

文章编号: 1000-2022(2000)-01-0119-05

山回波的 PIA 因子在 3 cm 雷达波衰减订正中的应用*

赵恒轩, 张赴建
(南京气象学院气象台, 南京 210044)

摘要: 通过比较同| 山体在晴雨两种天气条件下的回波反射率, 确定在雷达与山体之间的降水造成山体回波的路径积分衰减因子(path-integrated attenuation factor), 以此计算雷达与山体之间降水的真实反射率, 从而把降水对 X(3 cm 波长) 波段雷达波的衰减订正掉。
关 键 词: 路径积分衰减; 雷达反射率; 衰减订正
中图分类号: P412.25 文献标识码: A

从雷达气象方程可知道, 降水, 特别是强降水对 X 波段雷达波的衰减是严重的, 因而导致雷达定量测量降水的精度不高, 尤其对较远处的降水测量误差更大。为了订正这种误差, 早在 1954 年 Hitschfeld 等^[1]就提出过订正衰减的直接方法, 简称 H-B 算法。在国内, 张培昌等人在这方面也做了大量的研究工作。本文基于 M Marzoug^[2]和 G Delrieu 等^[3]近年来提出的利用地表或山体回波的路径积分衰减因子, 对空载或地基 X 波段天气雷达的回波数据进行衰减订正的基本思想, 尝试用雷达实测资料和本地降水特征参数, 验证用山体回波的路径积分衰减因子订正 3 cm 天气雷达回波数据的有效性和实用性。

1 用山体回波订正雷达波衰减的理论基础

根据雷达气象学知识, 可以导出雷达实测反射率因子 $Z_m(r)$ 与真实反射率因子 $Z(r)$ 之间的关系为

$$Z_m(r) = Z(r)A(r) \epsilon_0 \tag{1}$$

其中 $A(r) = e^{-0.46 \int_0^{k(s)} ds} \leq 1$ 称为距离 r 处的路径积分衰减因子, 简称 PIA 因子。它代表自雷达达到目标之间雨对雷达波往返衰减的程度。 $k(r)$ 叫做比衰减系数。 ϵ_0 代表雷达校准(如雷达系统的各个参数测量等) 误差。

对 (1) 式, 假定 ϵ_0 为常数, 再假设 $Z(r)$ 与 $k(r)$ 之间满足 $Z(r) = [k(r)]$, 并定义 $u(r) = 0.46k(r)/$, 则可得

$$\frac{0.46}{\epsilon_0} \left[\frac{Z_m(r)}{\epsilon_0} \right]^{1/\gamma} = u(r)[A(r)]^{1/\gamma} \tag{2}$$

另一方面, 从上述 $A(r)$ 和 $u(r)$ 的表达式还可推得

* 收稿日期: 1999-04-23; 改回日期: 1999-10-16
作者简介: 赵恒轩, 男, 江苏江浦人, 1951 年 10 月生, 副教授。主要研究方向: 天气雷达资料的收集和预处理方法研究

$$\frac{d[A(r)]^{1/2}}{dr} = -u(r)[A(r)]^{1/2} \tag{3}$$

一并考虑(2)和(3)式,再做 r_0 到 r 之间的积分可得

$$A(r) = \{[A(r_0)]^{1/2} - \frac{S(r_0, r)}{c^{1/2}}\}^2 \tag{4}$$

式中

$$S(r_0, r) = 0.46 \int_{r_0}^r \frac{Z_m(s)}{c} ds \tag{5}$$

r_0 为雷达反射率采样的起始距离,亦称盲距。通常指低仰角探测时开始出现地物杂波污染的回波距离。相应地, $A(r_0)$ 称为盲距衰减因子。

(4)式就是理论上计算任意距离上PIA因子的公式。显然,它是 $Z_m(r)$ 、 c 和 $A(r_0)$ 的函数。其中 c 为与雨滴谱分布和温度有关的表达 $Z-k$ 关系的系数,而 $Z_m(r)$ 还受雷达校准误差 ϵ 的影响。

1.1 山体回波的路径积分衰减的估算

如图1所示,以选定的山脉为参照物,并假设山体表面对X波段雷达波的后向散射能力在干湿两种条件下是相近的。文献[2]的实验表明,这种假设是符合实际的。

设在晴好天气,雷达以低仰角(以保证雷达波束充塞山体,图1所示实际是波束部分充塞山体的情况)探测山体,测得距离雷达 r_M 处的山体回波反射率因子为 $Z_m^D(r_M)$ 。

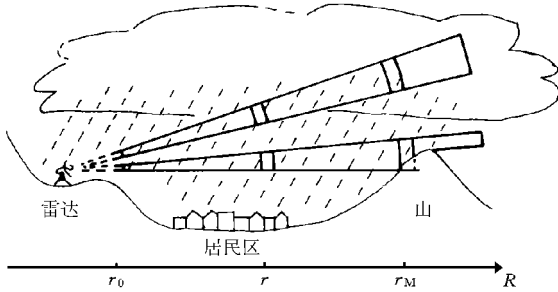


图1 估算山体回波路径积分衰减的模型图

Fig. 1 Schematic of estimating PIA for a mountain return

$$Z_m^D(r_M) = Z(r_M) \epsilon A^D(r_M) \tag{6}$$

而在下雨天气(尤指中或大雨),雷达以相同仰角探测同一山体,测得 r_M 处的山体回波反射率因子为 $Z_m^R(r_M)$ 。

$$Z_m^R(r_M) = Z(r_M) \epsilon A^R(r_M) \tag{7}$$

上两式中下标 m 表示测量值, M 代表山脉;上标 D 代表晴天, R 代表雨天。因(6)式中 $A^D(r_M)$ 代表晴天条件下雷达到山体之间的大气气体对雷达波的路径积分衰减因子,对3cm波长的雷达波而言,此衰减可以忽略,即可近似认为 $A^D(r_M) = 1$ 。记 $A^R(r_M) = A_m(r_M)$,得

$$A_m(r_M) = \frac{Z_m^R(r_M)}{Z_m^D(r_M)} \leq 1 \tag{8}$$

显然 $A_m(r_M)$ 与 ϵ 无关(假设 ϵ 不随时间变化)。另一方面,由于 $Z_m^R(r_M)$ 为降雨时山体表面回波的反射率因子,根据前述山表面的后向散射系数在雨天和干燥的晴天两种情况下是基本不变的假设,还可以认为 $A_m(r_M)$ 与雨滴大小分布的任何假设也无关。但是, $Z_m^R(r_M)$ 很可能包含了山体上方降雨产生的某些贡献。如在图1中,在参考距离 r_M 处的山体上方的波束部分地被降雨充塞,这种情况下,就需要对 $A_m(r_M)$ 做一定的修正。

设(1)山体上方的垂直反射率廓线是不随高度变化的常数;(2)在低仰角和高仰角下的PIA值都相同。则有

$$A_m(r_M) = \frac{Z_m^R(r_M) - Z_m^{R,U}(r_M)F(r_M)}{Z_m^D(r_M)}。 \quad (9)$$

式中 $F(r_M)$ 为低仰角时的波束充塞系数, $Z_m^{R,U}(r_M)$ 为高仰角上的实测反射率因子。显然, 如果山体表面上方的降雨产生的回波较之山体本身的回波可以忽略, 那末 (8)、(9) 式给出的 PIA 值是相同的, 否则 (9) 式将给出更高的 PIA (+ dB) 值。

1.2 路径积分衰减约束方程及盲距衰减的估算

从 (4) 式知道, 相对雷达距离为 r_M (参见图 1) 的山体回波的 PIA 因子的计算值为

$$A_c(r_M) = \left\{ [A(r_0)]^{1/c} - \frac{S(r_0, r_M)}{c} \right\}。$$

式中 A_c 的下标 c 表示计算值, 理想情况下, 它应等于由 (8) 式给出的通过测量山体表面回波而得到的 PIA 因子 $A_m(r_M)$, 即

$$A_m(r_M) = A_c(r_M)。 \quad (10)$$

它就是路径积分衰减约束方程。为简单起见, 一般忽略其盲距衰减 $A(r_0)$, 即取 $A(r_0) = 1$ 。或者, 在雷达站设一雨量计测量本站降水强度, 再由下式粗略估算 $A(r_0)$ 。

$$A(r_0) = e^{-0.46r_0cR_0^d}。$$

式中 c 和 d 是满足某一 $k-R$ 关系的系数, R_0 为本站降水强度。

1.3 用山体回波的路径积分衰减订正雷达回波数据的算法

从 (10) 式解出雷达校准误差 c , 再依次代入 (4) 和 (1) 式即可得最常用的一种用山体回波的路径积分衰减订正雷达回波数据的算法

$$Z_{(r)}^{PIA} = \frac{Z_m(r) \{ [A(r_0)]^{1/c} - [A_m(r_M)]^{1/c} \}}{\{ [A(r_0)]^{1/c} S(r, r_M) + [A_m(r_M)]^{1/c} S(r_0, r) \}}。 \quad (11)$$

即利用 $r_0 \rightarrow r_M$ 的反射率廓线计算 r 处的真实反射率 $Z(r)$ 。显然, 它和 c 无关。

2 降水回波数据 PIA 订正的计算机处理

2.1 数据准备及参数选择

(1) 在 1998 年 5 月 5 日至 7 日连续 3 个晴天 15 个时次, 用本院 711 天气雷达以仰角 0° ; 方位角 295° 测得大丰山 (对应 $r_M = 48$ km, 在此距离范围内无其他地物阻挡) 回波强度平均值 $Z_m^D = 40$ dB; 又在 5 月 8 日 10 时开始的一次较强降水过程中, 以相同仰角和方位角测得大丰山回波强度 $Z_m^R = 29$ dB, 由 (8) 式计算得山体回波 PIA 因子为 $A_m(r_M) = 0.725$ 。

(2) 取本地对流性降水的 $Z-I$ 关系^[4] $Z = 503 I^{1.32}$ 和 $k-I$ 关系 $k = 0.01247 I^{1.16}$, 通过换算得 $Z-k$ 关系 $Z = 40336.8 k^{1.138}$, 即取 $k = 40336.8$, $k = 1.138$ 。此外, 我们取 $A(r_0) = 1$ 。

(3) 直角坐标数据到极坐标数据转换。我院 711 雷达的数字视频积分处理器只输出直角坐标数据 $Z_m(x, y)$, 用图 2 所示的方法, 把直角坐标网格 ($1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$) 内的象素值转换成径向上相应距离库上的极坐标 dB 值。如图中打斜线的网格的象素值依次代表径向上 R_1, R_2, R_3, R_4 等距离库上的极坐标 dB 值。

2.2 结果分析与讨论

图 3 中虚线是由订正前雷达原始数据描绘的反射率廓线, 实线为用山体 PIA 算法订正后所得的反射率廓线。由图可见: (1) 随着距离的增加, 衰减亦随之增加。例如图中的 A、B 两点, B 点的未订正值比 A 点的未订正值小, 但经过订正以后 B 点的 dB 值反而比 A 点的 dB 值大, 这与路径积分衰减的物理意义相一致; (2) 订正值与雨强有关, 降水强度越强, 雨对雷达波的衰

减越大,因而订正值也越大。反之亦然。例如图中 8~20 km 范围内订正值就较小。这同时也说明了订正算法的有效性。(3) 由于本次降雨过程在 0~8 km 范围内降水强度很弱,订正前后的雷达数据相差无几,故取 $r_0=8\text{ km}$ 、 $A(r_0)=1$ 对 8 km 之后的雷达回波的订正的影响可以忽略。(4) 订正的反射率廓线与真实的反射率廓线相比,可能是高估了。例如在 $r^M=48\text{ km}$ 处的山体回波反射率值约为 42 dB,而在晴天雷达探测时测得的反射率值约为 40 dB。这种误差可能与 α 、 β 的取值有关。另外,按照 2.1 节中所述的从直角坐标数据串中提取极坐标数据的方法对订正精度也会有一定影响。

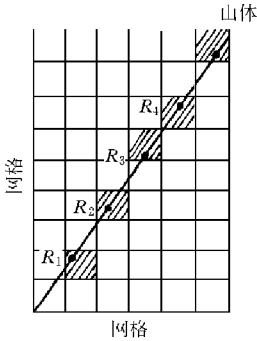


图 2 从直角坐标数据中提取极坐标数据示意图

Fig. 2 Radar data are transformed from right angle coordinate to polar coordinate

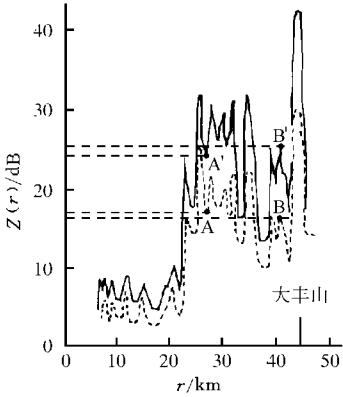


图 3 用 PIA 算法订正前(虚线)后(实线)的反射率廓线

Fig. 3 Reflectivity distribution of precipitation before correction (dashed curve) and after correction (solid curve) with PIA algorithm

3 结 语

本文用雷达实际探测资料,检验了用山体回波的 PIA 因子订正降雨对 X 波段雷达波的衰减的可行性和有效性。尽管工作做得还不够深入,但结果已经可以说明,用该方法来订正雷达回波数据、提高雷达定量测量降水的精度简便易行,并具有一定精度。它特别适用于雷达站和山体之间是谷地的人口稠密区或工业设施区或蓄水库的地形情况。在本文所述工作基础上,如何进一步提高订正精度的问题^[5]还可深入研究。

参考文献:

[1] HITSCHFELD W, BORDAN J. Errors inherent in the radar measurement of rainfall at attenuating wavelenths[J]. J Meteor, 1954, 11(1): 58~67

[2] MARZOUG M, AMAYENC P. Improved range profiling algorithm of rainfall rate from a spaceborne radar with path-integrated attenuation constraint[J]. IEEE trans geosci remote sens, 1991, 29(4): 584~592

[3] DELRIEU G, CAODAL S, CREUTIN J d. Feasibility of using mountain return for the correction of ground-based X-band weather radar data[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1997, 14(3): 368~385

[4] 戴铁丕, 张培昌. 雷达气候学[M]. 北京: 气象出版社, 1995

[5] HADDAD Z S, IM E. Optimal estimation of rain rate profiles from radar returns at attenuating wavelenth[R]. 26th int conf on radar meteorology. American Meteorological Society. Boston, Massachusetts, 1993. 699~701

Application of mountain return PIA to the attenuation correction of 3-cm weather radar data

ZHAO Heng-xuan, ZHANG Fu-jian

(Meteorological Observatory, NIM, Nanjing 210044)

Abstract: Path-integrated attenuation factor for a mountain return is determined by a comparison of the radar reflectivities of the mountain during precipitating between the radar and the mountain and the reflectivities from the same mountain when it is clear. Then, the PIA factor is applied for the attenuation correction of radar echoes of the precipitation so that the real reflectivities of the precipitation are obtained.

Key words: path-integrated attenuation; radar reflectivity; attenuation correction