

# 地基 35 GHz 测云雷达回波强度的衰减订正研究

黄兴友<sup>1</sup> 樊雅文<sup>2\*</sup> 李峰<sup>3</sup> 肖辉<sup>4</sup> 张曦<sup>1</sup>

(1. 南京信息工程大学,江苏南京 210044;2. 连云港白塔埠机场,江苏连云港 222000;  
3. 中国气象局气象探测中心,北京 100081;4. 中国科学院大气物理研究所,北京 100029)

**摘要:**为了订正大气和云对毫米波雷达信号的衰减,选取了层状云、降水性层状云及对流云个例,进行了衰减订正试验.根据雷达反射率因子 $Z$ 与衰减系数 $k$ 的经验关系,采用分级逐库订正法进行订正.结果表明,对于回波强度比较弱的层状云来说,订正后数据可靠性较高;对于降水回波来说,雨水及传播路径中的丰富水汽都会造成毫米波信号的严重衰减,因此降水云的衰减订正难度大.经过订正后,虽然还存在误差,但对毫米波雷达数据的质量有明显改善.

**关键词:**毫米波云雷达;衰减订正;分级逐库订正法  
**中图分类号:**P413.2+1 **文献标识码:**A

## The attenuation correction for a 35GHz ground-based cloud radar

HUANG Xing-You<sup>1</sup>, FAN Ya-Wen<sup>2\*</sup>, LI Feng<sup>3</sup>, XIAO Hui<sup>4</sup>, ZHANG Xi<sup>1</sup>

(1. Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;  
2. Lian Yungang Airport, Lian Yungang Jiangsu Province 222000, China;  
3. CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081, China;  
4. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract:** To correct the attenuation of radar echo at millimeter-wave band, stratus cloud, precipitating stratus cloud and convective cloud echo data were chosen as sample for the test. Method of bin-by-bin correction in the groups was used according to the empirical relationship between radar reflectivity factor  $Z$  and attenuation coefficient  $k$ . The results show that, in cases of stratus clouds with weak echo, the corrections are minor and these echoes are almost right. On the contrary, in case of rainfall, both water droplets and rich water vapor along the ray path will cause strong attenuation, and it is difficult to carry out the correction. After attenuation correction, the quality of millimeter wavelength radar data is definitely improved though difference is still existed.

**Key words:** millimeter-wave cloud radar; attenuation correction; bin-by-bin correction in groups  
**PACS:** 92.60. Jp, 92.60. Nv, 94.10. Bb

## 引言

云不仅是影响气候的重要因子,也是形成降水的前提,若能细致了解云的微物理特征参量,不仅有助于天气的监测和预报,也有助于全球气候变化的研究,还有助于人工干预天气业务的开展.因此,对云的探测和研究具有重要意义.目前,毫米波雷达是

进行云参数探测的有效工具,严卫等<sup>[1]</sup>联合星载毫米波雷达和激光雷达资料进行云相态识别,Harper<sup>[2]</sup>、Hobbs<sup>[3]</sup>和 Hollars<sup>[4]</sup>根据云雷达数据研究云高,Clothiaux<sup>[5]</sup>研究云参数,Wang<sup>[6]</sup>研究云的分类,Mace<sup>[7]</sup>利用 CloudSat 星载云雷达资料,探讨云分类的算法.

在毫米波频段,Ka波段的35 GHz和W波段的

收稿日期:2012-02-20,修回日期:2012-10-31

Received date: 2012-02-20, revised date: 2012-10-31

基金项目:863项目课题(2007AA061901);机载气象雷达的散射订正与衰减订正研究

Foundation items: National High Technology Research and Development Program of China (2007AA061901), Research on Scattering and Absorption Corrections for Airborne Meteorological Radar

作者简介(Biography):黄兴友(1965-),男,安徽无为,人,教授.主要研究领域为雷达气象学. E-mail: hxyradar@126.com

\* 通讯作者(Corresponding author); E-mail: fanyawen1215@126.com

95 GHz 附近是两个大气窗区,信号的衰减较少,这是目前毫米波雷达主要采用的频率.但当 Ka 波段或 W 波段雷达射线路径上有丰富的水汽或有液水时,就需要对回波信号进行衰减订正,否则,探测的回波偏弱.针对厘米波段雷达信号的衰减订正算法研究比较成熟,但对毫米波雷达信号的衰减订正研究较少,主要原因在于毫米波雷达还不够普及、可用的资料少.本文尝试利用 2010 年 7 月、在广东阳江的遥感试验所获得的 Ka 波段和 X 波段雷达数据,进行毫米波雷达回波强度的订正.试验结果表明,经过衰减订正后,毫米波雷达的资料质量有了明显的改善.

## 1 毫米波测云雷达的衰减订正

### 1.1 毫米波的衰减

大气和降水粒子的衰减,使雷达的回波功率减小,造成回波的失真<sup>[8]</sup>.与波长较长的测雨雷达相比,毫米波雷达信号的衰减更严重,造成毫米波雷达信号衰减的主要因素是大气中水汽和云粒子(特别云内液水).

气体吸收引起的衰减,对波长 2 cm 以上的天气雷达,一般可以忽略;但对波长在 1 cm 以下的毫米波雷达、或当探测距离比较远时,这种衰减必须考虑<sup>[9]</sup>.大气中的氧气含量随时间地点变化很小<sup>[10]</sup>,因此,对于 35 GHz 的 Ka 波段雷达,主要考虑 22.235 GHz 的水汽吸收谱线.

100 GHz 以下频率的水汽吸收系数为:

$$k_{\text{H}_2\text{O}}(f) = 2f^2 \rho_{\text{H}_2\text{O}} \left(\frac{300}{T}\right)^{1.5} \alpha_1 \left[ \frac{300}{T} e^{\frac{644}{T}} \frac{1}{(f^2 - 494.4019)^2 + 4f^2 \alpha_2^2} + 1.2 \times 10^{-6} \right], \quad (1)$$

$$\alpha_1 = 2.85 \left(\frac{P}{1013}\right) \left(\frac{300}{T}\right)^{0.626} \left[ 1 + 0.018 \frac{\rho_{\text{H}_2\text{O}} T}{p} \right], \quad (2)$$

其中,  $\alpha_1$  的单位为 GHz,  $f$  的单位为 GHz,  $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$  是水汽密度( $\text{g}/\text{m}^3$ ),  $p$  是气压(hPa),  $T$  是温度(K). 由于缺少探空资料,因此气压的计算采用干空气的状态方程.

水汽的衰减受到温度和水汽含量的影响,因难以知道雷达探测路径上的温度和水汽情况,按固定温度和气压根据式(1)计算出在标准大气压下地面温度为 30 °C, 频率为 35 GHz 时,水汽衰减系数随高度的变化曲线见图 1. 但是本次外场试验地处广东省阳江市,南面临海,7 月份温度高,且试验期间多次受台风影响,大气中水汽含量相当丰富,因此,需

要考虑水汽的衰减. 当确知大气水汽含量以及温度廓线,则可以对水汽衰减部分做更加准确的订正,获得更好的水汽衰减订正效果.

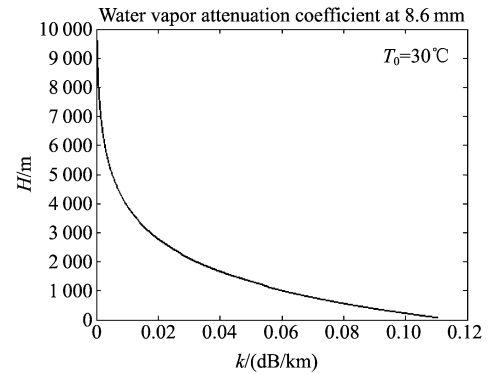


图 1 水汽衰减随高度的变化曲线

Fig. 1 Attenuation by water vapor in case of 30°C surface temperature

### 1.2 衰减订正

采用改进的逐库订正法进行衰减订正. 逐库法是由雷达回波强度的测量值  $Z_M$  求解实际值  $Z_r$ , 计算时, 必须按  $i = 1, 2, 3, \dots$  的顺序, 沿径向依次外推对各库进行衰减订正, 即逐库外推, 在完成对第  $i$  个库的衰减订正后, 由前  $i$  个库的订正结果计算  $\tau_i$ , 为进行第  $i + 1$  个库的衰减订正做准备.

逐库订正结果可以由式(3)<sup>[11]</sup>来计算得出:

$$Z_r(i) = [Z_M(i)/\tau_{i-1}] \exp\{aZ_M^b(i)\Delta R\} \quad (3)$$

按照逐库订正法,对毫米波雷达的回波强度进行衰减订正时,若仅仅使用一组衰减系数的( $a, b$ )值,则难以兼顾弱回波区和强回波区的不同衰减情况,例如弱回波区订正较好的情况下,强回波区订正不足,而强回波区订正较好时,较弱回波区则会订正过量.因此,本文采用改进的逐库订正法:将回波强度划分为 5 个等级,进行衰减订正.由于毫米波雷达给出的回波强度是以 dBZ 为单位的数据,所以在进行回波强度的分级时,也按照 dBZ 的大小划分 5 个区间:弱云区  $D_1: Z < -20$  dBZ, 厚云区  $D_2: -20$  dBZ  $\leq Z < 0$  dBZ, 云中液水  $D_3: 0$  dBZ  $\leq Z < 15$  dBZ, 弱降水  $D_4: 15$  dBZ  $\leq Z < 25$  dBZ, 显著降水  $D_5: Z > 25$  dBZ. 每个区间的衰减情况由一组( $a_i, b_i$ )表示. 同样,不同类型的云,也具有不同的一组( $a_i, b_i$ )组合. 计算表明,对于弱回波的订正, $a, b$  的微弱变化对订正的结果影响不大;对于强回波的订正, $b$  的微小变化将会给订正结果带来很大变化. 因此,对  $Z < -20$  dBZ 的回波强度(即回波强度值属于  $D_1$  情况)因

衰减弱,引起的回波强度差别小,可以忽略订正.对于其他情况(属于  $D_2 \sim D_4$  范畴),本文根据云的不同类型,整理出两部雷达在整个外场试验中观测到的可用于对比分析的数据,取  $10^{-8} \leq a \leq 10^{-4}$  ( $a$  的步长为  $10^{-9}$ ),  $0.01 \leq b \leq 2$  ( $b$  的步长为 0.01),按照等级划分,对每个等级内数据与 X 波段雷达数据进行相对误差最小值计算,将误差最小值对应的 ( $a, b$ ) 确定为衰减系数. 计算结果见表 1. 对于非降水弱云,回波强度梯度小,采用一组 ( $a, b$ ) 系数即可满足订正要求,按相对误差最小值的要求,得到  $a = 1.7822 \times 10^{-5}$ ,  $b = 1.13$ . 对于 5 个区间分段接点处是否存在跃变情况,图 2 给出了按照表 1 中对流性降水云系  $D_2 \sim D_5$  对应的衰减系数绘制了 4 条衰减订正前后反射率因子值的曲线. 对比后发现,当  $Z < 25$  dBZ 时,分段接点处虽然存在不连续现象,但绝对差别很小,不会导致订正结果的明显差别,因此本文没有对分段交接处做平滑处理.

表 1 不同回波类型衰减系数的 ( $a, b$ ) 组合  
Table 1 values of ( $a, b$ ) from different types of radar echo

等级类别	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$D_5$
台风外 围云系	$(1.982 \times 10^{-5}, 1.13)$	$(4.170 \times 10^{-6}, 1.105)$	$(3.749 \times 10^{-6}, 1.075)$	$(1.304 \times 10^{-7}, 1.040)$
对流性 降水云	$(1.982 \times 10^{-5}, 1.13)$	$(9.405 \times 10^{-6}, 1.103)$	$(7.753 \times 10^{-6}, 1.071)$	$(1.257 \times 10^{-6}, 1.047)$
降水性 层状云	$(1.982 \times 10^{-6}, 1.13)$	$(1.280 \times 10^{-6}, 1.105)$	$(1.753 \times 10^{-6}, 1.075)$	$(1.304 \times 10^{-7}, 1.040)$

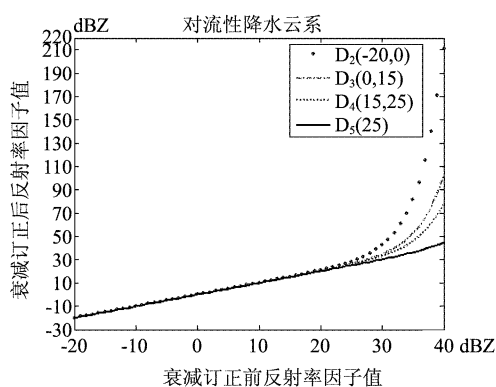


图 2 按照  $D_2 \sim D_5$  对应的衰减系数衰减订正前后反射率因子值图

Fig. 2 Reflectivity factors before and after attenuation correction according to attenuation coefficient corresponding to  $D_2$  to  $D_5$

## 2 衰减订正结果分析

利用 2010 年 7 月在广东省阳江市观测的数据

进行衰减订正. 分别选取层状云、层状云降水回波、对流云降水的个例进行衰减订正. 订正分为云对电磁波的衰减订正以及水汽对电磁波的衰减订正两部分. 水汽的衰减订正部分采用式(1)进行计算.

根据本次为期 1 个月的外场试验收集到的可用来对比的层状云降水回波、台风外围云系回波以及对流云降水回波数据,计算毫米波雷达探测数据订正前后与 X 波段雷达探测数据的差值(毫米波雷达和 X 波段雷达的系统误差均在 1 dB 以内,试验前经过厂家定标,因此订正时不考虑两部雷达的系统误差),得到如下统计数据:

表 2 毫米波雷达衰减订正前后与 X 波段雷达探测数据对比结果

Table 2 Comparison of the two radar data before and after attenuation correction

		$D_3$ /dB	$D_4$ /dB	$D_5$ /dB
层状云降水回波	订正前	4.47	5.01	5.37
	订正后	1.98	2.48	3.82
台风外围云系回波	订正前	5.52	4.38	2.08
	订正后	1.60	0.99	1.67
对流云降水回波	订正前	4.52	5.73	5.92
	订正后	2.07	3.01	4.24

说明:表中数据表示 X 波段雷达和毫米波雷达测得的回波强度差的平均值

### 2.1 层状云回波的衰减订正

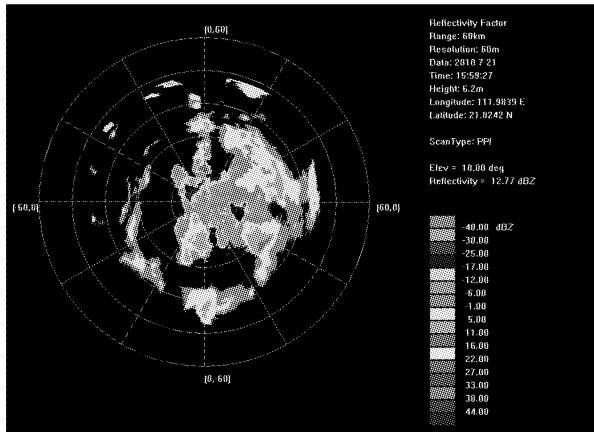
一般非降水云层状云回波在  $-20$  dBZ 以下,在回波较弱的情况下,订正效果不明显,差值在 1 dB 以内;距离较远处因传播路径上的水汽衰减,订正差值稍大些,但也在 3 dB 以内.

### 2.2 层状云降水回波的衰减订正

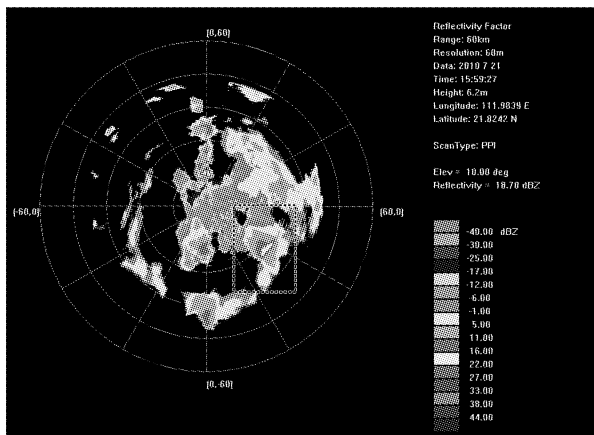
图 3(a)是 2010 年 7 月 21 日 15 时 59 分、 $10^\circ$ 仰角的 PPI 回波图像,图 3(b)、(c)是经衰减订正后的图像. 对比后可以看出订正差值最大为 7 dB,订正后回波强度最大值为 18 dBZ. 对于反射率因子值低于 0 dBZ 的回波,衰减订正差值均在 1 dB 以内. 图 4 为与图 3 的空间位置相对应的 X 波段雷达回波强度图(两部雷达安放在一起,相距不足 20 m),对比图 3(c)与图 4 可以看出,这个大范围的层状云回波,除了  $75^\circ$  方位角上距雷达水平距离约 30 km 处的一小块回波订正不足外,其它区域订正后的回波与 X 波段探测结果比较吻合. 图 3(b)与图 3(c)相比弱回波区订正结果几乎无差异,而回波相对较强的区域(图中虚线框内区域),采用分级逐库订正的方法(图 3(c))订正结果更接近于 X 波段探测结果.

### 2.3 台风云系回波的衰减订正

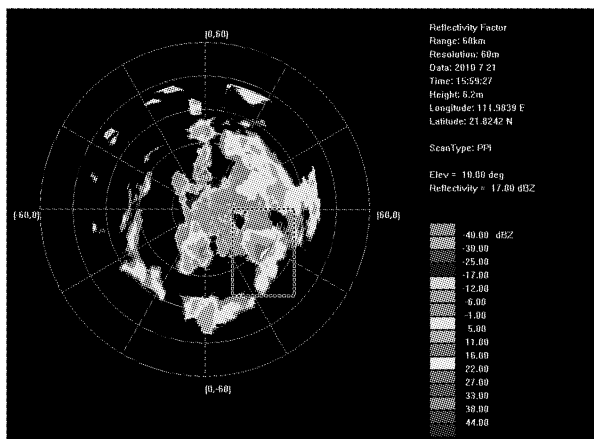
图 5(a)为 2010 年 7 月 25 日 15 时 06 分雷达探



(a)



(b)



(c)

图3 (a) 2010年7月21日15时59分、10°仰角的PPI回波强度图, (b) 经过衰减订正的回波, (c) 经过分级逐库衰减订正的回波

Fig.3 PPI at 10° elevation (a), the echo after attenuation correction (b) and the echo after bin-by-bin attenuation in groups(c) at 15:59 on July 21<sup>st</sup>, 2010

测到的台风云系回波强度图, 在水平距离 24 km 处有一小块强回波, 从垂直结构上看, 云的回波顶高约 13 km. 图 5 (b) 为衰减订正后的回波强度图, 图 5 (c) 为经过分级逐库衰减订正后的回波强度图. 订

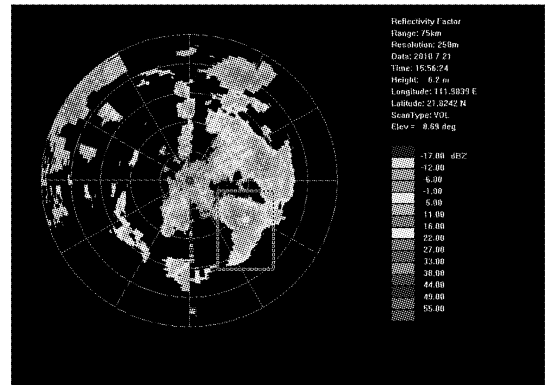
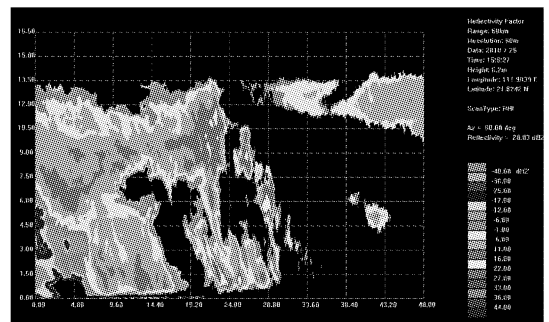
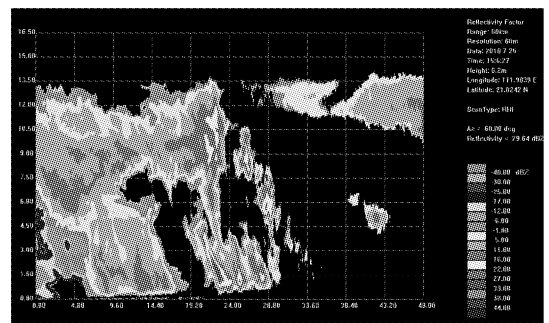


图4 X波段雷达2010年7月21日15时56分、10°仰角的PPI回波强度

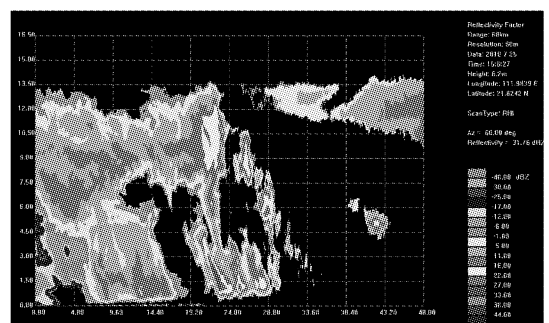
Fig.4 PPI from a X-band radar at 10° elevation, 15:56 on July 21<sup>st</sup>, 2010



(a)



(b)



(c)

图5 a) 2010年7月25日15时06分、60°方位的RHI回波强度, (b)、(c)是与图(a)相对应、但经过衰减订正的回波

Fig.5 RHI at 60° azimuth at 15:06 on July 25<sup>th</sup>, 2010. (b) and (c) represented the echo before and after attenuation correction respectively

正后, 24 km 处的强回波反射率因子最大值增大到 30 dBZ 以上. 图 6 为 X 波段雷达探测到的相应回波强度图. 通过比较可以看出, 图 6 中虚框块区域的目标物, 毫米波雷达基本没有探测到. 这是由于在台风影响期间、路径上丰富的水汽和少量的雨水的衰减造成的. 在其它区域, 订正效果较好. 由于此台风外围云系回波相对较弱, 基本无较强回波区, 因此采用单一  $(a, b)$  组合进行衰减订正与采用分级逐库衰减订正效果近似.

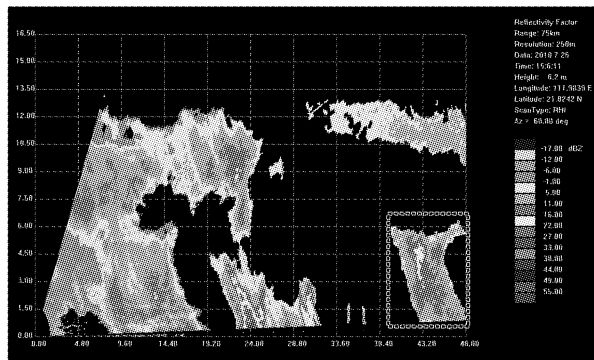


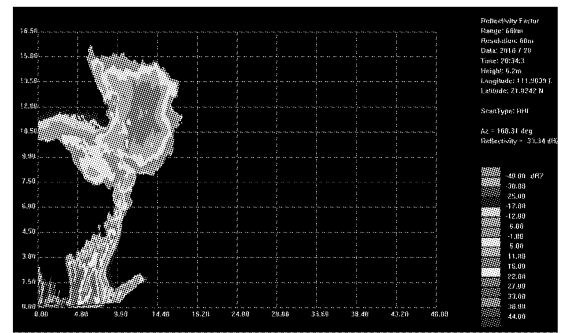
图 6 X 波段 2010 年 7 月 25 日 15 时 06 分、60° 方位的 RHI 回波强度

Fig. 6 RHI from a X-band radar at 60° azimuth, 15:06 on July 25<sup>th</sup>, 2010

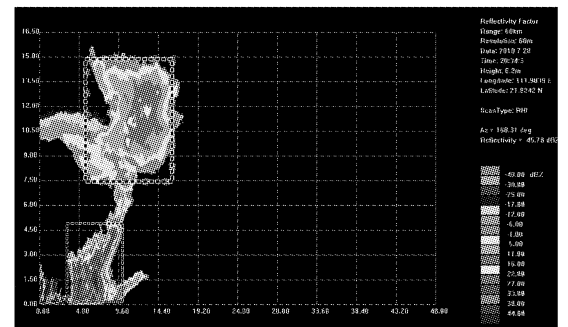
## 2.4 对流云回波的衰减订正

图 7(a) 为 2010 年 7 月 28 日 20 时 34 分、168° 方位的 RHI 回波强度, 图中所示的对流云发展非常旺盛, 由当时实况记录可知地面正在发生降水, 反射率因子最大值已达到 34 dBZ. 图 8 为同一时刻 X 波段雷达观测到回波. 距离雷达 40 km 左右, X 波段雷达探测到的回波并没有被毫米波雷达探测到, 说明路径上的雷达信号衰减严重, 透过率太小. 图 7(c) 是经过分级逐库订正后的回波强度. 与图 8 相比, 10 km 高度以上的回波订正仍然不足, 原因可能是在雷达射线路径上, 水汽对电磁波的严重衰减、导致信号太弱、低于毫米波雷达的最小可测信号. 对比图 7、图 8 中所示红色及蓝色虚线框内回波强度, 可以看出, 采用分段逐库订正后的结果仍旧优于只采用一组  $(a, b)$  系数的衰减订正结果.

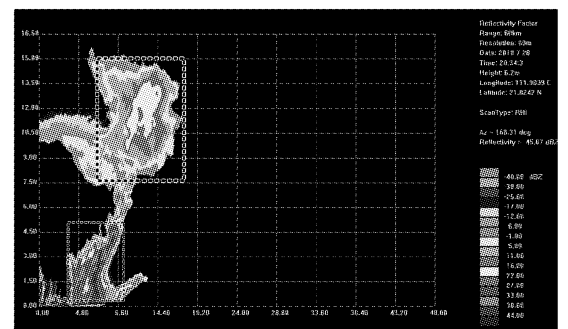
这个个例反映出, 如果路径上降水导致的衰减太严重, 那么即使采取订正措施, 也难以探测出降水区以外的弱回波, 另外, 强降雨雨滴的 Mie 散射效应也会导致两部雷达探测的差异. 所以对于强衰减情况, 目前的订正效果不可能很好, 还需继续探索新的订正方法.



(a)



(b)



(c)

图 7 2010 年 7 月 28 日 20 时 34 分、168° 方位的 RHI 图像 (a), 衰减订正后的 RHI 图 (b), 经过分级逐库订正的 RHI 图像 (c)

Fig. 8 RHI at 168° azimuth, 20:34 on July 28<sup>th</sup>, 2010. (a) and (b) (c) represented the echo before and after bin-by-bin attenuation correction respectively

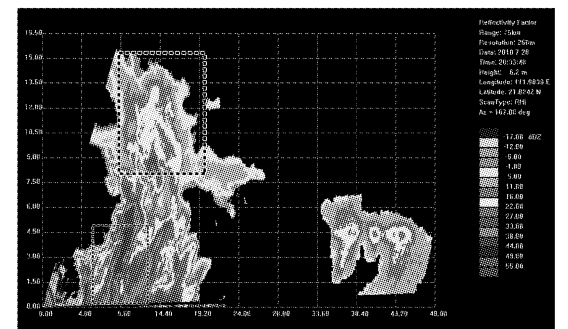


图 8 X 波段雷达在 2010 年 7 月 28 日 20 时 33 分、167° 方位的 RHI 反射率因子图像

Fig. 9 RHI from a X-band radar at 167° azimuth, 20:33 on July 28<sup>th</sup>, 2010

### 3 结论

大气和云内液水对 35 GHz 电磁波的衰减,随着 Ka 波段雷达探测距离的增加,透过率越来越小. 为了使雷达回波能准确地反映目标物的真实情况,需要进行衰减订正. 通过对 35 GHz 的 Ka 波段云雷达回波强度进行衰减订正,得到以下结论:

(1) 在逐库订正法的基础上,将回波强度值进行分级,每级采用不同的  $(a_i, b_i)$  组合,当回波较弱时(非降水云回波),此改进方法与一般逐库衰减订正法效果近似,并无明显优势. 但当回波强度较大时(降水回波),订正效果改善明显,优于仅用一组不变得  $(a, b)$  系数订正的方法. 综合而言,分级逐库订正法能够得到更好的订正效果.

(2) 对于非降水性层状云,其回波较弱,云内粒子对电磁波的衰减较小,订正结果一般在 1dB 以内,即使在距离较远处,订正差值最大为 3 dB.

(3) 对于降水回波,一方面云内液水含量高,另一方面又受雨水对毫米波的衰减,所以衰减很严重,订正难度很大. 层状云降水回波衰减订正值最大可达 10 dB.

衰减订正不足原因分析:

(1) 对于水汽衰减的计算,本文按照公式(1)进行计算,其衰减程度在 0.1 dB/km 以内,对雷达回波的影响有限. 但是本次试验地点是在广东省阳江市,特别是在台风登陆的天气情况下,大气中除了丰富的水汽外,还含有雨幡引起的、但不一定都能落到地面的水滴,此种情况下的衰减比纯水汽的衰减大,仅用水汽的衰减公式进行订正是不够的. 当确知大气含水量、温度等信息时,才能对这种情况进行准确的订正.

(2) 订正采用的  $(a_i, b_i)$  组合,由于统计数据较少,每组  $(a_i, b_i)$  并不一定是最优化的,今后可以随着统计数据的增加将这几组  $(a_i, b_i)$  精确化,将会得到更好的订正效果.

大部分非降水回波订正效果较好,虽然对于降水回波的衰减订正存在不足的情况,但是对毫米波

雷达数据质量还是有明显改善的.

### REFERENCES

- [1] YAN Wei, REN Jian-Qi, LU Wen, *et al.* Cloud phase discrimination technology based on spaceborne millimeter wave radar and lidar data [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (严卫, 任建奇, 陆文等. 联合星载毫米波雷达和激光雷达资料的云相态识别技术. *红外与毫米波学报*), 2011, **30** (1): 68-73.
- [2] Harper W G. Examples of cloud detection with 8.6 millimeter radar (Radar resolution capability for cloud detection) [J]. *Meteor Mag*, 1966, **95**: 106-112.
- [3] Hobbs P V, Funk N T, Weiss R. *et al.* Evaluation of a 35 GHz radar for cloud physics research [J]. *J Atmos Oceanic Tech*, 1985, **2**: 35-48.
- [4] Hollars S, Fu Q, Comstock J, *et al.* Comparison of cloud-top height retrievals from ground-based 35 GHz MOCR and GMS-5 satellite observations at ARM TWP Manusite [J]. *Atmos Res*, 2004, **72**: 169-186.
- [5] Clothiaux E E, Miller M A, Albrecht B A, *et al.* An evaluation of a 94 GHz radar for remote sensing of cloud properties [J]. *J Atmos Oceanic Tech*, 1995, **12**(2): 201-209.
- [6] Wang Z, Sassen K. Cloud type and macrophysical property retrieval using multiple remote sensors [J]. *J Appl Meteor*, 2001, **40**: 1665-1682.
- [7] Wang Z, Kenneth S, Deborah V, *et al.* Level 2 combined radar and lidar cloud scenario classification product process description and interface control document [R]. CloudSat Project Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, 2003.
- [8] YU Xiao-Ding, YAO Xiu-Ping, XIONG Yan-Nan, *et al.* *Principle and operational application of Doppler weather radar* [M]. Beijing: Meteorological Press (俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等. *多普勒天气雷达原理与业务应用*. 北京: 气象出版社), 2006: 19-22.
- [9] ZHANG Pei-Chang, DU Bin-Yu, DAI Tie-Pi. *Radar meteorology* [M]. Beijing: Meteorological Press (张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕. *雷达气象学*. 北京: 气象出版社), 2001: 35-43, 64-66, 81, 84-85.
- [10] ZHONG Ling-Zhi, Calibration and capability analysis of China new generation of cloud radar-HMBQ and its preliminary application in retrieving cloud microphysics parameters [D]. Atmospheric physics and Atmospheric Environment (仲凌志. 毫米波测云雷达系统的定标和探测能力分析及其在反演云微物理参数中的初步研究. 中国气象研究院), 2009: 65-66.
- [11] ZHANG Pei-Chang, WANG Zheng-Hui. A study on algorithm to make attenuation correction to radar observations of radar reflectivity factor (I): theoretical analysis [J]. *Plateau meteorology* (张培昌, 王振会. 天气雷达回波衰减订正算法的研究(I): 理论分析. *高原气象*), 2001, **20**(1): 1-5.