

# 天气雷达测定回波顶高的几种误差

戴铁丕 楼文珠

(南京气象学院)

## 提 要

研究天气雷达测定回波顶高的几种误差表明：大气异常折射会引起回波顶高明显误差。但在标准大气条件下，由于几类误差相互抵消，因此近距离测定强对流云回波顶高精度较高。

### 一、前言

在识别雹云及其结构的研究中，目前我国布点的711、713天气雷达，是很有用的探测工具。它们测得的回波顶高度（或该高度上相应的大气温度），特别是强回波顶高度（或该高度上相应的大气温度），是指示强对流云中是否存在冰雹，以及识别危险天气，探测局地强风暴强、弱变化的一个重要参数。但是由于不同型号雷达其参数的差异（例如天线波束的形状，天线垂直波束宽度），地球曲率和大气折射的影响以及距离衰减作用等，会使所测得的回波顶高度，强回波顶高度的准确性存在疑问。那么目前用天气雷达测定回波高度究竟存在多少误差，是否能满足精度要求呢？Donaldson<sup>[1]</sup>、Aoyagi<sup>[2-3]</sup>等人曾采用不同方法，对各自使用的雷达进行过分析，后者考虑了三类雨型（雷阵雨、阵雨、暖锋降水）反射率因子Ze值随高度变化五种不同的垂直廓线。结果表明：在50km以内，回波顶高度 $H_e$ 与云顶高度 $H_c$ 基本一致。在50km以外，需用下式

$$H_e = H_c - (R - 50)\varphi/2 \quad (1)$$

进行订正。式中R为雷达站与目标物之间的距离， $\varphi$ 为垂直波束宽度。

文献〔4〕用模拟方法研究了不同距离上，雷达测出的Ze垂直分布廓线与真实分布之间的差异，以及测量回波顶高的误差。虽

然也考虑了地球曲率和标准大气折射可能造成的误差，但是他们都没有考虑大气中可能存在的五种折射对测高误差的影响。本文详细讨论了仰角和仰角标定（或观测）误差，垂直波束宽度，距离衰减，大气折射和在有效照射体积“V”内Z值平滑作用等对测高误差的影响。得到了几点有意义的结论，可在雷达探测中参考应用。

### 二、几种雷达测高误差分析

1. 仰角和仰角标定（或观测）误差所引起的测高误差

据测高公式

$$h = h_0 + R \cdot \sin \alpha + \frac{R^2}{2R'_m} \quad (2)$$

式中 $h_0$ 是雷达天线离地高度，R是雷达站和被测目标物之间的斜距， $\alpha$ 为雷达天线探测目标物时的仰角， $R'_m$ 为等效地球半径。在（2）式中若把 $h_0$ 、R、 $R'_m$ 视为常数，并对该等式两边求微分可得

$$dh = R \cdot \cos \alpha d\alpha \quad (3)$$

由（3）式可见，仰角误差 $d\alpha$ 与测高误差 $dh$ 成正比。另外， $dh$ 还与斜距R及仰角的大小有关。在仰角 $\alpha$ 一定时，随着斜距R增加，由仰角误差 $d\alpha$ 引起的测高误差 $dh$ 也随之增加。在斜距R一定时，随着仰角增加，由仰角误差 $d\alpha$ 引起的测高误差是减少的。在实际工作中，利用（3）式可事先制成表或

图，以便根据  $d\alpha$ 、 $\alpha$  和  $R$  直接查得  $dh$ 。表 1 即为仰角误差引起的测高误差和斜距  $R$  的关系。可见， $dh$  的大小主要是由  $d\alpha$  和  $R$  决定的，而  $\alpha$  值对  $dh$  影响不大。为此，一部雷达安装时，仰角需经过仔细标定，雷达人员在操作时，仰角  $\alpha$  也必须认真读取，否则，当  $d\alpha = 0.5^\circ$  时，在离雷达站 100km 处，即可产生近 1km 的测高误差，影响探测精度。这个误差可正可负，其正、负值由  $d\alpha$  的正、负值决定。

表 1 不同斜距和仰角误差所引起的测高误差 (km)

$d\alpha$	$\alpha$	R (km)						
		10	50	100	150	200	250	300
0.1°	1°	0.017	0.085	0.17	0.26	0.34	0.43	0.51
	30°	0.015	0.075	0.15	0.22	0.30	0.37	0.44
0.3°	1°	0.051	0.26	0.53	0.77	1.0	1.27	1.53
	30°	0.045	0.23	0.45	0.66	0.9	1.10	1.32
0.5°	1°	0.09	0.43	0.90	1.27	1.7	2.12	2.55
	30°	0.08	0.38	0.80	1.10	1.5	1.84	2.21
0.75°	1°	0.13	0.64	1.27	1.91	2.55	3.19	3.82
	30°	0.11	0.55	1.10	1.65	2.21	2.76	3.31
1.0°	1°	0.17	0.85	1.75	2.55	3.4	4.25	5.09
	30°	0.15	0.75	1.50	2.21	3.0	3.68	4.42
2.0°	1°	0.34	1.7	3.5	5.09	6.8	8.50	10.2
	30°	0.30	1.5	3.0	4.42	6.0	7.36	8.83

## 2. 波束垂直宽度 $\varphi$ 引起的测高误差

在求得测高公式 (2) 时，把波束看作是射线，但实际上雷达发射的电磁波束有一定的宽度，这也会引起测高误差。由图 1 可见，当对流云顶回波较强时，在波束上拾过程

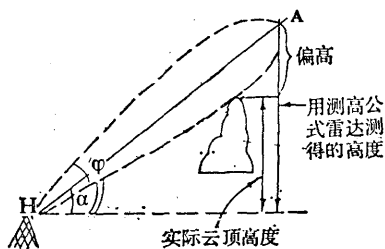


图 1 波束垂直宽度所引起的测高误差示意图

中，如波束轴线超过云顶后，直至波束下半部的半功率点离开云顶前，一直能散射回可探测的回波。则此时测回波顶高的天线仰角，将比波束为一条线  $OA$  时高二分之一的垂直波束宽度，即高  $0.73^\circ$ 。又因 RHI 上的高扫线与雷达天线的波束轴是同步旋转的，即该时天线波束轴线和高扫线的仰角均指示为  $\alpha$  角，但实际的云顶仰角是  $\alpha - \frac{1}{2}\varphi$ 。如以  $\alpha$  角代入 (2) 式，计算得的回波顶高度将偏高，偏高的大小与斜距  $R$  大小有关，其值为  $\frac{\varphi}{2}R$ ，在 100km 处会引起 1km 以上的误差。在实际工作中，为了方便，可事先作出这种订正表，以备查用。表 2 即为波束垂直宽度所引起的测高误差  $dh$  的大小。

表 2 波束垂直宽度与斜距  $R$  和仰角  $\alpha$  所引起的测高误差

仰角	斜距 (km)							
	10	50	100	150	200	250	300	
$\varphi = 15^\circ$	1°	0.127	0.637	1.27	1.91	2.55	3.19	3.82
	30°	0.11	0.55	1.1	1.65	2.21	2.76	3.31

## 3. 距离衰减所引起的测高误差

由于距离衰减作用，雷达探测到远处回波顶的高度将偏低。且距离愈远，偏低越多 (见图 2)。消除这种误差的基本方法，可在雷达上配备一个距离订正 (硬件或软件) 设备加以解决。若尚无此设备，或应用历史回

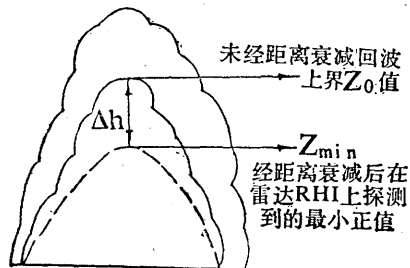


图 2 距离衰减示意图

• 但需注意：当对流云特别强时，要减去  $> \frac{\varphi}{2}R$  的值，而对流云较弱时，则要减去  $< \frac{\varphi}{2}R$  的值，甚至不需订正。

波资料分析问题, 可用下式订正。

$$\Delta h = \frac{1}{\nu} (\lg R^2 - \lg \frac{Z_0}{C}) \quad (4)$$

式中,  $Z_0$  为未经距离衰减回波顶上界的标准, 例如规定一个相当于最小降水强度或含水量的  $Z$  值作为标准的  $Z_0$  值。  $Z_{\min}$  为经距离衰减后, 雷达 RHI 上探测到的最小  $Z$  值。  $C$  为雷达常数。若回波顶部  $Z$  值按  $10^{-\nu \Delta h}$  的规律向上减小, 其中  $\nu$  为一个待资料确定的常数, 则有

$$Z_0 = Z_{\min} 10^{-\nu \Delta h}$$

若已知  $\nu$  值, 即可制作订正表或图。表 3 即

表 3 由距离衰减引起的测高误差  $\Delta h$  (km)

距 离 (km)	10	50	100	150	200
2	0.7 (0)	0 (-0.7)	-0.3 (-1.0)	-0.48 (-1.2)	-0.6 (-1.3)
1	1.4 (0)	0 (-1.4)	-0.6 (-2.0)	-0.95 (-2.35)	-1.2 (-2.6)
0.5	2.8 (0)	0 (-2.8)	-1.2 (-4.0)	-1.9 (-4.7)	-2.4 (-5.2)

注: 括号内外的数值分别是以 10、50km 为标准计算得出的。

#### 4. 波束宽度对最大 $Z$ 值探测的影响所导致的测高误差

由于雷达显示器上每个亮点是由波束内长度为  $h/2$  的一个有效照射体积 “V” 内降水粒子共同作用的结果, 因此, 显示器上观测到的某一高度上的  $Z_{\max}$  值, 实际上是这个 “V” 体积内的平均值。考虑到天线接收能力的方向性, 这个  $Z_{\max}$  值还与天线方向图有关。当雷达探测距离  $R$  变大, 主波瓣展宽, 探测到的  $Z_{\max}$  值就是更大范围内  $Z$  值分布的综合结果。并且, 主波束愈宽, 波束内  $Z$  值的垂直、水平变化愈大, 距离愈远, 雷达探测到的  $Z_{\max}$  值将比真正的  $Z_{0\max}$  值偏小得更多。若设 “V” 内  $Z$  值上、下、左、右均按 3dB/km 速率减少, 那么当  $\theta = \varphi = 1.5^\circ$ ,  $R = 100\text{km}$  时,  $\frac{Z_{\max}}{Z_{0\max}}$  的比值约为 0.57, 由此影响测高误差在  $R = 100\text{km}$  处仅为百米量级, 特别当对流云较强时, 这个误差可以不考虑。但在分析中小尺度回波精细结构时,

为应用 120 个样本资料确定  $\nu$  值为 2、1、0.5 情况下, 不同距离上由距离衰减所引起的回波高度降低的  $\Delta h$  值。像所预料的那样, 当  $\nu = 2$ , 即回波很强时, 由距离衰减所引起的回波顶下降值  $\Delta h$  并不大, 在离雷达站 200km 处仅为 0.6km (以 50km 处标准, 即在 50km 处没有距离衰减); 但当  $\nu = 0.5$  时, 即回波较弱, 在离雷达站 200km 处,  $\Delta h$  即为 2.4km。因强对流云, 特别是雹云, 回波很强, 经资料分析  $\nu$  值均在 2 以上, 因此可以认为在 100km 以内, 这个误差是不大的。对强回波高度, 测高误差更小。

这个差异仍应认真考虑。

#### 5. 大气折射所引起的测高误差

由大气折射所引起的测高误差, 可直接对测高公式 (2) 中等效地球半径  $R'_m$  求差分得到

$$\Delta h = \frac{-R^2 \Delta R'_m}{2R_m'^2} \quad (5)$$

式中  $\Delta R_m' = R_{m\text{标}}' - R_{m\text{实}}'$ 。可见该测高误差, 是由于实际大气的等效地球半径  $R_{m\text{实}}'$  偏离标准大气等效地球半径  $R_{m\text{标}}'$  引起的。其误差大小与大气折射程度和距离远近有关。式中负号的意义是: 若计算结果  $\Delta h > 0$ , 说明雷达显示器上显示的高度偏高, 订正值类负, 它们在  $R_m'$  大于 8490km 折射条件下发生; 反之, 若  $\Delta h < 0$ , 则雷达显示器上显示的高度偏低, 订正值类正, 它们在  $R_m'$  小于 8490km 折射条件下产生。

必须指出 (5) 式的适用范围是要求  $\Delta R_m'$  较小, 否则会导致明显的误差。考虑到实际大气偏离标准大气折射时  $R_m'$  变化很

大, 在临界折射时  $R_m' \rightarrow \infty$ , (5) 式不能应用, 这时可采用测高公式直接推求得到测高绝对误差公式

$$\Delta h = h_{\text{标}} - h_{\text{实}} = \frac{R^2}{2} \left( \frac{1}{8490} - \frac{1}{R'_m} \right) \quad (6)$$

(6) 式中  $R_m'$  为实际大气折射时的等效地球半径, 8490 为标准大气时等效地球半径。 $\Delta h$  正、负号规定与 (5) 式相同。

利用 (6) 式, 我们分别计算了临界折射,  $R_m' \rightarrow \infty$ ; 超折射,  $R_m' < 0$ ; 负折射,  $R_m' < 6370$  条件下的  $\Delta h$  值, 统一列出在表 4 中, 由表可见, 在临界折射时, 测高误差不大, 但超、负折射时,  $\Delta h$  值很大。就平均\*而言, 在 100km 处已接近公里量级, 至于出现超、负折射极值\*, 测高误差更大得惊人。

利用 1981 年南京地区全年探空资料逐

表 4 几类测高误差总表

dh (km) 类别		R (km)	R (km)						
			10	50	100	150	200	250	300
1	$d\alpha = \pm 0.5^\circ$	$\alpha = 1^\circ$	$\pm 0.09$	$\pm 0.43$	$\pm 0.9$	$\pm 1.27$	$\pm 1.7$	$\pm 2.12$	$\pm 2.55$
		$\alpha = 30^\circ$	$\pm 0.08$	$\pm 0.38$	$\pm 0.8$	$\pm 1.10$	$\pm 1.5$	$\pm 1.84$	$\pm 2.21$
2	$\varphi = 0.75^\circ$	$\alpha = 1^\circ$	0.127	0.64	1.27	1.91	2.55	3.19	3.82
		$\alpha = 30^\circ$	0.110	0.55	1.1	1.65	2.21	2.76	3.31
3	距离衰减	$\nu = 2$	0.7 [0]	0 [-0.7]	-0.3 [-0.1]	-0.48 [-1.18]	-0.6 [-1.3]		
		$\nu = 0.5$	2.8 [0]	0 [-2.8]	-1.2 [-4.0]	-1.9 [-4.7]	-2.4 [-5.2]		
4	超折射 $R'_m < 0$	平均值 -22500		0.2	0.88	2.0	3.5		
		极值 -690		1.96	7.85	17.7			
5	负折射	平均值 $R'_m = 4500$		-0.14	-0.59	-1.33	-2.36		
		极值 $R'_m = 248$		-4.98	-19.5				
6	临界折射	$R'_m \rightarrow \infty$		0.147	0.58	1.33	2.35		
7	"V"内	$Z_{\text{max}}$ 平滑		-0.1	-0.2	-0.35	-0.5		
8	不进行地曲和标准大气折射订正			-0.15	-0.59	-1.32	-2.35		

日分析了从地面到 100hPa 由大气折射所造成的测高误差频率分布直方图, 结果发现: 在离雷达站 50km 处的目标物, 65% 左右的测高误差在  $\pm 40m$  之间。但离雷达站 200km 处的目标物, 测高误差明显增加, 达到公里量级的占 20% 以上, 少数情况达数公里。

### 三、分析和结论

把上述几类测高误差统一列入表 4 中, 由表分析可得:

(1) 当大气大致处于标准大气折射条件下, 被测对流云又较强, 即  $\nu = 2$  左右。若

雷达仰角标定准确, 在 50km 以内测定回波高度, 则测高精度较高。因为这时由波束垂直宽度所引起的测高误差正值刚好和距离衰减所导致回波高度减小值抵消了。另外, 这时不进行地球曲率和标准大气折射订正, 误差也很小。这个结论与文献 [1]—[4] 一致。雷达测量零度层亮带高度与探空资料所得零度层高度相吻合, 就证明了这点结论的可靠性。

\* 超、负折射平均值和极值均是利用 1981 年全年南京地区探空资料得到的。

(2) 当大气大致处于标准大气情况下, 被测对流云较强 ( $\nu=2$ ), 在 100km 附近测定回波顶高度, 精度也较高。但由于这时不进行地球曲率和标准大气折射订正在半公里左右的误差, 因此要求进行这项订正。

(3) 在 150、200km 处, 2, 3 类误差差异较大, 订正值是“正”还是“负”要视被测目标物强弱决定。另外, 若这时大气仍处在标准大气折射附近, 则一定要作地球曲率和标准大气折射订正。

(4) 当大气处于临界折射情况下, 若 2、3 类误差仍能相互抵消, 那么不要作地球曲率和标准大气折射项订正。因为这时 6、8 类误差刚好抵消。这个结论与文献 [4] 相同。

(5) 当大气处在超、负折射条件下, 若这两种误差处在平均值附近, 在 100km 以

内误差达到半公里以上。当出现强异常折射时, 这时测高误差很大, 必须认真进行订正。

(6) 由 3 类误差可见, 当对流云较强时, 则  $\nu$  值较大, 测高误差相对说较小, 即保守性较好, 这就告诉我们定义强回波高度时, 标准宜定得高一些, 这个结论与文献 [4] 一致。

(7) 根据表 4, 为了保证雷达测定回波顶高具有一定精度, 建议只在 100km 以内进行测定, 特殊情况也不能超过 200km。

#### 参考文献

- [1] R. J. Donaldson, A demonstration of antenna beam errors in Radar reflectivity, J. Appl. Meteor. 3, 611, (1964).
- [2] J. Aoyagi, preprint val. 16th Radar Meteor. conf. 364, (1974).
- [3] J. Aoyagi, preprint Val. 15th Radar Meteor. conf. 133, 1972.
- [4] 葛润生 雷达测量层云回波顶高的误差讨论, 雷达气象文集, 气象出版社, pp99—105, 1981.

## On several kinds of errors in the measuring of radar echo top heights

Dai Tiepei, Lou Wenzhu

(Nanjing Meteorological College)

### Abstract

It has been shown by studying the radar echo top heights that the abnormal refraction of the atmosphere can cause obvious errors in the radar measurements of height. But echo top height errors are negligible in short range under standard condition of the atmosphere because errors caused by several factors counteract each other, so the radar measurements of convective cloud top heights are quite accurate.