

星载微波传感器大气温湿度物理反演算法研究

王超^{1,2}, 杜明斌¹, 谢鑫新³, 李向芹³, 李贝贝³

(1. 上海市气象科学研究所, 上海 200030; 2. 中国气象局上海台风研究所, 上海 200030;
3. 上海航天电子技术研究所, 上海 201100)

摘要: 针对我国下一代静止轨道微波探测器资料应用的需求, 对微波 50~60 GHz 和 183 GHz 的温湿遥感通道开展了不同大气条件下探测敏感高度的模拟, 发现大气散射对微波探测影响明显, 尤其是近地面通道, 在未来数据应用时需加以注意。提出一种基于一维变分的大气温湿度廓线物理反演算法。以美国最新一代气象卫星 Suomi NPP 搭载的 ATMS(Advanced Technology Microwave Sounder) 获取的观测资料为研究对象, RTTOV(Radiative Transfer for TOVS) 快速辐射传输模式为前向算子, 利用一维变分算法开展了温湿度廓线反演单点试验。研究发现: 地表参数对微波亮温, 尤其是地面通道影响较大。同时, 反演所需背景场对反演结果影响较明显, 反演所得温度与背景场较接近。

关键词: 微波; 权重函数; 温湿度廓线反演; 一维变分

中图分类号: TP732.1

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2018.02.009

Atmospheric Temperature and Humidity Profiles Physical Retrieval Algorithm for Satellite-Borne Microwave Sensors

WANG Chao^{1,2}, DU Mingbin¹, XIE Xinxin³, LI Xiangqin³, LI Beibei³

(1. Shanghai Institute of Meteorological Science, Shanghai 200030, China;

2. Shanghai Typhoon Institute, China Meteorological Administration, Shanghai 200030, China;

3. Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201100, China)

Abstract: To facilitate the application of the data from the future microwave instrument, which is planned to be used for China's next generation geostationary satellite, firstly, the peak altitudes of the weighting functions of 50~60 GHz and 183 GHz microwave channels for monitoring the temperature and humidity are simulated. It is found that atmospheric scattering is of significant impact for these channels, especially near the ground, and this effect should be treated carefully in the future data usage. Secondly, a physical one-dimensional variational (1DVAR) retrieval algorithm is proposed to obtain the atmospheric temperature and humidity profiles. Due to lack of geostationary microwave remote sensing data, in the single point retrieval testing, the data from ATMS (Advanced Technology Microwave Sounder) which is boarded on the USA new generation weather satellite Suomi NPP are used as the testing data, and RTTOV is used as the forward operator. The results show that the surface parameters have an obvious influence on the brightness temperature, in particular for the surface channels. Meanwhile, the retrieved temperature profiles are close to the background field, which indicates the importance of the background in 1DVAR.

Keywords: microwave; weighting function; temperature and humidity profiles retrieval; one-dimensional variation

0 引言

台风是我国沿海及部分内陆地区面临的主要灾

害性天气之一, 台风及其伴随的狂风、暴雨和风暴潮往往会造成人员及财产的大量损失^[1], 对此类灾害

收稿日期: 2017-11-20; 修回日期: 2018-02-08

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)

作者简介: 王超(1988—), 男, 博士, 主要研究方向为微波大气温湿度反演。

性天气的高时效、高精度监测对提高天气预报准确率有重要意义。由于红外遥感仅对晴空大气有效,而微波对云雨大气具备一定的穿透能力,因此,微波遥感是监测此类灾害性天气的重要手段之一。

目前星载微波传感器主要搭载于极轨卫星上,虽然极轨卫星具有通道信息丰富、分辨率高的特点,但仍无法完全满足对中小尺度暴雨和强对流等灾害性天气多变湿度场和热力场的观测要求^[2]。极轨卫星的重访周期通常为 12 h,即使采用双星探测方案,重访时间间隔也仅达 6 h,此时间分辨率无法满足对灾害性天气的监测要求。故基于静止轨道的星载微波探测技术将是解决此类需求的可靠技术手段。文献[3]中提出在静止轨道上运行微波传感器 GEM(Geostationary Microwave Observatory)的设想,该设计传感器采用 2~3 m 天线,利用高频通道减小了天线尺寸^[4];欧洲的 GOMAS(Geostationary Observatory for Microwave Atmospheric Sounding)计划采用类似设计理念^[5-6]。2006 年在美国国家航空和宇航局(NASA)的支持下,文献[7-8]中设计了合成孔径微波辐射计 GeoSTAR(Geostationary Synthetic Thinned Aperture Radiometer),该设计使用干涉式综合孔径体制,欧洲的 GAS(Geostationary Atmospheric Sounder)计划采用类似设计方案^[9-10],通过采用更先进的稀疏天线阵列旋转分时采样方案,降低了传感器的复杂性、技术风险及成本。目前,我国也开展了静止轨道微波星的设计研制工作,已报道的有 GIMS(Geostationary Interferometric Microwave Sounder)^[11-12],该设计方案采用的是干涉式综合孔径成像方案。

常用的温度探测微波通道为 50~60 GHz 处的 O₂ 吸收通道,常用的湿度探测通道为 183 GHz 的水汽吸收通道,美国极轨气象卫星上的传感器 AMSU/MHS(Advanced Microwave Sounding Unit/Microwave Humidity Sounder)和 ATMS(Advanced Technology Microwave Sounder)^[13]则使用以上 2 个吸收位置。除以上 2 个吸收通道之外,在 118 GHz 和 425 GHz 两处的 O₂ 吸收通道同样具备一定的温度探测能力,其中我国风云三号 C 星微波星首次在极轨气象卫星上装载了 118 GHz 接收机,提升了对对流层上部温度廓线的探测能力;在 325 GHz 处的 H₂O 吸收通道也可用于探测大气湿度。相比高频通道,低频通道对大气具有更好的穿透能力,但需对其配备尺寸较大的天线,将其设置在

静止轨道载荷上,对仪器制造和星载平台稳定性均有较高要求。随着仪器制造水平的提高,将低频温湿度探测通道设置于静止轨道已逐渐变为可能。

我国未来风云四号静止气象卫星将考虑搭载微波温湿度探测器,以期提高我国对灾害性天气的监测和预报能力,而大气温湿度反演将是风云四号微波探测器数据应用的重要环节。据此,本文给出了一种基于一维变分的星载传感器的大气温湿度反演算法。考虑到未来静止轨道微波探测器可能采用 50~60 GHz 温度探测通道和 183 GHz 湿度探测通道,该探测通道与美国 Suomi NPP(National Polar-orbiting Partnership)上搭载的 ATMS 相似,且将温湿探测通道集成于单一传感器是未来主流方案,故以 ATMS 资料为试验对象开展研究。此外,为了解 ATMS 通道对云雨大气的探测性能,在反演之前,利用快速辐射传输模式模拟了不同云雨大气时 ATMS 各通道的探测敏感高度。

1 数据和方法

1.1 ATMS 数据

美国新一代气象卫星 Suomi NPP 于 2011 年 10 月 28 日发射升空,其上搭载的 ATMS 具有 22 个探测通道,其中第 1 和第 2 通道用于提供温湿度廓线反演所需的水汽和下垫面发射率信息,第 3~15 通道用于大气温度探测,第 16~22 通道用于大气湿度探测,与前代 AMSU/MHS 相比,ATMS 新增了 51.76 GHz 温度探测通道,(183.31 ± 4.5) GHz 和 (183.31 ± 1.8) GHz 湿度探测通道,并将 89.0 GHz 窗区通道调整至 88.2 GHz 频率。相比 AMSU/MHS,ATMS 具有更宽的刈幅,为 2 500 km,比 AMSU 扩大了近 400 km,同时 ATMS 每条扫描线有 96 个扫描点,而 AMSU-A 仅有 30 个扫描点,MHS 仅有 90 个扫描点,故 ATMS 拥有更高的空间分辨率和覆盖率。

1.2 辐射传输模式

本文采用 RTTOV(Radiative Transfer for TOVS)为大气前向模拟算子,RTTOV 为 20 世纪 90 年代 ECMWF 开发用于模拟 TOVS 观测资料的辐射传输模式,经过多次改进^[14-15],已具备红外和微波通道的辐射模拟能力,同时其云散射模块(RTTOV_SCATT)可更好地模拟有云条件下的大气辐

射状况,RTTOV 目前已更新至 12.1 版本,被广泛应用于卫星产品反演和数据同化研究中。

2 一维变分反演算法

一维变分的本质是最优估计,其在地基微波辐射计^[16-18]、红外^[19-20]、微波^[21-25]探测数据反演中均有广泛应用。在反演最优求解过程中,一维变分算法将所求大气参数作为一个整体进行迭代求解,同时算法充分利用先验信息,降低反演的不确定性。假设仪器观测误差和背景场误差不相关,反演代价函数形式为

$$J(\mathbf{x}) = (\mathbf{x} - \mathbf{x}_0)^T \mathbf{B}^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) + [\mathbf{y} - \mathbf{y}(\mathbf{x})]^T \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{y} - \mathbf{y}(\mathbf{x})] \quad (1)$$

式中: \mathbf{x} 为当前迭代过程大气状态向量; \mathbf{x}_0 为背景场; \mathbf{B} 为背景误差协方差, \mathbf{B} 矩阵采用 NMC 方法^[26]从模式不同时间段相同时刻预报场估算得到; \mathbf{y} 为观测向量; $\mathbf{y}(\mathbf{x})$ 为辐射传输过程模拟(由大气状态场到观测场的映射过程); \mathbf{R} 为观测误差协方差。式(1)的第 1 项代表背景场误差,第 2 项代表观测场误差。代价函数最小化可由牛顿迭代法得到

$$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{x}_0 + \mathbf{B} \mathbf{H}_n^T (\mathbf{H}_n \mathbf{B} \mathbf{H}_n^T + \mathbf{R})^{-1} [\mathbf{y} - \mathbf{y}(\mathbf{x}_n) - \mathbf{H}_n (\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}_n)] \quad (2)$$

式中: $\mathbf{H}_n = \nabla_{\mathbf{x}} \mathbf{y}(\mathbf{x}_n)$, n 为迭代次数。在迭代过程中 $\nabla_{\mathbf{x}} J$ 变化小于一定程度时,即达到反演求解目标,此时的 \mathbf{x} 即为观测向量对应的大气状态。反演具体流程如图 1 所示,图中 NWP 为数值天气预报。

2.1 数据预处理

本研究反演采用 WRF v3.9 数值模式预报场为反演的背景场,由于数值模式通常为规则的经纬度格网,而卫星观测数据的格网依赖于传感器成像时的几何、光学条件和仪器探测空间分辨率。在反演之前,需对二者进行格网匹配。本研究拟采用空间双线性插值方法,对背景场进行插值,以匹配卫星观测数据。值得注意的是,未来静止轨道微波探测由于观测时间间隔短,在反演时需以较高的模式预报数据作为背景场,本文算法在未来应用时,将考虑使用高时空分辨率的华东地区业务预报模式预报产品作为背景场,故满足反演对背景场的需求。

极轨卫星微波传感器各通道波束宽度不同,导致观测位置、空间覆盖范围和分辨率不同。如 ATMS 的第 1、2 通道波束宽度为 5.2° ,第 3~16 通道

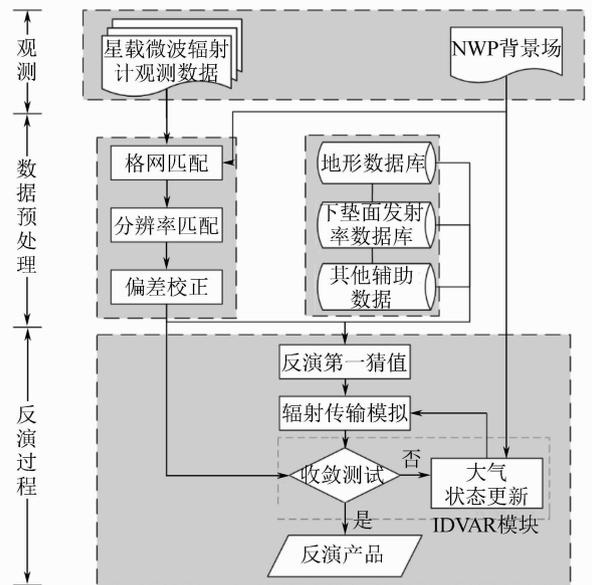


图 1 一维变分物理反演算法流程图
Fig.1 Schematic diagram of the physical IDVAR retrieval algorithm

为 2.2° ,第 17~22 通道为 1.1° 。故在进行反演前需对 ATMS 进行轨道分辨率匹配。本文使用 NWP-SAF 中心开发的 ATOVS and AVHRR Pre-processing Package (AAPP)包对 ATMS 进行通道分辨率匹配,该软件包采用 Backus-Gilbert(BG)算法。

偏差去除主要用于去除辐射传输模式模拟和真实观测值之间的系统误差,本研究拟采用的方法为:从模式预报场提取 9 月 11 日至 14 日 ATMS 成像时大气状态数据,在模式模拟和 ATMS 观测空间匹配区域,每日取空间不相邻廓线 250 条,利用 RTTOV 模拟得到模拟亮温值,对比该亮温值与 ATMS 观测亮温,以直方图匹配算法去除 ATMS 数据的偏差,使模拟和观测的整体偏差为 0。

2.2 反演过程

合理的第一猜值可使反演迭代过程更快地达到收敛,在目前主要的 ATMS 微波大气温湿度物理反演业务算法中,如 NOAA 的 MiRS 和 NUCAPS 反演系统,均采用经验拟合的方法为反演过程提供第一猜值^[23,27]。神经网络算法在 AIRS 大气廓线官方反演算法中,取代了拟合方法,为反演提供第一猜值,结果发现反演精度有明显提升^[28],但该方法尚未在 ATMS 反演中得到应用。

本文提出利用神经网络算法为反演提供第一猜

值。具体方法为:针对反演区域,利用 BP (Back Propagation) 神经网络对前一天的 ATMS 观测亮温和官方反演产品进行网络训练,保存网络,将待反演 ATMS 观测亮温输入至神经网络进行前向运算,得到大气温湿度第一猜值。研究分析了反演第一猜值的精度,以 2016 年 9 月 13 日 ATMS 观测数据为样本,提取 61 244 条亮温和大气廓线进行训练,随后利用训练的网络对 2 000 条亮温进行测试反演,对比反演结果与官方产品,反演温度差异在 0.6 K 以内,水汽差异在 10% 以内,如图 2 所示。

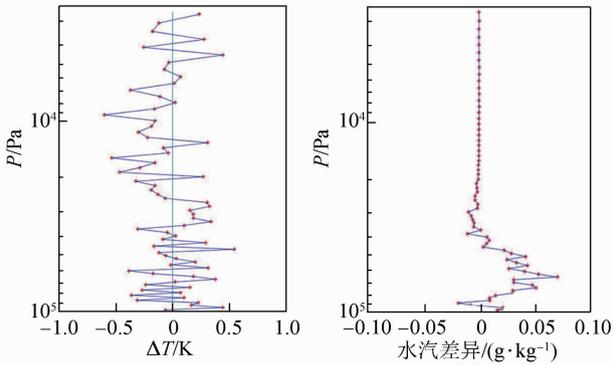


图 2 神经网络第一猜值与 NOAA MiRS 官方产品温湿度差异

Fig.2 Temperature and water vapor difference between the neural network-derived first guess and the NOAA MiRS products

获取第一猜值后,利用 RTTOV 模拟,得到对应的辐射亮温,将其与观测值对比进行收敛测试,测试通过则反演成功,若失败则更新大气状态再次迭代,若迭代达到一定次数仍不满足收敛测试,则判定反演失败。完成反演后,输出反演结果,目前主要反演产品有大气温度和湿度廓线。

3 结果与分析

3.1 ATMS 通道探测敏感高度分析

当大气中水呈液态时,水滴粒径大,大气散射增强,故传感器在短波部分可接收到来自底层大气的信息减少,甚至可能为零。需进一步分析不同云雨条件时微波通道探测敏感高度。从 WRF 数值模式预报场选取 2016 年超强台风莫兰蒂发生某一时刻(UTC 时间 2016 年 9 月 12 日 22:00)台风外围至中心位置 15 个位置的大气状态廓线,图 3 为台风在该时刻大气 2 m 温度场和所选廓线位置。

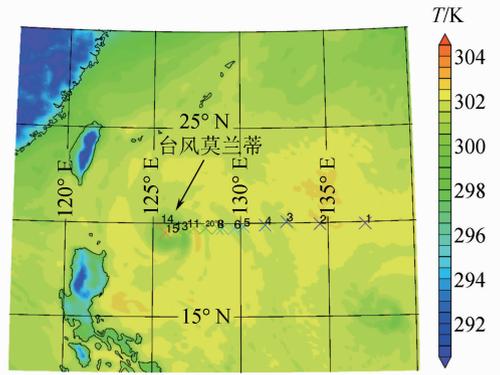


图 3 台风莫兰蒂发生时 2 m 温度场及所选大气廓线位置示意图

Fig.3 Locations of selected profiles and 2 m temperature field when typhoon Meranti occurred

图 4 为图 2 中 15 个位置的大气温度、水汽和云液水含量垂直分布,其中廓线 14 在约 530 hPa 处云液水含量最高,混合比超过 $1.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,廓线 9 在约 800 hPa 处云液水含量较高,其云液水含量达到约 $0.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,廓线 3,12 和 13 在近 900 hPa 的位置也有较高含量的云液水,其中 12 和 13 位于台风区域。液态水含量高可导致大气散射加强,对微波波段探测产生一定影响。由于空间跨度大,从台风外围至中心位置,水汽含量变化较为显著,见图 4(b)。

ATMS 第 1~4 和 16 通道为窗区通道,其中通道 1 频率最低,为 23.8 GHz,第 16 通道为 89.5 GHz。图 5 为在图 3 中 15 个位置时,ATMS 通道 1 和 16 的权重响应函数,由图 5 可知,在云液水含量较高的 3,9,12,13 位置,通道响应最大的高度基本对应于云液水含量最高时的高度,故云液水含量较高时,ATMS 探测响应高度所受影响较为明显,其原因是大气散射能力的增强影响了 ATMS 对地面辐射的接收。

图 6 为通道 6[频率为 $(53.596 \pm 0.115) \text{ GHz}$]和通道 20[频率为 $(183.31 \pm 3.0) \text{ GHz}$]在不同位置的权重响应函数。对于通道 6,在云液水含量较低时,大气探测高度约为 700 hPa,但在位置 12 和 13 廓线上,云液水含量最高位置气压高于 700 hPa,权重函数最大值出现位置位于云液水含量最高时的高度,在廓线 9 的位置,探测敏感高度略大于 700 hPa。对于通道 20,除廓线 1 以外,探测敏感高度气压均高于 500 hPa,权重函数受云液水含量影响不显著。

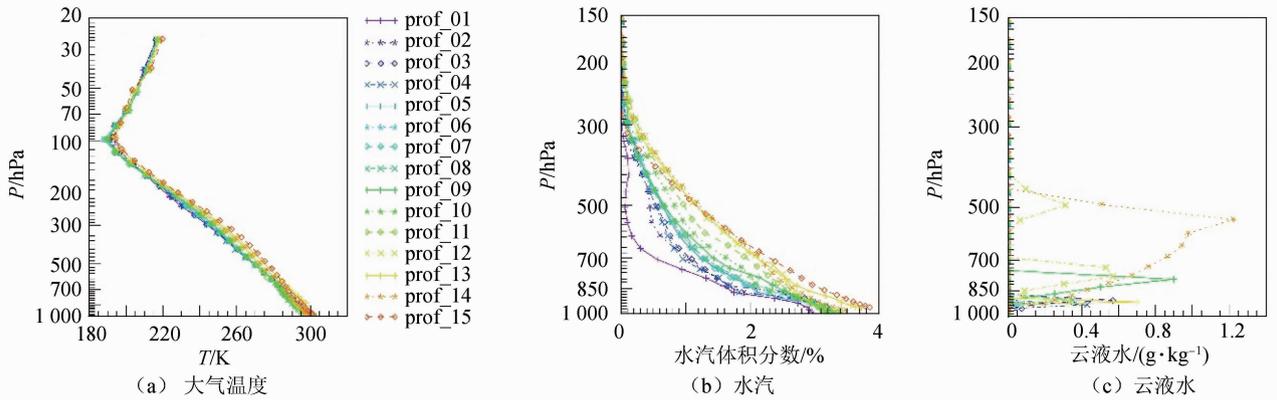


图 4 所选 15 个位置的大气温度、水汽和云液水含量图

Fig.4 Profiles of atmospheric temperature, water vapor and cloud liquid water at the 15 selected locations

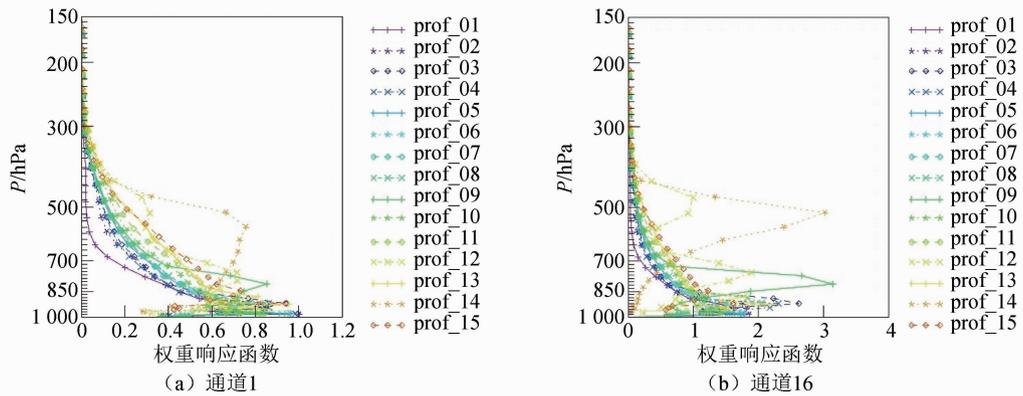


图 5 ATMS 通道 1 和 16 在不同位置时的权重响应函数

Fig.5 Weighting functions of the channels 1 and 16 of ATMS at the selected locations

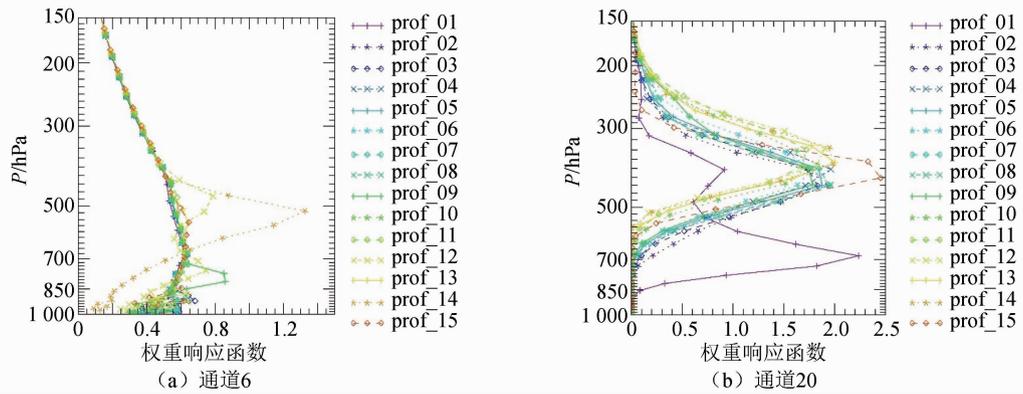


图 6 ATMS 通道 6 和 20 在不同位置时的权重响应函数

Fig.6 Weighting functions of the channels 6 and 20 of ATMS at the selected locations

3.2 温湿度廓线反演试验

为评估本文反演算法的可行性,并探讨算法中对反演结果有明显影响的过程,根据前述反演算法,

开展了单点反演试验。图 7 为单点试验中 ATMS 22 个探测通道观测亮温、背景场模拟亮温和反演成功时所得亮温值,由图 7 可知,亮温差异主要出现在

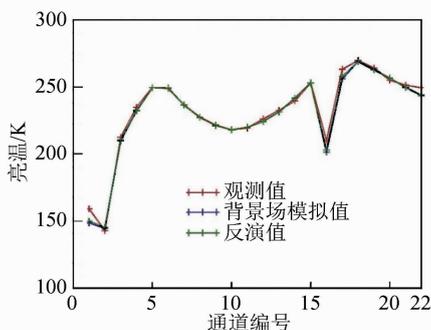


图7 单点反演试验中ATMS观测亮温、背景场模拟亮温和反演成功时所得各通道亮温

Fig.7 Brightness temperatures from ATMS, background filed and retrieved products at all channels in the single point testing

第1, 16, 17和22通道, 分别为10.5, 8.6, 7.2, 5.9 K, 而其他波段误差均在3 K以下。其中通道1和16为窗区通道, 卫星接收辐射受下垫面影响较大。此外, 相比较通道1和16, 窗区通道2和3虽

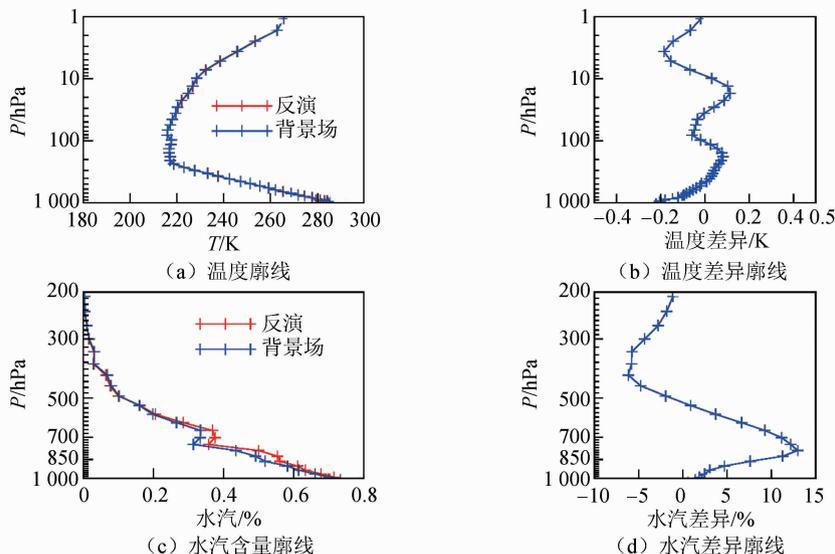


图8 反演和背景场

Fig.8 Background and retrieved profiles

4 结束语

以ATMS波段为例, 模拟了微波50~60 GHz和183 GHz温湿度探测频段在台风发生时不同云雨条件下各波段探测敏感高度。模拟结果发现: 液态水含量对微波波段探测影响较大, 其原因主要是大气散射能力随着空气水分子含量的变化而变化。提出基于一维变分的大气温湿度反演算法, 利用BP

神经网络为反演提供第一猜值, 随后开展了单点反演试验。试验发现: 下垫面参数对微波亮温模拟影响较大; 同时, 一维变分背景场对反演结果影响明显, 尤其是大气温度, 反演结果和背景场较接近, 故在今后开展反演时需对该问题加以关注。但由于本文仅进行了单点试验, 在其他条件下该结论是否依然适用仍有待观察。此外, 由于本文使用的是极轨

然亮温差异比通道1和16小, 但相对于通道4~11, 误差也较明显。由此可知, 通道1和16的模拟亮温差异主要受下垫面的影响。通道17主要用于探测近地面大气水汽状况, 其误差也可能来源于下垫面。同时, 从图7可看出, 反演亮温与背景场模拟亮温较接近, 观测和模拟亮温差也可能来源于背景场, 如通道22。

图8为反演和背景场温度和水汽廓线, 以及二者的差异。其中二者温度差异较小, 反演温度和背景场相差0.5 K以内; 水汽含量反演和背景场差异较明显, 如图8所示, 在近800 hPa处, 最大可达13%。总体来讲, 反演所得大气状态和背景场提供的大气状态较接近, 其原因可能是来源于数值模拟预报场的背景场较准确, 与大气真实状态较接近, 使反演的迭代更新过程快速达到收敛状态。故后续研究需关注背景场对一维变分反演的影响, 包括背景场的选取及背景误差协方差(即公式1中的 B)的估计等。

卫星上 ATMS 获取的资料,未详细研究未来静止轨道微波探测数据误差校正、质量控制。对算法反演精度的评估需要依赖大量反演试验结果,该项工作将是后续研究的重要主题。

参考文献

- [1] 雷小途,陈佩燕,杨玉华,等. 中国台风灾情特征及其灾害客观评估方法[J]. 气象学报, 2009, 67(5): 875-883.
- [2] 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.
- [3] STAELIN D H, KEREKES J P, SOLMAN F J. Final report of the geosynchronous microwave sounder working group[R]. Prepared for NOAA/NESDIS GOES Program Office by MIT Lincoln Laboratory, Lexington M A, 1997.
- [4] SOLMAN F J, STAELIN D H, KEREKES J P, et al. A microwave instrument for temperature and humidity sounding from geosynchronous orbit[J]. IEEE International Geoscience Remote Sensing Symposium, 1998, 3: 1704-1707.
- [5] BIZZARRI B, GASIEWSKI A J, STAELIN D H. MW/sub-mm sounding from geostationary orbit[J]. Report to EUMETSAT Science WG, 2000: 11.
- [6] BIZZARRI B, GASIEWSKI A J, STAELIN D H. Observing rain by millimetre-submillimetre wave sounding from geostationary orbit[M]. Dordrecht: Springer, 2007: 675-692.
- [7] LANBRIGTSEN B, WILSON W, TANNER A, et al. GeoSTAR-a microwave sounder for geostationary satellites[C]//2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Anchorage, AK, USA, 2004, 2: 777-780.
- [8] LANBRIGTSEN B H. GEO/SAMS-The geostationary synthetic aperture microwave sounder[C]//2000 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Honolulu, HI, USA, 2000, 7: 2984-2987.
- [9] CHRISTEBSEN J, CARLSTROM A, EKSTROM H, et al. GAS: the geostationary atmospheric sounder[C]//2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Barcelona, Spain, 2007: 223-226.
- [10] CARLSTROM A, CHRISTEBSEN J, EMBRETSEN N J, et al. A geostationary atmospheric sounder for now-casting and short-range weather forecasting [C]//2009 IEEE International Antennas and Propagation Society International Symposium, Charleston, SC, USA, 2009: 1-4.
- [11] 张成. 干涉式成像微波辐射计遥感图像的模拟与成像分析[D]. 北京: 中国科学院空间科学与应用研究中心, 2007.
- [12] LIU H, WU J, ZHANG S W, et al. Conceptual design and breadboarding activities of geostationary interferometric microwave sounder (GIMS)[C]//2009 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Cape Town, South Africa, 2009, 3: 1039-1042.
- [13] WENG F, ZOU X, WANG X, et al. Introduction to Suomi national polar-orbiting partnership advanced technology microwave sounder for numerical weather prediction and tropical cyclone applications[J]. Journal of Geophysical Research, 2012, 117: D19112.
- [14] SAUNDERS R, MSTRICARDI M, BRUNEL P. An improved fast radiative transfer model for assimilation of satellite radiance observations[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1999, 125(556): 1407-1425.
- [15] MATRICARDI M, CHEVALLIER F, KELLY G, et al. An improved general fast radiative transfer model for the assimilation of radiance observations [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2004, 130(596): 153-173.
- [16] CIMINI D, WESTWATER E R, GASIEWSKI A J, et al. Temperature and humidity profiling in the Arctic using millimeter-wave radiometry[C]//2008 IEEE International Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment, Firenze, Italy, 2008: 1-4.
- [17] HEWISON T J. 1D-VAR retrieval of temperature and humidity profiles from a ground-based microwave radiometer[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(7): 2163-2168.
- [18] 王云,王振会,李青,等. 基于一维变分算法的地基微波辐射计遥感大气温湿廓线研究[J]. 气象学报, 2014, 72(3): 570-582.
- [19] ISHIMOTO H, OKAMOTO K, OKAMOTO H, et al. One-dimensional variational (1D-Var) retrieval of middle to upper tropospheric humidity using AIRS radiance data[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2014, 119(12): 7633-7654.
- [20] LERNER J A, WEISZ E, KIRCHENGAST G. Temperature and humidity retrieval from simulated Infra-

- red Atmospheric Sounding Interferometer (IASI) measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2002, 107(D14): 4-11.
- [21] RIDLEY J. Retrieval of atmospheric parameters from SSM/I using a variational method[C]// *Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Seattle, WA, USA, 1998, 2: 725-727.
- [22] LIU Q H, WENG F Z. One-dimensional variational retrieval algorithm of temperature, water vapor, and cloud water profiles from advanced microwave sounding unit (AMSU)[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(5): 1087-1095.
- [23] BOUKABARA S A, GARRETT K, GRASSOTTI C, et al. A physical approach for a simultaneous retrieval of sounding, surface, hydrometeor, and cryospheric parameters from SNPP/ATMS[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2013, 118(22): 12600-12619.
- [24] 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.
- [25] MENG H, DONG J, FERRARO R, et al. A 1DVAR-based snowfall rate retrieval algorithm for passive microwave radiometers[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2017, 122(12): 6520-6540.
- [26] HE J Y, ZHANG S W, ZHANG Y. Retrieval and analysis of integrated precipitable water vapor in typhoon area from MWHTS onboard FY-3C satellite [C]// *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Beijing, China, 2016: 384-387.
- [27] PARRISH D F, DERBER J C. The national meteorological center's statistical spectral interpolation analysis system[J]. *Monthly Weather Review*, 1992, 120(8): 1747-1763.
- [28] NALLI N R, GAMBACORTA A, LIU Q H, et al. Validation of atmospheric profile retrievals from the SNPP NOAA-unique combined atmospheric processing system. part 1: temperature and moisture[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2018, 56(1): 180-190.