

杨金红,陈大任,王曙东. 2013. 改进新一代天气雷达低层探测能力研究. 气象,39(4):494-499.

# 改进新一代天气雷达低层探测能力研究<sup>\*1</sup>

杨金红 陈大任 王曙东

中国气象局气象探测中心,北京 100081

**提 要:** 为进一步改进新一代天气雷达低层探测性能和提高风暴顶高的准确性,利用 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)地理信息数据,研究和设计新一代天气雷达的体扫模式,主要是增加中低层仰角数和负仰角,以提高我国新一代天气雷达的低层探测能力。选取福州、龙岩两部雷达为例来计算降水模式的仰角,得出两部雷达新的观测模式 VCP12。通过观测试验表明,增加低仰角或负仰角后,能够提高雷达的低层探测性能。

**关键词:** SRTM 地理信息数据,新一代天气雷达,体扫模式,低仰角或负仰角

**中图分类号:** P415      **文献标识码:** A      **doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2013.04.012

## Research on Improving CINRAD Detection Ability in Lower Layers

YANG Jinhong CHEN Daren WANG Shudong

China Meteorological Administration Meteorological Observation Centre, Beijing 100081

**Abstract:** In order to improve China New Generation Weather Radar (CINRAD) low-level detection performance and accuracy of the wind storm top height, this paper studies and designs a volume coverage pattern (VCP) for CINRAD using SRTM geographic information data. It aims to improve CINRAD detection ability in lower layers by adding the number of elevation angles in lower and middle layers as well as negative elevation angles. We took Fuzhou and Longyan radar as examples to compute elevation angles for precipitation mode, and derived their new observation mode VCP12. Observation experiment results show that radar detection ability in the lower atmosphere can be improved after low or negative elevation angles are added.

**Key words:** SRTM (shuttle radar topography mission) geographic information data, CINRAD, volume coverage pattern (VCP), low or negative elevation angles

### 引 言

我国新一代天气雷达的体扫模式存在的主要问题有:一是雷达采用机械转动完成固定扫描(在 5 min 内完成 14 个不同仰角的扫描或 6 min 内完成 9 个不同仰角的扫描);二是仰角特别是在中低层分布比较稀疏,使得雷达在垂直方向上采样精度不高,有时会造成回波顶 3 km 的误差(Brown et al, 2000a);三是高仰角区各仰角波束之间存在间隙区,这些间隙区内没有雷达探测数据;四是对于高山雷达,利用最低 0.5°仰角有时探测不到低层回波,这

时应该使用负仰角来改善雷达的探测能力。为了解决目前业务中使用的体积扫描模式存在的问题,改进新一代天气雷达对风暴的探测能力,特别是低层探测能力,国内外对此做了一些研究。Brown 等(2000a;2000b)针对强风暴特征,研究了对观测模式 VCP11 和 VCP21 进行改进的方法。Brown 等(2002;2007)、Wood 等(2003)研究了使用负仰角来改善高山雷达的探测能力,同时指出使用负仰角在定量估测降水时能提高约 8%~15%。国内的刘应军等(2006)也对 VCP11 和 VCP21 的差异导致其生成的产品的不同进行了比较分析,提出了不同云状降水天气过程中,两种体扫模式各自的适应性;徐八

<sup>\*</sup> 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206038)资助  
2012 年 1 月 17 日收稿; 2012 年 7 月 24 日收修定稿  
第一作者: 杨金红,主要从事天气雷达探测方法研究. Email: yangjh0407@163.com

林等(2008)利用  $0^{\circ}$ 、 $-0.5^{\circ}$  仰角资料与雷达目前采用最低仰角为  $0.5^{\circ}$  扫描方式的回波分布情况进行了对比分析,但是未对如何选取雷达最佳探测低仰角提出有效方法;张沛源等(2008)从理论上计算并讨论了使用零仰角和负仰角存在的问题;陈大任等(2010)利用目前新一代天气雷达有限仰角层数据实现了自动组合“RHI”扫描模式的功能,直观地提供了云雨回波垂直结构的详细信息。本文根据福州、龙岩两部雷达周围地形数据,绘制不同低仰角的遮挡图,选出两部雷达的最佳探测低仰角,然后从最低仰角开始,计算其他的探测仰角,并利用 2011 年初春得到的观测资料分析了改变观测模式后两部雷达的低层探测能力。

1 仰角计算方法

首先指定一“真实”的风暴高度  $z_t$  (以一般强风暴能达到的高度为准),接着指定回波顶高度误差百分比  $\Delta H\%$ ,最后分别指定一个最低仰角  $\phi_1$  和一个最高仰角  $\phi_n$ ,这些指标确定后,从最低仰角  $\phi_1$  射线与  $z_t$  的交点 A 出发,沿着此仰角  $\phi_1$  的波束中心向斜距减小的方向前进,同时计算高度估计误差  $\Delta Z = z_t - h$  ( $h$  是给定探测距离处此仰角的探测高度),当  $\Delta Z = \Delta H\% \times z_t$  时,返回到  $z_t$  高度,计算此时的  $z_t$  和斜距对应的仰角  $\phi_x$  (如图 1 所示),如果这个仰角与前一个仰角的差小于波束宽度的一半,那么在此  $z_t$  值处沿着水平距离减小的方向前进,直到计算出的新仰角与前一个仰角的差等于波束宽度的一半,则这个新仰角就是所求的仰角值,循环往复继续计算下去就会得出一组仰角数。如图 1 所示。计算仰角的公式 (Brown et al, 2000b) 如下:

$$\phi = \sin^{-1} \left( \frac{z_t}{r_s} - \frac{r_s}{2r_e} \right)$$

式中,  $r_e$  为等效地球半径,  $r_s$  为斜距,  $\phi$  为仰角。

在该方法中,低仰角的选择至关重要,因为不同雷达所处的地理位置不同,由于周围山脉、高层建筑物等的阻挡,其最佳探测低仰角是不同的。

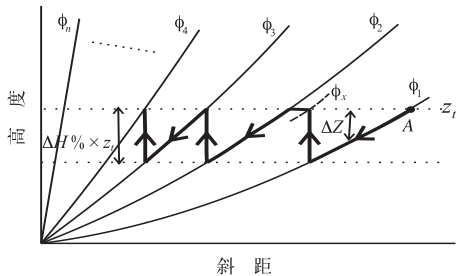


图 1 仰角的计算方法示意图  
Fig. 1 Calculation method of elevation

2 体扫模式计算结果

2.1 最低仰角

最低仰角的确定是基于 SRTM 地理信息数据,利用单站雷达周围地形数据、雷达站点信息,计算从  $0.5^{\circ} \sim -1^{\circ}$  (按步长  $0.1^{\circ}$  递减) 各仰角的雷达覆盖范围。在综合考虑波束遮挡和电磁波不会对密集区人口产生影响的情况下,找出一个最佳探测低仰角值,然后再根据前面的仰角计算方法计算其余仰角。最终选取  $-0.5^{\circ}$  和  $0^{\circ}$  分别作为福州和龙岩两部雷达最低仰角值。两部雷达的最低仰角与原先  $0.5^{\circ}$  仰角覆盖情况对比如图 2 所示。从图 2 可以看出,福州雷达在  $-0.5^{\circ}$  仰角下尽管西北部有较大的遮挡,但对东部海面台风的低层探测范围明显扩大。龙岩雷达  $0^{\circ}$  仰角在西北部与东部也有小部分遮挡,但扩大了对低层的探测范围。

2.2 仰角计算结果

冰雹云回波顶高度一般都在 10 km 以上,强的

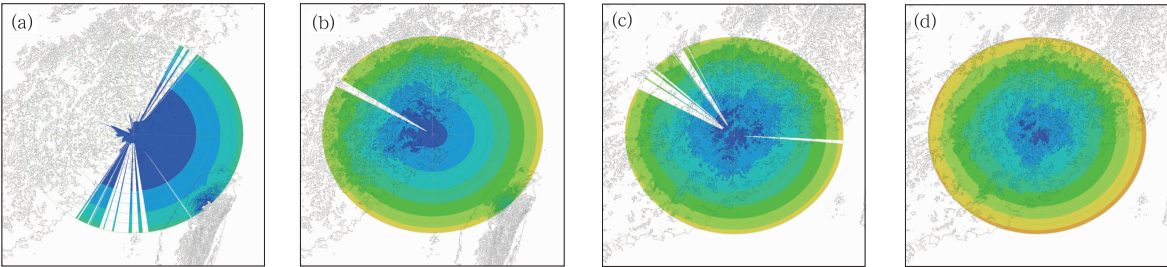


图 2 两部雷达的遮挡图  
福州雷达  $-0.5^{\circ}$  (a) 与  $0.5^{\circ}$  (b) 仰角; 龙岩雷达  $0^{\circ}$  (c) 与  $0.5^{\circ}$  (d) 仰角  
Fig. 2 Overlay diagrams of the lowest elevation angle of the two radars  
Fuzhou radar at  $-0.5^{\circ}$  (a) and  $0.5^{\circ}$  (b) and Longyan radar at  $0^{\circ}$  (c) and  $0.5^{\circ}$  (d)

对流回波高度可达 15 km 以上,而台风中强的对流云垂直伸展一般穿过对流层顶,约 15~20 km(易笑园等,2009;周非非等,2010;李德俊等,2011)。所以两部雷达回波“真实”高度都取 14 km,误差百分比取 13%,最高仰角不超过 19°,两部雷达的计算结果如表 1 所示。将计算出的一组仰角定义为 VCP12, VCP11 是现有雷达使用的模式。对 VCP12 体扫模式,小于 2°的仰角采用分离扫描方式 CS/CD(连续监测模式/连续多普勒模式),大于 2°而小于 7°的中

间仰角采用交替扫描方式 B,上面的仰角采用不考虑距离折叠的连续多普勒方式 CDX。

可以看出,每部雷达计算出来的仰角数都比现有的体扫模式 VCP11 要多,且中低层观测仰角相对来说要密(如图 3),这样可提高雷达在垂直方向上的分辨率。相应地,雷达在完成这些仰角的全部扫描所需时间要增加。为了节省时间,建议采用一种自适应扫描方法,即当雷达波束扫描到高层时,如果没有回波可停止其扫描,返回到低层仰角再开始新

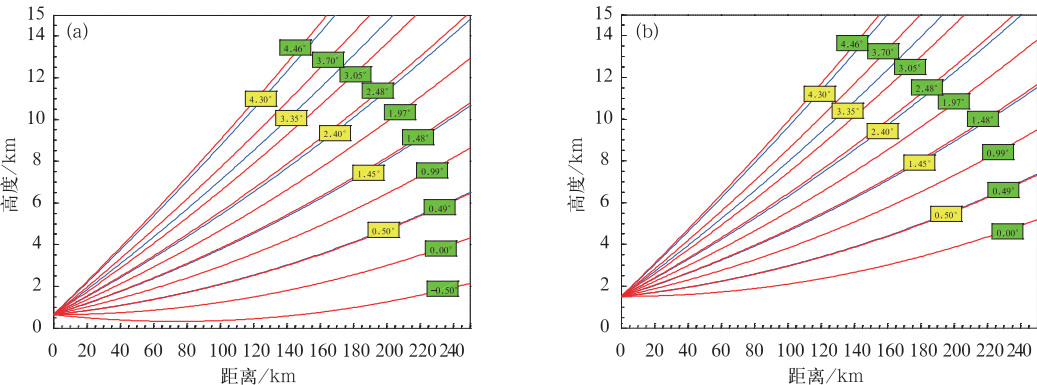


图 3 两部雷达改进的观测模式与现有的观测模式扫描射线图(仅画了 5°以下的)  
(a)福州雷达改进的观测模式 VCP12 与现有的 VCP11,(b)龙岩雷达改进的观测模式 VCP12 与现有的 VCP11  
(黄色的仰角代表现有的,绿色的仰角代表改进的。福州雷达天线海拔高度 642 m,  
龙岩雷达天线的海拔高度是 1505.8 m)  
Fig. 3 Scanning ray diagrams of improved VCP and using VCP of the two radars (only for less than 5°)  
(a) Fuzhou radar, altitude 642 m, (b) Longyan radar, altitude 1505.8 m

表 1 两部雷达改进的体扫模式与现有体扫模式对照表  
Table 1 Improved VCP (VCP12) and using VCP (VCP11) of the two radars

| 福州    |       |       |       | 龙岩    |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| VCP12 |       | VCP11 |       | VCP12 |       | VCP11 |       |
| 仰角    | 扫描方式  | 仰角    | 扫描方式  | 仰角    | 扫描方式  | 仰角    | 扫描方式  |
| −0.50 | CS/CD | 0.50  | CS/CD | 0.00  | CS/CD | 0.50  | CS/CD |
| 0.00  | CS/CD | 1.45  | CS/CD | 0.49  | CS/CD | 1.45  | CS/CD |
| 0.49  | CS/CD | 2.40  | B     | 0.99  | CS/CD | 2.40  | B     |
| 0.99  | CS/CD | 3.35  | B     | 1.48  | CS/CD | 3.35  | B     |
| 1.48  | CS/CD | 4.30  | B     | 1.97  | CS/CD | 4.30  | B     |
| 1.97  | CS/CD | 5.25  | B     | 2.48  | B     | 5.25  | B     |
| 2.48  | B     | 6.20  | B     | 3.05  | B     | 6.20  | B     |
| 3.05  | B     | 7.50  | CDX   | 3.70  | B     | 7.50  | CDX   |
| 3.70  | B     | 8.70  | CDX   | 4.46  | B     | 8.70  | CDX   |
| 4.46  | B     | 10.00 | CDX   | 5.35  | B     | 10.00 | CDX   |
| 5.35  | B     | 12.00 | CDX   | 6.41  | B     | 12.00 | CDX   |
| 6.41  | B     | 14.00 | CDX   | 7.63  | CDX   | 14.00 | CDX   |
| 7.63  | CDX   | 16.70 | CDX   | 9.08  | CDX   | 16.70 | CDX   |
| 9.08  | CDX   | 19.50 | CDX   | 10.79 | CDX   | 19.50 | CDX   |
| 10.79 | CDX   |       |       | 12.75 | CDX   |       |       |
| 12.75 | CDX   |       |       | 15.21 | CDX   |       |       |
| 15.21 | CDX   |       |       | 18.34 | CDX   |       |       |
| 18.34 | CDX   |       |       |       |       |       |       |

的体扫。

3 改进的体扫模式对风暴顶高的影响

雷达对风暴顶高的估算是使用接近回波顶下方的仰角来计算其高度,这样会导致雷达风暴顶高的

高度值偏低。当观测仰角加密后,就会提高风暴顶高估算的准确性。对该两部雷达,假设在离雷达一定距离处,有一块固定高度的风暴回波向雷达方向移动,则新的体扫模式和现使用的 VCP11 模式对该风暴顶高的估算值有何影响,下面分别给予计算。

设有两块回波,顶高的真实值分别为 8 和

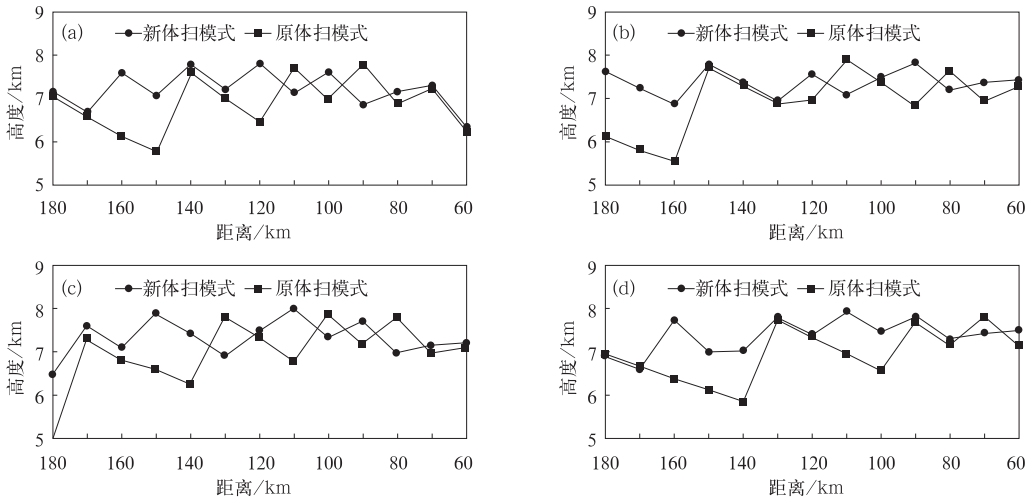


图 4 两部雷达对风暴顶高的估算值随距离变化曲线

(a) 福州:8 km, (b) 福州:6 km, (c) 龙岩:8 km, (d) 龙岩:6 km

Fig. 4 Variations of storm top height (STH) with distance from radar evaluated by two VCPs.

Suppose that  $STH=8\text{ km}$  at Fuzhou (a) and Longyan (c), and  $STH=6\text{ km}$  at Fuzhou (b) and Longyan (d)

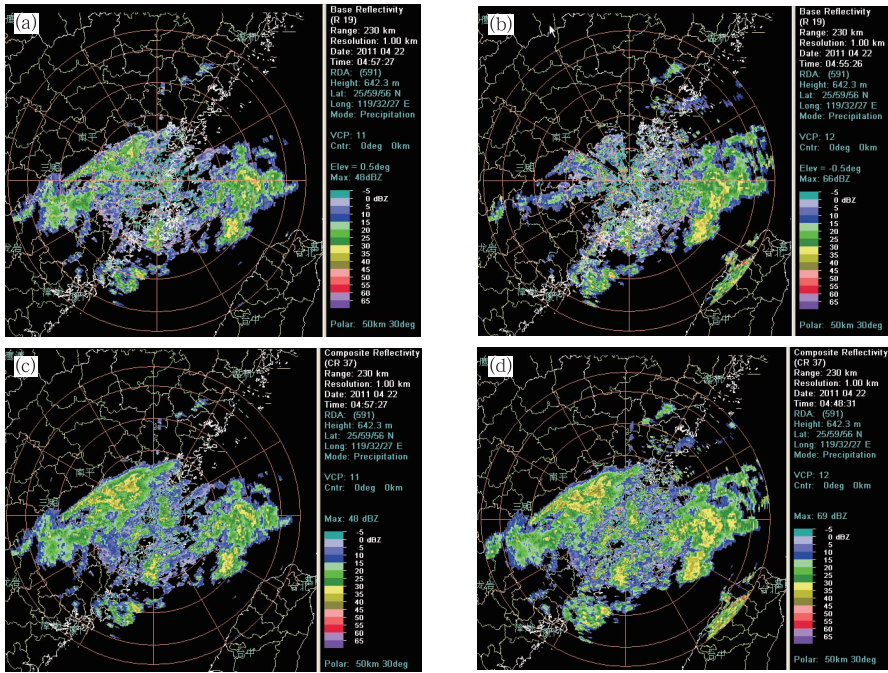


图 5 2011 年 4 月 22 日福州雷达使用两种模式探测到的反射率对比图

(a, c) VCP11 模式, (b, d) VCP12 模式, (a, b) 基本反射率, (c, d) 组合反射率

Fig. 5 Comparative diagrams of basic (a, b) and composite (c, d) reflectivities using two VCPs

by Fuzhou radar on 22 April 2011

(a, c) VCP11, (b, d) VCP12

6 km,距雷达 180 km,沿着向雷达方向移动,分别计算它们在 180~60 km 处的顶高估算值,结果如图 4 所示。从表图中可以看出,两部雷达使用新的体扫降水模式在较远处(180~130 km 处)对风暴顶高的估算值要比现用的 VCP11 模式估算得准确,在近处两者估算值差不多。

4 试验结果

对 2.2 节计算的两部雷达仰角结果,分别在 2011 年 4 月 22 日和 4 月 29 日两次天气过程做了

对比实验。如图 5~8 所示。可以看出,雷达使用 VCP12 模式后,回波范围明显增大,强度有所增强。福州雷达基本反射率因子图上,VCP11 模式探测的最大反射率因子为 48 dBz,VCP12 模式探测的最大反射率因子为 66 dBz;组合反射率因子图上,VCP11 模式探测的最大组合反射率因子是 48 dBz,VCP12 模式探测的最大组合反射率因子为 69 dBz。龙岩雷达基本反射率因子图上,VCP11 模式探测的最大反射率因子是 50 dBz,VCP12 模式探测的最大反射率因子为 54 dBz;组合反射率因子图上,VCP11 模式探测的最大组合反射率因子是 53 dBz,

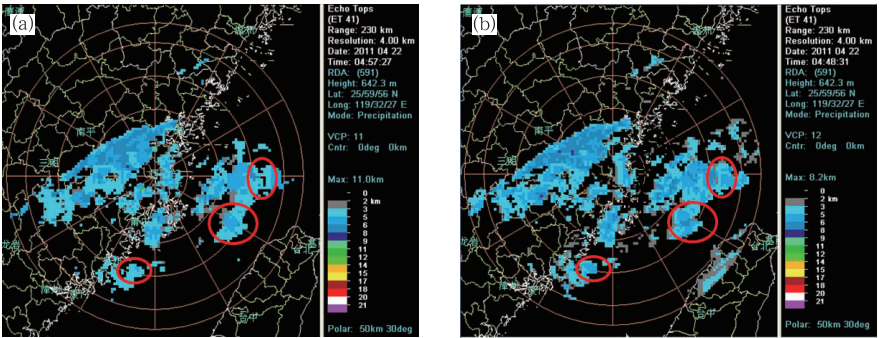


图 6 2011 年 4 月 22 日福州雷达使用两种模式探测到的风暴顶高对比图  
(a) VCP11 模式, (b) VCP12 模式

Fig. 6 Comparative diagrams of storm top height values using two VCPs by Fuzhou radar on 22 April 2011  
(a) VCP11, (b) VCP12

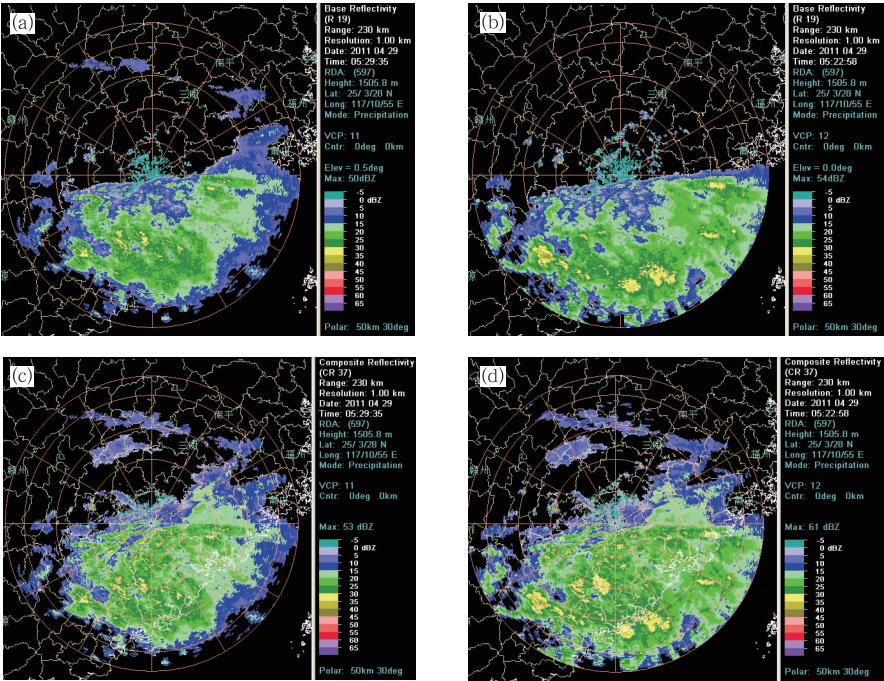


图 7 2011 年 4 月 29 日龙岩雷达使用两种模式探测到的反射率对比图  
(a,c) VCP11 模式, (b,d) VCP12 模式, (a,b) 基本反射率, (c,d) 组合反射率

Fig. 7 As in Fig. 5, but for Longyan radar on 29 April 2011

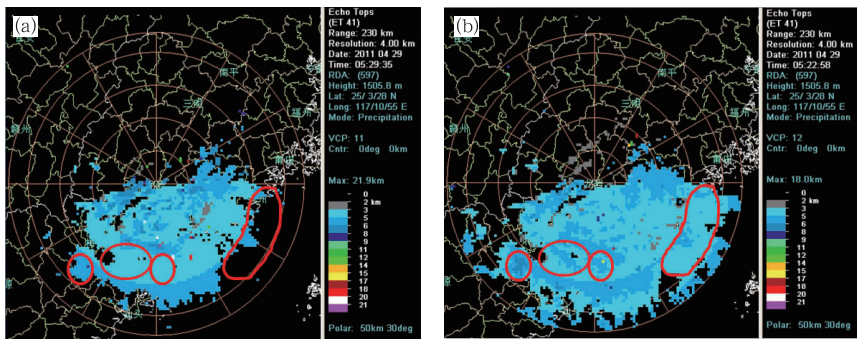


图 8 2011 年 4 月 29 日龙岩雷达使用两种模式探测到的风暴顶高对比图  
(a) VCP11 模式, (b) VCP12 模式

Fig. 8 As in Fig. 6, but for Longyan radar on 29 April 2011

VCP12 模式探测的最大组合反射率因子为 61 dBz。这表明使用 VCP12 模式后,能够提高雷达对中远距离回波的探测能力。

从两部雷达探测到的风暴顶高来看(图 6 和图 8),在近距离处(约 100 km 以内),使用两种体扫模式估算的值差不多,而在较远处(约 100 km 以上),VCP12 模式估算的值有些区域要大于 VCP11 模式估算的值,接近真值,如图 6 和图 8 中圆圈表示的区域。这与第 4 节讨论的改变模式后对风暴顶高估算影响分析结果基本相当。

5 结 语

研究分析现有多普勒天气雷达体扫模式存在的问题后,通过计算得到了福州和龙岩两部雷达的降水模式 VCP12,并做了对比试验,通过试验分析,得出以下结论:

(1)使用改进后的 VCP12 模式后,雷达低层回波范围明显增大,强度有所增强,可提高雷达对低层回波的探测能力。这对台风低层回波结构的探测具有一定的意义。

(2)改进的降水模式 VCP12 能够减小风暴顶高的探测误差。

存在的问题:仰角数比现有雷达使用的体扫模式要多,相应地扫描时间就会增加,因此建议可采用一种自适应的扫描方式,即当天线在高仰角处如果没有回波就返回到低仰角处开始下一个体扫。又增加低仰角后雷达探测的地物回波、海浪回波等会增加,应加以注意。

参考文献

陈大任,陈刚,吴峥嵘. 2010. 基于体扫模式的组合 RHI 自动实现算法. 气象, 36(2): 109-112.

李德俊,唐仁茂,熊守权,等. 2011. 强冰雹和短时强降水天气雷达特征及临近预警. 气象, 37(4): 474-480.

刘应军,顾松山,周雨华,等. 2006. 新一代天气雷达体扫模式的比较分析. 气象, 32(1): 44-50.

徐八林,刘黎平,徐文君,等. 2008. 利用低仰角扫描改进高山雷达低层回波探测能力浅析. 气象, 34(9): 28-33.

易笑园,宫全胜,李培彦,等. 2009. 华北飊线系统中地闪活动与雷达回波顶高的关系及预警指标. 气象, 35(2): 34-40.

张沛源,胡绍萍. 2008. 天气雷达零仰角及负仰角探测存在的问题及其解决办法. 第三届雷达气象学年会文集.

周非非,周毓荃,王俊,等. 2010. FY-2 卫星反演的云顶高度与多普勒雷达回波顶高的关系初探. 气象, 36(4): 43-50.

Brown R A, Janish J M, Wood V T. 2000a. Impact of WSR-88D scanning strategies on severe storm algorithms. Wea Forecasting, 15: 90-102.

Brown R A, Niziol T A, Donaldson N R. 2007. Improved detection using negative elevation angles for mountaintop WSR-88Ds. Part III: Simulation of shallow convective activity over and around Lake Ontario. Wea. Forecasting, 22: 839-852.

Brown R A, Wood V T, Barker T W. 2002. Improved detection using negative elevation angles for mountaintop WSR-88Ds: Simulation of KMSX near Missoula, Montana. Wea Forecasting, 17: 223-237.

Brown R A, Wood V T, Sirmans D. 2000b. Improved WSR-88D scanning strategies for convective storms. Wea Forecasting, 15: 208-220.

Wood V T, Brown R A, Vasiloff S V. 2003. Improved detection using negative elevation angles for mountaintop WSR-88Ds. Part II: Simulation of the three radars covering Utah. Wea Forecasting, 18: 393-403.