

《711》雷达测雨能力的分析

庄荫模 徐玉貌

(南京大学气象系)

一、前言

711 雷达已经广泛使用,它在许多方面发挥了积极的作用;但是,在不同的距离上,711 雷达究竟有多少雨探测不到?对不同范围的雨强,711 雷达比较有效的作用距离又有多大?雨的衰减作用对它的探测能力究竟能够影响到什么程度?这是使用 711 雷达资料的同志共同关心的问题。搞清楚这些问题,有助于正确分析和应用 711 雷达的观测结果,有助于有效地、经济地进行雷达网的布置。

为了搞清楚这些问题,可以对以下的雷达气象参数进行统计、计算:(1)雷达在不同距离上的测雨几率(用百分比表示,这就是在不同距离上雷达能够探测到降水的百分比次数,下面我们用 $P(r)$ 表示), (2)不同距离上最小可测降水强度(下面我们用 $R_{\min}(r)$ 表示), (3)大范围均匀降水时雨强 R 的最大探测距离 $r_{\max}(R)$ 。

二、利用雷达观测资料和地面降水资料求测雨几率

1. 资料和分析方法

安徽省合肥气象台的 711 雷达地处我国东部的中部,附近地势比较平坦,雷达站附近没有地形、地物阻挡,它对我国东部中部平原丘陵地区的 711 雷达有一定的代表性。

本文使用的是合肥气象台 711 雷达 72—74 年间 4—10 月的素描图记录和安徽-江苏地区十个水文、气象站的雨量自记记录。这十个站分布在雷达站周围 250 公里半径的范围内。其中有两个站距离相同,合并进行了统计。

距离 r 处的测雨几率我们用以下的关系式

$$P(r) = \frac{\text{雷达观测到 } r \text{ 距离某地有降水回波的次数}}{\text{雷达观测时 } r \text{ 距离某地地面观测到下雨的总次数}} \times 100\% \quad (1)$$

求得,为了去掉样本不足、随机误差带来的局部不规则涨落,我们把得到的测雨几率分布画成平滑线,这样就得到了图 1 所示的测雨几率 $P(r)$ - r 分布曲线(一组直线)。

2. 测雨几率及其分布

从 $P(r)$ 的统计分析中,得到以下的一些结果:

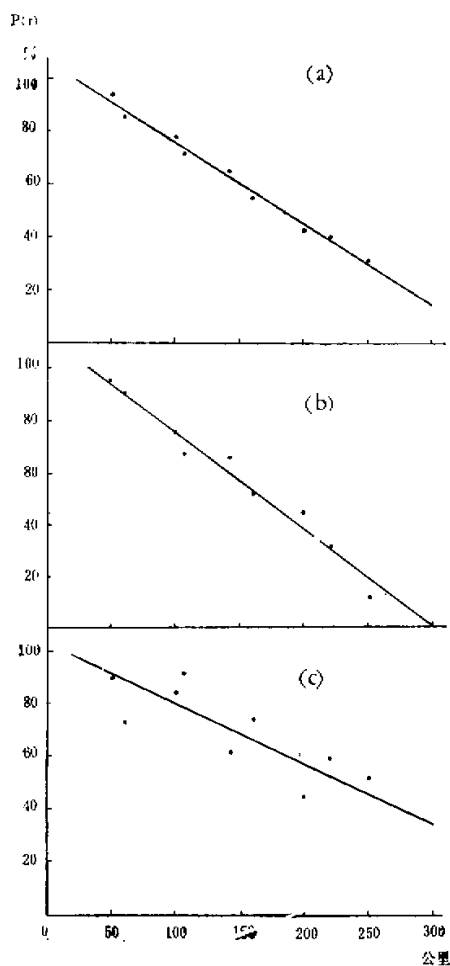


图1 711 雷达的实际测雨几率分布。

(a) 全部降水, (b) 大范围降水, (c) 零散对流降水。

测雨几率为零, 而零散对流雨的测雨几率还有大约 35%。

(6) 为了供分析、应用雷达回波资料和供布网、设站作参考, 我们把从图 1 的平滑直线得出的一些测雨几率的对应距离列表 1。

表 1 不同测雨几率对应的距离

r (公里)	P(r)							
		90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%
降水性质	总	51	84	118	150	184	217	251
	大 范 围	60	86	112	140	166	192	218
	对 流	58	101	146	190	234	278	> 300

(1) 在 250 公里范围内, 在 824 次雷达观测时有降水的事件中, 711 雷达在相应的地方观测到有降水回波的总次数为 508 次, 即总的测雨几率是 62%。有降水, 但是雷达未探测到的占 38%。考虑到 250 公里以外的测雨几率要比 250 公里以内的小, 因此, 在 711 雷达最大作用距离 300 公里范围内, 测雨几率不会比 62% 高 (300 公里附近没有找到适当的地面雨量站)。

(2) 50 公里上的测雨几率为 93%。这说明即使在 50 公里的距离上, 711 雷达也不能探测到自记雨量计上能够反映出来的所有的雨。

(3) 从图 1 上的 $P(r)$ 分布曲线可见: 测雨几率随距离的增加近于线性地降低。在 100、200、300 公里距离上 $P(r)$ 依次为 76%、45% 和 16% (见图 1(a), 300 公里上的 $P(r)$ 是由分布曲线外推得来的)。

(4) 按降水性质分别进行统计, 在 50—250 公里范围内, 在总数 630 次大范围降水中, 711 雷达的测雨几率为 60%; 而在总数 194 次零散对流降水中, 711 雷达的测雨几率为 73%。

(5) 从图 1 上的曲线 (b)(c) 可见: 大范围雨的探测几率比零散对流雨的探测几率随距离增加下降得更快。在 300 公里上, 711 雷达对大范围雨的探测几率为零, 而零散对流雨的测雨几率还有大约 35%。

因图 1 上的 $P(r)-r$ 分布线是根据总的、大范围的、对流的三种降雨情况的统计数据分别画出的平滑直线,所以在表 1 中出现了总的降雨情况下,对应于测雨几率 90% 和 80% 的探测距离比分别为大范围雨和对流雨情况下相同几率的对应距离都要小的不合理数值。这也表明表 1 的数据只能作为近似的参考数值。

三、不同距离上的最小可测雨强

上面得出的测雨几率分布,给出了安徽—江苏地区 711 雷达在不同的情况下,在不同的距离上能够观测到多少雨。进一步我们要知道不同距离上多大的雨强能够观测到,这就要求取不同距离上的最小可测雨强 $R_{\text{测}}(r)$ 。下面用三种不同的方法来求取。

(1) 从实际雷达回波资料和地面降水记录中找 $R_{\text{测}}(r)$

直接从 r 距离处某站的雨强和回波的对应情况找出最小可测雨强,这是最直接、最简单的办法,图 2 就是这样定出的 $R_{\text{测}}(r)$ 分布。

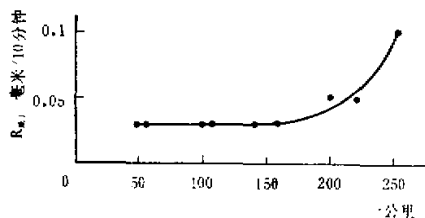


图 2 直接从雷达回波和地面降水记录得出的最小可测雨强

(2) 用雷达方程和 $Z-R$ 关系求 $R_{\text{测}}$

(r)

根据雷达方程和 $Z-R$ 关系^[1],可得

$$R_{\text{测}}(r) = \left(\frac{C}{\alpha} K^{-1} \psi^{-1} \right)^{\frac{1}{\beta}} r^{\frac{3}{\beta}} \quad (2)$$

式中 $C = \frac{1024(\ln Z) \lambda^2 P_r Pr_{\text{测}}}{\pi^3 P_t G^2 h \theta^2} \frac{m^2 + 2|z|^2}{m^2 - 1}$, 其中 λ 是雷达波长, $Pr_{\text{测}}$ 是雷达最小可测回波功率, P_t 是雷达发射脉冲功率, G 是天线增益, h 是脉冲长度, θ 是天线波束宽度, m 是降水物质的复折射指数,对雨来说, $\frac{|m^2 - 1|^2}{m^2 + 2} = 0.93$ 。把 711 雷达的这些参数的数值^[1]代进去,并使(2)式中距离 r 的单位为公里, $R_{\text{测}}$ 的单位为毫米/小时,则得 $C = 4.1 \times 10^{-4}$, Z 是雨的反射率因子, α, β 是 $Z = \alpha R^\beta$ 关系式中的系数和指数。 K 是雷达—目标间中间介质的衰减因子, $K = 10^{-0.2 \int_0^r k_{\text{总}} dr}$, $k = k_{\text{气}} + k_{\text{水}} + k_{\text{雨}}$ 。这里 k 是总衰减系数, $k_{\text{气}}, k_{\text{水}}, k_{\text{雨}}$ 分别是大气、雨、云的衰减系数,单位是分贝/公里。 ψ 是表示波束被降水物质充满程度的充塞系数,充满时 $\psi = 1$, 不充满时 $\psi < 1$ 。

为了使计算简单,只考虑固定的气体衰减影响和假定降水物质充满波束,这时

$$R_{\text{测}}(r) = \left(\frac{C}{\alpha} \right)^{\frac{1}{\beta}} K_{\text{气}}^{-\frac{1}{\beta}} r^{\frac{3}{\beta}} \quad (3)$$

式中 $K_{\text{气}} = 10^{-0.2 k_{\text{气}} r}$ 。

计算时取氧气的衰减系数为 0.01 分贝/公里,水汽的为 0.005 分贝/公里^{[1][2]},因而 $k_{\text{气}} = 0.015$ 分贝/公里。在零散对流雨时, α 和 β 取北京得到的 520 和 1.76;大范围雨时,考虑其中很多是混合降水,采用北京得到的 327 和 1.55^[2]。对雷达观测,使用 10 分钟雨强

1) 取水汽含量为 7.5 克/米³, 在 20℃, 一个大气压下, 3 公分波长的水汽衰减系数 $k_{\text{水汽}}$ 为 0.005 分贝/公里。

2) 可参阅前中央气象局气象台高空科编的“降水强度及降水量的雷达测定方法”(未发表)。

相对要好一些,这样对大范围雨

$$R_{\text{测}}(r) = 1.15 \times 10^{-4} r^{1.29} \times 10^{0.0019r} \text{ (毫米/10 分钟)} \quad (4)$$

对零散对流雨

$$R_{\text{测}}(r) = 2.12 \times 10^{-4} r^{1.14} \times 10^{0.0017r} \text{ (毫米/10 分钟)} \quad (5)$$

用(4)式和(5)式计算不同距离下的 $R_{\text{测}}$ 值,得图 3(a)、(b) 的虚线。

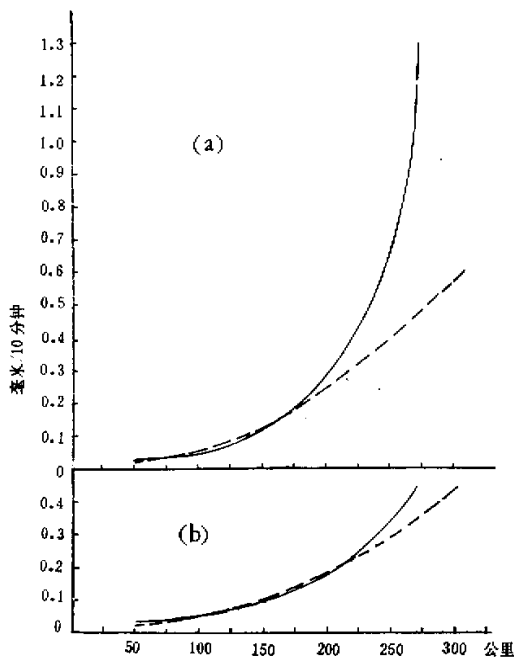


图 3 最小可测雨强 $R_{\text{测}}(r)$ 随距离的变化。(a) 大范围降水, (b) 零散对流降水。

图中实线是用测雨几率方程求得的,虚线是用雷达方程计算得到的。

(3) 利用测雨几率方程求 $R_{\text{测}}(r)$

从“雷达测雨几率方程及其应用”这一文章³⁾我们知道,在已知雨强分布规律(即 a 、 b 知道)的条件下,不同距离上的最小可测雨强可以由该距离上的测雨几率决定。这时它们的关系是

$$R_{\text{测}}(r) = 10^{\frac{\lg\left(-\frac{\ln P(r)}{a}\right)}{b}} + R_0 \quad (6)$$

式中“ $\lg$ ”是以 10 为底的对数,“ $\ln$ ”是以 e 为底的对数。在安徽—江苏地区,大范围雨时 $a = 2.05$, $b = 0.52$; 零散对流雨时, $a = 1.31$, $b = 0.46$ 。 R_0 是自记雨量计上的最小雨强读数,等于 0.03 毫米/10 分钟。

3) 庄荫模、徐玉貌,雷达测雨几率方程及其应用,尚未发表。

根据图 1 上 711 雷达的测雨几率分布,利用 (6) 式算出的 $R_{\text{测}}(r)$ 分布以实线表示在图 3 上。

现在我们把三种方法求得的 $R_{\text{测}}(r)$ 进行比较。由图 2、图 3 可见:从素描图和地面降水资料定出的 $R_{\text{测}}(r)$ 数值最小。用雷达方程、Z—R 关系算出的 $R_{\text{测}}(r)$ 比用第一种方法得到的 $R_{\text{测}}(r)$ 来得大,在 100—250 公里之间差不多要大二到五倍。用测雨几率方程求得的 $R_{\text{测}}(r)$,在二百公里以内和用第二种方法得到的相近,但是在这一距离以外,它的 $R_{\text{测}}(r)$ 值随距离增大而迅速增大,距离越远,它比第二种方法得到的 $R_{\text{测}}(r)$ 大得越多,特别是在大范围降水时,这种情况十分突出。

对于特定的雷达,在特定的条件下、特定的距离上,雷达能够探测到的 $R_{\text{测}}(r)$ 值应该是唯一的客观存在。为了求出比较符合实际的 $R_{\text{测}}(r)$ 分布,必须对上述三种方法三种结果加以分析。

第一种方法的 $R_{\text{测}}(r)$ 是根据某一次素描图回波范围和降水分布之间的对应关系确定的。由于素描图记录的回波区范围不很准确,它很可能把本来探测不到的小雨,由于描图范围的扩大而变成“可探测”的小雨,造成 $R_{\text{测}}(r)$ 值很小的假象,甚至比由忽略云雨衰减影响下的雷达方程计算出的理论值还要小,这显然是错误的。

第二种方法没有考虑云雨衰减作用和 $\psi < 1$ 以及回波强度随高度变化的影响,其结果必然是求出的 $R_{\text{测}}(r)$ 值在比较远的距离上仍然偏小(这里故且不论雷达参数是否有出入,Z—R 关系是否合用等问题)。

第三种方法由于在测雨几率 $P(r)$ 中自然地考虑了云雨衰减, $\psi < 1$, 回波强度随高度变化等影响,它在理论上弥补了第二种方法的缺点。从实际 $R_{\text{测}}(r)$ 的计算结果上也确实反映出了它的这一优点,即在不太远的距离上这两种方法得到的 $R_{\text{测}}(r)$ 值比较接近,在比较远的距离上用测雨几率方程求得的 $R_{\text{测}}(r)$ 值比用雷达方程、Z—R 关系得到的值来得大,并且距离越远、大得越多,大范围降水时尤其是如此。

根据以上分析,下面用测雨几率方程求出的 $R_{\text{测}}(r)$ 来推算 711 雷达的测雨能力。按中央气象局地面观测规范上划分大、中、小雨的标准^[1](换算成 10 分钟雨强,应有 0.4 毫米/10 分钟以下的雨为小雨;0.4—1.3 毫米/10 分钟的雨为中雨;1.3 毫米/10 分钟以上的雨为大雨),可以作出 711 雷达对大、中、小雨探测情况的范围图(图 4)。

由于在同样距离下,大范围雨的 $R_{\text{测}}(r)$ 值比零散对流雨的 $R_{\text{测}}(r)$ 值大,因此,按 $R_{\text{测}}(r)$ 值的含意,大范围雨时 $R_{\text{测}}(r) = 0.4$ 毫米/10 分钟所对应的距离——220 公里应该是所有中雨都能被探测到的范围,这里我们叫它为小雨的有效探测范围;同样,大范围雨时与 $R_{\text{测}}(r) = 1.3$ 毫米/10 分钟相对应的距离是 270 公里,即大雨的有效探测范围为 270 公

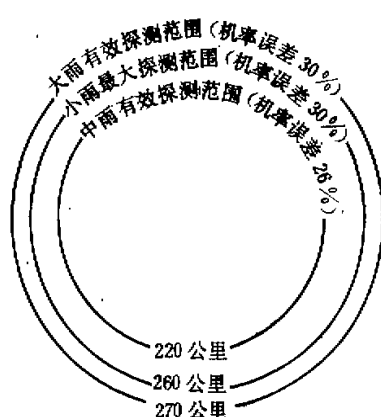


图 4 利用测雨几率方程算出的 711 雷达探测大、中、小雨的情况

里。此外,根据计算,与零散对流雨时 $R_{\text{测}}(r) = 0.4$ 毫米/10分钟对应的距离是260公里,这样,260公里将是小雨的最大探测距离。

为了检验上面的计算结果,我们按雨强等级统计了711雷达的实际探测几率。结果是:在我们能够统计的250公里范围内,大雨的实际探测几率是71%;在220公里的范围内,中雨的实际探测几率为70%;在250公里上,小雨的探测几率为26%,即在250公里以外,小雨探测几率 $< 26\%$ 。这就是说,根据几率方程计算出来的 $R_{\text{测}}(r)$ 确定的大雨和中雨有效探测范围各有约30%的几率误差,小雨不可探测范围有 $< 26\%$ 的几率误差。

由于各种雨的探测几率的统计和 $R_{\text{测}}(r)$ 的计算都是根据素描图资料和常规雨量计资料,上面得出的误差不可能很准确。此外,考虑到用几率方程计算 $R_{\text{测}}(r)$,在测雨几率中虽然已经包含了云、雨衰减等影响,但这种考虑只是统计性的、气候性的,或者说是平均的情况。个别情况下,雨对3公分电波的衰减可能大大地偏离平均的情况;而在这种方法中,不论实际衰减的情况如何变化,都是把雷达所观测到的雨所占的百分比数全部归之于不小于“ $R_{\text{测}}(r)$ ”的雨,而把雷达未观测到的雨全部归之于比“ $R_{\text{测}}(r)$ ”更小的雨。因此,由此求出的“ $R_{\text{测}}(r)$ ”必然比实际可能观测到的 $R_{\text{测}}(r)$ 来得大。所以,对衰减波长,用测雨几率方程计算得的 $R_{\text{测}}(r)$ 来表示雷达测雨能力会和实际情况有所出入,这是必然的,也是可以理解的。

四、雨的衰减对711雷达测雨能力的影响

雨对3公分雷达的探测能力能够产生严重的影响,下面利用雷达方程、Z-R关系从理论上进行一些分析计算。为了使计算简单和可能,这里只考虑雨强空间分布均匀的大范围稳定性雨的情况(因此下面得到的各种雨强下有效探测距离的估计将与前面一节所得的结果有所不同)。这时衰减因子 $K = K_a \times K_m$ 。气体衰减系数上面计算时已经给出,雨的衰减系数对3公分波长,温度为18℃时,有 $k_m = 0.0074 R^{1.31[4]}$ 。利用这个关系,得

$$K_m = 10^{-0.00148r R^{1.31}} \quad (7)$$

对大范围均匀降水,取⁴⁾

$$Z = 217 R^{1.37} \quad (8)$$

在(7)和(8)式中,R的单位是毫米/小时。在大面积雨强均匀分布的情况下,711雷达的探测距离不会太远,这时取 $\phi = 1$ 。最后可以由雷达方程得到:

$$R = 1.53 \times 10^{-5} r_{\text{测}}^{1.71} 10^{0.0026r_{\text{测}} \times 10^{0.0013r_{\text{测}} R^{1.31}}} \quad (9)$$

上式中雨强单位为毫米/10分钟。解上式得各种雨强时711雷达的最大探测距离如图5所示。可以看出,由于雨的衰减作用:

(1) 在大范围均匀降雨时,711雷达对0.27毫米/10分钟的小雨探测距离最远,但是这时的探测距离不超过135公里。

(2) 0.27毫米/分钟以下的小雨,随着雨强增大探测距离也增大;0.27毫米/10分钟以上的雨,随着雨强增大探测距离不但不增大,反而减小。

4) 见前注2)

(3) 当中雨强度从 0.4 毫米/10 分钟变化到 1.3 毫米/10 分钟时, 相应的有效探测范围从 125 公里减小到 85 公里。

(4) 能够探测到均匀大雨的最远距离不超过 85 公里。在 85 公里范围内, 雨强越大, 探测距离越近。例如雨强为 2.6、7.4、16 毫米/10 分钟时, 711 雷达的探测距离只分别为 50、20 和 10 公里。

以上计算结果说明, 在一些情况下, 雨的衰减作用能够严重地影响 3 公分雷达的探测能力。

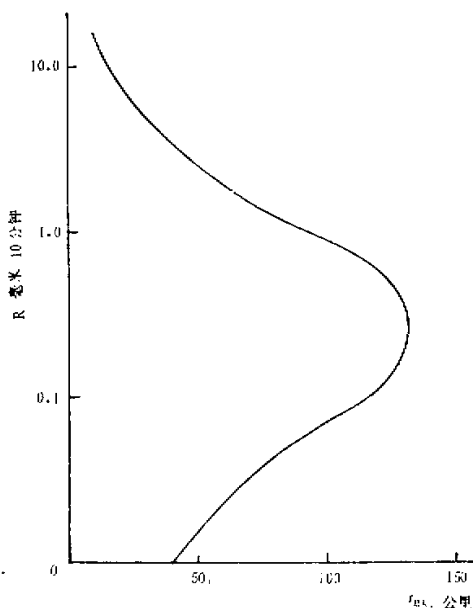


图 5 大范围均匀降雨时, 各种雨强下 711 雷达的最大探测距离

五、结 束 语

总结以上的分析和计算, 711 雷达的测雨能力可以归纳成以下几点主要结论:

1. 711 雷达的测雨几率随距离增加近乎线性地下降, 在比较远的距离上, 雷达探测零散对流雨的能力比探测大范围雨的能力相对要好得多。

2. 在几率误差为 30% 的情况下, 711 雷达对大雨的有效探测范围为 270 公里, 对中雨为 220 公里。根据现有的计算结果, 为了最大限度地发挥 711 雷达的探测能力, 同时避免过多的中等强度以上的雨探测不到, 在雷达网中, 711 雷达的规定有效半径似乎不宜大于 220 公里。

3. 雨的衰减作用能够严重地影响 3 公分雷达的测雨能力。在大范围均匀降雨的情况下, 711 雷达探测中雨的有效范围为 85 公里, 大雨的探测范围小于 85 公里。

上面介绍了利用素描图资料统计 $P(r)$, 然后通过 $P(r)$ 的统计值求 $R_{0.4}(r)$, 得到了有

规律的、合理的结果。但是,素描图资料毕竟不大准确,常规的自记雨量计也不够灵敏,并且我们使用的资料仍然不够多,因此,以上的内容只是目前条件下能够进行的初步分析、计算;更准确的分析、计算还有待于积累比较多、比较好的照相资料和使用精细的雨强资料来进行。

这一工作承安徽省气象局、合肥气象台及其雷达组的大力支持,承安徽省水电局水文组、江苏省水文总站的热情帮助,谨表示衷心感谢。

参 考 资 料

- [1] 中央气象局,测雨雷达观测手册,1972, 88-89.
- [2] W. M. O. Technical Note No.110 Use of weather radar for aviation, 1970.
- [3] 中央气象局,气象观测暂行规范,地面部分.
- [4] L. J. Battan, Radar observation of the atmosphere, Chicago, Uni. of Chicago Press,1973,72.