0577-6619/2011/69(4)-0729-35 *Acta Meteorologica Sinica* 气象学报

# S波段相控阵天气雷达与新一代天气雷达探测云回波强度及结构误差的模拟分析*

张志强[1,2,3] 刘黎平[1]

ZHANG Zhiqiang[1,2,3] LIU Liping[1]

1. 中国气象科学研究院,国家灾害天气重点实验室,北京,100081
2. 中国科学院研究生院,北京,100049
3. 国家气象信息中心,北京,100081
1. *State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing* 100081, *China*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*
3. *National Meteorological Information Centre, Beijing* 100081, *China*

2009-09-14 收稿,2010-05-11 改回.

**Zhang Zhiqiang, Liu Liping. 2011. A simulation and analysis of the observation errors of cloud intensity and structure with the S-band phased array radar and the CINRAD/SA. *Acta Meteorologica Sinica*, 69(4):729-735**

**Abstract** The State Key Laboratory of Severe Weather of CAMS and Nanjing Research Institute of Electronics Technology have jointly developed the first S-band phased array weather radar of China. In order to reduce the radar scan cycle, the S-band phased array weather radar uses a transmitted beam wider in pitch and narrower in azimuth, and multi-received beams to overlap the transmitted beam. However, when using this scanning method, beam width and gain are changed with elevation. For the wider beam width, it reduced the radar resolution, resulting in the absence of the details of radar echo. In order to explain theoretically the difference between observed cloud intensities and structures by the S-Band Phased array radar and the CINRAD/SA, a high spatial resolution cloud dataset is reconstructed by using the bilinear interpolation method. And we also simulate the features of the S-Band phased array weather radar and CINRAD/SA to scan the cloud and thus obtain the reflectivity based on which the difference of the scanning features for the S-band phased array radar and the CINRAD/SA is analysed. The results show that the echo structure has been, to some extent changed because of the horizontal and vertical smoothing of the phased array radar which weakened the center of echo intensity with the center of some small strong echoes disappearing. Compared with the SA radar, it reduced very weak echo dimensions and the strong echo area, and increased the area of echoes of intermediate intensity. The paper suggested the method of contrasting the CINRAD and the phased array weather radar, and provided a theoretical framework for the calibration of this phased array weather radar and the quantitative measurements.

**Key words** Phased array weather radar, Radar gain, Beam width, Simulation and analysis

**摘 要** 由中国气象科学研究院国家灾害天气重点实验室与中国电子科技集团南京第14研究所联合研制的S波段相控阵天气雷达采用宽波束发射多波束接收,从而很大程度上缩短雷达扫描周期,但是由于相控阵雷达其波束宽度的增加以及波束宽度与增益不再是定值而是随着仰角而发生变化,必然在一定程度上牺牲雷达探测分辨率,造成其回波细节的缺失。为了比较该S波段相控阵天气雷达与S波段多普勒天气雷达在探测云反射率因子大小和结构方面的差异,采用双线性插值方法,模拟出空间分辨率很高的降水云团,并模拟相控阵天气雷达和S波段新一代天气雷达的波束特性对其进行扫描,通过模拟扫描得到的反射率回波,分析了对同一降水云团、相同距离位置,相控阵天气雷达与S波段常规多普勒天气雷达回波在水平方向和

* 资助课题:公益性行业(气象)项目(GYHY(QX)2007-6-2)"相控阵天气雷达系统关键技术研究"。
作者简介:张志强,主要从事天气雷达相关算法研究以及相关气象数据处理。E-mial: zhiqiang82@cams.cma.gov.cn

垂直方向的差异,结果表明:相控阵雷达对回波水平方向上和垂直方向上的平滑作用在一定程度上改变了回波的结构,减弱了回波的中心强度,使一些小的强回波中心消失。相对于S波段多普勒天气雷达,减少了极弱回波与强回波的面积,增加了中间强度回波的面积。探索了模拟分析相控阵天气雷达与多普勒天气雷达数据的方法,为相控阵天气雷达的定标和定量测量提供了理论参考。

**关键词** 相控阵天气雷达,雷达增益,波束宽度,模拟分析

**中图法分类号** P405

## 1 引 言

天气雷达在大气探测中占有重要的地位(郑媛媛等,2004),由于其具有高时空分辨的探测能力,其实时准确的探测数据已经成为对包括雷暴、冰雹和雪灾等灾害性天气监测和短时天气预报等极为有效的工具。但是目前的机械扫描雷达扫描周期过长,已无法满足对快速变化天气系统的探测要求。于是,相控阵雷达技术(Leslie, 2003; Merrill, 2007)得到快速发展,相控阵雷达是一种电子扫描雷达,相对于常规机械扫描多普勒天气雷达,相控阵天气雷达可以很大程度上缩短扫描时间,提高对龙卷风、暴雨等灾害天气的预警能力,如何把相控阵雷达应用到气象领域已经被提上了日程。2006年,美国开始计划部署研制具有多功能的相控阵天气雷达(MPAR, Mutiple function Phased Array Radar),它的主要任务是进行强天气的监测、空中交通管制和服务于国家安全等。目前,中国也在进行相控阵天气雷达的研制工作,由中国气象科学研究院主持的"相控阵天气雷达系统关键技术研究"项目在军用雷达的基础上研制出了一部S波段相控阵天气雷达,目前已经进入出厂前的测试阶段。由于相控阵雷达采用电子扫描方式,其波束宽度与增益不再像目前业务使用的机械扫描雷达一样固定不变,而是不断变化的,同时为了提高扫描速度,其扫描方式采用宽波束发射,多波束接收的形式。因此,很有必要对其波束扫描情况进行研究。本文采用数值模拟的方法,首先通过双线性插值方法模拟出空间分辨率极高的不同情况下的降水回波,进而模拟相控阵天气雷达和常规S波段多普勒天气雷达的扫描方式对其进行扫描,对扫描的结果进行分析。从而模拟出相控阵天气雷达与常规多普勒天气雷达在扫描特性上的差异,为相控阵天气雷达的定量测量与应用提供理论准备。

## 2 相控阵雷达的扫描特性

相控阵雷达天线由许多天线单元排成阵列组成,它利用计算机控制天线阵的移相器,从而改变阵面上的相位分布,最终形成所需波束并使波束在空间按一定规则扫描。中国气象科学研究院国家灾害天气重点实验室与中国电子科技集团南京第14研究所联合研制的S波段相控阵天气雷达的天线参数见表1。

表1 相控阵天气雷达参数

Table 1 Parameters of the phased array weather radar

| 项目 | 参数 |
|---|---|
| 工作频率 | 2.7—3.0 GHz |
| 极化形式 | 水平极化 |
| 波束宽度 | 水平:1.57°±0.15°<br>垂直:接收3.12°±0.3° 发射8°±0.4° |
| 仰角扫描范围 | 0°—35°,仰角方向同时4波束接收,<br>覆盖空域为8° |
| 天线增益 | 宽波束发射:≥34.4 dB(垂直波束宽度8°)<br>接收:≥38.3 dB(垂直波束宽度3.12°) |

该雷达水平方向上采用机械扫描,与常规多普勒天气雷达一样,其水平方向波束宽度保持不变;垂直方向采用相位控制扫描,从而造成其垂直方向上的波束宽度随着仰角发生变化,进而其增益也随着仰角发生变化。

### 2.1 天线增益

假设矩阵平面阵列天线在水平和垂直方向上有独立的场强分布(式(1))

$$E_a(x,y) = E_{a1}(x)E_{a2}(y) \tag{1}$$

式中,$E_{a1}(x)$和$E_{a2}(y)$分别为$x$、$y$方向上的场强分布。当场强独立分布的时候,无损耗天线增益$D$也是独立分布的(Elliott, 1981)

$$D = \pi D_x D_y \cos\theta \tag{2}$$

式中,$\theta$为波束指向与天线法向方向的夹角,$\cos\theta = \sqrt{\cos\alpha\cos\beta}$,$\alpha$、$\beta$分别为水平和垂直方向与天线法向的夹角,$D_x$、$D_y$分别为$x$、$y$方向上的无损耗天线增益。

$$D_x = c_x \frac{L_x}{\lambda} \tag{3}$$

$$D_y = c_y \frac{L_y}{\lambda} \tag{4}$$

$L_x$、$L_y$ 分别为 $x$、$y$ 方向上的天线尺寸,$\lambda$ 是天线波长,常数 $c_x$、$c_y$ 是由孔径分布的斜度决定的。

$$D = \pi c_x c_y \frac{L_x L_y}{\lambda^2}\cos\theta \tag{5}$$

天线增益 $G$ 正比于天线无损耗增益 $D$

$$G = e_r D = e_r \pi c_x c_y \frac{A_p}{\lambda^2}\cos\theta \tag{6}$$

式中,$e_r$ 为阵列辐射效率,$A_p = L_x L_y$ 为天线孔径面积,当辐射孔径一致时 $c_x = c_y = 2$

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2}A_p\cos\theta \tag{7}$$

取天线法向上的增益为 $G_0$,则 $G_0 = e_r \pi c_x c_y \frac{A_p}{\lambda_0^2}$

$$G = G_0(\frac{\lambda_0}{\lambda})^2\cos\theta \tag{8}$$

天线的发射增益为 $G_t$,接收增益为 $G_r$,则

$$G_t = G_{t0}(\frac{\lambda_0}{\lambda})^2\cos\theta_t \tag{9}$$

$$G_r = G_{r0}(\frac{\lambda_0}{\lambda})^2\cos\theta_r \tag{10}$$

式中,$G_{t0}$ 为天线法向方向发射增益,$G_{r0}$ 为天线法向方向接收增益,$\theta_t$ 为发射波束与天线法向方向夹角,$\theta_r$ 为接收波束与天线法向方向夹角。

从以上式中可以看出,波束增益也与天线扫描角有关,当波束指向偏离阵列法向方向越大,则增益的增加也越大。

### 2.2 波瓣宽度

包括相控阵雷达在内的任何雷达增益有一个基本的表达式

$$D = \frac{4\pi}{\Omega_B} \tag{11}$$

式中,$\Omega_B$ 为波束的立体角。

由于,$\Omega_B D = 4\pi$ 为一常数,则

$$\theta_u \varphi_v = \frac{\theta_{u0}\varphi_{v0}}{\cos\theta} \tag{12}$$

式中,$\theta_u$、$\varphi_v$ 分别为水平和垂直的波瓣宽度,$\theta_{u0}$、$\varphi_{v0}$ 分别为天线法线方向水平和垂直的波瓣宽度,$\theta$ 为发射波束与天线法向的夹角。

从式中可以看出,波束宽度与天线扫描角有关。当波束指向偏离阵列法线方向越大,则波束半功率点宽度增加也越大。当波束指向 60°时,波束宽度展宽近一倍。这点对相控阵天气雷达的精度影响是很大的。

### 2.3 天线波束情况

阵面竖起与水平方向成 80°夹角,且其扫描范围为 0°—35°(图 1),则对于发射宽波束中心有 5 个发射角(2°、10°、18°、26°、34°),4 个发射角与天线法向方向所成夹角为 -8°,0°、8°、16°、24°,每个发射角又分为 4 个区域,因此,把此相控阵雷达扫描范围 0°—35°以 2°为区间分为 18 个区域。此 18 个区域发射波束和接收波束与天线法向的夹角见表 2。

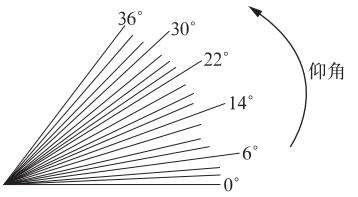



图 1 雷达扫描区间

Fig. 1 Scanning range of the radar

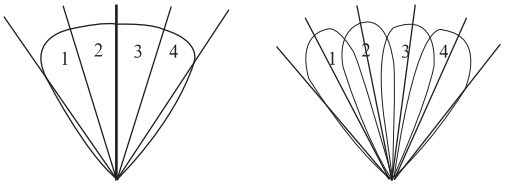



图 2 雷达天线波束

(a. 发射波束, b. 接收波束)

Fig. 2 Antenna beams of the radar

(a. Transmitting beam, and b. Receiving beam)

表 2 天线波束与天线法向夹角

Table 2 The angle between the antenna beam and the antenna normal

| 扫描区间 | 0°—2° | 2°—4° | 4°—6° | 6°—8° | 8°—10° | 10°—12° | 12°—14° | 14°—16° | 16°—18° |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\theta_t$(°) | 8 | 8 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 | 8 |
| $\theta_r$(°) | 9 | 7 | 5 | 3 | 1 | 1 | 3 | 5 | 7 |
| 扫描区间 | 18°—20° | 20°—22° | 22°—24° | 24°—26° | 26°—28° | 28°—30° | 30°—32° | 32°—34° | 34°—36° |
| $\theta_t$(°) | 8 | 8 | 16 | 16 | 16 | 16 | 24 | 24 | 24 |
| $\theta_r$(°) | 9 | 11 | 13 | 15 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 |

其中,$\theta_t$、$\theta_r$ 分别为发射波束、接收波束与天线法向的夹角。

## 3 模拟扫描方案

### 3.1 真实场数据的获得

选取一次真实的降水过程的多普勒雷达扫描数据,采用双线性插值算法,将其从极坐标插值到笛卡尔坐标系,形成空间分辨率为 1 km 的三维格点回波强度值。进一步对其 $X$、$Y$、$Z$ 方向采用双线性插值,将其插值到空间分辨率为 100 m 的网格,形成空间分辨率密集的降水数据。空间分辨率为 100 m 的降水数据可以满足模拟的要求,将此数据作为真实的云数据,设置雷达距离真实云团的位置为 10 km,云团的起始高度为 500 m,模拟 S 波段相控阵天气雷达与 S 波段多普勒天气雷达对其进行扫描,分析其扫描值的差异。

### 3.2 S 波段多普勒天气雷达的模拟扫描

天气雷达的波束都有一定的宽度和长度,雷达探测的回波强度实际上是散射体内一定体积的不同位置反射率因子以天线增益为权重的加权平均结果。在此假设所扫描的降水回波内云是不均匀的情况,$Z_{\mathrm{real}}$ 表示在散射体内不同位置的云的反射率因子,$Z_{\mathrm{sa}}$ 表示实际 S 波段多普勒雷达扫描的结果,则 $Z_{\mathrm{sa}}$ 可表示为(刘黎平, 2002)

$$Z_{\mathrm{sa}}=\iiint Z_{\mathrm{real}}(\theta,\phi)G(\theta-\theta_0,\phi-\phi_0)\mathrm{d}\theta\mathrm{d}\phi\mathrm{d}r\Big/\left[\iiint G(\theta-\theta_0,\phi-\phi_0)\mathrm{d}\theta\mathrm{d}\phi\mathrm{d}r\right] \tag{13}$$

式中,$\theta_0$、$\phi_0$ 是雷达天线法向的方位和仰角,$\theta$、$\phi$ 是散射元的方位和仰角,$G$ 为天线增益。$G$ 采用了 Donaldson(1964)给出的表达式

$$G=10^{-0.6(\frac{\theta}{\theta_0})^2}+10^{-4}\times10^{-2.4\times\frac{(\theta-4\theta_0)^2}{\theta_0{}^2}}+4\times10^{-6}\times10^{-2.4\times\frac{(\theta-6\theta_0)^2}{\theta_0{}^2}}+10^{-6}\times10^{-2.4\times\frac{(\theta-8\theta_0)^2}{\theta_0{}^2}} \tag{14}$$

式中,$\theta$ 表示散射体内体元和雷达天线的连线与天线法向的夹角,$\theta_0$ 为天线的波束宽度。雷达波的能量主要集中在波瓣宽度以内,$\theta$ 越大,雷达波的能量就越小,$G$ 也越小。对于 S 波段多普勒天气雷达,选取其波瓣宽度近似为 1°。

### 3.3 S 波段相控阵天气雷达的模拟扫描

对于 S 波段相控阵天气雷达其雷达探测的回波强度仍然是散射体内一定体积的不同位置反射率因子以天线增益为权重的加权平均的结果。由于该相控阵天气雷达在水平方向上采用机械控制扫描,在垂直方向采用相位控制扫描,因此其水平方向波束宽度是不变的,垂直方向上波束宽度随着仰角的改变而改变。因此其增益也是随着仰角的改变而改变。又由于该相控阵天气雷达在发射时采用 8°宽波束,接收时采用 4 个 3.12°的窄波束进行接收,其收发增益是不同的,其取样体积应按照接收波束来计算。$Z_{\mathrm{real}}$ 表示在散射体内不同位置的云的反射率因子,$Z_{\mathrm{phase}}$ 表示实际 S 波段相控阵天气雷达扫描的结果,则 $Z_{\mathrm{phase}}$ 可表示为

$$Z_{\mathrm{phese}}=\iiint Z_{\mathrm{real}}(\theta,\phi)G_{\mathrm{t}}(\theta-\theta_0,\phi-\phi_0)\cdot G_{\mathrm{r}}(\theta-\theta_0,\phi-\phi_0)\mathrm{d}\theta\mathrm{d}\phi\mathrm{d}r\Big/\left[\iiint G_{\mathrm{t}}(\theta-\theta_0,\phi-\phi_0)G_{\mathrm{r}}(\theta-\theta_0,\phi-\phi_0)\cdot\mathrm{d}\theta\mathrm{d}\phi\mathrm{d}r\right] \tag{15}$$

式中,$G_{\mathrm{t}}$ 为天线发射增益,$G_{\mathrm{r}}$ 为天线接收增益。

由于天线水平方向波束宽度保持不变,则 $\frac{1}{\theta_{\mathrm{u}}\varphi_{\mathrm{v}}}=\frac{\cos\theta_\varphi}{\theta_{\mathrm{u0}}\varphi_{\mathrm{v0}}}$。

天线增益如式(9)、(10)所示,对于该相控阵雷达,假设频率偏移达到 $10^{-11}$ 数量级,因此,$\lambda_0/\lambda$ 可以忽略不计。从而得到 $G_{\mathrm{t}}=G_{\mathrm{t0}}\cos\theta_{\mathrm{t}}$,$G_{\mathrm{r}}=G_{\mathrm{r0}}\cos\theta_{\mathrm{r}}$,式中,$G_{\mathrm{t0}}$、$G_{\mathrm{r0}}$ 分别为收发波束天线法相上的增益。天线法线波束增益可以用实际法线方向的波束宽度来表示(Merrill, 2003),$G\approx\frac{32000}{\theta_{\mathrm{u0}}\varphi_{\mathrm{v0}}}$,其中,$\theta_{\mathrm{u0}}$、$\varphi_{\mathrm{v0}}$ 为法向方向上水平和垂直波束宽度。

按照表 2 所示的取值空间,即可得到 18 个区域的接收和发射增益 $G_{\mathrm{t}}$、$G_{\mathrm{r}}$。

假设 S 波段相控阵雷达的副瓣足够的低,在模拟的时候不考虑天线副瓣的影响。

## 4 模拟扫描结果

选取 2005 年 3 月 22 日广州雷达的一次飑线过程的天气雷达数据,将其采用双线性插值的方法插成空间分辨率为 100 m 的三维格点数据,此云团范围为(25.65°—26°N,116.45°—116.85°E),云团的起始高度为 500 m 。将此数据作为真实场数据分别模拟天气雷达与相控阵雷达对其进行扫描进而分析其扫描的回波情况,模拟扫描时雷达距离回波的位置设定为 10 km。

### 4.1 水平结构模拟

图 3a 为 5 km 高度上的真实场,图 3b 为多普勒天气雷达模拟扫描的回波情况,图 3c 为 S 波段相控阵天气雷达模拟扫描的情况。选择 5 km 高度主要考虑由于真实场数据是采用雷达体扫数据插值得来的,在下层的数据分辨率不够,而且有可能会有地物杂波的影响,而 5 km 处在中间层可以反映出云团内部的情况。

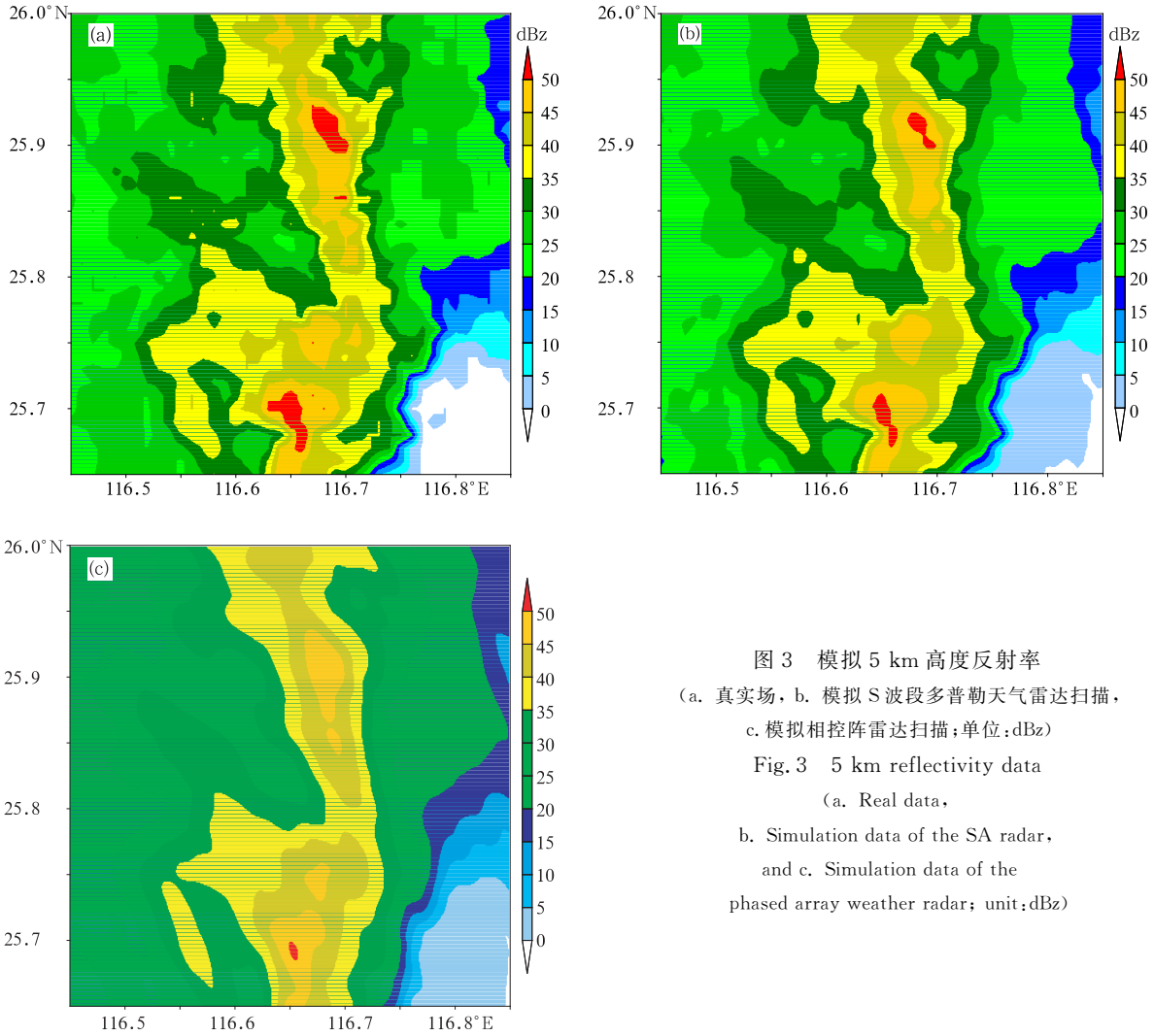



图 3 模拟 5 km 高度反射率
(a. 真实场, b. 模拟 S 波段多普勒天气雷达扫描,
c. 模拟相控阵雷达扫描;单位:dBz)
Fig. 3 5 km reflectivity data
(a. Real data,
b. Simulation data of the SA radar,
and c. Simulation data of the
phased array weather radar; unit:dBz)

从图 3 可以粗略地看出天气雷达与“真实场”的结构基本一致,只是边缘略有平滑,中强回波的面积有一定的减小。S 波段相控阵雷达扫描回波的形状和真实场基本一致,但在很大程度上平滑了云的反射率因子的结构,扩大了云的面积。反射率的观测最大值小于真实值,同时小的回波中心也消失了。

通过统计不同强度回波的点数,得到对于天气雷达和相控阵天气雷达模拟扫描回波的统计数据。相对于真实值,天气雷达与相控阵天气雷达扫描数据 10—40 dBz 的回波分别增加了 3%和 7%,大于 40 dBz 的回波分别减小了 4%和 18%。最强回波点,天气雷达相比于真实值减小了 2 dBz,该相控阵雷达减小了 6 dBz。从统计数据中可以看出相对于天气雷达,相控阵雷达对回波有明显的平滑作用,同时减小了强回波和极弱回波的面积,增大了中间强度回波的面积。

降水强度的雷达估测值 $R$ 和反射率因子 $Z$ 的关系为非线性关系,相控阵雷达对云和降水回波的平滑必然引起雷达观测面积积分降水量的误差。对于此次强对流降水,假设 $Z$-$R$ 关系为 $Z=486R^{1.37}$,相

对于真实场数据,天气雷达与此 S 波段相控阵天气雷达探测到的反射率因子估测的面积积分降水量分别为真实值的 99%和 95%。

### 4.2 垂直结构模拟

图 4 为沿 $x=20$ km 上做的 RHI 剖面真实场以及模拟的多普勒天气雷达与 S 波段相控阵雷达扫描的结果,图 4a 是模拟的真实回波值,图 4b 是模拟天气雷达扫描得到的回波值,图 4c 是模拟相控阵雷达扫描得到的回波值。从图中可以看出,天气雷达扫描的回波值与"真实场"的结构基本一致,只是平滑了回波的边缘,中心强度回波的面积有一定的减小。S 波段相控阵雷达扫描的回波值的形状相对于真实值有了很大的平滑,回波中心强度有所减弱,平均回波高度也有所增加。

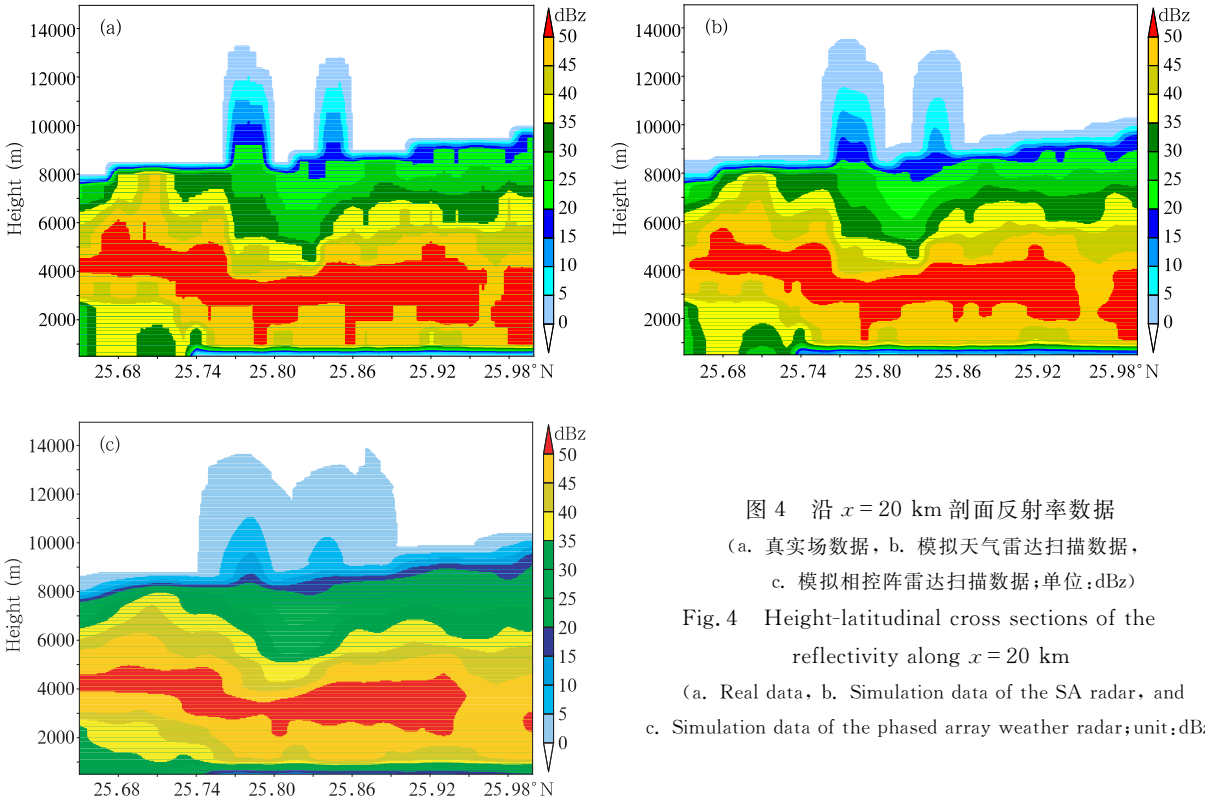



图 4 沿 $x=20$ km 剖面反射率数据

(a. 真实场数据, b. 模拟天气雷达扫描数据,
c. 模拟相控阵雷达扫描数据;单位:dBz)

Fig. 4 Height-latitudinal cross sections of the reflectivity along $x=20$ km

(a. Real data, b. Simulation data of the SA radar, and c. Simulation data of the phased array weather radar; unit: dBz)

对两部雷达模拟扫描的回波值与真实值进行统计比较,结果表明,相对于真实值,天气雷达与 S 波段相控阵天气雷达扫描到的回波值,10—40 dBz 的回波面积分别增加了 5%和 14%,大于 40 dBz 的回波面积分别减小了 6%和 28%。由于该相控阵雷达收发波束特性的影响,其对回波的平滑作用是非常明显的,相对于天气雷达,它在减小了极弱回波与强回波面积的同时,增加了中间强度回波的面积,尤其对一些小的云体,云体越小其平滑作用越明显,这与前面水平结构模拟的结果是一致的。

选取强中心(25.86°N,116.54°E)做垂直廓线(图 5),图 5a 是天气雷达扫描与真实值的对照曲线,其中,$X$ 为反射率强度,$Y$ 为对应高度,虚线为真实值,实线为天气雷达模拟扫描值,从图中可以看到天气雷达模拟扫描值随高度的变化趋势与"真实"结果比较一致,由于其平滑作用在强中心点处回波强度有所降低。图 5b 是 S 波段相控阵天气雷达与真实值的对照曲线,其中实线为相控阵雷达模拟扫描结果,虚线为真实值。由于相控阵雷达的平滑作用,使回波强度在 2 km 以下大于真实值,2 km 以上小于真实值,从图中可以看到,相控阵雷达扫描得到的回波曲线较为平滑,一些强的回波中心被平滑掉了,中心回波强度相对于真实值约减弱了 5 dBz。

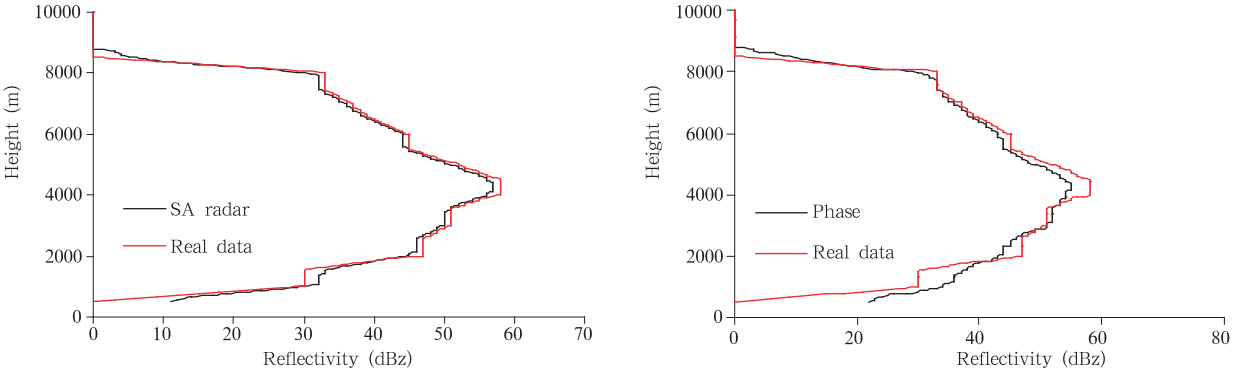



图 5 经过强回波中心的垂直廓线

(a. S 波段多普勒天气雷达模拟扫描与真实值, b. 相控阵天气雷达模拟扫描与真实值对比)

Fig. 5 Radar reflectivity vertical profiles through the center of strong echoes

(a. Comparison of the SA radar data with the real data, and b. Comparison of the phased array weather radar data with the real data)

## 5 结论和讨论

本文以多普勒天气雷达与中国气象科学研究院国家灾害天气重点实验室和中国电子科技集团南京第 14 研究所联合研制的 S 波段相控阵天气雷达为例,利用数值模拟的方法模拟了由于波瓣宽度、天线增益、距离等因素引起的两种雷达观测云和降水结构的误差,得到的初步结论如下:

(1) 该相控阵天气雷达采用宽波束发射多波束接收,由于其在垂直方向采用相位控制扫描,其增益和波束宽度随着仰角而发生变化。相对于天气雷达,在提高扫描速度的同时,也扩大了空间数据的采样体积,在某种程度上牺牲了雷达的空间分辨率。

(2) 该相控阵雷达对回波水平方向上的平滑作用在一定程度上改变了回波的结构,减弱了回波的中心强度,使一些小的强回波中心消失。相对于天气雷达,减少了极弱回波与强回波的面积,增加了中间强度回波的面积。

(3) 该相控阵雷达对回波的平滑作用在垂直方向上也改变了回波的平均高度与变化趋势,单体中心回波强度相对于真实值有所减弱,一些较强的单体中心被平滑掉了。

(4) 该相控阵雷达显著增加了中间强度回波的面积,使面积积分降水量有所变化。

以上结果是针对一个 40 km 尺度的回波进行分析研究的,很明显,强回波中心面积越小,该相控阵雷达的平滑作用越明显。本文在模拟时没有考虑副瓣对扫描的影响,由于该相控阵雷达的副瓣相对于天气雷达提高了很多,因此在实际应用中,副瓣的影响要予以考虑。

从模拟结果可以看出,该相控阵天气雷达采用宽波束扫描,大大减少了扫描时间,但是,其空间分辨率相对于常规多普勒天气雷达有明显的降低。要在不牺牲其扫描速度的情况下提升分辨率,必然要增加其阵面的水平和垂直收发单元,从而大大提高相控阵雷达的成本。因此,针对该相控阵雷达的波束特性,可以牺牲一部分扫描速度,提高其空间分辨率。有如下两种方法,一种是减小发射波束的宽度,发射时采用和接收时一样的波束宽度(3.12°)。另一种是减小波束间的间隔,之前的扫描模式是一次抬升 8°的仰角,改为一次抬升 1°仰角或更小,其水平方向同样是一次移动 1°方位角或更小,这样大大增加了波束的扫描密度,可以获得相对精细的结构。该相控阵天气雷达还处在研究阶段,究竟使用何种扫描方式从而获得时间分辨率和空间分辨率的均衡,是下一步实际应用中需要讨论的问题。

## 参考文献

刘黎平. 2002. 热带测雨卫星的星载雷达和地基雷达探测云回波强度及结构误差的模拟分析. 气象学报, 60(5):568-574

郑媛媛,俞小鼎, 方翀等. 2004. 一次典型超级单体风暴的多普勒天气雷达观测分析. 气象学报,62(3):317-328

张培昌,杜秉玉,戴铁丕. 2001. 雷达气象学. 北京:气象出版社, 182-183

Merrill I Skolnik. 2007. 雷达手册. 北京:电子工业出版社, 242-255

Donaldson R J. 1964. A demonstration odd antenna beam errors in radar reflectivity patterns. J Appl Meteor,3: 611-623

Elliott R S. 1981. Antenna theory and design. englewood Cliffs. NJ: Prentice-Hall, 200-206

Leslie R Lemon. 2003. The US national weather radar testbed (phased array): potential impact on aviation // Preprints, 31st International Conference on Radar Meteorology. Boston: American Meteorological Society,