

三维云模式在衰减波长雷达上的回波图象

马振骅 杨平* 孙明忠**

(中国科学院大气物理研究所)

(南京气象学院)

一、介绍

在雷达观测强风暴移动的过程中,屏幕上看到的风暴回波的形态结构是在不断变化着的。这种变化的原因包含有风暴本身结构随时间的演变,以及雷达探测性能中与距离有关的因素。为了单独考察后者的影响,可以计算某些不同距离上固定云模式的回波图象。Atlas等^[1]曾给出了二维轴对称降水模式在近距离上的回波图象。他们的计算忽略了波束宽度的影响,但考虑了雨的衰减和距离衰减的影响,得到了蝴蝶形的回波图象模式。以后Donaldson^[2]又计算过一维(垂直方向)云模式的回波强度垂直廓线。在他的计算中,仅考虑波束内能量分布在垂直方向上的不均匀性。实际的云体反射率结构是三维的,而且波束内的发射能量分布也是上下左右不均匀的。这些因素对处在不同距离上的风暴回波的外观形态结构会产生什么影响,是一个值得探讨的问题。弄清楚这个问题,对于利用雷达回波资料作云体结构分析和降水强度或含水量的定量测量,都有重要的指导意义。

在我们的模式计算中,考虑以下几种因素:

1. 云体反射率结构是三维不均匀的。
2. 雷达波束在水平和垂直方向皆有一定的宽度,且波束内的发射能量在与波束轴相垂直的平面上的分布是不均匀的。
3. 波束在路径中遭受云雨衰减和距离衰减。
4. 因地球曲率和大气折射的影响,发射波束的高度随距离而变化。
5. 地面对部份波束的遮挡作用。

在综合考虑雷达探测中实际存在的上述各种因素的条件下,我们计算了模式云处在不同距离上时,下列一些物理量的分布:

(1) 回波功率 P_r 在本文后面,回波功率用相对于雷达最小可辨功率 $P_{r, \min}$ 的分贝数 N 来表示,即

$$N = 10 \log (P_r / P_{r, \min}) \quad (1)$$

(2) 外观反射率 Z_p 由回波功率可通过雷达气象方程计算出反射率因子。但由于种种因素的影响,这样计算出来的反射率因子值并不是云体真正的反射率因子值,仅仅是雷达探测到的外观值而已。为区别起见,外观反射率因子用符号 Z_p 表示,而云体真正

1978年12月26日收到修改稿。

* 现在贵州省气象学校。 ** 现在山东省气象局。

的反射率因子(模式给定值)用符号 Z_e 表示。

(3) Z_p 与 Z_e 之差 这个值表明由雷达测量推算出的反射率与真实反射率之间的偏离。在本文后面, 这个偏离用两者分贝数之差来表示, 记为 ΔDBZ , 即

$$\Delta DBZ = DBZ_p - DBZ_e = 10 \log(Z_p/Z_e)$$

这些量分布的计算结果反映出一些很有意思的事实。

二、云模式与回波计算

根据对大量强风暴的观测, 我们认为, 平均说来, 风暴单体的水平形态近似于一个椭圆, 其反射率由内部向外递减; 在垂直方向上, 反射率随高度减小。为简明起见, 我们设计的云模式在 3.2 厘米波长上的反射率呈如下分布

$$\left. \begin{aligned} \eta &= 10^{-11+5(1-z^2/d^2)^2(1-x^2/a^2-y^2/b^2)^{1/2}} \text{ cm}^{-1} && \text{当 } (x^2/a^2 + y^2/b^2) \leq 1 \text{ 和 } z/d \leq 1 \\ \eta &= 0 && \text{当 } (x^2/a^2 + y^2/b^2) > 1 \text{ 或 } z/d > 1 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 a 和 b 分别是云体的半长轴和半短轴, 在所计算的模式中, 分别取作 10 和 5 公里, d 是云体厚度, 在模式中取作 10 公里。云体的水平边界是在由 $x^2/a^2 + y^2/b^2 = 1$ 式所决定的椭圆上。强回波核处在云体底层的中心。用 η 表示的反射率可以通过下式与反射率因子 Z 相联系

$$\eta = \frac{\pi^5}{\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 Z \quad (3)$$

式中 λ 是波长, m 是水的复折射指数。按照 (3) 式, 可算出模式云强回波核对 3.2 厘米波长的反射率因子为 56DBZ, 在任何高度的云体边界上及云顶处, 反射率为 6DBZ。上述的云体尺度及反射率分布是一种对实际近似的假设。在三个坐标平面上云模式的反射率分布如图 1 所示。

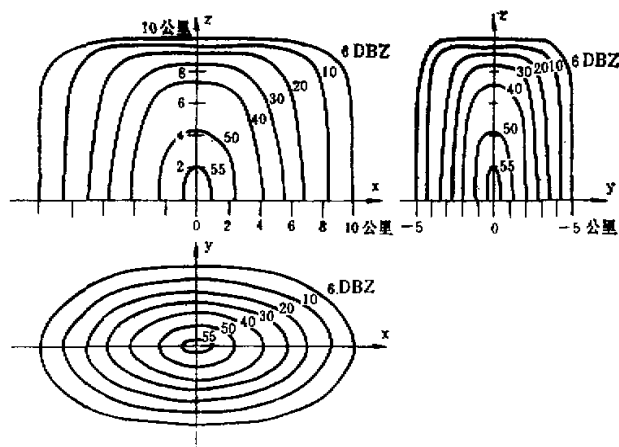


图 1 模式云在三个坐标平面上的反射率分布。(a) 在 $x=0$ 平面上, (b) 在 $y=0$ 平面上, (c) 在 $z=0$ 平面(地面)上

假设雷达发射波束内能量分布的二维方向性函数为正态的,即

$$f(\theta, \phi) = e^{-4(\ln 2)(\frac{\theta^2}{\theta_0^2} + \frac{\phi^2}{\phi_0^2})} \quad (4)$$

式中 θ 和 ϕ 分别是波束中水平和垂直方向上的偏轴角度, θ_0 和 ϕ_0 是由半功率点确定的波束宽度, 整个波束内的回波功率为

$$P_r = \frac{P_t G_0^2 h \lambda^2}{2^7 \pi^3 r^2} \int_{\phi} \int_{\theta} \eta \cdot f(\theta, \phi) d\theta d\phi \quad (5)$$

式中 P_t 是发射脉冲功率, G_0 是波束轴方向上的天线增益, h 是发射脉冲长度, r 是雷达至被测云体部位的距离。

在波束照射体积内目标物反射率是均匀分布的简化条件下, 由 (3)、(4) 和 (5) 式可导出常用的无介质衰减情况下的 Probert-Jones 雷达气象方程^[3]

$$P_r = \frac{P_t G_0^2 h \pi^3 \theta_0 \phi_0}{1024 (\ln 2) \lambda^2 r^2} \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} Z \quad (6)$$

在我们的计算中, 考虑到 η 在波束内的分布并不均匀, 因此对回波功率的计算需应用 (5) 式。由于 3.2 厘米波长在云雨中的衰减不能任意忽略, 所以在回波功率的计算中应包含衰减因子。在计算中 θ 和 ϕ 的取值区间各相当于两倍于半功率点波束宽度, 即在 $(-\theta_0, \theta_0)$ 和 $(-\phi_0, \phi_0)$ 范围内, 这是为了使波束中半功率点波束宽度以外的绝大部份回波贡献也包含在计算之内。因此计算公式的积分形式是

$$P_r = \frac{P_t G_0^2 h \lambda^2}{2^7 \pi^3 r^2} \int_{-\phi_0}^{\phi_0} \int_{-\theta_0}^{\theta_0} \eta \cdot f(\theta, \phi) d\theta d\phi \cdot 10^{-0.2 \int_0^r k dr} \quad (7)$$

式中衰减系数 k 的取值通过下式由波束轴上的反射率因子 Z 确定

$$k(\text{DB/KM}) = 2.8 \times 10^{-4} Z^{0.72} \quad (8)$$

(8) 式是在 Marshall-Palmer 雨滴谱分布下对 3.2 厘米波长适用的。实际计算是将 (7) 式的积分化为有限求和的形式用计算机算出的。

在天线仰角值未超过波束宽度值的情况下, 发射波束中一部份能量将会投射到地面上, 并在地面产生部份反射而叠加到直接波中。由于直接波和反射波的干涉效应, 叠加波中的能量分布很复杂。地表反射系数与地表物质的物理性质、表面粗糙度以及辐射波的入射角和偏振性有关。地表反射系数可在 0—1 之间变化。关于地表反射系数的讨论可参看有关的专著, 例如参考文献 [4]。在本文中, 为了简化计算模式起见, 我们假设地表的反射系数为零, 这相当于地表为微波黑体(全吸收)物质或极端粗糙的情况。当然, 这种情况在自然界中并不常见, 但作为这个工作的初步探讨, 不妨暂且仅考虑这种极端情况。在这种假设下, 我们可以认为雷达发射波束中低于水平发射角的那部份辐射波对回波没有贡献。因此, 当天线仰角低于 ϕ_0 值时, 在计算中对 (7) 式中的垂直偏角积分下限作相应的修改。

在计算中, 不同距离上波束轴的高度是按下列传播公式来确定的

$$H = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R} + K \right) r^2 + ar \quad (9)$$

式中 H 是波束轴离地高度, R 是地球半径, 取作 6370 公里, K 是标准大气下的折射指数垂

直梯度, 取为 -4×10^{-8} / 米, α 是天线仰角。

设雷达位于椭圆形模式云短轴的延长线上。当雷达处在离云体中心不同距离时, 计算了以 0° 、 0.75° 和 1.5° 仰角扫视得到的回波功率分布。计算中所用的雷达参数近似于 711 雷达的额定参数, $\theta_a = \phi_a = 1.5^\circ$, $h = 300$ 米, $\lambda = 3.2$ 厘米, $P_t = 75$ 千瓦, $P_{rmin} = 2.5 \times 10^{-13}$ 瓦。

在实际工作中, 对雷达回波资料作定量分析时, 由于无法知道波束在穿越云雨区域时所经受的介质衰减实际值和反射率在照射体积内的分布不均匀程度, 因此常常只好简单地由回波功率通过无衰减条件下的一般雷达气象方程 (6) 式来推算云雨的反射率。为了考察这样得到的外观反射率 Z_p 分布与实际反射率 (模式值) Z_e 分布有多大的差异, 我们计算了此两者的分贝差值 ΔDBZ , 并对各种情况下出现的 ΔDBZ 分布作出解释。

三、结果分析

首先考察 1.5° 天线仰角下的情况。在这个仰角下, 地面对波束遮挡的影响是极小的, 况且又处在我们的波束界限以外, 所以不加以考虑。不同距离上的回波功率分布画在图 2(a) 上。可以看到, 在强回波区后面出现因雨区衰减而造成的回波凹陷。此外, 当云体处在近距离时, 观测到的回波比实际云体在横向上略大。众所周知, 这是由于波束宽度的原因。当云体变远时, 由于距离衰减的影响, 可观测到的回波区域逐渐小于实际云体。

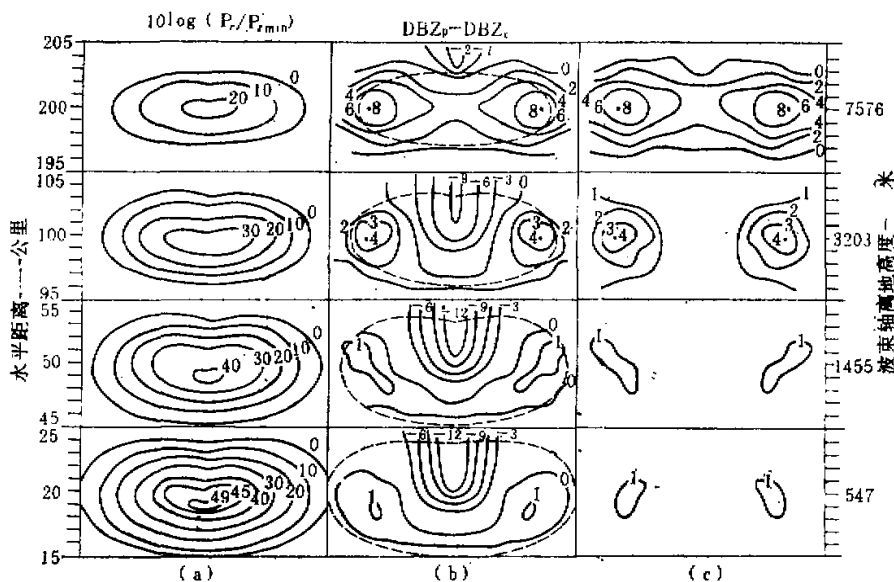


图2 1.5° 天线仰角下, 不同距离上模式云的回波特征。(a) 回波功率 N 分布, (b) 有介质衰减时, 外观反射率 Z_p 与模式实际反射率 Z_e 之间的分贝差值 ΔDBZ 分布, 虚线所围是可以观测到回波 (即 $N > 0$) 的部份, (c) 假定无衰减时, ΔDBZ 的分布

由回波功率通过(6)式计算的外观反射率 Z_p 分布的图象与 N 分布的图象相类似,只是因消除了距离因子的影响,强回波区后面的凹形缺口显得略浅些。为了节省篇幅,不再画出。由于波束高度随距离而增大,所以扫视面上云模式反射率 Z_e 分布也随距离而不同,但其廓线形态皆与图 1(c) 相同,也不另画出。在图 2(b)中给出了 $\Delta DBZ = DBZ_p - DBZ_e$ 的分布。

观察图 2(b),可以看到有意思的是,在云体回波内的左右侧,各出现一个 $\Delta DBZ > 0$ 的区域。正值 ΔDBZ 的区域面积和中心值都随着距离增大而增大。这种现象是由于波束宽度而造成的。因为 Z_p 值是根据整个波束有效散射体积中的回波贡献而算出的,并将它规定为波束轴上的外观反射率值。由于波束中发射能量分布和云体反射率分布是不均匀的,所以波束中回波能量分布也是不均匀的;回波能量大的散射体积部份可使 Z_p 值升高,而回波能量小的体积部份则使 Z_p 值降低。当前者的影响较大时,则可使外观反射率 Z_p 超过实际波束轴上的反射率值 Z_e 。在距离近(例如 20 公里)时,波束横向尺度小,因而这个效应表现较不明显。随着距离增大,波束横向尺度增大,上述效应相应增加的结果,可以使 ΔDBZ 的值增大,正值区面积也增加。在图 2(b)所示的情况下,200 公里距离上的 Z_p 可超过 Z_e 达 8DB 之多。

雨区衰减会使外观反射率减小。为了比较在有、无衰减的情况下 ΔDBZ 的分布,我们也计算了同一模式云在假定无衰减条件下的 ΔDBZ 分布,见图 2(c)。从图可以看出,除了不存在因雨区衰减而造成的处在强回波区后面的负 ΔDBZ 区域以外,正值 ΔDBZ 区的分布与图 2(b)(考虑衰减影响)基本相同,这是因为云内两侧衰减本来就较小的缘故。

从这些分析可以得出结论,就是在雷达观测时,即使在衰减波长上,也可能发生根据回波功率计算出来的外观反射率,在相当大的面积上高于真实值的现象。如果加上估计的衰减订正值,那么偏高就可能更多些。当然,计算的 ΔDBZ 分布与所假设的云模式有关,在实际反射率为某些其他特殊分布的条件下,也可能出现波束宽度效应使外观反射率偏低的现象。由于这个模式比较接近于实际强风暴内的反射率分布,所以这里提出的现象是值得注意的。从图 2(c)可知,即使非衰减波段的雷达再加上距离补偿装置,在 100—200 公里距离上仍难免出现反射率相当不真实的现象,使得移动的风暴呈现出虚假的增强或减弱。在作强风暴回波定量分析时,应想到这个问题。

当天线仰角降低为 0.75° 时,此仰角相当于波束半宽度,因而由半功率点规定的波束宽度仍全在地平线之上,波束中保留了发射能量中的绝大部份。这种情况下,回波功率廓线与 1.5° 仰角下的结果很接近。现只将 ΔDBZ 廓线画在图 3(a)中。比较图 3(a)与图 2(b),可以看到,在 100 公里以内,此两种仰角下的 ΔDBZ 廓线是很相似的,而在 200 公里距离上则有较大差异。在 0.75° 仰角时,200 公里距离上波束轴所处高度(约 5 公里)上云体仍较强,因而在强回波区后面仍存在一片负值 ΔDBZ 的区域;而在 1.5° 仰角下,200 公里距离上波束轴已达 7.6 公里高度,此处云体较弱,衰减影响很小,使得即使在云体中心仍出现正值 ΔDBZ 的区域,这是由于波束中的下部投射到较强云体部位的影响。但在强中心后面还存在一片较弱的负值 ΔDBZ 区域,与无衰减条件下(图 2(c))对应的更小且更弱的负值 ΔDBZ 区比较起来,反映出还存在一些衰减影响。在 0.75° 仰角下,200

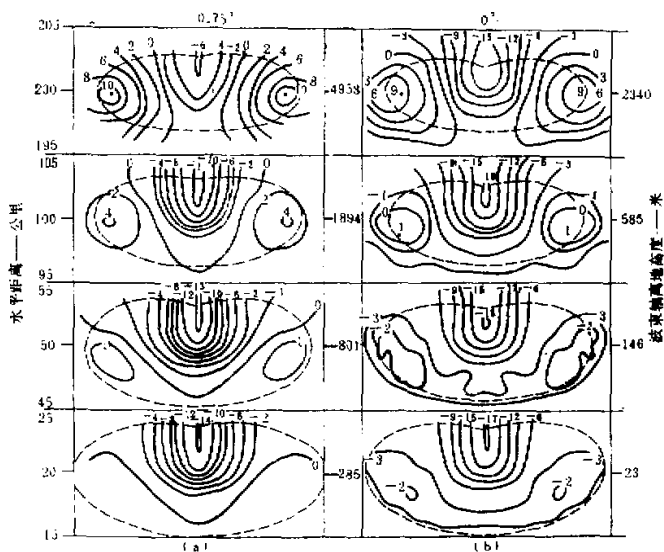


图3 (a) 0.75° 仰角下的 ΔDBZ 值分布, (b) 0° 仰角下的 ΔDBZ 值分布, 虚线所围是可观测到回波(即 $N > 0$) 的区域

公里距离上,云体内左右两侧的 ΔDBZ 值可高达 +11, 更说明这种现象是值得注意的。

当天线降至 0° 时,从图 3(b) 可以看到,在云体两侧对应于 0.75° (图 3(a)) 或 1.5° (图 2(b)) 仰角下的大片 ΔDBZ 为 0—1 的区域,出现的 ΔDBZ 值为 -3—-2。当距离为 100 或 200 公里时,这些区域出现的 ΔDBZ 值升高,但仍比 0.75° 情况下相应位置上的值低 3dB 左右。这个现象反映了 0° 仰角探测时,波束下半部份被地面遮挡影响的结果。另外,在这些距离上,0° 仰角下强回波区后面的 ΔDBZ 值比 0.75° 情况下的低不止 3dB,这是因为除了半波束损失外,0° 仰角波束高度更低,因而经过云体更强区域而遭受更大的衰减。由此看来,当雷达用低于波束半宽度的仰角作降水强度的定量测量时,地面对波束的部份遮挡作用是值得考虑的。

在通过云体中心的垂直剖面上计算的回波图象,如图 4(a) 所示。一些可以预期到的规律在图上明显地呈现出来,例如由于雨区衰减和距离衰减的结果,纵向水平外观尺度随云体离站距离的增大而减小;由于波束宽度的效应,回波的外观顶高随距离而增加(在这个模式中,顶高的增加一直持续到最大计算距离 200 公里上;再继续增加距离,可以预料因距离衰减的原因,最终观测到的回波顶会急剧下降)。值得注意的是,在回波强度 N 图上,显示出一个虚假的不接地的强核,在近距离上这个现象并不明显,但随着距离的增加,强核的外观高度也随之升高,但是在原设模式中,强核是贴着地面的。造成这种现象的原因,包含下列三个因素: 1) 低仰角时,地面对部份波束的遮挡作用使回波功率偏小。 2) 越往下层,云体的衰减越大。 3) 低仰角下波束轴指向真正强核时,因偏轴部位的反射率皆低于轴上反射率,波束宽度效应使外观反射率降低;而抬高仰角时,波束下部所照射到的云体反射率比波束轴上的反射率大,波束宽度效应可能使波束轴上的外观反射率升

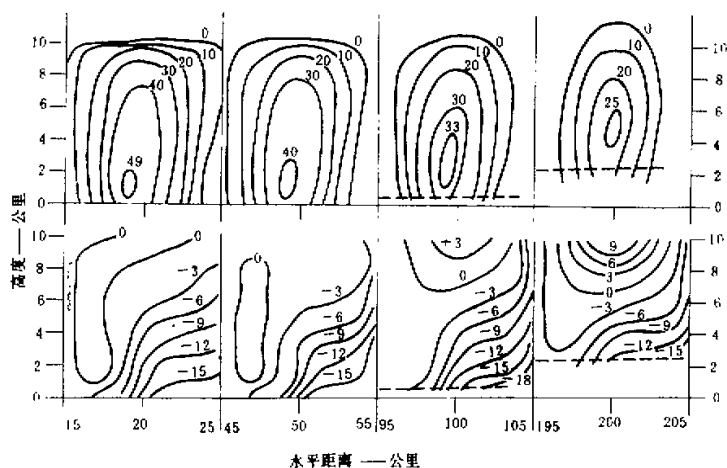


图4 (a) 通过云体中心的垂直剖面上回波功率 N 的分布, (b) 同一剖面上 ΔDBZ 的分布。虚线是雷达视平线高度

高。这三个因素的综合作用,使云体中心垂直线上的外观反射率与实际反射率(模式值)之差 ΔDBZ 随高度而增大(见图4(b)),这样出现了虚假的不接地强核。在其他某些分布(例如云体底层反射率随高度急剧递减)下,可能并不出现虚假的不接地强核。由于中空强核有时被用作识别风暴强烈性的指标之一,因而远距离上较高的虚假强核出现的可能性是值得注意的。

四、概 括

计算了三维云模式对3.2厘米波长雷达的外观反射率分布,从计算结果可推论,在雷达用于实际强风暴PPI观测时,应注意:

1. 在强回波区后面存在因雨区衰减而造成的回波凹陷。外观最强回波核位置略偏向雷达站一侧。
2. 在回波单体内部强回波区两侧可能出现反射率计算值偏高的区域。这种现象是由于波束宽度造成的。在近距离内误差较小,在远距离上则误差可能达很大。在远距离处,即使在强回波区上空也可能出现反射率计算值偏高的现象。
3. 当天线仰角值低于波束宽度值时,应考虑地面对波束的作用。当地面为全吸收性或极端粗糙及天线仰角为 0° 时,回波功率受到约-3DB的损失。

雷达工作于垂直剖面观测时,应注意可能出现虚假的不接地强回波核。波束宽度、云雨衰减和地面遮挡是产生这种现象的三项可能因素。外观云顶高度随距离的变化则是由于波束宽度造成的。

本文未考虑天线旁瓣的影响,但因旁瓣上的增益比主瓣增益低得多(双程增益约低50DB左右),故而可以预料,包括旁瓣影响在内的计算结果不会与前述结果之间存在重大的

差异. 另外, 可以预期, 如果云模式中包含有尺度较小的细微结构, 则由于波束宽度影响的存在, 在远距离上这类结构特征可能被平滑掉. 在上述这个简单的模式中, 未能明显地反映这个问题.

参 考 文 献

- [1] Atlas, D. and Banks, H. C., The interpretation of microwave reflections from rainfall, *J. of Meteorology*, Vol. 8, No. 5, 271—282, 1951.
- [2] Donaldson, R. J., Jr., A demonstration of antenna beam errors in radar reflectivity patterns, *J. Appl. Meteor.*, Vol. 3, No. 3, 611—623, 1964.
- [3] Probert-Jones, J. R., The radar equation in meteorology, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 88, 485—495, 1962.
- [4] Long, M. W., Radar reflectivity of land and sea, D. C. Heath and Company, 1975.

RADAR ECHO PATTERN AT ATTENUATION WAVELENGTH FOR THE THREE DIMENSIONAL CLOUD MODEL

Ma Zhen-hua

(Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica)

Yang Ping Sun Ming-zhong

(Nanjing Institute of Meteorology)

Abstract

In this paper, the distribution of apparent reflectivity at the attenuation wavelength for the inhomogeneous three dimensional cloud pattern at different distances from the radar station has been calculated. In the calculation several factors are considered: unequal distribution of the transmitted energy in the radar beam, medium extinction and range extinction in the path, the variation of beam elevation with range, and the effect of occultation of beam by the ground. Based on our calculation, the difference between the measured apparent reflectivity value and the original model value is given. The result indicates that for the typical severe convective cloud having high reflectivity core the apparent reflectivity value might be evidently higher than the actual model value for most part of the cloud when it is far from the radar station. This phenomena is mainly due to the beam width effect.