第4卷 第2期　　大气科学　　Vol. 4, No. 2
1980年6月　　SCIENTIA ATMOSPHERICA SINICA　　June, 1980

测雨效率方程及其应用

庄荫模　徐玉貌
（南京大学）

提　　要

本文提出了雷达测雨效率的理论方程，用实际雷达观测资料对它进行了验证，提出了它的一些应用.

雷达能够探测到降水的百分比——测雨效率是随着距离的增加而降低的[1,2]. 同一雷达在不同的气候地区测雨效率将不相同.

五十年代 Austin 就对雷达测雨效率随距离变化的现象进行过粗略的，定性的理论解释[1]，六十年代立平良三进一步对雷达测雨效率随距离增加而降低的现象进行了半定量的理论分析[3]. 但是，由于没有建立起合理的雷达测雨效率理论方程，用他们的方法来进行雷达测雨效率的定量分析和予计还是不可能，要进一步解决其它有关的雷达气象问题当然更不可能.

这里，我们提出了表示雷达测雨效率随距离变化的理论方程，初步验证了这个方程，并对测雨效率方程的用途进行了探讨和尝试.

一、测雨效率方程的建立

为了便于建立测雨效率方程，和 Austin 不同，我们定义测雨效率 $P(r)$ 为：雷达观测时，r 距离处某地下雨的总次数中，雷达能够探测到的比值或百分比.

用 $p(R)$ 表示某地区雨强等于和大于 R 毫米/10分钟的雨出现的概率，设自记雨量计的雨强最小读数为 R_0 毫米/10分钟，和工作[1]、[3]不同，我们取

$$p(R) = e^{-a(R-R_0)^b} \tag{1}$$

这里，$e=2.718$，a、b 为雨强分布参数.

用 $R_{最小}(r)$ 表示 r 距离上雷达能够探测到的最小雨强，设雷达能够探测到 $R(r) \geqslant R_{最小}(r)$ 的所有的雨，则可以得到 r 距离处雷达的测雨效率

$$P(r) = e^{-a[R_{最小}(r)-R_0]^b} \tag{2}$$

(2) 式是雷达测雨效率方程的一般形式.

在进行测雨效率的理论分析时，根据雷达方程[4]和反射因子(z_e)-雨强(R)的关系[5]，有

1979年2月12日收到修改稿.

$$R_{最小}(r) = \frac{1}{6}\left(\frac{c}{\alpha}K^{-1}\Psi^{-1}\right)^{1/\beta} r^{2/\beta} \text{ 毫米/10 分钟} \tag{3}$$

式中

$$c = \frac{1024 \ln 2}{\pi^3 \left|\frac{m^2-1}{m^2+2}\right|^2} \cdot \frac{\lambda^2 \overline{P}_{r最小}}{P_t h G^2 \theta \phi} \ \mathrm{mm^6/m^3(km)^2} \tag{4}$$

$$K = 10^{-0.2\int_0^r k dr} = 10^{-0.2\int_0^r (k_{气}+k_{云}+k_{雨})dr} \tag{5}$$

Ψ 是波束的充塞系数，α、β 是 Z_e-R 关系中的参数. (4) 式中的符号与雷达方程中常用的符号意义相同，其中 λ、h 的单位用米，(3) 式和 (5) 式中 r 的单位是公里. (5) 式中 k、$k_{气}$、$k_{云}$、$k_{雨}$ 分别是中间介质衰减系数和大气、云、雨的衰减系数. 它们的单位是 db/km.

在 (3) 式中，当 c、α、β、K、Ψ 等的数值一定时，一定的距离 r，对应有一定的 $R_{最小}(r)$ 值，这时 $R(r) \geqslant R_{最小}(r)$，$\overline{P}_r(r) \geqslant \overline{P}_{r最小}$($\overline{P}_r$ 为回波强度，$\overline{P}_{r最小}$ 为雷达的最小可辨回波强度)，雷达能够探测到 $R(r) \geqslant R_{最小}(r)$ 的雨. 但是，实际上对衰减波长和在远距离，不同情况下云雨的衰减影响和充塞程度差别很大，同一距离上的 $R_{最小}(r)$ 值可能差别很大，因而雷达能够探测到 $R(r) \geqslant R_{最小}(r)$ 的雨的关系将被破坏，从而不能应用 (2) 式求得 $P(r)$ 的大小. 因此，理论上测雨效率方程似乎只有对非衰减波长的雷达(或云雨衰减影响不大)，在 $\Psi = 1$ 或近于等于一的条件下才有可能应用.

对非衰减波长，在 $\Psi \doteq 1$ 的距离范围内，不考虑 K、Ψ 的影响，把 (3) 式代入 (2) 式，得

$$P(r) = e^{-a\left[\frac{1}{6}\left(\frac{c}{\alpha}\right)^{1/\beta} r^{2/\beta} - R_0\right]^b} \tag{6}$$

(6) 式是雷达测雨效率方程的更具体的理论形式，它表示了雷达测雨效率随距离变化的理论关系.

二、对测雨效率方程的初步验证——利用测雨效率方程估计不同雷达，在不同气候地区测雨效率的一个例子

对 (2) 式和 (6) 式进行定性的讨论，可以看到，$P(r)$ 对雷达参数，降水参数，和电磁波传播特性等的依赖关系是合理的. 这里必须指出的是：在 Austin[1] 和立平良三[3]的定性解释和半定量分析中，不能反映出实际测雨概率或效率在某一距离范围内，有一保持为最大值或等于一的实际情况(即在一定距离范围内，雷达能够探测到雨量计上能够测量出其雨强的所有的雨)，在他们的工作中，测雨概率一开始就随距离的增加而指数地降低. 这一与事实不符的缺陷，在测雨效率方程 (2) 和 (6) 中得到了纠正. 在方程 (6) 中，令 $P(r) = 1$，有

$$\frac{1}{6}\left(\frac{c}{\alpha}\right)^{1/\beta} r^{2/\beta} - R_0 = 0 \tag{7}$$

解上式，得 r 的解 r_0. 在 r_0 范围内，雷达能够探测到 $R \geqslant R_0$ 的所有的雨.

我们叫 r_0 为雷达的"完全有效探测范围". 对非衰减波长的雷达，我们建议把 r_0 作为

雷达测雨能力的一个参数. 它反映了雷达测雨能力的一个重要的临界情况，这对测雨雷达资料的正确分析和应用有很大的好处.

为了进一步定量地检验上面得到的测雨效率方程，并作为利用这一方程可以从理论上估计雷达测雨效率的一个例子，如前面讨论过的，应该选择非衰减波长的雷达(如 10 公分波长的雷达)进行 $P(r)$ 的理论计算，并和实际 $P(r)$ 值进行比较. 但是，由于我们缺少可应用的非衰减波长的雷达测雨资料，和手头上有现成的三公分“711”雷达的实测 $P(r)$ 数据[9]，这一情况驱使我们对雨的衰减影响有时可以很严重的三公分雷达进行了 $P(r)$ 理论分布计算的尝试.

计算时没有考虑(也无法考虑)时、空变化很大的云雨衰减影响，但是考虑了时、空变化较小的气体衰减影响. 在(3)式中取 $K = K_{气} = 10^{-0.2\int_0^r k_{气} dr}$，这时测雨效率方程(6)为

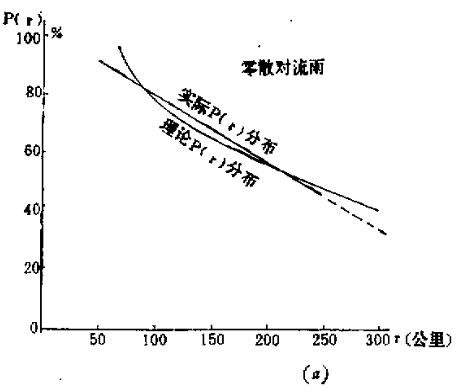
$$P(r) = e^{-a\left[\frac{1}{6}\left(\frac{c}{a}\cdot k_{气}^{-1}\right)^{1/\beta} r^{2/\beta} - R_0\right]^b} \tag{8}$$

取 $k_{气} = 0.015$db/km. 其中氧气衰减系数为 0.01db/km，水汽衰减系数为 0.005db/km (水汽含量 7.5g/m^3，温度 20℃ 下的衰减系数)[7].

根据 72—74 年安徽—江苏地区雷达观测时十个水文、气象站的十分钟雨强分布，有 $a = 1.86$，$b = 0.48$. 按降水性质分开计算，有零散对流雨时 $a = 1.31$，$b = 0.48$，大范围雨时 $a = 2.05$，$b = 0.52$[9]. 这里 R_0 为 0.03 毫米/10 分钟.

雷达参数取参考资料[6]中的那些数值. α、β 值根据工作[8]，零散对流雨取 $\alpha = 520$，$\beta = 1.76$，大范围雨取 $\alpha = 327$，$\beta = 1.55$.

把以上数据代人方程(8)计算，得“711”雷达探测零散对流降水，和大范围降水时不同距离上的理论测雨效率分布如图 1 所示. 把工作[9]得到的“711”雷达实际 $P(r)$ 分布



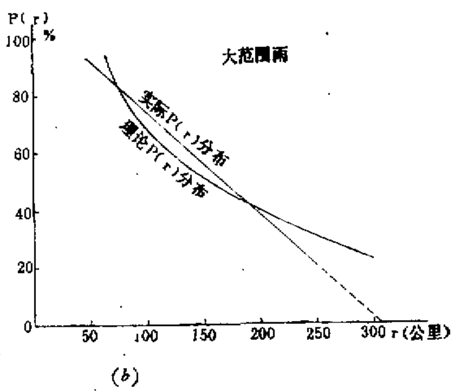


图 1 “711”雷达的理论和实际测雨效率分布

也画在图 1 上，并定义 $\Delta P \equiv P_{理论}(r) - P_{实际}(r)$，把 ΔP 值列成表 1. 由图 1 和表 1 的结果可见：在 200 公里范围内，$P(r)$ 的理论值和实际值意外地很接近，50、100、150、200 公里各点 $\Delta P \times 100\%$ 的算术平均值为 4.2%. 在 200 公里以外，特别在大范围降水的情况下，ΔP 值比较大. 这一理论计算结果说明：(1) 测雨效率方程不但在定性的意义上是合理的，甚至对三公分雷达，在 200 公里以内的范围内，作定量的计算也能得到比较好的

结果. (2)对三公分雷达,雨的衰减影响在个别情况下可能很大,但是在安徽—江苏地区,统计地说来,它对 $P(r)$ 的影响似乎不一定很大. 问题是这里的实际 $P(r)$ 分布是根据三年的素描图资料得到的,尽管由它得到的分布规律是合理的,但是显然是不精确的,因此以上的检验和试验只是初步的.

表1 "711"雷达测雨效率的理论值和实际值的差别

r(公里)	50	100	150	200	250	300
零散对流雨的 $\Delta P\times 100\%$	+8	−2	−3	−1	+3	+6
大范围雨的 $\Delta P\times 100\%$	+6	−5	−4.5	+4	+10	+22

三、利用测雨效率方程求 $\bar{k}'$、$\bar{\alpha}'$、$\bar{\beta}'$

为什么没有考虑云、雨衰减,利用测雨效率方程也能近似地求得"711"雷达的 $P(r)$ 分布? 作为时间和空间影响的平均,云雨衰减系数的时、空平均值 $\bar{k}'_{云雨}$ 有多大?

利用测雨效率方程能够求出 k、α、β 的时间、空间平均值 $\bar{k}'$、$\bar{\alpha}'$、$\bar{\beta}'$.

由(2)式和(3)式消去 $R_{最小}(r)$(在(3)式中取 $\Psi=1$),令

$$F(P(r)) \equiv 10^{\frac{\lg\left[-\frac{\ln p(r)}{a}\right]}{b}} + R_0 \tag{9}$$

和

$$K = 10^{-0.2\int_0^r k dr} \doteq 10^{-0.2\bar{k}r} \tag{10}$$

可以得到等式

$$\left(\frac{c}{\bar{\alpha}'} r^2 \times 10^{0.2\bar{k}' r}\right)^{1/\bar{\beta}'} = 6F(P(r))^* \tag{11}$$

对(11)式两边取对数,移项,有

$$\lg \bar{\alpha}' + \{\lg[6F(P(r))]\}\bar{\beta}' - 0.2\bar{k}' = \lg(cr^2) \tag{12}$$

(12)式在波束能够被降水粒子充满的任何距离 r 上成立. 在这一距离范围内,取三个不同的距离 r_1、r_2、r_3,由此有联立方程组

$$\begin{cases}\lg \bar{\alpha}' + \{\lg[6F(P(r_1))]\}\bar{\beta}' - 0.2r_1\bar{k}' = \lg(cr_1^2)\\ \lg \bar{\alpha}' + \{\lg[6F(P(r_2))]\}\bar{\beta}' - 0.2r_2\bar{k}' = \lg(cr_2^2)\\ \lg \bar{\alpha}' + \{\lg[6F(P(r_3))]\}\bar{\beta}' - 0.2r_3\bar{k}' = \lg(cr_3^2)\end{cases} \tag{13}$$

这里系数行列式不为零,$\bar{k}'$、$\bar{\alpha}'$、$\bar{\beta}'$ 有唯一确定的解.

可惜,利用合肥气象台"711"雷达的素描图资料我们得出了 $\bar{k}'$ 为负值的不合理结果. 之所以出现这种不合理现象,最可能的原因就是对解小值 $\bar{k}'$,素描图资料的精度不够,近处 $P(r)$ 值偏小,远处 $P(r)$ 值偏大,从而衰减变成了放大.

为了减小这种相对误差的影响,在已知 $\bar{\alpha}'$、$\bar{\beta}'$ 值的情况下,可以利用(12)式,只用一个距离上的 $P(r)$ 值来求 $\bar{k}'$ 的大小,这时

---

* 这里引入 $P(r)$ 后,$\bar{k}$, α, β 一律变成 $\bar{k}'$, $\bar{\alpha}'$, $\bar{\beta}'$.

$$\bar{k}' = \frac{1}{0.2r}\{\lg \bar{\alpha}' - \lg(cr^2) + \bar{\beta}' \lg[6F(P(r))]\} \tag{14}$$

取 $\bar{\alpha}' = 327$，$\bar{\beta}' = 1.55$，用工作[9]中 50、100、200 公里上大范围降水的 $P(r)$ 值代入，求得的 $\bar{k}'$ 值依次是 0.037、0.011、0.018db/km. 现在 $\bar{k}'$ 为正，即它们在符号上是合理的. 此外，和一般大气、云、雨衰减系数相比，这里求得的 $\bar{k}'$ 的量级是 10^{-2}db/km，是合理的. 值得注意的是，这里 0—50 公里上的 $\bar{k}'$ 值比较高，0—100 和 0—200 公里上的 $\bar{k}'$ 值比较低，这和上面提到的实测 $P(r)$ 值在近处可能偏低，在远处可能偏高的设想是一致的.

将求得的 0—50、0—100、0—200 公里上的 $\bar{k}'$ 值取算术平均，得 $\bar{k}'$ 的平均值为 0.022db/km. 如果上面计算出来的那些 $\bar{k}'$ 值有些偏高，有些偏低，则可以认为 0.022db/km 是比以上一些数值更接近实际大气、云、雨衰减作用的总衰减系数的平均值. 这样，如果 0.015db/km 的大气衰减系数是合理的，则在大范围降水的情况下，在安徽—江苏地区夏半年影响三公分雷达测雨效率的云雨衰减系数的时、空平均值 $\bar{k}'_{云雨} = 0.022 - 0.015 = 0.007$db/km. 这样大的衰减系数和雨强为 1 毫米/小时的大范围雨的衰减相当[7].

利用实际 $P(r)$ 和测雨效率方程求得的 $\bar{k}'_{云雨}$ 值远不像在个别大范围强降水情况下那样大，这从理论上说明了，在安徽—江苏地区，为什么利用测雨效率方程对三公分的"711"雷达也能近似地求得其 $P(r)$ 分布.

作为一个求 $\bar{\alpha}'$、$\bar{\beta}'$ 的例子，对零散对流降水，近似取 $\bar{k}' \doteq k_{气} = 0.015$ db/km，取 r_1、r_2 为 100 公里、200 公里，仍用工作[9]中相应距离上的 $P(r)$ 值，可以解得

$$\bar{\alpha}' = 577, \quad \bar{\beta}' = 1.62$$

如图 2，和北京利用雨滴谱资料计算得到的 $Z_e = 520R^{1.76}$ 的关系[8]相比，两者相差不大. 以 $Z_e = 520R^{1.76}$ 为准，在 0.1—40 毫米/小时之间，两者雨强差别在 0—20% 之间.

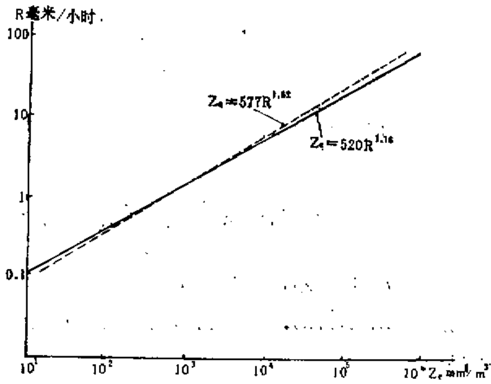


图 2　$Z_e = 577R^{1.62}$ 和 $Z_e = 520R^{1.76}$ 的比较

四、利用测雨效率方程分析衰减因子对雷达测雨效率的影响

利用测雨效率方程能够从理论上定量地分析引起测雨效率随距离增加而下降的一些物理原因及其作用的大小. 为了了解云、雨衰减对"711"雷达 $P(r)$ 的影响究竟有多大，下面仍以"711"雷达为例进行分析.

根据(6)式，在波束被充满，没有大气、云、雨等介质衰减影响时，将"711"雷达等的有关参数代入，得由于距离衰减而引起的测雨效率随距离增加而下降的变化曲线如图 3(a).

在(6)式中，除了考虑距离衰减，再分别考虑大气衰减（$k_{气}$取 0.015db/km）和云雨衰减（根据上面的计算，$k_{云雨}$ 取 0.007db/km)，这时测雨效率方程将分别为

$$P(r)=e^{-a\left[\frac{1}{6}\left(\frac{c}{\alpha}\times 10^{0.2k_{气}r}\right)^{1/\beta}r^{2/\beta}-R_0\right]^b} \tag{15}$$

和

$$P(r)=e^{-a\left[\frac{1}{6}\left(\frac{c}{\alpha}\times 10^{0.2(k_{气}+k_{云雨})r}\right)^{1/\beta}r^{2/\beta}-R_0\right]^b} \tag{16}$$

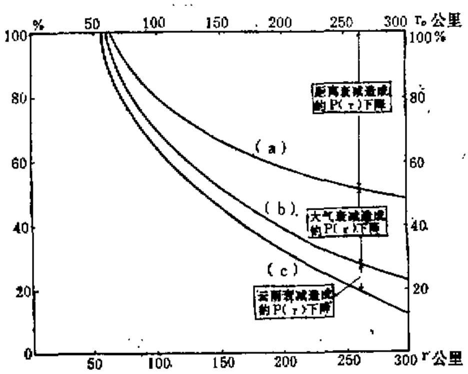


图 3　(a) 距离衰减影响下的 $P(r)$ 分布.
(b) 距离衰减、大气衰减影响下的 $P(r)$ 分布.
(c) 距离衰减、大气衰减、云雨衰减影响下的 $P(r)$ 分布.

将有关数据代人 (9)、(10) 两式分别得到图 3 中的曲线 (b) 和 (c)。

从图 3 可见: (1) 距离衰减是造成“711”雷达测雨效率下降的最主要原因. 在 100、200、300 公里距离上,单纯由于距离衰减的作用,“711”雷达的测雨效率将分别降低为 80%、58%、48%,(即降低 20%、42%、52%).(2)大气衰减造成的测雨效率下降也十分显著. 在 100、200、300 公里上,它分别使测雨效率进一步下降 10%、19%、26% (近似为距离衰减影响的一半). (3)云雨衰减造成的 $P(r)$ 下降确实不是太大,在以上三个距离上,由它造成的 $P(r)$ 下降只有 5%、8% 和 11%.

五、利用测雨效率方程求不同距离上的最小可测雨强

$R_{最小}(r)$ 是表示雷达测雨能力的一个重要参数. 迄今 $R_{最小}(r)$ 都是利用雷达方程和 Z_e-R 关系来求得的. 现在利用测雨效率方程也能求得 $R_{最小}(r)$, 并且这样做有它突出的优点.

在测雨效率方程 (2) 中,解出 $R_{最小}(r)$, 得

$$R_{最小}(r)=10^{\frac{\lg\left[-\frac{\ln p(r)}{a}\right]}{b}}+R_0 \tag{17}$$

由 (17) 式可见,利用测雨效率方程,只要知道雷达在不同距离上的测雨效率 $P(r)$ 和雨强分布参数 a、b, 就能求出不同距离上的 $R_{最小}(r)$ 值. 这个方法和利用雷达方程及 Z_e-R 关系求 $R_{最小}(r)$ 的方法比,其优点是: (1) 它不受雷达方程精度的影响. (2) 不受 Z_e-R 关系取样、计算精度的影响. (3)在比较远的距离上,由于在实际 $P(r)$ 值中已经自然地包括了回波强度随高度变化的影响和波束不充满的影响,因而在求 $R_{最小}(r)$ 时,它能统计地考虑上述影响,从而有可能把 $R_{最小}(r)$ 的计算进行到比较远的距离上. (4) 由于同样的原因,它能统计地考虑大气、云、雨等介质衰减影响(对 5 公分、10 公分雷达这种影响也不同程度地存在),从而对 3 公分这样的衰减波长,在理论上用测雨效率方程求出的 $R_{最小}(r)$ 比用雷达方程能够求出的更合理,更好.

利用测雨效率方程求 $R_{最小}(r)$ 除了具有以上优点, 必须注意对远距离和衰减波长它

具有的统计意义.由于不同的回波强度的高度变化,不同程度的 $\Psi < 1$ 的影响,和不同程度的介质衰减影响,雷达能探测到 $R(r) \geqslant R_{最小}(r)$ 的雨的关系将受到不同程度的破坏.

“在‘711’雷达测雨能力的分析”[9]工作中，我们利用测雨效率方程计算了“711”雷达的 $R_{最小}(r)$ 分布. 得到的结果是：在近距离它和用雷达方程、Z_e-R关系求出的 $R_{最小}(r)$* 很接近，而在比较远的距离上，随着距离的增加，用测雨效率方程求得的 $R_{最小}(r)$ 值越来越比较大(在大范围降水时尤其突出). 考虑到用雷达方程计算时没有考虑云雨衰减影响,和波束充塞程度等的影响,因此,由测雨效率方程计算出来的 $R_{最小}(r)$ 显然更合理.

六、利用测雨效率方程测雨强

雷达定量测量降水，现在主要也是利用雷达方程和 Z_e-R 关系进行的. 如上面所说，这样做要受到雷达方程和 Z_e-R 关系等精度的影响. 此外,由于一般使用的 Z_e-R 关系都是地面上的 Z_e 和 R 的关系,而在比较远的距离上,雷达探测到的是高空回波强度,这也是雷达定量测雨强工作中的一个问题.

不用雷达方程和地面上的 Z_e-R 关系,利用测雨效率方程测雨强，可以在一定程度上避免以上缺点.

已知回波强度 $\overline{P}_r$ 和雨强 R 满足

$$\overline{P}_r(r) \propto R^{\beta}(r) \tag{18}$$

$$\overline{P}_{r最小} \propto R^{\beta}_{最小}(r) \tag{19}$$

的关系. 将(18),(19)两式相比,得

$$\overline{P}_r(r) = \overline{P}_{r最小}\left(\frac{R(r)}{R_{最小}(r)}\right)^{\beta} \tag{20}$$

利用雷达上的衰减装置,利用下式的关系,可以由 $\overline{P}_{r最小}$ 和衰减分贝数的绝对值 $|N|$ 得知回波强度

$$\overline{P}_r(r) = \overline{P}_{r最小} \times 10^{|N|/10} \tag{21}$$

将(20)和(21)式相比,消去 $\overline{P}_r(r)$ 和 $\overline{P}_{r最小}$，得

$$R(r) = R_{最小}(r) \times (10^{|N|/10})^{1/\beta} \tag{22}$$

利用(2)式消去 $R_{最小}(r)$，得

$$R(r) = \left\{10^{\frac{\lg\left[-\frac{\ln p(r)}{a}\right]}{b}} + R_0\right\} \times (10^{|N|/10})^{1/\beta} \tag{23}$$

这就是利用测雨效率方程求雨强 R 的关系式. 从(23)式可见：在已知 β 值的条件下,可以由雷达接收机衰减的 db 数得知雨强分布.

(23)式中的 β 虽然也可以利用常用的 $Z_e = \alpha R^{\beta}$ 关系中的“β”，但是为了避免上面提到的有关 Z_e-R 关系中的一些缺点,可以利用(23)式直接对不同性质的降水,通过不同距离 $|N|$ 和 R 的实测关系,求出表示不同距离,不同高度上的回波强度和对应地面雨强之间关系的 β' 值，进而利用这样得到的 β' 值代替(23)式中的 β 进行雷达测雨强的工作.

---

* 考虑了大气衰减

需要注意的是：为了保持(23)式关系的稳定，雷达常数应设法保持稳定，或雷达观测应标准化．此外，和计算统计性的 $R_{最小}(r)$ 不同，使用这一方法求雨强应避免使用衰减波长，和不能应用到波束不充满的距离上去．

最后，附带说明一下：在(23)式中雨强 R 实际上不依赖于 $P(r)$、a、b 值的变化．因为式中 $10^{\frac{\lg\left[-\frac{\ln p(r)}{a}\right]}{b}}+R_0=R_{最小}(r)$，对同一雷达，在不同地区 $P(r)$、a、b 值可能不同，但 $R_{最小}(r)$ 值将仍然相同．

七、结 束 语

现在我们把上面的工作作如下的归纳：

(1) 提出了雷达测雨效率方程，并对它进行了定性的和定量的检验．检验的结果说明这一方程是合理的，有可能作定量的分析、计算．

(2) 雷达测雨效率方程可能有以下用途：

① 利用测雨效率方程可以从理论上估计、比较不同雷达在不同气候地区的测雨效率，为测雨雷达的设计、选择和观测资料的正确分析、使用提供依据．

②可以对影响雷达测雨效率的各个因子的作用进行理论的、定量的分析．这里分析了衰减因子对“711”雷达测雨效率的影响，得出距离衰减对 $P(r)$ 随距离的增加而降低的现象作用最大．大气衰减对雷达测雨效率的影响并不很小，近于为距离衰减影响的一半．而人们熟知的云雨衰减影响统计地说来对 $P(r)$ 的影响并不很大，而是比大气衰减影响小．

③ 利用测雨效率方程能够求出不同距离上的最小可探测雨强．这一方法的优点是：它不受雷达方程、常用的 Z_e-R 关系等的精度和缺点的影响，它能统计地考虑中间介质衰减作用，回波强度随高度的变化，和波束不充满等的影响．

④ 利用测雨效率方程也有可能进行定量测量降水强度的工作，同样它有不受雷达方程、常用的 Z_e-R 关系等的精度和缺点的影响．可以按不同的降水性质统计地考虑回波强度随高度变化的影响．

⑤利用测雨效率方程能够求得时、空平均的中间介质衰减系数 $\bar{k}'$，Z_e-R 关系中的 $\bar{\alpha}'$、$\bar{\beta}'$．这里我们得出安徽—江苏地区三公分波长的介质衰减系数 $\bar{k}'=0.022$db/km，大范围降水云雨衰减系数的时、空平均值 $\bar{k}'_{云雨}$ 为 0.007db/km．

在以上工作中，有些计算用的是“711”雷达的素描图资料，不可能很准确．这里进行的验证和一些应用也未经反复实践检验，有待于进一步的实践检验．此外，除这里已经讨论的以外，雷达测雨效率方程还有其它的应用，有待于继续探讨．

参 考 文 献

[1] Austin, P. M., Distribution of Precipitation Echoes as Observed by Radar at Cambridge, Massachusetts, Proceedings 6th Weather Radar Conference, 221—226, 1957.
[2] Степаненко, В. Д., Радиолокация В Метеорологии, 199, 1966.
[3] 立平良三，レーダーの降水探知能力の距離による低下について，气象集誌，41，255—260，1963.
[4] Probert-Jones, J. R., The Radar Equation in Meteorology, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **88**, 485—495,

[5] Battan, L. J., Radar Observation of the Atomosphere, Chicago Univ. of Chicago Press., 88—95, 1973.
[6] 中央气象局,测雨雷达观测手册
[7] Gunn, K. L. S., and East, T. W. R., The Microwave Properties of Precipitation Particles, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **80**, 522—545, 1954.
[8] 前中央气象局观象台高空科,降水强度及降水量的雷达测定方法(未发表)
[9] 庄荫模、徐玉貌,"711"雷达测雨能力的分析,大气科学, 265—272, 1977.

EFFICIENCY EQUATION OF DETECTING RAIN BY RADAR AND ITS APPLICATIONS

Chuang Yin-mo and Shu Yu-mao
(*Nanjing University*)

Abstract

In this paper we present an efficiency equation of radar on detecting rain, which is tested by observational data, and some applications of the equation.