

GPS 气象观测应用的研究进展与展望^{*}

陈世范

(中国气象科学研究院, 北京, 100081)

摘 要

GPS(Global Position System) 是美国第二代卫星导航系统。它的出现带来了当今世界上军事、民用导航技术的全面革新, 在许多科学研究领域得到了极为重要的应用。同样地, 在气象科学研究和业务应用方面也展示了广阔的前景。地基和空基的 GPS 气象探测已被看成为支持 21 世纪 WMO 计划的一种新的全球综合高空观测系统。美国气象学会第 78 届年会有不少相关研究报告, 集中反映了欧美 GPS 气象应用的开发研究最新进展, 可概括为以下 3 方面:

(1) 由 UCAR(University Corporation for Atmospheric Research) 主持的 GPS/ 气象学(GPS/MET) 计划已经取得了成功。1995 年 4 月 3 日发射了一颗低轨卫星(ML-1), 利用低轨卫星对 GPS 卫星进行掩星观测, 可以获得 5 ~ 45 km 高度范围内高分辨率的温度廓线(误差 1 ~ 2 °C) 以及在 5 km 高度以下大气层的温度分布已知的条件下(精确到 2 °C), 确定这一层中水汽压垂直分布。更具吸引力的应用是将大气折射率或射线偏转角这些基本物理量直接同化到高分辨率的全球或中尺度天气预报模式中去, 以提高预报的准确性。只要发射 8 颗低轨卫星, 总费用约 1 亿美元, 便可以为天气业务预报中心提供覆盖全球的 GPS 探测资料, 使用时间为 3 a。

(2) 美国和加拿大的一些重要研究机构合作实施的 Westford 水汽试验(WWAVE), 以评估应用地基 GPS 测定大气柱总可降水量。试验证明了这一技术的可行性, 测量结果的精度达 1 ~ 2 mm。

(3) 芬兰、英国、美国等国家进行了 GPS 测风试验, 芬兰、美国均已研制出相应的样机, 并进行了对比试验, 结果证明 GPS 测风系统稳定可靠并与雷达测风结果一致。

此外, 在 GPS 观测资料的反演方法研究方面也取得了很大进展, 可以说已有一套可行的反演方法和技术可供采用。

GPS/ 气象应用技术的发展方兴未艾, 在不远将来的全球气象业务系统、大型野外试验计划等诸多应用中将占有重要的一席之地, 值得高度重视。

关键词: 全球定位系统, 温度, 水汽, 风。

1 引 言

GPS 导航系统目前已取代奥米加(OMEGA) 导航系统(该系统已于 1997 年 9 ~ 10 月

* 初稿时间: 1998 年 6 月 26 日; 修改稿时间: 1998 年 11 月 4 日。

停止使用)。GPS 由美国国防部(U. S. Department of Defense)和交通部(U. S. Department of Transportation) 联合管理。

GPS 导航系统由 24 颗位于 20231 km 高空的 GPS 卫星组成, 这些卫星分布在 6 个等间隔轨道平面上, 轨道面与赤道面夹角为 55°, 每个轨道面上有 4 颗卫星, 卫星运行周期为 718 min。这样就可在全球任何地区、任何时刻都有不少于 4 颗卫星可供用于观测定位, 很好地实现了全球地面连续覆盖, 从而确保了全球全天候连续地提供动态目标的三维位置、三维速度和时间信息。

由于 GPS 具有极高的实时定位和授时精度, 在军事和民用领域获得了极为广泛的应用。除导航应用之外, 在测量工作方面, 这一定位技术在大地测量、工程测量、工程与地壳变形监测、地球板块运动和地球动力学研究、地质灾害监测(如城市地面下陷)、国土勘测、航空摄影测量以及海洋测绘等各个领域的应用已甚为普遍。虽然在气象学领域开发研究的历史还不到 10 a, 但初步的研究结果展现了其广阔的应用前景。本文将评述这一领域的最新研究进展, 这些进展显示了 GPS 气象探测应用的潜力, 同时展望这一技术在气象上的应用领域和发展趋势。

2 全球大气温度和水汽垂直分布的空基 GPS 观测试验进展

随着 GPS 的投入使用, 其在气象探测领域应用潜力的开发研究, 很快便成为气象学界和 WMO 关注的热点之一。全球大气温度和水汽垂直分布的空基 GPS 观测是其重要应用之一。

GPS 卫星发射的无线电波信号在到达接收机以前要穿过电离层和中性大气(60~80 km 以下)层, 由于电磁波与大气介质发生相互作用, 传播速度发生变化, 并产生折射效应。相对于真空而言, 电波射线偏转角(Ray path bending)或路径延迟(Radio path delays)的大小取决于大气折射率分布。中性大气折射率 N 为:

$$N = 77.6 \frac{P}{T} + 3.73 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (1)$$

式中 P, T, e 分别是大气压力(hPa)、温度(K)和水汽压(hPa)。这就意味着接收机接收的电波信号特征(射线到达方向、电波速度和强度)包含了大气层温度和水汽压状况的信息。这也就是 GPS 气象探测应用的物理基础。

全球定位系统/气象学计划(GPS/MET Program)由 UCAR 主持, 于 1993 年 5 月制定了应用无线电掩星技术(Radio occultation technique)探测中性大气和电离层的研究计划。1995 年 4 月 3 日发射了一颗低轨卫星(ML-1), 该卫星轨道高度 750 km、倾角 70°; 它带有临边观察天线(Limb-Viewing antenna), 观测 GPS 卫星的上升或下沉掩星^[1-3]。如图 1 所示。

这颗低轨卫星每天可观测到 500 次 GPS 卫星的上升或下沉掩星过程的信号资料。由大气电波折射原理, 在球面分层大气介质条件下, 射线偏转角^[4]

$$\alpha = \delta \int_L n \frac{1}{n^2 r^2 - a^2} \frac{dn}{dr} dr \quad (2)$$

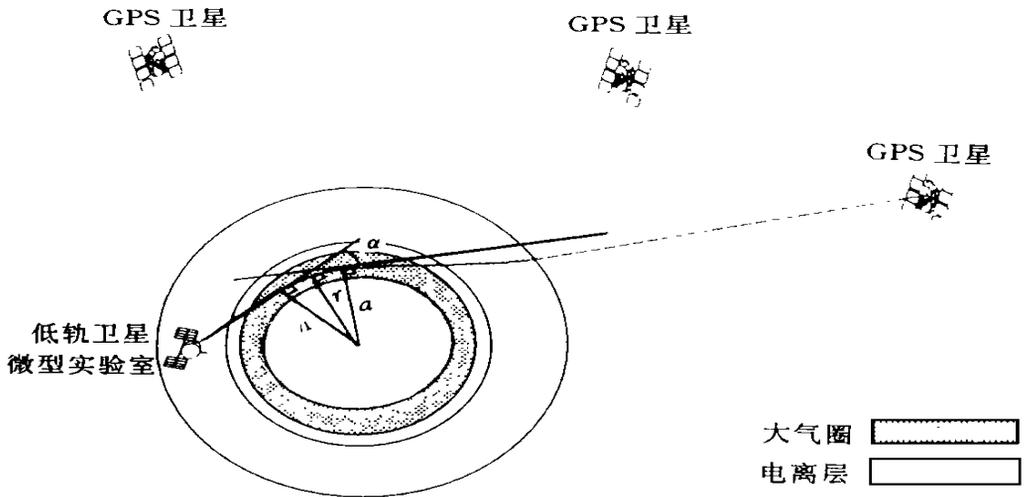


图 1 地球大气对低轨卫星(LEO)的掩星和非掩星 GPS 示意图

(轨道高度: LEO 卫星 750 km, GPS 卫星 20231 km)

其中 $N = (n - 1) \times 10^6$, n 为折射指数, $n = N \times 10^{-6} + 1$, N 为折射率; L 为射线路径, a, r 如图 1 所示, δ 为影响参数。

式(2)中射线偏转角由测量决定, 而利用阿贝变换(Abel 变换)方法或射线追踪方法可以反演决定折射率 $N(Z)$ 垂直剖面分布, 进一步可以决定温度或水汽压垂直剖面。GPS/MET 计划实施过程中, 把低轨卫星掩星观测结果跟探空和其它卫星仪器观测结果加以比较^[5,6]。结果表明:

(1) 低轨卫星掩星观测可以获得 5 ~ 45 km 高度范围内温度垂直分布, 高度分辨率 200 ~ 500 m, 精度 1 ~ 2 K。个例研究已证实, GPS/MET 探测可以精确地决定对流层顶和锋面的垂直结构;

(2) 如果 5 km 高度以下温度垂直分布可由其它方法独立地决定, 而且温度精度优于 2 K, 则可以由低轨卫星决定的折射率分布进一步决定出 5 km 以下大气层的水汽压垂直分布;

(3) 对低轨卫星探测资料的分析应用, 人们提出了一个新思路^[7,8], 即把大气折射率或射线偏转角这些基本物理量直接同化(assimilation)到高分辨率的全球或中尺度天气预报模式中去应用, 而不必试图从求出的折射率分布再分别地求解温度和水汽分布。个例研究证明, 这样做使强气旋的预报更为精确;

(4) 此外, 由低轨卫星掩星观测资料还可以决定电离层电子浓度垂直分布。

当然一颗低轨卫星观测获得的资料时间、空间密度不高, 但是合理地规划小卫星的轨道, 只要发射 8 颗小的低轨卫星, 总费用约 1 亿美元, 便可以为天气业务预报中心提供覆盖全球的 GPS/MET 探测资料, 使用期限为 3 a。以发达国家的财力或采用国际合作分担费用的办法, 实现这一全球观测计划是意义重大而且有现实可能的。

3 大气柱积分可降水分(IPW)的地基 GPS 观测试验

水汽是自由大气中最活跃的一种成分,关系着区域和全球大气水分、能量循环。它的观测对于天气、气候研究和业务天气预报都至关重要。目前世界各国的对流层大气水汽观测资料主要依靠每天两次的常规气球探空观测,这一资料的主要局限性是测站密度过稀、相邻两次探测之间间隔时间过长、且维持这一观测系统的成本也在不断增加。已有的替代方法中,双通道微波辐射计和 Raman 激光雷达观测水汽的手段,不但费用昂贵,而且不能全天候观测,难以大范围密集设置站网和实现观测业务化,且还须经常标定。卫星红外辐射计可以观测大气亮温、估算大气积分可降水量(IPW),能覆盖全球范围,但也只能局限于晴空区域的监测。因此寻求更新、更好、更节省的水汽观测方法仍然是迫切需要的,这也就是近年来美、加等国家进行了一系列地基 GPS 观测水汽试验的原因所在。美国海洋和大气管理局(NOAA)于 1993, 1994 两年先后组织了 GPS/Storm 和 GPS-Winter Icing and Storms Project 两次水汽观测试验^[9]。另外,美国和加拿大的一些大学、研究机构于 1995 年 8 月在 Westford 地区也组织了类似试验^[10]。在 Westford 水汽试验中设置了站间距离 0.5 至 40 km 的 11 个 GPS 接收站网,可以决定该局地 25 km 范围积分可降水量(IPW)的时间、空间变率。另外,从美国国家天气局(NWS)获得全美国 70 个陆地探空站的每天两次记录和卫星资料,也搜集了在阿拉斯加、夏威夷、德国、瑞典和挪威等地的 6 站长基线干涉仪(VLBI)站网的观测资料,以获得用多种独立方法决定的积分可降水量 IPW 资料,供相互比较。

为了便于说明和评述上述这些试验的结果,这里必须说明一下 GPS 探测积分可降水量的方法。可以把前面式(1)表示的大气折射率 N 写成两部分

$$N = N_d + N_w \quad (3)$$

其中, $N_d = 77.6 \frac{P}{T}$ (折射率干分量); $N_w = 3.73 \times 10^5 \frac{e}{T^2}$ (折射率湿分量)。

GPS 卫星信号从天顶方向穿过大气层到达地面接收机的传播路径总延迟 ZTD

$$ZTD = ZHD + ZWD \quad (\text{单位: cm 或 mm}) \quad (4)$$

其中 $ZHD = 10^{-6} \int_{H_d}^{H_d} N_d dH$ (干延迟)

$$ZWD = 10^{-6} \int_{H_w}^{H_w} N_w dH \quad (\text{湿延迟})$$

式中 $H_d = 40 \text{ km}$, $H_w = 10 \text{ km}$

传播干延迟 ZHD, 决定于气压和温度, 而湿延迟 ZWD 决定于湿度和温度。

大气柱积分可降水量由传播湿延迟 ZWD 决定, 如下式:

$$IPW = ar \cdot ZWD \quad (5)$$

式中 ar 依赖于大气柱权重平均温度, 约为 0.15(改变约 20%), ZWD 则由地基 GPS 观测决定。通常大气干延迟约占总延迟 ZTD 的 97% 左右, 湿延迟只占 3% 左右, 例如在 Westford 地区 ZWD 约为 0~40 cm。显然, 如果要求 IPW 的决定精度优于 2 mm, 相应 ZWD 的精度应优于 12 mm, 这对 ZTD 的测定和 ZHD 的计算精度提出了极高的要求。为此, 实现 GPS 测定 IPW 的一种可行方法是: 在获得较为精密的 GPS 卫星轨道参数和钟差数据

基础上,采用能进一步改进卫星轨道参数精度的多站平差方法^[11]和高精度的 ZHD 计算公式。

前面提到的地基 GPS 水汽试验的目的是:

- (1) 把 GPS 的 IPW 资料跟其它方法获得的 IPW 资料进行对比;
- (2) 考察计算 GPS 卫星轨道的精确度和及时性对 IPW 计算的影响;
- (3) 研究全自动的 GPS-IPW 资料整理方法;
- (4) 考察 GPS-IPW 资料的引入对数值天气预报模式预报结果有何改进。

表 1 列举了 Westford 水汽试验中应用不同方法测量 IPW 的结果之间的对比情况。

表 1 用不同方法测量出的积分可降水 IPW 之间
(和对应的天顶湿延迟 ZWD 之间)的比较

	IPW(和 ZWD)的平均差(mm)	IPW(和 ZWD)的标准偏差(mm)
WVR 与 GPS	1(+ 6)	1.5(9)
GPS 与探空	2(+ 12)	2(14)
WVR 与探空	3(+ 18)	2(13)
VLBI 与 GPS	1.5(+ 8)	1.5(10)
VLBI 与 WVR	0.5(+ 3)	1.5(9)
VLBI 与探空	4(+ 24)	2(11)

注: WVR: 微波辐射计; VLBI: 长基线干涉仪

表 1 说明: GPS 测量的 IPW(和 ZWD)与微波辐射计和探空测量结果相差在 1~2 mm(和 6~12 mm),这个结果跟 NOAA 两次水汽试验对比结果一致。另外,从 3 个彼此间距很近的 GPS 接收站测量的 IPW(和 ZWD)的一致性来看,地基 GPS-(IPW)测量误差小于 1 mm(6 mm)。中国科学家^[12]也研究了 GPS 测量大气柱积分可降水 IPW 的方法,用该方法决定了 1997 年 7 月 31 日—8 月 20 日东亚地区台风和强风暴通过时 IPW 随时间的变化曲线,并与探空资料推算的 IPW 记录比较,均方偏差 5 mm,证明了 GPS 测量大气柱积分可降水 IPW 方法的可行性和应用价值,也指出了改进这一方法精度的途径。

与大地测量学和地球物理学研究一样, GPS 水汽测量要求高精度的 GPS 卫星轨道参数和精密的卫星钟差数据。目前地球动力学国际 GPS 服务组织(IGS)可以提供这些信息,分 3 个层次:第一,精确轨道,1~2 星期提供一次,适应于事后高精度静态定位应用。第二,快轨道,24 h 提供一次,精度略低。第三,预测轨道,2 h 前提供和应用,适合实时定位应用之需。近年应用预测轨道计算 IPW 的偏差已可达到 7 mm(标准偏差 1 mm)。如何进一步提高预测轨道精度的研究仍在继续之中。

美国环境研究实验室(ERL)已经开发成功自动 GPS-IPW 计算程序,利用快轨道参数,计算 15 个 GPS-IPW 站资料。

NOAA 预报系统实验室把 GPS-IPW 资料同化,用于中尺度分析和数值预报模式。试验中,以评估 GPS-IPW 的应用价值,研究尚在继续进行。初步结果说明 GPS-IPW 的应用对降水预报有所改进,预期在强对流降水和伴随的重力波等中尺度系统发展的数值模拟

中会显示有趣的应用效果。

4 GPS 探空测风试验进展^[13~16, 17, 18]

在美国气象学会第 78 届年会上, 芬兰 Vaisala Oy 高空探测部报告了他们研究的 GPS 测风方法和研制的仪器系统概况, 英国气象局则提出了他们应用 Vaisala GPS 测风系统现场试验的结果。

Vaisala GPS 测风系统, 至少需要 4 颗卫星, 如图 2 所示。

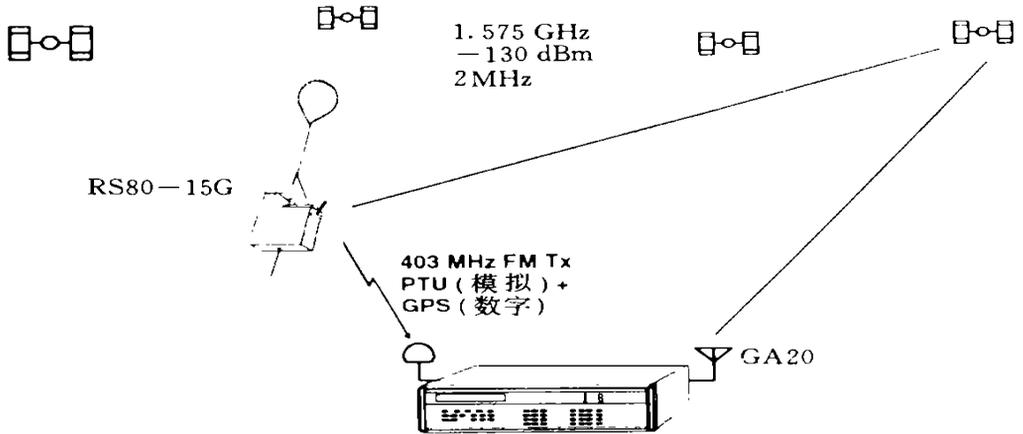


图 2 Vaisala GPS 测风系统

这个系统主要由 GPS 探空仪和 GPS 探空接收机两部分组成。Vaisala GPS 探空仪携带的是自行研制的、采用一种称之为无码方法的 GPS 接收机, 能够从 GPS 信号提取必要的信息, 测量 GPS 信号载波多普勒频移, 把 GPS 2 MHz 宽带信号转换成窄带信号发射到探空地面接收站, 价格相对于市场上通用的 GPS 接收机要便宜。GPS 探空接收机同时接收 GPS 探空仪信号和 GPS 卫星信号, 实质上是一种 GPS 动态相对定位测速的测风方法, 在此接收机内完成测风计算。

这个测风系统具有以下性能:

测量周期	0.5 s (即每秒两次)
探空仪发射频率	400 MHz(窄带)
有效接收范围	250 km
全天候工作	

现场对比试验结果表明: GPS 测风资料获得率为 96%(共 19 次探测试验), 具有极高的可靠性。如果以雷达测风为标准, GPS 测风平均偏差大约为 0.5 m/s, 而 Loran-c 测风平均偏差是 0.8 m/s。考虑到雷达测风本身具有 0.2~0.8 m/s 的标准差(20~90 km 范围), 则估计 GPS 测风精度应在 0.2~0.4 m/s 范围内。

表 2、表 3 分别列出 GPS 与雷达和 Loran-c 与雷达测风结果的对比情况。

表 2 GPS 与雷达测风的对比

(m/s)	东风 平均偏差	北风 平均偏差	东风 标准差	北风 标准差
GPS-02	- 0.08	- 0.05	0.27	0.46
GPS-04	0.05	- 0.05	0.40	0.40
GPS-05	0.06	- 0.01	0.41	0.39
GPS-07	0.10	0.02	0.36	0.42
GPS-09	0.01	0.00	0.55	0.41
GPS-11	0.08	- 0.01	0.37	0.35
GPS-12	0.10	- 0.12	1.47	1.26
GPS-13	0.05	0.02	0.49	0.58
GPS-14	0.19	0.07	0.53	0.44
GPS-16	0.09	- 0.06	0.46	0.59
GPS-17	0.04	0.00	0.71	0.64
GPS-19	0.05	0.00	0.42	0.48

表 3 Loran-C 与雷达测风的对比

(m/s)	东风 平均偏差	北风 平均偏差	东风 标准差	北风 标准差
LOR-05	0.01	1.07	0.76	
LOR-07	- 0.06	- 0.06	0.65	0.59
LOR-09	- 0.10	- 0.01	0.76	0.67
LOR-11	- 0.18	0.01	0.72	0.60
LOR-12	- 0.13	0.01	0.69	0.57
LOR-14	- 0.23	- 0.05	0.63	0.72
LOR-16	- 0.18	- 0.10	0.92	0.66
LOR-17	- 0.22	- 0.06	0.82	0.80
LOR-19	- 0.10	0.00	0.92	0.83

注: 头 100 秒是光学跟踪观测的, 去掉。

综上所述, GPS 气象探测具有优越和广泛应用的潜力, 将是 21 世纪新的全球综合高空观测系统的基本组成部分。

5 几点展望

5.1 GPS 气象探测应用研究与技术开发方兴未艾

与全球天气观测系统其它观测手段比较起来, GPS 气象探测有着其特有的优势:

(1) GPS 掩星观测对流层中高层—平流层温度垂直分布,特别在对流层顶结构探测上精确度优于 GOES(地球静止业务环境卫星)的温度反演结果。如果 5 km 以下大气温度垂直分布由其它探测手段给定,精度 2K,则 GPS 掩星观测可以反演水汽垂直分布,这是 GOES 卫星垂直探测所难以获得的。GPS 掩星观测能够均匀地覆盖全球,而价格却相对便宜。

(2) GPS 掩星观测有很高的垂直分辨率,在平流层的分辨率接近 1.5 km,在对流层则为 200~500 m。这一分辨率是超过卫星垂直探测反演结果的。

(3) GPS 探测不受气溶胶、云和降水存在的影响,这恰恰弥补了卫星和地面可见光、红外、微波遥感在这方面的缺陷。

但也应注意到 GPS 气象探测也存在着自身的局限性^[19]:

(1) 水平分辨率差。由于 GPS 卫星信号传播路径在水平方向延伸很大范围,掩星观测中接近 300 km,这对分辨大气的水平精细结构是不利的。

(2) 迄今为止, GPS 掩星观测方法也还不足以精确探测 5 km 以下大气温度垂直结构。

鉴于 GPS 在气象探测方面的潜在优势,这一新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、空间分辨力诸指标是可能得到进一步改进的。GPS 气象探测系统在 21 世纪世界天气观测系统中将占有不可或缺的位置。可以预见,在不远的将来,不仅有 Vaisala GPS 测风系统,而且还会有中国的 GPS 测风系统。因此,应尽快推进中国 GPS 气象探测研究和业务应用。

5.2 GPS 气象探测系统将在广泛的应用领域内取得成效

GPS 气象探测的预期应用领域非常广泛,有以下几方面^[20]:

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

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

(3) 对流层高层的高分辨率的温度廓线。用于: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,用于气候研究。

(5) 通过地转/梯度风关系估计高纬度地区风,用于航空工业。

(6) 其它遥感系统的相互比较/检定/初值。用于:微波探测单元、地球静止业务环境卫星(GOES)、泰罗斯业务垂直探测器(TOVS)、EOS。

(7) 电离层电子密度剖面。用于:电离层研究、空间天气(Space Weather)、通信工业。

(8) 野外试验。例如:锋面与大西洋风暴试验(FASTEX)、中尺度 ALPine 试验(Map)、印度洋试验(INDOEX)。

5.3 跨国和跨专业的科技合作是快速推进 GPS 应用的客观要求和必然趋势

GPS 气象探测技术发展迅速,在一些发达国家该探测系统将被纳入基本业务装备。目前,中国科学家参与了 GPS 掩星观测资料反演同化方法的国际合作研究,进行了地基

GPS 气象探测应用的研究,并已着手制定 GPS 探空测风系统的研究和试验计划。美国对 GPS 用户制定了限制性政策,使非特许用户的实时水平定位精度降至 100 m、垂直定位精度降至 150 m,这样的精度水平难以达到气象应用的要求。虽然在和平时期,非特许用户可长期免费利用 C/A 码,但它的精度水平将继续由美国政府根据自己的利益来加以控制。为摆脱或减弱上述限制性政策的影响,世界各国已研究成功一些有效的反限制措施:

- (1) 建立独立的 GPS 卫星测轨系统,提供精密的 GPS 卫星星历服务;
- (2) 使用差分定位技术。目前多站静态差分接收定位测距精度达到 5 mm。

另外,顺便提及,前苏联和欧洲空间署(ESA)曾分别计划发展自己的全球卫星定位系统。这一自成系统的措施虽然可以完全摆脱对美国 GPS 的依赖,但如此技术复杂和耗资巨大的工程(GPS 卫星寿命大约只有 7.5 a),对于发展中国家来说不仅困难,而且未必合算。

因此笔者认为,应当通过合作方式,建立和获得 GPS 气象观测应用的基础设施。

中国测绘部门组建的 GPS 站网,是相当密集的,气象部门应通过与他们建立有效的长期合作关系,依托国家这个 GPS 站网,获得精密的 GPS 卫星星历服务以及各 GPS 接收站的资料,用于气象目的。气象部门只把有限经费投入到为实现气象探测目的必须增设的 GPS 接收站和通信设施、以及软件开发方面。

另外,全球 GPS 掩星观测计划目前尚处在酝酿阶段,美国海洋和气象部门并未公布实施该计划的日程表。真正实施起来,除低轨小卫星技术的完善,世界范围的资料搜集和整理也必然是相当复杂的。中国应当关注这一计划的进程,设法寻求通过 WMO 或中、美等多方合作的方式参加这一计划、建立获取全球资料的渠道,也许将是中国最佳的选择。这并不排除研制开发用于特种气象探测目的的 GPS 接收的低轨卫星技术,但不应当是美国低轨卫星的简单翻板。再有,对于幅员如此辽阔的中国,一旦推广 GPS 气象业务应用,购置 GPS 接收设备的经费是很可观的。为此也应当设法通过国内或国际合作,开发研究适合气象应用的先进的 GPS 接收设备(包括探空测风),并力争进入国际市场。

此外,设立 GPS 气象应用研究的专项基金,支持这一领域的创新性研究,以及促进有条件的中尺度气象基地或机载 GPS 遥感试验和资料应用(特别是 GPS 资料同化应用于中尺度数值预报模式),同时也应当根据国内外 GPS 气象应用研究发展进程,适时地制定气象部门 GPS 气象探测技术逐步业务化的规划。

参考文献

- 1 Wu Xiangqian, Menzel W Paul, et al. Application of GPS occultations for deriving meteorological parameters. 10th Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation, 1998. J82- 85
- 2 Kursinski E R, et al. Initial results of radio occultation observations of earth's atmosphere using the global positioning system. Science, 1996, 271: 1107- 1110
- 3 Businger Steven, Chiswell Steyen R, et al. The promise of GPS in atmospheric monitoring. Bull Amer Meteor Soc, 1996, 77(1): 5- 18
- 4 Zuffada Cinzia, Hajj George, et al. A Generalized Inversion scheme for GPS occultation data taken by a receiver Inside or outside the atmosphere. 10th Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation, 1998. J92- 97
- 5 Kursinski E Robert, Hajj George, et al. Applications and accuracy of radio occultation observations using GPS. 10th

- Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation, 1998. J76- 81
- 6 Ware R, Exner M, et al. GPS sounding of the atmosphere from low earth orbit: preliminary Results, . Bull Amer Meteor Soc, 1996, 77(1): 19- 40
 - 7 Kuo Y H, Zou X, Huang W. The impact of GPS data on the prediction of an extra-tropical cyclone: an observing system simulation experiment. submitted to J Dyn Atmos Ocean, Feb. 1996
 - 8 Kuo Y H, Zou X, Guo Y R. Variational assimilation of precipitable water using a nonhydrostatic mesoscale adjoint model. part 1: moisture retrieval and sensitivity experiments. Mon Wea Rev, 1996, 124: 122- 147
 - 9 Wolfe Daniel E, et al. Development of an operational surface-based GPS water vapor observing system for NOAA: network design and project status. 10th Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation, 1998. J86- 91
 - 10 Coster A J, Niell A E, et al. The westford water vapor experiment: accuracy issues involving the use of GPS to measure total precipitable water vapor. 10th Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation, 1998. J70- 75
 - 11 周忠谟, 易杰军, 周琪. GPS 卫星测量原理与应用. 北京: 测绘出版社, 1997
 - 12 Mao Jietai, Li Chengcai, Li Jianguo. GPS remote sensing precipitable water in the typhoon and severe storm background. Proceedings of SPIE-Optical Remote Sensing of the Atmosphere and clouds, 1998. 329- 335, 15- 17
 - 13 Saarnimo Timo. GPS the global windfinding method, 10th Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation, 1998. 51- 54
 - 14 Barat Jean P, Villaeys Jacques. How to take advantage of the GPS resolution with meteorological balloons, 10th Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation, 1998. 55- 57
 - 15 Nash John and Elms J B, et al. Operational implementation of GPS windfinding test results from the UK and the South Atlantic. 10th Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation, 1998. 58- 63
 - 16 Obasi G O P. A new global composite upper air observing system in support of WMO programmes for the twenty-first century, 10th Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation, 1998. J64
 - 17 Barat J, Cot C. Accurate Analysis of rawinsonde-GPS wind sounding system. J Appl Meteor, 1995, 34: 1123- 1132
 - 18 Wilfong L, Smith S, Crosiar C. Characteristics of high-resolution wind profiles derived from radar-tracked balloons and the rose processing program. J Appl Meteor, 1996, 14: 318- 325
 - 19 Bevis Michael, Businger Steven, et al. GPS meteorology: in pursuit of greater accuracy. 10th Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation, 1998. J98
 - 20 Anthes Richard, Rocken Christian. GPS sounding of the atmosphere—results and implications for the future. 10th Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation, 1998. J65- 69

ADVANCE AND PROSPECT ON RESEARCH OF GPS ATMOSPHERIC SOUNDING AND ITS APPLICATION

Chen Shifan

(*Chinese Academy of meteorological Sciences, Beijing, 100081*)

Abstract

Up-to-date, the remarkable advances in a series of GPS/MET experimental programs to demonstrate potentiality and feasibility of GPS Sounding of atmospheric temperature profiles, precipitable water and wind have been acquired in different countries. It has been shown that active limb sounding of atmosphere using Global position system (GPS) radio signal received in low earth orbit is able to offer the data sets of temperature profiles with the precision of 1–2 K between 5–45 km, and to calculate the water vapor pressure from the measured refractivity if an temperature profile can be estimated independently. The measuring accuracy of atmospheric precipitable water (PW) from a GPS PW network with high precision is better than 1–2 mm, and the observation is relatively unaffected by rain, cloud and aerosol. The advanced GPS windfinding system has also been tested by a few of country, and when the radar windfinding was used as a reference the average deviation was about 0.5 m/s for GPS and 0.8 m/s for loran-C. Finally, the prospects for the wide application of the GPS sounding of atmosphere to meteorological research and operations are given, in addition the strategy to develop the technology of GPS remote sensing in China and to promote international cooperation is also presented in this paper.

Key words: Global Position System, Temperature, Vapour, Wind.