

地面的部分镜反射特性对雷达定量 测雨结果的影响

马 振 骅*

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

在考虑到地球曲率、大气无线电折射率垂直梯度、地表反射系数和地面粗糙度等因素对无线电波传播影响的条件下,推演了计算雷达波束内能量分布和气象目标物回波功率的表达式。根据这些公式的计算结果表明,雨区回波功率与不考虑这些因素情况下的值相比较,可有一3至+6分贝的偏差,具体值取决于雷达离地高度、天线仰角、雷达波长、波束宽度、地表反射系数和粗糙度等。

一、引 言

雷达在测量大面积上降雨量分布方面所具有的优点已得到广泛的承认。各国的工作者在探讨回波强度与降雨率之间的定量联系方面已做了不少工作。在实验中,为了避免地面特性对雨区回波测量的影响,通常需把天线仰角至少保持在波束的半宽度以上,因而减小了雷达测雨的有效范围。地面对电磁波的作用,究竟对雷达定量测量降雨率有多大影响,是一个值得探讨的具有实际意义的问题。

在雷达测量降雨量中,地面的影响主要表现在三个方面:1.因地面后向散射而产生的杂波,混杂在雨区回波信号中。2.地物对雷达波束的部分遮挡作用。3.地面在镜反射方向的反射波与雷达波束中的其他部分发生电磁场的干涉,从而改变了波束中的能量分布。这种效应,也会使得来自雨区的回波强度不同于无地面影响时的情况。对于前两种效应的作用和为减小影响所采取的办法,已有一些工作者作了探讨。本文将从理论上探讨地面的镜反射特性对雷达波束中能量分布和雷达定量测雨结果的影响,并且给出一些对实际工作有用的数据。

二、直射波与反射波的路程差

在雷达天线仰角较低时,发射波束中初始仰角低于 0° 的一部分射线,将在一定距离外投射到地面上(设投射点为 Q_2 ,见图1所示),并在地面产生反射波(设反射波的仰角

1982年9月29日收到。1982年12月3日收到修改稿。

* 南京气象学院刘学忠参加了部分工作。

为 α_r). 另有一部分初始仰角较高的射线, 在到达 Q_2 点上空时, 局地仰角也为 α_r ; 这部分射线由于未与地面相交, 可称为直射波. 因在 Q_2 点上空, 这两部分反射波与直射波相平行, 故在远处将产生波的叠加. 合成波的强度, 不仅与直射波及反射波的强度有关, 也与此两波的路程差有关, 因为路程差决定了两者之间的载波相位关系. 为了阐述方便起见, 下面先讨论两波的路程差.

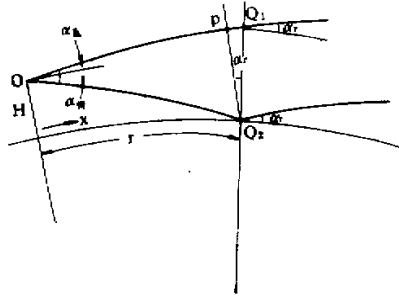


图 1 表示雷达直射波和地面反射波路程差的示意图

在呈水平分层均匀的地球大气中, 表征射线轨迹的微分方程是^[1]:

$$\frac{d^2 h}{dx^2} - \left(\frac{2}{R+h} + \frac{1}{n} \frac{dn}{dh} \right) \left(\frac{dh}{dx} \right)^2 - \left(\frac{R+h}{R} \right)^2 \left(\frac{1}{R+h} + \frac{1}{n} \frac{dn}{dh} \right) = 0 \quad (1)$$

式中 h 是射线的离地高度, x 是水平距离, R 是地球半径, n 是大气折射率, 是个随高度变化的量. 当所考虑的射线仰角不高时, 并因 $h \ll R$, 由 (1) 式可得到两个分别表示射线仰角和射线高度随水平距离变化的式子:

$$\alpha = \left(\frac{1}{R} + K \right) x + \alpha_0 \quad (2)$$

$$h = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R} + K \right) x^2 + \alpha_0 x + H \quad (3)$$

式中 α 和 α_0 分别是射线在路径中的仰角和射线离雷达时的初始仰角, H 是雷达天线的离地高度, K 是大气折射率的垂直梯度, $K = dn/dh$. 在本文后面的计算中, 皆取标准大气下的值, 即 $K = -4 \times 10^{-8}$ / 米; 地球半径 R 取 6370 公里.

如果射线初始仰角为某负值, 则射线可能与地面相交, 其交点离雷达站的水平距离 r 可由 (3) 式解出, 为

$$r = \frac{-\alpha_0 - (\alpha_0^2 - 2EH)^{1/2}}{E} \quad (4)$$

式中 α_0 表示具有负值的射线初始仰角, $E = \left(\frac{1}{R} + K \right)$.

射线在接触地平面时的仰角(是个负值)为

$$\alpha_1 = -(\alpha_0^2 - 2EH)^{1/2} \quad (5)$$

而水平地面上的反射线的仰角应为

$$\alpha_r = (\alpha_0^2 - 2EH)^{1/2} \quad (6)$$

另外,由(5)式可知,与地面相切的射线所对应的临界发射仰角则为

$$\alpha_{\text{临}} = -(2EH)^{1/2} \quad (7)$$

在 r 距离上,仰角也为 α_r 的直射线的初始仰角可由(2)式得出,即

$$\alpha_{\text{直}} = \alpha_r - Er \quad (8)$$

由(4),(6),(8)各式可得到在 r 距离以外平行的直射线和地面反射线的各自初始发射仰角 $\alpha_{\text{直}}$ 和 $\alpha_{\text{反}}$ 之间的关系式:

$$\alpha_{\text{反}} = -\frac{1}{3} [\alpha_{\text{直}} + 2(\alpha_{\text{直}}^2 + 6EH)^{1/2}] \quad (9)$$

初始直射角也可以是一个大于临界俯角的负值角。

为了确切地求出直射线和反射线的路程差,以确定两者之间的相位关系,必须精确地求出直射线的弧长 $\widehat{OP}$ 和俯射线的弧长 $\widehat{OQ_1}$, 其中 P 是直射线中和 Q_1 处在同一波阵面上的点(见图1)。因为测雨雷达所用的为厘米波段,所以两条射线之间的相位关系对路程差极为敏感。在计算射线路径长度时,不能应用一般平直地面下的近似,应当直接在以地球中心为原点的球极坐标系中进行计算。设以 S'_1 表示直射线 OQ_1 段 (Q_1 是直射线中处在 Q_1 点正上方的点)的弧长, S_2 表示俯射线 OQ_1 段的弧长,则从(3)式出发,在球极坐标系中经过一定的推演后可导出 S_2 与 S'_1 之差的表达式为:

$$S_2 - S'_1 = \frac{1}{4ER} (\alpha_{\text{反}} - \alpha_{\text{直}}) [2(1+ER)Er^2 + (\alpha_{\text{反}} + \alpha_{\text{直}})(ER + 2(1+ER))r] \\ + \frac{1}{2E\sqrt{ER(1+ER)}} [\alpha_{\text{反}}^2 \ln Y_2 - \alpha_{\text{直}}^2 \ln Y_1] + \frac{R}{2\sqrt{ER(1+ER)}} \ln \frac{Y_1}{Y_2} \quad (10)$$

其中

$$Y_1 = \frac{\alpha_{\text{直}} + \sqrt{\frac{ER(1+\alpha_{\text{直}}^2)}{1+ER}}}{Er + \alpha_{\text{直}} + \sqrt{\frac{ER(1+\alpha_{\text{直}}^2)}{1+ER} + 2E\alpha_{\text{直}}r + E^2r^2}} \\ Y_2 = \frac{\alpha_{\text{反}} + \sqrt{\frac{ER(1+\alpha_{\text{反}}^2)}{1+ER}}}{Er + \alpha_{\text{反}} + \sqrt{\frac{ER(1+\alpha_{\text{反}}^2)}{1+ER} + 2E\alpha_{\text{反}}r + E^2r^2}}$$

以 S_1 表示直射线 OP 段的弧长,则直射波与反射波的路程差为

$$\Delta S = S_2 - S_1 = [\widehat{OQ_1} - \widehat{OQ_1} + \widehat{PQ_1} = S_2 - S'_1 + h_r \sin \alpha_r \quad (11)$$

其中 h_r 是直射线在 Q_1 点的离地高度,可由(3)式算出。因此,对于雷达波束中每一条不与地面相交的直射线(初始仰角为 $\alpha_{\text{直}}$),可以从 $\alpha_{\text{反}}$ 、 α_r 、 r 、 h_r 等值求得直射波与反射波的路程差 ΔS 。

三、直射波与地面反射波的合成场强分布

设在雷达站上,波束轴的仰角为 α_0 ,天线发射的不与地面相交的直射线在垂直方向

上的偏轴角度以 ϕ 表示, 俯射线的偏轴角度以 ϕ_1 表示 (ϕ 与 ϕ_1 均取向上为正), 则有

$$\phi = \alpha_{\text{上}} - \alpha_0, \quad \phi_1 = \alpha_{\text{上}} - \alpha_0 \quad (12)$$

设天线发射的原始波束 (未受地面影响) 中, 场强在垂直方向上的方向性函数为 $f(\phi)$, 则在 S_1 距离上, 直射波的场强应为^[2]

$$E_1 = \frac{\sqrt{60PG_0}}{S_1} f(\phi) e^{-ikr_1} = |E_1| e^{-ikr_1} \quad (13)$$

式中, P 是雷达发射功率, G_0 是波束轴方向上的天线增益; k 是波数, $k = 2\pi/\lambda$, λ 是波长; $|E_1| = \frac{\sqrt{60PG_0}}{S_1} f(\phi)$.

雷达波束中的另一部分射线射向地面. 设地面对微波的复反射系数可写作

$$\Gamma = \gamma e^{-j\beta} \quad (14)$$

式中 γ 为粗糙地面的反射系数, $\gamma = \Gamma_0 R$; 其中 Γ_0 是地面物质的反射系数, R 是粗糙地面的镜反射因子; β 是反射所产生的相移. 对于极平坦的地面, 有 $R_s = 1$. Γ_0 , R , γ 的取值都在 0 与 1 之间.

设俯射线到达地面时经过的斜距是 S_2 , 则反射波的场强为

$$E_2 = \Gamma \frac{\sqrt{60PG_0}}{S_2} f(\phi_1) e^{-ikr_2} \approx |E_1| \gamma \frac{f(\alpha_{\text{上}} - \alpha_0)}{f(\alpha_{\text{下}} - \alpha_0)} e^{-j(\beta + kr_2)} \quad (15)$$

而合成波的场强则为

$$E = E_1 + E_2 = |E_1| e^{-ikr_1} \left[1 + \gamma \frac{f(\alpha_{\text{上}} - \alpha_0)}{f(\alpha_{\text{下}} - \alpha_0)} e^{-j(\beta + k\Delta S)} \right] \quad (16)$$

式中 $\Delta S = S_2 - S_1$, 系由 (11) 式决定.

令 $D = \gamma \frac{f(\alpha_{\text{上}} - \alpha_0)}{f(\alpha_{\text{下}} - \alpha_0)}$, 并因在雷达测雨的实际应用中, 投射到地面上的射线与地平线之间的夹角很小, 故有 $\beta = \pi$, 所以合成场强与直射场强之比为

$$F = \frac{|E|}{|E_1|} = [1 + D^2 - 2D \cos(k\Delta S)]^{1/2} \quad (17)$$

把测雨雷达的天线功率增益函数简单地视作正态分布形式已能够精确地满足雷达测雨的定量要求, 故而设增益函数为:

$$G = G_0 e^{-4 \ln 2 [(\frac{\theta}{\theta_0})^2 + (\frac{\phi}{\phi_0})^2]} \quad (18)$$

式中 θ 是波束中射线在水平方向的偏轴角度, θ_0 和 ϕ_0 分别是天线在水平和垂直方向上的半功率点波束宽度. 当存在地面反射影响时, 直射波与反射波合成的波束中的功率增益分布则应为:

$$G' = GF^2 = G_0 [1 + D^2 - 2D \cos(k\Delta S)] e^{-4 \ln 2 [(\frac{\theta}{\theta_0})^2 + (\frac{\phi}{\phi_0})^2]} \quad (19)$$

为了考察合成波束所具有的特征, 我们在图 2 中画出了 713 型雷达在平坦地面上作水平发射时, 合成波束中的相对功率密度随偏轴角度 ϕ 的分布. 所取的参数如下: $\lambda = 5.6$ 厘米, $\phi_0 = 1.1^\circ$, $\gamma = 1$, 天线轴离地高度 4 米, 天线仰角 $\alpha_0 = 0^\circ$. 实线所表示的是合成波的能量分布. 为了对照起见, 在同一图上用虚线画出了不存在地面影响时波束中应具有的能量分布.

从图2可以看出,由于地面反射影响的存在,反射波与直射波相干涉的结果,出现了波束的分裂,波束中包含了几个相对强度的极大值。由于整个波束的发射能量已经分散在几个小波束上,这里的相对最大功率密度辐射方向已经不像原先的波束轴方向那样具有重要的意义。

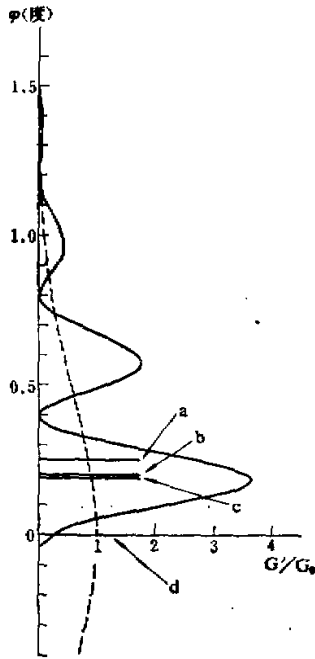


图2 713型雷达在4米高度作水平发射时,合成波束中的相对功率密度随偏轴角度的变化;地面反射系数为1;用字母指出的分别是: a—发射能量均分仰角 0.25° , b—回波能量均分仰角 0.20° , c—最大功率密度辐射仰角 0.19° , d—原波束轴仰角 0°

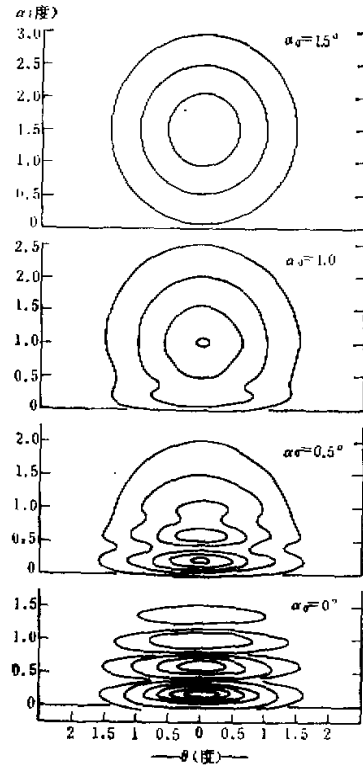


图3 天线高度为4米的713型雷达合成波束横截面上的等功率密度廓线分布形式随天线仰角的变化;地面反射系数为1;廓线的相对功率密度值 G'/G_0 。由外向内依次为0.01, 0.1, 0.5, 1, 2, 3

为了形象地表明当天线仰角抬高时,合成波束中能量分布的变化,在图3中画出了天线在几个仰角位置时合成波束中相对功率密度在波束横截面上的分布;垂直方向上的坐标用直射线的发射仰角来表示。从图可以看出,随着天线仰角的抬升,最大相对功率密度减小,波束的分裂程度减弱,波束逐渐脱离地面的影响。当天线仰角超过两倍波束半宽度值时,波束基本上保持了未受地面影响时的形状。由于平坦均匀地面的反射并不影响波束中能量的水平分布,所以波束能量在水平方向仍然保持对称的正态形式。

对于 711 型雷达(波长 3.2 厘米,波束宽度 1.5°) 和 714 型雷达(波长 10.7 厘米,波束宽度 2°) 的情况,也作了计算. 结果表明,合成波束也具有上面所说的那些特征. 对于较短的波长或当天线处在较大的离地高度上时,波束分裂的数目也随之增加. 在图 4 中画出了 714 型雷达架设在不同高度上,且天线作水平发射时合成波束中的能量分布.

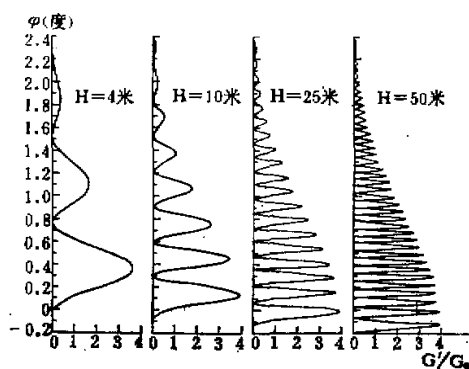


图 4 714 型雷达天线在不同高度上作水平发射时,合成波束中的相对功率密度随偏轴角度的变化;地面反射系数为 1

此外,地面反射系数的大小,显然也会影响合成波束内的能量分布. 在图 5 中画出了当 711 型雷达在 4 米高度, γ 为 1, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2, 0.1 和 0 时,水平发射波束中的相对能量分布.

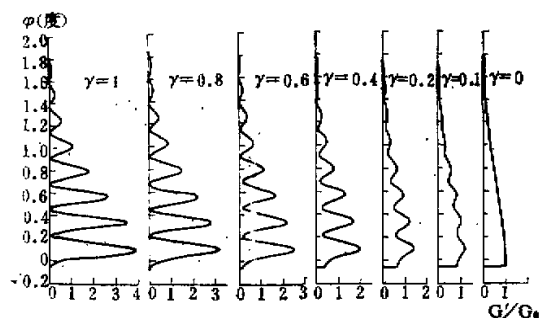


图 5 在不同地面反射系数下,711 型雷达水平发射波束中的相对功率密度分布;天线高度 4 米

四、地面反射特性对雨区回波信号强度的影响

在波束中功率增益函数为 $G(\theta, \phi)$ 的情况下,可得到回波功率为

$$P_r = \frac{P_t \lambda^2 L \eta}{2(4\pi)^3 r^2} \iint G^2(\theta, \phi) d\theta d\phi \quad (20)$$

式中 P_t 为雷达发射脉冲功率, L 为发射脉冲的空间长度, η 为雨区反射率. 如 $G(\theta, \phi)$

为正态型,如(18)式所示,则上式化为常用的 Probert-Jones 雷达气象方程^[3],形式为

$$P_r = \frac{P_t G_0^2 \lambda^2 \theta_0 \phi_0 L}{1024 (\ln 2) \pi^2 r^2} \eta \quad (21)$$

在考虑地面影响后,天线功率增益如(19)式所示,则回波功率为

$$P_r' = \frac{P_t G_0^2 \lambda^2 L \eta}{2(4\pi)^2 r^2} \int_0^{\theta_0} e^{-8 \ln 2 \left(\frac{\phi}{\theta_0}\right)^2} d\theta \int_0^{\phi_0} B^2(\phi) d\phi \quad (22)$$

式中

$$B(\phi) = [1 + D^2 - 2D \cos(k\Delta S)] e^{-4 \ln 2 \left(\frac{\phi}{\phi_0}\right)^2} \quad (23)$$

因此,在有无地面影响情况下的回波功率之比为

$$\frac{P_r'}{P_r} = \frac{\int_0^{\phi_0} B^2(\phi) d\phi}{\frac{\sqrt{\pi} \phi_0}{2 \sqrt{2 \ln 2}}} \quad (24)$$

此即为地面对回波功率的影响因子,其倒数即为回波功率订正因子。

在表1中给出了在各种地面反射系数值和天线高度为4米和50米时,713型气象雷达在各种天线仰角下的影响因子值。当天线高度处在4米和50米之间时,影响因子值也将处在此两种情况下的对应值之间。从表可以看出,当雷达天线以接近水平的仰角进行探测时,地面反射对回波功率的影响是很显著的。仅当天线仰角高于波束宽度值时,探测结果才不受地面影响。

表1 各种地面反射系数下的713型雷达回波功率影响因子值

天线高度 天线仰角	$\gamma=1$		$\gamma=0.8$		$\gamma=0.6$		$\gamma=0.4$		$\gamma=0.2$		$\gamma=0$	
	4米	50米	4米	50米	4米	50米	4米	50米	4米	50米	4米	50米
-0.1°	3.03	3.99	1.94	2.61	1.20	1.66	0.74	1.06	0.50	0.72	0.44	0.61
0.0°	3.11	3.83	2.06	2.58	1.34	1.71	0.88	1.14	0.63	0.82	0.56	0.72
0.1°	3.00	3.45	2.06	2.41	1.41	1.67	0.98	1.18	0.74	0.90	0.68	0.81
0.2°	2.73	2.95	1.96	2.14	1.41	1.57	1.04	1.18	0.83	0.96	0.78	0.88
0.3°	2.36	2.41	1.78	1.84	1.35	1.43	1.07	1.15	0.90	0.99	0.86	0.93
0.4°	1.98	1.94	1.57	1.57	1.27	1.29	1.07	1.14	0.95	1.00	0.91	0.96
0.5°	1.65	1.57	1.38	1.35	1.19	1.18	1.06	1.07	0.96	1.00	0.95	0.98
0.6°	1.39	1.32	1.23	1.20	1.12	1.10	1.04	1.04	0.99	1.00	0.98	0.99
0.7°	1.21	1.16	1.13	1.10	1.07	1.05	1.02	1.02	1.00	1.00	0.99	1.00
0.8°	1.11	1.08	1.07	1.05	1.03	1.03	1.01	1.01	1.00	1.00	0.99	1.00
0.9°	1.05	1.03	1.03	1.02	1.02	1.01	1.01	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.0°	1.02	1.01	1.01	1.01	1.01	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.1°	1.01	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.2°	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

表1中的数据反映出,在 γ 接近于1的情况下,在水平方向以上,随着天线仰角的降低,影响因子增大,使实际的回波功率高于不存在地面影响时的值,且影响因子值为一小于4的数。对711型和714型雷达的计算结果也反映出同样的规律。

在 γ 具有不同值时,回波功率影响因子值也是不同的。因此,应当根据雷达站周围的

地形、植被和地表物质的性质和干湿情况来估计实际的 γ 值,或用实验的方法来测定。

五、讨 论

下面对一些问题作进一步的讨论。

1. 合成波束中最大能量发射方向的功率增益极限值 在各种情况下的计算结果表明,高的功率增益总是出现在天线仰角很低时的合成波束的下部;在 $\gamma = 1$ 时的最大相对功率增益值 G'/G_0 是一个接近于 4 的数。从前面第三节中的推演可以看出,在这种情况下,对应于极低仰角射线的因子 D 是一个极为接近于 1 的数。因此,在天线仰角不低于临界俯角(见(7)式)的情况下,合成场强最大可比直射场强大一倍。因而在波束轴附近可出现一个功率增益为原来的近 4 倍的能量发射中心(见(19)式及图 2)。

2. 影响因子的极限值 前面曾提及,在各种情况下的计算结果表明,地面反射对雨区回波功率的影响因子的极限值也为 4。这个接近于 4 的极限值,也总是出现在天线仰角极低时的平坦光滑地面情况下。极限值为 4 的物理原因可解释如下:在直射波与反射波干涉增强的那些方向上,发射功率密度和天线的有效接收面积都增至原先的 4 倍,这两个因素可使来自这些方向的回波强度增大至 16 倍。但在直射波与反射波干涉相消的那些方向上,则发射功率密度和天线的有效接收面积都接近于零。因此平均地说起来,在波束范围内,回波强度为原先的 8 倍。同时由于地面阻挡和反射的影响,使脉冲体积减小了一半,所以总的实际效果使回波强度比不存在地面影响时的值增大至近 4 倍。随着地面反射系数的降低或雷达波束的抬高,影响因子也随着减小。当地面为极端粗糙时,有 $\gamma = 0$;在这种情况下,作水平发射的雷达的雨区回波功率就只有原来的一半左右。

3. 合成波束的发射能量分布中心和回波功率分布中心 当不存在地面影响时,正态型波束的轴方向就是最大能量的辐射方向,其上下左右的能量分布是对称的。图 2—图 5 表明,在考虑地面反射影响后,波束中的能量是分布在上下不对称的几个分开的小波束上的,因此其中任一个小波束的最大能量辐射方向,就不能用来恰当地代表整个波束的能量辐射方向。在这种情况下,为了便于在雷达测雨中确定散射体积的高度,选择一个新的、有代表性的波束仰角是必要的。在这里,有两个角度值得考虑,一是使合成波束中上、下两部分发射能量相等的仰角位置,称为发射能量均分仰角;另一是使雨区回波中上、下两部分回波功率相等的仰角位置,称为回波功率均分仰角。在图 2 所示的例子中,天线轴的仰角为 0° ,最大辐射能量出现在 0.19° 方向上,而发射能量均分仰角为 0.25° ,回波功率均分仰角则为 0.20° 。对于估计散射体积的中心高度说来,我们认为采用回波功率均分仰角更合理些。回波功率均分仰角不仅与雷达波长、波束宽度、天线仰角、地面反射系数有关,还与天线的离地高度有关。在表 2 中给出了 713 型雷达在天线高度为 10 米,地面反射系数为 1 的情况下,不同天线仰角所对应的发射能量均分仰角、回波功率均分仰角、最大能量辐射仰角和该方向上的相对功率增益值。

从表还可看出,当天线仰角大于两倍波束半宽度值后,发射能量均分仰角、回波功率均分仰角、最大能量辐射仰角就和天线轴仰角趋于一致,最大相对功率增益趋于 1,因为这时波束已基本上脱离地面影响了。

表 2 地面反射系数为 1, 天线高度为 10 米时, 713 型雷达在各种天线仰角下合成波束的几个特征值

天线仰角	发射能量均分仰角	回波功率均分仰角	最大功率密度辐射仰角	最大相对功率密度
-0.10	0.25	0.21	0.04	3.90
0.00	0.25	0.21	0.05	3.93
0.10	0.26	0.21	0.05	3.77
0.20	0.28	0.22	0.05	3.47
0.30	0.37	0.23	0.05	3.04
0.40	0.40	0.25	0.05	2.56
0.50	0.50	0.38	0.23	2.06
0.60	0.58	0.48	0.23	1.65
0.70	0.69	0.61	0.39	1.30
0.80	0.79	0.75	0.72	1.13
0.90	0.89	0.88	0.88	1.05
1.00	1.00	0.99	1.03	1.01
1.10	1.10	1.10	1.05	1.00
1.20	1.20	1.20	1.20	1.00
1.30	1.30	1.30	1.31	1.00
1.40	1.40	1.40	1.40	1.00

六、结 论

1. 雷达在以极低天线仰角作降水量的定量测量时, 应当考虑雷达站周围地面的镜反射特性对测量结果的影响, 否则对回波功率的估计会存在 $-3 \sim +6$ 分贝的误差。

2. 地面反射特性使雷达发射的针状波束分裂成由若干个小波束组成的合成波束, 合成波束中的最大功率密度最多可为原波束中的极大值的 4 倍。

3. 合成波束中的发射能量分布中心、回波能量分布中心和最大能量辐射方向不一定在原来的波束轴方向上。但随着天线仰角的抬高, 波束逐渐摆脱地面的影响, 恢复成原来的针状波束, 上述四者又趋于一致。

4. 在估计散射体积的中心高度时, 应当用合成波束的回波功率均分仰角来代替天线仰角。仅当天线仰角超过波束宽度值时, 回波功率均分仰角才与天线仰角相一致。

参 考 文 献

- [1] Hartree, D. R., Michel, J. G. L. and Nicolson, P. Practical methods for the Solution of the equations of tropospheric refraction, Meteorological factors in radio wave propagation, London, Physical Society, 127-168, 1946.
- [2] Connor, F. R. Antenna, Edward Arnold (Publishers) Ltd., 1972.
- [3] Probert-Jones, J. R., The radar equation in meteorology, Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 88, 485-495, 1962.

THE EFFECT OF SURFACE PARTIAL SPECULAR REFLECTION ON THE QUANTITATIVE RAINFALL-RATE MEASUREMENT BY RADAR

Ma Zhenhua

(Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica)

Abstract

The equations for calculating the echo power and the energy distribution within radar beam were derived, with taking earth curvature, atmospheric refractivity gradient, reflective factor and roughness of the surface into consideration. The estimation results based on these equations show that the rain echo power may deviate from its normal value by a factor of -3 to $+6$ db depending on the radar height, antenna elevation, wave length, beam width, surface reflectivity and roughness.