

王婉, 聂皓浩, 雷恒池, 等, 2023. 基于 183 GHz 机载微波辐射计探测水汽和云中液态水反演算法研究[J]. 气象, 49(5): 542-550. Wang W, Nie H H, Lei H C, et al, 2023. Retrieval method of precipitation water vapor and cloud liquid water path based on 183 GHz airborne microwave radiometer[J]. Meteor Mon, 49(5): 542-550 (in Chinese).

基于 183 GHz 机载微波辐射计探测水汽和 云中液态水反演算法研究^{*}

王 婉¹ 聂皓浩¹ 雷恒池² 刘 晴¹ 郭晓军¹ 陈 超¹

¹ 天津市人工影响天气办公室, 天津 300074

² 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴重点实验室, 北京 100029

提 要: 基于机载微波辐射计 GVR, 以北京探空资料作为训练数据, 机载对空微波辐射传输方程作为前向算子, 建立基于 BP 神经网络和 Decker 模型基础上的积分水汽含量和液态水路径反演算法。与 GVR 自带算法相比, 新算法增加观测高度作为输入变量, 考虑温度对云水相态的影响建立新的云模型, 对历史探空资料进行补全, 增加积分高度至 30 km。利用数值模拟检验、外场观测试验和观测误差传递分析对两种算法反演的积分水汽含量反演误差进行验证, 结果表明: 新算法和自带算法模拟计算的积分水汽含量与探空计算值相关系数分别为 0.9988、0.9929, 自带算法反演值普遍低于探空计算值; 新算法和 GVR 自带算法反演的积分水汽含量统计均方根绝对误差分别为 0.05~1.30 mm、0.2~3.0 mm, 相对误差分别为 1%~10%、4%~65%, 新算法在 6 km 以下计算的积分水汽含量相对误差最小值为 1%, 整层高度上约 75% 的相对误差低于 5%, 而自带算法仅有不到 1% 的相对误差低于 5%; 以 2016 年 11 月 20 日观测个例为例, GVR 仪器观测误差经过新算法和自带算法反演公式传递后造成的误差在 3000 m 高度分别为 0.05 mm 和 0.06 mm, 随水汽探测值增大(飞机高度下降), 自带算法传递误差增大明显高于新算法。选择 2021 年 6 月 30 日飞行个例, 对两种算法反演的液态水路径反演误差进行验证, 结果表明: 在飞机上空无云时段, 新算法和自带算法反演的液态水路径范围分别为 0 mm、0~0.006 mm。误差分析表明, 新算法可提升本地积分水汽含量和液态水路径反演精度。

关键词: 机载微波辐射计, 183 GHz, 云中液态水, 反演

中图分类号: P413

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.121801

Retrieval Method of Precipitation Water Vapor and Cloud Liquid Water Path Based on 183 GHz Airborne Microwave Radiometer

WANG Wan¹ NIE Haohao¹ LEI Hengchi² LIU Qing¹ GUO Xiaojun¹ CHEN Chao¹

¹ Tianjin Weather Modification Office, Tianjin 300074

² Key Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract: Based on the airborne microwave radiometer (G-band water vapor radiometer, named GVR), a retrieval algorithm of precipitation water vapor and liquid water path based on BP neural network and Decker model is established by using the Beijing sounding data as the training data, and the airborne microwave radiation transfer equation as the forward algorithm. Compared to the GVR own algorithm, the observation height is added as an input variable. A new cloud model considering the influence of temperature on the

^{*} 国家重点研发计划(2019YFC1510301)和天津市自然科学基金面上项目(20JCYBJC00010)共同资助

2022 年 2 月 3 日收稿; 2022 年 8 月 31 日收修定稿

第一作者: 王婉, 主要从事云和降水物理研究. E-mail: vvan1981@126.com

cloud water phase, and the historical sounding data completed to increase the integral height to 30 km are applied in the new algorithm. The precipitation water vapor errors calculated by two algorithms are verified by using numerical simulation test, external field observation test and observation error transfer analysis. The results show that the correlation coefficient between the retrieval and probe values of the new and GVR own algorithms are 0.9988 and 0.9929 respectively. The retrieval value of the GVR own algorithm is generally lower than the sounding calculation value. The absolute errors of precipitation water vapor calculated by the new and GVR own algorithms are 0.05–1.30 mm and 0.2–3.0 mm, relative errors are 1%–10% and 4%–65%, the minimum relative error calculated by the new algorithm is 1% below 6 km, about 75% of new algorithm results are below 5% while only less than 1% of GVR own results are below 5%. Take the data observed on 20 November 2016 as an example. The errors caused by the GVR instrument observation errors that are calculated by the new algorithm and the GVR own algorithm retrieval formula are 0.05 mm and 0.06 mm at 3000 m height respectively. After of retrieval formula, with the increase of the water vapor detection value (the aircraft altitude drops), the transfer error increase of the GVR own algorithm is significantly higher than that of the new algorithm. The flight case on 30 June 2021 is selected to verify the liquid water path retrieval error of the two algorithms. The results show that the liquid water path ranges of the new algorithm and the own algorithm are 0 mm and 0–0.006 mm during cloudless periods over the plane. Error analysis shows that the new algorithm is effective for improving the retrieval accuracy of local precipitation water vapor and liquid water path.

Key words: airborne microwave radiometer, 183 GHz, cloud liquid water content, retrieval

引 言

云中液态水含量是极为重要的大气物理学参数(雷恒池等,2003)。云在地球能量平衡中的重要作用多来自其中的液态水含量(Turner et al,2007),其反馈作用对全球气候变化产生十分重要的影响(Somerville and Remer,1985;Stephens and Greenwald,1991)。

微波辐射计是测量云中液态水的一种有效手段且应用广泛(崔雅琴等,2019;许皓琳等,2020;李金辉等,2022;辛悦等,2023)。与地基微波辐射计相比,机载微波辐射计不受空间限制,可通过改变飞机位置探测云中不同区域的液态水,有利于探测人工影响降水作业潜力区——过冷水区。利用机载微波辐射计探测云中液态水开始于20世纪80年代。Warner and Drake(1988)研制了9.5 mm波长双向天线机载微波辐射计,在反演算法上采用层析技术原理,将目标云系离散化,根据辐射传输原理求得云中液态水含量的二维分布(Drake and Warner,1998)。2000年初,雷恒池等(2003)在我国首次研制成功单波段单天线对空机载微波辐射计,其工作频率为31.65 GHz(波长为9.5 mm)。江芳等

(2004)针对该辐射计获得的亮温数据采用统计方法进行反演,获取垂直累积液态水。金德镇等(2004)、梁谷等(2007)采用该反演算法对层状云进行了液态水观测。周珺等(2008)在上述统计方法基础上,对云液态水廓线产生方法进行改进,采用一维层状云模式产生云样本进行垂直累积液态水反演计算,探测误差估计表明其反演精度在所有高度上都优于原方法,之后又采用层析法建立了机载微波辐射计探测云中液态水二维分布反演算法(周珺等,2010)。

2004年底,美国Prosensing公司研制了中心工作频率在183.31 GHz的双边四通道对空微波辐射计GVR(G-band water vapor radiometer),四个通道分别为183.31($\pm 1, \pm 3, \pm 7, \pm 14$) GHz(Pazmany,2006;2007)。183.31 GHz位于水汽强吸收带,具有更高的灵敏度,适于探测较低含量水汽,同时,该吸收带对液态水测量也极为灵敏(周秀骥,1982;Pazmany,2007),其测量结果受云中固态水影响很小,但对液态水非常敏感(Wang et al,1998),因此183 GHz机载微波辐射计在测量低含量水汽和液态水特别是过冷水含量上具有优势。Pazmany(2007)针对GVR采用神经网络算法对积分水汽含量(PWV)和液态水路径(LWP)进行反演,输入变量为四个通道亮温及大气温,训练数据选取美国

中纬度冬季和北极地区的探空资料。2016 年,天津市人工影响办公室引进该仪器并采用其自带算法(Pazmany 算法)进行水汽和云中液态水观测,作者在数据质量控制基础上对该算法在本地的适用性进行研究(王婉等,2018a;2018b;2021),结果表明与其他类型机载微波辐射计反演精度及 GVR 在北极地区地基观测反演精度相比,GVR 自带反演算法在天津地区的反演精度相对偏差。分析认为造成这种误差的原因主要是未考虑飞机高度变化,云模型构建过于简单等。为更好使用该仪器,本文将建立新的积分水汽含量和云中液态水反演算法,通过数值模拟、飞机外场观测试验及仪器观测误差传递方法验证新算法及 GVR 自带算法反演精度并进行比较。

1 仪器及数据资料

GVR 安装于飞机机翼下方,通过天线向上垂直观测,接收飞机上方云水信号。GVR 天线是一口面直径 10 cm、90°的抛物面金属镜,置于辐射计前端,伸出机翼外侧,天线正上方有一天线罩,来自辐射计上方的辐射能量透过天线罩被天线接收并反射进入辐射计接收机,从而测得四个通道辐射能量。由四

个通道测量的亮温可以反演得到从飞机所在高度直到大气上界这一柱体中的积分水汽含量和积分液态云水含量(液态水路径)。

本文利用历史探空数据,采用 BP 神经网络算法建立数学模型来反演飞机上方垂直气柱内的积分水汽含量和液态水路径。文章用到两类数据,历史探空数据和小时雨量数据。历史探空数据分为两部分:一部分用作建立数学模型,选取北京探空站 2009—2018 年 08 时和 20 时(北京时,下同)两个时次的探空资料;另一部分用作反演精度数值模拟,取北京站 2019 年 08 时和 20 时两个时次的探空资料。由于反演垂直累积液态水需要在探空资料中筛选有云无降水样本,文章选用北京探空站 2009—2019 年每日 08 时和 20 时两个时次的小时雨量资料,剔除雨天探空数据。

2 研究方案

GVR 自带算法采用的是 Pazmany(2007)建立的反演算法,新算法将在自带算法基础上进行改进并将两种算法的反演精度进行比较。表 1 为新算法与 GVR 自带算法反演方案对比。

表 1 新算法与 GVR 自带算法反演方案对比

Table 1 Comparison between the new and GVR own retrieval algorithms

项目	GVR 自带算法(GVR-OWN)	新算法(GVR-NEW)
云模型	固定云高度和厚度,假定液态水密度在云内垂直高度上为一常数,取 $0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 及在 $0 \sim 0.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 区间内随机 1 个数值作为云液态水密度	以相对湿度 85%作为云判断阈值,考虑温度对云水相态的影响,根据相对湿度和云内温度不同计算云液态水密度(详见 2.1)
反演算法	BP 神经网络算法(输入变量:四个通道对应亮温、温度)	BP 神经网络算法(输入变量:四个通道对应亮温、高度、温度)
探空资料积分高度	10 km	30 km(高层探空数据缺失时用标准大气模型补齐)

2.1 建立云天样本集和构建云模型

在历史探空数据中筛选有云无降水样本,建立云天样本集。首先在所有探空资料中剔除数据缺失资料,以相对湿度 85%作为有云判据,只要存在某高层相对湿度大于 85%则视为有云探空资料,然后在有云探空中剔除雨天探空数据,由于 08 时和 20 时两个时次的探空施放时间为 07:15 和 19:15,因此选择 08 时和 20 时的小时雨量资料,只要该时次存在降水则剔除相应时次探空数据。本文是针对机载微波辐射计来反演垂直累积液态水,因此高度

是不断变化的,为获取更多样本,将每个探空 0~9 km 随机取 8 个高度层作为样本初始高度(飞机观测高度),这样每个探空资料可获取 8 个探空样本,从而建立云天样本集。

针对每个云天样本构建云模型。云的模型与实际云的差别会给反演结果带来较大误差,因此准确构建云模型是影响反演精度的关键因素。国外常用的两种云模型为 Decker 模型(Decker et al,1978)和 Salonon 模型(Salonon and Uppala,1991),国内许多云液态水廓线构建方法类似于 Decker 模型(黄润恒和邹寿祥,1987;刘亚亚等,2010;王旭等,2016),

本文参照该模型,同时考虑温度影响,参照 Mattioli et al(2009)进行云模型构建。具体做法为:针对每个探空廓线样本,当相对湿度 $<85\%$ 时,液态水密度取 $0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$;当相对湿度 $>95\%$ 、温度 $>0^\circ\text{C}$ 时,液态水密度取 $0.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$;当相对湿度 $>95\%$ 、温度 $\leq -30^\circ\text{C}$ 时,液态水密度取 $0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$;当相对湿度 $>95\%$ 、温度处于 $-30 \sim 0^\circ\text{C}$ 时,液态水密度计算公式如下:

$$\rho_L = 0.5[1 - (T/30)^4] \quad (1)$$

当相对湿度处于 $85\% \sim 95\%$ 、温度 $>0^\circ\text{C}$ 时,液态水密度计算公式如下:

$$\rho_L = -4.25 + 0.05H_u \quad (2)$$

当相对湿度处于 $85\% \sim 95\%$ 、温度 $< -30^\circ\text{C}$ 时,液态水密度取值为 $0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$;

当相对湿度处于 $85\% \sim 95\%$ 、温度在 $-30 \sim 0^\circ\text{C}$ 时,液态水密度计算公式如下:

$$\rho_L = (-4.25 + 0.05H_u) \cdot [1 - (T/30)^4] \quad (3)$$

液态水路径(LWP)计算公式如下:

$$\text{LWP} = \int_{z_0}^{\infty} \rho_L dz \quad (4)$$

式中: ρ_L (单位: $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)表示液态水密度, T (单位:K)表示温度, H_u (单位:%)表示相对湿度, z_0 (单位:m)表示飞机观测高度。

2.2 积分水汽含量计算

利用探空资料计算积分水汽含量(PWV)的方法有多种,本文将采用如下公式(盛裴轩等,2003):

$$\text{PWV} = \int_{z_0}^{\infty} \rho_{\text{H}_2\text{O}} dz \quad (5)$$

式中: $\rho_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{\epsilon e_s D}{R_d T}$, $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ (单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)表示水汽密度, z_0 表示飞机飞行高度; $\epsilon = 0.622$, e_s 表示水面饱和水汽压(单位:Pa), D 表示相对湿度, R_d 表示干空气比气体常数,取值 $287.05 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, T (单位:K)表示某高度对应的温度。

2.3 大气下行辐射传输方程

GVR 在飞机飞行高度进行观测,接收来自其上方的微波辐射,不考虑降雨时,其微波辐射传输方程可采用如下形式(江芳等,2004):

$$T_b(z_0, f) = T_b(\infty) e^{-\int_{z_0}^{\infty} a(z, f) dz} + \int_{z_0}^{\infty} a(z, f) T(z) \cdot e^{-\int_{z_0}^z a(z', f) dz'} dz \quad (6)$$

式中: T_b (单位:K)表示辐射计接收到的大气向下的

辐射亮温, $T_b(\infty)$ (单位:K)表示宇宙背景亮温,一般取常数 2.7 K , z_0 (单位:m)表示飞机飞行高度, z (单位:m)表示飞机至宇宙背景的某一高度, f (单位:GHz)表示辐射计工作频率, $T(z)$ (单位:K)表示高度 z 处的大气温度, z' (单位:m)表示飞机至高度 z 之间的某一高度, a (单位: $\text{K} \cdot \text{m}^{-1}$)表示大气吸收系数,一般为氧气(a_{O_2})、水汽($a_{\text{H}_2\text{O}}$)和云中液态水吸收系数(a_{cloud})之和:

$$a = a_{\text{O}_2} + a_{\text{H}_2\text{O}} + a_{\text{cloud}} \quad (7)$$

氧气、水汽和液态水吸收系数参照 Ulaby et al (1981)公式。

氧气的微波吸收谱线是由许多分布在 $50 \sim 70 \text{ GHz}$ 频率范围上的吸收谱线和在 118.75 GHz 的附加谱线所组成,氧气的吸收系数为频率、大气压力和大气温度的函数:

$$a_{\text{O}_2} = 1.61 \times 10^{-2} f^2 \left(\frac{p}{1013} \right) \left(\frac{300}{T} \right) F' \quad (8)$$

式中: F' 是谱线线型函数, f (单位:GHz)为频率, p (单位:hPa)为大气压力, T (单位:K)为大气温度。

水汽吸收系数为频率、大气压力和大气温度的函数,表达式为:

$$a_{\text{H}_2\text{O}} = a'_{\text{H}_2\text{O}} + \Delta a \quad (9)$$

$$a'_{\text{H}_2\text{O}} = 2f^2 \rho_v \left(\frac{300}{T} \right)^{5/2} \sum_{i=1}^{10} A_i e^{-\epsilon_i/T} \cdot$$

$$\left[\frac{\gamma_i}{(f_i^2 - f^2)^2 + 4f^2 \gamma_i^2} \right] \quad (10)$$

γ_i 为线宽函数,计算公式为

$$\gamma_i = \gamma_{i0} \left(\frac{p}{1013} \right) \left(\frac{300}{T} \right)^x \left[1 + 10^{-2} a_i \frac{\rho_v T}{p} \right] \quad (11)$$

Δa 为 $100 \sim 300 \text{ GHz}$ 频率范围内使用的订正项,计算公式为:

$$\Delta a = 4.69 \times 10^{-6} \rho_v \left(\frac{300}{T} \right)^{2.1} \left(\frac{p}{1000} \right) f^2 \quad (12)$$

式中: ρ_v (单位: $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)为水汽密度, γ_{i0} , a_i , x , A_i , ϵ_i 和 f_i 均为给出参数值。

液态水的吸收系数与滴谱分布无关,是频率、云滴温度和云中含水量的函数:

$$a_{\text{cloud}} = a_1 \cdot m \quad (13)$$

式中: m (单位: $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)为云水含量, a_1 表示液态水的质量吸收系数,与波长和云滴温度有关,其表达式为:

$$a_1 = 0.434 \frac{6\pi}{\lambda_0} \text{Im}\{-K\} \quad (14)$$

$$K = \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \quad (15)$$

式中: λ_0 (单位: cm) 为波长, m 为水的复折射指数, 可表示为:

$$m = n - ik \quad (16)$$

式中: n, k 与波长和云滴温度有关, 计算采用 Liebe et al(1991)建立的水复折射指数经验公式。

GVR 是双边四通道微波辐射计, 四个通道的带宽分别为 0.5, 1.0, 1.4 和 2.0 GHz, 在计算通道亮温时需要根据式(6)和频率响应函数计算加权后的亮温, 由于缺少频率响应函数本文参照 Zuidema et al(2012)做法, 采用各通道中心频率来模拟通道亮温, 同时假设每个通道的两个边带对测量的贡献是一致的, 通道亮温取两者平均。

3 反演误差分析

3.1 积分水汽含量反演误差分析

本文分别采用数值模拟检验、外场观测试验和观测误差传递方法对积分水汽含量进行误差分析。

数值模拟检验指选择一定探空资料作为验证样本, 以探空资料计算的物理量作为真实值, 利用探空资料模拟仿真通道亮温作为反演方程的输入参数计算相应物理量, 以此作为反演值, 通过物理量的反演值和真实值对比获取反演误差。本文以相关系数(R)、统计均方根绝对误差(E)、统计均方根相对误差(S)三个统计变量来体现反演误差, 其计算方法为: 利用探空资料建立云天样本集, 采用式(5)计算每个样本的积分水汽含量作为真实值, 记作 $V_{zi}, i=1, 2, \dots, n$, 将所有样本真实值的平均记为 $\overline{V_z}$, 采用式(6)计算每个样本辐射亮温并读取对应高度及温

度, 通过反演算法计算积分水汽含量作为反演值, 记作 $V_{ri}, i=1, 2, \dots, n$, 所有样本的积分水汽含量反演值的平均记为 $\overline{V_R}$, 则相关系数、统计均方根绝对误差、统计均方根相对误差计算公式如下:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (V_{ri} - \overline{V_R})(V_{zi} - \overline{V_z})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (V_{ri} - \overline{V_R})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (V_{zi} - \overline{V_z})^2}} \quad (17)$$

$$E = \sqrt{\sum_{i=1}^n (V_{zi} - V_{ri})^2 / n} \quad (18)$$

$$S = \frac{E}{(\sum_{i=1}^n V_{zi} / n)} \quad (19)$$

取北京 2019 年探空资料作为验证样本, 计算积分水汽含量真实值, 并分别采用新反演算法(GVR-NEW)和 GVR 自带算法(GVR-OWN)计算每个积分水汽含量真实值对应的反演值。利用式(17)计算积分水汽含量真实值和反演值的相关系数并将对应值标于散点图中, 结果见图 1。GVR 自带算法计算的反演值与真实值相关系数为 0.9929, 新算法为 0.9988。显然新算法计算的积分水汽含量反演值与真实值相关性高于 GVR 自带算法。图 1a 为 GVR 自带算法计算的反演值与真实值散点图, 图 1b 为新算法计算的反演值与真实值散点图, 图 1 中斜线表示反演期望值, 斜线及两侧的散点表示反演值偏离期望值(真实值)的程度, 从图中可以看出, 与新算法相比, GVR 自带算法计算的积分水汽含量反演值偏离真实值较大且普遍低于真实值, 两种算法计算的反演值偏离期望值的程度都随着水汽含量增大而增大, 说明积分水汽含量越大反演误差越大。

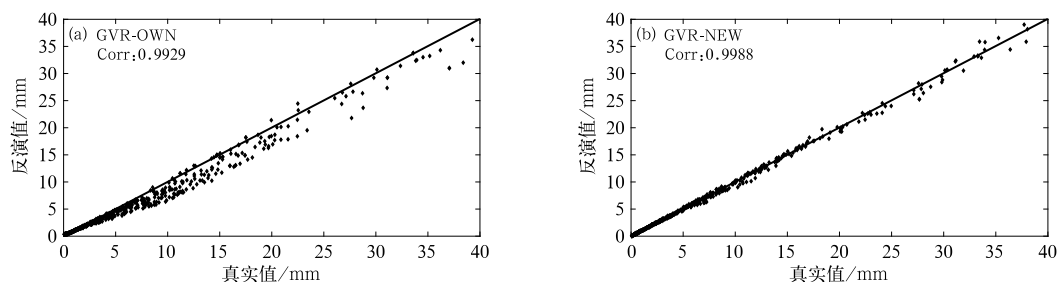


图 1 积分水汽含量反演值和探空真实值散点图

(a)GVR 自带算法(GVR-OWN), (b)新算法(GVR-NEW)

Fig. 1 Scatter plot of retrieval and sounding data calculation

(a) GVR own algorithm(GVR-OWN), (b) new algorithm(GVR-NEW)

利用北京2019年探空资料分别计算GVR自带算法和新算法反演的积分水汽含量统计均方根绝对误差和相对误差,其计算结果随高度分布见图2。图2中蓝色曲线表示GVR自带算法的反演误差,黑色曲线表示新算法反演误差,由图可见,新算法和GVR自带算法反演的积分水汽含量统计均方根绝对误差分别为0.05~1.30 mm、0.2~3.0 mm,相对误差分别为1%~10%、4%~65%。Cadeddu et al (2007)利用GVR在北极地区进行地基观测获得的积分水汽含量反演结果相对误差低于5%,新算法在6 km以下计算的积分水汽含量相对误差最小值为1%,整层高度上约75%相对误差低于5%,而自带算法仅有不到1%的相对误差低于5%,因此与GVR自带算法相比,新算法反演的积分水汽含量误差更小,反演效果更好。

上述分析表明新算法反演效果优于GVR自带算法,从表1可看到新算法在自带算法基础上做了三处改进。为验证每一处改进对改善反演效果的贡献,本文在自带算法基础上每次做一处改进,可对应得到三个反演方案,这三个方案分别命名为M1(改变云模型)、M2(增加高度数据作为输入参数)和M3(补齐探空资料到30 km高度)。取北京2019年探空资料作为反演结果验证数据,为便于比较,直接计算所有验证样本的统计均方根绝对误差,计算结果显示GVR自带算法、方案M1、M2和M3反演的

PWV统计均方根绝对误差分别为1.29、0.69、0.91、1.12 mm,方案M1、M2和M3对反演效果改进的贡献分别为52%、33%和15%,可见云模型对反演效果的影响最大。

利用数值模拟检验方法验证积分水汽含量反演精度时,由于输入亮温取自探空资料仿真值而非仪器实际探测结果,因此其计算误差仅能反映反演算法本身造成的误差,其中包括拟合反演方程时用到的历史资料背景场差异等因素。除反演误差外,仪器误差也会影响最后的水汽观测结果。本文结合2016年11月20日飞行探测个例来讨论仪器误差对水汽观测结果造成的影响。GVR定标误差低于1 K(Pazmany, 2007),本文以1 K作为仪器误差,分别对新算法和自带算法进行误差传递计算(经反演公式传递后造成的误差),结果在图3中分别以黑色和蓝色虚线表示。图3中黑色和蓝色实线分别表示采用新算法和自带算法计算的本次积分水汽含量反演值,由图可见,与新算法相比,自带算法反演值偏低,这与图1中自带算法模拟计算的反演值偏低是一致的。从图中虚线可以看到,两种算法经反演公式传递后造成的误差值都随着积分水汽含量值增大而增大,在3000 m飞行高度,自带算法与本文算法的传递误差分别约为0.06 mm和0.05 mm,随水汽探测值增大,自带算法传递误差增大幅度明显高于新算法。

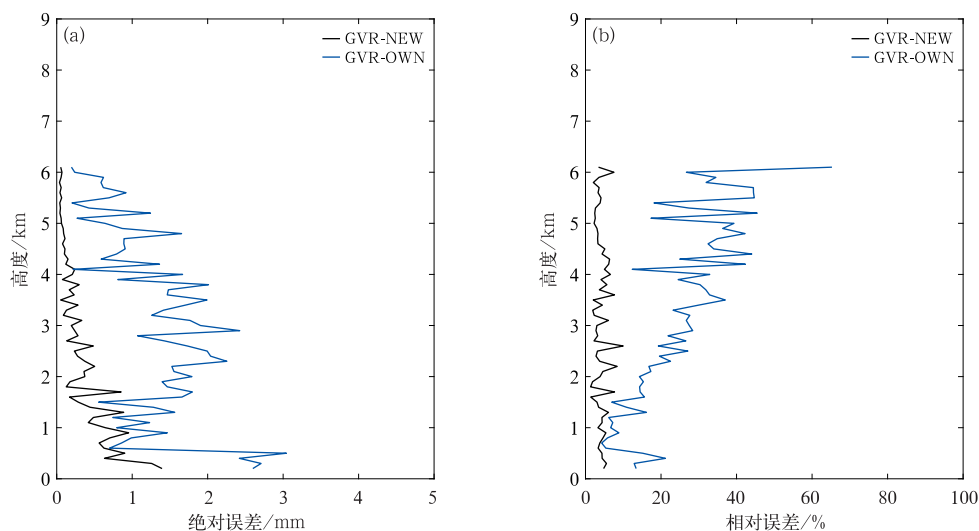


图2 对水汽反演结果(a)绝对误差和(b)相对误差随高度分布

Fig. 2 The distribution of water vapor retrieval (a) absolute errors and (b) relative errors with height

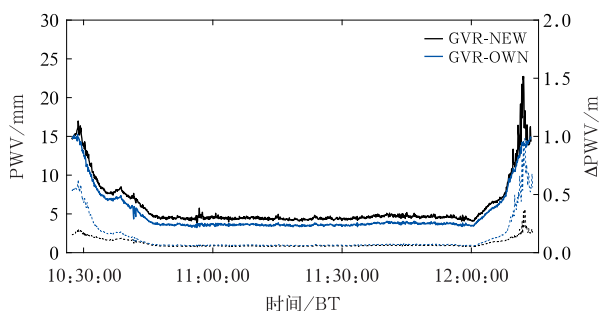


图 3 采用新算法和自带算法反演的
2016 年 11 月 20 日探测资料积分水汽
含量值(实线)及两种算法经反演
公式传递后造成的误差值(虚线)

Fig. 3 The precipitation water vapor calculated by the new algorithm and GVR own algorithm using the data detected on 20 November 2016 (solid line) and the error value caused by the retrieval formula (dashed line)

3.2 液态水路径反演误差分析

由于液态水无法直接由探空计算得到,其值与构建的云模型相关,特别是 GVR 自带算法对于每个探空样本都添加了数条液态水廓线,因此很难利用数值模拟检验法验证其反演精度。利用外场观测中不同仪器的探测结果进行对比分析是验证反演精度的最直观方式,但由于缺少其他有效的液态水路径探测手段,无法获取其真值,为外场观测验证带来一定困难。当飞机 GVR 上方无云存在时,可确定其上方的液态水路径真值为 0 mm,这为外场观测对比提供了可能。要确认飞机上方无云需要必要的探测设备,由于目前携带 GVR 的增雨飞机缺少这种设备,故采用安装在飞机上的视频拍摄装置寻找无云时段,同时通过 DMT 粒子测量系统确认飞机是否处于云外。通过多个观测个例分析,选择 2021 年 6 月 30 日个例。2021 年 6 月 30 日 10:18—15:53,天津增雨飞机空中国王 B300 进行了一次探测飞行,根据安装在飞机上的视频显示,本次飞行有一段时间处于云层上方且上方完全无云。

图 4 绿色曲线为 DMT 粒子测量系统的云、气溶胶和降水粒子组合探头 CIP 测量的粒子数浓度随时间变化,图中可见,12:30—12:54 粒子数浓度基本为 0 个·cm⁻³,这和机上人员观测是一致的,飞机该时段处于云外飞行。选取机载微波辐射计 GVR 12:30—13:10 观测数据,按照 GVR 亮温数据

中 RFI 识别和订正方法(王婉等,2018a;2018b)进行质量控制,然后分别采用 GVR 自带算法和本研究算法反演计算液态水路径(LWP),红色曲线表示自带算法反演结果,蓝色曲线表示新算法反演结果(图 4)。由图可见,两种反演结果在 12:39—12:48 时段内保持一致,基本趋于 0 mm,这和机上观测及 CIP 探头观测结果都是一致的,可认为该时段内飞机在云外飞行且上方无云层,液态水路径值应为 0 mm。图 5 为该时段内的 GVR 自带算法和本研究算法反演结果,从图中可以看到,该时段内新算法

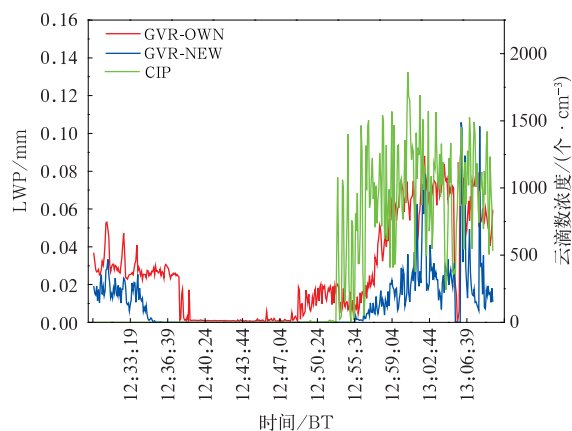


图 4 2021 年 6 月 30 日 12:30—13:10 采用 GVR
自带算法(红线)和新算法(蓝线)反演的
液态水路径与 CIP 观测(绿线)的云滴数浓度

Fig. 4 Retrieval results of liquid water path using GVR own algorithm (red line) and new algorithm (blue line) and cloud droplet number concentration of CIP (green line) from 12:30 BT to 13:10 BT 30 June 2021

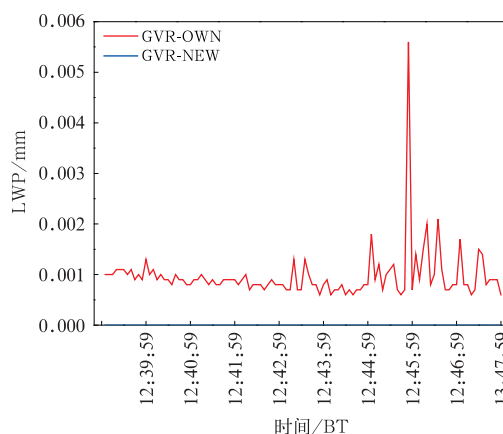


图 5 2021 年 6 月 30 日 12:39—12:48 采用 GVR 自带算法
(红线)和新算法(蓝线)反演的液态水路径

Fig. 5 Retrieval results of liquid water path using GVR own algorithm (red line) and new algorithm (blue line) from 12:39 BT to 12:48 BT 30 June 2021

获取的液态水路径反演值全部为0 mm,自带算法获取的反演值范围为0~0.006 mm,平均值约为0.001 mm,显然,新算法计算的液态水路径精度更高。12:48—12:55时段内,GVR自带算法反演出一定的垂直累积液态水,变化范围在0.001~0.020 mm,但新算法反演值和CIP粒子探头测量的粒子数浓度都趋于0个·cm⁻³,此时段飞机飞行高度位于4000~4700 m,不排除飞机上方存在一定云层,但据机上视频显示,此时段飞机上方并无云层,因此该时段内新算法反演结果更为可信。对比本次飞行的液态水路径反演结果,新算法反演值普遍低于自带算法,当不存在液态水时,新算法反演精度高于自带算法,但当存在液态水时,由于暂时缺少对比观测,尚无法定量计算两种算法的反演误差。

4 结 论

(1)本文在以往研究基础上,建立新的积分水汽含量和云中液态水反演算法,与GVR自带算法相比,新算法增加了观测高度作为输入变量,考虑了温度对云水相态的影响建立新的云模型构建云液态水廓线,对历史探空资料进行补全,增加微波辐射传输方程积分高度至30 km。

(2)利用数值模拟检验、外场观测试验和观测误差传递分析,对新算法和GVR自带算法反演的积分水汽含量反演误差进行验证。新算法和自带算法模拟计算的反演值与探空计算值相关系数分别为0.9988、0.9929,新算法计算的积分水汽含量反演值与真实值相关性高于GVR自带算法。两种算法计算的反演值与真实值散点图表明,与新算法相比,GVR自带算法计算的积分水汽含量反演值偏离真实值较大且普遍低于真实值,两种算法计算的反演值偏离期望值的程度都随着水汽含量增大而增大。以2016年11月20日飞行探测个例为例,讨论仪器误差对水汽观测结果造成的影响,结果表明两种算法经反演公式传递后造成的误差值都随着积分水汽含量值增大而增大,在3000 m飞行高度,自带算法与新算法的传递误差分别约为0.06 mm和0.05 mm,随水汽探测值增大,自带算法传递误差增大幅度明显高于新算法。为验证每一处改进对改善反演效果的贡献,本文在自带算法基础上每次做一处改进,结果表明云模型、增加观测高度作为输入变量和补齐探空资料到30 km高度对反演效果改进的贡献分别为52%、33%和15%。

(3)选择2021年6月30日飞行个例,对两种算法反演的液态水路径反演误差进行验证,结果表明:在飞机上空无云时段,新算法和自带算法反演的液态水路径范围分别为0 mm、0~0.006 mm。误差分析表明,新算法可提升本地积分水汽含量和液态水路径反演精度。

参考文献

- 崔雅琴,张佃国,王洪,等,2019. 2015年济南地区雾霾天气过程大气物理量特征初步分析[J]. 大气科学,43(4):705-718. Cui Y Q, Zhang D G, Wang H, et al, 2019. Preliminary analysis of atmospheric physical quantity characteristics during haze weather in Jinan area in 2015[J]. Chin J Atmos Sci, 43(4):705-718(in Chinese).
- 黄润恒,邹寿祥,1987. 两波段微波辐射计遥感云大气的可降水和液态水[J]. 大气科学,11(4):397-403. Huang R H, Zou S X, 1987. Remote sensing of total water vapor and liquid content of cloudy atmosphere by two-wavelength microwave radiometry[J]. Sci Atmos Sin, 11(4):397-403(in Chinese).
- 江芳,魏重,雷恒池,等,2004. 机载微波辐射计测云中液态水含量(II):反演方法[J]. 高原气象,23(1):33-39. Jiang F, Wei C, Lei H C, et al, 2004. Measurement of column cloud liquid water content by airborne upward-looking microwave radiometer (II): retrieval method[J]. Plateau Meteor, 23(1):33-39(in Chinese).
- 金德镇,雷恒池,谷淑芳,等,2004. 机载微波辐射计测云中液态含水量[J]. 气象学报,62(6):868-874. Jin D Z, Lei H C, Gu S F, et al, 2004. Measurement of column cloud liquid water content by airborne upward-looking microwave radiometer[J]. Acta Meteor Sin, 62(6):868-874(in Chinese).
- 雷恒池,金德镇,魏重,等,2003. 机载对空微波辐射计及云液态水含量的测量[J]. 科学通报,48(Z1):44-48. Lei H C, Jin D Z, Wei C, et al, 2003. Airborne upward-looking microwave radiometer and measurement of column cloud liquid water content[J]. Chin Sci Bull, 48(Z1):44-48(in Chinese).
- 李金辉,周毓奎,岳治国,等,2022. 基于微波辐射计数据的秦岭南北水汽和云底高度等参量的差异[J]. 气象,48(4):452-458. Li J H, Zhou Y Q, Yue Z G, et al, 2022. Water vapor and cloud base height difference between the north and south of Qinling Mountains based on microwave radiometer measurements[J]. Meteor Mon, 48(4):452-458(in Chinese).
- 梁谷,雷恒池,李燕,等,2007. 机载微波辐射计云中含水量的探测[J]. 高原气象,26(5):1105-1111. Liang G, Lei H C, Li Y, et al, 2007. A column cloud liquid water content measured by airborne upward-looking microwave radiometer[J]. Plateau Meteor, 26(5):1105-1111(in Chinese).
- 刘亚亚,毛节泰,刘钧,等,2010. 地基微波辐射计遥感大气廓线的BP神经网络反演方法研究[J]. 高原气象,29(6):1514-1523. Liu Y Y, Mao J T, Liu J, et al, 2010. Research of BP neural network for microwave radiometer remote sensing retrieval of temperature, relative humidity, cloud liquid water profiles[J]. Plateau

- Meteor, 29(6):1514-1523(in Chinese).
- 盛裴轩,毛节泰,李建国,等,2003. 大气物理学[M]. 北京:北京大学出版社:18-19. Sheng P X, Mao J T, Li J G, et al, 2003. Atmospheric Physics[M]. Beijing: Peking University Press: 18-19 (in Chinese).
- 王婉,雷恒池,郭晓军,等,2018a. GVR 机载微波辐射计反演算法适用性分析[J]. 气象科技, 46(3):485-489. Wang W, Lei H C, Guo X J, et al, 2018a. Applicability analysis of retrieval algorithm for GVR airborne microwave radiometer[J]. Meteor Sci Technol, 46(3):485-489(in Chinese).
- 王婉,雷恒池,王兆宇,等,2018b. 机载微波辐射计亮温数据中 RFI 识别方法研究[J]. 高原气象, 37(4):1033-1041. Wang W, Lei H C, Wang Z Y, et al, 2018b. Method study on identification of radio-frequency interference signal from airborne microwave radiometer[J]. Plateau Meteor, 37(4):1033-1041(in Chinese).
- 王婉,雷恒池,聂皓浩,等,2021. 基于机载微波辐射计探测大气水汽通道饱和问题研究[J]. 气象学报, 79(3):509-520. Wang W, Lei H C, Nie H H, et al, 2021. A study on channel saturation of atmospheric water vapor detection based on airborne microwave radiometer[J]. Acta Meteor Sin, 79(3):509-520(in Chinese).
- 王旭,牛海斌,杨桂玲,2016. 基于神经网络的水汽/液水含量反演方法研究[J]. 现代电子技术, 39(14):9-11. Wang X, Niu H B, Yang G L, 2016. Water vapor/liquid content inversion method based on neural network[J]. Mod Electron Tech, 39(14):9-11 (in Chinese).
- 辛悦,毕力格,包山虎,等,2023. 基于 CloudSat-CALIPSO 数据的大兴安岭地区云宏观物理量的垂直结构特征分析[J]. 气象, 49(4):427-438. Xin Y, Bilige, Bao S H, et al, 2023. Vertical structure characteristics of cloud macro and micro physical quantities in the Greater Khingan Mountains based on CloudSat-CALIPSO satellite data[J]. Meteor Mon, 49(4):427-438(in Chinese).
- 许皓琳,郑佳锋,姜涛,等,2020. 乌鲁木齐和成都两地机场雷暴降水水汽条件的分析研究[J]. 气象, 46(11):1440-1449. Xu H L, Zheng J F, Jiang T, et al, 2020. Analysis of water vapor variation and transformation during the two airport thunderstorms in Urumqi and Chengdu[J]. Meteor Mon, 46(11):1440-1449 (in Chinese).
- 周珩,雷恒池,陈洪滨,等,2010. 层析法微波辐射计遥感反演云液水含量的二维垂直分布[J]. 大气科学, 34(5):1011-1025. Zhou J, Lei H C, Chen H B, et al, 2010. Retrieval of cloud liquid water content distribution at vertical section for microwave radiometer using 2D tomography[J]. Chin J Atmos Sci, 34(5):1011-1025 (in Chinese).
- 周珩,雷恒池,魏重,等,2008. 机载微波辐射计反演云液水含量的云物理方法[J]. 大气科学, 32(5):1071-1082. Zhou J, Lei H C, Wei Z, et al, 2008. Retrieval method of path-integrated cloud liquid water content for airborne upward-looking microwave radiometer using a cloud model[J]. Chin J Atmos Sci, 32(5):1071-1082(in Chinese).
- 周秀骥,1982. 大气微波辐射及遥感原理[M]. 北京:科学出版社:55-61. Zhou X J, 1982. Atmospheric Microwave Radiation and Remote Sensing Principle[M]. Beijing: Science Press: 55-61 (in Chinese).
- Cadeddu M P, Liljegren J C, Pazmany A L, 2007. Measurements and retrievals from a new 183-GHz water-vapor radiometer in the Arctic[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 45(7):2207-2215.
- Decker M T, Westwater E R, Guiraud F O, 1978. Experimental evaluation of ground-based microwave radiometric sensing of atmospheric temperature and water vapor profiles[J]. J Appl Meteor, 17(12):1788-1795.
- Drake J F, Warner J, 1988. A theoretical study of the accuracy of tomographic retrieval of cloud liquid with an airborne radiometer[J]. J Atmos Oceanic Technol, 5(6):844-857.
- Liebe H J, Hufford G A, Manabe T, 1991. A model for the complex permittivity of water at frequencies below 1 THz[J]. Int J Infrared Millimet Waves, 12(7):659-675.
- Mattioli V, Basili P, Bonafoni S, et al, 2009. Analysis and improvements of cloud models for propagation studies[J]. Radio Sci, 44(2):RS2005.
- Pazmany A L, 2006. An operational G-band (183 GHz) water vapor radiometer[C] // 2006 IEEE MicroRad. San Juan: IEEE: 256-258.
- Pazmany A L, 2007. A compact 183-GHz radiometer for water vapor and liquid water sensing[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 45(7):2202-2206.
- Salonen E, Uppala S, 1991. New prediction method of cloud attenuation[J]. Electron Lett, 27(12):1106-1108.
- Somerville R C J, Remer L A, 1985. Cloud optical thickness feedbacks in the CO₂ climate problem[J]. J Geophys Res: Atmos, 89(D6):9668-9672.
- Stephens G L, Greenwald T J, 1991. The Earth's radiation budget and its relation to atmospheric hydrology: 2. Observations of cloud effects[J]. J Geophys Res: Atmos, 96(D8):15325-15340.
- Turner D D, Vogelmann A M, Austin R T, et al, 2007. Thin liquid water clouds: their importance and our challenge[J]. Bull Amer Meteor Soc, 88(2):177-190.
- Ulaby F T, Moore R K, Fung A K, 1981. Microwave Remote Sensing [M]. Reading: Addison-Wesley Publishing: 273-283.
- Wang J R, Racette P, Spinhirne J D, et al, 1998. Observations of cirrus clouds with airborne MIR, CLS, and MAS during SUCCESS [J]. Geophys Res Lett, 25(8):1145-1148.
- Warner J, Drake J F, 1988. Field tests of an airborne remote sensing technique for measuring the distribution of liquid water in convective cloud[J]. J Atmos Oceanic Technol, 5(6):833-843.
- Zuidema P, Leon D, Pazmany A, et al, 2012. Aircraft millimeter-wave passive sensing of cloud liquid water and water vapor during VOCALS-REx[J]. Atmos Chem Phys, 12(1):355-369.