

测雨雷达的校准

顾松山 朱清坤*

测雨雷达校准的主要内容,首先是为了保证雷达定位的准确性,而对雷达的方位角、仰角以及雷达测量的距离和高度加以仔细的校准;其次是精确测量雷达的主要参数,掌握其随时间的变化规律。

本文主要总结近几年来校准我院“711”雷达的工作。

一、雷达方位角、仰角以及测距、测高的校准

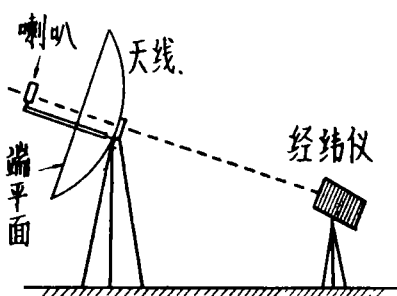
1. 雷达机械轴的校准

雷达机械轴指反射体中心与馈电喇叭口中心的连线。通常天线辐射波束的轴线方向与雷达天线的机械轴方向一致。用经纬仪标定天线的机械轴指向即可校准雷达方位角、仰角。经纬仪的方位可根据北极星或当地的磁偏角确定。

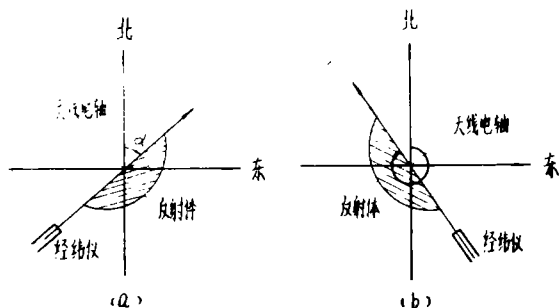
a. 测定反射体的垂直轴线校准雷达的方位角、仰角

拆下“711”雷达反射体中心小园盖,在远离天线处架设一部经纬仪,转动天线方位角和仰角,使经纬仪、反射体的中心、喇叭口位于一条直线上,方形喇叭口正好内接于反射体中心的园孔(图一)。此时经纬仪的方位角和仰角即为雷达的方位角和仰角。

b. 测定反射体的端平面校准雷达的方位角



(图 1)



(图 2)

将天线仰角停在 0° ,并大致指向北方,远处(约100米以远)架设一部经纬仪。缓慢转动天线方位(亦可改变经纬仪位置),直到反射体端平面的前后边缘与经纬仪轴线重合。

*楼文珠同志参加部分工作

此时,若经纬仪的方位角为 α ,并且经纬仪在天线的西边,则天线的方位角为 $\alpha+270^\circ$ 。(超过 360° 则可减去 360°),如图二(a)。若经纬仪在天线的东边,则天线的方位角为 $\alpha-270^\circ$ (小于 360° 时,可以加上 360°),如图二(b)。

经多次标定,我们认为利用端平面方法定位比较简便,重复性好。天线座的水平调准了,仰角的定标精度优于 0.1° 。车装“711”的水平校准较为困难。

2. 雷达电轴的校准

当天线辐射波束的轴线方向和天线的机械轴方向不完全一致时,雷达天线方位角、仰角的校准应该按其辐射波束轴线方向进行,即应定标雷达天线的电轴方向。

我们曾选择容易辨认的孤立地物目标回波,根据该地物在大比例尺地图上相对于雷达站的方位来定标雷达的电轴方向。此法便于日常观测中用来监测雷达的方位定标。但选择固定地物目标受环境条件的限制,难以精确定标。

最近,我们用太阳辐射校准了雷达的电轴方向⁵。太阳是一个频谱很宽的电磁波辐射源。当雷达的灵敏度足够高时,就能收到太阳的微波辐射。因其频谱很宽,类似于噪声信号,被雷达接收后叠加在雷达本身的固有噪声上,很容易用高内阻的万用表在雷达接收机检波插孔处检测出来。

雷达天线没有对准太阳时,万用表的指示为接收机固有噪声。天线对准太阳时,万用表指示最大。根据此刻太阳的方位角和高度角即可对雷达天线的方位角和仰角进行定标。

确定太阳的方位角和高度角有两种方法:一是直接用经纬仪观测此刻太阳的方位角和仰角。用经纬仪观测太阳时需加深色滤光镜,以防阳光烧伤眼睛。经纬仪本身需精确地定北标;二是根据太阳在天空中的运行规律,用天线对准太阳时的时间来确定太阳的方位角和仰角。

太阳的高度角计算公式⁽¹⁾:

$$\sin \varepsilon = \sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos h$$

式中 ε 为太阳的高度角, ϕ 为测站纬度, δ 为当时的视赤纬, h 为太阳的时角。

时角就是测站当地的地方真太阳时,这由当时的地方平时,根据当天的时差,进行订正得出,用角度表示。

视赤纬 δ 和计算时角用的时差可从天文年历中查得。只要记下雷达对准太阳的时间,便可计算出此刻太阳的高度角。

太阳从正南算起反时针转(向东转)的方位角 θ_s 由下式给出:

$$\sin \theta_s = -\cos \delta \cdot \sin h / \cos \varepsilon$$

如为负值,则表示从正南向西转。而 $180^\circ - \theta_s$ 则表示通常从正北起算的方位角 θ 。

天文年历中只给出历书时 o^h 的数据,可用内插法得出观测时刻的数据。

表一为1979年8月10日的标定结果。雷达的方位度盘指示已根据北极星测定反射体端平面方法进行了校准。仰角度盘指示,根据天线座调准水平来定标的。

由表一可见,只要天线座的水平调得精确,仰角度盘指示值与用太阳法测得的实测值非常接近。方位度盘指示值是根据北极星定标的。众所周知,北极星的位置是不断

变动的，纬度越高，变动越大，1979年一昼夜最大方位偏离达 $1^{\circ}40'$ 。经计算定标本雷达的方位度盘指示时，北极星偏东 0.8° 。考虑此项修正后，方位度盘指示值与用太阳法实测的方位值平均相差只有 0.6° 。

表 1

时 间 (北 京 时)	仰 角			方 位 角		
	度盘指示	实 测 值	差 值	度盘指示	实 测 值	差 值
6 ^h 4 ^m 50 ^s	16.6°	16.5°	0.1°	80.2°	81.4°	1.2°
6 ^h 54 ^m 15 ^s	17.5°	17.5°	0°	80.5°	81.9°	1.5°
6 ^h 58 ^m 10 ^s	18.4°	18.3°	0.1°	80.7°	82.5°	1.8°
7 ^h 3 ^m	19.4°	19.0°	0.4°	81.2°	82.2°	1.0°
7 ^h 18 ^m 25 ^s	22.5°	22.5°	0°	83.2°	84.8°	1.6°
7 ^h 27 ^m 25 ^s	24.7°	22.4°	0.3°	84.5°	85.9°	1.4°
平 均	—	—	0.17°	—	—	1.4°

时间误差对方位角的影响远大于对仰角的影响，这是造成方位偏差的主要原因。实际操作时，人站在反射体的背面，指挥操纵人员转动天线，使反射体大致对准太阳。然后，慢慢转动方位、仰角旋钮，直至接收到最强的讯号。先调俯仰，使信号最强。随后转动方位，使信号再次最强，立刻记下时间，时间尽可能精确到秒。

转动仰角，接收到太阳信号的范围约为 2.5° ；方位角的范围约为 3° 。只要天线大致对准太阳，很容易找到最强点。

为了提高方位度盘读数精确度，我们在方位度盘上加了一只固定游标。

从机械轴和电轴定标的结果来看，本雷达的机、电轴基本一致，这在仰角上尤为明显。至于方位角偏差较大，一是时间未记准，二是方位度盘读数精度不及仰角度盘。

用太阳法定标雷达方位角、仰角，简便易行，精度高。当雷达站周围没有合适的地物可用来定标电轴时，太阳法则更显得优越。

3. 用零度层校准测高

用雷达观测层状云系，可以看到回波在 0°C 层附近特别亮，称为零度层亮带。我们根据零度层的高度校准过雷达的测高。通常认为由探空资料确定的零度线以下约200—300米处为零度层亮带位置。如1979年6月21日，测得零度层亮带的顶高4900米，底高4700米，由探空资料查得的零度层高度为5100米。利用此法，可经常地标定和检查雷达测高的精度，简易有效。

二、雷达主要参数的测量

为了保证测雨雷达正常工作以及进行定量的雷达探测，必须对雷达的有关参数定期进行测量，并掌握它们随时间的变化情况。

常用的雷达气象方程为:

$$\bar{P}_r = \frac{\pi^3}{1024 \ln 2} \left| \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \right|^2 \frac{\bar{P}_t G^2 C \theta \phi}{\lambda^2 r^2 F} Z.$$

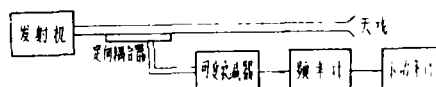
式中 λ 是波长, $\bar{P}_t$ 是雷达发射的平均功率, G 是雷达天线的有效增益, θ, ϕ 是以 -3db 计算的天线波束宽度, F 为雷达的脉冲重复频率, C 是电磁波传播速度, r 是气象目标的距离, $\bar{P}_r$ 为回波功率, ϵ 为气象目标的介电常数, 对水滴而言, 在 0 °C 时, $\left| \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \right|^2 = 0.93$.

1. 雷达发射参数的测量

雷达发射参数的校准主要是测量波长 λ (即雷达工作频率 f), 平均发射功率 $\bar{P}_t$ 和脉冲重复频率 F .

a. 平均发射功率的测量³

微波功率的测量是利用各种功率计进行的, 测量方式有两种, 一是测量吸收到的功率, 功率计直接作为磁控管的负载, 功率计吸收磁控管的全部输出功率, 并进行度量。我们使用的是 GLCD-2 型超高频大功率计, 它的工作原理是用水作为测热物质, 吸收发射机产生的电磁能, 并转化为热能, 测量水的升温, 由此确定所吸收的微波功率, 在实际测量中必须使循环水保持一定的流速。另一方式是测量通过功率, 用定向耦合器从波导系统中取出传输功率的一小部分进行测量, 如图三所示。



(图 3)

测量功率时应使频率计失谐, 若定向耦合器的过渡衰减为 A 分贝, 可变衰减器的衰减量为 B 分贝, 频率计及馈线损耗为 C 分贝, 功率计指示值为 P (mw), 则有:

$$10 \lg \frac{\bar{P}_t}{P} = A + B + C$$

$$\bar{P}_t = P 10^{\frac{A+B+C}{10}}$$

我们使用的是 $G \times 2A$ 型微瓦功率计。 A 为 17.2 分贝, 各部雷达不完全相同, 用时需单独定标。

大功率计测量精度较高, 但测量费时, 小功率计测量时因用到可变衰减器, 误差较大, 但简便易行。

长期测量表明, CKM—56 的输出功率比较稳定, 在正常寿命期间, 随时间变化很小。

表二列出了

表 2

CKM—56 输出功率随 400C—115V 电源电压波动而引起

电源电压 (400C)	105V	110V	115V	120V
输出功率 (瓦)	27.5	28.2	28.5	28.8

测量功率的精度主要受功率计精度的限制，高精度的功率计，其误差也允许 5 %。

b. 波长 λ 和脉冲重复频率 F 的测量

调节图三中频率计空腔的大小，当腔体的频率调整到磁控管的工作频率 f 时，空腔谐振，大量吸收微波能量，功率计的指示迅速下降。功率计指示降到最小值时，频率计所指示的频率即为磁控管的振荡频率 f 。由 f 可算出 λ 。

频率 f 也可直接用雷达配发的回波箱测量。

雷达发射脉冲的重复频率测量比较简单，我们是用数字式频率计直接测量的，也可用具有准确时标的示波器进行。

我们对 CKM—56 的振荡频率进行了多次测量，同一只管子其频率最大漂移约 10MHZ，变化比较小。

表三列出了雷达发射脉冲重复频率随电网电压变动的情况。随电网电压的降低， F 约有 2 周的变化。

表 3

电 网 电 压 (伏)	225	220	210	200	190
重 复 频 率 (周)	372.8	372.6	372.3	371.4	370.3

2. 接收机参数的测量

雷达定量测量工作中的一个重要环节是对回波功率的测定，这与接收机灵敏度的关系极大。目标一定，灵敏度高的雷达显示的回波功率大，反之亦然。接收机的校准主要是测定其灵敏度及回波功率的定标。

a. 接收机灵敏度的测量

雷达接收机的灵敏度，指其接收微弱信号的能力。可用噪声系数和最小可测功率两种方式表示，相应的也有两类测量方法。

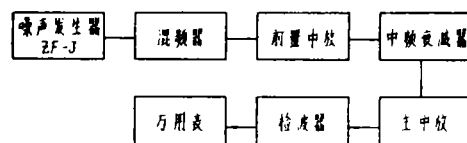
(1) 接收机噪声系数 N_F 的测量

接收机噪声系数指其输入端的信噪比与输出端的信噪比之比值：

$$N_F = \frac{\text{输入端信噪比}}{\text{输出端信噪比}} = \frac{P_{s1}}{P_{N1}} \cdot \frac{P_{s0}}{P_{N0}}$$

N_F 表示信号通过接收机后，由于接收机内部产生的噪声，在输出端信噪比变坏了多少倍。常用分贝表示，噪声系数越小，表示接收机的灵敏度越高，性能越好。

用噪声信号发生器 ZF—3 测量“711”雷达接收机噪声系数的线路如图四所示。



(图 4)

ZF—3 是用气体放电管通电时产生的噪声作为噪声源。它的噪声功率标定数值用

“超量噪声功率比 ENR 表示, 简称“超噪比”。

$$\text{ENR} = 10 \lg \left(\frac{T}{T_0} - 1 \right)$$

式中 T_0 为标准噪声温度, 通常取 $T_0 = 290^\circ\text{K}$, 它表示 ZF—3 未加高压时产生的固有噪声。 T 为 ZF—3 的等效噪声温度, 表示加高压后产生的噪声功率。ZF—3 的 ENR 等于 18db。

实际操作时用 500 型万用表直流 2.5 伏档接在检波插孔上, 作为输出监测指示器。本振调谐置“手动”位置, 调节反射极电压, 使本振速调管工作在模的中心(晶流最大)。在中频衰减器无衰减时, 调节接收机中放增益控制电位器, 使万用表的指示为 V_1 , 它表示接收机的固有噪声。然后, 接通噪声管的高压, 将噪声管的电流调到 150ma, 万用表的指示电压变为 V_2 , 它为固有噪声和外加强噪声之和。改变中频衰减器的衰减量, 使 $V_2 = V_1$, 记录下中频衰减器的衰减量 B 。于是就能计算出接收机的噪声系数 N_F :

$$N_F = \text{ENR} - 10 \lg(Y - 1) + \Delta$$

式中 Y 是信号发生器有信号输出时被测设备输出端的功率比信号发生器没有信号输出时(这时仍有信号源内阻的噪声输出)被测设备输出端的功率所增大的倍数。在这里, 可根据中频衰减量 B 求得。 Δ 是测量时工作室温度不等于 290°K 时的订正值, 数值很小, 一般可略去不计。

当考虑到接收机镜像通道噪声与信号通道噪声相等时, 即噪声系数的真实值比按上述公式计算的值大一倍(3 db), 也就是说中频衰减器在测试过程中为了使 $V_2 = V_1$, 多衰减了三分贝, 故最后结果要加上三分贝的修正量。

调节增益电位器, 使 V_1 取不同的数值, 重复测几次, 然后取 N_F 的平均值作为接收机的噪声系数。

表四为一次测量 N_F 的记录。经长期多次测量, 发现接收机的噪声系数相当稳定, 方法简单, 重复性好, 可用来监测接收机的灵敏度。

表 4

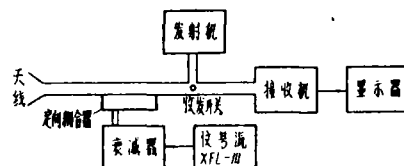
万用表指示 V (伏)	0.5	0.7	0.9
中频衰减量 B (db)	9	8.9	8.9
对应的 Y 值	7.94	7.76	7.76
$10 \lg(Y - 1)$	8.4	8.3	8.3
噪声系数 N_F (db)	12.6	12.7	12.7

(2) 用正弦波信号发生器测接收机的最小可测功率

最小可测功率 P_{min} 指雷达终端设备恰好能从噪声中识别信号时天线输给接收机输入端的最小信号功率。在雷达气象学中通常以 A 显上的信号与茅草一样高或平显上信号刚好淹没在噪声中(相当于回波边缘处的功率)来定义最小可测功率(称为实际灵敏度)。

图五是用正弦波信号发生器测接收机灵敏度的连接图。

先将接收机调到正常工作状态，开启信号源 XFL-14 使其产生类似于雷达发射机发出的高频脉冲，无论是工作频率、脉冲重复频率、调制脉冲宽度都与发射机的一致。为此，从雷达引出一个同步脉冲到信号源以求同步。将讯号源的功率校准到一毫瓦。然后调节衰减器使 A 显上的信号与茅草一样



(图 5)

高，则衰减器的衰减值加上定向耦合器的过渡衰减、馈线损耗（需在测试前进行定标）即为接收机的最小可测功率，单位是分贝毫瓦（dbm）。“711”的最小可测功率约为 -97dbm，长期测量中发现此值一致性较差，相差 3 dbm 是常有的事。

b. 回波功率的定标

雷达回波功率的定标，是用已知的标准讯号功率与雷达接收机输出功率进行比较来测量回波功率的大小。

任一强回波信号，都可用高频衰减量 N 及最小可测功率表示为：

$$P_r = P_{\min} 10^{\frac{N}{10}}$$

即任一强回波信号经高频衰减 Ndb 以后恰好等于最小可测功率。

当用中频衰减器来测量回波功率时，定标方法与用正弦信号测最小可测功率的方法类似，即在不同的中频衰减值 n 下测量最小可测回波功率 $P_{r,\min}$ （表 5）。 $P_{r,\min}$ 表示在 A 显上恰好能识别时天线输给接收机输入端的最小功率。

表 5

n (db)	0	5	10	15	20	25	30	35
$P_{r,\min}$ (dbm)	96.7	95.7	94.0	92.8	91.8	90.5	87.0	82.9
n (db)	40	45	50	55	60	65	70	75
$P_{r,\min}$ (dbm)	75.7	71.6	67.0	64.3	58.3	54.4	52.3	50.3

因为测量最小可测功率的差异较大，回波功率的定标一致性较差。

3. 无线增益的测量

无线增益定义为：在辐射功率不变时，定向天线在最大辐射方向的能流密度与各方向均匀辐射天线在同一距离处的能流密度之比值，用 db 表示，称为纯增益。考虑发射机至喇叭口之间的馈线损耗后，喇叭的辐射功率将减小，此时测得的天线增益称为有效天线增益。

雷达气象方程中的天线增益为有效增益。雷达出厂时测定的是纯增益。

天线增益测量的方法很多，我们用“功率传递法”^[6]测量了天线有效增益。

设有两部天线,相互间距离为 r (图六)主向对准, P_t 为发射天线辐射的峰值功率, G_t 为发射天线的增益, λ 为工作波长。

P_r 为接收天线接收到的峰值功率, G_r 为接收天线的增益。

发射天线发射到距离 r 处每单位面积的功率为 $\frac{P_t}{4\pi r^2} \cdot G_t$ 。

接收天线接收到的功率 P_r 应该是到达接收天线的功率密度乘上接收天线的有效面积

$$A_e, A_e = \frac{G_r \lambda^2}{4\pi}$$

因此接收天线接收到的功率为:

$$P_r = \frac{P_t}{4\pi r^2} \cdot G_t A_e = P_t G_t G_r \lambda^2 / 16\pi^2 r^2$$

如果将雷达天线作为发射天线,已知标准增益喇叭天线为接收天线,雷达发射机作为信号源,则由上述方程可求得雷达天线的有效增益为:

$$G_t = 16\pi^2 r^2 P_r / \lambda^2 G_r P_t \quad (1)$$

上述方程中的 P_r 及 P_t ,可用峰值功率表示,也可用平均功率表示,对“711”来讲,发射机的功率足够大,可直接用精度较高的小功率计来测量平均功率。

测试场地的选择,必须保证标准天线附近的电磁场不受地面及其它物体反射的影响。同时,必须满足, $r \geq \frac{2d^2}{\lambda}$ (d 为雷达天线直径, λ 为工作波长)以保证标准天线处的电磁场为平面波。

测试时首先使两部天线的波束轴线对准,即反复转动两部天线,使标准天线处的功率计测得的功率达到最大。用频率计测量工作波长。将小功率计、衰减器用波导同轴转换电缆和雷达机上的定向耦合器相连接,开启发射机,调节衰减器,使小功率计的指示为某一刻度 P ,记下 P 值和衰减器的读数 A_1 (db)。将同一台小功率计、衰减器及连接馈线与标准天线相接。开启发射机,移动标准天线,使小功率计指示最大。调衰减器,使小功率计的指示仍为 P ,记下衰减器的读数 A_2 (db)。

将(1)式右边的分子分母都除以小功率计的指示值 P ,等式两边各取以10为底的对数,并乘以10,即得天线增益的分贝表示式

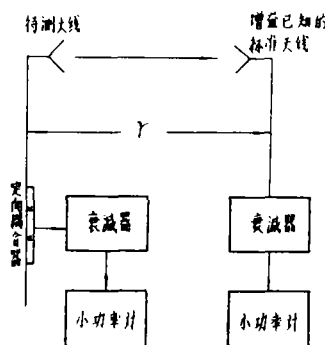
$$G_t(\text{db}) = 10 \lg \frac{16\pi^2 r^2}{\lambda^2} + 10 \lg \frac{P_r}{P} - G_r(\text{db}) - 10 \lg \frac{P_t}{P}$$

接收功率和发射功率如果用功率计指示 P 和衰减量表示,则有:

$$10 \lg \frac{P_t}{P} = C + A_1 + b, 10 \lg \frac{P_r}{P} = A_2 + b$$

c 为定向耦合器的衰减量, b 为馈线的衰减量,由上述关系式可得待测天线增益 G_t :

$$G_t(\text{db}) = 10 \lg \frac{16\pi^2 r^2}{\lambda^2} - G_r + A_2 - A_1 - C \quad \dots\dots(2)$$



(图 6)

我们测量时标准天线离地面约 16m, $r=265.8\text{m}$, $\lambda=3.2\text{cm}$ ($f=9386\text{MHz}$), $c=17.2\text{db}$, $G=19\text{db}$, $A_2=3.3\text{db}$, $A_1=36.1\text{db}$ 。将上述各值代入(2)式, 得天线的有效增益为 35.5db。经多次测量, 结果比较稳定, 误差主要来自衰减器的精度。此法用来测车装“711”的天线有效增益较为方便。

利用工厂的测试场地, 我们测量了“711”天线的波瓣宽度, 用增益比较法测量天线的纯增益, 垂直波瓣 1.45° , 水平波瓣 1.4° 。天线的纯增益为 $36\text{db}\pm 0.5\text{db}$ 。

三、讨 论

1. 用太阳法标定方位角、仰角简便易行, 精确度高。近年来太阳辐射处于最强时期(用期是11年), 当太阳辐射于最低值时“711”可能收不到太阳噪声。若将其混频器改成交叉场混频器(近期产品已改), 接收机灵敏度可提高2—3db, 估计仍能收到太阳噪声。

另外, 为了防止大气折射的影响, 标定时仰角最好大于 20° , 当然也可在仰角较低时进行观测, 了解大气折射情况。

2. 回波功率的测量与接收机灵敏度的标定关系极大。用噪声信号发生器标定灵敏度一致性较好。由噪声系数换算成最小可测功率, 应用公式 $P_r = P_{\text{smi}} 10^{N/10}$ 来测回波功率时, 其中N为高频率衰减量, 这对有高频衰减器的雷达比较适用。

3. 雷达各参数测量精度对 Z_e 的影响

雷达气象学要求 Z_e 的绝对值测量尽可能精确, 以便于比较不同雷达得到回波资料。

表 6

雷 达 参 数	θ	φ	f	$\bar{P}_t$	G	$\bar{P}_r$	F
测 量 精 度	0.05°	0.05°	10MHz	1.5W	1.5db	4dbm	2周
ΔZ_e (db)	0.1	0.1	0.008	0.2	3	4	0.02

表六列出了雷达各参数测量精度对 Z_e 的影响。

测量精度指标定过程中该参数的实际测量值与真值的偏离程度, 若为 ± 1 , 则精度记为2, 此值主要取决于仪器精度和测量方法。此外, 还包括该参数在一次观测过程中的最大变化值。表中的数据是根据我们历次标定取得的。

ΔZ_e 指雷达参数变化值等于测量精度时引起 Z_e 的变化量, 也可以说, 当两部雷达观测同一气象目标时, 其主要雷达参数按照前述的方法严格标定, 两部雷达测量的 Z_e 最大差异可达 ΔZ_e 。同一部雷达测量的 Z_e 与 Z_e 的真值, 其最大偏离只有 $\frac{1}{2} \Delta Z_e$ 。

由表可见, 对 ΔZ_e 影响最大的天线有效增益 G 和 $\bar{P}_r$ 。目前还难以将 G 的测量精确到1db, 也许混频器改进后的“711”用太阳法来标定 G , 其精度会有所提高。天线有效增益包括了馈线损耗, 后者随时间变化, 最好每年开机时标定一次。

“711”雷达回波功率的测量方法需改进, 否则难以提高测量精度。

参 考 文 献

- [1] 中央气象局研究所, 利用太阳辐射校准测雨雷达, 全国雷达气象会议交流材料, 1978。
- [2] 中国科学院兰州高原大气物理研究所, 气象雷达的校准, 1978。
- [3] M. 恽特等 (吴培亭译), 微波测量方法, 上海科学技术出版社, 1963。
- [4] Roger C. Whiton, Paul L. Smith, Jr., and Albert, C. Harbuck, Calibration of weather Radar Systems Using the Sun as a Radio Source, 1976, 17th Radar Meteorology conference.
- [5] Guidice, D. A., J. P. Castelli, The use of extraterrestrial radio sources in the measurement of antenna parameters, 1971, IEEE Trans on Aerosp and Electr Systems AES-7, 2, 226—234.
- [6] Smith, P, L., 1974, Measurement of Antenna Gain in Radar Systems, Microwave Journal 17 437—40.
- [7] 雷达设备编写组, 雷达接收设备, 国防工业出版社, 1978。