



大气探测技术发展趋势综述

2008-04-20

作者：张庆阳 张沅 李莉

摘 要：本文综合分析研究了大气探测技术发展的趋势并结合我国国情提出我国大气探测技术发展的方向及重点。

大气探测是大气科学的重要组成部分，是气象基本业务和气象服务的重要基础，要提高天气预报的准确率，提高服务质量，必须首先提高大气探测技术水平。

20世纪大气科学取得迅速的发展，其原因之一是重视观测系统的建设和新探测技术的应用。目前，国际几个大型研究计划，如气候变化与可预报性研究计划（CLIVAR）、全球能量和水分循环研究计划（GEWEX）、世界天气研究计划（WWRP）都把观测系统建设放在首位；并且，积极发展新的大气探测技术，如空基遥感探测技术，GPS技术等。

近年来，随着自然科学与科技进步，大气探测技术取得了显著的发展，其主要特点是：探测能力显著增强，观测自动化水平迅速提高，重视观测方法、观测网的设计，讲究观测工具的配合，直接观测、遥测和遥感三种观测技术并存，各取所长，综合利用。

今后大气探测技术总的发展趋势是：

1. 向综合探测方向发展。如地基与空基、天基，遥测遥感与大气观测，常规与非常规观测。
2. 向系统性方向发展。研制和开发新型设备，从而集信息的获取、预处理及传输为一体。
3. 向遥测遥感自动化方向发展。自动化遥测遥感设备将逐步取代器测和部分目测项目。
4. 向高精度方向发展。探测的精度主要是指时空上高分辨率，探测数据高准确性。
5. 探测仪器向多功能、小型化方向发展。

近年来，西方发达国家投入巨资研制发射21世纪新一代气象卫星，布设新一代气象雷达、风廓线仪、GPS定位系统等，建设21世纪的综合气象观测网。我国也批准数十亿的气象卫星基金和上十亿的气象雷达建设经费等组建我国面向21世纪的综合探测系统。综合探测系统总体设计首先是空基系统和地基系统互补。未来的综合系统将朝着以空基为主的方向发展，地基探测将作为基本网和校准空基探测的基准。 [8、12、13、16、18-23、31]

本文对气象卫星、气象雷达等高新探测技术的进展及其发展趋势进行探讨，但愿有助于我国气象业务现代化。

一、气象卫星

自从1960年4月1日美国发射第一颗气象卫星TIROS-1以来，20世纪60年代初至1978年前后为气象卫星试验阶段，1978年至20世纪90年中期建立了由5颗静止气象卫星和2颗极轨气象卫星组成的全球观测网；从20世纪90年代中期到2000年

前后气象卫星进入比较成熟的应用阶段。20多年来气象卫星在观测技术，业务化和应用等方面取得了长足的进展。气象卫星已成为制作全球天气预报必不可少的大气遥感的关键技术。

1. 21世纪气象卫星发展趋势及有关计划

趋势:

(1) 几十年的实践表明, 要进行全球的观测只靠某一个国家是不行的, 要进一步加强国际合作, 及时交流与气象卫星有关的信息和计划, 协调相关国家气象卫星任务和产品, 以保全球观测的连续性和完整性;

(2) 气象卫星观测项目应考虑气象、水文、海洋、地学界各方面的需求, 进行不断更新。观测项目更新时应考虑目前的能力和未来实现的可能性;

(3) 必须对对地空间系统的实际执行情况进行评论, 指出其不足并提出改进措施;

(4) 协调各卫星运行国家或组织的工作, 使气象卫星观测系统满足业务需求。还必须考虑好系统的连续性和可靠性;

(5) 未来的气象卫星对观测系统要有若干骨干卫星, 配合一些专用卫星(如进行微波观测)或小卫星(如进行GPS控空观测)组成, 由不同的国家或组织共同承担。

计划:

(1) 极轨气象卫星

如前所述, 美国是世界上发射气象卫星最多的国家, 并一直保持世界上最先进的业务气象卫星系统。随着1998年5月13日NOAA-K气象卫星的成功发射, 标志着美国业务极轨气象卫星进入了第五代。第五代气象卫星由NOAA-K, L、M、N、N' 五颗卫星组成。NOAA N、N' 的星载仪器将与第六代气象卫星——美国国家环境业务极轨气象卫星系统(NPOESS)接轨。尚未发射的第五代极轨气象卫星的发射日程为: NOAA-N 2003年12月, NOAA-N' 2007年7月。

新世纪美国国家极轨卫星计划是将美国商业部下属的NOAA极轨环境业务卫星系统与美国国防部气象卫星系统(NPOESS), 增强卫星遥感功能, 可同时满足军、民两用要求。NPOESS已完成了概念定义设计, 已在进一步实施。

美国与欧空局(ESA)和欧洲气象卫星开发组织(EUNETSAT)合作, 建立新世纪业务极轨气象卫星系统。合作系统包括两个完全独立、但又相互协调的NOAA和EUNETSAT极轨卫星系列, 双方将交换星载仪器和全球资料, 并在算法开发以及实时广播卫星数据上进行合作。计划在2002年底发射欧洲极轨气象卫星(METOP-1); 2007年~2010年为过渡阶段; 第三阶段大约在2012年初期联合极轨业务卫星系统建成。

(2) 静止气象卫星

①美国静止业务环境卫星(GOES): 美国于1975年10月16日发射了第一颗静止业务环境卫星(GOES-1), 现在为第三代(GOES-1~M)第三代卫星装载了成像仪和独立的大气垂直探测器。几年后, GOES-N~Q系列将取代GOES-1~M系列。计划于2002年10月发射GOES-N, 2004年4月发射GOES-0。②日本MS/MTSAT静止气象卫星: 第一颗GMS(GMS-1)1977年发射, 现在正在运行的是GMS-5。日本下一代静止气象卫星MTSAT是气象和航空管制的多用途卫星, 与GMS一样仍定位于140°E、气象探测寿命5年、航空管制寿命10年。MTSAT-1于1999年11月发射失败, 替补的MTSAT-1R将于2003年发射, MTSAT-Z计划于2004年发射, 2005年春季正式投入运行。与GMS相比, MTSAT的姿态控制, 扫描辐射器和数据传输将有重大变化。③欧盟静止气象卫星: 欧空局于1977年11月发射了第一颗准气象静止气象卫星Meteosat-1, 迄今共发射了7颗, 目前已在运行的是Meteosat-T, 定位于0°E。欧盟第二代静止气象卫星MSG仍然是自旋扫描卫星, 而不是三轴稳定的卫星。MSG-1于2002年1月发射, MSG-2于2003年, MSG-3将于2007年发射。

2. 改进气象卫星观测技术的途径

(1) 在静止气象卫星上进行垂直结构的观测不仅对中小尺度天气系统的监测有意义, 而且还可以改进对大尺度天

气系统的预报。改进垂直探测可用光栅或干涉式的垂直探测仪取代目前使用的红外分光计，以增加垂直探测仪的探测通道，提高探测的垂直分辨率；与图像仪一起反演计算，以提高对云和地表的识判能力。

星载GPS接收机可以观测到Doppler频移。加上接收机的位置和速度信息，可以反演到GPS信号近地点高度处的大气折射率，进而导出密度、气压、温度、湿度等大气参数。

(2) 星载激光雷达观测及技术是改进的方向，但近期测风尚需在传统方法的基础上改进。改进的途径是加快导风所用图像的观测频次，提高图像的水平分辨率，用多卫星立体观测确定云的高度等。为了改善图像观测，静止气象卫星平台的姿态控制方式必须改变。我国风云二号气象卫星若由自旋稳定的姿态控制方式改为三轴稳定，扫描仪的工作效率可提高到百分之五十以上，为提高观测次数和观测质量打下基础。

(3) 被动微波遥感是一种很有发展潜力的观测手段。在微波波段进行云的遥感观测，特别是对云中小滴大小和相态的观测，不仅对于天气预报具有重要意义，而且有利于了解大气中辐射传输过程的细节。欧空局正在研制云和辐射监测卫星。研制的目的旨在找到有利手段，能精确、综合，一致地作为业务工作提供云的结构和与云有关的辐射参数。

(4) 在陆地和海洋下垫面物理状态中，目前海表面水温、海冰、陆面反照率、植被指数等参数的观测质量已经相当好。主要的差距是在海洋盐度和土壤湿度方面。前者影响海洋环流，后者影响陆面与气团之间的大尺度热量、水汽交换过程，对短期天气预报十分重要。如果这两种要素的应用目标主要是天气以预报和气候监测，可将其水平分辨率降到50~100km。

(5) 闪电与剧烈的对流活动有关，通过监测大气中的闪电分布，可以了解造成剧烈对流活动天气系统的结构。因此观测闪电对天气预报十分有用。

3. 中国气象卫星及其发展趋势

我国1998年9月首发射太阳同步轨道试验气象卫星风云一号，现已发射风云一号、二号两个系列，能连续、稳定、可靠和提供大量产品。为我国天气预报和气象研究提供了有效的服务。我国已跻身于世界气象卫星和卫星气象大国的行列。

(1) 第二代极轨气象卫星风云三号：气象卫星风云三号除了目前风云一号已有的图像仪外，增加垂直探测仪、成像光谱仪、地球辐射收支平衡仪和微波成都市像仪。

(2) 第二代静止气象卫星风云四号：气象卫星风云四号除了目前风云二号已有的图像仪，还增加垂直探测仪，闪电探测仪、在条件成熟时增加微波成像探空仪和凝视式CCD相机。地球圆盘成像时间为15分钟。

我国计划在2004年、2006年、2008年分别发射风云三号A、风云二号D、风云三号C。在2010年发射的下一代极轨气象卫星，可获得全球、全天候大气探测能力，相当20世纪90年代国际水平；下一代静止气象卫星风云四号具有较高的中小尺度和灾害性天气监测能力。未来将建成的新一代气象卫星监测系统并投入运用，不仅将为我国天气预报、气象研究和环境遥感科学研究提供重要工具，也将为国际气象观测网提供一种重要的卫星系统，在国际气象合作中发挥重要作用。

预计今后全球静止气象卫星和轨道气象卫星与其它对地观测卫星一起将组成功能强大的全球对地观测网，人类将迎来卫星对地遥感新的发展时期。 [8、12、15、16、22-24、27-29、32]

二、气象雷达

气象雷达是大气监测的重要手段之一，在突发性、灾害性的监测、预报和警报中具有极为重要的作用。目前全球设有1000多个天气雷达站、分布在世界各地，为人类造福。气象雷达技术的发展是气象现代化的重要标志之一。

雷达技术引入气象领域，从1994年3月在美国召开的第一次天气雷达会议开始，已取得可喜的成绩。气象雷达技术的发展大体分三个阶段，第一阶段20世纪40年代末到60年代、第二阶段20世纪70年代到20世纪80年代、第三阶段从20世纪90年代开始。近二十年气象雷达最突出的发展是，气象多普勒雷达在大气遥感探测和研究中的应用，如探测降水云内和晴空大气中水平风场和垂直风场，降水滴谱和大气湍流等。多普勒气象雷达还为龙卷的探测和短时预报提供了有效的工具。在完成多部雷达联合组网实时定量探测的基础上，可利用雷达测雨的观测资料结合卫星观测，进行更大范围的降

1. 新一代天气雷达及其发展趋势

(1) 新一代天气雷达

美国20世纪90年代开始布网的NEXRAD (WSR-88D) 是气象雷达发展第三阶段有代表性的新一代天气雷达。美国由WSR-88D组成的雷达网已投入业务运行, 并可提供区域、全国拼图和降水估计等产品。WSR-88D除能获取常规数字化天气雷达的回波强度信息之外, 还能获取径向风速和谱宽等信息; 在460公里范围内能对强风暴进行有效地监测, 在230公里范围内能定量估计降水强度以及提供干线、阵风锋、龙卷涡旋、中尺度气旋、下击暴流等信息, 还具有一定的晴空探测能力。WSR-88D具有以下三个突出特点: 对风和暴雨有较好的分辨能力、可以告知操作员哪种风有危险并预示将在哪里出现龙卷风和下击气流; 大气穿入探测在其它云块中的或在雷暴云后面的雷暴云, 能对气象资料进行细致处理, 向操作员显示详细的气象图像, 并有多种显示选择。WSR-88对雷暴探测的准确率为96%, 对龙卷风探测的准确率为83%, 提前预报的时间平均18分钟。

(2) 发展趋势

尽管近年来电子计算机技术飞跃发展, 加快了科技成果向业务转化的速度, 但由于技术和经费等方面的原因, 在2020年之前各国气象部门采用更新一代的天气雷达投入业务应用的可能性很小。今后二十年间, 天气雷达技术的发展将集中在以下三个方面:

①下一步发展多普勒天气雷达技术, 扩展探测功能: 目前多普勒天气雷达主要是用于对与降水伴随的灾害性天气的监测和短时预报, 对晴空探测、特别是获取晴空风场信息, 将是多普勒天气雷达功能扩展的下一个目标。据估算采用相干累加技术有可能使雷达获取晴空风场的能力提高15-21dB。多普勒天气雷达对下击暴流、微下击暴流有很好的监测能力, 但由于这类恶劣天气现象生命史极短, 仅1~2分钟, 最多不超过10分钟, 改变现行多普勒天气雷达扫描取样的体制, 可行的最简单的是在天线垂直波束上采用相控技术, 形成多波束, 这样雷达仅做方位角一周的扫描便可以获取低层大气中三维立体的风场数据信息, 可以迅速而准确地监测和预警下击暴流或微下击暴流。②完善多普勒天气雷达数据处理功能, 发展应用技术: 进一步完善WSR-88D硬件的处理功能, 丰富软件产品, 势在必行。③加强对多普勒风场反演技术的研究: 目前对多普勒风场资料的应用仍处于定性阶段, 还没有对多普勒天气雷达获取的风场信息进行充分的应用。要充分应用, 风场信息要由定性转为定量, 单多普勒天气雷达的反演技术是风场信息定量应用的关键。西欧、日本、俄罗斯等国家也对天气雷达的发展极为重视, 西欧确定了下一代天气雷达的业务技术体制; 俄罗斯将发展脉间相干的C波段、S波段的多普勒天气雷达; 日本也已开展多普勒天气雷达的研制工作。韩国、台湾、香港、新加坡、泰国、土耳其等国家或地区都在计划或引进美国的WSR-88D。1999年11月11日至12日我国上海气象局也已引进WSR-88, 与此同时, 我国有关部门正研制中国的下一代天气雷达。在未来气象业务中, 多普勒天气雷达将在短时灾害性天气预报中发挥巨大作用。

2. 气象雷达动向

(1) 美国、日本、德国、印度尼西亚等国家参加的国际赤道观测站计划, 旨在对影响气候变化的赤道上空大气进行探测。已于2001年6月正式启动, 该计划除在印度尼西亚苏马特拉岛设站外还计划在非洲、南美设站。

(2) 欧共体为了促进雷达观测资料在各国之间交换, 扩大受益面, 加强各国之间的合作。重点研究雷达探测降水和雷达资料国际网络, 促进了天气雷达的发展。20世纪90年代, 欧洲数字化业务雷达多达约100部, 其中多普勒雷达约占一半。

未来几年欧洲天气雷达仍然以发展C波段多普勒雷达为主, 双PRF技术可能用脉冲压缩技术来代替。

(3) 美国联邦航空局 (FAA) 在纽约已成功研制成一部风切变告警雷达。该雷达是一部多普勒C波段雷达, 可以全自动探测和告警显示机场周围的恶劣天气, 防止风切变造成的危害和微爆现象。

(4) 日本住友电工公司和京都大学合作, 开发成功一种直径仅1米的小型雷达, 其性能与机场等使用的大型气象雷达相当。这种小型雷达将安装在战斗机上, 能360度全方位发射电波的小型雷达加以改进后研制成功的, 使用了适合在

低空进行观测的3000兆赫的电磁波。它首先向上空发射电波，这些电波会在那些因风吹而改变了密度的大气层部分发生散射，并反射回来而被天线接收。该雷达可计算出6000米高空的风向和风速。这种观测几乎是实时的，时间仅需约1分钟。由于体积小能安装在汽车和小型船舶上，可预测1平方公里小范围内的气象现象，因此可用来在局部地区，机场、水库及工厂等场所预报暴风雨和监测废气排放的流向。

(5) 美国宇航局的兰利研究中心在宇宙飞船“发现号”上安装激光雷达，进行激光雷达系统从太空观测大气。这一研究将使空间遥感技术进入一个新的时代，有可能找到至今仍使气候模式研究人员感到困惑的许多问题的答案。观测的数据包括云、对流层和平流层的气溶胶、行星边界层的特征、地面以上6-25英里平流层的空气密度和温度以及一系列的地面特征。进行激光雷达技术试验观测的同时，还利用地面激光雷达、飞机携带激光雷达和探空气球进行观测，旨在验证激光雷达空间技术试验观测的准确性。

3. 气象雷达技术发展趋势

(1) 当今大气科学的发展重点是更长时间尺度的气象研究和更短空间尺度的中小尺度气象学研究和应用，多普勒天气雷达是天气雷达发展的方向和趋势，也是我国气象设备现代化的必然趋势。从气象服务的要求来看，新一代气象雷达选取全相参技术更符合要求。

(2) 从国际发展来看，2010年世界天气监视网在建立最优化的全球混合观测系统方面将取得重大进步，国家及地区天气监测网也将显著发展。雷达和雷达探测技术将发挥重要作用。在雷达探测方面将实现多普勒雷达布网，来自雷达、卫星和地基遥感系统的资料将直接输入天气分析和预报系统。

(3) 天气雷达的发展方向，将是提高多普勒性能及采用双线偏多普勒技术。同时需要研究的是对其回波的分析，在对云、雨目标的测量方面，硬件和软件同等重要。利用计算机和数字图像技术，得到天气雷达回波中更多和更有用的信息是软件研究急需解决的问题。

双线偏振雷达技术逐渐成熟，在常规多普勒雷达上增加双线偏振功能，可以改善雷达探测降水和识别降水粒子相态和尺度的能力。美国将增加双线偏振雷达功能。我国许多单位也准备上双线偏振雷达项目。

(4) 快速扫描技术将应用于天气雷达。现有的天气雷达是利用天线扫描的方法完成立体扫描的，一个体积扫描约需要5~10分钟，这对下击暴流等小尺度现象的探测就显得慢了。为此，在水平方向旋转的相控阵雷达技术可能应用于天气雷达中，以及用天线的旋转完成水平扫描，用相控阵的方法完成垂直扫描的方法。

(5) 到2010年快速扫描多普勒雷达、多极化雷达、毫米波（多普勒雷达）、调频连续波雷达会有迅速发展。

(6) 国际上计划发展的空载激光雷达主要是后向散射、差分吸收和多普勒三类，以后向散射为工作原理的Na-YAG激光雷达技术最为成熟，美国已成功发射了载有Na-YAG激光雷达的航天飞机，进行了空间激光探测全球云和气溶胶。探测大气微量气体的差分吸收激光雷达和测风的多普勒激光雷达也将在21世纪送上空间平台。

(7) 热带降水测量卫星测雨雷达（TRMM-PR）是第一部星载测雨雷达。发射后经过在轨测试定标之后，已向地面发回大量的雷达探测信息。星载相控阵探测范围，特别是对海洋、沙漠、高原等无人区的探测。今后将进一步加强星载测雨雷达及其探测信息处理和应用研究。

(8) 宇宙飞船携带极光雷达，开创了人类从太空上观测大气，这将使空间遥感技术进入一个新的时代。

4. 我国新一代天气雷达发展规划

我国气象部门从上世纪七十年代开始使用天气雷达，为台风和降水观测积累了大量资料，在气象服务中发挥着重要的作用。八十年代和九十年代定型的天气雷达主要有711、712、713、714、715、716，已形成我国的天气雷达系列。

随着我国经济的快速发展，现行雷达站网技术性能，可靠性等难以满足社会发展和经济建设对气象灾害监测、预警服务越来越高的要求。迫切要求建设新一代天气雷达网。

我国的天气雷达正朝着多普勒天气雷达方向发展，《我国新一代天气雷达发展规划（1996-2010）》提出了全相干的多普勒天气雷达为我国新一代天气雷达发展目标。到2010年将形成由约100部S波段或C段多普勒天气雷达组成的我国天气雷达网。

已经启动的我国新一代天气雷达网建设是我国气象事业现代化的一项跨世纪工程，建成后的新一代天气雷达网将显

三、风廓线仪

风廓线仪的应用是对传统气球测风方法的一次革命。与有球测风相比，风廓线仪除了具有可连续探测优点外，还具有高精度和运行可靠性。它融合了现代最新技术，操作维护方便，垂直分辨率高，风速测量误差与有球测风相当，其适用范围是有球测风无法比拟的（ $-40\text{°C} \sim +50\text{°C}$ 、相当湿度 $0\sim 100\%$ 、地面 225.3km/h 、降水率在 7.6mm/h 或积雪 1.22m ）。

风廓线仪在气象探测领域有着十分重要的应用价值。在气象科学研究中的应用有：测定水平风廓线。尤其是用于研究中尺度天气现象；垂直风速测定，这对研究小尺度天气、强对流风暴等具有重要价值；此外，还可以探测湍流、大气稳定度、中尺度大气等。风廓线仪主要功能是获取高空风和低空急流活动特征，能够提供高时空密度的气象信息。

风廓线仪发明于20世纪80年代，先后研制出平流层、对流层和边界层风廓线仪三类。近20年来，美国、日本等国家用它来测量自由大气、湍流以及大气稳定度等已得到了普遍的发展与应用。美国NOAA已在中西部地区布设了29部风廓线仪组成示范网，计划2003年风廓仪投入业务应用布点。美国还计划研制适用于热带海洋地区的太阳能自动风廓线系统。芬兰、德国、瑞士、英国、法国都在建造试验性的风廓线仪。

我国20世纪90年代初成功地研制出风廓线仪。我国的风廓线仪的总体水平与美国差距约1.5年左右。我国对流层风廓线仪的建设已于2001年9月25日正式启动。根据《中尺度灾害性天气监测预警系统指南》（中气测发[2001]14号），我国监测预警中尺度灾害天气，适用探空高度为 6km 左右，频率 400MHz 左右的低对流层风廓线仪即可。使之布设在常规探空站之间天气变化敏感的地区。我国争取2020年实现风廓线仪业务布点。

风廓线作为一种先进的探测系统是21世纪的高空探测系统。风廓仪的业务应用，很可能像过去二十世纪五十年代卫星垂直探测器的应用一样，可以大大地拓宽全球气象情报。它对改进天气分析预报，降低测风成本和提高实效等均有重要的意义。 [7、8、9、12、13]

四、GPS定位系统

1. 新技术GPS

全球定位系统（Global Positioning System——GPS）是美国20世纪70年代开始研制，历时20年，耗资200亿美元完成的具有海、陆、空进行全方位三维定位导航与定位系统。GPS定位系统全球全天候工作，定位精度高，单机定位精度优于 10m 。GPS技术已发展成多领域（陆地、海洋、航天航空等）多用途（导航、定位、气象高空探测等）、跨学科、跨行业的综合性高新技术。GPS的出现为高空气象探测的发展带来了新契机。

2. GPS在气象探测的应用与发展趋势

GPS为气象高空探测展示出新的发展途径。

（1）对流层低层的水汽（积分可降水分和水汽垂直分布）：强烈天气和降雨的短期预报、水汽的全球气候学、水分循环研究；

（2）在数值模式中直接同化应用偏转角或折射率资料：业务数值天气预报、气候研究的再分析；

（3）对流层的高分辨率的温度廓线：对流层顶研究、平流层/对流层交换、平流层臭氧、高层锋面研究、火山效应、气候变率和气候变化的研究；

（4）高层等压面的位势高度计算：气候研究、通过地转/梯度风关系估计高纬度地区风；

（5）电离层电子密度剖面：电离层研究、空间天气；

（6）野外试验：FASTEX（锋面与太平洋风暴试验）、Map（中尺度Alpine试验）、INDOES（印度洋试验）；

(7) 可探测、预报闪电等。

由于GPS气象探测技术仍在蓬勃发展之中，开发其探测潜力的研究也仍在继续，可以预见GPS探测大气温度、水汽和风等气象要素的精度、探测范围、空间分辨率各指标将得到进一步改进。GPS气象探测系统在21世纪大气探测系统中将占有重要位置。美国、加拿大、澳大利亚都把GPS作为未来高空探测体制的重要组成部分。美国在高空探测发展计划中，拟将GPS投入常规高空观测，加拿大计划用GPS取代Omega和Loran导航测风系统。

3. 我国GPS的发展趋势

近几年来，我国在GPS系统开发、应用方面迅猛的发展，广泛应用于航空、公安、银行、大地测量等领域，国家科委把GPS应用列入“八五”国家科技发展计划的重中之重大项目，因此GPS在气象高空探测中应用，面临极好的机遇。从技术上讲，我国完全有能力开发、应用，不存在有逾越不了的障碍，美国和芬兰已迈出了通用GPS技术到GPS探空仪系统第一步，我们可汲取他们的技术和经验。

GPS是我国21世纪高空探测主要发展目标之一，GPS真正投入我国气象业务使用大概需要10年时间，2020年后GPS将是我国高空探测系统的主力。 [15、16、17、18、19、23、31]

根据中国气象事业21世纪拓宽服务发展战略，今后的气象探测不但要观天还要测地，探测太空。要“跳出气象看气象”，在空间上，要向地面、海洋及空间环境拓展。从发展趋势看，高新技术的综合应用，地球环境系统的探测和模拟（预测）以及空（天）基遥感技术（新一代静止和极轨气象卫星，对地观测的环境与资源卫星，基于GPS的新型大气遥感技术）在未来大气环境观测系统中的主导作用等应引起我们特别的关注。

参考文献

- (1) 石厚正仁，出席多普勒雷达和风廓线仪两个国际讨论会，天气，2000（2）：837-845（日文）
- (2) 加藤 进等，赤道大气雷达起动，天气，2001（11）：849-851（日文）
- (3) 今村 刚等，金星大气观测计划，天气，2001（12）：497-498（日文）
- (4) Collier, C. G., International weather radar networking: final seminar of the COST Project 73, D ordreche, Kluwer Academic Publishers, 1992, 191
- (5) Crum, Timothy, et al., An update to the NEXRAD program and future WSR-88D support to operative, Weather and Forecasting, 1998, 13(2): 253-262
- (6) Serafin, Robert J. et al., Operational weather radar in the United States: progress and opportunity, Bulletin of the American Meteorological Society, 2000, 81(3): 501-518
- (7) 林朴炎，风廓线仪——下一代测风系统，广东气象，1994（1）：40-41
- (8) 黎光清，气象卫星被动定量遥感的反问题，现代大气科学前沿与展望，气象出版社，1996年
- (9) 颜宏，在气象综合探测系统发展规划研讨会上的讲话，气象软科学，1996（1）：1-5
- (10) 美国国家大气局，高空探测战略计划，气象软科学，1996（1）：38-50
- (11) 葛润生，天气雷达发展状况和趋势，气象软科学，1996（1）：21-25
- (12) 张庆阳，新一代气象雷达及其发展趋势，气象科技动态，1996（5-6）：76-78
- (13) 苑跃，近年来国际大气探测技术发展概况，四川气象，1997（3）：57-59
- (14) 中国气象局总体室，高空探测体制研究文集，1997，1-9，29-30，69-79
- (15) 中国气象局情报所，美国气象科技发展动向的研究与分析，1998，60-61
- (16) 李良序，遥感技术的一些发展动态介绍，新疆气象，1999（2）：49-53
- (17) 刘咏，下一代测风系统——风廓线仪，新疆气象，1999（3）：57，60
- (18) 张玉存等，二十世纪末气象仪器的现状与发展，气象水文海洋仪器，2000（3）：6-8
- (19) 吴兴国，现代气象探测ABC，广西气象，2000（9）：8-10
- (20) 中国气象局，气象事业发展第十五个计划，2000，9-12

- (21) 黄荣辉等, 21世纪大气科学前景与展望, 21世纪初大气科学回顾与展望, 气象出版社, 2000, 3-9
- (22) 颜宏, 面向21世纪气象业务技术体系若干问题的思考, 气象出版社, 2000, 10-13
- (23) 章国材, 中国气象局未来科技展望, 气象出版社, 2000, 13-18
- (24) 许建民, 2000年后气象卫星发展趋势, 气象出版社, 2000, 165-171
- (25) 张可喜, 日本开发出直径仅一米的小型雷达, <http://www.space.cetin.net.cn> 2002-2-15
- (26) 美国纽约风切变告警雷达的进展, <http://www.jsu.cetin.net.cn> 2002-2-15
- (27) 英国伦敦大学的雷达观测项目, <http://www.jsu.cetin.net.cn> 2002-2-15
- (28) 卫星气象学, <http://www.i kepu.com.cn> 2002-2-11
- (29) 孟执中等, 中国气象卫星的进展, <http://www.space.cetin.net.cn> 2002-2-19
- (30) 21世纪初中国应用卫星发展趋势, <http://yuandi-ngjiajiao.sina.net> 2002-2-22
- (31) 机载雷达的发展概况, <http://www.gd.cetin.net.cn> 2002-2-22
- (32) 大气探测, <http://www.weather.org.cn> 2002-2-22
- (33) 北京奥运会我将发射6颗气象卫星, <http://www.tg21.com.cn> 2002-3-1
- (34) 中国民用天气雷达的现状与展望, <http://dot.gov.cn> 2002-3-15
- (35) 可预报闪电等恶劣气象的GPS,