

风云三号 MWTS/MWHS 大气温度与水汽廓线反演

——2008 年凤凰台风个例试验

陈昊, 金亚秋

复旦大学 波散射与遥感信息教育部重点实验室, 上海 200433

摘 要: 本文结合中国国家标准大气(GB 1920-80)与 1976 年美国标准大气, 利用 MPM (Millimeter Propagation Model, 毫米波传播模型)、ROS(Rosenkranz)模型和本文提出的改进混合模型(MIX, Mixed)计算大气吸收系数。采用西北太平洋地区中国与日本 16 个无线电高空探测仪 836 组大气实测数据(海拔高度、气压、大气温度和湿度), 通过大气辐射传输模型, 按 MWTS/MWHS 的工作参数(中心频率、带宽和波段数目), 模拟大气辐射亮度温度, 用以验证 FY-3A 的 MWTS/MWHS 实测辐射亮度温度。比较了 MPM、ROS 与 MIX 3 种模型的模拟结果, 并用 MIX 模型分析了 MWTS/MWHS 多通道大气吸收权重函数。进而通过无线电高空探测仪的大气实测数据与 MWTS/MWHS 的实测多通道辐射亮度温度数据, 构成统计 D 矩阵, 并由此反演 2008 年 7 月 27 日“凤凰”台风西北太平洋地区大气温度和湿度的 3 维分布。

关键词: FY-3A MWTS/MWHS, 大气吸收系数, 辐射传输, D 矩阵, 大气温度和湿度廓线

中图分类号: TP79/P407 **文献标志码:** A

引用格式: 陈昊, 金亚秋. 2011. 风云三号 MWTS/MWHS 大气温度与水汽廓线反演——2008 年凤凰台风个例试验. 遥感学报, 15(1): 137-147
Chen H and Jin Y Q. 2011. Retrievals of atmospheric temperature and humidity profiles from Chinese microwave FY-3A measurements and the example of Phoenix Typhoon, 2008. *Journal of Remote Sensing*, 15(1): 137-147

1 引言

星载大气微波遥感可追溯到 20 世纪 70 年代美国的雨云计划(Nimbus)。近十年来, AMSU-A (Advanced Microwave Sounding Unit-A)和 AMSU-B (Advanced Microwave Sounding Unit-A) 分别于 1998、2001 和 2002 年搭载在 NOAA-K、NOAA-L 和 NOAA-M 卫星平台上。以探测大气湿度廓线分布的 MHS (Microwave Humidity Sounder) 取代 AMSU-B 后, 形成 AMSU-A/MHS 组合, 分别于 2005 年和 2009 年搭载在 NOAA-N 和 NOAA-N', 以及 2006 年欧空局首颗极轨气象卫星 MetOp-A 平台上。将来 AMSU-A/ MHS 组合则会为 ATMS(Advanced Technology Microwave Sounder)取代(Goodrum 等, 2009)。ATMS 预计将于 2010 年搭载在 NOAA 新一代气象卫星系列 NPOESS (National Polar-orbiting Operational Environmental Satellite System)和 NPP

(NPOESS Preparatory Project)上。

中国风云三号 A(FY-3A)气象卫星于 2008-05-27 成功发射。首次载有中国自行研制的微波温度探测仪(MWTS)、微波湿度探测仪(MWHS)和微波成像仪(MWRI, Microwave Radiation Imager), 实现了中国自主研制的星载微波探测仪对大气进行 3 维微波探测 (Jin 等, 2010)。FY-3A 微波探测对于灾害性天气监测和气象预报将发挥重要作用(董瑶海等, 2008)。

台风是中国沿海地区危害程度最高的灾害性天气, 一般产生于西北太平洋地区菲律宾以东广阔的低纬度洋面。台风所带来的大风、暴雨和风暴潮等, 每年都对我国东南沿海地区造成巨大的人力物力损失。红外及可见光星载仪器受制于大气水汽云层的影响, 只能观测台风上表层, 而微波仪器可以对台风上至对流层顶层下至近地面层的 3 维尺度上进行温度和水汽的观测。微波毫米波频段星载辐射计正

收稿日期: 2010-12-30; 修订日期: 2010-07-09
基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 60971091, 40637033)和遥感科学国家重点实验室(编号: 2009KFJJ011)。
第一作者简介: 陈昊(1986—), 男, 复旦大学博士研究生。主要从事星载被动微波毫米波遥感研究。E-mail: hao.chen.1986@gmail.com。
通讯作者: 金亚秋, E-mail: yqjin@fudan.ac.cn。

在逐渐成为台风监测的重要和关键手段之一。

本文根据 MPM 和 ROS 大气吸收模型, 提出改进的 MIX 吸收模型。由大气辐射传输模型、2008 年 7 月 25—31 日无线电高空探测仪的大气实测数据及 MWTS/MWHS 通道的频率和带宽特性, 模拟 MWTS/MWHS 的多通道辐射亮度温度, 并与 FY-3A 实测辐射亮度温度进行对比, 分析了 MIX 模型优点。利用 1976 年美国标准大气, 计算出中国 FY-3A 的 MWTS/MWHS 的标准大气吸收权重函数。

在此基础上, 通过 2008 年“凤凰”台风期间, 采用西北太平洋地区 16 个无线电高空探测仪观测站的实测海拔高度、气压、大气温度和水汽数据, 利用对应时间的 MWTS/MWHS 实测的辐射亮度温度数据, 构造 D 矩阵, 并验证其反演效果。构成适合西北太平洋地区大气温度和水汽反演的统计 D 矩阵, 对 2008 年 7 月 27 日的“凤凰”台风及其周围地区进行大气温度和水汽廓线的 3 维反演。

2 FY-3A 的 MWTS/MWHS 通道辐射亮温数据分析

2.1 大气吸收模型

大气吸收系数的计算主要有逐线计算(Line-by-Line)模型和快速计算模型两大类(Garand 等, 2001)。本文主要采用精确的逐线计算模型。在大气的吸收特性中, 水分子以及氧气分子的共振吸收作用占主要成分。这种由于分子共振所引起的大气对电磁波的吸收, 通过选取典型吸收线, 逐线计算出电磁波谱各典型吸收线所形成的共振吸收, 可得到大气氧和水汽吸收系数。逐线计算模型目前主要有: MPM 模型 (Millimeter Propagation Model)(Liebe, 1989; Liebe 等, 1989, 1993)和 Rosenkranz 的 ROS 模型(Rosenkranz, 1975, 1988; Tretyakov 等, 2005); 还有其他一些模型等(Pardo 等, 2001)。

MPM 模型大气吸收系数的计算为:

$$\gamma_{\text{MPM}} = \gamma_{\text{O}_2-\text{M}} + \gamma_{\text{H}_2\text{O}-\text{M}} + \gamma_{\text{D}-\text{M}} + \gamma_{\text{V}-\text{M}} + \gamma_{\text{S}-\text{M}} + \gamma_{\text{R}-\text{M}} \quad (1)$$

主要由 6 部分组成: (1) 氧气分子共振吸收系数 $\gamma_{\text{O}_2-\text{M}}$; (2) 水分子的共振吸收系数 $\gamma_{\text{H}_2\text{O}-\text{M}}$; (3) 干空气的非共振吸收系数 $\gamma_{\text{D}-\text{M}}$; (4) 水汽的非共振吸收系数 $\gamma_{\text{V}-\text{M}}$; (5) 饱和情况下悬浮水滴或悬浮冰粒子的吸收系数 $\gamma_{\text{S}-\text{M}}$; (6) 降水的吸收系数 $\gamma_{\text{R}-\text{M}}$ (下标 M 指 MPM)。

ROS 模型大气吸收系数的计算为:

$$\gamma_{\text{ROS}} = \gamma_{\text{O}_2-\text{R}} + \gamma_{\text{H}_2\text{O}-\text{R}} + \gamma_{\text{D}-\text{R}} + \gamma_{\text{V}-\text{R}} \quad (2)$$

主要由 4 部分组成: (1) 氧气分子共振吸收系数 $\gamma_{\text{O}_2-\text{R}}$; (2) 水分子的共振吸收系数 $\gamma_{\text{H}_2\text{O}-\text{R}}$; (3) 干空气的非共振吸收系数 $\gamma_{\text{D}-\text{R}}$; (4) 水汽的非共振吸收系数 $\gamma_{\text{V}-\text{R}}$ (下标 R 指 ROS)。

MPM 和 ROS 模型核心是基于 Rosenkranz 修正的 Van Vleck-Weisskopf 函数(Rosenkranz, 1975, 2001)计算典型吸收线的吸收系数。在大气的总吸收系数中, 氧气吸收线吸收系数与水汽吸收线吸收系数起主导作用。据此本文计算了 MPM 与 ROS 模型典型氧气吸收线和典型水汽吸收线的吸收系数, 式(1)、(2)各吸收系数公式与具体计算过程见参考文献(Liebe 等, 1993; Tretyakov 等, 2005)。图 1(a)—(d)分别计算工作频率 f 、大气压强 P 、大气温度 T 和绝对湿度 V 对 MPM 的 $\gamma_{\text{O}_2-\text{M}}$ 、 $\gamma_{\text{H}_2\text{O}-\text{M}}$ 和 ROS 的 $\gamma_{\text{O}_2-\text{R}}$ 、 $\gamma_{\text{H}_2\text{O}-\text{R}}$ 的影响。图 1(a)中所出现的吸收峰由典型吸收线对大气的吸收作用引起。

2.2 MWTS/MWHS 数据与无线电高空探测仪数据

本文选取 2008-07-27 北京时间 8 点 30 分降轨过境西北太平洋地区(0°N — 40°N , 100°E — 160°E)FY-3A MWTS/MWHS 辐射亮度温度(T_b , Brightness Temperature)数据。其中 MWTS 为 4 通道 T_b 数据(工作中心频率为 50.30 GHz、 (53.596 ± 0.115) GHz、54.94 GHz 和 57.29 GHz, 对应的工作带宽分别为 180 MHz、340 MHz、400 MHz 和 330 MHz), MWHS 为 5 通道 T_b 数据(工作中心频率为 150 GHz、 (183.31 ± 1.0) GHz、 (183.31 ± 3.0) GHz 和 (183.31 ± 7.0) GHz, 对应的工作带宽分别为 1000 MHz、500 MHz、1000 MHz 和 2000 MHz)。

图 2 为 2008-07-27 MWTS/MWHS 第 1—4 通道 T_b 数据, 图 3 为 MWTS/MWHS 第 6—9 通道 T_b 数据。第 5 通道和第 6 通道为同频率(150GHz)不同极化方式(V,H)的通道。

晴空大气辐射亮温的极化差异主要来自于下垫地表极化发射率的影响, 由于 150GHz 时大气自身的辐射占主导作用, 地表发射率对辐射亮度温度影响较小, 因此第 5 通道和第 6 通道亮温数据差别很小, 故而只列出第 6 通道 T_b 数据。

本文采用 2008 年 7 月 25 日—31 日 FY-3A 数据覆盖的 16 个(中国东南沿海地区上海、杭州、台州、福州、台北、厦门、汕头、香港、海口和西沙群岛共 10 个, 日本南部地区 Kagoshima、Naze、Chichi-

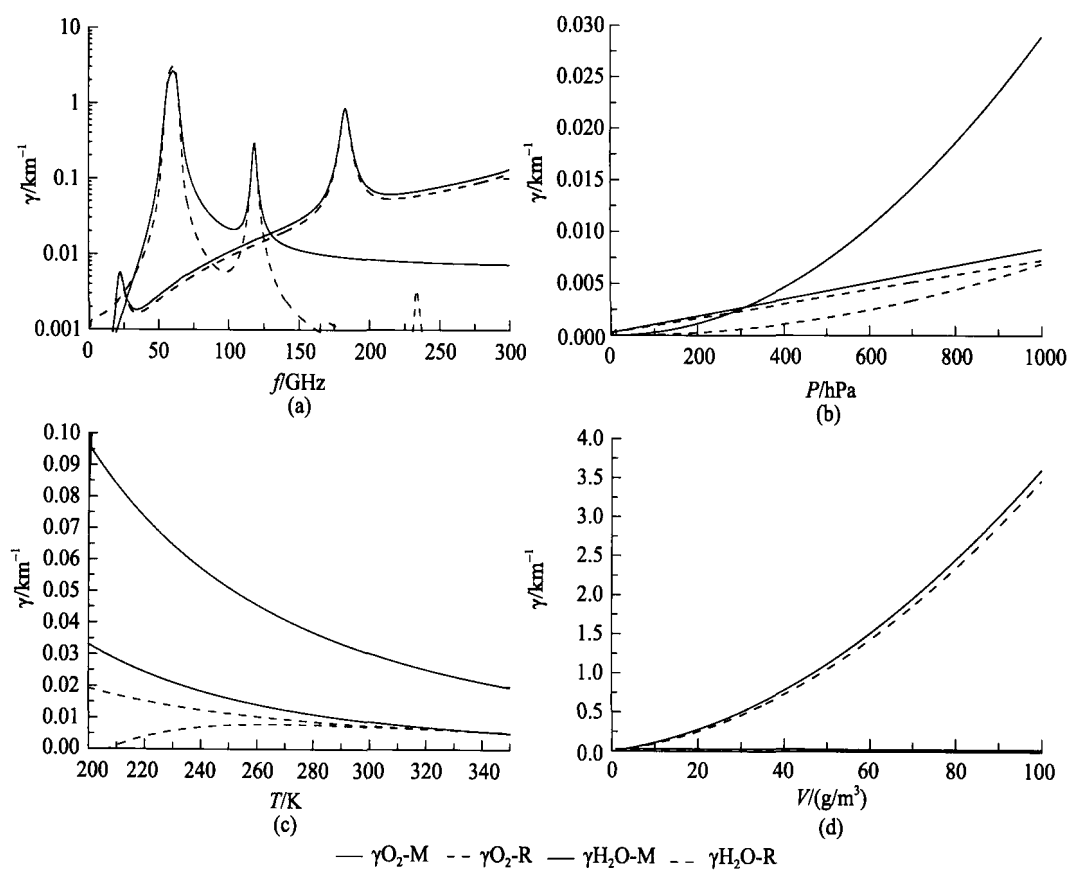


图 1 典型吸收线大气吸收系数 γ 随 f 、 P 、 T 和 V 的变化
(a) $P=1013$ hPa, $T=300$ K, $V=1$ g/m³; (b) $f=90$ GHz, $T=300$ K, $V=1$ g/m³; (c) $f=90$ GHz, $P=1013$ hPa, $V=1$ g/m³;
(d) $f=90$ GHz, $P=1013$ hPa, $T=300$ K

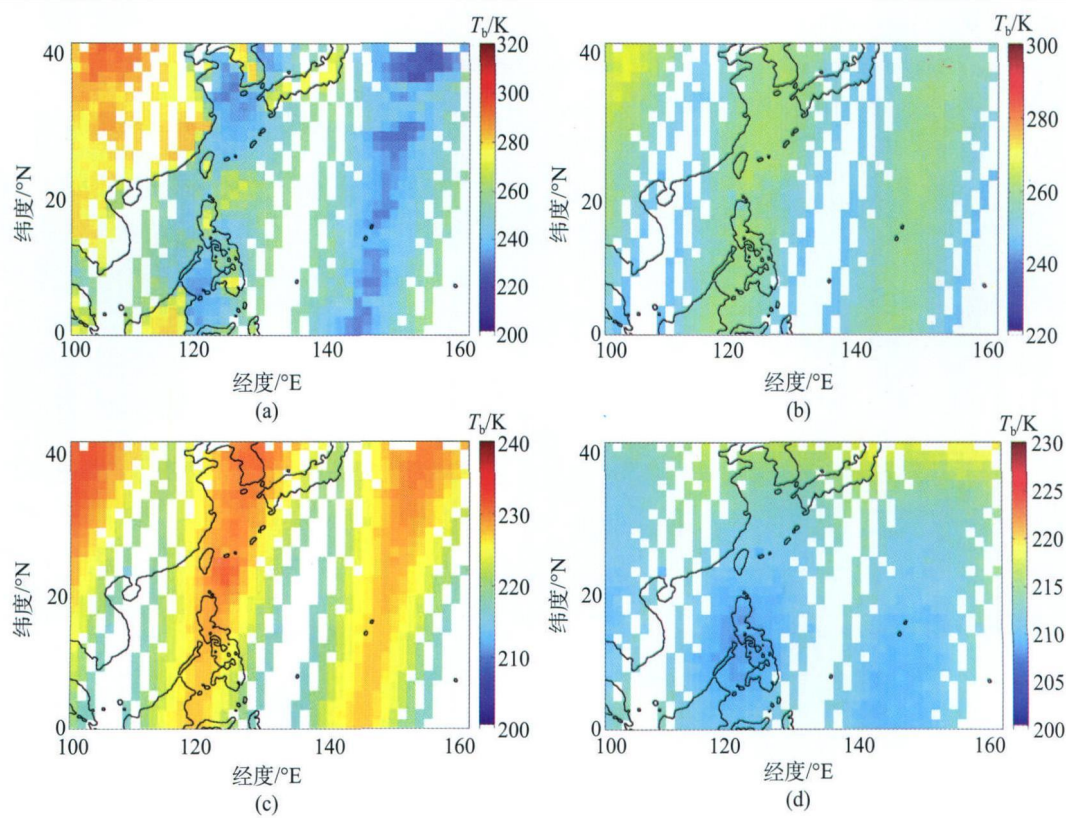


图 2 2008-07-27 北京时间 8 点 30 分西北太平洋地区 MWTS 第 1—4 通道降轨亮度温度
(a) 第 1 通道(Channel 1); (b) 第 2 通道(Channel 2); (c) 第 3 通道(Channel 3); (d) 第 4 通道(Channel 4)

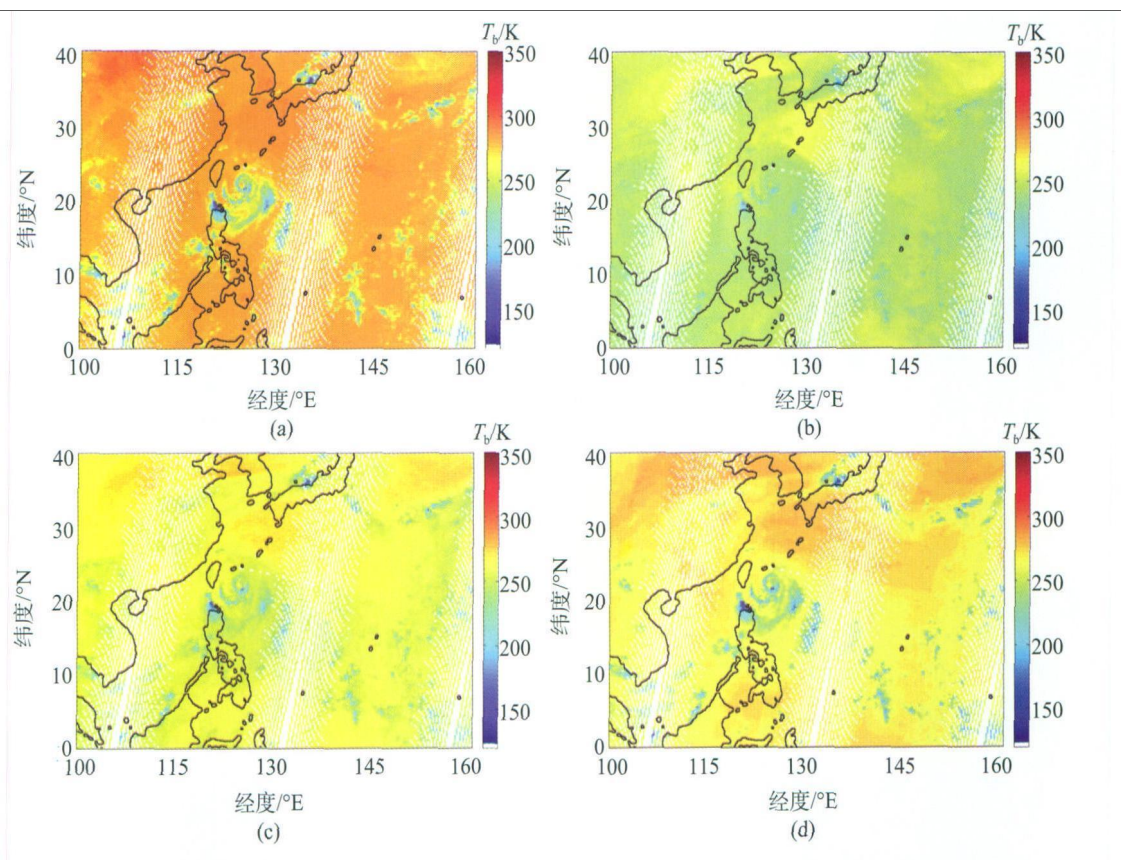


图3 2008-07-27 北京时间 8 点 30 分西北太平洋地区 MWHS 第 6—9 通道降轨亮度温度
(a) 第 6 通道(Channel 6); (b) 第 7 通道(Channel 7); (c) 第 8 通道(Channel 8); (d) 第 9 通道(Channel 9)

jima island、Minamitorishima、Minamid Aitojima island 和 Ishigakijima island 共 6 个)无线电高空探测仪观测站的大气实测数据(海拔高度、大气压强、大气温度和大气湿度)。从数据中选取出 925 hPa、850 hPa、700 hPa、500 hPa、400 hPa、300 hPa、250 hPa、200 hPa、150 hPa、100 hPa、70 hPa、50 hPa、30 hPa 和 20 hPa 共 14 个标准大气层的温度实测数据, 以及 925 hPa、850 hPa、700 hPa、500 hPa、400 hPa、300 hPa 和 250 hPa 共 7 个标准大气层的露点温度实测数据。

利用这些数据进行 FY-3A MWTS/MWHS 辐射亮度温度的对比验证, 并用这些数据构成统计 D 矩阵, 进行 FY-3A 数据覆盖区域的大气温度和水汽分布廓线的反演。

2.3 MWTS/MWHS 辐射亮度温度模拟

如图 4 所示的大气辐射传输模型(Jin, 1994, 2005), 可得到卫星高度为 z 时星载辐射计测量到的总辐射亮度温度, 写为:

$$T_b(z, \theta) = \int_0^z T_a(h) \gamma(h, f) e^{-\tau(h, z, f, \theta)} \sec \theta dh + e^{-\tau(0, z, f, \theta)} \left[r \int_0^\infty T_a(h) \gamma(h, f) e^{-\tau(0, h, f, \theta)} \sec \theta dh + (1-r) T_s + r e^{-\tau(0, z, f, \theta)} T_C \right] \tag{3}$$

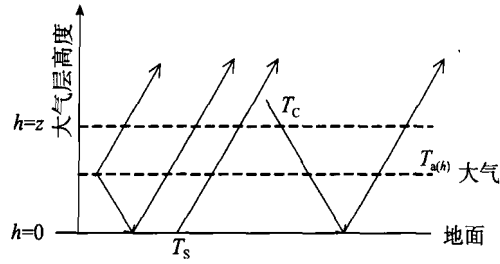


图4 大气辐射传输模型

式中, T_s 为下地表物理温度, T_C 为宇宙冷空的物理温度, $T_{a(h)}$ 表示高度为 h 大气的物理温度。 r 为地表平均反射率, $\gamma(h, f)$ 为由大气吸收模型计算的高度 h 处

的大气吸收系数。 $\tau(z, z', f, \theta)$ 表示入射角 θ 频率为 f 时, 高度 z 到高度 z' 的大气光学厚度。式(3)的第一项表示大气的上行辐射; 第二项表示大气下行辐射、地表辐射以及宇宙冷空下行辐射的总上行辐射。大气光学厚度定义为:

$$\tau(z, z', f, \theta) = \int_z^{z'} \gamma(h, f) \times \sec \theta dh \tag{4}$$

采用上述 16 个测量站 2008 年 7 月 25 日—31 日采集的标准层大气参数数据共 836 组, 分别利用 MPM 和 ROS 大气吸收模型, 模拟 MWTS/MWHS 辐射亮度温度 T_b^S (上标 S 表示模拟), 并与 FY-3A 实测辐射亮度温度 T_b^O (上标 O 表示观测)作比较。

图 5(a)(b)分别给出 MPM 和 ROS 模型模拟 MWTS/MWHS 的 T_b^S 与 FY-3A 实测 T_b^O 的对比。可以看出, MPM 模拟 MWTS 通道 T_b^S 不如 ROS 模型精确, 而 MPM 模拟的 MWHS 通道 T_b^S 比 ROS 模型的要好。

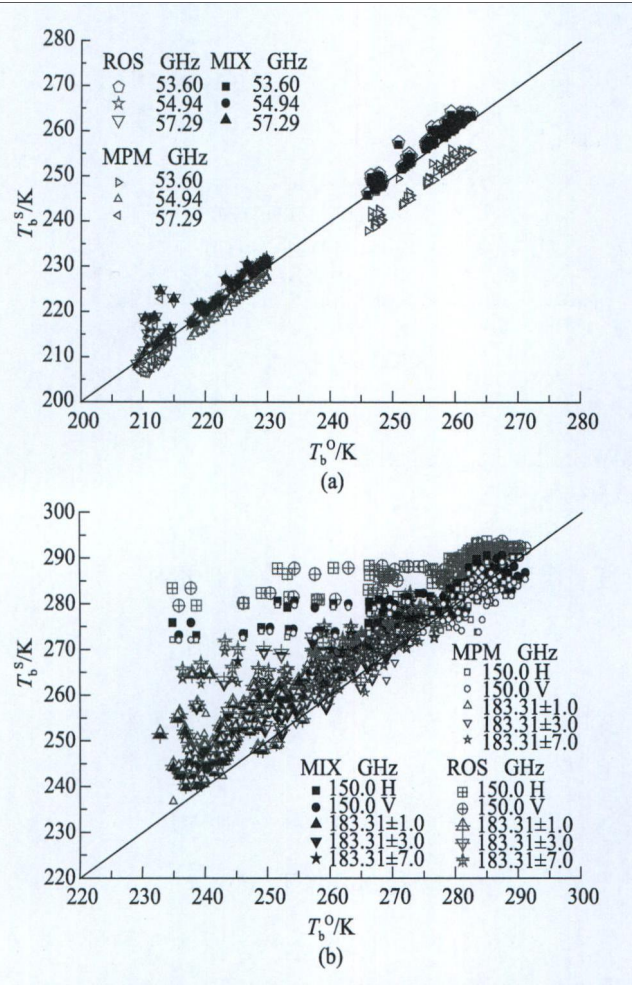


图 5 FY-3A MWTS 与 MWHS 辐射亮温数据验证
(a) MWTS; (b) MWHS

逐线计算大气吸收系数时, 氧气吸收线和水汽吸收线起主导作用。选取 ROS 的典型氧气吸收线与 MPM 的典型水汽吸收线, 再结合 MPM 模型中干空气及水汽的连续吸收谱, 极端天气条件下的大气吸收作用, 构成新的大气混合吸收模型—MIX 模型, 吸收系数为:

$$\gamma_{\text{MIX}} = \gamma_{\text{O}_2\text{-R}} + \gamma_{\text{H}_2\text{O-M}} + \gamma_{\text{D-M}} + \gamma_{\text{V-M}} + \gamma_{\text{S-M}} + \gamma_{\text{R-M}}$$

(5)

图 6 中给出分别用 MPM、ROS 和 MIX 模型模拟 MWTS/MWHS 各个通道 T_b^S 的误差, 其 $RSME$ 表示为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (T_{bn}^S - T_{bn}^O)^2}{N}}$$

(6)

式中, N 为模拟亮温点的数目 836。图 6 中从左往右依次为 MWTS/MWHS 第 2—9 通道模拟误差, 温度通

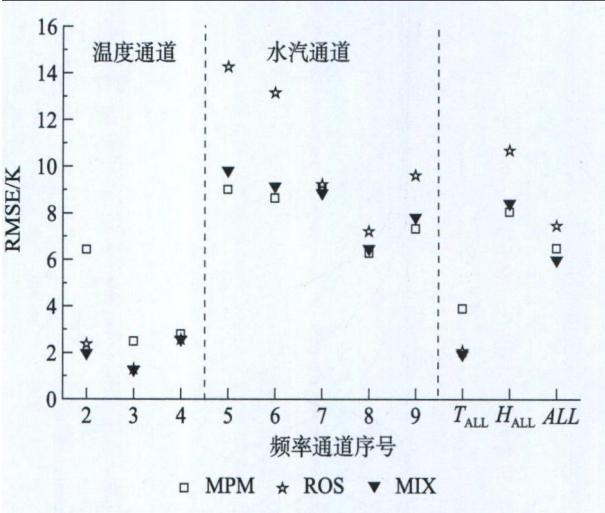


图 6 MWTS/MWHS 辐射亮温模拟误差

道总误差 T_{ALL} , 湿度通道总误差 H_{ALL} , 所有通道总误差 ALL 。可见本文提出的 MIX 模型要优于 MPM 和 ROS 模型。

2.4 MIX 模型大气权重函数

辐射传输方程中的大气吸收权重函数可以写为 (Komichak, 1982)

$$W(z, f) = \frac{d(e^{-\tau(z, f)})}{d(\ln P)}$$

(7)

大气吸收权重函数表现了不同工作通道对于大气敏感的气压层的不同分布。中国国家标准总局自 1980 年 5 月起, 将 1976 年美国标准大气的 30 km 以下部分选作中国的国家标准(GB 1920-80)。依据式 (7), 可以计算出 MWTS/MWHS 第 1—9 通道大气吸收权重函数。MIX 模型综合了 MPM 与 ROS 两种常用大气吸收模型的优点, 通过计算氧气和水汽的吸收线作用, 考虑干空气和水汽本身的连续吸收谱, 并增加了极端天气条件(如降雨降雪等)的作用, 形成了较为完善的大气传播模型。通过 MIX 可以有效地计算出大气吸收系数, 进而结合标准大气分布, 可以得到不同工作通道对于标准大气的大气吸收权重函数。

用 MIX 计算 MWTS 与 MWHS 的标准大气吸收权重函数如图 7(a)(b)所示。图 7(a)所示入射角为 0° 、空气绝对湿度为 0 g/m^3 和 0.175 g/m^3 时, MWTS 对国家标准大气的吸收权重函数。在 60 GHz 附近, 大气的吸收作用主要是氧气吸收线的贡献, 因此大气吸收权重函数对于湿度的敏感不如水汽通道(对比图 7(b))。图 7(b)为空气绝对湿度为 0.125 g/m^3 和 0.15 g/m^3 、入射角为 0° 时, MWHS 对 1976 年美国标准大气的吸收权重函数。由图 7(b)可以看出, 大气中的水汽含量对于微波湿度计的探测敏感层有重要的影响。当大

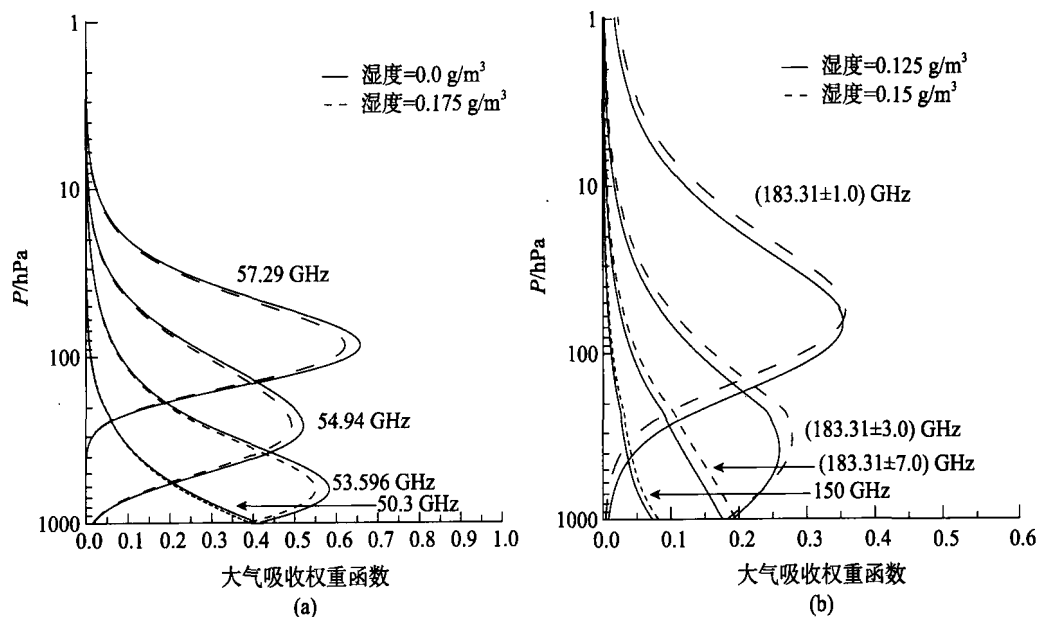


图7 不同大气湿度 MWTS/MWHS 大气吸收权重函数
(a) MWTS4 通道; (b) MWHS5 通道

气水汽含量变大时,微波湿度计工作通道的敏感大气层海拔高度将增大,反之则减小。

MIX 计算 FY-3A MWTS 标准大气吸收权重函数时,与 ROS 相比,峰值对应的气压与 ROS 相等,峰值比 ROS 大;与 MPM 相比,峰值对应的气压比 MPM 大,峰值也比 MPM 大。

MIX 计算 FY-3A MWHS 标准大气吸收权重函数时,与 ROS 相比,峰值对应的气压比 ROS 小,峰值比 ROS 大;与 MPM 相比,峰值对应的气压与 MPM 相等,峰值比 MPM 大。

不同的大气吸收模型虽然大致相似,但实际上不尽相同。气压层上不同的吸收权重函数峰值对大气辐射亮温有直接的影响。发展精细大气频谱吸收模型,始终是一个研究问题。

3 大气温度和水汽廓线的 D 矩阵反演

3.1 D 矩阵的构成

利用星载微波温度探测器与微波湿度探测器所测量到的大气辐射亮度温度 T_b 数据,反演大气温度和湿度分布廓线的方法总体上分为两大类。一是线性方法,主要有统计 D 矩阵法 (Komichak, 1982)等;二是非线性方法,如牛顿非线性反演方法,图像耦合法 (Lavanant 等, 2000)等。本文使用统计 D 矩阵法反演大气温度与水汽廓线的 3 维分布。

通过多通道 T_b 测量数据 $d_j(j=1,2,\dots\text{通道数})$,及其对应时间地点的特征参数 $p_i(i=1,2,\dots)$ (如大气温

度、湿度等)作为输入参数,构成 D 矩阵,写为:

$$p_i - \langle p_i \rangle = \sum_{j=1}^M D_{ij} (d_j - \langle d_j \rangle) \quad (8)$$

式中, $\langle p_i \rangle$ 为 p_i 的统计平均值, $\langle d_j \rangle$ 为 d_j 的统计平均值, D_{ij} 为算子元素。

由式(8),可得 $\bar{D}$ 为 (Kuo 等, 1994)

$$\bar{D} = \bar{C}(p, d) \times (\bar{C}(d, d) + \bar{R})^{-1} \quad (9)$$

式中, $\bar{C}(p, d)$ 为特征参数 p 与多通道 T_b 测量数据 d 的协方差矩阵, $\bar{C}(d, d)$ 为多通道 T_b 测量数据 d 的自协方差矩阵, $\bar{R}$ 为各通道测量误差的平方所组成的对角矩阵。

由此 $\bar{D}$ 与新一组多通道 T_b 观测值 $A(=T_{bj})$, 来反演一组新的特征参数 B

$$B - \langle B \rangle = \bar{D} \times (A - \langle A \rangle) \quad (10)$$

式中, $\langle B \rangle$ 为输出参数的统计平均值,由构造 $\bar{D}$ 矩阵时统计平均值 $\langle p_i \rangle$ 代替, $\langle A \rangle$ 为输入参数 A 的统计平均值。

选取上文提及的15个(除中国台州站外)无线电高空探测仪观测站 2008 年 7 月 25 日—31 日的大气实测数据和 FY-3A 对应时间地点的 MWTS/MWHS 实测 T_b 数据,分别构造式(9)反演大气温度和湿度的两组统计 D 矩阵。用这两组统计 D 矩阵来分别反演同时期中国台州地区的大气温度廓线 $T_b(P)$ 及大气湿度廓线 $DPT_a(P)$, 分别如图 8 和图 9 所示(图 9 中没有 7 月 25 日、26 日和 28 日大气湿度反演的比较,是由于无线电高空探测仪数据缺失或实测数据 T_b 缺失)。

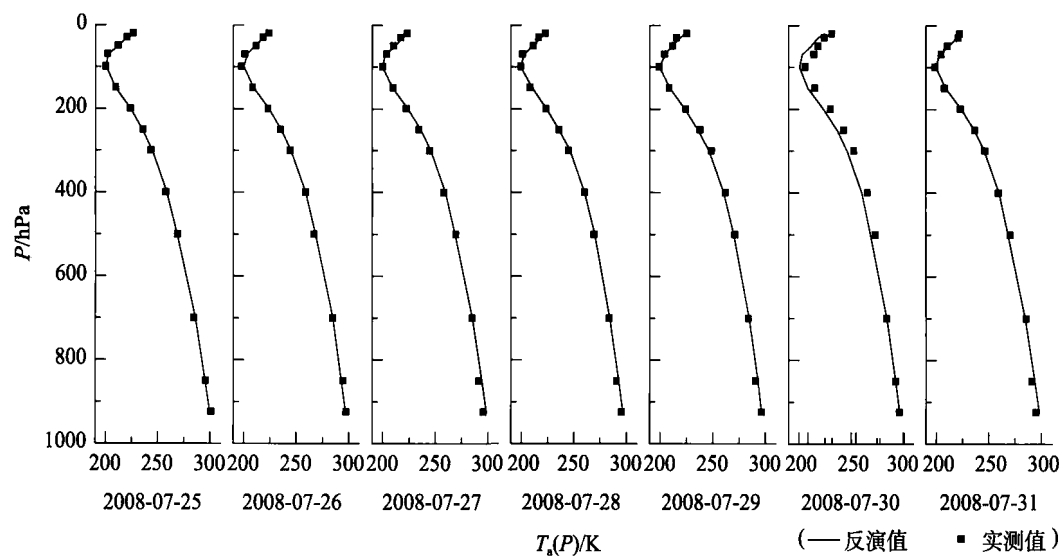


图 8 统计 D 矩阵反演台州地区大气温度廓线与高空探测仪实测值比较

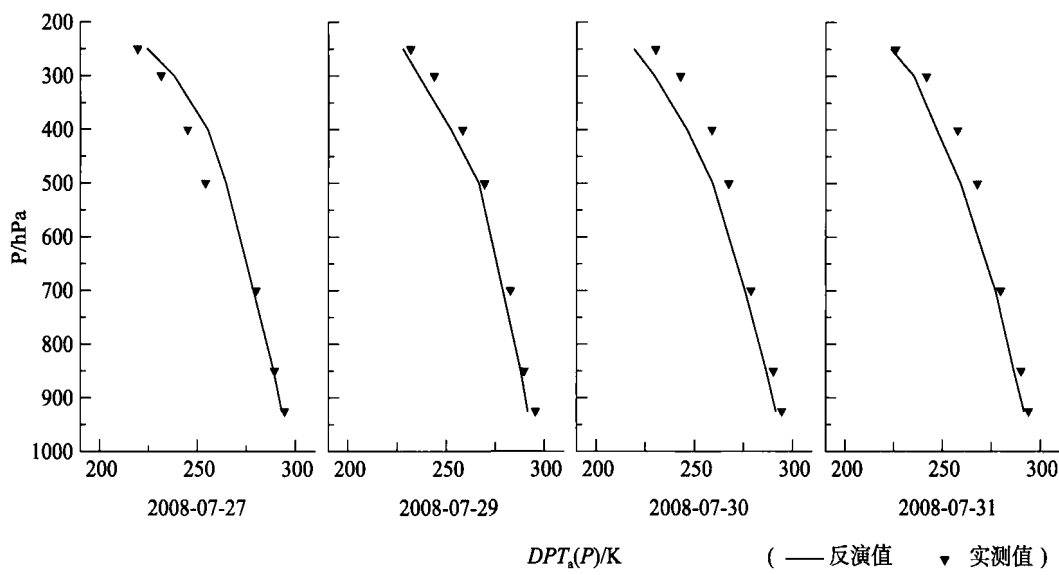


图 9 统计 D 矩阵反演台州地区大气露点温度廓线与高空探测仪实测值比较

由图 8 可见,统计 D 矩阵在反演大气温度时吻合很好,误差很小。图 9 可见,统计 D 矩阵在反演大气湿度时,误差增大,尤其是在低气压层。

图 10 分析了统计 D 矩阵在反演台州地区 2008 年 7 月 25 日—31 日期间大气温度和大气湿度时各个典型气压层的均方根误差。反演大气温度时,各个典型气压层反演均方根误差的平均值为 1.559 K;反演大气露点温度时,各个典型气压层反演均方根误差的平均值为 5.593 K。这实际上是因为相比大气湿度而言,大气温度与辐射亮度温度之间有着更好的线性关系,因此使用统计 D 矩阵反演大气温度时,精度要高于反演大气湿度。同时,反演精度还受到入射角、无线电高空探测仪测量精度和辐射计测量定标等因素的影响。

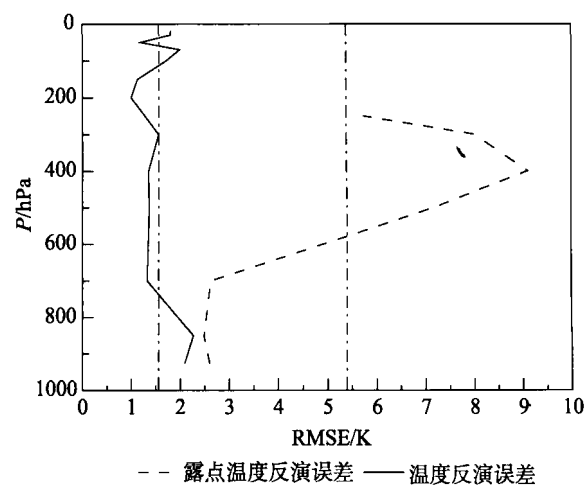


图 10 统计 D 矩阵反演台州地区大气温度与露点温度廓线误差

3.2 大气温度和水汽廓线反演

选取上文中西北太平洋地区 16 处台站 2008 年 7 月 25 日—31 日“凤凰”台风生成及登陆期间的无线电高空探测仪大气实测数据, 以及 FY-3A MWTS/MWHS 实测的对应地区与时间的 T_b 数据, 构成 D 矩阵, 用来反演“凤凰”台风生成及登陆时期的大气温度与水汽廓线。

对于 2008-07-27 北京时间 8 点 30 分 FY-3A MWTS/ MWHS 实测多通道 T_b , 利用已构成的 D 矩阵对台风及其周边地区各层大气进行大气温度廓线反演。图 11(a)—(d)分别为反演得到的西北太平洋地区 925 hPa、500 hPa、300 hPa、20 hPa 气压层的温度分布。

由图 11 可以看出, 在大气的低层(925 hPa)台风中心的温度与周围环境相比并无明显异常。图的左上方陆地温度最高, 这自然是夏季陆地天气炎热, 大气温度普遍比沿海地区要高。而在大气中层(500 hPa、300 hPa), 台风中心地区的温度显著高于周围环境, 台风暖核十分明显。在大气高层(20 hPa), 台风中心及周围地区的温度并无异常, 随着大气层海拔的升高超过对流层顶部(通常为 100 hPa 左右)时, 此层大气基本上不再受台风影响。此外, 随着海拔高度的增加, 温度总体呈现减小趋势。

对于 FY-3A 的 MWTS/MWHS 实测多通道 T_b , 利用已获得的 D 矩阵, 对台风及其周边地区各层大气进行水汽反演, 如图 12(a)—(d)给出了“凤凰”台风时西北太平洋地区 925 hPa、500 hPa、400 hPa、250 hPa 气压层大气水汽廓线分布。

可以看出, 大气的低层(925 hPa)台风附近地区的水汽含量与周围环境相比并有些许异常, 可以隐约看清其水汽分布呈涡旋状。而在夏季陆地天气炎热, 大气中水汽含量普遍比沿海地区要低。大气的中层(500 hPa、400 hPa)则可以发现台风附近地区的水汽含量明显高于周围环境, 并呈显著的涡旋状分布。在大气高层(250 hPa), 则台风附近地区的水汽含量与周围环境相比差异相对于中层大气来说有所减弱, 随着大气海拔的升高, 台风对大气的影 响逐渐减弱。

图 13 为统计 D 矩阵反演的该时西北太平洋地区大气水汽的三维分布。从气压值最高处开始, 随着海拔的升高, 大气露点温度总体逐渐减小。对于每一层大气, 台风影响范围内大气露点温度呈涡旋状分布且高于周围地区。

相比国际上在轨运行的微波湿度探测仪(如 AMSU-B, MHS), 中国 FY-3A MWHS 的单轨覆盖范围更宽 (AMSU-B 刈宽为 2250 km, MHS 刈宽为 2180 km,

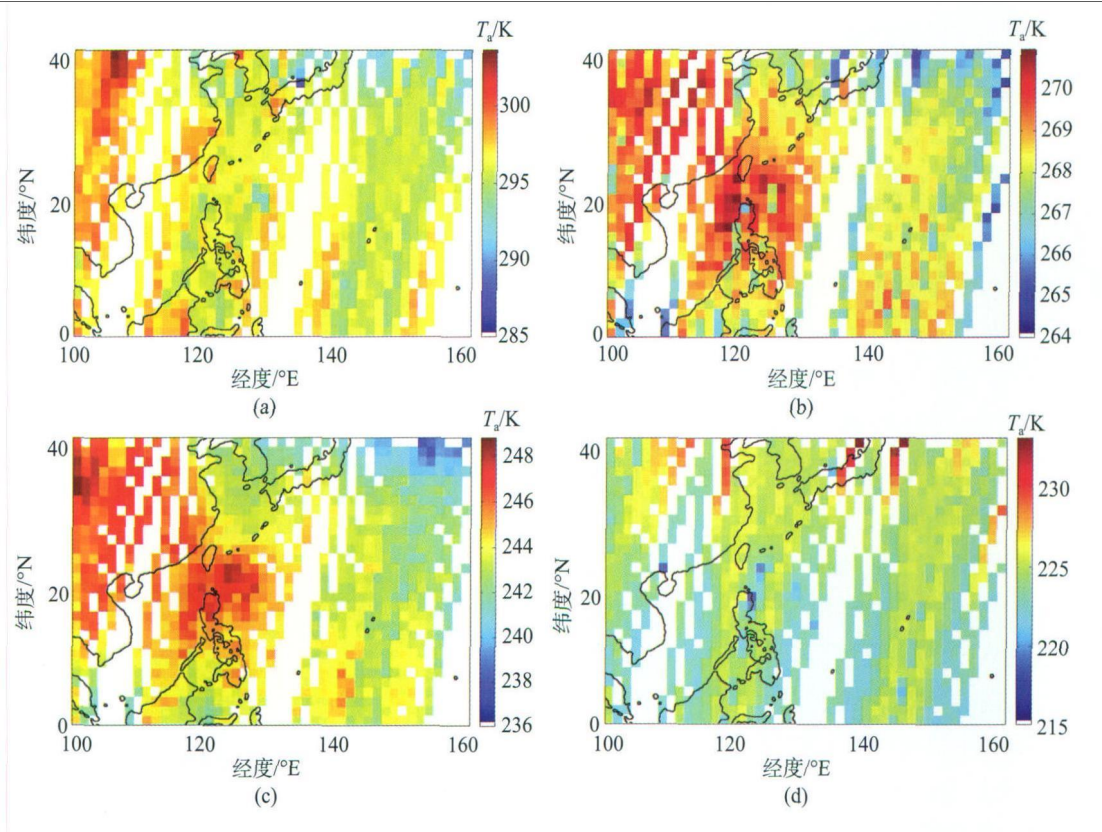


图 11 2008-07-27 北京时间 8 点 30 分西北太平洋地区各气压层大气温度的反演
(a) 925 hPa; (b) 500 hPa; (c) 300 hPa; (d) 20 hPa

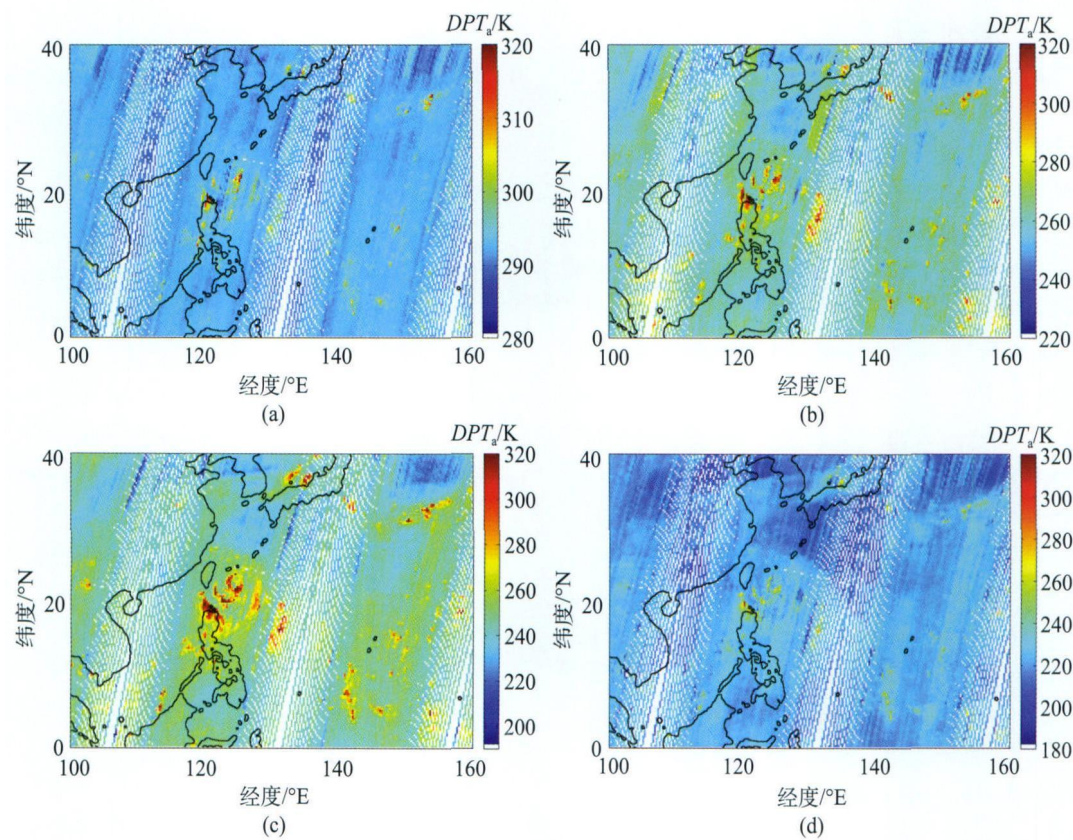


图 12 2008-07-27 北京时间 8 点 30 分西北太平洋地区各气压层露点温度
(a) 925 hPa; (b) 500 hPa; (c) 400 hPa; (d) 250 hPa

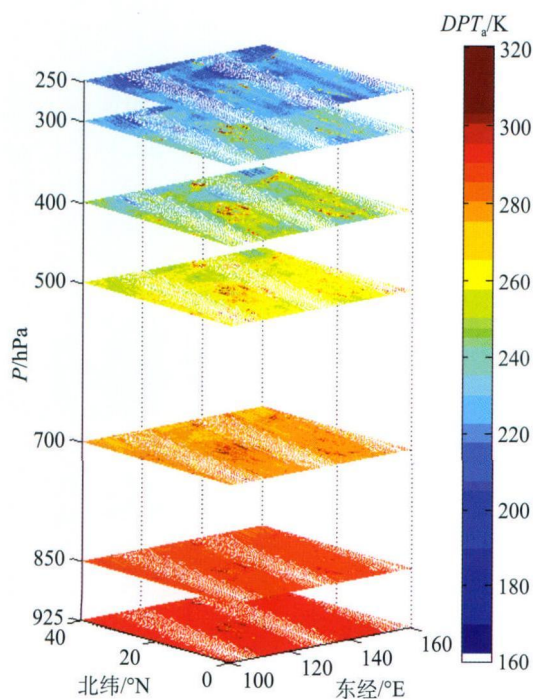


图 13 2008-07-27 北京时间 8 点 30 分西北太平洋地区露点温度的三维分布

FY-3A MWHS 刈宽为 2700 km), 中低纬度的扫描盲区更小。由于台风多分布于中低纬度地区, 因此 FY-3A MWHS 的这一优点对于台风中大气湿度廓线的反演是有利的。

4 结 论

与国际上同代仪器相比, 风云三号 A 气象卫星搭载的微波温度探测仪和微波湿度探测仪, 由于微波湿度探测仪的扫描盲区小, 有利于中国自主进行的大气温度和湿度廓线的三维测量。本文根据 MPM 和 ROS 大气吸收模型, 提出了改进的 MIX 模型。由大气辐射传输模型和 2008 年 7 月 25 日—31 日西北太平洋地区 16 个无线电高空探测仪台站的实测 836 组大气数据, 模拟 MWTS/MWHS 的多通道辐射亮度温度, 与 FY-3A 实测值进行了比较, MIX 模型误差最小。

此外, 利用“凤凰”台风期间 16 个台站的实测大气数据与对应时间地点的 FY-3A MWTS/MWHS 实测多通道辐射亮度温度数据, 构成反演大气温度和水汽廓线的统计 D 矩阵。由 2008-07-27 西北太平洋地区 FY-3A MWTS/MWHS 实测多通道辐射亮度温度数据, 进行整个西北太平洋地区大气温度和水汽廓线的三维反演。作为中国首次星载 FY-3A 微波遥感对中国大气观测与台风检测应用的个例分析, 对中国自主发展的被动微波大气遥感定量信息研究有一定的意义。

志 谢 感谢美国麻省理工学院 Philip W. Rosenkranz 博士在本文完成过程中给予的帮助。

REFERENCES

- Dong Y H, Sun Y Z, Wang J H and Cheng W Q. 2008. FY-3A polar-orbit meteorological satellite. *Shanghai Aerospace*(in Chinese), **25**(5): 1–11
- Garand L, Turner D S, Larocque M, Bates J, Boukabara S, Brunel P, Chevallier F, Deblonde G, Engelen R, Hollingshead M, Jackson D, Jedlovec G, Joiner J, Kleespies T, McKague D S, McMillin L, Moncet J L, Pardo J R, Rayer P J, Salathe E, Saunders R, Scott N A, Van Delst P and Woolf H. 2001. Radiance and Jacobian Intercomparison of Radiative Transfer Models Applied to HIRS and AMSU Channels. *Journal of Geophysical Research*, **106**(D20): 24017–24031
- Goodrum G, Kidwell K B, and Winston W. 2009. NOAA KLM User's Guide. National Oceanic and Atmospheric Administration
- Jin Y Q. 1994. Electromagnetic Scattering Modelling for Quantitative Remote Sensing. Singapore: World Scientific
- Jin Y Q. 2005. Theory and Approach of Information Retrievals from Electromagnetic Scattering and Remote Sensing. Berlin Heidelberg New York: Springer
- Jin Y Q, Lu N and Lin M. 2010. Advancement of Chinese Meteorological Feng Yun (FY) and Oceanic Hai Yang (HY) Satellite Remote Sensing. *Proceedings of IEEE*, **98**: 844–861
- Komichak M J. 1982. Estimation of Atmospheric water vapor profiles using microwave radiometry. M.S. thesis of MIT: 18–28
- Kuo C C, Staelin D H and Rosenkranz P W. 1994. Statistical Iterative Scheme for Estimating Atmospheric Relative Humidity Profiles. *IEEE Transactions on geoscience and Remote Sensing*, **32**: 254–260
- Lavanant L, Brunel P, Gendrier L and Rochard G. 2000. ICI Version 3 Retrieval Package. Technical Proceedings of the Eleventh International TOVS Study Conferences
- Liebe H J. 1989. MPM-An Atmospheric Millimeter-Wave Propagation Model. *International Journal of Infrared Millimeter Waves*, **10**: 631–650
- Liebe H J, Hufford G A, and Cotton M G. 1993. Propagation Modeling of Moist Air and Suspended Water/Ice Particles at Frequencies Below 1000 GHz. *The Advisory Group for Aerospace Research and Development (AGARD) Conference Proceedings*, **542**(3): 1–10
- Liebe H J, Manabe T, and Hufford T G. 1989. Millimeter-Wave Attenuation and Delay Rates Due to Fog/Cloud Conditions. *IEEE Transactions on Antennas and propagation*, **37**(12): 1617–1623
- Pardo J R, Cernicharo J, and Serabyn E. 2001. Atmospheric Transmission at Microwaves (ATM): An Improved Model for Millimeter/Submillimeter Applications. *IEEE Transactions on Antennas and propagation*. **49**(12): 1683–1694
- Rosenkranz P W. 1975. Shape of the 5 mm Oxygen Band in the Atmosphere. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **23**(4): 498–506
- Rosenkranz P W. 1988. Interference Coefficient for Overlapping Oxygen Lines in Air. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. **39**: 287–297
- Rosenkranz P W. 2001. Retrieval of Temperature and Moisture Profiles From AMSU-A and AMSU-B Measurements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. **39**(11): 2429–2435
- Tretyakov M Y, Koshelev M A, Dorovskikh V V, Makarov D S and Rosenkranz P W. 2005. 60-GHz Oxygen Band: Precise Broadening and Central Frequencies of Fine-Structure Lines, Absolute Absorption Profile at Atmospheric Pressure, and Revision of Mixing Coefficient. *Journal of Molecular Spectroscopy*. **231**: 1–14

附中文参考文献

- 董瑶海, 孙允珠, 王金华, 程卫强. 2008. FY-3A 极轨气象卫星. 上海航天, **25**(5): 1–11

Retrievals of atmospheric temperature and humidity profiles from Chinese microwave FY-3A measurements and the example of Phoenix Typhoon, 2008

CHEN Hao, JIN Yaqiu

Key Laboratory of Wave Scattering and Remote Sensing Information (MOE), Fudan University, Shanghai 200433, China

Abstract: As a China's second generation of polar-orbiting meteorological satellites, FY-3A (Fen Yun means wind and cloud) was launched on May 27, 2008. The microwave temperature sounder (MWTS) and microwave humidity sounder (MWHS) are first aboard the Chinese FY satellite for the purpose of retrieving atmospheric temperature and humidity profiles. There are four channels of MWTS, i.e. 50.30, 53.596 ± 0.115 , 54.94 and 57.29 GHz, with corresponding bandwidths 180, 340, 400 and 330 MHz, respectively, and five channels of MWHS, i.e. dual polarized (V,H) 150, 183.31 ± 1.0 , 183.31 ± 3.0 and 183.31 ± 7.0 GHz, which are corresponding to the bandwidths 1000, 500, 1000 and 2000 MHz, respectively. The spatial resolutions of MWTS and MWHS at sub-point are 50/75 km and 15 km, respectively, and the fields of views are 15 and 98 lines, respectively. Both scan modes are cross-track scanning.

Based on the algorithms of atmospheric absorption coefficients, i.e. the MPM (Millimeter Propagation Model) and ROS (Rosenkranz's model), this paper presents a novel MIX (mixed) model for calculation of atmospheric absorption coefficients in the multiple channels of MWTS and MWHS under China National Standard Atmosphere (GB 1920-80) and U.S. Standard Atmosphere, 1976.

Using atmospheric radiative transfer with the *in situ* measurements of 836 radiosonde datasets (including the altitude, pressure, atmospheric temperature and humidity) from 16 sites in China and Japan, multiple channel brightness temperature (T_b) are simulated, and compared with FY-3A MWTS/MWHS observations as good validation. The radiosonde measurements were issued by NOAA/ESRL (National Oceanic and Atmospheric Administration/Earth System Research Laboratory). The simulations with the atmospheric absorption coefficients based on respective MPM, ROS and our MIX algorithms are also analyzed. Data validation shows good performance of the MIX model.

The statistical D-matrix is firstly constructed from the MWTS/MWHS T_b data and the corresponding radiosonde measurements, and then is applied to the retrieval of atmospheric temperature and humidity profiles over the northwestern Pacific Ocean during 2008's Phoenix typhoon. A 3D distribution of the atmospheric temperature and humidity is also presented. Comparison and data fusing of FY-3A and other satellites shall be an interesting mission for future operational service. Large coverage of MWHS can be beneficial to further study of atmospheric parameters retrievals.

Key words: FY-3A MWTS/MWHS, atmospheric absorption, radiative transfer, D-matrix, atmospheric temperature and humidity profiles

CLC number: TP79/P407 **Document code:** A

Citation format: Chen H and Jin Y Q. 2011. Retrievals of atmospheric temperature and humidity profiles from Chinese microwave FY-3A measurements and the example of Phoenix Typhoon, 2008. *Journal of Remote Sensing*, 15(1): 137-147