

风云三号A星微波湿度计数据处理与应用

何杰颖,张升伟

(中国科学院微波遥感技术重点实验室空间科学与应用研究中心,北京 100190)

[摘要] 主要介绍了风云三号A星(FY-3A)有效载荷之一——微波湿度计的结构、运行状态以及数据接收和数据处理的具体形式。利用神经网络算法建立反演模型,并与国外已经业务运行的先进微波探测单元B型(AMSU-B)比较,性能相当。反演北京地区2008年7—12月相对湿度和水汽密度廓线,对比探空数据,分析反演均方差。同时,分析了台风到来时不同通道的亮温显示结果,从而证明:风云三号微波湿度计不仅能全球范围内探测大气水汽等相关信息,同样在台风、热带气旋的检测和判断未来的走势中也发挥了重要作用。

[关键词] 微波湿度计;风云三号A星;神经网络算法;水汽密度

[中图分类号] V474.2*91 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)10-0047-07

1 前言

风云三号A星(FY-3A)是我国第一颗新一代极轨气象卫星的首发星,于2008年5月27日在中国太原卫星发射中心发射升空,截至2011年5月,已成功运行三周年。微波湿度计(MWHS)^[1]是风云三号A/B星的主载荷之一,是搭载于极轨气象卫星的微波辐射计,目的是探测大气湿度廓线的垂直分布以及液态水含量等参数。其包括150 GHz和183 GHz两个探测频率以及5个探测通道,主要功能是探测全球大气湿度廓线及强降雨;按照卫星总体要求,工作寿命设计为3年,2年在轨运行考核。在轨运行中,MWHS工作正常,积累了大量全球大气水汽及强降雨等气象资料,图像层次分明,信息量丰富。目前风云三号A/B星MWHS以上午星和下午星形式交叉运行,提供了大量的湿度信息,与星载温度计联合使用,可获得全球大气的三维温湿度信息,有利于气象资料同化和融合。

本文主要介绍MWHS运行状态以及数据接收和数据处理的具体形式。分析2008年8月22日11时“鹦鹉”台风到来时不同通道的亮温显示结果,以及2008年9月13日“森拉克”热带气旋到来时不同通

道的亮温值。利用神经网络算法建立反演模型,并与国外已经业务运行的先进微波探测单元(AMSU-B)进行比较。反演北京地区2008年7—12月水汽密度,分析反演均方差。

2 设备结构及运行状态

FY-3A卫星轨道高度为836 km,轨道倾角为98.753°,自北向南运行,绕地球一圈大约需101.603 min,每天转动14.172 8圈。降交点的地方时为10:05~10:20,交点地方时漂移为15 min/a,回归周期约为6 d,设计寿命为3年。其上搭载的由中国科学院空间科学与应用研究中心自主研制的MWHS作为11个有效载荷之一,由5个探测通道组成,用于探测大气湿度廓线和降水强度等(见图1)。中心频率分别为150 GHz、 (183.31 ± 1) GHz、 (183.31 ± 3) GHz和 (183.31 ± 7) GHz,其中150 GHz通道包含水平和极化两种方式,5个通道均采用双边带方式,带宽分别为1 000 MHz、1 000 MHz、500 MHz、1 000 MHz和2 000 MHz。扫描宽度为 $\pm 53.35^\circ$,幅宽约为2 700 km,星下点分辨率为15 km,亮温动态范围为3~340 K,探测灵敏度为1.1~1.2 K,定标精度为1.5 K^[2]。图2为MWHS扫描几何。

[收稿日期] 2013-04-22

[作者简介] 何杰颖(1984—),女,天津市人,助理研究员,研究方向为地基和星载微波辐射计数据处理与应用;E-mail:hejieying@mirs-lab.cn



图1 风云三号 MWHS

Fig.1 MWHS onboard FY-3 satellite

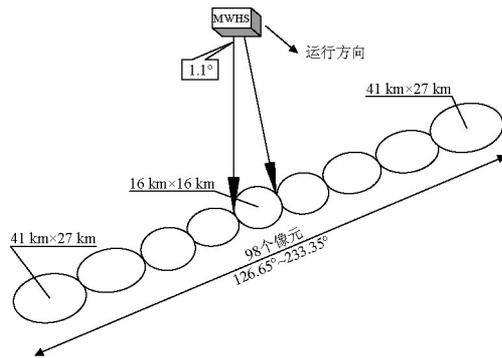


图2 MWHS扫描几何

Fig.2 Scanning geometry of MWHS

3 接收数据的基本信息

风云三号 MWHS L₁级数据是经数据预处理生成的包含定标定位及预处理辅助信息的数据产品,可直接应用于数值天气预报模式以及大气湿度垂直探测和图像分析。数据区域类型为全局探测,星下点分辨率为 15 km,更新频率为 14 圈/d,数据量为 $24 \times 60 \times 60 / (8/3) \times 2048 \times 5.0 / d \approx 3.32 \times 10^8 / d$,数据分块的方式按扫描路径的弧度进行划分。图 3 为 MWHS 2008 年 9 月 1 日 00:56 时刻开始扫描的 L₁级天底观测亮温数据,共 2 283 条扫描线,每条扫描线 98 个像元,天底点为第 49 个或第 50 个,本文对二者取平均作为天底点亮温值。图 4 和图 5 为与图 3 对应时刻的各通道亮温与实际扫描经纬度的匹配图。

4 大气探测原理

星载 MWHS 以与天底角夹角成 θ 的方向观测到的地球表面的亮度温度表示为^[3]

$$T_b(v, \theta) = T_u(v, \theta) + T_c(v, \theta)e^{-\tau(v, \theta)\sec(\theta)} + T_r(v, \theta)e^{-\tau(v, \theta)\sec(\theta)} \quad (1)$$

式(1)中, $e^{-\tau(v, \theta)\sec(\theta)} = \gamma_{v, \theta}(0, \infty)$, 为大气的透过率。右

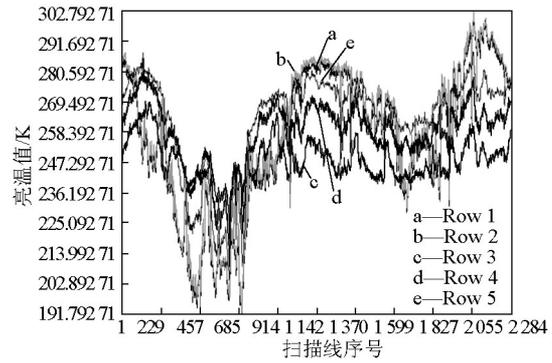


图3 MWHS某扫描线5通道亮温图

Fig.3 Brightness temperature values of 5 scanning lines from MWHS

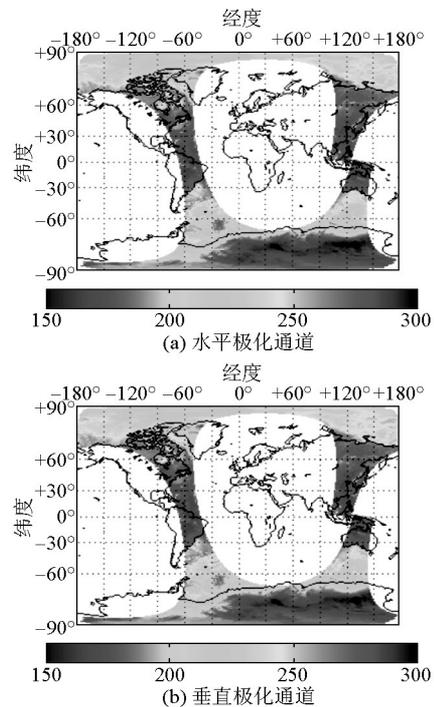


图4 MWHS 150 GHz水平和垂直极化通道的扫描亮温值

Fig.4 Brightness temperature values of window frequency at 150 GHz horizontal and vertical polarization from MWHS

边第二项为地球表面的辐射被所经过的路径衰减后的结果。第三项为表面散射贡献,表示表面反射(散射)的下行辐射而到达辐射计天线的部分。大气上行辐射是星载大气遥感的关键项,可以表示为

$$T_u(v, \theta) = \sec(\theta) \int_0^H \alpha(v, z) T(z) dz \quad (2)$$

大气地表辐射亮温为

$$T_c(v, \theta) = \varepsilon(v, \theta) T_s \quad (3)$$

大气地表反射亮温为

$$T_r(v, \theta) = [1 - \varepsilon(v, \theta)] T_d(v, \theta) \quad (4)$$

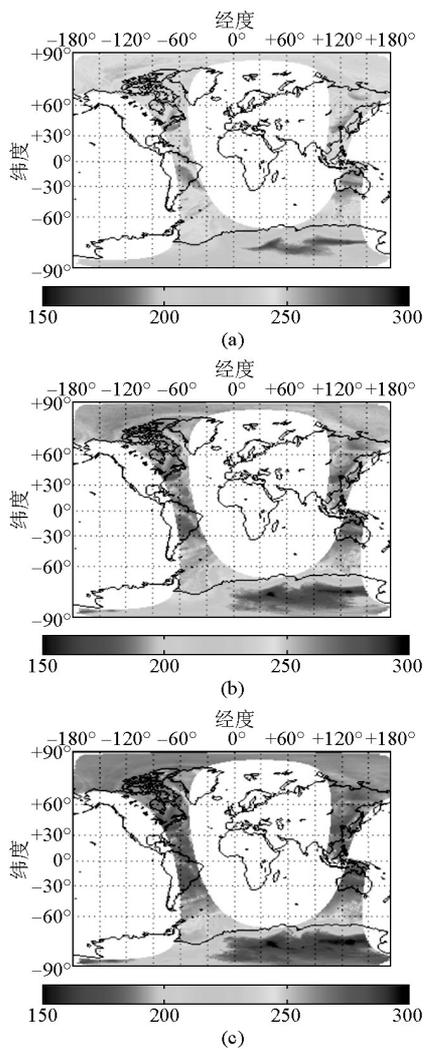


图5 MWHS 183.31 GHz的扫描亮温值
Fig.5 Brightness temperature values of 183.31 GHz from MWHS

大气下行辐射亮温为

$$T_d(v, \theta) = T_c e^{-\tau(0) \sec(\theta)} + \sec(\theta) \int_H^0 T(z) \alpha(v, z) e^{-[\tau(0) - \tau(z)] \sec(\theta)} dz \quad (5)$$

式(2)~(5)中, $\varepsilon(v, \theta)$ 为表面的发射率,对于非天底观测, $Q \neq 0$, $\varepsilon(v, \theta)$ 实际上是与极化相关的,同时是表面粗糙度和介电特性的函数; T_s 为物理温度; T_c 为宇宙背景辐射亮温,近似为2.75 K; $\alpha(v, z)$ 是在频率为 v ,高度为 z 处的大气吸收系数; $T(z)$ 是不同高度处的大气温度。从大气遥感的角度,所需要的信息包含在式(1)第一项,其可以认为是“信号”项。式(1)第二项与表面相关的通常认为是“噪声”项。

5 大气水汽反演理论

利用大气辐射传输方程仿真亮温数据和神经

网络算法可以获得更接近真实值的大气温湿度廓线^[4,5]。本文实验中的神经网络如图6所示,共3层,输入层的神经元数为8,即3个水汽通道、2个窗区通道以及地表的温度、湿度和压强,隐层神经元数通过经验公式以及反复验证确定为10,输出层神经元数为116,即分别对应于0~10 km的58个离散值的大气温度廓线和大气湿度廓线,0~0.5 km每50 m一层,0.5~2 km每100 m一层,2~10 km每250 m一层,每层大气参数取该层平均值。随机选取90%的探测数据作为训练数据,剩余10%用于神经网络的测试和验证。

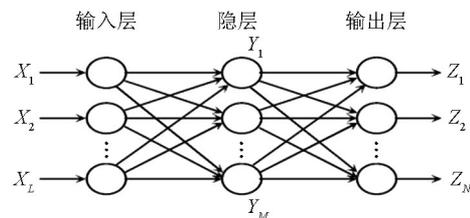


图6 神经网络原理示意图

Fig.6 The diagram of artificial neural network

对于隐层的第 j 个节点,可以表示为

$$Y_j = S\left(\sum_{i=1}^L w_{ij} x_i + b_j\right) \quad (6)$$

式(6)中, w_{ij} 是连接第 i 个输入神经元和第 j 个隐层神经元的权重; b_j 是计算值和测量之间的偏差; S 是Sigmoid函数,表述如下

$$S(a) = \frac{1}{1 + \exp(-a)} \quad (7)$$

输出层可以表示为

$$Z_k = \sum_{j=1}^M w_{jk} Y_j + b_k \quad (8)$$

式(8)中, w_{jk} 是连接第 j 个隐层神经元和第 k 个输出神经元的权重值; b_k 是测量值和输出值之间的偏差。它适用于非线性模型,在反复训练过程中,加权函数得以确定,从而减小实际训练的输出向量与测量的输出向量的偏差。相邻层间神经元完全连接,输入元素到输入层,经过隐层,传输到输出层,前者采用Sigmoid函数,后者采用Purelin函数。

运用MPM93大气吸收模型^[6]和大气辐射传输理论模型,计算出与无线电探空资料(RAOB)时间和空间对应的亮温值或利用经纬度为 $\pm 1^\circ$ 、时间误差为3 h的匹配窗,匹配到与之经纬度和时间相对应的FY-3A MWHS亮温数据。此处,探空数据取用北京地区2008年7—12月,晴天,经度116.28°,纬度

39.93°。图7~图10为利用人工神经网络(ANN)算法反演出北京地区2008年7—12月的大气相对湿度廓线以及均方差对比与分析。图11~图14为2008年7—12月北京地区冬季水汽密度廓线以及均方差对比与分析。

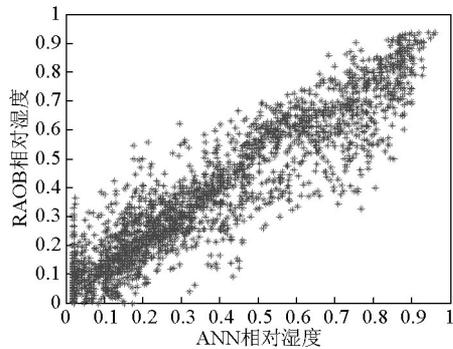


图7 ANN方法反演的相对湿度廓线与探空数据仿真的相对湿度廓线的相关性示意图

Fig.7 Correlation of relative humidity profile between retrievals from ANN and simulation from radiosonde

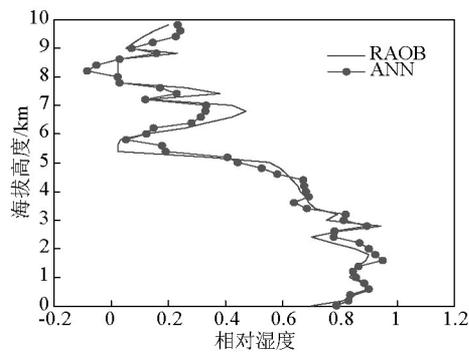


图8 ANN方法反演的某一样本相对湿度廓线与探空数据的对比示意图

Fig.8 Comparison of a certain relative humidity profile between retrieval from ANN and simulation from radiosonde

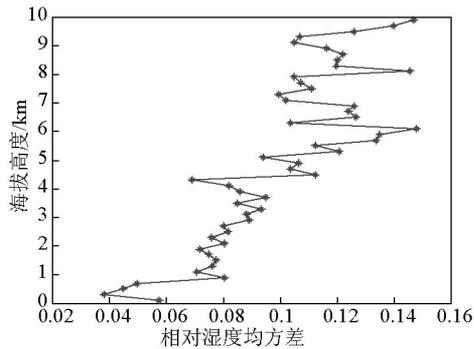


图9 ANN方法反演的相对湿度廓线均方差(RMS)

Fig.9 RMS distribution of relative humidity profile from ANN

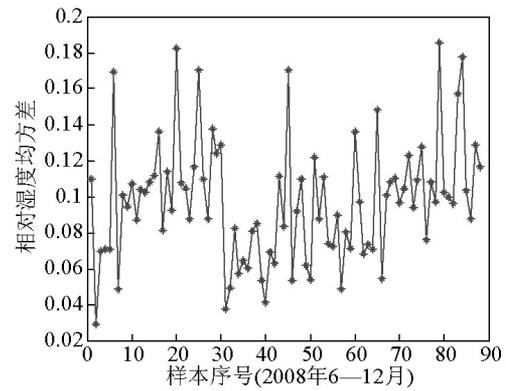


图10 独立测试样本的相对湿度反演均方差

Fig.10 RMS distribution of relative humidity for independent testing datasets

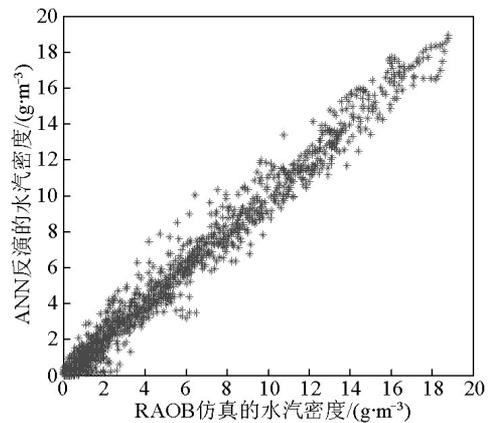


图11 ANN方法反演的水汽密度廓线与探空数据仿真值的相关性示意图

Fig.11 Correlation of water vapor density profile between retrievals from ANN and simulation from radiosonde

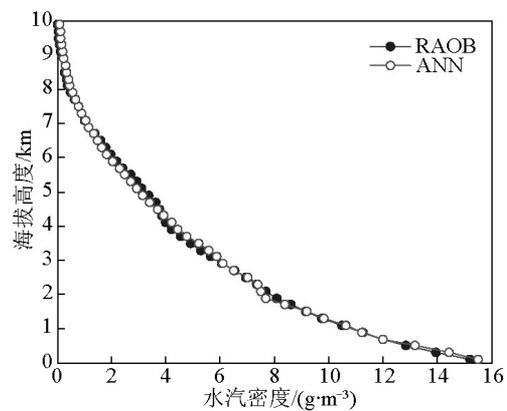


图12 ANN方法反演某一样本水汽密度廓线与探空数据的对比图

Fig.12 Comparison of a certain water vapor density profile between retrievals from ANN and simulation from radiosonde

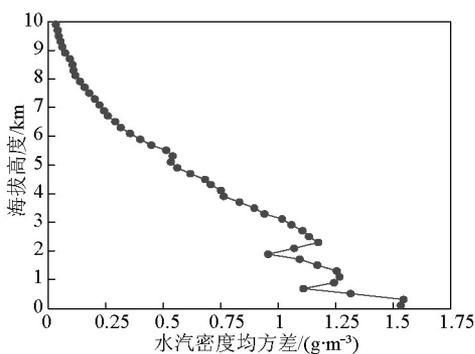


图13 ANN方法反演的水汽密度廓线均方差
Fig.13 RMS distribution of water vapor density profile from ANN

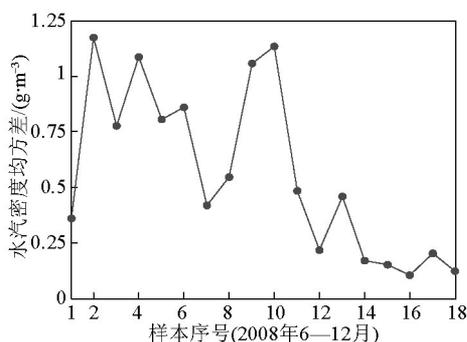


图14 独立测试样本的水汽密度反演均方差
Fig.14 RMS of water vapor density for independent testing datasets

通过实验结果可得,利用神经网络反演模型反演的北京地区大气相对湿度和水汽密度廓线与探空测量具有很好的一致性。大气湿度廓线的反演均方差为17.7%,大气水汽密度的反演均方差为1.25 g/m³。与搭载于美国国家海洋和大气管理局(NOAA)系列之上的先进微波探测单元B型(AMSU-B)^[7]相比,搭载于FY-3A/B的MWHS与之性能相当,与地基微波大气湿度廓线仪相比,能够实时地在全球范围内反演出大气湿度的实时变化,能够提高数值天气预报的性能,更好地为人们服务。

6 异常天气中的作用

2008年8月22日10:48时(北京时间),“鹦鹉”台风来临时150 GHz通道亮温的显示结果如图15所示。2008年9月8日,热带气旋“森拉克”(SIN-LAKE)于凌晨在菲律宾北部以东的西北太平洋洋面上生成,逐渐加强成为台风,于9月13日00:31时登陆台湾,150 GHz通道的亮温值如图16所示。

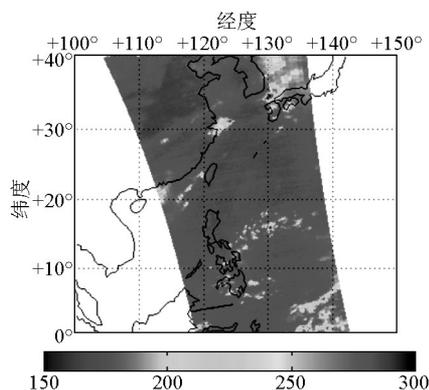


图15 MWHS第一通道15 km投影分辨率微波亮温图
Fig.15 Brightness temperature values of channel 1 with resolution of 15 km from MWHS

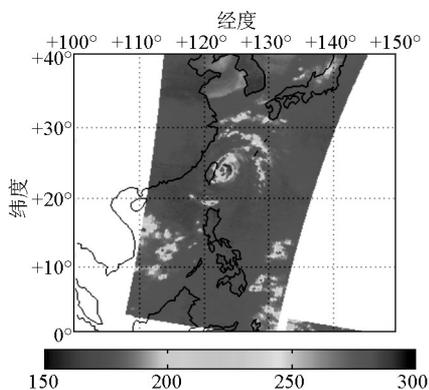


图16 MWHS第一通道15 km投影分辨率微波亮温图
Fig.16 Brightness temperature values of channel 1 with resolution of 15 km from MWHS

MWHS窗区通道图像显示,图形中心位置对流云区呈环状,对应亮温较低位置,其西部覆盖台湾岛,且略有减弱,东侧半环依然完整清晰。利用MWHS对“森拉克”台风立体空间结构诊断,对台风的强度分布、发展趋势提供了有意义的参考信息,为业务人员判识台风未来发展提供了有利依据^[8]。

图17是利用训练好的神经网络模型反演2008年7—12月的大气水汽密度随高度的变化情况,并对每月的大气水汽密度取平均值。图18是2008年7—12月每周水汽密度的最大值。

7 结语

风云三号MWHS可探测全球大气水汽密度,反演范围为300~1 000 hPa,相当于大气高度0~10 km,空间分辨率为50 km,探测频率为每日两次。本文

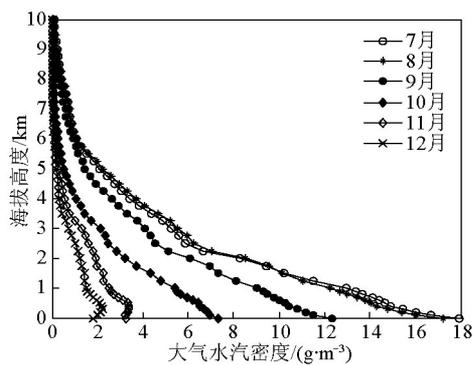


图 17 2008 年 7—12 月的大气水汽密度随高度的变化情况

Fig.17 Atmospheric water vapor density varies with height from July to December in 2008

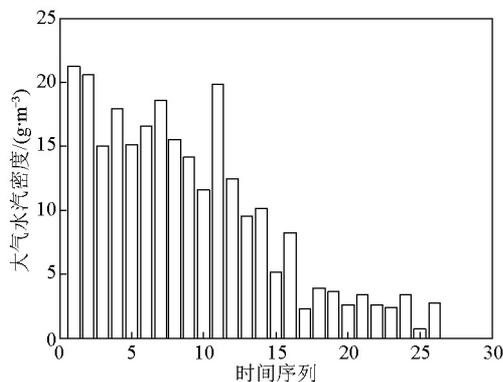


图 18 2008 年 7—12 月每周水汽密度的最大值柱状图

Fig.18 The maximum histogram of atmospheric water vapor density every week from July to December in 2008

注:横坐标表示时间序列,第一个样本对应时间为 2008 年 7 月 1 日,每个相邻数据样本间隔为 7 d,共选取了 26 个样本。如横坐标为 5 的数据点即表示对应第 5 个样本

选取北京地区风云三号 MWHS 观测亮温,利用经纬度为 1° 、时间误差为 3 h 的探空数据进行匹配,建立满

足均方差要求的神经网络反演模型,相对湿度反演均方差小于 18%,水汽密度均方差小于 1.25 g/m^3 。

MWHS 在全球气候变化研究中具有重要作用,是气象和灾害监测的重要遥感手段之一;可以全天时、全天候进行大气湿度观测,测量大气湿度的垂直分布、水汽含量和降雨量,实现中、长期数值天气预报,提高天气预报的准确性。实践结果证明,FY-3A 微波湿度计在台风监测中发挥了重要作用,极大地提高了人身安全,减少财产损失。

参考文献

- [1] 张升伟,李靖,姜景山,等. 风云三号卫星微波湿度计的系统设计与研制[J]. 遥感学报,2008, 12(2): 199-207.
- [2] 董瑶海,孙允珠,王金华,等. FY-3A 极轨气象卫星[J]. 上海航天, 2008 (5): 1-11.
- [3] Ulaby F, Moore R, Fung A. Microwave Remote Sensing: Active and Passive-volume III: Passive Microwave Sensing of the Atmosphere [M]. Arench House, 1986:1282-1378.
- [4] Leishi. Retrieval of atmospheric temperature profiles from AMSU-A measurement using a neural network approach [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2001, 18(3): 340-347.
- [5] Philip W Rosenkeanz. Retrieval of temperature and moisture profiles from AMSU-A and AMSU-B measurements [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(11):2429-2435.
- [6] Liebe H J. MPM—An atmospheric millimeter-wave propagation model[J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1989, 10(6): 631-650.
- [7] Fatima Karbou, Filipe Aires, Catherine Prigent, et al. Potential of advanced microwave sounding unit-A (AMSU-A) and AMSU-B measurements for atmospheric temperature and humidity profiling over land [J]. Journal of Geophysical Research, 2005, 110: 1-16.
- [8] Zhang Shengwei, Li Jing, Jiang Jingshan, et al. In-orbit performance of microwave humidity sounder (MWHS) of Chinese FY-3 meteorological satellite [J]. IGARSS, 2010 (1):574-577.

Processing and analysis of data from microwave humidity sounder onboard FY-3A satellite

He Jieying, Zhang Shengwei

(Center for Space Science and Applied Research, Key Laboratory of Microwave Remote Sensing,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

[Abstract] Microwave humidity sounder (MWHS) is one of payloads on the Fengyun-3A (FY-3A) satellite. This paper introduces its structure, operation status and data receiving and processing. The paper constructs an inversion model using artificial neural network (ANN) algorithm, and makes comparison with advanced microwave sounding unit advanced microwave sounding unit-B (AMSU-B). The results demonstrate that the model can be operated successfully. Using the simulated brightness temperatures from MWHS from July to December in 2008 in Beijing, the paper derives water vapor density profiles and gives analysis of root mean square. Meanwhile, the paper focuses on brightness temperature values of different scanning lines when the typhoon comes. The paper demonstrates that FY-3A satellite MWHS can retrieve the water vapor density profiles, cloud liquid water and other related information. Also, in the process of monitoring the tropical typhoon and cyclone and judging the trend of them, FY-3A satellite MWHS also plays a very important role.

[Key words] MWHS; FY-3A; ANN; water vapor density

(上接46页)

Thermal/vacuum calibration of microwave humidity sounder on FY-3B satellite

Wang Zhenzhan, Zhang Shengwei, Li Jing, Li Yun, Wu Qiong

(The Key Laboratory of Microwave Remote Sensing, CAS, National Space Science Center, CAS, Beijing 100190, China)

[Abstract] The principle and methods on thermal/vacuum (T/V) testing of microwave humidity sounder (MWHS) on FY-3B satellite were described; correction algorithms on calibration errors were developed, and some main specifications of MWHS-3B, such as linearity, sensitivity and calibration precision, were obtained. The parameters derived from the T/V testing had been used in in-orbit data processing to produce brightness temperature products in FY-3B ground system.

[Key words] FY-3B satellite; microwave humidity sounder; prelaunch calibration; thermal/vacuum testing