

文章编号: 2096-1618(2021)02-0129-09

Ka/Ku 双波段毫米波雷达功率谱数据 反演液态水含量方法研究

邹琳^{1,2}, 刘黎平¹

(1. 成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225; 2. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081)

摘要:单波段雷达用 Z-LWC 关系反演液态水因不同降水类型反演的液态水含量相差较大。利用双波段雷达回波强度偏差反演液态水含量, 直接将双波段雷达基数据回波强度相减的差值不仅包括了衰减的偏差也包括散射不同带来的偏差。因此, 利用双波段雷达功率谱数据经过小粒子选择计算受 Mie 散射影响小的粒子, 用最小二乘法计算 DWR (dual wavelength ratio) 的变化率, 反演液态水含量和液态水积分总量, 将双波段雷达基数据和功率谱数据反演结果与微波辐射计的作对比, 结果表明: (1) 经过小粒子选择, 去掉了双波段雷达的回波强度因散射不同带来的偏差。(2) 在高度较低时双波段雷达基数据和功率谱数据经过小粒子选择反演的液态水含量有着较大区别。随着高度的增加, 反演的液态水含量比较接近。(3) 双波段雷达基数据和功率谱数据反演的液态水含量与微波辐射计进行定性分析, 变化趋势能够达到较为一致, 微波辐射计液态水含量较强的区域, 两者反演的液态水含量也相应较大。(4) 双波段雷达基数据和功率谱数据反演的液态水积分总量和微波辐射计的液态水积分总量随着时间的变化趋势较为一致, 但双波段雷达功率谱数据总体程度小于基数据反演的液态水积分, 双波段雷达基数据与功率谱数据反演的液态水积分总量总体小于微波辐射计的液态水积分总量值。

关键词:双波段云雷达; 液态水含量; 回波强度偏差; 小粒子; 最小二乘法; 微波辐射计

中图分类号: TN959.4

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2021.02.001

0 引言

云的辐射传输和水循环作用在气候的变化中扮演着重要的角色, 液态水含量 (LWC) 是重要的云微物理参数, 对气候变化、天气变化、人工影响天气和飞机安全等很多方面有着重要的影响。利用单波段雷达对 LWC 的反演, 采用 Z-LWC 的经验关系反演出液态水含量。但对于不同的云类, Z-LWC 反演出的液态水含量会相差很大^[1-5]。且因受到雨区衰减、湍流对多普勒功率谱的影响、雷达灵敏度的影响等, 利用单波段云雷达观测的回波强度、径向速度和速度谱宽以及多普勒功率谱数据, 准确地探测和反演云微物理特性仍有困难。双波段技术是云降水探测的一个重要技术, 由于双波段雷达联合了雷达两个频率通道的返回信号, 能够更准确地提供降水粒子滴谱参数及降水率的估测。在国外, 早期的双波段雷达研究主要是利用衰减偏差进行液态水含量的反演, 常用的波段为 X/Ka 波段双波段雷达。NOAA (national oceanic and atmospheric administration) 的 ETL (environmental technology laboratory) 发展的地基双波段雷达工作波长为 X 和 Ka 波

段, 应用于 1991 年美国科罗拉多东北部进行的 WISP (winter icing and storms project) 试验项目, 采用差分衰减的方法反演了水云的液水含量和云滴中值半径, 但忽略了大粒子对于散射偏差的影响^[6]。1991 年 6 月, 在 CaPE (convection and precipitation electrification experiment) 试验中, 美国国家航空航天局的喷气式飞机 T-39 上也搭载了日本通信实验室发展的工作波长为 X 波段和 Ka 波段的双波段雷达, 对层云降水进行了有组织的飞行观测试验, 采用后向反演算法 (BRM) 反演出层云降水的雨滴谱及垂直廓线^[7-8]。另外比较常用的是 Ka 波段和 W 波段双波段雷达。在假设大气中的粒子与雷达的波长相比足够小的情况下, 水滴的散射偏差就很小, 进行液态水含量的反演, 并讨论了影响液态水含量反演精度的误差因素^[9]。2004 年 4 月在英国奇尔波顿, 以及 1996 年在美国奥克拉荷马的 ARM (atmospheric radiation measurement) 观测点, 采用 Ka/W 双波段雷达进行观测, 粒子应该足够小以满足在两个频段在瑞利散射区域内, 采用差分衰减的方法反演了云的液水含量, 并与微波辐射计的液态水路径比较, 能够达到基本一致^[10]。其次一种典型的双波段雷达工作的波段为 Ka 和 Ku 波段雷达, 也主要是通过两个波段衰减系数差来反演云降水微物理参数。主要利用

GPM 上的双波段降水雷达,发展了基于 GPM 的双波段降水雷达的差分衰减(DA)修订方法来反演降水粒子的滴谱分布,通过雨滴谱的分布,即可得到液态水含量^[11]。利用三种波段的雷达(S、Ka、W)采用两两波长讨论了双波长雷达差分衰减法反演降水云中液态水和冰含量。由差分衰减反演液态水含量方法前提是:粒子足够小并且满足瑞利散射的条件下,此方法才有效,并且得出在非瑞利散射体的情况下,用双波长法反演暖云和混合云中的液态水含量具有偏差^[12]。另外,2004年12月-2005年1月在美国加勒比海的 RICO (rain in cumulus over the ocean) 试验中,采用 NCAR (national center for atmospheric research) 发展的 S/Ka 波段地基双波段雷达观测数据,反演了液水含量、粒子中值半径及其垂直廓线^[13]。

国内利用云雷达和微波辐射计反演混合云液态水含量,采用经验关系反演液态水含量,并引入微波辐射计 LWP 数据,减小了由于 Z-LWC 关系的实际变化带来的偏差^[14]。黄兴友等^[15]采用 35 GHz 的 Ka 波段毫米波云雷达 IQ 数据,进行云微物理参数的反演,并且与云雷达和微波辐射计的联合反演方法做比较。郑晨雨等^[16]利用双波段云雷达观测模式和灵敏度等参数,在 Gamma 滴谱假设条件下,模拟分析 Ka、Ku 波段功率谱以及其比值与云降水参数温度、和湍流的关系,并讨论了双波段雷达探测微降水动力和微物理参数的优势。以上双波段雷达反演液态水含量基本是利用衰减偏差进行反演,且假设了粒子足够小,以满足瑞利散射的条件,忽略了由于散射不同而带来的偏差。目前在内地基的双波段雷达反演液态水含量的研究较少。

随着中国经济的发展,以及国家加大对科技的投入,现在国内已经开始发展双波段雷达,如航天科工集团第 23 所和青海大学已经联合研制了 Ku 和 Ka 波段的双波段雷达,并于 2016 年底进行了测试验收。中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室在 Ka 波段云雷达基础上,将其升级为 Ka/Ku 双波段云雷达,以提高该雷达探测降水云的能力,提高反演云降水微物理和动力参数的能力。垂直观测的双波长雷达研制和应用还刚刚开始,并且利用双波段雷达反演液态水含量的工作做得很少,双波段雷达功率谱数据的应用还有很多空白之处。

基于以上原因,提出一种利用双波段雷达功率谱数据去掉因散射不同而带来的回波强度偏差反演液态水含量的方法。利用中国气象科学研究院 Ka/Ku 垂直观测双波段毫米波雷达,结合微波辐射计,在广东龙门进行降水观测,研究双波长多普勒功率谱数据的处理方法,发展基于双波长多普勒功率谱的液态水含量反演方法,并利用微波辐射计进行反演效果的检验。

1 Ka/Ku 双波段雷达反演液态水含量方法

双波段雷达反演液态水含量主要的反演方法是利用两个波段的回波强度衰减偏差与液态水含量之间的关系进行反演。然而用双波段雷达的基数据得到的回波强度的偏差不仅来自因衰减带来的偏差,也来自因散射不同而带来的偏差,因此,仅仅使用双波段雷达基数据已经不能满足要求了。双波段毫米波雷达得到的主要数据包括功率谱密度和基数据回波强度、雷达径向观测速度、速度谱宽、退极化比 4 个数据。雷达实际上探测得到的基数据是由更加原始的雷达功率谱数据得到的。雷达功率谱数据是雷达探测体积内全部粒子后向散射截面关于速度的函数,是雷达探测的原始数据,相对于雷达的基数据雷达,雷达的功率谱数据量巨大,所有数据=径向数(500)×距离库数(500)×脉冲数(256)。Ka/Ku 双波段雷达功率谱数据文件都包含了 500 个径向,每一个径向有 500 个距离库,每一个距离库有 256 个谱点,代表着 256 个不同速度的脉冲电对应的回波功率的变化。相对于功率谱数据而言,雷达基数据所包含的信息是不完全的,而雷达功率谱数据包括了很丰富的信息,所以利用好功率谱密度数据对于云微物理的研究有着很大的重要意义。

利用功率谱数据得到的反演液态水含量 DWR 为

$$DWR = dBZ_{Ku} - dBZ_{Ka} \quad (1)$$

$$K_{Ka} - K_{Ku} = 4.72 \times LWC \quad (2)$$

其中,DWR 为回波强度衰减偏差,单位为 dBZ; K_{Ka} 、 K_{Ku} 分别为 Ka、Ku 波段的衰减系数,单位为 dB/km; LWC 为液态水含量,单位为 g/m^3 。DWR 与衰减系数的关系为

$$\frac{DWR(r_2) - DWR(r_1)}{r_2 - r_1} = 2 \times (K_{Ka} - K_{Ku}) \quad (3)$$

其中, r_2 、 r_1 分别代表两个距离库的距离,单位:m。结合式(1)、(2)、(3),可以得出双波段雷达回波强度差与液态水含量的关系。DWR 是因为两个波段回波强度的差是双程衰减造成的,所以与衰减系数是 2 倍的关系。式(3)左端代表的是变化率,在计算变化率时,选择的跨度是 300 m ($r_2 - r_1 = 300$ m),即 10 个距离库。文中选择最小二乘法来计算变化率。最小二乘法是一种数学优化技术,它通过最小化的误差的平方和寻找数据的最佳函数匹配,利用最小二乘法可以简便地求得未知的数据,并使这些求得的数据与实际数据之间误差的平方和为最小。即使观测值与估计值的误差的平方和达到最小值来求回归系数 b_0 和 b 。

$$y_i = b_0 + bx \quad (4)$$

其中, b_0 为回归常数, b 为回归系数。主要通过最小二乘法求得 b 的值。 b 的表达式为

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (5)$$

文中, x_i 为 Ka/Ku 双波段毫米波雷达距离库所代表的距离值, y_i 为 Ka/Ku 双波段毫米波雷达的回波强度偏差 DWR 的值, 通过式(5), 得到 Ka/Ku 双波段毫米波雷达每一个距离库的 DWR 值的变化率, 通过变化率与液态水含量的关系, 反演得到液态水含量。因双波段雷达的波束宽度不一致, 计算得到的变化率可能会产生负值。对产生的负值, 当作 0 处理。由双波段雷达探测得到的功率谱数据在使用之前, 需要对双波段功率谱数据质量控制, 文献[17-18]详细讨论了多普勒功率谱的数据处理方法。

2 Ka/Ku 双波段毫米波雷达设备功率谱数据的处理方法

2.1 双波段毫米波雷达设备与数据

中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室在

表1 Ka/Ku 双波段毫米波雷达主要技术指标

指标名称	指标规格
雷达体制	双波段、全固态、单发双收线极化、脉冲多普勒
工作频率	Ka 波段: 33.44 GHz Ku 波段: 13.6 GHz
探测方式	垂直观测 (THI)
探测要素	双波段回波强度、径向速度、速度谱宽、线性退极化比、多普勒功率谱数据
探测能力	Ka 波段: 在 5 km 高度上优于 -30 dBZ Ku 波段: 在 5 km 高度上优于 -25 dBZ
探测范围	高度: 120 m ~ 15 km 回波强度: -45 ~ +30 dBZ 径向速度: -15 ~ 15 m/s 速度谱宽: ≤ 4 m/s 线性退极化比: -30 ~ -5 dB
探测精度 (RMS)	高度: ≤ 距离分辨率 回波强度: ≤ 0.5 dBZ 径向速度: ≤ 0.5 m/s 速度谱宽: ≤ 0.5 m/s 线性极化比 LDR: ≤ 0.2 dB 两频段回波强度一致性: ≤ 1.0 dBZ
探测分辨率	高度: 30 m 回波强度: ≤ 0.01 dBZ 径向速度: ≤ 0.1 m/s 速度谱宽: ≤ 0.1 m/s 线性退极化比 LDR: ≤ 0.01 dB

表2 微波辐射计主要技术指标

指标名称	指标规格
探测方式	垂直天顶观测、北斜 20° 观测、南斜 20° 观测、南北平均观测
探测要素	地面温度、地面相对湿度、地面大气压强、水汽积分总量、液水积分总量、云底高度
探测分辨率	垂直分辨率: 0 ~ 500 m 50 m; 500 m ~ 2 km 100 m; 2 ~ 10 km 250 m 时间分辨率: 2.5 min

表3 降水模式下 Ka/Ku 主要参数指标

指标名称	Ka	Ku
速度分辨率	0.145 m/s	0.359 m/s
脉冲重复周期	120 μs	120 μs
相干积累数	1	1
波束宽度	0.3°	0.9°

广东龙门进行了华南前汛期降水联合探测实验, 主要的探测仪器包括 Ka/Ku 双波段毫米波云雷达, 微波辐射计等。Ka/Ku 双波段云雷达雷达是在已经开展了多年外场试验的 Ka 波段云雷达基础上, 由航天科工集团第 23 所进行升级改造完成, 并在广东龙门云降水观测基地进行观测试验。该雷达采用固定式结构, Ka/Ku 双波段、全固态、单发双收线极化、全相参脉冲多普勒体制。利用云和降水对电磁波的散射作用, 对作用范围内云、雨的空间位置与分布、回波强度、径向速度、速度谱宽和线性退极化比等进行定量探测, 获取目标的形状、相态和空间取向等特征, 具有高灵敏度、高空间分辨率、高可靠性等特点。微波辐射计是利用被动的接收各个高度传来的温度辐射的微波信号来判断温度、湿度曲线, 能定量测量目标(如地物和大气各成分)的低电平微波辐射的高灵敏度接收装置, 能够获得空气各层液态水含量等参数。选用 2019 年 5 月 18 日于广东龙门 Ka/Ku 双波段毫米波雷达功率谱数据、基数据以及微波辐射计数据进行研究。Ka/Ku 双波段雷达有 4 个观测模式, 文中, 主要采用 Ka/Ku 双波段毫米波雷达主要使用降水模式的数据。Ka/Ku 双波段毫米波雷达以及微波辐射计的主要参数如表 1 ~ 3 所示。

2.2 双波段毫米波雷达功率谱数据处理

2.2.1 功率谱数据的去噪处理

雷达噪声电平是指功率谱中所有雷达噪声的平均

功率,雷达功率谱数据去噪十分重要,它将直接影响后续功率谱数据小粒子选择的有效谱点的起始点。目前,主要的噪声电平计算方法包括:分段噪声电平算法、最大速度噪声电平算法、客观噪声电平算法。在这3种噪声电平确定的方法中,分段法的误差较小,误差基本不随信噪比的变化而变化,它的适应性和准确性较好^[17],但用这个方法确定的噪声电平一般偏小^[18],可以对求得的噪声电平做适当的调整。文中,采用的去噪方法是分段法噪声电平算法。分段法的原理是:假设雷达的功率谱的噪声电平服从自由度为 $2N/k$ 的卡方分布,将功率谱分成 k 段,分别统计出 k 段功率谱的平均值,选择最小的平均值作为此点的噪声电平。在确定噪声电平后,将功率谱全段减去噪声电平后,就完成了功率谱数据去噪处理。

2.2.2 功率谱数据的时间和空间平均

为减小由于湍流、波动等情况造成不同高度上弱功率谱分布不均匀造成的影响,需要对功率谱数据进行时间和空间的平均,也就是在功率谱数据的径向和距离库上进行平均。Ka/Ku双波段毫米波雷达探测的时间分辨率为26 s左右,一般选取1~6 min的时间平均,这样可以最大程度上去除空气中中小尺寸运动对功率谱的影响,又不失去功率谱数据本身的围观特性^[19]。对于空间的平均,为减少垂直方向湍流的影响,双波段毫米波雷达的距离分辨率为30 m,因此,选择3 min的时间平均、210 m高度的高度平均。

2.2.3 Ku波段功率谱数据的线性插值处理

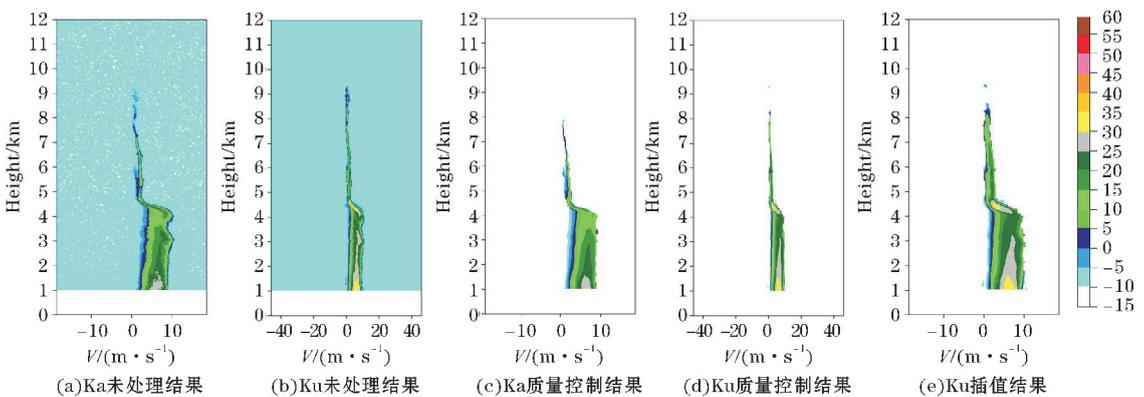


图1 Ka/Ku波段毫米波雷达的不同高度的功率谱密度

对比图1(a)、(b)和(c)、(d),Ka/Ku双波段雷达功率谱数据经过去噪、时间平均、高度平均后,得到了较好的效果。由图1(d)可得到,Ku波段的雷达观测速度范围为: $-45.83 \sim 45.83$ m/s,图(e)Ku波段雷达功率谱数据经过线性插值处理后,得到的雷达可观测的速度范围为: $-18.54 \sim 18.54$ m/s,经过处理之后,使Ku波段的每一个谱点代表的速度值与Ka每一个

为使Ka/Ku双波段毫米波雷达的速度分辨率一致,需要进行功率谱数据的插值处理。Ka/Ku双波段雷达的参数不一致,导致计算得到的最大不模糊速度也不相同,最大不模糊速度的计算公式为

$$V_{\max} = \frac{\lambda \times \text{PRF}}{4 \times N_{\text{con}}} \quad (6)$$

其中, λ 为雷达的波长,PRF为脉冲重复频率, N_{con} 为相干积累数。

计算得到的Ka波段的最大不模糊速度为 $18.54 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,Ku波段的最大不模糊速度为 $45.83 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,Ka/Ku具有相同的谱点数256,因此其速度分辨率不一致,为了后续的小粒子选择能够在Ka/Ku双波段雷达两个都有有效值的起点速度一致,需要进行插值处理。由于Ku的速度分辨率大,所以需进行Ku波段功率谱数据的插值处理,处理后与Ka波段雷达的分辨率一致。处理的办法是线性插值方法。在Ku波段中,选择和Ka的起始速度最接近的点开始插值。线性插值处理的公式为

$$S_{Z(\text{Ku})} = S_{Z(\text{Ku}_0)} + \frac{S_{Z(\text{Ku}_1)} - S_{Z(\text{Ku}_0)}}{V_{\text{Ku}_1} - V_{\text{Ku}_0}} \times (V_{\text{Ku}} - V_{\text{Ku}_0}) \quad (7)$$

其中, $S_{Z(\text{Ku})}$ 、 $S_{Z(\text{Ku}_0)}$ 、 $S_{Z(\text{Ku}_1)}$ 为Ku波段的功率谱数据,单位: $\text{mm}^6 \text{ m}^{-4} \text{ s}$; V_{Ku} 、 V_{Ku_0} 、 V_{Ku_1} 为Ku波段功率谱数据所对应的速度,单位:m/s。

完成Ka/Ku双波段雷达功率谱数据去噪、时间和高度平均、速度线性插值的结果如图1所示。

谱点代表的速度一致。

2.2.4 Ka/Ku双波段雷达功率谱与回波强度谱密度的转换

液态水含量是利用两个波段的回波强度衰减偏差与液态水含量的关系来反演,且不同的雷达由于参数不同,无法直接计算。因此需要转换为回波强度谱密度,回波强度谱密度直接对速度积分,即可得到回波强

度。将双波段雷达功率谱数据转换为回波强度谱密度数据的方法:将双波段雷达观测得到的基数据 dBZ 转换为 Z,并且将双波段雷达观测得到的功率谱数据对速度积分处理,当两个数据都为有效数据时,用对应的转换后的基数据乘以对应的功率谱数据对速度积分的倒数,得到一个常数 C ,最后用雷达观测得到的功率谱数据乘以常数 C ,得到回波强度谱密度数据。对应的 Ka/Ku 双波段毫米波雷达的回波强度谱密度数据如图 2 所示。

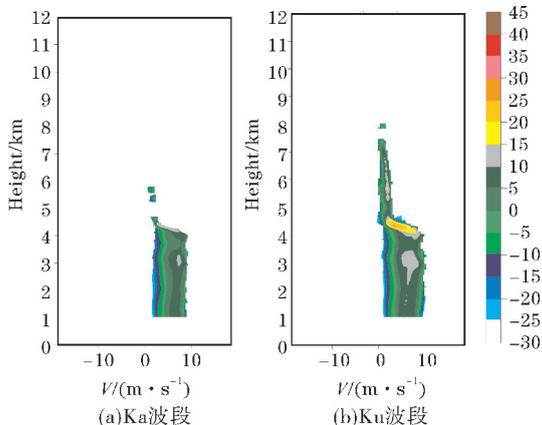


图2 Ka/Ku双波段毫米波雷达不同高度回波强度谱密度数据

双波段雷达功率谱数据是雷达探测体积内全部粒子后向散射截面关于速度的函数,散射分为瑞利散射和米散射。粒子大小不同时,所发生的散射也不同,当 $d \ll \lambda$ 时的小球形粒子的散射,叫作瑞利散射;当 $d \approx \lambda$ 时的大球形粒子的散射,叫作米散射。正因如此,双波段雷达回波强度偏差不仅是衰减造成的,也有来自于散射不同而造成的偏差。所以,需要去除掉因散射不同带来的偏差。本文的处理方法:经过处理的双波段雷达回波强度谱密度数据,从第一个径向第一个高度的第一个谱点开始,当两个波段的回波强度谱密度都为有效值时,作为此点的有效点,以此有效的谱点为一个起始点,选择跨度 28 个的谱点,经过处理后的 Ka/Ku 的回波强度谱密度数据的速度分辨大概为 $0.145 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,所以选择 4 m/s 的速度范围,经过选择后的回波强度谱密度数据对速度积分,得到回波强度数据,将得到的回波强度数据相减,即可得到经过小粒子选择后的回波强度偏差。定义由双波段雷达基数据直接得到的 DWR 为 DWR_1 ,双波段雷达功率谱数据经过小粒子选择计算得到的 DWR 为 DWR_2 。

3 个例分析

液态水含量的反演是利用两个波段的回波强度偏差与液态水含量的关系,现分别使用 Ka/Ku 双波段毫

米波雷达回波强度基数据、Ka/Ku 双波段毫米波雷达多普勒功率谱数据进行液态水含量反演的方法研究,并且与微波辐射计的液态水含量以及液水积分总量作比较。因 Ka/Ku 双波段雷达功率谱数据在近地面 1 km 以下的云降水功率谱会受到影响,导致功率谱数值的异常和谱的展宽,又由图 1(c) 和 (e) 可以得出, Ka/Ku 双波段雷达功率谱数据在 4 km 附近功率谱的宽度就突然变窄,可能有冰晶以及其他混合体的存在,因此选择零度层以下的区域进行液态水含量的反演。反演的高度为 $1.02 \sim 3.75 \text{ km}$ 。对于微波辐射计而言,研究发现,相比于天顶观测,斜路径观测由于天线罩的表面是弧形,即处于倾斜状态,在这种情况下,雨水无法在天线罩上累计,各通道反演得到的产品受水膜污染较小。虽斜路径方式仍然在一定程度上受窗口沾湿的影响,但相对于天顶方向观测而言,斜路径方向反演的液态水密度在特征上更加符合天气特征^[20]。因此,选择北斜 20° 方向观测得到的液态水含量和液态水积分总量进行分析。定义由双波段雷达基数据反演得到的液态水含量为 LWC_1 ,由双波段雷达功率谱数据经过小粒子选择反演得到的液态水含量为 LWC_2 ,微波辐射计反演得到的液态水含量为 LWC_3 。

3.1 Ka/Ku 双波段毫米波雷达基数据及功率谱数据反演液态水含量

利用两个波段的回波强度偏差,进行液态水含量的反演。选择 2019 年 5 月 08 日 12:23-15:51 广东龙门双波段毫米波雷达数据进行液态水含量的反演。选择反演的高度为 $1.02 \sim 3.75 \text{ km}$ 。此个例 Ka/Ku 双波段毫米波雷达基数据的图形如图 3 所示。

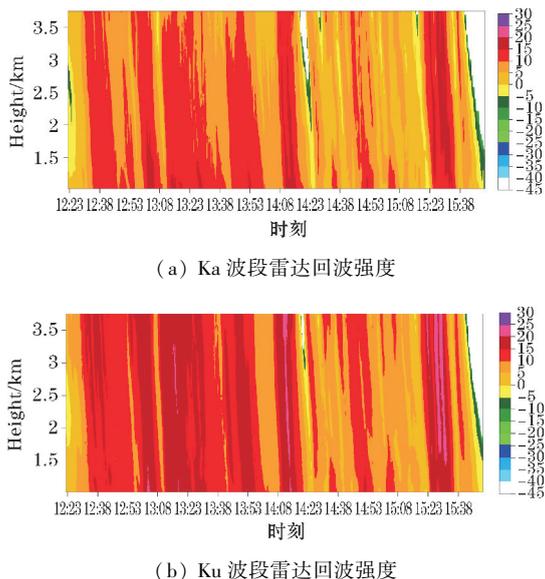


图3 2019年5月8日12:23-15:51在降水模式下观测的回波强度的时间-高度剖面图形

图4中红色的区域大部分集中在 $y=x$ 的下方,说明经过小粒子选择后,大部分的 DWR_2 的值是要比由雷达的基数据的 DWR_1 的值要大,可以得到,双波段雷达功率谱数据经过小粒子选择的 DWR_2 大部分去除了因散射不同而带来的偏差。

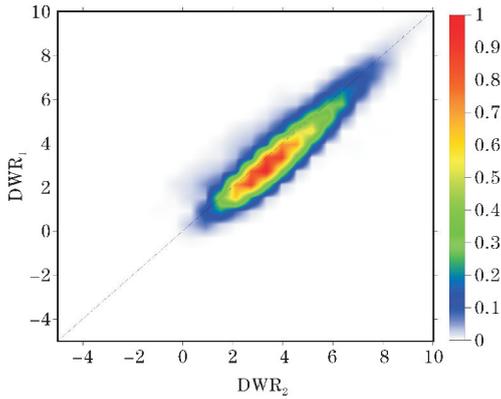


图4 两种不同DWR的比较

图5分别是由双波段雷达基数据和功率谱数据经过小粒子选择的回波强度差、变化率与液态水含量。用最小二乘法计算变化率,在计算的变化率小于0的区域,将变化率当作0处理,因此反演得到的液态水含量也为0。对比图5(c)与(g),由于两个波段的波束宽度不一致,Ku的波束宽度大于ka,在同一条件之下,Ku的波束宽度 0.9° ,Ka的波束宽度为 0.3° ,导致同一时间探测的范围不一致,特别是在一个回波强度比较强的区域和周围回波强度较弱的区域,两个波段探测得到的功率谱数据也会出现差别,也会导致DWR的偏差和反演的液态水含量的偏差。使用双波段基数据和功率谱数据反演的液态水含量,都在探测盲区的附近,出现较大的液态水含量的值,这是由于雷达波束宽度不一致,导致双波段雷达在探测盲区附近数据出现错误,从而导致反演得到的液态水含量出现错误。因此在分析时,可不讨论探测盲区附近的液态水含量值。

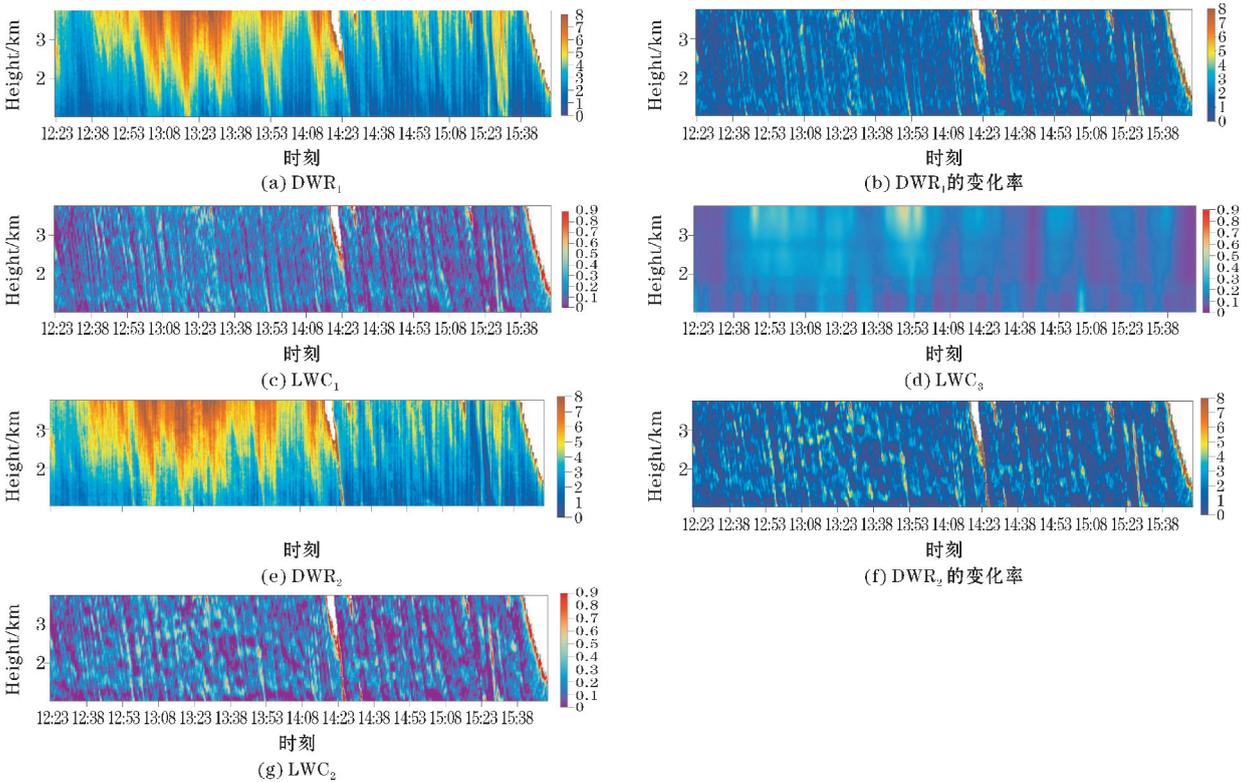


图5 Ka/Ku双波段毫米波雷达基数据、微波辐射计以及功率谱数据反演结果图

与微波辐射计作比较,由于两个设备有着不同的参数,且微波辐射计时间和空间的分辨率很低,且受到观测方向和环境的影响,反演出的液态水含量也会有很多的误差,无法将两个设备反演出的液态水含量进行定量地分析。因此,从反演出的液态水含量进行定性分析。分析两个设备反演出的液态水变化情况能够达到基本的一致,当微波辐射计中出现了较大的液态水含量时,双波段雷达反演得到的液态水含量也相应

较大。在忽略掉探测盲区附近的条件下,在微波辐射计中出现较大的液态水含量时,对应时刻双波段反演出的液态水含量也相应较大。

为检验是否因为大粒子的存在,影响了双波段雷达基数据与功率谱数据反演液态水含量出现不同,需要计算得到降水粒子直径。雷达观测得到的速度等于静止空气粒子下落速度与空气垂直运动速度之和。采用小粒子示踪法计算得到空气垂直运动速度。功率谱

最左端的第一个有效谱点所代表的雷达观测速度即为空气垂直运动速度。空气垂直速度的计算公式为

$$V_s = -(\text{Num} - \text{plusenum}/2) \times V_{\max} \times 2 \times \text{plusenum} \quad (8)$$

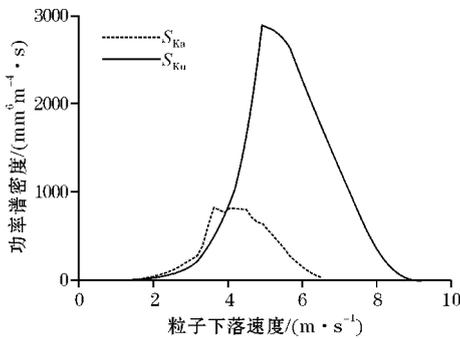
其中,确定功率谱最左端第一个有效点对应的谱点脉冲数 Num; plusenum 为每一条功率谱对应的谱点总数,使用的雷达功率谱的谱点总数为 256; v_{\max} 为雷达最大不模糊速度,在降水模式中,最大不模糊速度为 -18.54 m/s 。

计算得到空气垂直速度后,降水粒子直径和静止空气粒子下落;降水粒子直径与静止空气粒子下落速度的关系为:

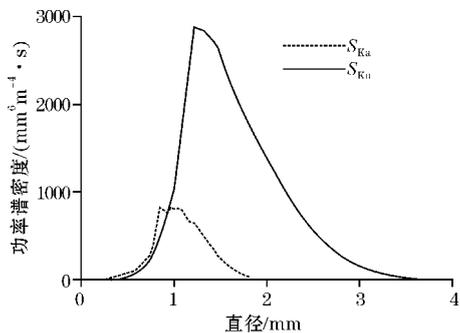
$$D = 0.25 \times v \times \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{0.5} \quad (v \leq 0.25 \text{ m/s})$$

$$D = -1.667 \ln \left(\frac{9.65 - v \times \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)}{10.3} \right) \quad (v > 0.25 \text{ m/s}) \quad (9)$$

式中, v 静止空气粒子下落速度; ρ_0 为地面的空气密度; ρ 为探测高度所代表的空气密度; ρ 与 ρ_0 的比值由高度和地面温度、大气温度垂直递减率等决定。研究的高度为 $1.02 \sim 3.75 \text{ km}$, 在高度较低的情况下,可以简单当作只与高度相关的函数。计算得到 13:29 时刻 1.2 km 处粒子下落速度、粒子直径与功率谱的变化如图 6 所示。



(a) 粒子下落速度与功率谱密度的变化



(b) 粒子直径与功率谱密度的变化

图6 Ka/Ku双波段毫米波雷达13:29时

1.2 km高度上观测的功率谱密度数据

达的波长 λ 为 22 mm , 当粒子直径远远小于波长时,发生瑞利散射(通常上界是波长的 $1/10$)。当粒子直径约等于波长时,发生米散射。根据图 6 可以得到, Ka 波段最大的可探测的粒子直径是 2 mm 左右。Ku 波段最大的可探测的粒子直径是 4 mm 。当进行小粒子选择 28 个谱点后,对应的粒子直径大约是 0.95 mm 左右。相对于对全部功率谱数据进行对速度的积分,得到回波强度的偏差,消除了由于大粒子产生米散射而带来的偏差。由此验证了双波段雷达基数据反演得到的液态水含量与由双波段雷达功率谱数据经过小粒子选择后反演得到的液态水含量的差异主要是来自回波强度偏差的差异。

3.2 Ka/Ku双波段毫米波雷达反演积分液态水含量

一个时刻的积分液态水含量是一个时刻的液态水含量对所有高度积分的结果,微波辐射计统计得到的积分液态水含量的高度为 $0 \sim 10 \text{ km}$, 而使用 Ka/Ku 双波段毫米波雷达基数据和功率谱数据反演得到的液态水含量反演的高度是 $1.02 \sim 3.75 \text{ km}$, 定义由双波段雷达基数据反演得到的积分液态水总量为 LWP1, 双波段雷达功率谱数据经过小粒子选择反演得到的积分液态水总量为 LWP2, 微波辐射计反演得到的积分液态水总量为 LWP3。

从图 7 中可得出, LWP1、LWP2、LWP3 的变化趋势能够达到基本一致, 但 LWP3 数值总体上较大, 这是由于 LWP3 的反演的高度是 $0 \sim 10 \text{ km}$, LWP1、LWP2 的反演高度是 $1.02 \sim 3.75 \text{ km}$ 。且在零度层以上, 有很多不确定的因素影响。这与使用双波段雷达反演液态水含量的高度选择有关。在 14:23–14:38, LWP2 有大于 LWP1 的时刻, 这是由于有探测盲区的存在, 探测盲区附近会出现液态水含量的异常值。

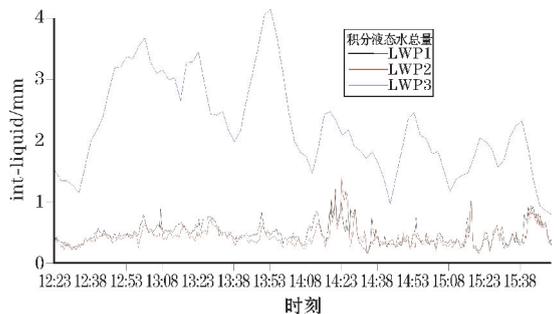


图7 积分液态水总量数据

4 结论

利用中国气象科学研究院于广东龙门升级的 Ka/Ku 双波段雷达功率谱数据进行液态水含量的反

已知 Ka 波段雷达的波长 λ 为 8.9 mm , Ku 波段雷

演,选取2019年5月8日12:23-15:51个例进行分析。并且对微波辐射计的液态水含量以及积分总量数据进行比较与分析,得到以下主要结论:

(1)双波段雷达功率谱数据经过小粒子选择后,去除了因散射不同而带来得回波强度的偏差。

(2)双波段雷达功率谱数据经过小粒子反演得到的液态水含量与基数据反演得到的液态水含量随着高度的增加,液态水含量的值愈加接近。在某一地方液态水含量相差较大的区域,经过研究静止空气下粒子下落速度与粒子直径的关系,有着大粒子的存在,会造成因散射不同带来的偏差。

(3)双波段雷达基数据和功率谱数据经过小粒子选择反演的液态水含量与微波辐射计反演的液态水含量的变化趋势能够基本一致。在微波辐射计的液态水含量出现较大的值时,双波段雷达反演的液态水含量的值也相对较大。

(4)由双波段雷达基数据和功率谱数据反演的液态水积分总含量变化趋势一致,在得到的液态水积分总量上,虽说趋势能够达到一致,但总体上,后者在总体程度上小于前者。

微波辐射计探测时有很多不确定的因素将会影响到反演的液态水含量,时间和空间的分辨率都较低,因此,只能将双波段雷达反演出的液态水含量与微波辐射计反演得到的液态水含量进行定性的分析。另外,利用双波段雷达数据对云微物理特性的反演才刚刚开始,除了在微波辐射计液态水含量较强的区域大部分与之对应之外,在探测盲区附近也出现了较大的液态水含量值,是否是波束宽度造成的数据错误,还需进一步研究以及更多的个例进行验证。

参考文献:

- [1] Atlas D. The estimation of cloud parameters by radar[J]. J Meter, 1954, 11(4): 309-317.
- [2] Sauvageot H, Omar J. Radar reflectivity of cumulus clouds[J]. Atmos Ocean Technol, 1987, 4(2): 264-272.
- [3] Fox N I, Illingworth A J. The retrieval of stratocumulus cloud properties by ground-based cloud radar [J]. Appl Meteor, 1997, 36(5): 485-492.
- [4] Miles N L, Verlinde J, Clothiaux E E. Cloud Droplet Size Distributions in Low-Level Stratiform Clouds [J]. Journal of Atmospheric Sciences, 2000, 57(2): 295-311.
- [5] Krasnov O A, Russchenberg H W J. Retrieval of water cloud microphysical parameters from simultaneous RADAR and LIDAR measurements [J]. International Union of Radio Science, 2002, 20(3): 101-115.
- [6] Vivekanandan J, Zhang G, Politovich M K. An Assessment of Droplet Size and Liquid Water Content Derived from Dual-Wavelength Radar Measurements to the Application of Aircraft Icing Detection [J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2000, 18(11): 1787-1798.
- [7] Meneghini R, Kozu T, Kumagai H, et al. A study of rain estimation methods from space using dual-wavelength radar measurements at near-nadir incidence over ocean [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1992, 9(4): 364-382.
- [8] Mardiana R, Iguchi T, Takahashi N. A dual-frequency rain profiling algorithm without the use of the surface reference technique [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 2004, 42: 2214-2225.
- [9] Williams J K, Vivekanandan J. Sources of Error in Dual-Wavelength Radar Remote Sensing of Cloud Liquid Water Content [J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2007, 24(8): 1317-1336.
- [10] Hogan R J, Gaussiat N, Illingworth A J. Stratocumulus Liquid Water Content from Dual-Wavelength Radar [J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2005, 22(8): 1207-1218.
- [11] Adhikari N B, Iguchi T, Seto S, et al. Rain Retrieval Performance of a Dual-Frequency Precipitation Radar Technique With Differential-Attenuation Constraint [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2007, 45(8): 2612-2618.
- [12] Gaussiat, Nicolas, Sauvageot. Cloud Liquid Water and Ice Content Retrieval by Multiwavelength Radar [J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2003, 20(9): 1264-1275.
- [13] Ellis S M, Vivek_Anandan J. Liquid water content estimates using simultaneous S and Ka band radar measurements [J]. Radio ence, 2011, 46(2).
- [14] 谢晓林, 刘黎平. 云雷达联合微波辐射计反演液态水含量的算法 [A]. 中国气象学会. 第33届中国气象学会年会 S18 雷达探测新技术与应用 [C]. 中国气象学会: 中国气象学会, 2016: 16.
- [15] 黄兴友, 张帅, 李盈盈, 等. 云参数的两种地基雷达反演方法对比研究 [J]. 气象科学, 2019, 39(5): 608-616.

- [16] 郑晨雨,刘黎平. Ka/Ku双波段云雷达探测云降水滴谱和空气垂直运动速度的能力模拟分析[J]. 高原气象,2020,39(3):543-559.
- [17] 马宁堃,刘黎平,郑佳峰. 利用Ka波段毫米波云雷达功率谱反演云降水大气垂直速度和雨滴谱分布研究[J]. 高原气象,2019,38(2):325-339.
- [18] 刘黎平,郑佳峰. 不同波段垂直指向雷达功率谱密度对比[J]. 应用气象学报,2017,28(4):447-457.
- [19] 陈英英,杨凡,徐桂荣,等. 基于雨雪天气背景的微波辐射计斜路径与天顶观测的反演结果对比分析[J]. 暴雨灾害,2015,34(4):85-93.

Study on the Method of Retrieval Liquid Water Content from Ka/Ku Dual-wavelength Millimeterwave Radar Doppler Spectral Data

ZOU Lin^{1,2}, LIU Liping²

(1. College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 601225, China; 2. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081, China)

Abstract: When a single-band radar uses the Z-LWC relationship to retrieve liquid water content, the content of liquid water retrieved by different precipitation types will vary greatly. Using dual-band radar echo intensity deviation to retrieve the liquid water content, the difference obtained by directly subtracting the dual-band radar base data echo intensity includes not only the deviation of attenuation but also the deviation caused by different scattering. Therefore, this paper uses the dual-band radar doppler spectrum data to calculate the particles that are less affected by Mie scattering through small particle selection, calculates the rate of change of DWR (dual wavelength ratio) using the least square method, and retrieves the liquid water content and total liquid water integral, the results of the dual-band radar base data and doppler spectrum data are compared with the microwave radiometer. The results show that: (1) After selecting small particles, the echo intensity of the dual-band radar is removed due to different scattering bias. (2) When the altitude is low, there is a big difference between the liquid water content of the dual-band radar base data and the doppler spectrum data after small particle selection. With the altitude increases, the retrieved liquid water content is closer. (3) The liquid water content retrieved from dual-band radar base data and doppler spectrum data is qualitatively analyzed with the microwave radiometer, and the change trend can be more consistent. In areas where the liquid water content is strong, the liquid water content retrieved by the dual-wavelength is correspondingly larger. (4) The total liquid water integration retrieved by the dual-band radar base data and doppler spectrum data and the total liquid water integration retrieved by the microwave radiometer the change trend of the quantity over time is relatively consistent, but the overall degree of the dual-band radar doppler spectrum data is less than the liquid water integration retrieved from the base data, and the total liquid water integration retrieved from the dual-band radar base data and power spectrum data is generally less than the microwave radiation total liquid water integral value.

Keywords: dual-wavelength cloud radar; liquid water content; echo strength deviation; small particles; least squares method; microwave radiometer