

数字化天气雷达定标中应注意 的一些问题

张沛源 周海光 梁海河 胡绍萍

(中国气象科学研究院,北京 100081)

提 要

定标是天气雷达定量测量的基础,论述了目前我国数字化天气雷达定标中存在的问题并提出解决方案。

关键词:天气雷达 定标 数字化处理

引 言

我国数字化天气雷达主要是在 80 年代末和 90 年代前期通过对常规的模拟信号显示的天气雷达的改造发展起来的。

对 713、714 雷达的改造方法是在视频输出端增加信号处理器(其中包括 A/D 变换及数字视频积分器)通过接口板把处理结果送入计算机,进行图像显示和进一步加工处理,在伺服系统增加数字天线控制器(其中包括 S/D 及角码变换),通过接口板进入计算机由计算机控制天线运动。

对 711 雷达,由于线性接收机增益所限,必须另外增加或更换为对数接收机,然后再在视频输出端增加信号处理器,在伺服系统中增加天线控制器,并用计算机控制和实现图像显示。

由于天气雷达的数字化改造发展很快,各地都分别与不同厂家联系,研制各自的天气雷达数字化终端,使得我国天气雷达数字化终端型号繁多,而且不同型号间性能差异很大。有关数字化天气雷达定标问题,当时各厂家基本上都没有考虑。改造后的雷达有的根本没有定标功能,有的仍按照模拟信号显示雷达的定标方法进行,因此造成不少问题。为了充分发挥全国数字化天气雷达网的效益

和更好地使用数字化天气雷达观测资料,进一步开展数字化天气雷达定标研究是有必要的。

1 数字化天气雷达定标的含义

数字化天气雷达提供给用户的物理量是回波强度及其相应的空间位置。回波强度一般用反射率因子表示,单位为 mm^6/m^3 。其空间位置是指以雷达天线为坐标原点的球坐标参量,即距离、方位、仰角。这里的距离是回波到雷达天线的长度;方位是以正北方为零度,顺时针转回到北为 360° ;仰角以天线处的地球切面(水平面)为零度,到天顶为 90° 。

所谓的天气雷达定标就是消除测量这些参量时产生的系统误差,给出这些量的真实值。所谓定标方法就是消除这些量的系统误差的方法,换句话说,定标方法就是消除系统误差的方法。天气雷达定标包括回波强度定标和空间位置定标(其中包括距离测量定标、方位测量定标和仰角测量定标)。本文主要讨论有关回波强度测量的定标问题。

2 数字化天气雷达与模拟信号显示天气雷达定标的异同

2.1 定标原理相同

数字化天气雷达和模拟信号显示的天气雷达都是利用降水粒子的后向散射特性探测

大气中的降水现象。从这一点讲,它们测量的根据都是雷达气象方程。因此在定标过程中都需要对雷达发射脉冲峰值功率、波长、脉冲宽度、天线增益、垂直波束宽度、水平波束宽度进行测量。都需要进行距离订正,都需要确定回波功率。这是它们相同之处。

空间位置参数定标(其中包括天线座水平调整、天线机械轴定标和天线电轴定标),两种雷达采用的方法基本一样。

2.2 系统误差的来源和定标精度不同

由于数字化天气雷达和模拟信号显示的天气雷达的硬件设备有较大差别,造成两种雷达的系统误差的来源有差别。数字化天气雷达除要考虑接收机、发射机造成的系统误差外,还要考虑 A/D 变换,信号处理器造成的系统误差。在雷达空间位置参数定标中除考虑伺服系统、电机、天线座水平、天线机械轴、电轴等造成的系统误差外,还要考虑 S/D 变换及天线控制器引起的系统误差。

系统误差是通过定标可以消除的。由于数字化天气雷达和模拟信号显示的天气雷达系统误差的来源有差别,因此消除系统误差的方法也有差别。

另外,数字化天气雷达和模拟信号显示的天气雷达的定标精度不同。例如数字化天气雷达中 A/D 变换存在有量化误差,积分处理中存在计算误差,由于在模拟信号显示的天气雷达中,设有 A/D 变换器和计算处理,它就没有这类误差。但是它有它的处理线路,这些线路有这些线路的处理误差,这些误差在数字化天气雷达中又是没有的。由于误差来源不同,处理方法不同,最终的定标精度也是不同的。

2.3 定标对象和处理方法不同

由于模拟信号显示的天气雷达最后输出到显示器上的是电压,而数字化天气雷达最后输出到计算机中的是数字。因此模拟信号显示的天气雷达是对电压进行定标,数字化

天气雷达是对数值进行定标。由于定标对象不同,采用的定标方法也就不同。模拟信号显示的天气雷达,回波信号积分、回波功率定标、距离订正等都是通过硬件实现的。而对数字化天气雷达而言,以上处理可通过直接的数字运算实现。

模拟信号显示的天气雷达的仰角和方位是通过表盘读数的,而数字化天气雷达的仰角和方位是以数值形式显示出来的。因此两种雷达在空间位置参数定标处理方法上将出现差异。

3 数字化天气雷达回波强度定标的根据

数字化天气雷达探测回波强度的依据是雷达气象方程。在不考虑大气对电磁波的衰减和充塞系数影响的情况下,雷达气象方程^[1]可写为:

$$\bar{P}_r = \frac{P_t G^2 \tau C \theta \varphi \pi^5}{A \lambda^2 R^2} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right| Z \quad (1)$$

其中 A 是一常数,它的大小与各个变量的取值单位有关,当各变量以下述量为单位时,其取值为 22.997×10^{21} 。

P_t 为雷达的发射峰值功率,单位取千瓦(kW), G 为雷达天气增益,即放大倍数,是一个无量纲量, τ 为雷达发射的脉冲宽度,单位取微秒(μs), C 为光速,单位取公里/秒(km/s),取值为: 3×10^5 km/s, θ, φ 为雷达垂直方向和水平方向的波束宽度,单位取度(deg), λ 为雷达发射的电磁波的波长,单位取毫米(mm), R 为目标物到雷达天线的距离,单位取公里(km), \bar{P}_r 为目标物的平均回波功率,单位取毫瓦(mW), m 是复折射指数, $\left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2$ 为无量纲量, Z 为反射率因子(或等效反射率因子),单位取毫米⁶/米³(mm⁶/m³)。

在雷达观测中,雷达接收到的是回波功率(\bar{P}_r),目标物的反射率因子(Z)只能通过回波功率 \bar{P}_r 的测量,利用雷达气象方程计

算,即

$$Z = \frac{A \bar{P}_r \lambda^2 R^2}{P_t G^2 \tau c \theta \varphi \pi^5} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^{-2} \quad (2)$$

为了计算出 Z 值,必需测出 \bar{P}_r 、 λ 、 R 、 P_t 、 G 、 τ 、 θ 、 φ ,其中雷达发射峰值功率(P_t)、雷达发射波长(λ)、雷达脉冲宽度(τ)、天线增益(G)、雷达垂直方向的波束宽度(θ)和雷达水平方向的波束宽度(φ),只与雷达本身有关,可通过雷达参数测量确定。距离(R)通过时间测量确定。关键是 \bar{P}_r 的测量。 \bar{P}_r 测量有二层含义,一是瞬时回波功率测量,二是求取多次瞬时测量的平均值。这是相当麻烦和困难的,狭义的天气雷达定标就是如何求出 \bar{P}_r 。

4 回波强度定标中的若干问题

4.1 定标中的参数测量点问题

由雷达气象方程可知,发射功率(P_t)是指雷达天线处的发射功率。平均回波功率(\bar{P}_r)是指雷达天线处的平均回波功率。但目前在我国天气雷达定标中,发射功率(P_t)不是在天线处测得的,而是在发射机输出端通过定向耦合器耦合出一小部分能量,采用小功率计测出。因此直接使用这一测量值代入雷达气象方程是不对的,因为测量点不在天线处。为了能使用这一测量值,必须测出从定向耦合器到天线喇叭口之间的波导管的衰减值。并利用下式计算出天线处的发射功率。

$$P_t = P_t^1 10^{\frac{-N}{10}} \quad (3)$$

N 是从定向耦合器到喇叭口之间衰减的分贝数, P_t^1 是定向耦合器测量点测到的雷达发射功率, P_t 为天线喇叭口处的发射功率。遗憾的是目前我国天气雷达站现用的雷达出厂时厂家没有给出 N 值,雷达安装后再测量这一值,困难较大。因此,不少台站在定标时只能用 P_t^1 代替 P_t ,这将给定标造成较大误差。

为了测量回波功率,需要找到天线处的回波功率与接收机输出端的输出量之间的关系。然后根据接收机的输出量,查算出天线处

的回波功率。为了确定天线处的回波功率与接收机输出量之间的函数关系,就要求从天线喇叭口处输入一组不同大小的功率值,在接收机输出端测量出相应的一组输出值(模拟信号是电压值、数字信号是数值)。但在实际工作中,每次从天线喇叭口处输入标准信号是不现实的,标准信号一般是从接收机的前端输入的。为了满足雷达气象方程的要求,必须用下式计算出天线处相应的功率值。

$$P_r = P_r^1 \times 10^{\frac{N_r}{10}} \quad (4)$$

P_r^1 为接收机前端的输入功率, N_r 为信号输入处到天线喇叭口之间的衰减分贝值, P_r 是相应天线处的输入功率。目前遗憾的是雷达出厂时厂家没有给出 N_r 值,雷达安装起来后再测量此值是相当困难的,因此在台站只能用 P_r^1 代替 P_r ,加大了定标误差。

在这里需要说明的是这二种误差都属于系统误差。

4.2 接收机的非线性问题

天气回波的变化范围很大,一般在 -10dBz 到 60dBz 范围内,强雹云回波常大于 60dBz。为了满足气象上的需要,要求数字化天气雷达的动态范围要大于 80dB。一般线性接收机不可能达到这一要求,因此需要采用对数接收机。

对于宽带对数接收机来说,输入功率与输出的 A/D 变换值之间有以下对应关系

$$P_n = a \times 10 \times \lg \left(\frac{I_0 + P_r}{I_0} \right) + b \quad (5)$$

其中 P_n 是量化值, P_r 为输入功率, I_0 是在小功率时线性与对数响应转移控制常数。这个值是个待定值,一般应由厂家给出,对数接收机的动态范围应该从这个值开始算起。 a 是斜率, b 是补偿常数。当 $P_r = 0$ 时, $P_n = b$, b 相当于噪声值。

由此可知,当 $P_r \ll I_0$ 时, P_n 与 P_r 为线性关系,即 $P_n = a_0 P_r + b_0$ 。

当 $P_r \gg I_0$ 时, P_n 与 $\lg P_r$ 呈线性关系,

即：

$$P_n = a \times 10 \times \lg P_r + C \quad (6)$$

其中 $C = b - a \times 10 \times \lg I_0$ 。

当以上条件不满足时, P_n 与 $\lg P_r$ 为非线性关系。由雷达气象方程可知, 远距离回波达到天线处时, 回波功率都不大, 不少回波回到天线处的功率是处在非线性关系之内。

在实际定标过程中, 需要点绘出对数接收机的响应特征曲线。横坐标是输入功率的分贝毫瓦值, 纵坐标是 A/D 变换的量化值。在一般情况下点绘出的曲线, 在低值区呈弧线, 在高值区呈直线。它说明在低值区输入功率的对数值与 A/D 变换的量化值不成正比, 只在高值区输入功率的对数值与 A/D 变换的量化值才成正比。

如果测试出来的曲线弯弯曲曲, 说明这个对数接收机的性能不好。

得到瞬时回波功率值后, 还要对瞬时回波功率进行积分处理, 对数平均需加 2.51dB, 线性平均不需要加 2.51dB^[1], 在线性到对数的过渡区内(即在特征曲线的非直线部分), 其订正值是测量值的函数, 其取值在 0~2.51 之间。

正是由于对数接收机存在非线性部分, 因此在定标过程中, 也就是在测定对数接收机特征响应曲线时, 测点要足够的多。尤其在非直线部分, 测点应尽量密集一些, 才能更好找到订正值与测量值之间的关系。测量曲线与定标曲线之间的关系如图 1 所示。

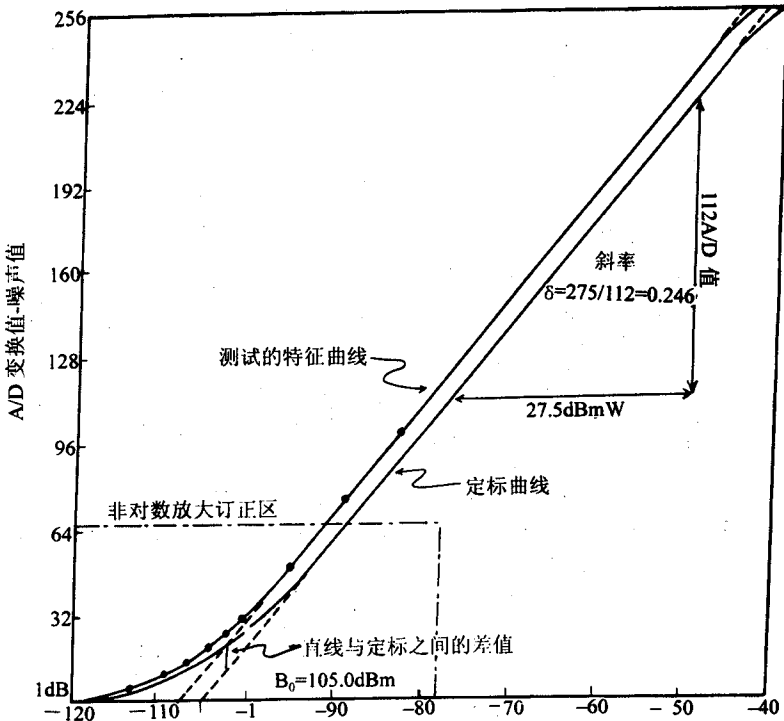


图 1 定标示意图

在线性区, 首先求出直线方程(即直线的斜率和常数项), 然后在常数项上加 2.51dB, 就是量化值对应的订正后的回波功率。

在非线性区, 要做特殊的订正, 订正值随量化值的增大而增大。一般在噪声点以上 1dB 处, 做为有回波的起始点。订正后的功率

值是在测量值上加上订正值。具体计算公式 $P_w = 0.14a \cdot x + \text{dBmW}$, 其中 dBmW 是测试值, a 是由测试曲线确定, 一般为直线部分的斜率, x 是 dBmW 对应的输出的量化值与噪声量化值之差。

4.3 A/D 变换及其予处理的非线性对定标的影响

对数接收机通过检波以视频方式输出, 不同雷达其视频输出电压的范围不同, 而且它的输出电压的范围一般不能满足 A/D 变换器的要求。因此为了满足 A/D 变换的需要, 必须对视频输出进行予处理, 予处理电路的线性状况, 直接影响定标的精度及均匀性, 这一问题应引起重视。

A/D 变换本身除了造成量化误差外, 它的线性状况也将对定标产生影响。因此建议进行二项检测, 一项是对视频输出到 A/D 变换输入之间的予处理电路进行线性状况检测。从视频输出端输入各种不同的电压值, 在 A/D 变换输入端测出相应的电压值, 然后在直角坐标纸中点绘出输入输出电压之间的对应曲线, 检查它的线性状况。另一种是检测 A/D 变换的线性度, 即从 A/D 变换的输入端输入各种不同的电压值, 在 A/D 变换的输出端输出相应的 A/D 变换的量化值, 检查 A/D 变换的线性度。线性度直接影响定标的一致性。线性差, 将造成有些地方测值偏大, 有些地方测量偏小。由于这一问题在定标过程中常常被忽略, 因此在这里特别提出, 以引起重视。

4.4 积分处理中存在的问题

回波功率的涨落服从瑞利分布, 理论表明平均次数越多, 测量误差越小。而且回波功率的对数值平均与平均回波功率的对数值相差 2.508dB, 即

$$\lg \bar{P}_r = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \lg P_{ri} + 2.508 \quad (7)$$

为了使式(7)成立, 从理论上讲 N 应取

无穷多次。当 N 取有限次时, 将会出现误差。当 $N = 31$ 时, 标准差大致为 1dB, 平均次数与误差大小之间有以下关系:

$$\sigma = 5.57 / \sqrt{N} \quad (8)$$

由于在积分处理器中进行积分时, 不是把 A/D 变换的量化值变换为回波功率的分贝值后再进行积分, 而是直接用 A/D 变换的量化值进行积分, 积分平均后, 再查表换算成回波功率值。因此对直线部分, 首先要线性化, 即通过回归求出直线方程。所以要首先求直线方程是因为积分处理是由式(7)完成的, 而由式(6)可得出, 回波功率的分贝值与量化值之间有以下关系:

$$\lg P_{ri} = S_i P_{ri} + b_i^1 \quad (9)$$

其中 P_{ri} 为量化值、 P_{ri} 为相应的功率值, S_i 为斜率, b_i^1 为常数项。

式(9)代入式(7)右测的第一项, 则有:

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \lg P_{ri} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i P_{ri} + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N b_i^1 \quad (10)$$

只有在同一直线下, 即 S_i, b_i^1 为常数时才有:

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \lg P_{ri} = S_i \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_{ri} + b_i^1 \quad (11)$$

才能直接用量化值进行积分。否则由于各处的 S_i 不同, 无法从求和号中提出来, 而且 $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N b_i^1$ 不能变为 b_i^1 , 就不能直接用量化值进行积分, 需要首先转化为回波功率的分贝值后, 才能积分, 这在目前的信号处理器中是办不到的。

目前国内雷达数字化终端中的积分次数, 一般都小于 16 次, 而且有的只有距离积分, 没有方位积分, 这样由于云体降水粒子在空间上分布的不均匀性将造成更大问题, 因此在考虑定标精度时, 这一问题必须引起足够的重视。为了定量测量的需要, 建议积分次数应大于或等于 32 次。

另外在积分处理过程中也就是在数字视频积分处理器(dvip)中,需要考虑积分处理存储器的位数,由于积分次数应 ≥ 32 ,多的可到 128 次,为了防止在累加过程中溢出,存储器和运算的位数必须比 A/D 变换的位数多 8 位,如果 A/D 变换为 8 位,则累加运算的位数必须为 16 位。如果 A/D 变换的位数为 12 位,则累加运算的位数至少采用 20 位。

4.5 数据整理问题

在定标过程中需要对大量测试数据进行计算、整理和分析,最后形成定标表,即得到输出信号与回波强度之间的对应关系。这个关系是否正确是定标成败的标志。经验表明在定标过程中,经常出现计算错误,错误的原因有:(a) 在计算过程中单位使用错误。(b) 系数变换过程中出现错误(其中包括单位变换)。(c) 小数位错误。为了提高定标的准确性和规范性。建议使用统一的定标软件,软件中算法必须正确。并要求具有以下功能:

a. 噪声测量。b. 雷达参数输入。c. 雷达常数计算。d. A/D 变换量化误差测定。e. 雷达对数接收通道响应特征曲线测定。f. 雷达

回波功率定标(其中包括线性化处理及非对数放大订正)。g. 定标曲线显示。h. 定标误差分析。i. 生成一公里处反射率因子查算表。j. 生成距离订正查算表。k. 其他(发射功率计算,定标检验等)。

除此而外,并建议:a. 所有平均计算,都采用算术平均。b. 所有内插,都采用线性内插。c. 线性处理都采用一元回归方法。d. 计算精度,应满足要求。

5 小结

从以上分析可知,天气雷达定标同样也需要随着软硬件设备的发展而发展。天气雷达从定性到定量,从模拟信号显示到数字信号显示,从单纯的回波强度观测到多要素观测,每前进一步,都需要有与它相适应的定标方法和定标技术。因此随着天气雷达技术的发展,不断地开展天气雷达定标方法研究是非常必要的。

参考文献

1 张培昌等. 雷达气象学. 北京:气象出版社,1988.

Some Problems of the Calibrations of Digit Weather Radars

Zhang Peiyuan Zhou Haiguang Liang Haihe Hu shaoping

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract

The calibrations of weather radars are the bases of quantitative measurements. Some problems of the calibrations of digit weather radars are discussed and the methods are advanced to solve these problems.

Key Words: digit weather radar calibration quantitative measurement