

相控阵天气雷达与多普勒雷达的 探测精度与探测能力对比研究

杨金红^{1,2} 高玉春^{3,4} 程明虎^{1,4}

(1. 中国气象科学研究院, 北京 100081; 2. 南京信息工程大学;
3. 中国气象局大气探测技术中心; 4. 北京邮电大学)

提 要: 相控阵技术应用到大气探测领域是一项崭新的课题, 国外已开展了此项研究。为了研究相控阵天气雷达在大气探测领域的探测能力和探测精度, 使用美国相控阵天气雷达与多普勒天气雷达同步探测的两次强天气资料, 分析比较了两部不同扫描体制雷达的径向探测精度、切向探测精度、扫描时间、灵敏度以及在探测强风暴反射率因子特征、径向速度和超级单体的演变过程。结果表明: 电扫描雷达的探测精度会随着波束指向角的变化而变化, 而多普勒雷达在整个扫描范围内不随扫描方向角的改变而改变。相控阵天气雷达的切向分辨率比多普勒雷达低, 提出了在方位上采用窄波束、俯仰方向上采用宽波束扫描, 同时在接收时采用多个窄波束覆盖发射波束的接收方法。将存在模糊的速度场恢复为连续的速度场然后再对速度数值进行调整的退模糊方法也能剔除波束多路转换扫描方式下的速度模糊现象。

关键词: 相控阵天气雷达 探测精度 探测能力 扫描体制 退模糊

A Comparative Study of Detection Precision and Capacity between Phased Array Weather Radar and Doppler Weather Radar

Yang Jinhong^{1,2} Gao Yuchun^{3,4} Cheng Minghu^{1,4}

(1. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081; 2. Nanjing University of Information Sciences and Technology;
3. Atmosphere Observation Technology Center, CMA; 4. Beijing University of Posts and Telecommunications)

Abstract: Application of phased array technology to detecting atmosphere is a new subject. By using the data of phased array weather radar and Doppler weather radar, both obtained from a severe tornado and a squall line on 30 May and 2 June 2004 respectively, the radial detection precision, tangential detection precision, scanning time, sensitivity, and reflectivity,

资助项目: 财政部行业专项“相控阵天气雷达系统关键技术研究”(GYHY(QX)2007-6-2) 国家自然科学基金项目
(40575009)

收稿日期: 2007年10月11日; 修定稿日期: 2008年1月22日

radial velocity, the life time of super-cell were compared to investigate their detecting ability and detecting precision. Results show that detection precision of phased array radar will change with the changes of scanning direction angle because of the changes of phase scanning antenna beam width. Detection precision of Doppler weather radar will have a little change at the whole scanning coverage. Tangential resolution of phased array radar is lower than that of Doppler radar. In order to improve its resolution and reduce the scanning time, an effective scanning method of phased array radar is provided, which uses a transmitted wider beam in pitch and narrower in azimuth, and multi received beams to overlap transmitted beam. This scanning method can largely reduce scanning time, improve reflectivity signatures and detect the evolution of severe storm in detail. A simple dealiasing velocity ambiguity method can also eliminate the ambiguity of velocity from beam multiplexing scanning.

Key Words: phased array weather radar detection precision detection ability scanning system eliminate ambiguity velocity

引 言

近年来布网的多普勒天气雷达在灾害性天气监测、预报和预警方面发挥了重要的作用^[1]。但是,冰雹、雷雨大风、短时强降水等强对流天气的发生发展突发性和局地性很强^[2]。目前,多普勒天气雷达还不能进行有效的监测,原因是现有体制的雷达为机械扫描,扫描速度慢,完成一个精度不太高的体扫时间需要5~6分钟,不能满足短时强天气监测与预报的需要。相控阵雷达(PAR, Phased array radar)采用电扫描方式,可形成多个波束,能够在不到1分钟之内完成一次数据信息更新^[3],比现有天气雷达每6分钟更新一次来说无疑是巨大的进步。2003年,美国开始将用于军事目的的退役相控阵雷达天线用于大气探测研究^[4-8],采用WSD-88D的发射机,新改装的相控阵天气雷达安装在Oklahoma州的Norman市,并进行了观测试验。Travis等^[9]研究了发生微下击暴流的一些前期征兆,指出使用PAR资料很容易识别和确定微下击暴流。Pamela等^[10]研究了冰雹核的快速演变和消亡过程以及产生的三

体散射,指出快速扫描的资料能够得到冰雹的增长、衰减和消亡的精细过程,但未对相控阵天气雷达的探测精度和探测能力做过对比研究。使用美国新改装的相控阵天气雷达(PAR)与多普勒天气雷达(KTLX)同步获取的强风暴资料研究相控阵天气雷达的探测精度和探测能力,对我国今后开展相控阵天气雷达的研究工作是有意义的。

1 相控阵天气雷达与多普勒天气雷达的异同

相控阵天气雷达与常规的多普勒天气雷达都包括发射机、接收机、天线。它们对降水目标的探测原理都是雷达朝一定的方向发射电磁波,当电磁波脉冲遇到降水物质(雨滴、雪花和冰雹等)时,其向后散射的能量回到雷达天线,被雷达所接收,这是二者的相同之处。不同的是两种雷达的天线结构,相控阵天气雷达的天线采用平面阵列形式(如图1b),由大量的辐射单元按一定的规则排列组成,各个辐射单元发射的信号聚集于空间某一方向,形成方向性极强的发射波束,波束指向是依靠发射信号相位差而改变。相控阵雷达可形成多个独立的波束以同时探测多个

目标,大大提高数据的采集率^[11],其天线一般都固定不动,因此也就无惯性,能够对目标精确定位,但是这样一个平面阵列天线限制了它的扫描范围,最大范围为 $\pm 60^\circ$,为了完成方位 360° 扫描,天线一般采用 $3\sim 4$ 个阵面或者在方位上采用机械转动。美国的PAR天线是退役的宙斯盾SPA-1天线,由4个阵面组成,目前只有一个阵面用作探测气象目标,依靠机械转动完成方位 360° 扫描,可在1分钟之内完成一个体扫。常规的多普勒天气雷达天线采用抛物面形(如图1a),波束的方位和俯仰扫描都采用机械转动天线来完成且具有惯性,波束的转换速度受到天线机械转动的限制,一般为每秒钟 36° ,在 $5\sim 6$ 分钟内完成一个体扫描,且不易形成多波束,采用单波束发射单波束接收。两部雷达的一些参数见表1。

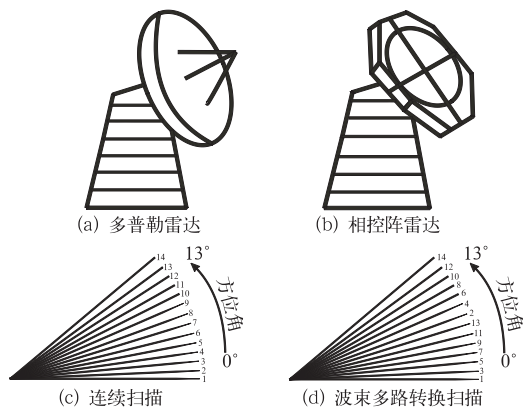


图1 两部雷达的天线结构及波束扫描方式示意图

表1 相控阵天气雷达与多普勒雷达参数

相控阵天气雷达(PAR)	多普勒天气雷达(CINRAD/SA)
平面阵列	4325个阵元
波束宽度	$1.5\sim 2.1^\circ$
方位扫描范围	$\pm 45^\circ$
机械转动天线完成 360°	方位扫描范围 360° 连续转动
转速 $18^\circ/\text{秒}$	转速 $30^\circ/\text{秒}$
阵面倾斜 10°	
波长 9.375cm	10cm

天线的结构不同,则两部雷达的扫描方式也就不同。相控阵天气雷达的天线扫描采用多波束转换扫描方式^[12](如图1d所示),在发射脉冲时,首先在 0° 的位置发射一对脉冲(发射一对脉冲是为了径向速度估计),接着转向 7° 的位置再发射一对脉冲,再转向 3° 的位置,依次类推,当这14个方位的脉冲数全部发射完后,再返回到 0° 的位置发射脉冲,循环往复,直到每个方位上达到所需的脉冲数。这个 14° 的扇形扫描完成后,再接着进行下一个扇形扫描以达到全方位 360° 的扫描。而多普勒天气雷达采用连续扫描方式如图1c所示,即先在 0° 的位置一次发射完所需的脉冲数后,再转向 1° 的位置,依次类推直到 360° 方位全部扫描完成。

2 比较与分析

2.1 波束宽度变化情况比较

美国相控阵天气雷达(PAR)的波束宽度变化范围为 $1.5\sim 2.1^\circ$,多普勒天气雷达(KTLX)的波束宽度变化范围为 $0.9\sim 1.01^\circ$,两者的波束宽度随扫描方向角的变化情况如图2,相控阵天气雷达的波束宽度随扫描方向角的变化呈抛物线形,当波束指向天线阵面法线方向时波束宽度最小,当波束指向偏离阵面法线方向时随着指向角的增大波束宽度也随之增大,表现在图中也就是在方位 355° (图2a)和 20° 、 100° 、 200° 、 280° (图2b)处波束宽度最小,在方位 310° 、 40° (图2a)和 65° 、 155° 、 245° 、 335° (图2b)处波束宽度最大,而多普勒天气雷达的波束宽度在整个扫描方位角范围内基本保持不变,维持在 1° 左右。波束宽度的变化必然影响到在同一距离处有效照射体积的变化,也就影响到雷达的探测精度。

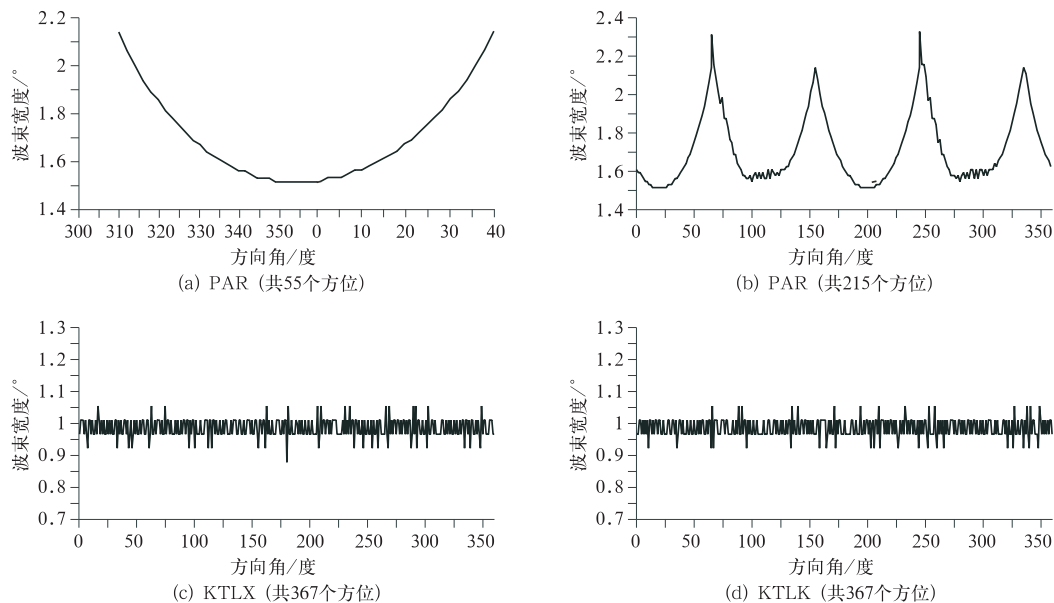


图2 波束宽度随扫描方向角的变化曲线图

(a)、(c)分别为PAR雷达和KTLX雷达于2004年5月30日探测龙卷过程使用的波束宽度
(b)、(d)分别为PAR雷达和KTLX雷达于2004年6月2日探测飮线过程使用的波束宽度

2.2 径向探测精度比较

众所周知,雷达显示器上每个亮点都是一个有效照射体积(也就是采样体积)中降水粒子共同作用的结果。显示器上观测到的某一位置上的 Z 值,实际上也是这个体积内的平均值,当这个体积增大时,雷达探测到的 Z 值是这个更大体积内综合平均的结果,则在显示器上观测到的被平均化了的 Z 值将比该高度上真正的 Z 值更偏小^[13]。因此分析这个体积的变化情况可以反映雷达径向探测精度的高低。两部雷达采样体积在不同距离处的变化情况见图3(见彩页)。从图中可以看出,PAR雷达的采样体积在某一距离处随波束扫描方向角的变化情况同波束宽度的变化情况一样呈抛物线形,当波束指向垂直于阵面时(表现在图3中也就是在方位 20° 、 100° 、 200° 、 280° 处),采样体积最小,也就是探测精度最高,而在偏离阵面法线两侧,随着偏向角的增大,采

样体积也增大,也就是探测精度降低。KTLX雷达的采样体积在某一距离处不随方位的改变而变化而变化,也就是说它的探测精度在某一距离处是基本不变的,它的采样体积只随距离的增大而降低。从图3(见彩页)整体来看,在相同距离处,PAR雷达的采样体积比KTLX雷达要小,只是在波束宽度较大的几个方位处要稍大些,可见,PAR雷达的径向探测精度要比KTLX雷达高。

2.3 切向探测精度比较

雷达发射的波束都具有一定宽度,正是这个宽度的存在,使得雷达波束在作水平扫描时造成真实目标物在切向的探测误差。PAR雷达的波束宽度又会随着扫描方向角的变化而变化,那么它的切向探测误差又会如何呢?对于强雷暴这个切向探测误差的表达式^[13]为:

$$\frac{\theta}{2} \times \frac{2\pi}{360} \times R$$

R 为雷达与目标物之间的径向距离。

两部雷达产生的切向探测误差变化情况如图 4(见彩页)。从图可以看出,PAR 雷达的切向探测误差变化曲线也是呈抛物线形,在波束指向阵面法线方向时,切向探测误差最小,而随着扫描方向角的变化切向探测误差也随之增大;KTLX 雷达的切向探测误差在某一距离处随着扫描指向角的变化基本保持不变;在同一距离处,PAR 雷达的切向探测误差都要比 KTLX 雷达的大,在近距离(100km 以内)处,PAR 雷达的切向探测误差大约是 KTLX 雷达的 1~2 倍,而在远距离(100km 以外)处,PAR 雷达的切向探测误差远远大于 KTLX 雷达。

相控阵天气雷达带来的这些误差都是由于波束加宽后而产生的,且相控阵天气雷达的波束宽度还会随着扫描指向角的变化而发生改变。为了尽可能减小探测误差,提高雷达的探测精度,就必须减小波束的宽度,但是波束宽度越窄,所要求的天线辐射单元越多,天线的体积越庞大,难于实现。为了缩短探测周期,利用相控阵雷达可形成多波束的优势,在方位上采用窄波束、俯仰上采用宽波束发射,同时在接收时采用多个窄波束覆盖发射波束的接收技术。

2.4 扫描时间对比

相控阵天气雷达与多普勒天气雷达对两次强风暴的观测时间如表 2。由于相控阵天气雷达的电子波束采用扇形扫描和多波束扫描,比起 KTLX 雷达的圆锥扫描来说,扫描完特定的区域所需时间相对短些。如表 2 中 5 月 30 日的龙卷过程,扫描的扇形区域是从方位 $310^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 共 55 个方位、9 个仰角大约 25 秒就可完成;而同样的天气过程,KTLX

雷达却需要用 4 分 13 秒才能完成 360 个方位、14 个仰角的体扫。6 月 2 日的飊线过程,两部雷达的扫描区域都是从 $0 \sim 360^{\circ}$,相控阵天气雷达用了 96 秒就完成了这样一个体扫,KTLX 雷达却用了 4 分 14 秒。可见,相控阵天气雷达的扫描周期比多普勒天气雷达的扫描时间短得多。

表 2 相控阵天气雷达与多普勒天气雷达
观测时刻对比

	5 月 30 日	6 月 2 日
PAR	方位 $310^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 的扇形扫描, 9 个仰角每个体扫用时 25s	360° 的扇形扫描, 9 个仰角, 每个体扫用时 96s
KTLX	360° 的连续扫描, 14 个仰角, 每个体扫用时 4 分 14 秒	360° 的连续扫描, 14 个仰角, 每个体扫用时 4 分 14 秒

2.5 灵敏度比较

虽然弱信号对降水测量的贡献可以忽略,但也是真实信息的反应^[14]。这里分别选取了 2004 年 5 月 30 日和 6 月 2 日两个个例在 1km 等高面上的反射率因子分布图(如图 5)。从图中可看出两条分布曲线基本吻合,但是在图 5a 中小于 50dBz 的区域中,KTLX 雷达探测到的像素点数量要比 PAR 雷达多;同样在图 5b 中小于 30dBz 的区域中,KTLX 雷达探测到的像素点数量比 PAR 雷达多;在两幅图中大于 50dBz 的区域中,两部雷达探测到的像素点数基本一样。可见快速扫描的 PAR 雷达对探测大于 50dBz 的反射率因子与 KTLX 雷达有较好的一致性,而对于强度较低的反射率因子 KTLX 雷达所观测的值占的比重要比 PAR 雷达成大。

3 高时空分辨率资料的应用

美国相控阵天气雷达(PAR)位于 $35.24^{\circ}\text{N}, 97.46^{\circ}\text{W}$,多普勒天气雷达(KTLX)位于 $35.33^{\circ}\text{N}, 97.28^{\circ}\text{W}$,它们的天线架设高度分别为 13m 和 384m,根据雷达的测高计

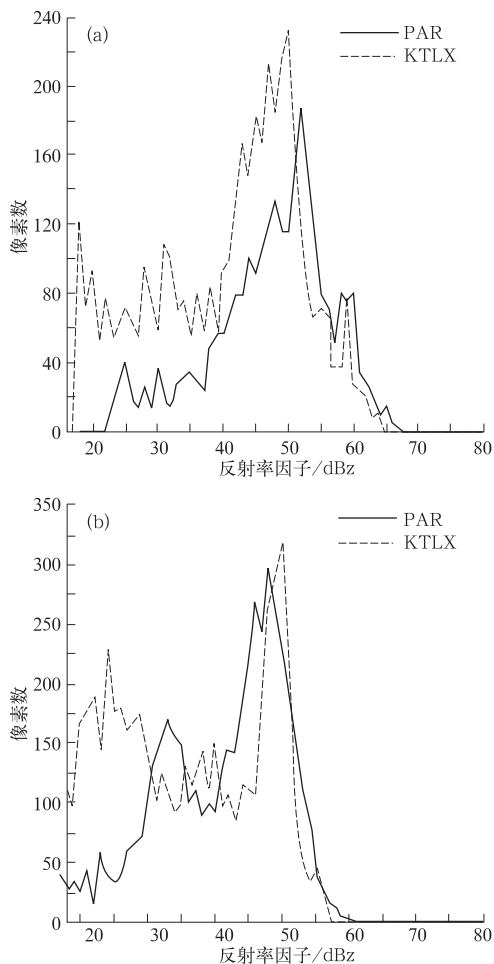


图5 2004年5月30日(a)和6月2日(b)两部雷达1km等高面上的反射率因子分布图

算公式,PAR雷达的 0.75° 仰角和KTLX雷达的 0.5° 仰角在140km范围内的探测高度最大误差367m,因此对PAR雷达 0.75° 仰角和KTLX雷达 0.5° 仰角探测的反射率因子和径向速度图可近似对比。

3.1 探测强反射率因子和多普勒速度特征

由前面的分析中可知,PAR雷达的径向探测精度比KTLX雷达高,两部雷达不同扫描体制所探测到的反射率因子如图6(见彩页)所示。可以看出两者在探测龙卷的钩状回波特征时基本一致。只是由于PAR雷达

的采样体积比KTLX雷达的小分辨率高,所探测得到的反射率因子图比KTLX雷达更加清晰。图7(见彩页)是两种不同扫描体制雷达2004年6月2日探测的一次强风暴的径向速度图。两部雷达探测到风场结构基本一致,在低层风向都为东北—西北走向,在雷达的西北处都存在风向的辐合。只是由于PAR雷达的库长为240m,KTLX雷达的库长为250m,从径向上,两者的库长基本相当,但是PAR雷达的方位分辨率不如KTLX雷达,从图7a和b中可看出,KTLX雷达观测到的径向速度在方位上要比PAR雷达精细些,图7b中还可看出,PAR雷达由于采用了完全不同于KTLX雷达的扫描方式,其观测到的径向速度出现的模糊现象比KTLX雷达观测到的要严重,图中以白色的圆圈表示,图7c是采用了一种简易的速度模糊纠正技术^[15]后得到的径向速度图,即首先将存在模糊的速度场恢复为连续的速度场,然后对其速度数值是否存在整体偏移做出判断和调整。可以看出,这种简易的退速度模糊法也可去除波束多路转换扫描方式下出现的速度模糊现象。

3.2 探测风暴演变特征

从两部雷达的扫描时间对比中可知,PAR雷达能够在不到1分钟时间内完成一次数据的更新,而KTLX雷达却需要4分多钟的时间。在图8(见彩页)中,列出了21:31:34—21:40:02两部雷达同时探测风暴的时间序列,在这段时间内,KTLX雷达完成了两个体扫,PAR雷达完成了五个体扫,飊线上的单体经历了分裂、合并,并逐渐向南运动。在靠近雷达的两个单体,两部雷达都观测到了分裂过程,首先在两部雷达的起始阶段,两个单体有分裂的趋势,到了PAR雷

达下一次体扫时间 21:34:42, 已观测到这两个单体完全分裂开了, 而 KTLX 雷达在下次体扫时间 21:35:48 才观测到; 到了 PAR 雷达的第五个体扫时间 21:39:36, 观测到了左边第二、第三个单体上已分裂成一个个小的单体, 且第二、第三个单体有合并的趋势, 而 KTLX 雷达在每三个体扫时间 21:40:02 才观测到。可见, 快速扫描的 PAR 雷达能够探测到超级单体的精细演变过程, 能够提高灾害性天气的预警时间。

4 结 论

本文通过对 PAR 雷达与 KTLX 雷达同时探测到的两个个例资料的分析与比较, 得出以下初步结论:

(1) 相控阵雷达在扫描过程中, 波束宽度会发生改变呈抛物线形, 且变化的幅度比 KTLX 雷达大, 在波束指向阵面法线方向时, 波束宽度最小, 随着偏离阵面法线角度的增大波束宽度也随之增大。

(2) 相控阵天气雷达的径向探测精度、切向探测精度也会随着方向角的变化而变化, 当波束指向阵面法线方向时精度最高, 在偏离阵面法线时, 精度逐渐降低, 而多普勒雷达在整个探测周期内, 其探测精度不随扫描方向角的改变而改变。

(3) 相控阵天气雷达的切向分辨率比多普勒雷达低, 提出了在方位上采用窄波束、俯仰方向上采用宽波束扫描, 同时在接收时采用多个窄波束覆盖发射波束的接收方法。

(4) 相控阵天气雷达对探测大于 50dBz 的反射率因子与 KTLX 雷达有较好的一致性, 而对于强度较低的反射率因子 KTLX 雷达所观测的值占的比重要比 PAR 雷达大。

(5) 高时空分辨率资料能够提高强反射

率因子特征以及风暴发生发展的精细演变过程。在探测径向速度方面, 波束多路转换扫描方式下得到的速度图像模糊现象较连续扫描严重。将存在模糊的速度场恢复为连续的速度场然后再对速度数值进行调整的退模糊方法也能剔除波束多路转换扫描方式下的速度模糊现象。

相控阵天气雷达的快速扫描能够使我们中小尺度天气过程发生、发展以及三维立体结构和动力结构有更好的了解, 但是多波束的同时扫描和多波束转换扫描方式的使用, 使得数据处理更加困难以及会带来一些负面影响, 如多波束扫描会使主波束受到相邻波束的污染等等。因此在今后我国研制相控阵天气雷达中要重点考虑多波束体制下的探测方法、多通道信号处理以及数据处理等。

参考文献

- [1] 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. 1-2.
- [2] 应冬梅, 许爱华, 黄祖辉. 江西冰雹、大风与短时强降水的多普勒雷达产品的对比分析[J]. 气象, 2007, 33(3): 48-53.
- [3] Leslie R Lemon. The U. S. national weather radar test-bed (phased array): potential impact on aviation[C]// Preprints, 31st International Conference on Radar Meteorology. Boston: American Meteorological Society, 2003.
- [4] Douglas E Forsyth, James F Kimpel, Dusan S Zrn-ic, et al. Progress report on the national weather radar tested (phased-array)[C]// Preprints, 21st International conference on interactive information processing systems (IIPS) for meteorology, oceanography, and hydrology. Boston: American Meteorological Society, 2005.
- [5] Douglas E Forsyth, James F Kimpel, Dusan S Zrn-ic, et al. Bulding the national weather radar testbed (phased-array)[C]// Preprints, 19th Conference on interactive information and processing system (IIPS). Boston: American Meteorological Society, 2003.
- [6] Forsyth D E, Kimpel J F, Zrn-ic D S, et al. The na-

- tional weather testbed (phase-array) [C] // Preprints, 18th conference on interactive information and processing system (IIPS). Orlando: American Meteorological Society, 2002: 140-141.
- [7] McNellis Tom, Katz S, Campbell M, et al. Recent Advances in Phased Array Radar for Meteorological Applications[C]//Preprints, 21st International conference on interactive information processing systems (IIPS) for meteorology, oceanography, and hydrology. Boston: American Meteorological Society, 2005.
- [8] Ivan PopStefanija, Andrew Pazmany, ProSensing Inc, et al. An X-Band phased array Doppler weather radar[C] // 31st International Conference on radar meteorology. Boston: American Meteorological Society, 2003.
- [9] Travis M Smith, Pamela L Heinselman, David Priegnitz. Characteristics of Microburst Events Observed with the National Weather Radar Testbed Phased Array Radar[C]//Preprints, 23rd conference on interactive information and processing system (IIPS). Boston: American Meteorological Society, 2007.
- [10] Pamela Heinselman, David Priegnitz, Kevin Manross, et al. Comparison of Storm Evolution Characteristics: The NWRT and WSR-88D[C]//Preprints, 23rd conference on interactive information and processing system (IIPS). Boston: American Meteorological Society, 2007.
- [11] 张光义, 赵玉洁. 相控阵雷达技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006. 25-29.
- [12] Tianyou Yu, Marko B Orescanin, Christopher D Curtis. Beam Multiplexing Using the Phased Array Weather Radar[J]. Atmo Oceanic Technol, 2006, 24(4): 616-626.
- [13] 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕. 雷达气象学[M]. 北京: 气象出版社, 2000: 136-139.
- [14] 王成刚, 葛文忠, 魏鸣. TRMM PR 雷达与阜阳雷达降水资料的对比研究[J]. 遥感学报, 2003, 7(4): 332-337.
- [15] 刘淑媛, 王洪庆, 陶祖钰, 等. 一种简易的多普勒雷达速度模糊纠正技术[J]. 应用气象学报, 2003, 14(5): 111-116.

杨金红等：相控阵天气雷达与多普勒雷达的探测精度与探测能力对比研究

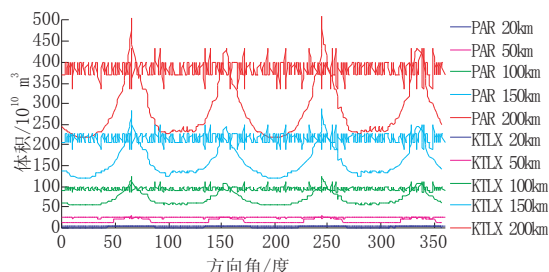


图3 两部雷达的波束有效照射体积随扫描方向角的变化曲线

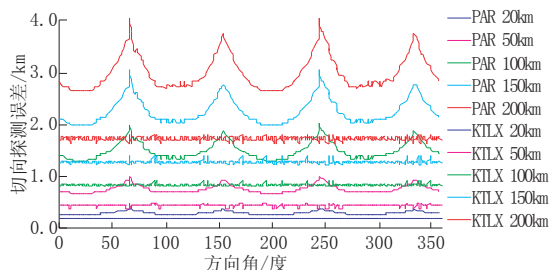


图4 两部雷达的切向探测精度随扫描方向角的变化曲线 (2004年6月2日一次飊线过程)

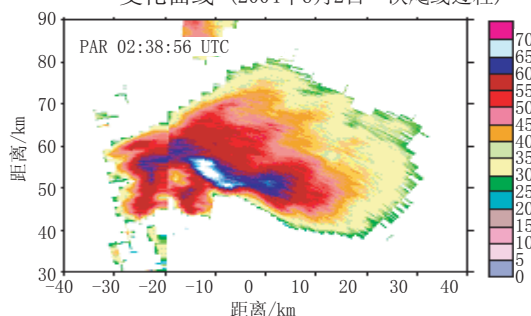
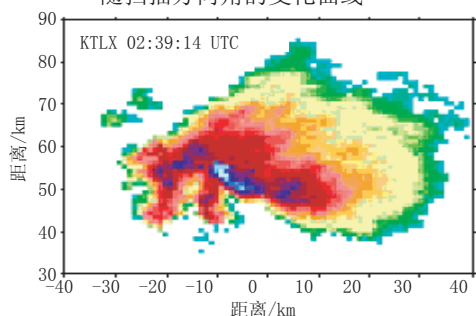


图6 两部雷达2004年5月30日探测的反射率因子图 (PAR:0.75°, KTLX:0.5°)

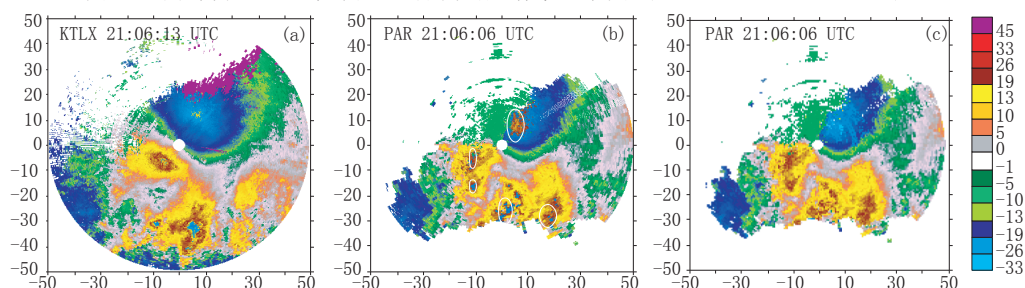


图7 两部雷达2004年5月30日探测的径向速度图 (PAR:0.75°, KTLX:0.5°)

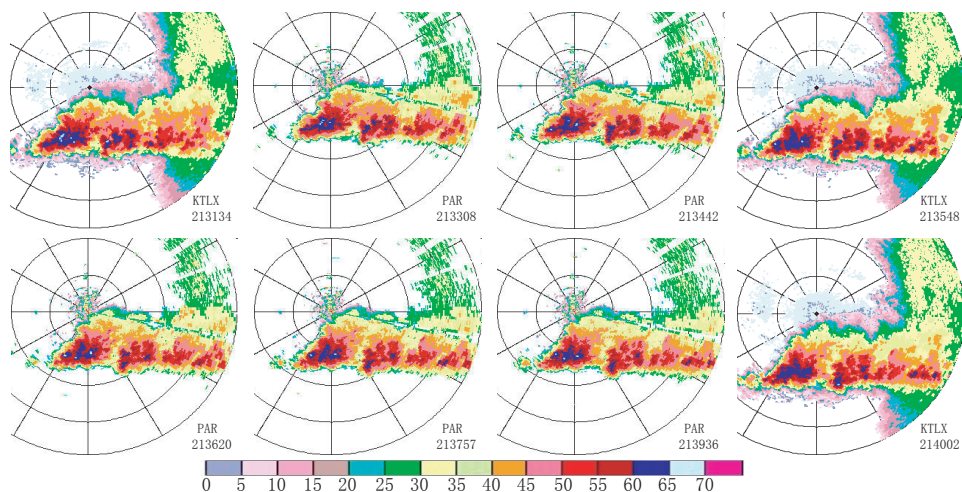


图8 2004年6月2日两部雷达探测一次飊线过程的反射率因子的时间序列图
PAR的仰角为0.75°, KTLX的仰角为0.5°