

GVR 机载微波辐射计反演算法适用性分析

王婉¹ 雷恒池² 郭晓军¹ 王兆宇¹ 陈超¹ 王彦¹ 吴彬贵³

(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; 3 天津市气象科学研究所, 天津 300074)

摘要 为研究 GVR(G-band water Vapor Radiometer)机载微波辐射计自带反演算法在天津地区的适用性,将 2016 年北京探空资料分成春夏秋冬,对垂直累积液态水和垂直累积水汽的反演精度进行数值模拟检验。结果表明:垂直累积液态水反演精度随高度变化不明显,春夏秋冬 4 个季节反演结果相对偏差值范围分别为 29%~78%、31%~71%、36%~67%、35%~79%,绝对偏差值范围分别为 0.04~0.492 mm、0.075~0.294 mm、0.074~0.315 mm、0.116~0.347 mm;垂直累积水汽反演精度随高度降低(3000 m 以上降低更为明显),春、夏、秋、冬 4 个季节相对偏差 3000 m 以下时分别为 2.6%~20.8%、7.9%~19.1%、4.3%~16.5%、3.4%~14.2%,3000 m 以上时分别为 6.4%~89.7%、12.5%~36.9%、13.2%~50%、11.8%~301%。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垂直累积液态水和垂直累积水汽反演精度明显偏低。

关键词 机载微波辐射计 GVR;反演;垂直累积水汽;液态水

中图分类号: P407.7 **DOI:** 10.19517/j.1671-6345.20170384 **文献标识码:** A

引言

过冷水含量和冰晶浓度是冷云人工增雨潜力条件的两个重要判别参数^[1]。了解云中的过冷水含量是人工影响天气科学作业的前提。探测过冷水对人工影响天气科学作业至关重要,但目前探测手段并不多。

机载微波辐射计可以通过改变飞行位置来探测云中液态水或过冷水分布,是探测人影作业潜力区——过冷水区的有效手段。利用机载微波辐射计探测大气水汽和云中液态水开始于 20 世纪 80 年代,但时至今日相关研究工作仍然较少。J. Warner 和 J. F. Drake^[2](1988)研制了 9.5 mm 波长双向天线机载微波辐射计,它利用前后成固定角度的两天线交互接收来自两个不同方向的目标云系信号,获取云系辐射亮温,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^[3]。A. L. Pazmany(美国 pro-

sensing 公司,2007)在地基微波辐射计^[4]基础上研制了机载微波辐射计(G-band water Vapor Radiometer,简称 GVR),其中心频率为 183.31 GHz,通过接收垂直于其上方的宇宙天体和大气向下发射的辐射信号,获取辐射亮温,在反演算法上,Pazmany 和 Zuidema^[5](2012)曾分别采用神经网络算法和通道亮温物理反演算法计算大气柱中垂直累积水汽和垂直累积液态水含量。2000 年初,雷恒池^[6]等人在我国首次研制成功单波段单天线对空机载微波辐射计,其工作频率在 31.65 GHz(波长 9.5 mm);江芳等^[7](2004)针对该辐射计获得的辐射亮温数据采用统计方法进行反演,获取垂直累积液态水;周珩等^[8](2008)在上述统计方法基础上,对云液水廓线产生方法进行改进,不再利用探空廓线相对湿度得到简单分层的云液水结构,而是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。

在上述所有机载微波辐射计中,只有由美国

<http://www.qxkj.net.cn> 气象科技

天津市气象局科研课题(201707ybxm07)、国家自然科学基金课题(41675046)和(41675018)资助

作者简介:王婉,女,1981 年生,硕士,研究方向为云降水物理和人工影响天气,Email:vvan1981@126.com

收稿日期:2017 年 6 月 29 日;定稿日期:2017 年 11 月 24 日

prosensing 公司生产研制的机载 GVR 工作频率在 183 GHz, 该频段更适于探测较低含量的水汽和液态水值, 在飞机探测中更具优势, 但这对微波元器件的要求更高, 目前国内尚无法生产该类型辐射计。为更好地探测云中过冷水区, 提高人影作业科学性, 天津市人影办于 2016 年采购一台由美国 Prosensing 公司生产的机载微波辐射计 GVR。本文将对该机载微波辐射计自带反演算法进行介绍, 并针对其反演算法在天津地区的适用性展开研究。

GVR(G-band Water Vapor Radiometer) 是一种用来测量垂直累积水汽和垂直累积液态水的双边 4 通道机载微波辐射计, 中心频率是 183.31 GHz, 4 个通道分别为中心频率 ± 1 , ± 3 , ± 7 , 和 ± 14 GHz^[4]。可通过 4 个通道测量的天空亮温值利用其自带反演算法计算得到飞行高度以上的大气可降水量(PWV: Precipitable Water Vapor)和液态水路径(LWP: Liquid Water Path)。

1 机载微波辐射计垂直累积水汽和液态水反演

由机载微波辐射计探测得到的多通道亮温数据来反演计算垂直累积水汽和垂直累积液态水含量可分为两个部分, 即前向微波辐射传输模型和数学反演方法。

1.1 微波辐射传输方程

地对空微波辐射计接收的辐射分为两部分, 一部分来自宇宙天体通过大气层并且受到能量衰减之后的微波辐射, 一部分来自某高度上大气向下发射的通过在该高度以下的大气部分并且受到能量衰减之后到达辐射计的微波辐射, 这部分辐射包括大气分子和云中液态水两部分^[9]。GVR 在飞机飞行高度进行观测, 接收来自其上方的微波辐射, 观测方式为扫频法, 其微波辐射传输方程可采用如下形式:

$$T_B(z_0, f) = T_0 e^{-\int_{z_0}^{\infty} \alpha(z', f) dz'} + \int_{z_0}^{\infty} \alpha(z, f) T(z) e^{-\int_{z_0}^z \alpha(z', f) dz'} dz \quad (1)$$

式中: T_0 表示宇宙背景亮温(单位: K), 一般取常数 2.7 K, z_0 表示飞机飞行高度(单位: m), f 表示辐射计工作频率(单位: GHz), α 表示大气分子和云中液态水吸收系数(单位: $K \cdot m^{-1}$), 一般为氧气、水汽和云中液态水吸收系数之和(吸收系数公式^[10]略)。根据上述公式由探空资料可计算得到飞行高度处的

微波辐射计接收到的辐射亮温。

1.2 数学反演方法

数学反演方法一般分为物理方法和统计方法两种。物理方法是利用观测到的通道亮温数据通过式(1)中辐射传输方程求解反演参量(垂直累积水汽、垂直累积液态水)。统计方法是利用历史探空数据计算反演参量值和通道亮温值, 建立两者之间的统计关系, 由辐射计测量的亮温数据来计算反演参量。与物理方法相比, 统计方法具有不受辐射传输过程及实际环境干扰限制、计算效率高等优点, 目前, 在大气反演算法中被广泛应用。常用的统计方法有统计回归法、Bayesian 最大概率估计算法、神经网络算法等。

利用历史探空资料计算垂直累积水汽的方法有多种, 本文将采用如下公式^[11]进行计算:

$$P = \int_{z_0}^{\infty} \rho_{H_2O} dz \quad (2)$$

$$\rho_{H_2O} = \frac{\epsilon e_s D}{R_d T} \quad (3)$$

其中, P 表示垂直累积水汽(单位: g/m^2), ρ_{H_2O} 表示水汽密度(单位: g/m^3), 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 J/(kg·K), T 表示某一高度温度(单位: K)。

由于垂直累积液态水无法由探空资料计算得到, 本文采用由相对湿度作为诊断标准获取云液水廓线的方法^[12], 具体为: 当相对湿度 $< 85\%$ 时, 认为云液水为 0, 当相对湿度介于 $85\% \sim 95\%$ 之间时, 云液水取值满足线性关系, 当相对湿度 $> 95\%$ 时, 云液水取值 $0.5 g/m^3$ 。

2 GVR 自带反演算法及在天津地区适用性分析

GVR 自带反演算法采用的是 BP 神经网络算法, 训练数据来自美国中纬度冬季和北极地区的探空资料, 是基于地基微波辐射计发展的反演算法。将该算法应用在天津地区存在两个问题, 一是气候背景条件差别较大的训练数据获取的反演方程在天津是否适用; 二是地基微波辐射计基础上发展的反演算法应用在机载探测中的是否合理。为验证这两个问题, 下面将利用探空资料进行 GVR 自带算法反演精度的数值模拟检验。

2.1 数据及分类

由于天津无探空站, 本文采用北京探空站

(54511)2016年探空资料进行反演精度的数值模拟检验。首先剔除数据量缺失资料后,将全年探空资料按照季节划分为:春季3—5月,夏季6—8月,秋季9—11月,冬季12月至次年2月。

为验证不同高度上反演结果精度,将每个时次探空资料的最低高度(模拟飞机飞行高度)取不同数值,具体做法为:在200~6000 m高度范围内每间隔100 m作为一层,以该层作为最低高度,选取该层以上的探空数据与构建的相应云液水廓线作为一个云天大气样本(检验样本)。

2.2 模拟检验方法

根据式(1)计算每个检验样本的4个通道(183.31±1,±3,±7,±14 GHz)亮温值作为模拟观测值。将4个模拟亮温值及每个样本最低高度上对应的大气温度值作为输入参数,利用GVR自带算法做反演,求得每个样本的垂直累积水汽(记作 P_R)和垂直累积液态水(记作 L_R),即反演值。分别根据式(2)、(3)和(4),利用探空资料计算每个样本的垂直累积水汽(记作 P_Z)和垂直累积液态水(记作 L_Z),作为真值。

假定某一季节同一最低高度(模拟飞机飞行高度)的检验样本数是 n ,则每个垂直累积水汽和垂直累积液态水反演值分别记为: $P_{Ri}, L_{Ri}, i=1, 2, \dots, n$,每个垂直累积水汽和垂直累积液态水真值分别记为: $P_{Zi}, L_{Zi}, i=1, 2, \dots, n$,令 E 表示反演值与真值的统计均方根绝对偏差, S 表示反演值与真值的统计均方根相对偏差,则垂直累积水汽和垂直累积液态水的统计均方根绝对偏差及统计均方根相对偏差分别为:

$$E_P = \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_{Zi} - P_{Ri})^2 / n} \quad (4)$$

$$E_L = \sqrt{\sum_{i=1}^n (L_{Zi} - L_{Ri})^2 / n} \quad (5)$$

$$S_P = E_P / (\sum_{i=1}^n P_{Zi} / n) \quad (6)$$

$$S_L = E_L / (\sum_{i=1}^n L_{Zi} / n) \quad (7)$$

2.3 模拟检验结果

根据上述方法计算每个季节不同飞行高度垂直累积水汽和垂直累积液态水的统计均方根绝对偏差及统计均方根相对偏差,得到反演误差随高度的分布,结果见图1。图1分别表示春、夏、秋、冬4个季节

检验结果,每幅图左侧表示垂直累积液态水,右侧表示垂直累积水汽,浅色曲线表示统计均方根相对偏差随高度变化,深色曲线表示统计均方根绝对偏差随高度变化。从图中可以看出:垂直累积液态水反演结果相对偏差和绝对偏差在4个不同季节中随高度变化基本表现出较为一致的趋势,即随高度略微增大,春、夏、秋、冬相对偏差值范围分别为29%~78%、31%~71%、36%~67%、35%~79%,绝对偏差值范围分别为0.04~0.492 mm、0.075~0.294 mm、0.074~0.315 mm、0.116~0.347 mm。江芳等^[7]曾对我国31.65 GHz的机载微波辐射计进行云中液态水含量反演计算并对反演结果做精度分析,结果(图略)表明,其相对偏差在地面和6 km高度处分别为15%~25%、5%~10%,绝对偏差在地面和6 km高度处分别为0.03~0.09 mm、0.01~0.025 mm。与此结果相比,GVR对天津地区液态水的反演精度明显偏差。而同样利用GVR在北极地区进行地基观测,Cadedd等得到的垂直累积液态水反演结果绝对偏差仅为0.006 mm。由此可见,GVR自带反演算法对天津地区液态水反演效果较差。垂直累积水汽的反演精度普遍高于垂直累积液态水,相对偏差在所有季节中都有随高度增大的趋势,3000 m以上时增大更为明显,绝对偏差则随高度减小,相对偏差和绝对偏差随高度的不同变化趋势应该是由垂直累积水汽含量随高度减小造成的。为方便比较,这里只把相对偏差作为反演精度的标准。图中显示,春、夏、秋、冬4个季节相对偏差范围在3000 m以下时分别为2.6%~20.8%、7.9%~19.1%、4.3%~16.5%、3.4%~14.2%,3000 m以上时分别为6.4%~89.7%、12.5%~36.9%、13.2%~50%、11.8%~301%,高空的反演精度明显偏差。而利用GVR在北极地区进行地基观测,Cadeddu等得到的垂直累积水汽反演结果相对偏差小于5%,天津地区的低空反演结果达到此精度的比率分别为10.3%、0%、3.4%和6.9%,而高空的反演精度与之相比差距更大。因此,尽管GVR自带反演算法对垂直累积水汽的反演结果好于液态水,但其精度与其它地区的观测相比仍差距较大,尤其对于高空垂直累积水汽的反演,其效果更差。

上述分析表明,GVR自带反演算法在天津地区适用性较差,有必要针对天津机载微波辐射计观测垂直累积水汽和垂直累积液态水反演算法做进一步研究。

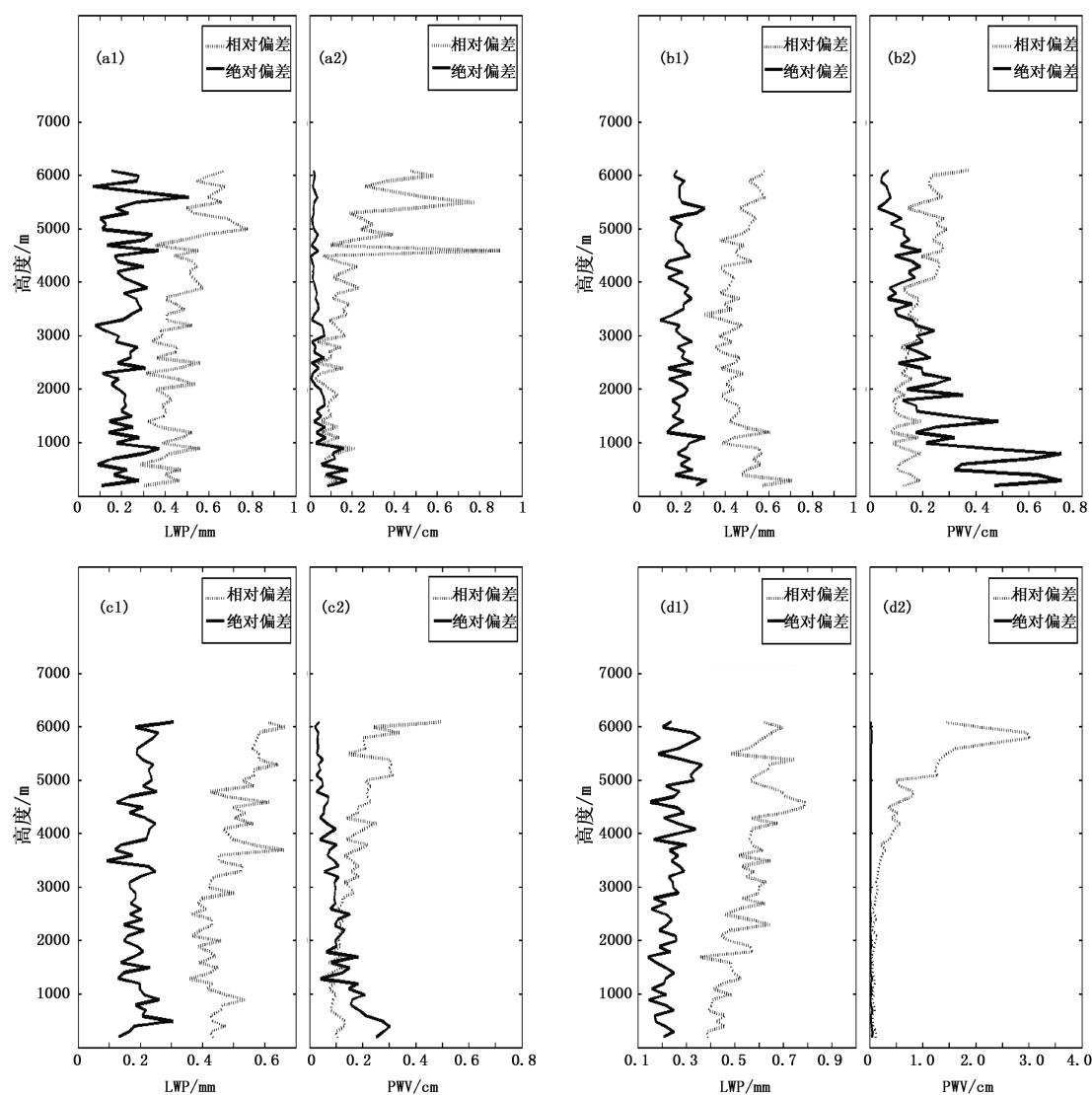


图1 GVR 自带反演算法在天津地区不同季节的液态水路径(LWP)和大气可降水量(PWV)反演误差随高度分布:(a1,a2)春季,(b1,b2)夏季,(c1,c2)秋季,(d1,d2)冬季

3 结论

(1) 本文采用北京站探空资料对 GVR 机载微波辐射计自带反演算法计算天津地区的垂直累积液态水和垂直累积水汽反演精度进行数值模拟分析, 结果表明: ①垂直累积液态水反演精度随高度变化不明显, 有略微增加趋势。春、夏、秋、冬 4 个季节相对偏差值范围分别为 29%~78%、31%~71%、36%~67%、35%~79%, 绝对偏差值范围分别为 0.04~0.492 mm、0.075~0.294 mm、0.074~0.315 mm、0.116~0.347 mm。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, 天津地区的垂直累积液态水反演精度明显较差。②垂直累积水汽反演精度随高度降低, 3000 m 以上时降低更为明显, 春、夏、秋、冬 4 个季节相对偏差范围在 3000 m 以下时分别为 2.6%~20.8%、7.9%~19.1%、4.3%~16.5%、3.4%~14.2%, 3000 m 以上时分别为 6.4%~89.7%、12.5%~36.9%、13.2%~50%、11.8%~301%, 与 GVR 在北极地区地基观测反演精度(<5%)相比, 天津地区 4 个季节的低空反演结果达到类似精度的比率分别为 10.3%、0%、3.4%和 6.9%, 高空的反演精度与之相比差距更大。

(2) 鉴于 GVR 自带反演算法对天津地区垂直

累积液态水和垂直累积水汽反演精度较差,有必要发展一套适用于天津地区的机载微波辐射计反演算法,我们将在后续工作中做进一步研究。

参考文献

- [1] 李大山,章澄昌,许焕斌. 人工影响天气现状与展望[M]. 北京:气象出版社,2002:92.
- [2] Warner J, Drake J F. Field tests of an airborne remote sensing technique for measuring the distribution of liquid water in convective cloud [J]. J Atmos Oceanic Tech, 1998, 5: 833-843.
- [3] Drake J, Warner J. A Theoretical study of the accuracy of tomographic retrieval of cloud liquid with An airborne radiometer [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic technology, 1998, 5: 844-857.
- [4] Pazmany A L. A compact 183-GHz radiometer for water vapor and liquid water sensing [J]. IEEE Trans Geosci. Remote Sens, 2007, 45(7): 2202-2206.
- [5] Zuidema P, D Leon, Pazmany A, et al. Aircraft millimeter-wave passive sensing of cloud liquid water and water vapor during VOCALS-Rex [J]. Atmos Chem Phys, 2012, 12: 355-369.
- [6] 雷恒池,魏重,沈志来,等. 机载微波辐射计测云液水含量 I:仪器和标定[J]. 高原气象, 2003, 22(6):55 1-55.
- [7] 江芳,魏重,雷恒池,等. 机载微波辐射计测云液水含量 II:反演方法[J]. 高原气象, 2004, 23(2):33-39.
- [8] 周珺,雷恒池,魏重,等. 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, 2008, 32 (5):1071-1082.
- [9] 张瑞生. 大气微波遥感[M]. 济南:山东科学技术出版社,1989:167-169.
- [10] Ulaby F T, Moore R K, Fung A K. Microwave Remote Sensing [M]. Addison-Wesley Publishing, 1981:273-283.
- [11] 盛裴轩,毛节泰,李建国,等. 大气物理学[M]. 北京:北京大学出版社,2006:21-22.
- [12] 顾震潮. 云雾降水物理基础[M]. 北京:科学出版社,1980:1-34.

Applicability Analysis of Retrieval Algorithm for GVR Airborne Microwave Radiometer

Wang Wan¹ Lei Hengchi² Guo Xiaojun¹ Wang Zhaoyu¹
Chen Chao¹ Wang Yan¹ Wu Binggui³

(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;
3 Tianjin Institute of Meteorological Science, Tianjin 300074)

Abstract: The retrieval accuracy of G-band Vapor Radiometer (GVR) in Tianjin is examined through numerical simulation by using Beijing radiosonde data, which are divided into four seasons, in order to study the applicability of GVR with its own retrieval algorithm in Tianjin. The results show that the accumulated liquid water retrieval precision has no significant change with height. The relative deviation ranges of the accumulated liquid water in four seasons are 29% to 78%, 31% to 71%, 36% to 67%, 35% to 79% while the absolute deviation ranges are 0.04 to 0.492 mm, 0.075 to 0.294 mm, 0.074 to 0.315 mm, 0.116 to 0.347 mm, respectively. The accumulated water vapor retrieval precision decreases significantly in all the seasons, especially under the height of 3 km. The relative deviation range below 3 km of the accumulated water vapor in four seasons are 2.6% to 20.8%, 7.9% to 19.1%, 4.3% to 16.5%, 3.4% to 14.2%, while above 3 km are 6.4% to 89.7%, 12.5% to 36.9%, 13.2% to 50%, 11.8% to 301%. Compared with the other types of airborne microwave radiometers and ground GVRs used in the Arctic, the retrieval precision of the accumulated liquid water and water vapor in Tianjin is lower obviously.

Keywords: airborne microwave radiometer; GVR (G-band Vapor Radiometer); retrieval