

测雨雷达参数的变化

对定量测量的影响

栾奎良 (省气科所)

吴宝民 (北大地球物理系)

摘要: 本文用雷达气象方程参数相对变化导出的 Z_e 值的相对误差公式,对一部711雷达各参数进行了实际测量,得出 Z_e 值最大相对误差的估计值;指出雷达参数的测量应特别注意对雷达灵敏度及发射功率的测量。对于雷达方程中其它因子定量测量的影响也作了简要讨论。

一、引言

目前,我国气象雷达的观测工作逐步由定性描述向半定量、定量测量发展。由测定目标物的雷达反射率因子 Z_e (满足莱雷散射 $Z_e = Z$),判别冰雹云及估计降雹强度的工作已进行多年,而且仍在继续。由测定 Z_e 值计算降水强度,区域降水量以及测定云中含水量等工作逐步开展起来。

雷达 Z_e 值定量测量的误差,主要来自以下几个方面:(1)雷达参数测量对 Z_e 值测定的影响,以及 Z_e 值测量方法引起的误差;(2)雷达波沿途由降水的不均匀性等被衰减引起的误差。本文主要讨论第(1)个方面的问题。

二、 Z_e 值相对误差公式的推导

气象目标的雷达定量测量的理论基础是气象雷达方程。目前,公认与实际比较符合的方程是Probert—Jonsl 1962年提出的⁽¹⁾。它考虑了目标物对产生回波的脉冲体积的充塞

系数以及雷达波沿两倍路径的衰减。方程有如下形式:

$$P_r = \frac{\pi^3 c}{1024 \ln 2} \left[\frac{P_t G_o^2 \phi \Theta}{\lambda^2} \right] \left[|K|^2 \frac{Z_e}{R^{2\psi}} \right] 10^{-0.2 \int_0^R K_t dR} \quad (1)$$

其中, P_r : 天线接收到的距离 R 处目标物产生的回波功率(瓦), C 为电磁波在大气中的传播速度 3×10^5 公里/秒, P_t : 雷达发射的脉冲功率(瓦), G_o : 雷达天线有效增益, τ : 雷达发射脉冲宽度(微秒), $\Theta \phi$ 分别为垂直和水平方向的波束宽度(弧度), λ : 雷达工作波长(cm), $|K|^2$: 与目标物性质有关的常数,一般,对水滴 $|K|^2 = 0.93$,对冰粒子 $|K|^2 = 0.197$, Z_e : 目标物雷达反射率因子(毫米⁶/米³), R : 目标物到雷达的距离(公里), ψ : 充塞系数,表示产生回波的脉冲体积被目标物充满的程度, ψ 的取值范围为 $0 < \psi \leq 1$,全充满 $\psi = 1$, K_t : 雷达波沿路径的削弱系数(db/km)。

$$\text{由: } P_r = P_{r \min} 10^{\frac{N}{10}} \quad (2)$$

$P_{r \min}$ 是雷达最小可测功率(瓦),表示雷达实际灵敏度; N 为将某处目标产生的回波 P_r 衰减成 $P_{r \min}$ 时,在雷达高频部分衰减的分贝数,711雷达用的是中频衰减器,其中频衰减分贝数 n 与高频衰减分贝数 N 有差别,需订正⁽²⁾。

$$\text{又由: } P_t \tau = \bar{P} T_n \quad (3)$$

\bar{P} 为雷达发射的平均功率 (瓦), T_n : 脉冲重复周期 (微秒)。

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (4)$$

c : 雷达波传播速度, f : 雷达发射波频率, 将 (2), (3), (4) 代入 (1), 并写成 Z_e 的表达式:

$$Z_e = \left\{ \frac{C1024 \ln 2}{\pi^3} \left[\frac{P_{rmin}}{\bar{P} T_n f^2 G_0^2 \Theta \phi} \right] \right. \\ \left. \left[\frac{R^2 10^{10} 10^{0.2 f R}}{K^2 \psi} \right] \right\} \quad (5)$$

(5) 式中第一个括号为常数; 第二个括号为雷达本身各参数, 这是我们在雷达标定时需要测量的; 第三个括号内 R 是目标到雷达的距离, 其余是与目标物性质有关的一些因子。先把第三个括号看成常数, 只考虑第二个括号内雷达各参数对 Z_e 测量的影响。 Z_e 为雷达参数的函数, 则有:

$$Z_e = F(P_{rmin}, f, T_n, \bar{P}, G_0, \Theta, \phi) \quad (6)$$

即:
$$Z_e = A \left[\frac{P_{rmin}}{\bar{P} T_n f^2 G_0^2 \Theta \phi} \right] \quad (7)$$

A 为常数, 对于 (7) 式两边取自然对数, 微分, 并用差分表示, 则有:

$$\ln Z_e = \ln A + \ln P_{rmin} - \ln \bar{P} - \ln T_n - 2 \ln f \\ - 2 \ln G_0 - \ln \Theta - \ln \phi$$

$$\frac{dZ_e}{Z_e} = \frac{dP_{rmin}}{P_{rmin}} - \frac{d\bar{P}}{\bar{P}} - \frac{dT_n}{T_n} - \frac{2df}{f} \\ - \frac{2dG_0}{G_0} - \frac{d\Theta}{\Theta} - \frac{d\phi}{\phi}$$

$$\frac{\Delta Z_e}{Z_e} = \frac{\Delta P_{rmin}}{P_{rmin}} - \frac{\Delta \bar{P}}{\bar{P}} - \frac{\Delta T_n}{T_n} - \frac{2\Delta f}{f} \\ - \frac{2\Delta G_0}{G_0} - \frac{\Delta \Theta}{\Theta} - \frac{\Delta \phi}{\phi} \quad (8)$$

(8) 式表示雷达各参数的相对变化引起 Z_e 。

测量值的相对误差。

雷达工作时, 各参数相对于标定值的变化可正可负, 我们现在考虑各参数相对变化使 $\frac{\Delta Z_e}{Z_e}$ 取最大值的情况, 则对 (8) 式各项取绝对值, 有:

$$\left| \frac{\Delta Z_e}{Z_e} \right| = \left| \frac{\Delta P_{rmin}}{P_{rmin}} \right| + \left| \frac{\Delta \bar{P}}{\bar{P}} \right| + \\ \left| \frac{\Delta T_n}{T_n} \right| + \left| \frac{2\Delta f}{f} \right| + \\ \left| \frac{2\Delta G_0}{G_0} \right| + \left| \frac{\Delta \Theta}{\Theta} \right| + \\ \left| \frac{\Delta \phi}{\phi} \right| \quad (9)$$

我们对一部 711 雷达各参数进行了实际测量。用某一参数多次测量值的平均值作为它的标定值, 取各参数相对于平均值的最大变化值表示雷达可能出现的最大变化。用 (9) 式来估算 Z_e 值的最大相对误差 $\frac{\Delta Z_e}{Z_e}$, 来看雷达各参数的变化对定量测量的影响。

三、711 雷达各参数值的实际测量结果

我们对北京大学地球物理系 711 雷达各参数进行了测量⁽³⁾。

(一)、雷达最小可测功率 P_{rmin} 的测量

P_{rmin} 可用与雷达相同工作频率的信号源进行标定, 也可用噪声源测出接收机的噪声系数, 进行换算, 我们采用后者。

$$P_{rmin} = KT \Delta F D 10^{\frac{Bdb}{10}} \quad (10)$$

$K = 1.38 \times 10^{-23}$ 焦耳/度 (玻耳兹曼常数); T : 雷达工作环境温度, 一般取 $T = 290$ K, ΔF : 雷达接收机中频带宽 (MH); D : 识别系数, 一般 $D = 1$, 表示信号刚从噪声中分辨; Bdb : 雷达接收机噪声系数的分贝数。将 K, T, D 值代入 (10) 并求其分贝数, 有 $P_{rmin} (dbmw)$

= -114 + Bdb + 10lg ΔF (MH) (11) 对本雷达测出 ΔF = 2MHZ/秒则有: (ΔF 以兆赫兹数值代入)。

$$P_{rmin} (dbmW) = -111.0 + Bdb \quad (12)$$

$$P_{rmin} = \frac{-111 + Bdb}{10^{10}} \quad (mw) \quad (13)$$

表 I P_{rmin} 测量结果

序号	1	2	3	4	5	6	7	8
Bdb(分贝)	10	10	10	10.5	10	10.5	10	10
$P_{rmin} = n \times 10^{-11}$ (mw) 其 n =	7.9	7.9	7.9	8.9	7.9	8.9	7.9	7.9
序号	9	10	\bar{P}_{rmin}	ΔP_{rmin}	$\frac{\Delta P_{rmin}}{\bar{P}_{rmin}}$			
Bdb	10	10.5						
$P_{rmin} = n \times 10^{-11}$ (mw) 其 n =	7.9	8.9	8.2	0.7	9%			

测得: $\frac{\Delta P_{rmin}}{\bar{P}_{rmin}} = 9\%$

(二)、平均发射功率 \bar{P} 的测定

测量 \bar{P} , 可在定向耦合器上加匹配器和衰减器, 用微瓦功率计或中功率计, 或者雷达测试仪的功率计测出, 也可用大功率计直接接在雷达发射机波导口处测量, 我们用中功率计对雷达 (某一磁控管) 发射的平均功率测得结果如下:

表 2 平均发射功率 \bar{P} 测量结果

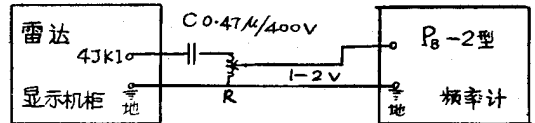
序号	1	2	3	4	5	6	7
$\bar{P}(w)$	24.5	24.7	24.4	24.4	24.6	24.7	25.7
序号	8	9	10	\bar{P}	$\Delta \bar{P}$	$\frac{\Delta \bar{P}}{\bar{P}}$	
$\bar{P}(w)$	26.2	25.9	25.1	25.0	1.2	5%	

$\frac{\Delta \bar{P}}{\bar{P}} = 5.0\%$

经多次测量发现, 影响发射功率的主要因素是中频电压, 雷达每次开机, 应监测中频电压调准在所要求的值 (711雷达为115伏)。

(三)、脉冲重复周期 T_n 的测量

用带时标的示波器只能大致测出脉冲重复周期 T_n 为 2500us 左右 (711 雷达)。我们用 P_B-2 型数字频率计, 仪器连接如下图:



P 为变阻器, 调节 R 使输入给数字频率计的交电压为 1—2 V。

表 3 T 的测量结果

序号	1	2	3	4	5	6	7
T_n (us)	2537	2538	2537	2535	2536	2535	2535
序号	8	9	10	\bar{T}_n	ΔT_n	$\frac{\Delta T_n}{\bar{T}_n}$	
T_n (us)	2536	2535	2536	2535	3	0.1%	

$$\frac{\Delta T_n}{\bar{T}_n} = 0.1\%$$

(四)、雷达发射频率 f 的测量

发射频率用回波箱或雷达测试仪, 从定向耦合器处耦合出信号测量。我们用回波箱对某磁控管测得结果如下:

表 4 发射频率 f 的测量结果

序号	1	2	3	4	5	6	7
f	9370	9376	9376	9378	9380	9377	9360
序号	8	9	10	\bar{f}	Δf	$\frac{\Delta f}{\bar{f}}$	
f	9350	9353	9376	9370	20	0.2%	

$$\frac{\Delta f}{\bar{f}} = 0.4\%$$

(五)、天线参数 (G_0 、 Θ 、 ϕ) 的测量

天线参数的测量, 可用气球带反射靶(金

属球或角反射器)作为目标,但天线跟踪比较困难,加之目标闪烁,不易测准。也可用标准喇叭天线进行标定,但要求场地条件比较严格,一般难以满足。近年来用太阳作为辐射源进行天线参数标定(又称“太阳法”)结果较好。我们用此种方法测得天线有效增益及波束宽度如下[4]。

表5-1 天线有效增益 \$G_0\$ 测量结果

序号	1	2	3	4	5	6	7
\$G_0\$ (db)	36.40	36.50	36.90	36.10	36.55	36.25	36.65
\$G_0\$ (倍)	4365.2	4466.8	4897.8	4073.8	4518.6	4217.0	4623.8
序号	8	9	10	\$\bar{G}_0\$	\$\Delta G_0\$	\$\frac{\Delta G_0}{\bar{G}_0}\$	
\$G_0\$ (db)	36.85	36.45	36.50	36.52			
\$G_0\$ (倍)	4841.7	4415.7	4466.8	4498.7	414.9	9%	

$$\frac{2\Delta G}{\bar{G}_0} = 18\%$$

表5-2 天线水平波束宽度测量结果

序号	1	2	3	4	5	6	\$\bar{\phi}\$	\$\Delta\phi\$	\$\frac{\Delta\phi}{\bar{\phi}}\$
\$\phi\$ 度	1.60	1.79	1.72	1.68	1.72	1.73	1.71	0.11	6%

$$\frac{\Delta\phi}{\bar{\phi}} = 6\%$$

表5-3 天线垂直波束宽度测量结果

序号	1	2	3	4	5	6	7
\$\Theta\$ 度	1.57	1.64	1.52	1.51	1.54	1.64	1.56
序号	8	9	10	\$\bar{\Theta}\$	\$\Delta\Theta\$	\$\frac{\Delta\Theta}{\bar{\Theta}}\$	
\$\Theta\$ 度	1.62	1.53	1.51	1.56	0.08	5%	

$$\frac{\Delta\Theta}{\bar{\Theta}} = 5\%$$

四、对雷达参数测量结果的讨论

将以上各参数测量的结果列表如下:

表6 各参数测量结果

雷达参数	*	\$\bar{P}(w)\$	\$T_m(us)\$	\$f(MHZ)\$	\$G_0\$ (倍数)	\$\phi\$ (度)	\$\Theta\$ (度)
平均值	8.2	25.0	2535	9370	4489	1.71	1.56
最大变化	0.7	1.2	3	20	415	0.11	0.08
最大相对变化	9%	5%	0.1%	\$\frac{2\Delta f}{f} = \frac{4.1}{9370} \approx 0.04\%\$	**	6%	5%

将表6所列最大相对变化值代入(9)式得:

* 为 \$P_{min} \times 10^{11}\$ (mw); ** 为 \$\frac{2\Delta G}{\bar{G}_0} = 18\%\$。

$$\left| \frac{\Delta Z_e}{Z_e} \right| = 9\% + 5\% + 0.1\% + 0.4\% + 18\% + 6\% + 5\% = 43.5\% \quad (14)$$

由(9)式估算出雷达参数相对于标定值的最大变化引起 \$Z_e\$ 观值的最大相对误差为 43.5%。这是极端情况,实际上,雷达在观测时,各参数相对于标定值的变化可正可负,正负会相互抵消一部分。

由表6可见雷达各参数中,发射频率 \$f\$ 和脉冲重复周期 \$T_m\$ 的相对变化很小,作一次测量即可。这两个参数直接用标称值也不会引起大的误差。这两个参数,测量并不费事,每次标定雷达时应测一下,更换磁控管后,再测一下发射频率。对 \$Z_e\$ 测量影响较大的参数是最小可测功率(雷达灵敏度),发射功率以及天线参数。对于天线参数 (\$G_0, \phi, \Theta\$) 直接采用厂方给的标称值是不行的,需仔细标定。天线参数主要取决于天线的尺寸及外形,一次标定后,天线不变形,以后不必重新标定。对于雷达灵敏度及发射功率的测量,由于仪器精度及误差,应仔细测量。这两个参数易随雷达工作状态而变化,因此,每年雷达工作期开始,中间,结束时都应测量一次。在雷达作定量测量时,对发射功率和中频电压应有监测设备。

五、对(5)式中

$$\left[\frac{R^2 10^{\frac{N}{10}}}{|K|^2 \psi} 10^{0.2 \int_0^R K_t dR} \right]$$

项的讨论

在前面的讨论中,我们没有考虑这一括号中各因子对 \$Z_e\$ 测量值的影响,在这个括号中所包含的因子 \$R\$ 是目标物到雷达的距离, \$N, \psi, |K|^2, K_t\$ 与被测目标物性质有关,现在若只考虑这些因子对 \$Z_e\$ 测量的影响,则由(5)式有:

$$Z_e = B \left(\frac{R^2 10^{\frac{N}{10}}}{|K|^2 \psi} 10^{0.2 \int_0^R K_t dR} \right) \quad (15)$$

B 为 (5) 式中前两个括号所表示, 可看成常数, 由 (15) 式有: $Z_e = F(R, H, \psi, K_t)$ (16)

(15) 式中 $|K|^2$ 是常数, 对水滴 $|K|^2 = 0.93$, 对冰粒 $|K|^2 = 0.197$ 。

对 (15) 式取自然对数, 微分, 并用差分表示, 则:

$$\frac{\Delta Z_e}{Z_e} = \frac{2 \Delta R}{R} + 0.23 \Delta N - \frac{\Delta \psi}{\psi} + 0.46 \int_0^R \Delta K_t dR \quad (17)$$

对 (17) 式的简单讨论:

$$1. \frac{2 \Delta R}{R}$$

R 是目标到雷达的距离, 是靠 A 显示器或 PPI 显示器上距离标志显示的。A 显和 PPI 显示器上的距离标志要经过仔细调整, 特别是 PPI 显示器, 对 50KM、100KM、300KM 挡 (有的雷达改加 200KM 挡), 都要调整使扫描线起点在显示器荧光屏中心, (有的为了避免荧光屏中心点被烧黑, 调整扫描线起点离开荧光屏中心点少许, 这样, 扫描线转一周, 荧光屏中心出现一个很小的圆, 这是可以的)。调整使距标线分布均匀, 各距离挡最大距离标志线处于荧光屏边缘而又可以看见, 经过仔细调整, PPI 显示器上距离标志是够精确的, 而且气象目标并非点目标, 通常都是一个回波区域, 因此, 对距离显示的精度要求不高。考虑到雷达波脉冲体积, 接收机带宽以及显示器扫描亮点的宽度的影响, 雷达径向距离的延伸约为各距离挡最大距离的 1% (5), 因此, 可取 $\frac{2 \Delta R}{R} = 2\%$, 对气象目标, $\frac{2 \Delta R}{R}$ 的影响是不重要的。

2. “衰减法”测 Z_e 值的误差

由 (17) 式第二项 $0.23 \Delta N$, 可见 N 差 1 db, 使 $\frac{\Delta Z_e}{Z_e}$ 为 23%, N 应为高频部分衰减

的分贝数, 而国产 711 雷达的分挡衰减器是在中频, 应作出高频衰减分贝数 与中频衰减分贝数 n 的对照表, 直接用 n 代替 N 会产生误差。另外, 711 雷达测某处回波 P_r 的强度, 是用“衰减法”将 P_r 衰减为 P_{rmin} , 由 P_{rmin} 和衰减的分贝数求出 P_r , 对强度大于 50db 以上的强回波, 有时衰减器误差 5db 左右, 其强度变化在荧光屏上分辨不出来。同时, 711 雷达不配备视频积分器, 由于回波的随机涨落, 中频衰减器衰减 3—5db, 回波边缘几乎不变, 因此, 711 雷达用“衰减法”作定量测量是不可能的。对装有对数中放, 视频积分分层器的雷达 (如 713 雷达及改装有此设备的 711 雷达), 给观测工作带来很大方便, 但分层显示范围为 5db, 10db, 或 20db 一层, 这样, 在同一层中就会有 n 个 db 至十几个 db 的差别, 这样, 对测量雨强或区域总降水量仍会带来较大误差。因此, 在雷达定量测量中, 除 $Z_e - I$ 关系 (或 $Z_e - g$ 关系) 的选取会造成较大误差外, 测试方法本身就包含着较大误差。

3. $\frac{\Delta \psi}{\psi}$ 与 $0.46 \int_0^R \Delta K_t dR$ 的影响

ψ 称为充塞系数, 表示产生回波的脉冲体积被气象目标充满的程度, ψ 取值为 $0 < \psi < 1$, 一般我们假定 $\psi = 1$, 即脉冲体积被气象目标全充满, 但实际上 ψ 并非都为 1, 若假设 $\bar{\psi} = 0.5$ 对某一回波区 $\Delta \psi = 0.5$, 则有 $\frac{\Delta \psi}{\psi} = 100\%$ 。

$0.46 \int_0^R \Delta K_t dR$, 这一项反映由于气象目标 (降水等) 分布不均匀, 在 O—R 的探测路径上 K_t 的变化对定量测量造成的误差。

对大面积均匀降水, $\psi = 1$, 不必考虑 ψ 变化的影响, 同时, 对大面积均匀降水, 认为各处 K_t 相同, 因而也不必考虑 $\int_0^R \Delta K_t dR$ 的影响, 只需考虑 K_t 对雷达波的削弱作用, 但是, 一般降水多为不均匀, ψ, K_t 也是不均匀的, 而它们又不能直接实时地测出, 因此, 它们对定量测量的影响比较复杂。

六、结 论

(1) 对定量测量影响较大的雷达参数是雷达灵敏度, 发射功率, 天线有效增益。标定时应仔细, 由于雷达灵敏度, 发射功率容易随雷达工作状态而变, 应经常标定。发射功率与中频电压关系密切, 因此, 对中频电压和发射功率最好有监测设备。

(2) 欲用不配备视频积分器的711雷达作定量测量是不可能的, 用装有视频积分器的雷达作定量测量时, 由于每层代表5db、10db 或20db范围的平均值, 对定量测量仍会带来较大误差。相比之下, 雷达参数的标定误差及使用过程中参数值的变化对定量测量的影响可能是不重要的。

此稿在修改过程中, 刘珍茂同志提出了一些宝贵意见, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- 【1】 Probert—Jones. J.R, 1962, The radar equation in meteorology, Quart. J. Roy meteor soc, 88PP485—495.
- 【2】 顾松山, 对气象雷达中频衰减及STC电路的探讨, 南京气象学院学报, (2)1980年, 186—194页。
- 【3】 北京大学地球物理系雷达组, 雷达气象学讲义, 1979年。
- 【4】 北京大学地球物理系雷达组, “太阳法”测711雷达天线增益和波束宽度, 1979年。
- 【5】 南京气象学院雷达组, 雷达气象讲义, 1976年, 第二册, 6—16页。

万元。去年夏天, 沈阳市内暴雨频繁出现。但从有关部门调查结果看, 仅倒塌平房22间, 人员无一伤亡。路面排水及时, 市内交通畅通。一个重要原因就是有关部门重视收集气象信息, 听到预报后, 准备早、出动快, 因此减少了各种损失。 (本刊记者)

沈阳市气象台

积极开展气象服务

本刊讯 沈阳市气象台认真贯彻国务院有关规定, 1985年有偿服务和公益服务迈出新步伐, 受到市领导和服务单位的好评。

沈阳市有四个郊区和两个县属于粮食产区, 水稻在粮食作物中占有很大比例。去年2月, 这个台根据3—10月长期天气预报, 结合各作物对光、温、水条件需求指标综合分析, 做出了全年温度正常稍高、降水偏多的预报。建议水稻中晚熟品种的种植面积比例要适当扩大, 尤其新城子区和新开水田区必须以中熟品种为主。3月中旬, 这个台根据春湿严重、雨量多的趋势, 为保证培育壮苗提早插秧, 建议市里有关部门对水稻的育苗方式要抓好两个转移: 育苗地由水田向园田和旱地转移; 育苗方法由过去灌水湿润育苗向旱育苗转移。要把过去拱式单幅薄膜覆盖改为宽床双幅上通风式苗床, 以利增湿保温, 缓和床温剧变。6月下旬, 低温冷害(俗称“哑巴灾”)开始出现苗头, 他们马上编写了专题分析材料, 在电视台发表, 并向市领导汇报, 副市长全雅山所取汇报后, 立即研究决定拨款用飞机为水田喷撒生长激素, 促进水稻早熟, 战胜冷害。这些建议行之有效, 使大面积水稻获得好收成。

这个台城市服务效果也很好, 各用户对天气预报服务很重视, 能根据气象信息灵活指挥安排生产, 使经济效益大幅度提高。去年1月19日, 该台预报将有大雪, 沈阳铁路分局接到电话后, 马上组织人员, 在雪停后迅速清除站内积雪, 使全站没有一次列车晚点, 直接减少损失16万元。市和平饮食服务公司根据天气预报安排饮料、副食生产, 取得了高效益。春节仅生产元宵一项就获利十