

# “强对流天气第一道防线”的构建：新型相控雷达阵列研发应用对我国强对流天气预警的实践意义

——对中国气象局大气探测中心马舒庆和湖南宜通华盛科技有限公司寸怀诚/王国荣的采访

采访人：贾朋群（本刊专职副主编）

受访专家：马舒庆（本刊编委，中国气象局大气探测中心研究员）

寸怀诚 / 王国荣（湖南宜通华盛科技有限公司董事长兼总经理 / 高级工程师）

采访方式：线上

采访时间：2020年12月16日

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.01.008

**贾朋群：**本刊2020年6期刊载了期刊主编许小峰关于雷达探测的文章，阐述了从美国最早的雷达在气象领域用于风雨探测开始，雷达探测在推进大气科学学科发展和气象预报业务能力提升方面的重要作用，其中对几次技术进步带来的探测能力拐点，令人印象深刻。本刊2019年增刊介绍的美国气象学会百年文集中，多个章节也提及雷达资料不可或缺的作用。请专家先简要概述一下我国研发机构和企业在上述领域最新的发展情况。

**马舒庆：**天气雷达在各种天气过程，尤其是台风、暴雨和冰雹等强对流灾害性天气过程的快速监测中，显示出了不可替代的作用，成为气象防灾减灾的国之重器，取得了突出的社会经济效益。气象部门不断提升天气雷达探测能力：包括增补站点，提高覆盖；双偏振改造，增强识别和定量测量降水能力；提高资料质量控制，丰富探测产品；发展短程探测雷达，提高精细化探测能力。

短程探测雷达探测距离为几十千米，探测波段选择为X波段，技术体制有两类：一类是机械扫描雷达；另一类是相控阵雷达。X波段相控阵雷达同时多波束探测能力表现出巨大吸引力和强劲发展势头。

**寸怀诚/王国荣：**我国最初的天气雷达是由商船和军用雷达改造的，后来研制、生产、装备了711、713、714等型号的天气雷达，为了赶上国外天气雷达技术发展，引进了多普勒天气雷达（新一代天气雷达）。在2010年之前我国天气雷达研制、生产单位有电科集团14所、38所、航天科工23所、784厂、长海厂等，都是国字号单位。近十年来一批新兴企业加入了天气雷达研发生产的行列。其中，长沙宜通华盛在军工产业的基础上，带着先进的相控阵技术和创新发

展的分布式探测理念，研制出了新型相控阵天气雷达——阵列天气雷达（图1）。在中国气象局和省市气象局的帮助下，已经在上海、广东佛山、河北雄安等地进入应用。阵列天气雷达能够有效探测降水系统中大气流场，天气雷达业务化探测真正实现动力学探测与热力学探测相结合。为研究大气和天气预报提供更丰富、完整的信息。

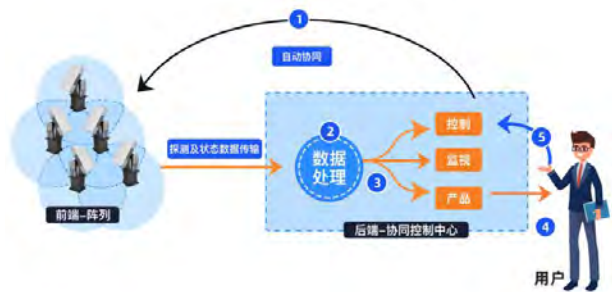


图1 新型相控阵天气雷达——阵列天气雷达

**贾朋群：**刚才马研究员提及，针对新的雷达技术，如新型相控阵雷达——阵列天气雷达，如果得到预报员和模拟系统的认可，即大幅度提高预报（预报员和业务模式）技巧，得到大气运动更多细节，一些具有跨越意义的关键技术值得期待。请问，以阵列天气雷达设计和研发的过程为代表，这类技术的研发瞄准的科学问题和技术问题是什么？两者结合起来更大的挑战在哪里？也请寸总和王工分析一下，这样的技术成果，现在和未来对于企业开发产品换代的意义。

**马舒庆：**21世纪初，美国气象专家设计了网络化天气雷达协同自适应观测系统（CASA），这是以多个X波段小功率、短程雷达构成的雷达系统。关于网络化雷达的功用，说的最多的是低空补盲，实际上

最重要的意义是多点协同观测，使得同一空间点，相同探测要素有多个探测值（如多个径向速度）。这与现有雷达网（新一代天气雷达网）探测理念完全不同。现有雷达网要求同一空间点，同一个探测要素有一个探测值即可（如一个径向速度）。我国也开展了网络化雷达技术研究，中科院大气所陈洪滨研究员主持开展了网络化天气雷达研究，在研究中发现了机械扫描雷达构成的网络化雷达扫描速度慢，空间覆盖不够，特别是同一空间点上不同雷达获取的数据时间相差（简称数据时差）大。数据时差大对于合成风场有致命的影响，比如同一空间点上两个雷达获取径向速度的时间差是1 min，当风速为20 m/s，那么这两个数据就是大气这个系统中相隔1200 m的两点的数据，如果这个系统是龙卷，那么这两个点的风向可能完全相反，用在这两点上获取的数据合成风场就可能完全错误。因此，我们把目光转向了相控阵雷达技术，相控阵雷达具有多波束同时扫描的能力。探测中心与多个雷达研发单位探讨过利用相控阵技术构建新的网络化天气雷达——阵列天气雷达，宜通华盛勇敢地扛起了这杆大旗。

**寸怀诚/王国荣：**宜通华盛有很好的微波技术和相控阵雷达基础（图2）。针对阵列天气雷达的功能需求，我们从微波技术开始，研制相控阵雷达部件，发展到相控阵雷达整机，能解决快速扫描的问题。但为了解决近程雷达多点观测资料时差大导致风场准确性不足的痛点，我们结合气象专家们提出的分组同步观测的技术路线，从相控阵雷达到同步协同观测设计了完整的实现方案。在雷达硬件上实现了从模拟到数字波束的过渡。2017年采用数字波束形成技术实现了16波束同时探测（图3），体扫时间快了16倍；在同步控制方面，我们研制了专门的支持远程同步控制和伺服自动校验同步的雷达同步系统，能保证多雷达的严格同步；在整体方案上，设立了以控制中心为大脑，指挥控制多个单相控阵雷达的工作模式、同步信息，并把多雷达变成一个整体，由中心站来统一进行气象数据的处理的模式。这些新技术为气象研究和天气分析提供了垂直时间一



图2 宜通华盛相控阵雷达

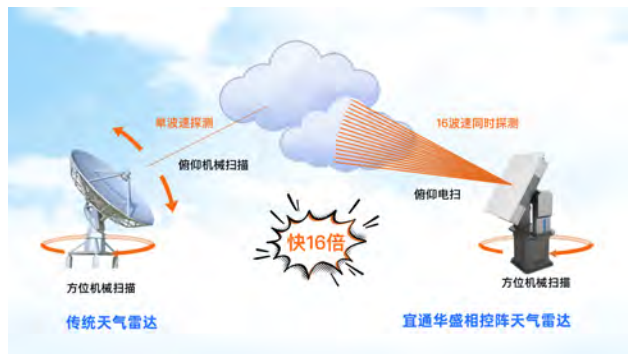


图3 单波束探测和16波束探测示意

致性，空间分辨率、时间分辨率、空间覆盖率十分优良的探测资料，并能获得比较准确的云内风场资料，为进一步提高预报准确性提供了可能。应该说这些技术成果无论是现在还是未来的一段时间内，都是代表气象探测领域的先进方向和理念，作为企业能有这样的机会把先进成果转化为产品，并应用到企业服务中，是非常荣幸的，也为企业在气象领域的自主创新奠定了坚实的基础。

**贾朋群：**WMO最新发表了精细到每个国家的主要气象灾害（图4），可以看到，“风暴”作为主要灾害，覆盖了全球最多的地区，是气象灾害的最主要成因。以风暴为代表的强对流天气，从大气探测学科和探测仪器两个角度，怎样才能更好地被认知？

**马舒庆：**李泽椿院士等在《自然灾害监测预警科技发展规划研究》中指出：气象灾害通过影响生产生活等方方面面，可以危害到环境安全、粮食安全、水资源安全、生态安全、社会安全、国防安全等。其中，暴雨、台风等强对流气象灾害及其衍生灾害严重危害人民生命财产安全；干旱、暴雨洪涝等气象灾害对农业生产影响严重，危害国家粮食安全；台风、暴雨（雪）及其导致的洪涝、电线道路结冰对生产生活安全造成威胁；极端天气气候事件直接影响军事行动实施以及作战平台、武器装备安全使用和效能发挥，影响重大国防工程建设，进而影响国防安全。如何提高对冰雹、龙卷、雷雨大风、短时强降水这些强对流天气的预报预警能力，从而降低其灾害程度呢？首先这是一个资料获取的问题，也就是探测问题。短临预报主要依靠天气雷达资料，以及短期天气预报、探空资料、地面气象站资料、卫星资料，风廓线雷达资料。辅之以短期天气预报、探空资料、卫星资料作为背景，给出强烈天气出现的可能性和可能类型。至于强烈天气在什么时间、什么地点出现，出现的强度就要靠天气雷达资料分析来确定。早期短临预报利用雷达回波的强度（反射率因子）来分析，现在很多地方

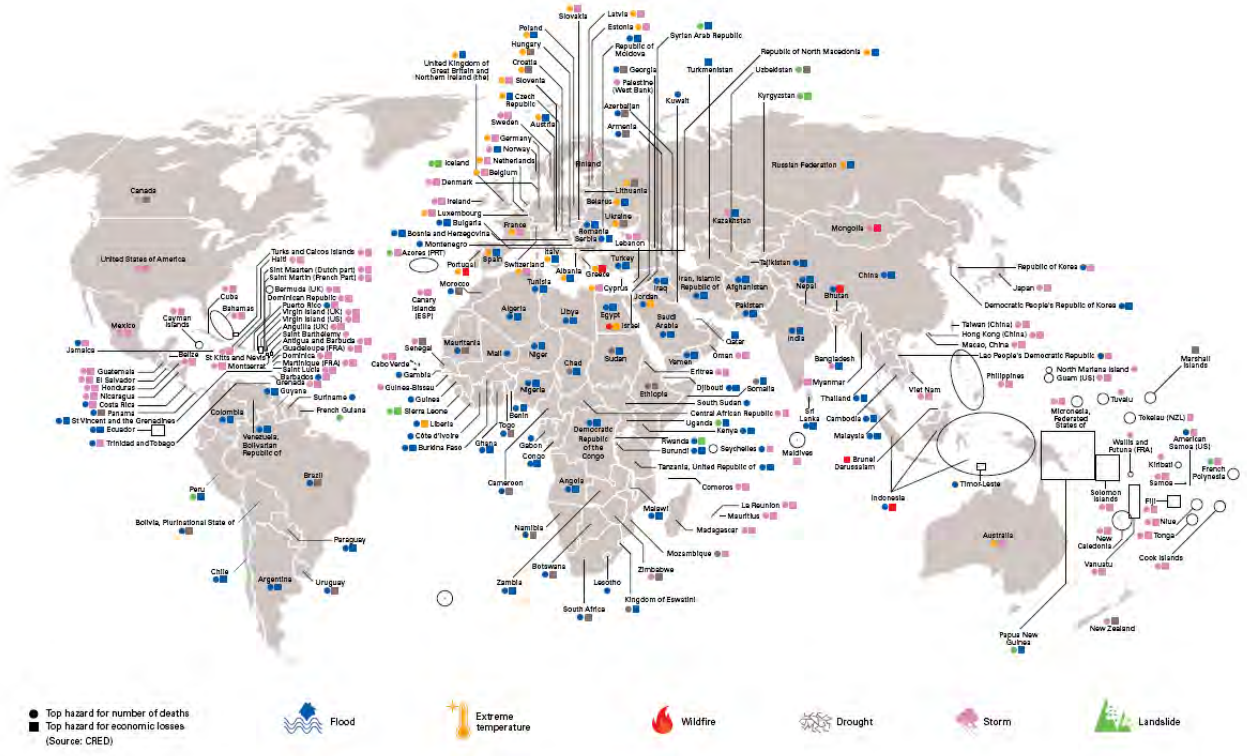


Figure 2: Map of deadliest and most costly weather, water and climate related hazards for each country (Source: WMO analysis of 1970-2019 data from the Emergency Events Database of the Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, CRED).

图4 各国死亡最多和损失最大的天气、水和气候灾害分布 (来源: WMO《2020气候服务状况》)

加入双偏振雷达资料来提高分析的准确性。反射率因子主要反映大气中热力学变化，双偏振参数也主要体现热力学变化状态。然而，大气的变化不仅包含了热力学变化，而且包括动力学过程。20世纪80年代，多普勒技术引入天气雷达，形成了多普勒天气雷达（如我国新一代天气雷达），雷达的价格也增加了10倍，这时可以测量降水粒子速度沿雷达波束方向的分量，即径向速度。多普勒天气雷达的应用是天气雷达应用发展的重要标志，标志着雷达探测从热力学探测走向动力学探测与热力学探测结合。但是多普勒天气雷达所测的不是粒子速度，而只是粒子速度的一个分量，因此，尽管为了获取这个径向速度投入巨大，但是在强天气的应用仍然存在很多困难，径向速度应用的场景受到限制。前面提到美国气象专家设计了网络化天气雷达（CASA），提出了多点协同观测，在网络化雷达多点协同探测方式的启发下，我们在相控阵雷达技术基础上设计、研制了独特的阵列天气雷达。阵列天气雷达利用相控阵多波束同时探测技术和分组方位同步技术，解决以往多雷达组网探测数据时差大问题，将数据时差缩短到几秒钟，准确获取对流天气风场资料（图5）。实现了天气雷达动力学探测和热力学探测结合。阵列天气雷达在空间覆盖和时间空间分辨率方面都按照精细化探测的需要进行了设计。

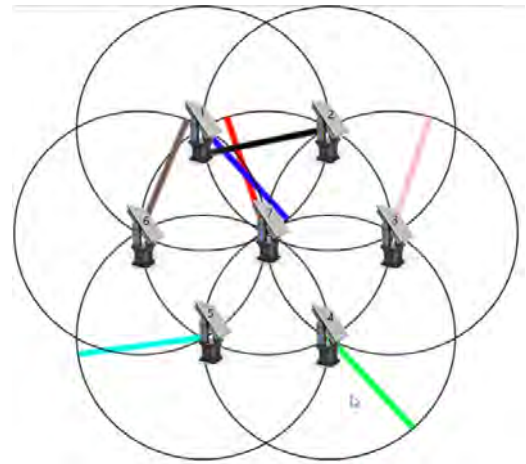


图5 7个前端阵列天气雷达前端布局和扫描示意图 (黑色圆圈为前端扫描范围；七种颜色线段表示扫描线；相邻3个前端构成一个三角形；相邻3个前端的扫描线同时进入这三个前端围成的三角形；扫描顺序：(1、2、7)，(2、3、7)，(3、4、7)，(4、5、7)，(5、6、7)，(6、1、7))

寸怀诚/王国荣：阵列天气雷达是一个新的概念，这是我们中国人在天气雷达领域提出的概念。作为企业我们将面对两个挑战：一是对新事物的接受。中国气象是一个有着改革创新文化的领域，几十年，特别是改革开放的40年，不断创新、蓬勃发展。因此，对于阵列天气雷达接受度极高，当把阵列天气雷的技术

内涵和应用价值讲清楚后，得到了普遍的认同和支持。我们与上海市气象局联合创办了阵列天气雷达开放实验室，共同研究，推进阵列天气雷达的完善和应用。还有一个例子：有一个市原来准备建2个相控阵雷达，但听完阵列天气雷达和应用报告后，将计划修改为7个雷达（前端）构成的阵列天气雷达。二是实现新概念需要攻克一系列技术难题，需要一系列技术的突破。经过几年的艰苦努力，企业形成了雷达前后端十四项核心关键技术，十一项发明专利。

**贾朋群：**我国气象“十四五”规划，瞄准全球气象观测发展前沿，持续优化气象站网布局。针对雷达观测，从单站到组网，从观测效益和设备配置方面看，有哪些能力提升和新挑战？

**马舒庆：**通过“十三五”建设，我国国家业务天气雷达网雷达数量达到216部，在灾害性天气监测和预警服务方面发挥了重要作用，取得了较好的社会经济效益。其中103部已建天气雷达完成双偏振技术改造，初步研究结果表明：双线偏振雷达在强降水估测、冰雹识别等方面有明显应用效果。在京津冀、长江三角洲、珠江三角洲等地区开展了X波段相控阵天气雷达应用或试验。

相控阵技术在国家雷达网和局域雷达两个方面都将得到发展。在十四五期间，针对国家雷达网（新一代天气雷达网）的更新换代会有相应的探索性或者说前期研究工作。在区域性天气雷达方面，随着气象灾害预警、短时临近预报和高分辨率数值预报的发展，尤其是精准气象预报和精细气象服务迫切需要天气雷达提供分钟级、百米级的气象监测实况产品；高分辨率数值模式需要高分辨云内风场资料；佛山、上海和长沙阵列天气雷达的示范作用。这些需求的刚性和示范的引领将极大推动相控阵技术在区域性天气监测中应用。多点协同探测是区域性天气雷达未来发展的特征。相对于国家雷达网而言，多点协同探测注重高时空分辨，仰角高覆盖（或全覆盖）和动力学探测与热力学探测结合。因此需要建立新的信号和数据处理系统。远高于国家雷达网的数据密度和数据量对于处理系统的能力带来新的挑战，必须将新的处理技术，比如并行运算技术引入，并且建立新的处理方法和流程。同时，进行新产品的开发与应用研究，提高对流天气预警的实效和准确性。

**贾朋群：**阵列天气雷达与相控阵天气雷达的关系，以及与相控阵雷达组网观测有什么差别？

**马舒庆：**阵列天气雷达是一种新型相控阵天气雷达，是一种分布式相控阵天气雷达。相控阵天气雷

达可以分成两部分，控制处理中心（监控、处理、产品）和收发通道（天线、收发模块、信号处理、伺服），按照雷达领域的习惯，可以把控制处理中心称之为雷达的后端，收发通道称之为雷达的前端。那么传统的相控阵天气雷达就是一个前端和一个后端组成的相控阵天气雷达，而阵列天气雷达就是多个前端和一个后端组成的相控阵天气雷达。阵列天气雷达的多个前端按照三角形方式分别设置在不同的地方，每3个相邻前端一组，在后端的统一控制下进行方位同步扫描，每个前端扫描得到的信息传送到控制处理中心综合处理生成观测产品。

从外表上看阵列天气雷达和相控阵天气雷达组网，都是在不同点进行探测，然后将数据汇到中心站。实际上相控阵雷达组网与阵列天气雷达有重大的差别：

（1）系统结构差别：阵列天气雷达是将多个前端分布在不同地方进行探测，而相控阵雷达组网观测是将多个雷达（前端和后端）分布在不同地方进行探测。阵列天气雷达有分组方位角同步系统，传统的相控阵雷达没有分组方位角同步系统。

（2）描方式不同：相控阵雷达组网，雷达与雷达之间的协同体现在共同完成指定区域的扫描探测，但是扫描波束进入制定区域的时间没有要求。阵列天气雷达的前端与前端之间不仅共同完成指定区域的扫描探测，而且每个子阵扫描波束进入共同探测区的时间严格同步，即分组方位角同步。

（3）探测效果不同：阵列天气雷达的方位角同步使得共同探测区同一空间点，数据时差非常小，是相控阵天气雷达组网数据时差的六分之一。

因此，阵列天气雷达几乎在所有降水天气都能够正确合成风场，而相控阵雷达组网探测在遇到移动、变化快的天气系统时，合成风场就会产生大的误差或失效。此外，阵列天气雷达同一空间点多个反射率因子融合后，反射率因子分辨率远高于相控阵雷达组网探测。

**贾朋群：**我国新一代天气雷达主要是S波段雷达和C波段雷达，X波段雷达在整个天气雷达体系中会扮演什么角色？

**马舒庆：**20世纪80年代中国气象局大部分业务雷达都是X波段雷达（711），后来全部退出业务。其主要原因是降水衰减太大的问题。当出现大范围降水，雷达看到的就是一块半径几十千米的一块“饼”。2003年美国提出CASA计划后，X波段雷达又热起来了。应该注意到这一次X波段“复兴”其特征是短程

探测（几十千米）和协同探测，称之为网络化雷达。短程探测减小了降水衰减的影响，协同探测增加了精细化探测的能力。

在美国提出X波段短程雷达构成网络化雷达时，就有一种说法：用几个短程雷达覆盖全美国，替代WSR-88D雷达。我认为这种方案难以实现。远程雷达与短程雷达结合是一种更加合理的方案，远程雷达解决大范围天气系统监测，短程雷达布设在更为关注的区域进行精细化探测。现在有X波段雷达的单位，都在做与S、C、X波段雷达的融合，可能主要工作还是将不同的雷达数据能够统一的在一张图上再现出来。现在重要的任务是真正将远程雷达与短程雷达融为一个体系，即构建远程雷达与短程雷达结合的现代化天气雷达体系。关键是短程雷达采用怎样的体制？主要技术指标怎么确定？怎样才能通过远程雷达与短程雷达数据结合更客观的反演出大气的气象要素场。体

制不对满足不了要求，指标不合适准确性、代表性就不够。

贾朋群：X波段雷达在整个天气雷达体系中作为短程雷达出现，那么短程雷达探测主要特点是什么？在设计时主要考虑哪些问题？

马舒庆：短程天气雷达以精细化探测为目标。那么首先要能够实现动力学和热力学探测。前面谈到多普勒天气雷达探测风场的一个关键问题数据时差问题，数据时差过大将导致风场误差过大以致失效。从图6a和6b可以看出，1 min数据时差，在风速变化大的地方就会有100%的误差。因此，要能够探测得到有效风场，就必须将数据时差尽可能缩小，达到秒级。采用数字多波束相控阵雷达可以将数据时差降低一个量级以上，比如从抛物面天线雷达的几百秒降低到几十秒。进一步降低就需要采用类似阵列天气雷达的分组同步技术。

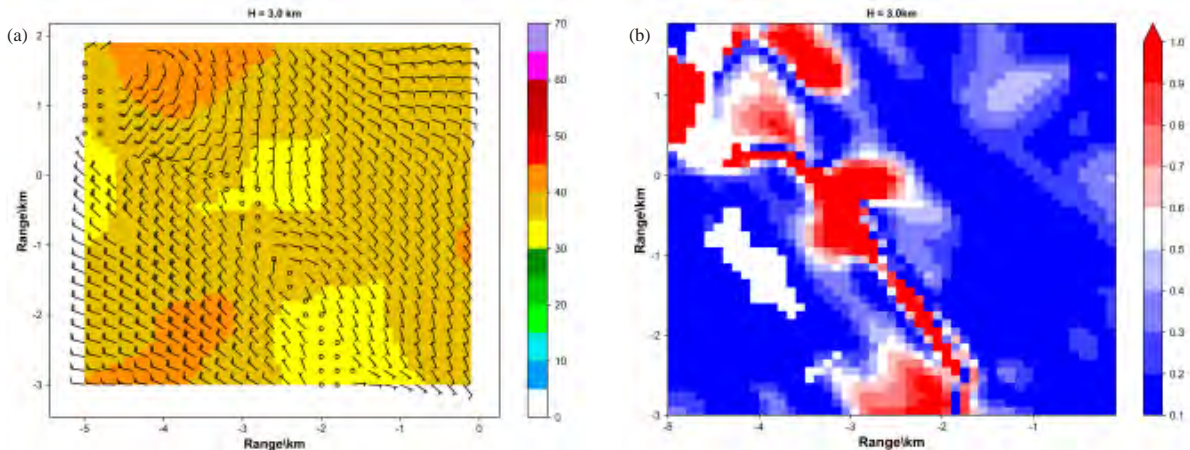


图6 风场 (a) 和时差1 min 风场误差分布 (b)

其次空间分辨率和时间分辨率满足揭示精细化结构。空间分辨率取决于波束宽度、接收通道带宽、采样速率以及处理方法，从国内外短程雷达研究的情况看，空间分辨率一般在百米左右。关于时间分辨率，首先反应了数据的更新速度，以及对天气变化的捕捉能力，时间分辨率体现了资料在时间上的一致性。如果时间分辨率过低，一个体扫中不同位置的可比性就会降低，会给预报分析带来困难。通过相控阵雷达与S波段雷达比较，发现S波段雷达扫描由于低仰角到高仰角需要6 min，在垂直方向的可比性就比较差。相控阵雷达一般采用先完成垂直一高度扫描的方式，所以垂直方向数据可比性非常好。但是相控阵雷达体扫时间就是PPI的时间，那么水平方向的可比性取决于体扫时间，当体扫时间为30 s时，水平方向的可比性就与S波段雷达水平可比性相当。因此，不建议将体扫

时间超过30 s。

再者，空间覆盖率要满足完整描述天气系统垂直结构的要求。S波段雷达远程探测，其仰角覆盖 $0\sim 20^\circ$ ，这时空间覆盖可以到达90%以上（不考虑地球曲率影响）。短程雷达探测几十千米距离范围，如果仰角覆盖也采用 $0\sim 20^\circ$ ，那么空间覆盖就不到50%，当天气系统移向雷达，就可能缺失大部分资料，导致分析天气困难。有一种说法，当天气系统移近一个雷达，就会远离另一个雷达，就可以用另一个雷达的资料来弥补。这对于探测反射率因子、双偏振量来说是可以的。但是对于探测风场来说，就缺了一条腿，无法行走。因此，建议短程雷达俯仰覆盖 $70^\circ\sim 90^\circ$ 。

贾朋群：佛山阵列天气雷达在龙卷、飑线、风暴单体监测的意义是什么？

马舒庆：龙卷是最为强烈的灾害天气，其系统复

杂、生消时间短，也是国内外气象科学家不断探索，然而仍然存在诸多未解之谜的天气系统。佛山市气象局的阵列天气雷达刚刚研制出来，就将这种技术用于佛山地区龙卷监测，建立全球第一个7前端的阵列天气雷达（图7），足见其勇气和远见。我们知道龙卷的危害在于它的强烈旋转气流。因此要揭示龙卷的秘密、提高龙卷的预报预警能力，获取龙卷母体云系的流场至关重要。国内外相关研究认为龙卷母体云系

中的流场，以及流场与强度场的配置决定了龙卷的形成，为了验证这个理论，美国气象学者还专门利用机载雷达跟随探测龙卷，获取龙卷生成前后云系流场，取得了重要研究成果。佛山市气象局在龙卷易发区布设阵列天气雷达，可以长期获取大量流场资料，将在强对流研究，揭示龙卷机理方面取得重大成果，在龙卷识别预警业务方面得到重要发展。

寸怀诚/王国荣：佛山阵列天气雷达2019年完成4

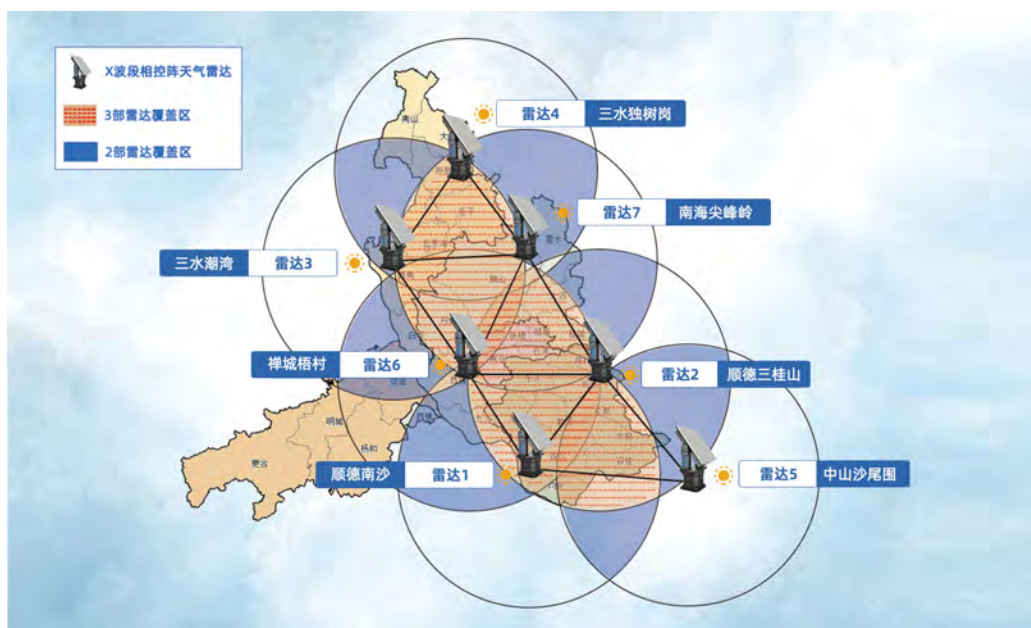


图7 佛山阵列天气雷达

个子阵布设，2020年完成全部7个子阵布设，获取了大量强对流天气资料。图8展示了风场、图9展示了垂直气流。宜通华盛与佛山气象局建立了深入合作关系，一方面为阵列雷达提供运维保障，另一方面针对探测数据质量和探测产品开展联合研究（图10），定

期交流，并且派技术人员驻佛山市气象局。

贾朋群：相控阵雷达雷达数据和产品远远大于现在业务雷达，这么密集的资料和产品，如何分析，预报员怎么消化？怎么在实际业务中更快地发挥作用？

马舒庆：相控阵雷达、阵列天气雷达时空分辨率

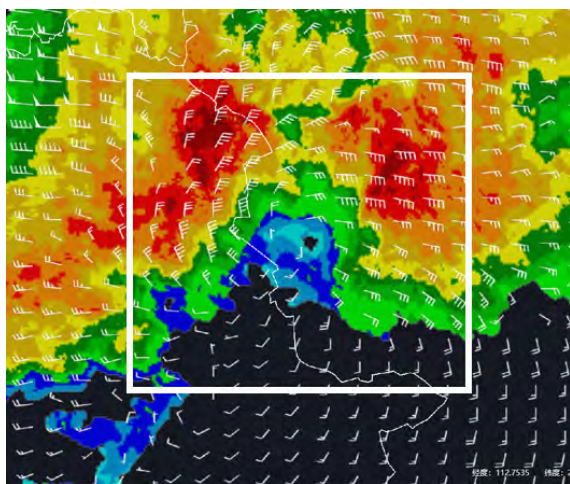


图8 佛山阵列天气雷达探测的风场

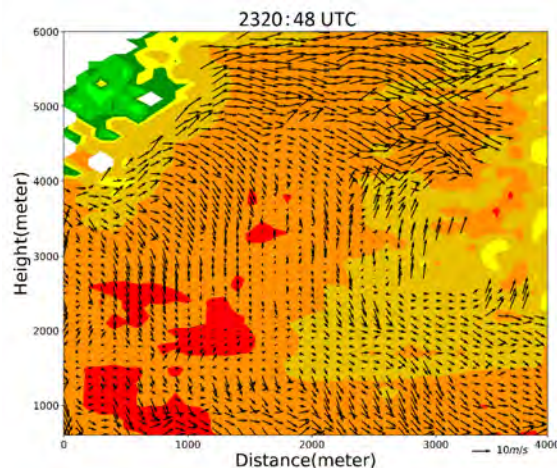


图9 佛山阵列雷达探测的垂直气流

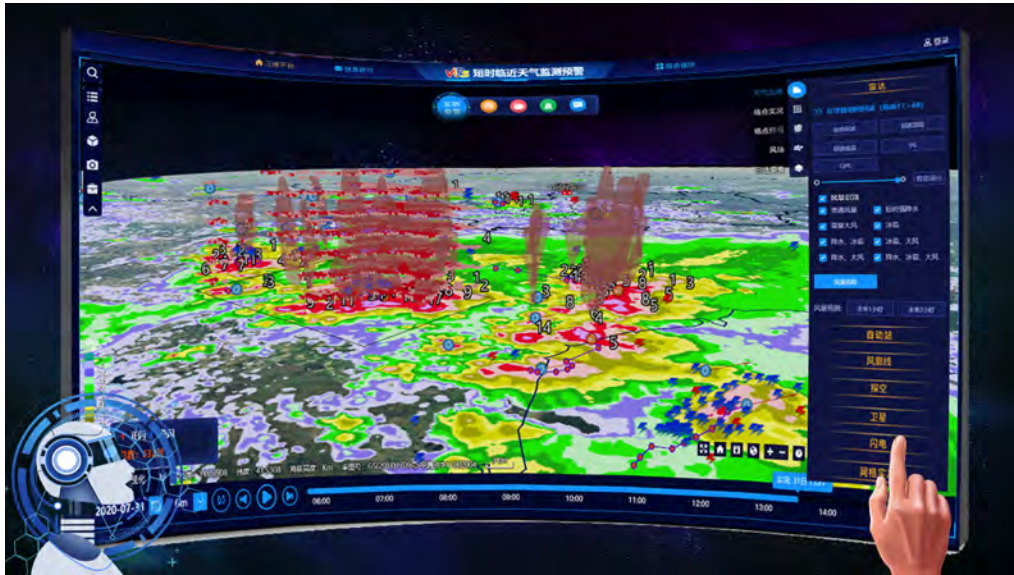


图10 三维显示平台

高、空间高覆盖，因此数据量非常大。宜通华盛与阿里云等团队合作，采用并行处理技术，建立专用处理方法，实现实时数据处理。研究新型的多源数据融合方法，智能识别与预警方法，建立三维立体呈现的平台。产品分级使用，将预报员最需要的信息和资料及时推送呈现，方便预报员的分析应用。这方面，还需要做一些合作研究。

**贾朋群：**我国相控阵阵列天气雷达在国内外处于什么水平？

**马舒庆：**前面讲到了，阵列天气雷达是在相控阵雷达技术和网络化雷达技术基础上发展起来的，主要是通过多波束同时扫描技术和方位同步实现了大幅度降低数据时差，从而有效获取强对流天气风场。2019年10月，上海市气象局专家在第39届国际气象雷达会议上做了大会报告，报告了上海阵列天气雷达试验情况，这个报告是我国在39届国际雷达会议上两篇大会报告之一，也是大会12篇相控阵口头报告之一。在国内外学术刊物上发表了多篇阵列天气雷达论文，并且还在继续投稿。

**贾朋群：**请谈谈国内外最新进展和未来发展展望。

**马舒庆：**目前国内外都在开展相控阵天气雷达研制和应用，在波段上有S、C、X，在极化方式上有单偏振、双偏振。在大的方面可以看出两个方面的发展趋势：

1) 在国家雷达网发展上，美国气象部门在技术层面和业务层面开展相控阵雷达用于国家雷达网的研究，美国对相控阵雷达多波束同时扫描能够缩短体扫时间，提高雷达网捕捉小尺度天气系统的能力感兴

趣。试图用相控阵天气雷达作为下一代业务使用天气雷达。美国的工作使我们看到了远程探测天气雷达下一代为相控阵雷达的可能性。

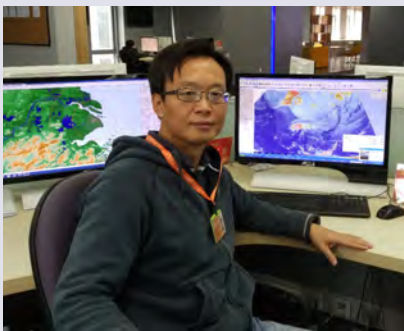
2) 另一个趋势就是短程相控阵雷达发展势头强烈，这些相控阵天气雷达也有不少共同点，大部分径向探测范围为几十千米；峰值发射功率不大，在几百瓦量级；采用有源天线体制；采用数字波束形成技术（DBF）；一维相控阵，俯仰电扫，方位机械扫描；体扫时间短。

短程雷达将以协同探测为特征，为短临预报提供精细化的动力学与热力学结合的较为完整的资料。在十四五期间我国短程相控阵天气雷达也处在一个快速阶段。

**寸怀诚/王国荣：**宜通华盛在相控阵雷达技术和雷达资料两个方面，通过与中国气象局和相关院校的合作已经做了准备和积累，将通过不断努力，在天气雷达发展的大趋势下，一方面把相控阵雷达与多种探测设备的协同观测结合起来，开展不同波段相控阵雷达产品，并不断提升相控阵气象雷达的性价比；另一方面，我们将和气象部门和科研单位一起把相控阵雷达的资料与多源资料的应用继续深入下去，为气象部门在人工智能、快速循环同化、中小尺度数值模式等应用方面做出应有的贡献。

**贾朋群：**谢谢专家们接受我刊的采访。祝愿在多方共同努力下，早日实现我国雷达气象探测先进技术的多样化和高效化。

## 专家点评：“强对流天气第一道防线”的构建：新型相控雷达阵列研发应用



上海市中心气象台首席戴建华

相较于机械扫描的常规业务天气雷达，相控阵阵列天气雷达的覆盖仰角广、时空分辨精度高，对尺度小、变化快的近距离对流天气监测优势显著，表现在以下几个方面：1) 高空间分辨率：有助于获取中小尺度对流降水的动力和热力精细结构，为监测和预警冰雹、下击暴流、龙卷等中小尺度灾害性天气提供支撑；2) 高垂直空间覆盖：多波束观测可以增加垂直方向空间探测范围和连续观测，获取垂直方向上对流降水的完整结构，为对流降水发展演变研究奠定基础；3) 高时间分辨率：低于1 min间隔观测，可捕捉中小尺度对流降水发展过程中重要的演变特征；4) 分布式阵列协同观测：进一步提升观测的针对性和一致性，可获取更加精细、全面的热力、动力信息。

因此，相控阵阵列天气雷达的重要价值之一是有助于提高对中小尺度对流天气的科学认识。1) 为探索新的发现提供了手段：对流天气的精细结构，如上升、下沉运动区、

各类中小尺度涡旋甚至龙卷等，一个典型的例子是2020年7月6日上海崇明迷你龙卷，相控阵雷达可以连续(30 s间隔)、精细(30 m距离库)地观测到水平尺度小于250 m、高度低于1.8 km、生命史不到18 min的龙卷涡旋的发展演变，揭示了龙卷涡旋自低层向上发展加强的过程，这些是周边的业务雷达无法识别的。2) 借助双偏振技术，可获取中小尺度对流云中的相态分布及其动态演变，从而提高对云物理过程的科学认识。3) 深入探索：借助阵列雷达的新型观测能力，通过业务观测和科学试验，进一步提高对中小尺度对流天气中动力结构及其演变的认识，探索其形成机制机理。

另外，相控阵阵列天气雷达还可有效推进强对流天气预报预警业务的发展：一方面，通过高时空精细化的观测，提高对中小尺度对流降水的探测能力，对临近预报预警技术的提升起到明显的促进作用；另一方面，其新型观测手段和协同观测方式对传统技术方法将有明显的提升，如协同观测的时空一致性将大大提升多雷达风场反演的精度。

经过2年多的业务观测试验，相控阵阵列雷达已展示其优势，对研究我国特色的中小尺度对流天气提供了有效手段。

(上接45页)

与今年生成和登陆我国的台风个数比常年偏少相关。龙卷发生时间集中在5—9月，其中7月最多，出现在湖北省、江苏省、安徽省和上海市，均为我国龙卷相对高发省(市)。江苏在同一过程出现3个龙卷，当上游出现龙卷，上下游的气象局部门联动可以更好对龙卷进行预警。

相对2018年和2019年的龙卷伤亡信息<sup>[7-8]</sup>，2020年的龙卷数量有所增加，但致灾性比2019年低。7月22日安徽宿州EF3级龙卷的路径长达62 km，是我国近10年来利用微型无人机进行详细灾情调查的破坏路径长度最长的一个龙卷。2020年现场调查的9个龙卷中，除6月27日湖北荆门龙卷有部分路径经过山丘地形，其他龙卷风的路径的主要下垫面都是开阔平地，下垫面的粗糙程度与龙卷存在某些联系，还值得做进一步研究。部分强龙卷地面灾情特征具有树木倒向呈辐合状、龙卷破坏范围纵横比大，地面浅色破坏条迹，这些地面灾情特征对灾情调查判断灾情性质和龙卷的移向有重要作用。

## 致谢

感谢国家气象中心、江门市气象局、台山市气象局、开平气象局、高明区气象局、江苏省气象局、荆门市气象局、

宿州市气象局、盐城市气象局、响水县气象局、包头市气象局、武川市气象局、达茂旗气象局、绥化市气象局等对龙卷灾害调查提供的支持和帮助。

## 参考文献

- [1] 俞小鼎, 郑媛媛, 张爱民, 等. 安徽一次强烈龙卷的多普勒天气雷达分析. 高原气象, 2006, 25(5): 914-924.
- [2] 俞小鼎, 郑媛媛, 廖玉芳, 等. 一次伴随强烈龙卷的强降水超级单体风暴研究. 大气科学, 2008, 32(3): 508-522.
- [3] 郑永光, 朱文剑, 田付友. 2015年“东方之星”翻沉事件和2016年阜宁EF4级龙卷对流风暴环境条件、结构特征和机理. 气象科技进展, 2018, 8(2): 44-54.
- [4] 张小玲, 杨波, 朱文剑, 等. 2016年6月23日江苏阜宁EF4级龙卷天气分析. 气象, 2016, 42(11): 1304-1314.
- [5] Fujita T T, Wakimoto R M. Five scales of airflow associated with a series of downbursts on 16 July 1980. Monthly Weather Review, 1981, 109(7): 1438-1456.
- [6] 郑永光, 朱文剑, 姚聃, 等. 风速等级标准与2016年6月23日阜宁龙卷强度估计. 气象, 2016, 42(11): 1289-1303.
- [7] 黄先香, 炎利军, 蔡康龙, 等. 2018年中国龙卷活动特征. 气象科技进展, 2019, 9(1): 51-55.
- [8] 李彩玲, 黄先香, 蔡康龙, 等. 2019年中国龙卷等对流大风过程及灾情特征. 气象科技进展, 2020, 10(1): 7-14.
- [9] McDonald J R, Mehta K C. A recommendation for an enhanced Fujita scale (EF-scale). Wind Science and Engineering Center, Texas Tech University, 2006.
- [10] 范雯杰, 俞小鼎. 中国龙卷的时空分布特征. 气象, 2015, 41(7): 793-805.
- [11] Meng Z, Yao D. Damage survey, radar, and environment analyses on the first-ever documented tornado in Beijing during the heavy rainfall event of 21 July 2012. Weather and Forecasting, 2014, 29(3): 702-724.