

钟正宇, 马舒庆, 杨玲, 等. 结合风廓线雷达的毫米波衰减特性初步研究. 应用气象学报, 2018, 29(4): 496-504.

DOI: 10.11898/1001-7313.20180410

## 结合风廓线雷达的毫米波衰减特性初步研究

钟正宇<sup>1)2)</sup> 马舒庆<sup>3)\*</sup> 杨玲<sup>1)2)</sup> 黄书荣<sup>4)</sup> 唐英杰<sup>5)</sup>

<sup>1)</sup>(成都信息工程大学, 成都 610225)

<sup>2)</sup>(中国气象局大气探测重点开放实验室, 成都 610225)

<sup>3)</sup>(中国气象局气象探测中心, 北京 100081)

<sup>4)</sup>(中国民用航空西南地区管理局贵州分局, 贵州 550012)

<sup>5)</sup>(中国民用航空西南地区管理局气象中心, 成都 610202)

### 摘 要

使用中国气象局大气探测综合试验基地 35 GHz 毫米波云雷达和 L 波段风廓线雷达 2016 年 5 月 1 日—7 月 31 日在降水条件下的观测数据, 根据不同观测模式下两部雷达得到的数据, 计算在一定高度区间内不同下落速度的降水粒子反射率因子变化量, 初步分析不同下落速度的降水粒子对毫米波衰减的影响。结果表明: 在持续时间较长的层状云降水且降水粒子在雷达观测范围内均匀分布条件下, 毫米波衰减与降水粒子下落速度呈近似线性关系, 且毫米波经过的路径长度越长, 衰减越大; 毫米波在经过 1110~2430 m, 1110~3510 m 的高度区间时, 下落速度处于 3.5~7.5 m·s<sup>-1</sup> 之间的降水粒子对毫米波的衰减作用导致毫米波云雷达所测的等效反射率因子分别减小约 1~7 dB 和 2~11 dB。

**关键词:** 毫米波云雷达; 风廓线雷达; 衰减; 反射率因子; 功率谱

### 引 言

云和降水一直是气象领域的重要研究内容, 近年来快速发展的毫米波云雷达在云的观测上拥有较大优势, 其发射的毫米波段电磁波具备良好的穿透云层能力, 可对云底高度、云顶高度进行有效探测, 还能获取云内参数以及云的垂直结构等信息<sup>[1]</sup>。毫米波云雷达发射的脉冲波束宽度较窄, 相比一般的天气雷达而言, 采样体积较小, 以减少湍流对探测结果的影响<sup>[2]</sup>。毫米波云雷达能较好地对云进行观测, 而且对于较弱的降水也具备一定的探测能力, 不仅可以探测雨区的垂直结构, 还可探测一些雨滴的物理参数, 与常规天气雷达相比, 探测云和弱降水的能力更强<sup>[3]</sup>。另外, 云在当前的气象研究和业务中, 如天气分析和大气相变过程中具有非常重要的意

义<sup>[4]</sup>; 云在大气辐射能量传输的过程中也扮演着重要角色, 影响地球的大气辐射平衡、热量平衡, 利用毫米波云雷达时间分辨率高的特点, 可以连续观测云在大气辐射能量传输过程中的重要参数<sup>[5-7]</sup>。

由于毫米波云雷达采用毫米波段的电磁波作为发射波段, 在具备较好的云观测能力的同时, 受液态降水的影响也很大<sup>[8]</sup>, 尤其是强度较高的降水, 雨滴粒子对毫米波段电磁波的吸收和散射会导致电磁波能量衰减, 尤其是雨滴粒子对电磁波吸收作用, 能量衰减极大影响了雷达的探测能力, 雷达功率谱整体下移<sup>[9]</sup>, 导致其探测结果的准确性不佳。因此, 有必要研究毫米波云雷达的衰减特性, 了解其衰减特点, 对于衰减的订正工作也有一定参考价值。

国内外不少学者进行过毫米波段电磁波的衰减研究, 为订正衰减工作提供了参考依据。1989 年 Lhermitte<sup>[10]</sup> 研究了降水和云对 35 GHz, 94 GHz,

2017-11-30 收到, 2018-04-08 收到再改稿。

资助项目: 国家重大仪器研制项目(31727901)

\* 通信作者, 邮箱: msqaoc@cma.gov.cn

140 GHz, 240 GHz 4种波段电磁波的衰减,并计算了衰减的散射和吸收截面,还研究了降水强度、反射率因子等因素与衰减系数的关系,同时还讨论了不同尺寸的液态水粒子和冰晶粒子对衰减的影响。2004年 Matrosov<sup>[11]</sup>利用垂直指向的Ka波段雷达,研究其受到的来自降雨的衰减作用估计降水强度,该工作得出了其衰减作用和温度、雨滴谱、降水类型有关的结论。2000年 Li等<sup>[12]</sup>使用地基35 GHz毫米波雷达和机载94 GHz毫米波雷达联合研究衰减,通过结合两部雷达的探测结果联立公式计算出无衰减情况下的回波强度。纪雷等<sup>[13]</sup>用多种不同的衰减订正方案订正多种不同类型的云造成的衰减,并相互比较其订正方案的订正效果。2014年吴举秀等<sup>[14]</sup>研究了冰云中不同形状的冰晶粒子对94 GHz毫米波云雷达的后向散射和衰减。

目前毫米波云雷达已成为气象领域的研究热点,随着技术的迅速发展,其探测能力也在不断提高,未来会得到更广泛的部署与应用。本文结合风廓线雷达初步研究毫米波云雷达衰减特性,在中国气象局大气探测综合试验基地使用两种设备在2016年5月1日—7月31日对较稳定降水的观测数据,利用两种不同波长的雷达对降水粒子的观测能力差异,初步研究降水条件下毫米波的衰减特性,以及降水粒子造成的毫米波能量衰减对毫米波云雷达功率谱的影响,便于今后从功率谱的角度对毫米波回波信号进行补偿和订正,以提高毫米波云雷达对降水的观测能力,获取更准确的气象观测数据。

## 1 观测设备和数据

### 1.1 Ka波段毫米波云雷达

观测使用的毫米波云雷达由西安华腾微波有限责任公司和成都信息工程大学联合研制,观测地点为中国气象局大气探测综合试验基地,该毫米波云雷达为Ka波段35 GHz的全相参连续波多普勒天气雷达,天线工作方式为垂直顶空瞄准式,探测高度约15 km,峰值功率10 W,垂直分辨率30 m,时间分辨率可在1~60 s之间调节,实际使用时,时间分辨率设置为60 s。该雷达提供的产品数据包括基本反射率、径向速度、速度谱宽、信噪比、液态水含量、功率谱密度数据,以及I,Q信号数据。

### 1.2 L波段风廓线雷达

观测所采用的风廓线雷达是由中国航天科工集团第2研究院23所制造的CFL-06型风廓线雷达,观测地点同样为中国气象局大气探测综合试验基地。该雷达发射频率约为1360 MHz,拥有5个扫描波束,发射峰值功率为10 kW,探测模式分为高、中、低3种,高模式垂直分辨率240 m,中、低模式垂直分辨率120 m,高、中、低3种模式的脉冲重复频率分别为8330 Hz,12500 Hz,25000 Hz。提供的数据包括实时的采样高度上的产品数据,30 min平均的采样高度上的产品数据,1 h平均的采样高度上的产品数据,以及各个波束的功率谱数据。

两部雷达部署在同一观测场,直线距离约94 m,海拔高度相同,运行过程中,定期接受厂家的定标与测试。

### 1.3 数据获取和整理

采用35 GHz毫米波云雷达和L波段风廓线雷达垂直波束在2016年5月1日—7月31日对降水的观测数据,选取的数据多为较均匀的连续性降水,其中毫米波云雷达采用I,Q信号数据,风廓线雷达采用垂直波束的功率谱数据,选取两部雷达在连续降水条件下同一时间的数据,进行对比分析。风廓线雷达功率谱数据时间分辨率为7 min,毫米波云雷达的I,Q数据需要手动采集,实际采集时,每2~3 min采集1组。为保证数据在观测时间上的一致性,同时又要要有足够的数量,综合考虑后将数据的时间匹配范围划定为120 s,即确保用于对比分析的一组数据的观测时间之差在120 s以内。

本文所采用的风廓线雷达具备3种探测模式,不同的探测模式对应不同的探测高度,低模式为150~3630 m,中模式为1110~4590 m,高模式为3150~10110 m。毫米波云雷达发射的波束脉宽有2  $\mu$ s,5  $\mu$ s,20  $\mu$ s 3种,对应不同的探测高度,分别为360~2460 m,960~5010 m,3060~15270 m。在本文的对比分析中,为确保高度对应,风廓线雷达的低模式数据用于与毫米波云雷达2  $\mu$ s脉宽的探测模式的数据进行对比分析,对应的高度范围为1110~2430 m;风廓线雷达的中模式数据则用于与毫米波云雷达5  $\mu$ s的数据进行对比分析,对应的高度范围为1110~3510 m;由于风廓线雷达高模式覆盖范围较高以及距离分辨率较低,便不再采用。

由于两部雷达部署地点接近,用于对比分析的每一组数据观测时间也很接近,同时所使用的数据主要是在长时间连续降雨条件下获取,所以本文假定两部雷达观测到的降水目标物在雷达观测区域内均匀分布,且在短时间内也不存在较大变化,即不考虑雨滴在下落过程中存在的蒸发、碰并、碎裂作用对滴谱分布造成的影响。

## 2 雷达谱数据处理和反射率因子的计算

毫米波云雷达的 I, Q 数据经处理后可得到功率谱信息,雷达功率谱数据包含的功率信息实际是气象目标信号以及噪声信号的功率总和,所以需要在功率谱上先进行去噪处理才能提取所需信息。功率谱上平均噪声的计算采用一种分段法,具体算法是将功率谱上的 FFT(快速傅里叶变换)点数分为  $k$  段,对每段数据分别算出其平均值,取这些平均值中的最小值作为整个功率谱的平均噪声功率。根据 Petitdidier 等<sup>[15]</sup>的研究分析结果, $k$  取 8 或 16 时效果最好。本文  $k$  取 16。

噪声存在于整个功率谱范围内,在功率谱上对谱峰附近信号除去噪声,则可得到有用的回波信号,在功率谱上雷达的回波功率可表示为信号带宽内所有信号谱线的累加,去除噪声后的回波功率值由式(1)计算:

$$P_r = \sum_{i=1}^I (P_i - P_N) \Delta v. \quad (1)$$

式(1)中, $P_r$  是回波功率, $I$  是功率谱上的 FFT 点数, $P_i$  是第  $i$  点的功率, $P_N$  是按上述方法计算出的平均噪声功率, $\Delta v$  是每两个 FFT 点的速度间隔。在本文中只用到单个 FFT 点功率值,用式(2)表示:

$$P_D = (P_i - P_N) \Delta v. \quad (2)$$

式(2)中, $P_D$  是单个 FFT 点功率值。根据雷达气象方程,可将根据回波功率计算出反射率因子,对于毫米波云雷达而言,降水粒子的散射机制为米散射,所以此处为等效反射率因子。式(3)为瑞利散射条件下适用于云和降水的气象雷达方程<sup>[16]</sup>。

$$P_r = \frac{\pi^3 P_t h G^2 \theta \varphi |M|^2 ZK}{1024 \ln 2 \lambda^2 R^2}. \quad (3)$$

式(3)中, $P_r$  是回波功率,单位为 W; $P_t$  是雷达发射的峰值功率,单位为 W; $h$  是脉冲长度,单位为 m; $G$  是天线增益; $\theta$  和  $\varphi$  是水平、垂直波束宽度,单位为

rad; $|M|^2 = |(m^2 + 1)/(m^2 - 1)|^2$ ,  $m$  是复折射率; $Z$  是反射率因子,对毫米波云雷达而言,此处为等效反射率因子,单位为  $\text{m}^6/\text{m}^3$ ;  $K$  是衰减因子,代表考虑衰减后的回波功率与未考虑衰减的回波功率之比; $\lambda$  是雷达波长,单位为 m; $R$  是目标物距离雷达的距离,单位为 m。为计算  $Z$ ,并将反射率因子的单位化为常用的  $\text{mm}^6/\text{m}^3$ ,并以对数形式表示,由于  $\text{mm}^6/\text{m}^3 = \text{m}^6/\text{m}^3 \times 10^{18}$ ,则得到式(4):

$$Z_{\text{db}} = 10 \lg \frac{1024 \ln 2 \lambda^2 R^2 P_r}{\pi^3 P_t h G^2 \theta \varphi |M|^2} + 180. \quad (4)$$

其中, $Z_{\text{db}}$  代表实际计算出的反射率因子或等效反射率因子,式(4)中未包含衰减因子  $K$ ,因为在实际计算时使用实测功率值  $P_r$ ,计算出的  $Z_{\text{db}}$  受衰减影响并非真实值,对于 Ka 波段毫米波云雷达, $|M|^2 = 0.877$ ;对于 L 波段风廓线雷达, $|M|^2 = 0.928$ 。

有资料显示,S 波段波长为 10 cm 的雷达波,在降水强度为  $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  的情况下,降雨造成的衰减可以忽略<sup>[16]</sup>,对于波长更长的 L 波段风廓线雷达波长为 22 cm,降水造成的衰减更小。而 Ka 波段毫米波云雷达发射的电磁波受降水衰减较大<sup>[17]</sup>,所以可将风廓线雷达的探测结果视为近似无衰减的情况,并在此基础上研究毫米波的衰减。

## 3 不同下落速度的降水粒子和衰减的关系

### 3.1 大气垂直速度的计算

在降水条件下,云雷达功率谱的有用信号来自降水粒子。风廓线雷达具备对降水过程的观测能力<sup>[18-19]</sup>,在降水条件下其回波信号实际包含降水粒子信号和湍流信号<sup>[20]</sup>,降水粒子信号强度比湍流信号强得多<sup>[21]</sup>,此时,雷达所测到的径向速度是垂直方向上大气运动速度和静止大气中降水粒子下落速度之和:

$$V = V_i + V_r. \quad (5)$$

式(5)中, $V$  是雷达所测得的径向速度, $V_i$  是大气垂直速度, $V_r$  是静止大气中降水粒子下落速度,单位均为  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

一般情况下,若规定垂直向下为正方向,大气运动速度通常为  $-2 \sim 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,强对流天气下有时会更大<sup>[22]</sup>,本文选取的数据不存在这种情况,而降水粒子在功率谱上的信号峰值通常大于  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。降雨时,风廓线雷达的功率谱通常表现为双峰谱,但

有时大气垂直运动并不明显,也有可能只表现为单峰谱,降水粒子谱的峰值对应的速度通常较大,两者容易辨别。

对于湍流谱,有研究认为其可以看作正态分布<sup>[23]</sup>,于是可通过寻找湍流谱峰的方法确定大气垂直运动速度,该速度值近似于真实的平均速度,先对风廓线雷达功率谱进行滑动平均处理,避免功率谱上跳动较大的 FFT 点的影响,在功率谱上  $\pm 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  区间和大于  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的区间上分别寻找最大值点,同时对这两点向左右两边进行单调性判断,若在 8 个 FFT 点范围内满足单调递减,则说明功率谱具有双峰谱特征,在此条件下,  $\pm 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  区间内的功率谱峰值对应的速度即为大致的大气垂直运动速度,若只出现单峰谱且处于大于  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的区间上,则认为大气垂直运动不明显,速度值视为零,其余情况便不采用。并同时计算该点的信噪比,保证该点功率值明显大于噪声电平才采用,若信噪比大于设定的阈值,则认为该谱峰信号强度足够明显,将该最大值点对应的速度作为大气垂直运动速度  $V_r$ 。

### 3.2 衰减的表示以及毫米波衰减和粒子下落速度关系

假设在某一高度上,由风廓线雷达测得的反射率因子为  $Z_{w1}$ ,由毫米波云雷达测得的反射率因子为  $Z_{c1}$ ,在更高的某处,由风廓线雷达测得的反射率因子为  $Z_{w2}$ ,毫米波云雷达测得的反射率因子为  $Z_{c2}$ 。由于降水对风廓线雷达所发射的 L 波段电磁波衰减很小,  $Z_{w1}/Z_{w2}$  可代表由气象目标物导致的反射率因子变化,该比值记为  $\Delta Z_w$ ;对于毫米波云雷达而言  $Z_{c1}/Z_{c2}$  则与气象目标物和毫米波衰减有关,该比值记为  $\Delta Z_c$ 。

降雨条件下,功率谱上的每个 FFT 点物理意义为以该点对应速度下落的全部粒子的回波功率,本文只用到单个 FFT 点功率值,先在较低的高度层上剔除垂直速度的影响找出谱峰对应的  $V_r$ ,然后在较高的高度上剔除垂直速度的影响,再直接寻找  $V_r$  对应的功率密度值,这样在本文假设条件下,上下两个高度层  $V_r$  对应的降水粒子是一致的,毫米波雷达在较高层测得的  $V_r$  对应的降水粒子的反射率因子相对低层的减小应由衰减导致,在对雷达功率谱进行滑动平均后通过寻找该点并计算以该点对应速度下落的所有粒子的反射率因子。

由式(4)可得到式(6),除了  $P_r, R$  以外的所有量均为定值(用  $C$  表示),该值和雷达参数有关。

$$Z_{ab} = 10 \lg \frac{1024 \ln 2 \lambda^2}{\pi^3 P_r h G^2 \theta \varphi |K|^2} + 180 + 10 \lg P_r R^2 = C + 10 \lg P_r R^2, \quad (6)$$

$$\Delta Z_w = C + 10 \lg P_1 K_1 R_1^2 - (C + 10 \lg P_2 K_2 R_2^2) = 10 \lg \frac{P_1 K_1 R_1^2}{P_2 K_2 R_2^2}. \quad (7)$$

$\Delta Z_w$  的计算过程进一步化为式(7),将  $P_r$  换成包含衰减项的形式,  $P_1$  和  $P_2$  分别是  $R_1, R_2$  处未考虑衰减的回波功率,  $K_1$  和  $K_2$  分别是  $R_1, R_2$  距离处的衰减因子,若式(7)中  $P_1, P_2$  代表单个粒子的回波功率,则对于一群数量为  $n$  的粒子,功率应为  $nP_1, nP_2$  和  $n$  恰好在比值中约去,所以  $\Delta Z_w$  是一个与粒子数量无关的量。由式(3)可知,对于同样的目标物,若不考虑衰减,其产生的回波功率与距离的平方成反比,本文由于假定在雷达进行观测时,两部雷达上空的降水粒子均匀分布,所以有  $P_1/P_2 = R_2^2/R_1^2$ ,若以衰减系数  $k$  表示,则有  $10 \lg K = 2R \times 10 \lg k$ ,式(7)可化为式(8),

$$\Delta Z_w = 10 \lg \frac{K_1}{K_2} = 20(R_1 - R_2) \lg k. \quad (8)$$

式(8)中,  $k$  是衰减系数,可见  $\Delta Z_w$  和衰减系数以及高度差有关,若电磁波经过的路径上雨滴分布一致,由  $\Delta Z_w$  和电磁波经过的路径  $2(R_1 - R_2)$ ,可得到这段路径的平均衰减系数,式(8)反映了在雨滴分布上下一致的情况下,反射率因子的变化与衰减系数的关系,若  $k$  的单位是 dB/km,对应  $R_1, R_2$  的单位也应是 km。

选取 2016 年 5 月 1 日—7 月 31 日连续降水时段的数据进行分析,计算  $\Delta Z_w$  的同时,由上述方法得出大气垂直运动速度  $V_r$ ,并进一步计算出  $V_r$ ,计算出的每一个  $\Delta Z_w$  均对应一个  $V_r$ ,图 1 是风廓线雷达的  $\Delta Z_w$  与静止大气中降水粒子下落速度  $V_r$  的关系,计算  $\Delta Z_w$  时,在毫米波云雷达  $2 \mu\text{s}$  探测模式,风廓线雷达低模式中,  $Z_{w1}$  和  $Z_{w2}$  高度分别为 1110 m 和 2430 m,在毫米波云雷达  $5 \mu\text{s}$  探测模式,风廓线雷达中模式中,  $Z_{w1}$  和  $Z_{w2}$  的高度分别为 1110 m 和 3510 m,可看到对于风廓线雷达而言,  $\Delta Z_w$  的变化并不明显,则说明在选取的高度区间内,高层和低层的反射率因子较为一致,为避免风廓线雷达降水信号与湍流信号混合,剔除了  $V_r$  小于  $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的数

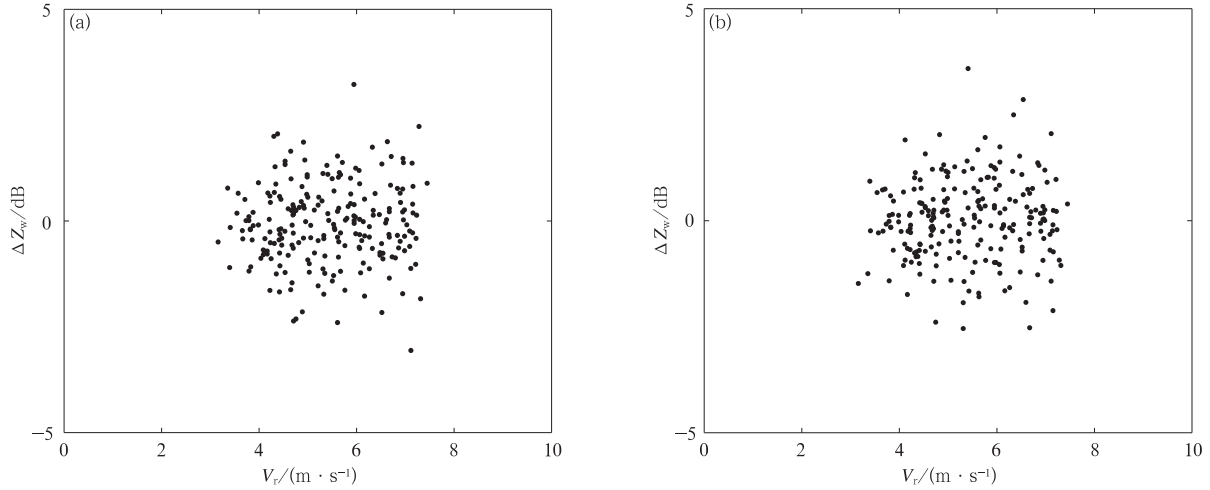


图 1  $\Delta Z_w$  与  $V_r$  的关系

(a)1110~2430 m 高度范围内风廓线雷达低模式,(b)1110~3510 m 高度范围内风廓线雷达中模式

Fig. 1 Relation between  $\Delta Z_w$  and  $V_r$

(a)the low mode of wind profiler at height range of 1110-2430 m,

(b)the medium mode of wind profiler at height range of 1110-3510 m

据,这部分数据其实也是极少的。

在该情况下,用相同方法得到的毫米波云雷达的  $\Delta Z_c$  则能反映毫米波衰减的强弱,由于降水粒子对毫米波的散射作用可看作是米散射,此处的  $\Delta Z_c$  由等效反射率因子得到。图 2 是  $\Delta Z_c$  与  $V_r$  的关系,在采集数据时已确保用于对比分析的同一组数据的观测时间之差在 120 s 以内,此处的  $V_r$  时使用

的由同组数据中风廓线雷达测得的  $V_r$  进行计算。

由图 2 可知,对于下落速度不同的降水粒子,由衰减造成的反射率因子的变化量和与粒子下落速度呈正相关,在统计数据中,共包含 220 多个时刻的对比。对于毫米波云雷达  $2 \mu s$  的探测模式,即在 1110~2430 m 的高度区间内, $V_r$  处于  $3.5 \sim 7.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  之间, $\Delta Z_c$  的值在  $1 \sim 7 \text{ dB}$  之间;对于  $5 \mu s$  脉宽的模

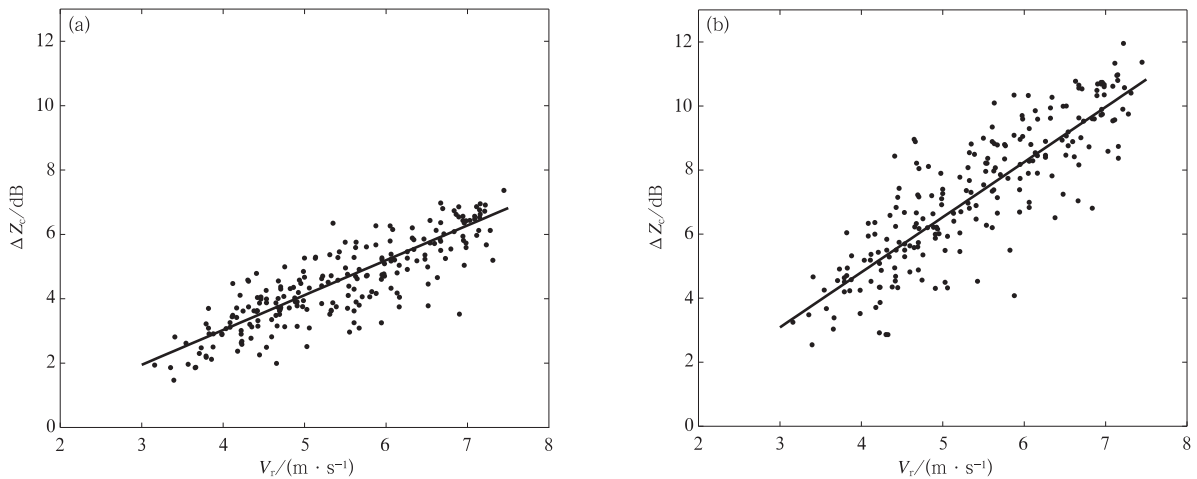


图 2  $\Delta Z_c$  与  $V_r$  的关系

(a)1110~2430 m 高度范围内毫米波云雷达  $2 \mu s$  探测模式,

(b)1110~3510 m 高度范围内毫米波云雷达  $5 \mu s$  探测模式

Fig. 2 Relation between  $\Delta Z_c$  and  $V_r$

(a)  $2 \mu s$  detection mode of the millimeter-wave cloud radar at height range of 1110-2430 m,

(b)  $5 \mu s$  detection mode of the millimeter-wave cloud radar at height range of 1110-3510 m

式,高度区间为 1110~3510 m,当  $V_r$  处于相同的范围内, $\Delta Z_c$  的值在 2~11 dB 之间。 $\Delta Z_c$  的分布较散乱,但也可看到, $\Delta Z_c$  的值随  $V_r$  变化的明显趋势和规律。

对于毫米波云雷达 2  $\mu s$  探测模式,风廓线雷达

低模式的对比,选取高度区间长度为 2430-1110=1320 m(令  $\Delta Z'_c = \Delta Z_c \times 1000/1320$ );对于毫米波云雷达 5  $\mu s$  探测模式,风廓线雷达中模式的对比,选取高度区间长度为 3510-1110=2400 m(令  $\Delta Z'_c = \Delta Z_c \times 1000/2400$ )。 $\Delta Z'_c$  与  $V_r$  关系如图 3 所示。

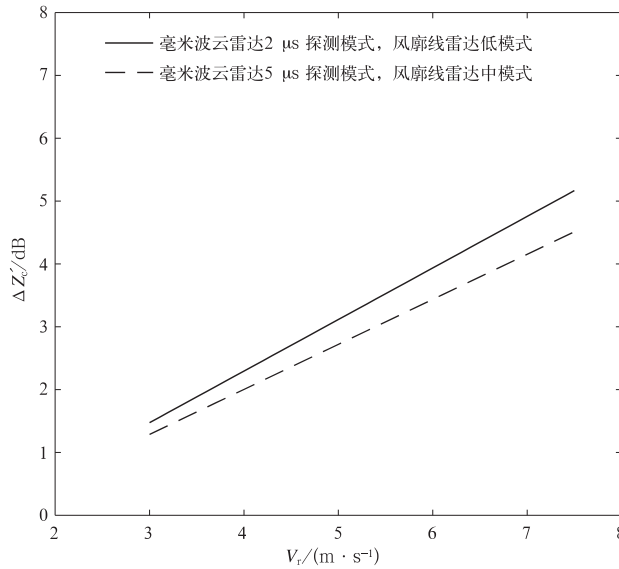


图 3  $\Delta Z'_c$  与  $V_r$  的拟合曲线  
Fig. 3 Relation between  $\Delta Z'_c$  and  $V_r$

由图 3 可以看到,在每 1000 m 的高度范围内,两种模式下  $\Delta Z_c$  分布分别在 1~4.5 dB 和 1~5 dB 左右,得到的  $\Delta Z_c$  与  $V_r$  的拟合曲线也比较一致,说明在这两种模式下进行分析结果差异不大。

#### 4 连续均匀降水的实例分析

2016 年 6 月 20 日和 7 月 19 日存在持续较长时间的连续降雨过程,图 4 是这两日部分时间毫米波

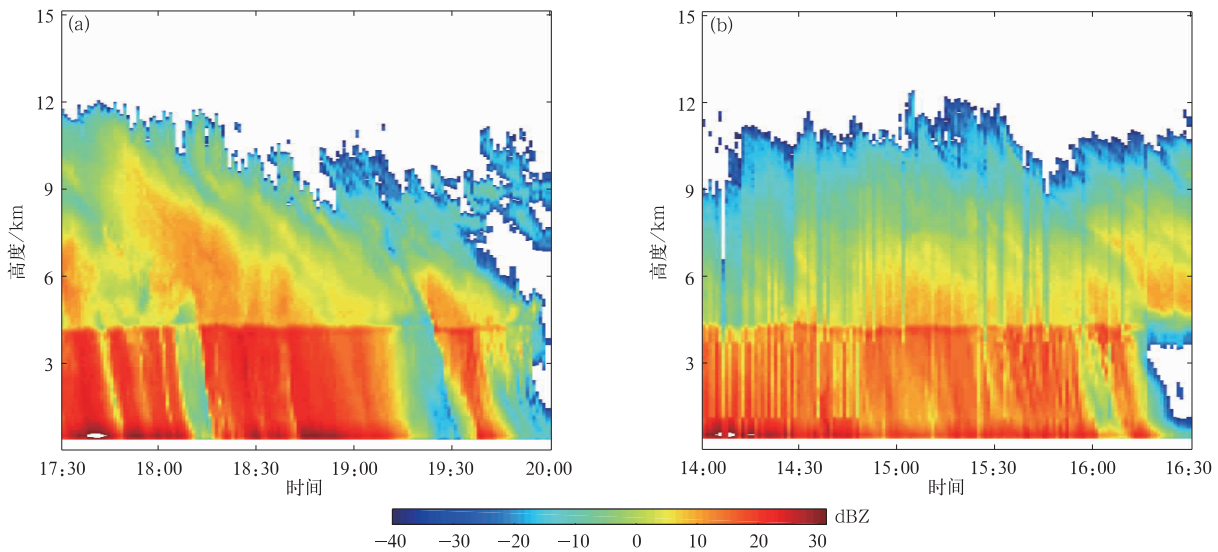


图 4 2016 年 6 月 20 日 17:30—20:00(a)以及 2016 年 7 月 19 日 14:00—16:30(b)毫米波云雷达反射率因子  
Fig. 4 Reflectivity factor observed by millimeter-wave radar from 1730 BT to 2000 BT on 20 Jun 2016(a) and 1400 BT to 1630 BT on 18 Jul 2016(b)

云雷达反射率因子(基数据读取)变化,可反映当时降水情况。可以看到,6月20日18:20—19:00(北京时,下同)及7月19日14:00—16:30降水比较均匀且强度不大,均属于层状云降水,由图4也可看到较明显的零度层亮带。同时,毫米波云雷达发射的电磁波能透过降水区域和云层,电磁波能量未完全衰减。

图5及图6分别是2016年6月20日18:51和7月19日14:21两部雷达不同高度上的功率谱,可看到毫米波云雷达的功率谱强度和谱宽随高度增高

均出现逐渐降低的趋势,这种变化由毫米波受到的衰减作用导致,风廓线雷达在降水粒子部分的功率谱随高度增高则变化不大,同时图中标记的功率谱峰位置变化也不大,说明降水在不同高度的空间一致性较好。这两个时刻两部雷达实际观测时间分别相差64s和56s,功率谱上功率最强点对应的速度均为 $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,湍流谱普遍处于零速度线附近,实际 $V_r$ 的取值也为 $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右, $\Delta Z_c$ 分别为4.1 dB和6.5 dB。

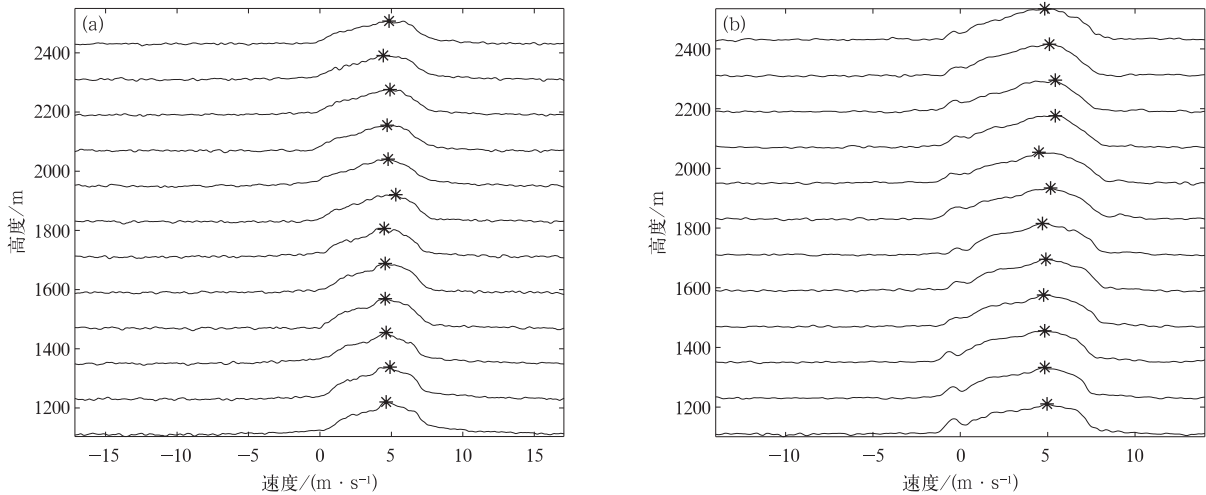


图5 2016年6月20日18:51毫米波云雷达 $2\ \mu\text{s}$ 探测模式的功率谱(a)以及风廓线雷达低模式功率谱(b)

Fig. 5 Power spectrum observed by  $2\ \mu\text{s}$  detection mode of the millimeter-wave radar(a) and the low mode of wind profiler(b) at 1851 BT 20 Jun 2016

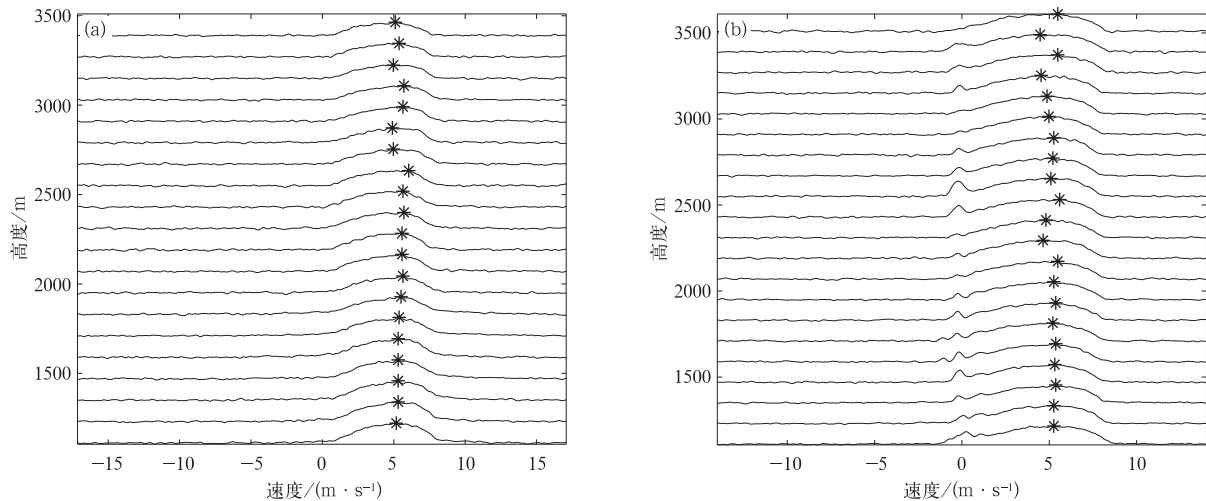


图6 2016年7月19日14:21毫米波云雷达 $5\ \mu\text{s}$ 探测模式的功率谱(a)以及风廓线雷达中模式功率谱(b)

Fig. 6 Power spectrum observed by  $5\ \mu\text{s}$  detection mode of the millimeter-wave radar(a) and the medium mode of wind profiler(b) at 1421 BT 19 Jul 2016



## 5 结论与讨论

本文在2016年5月1日—7月31日持续时间较长,强度较均匀的层状云降水,且毫米波能量未完全衰减,仍能穿透降水云层的情况下,对毫米波云雷达和风廓线雷达的观测数据进行初步统计,得到以下主要结论:

1) 由降水造成的毫米波云雷达电磁波能量衰减非常明显,对处于不同下落速度的降水粒子,由毫米波云雷达电磁波能量衰减造成的反射率因子的变化量不同,且与粒子的下落速度呈近似线性关系,在1110~2430 m,1110~3510 m的高度区间内,当 $V_r$ 处于 $3.5\sim 7.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间时, $\Delta Z_c$ 分别约在1~7 dB,2~11 dB之间。

2) 分别结合风廓线雷达的两种高度模式,毫米波云雷达在两种脉宽模式下 $\Delta Z'_c$ 和 $V_r$ 的关系比较一致,也说明雨滴谱在选取的高度范围内分布比较均匀。

3) 在持续时间较长、强度较均匀的层状云降水条件下,进行风廓线雷达与毫米波云雷达所测得的反射率因子对比更能体现出毫米波的衰减特性,由于同时使用两部不同雷达难以保证对比分析在时间和空间上的完全一致性,较平稳均匀的降雨过程,降水强度较均匀,雨滴谱分布较稳定,由时空差异造成的误差较小。

本研究中可能造成误差的原因包括:①两部雷达观测时间分辨率不同,数据对比存在时间差,虽然时间匹配设定的时间范围较短,但在几分钟的时间内,降水情况也可能会发生较大变化;且两部雷达相距一定的水平距离,这些因素都有可能引起误差的出现。②雷达噪声的确定是较为复杂的问题,功率谱数据处理中噪声的估算采用单一算法,可能会对后续处理产生一定误差。③统计数据多来自连续均匀降水,但实际雨滴在下落过程中存在蒸发、碰并、碎裂作用,会造成滴谱分布出现差异,本文并未考虑这些情况,同时发现在少数情况下相同时刻的不同高度上降水粒子分布有很大差异,这种情况下的计算结果会有误差,由于研究过程建立在较强的假设条件下,还需今后继续做大量工作以完善。

## 参考文献

[1] 樊雅文,黄兴友,李锋.毫米波雷达测云个例研究.大气科学学

报,2013,36(5):554-559.

- [2] 彭亮,陈洪滨,李柏.3 mm多普勒云雷达测量反演云内空气垂直速度的研究.大气科学,2012,36(1):1-10.
- [3] 刘黎平,仲凌志,江源,等.毫米波测云雷达系统及其外场试验结果初步分析.气象科技,2009,37(5):567-571.
- [4] 屈右铭,蔡荣辉,朱立娟,等.云分析系统在台风莫拉非数值模拟中的应用.应用气象学报,2012,23(5):551-561.
- [5] 胡树贞,马舒庆,陶法,等.基于红外实时阈值的全天空云量观测.应用气象学报,2013,24(2):179-188.
- [6] 汪宏七,赵高祥.云微物理特性对云光学和云辐射性质的影响.应用气象学报,1996,7(1):36-44.
- [7] 刘黎平,谢蕾,崔哲虎.毫米波云雷达功率谱密度数据的检验和在弱降水滴谱反演中的应用研究.大气科学,2014,38(2):223-236.
- [8] Wexler R. Radar reflectivity and attenuation of rain. *J Appl Meteor*, 1963, 2(2): 276-280.
- [9] 孙豪,刘黎平,郑佳锋.不同波段垂直指向雷达功率谱密度对比.应用气象学报,2017,28(4):447-457.
- [10] Lhermitte R. Attenuation and scattering of millimeter wavelength radiation by clouds and precipitation. *J Atmos Ocean Technol*, 1990, 7(3): 464-479.
- [11] Matrosov S Y. Attenuation-based estimates of rainfall rates aloft with vertically pointing Ka-band radars. *J Atmos Ocean Technol*, 2005, 22(1): 43-54.
- [12] Li Lihua, Sekelsky S M, Reising S C, et al. Retrieval of atmospheric attenuation using combined ground-based and airborne 95-GHz cloud radar measurements. *J Atmos Ocean Technol*, 2001, 18(8): 1345-1353.
- [13] 纪雷,王振会,黄兴友,等. W波段不同云型衰减订正研究//中国气象学会年会,2011.
- [14] 吴举秀,魏鸣,黄磊,等.对非球形冰晶94GHz云雷达后向散射和衰减的研究.气象科学,2016,36(1):63-70.
- [15] Petitdidier M, Sy A, Garrouste A, et al. Statistical characteristics of the noise power spectral density in UHF and VHF wind profilers. *Radio Science*, 1997, 32(3): 1229-1247.
- [16] 张培昌,杜秉玉,戴铁丕.雷达气象学.北京:气象出版社,2001.
- [17] 仲凌志,刘黎平,葛润生.毫米波测云雷达的特点及其研究现状与展望.地球科学进展,2009,24(4):383-391.
- [18] 何平,朱小燕,阮征,等.风廓线雷达探测降水过程的初步研究.应用气象学报,2009,20(4):465-470.
- [19] 何平,李柏,吴蕾,等.确定风廓线雷达功率谱噪声功率方法.应用气象学报,2013,24(3):297-303.
- [20] 阮征,吴志根.风廓线仪探测降水云体结构方法的研究.应用气象学报,2002,13(3):330-338.
- [21] 葛润生,朱晓燕,姜海燕.提高多普勒天气雷达晴空探测能力的一种方法.应用气象学报,2000,11(3):257-263.
- [22] 王晓蕾,阮征,葛润生,等.风廓线雷达探测降水云中雨滴谱的试验研究.高原气象,2010,29(2):498-505.
- [23] 何越,何平,林晓萌.基于双高斯拟合的风廓线雷达反演雨滴谱.应用气象学报,2014,25(5):570-580.



## Preliminary Study on Millimeter Wave Attenuation Characteristics Combined with Wind Profiler

Zhong Zhengyu<sup>1)2)</sup> Ma Shuqing<sup>3)</sup> Yang Ling<sup>1)2)</sup> Huang Shurong<sup>4)</sup> Tang Yingjie<sup>5)</sup>

<sup>1)</sup> (Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225)

<sup>2)</sup> (CMA Key Laboratory of Atmospheric Sounding, Chengdu 610225)

<sup>3)</sup> (Meteorological Observation Center of CMA, Beijing 100081)

<sup>4)</sup> (Guizhou Sub-bureau of CAAC Southwest Regional Administration, Guizhou 550012)

<sup>5)</sup> (Meteorological Center of CAAC Southwest Regional Administration, Chengdu 610202)

### Abstract

Millimeter wave is easily impacted by the attenuation of precipitation, and the energy of electromagnetic wave emitted by millimeter-wave cloud radar is often absorbed and scattered by the precipitation particles. Electromagnetic wave attenuation makes the radar echo intensity less than the actual echo intensity and affects the detection accuracy. However, wind profiler is invented to detect the turbulence of clear air and it can detect precipitation particles. For the L-band wind profiler with a wavelength of 220 mm, the attenuation caused by rainfall is negligible. Therefore, detection results of wind profiler can be considered as no attenuation. A millimeter-wave cloud radar is installed in Meteorological Observation Center of CMA, and its observations of precipitation are compared with data of an L-band wind profiler from 1 May 2016 to 31 July 2016. The millimeter-wave cloud radar has three kinds of pulse width ( $2\ \mu\text{s}$ ,  $5\ \mu\text{s}$  and  $20\ \mu\text{s}$ ), and the wind profiler has also three detection modes (low, medium, and high). Because the temporal resolution of two radars is different, to make sure that the observation time are consistent and samples of data for analysis is sufficient, the difference of observation time for each group of data is set within 120 s. The data for comparison and analysis comes from  $2\ \mu\text{s}$  and  $5\ \mu\text{s}$  modes of millimeter-wave cloud radar, low and medium mode of wind profiler. Reflectivity factors are calculated using the power spectrum data of wind profiler and I, Q data of millimeter-wave cloud radar. The processing method of power spectrum and calculation method of reflectivity factor are also introduced. The relationship between the attenuation and the falling velocity of precipitation particles is initially analyzed.

Results indicate that the attenuation of millimeter wave caused by precipitation is obvious. If precipitation particles are uniform in the range of radar observation, there is a positive correlation between the attenuation of the millimeter wave radar and the falling velocity of precipitation particles. And the longer distance the millimeter-wave travels, the greater the attenuation is. The variation of reflectivity factor caused by attenuation is about 1–7 dB, 2–11 dB when the falling velocity of precipitation particles is within the range of  $3.5\text{--}7.5\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  at the height range of 1110–2430 m, 1110–3510 m. Results are consistent under different detection mode of the millimeter-wave radar and the wind profiler.

**Key words:** millimeter-wave cloud radar; wind profiler; attenuation; reflectivity factor; power spectrum