

# 负仰角观测对新一代天气雷达(CINRAD) 探测降水的意义

张 双<sup>1</sup>, 张福贵<sup>1,2</sup>, 杨金红<sup>2,3</sup>

(1. 成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225; 2. 中国气象局大气探测重点开放实验室, 四川 成都 610225; 3. 中国气象局气象探测中心, 北京 100081)

**摘要:**新一代天气雷达观测模式使用观测的仰角都在 $0.5^\circ$ 以上,而在 $0.5^\circ$ 以下是没有仰角的,这样就导致雷达估测降水时反射率因子 $Z$ 值场的取值精度降低和取值范围缩小,致使雷达估测降水的能力降低,而 $Z$ 值场的取值往往以零度层亮带以下的中低层范围为宜。计算并分析正、负仰角下雷达的最低探测高度,得到雷达在 $-0.3^\circ$ 仰角的最低探测高度明显低于 $0^\circ$ 仰角和 $0.5^\circ$ 仰角,表明采用负仰角探测可以有效的降低最小探测高度;读取VCP11和VCP22两种体扫模式下的雷达仰角数据信息,分析在 $0.48^\circ$ 、 $0^\circ$ 以及 $-0.31^\circ$ 仰角下雷达探测降水回波的能力,发现仰角越低探测到的降水回波越多。

**关键词:**天气雷达;负仰角;估测降水

**中图分类号:** TN959.4

**文献标志码:** A

## 0 引言

中国受强风暴天气的影响,每年都要因此造成重大损失,而如何有效的测量大范围降水,提高降水精度成为一个迫切面临的问题。实际估测的区域和降水量不仅对进行洪水检测、发布洪水警报起指导作用,而且是各种水文和大气数值模式用到的最重要的实测原始资料之一。目前地面雨量站测量的雨强和雨量因站网密度过稀而往往缺乏代表性,很难准确算出一定区域上的雨量,天气雷达却能估计雷达扫描范围内格点的雨强、一定区域上的雨量分布和总雨量,并及时取得大面积定量降水信息<sup>[1]</sup>。但与雨量计相比,雷达测量降水的精度较差,因此提高雷达探测降水的精度问题显得尤为重要。新一代天气雷达观测模式中主要测量的是 $0.5^\circ$ 仰角以上的降水,导致雷达在中低层采样分辨率低以及 $0.5^\circ$ 以上探测不到降水回波,使得雷达估测降水能力下降。Bwon等<sup>[2]</sup>改进雷达的观测模式,提出新的观测模式VCP22,为提高雷达低层探测能力做了不少研究。刘应军等<sup>[3]</sup>通过对体扫模式VCP11和VCP21生成产品的差异性进行分析,提出不同云状降水天气过程,两种体扫模式各自的适应性。徐八林等<sup>[4]</sup>通过昆明雷达 $0^\circ$ 仰角探测得到大范围暴雨资料,将其与 $0.5^\circ$ 仰角资料进行对比,发现 $0^\circ$ 仰角能明显的提高雷达测量降水的能力。通过读取负仰角数据资

料,分析采用负仰角扫描后雷达探测降水的能力。

## 1 CINRAD 雷达最低探测高度分析

### 1.1 正仰角下的雷达最低探测高度公式

雷达定量估测降水中,在选用雷达探测仰角为 $0^\circ$ 以上时,探测高度受距离、天线仰角、地球曲率以及天线海拔高度等的影响。雷达的测高公式(张昌培等):

$$H = h + R \sin \theta + \frac{R^2}{2Re}$$

式中: $H$ 为最低探测高度(单位:m), $h$ 为雷达天线距地高度, $R$ 为探测距离, $Re$ 为等效地球半径(常取8450 km), $\theta$ 为探测仰角。

### 1.2 负仰角下的雷达最低探测高度公式

CINRAD 雷达对低层降水回波的探测能力,主要是由雷达技术性能和有效探测高度决定的。因此,张扬成等推导了负仰角探测时的雷达测高公式(图1):

$$H = h - R \sin \theta + \frac{R^2 \cos \theta}{2Re}$$

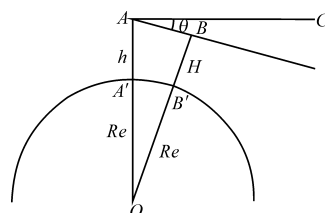


图1 负仰角探测示意图

由余弦定理可得：

$$OB^2=AO^2+AB^2-2AB \cdot AO\cos(90-\theta)$$
$$H=\sqrt{(h+Re)^2+R^2+R^2-2(h+R_e)R\cos(90-\theta)}-Re \quad (1)$$

假设  $X=\left(\frac{h}{Re}\right)^2+\frac{2h}{Re}+\frac{R^2}{Re^2}-\frac{2hR\sin\theta}{Re^2}-\frac{2R\sin\theta}{Re}$ ，因等效地球半径  $Re$  远大于  $h$  和  $R$ ，故  $X$  的值接近 0。于是可令  $H=Re(\sqrt{1+X}-1)$

将 $\sqrt{1+X}$ 按麦克劳林公式展开为

$$\sqrt{1+X}=1+\frac{x}{2}+\frac{x^2}{8}+\frac{3x^3}{48}+\cdots$$

因  $X$  约等于 0，上式近似计算为 $\sqrt{1+X}=1+\frac{x}{2}+\frac{x^2}{8}$ ，将其代入(1)式近似求得测高公式：

$$H=h-R\sin\theta+\frac{R^2\cos\theta}{2Re}$$

令  $R=x$   
设  $g(x)=(h+Re)^2+x^2+x^2-2(h+Re)xcos(90-\theta) \quad (2)$

$$g'(x)=2x-2(h+Re)\sin\theta$$

当  $g'(x)>0$ ，得  $x>(h+Re)\sin\theta \quad (3)$

将  $x=(h+Re)\cos\theta-Re$  代入(2)式得到

$$g(x)_{\min}=(h+Re)^2\cos^2\theta$$

即  $H_{\min}=(h+Re)\cos\theta-Re$

要求  $H$  恒大于 0，则  $H_{\min}>0$ ，得  $\cos\theta>1/(\frac{h}{Re}+1)$

由此可以得出负仰角的角度不仅受雷达站地形的影响，也受天线海拔高度的限制，故在实验业务应用工作中应根据实际地形和天线海拔高度选取适当的低仰角进行探测。同时可以得出，采用负仰角探测时，探测高度是随着探测距离的增大，先减小后增大。

1.3 雷达不同距离最低探测高度情况

CINRAD/SA 雷达在 VCP21 和 VCP22 两种模式下，不同仰角的最低探测高度情况如表 1 所示。

表 1 探测高度 H/m

| 仰角 θ  | 探测距离 R/km |      |      |      |       |      |      |       |      |      |      |      |       |       |
|-------|-----------|------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|------|------|-------|-------|
|       | 10        | 30   | 40   | 50   | 80    | 90   | 100  | 130   | 150  | 180  | 200  | 230  | 300   | 400   |
| 1.5°  | 268       | 838  | 1142 | 1455 | 2473  | 2835 | 3209 | 4403  | 5258 | 6629 | 7602 | 9151 | 13179 | 19938 |
| 0.5°  | 93        | 315  | 444  | 584  | 1077  | 1265 | 1464 | 2134  | 2640 | 3089 | 3488 | 5137 | 7943  | 12958 |
| 0°    | 5.9       | 52.7 | 94.7 | 146  | 375   | 474  | 586  | 1078  | 1318 | 1917 | 2367 | 3130 | 5325  | 9467  |
| -0.3° | -46.4     | -104 | -115 | -115 | -43.9 | 3.32 | 62.2 | 319.3 | 533  | 956  | 1296 | 1895 | 3755  | 7372  |

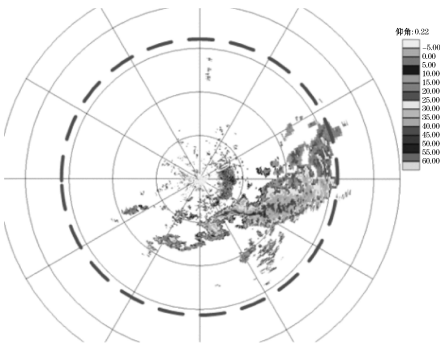
根据表 1，当  $\theta=-0.3^\circ$ ， $R<180$  km 时，由于地球曲率和波束形状的影响，最低探测高度没有超过 1000 m，所以可以探测到低层的降水回波。而当  $R>300$  km，最低探测高度迅速增加，到 400 km 探测距离时已经达到 7372 m。当  $\theta=0.5^\circ$ ， $R=230$  km 时最低探测高度达到 5137 m，接近  $\theta=0^\circ$ ， $R=295$  km 时的最低探测高度 5149 m，以及  $\theta=-0.3^\circ$ ， $R=345$  km 时的最低探测高度 5236 m。故雷达在  $-0.3^\circ$  仰角的探测能力强于  $0^\circ$  仰角和  $0.5^\circ$  仰角，表明采用负仰角探测可以有效的降低最小探测高度，提高雷达的探测能力。

2 负仰角探测能力分析

2.1 降水回波信息对比分析

图 1 是 2011 年 4 月 17 日 03:06 降水时雷达探测到的基本反射率，雷达图内一圈是 100 km。比较  $-0.22^\circ$  仰角(图 1 a)， $0^\circ$  仰角(图 1 b)和  $0.44^\circ$  仰角(图 1 c)可以看到，当探测距离  $>200$  km， $0.44^\circ$  仰角只能探测微弱且少量的降水回波，远距离探测能力低。探测距离达到 300 km， $0.44^\circ$  仰角已经完成探测不到降

水回波，此时的  $0^\circ$  仰角探测到较小的降水回波，而  $-0.22^\circ$  仰角探测到较强降水回波且回波连续性较好。因此，增加低层仰角数，对探测远距离降水回波强度有重要意义，但在近距离处探测到的回波强度相差不大。探测距离  $<100$  km，图 1 (a) 中负仰角探测到了海浪回波(A 标记处)。主要是因为探测距离较近，负仰角的最低探测高度就比较小，距离近地面较近，容易受到海浪回波的影响。表 2 为  $-0.22^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $0.44^\circ$  仰角 PPI 回波总量和不同强度回波的分布情况，表中数据为不同强度回波占雷达扫描面积的百分比。从表 1 可以看出，探测的仰角越低，探测到的回波越多。



(a)  $-0.22^\circ$  仰角反射率图

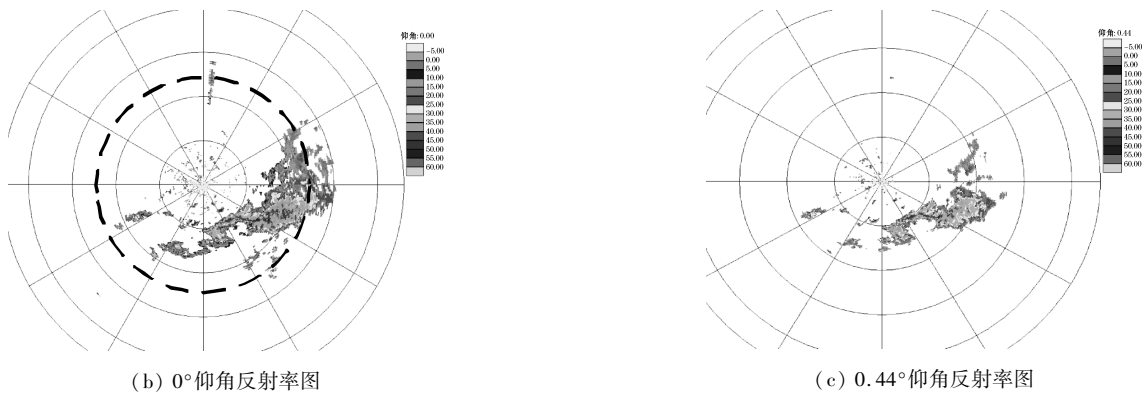


图 1 VCP22 模式下-0.22°、0°、0.44°仰角的基本反射率图

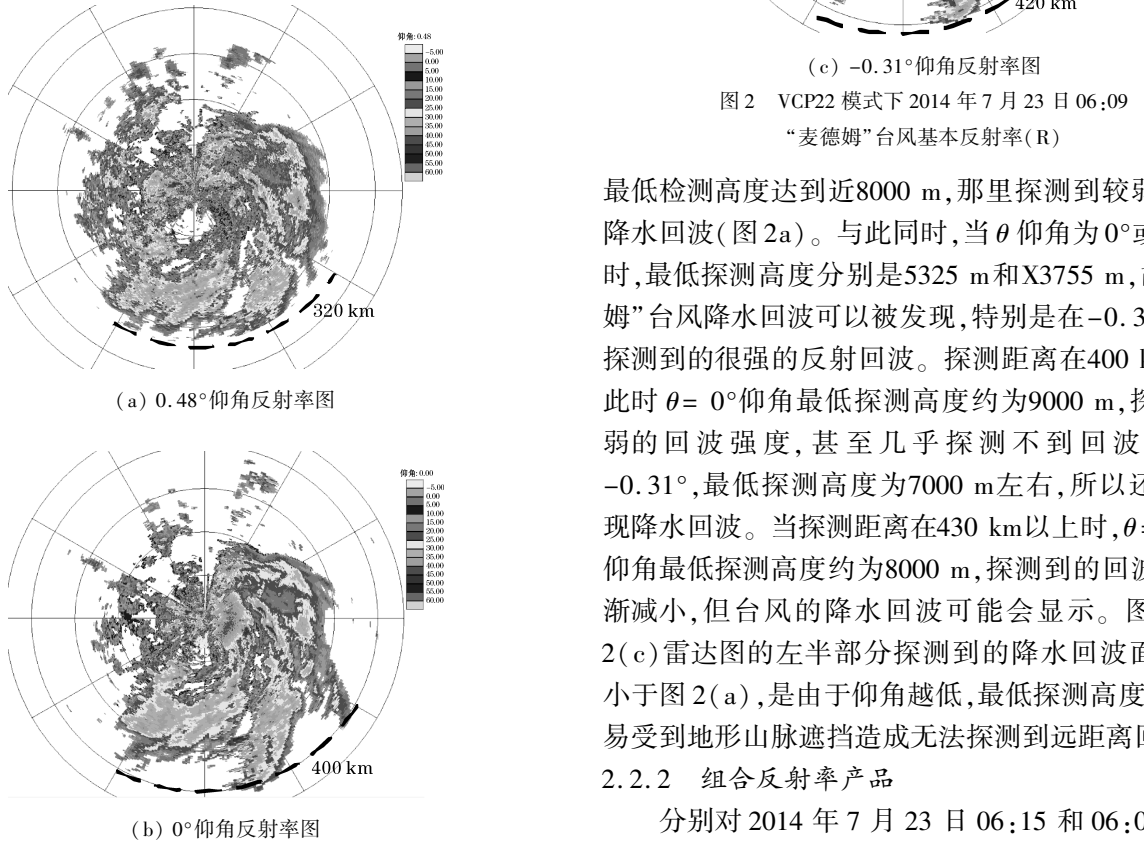
表 2 2011 年 4 月 17 日 03:06 不同强度回波百分比情况

| 仰角/°   | 回波分布/% |            |             |            |             |             |             |
|--------|--------|------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|
|        | <0 dBz | 0 ~ 10 dBz | 10 ~ 20 dBz | 20 ~ 30dBz | 30 ~ 40 dBz | 40 ~ 50 dBz | 50 ~ 60 dBz |
| -0.22° | 0.91   | 2.90       | 3.28        | 2.21       | 1.60        | 0.58        | 0.02        |
| 0°     | 0.52   | 1.43       | 2.91        | 1.71       | 1.22        | 0.46        | 0.02        |
| 0.44°  | 0.38   | 0.41       | 1.26        | 1.17       | 0.94        | 0.20        | 0           |

2.2 不同雷达产品对台风的分析

2.2.1 反射率产品

采用 CINRAD/SA 雷达对 2014 年 7 月 23 日 06:09 “麦德姆”台风进行观测,图 2 为“麦德姆”台风在 VCP22 模式下,仰角分别为 0.48°、0°以及-0.31°雷达探测到基本反射率图。从图 2 看,随着仰角的减小,反射率的回波强度明显增强。当  $\theta=0.48^\circ$  和  $R=300\text{ km}$ ,



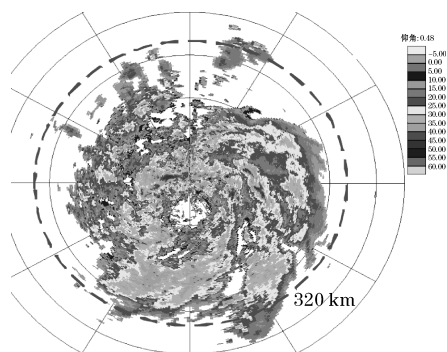
最低检测高度达到近8000 m,那里探测到较弱的台风降水回波(图 2a)。与此同时,当  $\theta$  仰角为 0°或-0.31°时,最低探测高度分别是5325 m和X3755 m,故“麦德姆”台风降水回波可以被发现,特别是在-0.31°仰角,探测到的很强的反射回波。探测距离在400 km以上,此时  $\theta=0^\circ$  仰角最低探测高度约为9000 m,探测到较弱的回波强度,甚至几乎探测不到回波;而  $\theta=-0.31^\circ$ ,最低探测高度为7000 m左右,所以还可以发现降水回波。当探测距离在430 km以上时, $\theta=-0.31^\circ$  仰角最低探测高度约为8000 m,探测到的回波强度逐渐减小,但台风的降水回波可能会显示。图 2(b)、2(c)雷达图的左半部分探测到的降水回波面积明显小于图 2(a),是由于仰角越低,最低探测高度越小,容易受到地形山脉遮挡造成无法探测到远距离回波。

2.2.2 组合反射率产品

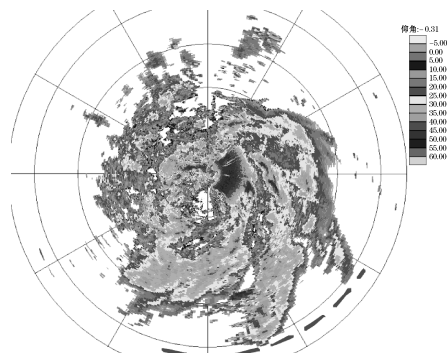
分别对 2014 年 7 月 23 日 06:15 和 06:03 的“麦



德姆”台风进行观测,发现台风回波在 VCP21 和 VCP22 模式下有明显的不同(图3)。VCP21 模式下,在回波高度的作用下,可以有效地观察到在320 km之内的台风中心降水回波(最低探测高度近8000 m),在近400 km处还可以发现较弱的远距离降水回波。当  $R=420$  km时,最低探测高度达到近14000 m,因此雷达探测不到台风中心附近的降水回波。此模式下的雷达无法有效监控“麦德姆”台风,但可以大致探测到台风中心在西南方向200 km处。VCP22 模式下,该雷达能够探测到近460 km的降水回波,可以有效地观察420 km的台风中心降水回波,尤其是在400 km内。



(a) 06:15 VCP21 模式下  $-0.48^\circ$



(b) 06:03 VCP22 模式下  $-0.31^\circ$

图3 VCP21 和 VCP22 模式下组合反射率

### 3 CINRAD 雷达使用负仰角模式的限制

不同海拔高度下,雷达应采取不同的负仰角模式,负仰角模式能有效地降低雷达探测高度。随着探测距离的增加,其探测高度先减小后增大,为了防止雷达电磁波被地形遮挡,CINRAD 雷达采用负仰角模式时,应根据其天线高度和周围地形采取适当的负仰角进行观测。

可以人为地对近地面杂波进行判断,并将其消除。VCP22 模式下可以明显发现区域 A(图1a)存在的异常反射回波。这是因为,在 VCP22 模式下雷达波束在

负仰角进行扫描时,离地面距离较近,容易受海浪和雾的干扰。因此,区域 A 中的异常回声是由海浪和雾造成的。而山脉也会造成异常的回波。由于大多数山脉的海拔高度在3700 m以下,而在 VCP22 模式下,  $-0.3^\circ$  仰角在探测距离  $R<300$  km时,最低探测高度不高于4000 m,因此可能会造成异常强烈地杂波,容易影响对天气情况的判断,所以需要人为地判断和消除地杂波。

### 4 结束语

现有的观测模式主要是对  $0.5^\circ$  仰角以上进行探测,而在  $0.5^\circ$  仰角以下则没有设置仰角进行探测,这样会使得对于台风等强对流天气回波的显示不够详尽,特别是在低层结构。因此,增加了  $0^\circ$  仰角和负仰角进行观测,通过雷达的最低探测高度公式,计算了不同仰角下的最低探测高度。在 VCP21 和 VCP22 两种模式下,分析基本反射率产品和组合反射率产品,得到如下结论:

(1) 仰角越低,探测的远距离回波越多,探测能力明显增强。由于地物曲率的影响,随着仰角的降低,最低探测高度也在减小,造成低仰角下的探测容易受到海浪回波和雾的影响,业务应用时需要注意。

(2) 探测距离超过300 km,  $0.5^\circ$  仰角的最低探测高度达到近8000 m,几乎不可能再探测到降水回波。而  $0^\circ$  仰角和负仰角则仍可以探测到远距离降水回波,尤其是负仰角的远距离探测能力最强,可以有效地观测台风降水回波,这样对于提早发现强对流天气特征有重要意义。

(3) CINRAD 雷达采用负仰角探测时,负仰角角度大小不仅与雷达站地形有关,还与其天线海拔高度有关。因为地球曲率的影响,负仰角探测高度随探测距离的增大先减小后增大,为了防止最低探测高度过低导致受地形、地物遮挡,需要考虑天线海拔高度及雷达站地形。同时要正确地判断天气情况,还需要人工判断并消除地杂波在实际应用中的影响。

### 参考文献:

- [1] Rodger A Brown, Janelle M Janish, Vincent T. Wood. Impact of WSR-88D strategies on severe storm algorithms[J]. Wea. Forecasting, 2001, 15 (2): 90-102.
- [2] Brown RA, Janish JM, Wood VT. Impact of WSR-88D scanning strategies on severe storm algorithms. Weather Forecasting[J]. 2000, 15: 90 - 102.

- [3] Vincent T Wood, Rodger A Brown, Steven V Vasiloff. Improved detection using negative angles for mountaintop WSR-88Ds: simulation of the three radars covering Utah [J]. Wea. Forecasting, 2003, 18(6): 393-403.
- [4] 刘应军, 顾松山, 周雨华, 等. 新一代天气雷达体扫模式对比分析[J]. 气象, 2005, (1).
- [5] 徐八林, 刘黎平, 徐文君, 等. 利用低仰角扫描改进高山雷达低层回波探测能力 [J]. 气象, 2008, 34(9): 28-33.
- [6] 徐八林, 刘黎平, 王改利. 超低仰角扫描改进高山雷达降水估测[J]. 高原气象, 2011, 30(5): 1337-1345.
- [7] 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006: 22-31.
- [8] 张扬成, 游文华, 高翔宇, 等. 新一代天气雷达负仰角探测能力分析[J]. 气象科技, 2013, 41(2).
- [9] 杨金红, 陈大任, 王署东, 等. 改进新一代天气雷达低层探测能力研究探 [J]. 气象, 2013, 39(4): 494-499.
- [10] 陈森. 多普勒天气雷达不同仰角数据定量估测降水对比分析 [J]. 广东水利水电, 2011, 2(2): 28-40.
- [11] 张林, 杨洪平, 邓鑫, 等. 基于模板匹配法的长乐雷达强超折射回波识别[J]. 气象, 2014, (3).
- [12] 周志文, 王艳兰, 李耀先. 雷达降水估测优化及其在暴雨预警中的应用[J]. 气象科技, 2009, 37(4): 407-411.
- [13] 刘昉, 丁明星, 张俊. 天气雷达低仰角杂波干扰区域性能分析[J]. 电子科学与技术, 2016, (2).
- [14] 程明虎, 刘黎平. 暴雨系统的多普勒雷达反演理论和方法[M]. 北京: 气象出版社, 2004.
- [15] 王红艳, 刘黎平. 新一代天气雷达降水估算的区域覆盖能力评估[J]. 电高原气象, 2015, (12).
- [16] 戴铁丕, 傅德胜. 天气雷达-雨量计网联合探测区域降水量的精度 [J]. 南京气象学院学报, 1990, 13(4): 592-597.

## The Significance of Negative Elevation Observation to the Precipitation of the New Generation Weather Radar

ZHANG Shuang<sup>1</sup>, ZHANG Fu-gui<sup>1,2</sup>, YANG Jin-hong<sup>2,3</sup>

(1. College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. The Key Laboratory of China Meteorological Administration, Chengdu 610225, China; 3. China Meteorological Administration Meteorological Observation Center, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The most elevations of new generation of weather radar observation mode are above  $0.5^\circ$ , and there is no elevation under  $0.5^\circ$ , thus causing loss of accuracy and reducing values range of radar reflectivity factor  $Z$  during radar rainfall estimation, decreasing the ability of the radar to estimate precipitation. But the value of  $Z$  field is often with zero layer bright band in the middle and lower range is appropriate. This paper calculates and analyses the positive and negative elevation radar detection minimum height, The lowest detection altitude of radar in  $-0.3^\circ$  elevation was significantly lower than that of  $0^\circ$  elevation and  $0.5^\circ$  elevation, indicating that the negative elevation detection can effectively reduce the height of the minimum detection; Read the radar elevation data information in the VCP11 and VCP22 scanning mode, the analysis of radar detection of precipitation echoes at  $0.48^\circ$ ,  $0^\circ$  and  $-0.31^\circ$  elevation, found that the lower the elevation, the more precipitation echo.

**Key words:** weather radar; negative elevation angle; precipitation estimation