

多普勒天气雷达组网拼图有效数据区域分析^{* 1}

杨洪平¹⁾²⁾ 张沛源¹⁾ 程明虎¹⁾ 李 柏²⁾ 熊 毅³⁾ 高玉春²⁾ 陈大任²⁾

¹⁾(中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081)

²⁾(中国气象局气象探测中心, 北京 100081) ³⁾(中国气象局监测网络司, 北京 100081)

摘 要

在正常情况下, 由于天线仰角和地球曲率原因, 雷达波束位置在远距离处要比近距离处高。当雷达电磁波能量被部分阻挡时, 回波强度观测值低估; 被完全挡住时, 探测不到地物后的目标。该文利用高分辨率地形高程数据计算波束阻挡率, 确定组网拼图有效数据区域以及波束部分阻挡时的回波强度订正方法。根据业务观测模式 VCP11 及 VCP12 的 14 个仰角值, 在标准大气假定下, 对湖南、江西、浙江、福建、广东、广西和海南已建多普勒天气雷达组网的数据有效区域进行计算, 绘制出海拔 1500 m, 3000 m 和 6000 m 高度上有效区域图。分析结果表明: CAPPI 数据有效范围比等射束高度图更能反映出多普勒天气雷达业务观测范围; 若采用 VCP12 模式观测, 与采用 VCP11 或 VCP21 模式观测相比, 不仅增加低层探测密度, 而且可扩大雷达实际探测距离, 其回波数据更适合于组网拼图。

关键词: 多普勒天气雷达; 组网拼图; 有效数据区域

引 言

对于地基天气雷达来说, 其地理位置是固定的, 受地球曲率和四周地形影响以及发射功率限制, 雷达实际探测空间有限。天气雷达发射的电磁波能量由方向性天线积聚成一个笔状波束辐射到空中, 其传播路径通常微微弯向地表, 由于地球曲率影响, 电磁波束高度随距离增加而变大^[1-4]。我国地势西高东低, 地形起伏较大, 对雷达探测天气带来一定影响。雷达电磁波能量在近距离被山脉部分阻挡后, 该雷达电磁波能量只有部分向远方传播, 有效照射体积变小, 造成回波强度估计值偏低; 电磁波能量完全被挡住后, 探测不到实际回波。在雷达定量估测降水中, 雷达电磁波的阻挡情况用波束阻挡率来表征, 根据电磁波能流密度和地形高度分布计算波束阻挡率的大小, 用于混合扫描反射率数据合成处理^[5-9]。在利用多部雷达进行强风暴探测和降水估测的技术研究中^[10-13], 组网数据实际上是在一系列等高面上实现的。在组网拼图过程中, 不仅低仰角观测数据的遮挡问题需要处理, 而且拼图区域内各

格点值由哪几部雷达的观测数据确定也要明确, 否则将影响拼图数据可靠性。

本文首先讨论了利用地形高程数据计算波束阻挡率, 在此基础上确定雷达 PPI 的实际探测距离和 CAPPI(constant altitude PPI)有效数据范围, 计算组网拼图有效数据区域的方法; 然后结合多普勒天气雷达业务观测模式, 在标准大气假定下, 对湖南、江西、浙江、福建、广东、广西和海南已建多普勒天气雷达组网拼图的有效数据区域进行计算和分析。

1 原理与方法

1.1 波束阻挡率

天气雷达波束可视为椭圆形锥体, 波束宽度为方向图半功率点之间波束的张角。若电磁波最大能流密度为 S_{\max} , 天线方向图函数为 $f(\theta, \phi)$, 其中 θ 为方位, ϕ 为仰角, 则在距离 R 处无遮挡时的雷达电磁波功率为

$$P_t = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} S_{\max} |f(\theta, \phi)|^2 R^2 d\phi d\theta$$

若遮挡物在 θ 方位对雷达形成的遮挡仰角为 $\alpha(\theta)$,

* 国家自然科学基金项目(40375006)和武汉暴雨研究所开放基金课题(IHR20053)共同资助。

2007-12-07 收到, 2008-07-25 收到再改稿。

那么被阻挡的电磁波功率为

$$P_{oc} = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\alpha(\theta)} S_{max} |f(\theta, \phi)|^2 R^2 d\phi d\theta$$

雷达波束阻挡率 R_o (occultation rate) 定义为 P_{oc} 与 P_i 之比, 即

$$R_o = \frac{P_{oc}}{P_i} = \frac{\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\alpha(\theta)} |f(\theta, \phi)|^2 d\phi d\theta}{\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} |f(\theta, \phi)|^2 d\phi d\theta} \quad (1)$$

其大小与遮挡所在的方位以及遮挡仰角大小有关。

电磁波传播路径与传播介质有关。本文将实际大气看作球面分层大气, 大气折射率梯度随垂直高度线性变化, 采用等效地球模型计算电磁波束高度和水平距离。记地球半径为 R_e , 雷达天线反射体的经纬度为 λ_r 和 φ_r , 海拔高度为 h_r ; 遮挡物经纬度为 λ 和 φ , 海拔高度为 h 。遮挡物相对于雷达的水平距离 L_s 、方位 θ 和遮挡仰角 α 的计算方法分别为:

水平距离 $L_s = \beta R_e$, 其中 β 为地心角, 且

$$\beta = \arccos(\sin\varphi_r \sin\varphi + \cos\varphi_r \cos\varphi \cos(\lambda - \lambda_r)) \quad (2)$$

令 $\delta = \arcsin(\cos\varphi_r \sin(\lambda - \lambda_r) / \sin\beta)$,

$\varphi_{\perp} = \arcsin(\cos\beta \sin\varphi_r)$, 遮挡物方位 θ 的计算公式为

$$\theta = \begin{cases} \delta & (\varphi \geq \varphi_{\perp}, \lambda \geq \lambda_r) \\ 2\pi + \delta & (\varphi \geq \varphi_{\perp}, \lambda < \lambda_r) \\ \pi - \delta & (\varphi < \varphi_{\perp}) \end{cases} \quad (3)$$

遮挡仰角 α 的计算公式为

$$\alpha = \arctan \left[\frac{(R_m + h) \cos\beta_m - (R_m + h_r)}{(R_m + h) \sin\beta_m} \right] \quad (4)$$

式(4)中, $R_m = k_m R_e$, $\beta_m = \beta / k_m$, k_m 为等效地球半径系数, 标准大气中 $k_m = 4/3$ 。

1.2 实际探测距离

我国多普勒天气雷达可选择的立体扫描模式 VCPs(volume coverage patterns)有 VCP11, VCP21 和 VCP31 共 3 种, 其中 VCP11 适用于强风暴监测, VCP21 适用于降水监测, 二者的低仰角层观测中采用相同的仰角值^[14], 是主要业务观测模式。VCP31 用于晴空湍流探测, 但在实际业务中很少使用。目前美国的 WSR-88D (Weather Surveillance Radar-1988 Doppler) 业务观测中还增加了 VCP12 模式。这些模式均分别设定了一组固定的观测仰角, 观测层数及各层仰角值见表 1。雷达按照所选的观测模式进行数据采样时, 其实际探测范围也就是所选模式各仰角层采样空间的总和, 由各仰角层在不同方位上的最大探测距离确定。

雷达的实际探测距离可由雷达波束阻挡率来估计。当波束阻挡率达到或者超过一定的阈值(本文根据试验取 55%)时, 认为雷达波束被完全遮挡。图 1 为雷达波束的地物遮挡示意图。图 1 中雷达波

表 1 体扫模式 VCP11, VCP12, VCP21 和 VCP31 的观测层数及各层仰角度数表(单位: (°))

Table 1 Elevation number and elevation angles of VCP11, VCP12, VCP21 and VCP31 (unit: (°))

层号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
VCP11	0.5	1.45	2.4	3.35	4.3	5.2	6.2	7.5	8.7	10.0	12.0	14.0	16.7	19.5
VCP12	0.5	0.9	1.3	1.8	2.4	3.1	4.0	5.1	6.4	8.0	10.0	12.5	15.6	19.5
VCP21	0.5	1.45	2.4	3.35	4.3	6.0	9.9	14.6	19.5					
VCP31	0.5	1.5	2.5	3.5	3.5									

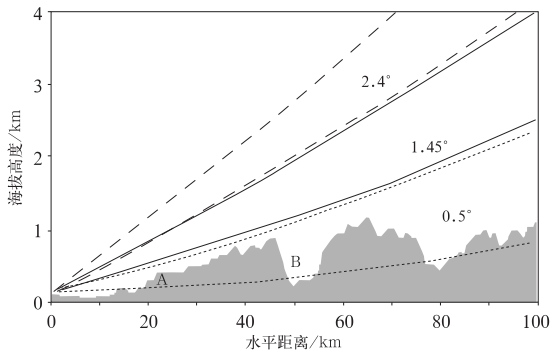


图 1 雷达波束的地物遮挡示意图
(阴影部分为地形)

Fig. 1 An example of radar beams obscured by ground obstacles (shaded areas denote topograph)

束的垂直宽度取值 0.9° , 阴影部分为地形分布。雷达波束的 2.4° 仰角层(短划线之间部分)和 1.45° 仰角层(实线之间部分)没有遮挡, 而 0.5° 仰角层(点线之间部分)上 A 点的波束阻挡率超过了 55%, 被认为完全遮挡从 A 点开始。尽管 B 点处的地形高度低于波束高度, 但受前面地物的遮挡, 实际上雷达探测不到 B 点的回波, 这时雷达可探测的水平距离仅为 22 km。可见在出现完全遮挡的方位, 雷达的实际探测距离为完全遮挡开始出现的距离; 在没有完全遮挡的方位上, 雷达的实际探测距离则为雷达的最大采样距离。

1.3 有效数据区域

对雷达而言, 通常称某个高度上的数据为

CAPPI 数据,以区别于固定仰角观测的 PPI 数据。严格来说,多部雷达组网拼图数据是由各雷达的 CAPPI 数据合并而成的一组等高面回波数据集。因此,雷达在等高面上的有效数据区域,也就是 CAPPI 有效数据区域才能被认作是该雷达参与组网拼图的有效数据区域。

CAPPI 数据不是雷达原始观测数据,而是多个 PPI 观测的体扫数据的内插值。在 PPI 上回波由仰角和探测距离直接定位,而在 CAPPI 上则通常采用高度和水平距离进行定位。CAPPI 的数据有效区域由雷达实际探测范围确定,因而与雷达扫描时选择的观测模式有关。在实际探测中,雷达观测总是从低仰角层开始到高仰角层结束,不仅观测层数和各层的观测仰角是固定的,遮挡也是先从最低的观测层开始,低层出现遮挡的水平距离不会远于高层出现遮挡的水平距离。

设观测层数为 N ,在某方位中雷达实际探测的水平距离记为 L_{VCP_i} (i 为观测层序号),CAPPI 等高面与各观测层交点的水平距离用 L_{CAP_i} 表示。根据上述原则,确定 CAPPI 的有效数据范围中靠近雷达的近端位置为 L_{CAP_N} ,而离开雷达的远端位置则由 L_{CAP} 和 L_{VCP} 共同确定:若 $L_{CAP_1} < L_{VCP_1}$,远端位置为 L_{CAP_1} ;否则从第 N 层开始往下逐层判断,当 $L_{CAP_i} < L_{VCP_i}$ 而且 $L_{CAP_{i-1}} > L_{VCP_{i-1}}$ 满足时,远端位置为 $L_{VCP_{i-1}}$ 和 $L_{CAP_{i-1}}$ 的大值者。近端和远端之间的那段距离即为该方位中 CAPPI 的有效数据范围。

2 雷达组网拼图有效数据区域

根据雷达有效数据区计算方法,开发了雷达组网拼图有效数据区域客观分析软件,利用该软件处理经向分辨率和纬向分辨率均为 0.0008333° 的地形高程数据(单位:m),并对湖南、江西、浙江、福建、广东、广西和海南等的多普勒天气雷达组网拼图的有效数据区域进行了绘制。

2.1 雷达极坐标地形与波束阻挡率

雷达极坐标地形表示雷达四周的地形分布,由 3600×300 个地形数据库组成。数据以雷达站为中心,从正北开始顺时针排列,方位间隔 0.1° ,径向数为 3600;径向分辨率为 1000 m,水平距离为 300 km。处理时根据式(2)~(4)将地形高程数据

的经纬网格坐标转换为雷达极坐标(方位和水平距离),取同一库内的多个地形高程数据的平均值作为该库的地形高度,计算各库的遮挡仰角。

取雷达的水平波束宽度和垂直波束宽度均为 0.95° ,根据文献[7]所采用的方法分别计算 VCP11 和 VCP12 模式各观测层的波束阻挡率。在每一根径向上,考虑近距离遮挡对远距离的影响,从第 1 个库开始逐库计算,并从第 2 个库开始取当前库与前一库的大者作为当前库的波束阻挡率值,直到第 300 个库结束。

2.2 CAPPI 有效数据范围

对每一部雷达,分别选择 VCP11 与 VCP12 模式,先根据雷达天线高度、CAPPI 高度与观测层仰角值计算出 L_{CAP} 数组,然后设定完全遮挡的波束阻挡率阈值为 55%,利用波束阻挡率计算值确定 L_{VCP} 数组,最后按照本文 1.3 节介绍的方法确定海拔高度 1500 m,3000 m 和 6000 m 的 CAPPI 在 3600 个方位中的近端和远端位置,得到数据有效范围。

以广州雷达为例,在 3000 m 海拔高度上,该雷达 $0.5^\circ, 0.9^\circ, 1.45^\circ$ 和 19.5° 仰角观测层 L_{CAP} 分别为 158,124,93 km 和 9 km,因而在无遮挡方位海拔高度 3000 m 上 CAPPI 有效数据范围为 9~158 km。假如在遮挡方位上的地形分布如图 1 所示,由于 0.5° 仰角层在近距离被完全遮挡,使得该方位 3000 m 海拔高度的有效数据水平范围变小,在 VCP11 和 VCP21 模式中均为 9~93 km;但由于地形对 0.9° 仰角层只产生部分遮挡,故 VCP12 模式中为 9~124 km。

2.3 组网拼图有效数据区域

多部雷达 CAPPI 有效数据区域的合成,不仅可以确定雷达网联合探测区域与空白区域,而且还可以确定组网数据是由哪几部雷达探测数据得来的。首先,将各雷达的 CAPPI 有效数据区域转换成间距均为 0.01° 等经纬网格区域,并将有效区域内的所有格点标记为 1,空白区标记为 0;然后,将这些经纬网格区域合成为组网拼图区域,并对经纬度相同的网格点进行标记值累加,标记值不为 0 的所有格点就构成了组网拼图的数据有效区域,累加后的格点值指示出能够探测到格点区域的雷达个数。

图 2 为湖南、江西、浙江、福建、广东、广西和海南多普勒天气雷达组网拼图的数据有效区域图。当

所有雷达均采用 VCP11 模式时,1500 m, 3000 m 和 6000 m 高度的有效数据区域见图 2a, 2c 和 2e;

当所有雷达均采用 VCP12 模式时,1500 m,3000 m 和6000 m高度的有效数据区域见图 2b, 2d和2f。

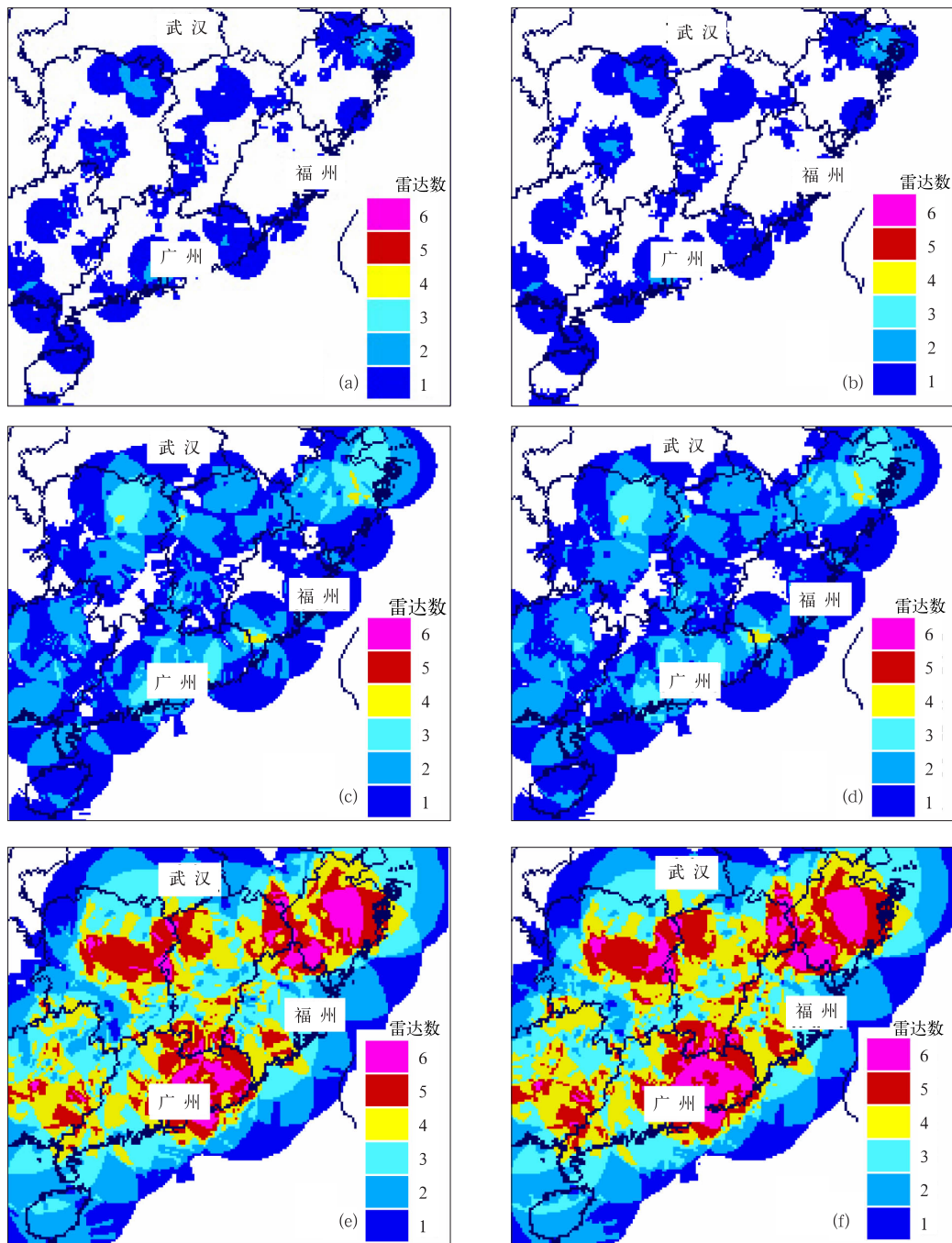


图2 湖南、江西、浙江、福建、广东、广西和海南雷达组网拼图数据有效区域图

(a) VCP11 模式,1500 m 高度,(b) VCP12 模式,1500 m 高度,(c) VCP11 模式,3000 m 高度,
(d) VCP12 模式,3000 m 高度,(e) VCP11 模式,6000 m 高度,(f) VCP12 模式,6000 m 高度

Fig. 2 The valid mosaic data regions of CINRAD network from Hunan, Jiangxi, Zhejiang, Fujian, Guangdong, Guangxi and Hainan with VCP11 or VCP12 at different altitudes
(a) VCP11, at 1500 m, (b) VCP12, at 1500 m, (c) VCP11, at 3000 m, (d) VCP12, at 3000 m,
(e) VCP11, at 6000 m, (f) VCP12, at 6000 m

对比 3 个高度的有效数据区域,1500 m 的空白区最大,3000 m 的空白区较少,而 6000 m 上基本没有空白区。VCP12 与 VCP11 相比,在相同高度前者增大了联网探测的范围,并且使雷达之间重叠区域变大。大部分重叠区域的雷达数在 3 个以上,最多的地方有 6 个。

3 回波强度的波束阻挡订正

地物对雷达电磁波的遮挡情况分为部分遮挡和完全遮挡。完全遮挡时,雷达基本探测不到遮挡物之后目标物的回波强度。而部分遮挡时,实际采样体积比相同距离上无遮挡时的采样体积小,雷达探测的回波强度值偏低,需要加以订正。设发射功率为 P_t ,被地物阻挡的功率 P_{oc} ,采样体实际入射功率为 $P_t - P_{oc}$ 。若强度观测值为 dBZ ,订正后的强度值为 dBZ' ,根据雷达气象方程可得

$$\begin{aligned} dBZ' &= dBZ + 10\lg\left(\frac{P_t}{P_t - P_{oc}}\right) \\ &= dBZ + 10\lg\left(\frac{1}{1 - R_o}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)中, $10\lg\left(\frac{1}{1 - R_o}\right)$ 为回波强度订正值,由波束阻挡率计算。例如,当 R_o 取 0.2,0.3,0.4,0.5 和 0.55 时,订正值分别为 1.0,1.5,2.2,3.0 和 3.5 dB。

根据上述方法,对温州雷达最低仰角观测的回波强度进行波束阻挡订正,并利用宁波雷达最低仰角观测的回波强度检验其订正效果。2007 年 9 月 19 日 04:57(北京时,下同)—06:12,这两部雷达各进行了 13 次观测,观测时间差最小为 1 s,最大为 57 s。由于两部雷达之间的水平距离约为 253 km,因此订正效果检验主要是进行 2.2~3.2 km 高度层内的强度数据对比。在 13 次观测序列中,对比数据均分为两组:第 1 组数据由两部雷达无遮挡观测数据组成,第 2 组数据由温州雷达部分遮挡观测数据且宁波雷达无遮挡观测的数据组成。第 1 组数据用于估计两部雷达的方位偏差和强度差异,第 2 组数据用于订正及其效果检验。

第 1 组试验表明温州雷达的观测方位订正值为一 0.2°时,两部雷达数据之间的相关性最好,且温州雷达的回波强度平均值比宁波雷达的大 0.8~

1.6 dB。在此基础上进行第 2 组试验,发现除了序列 6 的相关系数变化不大外,其余所有序列的相关系数都有较大提高,与第 1 组数据的相关系数无明显差别,说明订正后的温州雷达数据与宁波雷达数据之间的相关程度与两部雷达无遮挡观测数据之间的相关程度非常接近,订正效果比较理想。表 2 分别列出了 13 个序列第 1 组数据的平均强度差和相关系数以及第 2 组数据订正前后的相关系数,计算中温州雷达数据均事先进行了方位值订正。图 3 给出了温州雷达 2007 年 9 月 19 日 06:31 的最低观测层回波强度订正结果,其中图 3a 和 3b 分别表示回波所在位置的波束阻挡率及其订正值,图 3c 和 3d 分别为订正前后的回波强度图。

刘黎平等^[15]指出雷达原始观测数据需要进行方位值订正,说明雷达数据中存储的方位值与实际采样角度之间存在偏差。在上述波束阻挡订正试验中,经过多次选择,最终确定温州雷达方位订正值为一 0.2°,宁波雷达不需要方位订正。通过两组数据的验证,表明利用雷达波束阻挡特征确定方位订正值也是可行的。

表 2 波束阻挡订正前后的温州雷达回波强度与宁波雷达回波强度对比试验结果

Table 2 Results of comparing intensities without/with occultation corrections of Wenzhou radar echo with observations of Ningbo radar

观测序号	第 1 组数据		第 2 组数据	
	平均强度差	相关系数	订正前相关系数	订正后相关系数
1	1.4	0.844	0.619	0.844
2	1.2	0.853	0.609	0.852
3	1.5	0.877	0.780	0.877
4	1.3	0.858	0.605	0.859
5	1.5	0.862	0.482	0.862
6	1.6	0.798	0.800	0.798
7	0.8	0.858	0.708	0.857
8	1.4	0.845	0.475	0.844
9	1.0	0.858	0.602	0.857
10	1.0	0.767	0.539	0.767
11	0.9	0.564	0.515	0.563
12	0.8	0.524	0.445	0.523
13	1.0	0.710	0.510	0.708

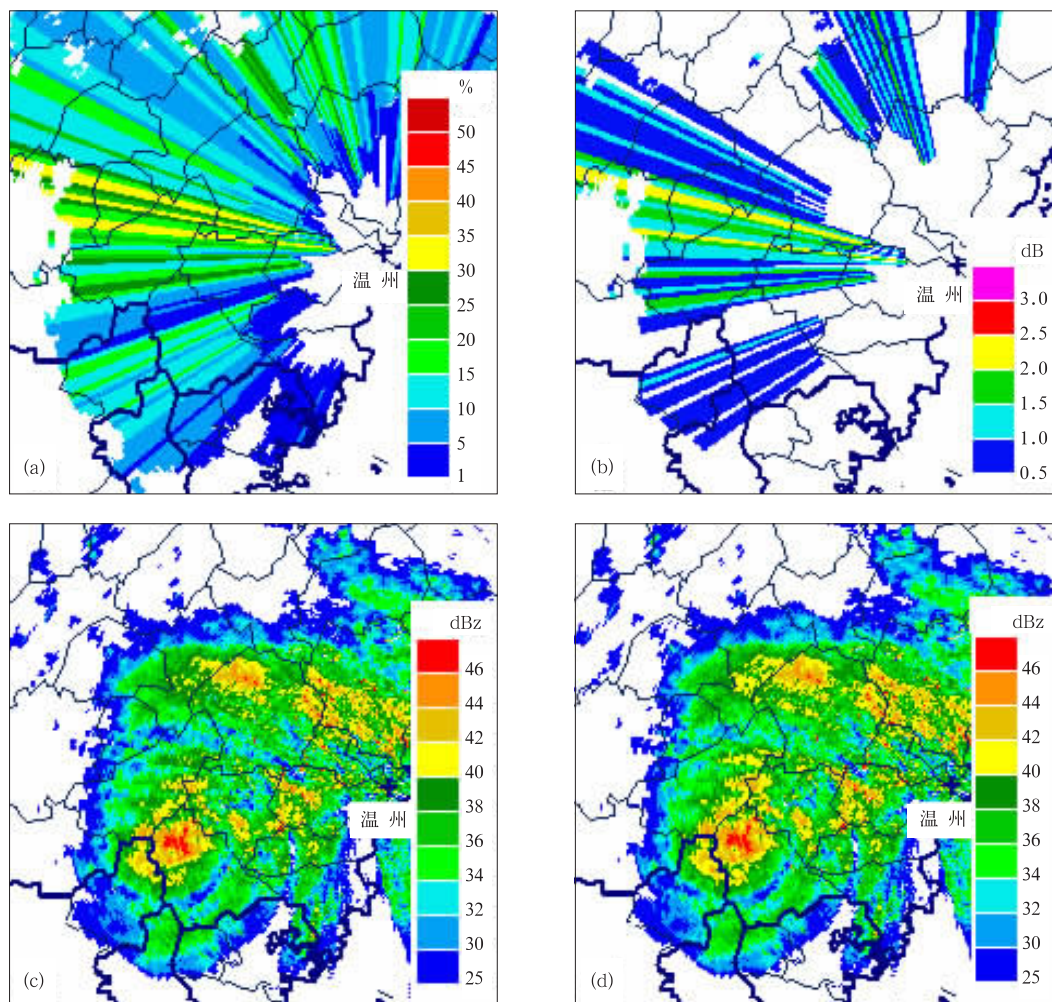


图3 温州雷达回波的波束阻挡订正个例(观测时间为2007年9月19日14:31)
 (a)最低观测层回波的波束阻挡率(单位:%), (b)最低观测层回波订正值分布图(单位:dB),
 (c)最低观测层回波波束阻挡订正前回波强度(≥ 26 dBz), (d)最低观测层回波波束阻挡
 订正后回波强度(≥ 26 dBz)

Fig. 3 Occultation rates(unit: %) of the lowest elevation that Wenzhou radar observed
 at 14:31 on September 19, 2007(a), the correction values(unit: dB) for the partial occultation(b),
 the uncorrected(c) and the corrected(d) intensities of that equal to or greater than 26 dBz

4 分析与讨论

4.1 CAPPI 数据有效范围与等射束高度图对比

等射束高度图是对雷达视程的一种客观分析^[16],根据四周地形起伏变化,最大探测距离采用无遮挡观测的最低仰角计算。以图1为例,最低仰角取 0.9° ,在3000 m等射束高度图中最大探测距离处的水平距离为124 km。而采用VCP11或者VCP21模式观测时,3000 m高度上CAPPI的数据有效范围仅达93 km,比前者近了31 km。在无遮

挡方位计算中,前者最低仰角取值 0° ,后者最低仰角取值 0.5° ,也是后者的距离近。说明在同一高度上,等射束高度图范围大于实际业务观测的CAPPI有效数据范围。

图4给出了赣州多普勒天气雷达6000 m海拔高度的等射束高度图和这两种模式的CAPPI数据有效范围。图4中距离圈表示其与雷达之间的水平距离,间距为150 km。可以看出,无论是采用VCP11模式还是VCP12模式进行业务观测,CAPPI的数据有效范围都小于等射束高度图的范围。尽管如此,由于雷达不可能在所有方位上都按无遮

挡观测的最低仰角进行观测,所以 CAPPI 数据的有效范围比等射束高度图更能反映出多普勒天气雷达业务观测范围。

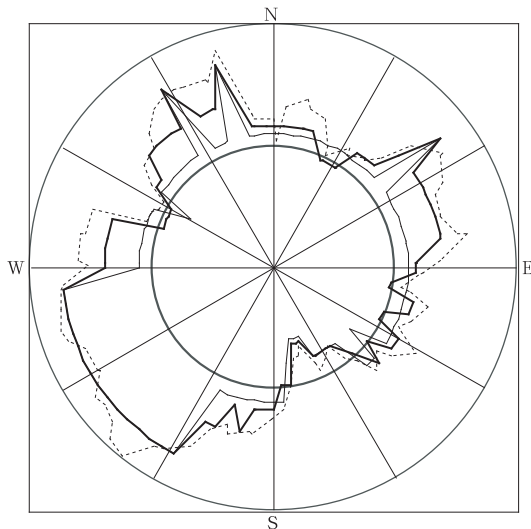


图4 赣州雷达 6000 m 等射束高度图(虚线)与 CAPPI 数据有效区域(细实线为 VCP11,粗实线为 VCP12,距离圈间距 150 km)

Fig. 4 Coverage of equivalent beam range(dashed line) and CAPPI valid data region(thin line denotes CP 11 and thick line denotes VCP12) at 6000 m above the sea level(distance between range ring is 150 km)

4.2 VCP11 与 VCP12 对比

从图 4 可以发现,同一高度 CAPPI 数据有效区域在大部分遮挡方位中,VCP12 模式的比 VCP11 模式的大一些。只是在极少的方位,如图 4 中的 25°方位,VCP12 模式的比 VCP11 模式的小。其原因在于每一个中间观测层,VCP12 的仰角值均小于 VCP11 的仰角值(表 1),当遮挡仰角在 0.5°和 0.9°之间时,扩大了 VCP12 的 CAPPI 数据有效范围。另外,VCP12 还减小了低层仰角的间距,使得远距离处的上下层回波高度差降低,有利于 CAPPI 回波计算。显然,采用 VCP12 模式观测,与采用 VCP11 或 VCP21 模式观测相比,不仅可增加多山地区的雷达实际探测范围,而且回波数据更适合于组网拼图。

4.3 波束阻挡率计算方式对 CAPPI 数据有效区域的影响

波束阻挡率是本研究中 CAPPI 有效数据区域计算的基础,计算值的大小与地形高度确定方式和遮挡仰角的计算过程有关,影响到雷达实际探测距离的估计。

由于一个地形库中包含多个地形高程数据,高度值确定方式不同将导致波束阻挡率计算结果的不同。本文通过波束阻挡率域值判断波束是否遭遇完全遮挡,从实际情况来看,波束被完全遮挡多发生在离雷达较近的多山地区,遮挡方位较宽,因而用平均值作为地形库的高度,域值为 55%。如果采取文献[7]中的最大值填充方式,得到的地形库高度值就大一些,在某些方位中的遮挡距离可能近一些,计算的 CAPPI 数据有效区域就会小一些。

地形遮挡仰角的大小与大气折射条件有关。在实际大气中,电磁波束高度稍微下降一点,就可能被完全挡住,按照标准大气折射计算的数据有效区域就比实际范围大。某些超折射条件下远距离处可探测到大片地物回波,也是因为雷达波束高度降低的原因,而不能当作 CAPPI 数据。

4.4 垂直波束宽度对 CAPPI 数据有效区域计算的影响

计算 L_{CAP} 时,将雷达电磁波的传播路径近似为一条线,实际上是计算波束中心轴线的高度。由于雷达波束有一定的垂直宽度,并且随距离增加而变大,如垂直宽度取 1.0°时,在 0.5°仰角观测层中探测距离 50,100 km 和 200 km 处,波束的垂直宽度分别约为 0.87,1.75 km 和 3.49 km。说明在波束中心轴线达到 CAPPI 高度之后的一段距离内,雷达数据仍然包含该高度上的回波信息,这段距离可以看作远端的向外延伸。同理也可以将近端向内延伸,适当扩大 CAPPI 数据有效范围。

5 结 论

1) 在标准大气假定下,结合多普勒天气雷达业务观测模式,利用地形高程数据计算出的 CAPPI 有效数据区域,比等射束高度图更能反映出多普勒天气雷达业务观测范围。

2) 从 1500 m,3000 m 和 6000 m 高度的湖南、江西、浙江、福建、广东、广西和海南雷达组网拼图数据有效区域图上看,1500 m 的空白区最大,3000 m 的空白区较少,而 6000 m 上基本没有空白区。采用 VCP12 模式观测扩大了雷达之间的重叠区域,大部分重叠区域的雷达数在 3 个以上,最多的地方有 6 个。

3) 雷达实际探测范围与遮挡仰角的大小和所选择的观测模式有关。采用 VCP12 模式,与采用

VCP11 或者 VCP21 模式相比, 不仅可因实际探测范围的增大而使有效数据区域扩大, 而且回波数据更加有利于组网拼图。

4) 在雷达波束部分遮挡情况下, 需要利用波束阻挡率进行回波强度订正。同时参考雷达波束阻挡特征, 也可以确定雷达方位订正值。

参考文献

- [1] Doviak J R, Zrnic S D. Doppler Radar and Weather Observations. San Diego, CA: Academic Press, 1993: 10-29.
- [2] 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕. 雷达气象学. 北京: 气象出版社, 2001: 94-149.
- [3] 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学. 北京: 北京大学出版社, 2003: 468-474.
- [4] 王军, 林强, 米慈中, 等译. 雷达手册(第二版). 北京: 电子工业出版社, 2003: 18-68.
- [5] O'Banon. Using a 'Terrain-based' Hybrid Scan to Improve WSR-88D Precipitation Estimates. Preprints, the 28th ICRM, 1997: 506-507.
- [6] Fulton R A, Breidenbach J P, Seo D-J, et al. The WSR-88D rainfall algorithm. *Wea Forecasting*, 1998, 13: 377-395.
- [7] 张亚萍, 刘钧, 顾嵩山, 等. 雷达定量估测区域降水波束阻挡系数的计算. 南京气象学院学报, 2002, 25(5): 640-647.
- [8] 程明虎, 刘黎平, 张沛源, 等. 暴雨系统的多普勒雷达反演理论和方法. 北京: 气象出版社, 2004: 108-112.
- [9] 张亚萍, 程明虎, 夏文梅, 等. 天气雷达回波运动场估测及其在降水临近预报中的应用. 气象学报, 2006, 64(5): 631-646.
- [10] Lakshmanan V, Rabin R, DeBrunner V. Multiscale storm identification and forecast. *J Atmos Res*, 2003, 367-380.
- [11] Zhang J, Howard K, Xia W, et al. Three-dimensional High-resolution National Radar Mosaic//Preprints, the 11th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology. Amer Meteor Soc, 2004.
- [12] Zhang J, Howard K, Gourley J J. Constructing three-dimensional multiple-radar reflectivity Mosaic: Examples of convective storms and stratiform rain echoes. *J Atmos Oceanic Technic*, 2005, 10: 30-42.
- [13] 肖艳娇, 刘黎平. 新一代天气雷达网资料的三维格点化及拼图方法研究. 气象学报, 2006, 64(5): 647-657.
- [14] 中国气象局. 新一代天气雷达观测规定. 北京: 中国气象局, 2005.
- [15] 刘黎平, 张沛源, 梁海河, 等. 双多普勒雷达风场反演误差和资料的质量控制. 应用气象学报, 2003, 14(1): 17-29.
- [16] 王玉发, 杨洪平, 肖艳娇, 等. 多普勒天气雷达站址视程的客观分析技术. 应用气象学报, 2000, 11(4): 440-447.

The Valid Mosaic Data Region of the CINRAD Network

Yang Hongping¹⁾²⁾ Zhang Peiyuan¹⁾ Cheng Minghu¹⁾ Li Bai²⁾
Xiong Yi³⁾ Gao Yuchun²⁾ Chen Daren²⁾

¹⁾ (State Key Laboratory Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

²⁾ (Atmospheric Observation Technical Center of CMA, Beijing 100081)

³⁾ (Department of Observation and Telecommunication, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract

Along the normal propagation path, the radar ray becomes higher and higher due to effects of the earth curvature and positive elevation angle of transmitter. Actually, radar waves are often blocked as they propagate through mountain areas. When radar beam has occultation, its real sample volume will be smaller than that of zero occultation, echo intensity of targets will be underestimated if it is partial occultation, and targets will be totally missed if complete occultation occurs. It is common practice now to use occultation rate for beam occultation correction. Assuming that radar waves propagate in standard atmosphere, occultation rates of radar beam herein are calculated with the high resolution digital elevation map data, and are utilized to analyze the valid mosaic data region of netted radars and to assess the beam occultation correction. Test shows that echo will be severely underestimated and waves can be considered to be completely blocked when the occultation rate is larger than 55%. Based on that, in terms of the 14 elevation angles of two Volume Coverage Pattern modes, VCP11 and VCP12, the real detecting ranges of netted ra-

dars are obtained. The netted radars include the local CINRAD in Hunan, Jiangxi, Zhejiang, Fujian, Guangdong, Guangxi and Hainan provinces. Compared with the equivalent beam range at the same height, the valid data range of CAPPI is more suitable to represent the real detection range. Among the valid mosaic date regions at the height of 1500 m, 3000 m and 6000 m above the sea level, the largest blank area can be seen in the graph of 1500 m height, but can hardly be seen in that of 6000 m height. In the overlapping area of 6000 m height, most common grids can be detected by three radars or more, some by the maximum of six. Observations in VCP12, compared with that in VCP11 or in VCP21, are more useful to construct mosaic data not only because of its dense vertical sample in low elevation but also its larger valid data range in mountain areas. According to the definition formula of echo intensity, correction of intensities sampled in partial occultation range gates is obtained from its occultation rate. For instance, the correction value is 1.0 dB, 1.5 dB, 2.2 dB, 3.0 dB and 3.5 dB while the occultation rate is 20%, 30%, 40%, 50% and 55% respectively. In the experiment of correction, base data are observed in the common latitude longitude grid at the same time by the two weather radars in Wenzhou and Ningbo. The common grids are separated into two groups. The group I consists of the grids where Wenzhou radar has partial occultation and Ningbo radar has none. And the group II consists of the grids where both two has no occultation. Therefore, the observations of Wenzhou radar are corrected in group I, and correction is assessed by the observations of Ningbo radar. The results indicate that the correlative coefficient of corrected data is larger than that of uncorrected in group I, and the values are close to that of group II, the corrections are effective.

Key words: Doppler radar; radar mosaic; valid data region

欢迎订阅《应用气象学报》

《应用气象学报》是由中国气象科学研究院、国家气象中心、国家卫星气象中心、国家气候中心、国家气象信息中心和中国气象局气象探测中心联合主办的大气科学理论与应用研究的综合性学术期刊。《应用气象学报》将向您提供有关我国大气科学领域内研究和应用成果的最新论文、资料、方法等大量信息,内容包括气象预报、卫星气象、农业气象、海洋气象、航空气象、环境气象、人工影响天气、应用气象、大气探测、遥感技术以及计算机应用技术等学科;还向您介绍国内外现代科技的最新理论与新技术在大气科学中应用的研究论文及信息。主要栏目有论著、短论、综合评述、业务系统、学术论坛、研究简报、书刊评介等。本刊被《中文核心要目总览》确认为大气科学(气象学)类核心期刊,并已首批入选“中国科学引文数据库”(CSCD),中国科学技术期刊文摘(CSTA)国家数据库(英文版)收录的刊源名单,并被美国气象学会“气象与地球天体物理学文摘”(MGA)和美国国际科学应用协会(SAIC)以及中国科学文摘(英文版)等多种文摘摘录。本刊还首批入选“中国学术期刊(光盘版)”、“万方数据——数字化期刊群”和“中文科技期刊数据库”。《应用气象学报》面向广大的气象科研、业务技术人员、在校有关专业的研究生、大专院校师生等专业人员。

《应用气象学报》为双月刊,逢双月出版,可以随时汇款订阅或购买(户名:中国气象科学研究院,账号:11001028600056086013,开户行:建行北京白石桥支行)。2009年6期(每期定价30.00元),总订价180.00元(含邮资)。

订阅地址:北京市中关村南大街46号中国气象科学研究院《应用气象学报》编辑部;邮政编码:100081。

联系电话:(010) 68407086,68408638。E-mail地址:yyqxxb@cams.cma.gov.cn,yyqxxb@163.com。