

中国地基 GPS 气象应用站网建设展望

曹云昌¹ 方宗义¹ 夏 青¹ 赵志强²

(1. 国家卫星气象中心, 北京 100081; 2. 中国气象局监测网络司)

提 要: 地基 GPS 探测大气具有探测精度高、时间分辨率高、不需要标定、设备可综合利用等诸多优点, 随着中国 GPS 地面基准站网的建设, 在将来的基准站网的气象应用方面, 可分为两个层次: 覆盖全国的、站间距离约 100km 的国家级 GPS 大气探测网, 主要监测天气尺度的水汽分布和变化, 以及电离层电子密度分布; 在一些经济发达的地区, 建立站间距离约 10~40km 的中尺度 GPS 大气探测网, 主要任务是监测中尺度水汽场及变化, 并利用层析技术获取中尺度水汽廓线。在将来的站网建设时, 将主要把国家、地方各部门的基准站网和气象部门的站网相结合, 来满足气象部门的业务需要。气象部门的建设, 将依赖于中国气象局的业务技术体制, 特别是通讯和业务运行体制, 面向应用, 以期利用该项技术提高气象预报的精度和时效, 进行空间天气的监测和气候的监测预测。

关键词: GPS 气象 基准站网 布局

Prospect of Meteorological Application Network on the Ground-based GPS in China

Cao Yunchang¹ Fang Zongyi¹ Xia Qing¹ Zhao Zhiqiang²

(1. National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081;
2. Department of Observation and Telecommunication, CMA)

Abstract: Ground-based GPS atmospheric sounding has been used in many meteorological services due to its high temporal resolution, accuracy, no calibration and multiple applications. Research and regional operational experiments have been conducted in China over these years. Two levels of meteorological applications will be operated in the future with the

development of the Chinese continuous operational reference stations. The national GPS network with about 100 km distance between two stations is used to monitor the synoptic distribution and variation of the moisture, while the local GPS network with about 10—40 km distance is used to monitor the me-soscale weather phenomena, and to obtain moisture profiles by tomographic technology. GPS stations operated by different departments in China will be combined with the ones operated by China Meteorological Administration to meet the operational need of meteorological department. The establishment of the project will rely on the operational system of communication and technique to improve the weather forecast and monitor the space weather and the climate.

Key Words: GPS meteorology continuous operational reference stations (CORS) network

引 言

全球定位系统 (GPS) 作为导航卫星系统之一, 从 20 世纪 70 年代出现以来得到迅速发展, 目前已广泛应用于科学技术、交通导航、工程建设和社会减灾等国民经济的各个领域, 利用导航卫星探测大气参数则是它在气象领域的重要的遥感应用。

GPS 气象应用大体包括以下 3 方面内容: (1) 利用地面的 GPS 接收机测量整层大气的水汽含量和电离层电子数密度; (2) 利用低轨道卫星上的 GPS 接收机, 在 GPS 卫星、地球和低轨卫星之间发生掩星事件时, 探测大气折射率廓线, 进而反演电离层电子数密度、大气温度、气压或湿度的垂直分布。(3) 利用 GPS 的空间定位功能, 确定探空气球的位置, 测量高空风分布, 进而发展成为 GPS 探空设备的一个支撑。这里主要介绍利用地基 GPS 技术探测大气参数的应用。

由于地基 GPS 探测大气参数具有探测精度高、时间分辨率高、不需要标定、设备可综合利用等诸多优点, 因而受到了许多国家的气象部门的高度重视, 并得到了十分迅速的发展。

1 发展 GPS 气象应用的意义和需求

水汽是大气中十分重要的参数, 它既在地球气候系统的能量和水循环中扮演十分关键的角色, 也是灾害性天气形成和演变中的重要因子。电离层电子数密度的分布及其演变是空间天气监测和预警中的重要内容, 如何快速、有效地探测大气中的水汽分布和电离层电子数密度分布是当代地球大气探测系统中必须要解决好的问题之一, 地基 GPS 的气象探测可以发挥这方面的优势, 气象领域对地基 GPS 气象应用的需求包括:

(1) 灾害性天气监测预报

在暴雨、洪涝等灾害性天气分析预报中, 水汽输送、水汽辐合的分析至关重要, 而水汽又是一个变化十分迅速的量。在雷暴大风等强对流天气演变过程中, 水汽场的分布、垂直输送和相变是制约其发展的动力机制之一。所以, 高时效、高空间分辨率地获取大气水汽场是准确地分析天气系统的演变、进行监测和预报的关键环节之一。

(2) 为中尺度数值预报模式提供初始场

对一个物理过程比较齐全、动力框架合理的中尺度数值预报模式, 其预报的优劣在很大程度上取决于初始场的准确程度。由于水汽场是一个变化迅速的物理量, 尤其是在

暴雨发生前,以常规探空资料为主的初始场常常捕捉不到“山雨欲来风满楼”之时的水汽变化,从而导致对暴雨的数值预报准确率不高。可以做到每小时甚至每 15 分钟获取一次高精度水汽探测的 GPS 技术,是满足这一需求的最佳选择。

(3) 为人工影响天气作业提供依据

人工影响天气是在一定的大气状况、天气背景条件下,通过向云撒播催化剂等技术手段,促进或抑制云中水滴或冰晶的增长,从而达到增雨或消雹等目的。大气中的水汽分布状况、水汽的输送和源、汇是云雨变化的重要背景条件,在实施人工影响天气作业时,利用 GPS 技术及时而准确地了解作业点四周大气中的水汽分布及其输送,是提高人工影响天气效率的一个重要环节。

(4) 气候监测和分析

地气系统能量和水分循环的分析研究,水资源的研究分析和利用,水分收支计算及气候区划等工作均需要大气可降水量的资料,利用地基 GPS 水汽总量探测技术,能很好地满足这方面的需求。同时,由于 GPS 探测的水汽精度高,通过长时期的资料分析,可用于监测水汽的长期变化趋势,而水汽又是一个温室气体,从而可以从一个侧面监测气候的变化趋势。

(5) 空间天气监测和预警

电离层电子浓度分布及其变化是影响电波传播的重要参数,是空间天气监测和预警的重要内容之一。地基 GPS 是探测电离层电子浓度总量的有效手段,它的高时、空分辨率和相位测量,不需要定标等诸多优点,使利用这项技术探测电离层电子浓度是十分经济、有效的。

(6) 提高对 GPS 探空仪的跟踪精度

在综合分析、统筹兼顾的原则下,可以尽可能地把 GPS 站点选在探空站附近。这样,高精度的 GPS 站可以用作 GPS 探空仪的差分站,从而可大大提高地面对 GPS 探空仪的跟踪精度,起到一站多用的效果。

(7) 作为未来空基 GPS 掩星探测的地面定轨站

2 我国 GPS 气象应用情况

利用地基 GPS 进行大气的遥感探测始于 20 世纪 90 年代。目前,通过这种方法测定大气垂直气柱的水汽含量——大气可降水量,测量精度可达 $1\sim 2\text{mm}^{[1,2]}$ 。进入本世纪以来,美国、日本和西欧等发达国家相继建成了由多部门的地面 GPS 接收站组成的 GPS 综合应用网,气象应用也从研究试验、业务试验走向业务运行,很多国家的气象服务部门如美国海洋大气署的预报系统实验室、德国气象局等和国际性组织如国际 GPS 服务局已在提供区域和全球各站点近实时的大气可降水量产品^[3,4]。

国内早在 20 世纪 90 年代中期就开始了利用地基高精度双频 GPS 接收机信号反演大气积分水汽含量的方法研究^[5]。2000 年在北京地区开展了 GPS/VAPOR 水汽观测试验^[6]。1999—2002 年,在国内的一些重大气象科学试验观测计划中,均把 GPS 水汽观测作为观测内容之一而加以实施,如海峡两岸暴雨观测试验研究计划,国家重大基础研究项目计划之一的我国重大天气灾害形成机理和预测理论研究项目中的长江中下游梅雨暴雨观测试验研究等,均有 GPS 水汽观测的内容^[7,8]。所有这些工作,均大大推动了我国地基 GPS 观测技术由研究、科学试验向业务应用服务方向发展。

2.1 我国 GPS 观测业务试验应用网建设

尽管我国至今尚无一个完整的、满足气象业务应用服务要求的 GPS 水汽探测网建成,但已有不少 GPS 站网建设的前期工作,或业务试验应用性的局地网建设,这些均为国家级的站网建设打下了基础。

地壳形变观测网络项目下的 GPS 基准站网^[9]。“九五”期间,在国家重大科学工

程项目的支持下，由地震、测绘等多部门合作，在全国建设了资料共享服务的地壳形变监测网络，图 1 上的实圆圈标出了这些站点的位置。由图可见，此网络在全国范围的站点十分有限，共有 27 个站，且分布极不均匀，全国共 27 个，但在北京地区就有 3 个，且每天仅传送一次前 24 小时的观测资料。所以，这不是一个供气象部门业务应用服务的 GPS 水汽观测网。但是，若在通讯上加以改造，它仍然可以成为国家 GPS 水汽探测网的组成部分之一。

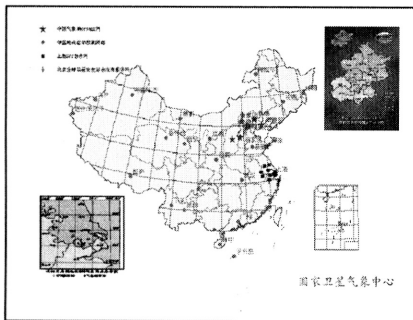


图 1 中国地基 GPS 基准站分布

在上海市政府的支持下的上海地区局地 GPS 网^[10,11]。上海市的天文、测绘和气象等部门联合上海及其周边地区建成了由 16 个 GPS 观测站（图 1 的方框符号所示）组成的 GPS 网，此项目在 2004 年通过验收，已进行业务试运行。

中国气象局的局地业务试验 GPS 网。为在全国建设 GPS 水汽探测网积累经验，中国气象局已在河北省的石家庄、张家口、秦皇岛和北京市的大气探测试验基地（图 1 的五角星所示）建立了 GPS 探测水汽的业务试验网，其中河北省的 3 个站主要试验数据采集、信息传输、资料处理方法和应用；北京的示范站则试验站址选择、站基建设、设备选型、通讯及远程监控等方面内容。

此外，天津、河北、湖北、安徽、山东等省市也已开始了地方投资的 GPS 综合应

用网建设。所有上述工作的完成，均为国家级的 GPS 水汽探测业务网的建设打下了坚实的基础。

2.2 我国 GPS 水汽探测的业务技术发展

我国尚未建成全国范围内分布比较均匀的 GPS 水汽探测网，GPS 站网建设、通讯和资料处理等有关的建设和技术问题仍然是目前要解决的主要业务技术问题之一。

随着局地 GPS 网的建成，如何利用这类稠密的站网资料获取大气水汽垂直分布的问题就提上了议事日程。目前，国内一部分从事 GPS 遥感水汽反演的科技人员，正努力研究倾斜路径水汽的计算方法。在此基础上，通过层析技术，得到中尺度 GPS 站网的水汽三维分布，从而极大地支持中尺度天气分析和数值预报。

在 GPS 水汽资料的应用方面，主要在以下 3 个方面开展工作，一是天气分析预报中的应用；二是水汽的气候分析，如均值、月际变化、年变化和演变趋势；三是数值预报中的应用，通过最优插值、3DVAR 和 4DVAR 等方式把 GPS 探测的水汽或直接把 GPS 信号的时延同化到数值预报模式中去，期望通过模式初值的改进和高频次水汽探测信息的输入，改进数值预报的结果。

3 我国 GPS 气象应用的展望

3.1 气象应用基准网建设的思路

(1) 综合应用、资源共享

与其他的大气探测技术相比，GPS 技术的多用途特点更加明显，国家和部分省、区、市均有建设共用 GPS 网的计划和规划。中国气象局的国家级 GPS 水汽探测网和中尺度 GPS 水汽探测网，均应与公用的 GPS 网和其他部门 GPS 网通过共建、数据共享等手段，相互补充，资源共享，逐步完善前述两种类型的 GPS 大气水汽探测网。对于

包括 GPS 接收机和与接收机配套的地面温压湿三要素气象仪,如站点在气象台站,三要素气象仪可以考虑与自动气象站公用,防止重复建设。

(2) 统一规划、分类建设、分步实施

国家级的天气尺度网应在中国气象局的统一规划下,根据天气尺度的特点,配合中国气象局的探空站点和部分气候观象台来规划布局。其主要任务是提供全国范围的天气尺度的大气可降水量场和电离层电子密度分布。地方的中尺度 GPS 站网则在各省区市的、为地方服务的建设项目规划下,以地方投资的 GPS 综合应用网为依托,在各自的省区范围内建成站间距 10~40km 的 GPS 网,以提供高时空分辨率的层析 GPS 水汽场为主要目标。上述两类 GPS 网均要在国家和地方的项目支持下,分步实施,逐步建成。

(3) 设备先进、可靠、兼容性好

作为我国 GPS 大气探测业务系统的重要组成部分,两级 GPS 网建设所采用的设备必须达到先进、可靠的要求。GPS 是一项迅速发展的先进技术,且不同的国家和国家集团均在建设自己的全球定位、导航和授时系统(如:美国的 GPS,俄罗斯的 GLO-NASS、欧共体的 Galileo 和中国的北斗一代、二代导航卫星系统等)。当在一些重大突发事件发生时,为使建成的地面 GPS 接收系统及相应的处理系统,能适应不断变化的国际空间技术状态、使自己不被动受制和尽可能多地获取导航定位信息,必须采用先进的、稳定可靠的接收系统。从长远来说,还应达到能兼容接收多个全球定位卫星星座的要求。

(4) 兼顾 GPS 探空的需求

GPS 探空仪的高精度和简单的地面系统将使他成为未来探空仪系统的主体。在 GPS 探空仪中为了得到高精度的气球定位,需要一个双频高精度 GPS 接收机作为参考站。作为大气水汽探测的地基 GPS 接收机

完全能满足参考站的要求。在地基 GPS 水汽探测的站点确定中,应尽可能地兼顾 GPS 探空仪的需求。

3.2 未来 GPS 气象应用的展望

未来基准站网气象应用的主要功能是生成全国范围的高时间分辨率大气可降水量场和电离层电子密度分布场。对局地中尺度 GPS 网,则通过层析技术得到高时空分辨率的三维中尺度水汽场。

3.2.1 站点布局

(1) 天气尺度站点的布局是:国家级的天气尺度 GPS 网应作到站间平均距离约 150km 一个站点,东部的站间平均距离约在 100km;西部的站间距离应不大于 200km;南海季风、印度季风和东部海上回流等水汽通道上的站网密度和一些特殊区域的站网密度应大于平均密度。

(2) 中尺度站点的布局是:中尺度 GPS 水汽监测站网主要服务于地方经济,其建设也应以地方为主。各省、区、市应在地方的 GPS 综合应用服务网的基础上,筹建本地区的中尺度网。为了实现水汽的层析探测,中尺度 GPS 网的站间平均距离应小于 40km,有条件的地方尽可能做到站间平均距离 10km。

3.2.2 数据的通讯传输

GPS 站网各站的观测数据应实时或准实时地集中到省、区、市和国家的资料处理中心,经过处理生成全国范围的大气可降水量场、电离层电子密度分布和中尺度三维水汽场,然后再传输给中央和地方的各级气象业务部门和各方用户,供天气分析、数值预报、灾害性天气监测、空间天气监测和大气科学研究等方面使用。此外,根据 GPS 数据处理的需求,在计算中还要引入远端站以提高解算精度。因此,国家气象信息中心还应向各省 GPS 资料处理中心下发约 10 个左右特征站的 GPS 观测资料,以供省级 GPS 资料处理中心选取引用。

3.2.3 GPS 水汽、电离层产品的生成和应用服务

由 GPS 观测站点网络传到数据处理中心的观测数据, 经过数据处理软件, 生成用户需要的各种产品, GPS 数据处理系统的功能是: GPS 数据自动获取、数据转换及存储、GAMIT (或其他专用软件) 软件数据处理、大气水汽和电离层电子浓度的计算和作业调度。其中, 数据获取模块的主要任务是收集 GPS 数据处理所必须的观测数据和星历及星表文件。数据转换的任务是将观测文件和气象文件进行格式转换, 变成 GPS 数据处理常用的 RINEX 格式。GAMIT 等数据处理软件的任务是生成 GPS 信号在电离层的时间延迟和在对流层的时间延迟。应用产品生成软件的任务是根据得到的电离层延迟和天顶对流层延迟, 以及地面气象站辅助文件, 计算电离层电子密度和大气柱的水汽总量 (即大气可降水量)。

以上各项任务均通过系统的时间调度作业软件, 进行资料收集、处理和存档。文件将数据按照原始文件、资料产品 (包括重要处理状态文件) 和产品加工图表进行三级存档。

4 结 语

气象部门 GPS 遥感大气参数系统的建成将是我国大气探测技术现代化的标志之一, 将使我国的地球大气探测系统上升一个新的台阶。由此系统获取的高时间分辨率大气水汽探测资料将极大地增强对暴雨和强对流等灾害性天气的监测能力, 高时空分辨率的三维大气水汽探测将提高中尺度数值预报模式的预报精度并延长其预报时效; 长时间、高精度的大气水汽的平均值和距平值监测是探讨气候变化的重要手段; 实时的电离层电子浓度监测将为我国的空间天气预警提供重要手段; 人工增雨作业已经成为我国改

善水资源短缺的一个重要手段, 实时的大气水汽探测将为我国人工增雨作业区的选择和增强作业效果提供依据。GPS 遥感技术在上述诸方面的应用将使我国的防灾减灾、可持续发展上升到一个新的台阶, 从而取得重要的经济效益和社会效益。

参考文献

- [1] Bevis M, S. Bussinger, T. Herring, et. al.. GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system [J]. *J. Geophys. Res.*, 1992, 97 (D14): 15787-15801.
- [2] Rocken C, R. Ware, T. Van Hove, et. al.. Sensing atmospheric water vapor with the global positioning system [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1993, 20 (23): 2631-2634.
- [3] Wolfe D E, S. I. Gutman. Developing an operational surface based GPS water vapor observing system for NOAA; network design and results [J]. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 2001, 17: 426-440.
- [4] Gendt, G., C. Reigber, G. Dick. Near Real-Time Water Estimation in a German GPS Network - First Results from the Ground Program of the HGF GASP Project [J]. *Phys. Chem. Earth (A)*, 2001, 26 (6-8): 413-416.
- [5] 李成才, 毛节泰, 李建国, 等. 全球定位系统遥感水汽总量 [J]. *科学通报*, 1999, 9 (4): 333-336.
- [6] 曹云昌, 方宗义, 李成才, 等. 利用 GPS 和云图资料监测北京地区中小尺度降水的研究 [J]. *高原气象*, 2005, 24 (1): 91-96.
- [7] 李延兴, 徐宝祥, 胡新康, 等. 用地基 GPS 观测站遥测大气含水量和可降水量的理论基础与试验结果 [J]. *中国科学*, 2000, 30 (A), 107-110.
- [8] 曹云昌, 方宗义, 夏青. GPS 观测的大气可降水量与局地降水关系的初步分析 [J]. *应用气象学报*, 2005, 16 (1): 54-59.
- [9] 焦文海, 段五杏, 马欣. “中国地壳运动观测网络”工程 1998 年 GPS 联测数据的处理 [J]. *测绘通报*, 2000, 11: 13-14.
- [10] 丁金才, 叶其欣. 长江三角洲地区近实时 GPS 气象网 [J]. *气象*, 2003, 29 (2): 26-29.
- [11] 丁金才, 叶其欣, 马晓星, 等. 区域 GPS 气象网站点合理布设的几点依据 [J]. *气象*, 2006, 32 (2): 34-39.