

雷达气象学在八十年代的发展

R. Serafin

R. Lhermitte

D. Atlas

雷达气象学是一门实验科学，它是从实验的角度提出科学问题，其进展在很大程度上依赖于技术的发展和工艺的状况。所以雷达气象学的未来应该从技术上或者从科学的前景方面来加以探讨。通常是倾向于先考虑科学上某些有意义的领域，再提出技术要求，以达到科学问题的实现。

一、现状

从七十年代开始，多普勒雷达才开始作为一种可行的定量研究工具而出现，由于雷达资料处理技术的发展和理论研究，才使多普勒雷达测量技术建立在坚实的基础上，并解决了许多有关估计径向速度的精度问题。到目前为止，根据它在科学应用上

的生命力，多普勒雷达已经远远超出常规天气雷达，然而尽管如此，它仍然没有被广泛地应用。

数字计算机与集成电路技术近年来呈指数地增长，气象界迅速地向着实时数字处理前进，并提供了比过去要好的时空分辨率的三维场的定量测量值。目前科学家们面临的新问题中最重要的是如何有效地处理大量的数字资料。双多普勒和多多普勒雷达技术使得有可能提供三维速度场的快速检视。

由于国家海洋大气局(NOAA)的波传播实验室、国家强风暴实验室、伊利诺斯大学、芝加哥大学、迈阿密大学以及NCAR都发展了新的多普勒雷达，并投入使用，使得观测能力迅速扩大，从而有可能去计划比以往更大的实验。多普勒雷达阵列已被列为

八十年代主要观测计划中的重要组成部分,目前同时使用多达七部气象雷达的实验已经实施。

在七十年代雷达气象有三方面的重要进展:

① 雷达气象学不再是雷达气象学家的专有领域,许多气象学家,他们并没有雷达的专门知识,但他们把雷达作为观测工具,使他们的工作更有成效。

② 人们接受了用多多普勒雷达技术能够确定降水系统的三维运动学结构。由于脉冲体积的有限尺寸和扫描速率的限制产生的空间和时间上的滤波效应,使可以得到的分辨率有一定的限度,但这些技术提供了对风暴三维运动学结构的进一步认识。

③ 多多普勒雷达已被列为有用的工具。自七十年代开始,人们还很少知道如何解释实时多多普勒雷达资料。起初只是着重利用多多普勒雷达来探测强对流风暴,特别是探测龙卷的特性。经国家强风暴实验室和空军地球物理实验室的研究使强风暴多多普勒雷达观测实时资料解释方面取得了显著进展,Baynton 等人(1977)证明了多多普勒雷达在揭示温带气旋风场实时详情方面的能力,Fujita(1979)讨论了对雷暴飑锋的探测,Wilson、Carbon、Serafin(1980)还讨论了用多多普勒雷达进行风切变的定量观测;最后在联合多多普勒工作计划报告中,国家强风暴实验室等(1979)建议把多多普勒雷达作为国家气象局的下一代雷达。

二、八十年代气象学关心的问题

有理由认为在今后的十年里,中尺度和边界层气象学将会迅速地发展。这些领域包括强风暴的初生,强风暴和它们环境之间的相互作用,运动场和降水场之间的关系以及造成电荷分离的基本机制。对边界层的研究将着重了解运动学和热力学结构及其演变、地形对局地中尺度环流型式的影响,以及地面反射率和土壤湿度的影响。这些基本的内容涉及到如下许多领域:边界层在云和风暴初生及演变时的作用;空气污染气象学;中尺度和全球尺度模式物理过程的参数化;冬季中纬度气旋生成及其大范围降水。其中特别感兴趣的将是风暴运动学和动力学;云的微物理结构;云尺度和中尺度之间的能量反馈机制等。另外飓风的研究在许多方面还是空白,利用机载多多普勒雷达将会得到好处。用机载和船载多多普勒雷达对观测发生在热带辐合带内的大范围降水系统的运动学特性也是很有价值的。一方面因为还存在许多尚未解决的重大问题;另一方面也因为国家对改进短期天气预报、空气污染监测和控制、人工

影响天气以及空中交通安全的根本需要,这些领域还要继续进行研究。气象雷达技术的状况,在一定程度上有助于这些领域的工作。如果许多令人鼓舞的概况和技术能实现的话,必将加速对大气从物理上的了解。

三、八十年代有希望的新发展

(1) 快速扫描多多普勒雷达

利用多多普勒雷达技术的主要目的是为了获得三维运动场的准同时测量值。多多普勒雷达已经在俄克拉荷马和伊利诺斯州的强风暴研究中,科罗拉多高原风暴、佛罗里达和新墨西哥的对流风暴、加利福尼亚州冬季风暴的研究中得到有效的应用。这些研究中的许多问题是属于大型合作研究计划的一部分,诸如强环境风暴和中尺度试验、雷暴研究国际计划、国家冰雹研究试验。对各类风暴的研究发展了风暴扫描和资料处理的特殊方法,并取得了一些可喜的结果,但也还存在一些问题。实践表明,即使体积扫描时间短到二分钟,仍不能经常有效地处理风暴的演变和水平移动。这样得出的运动场常常是被过滤了的,使得一些本来依靠雷达波束和脉冲宽度能够分辨的运动尺度变得模糊不清。

当一个风暴处于一个多多普勒雷达阵中的一部雷达上空时,理论上讲,对粒子垂直运动作高精度的、空间高分辨率的直接测量是可能的,这是探测风暴运动学的详细情况,并将得出的运动场和降水增长及电活动相联系的一种理想情况。这时为了获得三维结构的测量值,必须扫描头顶上整个半球的很大部分。遗憾的是,由于风暴包括很大的立体角,长时间体积扫描是无法接受的。

Krehbial 和 Brook(1979)提出了一种快速扫描雷达,它用少到一个发射脉冲就能够提供反射率的估计值。这种雷达当在天顶慢扫描时,在距离高度显示器(RHI)上有极端快的连续扫描能力,在刚好15秒内就完成整个半球的扫描。靠显著增加发射脉冲的时间-带宽乘积(信息含量)消除了对长信号滞留时间的要求。用这种技术在单个脉冲重复周期内,获取所有距离上的反射率精确估计量是可能的。

通过各种各样的设计方案能够扩大这种创新的和开拓性的工作。例如可以同时发送几种频率,而用并联的接收机处理它们,或者用压缩脉冲以获得距离上的甚高分辨率。脉冲对处理法,是用一系列二个连续发射脉冲,就可能获得象信号自由度那样多的独立的平均多多普勒速度和谱方差估计值。简单

地说,即高精度的平均速度估计值能够在几毫秒量级的时间间隔内获得的。把很高的天线扫描速度和这种快速处理结合起来,在 Krehbiel 和 Brook 用非相干处理实现的时间量级的时段里扫描整个半球应该是可能的。

Brook、他的同事和别的研究者现正认真地计划发展这种雷达。在体积扫描期间需要极高的数据传输速度和快速的算术计算,目前微电路技术工艺的情况和大容量低成本的记忆储存设备的具备,使得这些要求可以满足。必须注意,快速扫描雷达因为大大减少了扫描时间,它可能对弱信号的灵敏性有所损失。所以,任何通用性快速扫描雷达,当灵敏度是最重要时,也应该具备慢扫描的能力。这种技术所需要的天线扫描速率对常规马达驱动的抛物面天线说来,要求可能太高,电子束扫描可能提供了一种合适的解决办法,但这种技术现时是昂贵的。

(2) 晴空探测

a. 边界层探测 六十年代利用超灵敏度雷达在探测光学上晴朗的对流层结构方面做过许多工作。过去几年, Kropfli 和 Kohn(1978)用金属箔作为大气运动示踪物对晴空边界层做过多普勒雷达的研究。Doviak、Zrnic、Sirmans(1979)介绍了用双多普勒雷达导出晴空风场,他们不用金属箔,而是取用 10 厘米多普勒雷达资料。由于对边界层研究的兴趣日益增长,促进了雷达技术的发展,用多普勒技术对湍流基本特性和大范围平均气流进行了研究,使对深厚对流的初生,对流风暴的发展有了更多的了解,进而促进了短期预报的改进。

由于我们对晴空回波进行非常仔细的研究,许多用于气象研究的 S 和 C 波段多普勒雷达能够测量大多数春、夏和秋的晴空空气流速度。因为不大受地理条件的限制,在美国很多地方用流动的 NCAR 雷达做晴空观测。

造成晴空回波的基本散射机制还存在些不明确问题,事实上,这种回波多是在夏季边界层里充满了昆虫时观测到的。如水汽和温度的不均匀时也可能出现。只有用更高灵敏度的波长 10 厘米或更长些的雷达才能经常探测到晴空折射率结构;较短波长系统常常只能检测到昆虫。

b. 遥感 在晴空中,甚高频(VHF)和超高频(UHF)雷达探测的应用(Gage 和 Basley,1981),对对流层和其上空的探测,是一种引人注目的解决方法,对了解对流风暴的环境和大范围的降水系统也是很有价值的。甚至可将大尺度垂直空气运动也测

量出来。

利用高层大气探测的中间层—平流层—对流层(MST)雷达,可以测得在 50 公里或更高的平流层高度普遍存在的晴空湍流散射性质,而电子散射甚至可存在于中间层高度。MST 雷达用较长的波长,更大的天线和更大的功率,能深入到上层大气对风、波动、湍流进行前所未有的观测,为了解高层大气动力学和对流层动力学之间的重要联系打开大门。这些联系对了解穿过大气对流层顶的化学交换以及将太阳扰动从中间层传递到对流层的物理机制至关重要。

八十年代将继续依靠气球携带的传感器测量大气状态的各种变量。当前用地面的红外与微波辐射计来测量大气的温度和湿度,其精度与垂直分辨率已不低。到九十年代,超高频(UHF)和甚高频(VHF)探测器将和遥感探测技术联合遥测风、温度和湿度,即综合的遥感探测系统将代替目前的无线电探空仪。

(3) 机载多普勒雷达

机载多普勒雷达由于它的机动性和高分辨能力,通常被人们认为是一种潜在的重要研究工具,它能得出对流星暴高分辨的多普勒图象,测出新发展风暴中的垂直速度,并提供开阔海面上飓风内的速度测量值。

这方面的工作近几年来发展较快,已经有人用合成孔径雷达获得降水图。NOAA 的一架 p-3 飞机已装备了多普勒系统。NOAA 和 NCAR 的工作人员,近来从飞机上用脉冲对处理器进行试验飞行,取得了侧向和垂直指向方式的多普勒场。更令人鼓舞的是联合航空公司正计划在下一代的商业飞机上安装多普勒雷达。所以,可以预料在八十年代末之前,能看到合用的研究机载系统。

(4) 波长和偏振的多样性

基于对云的发展及其早期生长的科学意义,需要增加对小尺寸目标物探测的灵敏度。Pasqualucci(1981)、Pasqualucci 和 Abshire(1980)介绍了如何用较短波长(8 mm 雷达和激光)去探测用较长波长的雷达无法探测的云。为了这一目的 NOAA 波传播实验室正着手发展 8mm 扫描多普勒雷达。

Heymsfield 和 Jameson(1980, 1981)通过双波长的观测,成功地研究了科罗拉多雹暴内的冰晶增长和冰雹轨迹。Bringi 等人(1981)、Barge 和 Hamphries(1980)、Metcalfe(1981)介绍了与降水有关的多波长和双偏振观测成果。由于单纯地用单

波长和单偏振雷达确实不能探测到风暴的生命史以及它们的复杂的内部结构,今后不仅在研究上,而且在业务上都会更着重利用波长的和偏振的多样性。在业务应用上,如将微波和光程衰减测量加到多种波长和偏振的雷达测量中去,降雨估计量的精度可以得到显著的改进。最后,可以想象,一种通用的多波长快速扫描雷达系统用集成实时彩色显示能够把晴空回波、降水的相态和闪电信号互相区别开来,从而定量地识别不同的现象。

(5) 卫星气象雷达

目前用 1.5 厘米波段的微波辐射计(在雨云 5 号卫星上是电扫描微波辐射计 ESMR; 在雨云 6 号卫星上是扫描多波长微波辐射计 SMMR, 能够对海洋上的降雨进行很不错的测量($\pm 50\%$ 的误差)。ESMR 和 SMMR 误差的主要来源之一视野太大(在星下点约为 25 公里)。微波测量的其他问题是忽略了用计算方法不能适当处理的某些物理现象,例如变化的云中含水量、冻结高度以上的雨和雹及一天两次观测的日变化等问题。此外,因为地球背景温度是变化的,陆地上不能用微波测量,所以强烈地提出需要以空间为基地的气象雷达。在国家 and 世界气候计划期间,在农业和水文方面,陆地和海洋上全球降水测量是特别需要空间气象雷达。

从空间使用雷达受到的限制,很大程度上与大的波束、旁瓣、地面和海洋杂波的区分以及信号-噪声等问题相联系,这些问题用足够大的天线和强功率是可以克服的。现在有了不少好的空间雷达经验,诸如对地静止地球轨道卫星(GEOS-3)雷达高度计,海洋卫星(SEASAT)上改进的雷达高度计,以及合成孔径雷达和雷达散射计(也在 SEASAT 上)。另外,从理论上和系统可行性研究上已经得出了各式各样的雷达降雨概念(例如 C 到 S 波的直接反射率,双波长技术,用海洋和陆地散射为基准的雷达衰减方法)。在今后几年里,这些方法在飞机试验中会得到鉴定。可以预料,到八十年代末气象雷达将会在空中飞行。

(6) 信号和资料处理

在过去的十年,信号和资料处理在雷达气象学中已经扮演了极端重要的角色。快速、有效、经济上划算的数字处理已经导致了科学上很大的进步,并且对全国多普勒雷达网的建立是关键性的。未来,可以预见到这个领域更加令人鼓舞的发展。

常规雷达和多普勒雷达都不能完全排除地面杂波的干扰,这些干扰不仅影响低仰角资料的收集,而

且因为旁瓣效应,还影响较高仰角资料的收集。相干信号的数字处理理论上提出了地面杂波问题的部分解决办法。然而,当清掉了杂波,必须小心确保杂波干扰滤波器在杂波带宽外边对多普勒谱形没有重大的减低。任何杂波干扰消除技术必须适应于雷达座落位置和天线扫描速度。例如排除杂波干扰算法仅应用于存在明显杂波的那些范围。杂波滤波器带宽要能调整和杂波带宽的变化相适应也是很重要的,杂波带宽是雷达位置、风、季节、天线扫描速度的函数。一个设计得好的杂波消除器与仔细地选择雷达位置,并很好地设计天线,这些互相配合能够消除许多我们已经面临的与杂波有关的问题。

其次主要关心的是解决距离和速度非单值性问题。Sirmans、Zrnic、Bumgarner(1976)和Campbell、Strauch(1976)已经分别实现并成功地显示了可变的脉冲重复频率(PRF)技术和双脉冲技术。在未来的信号处理中,可以预料,改装信号处理技术使它适合于气象研究的需要,会有很大的灵活性,这样距离和速度混淆问题会得到显著改善。

在野外研究计划中,根据实时资料做出决定,常常对实验的成败很重要。许多计划需要在检测到雷达回波之前就把仪器由飞机带到初生云发展位置,还需要从许多观测目标中选择一块云进行集中观测。这些可以通过利用定量的实时单雷达显示、实时地面网观测、飞机轨迹资料透明图等来帮助分析。如果再多部署多普勒雷达联合资料来提供水平空气运动场和辐合场就更好了。除了业务价值之外,这种实时计算的系统能立即将收集的资料进行分析,这样便可以对于与计划有关的资料质量和价值进行评定。这种资料的野外考查对于严格地估价一次试验的进展,提出下一步的作业计划,细致调整观测程序都是重要的。

资料处理的第二个有关方面是事后的人机对话处理。非常大的记忆存储、高速微型计算机、新的显示技术等,使得人机对话系统得以发展。人机对话处理机使用户与资料的联系更为密切,反过来又使得许多工作比采用大型通用计算机常规程序处理更迅速。目前要安装一个能处理几部多普勒雷达资料的系统是完全可以的,它能够执行的功能包括坐标变换、矢量风场合成、以不同形式导出的各种场的显示。今后几年人机对话系统将更为加强,这将为科学家们提供其所观测到的物理系统特征以更深入地了解。

在过去十年,大部分实时数字信号处理(例如将

未加工过的雷达模拟信号转换成平均接收功率和雷达反射率的测量值,平均多普勒速度,速度谱方差等),着重于特殊目的、有线数字处理器的利用。习惯上选择这种方法是因为这种有线处理器具有的高速度,并因为它相对讲价格低,但它的缺点是灵活性不够。如把微计算机加到处理系统上,以执行诸如有线处理器控制、天线控制、资料管理等功能,从而部分克服了上述的缺点。

展望未来,还能预料得到更多的灵活性。可编程程序的硬件外围设备,诸如市场上能买到的阵列处理器,或者按 Schaffner(1978)循环页式处理器类型的处理系统,将使高速硬件的简单组合在软件控制下发挥多种处理功能。不费太大努力去制作一种用于专门研究计划的科学需要的处理器将是可能的。可以设想,在用几个测距门(range gate)消除杂波的系统,用另外一些门计算平均多普勒速度和其方差的系统,用其余的门计算全多普勒谱的系统。在计算多普勒谱资料的同时,多通道输入本领还允许对双波长和(或)双偏振系统的资料处理。就迅速改变处理方式、天线扫描类型和软件控制下的天线实时扫描速率来讲,也存在着灵活性。人机对话显示器的有效利用和新的计算能力将合乎逻辑地利用到业务预报和野外研究计划实时指导的强有力的实时系统上去。到八十年代中期,野外计划的领导人有可能通过各种各样的手段,诸如多点雷达、飞机、探空

网、卫星、地面观测网和别的探测设备取得资料。并且在所观测到的现象中,对最重要的区域,以许多方式显示出探测系统。这样一种系统,从现在主要的野外计划所要求的仪器、人力、时间的大量投资看来将是高度经济有效的。

小 结

上述仅是对雷达气象领域内未来某些方面的看法,希望在今后的十年中能够实施这些计划,从而在引导新的科学进展和业务实践中变得果实累累和取得巨大的经济效益。

从业务上讲,希望把已经在七十年代取得的成果用于八十年代国家新的天气雷达网中,让多普勒技术给预报者提供以前从未有过的信息。在实时警戒灾害性风、龙卷、风切变、航行安全等方面取得巨大的收益。在探测边界层中的中尺度空气运动,预测空气污染严重程度有大的进展。另外双波长和双偏振资料与卫星资料联合使用,会大大改进降水类型和降水量的预报,并将提供洪水警报。

最后,我们相信,在未来的十年里,这些新一代的雷达将确实带来业务能力上的一次跃进,雷达气象学的研究将取得令人鼓舞的成就。

龚乃虎、章凝丹、忻贤华编译自美国 <Atmospheric Technology>1981, No. 13, p135-144 徐家驷郝望校