

文章编号: 2096-1618(2016)04-0358-05

基于分级逐库方法的 KA 波段云雷达反射率因子衰减订正

王传志¹, 侯小宇¹, 李学华^{1,2}, 漆洋¹, 余骁¹

(1. 成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225; 2. 中国气象局大气探测重点开放实验室, 四川 成都 610225)

摘要:针对 KA 波段云雷达回波衰减引起的数据失真问题,根据雷达气象方程和 K-Z 经验关系,分析 KA 波段电磁波传播过程中的液态水及水汽的吸收衰减原理,采用改进的分级逐库订正方法,对学校 KA 波段云雷达观测数据进行衰减订正试验,并与该雷达目前软件中固定 K-Z 系数衰减订正效果进行对比分析。分析结果表明,相比云雷达现有反射率因子衰减订正结果,采用分级逐库订正方法后对流性和层状云降水反射率因子的订正有更好的效果,且在回波强度较大时订正效果更为明显,可有效地减少回波的失真。

关键词:云雷达;衰减订正;水汽订正;分级逐库订正

中图分类号:TN959.4

文献标志码:A

0 引言

通常探测云粒子的直径在微米量级,其散射截面积非常小,常规 X、S 波段天气雷达很难探测到如此微米量级的云粒子,故为实现对云粒子的探测一般使用毫米波雷达。HT101 型祥云全固态 KA 波段测云雷达(以下简称“云雷达”)是一种全新的云观测设备,是成都信息工程大学与西安华腾微波有限责任公司合作研发的固态测云仪。该测云仪工作的中心频率为 35 GHz,这也是目前测云雷达使用的主要频率,采用全固态、准连续波体制^[1]和脉冲压缩的信号形式,最大探测高度大于 15 km,使用的雷达数据就是成都信息工程大学该云雷达的观测数据。因为该云雷达工作在 KA 波段,若在波束的收发路径上有丰富的水汽或者含有液态水时,雷达电磁波信号将出现大量的衰减,导致雷达的反射率因子数据不能真实地反映被探测目标的真实强度信息或者说与真实强度信息有很大的偏差,这时就需要对雷达反射率因子数据进行衰减订正。目前中国针对厘米波雷达的衰减订正有比较成熟的理论和方法^[2-3],但是对毫米波雷达的衰减订正方法却相对较少,刘黎平^[4]、黄兴友^[5]等研究了分级逐库衰减订正方法,并使用订正之后的 KA 波段云雷达数据与 X 波段测雨雷达数据进行效果对比分析。目前,成都信息工程大学的 KA 波段测云雷达固有软件中衰减订正主要采用固定 K-Z 关系的衰减订正方法,没有考虑不同类型云层衰减系数不同的情况,从而导致衰减

订正结果出现订正不足或订正过量的情况。针对这种现状,采用改进型分级逐库衰减订正方法^[5]对成都信息工程大学 KA 波段云雷达反射率因子数据进行衰减订正试验分析。文中首先以雷达气象方程为基础对液态水逐库订正方法和水汽订正方法的原理进行分析,利用该方法对 KA 波段云雷达实际反射率因子数据进行衰减订正试验和分析。并利用方法的订正结果与该雷达软件固有衰减订正结果进行对比分析。

1 雷达气象方程及衰减分析

在此不考虑雷达波束的非均匀充塞,则雷达回波的衰减可以表示为雷达气象方程^[6]为

$$P_r(R) = \frac{C}{R^2} Z_r(R) \tau(R)$$

其中 R 是目标距雷达的距离, P_r 是该距离处的目标回波功率, C 是雷达系统常数, $Z_r(R)$ 是在距离 R 处的雷达反射率因子的真实值, $\tau(R)$ 是在雷达与目标距离 R 之间的雨区双透过率,可以表示为

$$\tau(R) = \exp \left\{ -2 \int_0^R \kappa(R) dR \right\}$$

其中 $\kappa(R)$ 是以 Np/m 为单位的雨区衰减系数, $1 \text{ Np/m} = 4343 \text{ dB/km}$ 。在雷达回波强度测量中可以由测量到的回波功率 P_r 转换得到雷达回波强度测量值 Z_M :

$$Z_M(R) = \frac{R^2}{C} P_r(R) = Z_r(R) \tau(R)$$

雷达回波强度的衰减订正就是由雷达回波强度的测量值 Z_M 计算得到实际值 Z_r 的一个订正过程。

收稿日期: 2016-07-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41475043、41575022); 四川省科技厅资助项目(2014JY0093)

2 衰减订正

在实际云雷达观测中,大气衰减使雷达回波功率减小从而造成回波失真,和其他厘米波测雨雷达不同的是毫米波雷达电磁波信号的衰减更加严重,主要因素是因为大气中水汽和云粒子内液态水含量的影响^[8],所以研究的订正方法包含液态水逐库衰减订正和水汽订正两部分。

2.1 液态水的衰减订正

根据该 KA 波段云雷达观测到的反射率因子数据,采用改进型的分级逐库订正方法进行衰减订

正^[4],由云雷达测得的回波强度值 Z_M 求解考虑衰减之后的订正值 Z_r 。订正方法就是按照径向方向从第一个库依次外推分别对各库进行衰减订正,当完成从第一个库到第 i 个库的衰减订正之后,由订正的前 i 个库订正结果 τ_i ,再对下一个库的订正做准备,因此该订正方法可以表示为^[3-4]

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

其中 (a, b) 为衰减系数,分级逐库衰减订正就是根据不同天气条件下云的类型使用不同衰减系数的方法。相比于仅仅使用一组固定的衰减系数的方法来说,分级逐库订正方法能够很好地反应强回波和弱回波情况下的衰减变化,固定系数法却很难兼顾强回波和弱回波情况下的衰减变化。

表 1 不同回波类型的衰减系数 a, b 组合

等级 类别	厚云区 D2 -20 dB<=Z<0 dB	云中含水区 D3 0<=Z<15 dB	弱降水 D4 15<=Z<25 dB	强降水 D5 >25 dB
层状云回波	1.982 E-6,1.13	1.280 E-6,1.105	1.753 E-6,1.075	1.304 E-7,1.040
对流云降水回波	1.982 E-5,1.13	9.405 E-6,1.103	7.753 E-6,1.071	1.257 E-6,1.047
台风外围回波	1.982 E-5,1.13	4.170 E-6,1.105	3.749 E-6,1.075	1.304 E-7,1.040

对此分级逐库订正法将回波强度划分为 5 个等级,分别进行衰减订正。分为弱云区、厚云区、云中包含液态水区、弱降水区、强降水区 5 种等级^[5]的云区,不同的云区条件下不同的云粒子类型使用不同的衰减系数组合,表 1 表示按照 X 波段雷达在外场实验中观测到的数据在每个等级进行相对误差最小值计算出对应的衰减系数组合 (a, b) 。因为当 $Z<-20$ dBz 时即弱云区的回波强度因为衰减较弱,引起的回波强度差别非常小,可以忽略订正。所以表 1 仅表示其余 4 个等级在不同云类型情况下的衰减系数组合值^[4]。

2.2 水汽的衰减订正

水汽含量较多的天气状况下,水汽引起的衰减与雷达波长有很大关系,在常见的天气情况下,水汽对 S、X 波段的衰减很小,但是当雷达波长为毫米波段时,水汽引起的衰减高达 0.1 dB/km,因此对于 KA 波段的云雷达,其水汽的衰减虽然比较小但是却不能忽略。根据相关文献资料显示^[9]表明在 100 GHz 以下频率的水汽衰减系数可以表示为^[6]

$$k_{\text{H}_2\text{O}}(f) = 2f^2 \rho_{\text{H}_2\text{O}} \left(\frac{300}{T}\right)^{2.5} \alpha_1$$

$$\left[\frac{300}{T} e^{\frac{644}{T}} \frac{1}{(f^2 - 494.4019)^2 + 4f^2 \alpha_2^2} + 1.2 \times 10^{-6}\right]$$
$$\alpha_1 = 2.85 \left(\frac{P}{1013}\right) \left(\frac{300}{T}\right)^{0.626} \left[1 + 0.018 \frac{\rho_{\text{H}_2\text{O}} T}{P}\right]$$

其中,频率 f 的单位为 GHz, α_1 的单位为 GHz, $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ 是水汽的密度, P 是气压, T 温度单位为 K。在实际探测过程中,由于探空设备和探空资料的限制,在此无法得到雷达探测路径上温度和水汽的详细变化情况。同时为验证该方法的有效性,使用在标准大气压下地面温度为 30° 情况下,频率为 35 GHz 时水汽的衰减变化情况。当然若能准确测得雷达探测路径上水汽含量和温度的详细变化情况,将能够得到更加准确的订正效果,所以在这一问题上还需要继续探索研究。

3 订正结果分析

利用 2016 年 5 月在成都信息工程大学航空港校区实际的云雷达观测数据进行衰减订正,分别选取对流云降水、层状云降水和非降水层状云的实例回波数据进行衰减订正分析,订正前后的效果以及订正前后差值图和该云雷达的原始订正图分别如图 1 所示。

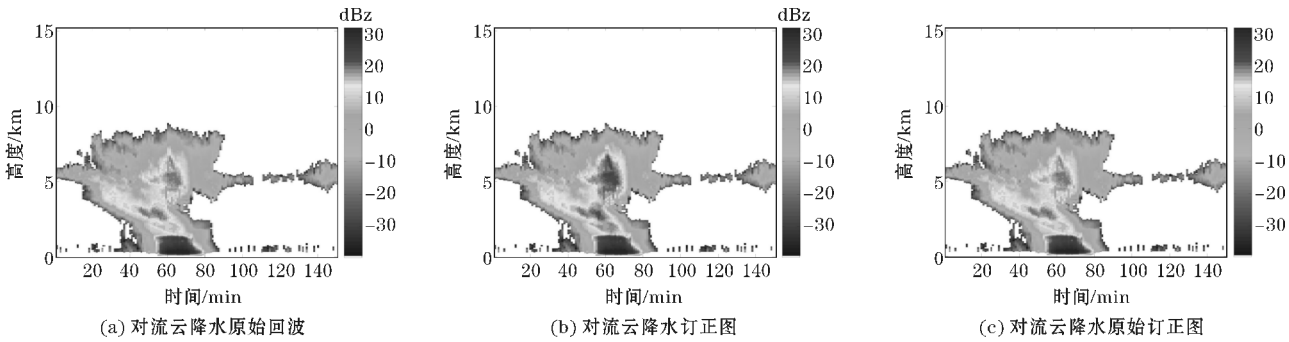


图1 对流性降水原始回波、对流性降水分级逐库订正图及固定 K-Z 系数原始订正图

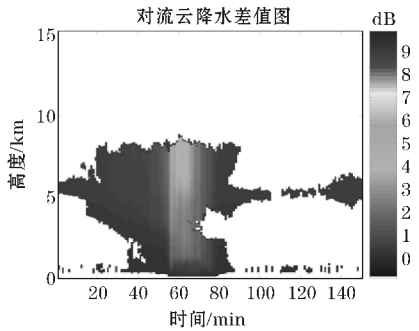


图2 对流性降水分级逐库订正差值图

对于对流性降水回波,分析图 1(b)可知云雷达原有固定衰减系数订正法的订正效果并不明

显,订正最大值为2 dB左右。而采用逐库订正法并且充分考虑水汽的影响后,由图 2 知其订正差值大部分在5 dB以内,经过查阅相关文献表明^[13],其订正值是可信的;少部分差值高达7 dBz,这是因为该时间降雨明显增强,衰减不断累积造成。分析比较图 1(b)和 1(c)两种订正结果可知,在强回波时,云雷达原有固定衰减系数订正法相比分级逐库订正法较弱,存在衰减订正量不够的情况。这主要是因为分级逐库订正法中考虑到水汽的衰减,以及对不同回波强度采取了不同衰减系数,这相对于固定系数来说,更接近实际情况。

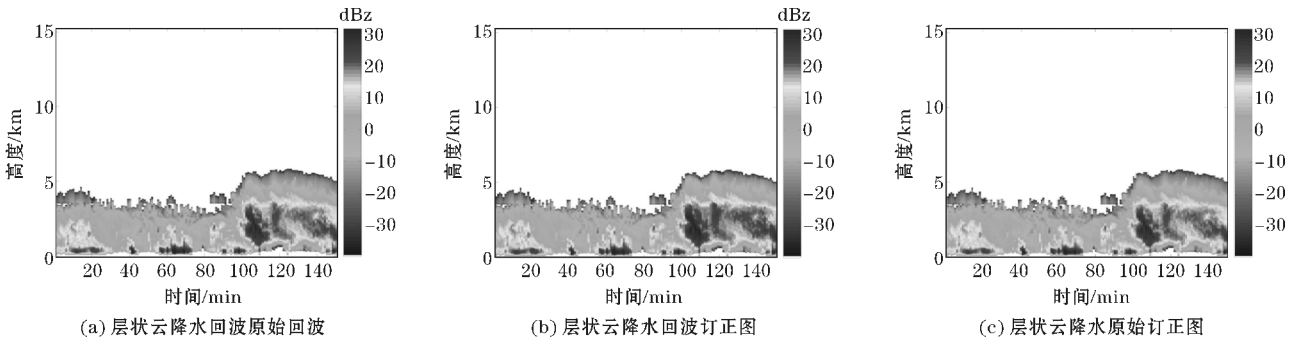


图3 层状云降水原始回波、分级逐库订正图及固定 K-Z 系数原始订正图

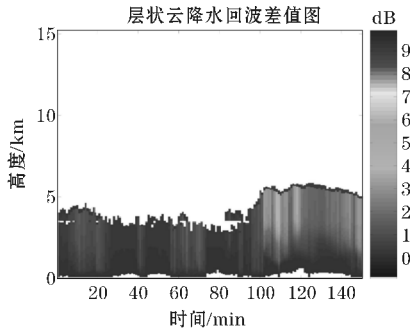


图4 层状云降水分级逐库订正差值图

图 3 所示,对于层状云降水回波,分级逐库方法订正结果与云雷达原始固定衰减系数订正法结果具有细微的差异,根据图 4 知其订正最大值为4 dB左右。对于反射率因子值低于0 dBz的回波,衰减订正差值均在1.5 dB以内。对比图 3(b)和 3(c)可以看出云雷达原有订正效果与在

层状云降水情况下使用分级逐库方法的订正效果不明显,但从数值来说,最大位置还是差值1 dB。

图 5 所示,对于层状云回波,层状云中有较多的云粒子,对比图 5(b)和 5(c)可以看出两种订正方法并没有明显差异。由图 6 订正后差值可得,衰减订正差值最大为0.5 dB,其衰减很小,在此种天气情况下两种订正方法效果基本一致。

综合上面的例子分析得出,因为云雷达原始订正采用的是固定的衰减系数,即对不同的天气过程都使用一个固定的衰减系数(a , b),显然这样的订正结果不能普遍适用于各种天气过程,而采用的逐库订正方法按等级使用不同的衰减系数并且充分考虑水汽衰减的影响,结果对比分析表明,订正结果相比原始的订正效果而言其订正效果更加充分。

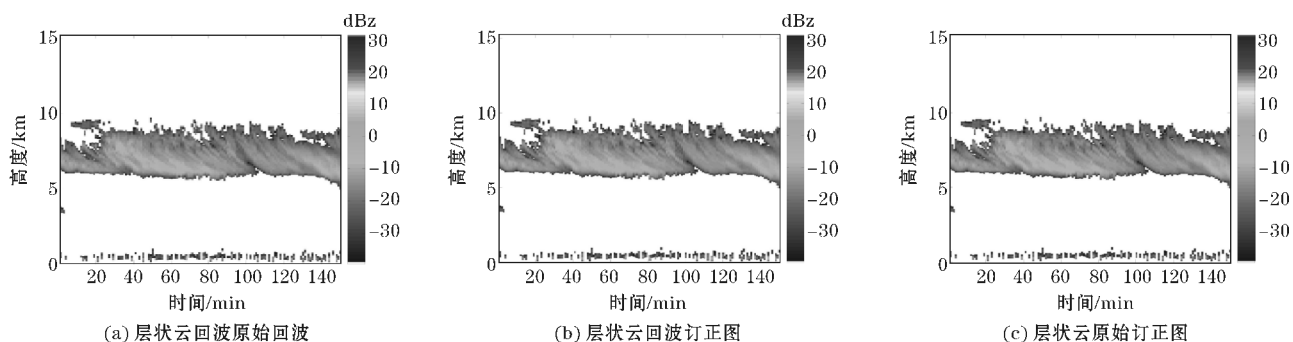


图5 非降水层状云原始回波、云分级逐库订正及云固定K-Z系数原始订正图

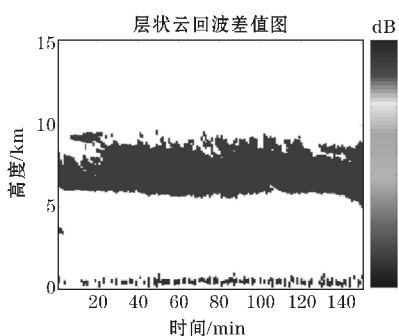


图6 层状云分级逐库订正差值图

4 结束语

毫米波云雷达受降雨的衰减较为严重,随着探测距离的增加,累积衰减越来越严重。为使云雷达探测到的气象目标回波强度能够准确地反映其真实情况^[14],所以需要对其回波强度进行衰减订正。回波强度衰减订正采用分级逐库订正方法,对不同类型云层进行分级处理,不同云类型分级使用不同的衰减系数,同时考虑到水汽对电磁波衰减影响。通过对比分析云雷达原有固定衰减系数订正法的订正结果,当强降水或者回波强度较强时,采用分级逐库订正法的订正效果订正效果更好,订正量最大增大5 dB,而当回波强度较弱时两种订正结果相差不大,但是最大时仍然可1~2 dB。因此,采用分级逐库订正方法订正效果,相比雷达现有处理方法,更接近实际。当然不足之处,由于条件限制,没有利用其他降雨雷达对订正效果进行对比试验。

参考文献:

- [1] 仲凌志,刘黎平,葛润生,等.毫米波测云雷达的系统定标和探测能力研究[J].气象学报,2011,69(2):352-362.
- [2] 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.
- [3] 张培昌,杜秉玉,戴贴丕.雷达气象学[M].北京:气象出版社,2001:24,35-43,81-85,300-303.
- [4] 刘黎平,仲凌志,江源.毫米波测云雷达系统及其外场实验结果初步分析[J],气象科技,2009,37(5):567-571.
- [5] 黄兴友,樊雅文,李峰,等.地基Ka波段测云雷达回波强度的订正.红外与毫米波学报[J].2013,32(4):325-330.
- [6] 樊雅文.雷达资料订正及应用研究[D].南京:南京信息工程大学,2012.
- [7] 纪奎秀,王贤勤,倪萍.X波段气象雷达回波强度的订正[J].成都信息工程学院学报,2007,22(3):355-359.
- [8] 吴欢.X波段双线偏振雷达资料的衰减订正和地物消除以及降水类型判别研究[D].南京:南京信息工程大学,2013.
- [9] 毕永恒,刘锦丽.X波段双线偏振气象雷达反射率的衰减订正[J].大气科学,2012,36(3):495-506.
- [10] 吴仁彪,韩雁飞,李海,等.气象雷达衰减订正方法的研究现状与展望[J].中国民航大学学报,2012,30(3):22-27.
- [11] 王振会,张培昌.天气雷达回波衰减订正算法的研究(II):数值模拟与个例实验[J].高原气象,2001,20(2):115-120.
- [12] 赵恒轩,陈钟荣,周枫.天气雷达反射率因子的实时衰减订正[J].高原气象,2003,22(4):365-370.
- [13] 黄芳,陈洪滨,王振会.37GHz和94GHz的大气微波衰减比较分析[J].遥感技术与应用,2003,18(5):269-275.
- [14] 王楠,乔剑.衰减订正技术本地化对比试验研究[J].陕西气象,2011,(2):29-32.
- [15] 纪奎秀,余勇,王贤勤,等.X波段气象雷达回

波强度的衰减订正[C]. 中国气象学会 2006 年
年会“气象雷达及其应用”分会场论文集.

2006:355-359.

Attenuation Correction of the KA Band Cloud Radar Reflectivity Factor based on Bin-by-bin Method

WANG Chuan-zhi¹, HOU Xiao-yu¹, LI Xue-hua^{1,2}, QI Yang¹, YU Xiao¹

(1. College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. CMA Key Laboratory of Atmospheric Sounding, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: In order to solve the data distortion problems caused by the echo attenuation of KA band cloud radar, the absorption and attenuation principle of the liquid water and water vapor in the transmission process of KA band microwave is analyzed, according to the radar meteorological equation and K-Z empirical relationship. Moreover, the improved method of bin-by-bin correction in the groups is used, and the attenuation correction experiment based on the data observed by KA band cloud radar at CUIT was carried out. Then it is compared with the correction attenuation effect of K-Z coefficient in the radar at present. The results show that, compared with the existing reflectivity factor attenuation correction results of the cloud radar, the method of bin-by-bin correction in the group has better correction effect for convective and stratiform cloud precipitation reflectivity factor. The correction effect becomes more obvious when the echo intensity is larger, and it can effectively reduce the distortion of the echo.

Key words: cloud radar; attenuation correction; bin-by-bin correction in groups; water vapor correction