

文章编号: 1007-4619 (2003)01-0031-06

小旋转椭球粒子群降水区雷达回波衰减订正模拟实验

王振会¹, 王庆安², 张培昌¹, 官莉¹

(1. 南京气象学院 电子工程系, 南京 210044; 2. 南京大学 大气科学系, 南京 210000)

摘要: 计算了降水区雨滴形状和雨滴群旋转轴相对于雷达波偏振方向不同取向情况下的 $Z-I$ 关系和 $k-I$ 关系, 并用 5 种衰减订正算法进行雷达回波衰减订正效果研究。结果表明, 在已知小旋转椭球粒子群取向的情况下, 雨强越大, 降水区回波衰减的可订正厚度越小; 雨强 80mm/h 均匀分布时, 使用 R^2 或 R^3 订正法, 5.6cm 雷达回波可订正厚度在 120km 以上, 3.2cm 雷达可订正厚度为 50km 左右; 雷达遥感降水时, 有必要正确估计小旋转椭球粒子群的取向, 以便选用正确的 $k-Z$ 关系, 提高衰减订正效果。

关键词: 小旋转椭球粒子群; 降水遥感; 雷达反射率因子; 衰减订正

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A

1 引言

雷达波在降水区内受到衰减^[1]。因此, 在使用雷达遥感降水区时, 衰减作用造成回波面积减小, 在雨区远处降水的雷达观测值小于实际雨强值。因此, 在用 $Z-I$ 关系把雷达反射率因子换算为雨强之前, 必须进行 Z 的衰减订正。雨滴在下落过程中产生形变, 且雨滴越大形变越大。这早已在理论上和实践上都得到了证实^[2]。非球形雨滴具有与同体积球形雨滴不同的微波后向散射^[3]和衰减特征^[4]。作者已经建立了适合于小旋转椭球雨滴群降水区的、形如 $k = aZ^b$ 的 $k-Z$ 关系^[5]。Hitschfeld 和 Bordan 给出在已知 $k = aZ^b$ 条件下 Z 的衰减订正解析表达式^[6]。为了提高订正计算稳定性, Meneghini 建议使用低阶迭代^[6]。但是, 合适的迭代阶数与回波强度、回波分布特征、库分辨率、各种误差等多因素有关, 在实际中难以确定, 且迭代计算效率较低。作者提出了逐库订正及其近似算法和稳定性判据^[7,8], 虽然仍不能解决衰减订正问题中固有的“不稳定”特征, 但对于提高订正计算效率、防止过量订正溢出, 是有效的。

该文将利用上述各种算法研究雷达遥感椭球形雨滴降水区时回波衰减的可订正性和小旋转椭球粒

子群旋转轴取向对订正效果的影响, 指出在实际应用中正确判断小旋转椭球粒子群旋转轴取向的重要性。

2 雷达气象方程及积分采样资料的衰减订正算法

假设雷达天线发射波束的充塞系数为 1, 考虑雨对雷达波的衰减, 则由雷达气象方程^[1]可得在距离 R 处的雷达反射率因子(即雷达回波强度)的测量值 $Z_M(R)$ 与真实值 $Z_r(R)$ 之间的关系为^[7]

$$Z_M(R) = Z_r(R) \tau(R) \quad (1)$$

其中 R 是距离, $\tau(R)$ 是在雷达与距离 R 之间雨区的双程透过率

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

$k(R)$ 是以 Np/m 为单位的雨区衰减系数, $1 Np/m = 4343 dB/km$ 。雷达回波衰减订正, 就是由雷达回波强度的测量值 Z_M 计算得到真实值。

衰减系数 k 与雷达反射率因子 Z_r 之间的经验关系^[5]可表示成

$$k = aZ_r^b \quad (3)$$

推导计算了球形和旋转椭球形粒子群降水区内系数与波长的关系^[5]。在常用的 $\lambda = 3.2cm, 5.6cm$ 和 $10cm$ 处, a 和 b 的值由表 1 给出。

收稿日期: 2001-04-28; 修订日期: 2001-07-06

基金项目: 国家自然科学基金项目“复杂形状和相态降水粒子微波极化散射实验和理论研究”资助。编号: 49875007。 <http://www.cnki.net>

作者简介: 王振会(1955—), 男, 教授, 毕业于南京气象学院, 主要从事大气遥感探测尤其是雷达、卫星遥感信息处理和应用研究, 已发表论文 40 多篇、出版专著 1 部。

表 1 在用 $k = a * 10^{-9} Z_r^b$ 关系中系数 a, b 的值Table 1 The values of the coefficients a and b in $k = a * 10^{-9} Z_r^b$ for spheroidal raindrops at the specified wavelengths

粒子形状	情况*	$\lambda=3.2\text{cm}$		$\lambda=5.6\text{cm}$		$\lambda=10\text{cm}$	
		a	b	a	b	a	b
球		3.0199	0.8771	0.9381	0.8749	0.2940	0.8645
扁椭球	1	2.9703	0.8739	0.9195	0.8709	0.2893	0.8601
	2	3.1400	0.8820	0.9734	0.8807	0.3033	0.8710
	3	3.0149	0.8762	0.9335	0.8736	0.2936	0.8631
长椭球	4	2.9902	0.8745	0.9262	0.8716	0.2912	0.8608
	5	3.0653	0.8794	0.9551	0.8776	0.2985	0.8677

* 情况 1=粒子群旋转轴在空间一致铅直取向, 雷达水平发射水平偏振波; 情况 2=同情况 1 但雷达水平发射垂直偏振波; 情况 3=粒子群旋转轴在空间内均匀随机取向; 情况 4=粒子群旋转轴在水平面内均匀随机取向, 雷达水平发射水平偏振波; 情况 5=同情况 4 但雷达水平发射垂直偏振波。 k 的单位为 $\text{Np} \cdot \text{m}^{-1}$, Z_r 的单位为 $\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}$

在雷达实际测量中, 雷达测量资料是用视频积分器沿径向等距积分采样而得到的离散值^[9], 即每个值与确定的径向距离段(称为库)对应。记库长度为 ΔR , 雷达到第 i 个库的中心距离为 $(i-1/2)\Delta R$, 对应的雷达测量资料为 $Z_M(i)$, 它是第 i 个库内的积分平均值。文献[7, 8]由式(1)~(3)及文献[6]导出了由雷达测量资料 $Z_M(i)$ 估计相应真实值 $Z_r(i)$ (即衰减订正)的以下几种算法。

Hitschfeld 和 Bordan 解析法(HB):

$$Z_r(i) = Z_M(i) \left[1 - ab Z_M^b(i) \Delta R - 2ab \sum_{j=1}^{i-1} Z_M^b(j) \Delta R \right]^{1/b} \quad (4)$$

逐库订正法(R^3):

$$Z_r(i) = [Z_M(i) / \tau_{i-1}] \exp \{ a Z_r^b(i) \Delta R \} \quad (5)$$

$$\tau_i = \tau(i \Delta R) = \begin{cases} 1, & i = 1 \\ \exp \left\{ -2 \sum_{j=1}^i a Z_r^b(j) \Delta R \right\}, & i \geq 1 \end{cases} \quad (6)$$

逐库订正的近似算法(R^1):

$$Z_r(i) = [Z_M(i) / \tau_{i-1}] \exp \{ a Z_M^b(i) \Delta R \} \quad (7)$$

逐库订正的近似算法(R^2):

$$Z_r(i) = [Z_M(i) / \tau_{i-1}] \exp \{ a [Z_M(i) / \tau_{i-1}]^b \Delta R \} \quad (8)$$

$$i = 1, 2, \dots$$

迭代算法(ik):

$${}^k Z_r(R) = Z_M(R) \exp \left\{ 2 \int_0^R a^{k-1} \cdot Z_r^b(R) dR \right\}$$

或

$${}^k Z_r(i) = Z_M(i) \exp \left\{ a^{k-1} \cdot Z_r^b(i) \Delta R + 2 \sum_{j=1}^{i-1} a^{k-1} \cdot Z_r^b(j) \Delta R \right\} \quad (9)$$

其中 ${}^0 Z_r(R) = Z_M(R)$ 。迭代法自我约束^[7, 8]停止迭代时的结果记为 sn , n 为迭代阶数。

为了了解旋转椭球粒子群在不同取向情况下降水区回波衰减订正的效果, 并了解订正方法对订正效果的影响, 设雷达反射率因子真值在径向上的分布为已知常数 ζ , 即 $Z_r(R) \equiv \zeta$, 或雨强真值在径向上的分布为已知常数 η , 即 $I_r(R) \equiv \eta$, 进行已知小旋转椭球粒子群旋转轴取向时的衰减订正数值实验。

3 小旋转椭球粒子群降水区的 $Z-I$ 关系

在已有研究^[5]的基础上, 进行小旋转椭球雨滴群降水情况下的 $Z-I$ 关系计算, 得到 $Z = \alpha * I^\beta$ 中的系数 α 和 β 的值, 在微波波段, α, β 随波长的变化可忽略, 结果如表 2 给出。计算中, 假设雨滴呈液态, 温度为 273K, 雨滴等效直径最大值为 1cm, 雨滴谱服从以下 Gamma 分布函数形式

$$N(D_e) = C_1 D_e^\mu \exp \{ -(3.67 + \mu) D_e / D_0 \} \quad (10)$$

其中 C_1, μ 和 D_0 为雨滴谱参数, 依照

$$0.00015 < C_1 < 0.15; -1 < \mu < 4; 0.05 < D_0 < 0.25$$

各自按正态分布随机取值, 为提高统计量的代表性, 取样达 1330 次, $\ln Z - \ln I$ 线性相关系数 R^2 也列入表 2。把 $Z = \alpha * I^\beta$ 代入式(3)得到形如 $k = A * I^B$ 的 $k-I$ 关系。表 2 中还给出系数 A, B 的值。

由表 2 可见, 在相同雨强的情况下, 水平发射的雷达波当其偏振方向与雨区内旋转椭球群长轴方向平行时受到的衰减, 大于其偏振方向与旋转椭球短轴方向平行时受到的衰减。扁旋转椭球的 3 种情况可分别代表给定雨强 η 时衰减强、弱、中的 3 种情况。

既然 $Z-I$ 关系与雨滴形状和雨滴群旋转轴相对于雷达波偏振方向的取向有关, 在用雷达反射率因子估计雨强时, 就需要已知雨滴形状和雨滴群旋转轴相对于雷达波偏振方向的取向。

表 2 在波长 3.2—10cm 范围内 $Z = \alpha * I^\beta$ 和 $k = A * 10^{-9} I^B$ 关系中系数 α 、 β 、 A 、 B 的值及 Z - I 相关系数 R^2

Table 2 The values of the coefficients α , β , A and B in $Z = \alpha * I^\beta$ and $k = A * 10^{-9} I^B$ for spheroidal raindrops at the specified wavelengths and the coefficient of correlation, R^2 , between Z and I .

粒子形状	情况*	$\lambda = 3.2-10\text{cm}$			$\lambda = 3.2\text{cm}$		$\lambda = 5.6\text{cm}$		$\lambda = 10\text{cm}$	
		α	β	R^2	A	B	A	B	A	B
球		781.01	1.1016	0.9851	1040.24	0.9662	318.45	0.9638	93.12	0.9523
扁椭球	1	901.19	1.1095	0.9836	1135.05	0.9696	344.27	0.9663	100.65	0.9543
	2	613.07	1.0901	0.9874	903.79	0.9615	277.49	0.9601	81.24	0.9495
	3	801.34	1.1039	0.9847	1055.84	0.9672	321.28	0.9644	94.20	0.9528
长椭球	4	861.58	1.1080	0.9839	1103.10	0.9689	335.05	0.9657	97.93	0.9538
	5	692.67	1.0959	0.9862	964.79	0.9637	297.09	0.9618	87.03	0.9509

* 同表 1。

Z , I 和 k 的单位分别为 $\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}$, $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $\text{Np} \cdot \text{m}^{-1}$

4 小旋转椭球粒子群取向为已知情况下降水区回波衰减订正的数值实验与效果分析

由表 1 可见,扁旋转椭球的 3 种情况可分别代表给定雷达反射率因子 ζ 时衰减弱、强、中的 3 种情况。设 $Z_r(R) = 10^5 \text{mm}^6 \text{m}^{-3}$ (50dB), 图 1(a), (b) 和 (c) 分别给出扁旋转椭球粒子群 3 种情况下积分取样观测资料 $Z_m(R)$ 以及用各种订正方法对其订正所得到的结果。如图 1 所示, 由于强烈的电磁波衰减, $Z_m(R)$ 随着距离的增加而很快减小、偏离 $Z_r(R)$, 可探测厚度(距离)仅有几公里。经用方法 $R1$ 订正后, 在大约 60km 范围内偏离小于 10%。经 $R2$ 订正后, 可使“偏差小于 10%”的厚度达 120km。迭代法订正效果如图 1 中曲线 $i1, i5, \dots, s \times \times$ 表示, 低阶时距离稍远则订正不足, 随着迭代阶数增加, 订正后回波强度逐渐趋于真值 $Z_r(R)$, 可订正厚度逐渐加大。 $HB, s \times \times$ 和 $R3$ 能进一步增加可订正厚度, 但都在最后表现出过量订正, 这是它们的不足。由图 1 还可见, 对于指定的一种订正方法, 如 $R3$, 在粒子群旋转轴一致铅直取向、雷达水平发射垂直偏振波(即情况 2)时, 可订正厚度相对于另两种情况(即情况 1 和 3)而言较小。按表 2 的 Z - I 关系, 3 种情况的雨滴分别为 69.7, 107.1 和 79.2 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。所以, 雨强越大, 可订正厚度越小。

图 2(a), (b) 和 (c) 分别给出雨强 $I_r(R) = 80 \text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时扁旋转椭球粒子群 3 种情况下积分取样观测资料的各种订正方法的订正结果。图 2 中各曲线的含义同图 1, 各种订正方法的订正效果也具有与图 1 相同的特点。由于 3 种情况可分别对应给定雨强 ζ 时衰减强、弱、中的 3 种情况, 可见, 各种订正方法的

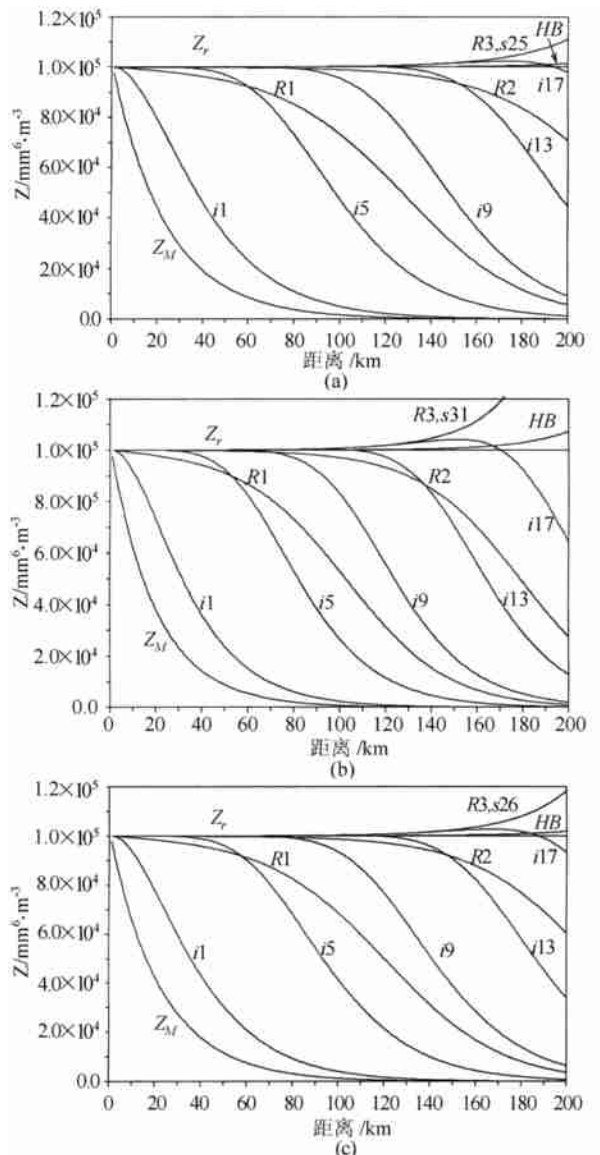


图 1 $Z_r(R) = 10^5 \text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}$ (50dB) 时, 扁椭球群 3 种情况下积分取样观测资料的各种订正方法的订正结果 (a) 情况 1; (b) 情况 2; (c) 情况 3

Fig. 1 Correction results from different algorithms of observed reflectivity factor as compared with the truth, which is supposed a constant of $10^5 \text{mm}^6 \text{m}^{-3}$ (50dB)

可订正厚度在图 2(a)中比在图 2(b)中小。例如, R_2 , 在图 2(a)中的可订正厚度为约 150km, 在图 2(b)中则达 200km。按表 2 的 $Z-I$ 关系, 3 种情况的雷达反射率因子分别为 50.7, 48.6 和 50.0dB。

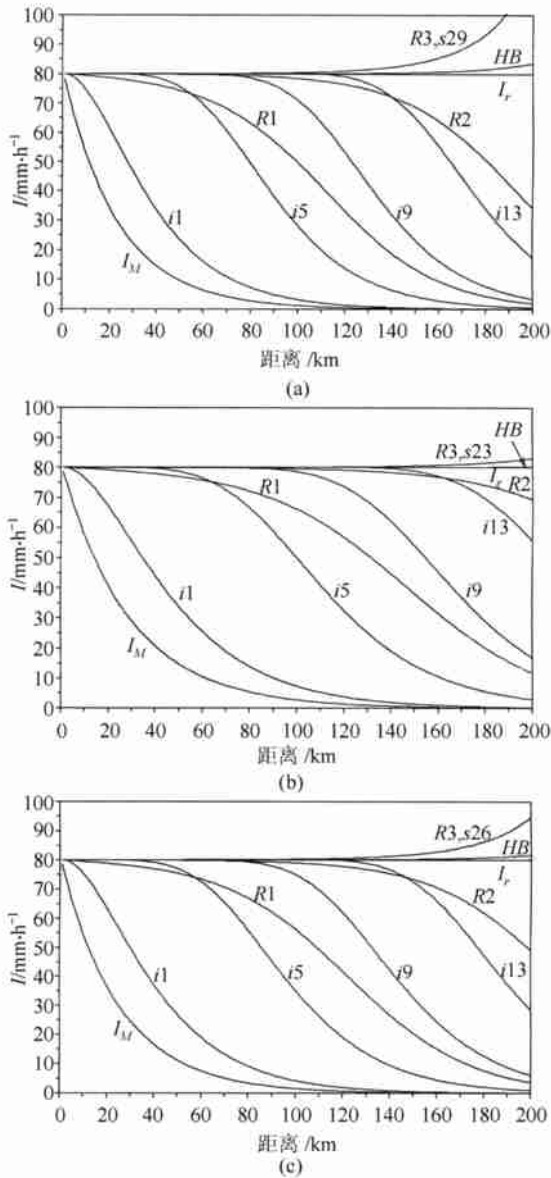


图 2 $I_r(R)=80\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时, 扁椭球群 3 种情况下 $\lambda=5.6\text{cm}$ 雷达积分取样观测资料的各种订正方法的订正结果 (a) 情况 1; (b) 情况 2; (c) 情况 3

Fig. 2 Same as in Fig. 1 except that the radar reflectivity factor is replaced with rainfall rate and the truth is supposed a constant of $80\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$

5 小旋转椭球粒子群取向判断失误情况下降水区回波衰减订正的数值实验与效果分析

小旋转椭球粒子群的取向, 需要用双偏振雷达来

探测。在实际中, 若雷达没有双偏振特征, 用风速也可估计取向情况^[3]。由于雷达波的衰减程度与椭球取向有关, 取向判断错误就会增加衰减订正误差。对于确定的雷达回波强度, 由表 1 可见, 情况 1(即降水区内水滴为扁椭球, 旋转轴一致铅直向上, 雷达水平发射水平偏振波)时衰减最小, 当错判为其它任何情况时都使衰减订正过大。而情况 2(即在情况 1 中仅使雷达水平发射垂直偏振波)时衰减最大, 当错判为其它任何情况时都使衰减订正不足。球形粒子群对雷达波的衰减程度, 基本上处于旋转椭球粒子群的 5 种情况的中间, 与扁旋转椭球粒子群旋转轴在空间作均匀随机取向(情况 3)时最接近。作为参考, 图 3 (a), (b) 分别给出在非球形粒子群情况 1、2 时用球形粒子的 $k-Z$ 关系进行雷达回波衰减订正时的结果。图 3 中设 $Z_r=50\text{dB}$ 均匀分布。

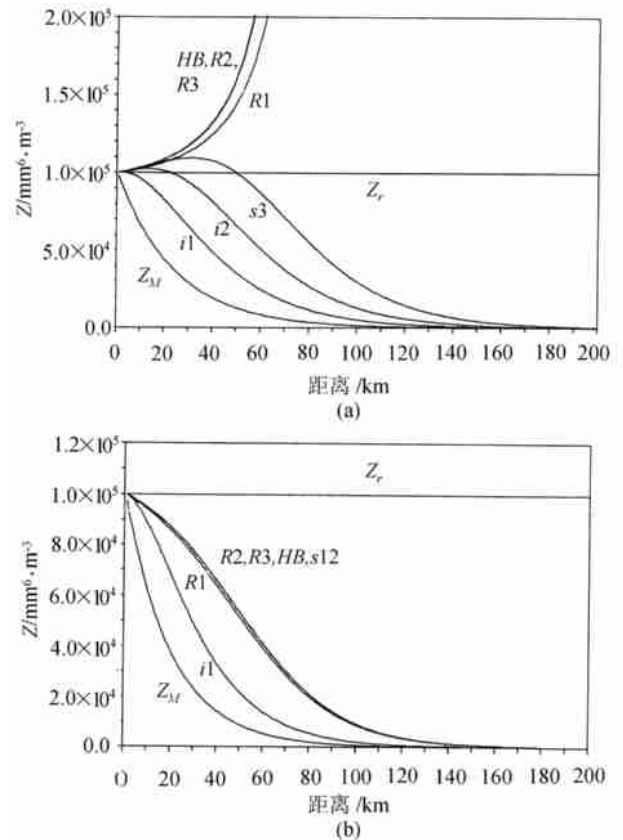


图 3 降水粒子为旋转轴一致铅直取向的扁椭球, 5.6cm 雷达反射率因子为 50dB 均匀分布情况下, 用球形粒子的 $k-Z$ 关系进行雷达回波强度的衰减订正

(a) 雷达水平发射水平偏振波; (b) 雷达水平发射垂直偏振波

Fig. 3 Correction of observed reflectivity factor as compared with the truth, which is supposed a constant of $10^5\text{mm}^6\cdot\text{m}^{-3}$ (50dB).

Precipitating particles are oblates whose rotatory axes are all pointing in vertical direction while the incident waves are either (a) horizontally polarized waves or (b) vertically polarized waves.

由图 3(a)可见,由于球形粒子 $k-Z$ 关系系数较大,HB, $R1$, $R2$ 和 $R3$ 均使衰减订正结果偏高,且随距离增加而迅速恶化。允许 10%误差的可订正厚度仅有 30km 左右,比图 1(a)所示的可订正厚度小很多。迭代法因其固有的“低阶迭代订正不足”特点, $i1$ 和 $i2$,甚至 $s3$,都没有引起明显的过量订正。

若雷达水平发射垂直偏振波,其它条件与图 3(a)相同。此时的 $k-Z$ 关系系数大于球形粒子 $k-Z$ 关系系数,订正结果如图 3(b)所示,各种方法均对衰减订正不足。允许 10%误差的可订正厚度仅有 20km 左右,比图 1(b)所示的可订正厚度小很多。

图 3(a)、(b)与图 1(a)、(b)的比较可见,小旋转椭球粒子群的取向判断错误,在衰减订正中可以引起很大的误差。因此,正确判断小旋转椭球粒子群的取向,对于衰减订正是很重要的。

6 结 论

(1) $Z-I$ 关系与雨滴形状和雨滴群旋转轴相对于雷达波偏振方向的取向有关,在用雷达反射率因子估计雨强时,就需要已知雨滴形状和雨滴群旋转轴相对于雷达波偏振方向的取向。

(2) 在已知小旋转椭球粒子群取向的情况下,降水区回波衰减的可订正厚度主要受雨强影响,雨强越大,可订正厚度越小。雨强 80mm/h 时,使用 $R2$ 或 $R3$ 订正法,5.6cm 雷达可订正厚度在 120km 以上。计算表明,同样条件下 3.2cm 雷达可订正厚度为 50km 左右。

(3) 降水区回波衰减的可订正厚度,也与降水区雨滴形状和雨滴群旋转轴相对于雷达波偏振方向的取向有关。正确估计小旋转椭球粒子群的取向,对选用正确的 $k-Z$ 关系、提高订正效果,有重要意义。

(4) 在“无误差”的理想条件下进行衰减订正,解析算法(HB)得到最佳的效果;迭代法在低阶时订正不足,在高阶时订正过量;逐库算法及其近似法比迭代法计算效率高、结果仅次于 HB 算法。由于 HB 算

法抗误差干扰能力较差,因此逐库算法及其近似法可能是较好的折中算法。

参 考 文 献 (References)

- [1] Zhang Peichang, Dai Tiepi, Du Bingyu *et al.* Radar Meteorology[M]. Beijing: Meteorological Press, 1998. [张培昌,戴铁丕,杜秉玉等. 雷达气象学[M].北京:气象出版社,1998.]
- [2] Proppacher H R, Beard K Y. A Wind Tunnel Investigation of the Internal Circulation and Shape of Water Drops Falling at Terminal Velocity in Air[J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1970, **96**(408):247—256.
- [3] Zhang Peichang, Liu Chuancan. Radar Meteorology Equation for Groups of Rotating Spheroidal Raindrops and Correction for Rainfall Measurement[J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 1998, **21**(3): 307—312. [张培昌,刘传才. 旋转椭球雨滴群的雷达气象方程及测雨订正[J]. 南京气象学院学报,1998, **21**(3):307—312.]
- [4] Zhang Peichang, Wang Zhenhui. Attenuation of Microwaves by Polydisperse Small Spheroid Particles[A]. Proceedings of SPIE: Microwave Remote Sensing of the Atmosphere and Environment[C]. Beijing, China, 1998.
- [5] Wang Zhenhui, Zhang Peichang. Relationship between Attenuation of Microwaves by Polydisperse Small Spheroid Particles and Their Radar Reflectivity Factor[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2000, **58**(1):123—128. [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.]
- [6] Meneghini R. Rain Rate Estimates for an Attenuating Radar[J]. *Radiation Sci.*, 1978, **13**:459—470.
- [7] Zhang Peichang, Wang Zhenhui. 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. [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.]
- [8] Wang Zhenhui, Zhang Peichang. A Study on Algorithm to Make Attenuation Correction to Radar Observations of Radar Reflectivity Factor(II): Numerical Simulation and Case Study[J]. *Plateau Meteorology*, 2001, **20**(2):115—120. [王振会,张培昌. 天气雷达回波衰减订正算法的研究: II. 实际检验[J]. 高原气象,2001, **20**(2): 115—120.]
- [9] Zhang Peichang, Wang Zhenhui. Fundamentals on Atmospheric Remote Sensing[M]. Beijing: Meteorological Press, 1995. [张培昌,王振会. 大气微波遥感基础[M].北京:气象出版社,1995.]

Attenuation Correction to Radar Observations of Reflectivity Factor from Precipitating Area with Poly-disperse Small Spheroid Raindrops

WANG Zhen-hui¹, WANG Qing-an², ZHANG Pei-chang¹, GUAN Li¹

(1. Dept. of Electronic Information & Applied Physics, Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing 210044, China;

2. Dept. of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210083, China)

Abstract: The relationship between attenuation coefficient, k , and radar reflectivity factor, Z , as well as that between k , Z and rainfall rate, I , is influenced by the shape of precipitating raindrops and the orientation of their rotatory axes respect to the polarization direction of the incident radar wave. Provided that the orientation of rotatory axes of poly-disperse small spheroid particles is known, correctable thickness of radar echo for attenuation depends mainly on rainrate. The heavier the rainfall rate, the thinner the correctable thickness. For an 80mm/hour precipitation uniformly distributed along a radial direction, correctable thickness of radar echo is more than 120km for 5.6cm wavelength and about 50km for 3.2cm if correction algorithm R^2 or R^3 is used. Orientation information is critically important during attenuation correction. Right k - Z relationship must be coupled with right orientation status.

Key words: poly-disperse small spheroid raindrops; radar reflectivity factor; attenuation correction