

吴翀, 刘黎平, 汪旭东, 等. 相控阵雷达扫描方式对回波强度测量的影响. 应用气象学报, 2014, 25(4): 406-414.

相控阵雷达扫描方式对回波强度测量的影响

吴 翀¹⁾²⁾ 刘黎平¹⁾³⁾* 汪旭东⁴⁾ 范 辉⁴⁾ 刘 琦⁴⁾

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⁾(成都信息工程学院, 成都 610225)

³⁾(南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044)

⁴⁾(安徽四创电子股份有限公司, 合肥 230088)

摘 要

有源数字阵列雷达的波束设计非常灵活, 可变的波束宽度和多波束模式不仅可以满足不同任务的观测需求, 还可有效节约扫描时间, 但阵列天线参数随波位改变的特性对相控阵天气雷达回波强度的精确定标提出了挑战。2013 年 4—6 月, 中国气象科学研究院与安徽四创电子股份有限公司联合研发的 X 波段一维有源相控阵天气雷达 (X-PAR) 进行了装配后的首次测试观测。对比该雷达与相同位置的 C 波段双线偏振雷达 (C-POL) 观测资料发现, X-PAR 不同宽度的扫描波束均能取得较合理的观测资料。但由于各模式的雷达方程及其标定方法不尽相同, 并受到阵列天线照射体积、展宽波束和发射增益的影响, 造成 X-PAR 回波强度存在一定的测量偏差。结合天线参数分析和实际数据统计将测量偏差订正至 ± 1 dB 内, 为雷达的进一步调试和改进提供了依据。

关键词: 相控阵天气雷达; 回波强度; 定量测量

引 言

目前, 常规天气雷达受机械伺服系统、脉冲累积数目的限制^[1-2], 其扫描时间和资料精细程度均难以显著提高。当相控阵体制运用于天气雷达后, 可使用宽波束发射多波束同时接收的扫描方式提升观测效率, 并通过“电扫描”的方式快速灵活地控制多波束的产生和移动, 大大增强了气象信息的获取能力, 因此相控阵体制是今后天气雷达发展的重要方向之一^[3-4]。自 2002 年起, 美国海洋大气局 (NOAA) 的强风暴实验室 (NSSL) 先后获得了一部 S 波段相控阵天气雷达 (NWRT-PAR) 和一部 X 波段车载相控阵天气雷达 (MWR-05XP), 并在大量的试验基础上讨论了相控阵技术在双极化方向的技术可行性及下一代天气雷达的性能方案^[5-6]。其中, NWRT-PAR 由一大型军用二维相控阵雷达改造而来, 加装机械转动系统后构成固定的相控阵技术试验站^[7-9]。而 MWR-05XP 则是 NSSL 针对强对流过程专门研发

的车载雷达, 不仅可完成常规雷达的体扫 (VPPI), 还可由不同方位角 RHI 组成 VRHI 形式的扫描数据, 两种扫描模式下获取 360° 方位角的观测资料用时仅需 40~62 s, 75 m 的距离分辨率覆盖 $1^\circ \sim 55^\circ$ 仰角 (31 层), 该雷达已在 VOTEX2 试验中采集了大量资料^[10-14]。我国也开展了相控阵技术在天气雷达领域的相关研究, 在军用雷达的基础上分别改造出了一部 S 波段车载和一部 X 波段机载相控阵天气雷达, 研制了拥有自主知识产权的相控阵天气雷达系统^[15-17]。

虽然相控阵技术能够使天气雷达高效获取气象信息, 但受阵列天线结构影响, 雷达波束宽度、天线的发射增益 (简称发射增益)、天线的接收增益 (简称接收增益) 等系统参数均会随扫描角的波束指向 (简称波位) 远离阵面法向而恶化^[18-19], 造成了其在标定过程中与常规体制天气雷达方法^[20] 的差异。相控阵天气雷达大多由军用警戒搜索雷达改造而来, 其初始设计并未用于精细气象目标探测, 较高的副瓣和较宽的波束均会影响资料质量。Zhang 等^[21] 在分析观测资

2013-10-30 收到, 2014-04-08 收到再改稿。

资助项目: 国家自然科学基金项目 (41175038), 公益性行业 (气象) 科研专项 (GYHY201106046), 十二五国家科技支撑计划项目 (2012BAC22B00)

* 通信作者, email: lpliu@cma.cma.gov.cn

料 NWRT-PAR 时发现,天线副瓣将引入一定的地物杂波,需进行相应的质量控制。对于我国 S 波段一维相控阵天气雷达,张志强等^[22]和吴翀等^[23]发现该雷达的宽波束对回波结构产生了明显的平滑,与多普勒天气雷达相比回波结构存在一定差异。对于 X 波段机载二维相控阵天气雷达,该雷达同样存在因过宽波束导致的平滑效应,二维平面阵体制使不同方位的平滑作用也不同,在阵面边缘的平滑作用远高于法向,难以获取较常规天气雷达精细的观测资料^①。

2009 年,中国气象科学研究所与安徽四创电子股份有限公司合作研发了车载 X 波段相控阵天气雷达。该雷达采用一维有源相控阵天线,扫描模式和用途与 NSSL 的 MWR-05XP 类似,均用于强对流天气过程的数据采集。与常规多普勒天气雷达相比,其观测资料的分辨率更高,并在使用 4°展宽波束及赋形波束(0°~20°)的观测模式中实现了多个通道同时接收的技术,扫描效率得以成倍提升,能够大幅减少高分辨率观测资料的获取时间。2013 年 4—6 月,X-PAR 在完成装配后进行了首次测试观测,以检验并调试雷达系统。本文将 X-PAR 测试过程中不同模式的观测数据与相同位置的 C-POL 对比,结合雷达设计参数和定标方法分析了回波强度测量偏差的产生原因并进行初步订正,为雷达的进一步调试和改进提供依据。

1 X-PAR 性能及工作参数

中国气象科学研究所与安徽四创电子股份有限公司合作研发的 X 波段相控阵天气雷达是我国今后天气雷达体制研究及试验的验证系统,使用了由 128 根波导组成的裂缝平面阵列天线、全数字 T/R 组件、数字波束形成(DBF)、直接数字合成(DDS)、数字脉冲压缩等先进技术,性能较常规天气雷达有较大提升。该雷达发射功率为 1 kW,使用 33 μs 脉冲压缩,探测范围为 70 km,距离分辨率为 37.5 m。在垂直方向,雷达阵面的预仰角固定为 10°,通过 DBF 系统控制 8 个数字阵列模块(DAM)内的 128 个有源 T/R 组件产生不同宽度和指向的波束,在每个方位进行 RHI 方式的垂直扫描,并由水平方向上的机械伺服系统控制雷达的扫描周期,得到 VRHI 方式的扫描数据^②。目前,X-PAR 在系统验证和初步调试过程中使用了 3 种扫描模式,即精细测量(fine mode,简称为 FM)、警戒搜索(guard mode,简称为 GM)、快速观测(quick mode,简称为 QM),3 种模式下的基本工作参数见表 1。

X-PAR 工作时,首先由校正网络对各通道的幅相一致性进行订正,将幅度精度控制在 0.3 dB、相位精度控制在 0.5°以内。随后 DBF 系统控制 DAM

表 1 X-PAR 3 种模式工作参数及波束特性

Table 1 Parameters and beam patterns of X-PAR(FM/QM/GM)

工作参数	精细测量	警戒搜索	快速观测
观测用时(64 点脉冲积累)	150 s, 90°方位	150 s, 360°方位	30 s, 360°方位
扫描策略	单波束顺序扫描	发射赋形波束 14 路接收	发射展宽波束 4 路接收
法向参数	$\varphi_{r0} = 0.61^\circ, \varphi_{r0} = 0.88^\circ$ $G_{t0} = 46 \text{ dB}$ $G_{r0} = 44.4 \text{ dB}$	φ_{r0} 不定, $\varphi_{r0} = 0.88^\circ$ G_{t0} 不定, $G_{r0} = 44.4 \text{ dB}$	$\varphi_{r0} = 4^\circ, \varphi_{r0} = 0.88^\circ$ $G_{t0} = 37.8 \text{ dB}, G_{r0} = 44.4 \text{ dB}$
发射俯仰 φ_{r0}	收发波束均以 0.5°仰角的波位处开始,以 1°的步进角扫描至 39.5°	赋形波束覆盖 0°至 20°	发射波束以 2°仰角的波位处开始,以 4°为步进角扫描至 38°
接收俯仰 φ_{r0}		14 路接收波束分布同 VCP11	4 路接收波束分布与精细测量模式一致
阵面夹角 v_t, v_r	$v_t = \alpha_t - 10, v_r = \alpha_t - 10$	$v_t = \alpha_t - 10, v_r = \alpha_t - 10$	$v_t = \alpha_t - 10, v_r = \alpha_t - 10$
接收增益 G_{rv}	$G_{rv} = G_{r0} \cdot \cos v_r$		
发射增益 G_{tv}	$G_{tv} = G_{t0} \cdot \cos v_t$	$\varphi_{r0} = 1.5^\circ$ 时约 36 dB,随仰角升高 G_{tv} 迅速减小,在 $\varphi_{r0} = 19.5^\circ$ 时约 17 dB	$G_{tv} = G_{t0} \cdot \cos v_t$
波束宽度 φ_v	$\varphi_v = \varphi_{r0} / \cos v_r$	$\varphi_v = \varphi_{r0} / \cos v_r$	$\varphi_v = \varphi_{r0} / \cos v_r$

①Wu Chong, Liu Liping. Comparison of the observation capability of an X-band phased-array radar with and X-band Dopplar radar an S-band operational radar. *Adv Atmos Sci*, to be published.

②刘绍平,吴翀,汪旭东,等. X 波段相控阵天气雷达对流过程外场试验及初步结果分析. 大气科学,待发表.

内的 DDS 参数,由其内部的 FPGA 产生高精度的中频信号。DDS 输出的发射波形经一本振和二本振两次上变频和放大后送达天线的输入端,裂缝波导线阵将射频信号辐射到空间中形成雷达所需要的发射波束。在接收过程中,天线接收的信号经低噪声放大后由一本振、二本振下变频到中频信号,送至数字接收机进行 AD 采样和数字下变频处理,该过程均在阵面的 DAM 内完成。随后,高速光纤将处理得到的基带数据由阵面送至后端,由 DBF 完成 128 个阵元的波束加权合成后进行数字脉冲压缩处理。对于处理后的基带信号,信号处理系统将使用 4 MHz 对其采样,并由 DVIP 及 FFT 处理计算得到回波强度、径向速度、速度谱宽等基数据。

在 X-PAR 的测试过程中,雷达回波强度的标定与计算均使用式(1)的气象雷达方程^[24],其中增加了

脉压得益 G_p 来衡量脉冲压缩体制对雷达性能改善

$$Z = \frac{1024 \ln 2}{\pi^3} \times \frac{\lambda^2}{P_t G_{tv} G_{rv} G_p \theta_0 \varphi_v h} \times \frac{R^2}{|K|^2} P_r \quad (1)$$

由于 X-PAR 3 种模式下的收发波束存在差异(图 1),发射增益 G_{tv} 、接收增益 G_{rv} 、垂直波束宽度 φ_v 均与波束与阵面夹角相关。设法向处的发射波束和接收波束的宽度分别为 $\varphi_{t0}, \varphi_{r0}$,其俯仰角分别为 α_t, α_r ,与阵面法向夹角分别为 ν_t, ν_r ,雷达法向处的收发增益分别为 G_{r0}, G_{t0} 。在雷达工作中,终端软件根据表 1 给出的 X-PAR 参数值,将对应模式和波位下的参数 $G_{r0}, G_{t0}, \varphi_v$ 分别代入式(1),再根据标准的收发功率及距离即可计算出 X-PAR 对当前气象目标的回波强度 Z 值。

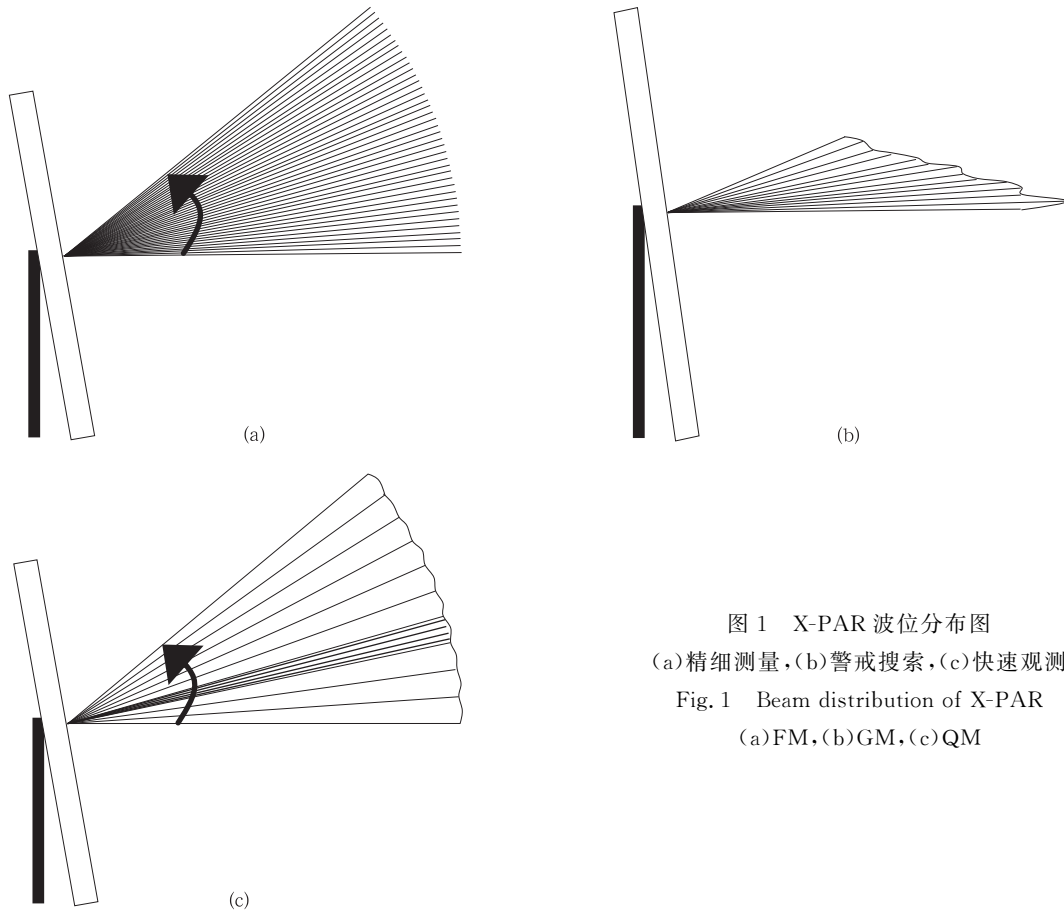


图 1 X-PAR 波位分布图
(a)精细测量,(b)警戒搜索,(c)快速观测
Fig. 1 Beam distribution of X-PAR
(a)FM,(b)GM,(c)QM

由 3 种模式的参数对比可以看出,在精细测量模式下 X-PAR 使用单波束顺序扫描 40° 的三维空间,能够得到最精细的观测资料,耗时也最长,这将对不同方位角的时间一致性产生不利影响。在警戒

搜索模式下,雷达以赋形波束发射、14 路波束接收的方式同时扫描 20° 的三维空间,能够获得最高的扫描效率,但赋形波束的增益远不如单波束强,探测能力也将受到局限。在快速模式下,雷达使用 4° 展

宽波束发射、4路波束接收的方式顺序扫描 40° 的三维空间,扫描效率较单波束提升了4倍,是现阶段兼顾扫描效率及雷达探测能力的观测方案。

2 资料选取及测量偏差分布

2.1 测试资料选取

X波段一维相控阵天气雷达于2013年4月15日起在广东省江门市鹤山气象局新站(22.7°N , 113.0°E , 海拔高度为42.8 m)开展了为期两个月的的外场测试工作,一部用于资料对比验证的C-POL雷达架设在相同位置。在整个外场测试过程中,X-PAR均使用距离库长为37.5 m、双PRF 1800:1200 Hz的设置进行观测,对其探测范围内的天气过程开机18次,获取了一定数量的观测资料。

C-POL是C波段双线偏振雷达,该雷达采用了单发双收的工作模式,峰值功率高(大于250 kW)、动态范围大(大于85 dB),并经过了较为严格的标定,其观测资料的可靠性较高。对于X-PAR,其接收波束宽度较C-POL更窄(不大于 1°)、距离分辨率更高(小于50 m),不存在类似我国S波段相控阵天气雷达因过宽波束导致的平滑作用。因此,其与C-

POL的测量偏差主要来自于相控阵天线参数差异引起的标定误差。

在资料比对过程中,C-POL与X-PAR地理位置完全相同,各仰角的观测资料不需经纬度插值可直接使用,由于X-PAR的距离分辨率为C-POL的4倍,已按4个库为间隔做平滑处理。在垂直方向,C-POL采用VCP11的扫描策略,可与同样使用单波束扫描的X-PAR精细测量模式 19.5° 仰角以下资料进行对比。对于X-PAR $20.5^\circ\sim 39.5^\circ$ 仰角的观测资料,C-POL没有资料与之对应,因此使用精细测量资料与快速观测模式对比,分析 4° 宽波束与单波束的探测差异。需要注意的是,两部雷达分别处于C波段及X波段,不同波长下的衰减情况也存在差异,这种差异随距离增加及不同的降水类型而改变、不易定量表示,在资料对比时将尽可能选择衰减较小的区域进行分析。另外,由于X-PAR采用VRHI的扫描方式,垂直方向的时空分辨率远高于常规天气雷达,在强对流天气过程中X-PAR的垂直结构与C-POL存在一定差异。为了准确分析两部雷达的测量偏差,选择降水过程较为稳定及观测模式较为丰富的9次个例进行对比分析,个例概况见表2。本文所用时间均北京时。

表2 X波段相控阵天气雷达观测个例概况

Table 2 Weather observations of X-PAR

序号	日期	观测时段	雷达及观测模式	过程简单描述
1	2013-05-20	08:00—14:30	X-PAR(FM),C-POL	较大范围对流及稳定降水
2	2013-05-21	09:00—19:00	X-PAR(FM),C-POL	较大范围对流及稳定降水
3	2013-05-27	13:00—16:00	X-PAR(FM),C-POL	较小范围对流
4	2013-05-28	19:00—20:00	X-PAR(FM/QM),C-POL	较大范围稳定降水
5	2013-05-29	15:00—17:00	X-PAR(FM/QM),C-POL	较大范围对流
6	2013-06-03	15:00—18:00	X-PAR(FM/QM),C-POL	较小范围对流
7	2013-06-04	13:00—18:30	X-PAR(FM/QM),	较大范围稳定降水
8	2013-06-05	13:30—17:30	X-PAR(FM/QM),C-POL	较大范围对流
9	2013-06-10	13:00—18:00	X-PAR(FM/QM),C-POL	中等范围稳定降水

2.2 X-PAR与C-POL的测量偏差分布

根据表2的个例分布情况,取出X-PAR与C-POL相同位置下的观测资料,通过点对点的比较,得到各仰角下平均回波强度的测量偏差。为了降低大范围降水时不同波长衰减差异造成的影响,均选取离雷达最近的无遮挡雨带进行分析,取值范围控制在15 km内。其中,选取X-PAR精细测量模式于2013年5月20日09:12,09:32,09:52,5月21日11:23,11:33,12:03,5月28日19:38,6月3日17:32,17:41,6月5日13:14,6月10日13:16的

观测数据,将主要降水区域内 $0.5^\circ\sim 19.5^\circ$ 仰角数据与C-POL对比,得到测量偏差廓线(图2a)。同时,将X-PAR快速观测模式于5月28日18:55—19:10,19:38—19:53,5月29日15:21—15:36,16:28—16:33,16:37—16:42,6月4日17:09—17:18,17:29—17:37的40层数据与精细测量模式对比,分析展宽波束与单波束观测结果的异同(图2b)。图2给出不同测量偏差所对应的样本量可以看出,统计得到的测量偏差廓线具有较高的代表性。

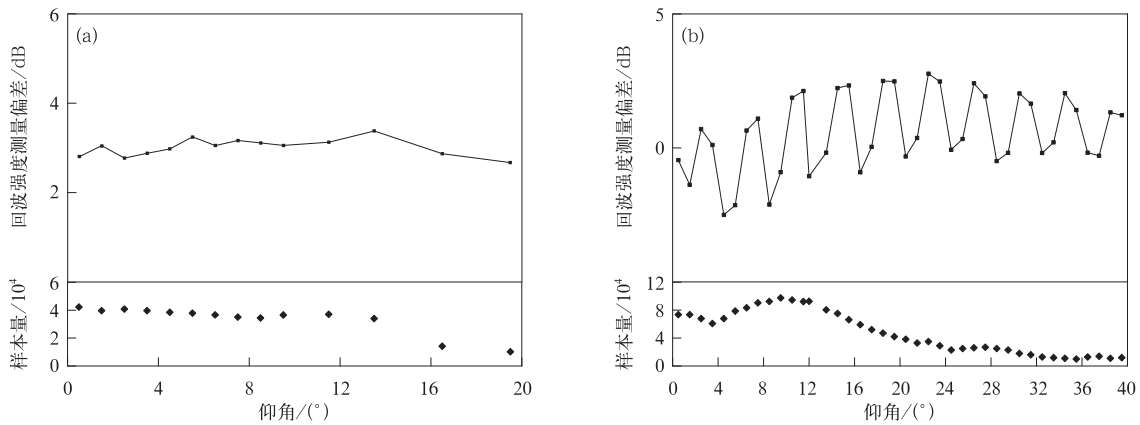


图 2 X-PAR 各仰角回波强度测量偏差随仰角变化廓线
 (a)精细测量与 C-POL 对比,(b)快速观测与精细测量对比
 Fig. 2 Reflectivity bias of X-PAR along elevation
 (a)from FM to C-POL,(b)from QM to FM

从对比结果可以看出,X-PAR 精细测量模式的观测资料可靠性很高,与 C-POL 的测量偏差稳定分布于 2.67~3.38 dB 之间,随仰角的变化非常小,验证了修正项 $(\cos \nu_t)^{-1}$ 对雷达方程订正的合理性。而快速观测模式与精细测量的偏差以 4° 为周期反复变化,在 4° 展宽波束的第 1 号、第 2 号波位 ($\nu_t - 0.5^\circ, \nu_t - 1.5^\circ$) 快速观测模式的观测结果基本偏弱,对于第 3 号、第 4 号波位 ($\nu_t + 0.5^\circ, \nu_t + 1.5^\circ$) 则明显偏强。同时,快速观测模式在不同展宽波束之间(即以 4° 仰角为间隔)的测量偏差也存在差异, 2° 仰角附近的测量偏差明显低于 22° 仰角,这与不同波位处的增益变化有关。

3 测量偏差产生原因及初步订正

3.1 X-PAR 单波束照射体积对回波强度的影响

对于使用单波束扫描的精细测量模式,各仰角间差异很小,但整体与 C-POL 相比存在约 3 dB 的固定测量偏差,这样的差异与方程中雷达常数的计算有关。对于 C-POL 等常规体制的天气雷达,其雷达常数是由圆形抛物面天线的近似计算得来,而采用裂缝波导平面阵的 X-PAR,天线的有效截面如图 3a 所示。对于式(1)中的 X-PAR 雷达方程,虽然考虑了增益和波束宽度随波位的变化,但仍使用圆形

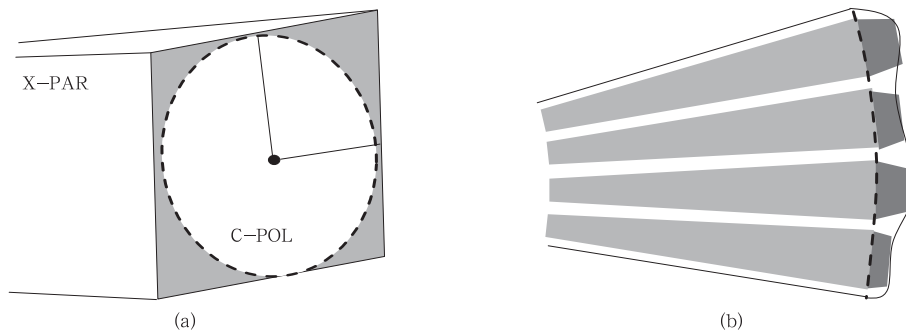


图 3 波束剖面对比图
 (a)X-PAR 与 C-POL 的有效截面对比,(b)X-PAR 快速观测模式收发波束分布图
 Fig. 3 Comparison of beam profile
 (a)effective cross section of X-PAR and C-POL,
 (b)transmitting and resaving beam positions of X-PAR QM

截面的近似方法,导致 X-PAR 的雷达常数将出现系统性差异,从而产生回波强度的测量偏差。

目前,X-PAR 的天线增益 G 均通过波束宽度 θ_φ 计算而来。由天线理论可知,增益与实际的波束宽度成反比,波束宽度又与天线有效截面成反比,而在雷达方程中,回波强度则分别与波束宽度及增益的平方均成反比关系。因此,X-PAR 的回波强度与 θ_φ 将成正比关系,由于天线有效截面的低估引起波束宽度的偏大,造成了雷达常数及其计算的回波强度的高估现象。

通过计算,X-PAR 的有效截面存在约 $\frac{\pi}{4}$ 的低估,对应的雷达常数将存在 $10\lg(\frac{4}{\pi})$ 的高估,即 X-PAR 实际回波强度将比理论值偏强约 1 dB。本次外场试验结束后,安徽四创电子股份有限公司针 X-PAR 的天线性能进行测试,其发射功率、收发增益、内部损耗等参数均与设计值存在少许差异,与天线有效截面的差异共同造成了约 3 dB 的测量偏差。对 X-PAR 精细测量下的雷达常数做整体 3 dB 的修正后,可使 X-PAR 精细测量模式与 C-POL 的测量

偏差控制在 ± 0.4 dB 内。

3.2 X-PAR 展宽波束对回波强度的影响

对于使用 4° 展宽波束的快速观测模式,仅需 10 次扫描即可完成 40° 空域的观测,效率较精细测量提升了 4 倍。与图 2b 对比,该模式下不同波位处的测量偏差以 4° 为周期变化,这正与其发射波束宽度吻合,因此推测展宽波束的实际方向图与理论值存在差异。

X-PAR 在标定过程中,假设展宽波束内各接收波束波位处的天线发射增益一致,如图 3b 中的虚线所示。但雷达展宽波束的实际方向图并非与理论值完全一致,这样造成的差异已反映至图 3b 中深色部分,并周期性影响雷达方程中回波强度的准确性。根据图 2b 的实测数据,统计分析出展宽波束内接收波束的 4 个波位处回波强度的平均测量偏差分别为 $-0.83, -0.41, 1.85, 1.67$ dB。使用该结果对 X-PAR 快速观测模式的数据进行订正,并再次与精细测量对比得到测量偏差的廓线(图 4a)。可以发现,新的误差廓线更为平滑,图 2 中以 4° 为周期的起伏现象基本消失。

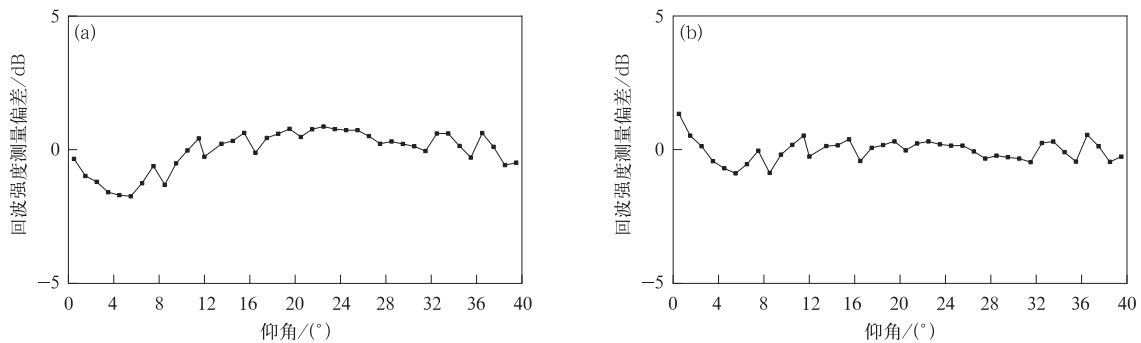


图 4 X-PAR 快速观测与精细测量模式各仰角回波强度测量偏差随仰角变化廓线

(a)快速观测模式经展宽波束订正,(b)快速观测模式经过展宽波束和发射增益订正

Fig. 4 Reflectivity bias of X-PAR between QM and FM along elevation

(a)broaden beam correction for QM,(b)broaden beam and transmitting gain correction for QM

3.3 X-PAR 发射增益对回波强度的影响

根据雷达性能,X-PAR 的天线增益均会随扫描角远离阵面法向而恶化,需对雷达方程中的增益参数按 $(\cos\alpha_1)^{-1}$ 进行修正。对比图 2a,该方法对单波束收发的精细测量模式效果较好,各仰角的测量偏差基本不随仰角变化。但在图 4a 的快速观测模式中,各仰角的测量偏差并不一致,其中低仰角偏弱而高仰角偏强。推测 4° 展宽波束的发射增益并非按

$(\cos\alpha_1)^{-1}$ 规律变化,其在不同波位处与理论值的差异导致了测量偏差的产生。

根据图 4a 的测量偏差分布情况,拟合得到对应的订正曲线 $y = -0.04x^2 - 0.193x + 1.875$,将其代入原数据中,图 4b 给出了经两次订正后测量偏差的分布情况。与图 2b 相比可以明显发现,因雷达方程参数差异造成的测量偏差得到了较好的修正,X-PAR 快速观测模式与精细测量模式的测量偏差已

控制在 ± 1 dB 内。

4 订正后 X-PAR 与 C-POL 回波结构对比

2013 年 6 月 5 日 12:00—17:00 鹤山站附近出现大范围对流性降水过程,选取 X-PAR 13:36—

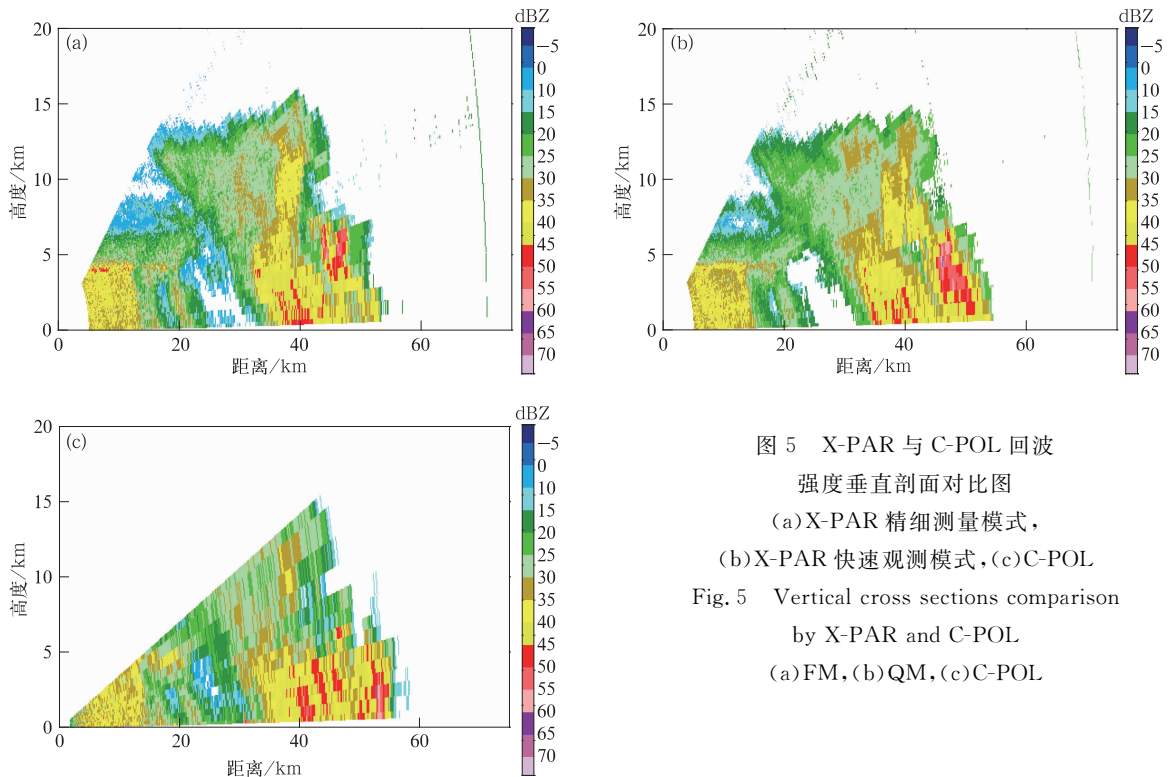


图 5 X-PAR 与 C-POL 回波强度垂直剖面对比图

(a) X-PAR 精细测量模式,

(b) X-PAR 快速观测模式, (c) C-POL

Fig. 5 Vertical cross sections comparison by X-PAR and C-POL

(a) FM, (b) QM, (c) C-POL

由图 5 可以看到,订正后 X-PAR 精细测量模式与快速观测模式的垂直结构几乎一致,与 C-POL 相比其降水回波的位置、强弱分布均合理,不仅准确反映了降水过程的发展特征,同时也验证了订正方法的可靠性。由于直接数字合成技术的应用, X-PAR 扫描范围和波束的指向非常灵活,以 1° 步进角完成 40 层扫描的垂直分辨率远超 VCP11 分布的 C-POL,有助于对天气过程的精细探测。

5 结论与讨论

2013 年 4—6 月,中国气象科学研究院的 X 波段一维相控阵天气雷达进行了装配后的首次测试观测。为了检验该雷达系统的可靠性和不同模式的测量精度,本文将 X 波段相控阵天气雷达的观测资料与相同位置的 C 波段双线偏振天气雷达进行定量对比,得到不同仰角回波强度测量偏差的分布规律,

13:48 的观测资料与相同位置的 C-POL 进行回波结构比较。对比前,根据第 3 章中的初步订正方法对 X-PAR 精细测量模式各仰角按 -3 dB 修正测量偏差,快速观测模式在此基础上分别对展宽波束内的增益差异和不同发射波束间的增益差异进行修正,得到以 15° 方位角的垂直剖面对比见图 5。

结合雷达标定和理论参数分析了该雷达测量偏差的产生原因,并提出了初步订正方法,得出结论如下:

1) 目前 X-PAR 使用了 1° 单波束、 4° 展宽波束、 20° 赋形波束的 3 种扫描模式,不同模式下的天线参数各不相同、对应的标定方案存在差异,需通过测量偏差的对比进行验证。在资料选取时,使用了稳定降水的观测数据以减小不同扫描方式的影响,同时近处区域的样本避免了不同波长的衰减差异。

2) 通过偏差廓线的分析发现, X-PAR 使用 1° 单波束扫描的精细测量模式探测结果与 C-POL 存在约 3 dB 的固定测量偏差,但在各仰角间的浮动很小。 X-PAR 使用展宽波束的快速观测与精细测量模式的测量偏差以 4° 波束宽度为周期规律性变化,且较高仰角附近的测量偏差更大。

3) 根据检测分析, X-PAR 精细测量模式与 C-POL 的测量偏差主要由有效截面的计算和天线参数的差异共同造成,通过雷达常数的修正可以将测

量偏差缩小至 ± 0.4 dB内。在此基础上,快速观测模式还受展宽波束方向图和不同方位增益的影响,其与精细测量的偏差同时随波束宽度和仰角升高变化,通过对实际数据的统计拟合可以将测量偏差订正至 ± 1 dB内。

4) 将X-PAR订正后的垂直剖面与C-POL对比,不同模式下的回波结构几乎一致,均准确反映降水系统的发展特征,验证本文分析方法的可靠性。X-PAR在垂直方向的分辨率远高于常规天气雷达,有利于强对流过程的分析研究。

由于有源数字阵列天线的结构复杂,其实际性能难以与理论值保持严格一致,这对于雷达的精确标定提出了较高要求。今后在外场观测中较好的解决方案是将一部经严格标定的常规天气雷达架设在相同位置进行对比,通过实测数据将雷达的标定误差降至最低。

参 考 文 献

- [1] 丁青兰,刘黎平,葛润生,等. 双线偏振多普勒雷达测量精度的理论分析. *应用气象学报*, 2003, 14(1): 30-38.
- [2] 葛润生,朱晓燕,姜海燕. 提高多普勒天气雷达晴空探测能力的一种方法. *应用气象学报*, 2000, 11(3): 257-263.
- [3] Zrníc D S, Kimpel J F, Forsyth D E, et al. Agile-beam phased array radar for weather observations. *Bull Amer Meteor Soc*, 2007, 88(11): 1753-1766.
- [4] Weadon M, Heinselman P, Forsyth D, et al. Multifunction phased array radar. *Bull Amer Meteor Soc*, 2009, 90(3): 385-389.
- [5] Weber M E, Cho J Y N, Herd J S, et al. The next-generation multi-mission US surveillance radar network. *Bull Amer Meteor Soc*, 2007, 88(11): 1739-1751.
- [6] Zhang G, Doviak R J, Zrníc D S, et al. Phased array radar polarimetry for weather sensing: A theoretical formulation for bias corrections. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2009, 47(11): 3679-3689.
- [7] Heinselman P L, Priegnitz D L, Manross K L, et al. Rapid sampling of severe storms by the National Weather Radar Testbed Phased Array Radar. *Wea Forecasting*, 2008, 23(5): 808-824.
- [8] Yussouf N, Stensrud D J. Impact of phased-array radar observations over a short assimilation period: observing system simulation experiments using an ensemble Kalman filter. *Mon Wea Rev*, 2010, 138(2): 517-538.
- [9] Emersic C, Heinselman P L, MacGorman D R, et al. Lightning activity in a hail-producing storm observed with phased-array radar. *Mon Wea Rev*, 2011, 139(6): 1809-1825.
- [10] Wurman J, Dowell D, Richardson Y, et al. The second verification of the origins of rotation in tornadoes experiment: VORTEX2. *Bull Amer Meteor Soc*, 2012, 93(8): 1147-1170.
- [11] Brown R A, Wood V T. Simulated vortex detection using a four-face phased-array Doppler radar. *Wea Forecasting*, 2012, 27(6): 1598-1603.
- [12] Isom B, Palmer R, Kelley R, et al. The atmospheric imaging radar: simultaneous volumetric observations using a phased array weather radar. *J Atmos Ocean Technol*, 2013, 30(4): 655-675.
- [13] Zhang F, Snyder C, Sun J. Impacts of initial estimate and observation availability on convective-scale data assimilation with an ensemble Kalman filter. *Mon Wea Rev*, 2004, 132(5): 1238-1253.
- [14] Bluestein H B, French M M, PopStefanija I, et al. A mobile, phased-array Doppler radar for the study of severe convective storms. *Bull Amer Meteor Soc*, 2010, 91(5): 579-600.
- [15] 高玉春. 机载气象雷达探测系统总体关键技术研究. 北京: 北京邮电大学, 2009: 32-35.
- [16] 张志强, 刘黎平. 相控阵技术在天气雷达中的初步应用. *高原气象*, 2011, 30(4): 1102-1107.
- [17] 刘黎平, 葛润生. 中国气象科学研究院雷达气象研究50年. *应用气象学报*, 2007, 17(6): 682-689.
- [18] Skolnik M I, 王军. 雷达手册. 北京: 电子工业出版社, 2003: 480-536.
- [19] 杨金红, 高玉春, 程明虎, 等. 相控阵天气雷达波束特性. *应用气象学报*, 2009, 20(1): 119-123.
- [20] 潘新民, 柴秀梅, 崔柄俭, 等. CINRAD/SB雷达回波强度定标调校方法. *应用气象学报*, 2011, 21(6): 739-746.
- [21] Zhang G, Li Y, Doviak R J, et al. Multipatterns of the national weather radar testbed mitigate clutter received via sidelobes. *J Atmos Ocean Technol*, 2011, 28(3): 401-409.
- [22] 张志强, 刘黎平. 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. *气象学报*, 2011, 69(4): 729-735.
- [23] 吴翀, 刘黎平, 张志强. S波段相控阵天气雷达与新一代天气多普勒天气雷达定量对比方法及其初步应用. *气象学报*, 2014, 72(2): 390-401.
- [24] Donaldson Jr R J. A demonstration of antenna beam errors in radar reflectivity patterns. *J Appl Meteor*, 1964, 3: 611-623.

The Measurement Influence of Reflectivity Factor Caused by Scanning Mode from Phased Array Radar

Wu Chong¹⁾²⁾ Liu Liping¹⁾³⁾ Wang Xudong⁴⁾ Fan Hui⁴⁾ Liu Qi⁴⁾

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

²⁾ (Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225)

³⁾ (Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044)

⁴⁾ (Anhui Sun-create Electronic Co Ltd, Hefei 230088)

Abstract

The beam design of active phased array weather radar is flexible, and this variable beam width and multi-beam mode can satisfy the requirement of various tasks and get much higher temporal resolution than general weather radar. However, the performance of active phased array weather radar can be hardly kept consistent due to the massive digital T/R components, and any variations of antenna parameters between the beam direction and axis normal would be a huge challenge for radar calibration. The X-band phased-array weather radar (X-PAR) developed by State Key Laboratory of Severe Weather of Chinese Academy of Meteorological Sciences and Anhui Sun-create Electronic Co Ltd is tested for the first time from April to June in 2013. The X-PAR and C-band polarization weather radar (C-POL) are installed at the same site, so their observations provide reflectivity measure deviation information and correction scheme for radar debugging and calibration of antenna parameters.

During the operation of X-PAR, 3 kinds of observing modes with different beam width are applied, each using different parameters in their radar equations of calibration algorithm. Observations from C-POL and X-PAR (fine mode) with single scanning beam, X-PAR (quick mode) with multi scanning beams and X-PAR (fine Mode) are contrasted in detail. In order to reduce the comparison bias, severe convection and attenuation should be avoided. Results from statistical analysis indicate that observations from each elevation of X-PAR (fine mode) is 3 dB higher than C-POL, the measurement deviation between quick mode and fine mode changes along 4° regularly, and is inconsistent in higher elevation. The deviation source of X-PAR (fine mode) and C-POL comes from differences between the antenna parameter and the effective cross section, and the fast mode is also influenced by beam pattern, gaining in different elevation. A correction scheme based on data statistics and fitting is proposed to decrease the bias within 1 dB. By the comparison through vertical structures, the dependability of the above method is testified, and the resolution of X-PAR is also higher than C-POL, which is significant for convective precipitation research.

The actual performance of phased array antenna could not keep strictly consistent with theoretical value because of its complicated structure. The result suggests that antenna measurement and digital T/R test during the factory inspection and acceptance are very indispensable. In the future field experiments, a well-calibrated radar should be installed at the same position to correct the X-PAR observation bias.

Key words: X-band phased array weather radar; reflectivity factor; quantitative measurement