后续改进型 FY-3C 和 FY-3D 星搭载的 II 型微波温度计(MWTS-II)和微波湿温探测仪(MWHS-II),分别包含 13 个和 15 个通道,在原探测频点附近细化增加了通道数量,同时增加了 118 GHz 新的探测频点,提升了对对流层上部大气温度廓线的探测精度<sup>[4-6]</sup>。这些成果为发展静止轨道微波大气探测技术奠定了基础。发展静止轨道微波大气探测技术所面临的挑战,一是高精度探测难度大,二是高空间分辨率探测难度大。由于载荷发展的科学难题突破周期、制造工艺成本和轨运行环境等因素的影响,利用微波测量大气遥感时,观测精度的影响评估是仪器设计、遥感数据定标和观测资料应用所要考虑的重要问题,尤其是在微波辐射计观测精度设计需求

方面<sup>[7-9]</sup>。文献[10]中在机载微波辐射及大气温湿廓线反演性能分析中,通过加入通道亮温观测噪声的方法对比分析反演样本,得出通道亮温偏差对反演性能的影响。

本文基于美国新一代卫星系统 S-NPP 所搭载的 ATMS 资料,通过增加正态随机扰动进而获得不同精度的观测模拟值序列,利用三维变分同化系统模拟分析在轨微波辐射计的观测精度指标;通过区域数值气象预报同化试验,从微波大气探测精度方面为微波辐射计观测指标设计提供参考依据<sup>[8-13]</sup>。

## 1 资料介绍、同化系统及技术方案

### 1.1 微波资料、背景场数据及实况参考

ATMS 作为 AMSU-A 和 AMSU-B/MHS 辐射计的继承版本,成为后续联合极轨卫星系统 JPSS (Joint Polar Satellite System) 的核心探测仪器,主要用于探测大气温度和湿度廓线。ATMS 共有 22 个探测通道,前 15 个通道为温度探测通道,后 7 个为湿度探测通道,其轨道宽度为 2 300 km,每条扫描线上有 96 个扫描点,扫描步长为 1.11°,扫描周期为 8/3 s,具体参数见表 1<sup>[1-2]</sup>。

ATMS 资料来自于美国国家环境预报中心的全球资料同化系统(GDAS),模式背景场来自美国气象环境预报中心(NCEP)的全球预报系统(GFS),水平分辨率为 0.5°×0.5°,时间分辨率为 6 h。使用 NCEP 发布的再分析场全球分析资料(FNL)数据作为实况参考,因 FNL 作为 NCEP 的再分析资料是最终分析场,补齐了 GFS 在实时状态下没有收集齐全的某些观测资料再次同化分析后的结果,相对于 GFS 资料更加接近于真实大气状况,其水平分辨率为 0.25°×0.25°,时间分辨率为 6 h。模拟试验所用的资料包括 2016 年 6 月共 30 d 的 GFS 预报场资料、FNL 再分析场资料和 S-NPP ATMS 卫星辐射资料。

### 1.2 同化系统与模式介绍

三维变分同化的基本思想就是将目标函数极小化来获得最优的模式初值。定义目标函数

$$J(\mathbf{x}) = J_b + J_o = \frac{1}{2}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_b)^T \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_b) + \frac{1}{2}(\mathbf{y} - \mathbf{y}_o)^T (\mathbf{O} + \mathbf{F})^{-1}(\mathbf{y} - \mathbf{y}_o) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{x}$ 为分析变量; $\mathbf{x}_b$ 为背景场; $\mathbf{y}_o$ 为观测值; $\mathbf{y}$

表 1 ATMS 光谱通道特征  
Tab.1 Channel characteristics of ATMS

通道序号	中心频率/GHz	极化属性	主要吸收成分	峰值能量贡献高度	主要探测目的	灵敏度/K	定标精度/K
1	23.8	V	H <sub>2</sub> O	地表	地表特征、可降水量	0.50	1.00
2	31.4	V	H <sub>2</sub> O	地表	地表特征、可降水量	0.60	1.00
3	50.3	H	O <sub>2</sub>	地表	表面发射率	0.70	0.75
4	51.76	H	O <sub>2</sub>	地表	表面发射率	0.50	0.75
5	52.8	H	O <sub>2</sub>	地表	大气温度	0.50	0.75
6	53.596±0.115	H	O <sub>2</sub>	700 hPa	大气温度	0.50	0.75
7	54.4	H	O <sub>2</sub>	400 hPa	大气温度	0.50	0.75
8	54.94	H	O <sub>2</sub>	250 hPa	大气温度	0.50	0.75
9	55.5	H	O <sub>2</sub>	180 hPa	大气温度	0.50	0.75
10	$f_0=57.29$	H	O <sub>2</sub>	90 hPa	大气温度	0.75	0.75
11	$f_0 \pm 0.322 \pm 0.217$	H	O <sub>2</sub>	50 hPa	大气温度	1.00	0.75
12	$f_0 \pm 0.322 \pm 0.048$	H	O <sub>2</sub>	25 hPa	大气温度	1.00	0.75
13	$f_0 \pm 0.322 \pm 0.022$	H	O <sub>2</sub>	10 hPa	大气温度	1.50	0.75
14	$f_0 \pm 0.322 \pm 0.010$	H	O <sub>2</sub>	6 hPa	大气温度	2.20	0.75
15	$f_0 \pm 0.322 \pm 0.0045$	H	H <sub>2</sub> O	3 hPa	地表特征、可降水量	3.60	0.75
16	88.2	V	H <sub>2</sub> O	地表	地表特征、可降水量	0.30	1.00
17	165.5	H	H <sub>2</sub> O	1 000 hPa	地表特征、可降水量	0.60	1.00
18	183.31±7.0	H	H <sub>2</sub> O	800 hPa	大气湿度	0.80	1.00
19	183.31±4.5	H	H <sub>2</sub> O	700 hPa	大气湿度	0.80	1.00
20	183.31±3.0	H	H <sub>2</sub> O	600 hPa	大气湿度	0.80	1.00
21	183.31±1.8	H	H <sub>2</sub> O	500 hPa	大气湿度	0.80	1.00
22	183.31±1.0	H	H <sub>2</sub> O	440 hPa	大气湿度	0.80	1.00

为由分析变量推导出的观测值;  $y = H(x)$ ,  $H$  称为观测算子, 表示模式空间向观测空间转换的映射关系;  $B$  为背景场误差协方差;  $O$  为观测误差协方差;  $F$  为代表性误差协方差。

观测算子  $H$  代表模式空间向观测空间的一种映射, 对于卫星辐射率资料的直接同化来说, 即为辐射传输模式。卫星资料变分直接同化可通过应用复杂的观测算子, 简化与模式变量非线性相关的观测量的同化, 通过正演方法求解反演问题, 避免卫星反演计算中复杂的不适定问题所带来的误差, 从方法论上避开反演问题的复杂性, 适用于卫星资料的数据同化。

本文采用的同化系统和预报模式分别为美国国家大气研究中心(NCAR)开发的 WRFDA V3.8 和 WRF V3.8, 辐射传输模式为卫星资料同化联合中心(JCSDA)的 CRTM-2.1.3。

### 1.3 技术方案

根据对 S-NPP 的轨道分析, 每天 05:30(协调世界时, UTC, 以下同)前后, 轨道经过中国东部一次, 因此将数值同化试验步骤设计如下。

1) 使用 2016 年 6 月每日 00:00 时全球预报系统的预报资料作为背景场, 通过 WRF 直接启动预报 6 h 作为同化系统的初始场。GFS 00:00 时的初始场已经同化了多种大气观测资料, 也包括 ATMS 资料, 故使用 00:00 时启动的 6 h 预报场作为数值模式同化的初始场可有效避免 ATMS 资料重复同化的问题。模式设置区域如图 1 所示。

2) 卫星资料同化时间设为 06:00 时, 这个时间段正好有 2 条轨道经过中国东部附近区域, 如图 2 所示。同化时间窗设定为 3 h, 一般可使用到前后 3 条轨道的观测数据, 如图 1 所示。由于观测算子模拟精度和观测误差等原因, 微波辐射资料应用须剔除对同化误差影响较大的观测数据, 采用的方法为

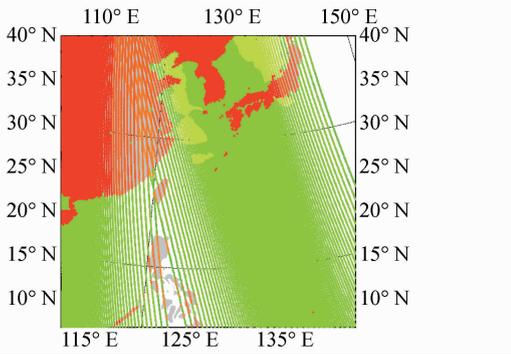


图 1 同化时间窗口内 ATMS 模式区域设置的观测样例  
Fig.1 Example of ATMS paths inside the model domain within assimilation time window

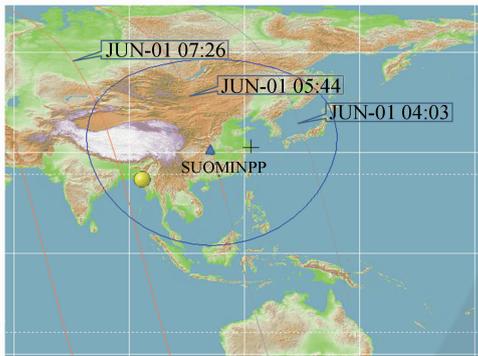


图 2 2016 年 6 月 1 日 06:00 时 (UTC) 前后 S-NPP 经过中国东部 30° N 附近同纬度的轨道时间  
Fig.2 Orbit time when S-NPP passed East China near 30° N before and after 06:00 (UTC) on June 1, 2016

质量控制。质量控制主要有 6 方面内容:(a)极值检查主要剔除观测与模拟差异较大的值,判定方法为去除 OMB(observed-minus-background)超过 15 K 和 OMB 绝对值大于 3 倍标准偏差(S)的像元;(b)剔除混合下垫面上的卫星观测数据;(c)在剔除混合下垫面上的卫星观测数据的同时,剔除在一定程度上受冰、雪影响的下垫面通道 1~5 和 16~17;(d)再对水汽含量较高的像元采用综合通道判识法,统计水汽含量敏感的通道 1,3,16,17 的 OMB 并设置剔除阈值,剔除超过阈值的 1~8 通道和 16~22 通道;(e)云水检测剔除云水路径(CLWP,  $l_{CLWP}$ )超过 0.2 mm 的像元;(f)路面气压检测分别剔除路面气压大于 850 hPa 时的通道 6 像元( $P_{s\_ch6}$ )和路面气压大于 800 hPa 时的通道 18 像元( $P_{s\_ch18}$ )。具体质量控制的检验项目见表 2<sup>[14-17]</sup>。根据 WRF 预报的 06:00 时初始场,控制微波数据质量,订正数据偏

差,分析 ATMS 资料偏差订正的结果。

表 2 ATMS 质量控制项目

Tab.2 Quality control items of ATMS

序号	检验项目	方法	影响通道
(a)	极值检查	$<15\text{ K} \ \& \ <3S$	1~22
(b)	混合下垫面	混合下垫面像元	1~22
(c)	底层通道	冰、雪	1~5,16~17
(d)	可降水量	通道 1,3,16,17 通道检测	1~8,16~22
(e)	云水检测	$l_{CLWP} < 0.2\text{ mm}$	1~22
(f)	路面气压	$P_{s\_ch6} > 850\text{ hPa};$ $P_{s\_ch18} > 800\text{ hPa}$	6,18

3)利用 WRFDA 对 ATMS 资料进行同化,并将同化的结果和 GFS 6 h 预报场分别与 FNL 比较,分析 ATMS 资料对 GFS 6 h 预报场的改进效果。

4)根据正态分布数组特点,相互独立的数组  $A$  和  $B$  分别呈正态分布,  $A \sim N[\mu_a, (\sigma_a)^2]$ ,  $B \sim N[\mu_b, (\sigma_b)^2]$ ,那么  $U = (A + B) \sim N[\mu_a + \mu_b, (\sigma_a)^2 + (\sigma_b)^2]$ 。理论上 ATMS 观测误差呈正态分布,方案通过在 ATMS 观测的基础上增加均值为零,标准偏差分别为 0.5,1.0,1.5,2.0 K 的正态随机扰动,进而获得不同精度的 ATMS 模拟值。

5)把步骤 4)获得的 4 组新的 ATMS 模拟值作为需要同化应用的观测资料,并重复执行步骤 2)和 3)。

## 2 偏差订正结果分析

进行资料同化前需要对微波资料进行偏差订正和质量控制。观测资料的系统偏差通常与数值模式大气温度场典型误差相应的辐射变化相当,故减小辐射传输模式和探测仪器等产生的系统偏差是同化模式产生正效应的基础<sup>[17-19]</sup>。同时,观测资料的误差分布是正态的,故无偏特征也是三维同化的必要条件。偏差订正方案使用 Harris 和 Kelley 的辐射资料偏差订正经验方法,计算每个扫描位置平均值,然后利用该平均值计算扫描订正系数。

$$s(\theta) = \bar{R}(\theta) - \bar{R}(0) \quad (2)$$

式中: $\bar{R}(\theta)$ 为全局或区域平均观测残差; $\theta$ 为扫描角。

图 3 为 2016 年 6 月 ATMS 扫描偏差,通过对各个通道的扫描偏差分析发现,ATMS 的 22 个通道偏差大部分较小,绝对值大部分在 0.5 K 以内,甚至在扫描线边缘远离星下点的区域,偏差仍然较小。有个别通道在原理星下点区域偏差较大,如通道 1~

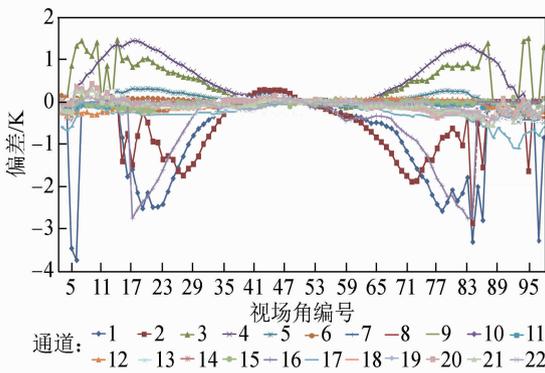
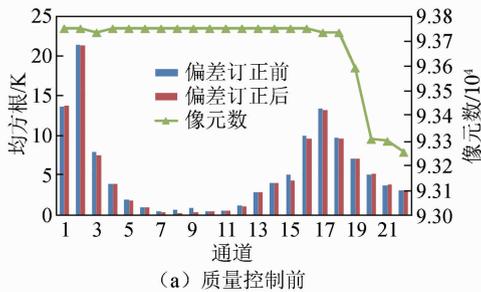


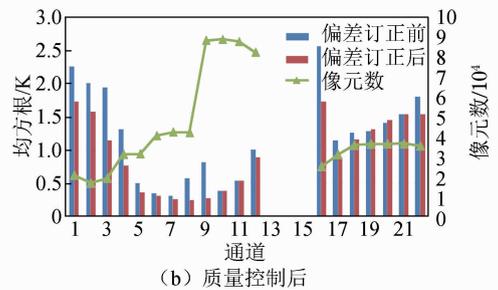
图 3 2016 年 6 月份 ATMS 扫描偏差

Fig.3 Scan deviation of ATMS in June, 2016

5 和 16~17, 都是峰值能量贡献高度层在地面的通道。从图 3 可见, 1~3 通道和 16 通道的偏差较大, 且随着扫描角的增大, 变化趋势并不一致, 说明受下垫面影响, 观测算子模拟和观测值之间的偏差难以控制。另外, 由于通道 13, 14, 15 为高空吸收带通道, 峰值能量贡献高度分别是 10, 6, 3 hPa, 高于模



(a) 质量控制前



(b) 质量控制后

图 4 质量控制前 OMB 均方根

Fig.4 Root mean square of OMB

### 3 不同精度观测资料同化效果分析

根据前述同化试验步骤 4) 获得的 4 组新的 ATMS 模拟值做质量控制和偏差订正, 通过分析每次模拟的 OMB 统计结果得知, 各通道在质量控制和偏差订正后的变化趋势和原始观测资料类似。如图 5 所示, 标签 0.0 为原始观测资料, 在 ATMS 观测的基础上增加均值为零、标准偏差分别为 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 K 的正态随机扰动, 进而获得不同精度的 ATMS 模拟值。可见, 通过质量控制和偏差订正, 随着扰动的增加, 标准偏差明显增大。增加 0.5 K 的正态随机扰动后, ATMS 大部分通道的标准偏差稍有增大, 主要为中层温度通道和中层湿度通道的标准偏差, 但个别地面通道标准偏差的变化

趋势不一致。当增加随机扰动的标准偏差超过 1.0 K 时, GFS 背景场的温度通道标准偏差超过 1.0 K, 湿度通道标准偏差超过 1.5 K。同时从图 5 中可见, 在增加 0.5 K 的扰动后, 通道 1 和通道 16~22 的标准偏差并没有增大, 个别通道反而变小, 其原因是对于地面通道和湿度通道, 快速辐射传输模式的正演精度和卫星观测误差叠加起来远大于 0.5 K, 故无法对 0.5 K 的扰动产生相应的响应。

拟模式层顶气压 (20 hPa), 故这 3 个通道不在分析之列。

离线统计 2016 年 6 月 1 日—15 日的观测数据偏差, 将统计结果用于 2016 年 6 月 16 日—30 日 ATMS 微波资料的偏差订正。从图 4 所示的偏差订正前后 OMB 均方根可见, 质量控制前, 偏差订正对观测资料与背景场之间均方根的影响不大。从图 4(a) 可见, 通道 1~3 和通道 16~20 的均方根明显偏大, 超过 5 K。采用表 2 的质量控制后, 剔除大量对同化应用影响较大的观测像元。同时, 由于通道 13~15 峰值能量贡献高度超过模式层顶, 同化应用中直接剔除。从图 4(b) 可见, 通过质量控制和偏差订正, 均方根明显减小, 像元数目在质量控制后也减小到原来的 25% 左右。可见, 质量控制和偏差订正可使除下层通道 1~3 的大部分 ATMS 温度通道 OMB 均方根小于 1 K, 5~10 中层温度通道均方根小于 0.5 K; 湿度通道均方根相对较大, 地面湿度通道 16~17 均方根在 1.5~2.0 K 之间, 中层湿度通道均方根约为 1 K。

趋势不一致。当增加随机扰动的标准偏差超过 1.0 K 时, GFS 背景场的温度通道标准偏差超过 1.0 K, 湿度通道标准偏差超过 1.5 K。同时从图 5 中可见, 在增加 0.5 K 的扰动后, 通道 1 和通道 16~22 的标准偏差并没有增大, 个别通道反而变小, 其原因是对于地面通道和湿度通道, 快速辐射传输模式的正演精度和卫星观测误差叠加起来远大于 0.5 K, 故无法对 0.5 K 的扰动产生相应的响应。

偏差订正后, 利用 WRFDA 把不同精度的模拟资料直接同化到 GFS 6 h 预报场中, 比较获得的初始场与 FNL 再分析场, 把同化后与同化前的初始场与 FNL 之差的区域平均均方根作差, 如果差值为负值, 说明同化后的初始场与 FNL 再分析场比同化前

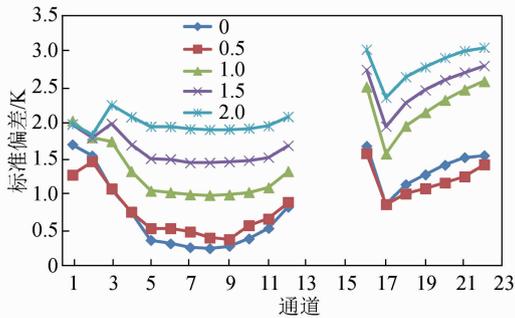


图 5 不同精度模拟资料的标准偏差

Fig.5 Standard deviation of different precision simulation data

更加接近。由于 ATMS 主要探测大气的温湿度廓线,在此统计了同模式的 850 hPa 温度场  $T$  和 700 hPa 湿度场  $H_{RH}$  同化效果,如表 3 所示,可见,随着扰动的增加,对初始场改善的效果减小,同时通过分析发现仅仅同化 ATMS 资料对模式初始场的改变不大。

表 3 不同精度模拟资料直接同化效果统计

Tab.3 Direct assimilation statistics of simulation data with different precisions

统计项目	气压/hPa	统计结果		
		0.0	1.0/K	2.0/K
湿度场/%	700	-0.159 62	-0.141 9	-0.081 96
$T/K$	850	-0.038 68	-0.035 35	-0.023 27

## 4 结束语

在 ATMS 观测的基础上,通过增加均值为零、标准偏差分别为 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 K 的正态随机扰动进而获得不同精度的 ATMS 模拟值。利用三维变分同化模式 WRFDA 和快速辐射传输模式 CRTM 对包括原始观测资料的 5 组不同精度的 ATMS 模拟值做质量控制和偏差订正。研究发现:观测资料模拟值随着扰动的增加,标准偏差明显增大;增加 0.5 K 的正态随机扰动后,ATMS 大部分通道的标准偏差稍有增大,主要为中层温度通道和中层湿度通道的标准偏差增大,但个别地面通道的标准偏差变化趋势表现不一致;当增加随机扰动的标准偏差超过 1.0 K 时,与 GFS 背景场的温度通道标准偏差超过 1.0 K。质量控制和偏差订正后,利用 WRFDA 同化不同精度的 ATMS 模拟资料并统计同化效果可得:随着扰动的增加,对初始场改善的效果减小,且仅仅同化 ATMS 资料对模式初始场的改变不大。其原因有二:一是由于 GFS 模式背景场

已经同化了多种观测资料,精度相对较高,一是因为 FNL 再分析场与 GFS 来源于同一套 WRF 业务系统,模式场比较接近。

台风、暴雨、强对流等灾害性天气过程需要高时效、高精度的监测,静止轨道气象卫星对于监测上述快速发展的强灾害性天气系统具有明显优势。我国下一代风云静止气象卫星将搭载微波遥感仪器,通过利用静止平台的高时间分辨率特性和微波对云雨大气的穿透特性,来提高对灾害性天气发生、发展、消亡的监测能力。迄今为止,国际上静止轨道微波大气探测仍是一项技术空白,然而,在轨极地轨道卫星上的微波气象探测仪器众多且应用广泛,其中 ATMS 是目前业务极轨卫星星载微波垂直探测仪器的代表。因此通过在轨微波辐射计观测精度模拟分析可为静止微波仪器的论证研制提供参考。

## 参考文献

- [1] MUTH C, LEE P S, SHIUE J C, et al. Advanced technology microwave sounder on NPOESS and NPP [C] // IEEE International Conference of Geoscience and Remote Sensing Symposium, Anchorage, AK, USA, 2004, 4: 2454-2458.
- [2] 董佩明,刘健文,刘桂青,等. ATMS 卫星资料的同化应用及与 AMSUA/MHS 的比较研究[J]. 热带气象学报, 2014, 30(4): 623-632.
- [3] 贺秋瑞,王振占,何杰颖. FY-3C/MWHTS 资料反演陆地晴空大气温湿廓线[J]. 遥感学报, 2017, 21(1): 27-39.
- [4] 杜明斌,杨引明,杨玉华,等. FY-3A 微波资料偏差订正及台风路径预报应用[J]. 应用气象学报, 2012, 23(1): 89-95.
- [5] 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(7): 890-894.
- [6] 何杰颖,张升伟. FY-3A 星 MWHTS 反演中纬度和热带大气水汽[J]. 遥感学报, 2012, 16(3): 562-578.
- [7] 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.
- [8] 卢乃锰,谷松岩. 静止轨道微波大气探测的技术现状与发展展望[J]. 气象科技进展, 2016, 6(1): 120-123.
- [9] 钱博,曹岸杰,吴莹,等. 静止轨道微波大气探测技术现状[J]. 国土资源遥感, 2017, 29(4): 1-5.
- [10] 谭泉,姚志刚,赵增亮,等. 机载微波辐射计大气温湿廓线反演性能分析[J]. 气象水文海洋仪器, 2014,

- 31(3): 5-11.
- [11] 叶云裳. 星载多频段双极化共馈微波辐射计天线[J]. 宇航学报, 2004, 25(1): 52-59.
- [12] 杨忠东, 张鹏, 谷松岩, 等. FY-3 卫星应用和发展[J]. 上海航天, 2017, 34(4): 1-7.
- [13] 王彦, 康奥峰, 曹韞真, 等. 静止轨道实孔径微波天线主反热控方案研究[J]. 上海航天, 2016, 33(5): 107-113.
- [14] BANNISTER R N. A review of forecast error covariance statistics in atmospheric variational data assimilation. I: Characteristics and measurements of forecast error covariances[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2008, 134 (637): 1971-1996.
- [15] 王金成, 龚建东, 王瑞春. GRAPES 全球三维变分同化中卫星微波温度计亮温的背景误差及在质量控制中的应用[J]. 气象学报, 2016, 74(3): 397-409.
- [16] 杨寅, 韩威, 董佩明. AMSU 微波探测资料同化的质量控制方法概述[J]. 气象, 2011, 37(11): 1395-1401.
- [17] 马刚, 王云峰, 张晓辉, 等. 基于梯度信息的微波辐射亮温资料质量控制方法[J]. 热带海洋学报, 2017, 36(2): 86-95.
- [18] HARRIS B A, KELLY G. A satellite radiance-bias correction scheme for data assimilation[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2001, 127(574):1453-1468.
- [19] 刘志权, 张凤英, 吴雪宝, 等. 区域极轨卫星 ATOVS 辐射偏差订正方法研究[J]. 气象学报, 2007, 65(1): 113-123.