

李柏, 古庆同, 李瑞义, 等. 2013. 新一代天气雷达灾害性天气监测能力及未来发展. 气象, 39(3): 265-280.

新一代天气雷达灾害性天气监测 能力及未来发展^{* 1}

李 柏¹ 古庆同¹ 李瑞义¹ 曹俊武² 王 旭³

1 中国气象局气象探测中心, 北京 100081

2 合肥四创电子股份有限公司, 合肥 230061

3 成都信息工程学院, 成都 610225

提 要: 自 20 世纪 90 年代, 我国开展大规模新一代天气雷达建设以来, 已初步形成一个对大、中、小尺度灾害性天气监测的天气雷达业务网, 并在防灾减灾中发挥了重要作用。本文利用我国新一代天气雷达网获得的大量实例资料分析了新一代天气雷达在实际应用中对大尺度天气系统如: 冷锋、温带气旋、江淮切变线、低空急流、台风, 中尺度天气系统诸如强对流天气系统的飑线、阵风锋、冰雹和雷暴高压, 以及对我国产生重要影响的梅雨锋暴雨的监测能力。同时分析了现有天气雷达业务观测模式中的扫描策略、雷达适配参数设置以及雷达技术体制的特点与存在的问题。在不对现有雷达技术体制和结构做重大改变前提下, 有针对性提出了: (1) 改进现有业务观测模式: 一是增加晴空模式和 RHI 垂直扫描模式增强对晴空回波以及垂直结构精细化探测能力; 二是增设高山观测模式增强对边界层的探测覆盖能力。(2) 改进雷达适配参数, 采用相位编码技术和双 PRF 技术, 把距离不模糊作为第一优先原则, 来解决多普勒脉冲雷达体制下的距离与速度模糊问题。(3) 增强雷达对弱回波探测能力, 提高雷达的时空分辨率。(4) 充分利用雷达网的组网技术, 开展协同观测实现对大、中、小灾害性天气系统的时间与空间同步观测。(5) 利用双偏振技术, 进一步提高雷达定量估测降水的精度以及对相态的识别。并在上述 5 方面改进的基础上, 提出了目前雷达技术升级改造的初步方案。展望了未来天气雷达技术的发展。

关键词: 天气雷达, 观测模式, 监测能力, 发展

中图分类号: P412

文献标识码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2013.03.001

Analyses on Disastrous Weather Monitoring Capability of CINRAD and Future Development

LI Bai¹ GU Qingtong¹ LI Ruiyi¹ CAO Junwu² WANG Xu³

1 CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081

2 Hefei Sichuang Electronic Co. Ltd., Hefei 230061

3 Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

Abstract: The large-scale CINRAD operational network has been built in China. Using quite a lot of data from the network, this paper analyzed the detection capability of the radar network in monitoring the large-scale weather systems including cold front, extratropical cyclone, Jianghuai shear line, low-level jet stream and typhoon; the mesoscale weather systems such as squall line, gust front, hail and thunderstorm high in severe convective weathers as well as the Meiyu front rainstorm. In addition, the scanning strategy and parameter setting in the CINRAD operation model as well as the features and problems of its technical system were discussed. The progresses are as follows: (1) Improving the existing observation model: Adding clear air mode and RHI vertical scanning mode to strengthen the radar detecting capability to clear air echoes

* “新一代天气雷达建设业务软件系统开发”项目资助

2013 年 2 月 26 日收稿; 2013 年 3 月 4 日收修定稿

第一作者: 李柏, 主要从事天气雷达应用开发与研究工作. Email: libai@cma.gov.cn

and the refinement of vertical structure; setting high-mountain observation mode to enhance the capability to the boundary layer. (2) Improving radar adaption parameter to solve the problem of range folding and velocity ambiguity. (3) Using pulse compression method to develop the detecting capability to weak echoes and keeping spatial resolution of radar data. (4) Making good use of radar networking technology to realize simultaneous observations in time and space on different scale disastrous systems. (5) Using dual-polarization technology to improve the accuracy of quantitative precipitation estimation and identify the precipitation phase state. Based on the above five progresses, a preliminary scheme of radar technology upgrading was proposed. Finally, an outlook for the development of future CINRAD was presented as well.

Key words: weather radar, observation model, detecting capability, development

引 言

2013 年世界气象日的主题是:监视天气,保护生命和财产(Watching the Weather to Protect Lives and Property)。本文通过分析新一代天气雷达灾害性天气监测能力以及未来发展,旨在庆祝始建于 1963 年 4 月的世界天气监视网建立 50 周年。我国从 20 世纪 90 年代中期开始大规模建设具有定量测量降水和获得大气动力场结构能力的数字化全相参多普勒天气雷达网。由于新一代天气雷达具有在线实时定标、全自动体扫描工作模式、较合理的地物杂波抑制以及科学的产品算法等特点,使得在定量测量降水以及对大尺度、中尺度天气系统的结构、演变的监测能力方面得到很大的提高,在社会各个领域得到了广泛的应用。为社会经济发展、保护人民生命财产发挥了重要作用。但是,在长期的实际应用过程中新一代天气雷达也暴露出一些亟待解决的问题。主要表现在中低层垂直分辨率相对较低、在多山地区尤其是高山雷达站采用体扫描模式导致对大气边界层监测范围偏小、距离与速度模糊、对晴空大气和天气系统早期发展中的弱回波的监测能力不足、降水估计存在较明显偏差、组网与协同能力不足等诸多问题。为此本文在分析目前国内外一些已有的成熟技术基础上,提出了在现有雷达体制下,如何改进提高新一代天气雷达探测能力。

1 天气雷达对各类灾害性天气系统监测能力分析

我国受季风气候影响十分显著,每年进入汛期各种天气系统频繁在各地活动,是造成气象灾害的主要原因。对于不同尺度天气系统新一代天气雷达

的探测能力是不同的。主要是由天气系统的水平尺度、垂直高度、发生发展、移动速度快慢以及内部结构所决定的。

1.1 对大尺度天气系统探测能力分析

对于大尺度天气系统的雷达探测,由于其水平尺度大(一般在上千千米以上),持续时间长(一般在十几个小时到几天),移动速度比较慢的特点,天气雷达探测的能力主要受地球曲率、地形遮挡等影响。天气雷达探测的主要大尺度天气系统包括:冷(暖)锋、温带气旋(如:江淮气旋、黄河气旋、蒙古气旋等)、高空槽、切变线(如:江淮切变线)、急流及台风等。雷达在探测这些天气系统时,可以获得它们不同有效信息。

1.1.1 冷(暖)锋的探测

新一代天气雷达在探测冷(暖)锋时,利用雷达反射率因子和多普勒径向速度信息,可以比较准确地获得锋面位置信息、锋区辐散辐合强度、锋的走向以及移动演变等特征。但对于单部雷达而言,受到水平尺度的限制,难以把整个冷(暖)锋的结构观测到,只是对锋面的局部进行监测。

利用雷达每 5~6 min 的高频度的信息,从反射率因子回波结构以及演变特征,可以分辨冷锋是属于第一型冷锋,还是第二型冷锋。第一型冷锋在反射率因子上表现为:回波强度场分布比较均匀,一般在 25~45 dBz 之间,呈片状分布,同时回波整体移动速度比较慢,如图 1a。第二型冷锋,其反射率因子呈带状分布,回波强度一般在 35~60 dBz 之间,回波整体移动很快,如图 1b。在强的第二型冷锋中,往往能够从径向速度场上分析出较强的辐合结构,同时还伴有尺度较小的气旋性结构。图 1c 是冷锋的典型风场结构图,从该图可以分析出冷锋位置、强度,利用时间序列演变可以分析冷锋的演变特征。

1.1.2 温带气旋的探测

影响大陆的温带气旋主要有江淮气旋、黄河气旋以及蒙古气旋等。由于其热力不对称的结构,在其内部有冷暖锋区结构存在。利用天气雷达能够观测到温带气旋的中心、内部的锋区结构、其上气旋性切变、辐合强度以及移动速度等信息特征。但是,由于温带气旋属于大尺度天气系统,而且温带气旋属于较浅薄的天气系统,利用单部雷达探测,难以把其整个系统结构详细观测到,需要多部雷达才能够实现其完整的结构探测。如图 2a 和 2b 所示,温带气旋对应的反射率因子以及对应的径向速度图。

另外,温带气旋其生命史可分为 4 个阶段,即波动阶段、成熟阶段、锢囚阶段和消散阶段。在不同阶段雷达回波特征也不同。波动阶段,雷达反射率因子表现为两个降水区,即暖锋区对应的降水区和冷锋对应的降水区。到了成熟阶段温带气旋的冷暖锋区发展更加显著,对应的冷暖锋区降水在雷达反射率因子上反映更加明显。尤其是有些温带气旋的冷锋区表现为第二型冷锋时,所产生的降水以对流性降水特征为主。锢囚阶段,雷达反射率因子表现的主要特征即是冷暖锋区降水合二为一,两个降水区连在一起。

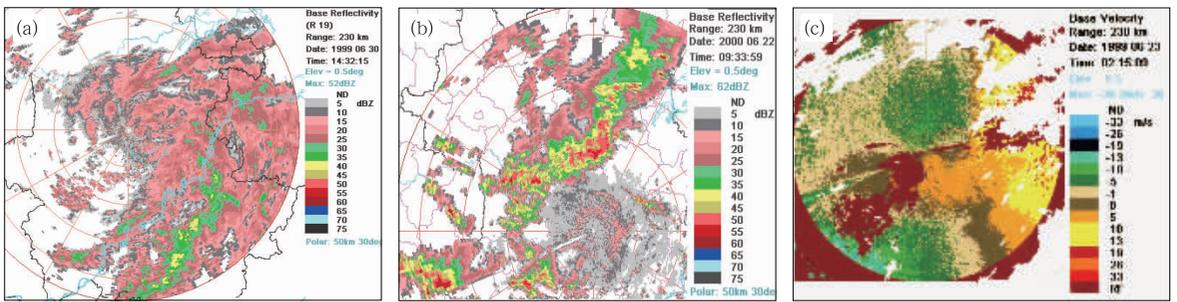


图 1 冷锋回波图

- (a) 1999 年 6 月 30 日 14:32 合肥雷达 0.5°仰角第一型冷锋在雷达反射率因子上的表现,
- (b) 2000 年 6 月 22 日 09:33 合肥雷达 0.5°仰角第二型冷锋在雷达反射率因子上的表现,
- (c) 1999 年 6 月 23 日 02:15 合肥雷达 0.5°仰角冷锋风场在雷达径向速度图中的表现

Fig. 1 Echoes of cold front by CINRAD at Hefei

- (a) Performance of first-type cold front on the radar reflectivity factor at 14:32 BT 30 June 1999, elev. = 0.5°,
- (b) Performance of second-type cold front on the radar reflectivity factor at 09:33 BT 22 June 2000, elev. = 0.5°,
- (c) Performance of cold front wind in the radar radial velocity at 02:15 BT 23 June 1999, elev. = 0.5°

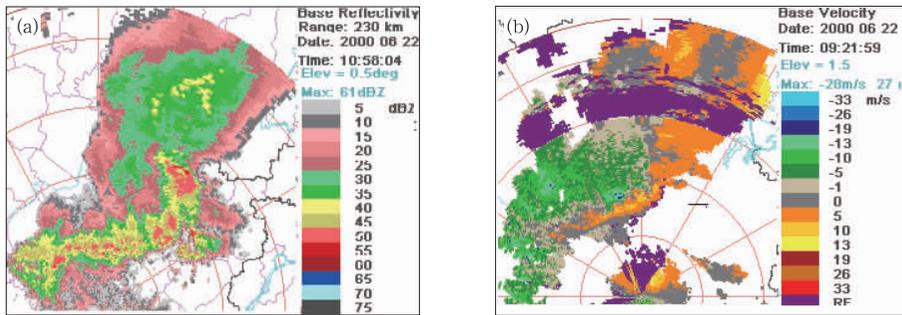


图 2 温带气旋回波图

- (a) 2000 年 6 月 22 日 10:58 合肥雷达 0.5°仰角江淮气旋反射率因子结构特征,
- (b) 2000 年 6 月 22 日 09:21 合肥雷达 1.5°仰角江淮气旋径向速度结构特征

Fig. 2 Echoes of extratropical cyclones by CINRAD at Hefei

- (a) Structure characteristics of radar reflectivity factor of extratropical cyclones at 10:58 BT 22 June 2000, elev. = 0.5°,
- (b) Structure characteristics of radar radial velocity of extratropical cyclones at 09:21 BT 22 June 2000, elev. = 1.5°

1.1.3 台风探测

台风是影响我国的重要天气系统,新一代天气雷达在台风探测中具有非常重要的作用。天气雷达高时空分辨率的监测能力可获得台风重要结构特征

信息。诸如:利用新一代天气雷达能够确定台风的位置、分析台风强度、定位台风中心、确定台风移向移速、确定台风眼、螺旋雨带以及最大风速区。还能够分析台风内部的细微结构,如图 3a 和 3b 台风桑

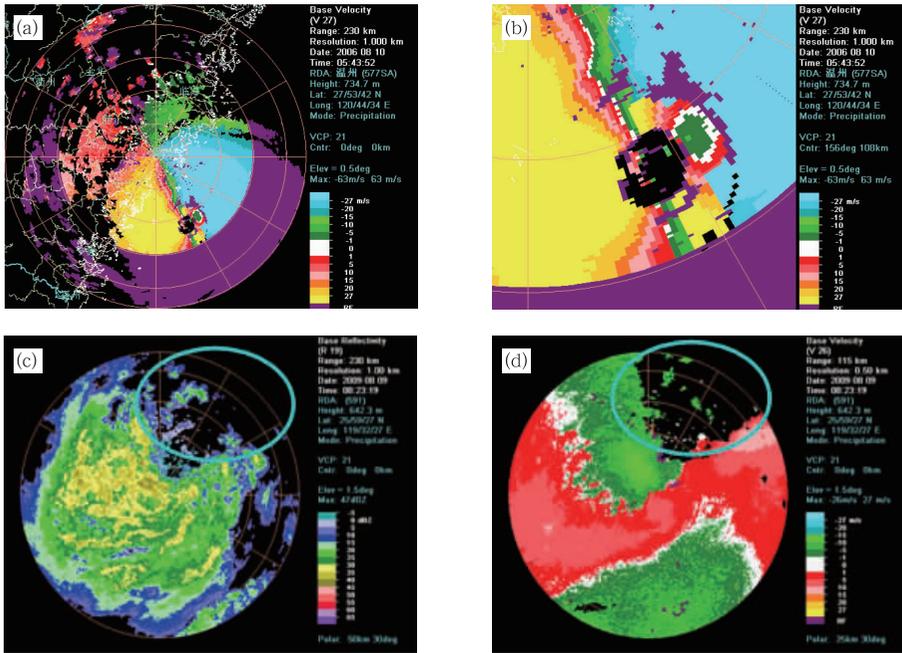


图 3 台风回波图

- (a) 2006 年 8 月 10 日 05:43 温州雷达台风桑美径向风速非对称性结构, (b) 图 3a 中径向速度非对称结构局部放大, (c) 2009 年 8 月 6 日 08:23 福州雷达台风莫拉克登陆时锋生反射率因子, (d) 对应图 3c 的锋生径向速度

Fig. 3 Echoes of typhoon by CINRAD at Wenzhou (a, b) and Fuzhou (c, d)

- (a) Asymmetrical structure of the radial velocity of typhoon Saomai at 05:43 BT 10 August 2006,
 (b) Part of the enlarged image of the asymmetrical structure of radial velocity,
 (c) Front genesis reflectivity factor of typhoon Morakot when landing at 08:23 BT 6 August 2009,
 (d) Corresponding radial velocity of front genesis

美径向速度图中的非对称性结构。并能够分析台风的演变,如图 3c 和 3d 台风莫拉克锋生过程。

1.1.4 低空急流探测

低空急流是影响大陆重要的天气系统,尤其在暴雨过程中急流对暴雨发生发展具有重要作用。在天气图上已确定存在急流时,可用雷达监测低空急流,获取低空急流的强度(即急流的最大风速)、急流走向、急流轴的高度以及急流演变特征等。利用多部新一代天气组网观测,分析出急流的出口,这对于确定暴雨落区非常重要。

1.1.5 大尺度切变线探测

利用新一代天气雷达速度图不仅能够准确确定大尺度切变线的位置,而且还能够识别它属于暖式切变、还是冷式切变,以及切变线的辐合强度等信息特征。在径向速度图上一共有三条零速度线,一长两短。长零速度线贯穿整个速度区,两条短零速度线分布在其两侧并与它几乎垂直。图 4a 为江淮切变线径向速度图,要确定这张图上江淮切变线的位置:第一步,确定雷达站的位置;第二步,找到最长的一条零速度线,以此为界,可以看到其两侧冷暖色区

位置正好相反,此线以北为东南偏东风,以南为西南偏西风,它两侧风向辐合,因此可以判断大尺度切变线位于这条零速度线上,图 4b 为其风场示意图。切变线两侧湿度差较大,温差较小,弱的辐合气流形成宽而稳定的降水带,有弱气旋波扰动。由于有以上特点,所以它在多普勒雷达反射率图上表现为面积较大、强度较弱的带状回波,对应切变线上的小扰动,回波带上有一个个强度不一的降水中心。

1.2 对中尺度天气系统探测能力分析

中小尺度天气系统由于其具有发生、发展快,生命史持续时间短的特点,常规观测网难以捕捉到它们,尤其是它们发生发展的全过程。新一代天气雷达采用 5~6 min 的体扫描模式进行观测,可有效地监测中小尺度天气系统产生、发展、成熟和消亡的全过程,揭示它们的产生条件和演变规律。尤其是多普勒天气雷达能够提供径向速度场,使我们能够了解其内部的流场结构,并以此判断它们未来发展状况。

常见的中尺度天气系统主要有:雹暴(降雹)、雨暴(局地暴雨)、飑线以及强对流风暴产生的阵风锋、

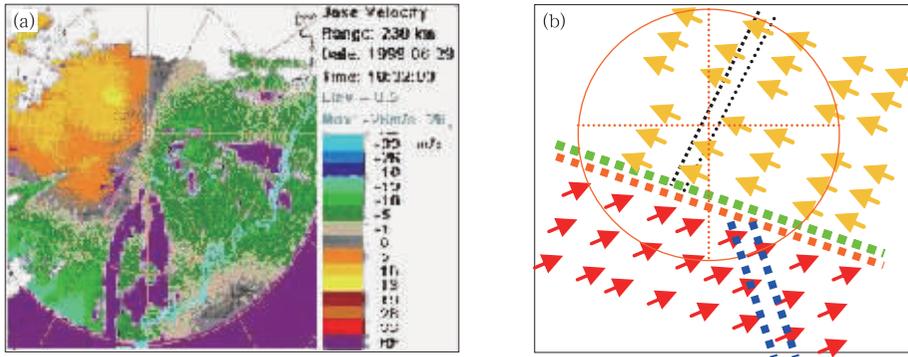


图 4 江淮切变线径向速度回波图

(a) 1999 年 6 月 29 日 10:32 合肥雷达江淮切变线径向速度, (b) 图 4a 江淮切变线速度场示意图

Fig. 4 Radial velocity echoes of the Jianghuai shear line by CINRAD at Hefei

(a) Corresponding radial velocity of the shear line at 10:32 BT 29 June 1999,

(b) Schematic diagram for the Jianghuai shear line velocity field

龙卷与下击暴流,还有中气旋、边界层的中尺度辐合线、垂直切变等中尺度系统。

1.2.1 冰雹

冰雹是中尺度天气系统所产生的灾害天气之一,天气雷达也是监测冰雹过程的最有效的工具。图 5a 是天气雷达观测到的一次冰雹过程。冰雹过

程的雷达反射率因子非常强,一般都能够达到 50~60 dBz 以上。在它发生发展的阶段都伴有明显的辐合,而且气旋呈辐合性气旋。这突破了传统的雷达气象学仅仅从回波强度的形态学分析,而充分利用了径向风速场提供的动力场特征信息,认识冰雹云的发展,如图 5b 和 5c 所示。

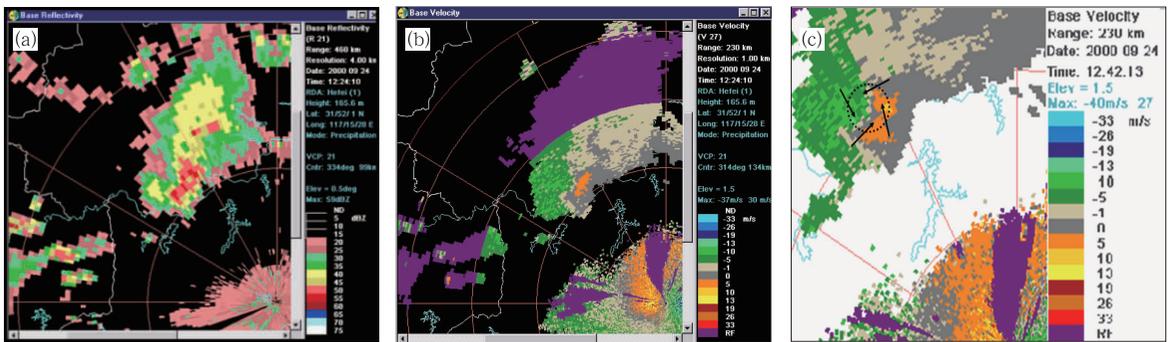


图 5 冰雹回波图

(a) 2000 年 9 月 24 日 12:24 合肥雷达 0.5°仰角冰雹在雷达反射率因子上的表现, (b) 对应图 5a 冰雹发生时合肥雷达 1.5°径向速度, (c) 图 5b 径向速度的局部放大(黑色箭头指示风场气旋性旋转)

Fig. 5 Echoes of hails by CINRAD at Hefei

(a) Performance of hails on radar reflectivity factor at 12:24 BT 24 September 2000, elev. = 0.5°, (b) Radial velocity when hails occurred at elev. = 1.5°, (c) Part of the enlarged radial velocity (Black arrows represent the cyclonic winds)

1.2.2 暴雨冰雹过程中的逆风区

无论冰雹过程还是暴雨过程,在天气雷达回波分析时都经常会发现存在着一种称为“逆风区”的结构特征。即有正(负)速度完全包围着负(正)速度区,而且是从正(负)速度区逐步由零过度到负(正)速度区的结构。这种结构特征表征冰雹云区或暴雨降水云区存在着垂直环流。图 6a 是发生在南通的冰雹云的逆风区结构,图 6b 则是发生在南昌的暴雨过程中逆风区结构。

1.2.3 飊线

由于新一代天气雷达采用了全自动连续体扫描观测模式,对于观测像飊线、阵风锋一类的短时强对流天气或与之相伴随而生的天气监测十分有效。

飊线是我国常见的中尺度强对流天气系统,它呈现带状对流回波,强度一般达到 45~65 dBz,移动迅速,常造成大风、冰雹等灾害性天气。所经之地都会造成气压先是略有下降,然后迅速涌升,风向突变,气温骤降等天气现象。图 7 给出了 2012 年 7 月

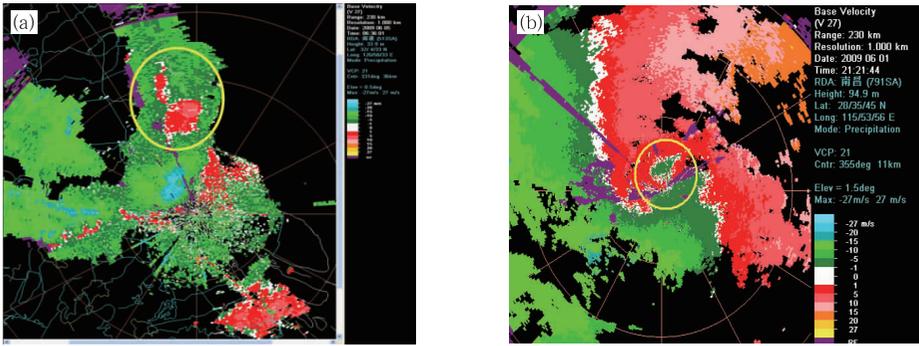


图 6 逆风区径向速度回波图
 (a) 2009 年 6 月 5 日 06:36 南通雷达探测到冰雹云中逆风区，
 (b) 2009 年 6 月 1 日 21:21 南昌雷达探测到暴雨中逆风区

Fig. 6 Radial velocity echoes in adverse wind field

(a) Adverse winds in hail clouds observed by Nantong radar at 06:36 BT 5 June 2009,
 (b) Adverse winds in rainstorms observed by Nanchang radar at 21:21 BT 1 June 2009

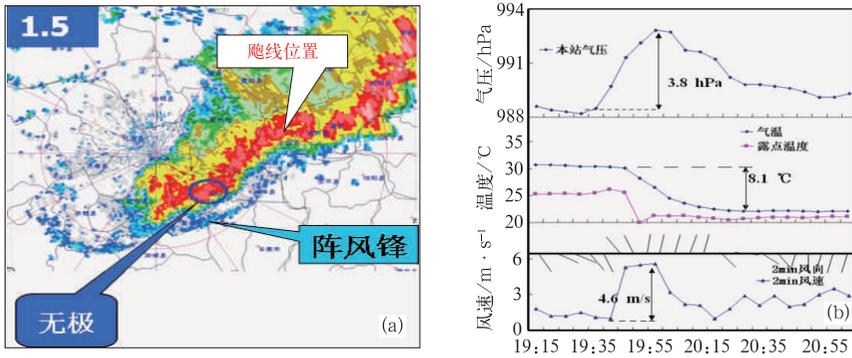


图 7 飑线回波图

(a) 2012 年 7 月 10 日 20:00 石家庄雷达 1.5° 仰角探测飑线反射率因子图，
 (b) 无极站自动站气象要素变化情况

Fig. 7 Echoes of squall line by CINRAD at Shijiazhuang

(a) Reflectivity factor of squall line observed by radar at 20:00 BT 10 July 2012, elev. = 1.5°,
 (b) Variation of weather elements at Wuji AWS

10 日发生在河北境内一次飑线过程。

1.2.4 阵风锋

阵风锋往往与强对流相伴随，它是强天气发生时，风暴形成的风暴高压与周围暖湿空气的交汇面，在雷达回波上形成窄带回波，常出现在晴空区。阵风锋过境时的特征基本与飑线相似。图 8 给出了河南省商丘境内一次超级单体中伴随的阵风锋。

1.2.5 中尺度雷暴高压

在 1.2.4 超级单体个例中有中尺度雷暴高压现象。从图 9a 径向速度图可以发现，在商丘雷达站四周，除西北方向外，雷达站其他方向都是呈红色调，意味着速度场远离雷达站。当我们将风暴系统向东南方向移动的速度剔除后（即风暴相对径向速度图），如图 9b，可以发现商丘雷达站四周包括西北方向均是离开雷达的速度分布。只有当雷达站处于雷

暴高压时才能够观测到这样的结构。图 9c 和 9d 分别给出了雷暴高压形成的概念模型和地面观测实况。

1.3 暴雨监测能力分析

暴雨是我国最重要的灾害性天气之一，造成我国暴雨天气过程的天气系统分为大尺度天气系统：产生的持续时间长、范围大的暴雨天气过程，中小尺度天气系统——强对流天气系统产生持续时间短、降水强度大的局地暴雨天气过程。无论是大尺度天气系统，如 2007 年 7 月，发生在江淮流域的大范围的梅雨锋暴雨天气过程，还是像 2012 年 7 月 21 日发生在北京地区的“721”强对流天气系统产生的局地特大暴雨过程，新一代天气雷达都在其监测方面发挥了重要作用(俞小鼎, 2012; 谌芸等, 2012)。

天气雷达在整个暴雨的发生、发展过程中，能够

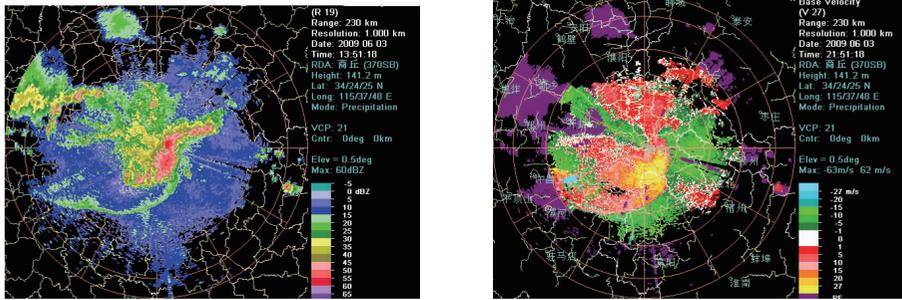


图 8 阵风锋回波图

- (a) 2009 年 6 月 3 日 21:51 商丘雷达 0.5°仰角超级单体中伴随阵风锋反射率因子图,
- (b) 对应图 8a 超级单体中伴随阵风锋径向速度图

Fig. 8 Echoes of gust front by CINRAD at Shangqiu

- (a) Reflectivity factor accompanying gust front in supercells at 21:51 BT 3 June 2009, elev. = 0.5°,
- (b) Radial velocity accompanying gust front in supercells

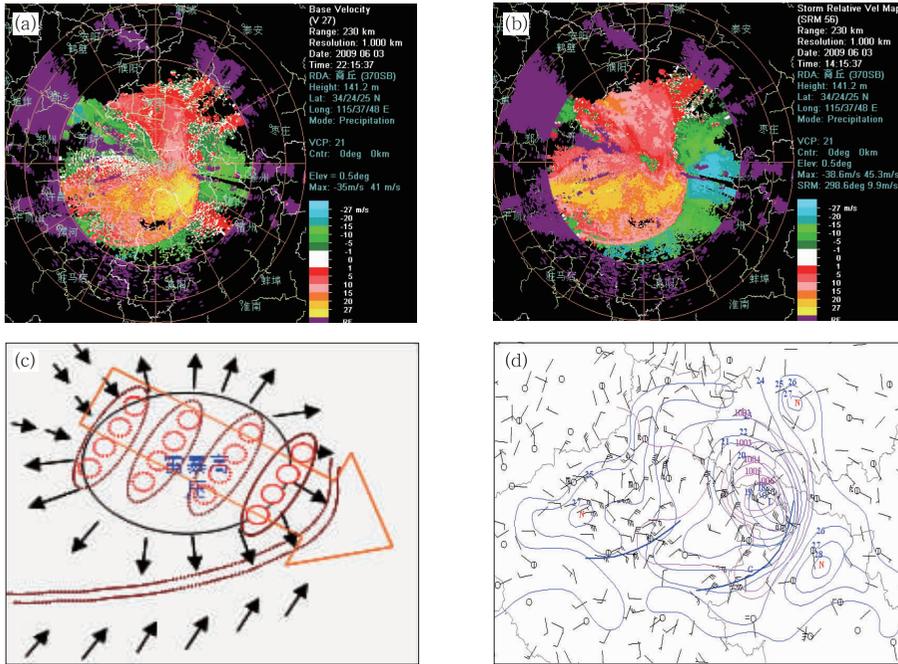


图 9 雷暴高压径向速度回波图

- (a) 2009 年 6 月 3 日 22:15 商丘雷达 0.5°仰角超级单体中雷暴高压径向速度图,(b) 对应图 9a 商丘雷暴高压风暴相对径向速度,(c) 商丘雷暴高压概念模型,(d) 商丘雷暴高压对应地面实况

Fig. 9 Radial velocity echoes of thunderstorm high by CINRAD at Shangqiu

- (a) Radial velocity of thunderstorm high in supercells at 22:15 BT 3 June 2009, (b) Relative radial velocity of the thunderstorm high, (c) Conceptual model of thunderstorm high, (d) Surface observation corresponding to thunderstorm high

监测到暴雨过程产生的时间、地点,同时获得暴雨过程的强度变化、持续时间。尤其对产生暴雨过程的暴雨雨团演变具有很好的监测预警作用。天气雷达能够有效地监测获取暴雨雨团的强度、强度变化、降水率、累计降水量以及雨团内部的风场结构特征,这对于判断暴雨雨团能否持续发展十分重要。

天气雷达的最重要的功能之一就是降水的测量,随着天气雷达技术的不断改进提高,天气雷达定

量测量降水的能力也不断提高。利用 Z-R 关系,能够准确地反演暴雨过程的降水强度和过程的累计降水量。由美国雷达专家(Bringi et al, 2010)所著的《偏振多普勒天气雷达原理和应用》一书中讲到:“利用雷达进行降水估计的主要优点在于,它可以以相当高的时空分辨率,获得大面积(大约 10000 km²)的测量数据。如果用一个雨量计网络来替代一部雷达的空间采样(距离分辨率 150 m,方位分辨率 1°),



图 10 2012 年 7 月 21 日 13:00 时 1 h 雷达估测降水
Fig. 10 One-hour precipitation estimated by CINRAD at Beijing at 13:00 BT 21 July 2012

则在一个半径 150 km^2 的区域内大约需要布设 250000 个以上的雨量计,并且这些测量值需要通过一个“固有的”网络,以光速送到中心站。”因此,天气雷达除了能够定量测量降水外,快速高效获得高时空分辨率的降水信息也是天气雷达监测暴雨过程的一大优势。图 10 给出了 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨过程,北京时间 13:00 时雷达估测的 1 h 降水分布。连续监测的雷达定量估测降水表明:造成北京“721”特大暴雨过程的雨团降水强度特别强(雷达定量估测最大达到 $82.9 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$),并且在同一地区持续时间长,最长的达近 10 h。

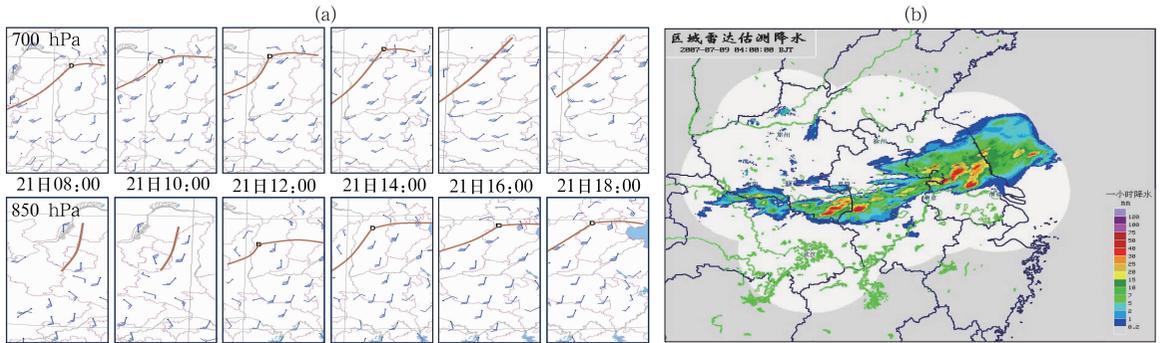


图 11 暴雨过程雷达组网产品图
(a) 2012 年 7 月 21 日 08:00—18:00 北京地区天气雷达 VWP 组网 700 和 850 hPa 风场,
(b) 2007 年 7 月 9 日 04:00 组网雷达 1 h 估测降水

Fig. 11 Radar network products in the process of rainstorm
(a) The 700 hPa (top) and 850 hPa (bottom) wind fields of weather radar VWP network in Beijing during 08:00—18:00 BT 21 July 2012, (b) One-hour precipitation estimated by radar network at 04:00 BT 9 July 2007

面还存在有待改进的地方,主要表现在以下几方面。

2.1.1 现行扫描策略垂直分辨率相对较低

我国新一代天气雷达扫描采用体扫描模式。设计有两种扫描模式,一种是降水模式,使用 VCP11 和 VCP21;另一种是晴空模式,使用 VCP31 和 VCP32。由于各种原因,在现行业务运行中主要采用 VCP21 模式,该模式 6 min 完成 9 个仰角的 PPI

对于大尺度天气系统产生的大范围暴雨过程,天气雷达利用其组网技术优势,不仅可以发挥雷达高时空分辨率的特点获取系统和雨团的精细化结构特征,而且还能利用多部雷达组网获取登陆台风、梅雨锋暴雨过程等那样的大范围的大尺度结构特征。从而对整个天气系统有一个完整的系统揭示(张家国等,2011)。图 11a 和 11b 分别给出了利用雷达 VWP 组网产品获得产生“721”北京特大暴雨过程的大尺度风场结构特征和利用雷达组网技术获得的梅雨锋暴雨过程中雨团的结构特征。上述组网产品的应用,使雷达不仅可以获得天气系统的大尺度结构特征,还可以获得暴雨的中尺度结构特征。

2 存在的主要问题及对策

2.1 问题的提出及分析

新一代天气雷达无论在大尺度天气系统的监测还是在中尺度天气系统的监测以及暴雨的监测上,都表现出了它的巨大优势。使我们能够利用雷达获得高时空分辨率信息从而认识了解各种天气系统。但在实际应用中它的扫描策略、技术体制以及功能等方

扫描,雷达天线转速相对较慢,雷达采集的反射率因子和速度数据准确。但 VCP21 扫描模式的垂直分辨率低于 VCP11 模式。假设雷达站高度为 0 m,大气为标准大气,则在距雷达站水平 70 km 处,高度 12 km 以下,VCP11 垂直采样的数据有 10 个,而 VCP21 仅 7 个(Steadham et al, 2002)。Witt 曾根据两部雷达分别采用 VCP21 与 VCP11 模式对同一

风暴进行探测,产品具有明显不同,他认为产生这种差别的主要原因是因为 VCP21 在垂直方向上采样较少,分辨率低,导致其产品较为粗糙。现行 VCP21 扫描策略不适应垂直结构精细化探测。

2.1.2 现行扫描策略边界层观测覆盖能力弱

我国现行 VCP21 扫描策略,扫描最低仰角为 0.5° 。在雷达站高度为 0 m,大气为标准大气的情况下, 0.5° 的仰角扫描能够有效地减少地物杂波的干扰以及二次回波的影响,但考虑地球曲率,在水平距离 300 km 以内近 70% 边界层内的回波探测不到,造成边界层探测盲区偏大。由于我国地形复杂,现有 40% 的雷达站都建在高山顶上,最低 0.5° 的仰角扫描使得对边界层的探测能力进一步降低。大气边界层是地球大气动量、能量和各种物质上下输送的通道,其与自由大气的耦合作用影响着天气过程的发生发展,因此需要加强对大气边界层的观测。

2.1.3 晴空回波、弱回波探测能力弱

我国新一代 S 波段天气雷达发射峰值功率可以达到 650 kW 以上,C 波段雷达发射峰值功率也达到 250 kW 以上。尽管发射功率已不小,但对弱回波的探测能力仍不能满足要求,尤其是晴空大气探测显著不足。虽然新一代天气雷达观测模式设计上脉冲宽度可变。但是,实际探测表明,无论宽脉冲模式还是窄脉冲模式仍然不能够很好地获得晴空大气和天气系统早期的弱回波信息。

2.1.4 距离模糊问题突出

我国新一代天气雷达采用脉冲发射体制,其最大不模糊距离 R_{\max} 和最大不模糊速度 $V_{\gamma\max}$ 都与脉冲发射的重复频率有关,并且相互制约,两者关系为 $R_{\max} \cdot V_{\gamma\max} = \frac{\lambda \cdot C}{8}$,其中 λ 是波长,C 是光速。目前新一代天气雷达扫描方法主要采用美国 WSR-88D 的批处理方法,在低仰角采用高低脉冲重复频率分离扫描方式。采用高重复频率测速时,若距离折叠现象出现,则采取反射率因子强的优先获得测速值的原则,一旦出现两者强度值相当时,测速给予则无法确定(设置为紫色)。现有业务模式中高频 PRF 设置为 1014 Hz,可获得 $\pm 27 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 不模糊测速范围。根据公式: $R_{\max} = \frac{1}{2} C \times \frac{1}{\text{PRF}}$,高频时不模糊距离 R_{\max} 为 148 km。由于我国重要降水天气系统以大范围为主,如梅雨锋暴雨过程,其具有降水范围大,且以层状降水云系中夹杂着弱的对流系统的特征,最大不模糊距离 148 km 使径向速度图中距离模糊问题突出,不能满足水平范围探测的需求。

2.1.5 降水估计偏差

新一代天气雷达一个重要的用途是定量测量降水。即利用 Z-R 关系,通过反射率因子,算出降水强度。Z-R 关系中系数的设置与降水粒子的相态以及粒子滴谱有关。而现有新一代天气雷达没有能力区分探测目标中降水粒子的相态,也不能对降水系统中的降水粒子的谱特征给出有效信息,从而导致对降水的定量估计出现较大偏差。

2.1.6 组网与协同观测能力不足

组网技术的应用与协同观测是充分发挥雷达对灾害性天气监测能力的一个重要方面。单部雷达由于在探测过程中,不仅要受到雷达自身探测能力的限制(包括发射机功率和波段等),还要受到环境的影响,包括地形、建筑物和地球曲率等;因此,实际探测能力会大大受上述因素的影响。目前业务雷达网,由于雷达观测时采用体扫描模式进行组网观测,不能够在时间上保持较好的一致性,从而导致组网雷达对同一天气系统探测时获取的信息存在较大差异,即导致组网观测的时间与空间的不同步。另外,现有的业务观测方式,没有充分利用雷达网在空间分布优势进行多部雷达的协同观测,以实现对那些生消演变迅速的中小尺度天气系统和空间尺度较大的天气系统的精细化观测。

2.2 主要问题对策分析

鉴于新一代天气雷达在实际观测中存在的各种各样问题,并且在不对原有雷达技术体制、系统结构以及硬件设备等做重大改变的前提下,有针对性地提出目前存在问题的解决办法,以实现雷达观测效益最大化,其对策有如下几方面。

2.2.1 建立符合我国天气特征的观测模式,增强边界层的探测能力

(1) 增加扫描仰角和 RHI 观测扫描模式,提高中低层垂直分辨率

现行 VCP21 体扫描方式,垂直采样数较少,分辨率较低,可以适当增加扫描仰角,提高中低层垂直分辨率,如 VCP11 仰角扫描。但 VCP11 扫描速度快,5 min 完成 14 个仰角的扫描,雷达天线转速较快,不能保证雷达采样反射率因子与速度的准确性,因此在增加 VCP21 的扫描仰角数时,也要保持雷达天线转速较慢,来保证反射率因子与径向速度的采样数。通过增加仰角数,可以增强新一代天气雷达垂直结构的精细化探测能力。此外,采用体扫描模式与 RHI 扫描相结合的观测模式,进一步提高垂直

结构精细化探测的能力。

(2) 建立高山观测模式,增强大气边界层探测能力

现行 VCP21 扫描方式,最低 0.5°仰角扫描,由于我国复杂地形以及地球曲率的影响,大气边界层探测盲区较大。通过增加 0.5°以下以至负仰角扫描,可以增强边界层的探测能力。尤其高山站雷达要增加负仰角扫描。2012 年 8 月 1—2 日福州雷达站在台风苏拉近海登陆时采用低仰角和负仰角观测模式进行的实际探测(如图 12)。结果表明采用 0°仰角的低仰角观测模式和-0.2°的负仰角观测模式,所探测到的台风苏拉的反射率因子明显要比采用 0.5°仰角观测模式的强度强,在显示色标上要强一个等级以上,图中粉色箭头所指的台风外围云系。但 0°仰角与-0.2°仰角也造成了海杂波现象,图 12b 和 12c 中红色箭头所示。

(3) 建立适当的距离与速度探测的参数配置,实现距离与速度的最佳探测

在 2.1.4 中已经分析现有业务模式中 1014 Hz

的高重复频率,可获得±27 m·s⁻¹不模糊测速范围,但最大不模糊距离 R_{max} 只有 148 km,在探测梅雨锋暴雨、台风等大范围降水过程中在 148 km 外产生大范围不确定区。由于我国主要降水系统为大范围降水系统,因此保证探测范围内距离不模糊为第一优先原则十分必要。

要保证在 200 或 230 km 范围内不产生距离模糊,应当把 PRF 设置分别为:738 Hz 或 644 Hz。脉冲重复频率 PRF 与最大不模糊速度 V_{ymax} 关系式: $V_{\max} = \frac{\lambda}{4} \times PRF$, 则得到测速范围分别为:±18.75 m·s⁻¹或±16.3 m·s⁻¹。因此可以在 200 km 或 230 km 范围内,使距离不模糊的优先原则得以实现。如图 13 采用不同重复频率扫描试验对比,可见重复频率的降低可以明显增加最大不模糊距离的范围,使紫色区域消失。

2.2.2 采用相位编码技术、双 PRF 技术应用,解决距离与速度模糊问题

(1)相位编码技术(王旭等,2009);它通过对发

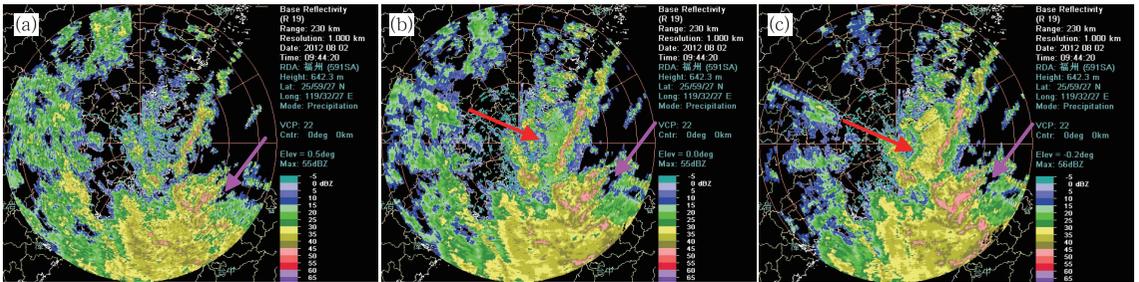


图 12 高山站负仰角观测个例

- (a) 2012 年 8 月 2 日 09:44 福州雷达 0.5°仰角探测台风苏拉反射率因子, (b) 0.0°仰角探测台风苏拉反射率因子, (c) -0.2°仰角探测台风苏拉反射率因子

Fig. 12 Reflectivity factors of typhoon Saola detected by CINRAD at Fuzhou at 09:44 BT 2 August 2012 at elevation angles of (a) 0.5°, (b) 0.0° and (c) -0.2°

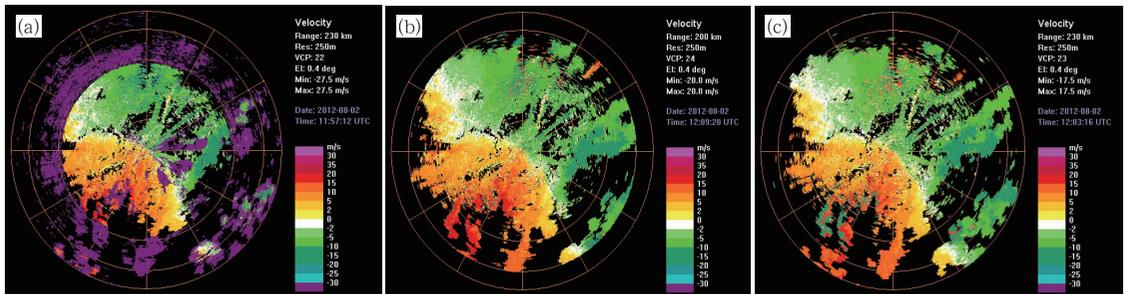


图 13 2012 年 8 月 2 日安徽铜陵雷达不同 PRF 观测到的径向速度回波图

- (a) PRF=1014 Hz,不模糊距离为 148 km, (b) PRF=738 Hz,不模糊距离为 200 km, (c) PRF=644 Hz,不模糊距离为 230 km

Fig. 13 Radial velocity echoes observed by CINRAD at Tongling on 1 August 2012 with different PRF (a) PRF=1014 Hz, unambiguous range 148 km, (b) PRF=738 Hz, unambiguous range 200 km, (c) PRF=644 Hz, unambiguous range 230 km

射脉冲的相位进行编码,在接收端将不期望回波的频谱分散来降低叠加回波对期望信号的谱矩估计的影响,相位编码序列有多种方法,目的是使回波的频谱分散程度更大,从而能用比较简单的方法恢复出期望的回波。因此,通过相位编码可以在保持最大不模糊速度不变的情况下,有效地抑制不需要的回波,从而恢复出需要的回波,达到扩展不模糊距离的目的,同时还可以消除因回波叠加引起的谱矩估计的偏差,提高对叠加回波的谱矩估计的准确性。

利用 X 波段双极化多普勒天气雷达的回波数据对批处理和 SZ 相位编码退距离模糊的效果进行了验证和比较(如图 14 所示)。试验结果表明:SZ 相位编码退距离模糊算法能够恢复出叠加回波的速度,而且得到的速度图不再出现大片的紫色区域(即速度退模糊算法失效区),其退距离模糊明显优于传统的批处理方法,并且根据速度的连续性可知,恢复出的速度是可信的。目前 SZ(8/64)编码最多可以分离出 4 次回波信号,但是由于 X 波段雷达衰减较为严重,在实际应用过程中还没有测试到 4 次回波的实例,只是出现了很少的 3 次回波。对 3 次回波出现时该相位编码算法也能比较准确地恢复其速度。虽然 SZ 相位编码算法比批处理增加了一次扫描,而且计算较批处理复杂,但是借用 IPP 性能库中的函数实现 FFT 和逆 FFT 运算并通过合理的软件编程,SZ 相位编码算法能够达到实时处理的需求。

(2) 双 PRF 退速度模糊技术(葛润生等,1988;仰美霖等,2011):根据公式: $R_{\max} \cdot V_{\max} = \frac{\lambda \cdot C}{8}$,最大不模糊径向速度 V_{\max} 与探测距离 R_{\max} 成反比关系。因此,为了增大最大不模糊速度,就要减小探测距离。但探测距离小时,容易出现 2 次回波甚至 3 次回波。如果要增大探测距离就必然要减小速度的可测范围。为了解决这一矛盾,可采用双脉冲重复

频率的发射体制,即双 PRF 功能。不同脉冲重复频率交替发射,然后利用它们的相位差和脉冲重复周期差,求算径向速度。基本原理如下:对速度一定的目标物来说,不同的脉冲重复周期测得的相位不同。

由公式: $V = \frac{\lambda \bar{\theta}}{4\pi T}$ 可得: λ 为波长, T 为脉冲周期, $\bar{\theta}$ 为平均相邻两次的相位差(雷达能够识别的或检测出的最大相位差为: 2π),由此可得最大不模糊径向速度 V_{\max} 为: $\bar{V}_{\max} = \frac{\lambda}{4(T_1 - T_2)}$ 。若令: $T_1 > T_2$,为了提高最大不模糊速度,则要求 $T_1 - T_2 < T_2$,即 T_1/T_2 在 1~2 之间。而最大可测距离则由 T_2 决定。例如:我们要求最大不模糊探测距离为 300 km,则要求 $T_2 = 0.002$ s,即脉冲重复频率为 500 Hz。当 $T_1 = 0.0025$ s 时,即 $PRF = 400$ Hz, $\bar{V}_{\max} = 53.50$ m · s⁻¹;当 $T_1 = 0.0027$ s 时,即 $PRF = 375$ Hz, $\bar{V}_{\max} = 38.21$ m · s⁻¹;当 $T_1 = 0.003$ s 时,即 $PRF = 333$ Hz, $\bar{V}_{\max} = 26.75$ m · s⁻¹。图 15a 和 15b 分别给出了利用单重复频率($PRF = 1014$ Hz)和双重复频率($PRF = 644:429$ Hz)的径向速度图的对比。由对比试验可以看到,采用双重复频率 $PRF = 644:429$ Hz 后,不模糊区域由 148 km 扩展到了 230 km,紫色区域消失,且不模糊速度由原来的 ± 27 m · s⁻¹ 扩展到 ± 34 m · s⁻¹。

2.2.3 增加晴空扫描模式,利用脉冲压缩技术,提高弱回波和晴空回波探测能力

(1) 建立晴空业务观测模式,提高灾害性天气早期发现能力

美国 WSR-88D 雷达业务观测模式中设立了 VCP31/VCP32,两种晴空观测模式主要采取了发射宽脉冲和降低雷达采样时扫描的转速,增加样本累计数来提高雷达对弱回波或晴空回波的探测能力。而我国天气雷达业务观测模式一律采用 VCP21

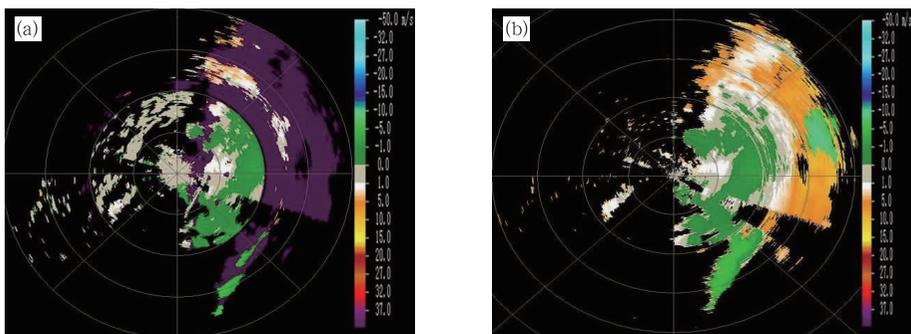


图 14 相位编码退距离模糊图

(a) 批处理方法退距离模糊, (b) SZ 相位编码技术退距离模糊(已做杂波滤波)

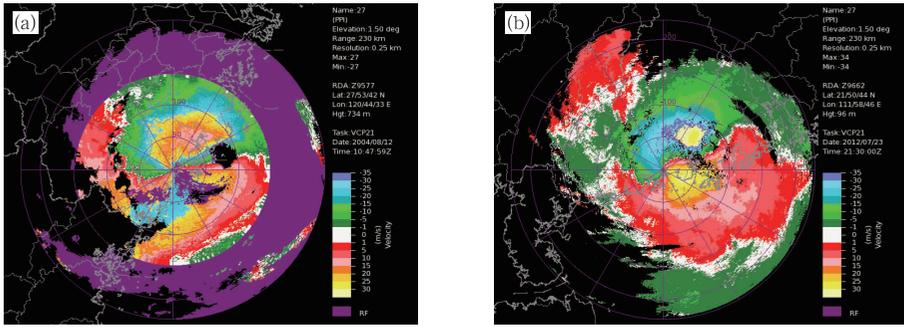


图 15 双 PRF 观测到的径向速度图

(a) 2004 年 08 月 12 日 10:47 温州雷达 1.5°仰角单重复频率 $PRF=1014$ Hz 时径向速度图，
 (b) 2012 年 07 月 23 日 21:30 阳江雷达 1.5°仰角双重复频率 $PRF=644:429$ Hz 径向速度图

Fig. 15 Radial velocity echoes (a) by CINRAD at Wenzhou at 10:47 BT 12 August 2004, elev. = 1.5° when single repetitive frequency $PRF=1014$ Hz, and (b) by CINRAD at Yangjiang at 21:30 BT 23 July 2012, elev. = 1.5° when dual repetitive frequency $PRF=644:429$ Hz

模式,使得雷达对弱回波和晴空回波探测能力明显不足。因此,建立以宽脉冲低转速扫描的晴空观测模式来提高灾害性天气的早期监测能力势在必行。但采用宽脉冲发射,会降低雷达在径向上探测的空间分辨率,以新一代天气雷达 CINRAD/SA 为例,窄脉冲约为 $1.7 \mu s$,径向空间分辨率为约 250 m。若采用 $4 \mu s$ 或 $5 \mu s$ 的宽脉冲,则空间分辨率分别为 600 m 或 750 m。此外,晴空模式下采用宽脉冲发射,会导致发射机平均功率加大,从而使雷达发射机故障率增加。因此,提高发射机的可靠性也应当与之相适应。

(2) 采用脉冲压缩技术,改进提高雷达晴空回波监测能力

脉冲压缩是一种信号处理技术,其基本原理就是在发射端采用特定波形的宽脉冲发射,在接收端通过脉冲压缩处理将接收到的回波压缩成窄脉冲。

宽脉冲发射增强了平均功率,从而增强了雷达对弱回波的探测,而脉冲压缩处理则提高了目标间的距离分辨力,使回波结构清晰。

国外开展脉冲压缩技术在气象领域的应用研究已有多年。并且这项技术已在气象业务中得到应用。通常脉冲压缩技术都用在发射机功率都比较低的固态雷达系统上。图 16 给出的是国外使用行波管(TWT)作为发射器件,其发射机的峰值功率约为 8 kW(低于普通雷达的发射功率)一个实例。图 16a 和 16b 分别给出了采用 $40 \mu s$ 宽脉冲压缩后与 $1 \mu s$ 窄脉冲的两种体制下雷达的灵敏度以及分辨率比较。显然,在雷达以较低功率发射情况下使用 $40 \mu s$ 的宽脉冲通过脉冲压缩后可获得与常规高功率雷达以 $1 \mu s$ 窄脉冲一样的距离分辨率,但前者对弱回波探测能力优于后者(古庆同等,2011)。

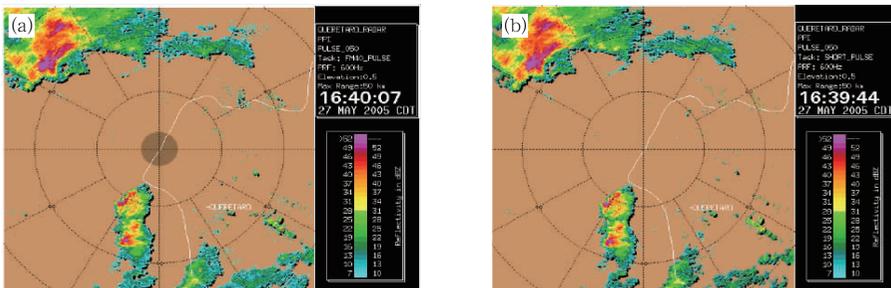


图 16 国外应用脉冲压缩技术的雷达回波图

(a) 采用 $40 \mu s$ 宽脉冲经压缩处理获得的反射率图，
 (b) 采用高功率 $1 \mu s$ 宽窄脉冲经发射获得的反射率图

Fig. 16 Radar echoes detected by using pulse compression technique abroad. Reflectivities obtained (a) through pulse compression by $40 \mu s$ pulsed width transmission and (b) by high-powered $1 \mu s$ pulsed width transmission

国内也积极开展脉冲压缩技术在气象业务中的应用研究,图 17a、16b 和 16c 分别给出了以 $1 \mu\text{s}$ 窄脉冲、 $10 \mu\text{s}$ 宽脉冲但不采用压缩处理和 $19 \mu\text{s}$ 宽脉冲做压缩处理,在车载移动相控阵天气雷达所做的对比试验,结果表明:从图 17c 上可以看出,用 $19 \mu\text{s}$

的线性调频脉冲压缩回波比普通 $1 \mu\text{s}$ 窄脉冲回波(图 17a 所示)要强,且距离分辨率却高于普通的 $10 \mu\text{s}$ 宽脉冲(图 17b 所示),也就是说采用了脉冲压缩技术的图 17c 同时具有了窄脉冲的高距离分辨率和宽脉冲的探测能力(古庆同等,2011)。

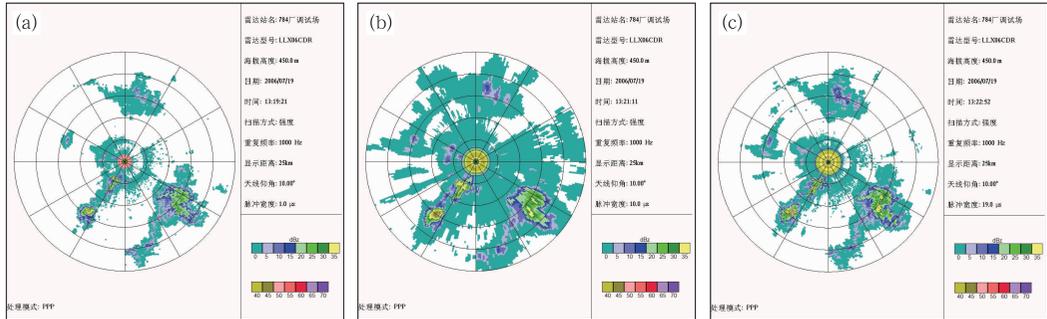


图 17 国内应用脉冲压缩技术的雷达回波图

- (a) 采用 $1 \mu\text{s}$ 脉宽发射获得的反射率, (b) 采用 $10 \mu\text{s}$ 脉宽发射不做压缩处理反射率,
- (c) 采用 $19 \mu\text{s}$ 脉宽发射做压缩处理反射率

Fig. 17 Radar echoes detected by using pulse compression technique in China. Reflectivities obtained (a) by $1 \mu\text{s}$ pulse width transmission, (b) without compression obtained by $10 \mu\text{s}$ pulsed width transmission, and (c) with transmission obtained by $19 \mu\text{s}$ pulsed width

3 天气雷达技术发展展望

天气雷达自第二次世界大战问世以来,在许多领域得到广泛应用。天气雷达由早期的模拟信号雷达发展成为数字信号雷达,进入 20 世纪 80 年代,又与多普勒技术相结合形成了目前业务上广泛使用的多普勒天气雷达。随着雷达技术、电子技术和计算机技术、通讯技术以及 GIS 的发展,天气雷达正逐步形成以多普勒、多波长、多极化和相控阵技术相融合为一体的雷达技术体制,同时与组网技术和 GIS 技术相结合的发展趋势。未来天气雷达将在如下方面得到发展。

3.1 组网与同步技术应用,实现对天气系统的协同观测

随着大规模的雷达网的逐步建成,运用雷达组网实现对大范围或一个特定区域天气系统的时间与空间同步和精细化结构的协同观测是非常必要的。但要实现上述目标,与天气雷达网相适应的高效通信网络、应用卫星导航系统解决雷达观测的时间同步与空间同步技术以及组网雷达的系统定标技术都是非常必要的,他们将有助于实现组网雷达观测的

时间、空间和定量的一致性。此外,将高分辨率的 GIS 信息与协同观测相结合将大大提高组网雷达对灾害性天气监测预警的能力。

3.2 新一代天气雷达进行双极化技术升级改造,提高雷达估测降水精度与准确性

在 2.1.5 中已分析到,定量估计降水是新一代天气雷达重要用途之一,但因无法区分降水粒子相态以及缺少粒子谱特征信息,从而导致对降水的定量估计有较大偏差。双线偏振技术不仅能够获得探测目标的回波强度,还能够获得降水粒子的差分反射率因子 Z_{DR} 、差分相移 ϕ_{DP} 、退偏振因子 K_{DP} 、相关系数 ρ 等参数,通过这些参数可识别降水粒子形态,提高定量测量降水的精度。因此在新一代天气雷达上增加双线偏振功能是有必要的。

美国已在十多部 NEXRAD 上进行了双线偏振技术升级改造,重点试验双线偏振雷达技术对提高雷达定量估测降水能力试验。为了检验其业务应用的确切性能,从 2002 年至今在俄克拉荷马州中部等多个地方进行外场对比观测试验。图 18a 和 18b 分别是双极化 WSR-88D 雷达与 WSR-88D 雷达定量估测降水的比较。在图 18b 中由于对流云体内的冰雹的影响导致估测降水明显过高估计,而图 18a 采

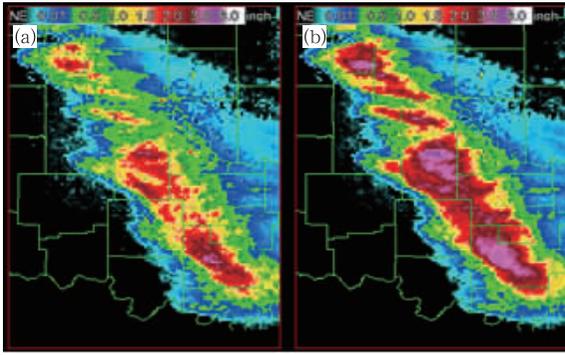


图 18 双线偏振雷达定量测量降水图
(a) 双极化 WSR-88D 雷达 1 h 估测降水,
(b) WSR-88D 雷达 1 h 估测降水
Fig. 18 Quantitative precipitation detected
by dual linear polarization radar
(a) One-hour precipitation by dual-polarized
WSR-88D radar, (b) One-hour precipitation
by WSR-88D radar

用了双极化偏振技术,消除了冰雹的影响,降水的估计比较合理。

目前具有双极化偏振技术的多普勒天气雷达需要解决的关键技术包括:微秒级的大功率高速高精度高隔离度的极化开关以及极低副瓣天线在两种极化下增益、波束形状和指向的一致性;天馈系统的稳定性;接收机双通道的一致性、高速高精度的信号处理器等保证观测数据的可靠性。

3.3 发展我国毫米波雷达技术,提高灾害性天气预警预报能力

提高灾害性天气的预警预报能力,一个主要途径就是探测灾害性天气发生前云的发生、发展。毫米波云雷达为实现这一目标提供了技术的支撑(孙晓光等,2011;王德旺等,2012)。目前国内外云雷达的频段主要选择在 35 GHz 或者 94 GHz,其对应的波长分别为约 8 或 3 mm。根据研究表明(仲凌志等,2009):这两个波长对粒子大小以及液水含量的敏感性见图 19a 与 19b。图 19a 给出了 8 mm 波长云雷达在相同液水含量条件下,0~800 μm 粒子大小范围内随着粒子尺寸的增加,反射率因子是逐渐增强的,这表明 8 mm 波长云雷达适合观测粒子大小范围 0~800 μm ,即观测非降水云、毛毛雨以及弱降水云系;图 19b 给出了 3 mm 波长云雷达在相同液水含量条件下,0~350 μm 范围内反射率因子随粒子尺寸的增大而增强,在 350~800 μm 反射率因子随粒子尺寸增加反而减小。因此,3 mm 波长云雷达适合观测的粒子大小范围为 0~350 μm ,适合观测卷云。

毫米波云雷达还具有如下特点(仲凌志等,2009):一是波束方向性好,有极高的空间分辨率。毫米波雷达波束宽度多在 0.4°~0.6°,相对于新一代天气雷达 1.0° 的波束宽度其方向性有很大提高。

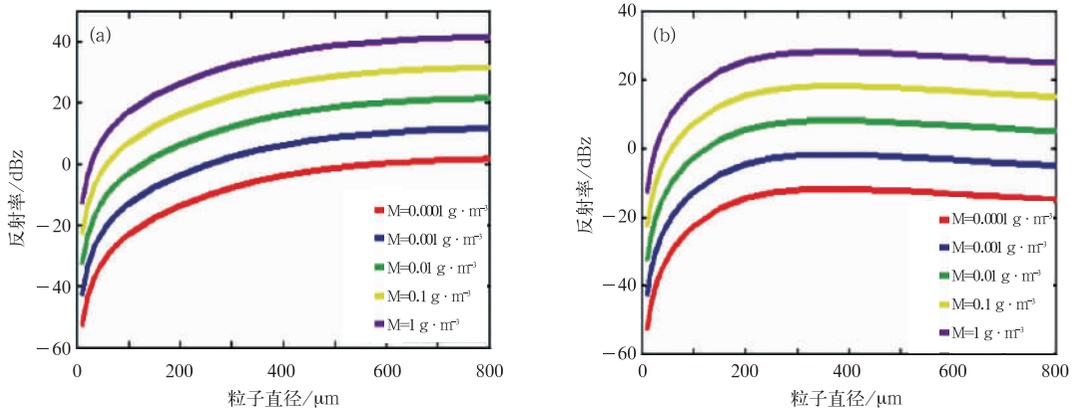


图 19 毫米波雷达探测能力图
(a) 8 mm 波长雷达对粒子大小以及液态水含量敏感性,
(b) 3 mm 波长雷达对粒子大小以及液态水含量敏感性
Fig. 19 Detection capability of MMW radar
(a) Sensitivity of 8 mm wavelength radar to particle size and liquid water content,
(b) Sensitivity of 3 mm wavelength radar to particle size and liquid water content

二是能够探测到的粒子从几微米的云粒子到弱降水回波粒子,并且非降水云或弱降水云对其衰减很小,

能够非常精细地探测云体的物理结构,是探测云发生发展及其演变的有效工具,也是提高灾害性天气

预警预报能力的重要手段。

3.4 采用脉冲压缩技术,推动天气雷达固态化和小型化

随着天气雷达系统总体朝向低功率、高可靠稳定性方向发展,发射机技术也日趋呈现向固态发射机体制的发展趋势,因此,脉冲压缩技术具有重要应用价值。脉冲压缩技术其实质是,在发射端增加脉冲发射宽度,增强脉冲发射平均功率,在接收端通过脉冲压缩技术将接收信号压缩为窄脉冲,提高距离分辨力。该种信号处理方法优点有:(1)通过发射宽脉冲,可以降低雷达的发射峰值功率,避免采用大功率发射管,采用固态化固件,使雷达小型化,轻便化;(2)在雷达发射功率不变,保持距离分辨力,增强其探测能力,能够探测到晴空回波或者弱回波。

压缩按发射信号的形式可分为4类:(1)线性调频脉冲压缩,(2)非线性调频脉冲压缩,(3)相位编码脉冲压缩,(4)时间频率编码脉冲压缩,其中用得比较多的是前3种方法。

3.5 发展机载气象雷达,追踪重大天气过程

目前,应用较广泛的机载多普勒天气雷达系统有4套:WP-3D机载尾翼单波束垂直扫描多普勒雷达、机载尾翼双波束雷达、ER-2多普勒雷达和双偏振云雷达。这些雷达扫描策略分为两类,一类雷达可进行准双多普勒雷达体扫,另一类雷达只能进行定向扫描。

机载气象雷达的特点:(1)灵活机动性好,能够快速追踪天气过程。为了充分发挥其灵活性并且能够使其探测到灾害性天气系统的动力、热力结构以及微物理结构,应该研制具有快速扫描能力的机载相控阵天气雷达。(2)机载雷达在观测时通过设计特殊飞行路径或者扫描策略来形成双雷达观测数据,进而通过双雷达反演精度较高的风场信息,有效地追踪重大天气过程。

3.6 快速扫描的相控阵天气雷达技术应用

相控阵技术最早出现在20世纪30年代,一直主要用于军事。有别于常规的只有1个收发天线的机械扫描雷达,相控阵雷达是具有许多收发组件的天线阵列,通过电子控制多个发射单元波束的相位

来调节扫描方位与俯仰,相控阵雷达的这种电子扫描方式较机械扫描明显的优势就是雷达扫描速度快。

由于相控阵雷达具有天线波速的快速扫描特性,能在短时间内快速扫描一个周期,适合探测发展速度很快的强对流天气,如雷暴、冰雹和龙卷等,2002年美国国家雷达技术委员会推荐利用相控阵技术取代原WSR-88D技术。为了研究相控阵天气雷达的特性,美国建立了国家气象雷达试验平台,由美国强风暴实验室(NSSL)、雷达运行中心(ROC)、俄克拉荷马大学(OU)和美国海军等9家单位合作对退役的宙斯盾相控阵雷达进行改造,建立了两维相扫体制的相控阵天气雷达系统,安装在俄克拉荷马州的Norman市,用于对冰雹、龙卷等强天气的探测。在此基础上,美国还发展了可移动一维相扫X波段相控阵天气雷达,并于2007—2008年进行外场试验,追踪观测龙卷、冰雹。在我国,中国气象科学研究院国家灾害天气实验室与其他科研院所研制了S波段相控阵天气雷达以及车载X波段相控阵天气雷达系统。

尽管相控阵天气雷达有扫描速度快,收发单元功率小等优点,但也有其技术难点。常规天气雷达天线方向性很强,它所辐射的功率主要集中在波束所指的方向,而相控阵天气雷达,由于其是靠相位改变来改变雷达波束的指向,因此其波束宽度不再是固定不变而是随着仰角变化发生变化,当波束垂直天线阵面时,波束宽度最小,当波束指向偏离法线越大时,波束宽度越大;由于波束宽度是随着仰角发生变化的,因此相控阵天气雷达的雷达增益也不是固定不变的,而是随着仰角发生变化的,波束指向越靠近天线法向方向时,天线增益大,越偏离其增益就越小。因为相控阵天气雷达波束宽度的不固定、增益的不固定,给定量观测带来困难。另外,定标问题还有待进一步研究。

4 结 论

我国自从20世纪90年代后期启动新一代多普勒天气雷达网建设以来,在大尺度、中尺度灾害性天气监测方面取得了长足的进步,但在实际业务使用中暴露出一些突出问题。因此,有针对性提出对

新一代天气雷达业务网技术升级改造的初步方案,进一步改进提高天气雷达网的监测能力十分必要。

(1) 改进现有业务雷达扫描策略。通过增加扫描仰角,提高垂直分辨率,增强垂直结构精细化探测;对于沿海和高山雷达站,增加低层和负仰角观测以增强雷达对边界层的观测能力,这将有利于进一步提高对中小尺度天气系统的发现能力和分析能力。同时,在观测模式的适配参数方面,针对大陆天气系统的特征,建立起有利于消除距离模糊为第一准则适用于大陆天气观测的模式。未来的观测模式应当是体扫描与 RHI 扫描相结合的观测策略。

(2) 天气雷达主要作用是测量降水,双极化技术的应用将提高天气雷达定量估测降水的准确性和估测精度。因此,在现有技术体制不做大的改变前提下,逐步将大陆业务雷达网升级为双极化多普勒天气雷达体制是十分必要的,技术上也是可行的。

(3) 天气雷达的脉冲多普勒体制因其距离与速度模糊的瓶颈,已经严重限制了雷达探测能力,尤其是在多普勒径向速度场的应用。采用目前成熟的相位编码技术与双 PRF 技术是有效提高雷达在多普勒径向速度场探测质量的关键技术之一,将大大提高我们在径向速度场的量化应用水平。

(4) 晴空大气探测以及弱回波的早期探测是提高灾害性天气预警能力的重要因素之一,在现有雷达技术体制不做大的改变下,应用成熟的脉冲压缩技术提高对晴空大气和弱回波探测能力是可行的有效途径,并且通过脉冲压缩技术推动天气雷达固态化小型化。

(5) 天气雷达有效组网,多部雷达的协同观测不仅能够有效地观测到中尺度天气系统,而且还能够有效地对如梅雨锋暴雨天气过程、温带气旋等大

尺度天气系统进行观测。重点要解决好组网雷达的实时定标以及空间与时间同步问题。

(6) 发展毫米波测云雷达探测技术,实现对云的精细化结构探测,可以有效提高对灾害性天气早期预警能力。同时,运用机载气象雷达的快速灵活的特性,以实现追踪重大天气过程,是我国亟待需要进一步加强的方面。

参考文献

- 谌芸,孙军,徐珺,等. 2012. 北京 721 特大暴雨极端性分析及思考 (一) 观测分析及思考. 气象, 38(10): 1255-1266.
- 古庆同,李柏. 2011. 移动式全固态雷达信号处理技术研究. 成都信息工程学院.
- 葛润生,王顺生,张沛源. 1988. CAMS 多普勒天气雷达系统. 中国气象科学研究院气象科学技术报告第 88009 号.
- 孙晓光,刘宪勋,贺宏兵,等. 2011. 毫米波测云雷达融化层自动识别技术. 气象, 37(6): 720-726.
- 王德旺,刘黎平,仲凌志,等. 2012. 毫米波雷达资料融化层亮带特征的分析及识别. 气象, 38(6): 712-721.
- 王旭,李柏. 2009. 相位编码在 WSR98/XD 天气雷达中退距离模糊的方法研究与实现. 成都信息工程学院.
- 仰美霖,刘黎平,苏德斌,等. 2011. 二维多途径退速度模糊算法的应用及效果研究. 气象, 37(2): 203-212.
- 俞小鼎. 2012. 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨成因分析. 气象, 38(11): 1313-1329.
- 张家国,王珏,黄治勇,等. 2011. 几类区域性暴雨雷达回波模型. 气象, 37(3): 285-290.
- 仲凌志,刘黎平. 2009. 毫米波测云雷达系统的定标和探测能力分析及其在反演云微物理参数中的初步研究. 中国气象科学研究院.
- Bringi V N, Chandrasekar V, 李忱,张越译,张培昌校. 2010. 偏振多普勒天气雷达原理和应用. 北京: 气象出版社.
- Steadham R M, Brown R A, Wood V T. 2002. Prospects for faster and denser WSR-88D scanning strategies. 18th International Conference on Interactive Information and Processing Orlando, FL-orida, Amer. Meteor. Soc., J89-J91.