

## 毫米波测云雷达回波的衰减订正研究\*

冯永会<sup>1,2</sup> 王金虎<sup>1,2</sup> 葛俊祥<sup>1,2</sup>

(1. 南京信息工程大学 江苏省气象探测与信息处理重点实验室, 南京 210044;

2. 江苏省气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044)

**摘要:** 毫米波测云雷达探测云目标时,电磁波除了受到云目标衰减之外,还受到大气传输中氧气以及水汽的衰减,电磁波的衰减导致雷达观测到的回波强度小于云目标的实际回波强度,这种误差将影响云内结构的反演。因此,为了使毫米波测云雷达的探测数据正确地反演出云目标的宏观物理特征,必须对进行毫米波测云雷达工作频率下气象目标物的衰减进行订正。主要利用逐库衰减订正算法以及分级逐库衰减订正算法对英国 Chilbolton 观测场 94 GHz 毫米波测云雷达的一次降水云观测结果进行了垂直方向的大气衰减订正研究,并比较逐库衰减订正算法以及分级逐库衰减订正算法间的反演差异。同时,利用国际电信联盟 ITU-RP.676-10 建议书中氧气以及水汽衰减订正公式进行了毫米波测云雷达探测数据的二次订正。分析和对比结果表明,衰减系数的变化对于云目标的宏观物理特征反演有着明显的影响,并且分级逐库衰减订正法的订正效果强于逐库衰减订正法。

**关键词:** 毫米波测云雷达,大气衰减订正,逐库订正算法,分级逐库订正算法

## Research of Millimeter-Wave Cloud Radar on Attenuation Correction

FENG Yong-hui<sup>1,2</sup>, WANG Jin-hu<sup>1,2</sup>, GE Jun-xiang<sup>1,2</sup>

(1. Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Information Processing,  
Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

2. Jiangsu Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** When millimeter-wave cloud radar detects cloud targets, electromagnetic wave not only suffer the attenuation of cloud targets, but also the attenuation of oxygen and water vapor in the atmosphere. Electromagnetic wave attenuation brings that the echo intensity data of radar observations is smaller than that of the actual cloud targets. This error will affect the cloud structure inversion. Thus, meteorological target attenuation correction must be carried out under the millimeter-wave cloud radar frequency in order to inverse exactly the macro physical characteristics of cloud targets by the detected datum of the millimeter-wave cloud radar. In this paper, we researched a precipitation clouds attenuation correction in vertical direction which detected by 3 mm cloud radar at British Chilbolton observation by bin-by-bin attenuation correction algorithm and hierarchical bin-by-bin attenuation correction algorithm and compared their difference. Meanwhile, we conducted the second correction of the millimeter-wave cloud radar detected data by using ITU-RP.676-10 atmospheric oxygen and water vapor attenuation correction formula. The above analysis and comparison results showed that the change of the attenuation coefficient has a significant impact on the cloud targets macro physical characteristics inversion. The effect of hierarchical bin-by-bin attenuation correction is stronger than that of bin-by-bin attenuation correction.

**Key words:** millimeter-wave cloud radar, atmospheric attenuation correction, bin-by-bin algorithm, hierarchical bin-by-bin algorithm

\* 收稿日期:2015-08-10;修回日期:2015-11-09

基金项目:2011年国家科技部公益性(气象)行业专项毫米波云雷达关键技术研究(GYHY201206038);2013年国家自然科学基金毫米波MIMO雷达云闪烁抑制及云内参数反演研究(61372066);江苏省2012年度普通高校研究生科研创新计划(CXLX12\_0500);江苏省信息与通信工程优势学科建设项目

## 引言

云通过辐射传输和水循环作用对气候变化起到了重要的作用<sup>[1-2]</sup>。国内外对于云的观测手段较多,比如厘米波雷达、微波辐射计、毫米波雷达、云幕测量仪、探空气球等<sup>[3-5]</sup>。

这些仪器中毫米波雷达能探测直径从几微米的云粒子到毫米量级的弱降水粒子,并且能够穿透云的内部从而能够描述云内部信息而得到了广泛的应用<sup>[6-7]</sup>。目前国内在 94 GHz 雷达方面取得了一定的进展,如安徽四创电子股份有限公司依托国家 863 计划的支持研制了国内首部 94 GHz 测云雷达“SKY”<sup>[8]</sup>,南京信息工程大学自主研制了国内首部 94 GHz 地基毫米波云雷达测试系统,目前该雷达正处于紧张的调试阶段。这些毫米波雷达的成功研制必然为气象目标的精细探测提供技术保障,但是注意到毫米波在云雨天气的传输过程中,会受到云雨、大气气体的衰减,导致回波面积的减小<sup>[9]</sup>,其观测值比实际值要小,因此大气衰减订正是毫米波测云雷达探测中必须要考虑的问题。

对于天气雷达回波衰减订正算法,国内外已经有了一些初步的研究。基于衰减系数  $k$  与雷达反射率因子  $Z$  之间的经验关系和雷达气象方程,文献<sup>[10]</sup>给出了  $Z$  的衰减订正解析表达式,文献<sup>[11]</sup>讨论了解析订正法与迭代法之间的关系。文献<sup>[12]</sup>在分析了上述两种订正算法后,给出了逐库法和逐库近似算法以及订正稳定判据,并且通过数值模拟给出了小旋转椭球粒子群在 X, C, S 3 个波段衰减系数与雷达反射率因子之间的关系<sup>[13]</sup>。在毫米波波段,王振会等同样通过数值模拟,给出了 K 和 W 波段不同云滴谱类型的球形粒子群的  $k$ - $Z$  关系,并在此基础上数值仿真 4 种非降水云的机载 W 波段雷达回波强度,利用迭代法进行雷达回波衰减订正实验<sup>[14]</sup>。然而目前国内对于 94 GHz 毫米波雷达的衰减订正研究仍然较少,原因在于毫米波雷达器件的成本较高,设计难度较大,除此之外目前对于衰减订正的文献中较少地同时考虑大气中云、雨、氧气和水汽的衰减订正问题。本文利用英国 Chilbolton 观测场的地基 94 GHz 毫米波雷达 (Galileo) 对 2008 年 1 月 14 号的一次降水云系进行观测,利用逐库订正以及分级逐库订正方法对这次降水云系的云雨粒子进行衰减订正,之后利用国外统计的水汽以及氧气对电磁波吸收的经验公式进行了毫米波雷达数据的再次订正,给出订正前后的差别,为毫米波雷达探测

云雨粒子提供衰减订正思路。

## 1 毫米波雷达的大气衰减理论基础

### 1.1 大气气体衰减

大气与降水粒子的衰减,使雷达的回波功率减小,造成回波失真。大气中氧气与水汽等气体分子远远小于微波波长,因此可以忽略气体对微波的散射作用,衰减主要是由吸收造成。大气由多种气体分子组成,对微波吸收作用较强的主要是氧气与水汽分子,其它分子例如  $O_3$ ,  $VO$ ,  $CO$ ,  $SO_2$ ,  $NO_2$  等由于含量甚少,对微波不会引起明显的吸收作用,因此我们主要讨论水汽和氧气的衰减问题。

#### 1.1.1 水汽的衰减

由国际电信联盟标准<sup>[16]</sup>ITU-R P. 676-10 建议书可知无线电波在大气气体中的衰减。从海平面到 10 km 高度范围内,由干燥空气和水汽造成的无线电波特征衰减,可采用下列简化算法进行估算。这一方法是基于逐线计算的曲线拟合,并同意更准确的计算是在距主吸收线中心的频率偏移不超过 0.1 dB/km,在 60 GHz 附近时达到最大为 0.7 dB/km,当超过 10 km 时,由于更高的精确度,应当采用逐线计算的方法。

对于干燥的空气,大气衰减  $\gamma_0$  (dB/km) 计算如下:对于 66 GHz  $< f \leq 350$  GHz:

$$\gamma_0 = \left\{ 3.02 \times 10^{-4} r_t^{3.5} + \frac{0.28 r_t^{3.8}}{(f - 118.75)^2 + 2.91 r_p^2 r_t^{1.6}} + \frac{0.502 \zeta_6 [1 - 0.0163 \zeta_7 (f - 66)]}{(f - 66)^{1.4346 \zeta_4} + 1.15 \zeta_5} \right\} f^2 r_p^2 \times 10^{-3} \quad (1)$$

其中,  $f$  为频率 (GHz),  $r_p = p_{tot}/1013$ , 其中  $p_{tot}$  代表总空气压力。

对在水汽中的衰减,大气衰减

$$\gamma_w = \left\{ \frac{3.98 \eta_1 \exp[2.23(1 - r_t)]}{(f - 22.235)^2 + 9.42 \eta_1^2} g(f, 22) + \frac{11.96 \eta_1 \exp[0.7(1 - r_t)]}{(f - 183.31)^2 + 11.14 \eta_1^2} + \frac{0.081 \eta_1 \exp[6.44(1 - r_t)]}{(f - 321.226)^2 + 6.29 \eta_1^2} + \frac{3.66 \eta_1 \exp[1.6(1 - r_t)]}{(f - 325.153)^2 + 9.22 \eta_1^2} + \frac{25.37 \eta_1 \exp[1.09(1 - r_t)]}{(f - 380)^2} + \frac{17.4 \eta_1 \exp[1.46(1 - r_t)]}{(f - 448)^2} + \frac{844.6 \eta_1 \exp[0.17(1 - r_t)]}{(f - 557)^2} g(f, 557) + \right.$$

$$\frac{290\eta_1 \exp[0.41(1-r_i)]}{(f-752)^2} g(f,752) + \frac{8.3328 \times 10^4 \eta_2 \exp[(1-r_i)]}{(f-1780)^2} g(f,1780) \left. \right\} f^2 r_i^{2.5} \rho \times^{-4} \quad (2)$$

其中,  $\eta_1 = 0.955r_p r_i^{0.68} + 0.006\rho$ ;  $\eta_2 = 0.735r_p r_i^{0.5} + 0.0353r_i^4 \rho$ ;  $g(f, f_i) = 1 + \left(\frac{f-f_i}{f+f_i}\right)^2$ ;  $\rho$  是水汽密度, 单位为  $g/m^3$ 。

### 1.1.2 氧气的衰减

氧气的微波吸收谱是由分布在 50 ~ 70 GHz 区间的很多共振吸收线和 118.75 GHz 吸收线组成的<sup>[15]</sup>。在低层大气中, 压力加宽使得 50 ~ 70 GHz 区间内的吸收线相互重叠形成了一个连续吸收带, 即氧气的 60 GHz 吸收带。

传统计算氧气吸收系数的方法有 VVW 线型或 Gross 线型进行逐线积分。在该研究中运用 ITU-RP.676 建议书附录 2 有限的气象条件下的简化算法<sup>[16]</sup>, 该算法可以快速和近似地计算最高到 350 GHz 频率的无线电波在大气的衰减特性。

特征大气衰减值  $\gamma$  表达式如下:

$$\gamma = \gamma_0 + \gamma_w = 0.1820fN''(f) \text{ dB/km} \quad (3)$$

其中:  $\gamma_0$  是干燥空气条件下的特征衰减 (仅指氧气条件下, 由于大气压力造成的氮和非谐振 Debye 衰减);  $\gamma_w$  是在一定水汽密度条件下的特征衰减;  $N''(f)$  是该频率相关的复合折射率的假设部分。

$$N''(f) = \sum_i S_i F_i + N''_D(f) \quad (4)$$

线强度:

$$S_i = a_1 \times 10^{-7} p \theta^3 \exp[a_2(1-\theta)] \quad \text{对于氧气}$$

$$= b_1 \times 10^{-1} e \theta^3 \exp[b_2(1-\theta)] \quad \text{对于水汽}$$

其中  $p$  为干燥空气压力 (单位为 hPa);  $e$  为水汽压力 (单位为 hPa);  $\theta = 300T$ ,  $T$  为温度 (单位为 K)。

图 1 给出了标准大气下总的天顶衰减以及由水汽和氧气造成的衰减, 采用 ITU-RP.676 建议书所给方法计算得出, 为后续 94 GHz 毫米波雷达回波在水汽及氧气衰减订正问题上提供确切数据。

### 1.2 云雨目标衰减

前面给出了大气中氧气和水汽对雷达电磁波的衰减情况, 但是雷达探测云雨目标时还会受到这些被测目标物自身的影响, 尤其是其含水量较大时的衰减更不可忽视。本文假设雷达天线发射波束的充塞系数为 1, 当考虑云雨等水成物粒子的衰减时, 气象雷达方程可写成下面的形式<sup>[18]</sup>:

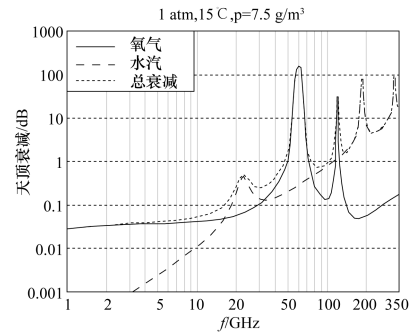


图 1 标准大气下水汽及氧气的衰减

$$p_r(R) = \frac{C}{R^2} Z_r(R) \tau(R) \quad (5)$$

式中  $R$  为雷达到被测目标物的距离,  $p_r(R)$  为雷达接收到的被测目标的回波功率,  $C$  为雷达的常数,  $Z_r(R)$  为距离  $R$  处的雷达反射率因子的真值,  $\tau(R)$  为雷达与目标之间的双程透射率, 其可表述为:

$$\tau(R) = \exp\{-2\int_0^R k(R) dR\} \quad (6)$$

式中  $k(R)$  是以 Np/m 为单位的衰减系数 ( $1 \text{ Np/m} = 4343 \text{ dB/km}$ ), 如果雷达探测目标时不考虑衰减, 则  $\tau(R) = 1$ 。公式 (9) 中的衰减系数  $k(R)$  可认为是云衰减系数  $k_c(R)$ 、雨衰减系数  $k_p(R)$  之和, 即:

$$k(R) = k_c(R) + k_p(R) \quad (7)$$

公式 (8) 中雷达反射率因子的计算则按照下面的思路进行<sup>[19]</sup>:

① 对于小的球形云雨粒子 (瑞利近似条件下: 粒子直径远小于波长)

$$Z = \int_0^{D_{\max}} N(D) D^6 dD \quad (8)$$

式中  $D_{\max}$  为最大粒子的直径,  $D$  为粒子的直径,  $N(D)$  为粒子的谱。

② 对于大的球形以及非球形粒子:

$$Z_e = \frac{\lambda^4}{\pi^5 |K|^2} \int_0^{D_{\max}} N(D) \sigma(D) dD \quad (9)$$

雷达实际测量的雷达反射率因子为:

$$Z_M(R) = \frac{R^2}{C} P_r(R) \quad (10)$$

由以上分析可知实测的雷达反射率因子  $Z_M(R)$  与真实的雷达反射率因子  $Z_r(R)$  之间的关系为:

$$Z_M(R) = Z_r(R) \tau(R) \quad (11)$$

因此通过雷达回波的衰减订正即可由雷达回波强度的测量值  $Z_M(R)$  计算得到真实值  $Z_r(R)$ 。

## 2 毫米波雷达探测气象目标的衰减订正方案

### 2.1 针对云雨目标的衰减订正

本文研究的逐库订正法实现步骤如下<sup>[12,20]</sup>：

由雷达回波强度的测量值求解其实际值,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。在完成前  $i$  个库的衰减订正之后,由前  $i$  个库的结果计算  $\tau_i$ ,为下一个  $i+1$  个库的衰减订正做准备,此法为逐库法。

在雷达实际测量中,雷达测量资料都是用积分器沿径向等距积分采样而得到的离散值,即每个值都是与确定的径向距离段(即库)相对应。记库分辨率为  $\Delta R$ ,雷达到第  $i$  个库的中心距离为  $(i-1/2) \cdot \Delta R$ ,对应的雷达测量资料为  $Z_M(i)$ ,它的第  $i$  个库的积分平均值为:

$$Z_M(i) = \frac{1}{\Delta R} \int_{(i-1)\Delta R}^{i\Delta R} Z_M(R) dR \quad (12)$$

离散形式为:

$$Z_M(i) = Z_i(i) \tau_i \quad (13)$$

对于离散数据来说,积分只能用求和来近似。由上式综合可得:

$$\tau_i = \tau(i\Delta R) = \begin{cases} 1, & i = 0 \\ (-2 \sum_{j=1}^i a Z_r^b(j) \Delta R), & i \geq 1 \end{cases} \quad (14)$$

离散数据,积分换算求和计算可得雷达与距离  $R$  处之间的云或云区的双程透过率。

因此,对于  $i \geq 1$ ,

$$\tau_i = \tau_{i-1} \exp\{-2aZ_r^b \Delta R\} \quad (15)$$

代入可得:

$$Z_r(i) = [Z_M(i)/\tau_{i-1}] \exp\{aZ_r^b \Delta R\} \quad (16)$$

逐库订正可以采用以下近似算法:

$$Z_r(i) = [Z_M(i)/\tau_{i-1}] \exp\{a[Z_M(i)/\tau_{i-1}]^b \Delta R\} \quad (17)$$

其中  $Z_M$  为实测值, $Z_r$  为衰减订正后的实际值。

这种算法提高了订正的稳定性,又有较高的计算效率。防止过量订正溢出是有效的。缺点是仍然不能解决衰减订正问题中固有的不稳定的特征。

本文主要是对 Chilbolton 观测场 3 mm 雷达一次降水云系观测结果进行衰减订正研究。伽利略测云雷达是以 60 m 为一个库,可以观测到最高高度为 14.64 km 的共计 244 个库的雷达反射率因子。244 个库在每隔 30 s 测得一组数据,经过 24 个小时,实际的探测结果为 244×2880 个不同的数据。

由参考文献[15]可知,给出的  $k-Z$  关系系数可

用于 3.2 mm(94 GHz)和 8.6 mm 机载毫米波雷达衰减订正的计算参考。另外本文计算得到的毫米波雷达探测非降水云的  $Z-M$  关系,对于雷达探测资料的气象释义也具有一定的参考价值。

在逐库订正的过程中主要通过 matlab 编程,运用衰减系数  $k$  与反射率因子  $Z_r$  之间的经验关系选择合适的  $a, b$  系数对降水云进行逐库订正。主要的编程思想是先对某一时刻的 244 个库进行衰减订正,由逐库订正方案公式(17)可知,计算第  $i+1$  个库的订正结果,需要前  $i$  个库的结果来计算第  $i+1$  个库的双程透过率,由此完成逐库的订正,然后再运用 for 循环对不同的时刻进行衰减订正,直到 2880 个时刻的全部数据订正结束为止。注意到  $a, b$  系数的选取对于不同的气象目标有不同的取值,因此本文在逐库订正方案的基础之上进一步提出分级逐库订正方案对这次降水云系的衰减订正,因为利用衰减订正算法对毫米波回波强度进行订正时,如果仅使用一组衰减系数( $a, b$ )值,很难兼顾到回波区和强回波区的不同衰减情况,比如在弱回波订正较好的情况下,强回波订正不足,强回波订正较好的时候,弱回波订正过量。基于这种情况,将回波强度划分成 5 个不同的等级,读取的基数据反射率因子按照分贝形式存储,具体取值如文献[21]中所示。

第一区间为弱云区:

$$D_1: Z < -20 \text{ dBz} (0.01 \text{ mm}^6/\text{mm}^3),$$

第二区间为厚云区:

$$D_2: -20 \text{ dBz} (0.01 \text{ mm}^6/\text{mm}^3) \leq Z \leq 0 \text{ dBz} (1 \text{ mm}^6/\text{mm}^3), (a, b) = (1.982 \times 10^{-6}, 1.13)$$

第三区间为云中液水区:

$$D_3: 0 \text{ dBz} (1 \text{ mm}^6/\text{mm}^3) \leq Z \leq 15 \text{ dBz} (31.623 \text{ mm}^6/\text{mm}^3), (a, b) = (1.280 \times 10^{-6}, 1.105)$$

第四区间为弱降水区:

$$D_4: 15 \text{ dBz} (31.623 \text{ mm}^6/\text{mm}^3) \leq Z \leq 25 \text{ dBz} (316.228 \text{ mm}^6/\text{mm}^3), (a, b) = (1.753 \times 10^{-6}, 1.075)$$

第五区间为显著降水区:

$$D_5: z > 25 \text{ dBz} (316.228 \text{ mm}^6/\text{mm}^3) (a, b) = (1.304 \times 10^{-7}, 1.040)$$

对于不同的区间采用不同的( $a, b$ )组合。在进行降水云逐库衰减订正时首先对同一时间点上 244 个数据完成衰减订正,其中每个数据根据取值范围选定不同的( $a, b$ )组合来完成订正,进行下一时刻上每个库的订正同样根据其值归属的区间选择不同的( $a, b$ )组合,直到完成所有的 2880 个不同时刻的衰减订正。

逐库订正算法可以提高订正计算的稳定性,又有较高的计算效率,但在衰减较小,计算稳定时订正不够充分。而分级逐库算法可以在逐库算法的基础上,提高稳定性及计算效率,具有更广泛的适用性。

### 2.2 针对氧气和水汽的衰减订正方案

当毫米波雷达垂直指向天空时,由于传播路径中包含了大气气体(晴空大气中为氮气(N<sub>2</sub>),氧气(O<sub>2</sub>),二氧化碳(CO<sub>2</sub>),臭氧(O<sub>3</sub>),水汽(H<sub>2</sub>O)等气体分子组成,还包括了SO<sub>2</sub>,NO<sub>2</sub>等污染物气体),需要注意在1~350 GHz 频率(微波波段)下,大气的衰减主要由氧气和水汽这两种气体造成。对于云雨天气情况,还需考虑云和降水的衰减作用<sup>[22]</sup>,即总的衰减系数  $k_e$  为:

$$k_e = k_{O_2} + k_{H_2O} + k_c + k_p \quad (21)$$

式中, $k_{O_2}, k_{H_2O}, k_c, k_p$  分别为大气中的氧气、水汽、云以及降水的体积衰减系数,单位为 dB/km(1 dB · km<sup>-1</sup> = 0.2303 Np · km<sup>-1</sup>)。

在大气中的衰减订正方案中,依据水汽及氧气的吸收特性得出 94 GHz 毫米波雷达探测时所对应的吸收系数。在不考虑云和降水的衰减的情况下,可以得出氧气和水汽的吸收系数,然后依据式(6)得出雷达的双程透过率  $\tau(R)$ 。 $\tau(R)$  是与距离有关的函数,此时的距离为库分辨率。可得每个库的双程透过率  $\tau(R)$ 。然后依据式(11)可得氧气和水汽衰减订正后的结果,此时公式中的观测值  $Z_M$  是进行过云雨衰减订正后的实际值,完成二次订正。

## 3 Chilbolton 观测场 3mm 雷达一次观测的衰减订正研究

### 3.1 伽利略雷达简介

位于英国 Chilbolton 的 94 GHz 伽利略云雷达是收发天线分置的结构,可以连续运行工作。它是由伽利略公司、卢瑟福阿普尔顿实验室和雷丁大学共同为欧洲航天署开发,实物如图 2 所示<sup>[22]</sup>,表 1 为该雷达的性能参数。



图 2 英国 94GHz 伽利略云雷达

表 1 英国 94 GHz 伽利略云雷达性能参数

参数	参数值
频率	94.00 GHz
天线直径	0.46 m
峰值功率	1.6 kW
脉冲宽度	0.5
脉冲重复频率(PRF)	6250 Hz
系统噪声指数	10 dB
波束宽度	0.5
距离分辨率	60 m
每公里噪声系数	-36.0 dBz

### 3.2 雷达回波图的实例分析

图 3 为 2008 年 1 月 14 号降水过程中 2880 个时刻不同高度上测量的雷达反射率因子。首先利用逐库衰减订正以及分级逐库衰减订正算法将 244 × 2880 个测量值全部进行订正,订正结果如图 4 所示。图 4(a)订正(a,b)值选取为  $a = 1.280 \times 10^{-6}, b = 1.105$ 。由第 3 部分的逐库订正方案可知,计算第  $i+1$  个库的订正结果,需要前  $i$  个库的结果来计算第  $i+1$  个库的双程透过率,因此可以看出订正后的结果相比于图 3 回波面积减少,即出现了数据缺失的现象。图 4(b)是根据第 3 部分的分级逐库订正方案把 5 个区间的不同阈值划分,雷达反射率因子根据不同的实测值选取不同的阈值范围,即根据目标物的类型选择不同的(a,b)进行衰减订正。

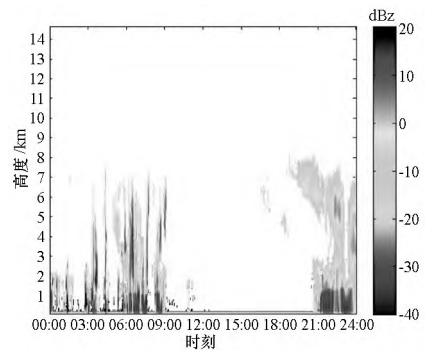
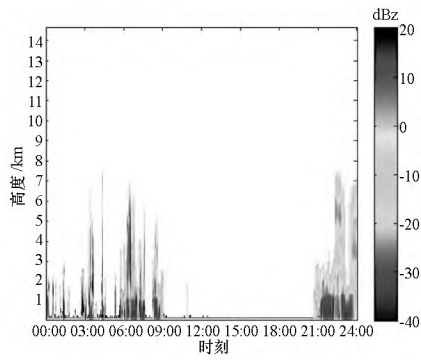


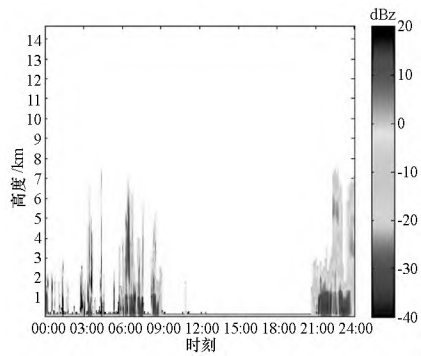
图 3 94GHzGalileo 雷达探测的雷达反射率因子

图 5 显示了分级逐库订正与逐库订正的差值。可以看出分级逐库的订正效果要强于逐库订正,两种方法对比后发现最大相对误差为 10.97%,平均相对误差为 3.03%,最小相对误差为  $(3.63 \times 10^{-4})\%$ 。除此之外分级逐库针对不同的气象目标物采用了不同的衰减系数订正公式(a,b)值,因此更加符合毫米波雷达实际探测的情况。

但是也有文献指出(a,b)可以选择其它值<sup>[21]</sup>,本文讨论逐库订正时的另一种衰减系数取值,图 6

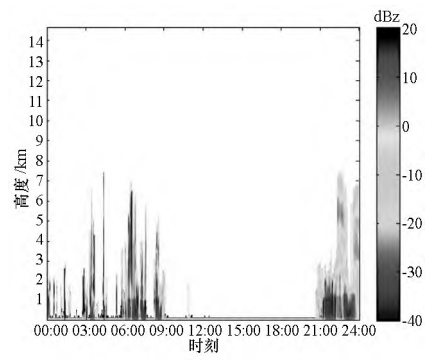


(a) 逐库法衰减订正

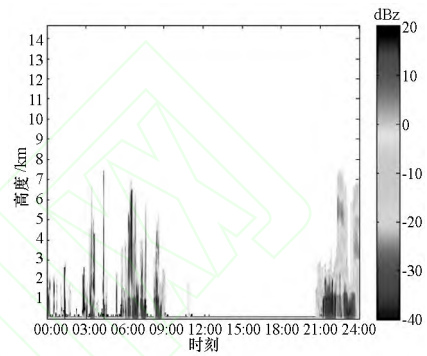


(b) 分级逐库法订正

图4 逐库法以及分级逐库法衰减订正后的反射率因子



(a) 逐库法衰减订正



(b) 分级逐库法订正

图6 逐库法以及分级逐库法衰减订正后的反射率因子

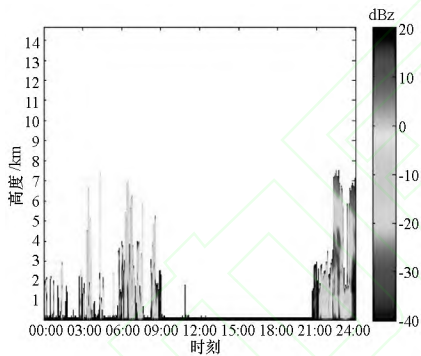


图5 分级逐库订正与逐库订正的差值

正的差别。

图7表明分级逐库的订正效果要强于逐库订正,而且对比图5的结果可知,此时衰减系数取值下订正效果要更强。由于此次订正的结果中出现了过量订正的问题,因此后面讨论大气中氧气和水汽衰减订正问题时仅在图4分级逐库订正的基础上进行二次订正,结果如图8所示。

为衰减订正的结果。

图6(a)采用 $a, b$ 系数为 $a = 9.405 \times 10^{-6}, b = 1.103$ 时的逐库衰减订正图像,图6(b)为分级逐库订正,不同区间的 $a, b$ 的取值如下:

$$D_2 : (a, b) = (1.982 \times 10^{-5}, 1.13);$$

$$D_3 : (a, b) = (9.405 \times 10^{-6}, 1.103);$$

$$D_4 : (a, b) = (7.753 \times 10^{-6}, 1.071);$$

$$D_5 : (a, b) = (1.257 \times 10^{-6}, 1.047)$$

图6表明该衰减系数取值下的衰减订正效果要优于图4的衰减订正,原因在于图6的衰减系数更加适合于强对流天气下的降水,但是该取值也存在不少的数据过量订正问题,因此对于衰减订正而言, $(a, b)$ 的取值非常重要。图7为分级逐库与逐库订

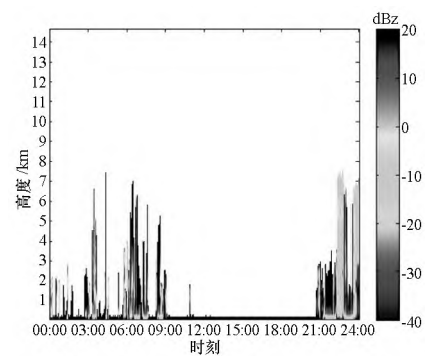
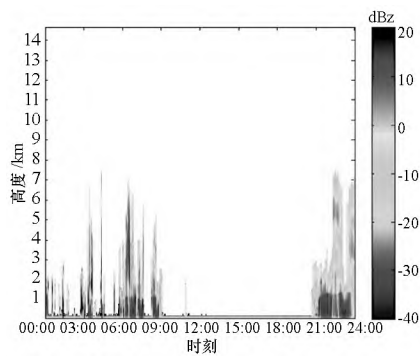
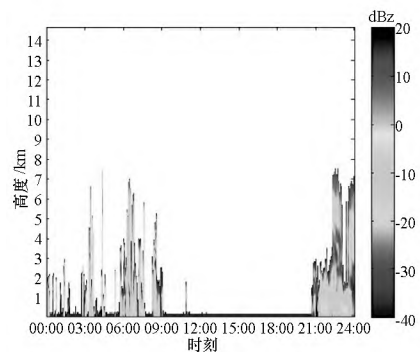


图7 分级逐库订正与逐库订正的差值

图8(a)为利用分级逐库算法对云雨参数订正后进行的氧气和水汽二次衰减订正结果。由于大气气体的衰减主要是由氧气与水汽造成的,根据图1所示的衰减系数结果可得94 GHz频率下氧气及水汽分子的衰减系数值,在求得每个库的双程透过率后计算得到反射率因子的实际值。由于强降水时的



(a) 分级逐库后大气气体衰减的二次订正



(b) 分级逐库后大气衰减订正与分级逐库的差值

图 8 分级逐库后的大气衰减订正及大气衰减订正差值

云雨目标对毫米波的衰减远大于大气中气体的衰减,因此图 8(a) 相比于图 4(b) 没有明显的差别,图 8(b) 为大气衰减二次订正后与分级逐库订正的差值,由图看出其订正强度不大,订正效果不明显,但在离地面较近的区域内,氧气与水汽的订正效果比较明显,其原因为地面水分的蒸发及氧气浓度较高所致。最大相对误差为 1.22%,平均相对误差为 1.23%,最小相对误差为 1.22%,由此可见,大气气体衰减订正在毫米波测云雷达反演中应该予以考虑。

## 4 结论

云是影响天气变化的重要因素,为此,毫米波测云雷达的研究已引起了国内外广泛关注。对于毫米波测云雷达来说,为了精确反演云内的宏微观物理特性,对测量的回波强度进行衰减订正具有重要的研究意义。本文利用雷达气象方程和  $k-Z$  关系,通过英国 Chilbolton 观测场的 94 GHz 伽利略云雷达 2008 年 1 月 14 日的一次降水云实测结果对比了逐库订正算法与分级逐库算法的差别,结果表明两者之间的最大相对误差为 10.97%,平均相对误差为 3.03%,最小相对误差为  $(3.63 \times 10^{-4})\%$ ,分级逐库订正效果更明显。之后探讨了不同衰减系数 ( $a, b$ )

取值对于订正结果的影响,结果表明衰减系数取值较大时会出现衰减订正过量的问题。在分级逐库算法的基础上进一步讨论了大气气体中氧气和水汽的衰减订正,结果表明最大相对误差为 1.22%,平均相对误差为 1.23%,最小相对误差为 1.22%。综合以上分析认为考虑大气气体衰减的分级逐库订正方法的订正效果最明显,适合于毫米波测云雷达探测云目标时的订正,大气中氧气和水汽在离地面较低的区域订正明显,在毫米波测云雷达中应该予以考虑。本文的订正思路考虑了毫米波测云雷达中最复杂的一种情况,应用范围广泛。

致谢 感谢 Rutherford Appleton Laboratory 为本文研究工作提供的测试数据。同时感谢本实验室老师同学对本文的帮助。

## 参 考 文 献

- [1] 邱金恒,吕达仁,陈洪滨,等. 现代大气物理学研究进展. 大气科学[J],2003,2(74):628-652  
Qiu J H, Lu D R, Chen H B, et al. Modern research progresses in atmospheric physics [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2003, 2(74): 628-652
- [2] 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  
Huang F, Chen H B, Wang Z H. Analysis of the atmospheric attenuation at 37GHz and 94GHz [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2003, 18(5): 269-275
- [3] 赵少华,张峰,李自杰,等. 雷达遥感在环境保护工作中的应用[J]. 微波学报,2014,30(1):90-96  
Zhao S H, Zhang F, Li Z J, et al. Summary of radar remote sensing application in environmental protection [J]. Journal of Microwaves, 2014, 30(1): 90-96
- [4] 王振会. TRMM 卫星测雨雷达及其应用研究综述[J]. 气象科学,2001,21(4):491-500  
Wang Z H. A brief introduction to TRMM precipitation radar and a summary on the study of its application [J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2001, 21(4): 491-500
- [5] 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[J]. 地球科学进展,2009,24(4):383-391  
Zhong L Z, Liu L P, Ge R S. Characteristics about the millimeter-wavelength radar and its status and prospect in and abroad [J]. Advances in Earth Science, 2009, 24(4): 383-391
- [6] Wang J H, Ge J X, Wei M. Theoretical study on single-scattering properties of ice particles of different orientation

- at 94 GHz [J]. Progress in Electromagnetics Research M, 2014, 36:39-46
- [7] 王金虎,葛俊祥,祝潇,等. 粒子取向以及空气含量对卷云雷达反射率因子的影响分析[J]. 红外与毫米波学报,2015,35(1):78-86  
Wang J H, Ge J X, Zhu X, et al. Effect of orientation and air content of ice particles on radar reflectivity factor[J]. J Infrared Millim Waves, 2015, 35(1):78-86
- [8] 高仲辉,黄兴玉,魏鸣,等. 机载 W 波段双线偏振测云雷达回波分析[J]. 雷达科学与技术,2014,12(5):561-568  
Gao Z H, Huang X Y, Wei M, et al. Analysis of cloud echo observed by airborne W-band dual-linear polarization cloud radar[J]. Radar Science and Technology, 2014, 12(5):561-568
- [9] 马冬冬,金虎,郭新民. 毫米波空间传播"雨衰"的计算[J]. 舰船电子工程,2010,30(7):101-102  
Ma D D, Jin H, Guo X M. Rain attenuation calculation of millimeter wave transmission in the space[J]. Ship Electronic Engineering, 2010, 30(7):101-102
- [10] Hitschfeld W, Bordan J. Errors inherent in the radar measurement of rainfall at attenuating wavelengths[J]. Journal of Meteorology, 1954, 11:58-67
- [11] Meneghini R. Rain rate estimates for an attenuating radar [J]. Radio Science, 1978, 13:459-470
- [12] 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[J]. 高原气象,2001,20(1):1-5  
Zhang P C, Wang Z H. A study on algorithm to make attenuation correction to radar observations of radar reflectivity factor (I): theoretical analysis[J]. Plateau Meteorology, 2001, 20(1):1-5
- [13] 王振会,张培昌. 小旋转椭球粒子群的微波衰减系数与雷达反射率因子之间的关系[J]. 气象学报,2000,58(1):123-128  
Wang Z H, Zhang P C. Relationship between attenuation of microwaves by poly disperse small spheroid particles and their radar reflectivity factor [J]. Acta Meteorologica sinica, 2000, 58(1):123-128
- [14] 王振会,纪雷,黄兴友,等. 机载 W 波段测云雷达回波强度衰减订正仿真研究[J]. 高原气象,2011,30(2):437-444  
Wang Z H, Ji L, Huang X Y, et al. Simulation study on the attenuation correction to reflectivity factor observed with an air-borne W-band cloud radar[J]. Plateau Meteorology, 2011, 30(2):437-444
- [15] 王振会,滕煦,纪雷,等. 球形粒子毫米波 k-Z 关系研究[J]. 气象学报,2011,69(6):1020-1028  
Wang Z H, Teng X, Ji L, et al. A study of the relationship between the attenuation coefficient and radar reflectivity factor for spherical particles in clouds at millimeter wavelengths [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2011, 69(6):1020-1028
- [16] 国际电信联盟. ITU-R P. 676-10 建议书[S]. 2013. 1-24  
International Telecommunication Union. ITU-RP. 676-10 proposal[S]. 2013. 1-24
- [17] 张培昌,王振会. 大气微波遥感基础[M]. 北京:气象出版社,2003. 300-303  
Zhang P C, Wang Z H. Atmospheric Microwave Remote Sensing[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2003. 300-303
- [18] 张培昌,杜秉玉,戴铁培. 雷达气象学[M]. 北京:气象出版社,2001. 36-40,82-85  
Zhang P C, Du B Y, Dai T P. Radar Meteorology [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2001. 36-40, 82-85
- [19] 纪雷. 机载雷达探测资料处理仿真平台的设计与模拟实验[D]. 南京:南京信息工程大学,2011. 1-65  
Ji L. Software design and numerical experiments for simulating airborne radar detection and data processing [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2011. 1-65
- [20] 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  
Wang Z H, Zhang P C. A study on the algorithm making attenuation correction to observations of radar reflectivity factor(II): numerical simulations and a case study [J]. Plateau Meteorology, 2001, 20(2):115-120
- [21] 樊雅文. 云雷达资料订正及应用研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2012. 1-63  
Fan Y W. The correction and application studying of cloud radar data [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2012. 1-63
- [22] 黄芳. 37GHz 和 94GHz 的大气微波衰减计算分析[D]. 南京:南京气象学院,2003. 1-51  
Huang F. A study of characteristics of atmospheric attenuation at 37GHz and 94GHz [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2003. 1-51
- 冯永会** 女,1990年生,硕士生,主要研究方向为气象探测系统软件开发。  
E-mail:fyh1206976673@126.com
- 王金虎** 男,1987年生,博士生,主要从事毫米波雷达系统、粒子散射理论计算与测量以及微波遥感的研究。
- 葛俊祥** 男,1960年生,博士生导师,主要从事雷达系统、微波毫米波与天线技术、电磁散射与绕射理论的研究。  
E-mail:jxge@nuist.edu.cn