

GPS 探测气象参数的技术进展

郭志梅^{1,2} 李 黄³ 缪启龙¹

1 南京信息工程大学应用气象系, 南京 210044

2 中国气象局大气探测技术中心, 北京 100081

3 中国气象科学研究院, 北京 100081

摘 要 回顾了全球定位系统 (GPS) 探测气象参数 (GPS/MET) 的技术进展。全球定位系统探测气象参数利用 GPS 信号穿过大气受到大气折射而产生的延迟来探测大气中的温度、气压、水汽含量或湿度及电离层的电子浓度。就地基 GPS/MET 来看, GPS 对中性大气层水汽的探测研究, 主要集中在大气可降水量反演、水汽层析及 GPS 资料在数值预报模式中的应用等领域; GPS 对电离层探测, 主要应用于电离层变化的分析和研究, 监测和预报电离层的危害方面。天基 GPS/MET 技术利用了导航卫星 GPS 星座和 LEO 小卫星在地球地平线边缘的上下相对运动, 获取大气参数的垂直分布。GPS 气象小卫星在太空飞行, 探测范围大、频率高。两颗天基低轨 GPS 气象小卫星系统的高空资料收集能力就超过了现行全球高空气象探测能力的总和。天基 GPS/MET 掩星探测技术的业务实现将是全球高空大气探测技术发展的一次飞跃。GPS/MET 的探测精度高、全天候、时间分辨率高、观测稳定、无需校正。可以预期, 这种新型的探测手段将是未来大气探测系统中重要的组成部分, 随着 GPS 探测站网的建设 and 业务化, 它所提供的数据源, 将会对气象、环境、水文和空间天气等学科领域的研究产生深刻的影响。

关键词 地基/空基 GPS 气象参数 探测技术

文章编号 1006-9585 (2008) 02-0212-13 **中图分类号** P412 **文献标识码** A

The Technical Progress in Meteorological Parameter Observation by GPS

GUO Zhi-Mei^{1,2}, LI Huang³, and MIAO Qi-Long¹

1 *Department of Applied Meteorological Science, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044*

2 *National Centre of Observation Technology, China Meteorological Administration, Beijing 100081*

3 *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*

Abstract The technical progress in GPS observing meteorological parameter (GPS/MET) have been reviewed in this paper. GPS/MET observe temperature, pressure, water vapor content or humidity in the atmosphere and electron concentration in the ionosphere by using of the delay generated from the refraction when GPS signal passes the atmosphere. As far as ground-based GPS/MET was concerned, the observing research on water vapor in the neutral atmosphere, mostly focus on atmosphere precipitable water amount retrieval, water vapor CT and the application of GPS datum in numerical prediction mode and so on; GPS observation on ionosphere, mainly apply to analysis and research on change of electron concentration, monitor and predict ionosphere harm. Space-based GPS/MET can get vertical distribution of atmospheric parameter in space, utilized the up-and-down relative movement between naviga-

收稿日期 2006-09-07 收到, 2007-11-16 收到修定稿

资助项目 中国气象局新技术推广项目 G2008M10

作者简介 郭志梅, 女, 1970 年出生, 高级工程师, 博士研究生, 主要从事大气探测、遥感技术与气候方面的研究。

E-mail: zhimeig@163.com

tional satellite GPS sites and LEO moonlet. GPS meteorological moonlets fly with more higher frequency (a few hundred time everyday) in the space, can obtain global information from 0 to 60 km (the scope of routine meteorological soundings is 0—30 km) and measure ionosphere more higher (60—800 km). The high capacity collecting data of two Space-based low orbit GPS meteorological satellite systems have exceeded that of the present whole global operational Air-soundings observation. It is a rush for the technical development of global atmospheric observation from space, when the Space-based GPS/MET occultation observation technology would become operation. This has caused super attention to geoscience and Space Remote Sensing fields, from GPS/MET with higher precision, all weather, high temporal resolution, observation stabilization, no calibration. We can anticipant that such new observing technology is a important compositive part of atmospheric observation in the future, with the establishing of GPS station network and its operation, the new data resource will undoubtedly bring profound advancement to meteorology, environment and hydrology, space weather and so on.

Key words ground/space-based GPS, meteorological parameter, observation technology

1 引言

GPS 全球定位系统 (Global Positioning System) 是美国在 20 世纪 70 年代开始开发的卫星定位系统, 其主要目的是为飞机、船舶定位或导航。由于它具有很高的定位精度, 已被广泛地用于许多军用和民用的目的。世界上其他国家也开发了相应的系统, 如俄罗斯的 GLONASS 系统, 中国的北斗系统, 欧共体的 GALILEO 系统, 它们都属于全球导航卫星系统 GNSS 系统。

GPS 遥感技术应用于气象中, 给气象部门测定大气参数提供了新的手段, 它可以补充现有的无线电探空仪、微波辐射计所测量的气象数据, 从而改善大气中水汽参数的时空分辨率。GPS 高精度测量中, 最基本的观测是卫星至 GPS 接收机天线的无线电信号的传播时间, 这一传播时间受大气影响而产生额外延迟, 这种延迟主要是电离层和中性层大气层作用的结果。其中电离层延迟可以利用双频信号将其影响消除, 但中性大气层的影响, 很难通过一定的观测手段将其影响消除, 只能通过一定的模型将其影响降低到最小程度。这种影响与大气折射率密切相关, 大气折射率是气压、温度和湿度的函数。因此可把 GPS 作为测定大气参数及其变化的一种新的遥感技术。它可以分为两类: 一类是地基 GPS 气象学 (Ground-based GPS Meteorology), 即利用地球表面静止的 GPS 接收机来接收 GPS 卫星信号, 连续对地球的大气参数进行测量; 另一类是天基 GPS 气象学 (Space-based GPS Meteorolgy), 即

主要利用安置在低轨卫星上的 GPS 接收机来接收 GPS 卫星信号, 采用掩星法对大气参数进行测量。

2 地基 GPS 探测气象参数的基本原理

2.1 天顶总延迟

大气层相对于 L 波段电磁波可认为是连续介质, 根据大气折射原理, 主要是受到电离层的影响以及中性大气中的干空气和水汽的影响。通过对电磁波传播路径上大气折射率 N 的路径积分就可以得到 GPS 信号的大气总延迟 ΔD_z , 可分为 3 项: 电离层延迟 D_i 、大气干延迟 D_h 和湿延迟 D_w (其中大气干延迟和水汽湿延迟又可统称为中性大气延迟)。

信号的时间延迟可以用增加的传输路径长度来表示, 增加的路径长度可表示如下:

$$\Delta D_z = \int_L n(s) ds - G, \quad (1)$$

式中, $n(s)$ 是弯曲路径 s 上的大气的折射率指数 (Refractive Index), 它是位置 s 和路径 L 的函数, G 是 GPS 卫星与接收机之间的直线距离长度。上式也可以写为

$$\Delta D_z = \int [n(s) - 1] ds + (s - G), \quad (2)$$

式中, s 是 GPS 无线电信号传输时实际的弯曲路径长度, 它与 G 不同。右方第一项是空间大气层对信号传播速度的影响, 也把它称为光学延迟 (Optical delay); 第二项是信号路径弯曲的影响, 也把它称为几何延迟 (Geometrical delay), 该项

是很小的,当高度角大于 15° 时,其值不超过 1 cm,相对于光学延迟可以略去。由于 $(n-1)$ 的数值很小,于是令

$$N=10^6(n-1), \quad (3)$$

式中, N 是气压、气温和水汽含量的函数,其关系式为

$$\begin{aligned} N &= (n-1) \times 10^6 \\ &= 77.6 \frac{p}{T} + 3.73 \times 10^5 \frac{e}{T^2} + 4.03 \times 10^7 \frac{n_i}{f^2} \\ &= 77.6 \frac{p_d}{T} + \left(\frac{77.6}{T} + \frac{3.73 \times 10^5}{T^2} \right) e + \\ &\quad 4.03 \times 10^7 \frac{n_i}{f^2}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \Delta D_z &= \int [n(s) - 1] ds = \frac{10^{-6} \int 77.6 \frac{p_d}{T} dz}{\text{I}} + \\ &\quad \frac{10^{-6} \int \left(\frac{77.6}{T} + \frac{3.73 \times 10^5}{T^2} \right) e dz}{\text{II}} + \frac{\int 40.3 \frac{n_i}{f^2} dz}{\text{III}} \\ &= D_h + D_w + D_e, \end{aligned} \quad (5)$$

式中, p 是大气压 (单位: hPa), T 是绝对温度 (单位: K), p_d 是干空气气压 (单位: hPa), e 是水汽压 (单位: hPa), n_i 是电子密度。在标准大气条件下, (5) 式的误差不超过 0.5%。在大多数情况下, (5) 式中的第 I 部分比第 II 部分大得多, 第 I 部分是干空气部分 (即天顶静力学部分), 它与大气压和绝对温度有关; 第 II 部分是湿空气部分, 它与水汽分压和绝对温度有关, 第 III 部分是电离层部分。

2.2 电离层延迟

电离层延迟可以利用双频 GPS 信号测量算出。因为大气干延迟和湿延迟均与 GPS 信号频率无关, 而电离层延迟与频率平方成反比, 与电子密度成正比。通过分别测量两个频率 GPS 信号的总延迟, 联立求解就可以消去大气干延迟和水汽湿延迟, 求出电离层延迟。这也是 GPS 系统设计使用 L1、L2 两个频率发射的原因。

$$\begin{cases} \Delta L_{f_1} = (N_d + N_w + N_i)_{f_1} \\ \quad = (N_d + N_w)_{f_1} + \int k_4 \frac{n_i}{f_1^2} dz, \\ \Delta L_{f_2} = (N_d + N_w + N_i)_{f_2} \\ \quad = (N_d + N_w)_{f_2} + \int k_4 \frac{n_i}{f_2^2} dz, \end{cases} \quad (6)$$

$$\delta \Delta L = k_4 \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) \int n_i dz = D_i. \quad (7)$$

用 GPS 电离层延迟可以进一步反演出从卫星到 GPS 接收机之间的信号路径上的全部电子密度, 以 T_{EC} 表示。双频载波 GPS 接收机提供两个 GPS 信号的伪距观测量。利用伪距观测量可以得到电离层的绝对 T_{EC} , 利用载波相位观测量能够得到 T_{EC} 变化的相对值。利用观测数据能够得到 T_{EC} 廓线, 提供高时空分辨率的全球电离层映像。通过对电离层监测, 有助于电离层数值模式和预报的研究, 提高对电离层/热层系统中许多重要的动力过程的了解, 为空间天气学的研究提供基础。

$$\int n_i dz = \frac{\delta \Delta L}{k_4 \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right)} = \frac{D_i}{k_4 \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right)}, \quad (8)$$

$$\begin{aligned} T_{EC} &= \int n_i dz \\ &= \frac{1}{40.3} \left(\frac{f_1^2 f_2^2}{f_2^2 - f_1^2} \right) (\rho_1 - \rho_2 + A_m + B_{ai}), \end{aligned} \quad (9)$$

其中, f_1 、 f_2 分别为两种载波频率, ρ_1 、 ρ_2 为相位延迟测量值, A_m 是 L1 和 L2 两种载波相位测量的模糊度, B_{ai} 是偏差项。

2.3 大气干延迟

大气干延迟 (又称静力延迟) 与大气压力成正比, 与大气温度成反比。通过实测资料分析, 可以建立 GPS 信号路径上的干延迟与 GPS 接收机所在地面的本站气压及纬度、高度的统计关系, 即所谓静力学干延迟公式, 而求出大气干延迟。

天顶静力学延迟比较有规律, 可以按不同的模型推算出来, 如 Saastamoinen 模型和 Hopfield 模型, 其他模型可以从这两种模型演变而来。

根据 Saastamoinen 模型, 天顶静力学延迟可以写为

$$D_h = (2.2768 \pm 0.0024) \frac{p_s}{f(\theta, H)}, \quad (10)$$

式中, D_h 代表天顶静力学延迟 (单位: mm), $f(\theta, H) = 1 - 0.00266 \sin(2\theta) - 0.00028H$, p_s 是测站大气压 (单位: hPa), θ 是测站纬度, H 是测站海拔高度 (单位: km)。

根据 Hopfield 天顶延迟改正模型, 天顶静力学延迟可以写为

$$D_h=77.6\times10^{-6}\frac{p_s(h_d-h_s)}{5T_s},\tag{11}$$

式中， $h_d=40136+148.72(T_s-273.16)$ ， p_s 是测站大气压， T_s 是测站绝对温度， h_d 是中性大气层顶部高于大地水准面的有效高度（单位：m）， h_s 是测站的高程（单位：m）。

2.4 大气湿延迟

从估算出的总中性层天顶延迟中减掉表面气压中所推得的天顶静力学延迟，就得到我们所需要的天顶湿延迟，

$$D_w=10^{-6}\int\left(27\frac{e}{T}+3.73\times10^5\frac{e}{T^2}\right)dz$$
$$=D_z-D_i-D_h.\tag{12}$$

而表征大气水汽情况的量通常有两个，一个量是积分水汽量（Integrated water vapor: I_{wv} ），即每单位面积上水汽的质量，其高度可以理解为往上无限的延伸。另一个量是可降水量（Precipitable Water: P_w ）它相当于同样水汽含量的水柱高，可理解为某一时刻大气中的水汽在达到饱和时凝结成水的全部降水量，即

$$P_w=I_{wv}/\rho,$$

式中， ρ 是液态水的密度，大气积分水汽（ I_{wv} ）与天顶湿延迟（ D_w ）的关系可用下式表示：

$$D_w=1\times10^{-6}I_w\left[R_v\left(k'_2+\frac{k_3}{T_m}\right)\right],\tag{13}$$

式中， $R_v=461.495\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 为气体常数。 $k'_2=22.1$ ， $k_3=3.739\times10^5$ 。

$$T_m=\frac{\int(e/T)dz}{\int(e/T^2)dz},\tag{14}$$

为加权平均温度，可以采用以下关系式来将湿延迟数值转化为大气积分水汽

$$I_{wv}=\Pi\cdot D_w,\tag{15}$$

$$\Pi=1\times10^6\left[R_v\left(\frac{k_3}{T_m}+k'_2\right)\right]^{-1},\tag{16}$$

通过实测资料分析，可以建立 GPS 信号路径上的水汽积分总量与湿延迟以及 GPS 接收机所在地面本站气温的统计关系。

由 GPS 数据推算大气积分水汽时，转换系数 Π 最好是在不同地区不同季节采用不同 T_m 值来推算，若采用单一的 T_m 值将会产生较大的误差。 T_m 的大小取决于地面温度、对流层温度和水汽分

压的垂直分布。参数 T_m 可由数值天气预报模型提供，或者通过地面温度 T_s 以观测来估算： $T_m=a+bT_s$ ，Bevis 等^[1]推出适合于中纬度地区的回归系数为 $a=70.2$ 、 $b=0.72$ ，其中误差是 ± 4.74 ，相对误差小于 2%，推算大气可降水量的平均误差小于 4%。李建国等^[2]给出北京地区的回归系数为 $a=44.05$ 、 $b=0.81$ 。

3 GPS 数据处理软件

GPS 应用于大气遥感的关键问题是空间大气天顶延迟参数的估算，高精度的 GPS 数据处理软件都可以估算空间大气延迟参数，它们可以同时推算出测站坐标、卫星轨道和天顶延迟参数。在高精度 GPS 数据处理软件中，估算总的中性层天顶延迟的常用方法有两种：一种是最小二乘估计，即在每个特定时间间隔里，在每个测站上确定一个参数。另一种是利用卡尔曼滤波把估值当作一个随机过程来处理，在两种估计方法中，均假定 GPS 天线周围的大气是各向同性的。

选用好的数据处理方法和软件对 GPS 测量结果影响很大。在 GPS 软件研制方面，国内外已经发展了一些著名的软件，如表 1 和表 2 所示。

国际上一些较为著名的高精密后处理软件（如 GAMIT、BERNESE 和 GIPSY）和国内的 SHAGAP 等几乎都实现了估算对流层天顶延迟的功能。此类软件一般用于科学研究目的，而由各生产厂家推出的与接收机匹配的商用处理软件则无此功能。

各种后处理软件由于采用的天顶延迟计算模

表 1 国际著名 GPS 软件
Table 1 International GPS software

GPS 软件	研制单位
GAMIT	麻省理工学院（MIT）、美国加利福尼亚斯克瑞布斯（SCRIPPS）海洋研究所（SIO）
BERNESE	瑞士伯尔尼大学天文学院
OMNI	美国国家大地测量（NGS）部
EMANON	美国 Emanon 公司
GIPSY	美国喷气推进实验室（JPL）
GAS	英国诺丁汉大学的工程测量与空间测量研究所（IESSG）

表 2 国内发展的 GPS 高精度软件

Table 2 Domestic developed GPS software

GPS 软件	研制单位
SHAGAP	中国科学院 (基于 GAMIT 研制)
SNAPS	国家地震局
SOSDS	总参测绘局
GPSADJ	国家测绘局

表 3 GAMIT BERNESE GIPSY 3 种软件的 GPS 水汽结果差异

Table 3 Difference of Water Vapor in GAMIT BERNESE and GIPSY software

GPS 软件	均方根误差/mm
BERN-GAS	1.59
BERN-GIPSY	0.89
GAS-GIPSY	1.92

型和相映射函数不完全相同,给出的结果可能会有系统性差别。Dodson 等^[3]用 BERNESE、GAS、GIPSY 软件对欧洲某地 GPS 网络 10 天的数据作了处理,分析了上述软件在解算 GPS 水汽上的差异,结果见表 3。

从表 3 可以看出, GAS 软件与另外两种软件差异较大,而 BERNESE 与 GIPSY 结果很接近。但此表也说明, 3 种软件都能用于水汽解算。中国地壳运动观测网络数据中心调试了 GAMIT/GLOBK 的几个版本与 BERNESE4.0 GPS 数据处理软件、GMT 绘图软件等,开展了两个软件定轨试验计算,并完成观测数据处理;用 GAMIT/GLOBK、BERNESE 软件完成了 1998 年基准网 81 个站首次观测的计算,达到了网络设计对基准网的精度要求,并用 GAMIT/GLOBK、BERNESE 软件开展了基准网日常数据处理。上海 GPS 水汽监测网用的是国产软件 SHAGAP,北京 GPS 水汽监测网选用的是 BERNESE。

国内外各研究机构进行数据处理应用的软件大都采用 GAMIT/GLOBK 或 BERNESE 软件,由于 GAMIT/GLOBK 不但精度高而且开放源代码,使用者可以根据需要进行源程序的修改,因此在国内得到了广泛的应用。

4 地基 GPS/MET 探测的研究应用进展

4.1 大气中水汽探测

4.1.1 国外 GPS/MET 水汽探测

GPS 信号穿过大气到达地面 GPS 接收机时受到大气中水汽的影响而延迟,这种延迟近似正比于沿信号传播路径上的大气水汽的总含量。利用这种关系将湿延迟转变成大气可降水量,且可以得到较为准确的结果,从而产生了许多利用 GPS 来遥感大气水汽的设想和研究工作^[4]。

最早始于 1992 年。1993 年^[5]由 UNAVCO 和南加州大学联合进行了具有较大规模 GPS/STORM 试验^[6],以评估大气水汽的地基 GPS 测量。在 GPS/STORM 实验中,科学家在 5 个 NOAA 风廓线仪站和能源部在 OKLAHOMA 和 LAMONT 的南大平原云辐射试验站上安装了 GPS 接收机和地基微波辐射计。选择这些站点是为了充分利用 NOAA 现有的业务基础设施。1994 年,由 NOAA 和 UNAVO 进行了 GPS-WIS94 试验,证明了利用 GPS 可以连续监测大气可降水量,其时间分辨率优于 1 h,精度达到毫米量级^[7]。

由刘悦安等^[8]发展的方法是将 GPS 观测的水汽和独立的水汽微波辐射计 (Water Vapor Radiometer, WVR) 值进行比照,利用 WVR 值对 GPS 的观测进行订正,称为“举托法” (Levering),也称 WVR 约束法。对于小于 500 km 的 GPS 接收机网点,用来估算天顶延迟的最小平方法和卡尔曼滤波技术对相对时延的敏感性都高于绝对时延的敏感性,两个或者更多 GPS 接收机所见的同一颗 GPS 卫星的高度角几乎相同,导致对时延的估计值高度相关,因此,由小区域网得到的湿延迟在每一个取样期呈现一种未知的偏差,偏差的大小在整个网区上是常数。这样只能得到相对的大气可降水量值和辐射计观测相比有 1.5 mm 的均方差误差和小于 0.5 mm 的偏差。1996 年, Duan 等^[9]发展了对 GPS 水汽进行绝对估计的方法,这种方法要求:在估计小的网点的 GPS 水汽时,可以利用大于 500 km,位置精度已知站点的 GPS 接收机的同步观测,使整个观测网的尺度大

于 500 km。Duan^[9] 分析了 GPS/STORM 试验场和加拿大、加利福尼亚、法属圭亚那的 GPS 资料,发现相应的误差比“举托法”要低。这种技术的发展,使 GPS 测量水汽的方法摆脱了对 WVR 的依赖。

以上估计天顶延迟是基于大气方位对称的假设,用卫星高度角的余切把天顶延迟映射到每颗卫星的信号延迟上^[10,11],方位对称的假设^[12,13]限制了 GPS 探测大气可降水量的精确性和空间分辨率。对 GPS 在信号传播路径上的水汽进行积分,可以得到更高空间分辨率的倾斜路径的水汽含量(SW),它通过将倾斜路径的总延迟减去倾斜路径的干延迟分量部分,再通过换算成水汽含量获得。GPS 倾斜路径的延迟的高频变化归因于小尺度水汽场结构。这在 WVR 在 5° 的视场和 8 min 的观测时段是探测不到的。GPS 和辐射计数据的比较表明,倾斜路径的水汽含量在高度角 10° 附近,其均方根误差为 0.8 mm,到天顶附近减少到 0.3 mm。倾斜路径的延迟还具有其他方面的应用价值,Herring 和 Shimada^① 使用倾斜路径的延迟估计水汽风的高度和速度。由这个方法估计水汽风是对卫星云导风技术的补充。使用 GPS 倾斜路径的延迟还可以获得大气折射率的 4 维变化特征,用 1~2 km 的间隔的单频 GPS 接收机可以获得水汽场的四维特征^[14],GPS 数据在大气的湍流研究中也具有潜在的应用价值^[15],当大气的湍流增强、混合比增大,GPS 信号的变化加大。使用边界层雷达、探空和 GPS 数据可以观测到大气湍流的结构。同化倾斜路径上的水汽资料可以同时约束 10 条左右的 GPS 信号路径上的水汽,从而高分辨地探测大气的水汽结构^[16,17]。

从利用 GPS 探测水汽以来,气象学家也开始了关于 GPS 水汽在有限区域数值预报模式中的应用研究。及时并且准确的水汽资料对中尺度数值模式和短期云降水预报的改进是非常重要的。数值预报模式的研究者希望从 GPS 得到高精度的水汽场能更好地模拟强对流天气。GPS 的大气可降水量数据能用于改进暴雨系统的分析^[18,19]。另外,通过同化地面水汽和大气可降水资料,可以改进

水汽垂直结构和短期降水预报。Park 和 Droege-meier^[20]对雷暴的模拟研究表明,雷暴对环境水汽场的分布相当敏感。Crook^[21]则指出,在科罗拉多东北部形成的雷暴和温度、湿度在大气边界层的分布有着密切的关系,他们利用 GPS 探测资料分析发现雷暴的形成和边界层的温度密切相关,雷暴的强度对水汽含水量非常敏感,因此,更好的水汽测量将会提供更好的暴雨预报。1996 年,Kuo 等^[22]开发了 MM5 非静力伴随模式,并对 GPS 反演的大气可降水量进行了同化研究,结果发现:通过大气可降水量的同化,可以得到更好的初始场从而得到更好的短期预报效果。通过三维变分同化或 NUDGING 技术,对水汽资料进行同化的研究工作^[23]也提示了 GPS 反演水汽对模式预报水平具有提高作用。

GPS 资料对区域气候学的价值已被 Yuan 等^[24]和 Stevens^[25]证明,这些资料的价值在于其全天候和稳定性,应用合适的变分模式,GPS 延迟数据就可以直接同化到模式中。Herring^[26]比较了 GPS、VLBI(甚长基线干涉)和模式计算的延迟,发现它们之间存在密切的关系。Kuo 等^[27]也发现同样的结果。区域气候研究将受益于改善的水汽场分析,Schubert 等^[28]通过区域水汽通量研究气候变化时发现:大气可降水量异常和美国中部大平原的极端气候有关;他们还发现,3 种全球分析相差 25%,因此认为是由水汽场的分析不够造成的。

由于三维水汽场在气候研究和数值天气预报模式中的重要作用,因此,另外一种通过加密 GPS 观测对水汽进行层析的技术发展起来。通过观测倾斜路径的水汽延迟,在一定的背景场条件下,通过变分方法,从而反演出水汽廓线资料,得到三维的水汽资料。这种方法首先由 Rocken^[29]在美国南大平原地区(SGP)进行了试验,该试验是美国能源部 ARM 项目为改进大气辐射模式而对水汽进行的观测,在 6.5 km×6.5 km 的区域布设了 24 台 GPS 接收机,通过信号的延迟首先估计倾斜路径的水汽含量,用 Raman Lidar 的垂直廓线,通过变分的方法反演出 15 min 间隔的垂

① Herring T, Shimada S. Estimating spatial variations in atmospheric delays using GPS. Japanese conference on GPS Meteorology, August, 1998. http://www-gpsg.mit.edu/~tah/web/japan_gps_met/GPSMetJapan.html

直分层 12 层的水汽场。

4.1.2 国内 GPS/MET 水汽探测

国内各有关单位早在 20 世纪的 90 年代初期就开始利用地基 GPS 接收机信号反演大气参数的方法进行研究^[30]。特别是在国防科工委卫星应用项目指南的支持下,1995 年起,国家卫星气象中心^[31]、北京大学^[32]和国家测绘局^[33]单位联合开展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专题研究。得到精度为 2 mm 左右的 GPS 大气可降水量和 1 K 的温度反演廓线。经详细验证,确认了利用 GPS 信号反演大气可降水总水汽含量(PWV)方法的可行性,即 GPS 获得的 PWV 与常规探空得到的 PWV 之间相对误差小于 10%。

上海气象局和上海天文台通过合作,对上海暴雨期间进行了 GPS 观测,了解了梅雨期 GPS 大气可降水量的变化情况^[34]。中国气象科学研究院在华南暴雨试验、青藏高原试验中进行了 GPS 观测,得到我国华南和高原的水汽变化情况^[35]。2000 年国家卫星气象中心、北京大学和北京市气象局又联合在北京地区开展了更大规模的我国第一次区域性的地基 GPS/VAPOR 水汽观测试验^[36]。2002 年,在海峡两岸暴雨观测试验研究计划,973 研究项目“我国重大天气灾害形成机理和预测理论研究”中的长江中下游梅雨暴雨观测试验研究^[37],进一步完善了 GPS 观测和反演的技术。

中国科学院大气物理研究所李树勇等^[38]开发了同化 GPS 折射角的四维变分同化系统,中国气象局北京市城市气象研究所张朝林等^[39]在模式中同化了 GPS 资料后对 2000 年 7 月 4~5 日特大暴雨的影响进行了评估,国家卫星中心的曹云昌等^[40]对导航卫星信号湿延迟参数模型和数值模式进行了比较研究,这些都证明了 GPS 观测在数值预报中的应用价值。

上海天文台利用上海市区 5 个 GPS 站组成的中尺度网的观测资料,开展了大气可降水量层析研究和监测,结果表明:GPS/PWV 的层析结果与无线电探空的结果非常接近。北京市气象局也在北京地区两个地基 GPS 大气水汽监测局地中尺

度小网上实现了大气可降水量 GPS/PWV 的层析监测,在北京气象局局内网上以网页形式提供了实时产品;还开展了地基 GPS 大气水汽监测资料在北京人工影响天气和空中云水资源评估方面的示范性研究。

4.2 电离层电子浓度探测

电离层的存在对电磁波信号的传播会产生衍射、散射,从而影响无线电信号的接收质量。通过地基 GPS 站对电离层实时监测可以得到全球、区域甚至局地的电离层 T_{EC} 分布,这是空间天气监测预报的重要信息。

利用观测数据得到 T_{EC} 廓线,可提供高时空分辨率的全球电离层映像,通过对电离层监测,有助于电离层数值模式和预报的研究,提高对电离层/热层系统中许多重要的动力过程的了解,为空间天气学的研究提供基础。根据美国空军实验室的研究,由于引入 GPS 电离层 T_{EC} 实时监测资料,提高了数值模式对电离层的模拟,模式均方根误差下降了 42%。

中国地震局利用 25 个 GPS 观测站的资料,反演获得了东亚区域 T_{EC} 的春夏秋冬四季分布图^[41],并发现利用地基 GPS 可探测到震前电离层 T_{EC} 异常^[42]。

电离层不规则变化会对无线电通讯、电视台和广播电台的信号传播都有很大干扰,甚至导致通信中断。利用上海 GPS 综合应用网提供的高时空分辨率的双频 GPS 台站观测资料,监测研究了上海地区上空电离层不均匀体的产生、消亡和快速变化的细节过程,对上海电离层局地中尺度变化有了进一步认识^[43,44]。

5 地基 GPS/MET 站网的建设进展

地基全球定位系统探测空间气象参数(GPS/MET)技术从 20 世纪 80 年代发展以来,伴随 GPS 的快速发展,得到广泛应用。技术日益成熟,已经从科学研究领域迈进日常业务运行工作^①。

5.1 国外地基 GPS/MET 站网

国外,欧美等发达国家加大投资建立有多颗低轨卫星组成的空基 GPS 探测系统,美国、日

① 国家卫星气象中心编. 中国气象局 GPS 大气探测业务工作研讨会材料. 中国气象局监测网络司, 2006 年 1 月

本、德国、欧盟、韩国等纷纷建立起包含地基 GPS/MET 应用的连续运行网络,其中,美国长期连续稳定运行高精度地基 GPS 基准站有 1 000 多个;日本由 GSI (日本测绘研究所)管理的目前有 1 200 台接收机组成的一个密集的观测网络;在德国,目前有 170 个地基 GPS 基准站点。欧盟配合伽利略导航卫星系统计划的实施,由法国、意大利、西班牙和丹麦等国联合发起的 MAGIC 计划,同化并检验 GPS/MET 资料对天气模式 (HIRLAM) 和气候模式 (HIRHAM) 的作用。

5.2 国内 GPS/MET 站网

“九五”期间,由中国地震局联合国内相关部委建立了 25 个基准站用于大地测量的 GPS 观测网络,该项目二期工程将建立 260 个基准站。深圳率先建立起城市 GPS 应用网络,2001 年上海地区建立了第一个集气象服务、大地测量、地壳形变、地面沉降和地理信息系统 (GIS) 多种应用的 GPS 综合网络,由 14 个地面 GPS 基准站和 1 个资料处理中心组成,覆盖上海及周边江、浙、皖地区。并可推广到交通智能化管理、电离层变化监测和城市规化等方面。北京市气象局 2004 年已经建成了以房山和怀柔两地为中心的 14 个加密 GPS/MET 站网,以发展三维水汽层析技术。目前, GPS 应用在我国正在迅速展开,天津、安徽、河北、湖北、重庆、江苏、浙江、福建和山东等省市都有自己的综合应用 GPS 建设方案。

中国气象局在 20 世纪初就安排 GPS 探测工程试验项目,由国家卫星气象中心牵头在华北地区 (首先在河北省的石家庄、张家口、秦皇岛、山西太原) 建立了 GPS 探测水汽的业务试验网。在北京南郊的中国大气探测试验基地建立地基 GPS 观测示范站,资料处理中心设在中国气象局大气探测技术中心。开展了 GPS 水汽探测业务系统建设和实时运行试验,包括站址选择、站基建设、设备选型、数据采集、信息传输、通信组网、远程监控、资料处理、产品生成和应用等各方面内容,取得了丰硕的成果,积累了 GPS 水汽探测业务系统建设和运行全流程各个环节的全面经验,并形成了一批规范性的文件。2006 年 1 月,在北京召开了中国气象局 GPS 大气探测业务工作研讨会,中国气象局计划到 2010 年建成约 430 个站,组成覆盖全国,平均间距 150 km,东部 100 km、

西部 200 km 的国家级 GPS 水汽探测网。主要监测天气尺度的水汽分布和变化,以及电离层电子浓度分布。为适应 2008 奥运气象保障服务的需要,由各单位、部门 50 余站实时资料联合共享组成的京津冀 GPS 水汽探测实时业务网已于 2006 年 8 月投入运行。

6 天基 GPS/MET 掩星技术的进展

6.1 天基 GPS/MET 掩星技术概述

天基 GPS/MET 技术,利用 GPS 进行地球大气航天遥感探测的基本原理是:发射一颗或多颗低地球轨道小卫星 (LEO),其上装有星载高精度 GPS 接收机 (可称为 GPS 气象小卫星或 GPS 应用小卫星),借助于地球边缘的临边效应,接收由导航卫星 GPS 星座发出的无线电信号进行掩星测量^[45]。

GPS-LEO 掩星数据具有全天候全球覆盖面、高垂直分辨率和高长期内在稳定性的优点,能够很好地满足气象研究对数据的时空分布要求,因此在天气预报和气候研究领域具有很好的应用前景。

从天气预报领域来看,单颗低轨卫星每天可提供 500 多个掩星数据。假如接收机能够同时接收来自前苏联的 GLONASS 卫星信号,掩星数据将翻倍至每天 1 000 次以上。掩星事件全球均匀分布,很好的解决了海洋及南半球探空资料相对缺乏的问题;与空基红外传感器得到数据相比,掩星数据垂直分辨率高,在地面附近为几十米,60 km 高度附近增大到 1 km;且 GPS 信号波长在 L 波段,不易受云、雨和气溶胶的影响,具有真正全天候的优势,这对提供精确的数值预报初始场,改进模式,提高预报精度具有十分重要的意义。另一方面,在气候研究领域,掩星探测能够长期记录全球平均温度,监测水汽变化、臭氧消耗、温室气体增加等重要指标,将对 La Niña 和 El Niño 现象研究及全球气候变化研究产生重大影响。GPS-LEO 掩星数据还能够应用于对火山、地震和全球电离层映象等众多科学领域的研究和探索^[46]。

6.2 天基 GPS/MET 掩星探测原理

GPS 信号在穿过大气层到达 LEO 卫星的过程中发生折射,折射与大气的压力、温度和水汽分

布等参数有关。利用 LEO 卫星上的 GPS 接收机测得的多普勒频移及 LEO 卫星的位置和速度信息,可得到无线电信号在地球大气中传播的时延,从而可反演出大气的折射指数、电离层参数以及气压、温度和水汽等其他气象信息随高度的变化。低轨卫星高度 750 km,每天可以观测到 500 次 GPS 卫星升降过程。

6.3 国外天基 GPS/MET 掩星技术的进展

美国的天基 GPS/MET 研究几乎是与地基 GPS/MET 同时起步的。1992 年,美国国家科学基金会(NSF)、联邦航空管理局(FAA)、以及国家海洋和大气管理局(NOAA)联合发起制定了利用 GPS 气象小卫星系统主动遥测地球大气的(GPS/MET)计划。1995 年 4 月 3 日,UCAR 发射了第一颗低轨试验小卫星 MicroLab-1,开始了第一次地球大气掩星观测,迄今得到了约 7 000 多个气象剖面数据。其重大意义在于,充分表明了掩星技术完全可以用于地球大气气象参数的观测。

欧洲及其他国家也积极开展这方面的研究工作。1999 年 2 月丹麦发射奥斯特 Orsted 小卫星,南非发射 SUNSAT 小卫星,2000 年 7 月发射的德国重力测量卫星 CHAMP 和 2002 年 3 月发射的欧美重力测量卫星 GRACE 也都有利用 GPS 进行大气参数航天遥感测量的试验项目。2000 年 11 月发射的阿根廷科学应用卫星 SAC-C 的一个重要项目也是 GPS 大气遥感试验。2002 年巴西发了 EQUARS 卫星,澳大利亚也发了 FedSat 卫星。欧洲空间管理局正在研制的重力测量卫星 GOCE 计划携带一个双频 GPS 和 GLONASS 组合接收机 GRAS 用于大气遥感测量。欧洲空间管理局的大气气候探测计划 ACE+掩星观测计划^[47]和替代的 ACCURATE 计划要发射若干小卫星组成星座,通过在卫星上安装的高精度 GPS 接收机获取掩星期间的信号实现全球范围的高精度、高垂直分辨率的大气温度和湿度探测。

特别是由美国出设备技术,中国台湾出主要资金合作研究的 COSMIC 计划(气象、电离层和气候的星座观测计划)^[48],由 6 颗小卫星组成星座,卫星高度在 700~800 km 3 个不同的轨道面上,每颗卫星重约 62 kg,主要有效载荷是用于掩星观测的高精度 GPS 接收机,除用于气象研究

外,还用于电离层和地球重力探测研究等。此计划从 1997 年 10 月开始启动,历经近 10 年,终于在 2006 年 4 月 14 日从美国范登堡空军基地成功发射,成为全球第一个投入业务的 GPS 气象小卫星星座,工作寿命 5 年。用于获取 0~60 km 高度范围大气资料和 90~800 km 高度范围电子密度场。每天可获取 4 000 个这样的全球分布的垂直剖面。及时掌握全球大气参量数据资料。

6.4 国内天基 GPS/MET 掩星技术的进展

从 20 世纪 90 年代中期以来,中国科学院武汉数学物理研究所及空间中心、中国气象局卫星气象中心、北京大学和中国地震局等有关单位的许多科学工作者积极跟踪国外 GPS 气象小卫星技术的发展情况。利用国外的 GPS 掩星探测数据,进行了空基大气参数:温度、气压以及电子浓度分布廓线的反演,在相关应用方面做了许多工作^[49~52]。掌握了 GPS 气象小卫星技术的原理和应用方向,在 GPS 气象小卫星系统规划、预研、仿真以及资料反演和数据处理等方面,进行了研究,具备了一定的技术基础。

高精度星载 GPS 接收机是制约中国 GPS 掩星观测的关键,有关部门通过国内研制、国际合作的方式,突破星载 GPS 接收机的研制技术,掌握 GPS 掩星接收、数据处理技术。已经研制成功了星载高性能 GPS 接收设备,解决了星载 GPS 接收机的抗辐照、散热和适用于大气探测的高精度等关键技术问题。

采取多渠道方式,建立我国天基 GPS 应用小卫星,发展中国的 GPS 掩星系统,包括在 FY-3 系列极轨气象业务卫星上搭载,在环境与减灾小卫星座上搭载,参与欧洲 ACCURATE 计划国际合作活动等。我国自有的 GPS 应用小卫星星座也列入了航天计划,正加紧研制。

6.5 我国山基 GPS/MET 掩星技术试验的进展

山基 GPS 掩星试验工作既是星载 GPS 掩星技术的前期准备,检验星载设备性能,突破有关技术难点的重要手段,根据我国多山的特点,又有可能开拓建立我国山基 GPS 掩星试验网,甚至发展为山基 GPS 掩星观测业务网,以弥补天基 GPS 掩星观测在低空复杂环境下的缺陷。

2003 年 10 月 16~20 日由总参大气环境研究所、国家卫星气象中心、航天一院 704 所与 14 所

及中国科学院空间科学与技术应用中心的科技人员组成的试验组,在五台山中台开展了我国首次山基 GPS 掩星大气探测试验。这次试验是我国山基 GPS 掩星大气探测技术应用的一个开端,也是我国天基 GPS 掩星探测技术的一次预研。通过试验和相关技术研究,填补了国内这方面研究的空白,为以后研究和业务开展提供了宝贵的经验,为空基 GPS 掩星探测技术在我国开展作了一个物质和技术的准备。

2003 年 12 月 17 日和 2004 年 7 月 24 日中国科学院武汉数学物理研究所在湖北大药姑山和九宫山也进行了山基 GPS 掩星观测,获得了观测资料^[53]。

经过近 2 年的精心准备,在中国气象局监测网络司和科技发展司组织下,2005 年 8 月 1~29 日,再次在河北省兴隆县雾灵山(海拔 2,118 m)开展了山基 GPS 掩星探测大型试验。由国家卫星气象中心领衔,中国人民解放军总参谋部大气环境研究所、北京大学物理学院、中国科学院空间科学与技术应用中心、航天 704 所、清华大学地球空间信息研究所、国家基础地理信息中心、北京市信息管理中心等多单位参加。进行了多种 GPS 接收机的掩星观测对比,中尺度地基 GPS 加密小网观测试验,并进行了地面自动气象要素观测和同步的低空探空观测。

初步资料分析表明,我国自行研制的星载 GPS 接收机性能良好。这次试验是我国在 GPS 气象探测领域内迈出的重要一步,标志着在地基 GPS 探测逐步业务化后,我国 GPS 气象学掩星观测领域迈进深入展开试验的阶段。

地基、山基、天基 GPS/MET 探测技术由于能够提供高时间密度、高空间密度、高精度的大气水汽总量和垂直分布信息,给精细化天气预报提供了有力的基础。而且地基 GPS 探测技术投资小,设备稳定可靠,运行简易,便于推广。可以预见,在未来 10 年,全国每一个国家气象站都会设立一个地基 GPS 基准站,它将成为我国地面气象观测站向地基观测站发展的重要突破口。

7 结论

GPS/MET 技术是利用 GPS 信号穿过大气

时,主要受到电离层以及中性大气中的干空气和水汽的影响,而产生的延迟来探测电离层中的电子浓度以及中性大气层中的温度,气压,水汽含量或湿度。

就地基 GPS/MET 来看, GPS 对中性大气层水汽的探测,主要集中在大气可降水量反演、水汽层析及 GPS 资料在数值预报模式中的应用等领域; GPS 对电离层电子浓度的探测,主要应用于电离层变化的分析和研究,监测和预报电离层的危害。目前 GPS/MET 技术已基本成熟,地基 GPS 探测正在向业务化方面发展。

天基 GPS/MET 技术利用了导航卫星 GPS 星座和 LEO 小卫星在地球地平线边缘的上下相对运动,获取大气参数的垂直分布。掩星事件全球均匀分布,很好的解决了海洋及南半球探空资料相对缺乏的问题。GPS 信号波长在 L 波段,不易受云、雨和气溶胶的影响,具有真正全天候的优势,在气候研究领域,掩星探测能够长期记录全球平均温度,监测水汽变化、温室气体增加等重要指标,将对拉尼娜、厄尔尼诺现象研究及全球气候变化研究产生重大影响。同时 GPS-LEO 掩星数据还能够应用于对火山、地震、全球电离层映象等众多科学领域的研究和探索。天基 GPS/MET 掩星探测技术的业务实现将是全球高空大气观测技术发展的一次飞跃。

可以预期, GPS 探测将是未来大气探测系统中重要的组成部分,用这种手段获得的数据将会在天气预报、气候和全球变化、水文学、空间天气等领域得到广泛应用。

参考文献 (References)

- [1] Bevis M, Businger S, Chiswell S A, et al. GPS Meteorology: Mapping zenith wet delays onto precipitable water. *J. Appl. Meteor.*, 1994, **33** (3): 379~386
- [2] 李建国, 毛节泰, 李成才, 等. 使用全球定位系统遥感水汽分布原理和中国东部地区加权“平均温度”的回归分析, *气象学报*, 1999, **57** (3): 283~292
Li Jianguo, Mao Jietai, Li Chengcai, et al. The approach to remote sensing of water vapor based on GPS and linear regression T_m in eastern region of China. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1999, **57** (3): 283~292
- [3] Dodson A H, Baker H C. Accuracy of orbits for GPS at-

- mospheric water vapour estimation *Physics and Chemistry of The Earth*, 1998, **23** (1): 119~124
- [4] Behnke R, Bevis M, Businger T, et al. GPS Meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system. *J. Geophys. Res.*, 1992, **97**: 15787~15801
- [5] Rocken C, Ware T, Van Hove T, et al. Sensing atmospheric water vapor with the global positioning system. *J. Geophys. Res.*, 1993, **20**: 2631~2634
- [6] Rocken C, Van Hove T, Johnson J, et al. GPS storm - GPS sensing of atmospheric water vapor or meteorology. *J. Atmos. Oceanic. Technol.*, 1995, **12**: 468~478
- [7] Gutman S L, Chadwick R B, Wolfe D E, et al. An operational water vapor remote sensing system using GPS. *FSL Forum*, 1994, **12**: 29~33
- [8] 刘悦安, 杨名. GPS 估计可降水量: WVR 约束法. 大气科学 (台湾版), 1999, **27** (2): 131~140
Liu Yuean, Yang Ming. GPS estimation of precipitable water vapor: WVR restriction. *Atmospheric Science* (Taiwan) (in Chinese), 1999, **27** (2): 131~140
- [9] Duan J, Bevis M, Fang P, et al. GPS Meteorology: Direct estimation of the absolute value of precipitable water vapor. *J. Appl. Meteor.*, 1996, **35**: 830~838
- [10] Niell A. Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wave lengths. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**: 3227~3246
- [11] Davis J, Elgered G, Niell A, et al. Ground-based measurement of gradients in the wet radio refractivity of air. *Radio Sci.*, 1993, **28**: 1003~1018
- [12] Elosegui P, Rius A, Davis J, et al. An experiment for estimation of the spatial and temporal variations of water vapor using GPS and WVR data. *Phys. Chem. Earth*, 1998, **23**: 125~130
- [13] Chen G, Herring T. Effects of atmospheric azimuthal asymmetry on the analysis of space geodetic data. *J. Geophys. Res.*, 1996, **102**: 20489~20502
- [14] Elosegui p, Ruis A, Davis L et al. An experiment for estimation of the spatial and temporal variations of water vapor using GPS data. *Physics and Chemistry of the Earth*, 1998, **23** (1): 125~130
- [15] Minami S, Mishino M, Suzuki Y, et al. Ionospheric stimulation by high power radio waves. *Advances in Space Research*, 1999, **24** (8): 997~1001
- [16] Ware R, Alber C, Rocken C, et al. Sensing integrated water vapor along GPS ray paths. *Geophys. Res. Lett.*, 1997, **24**: 417~420
- [17] Alber C, Ware R, Rocken C, et al. Obtaining single path phase delays from GPS double differences. *Geophys. Res. Lett.*, 2000, **27**: 2661~2664
- [18] Mcpherson R, Kalnay E, Lord S, et al. The potential role of GPS/Met observation in operational numerical weather prediction. *The Global Positioning System for the Geosciences*, NRC report, 1997, 111~113
- [19] Ruffini G, Cucurull L, Flores A, et al. A PIM-aided kalman filter for gps tomography of the ionospheric electron content. *Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial & Planetary Science*, 1999, **24** (4): 365~369
- [20] Park S, Droegeemeier K. Sensitivity of 3-D convective storm evolution to water vapor and implications for variational data assimilation. *Preprints, 11th Conf. on Numerical Weather Prediction*, Norfolk, VA, Amer. Meteor. Soc. 1996, 137~139
- [21] Crook N, Sensitivity of moist convection forced by boundary layer processes to low-level thermodynamic fields. *Mon. Wea. Rev.* 1996, **124**: 1767~1785
- [22] Kuo Y H, Zou X, Guo Y R. Variational assimilation of precipitable water using a nonhydrostatic mesoscale adjoint model. Part I: Moisture retrieval and sensitivity experiments. *Mon. Wea. Rev.*, 1996, **124**: 122~147
- [23] Reiger C, Gendt G, Dick G, et al. Near real time water vapor monitor for weather forecasts. *GPS World*, January, 2002, 18~27
- [24] Yuan L, Anthes R, Ware R, et al. Sensing climate change using the global positioning system. *J. Geophys. Res.*, 1993, **98**: 14925~14937
- [25] Stevens M. Optimal climate signal detection in four dimensions. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**: 4089~4099
- [26] Herring T. Diurnal and semidiurnal variations in Earth rotation. *Advances in Space Research*, 1993, **13** (11): 281~290
- [27] Kuo Y H, Huang W. The impact of Global Positioning System data on the prediction of an extratropical cyclone: an observing system simulation experiment. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 1998, **27** (1-4): 439~470
- [28] Schubert S D, Min W, Takacs L, et al. Reanalysis of historical observations and its role in the development of the goddard EOS climate Data Assimilation System. *Advances in Space Research*, 1997, **19** (3): 491~501
- [29] Rocken C. Sensing atmospheric water vapor with the global positioning system. *Geophys. Res. Lett.*, 1993, **30**: 2631~2634
- [30] 毛节泰. GPS 的气象应用. 气象科技, 1993, **4**: 45~49
Mao Jietai. The meteorological application of GPS. *Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 1993, **4**: 45~49
- [31] 刘志权, 方宗义, 徐建平, 等. 探测大气参数的 GPS/MET 方法. 气象科技, 1996, **2**: 1~9
Liu Zhiquan, Fang Zongyi, Xu Jianpin, et al. The GPS/MET method of observing atmospheric parameter. *Meteor-*

- ological Science and Technology (in Chinese), 1996, **2**: 1~9
- [32] 李成才, 毛节泰. GPS 地基遥感大气水汽总量的分析. 应用气象学报, 1998, **9** (4): 470~477
Li Chengcai, Mao Jietai. Analysis for remote sensing of atmospheric precipitable water using ground _ based GPS receiver. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 1998, **9** (4): 70~477
- [33] 陈俊勇. 地基 GPS 遥感大气水汽含量的误差分析. 测绘学报, 1998, **27** (2): 113~118
Chen Junyong. On the error analysis for the remote sensing of atmospheric water vapor by ground _ based GPS. *Acta Geadaetica et Cartographica Sinica* (in Chinese), 1998, **27** (2): 113~118
- [34] 王小亚, 朱文耀, 丁金才, 等. 上海地区 GPS/STROM 试验与结果. 全球定位系统, 2000, **25** (3): 6~10
Wang Xiaoya, Zhu Wen Yao, Ding Jincai, et al. The GPS/STROM experimentation and result in Shanghai region. *Global Positioning System* (in Chinese), 2000, **25** (3): 6~10
- [35] 陈世范. GPS 气象观测应用的研究进展与展望. 气象学报, 1999, **57** (2): 242~252
Chen Shifan. Advace and prospect on research of GPS atmospheric soundings and its application. *Journal of Meteorological Science* (in Chinese), 1999, **57** (2): 242~252
- [36] 曹云昌, 方宗义, 李成才, 等. 利用 GPS 和云图监测北京地区中小尺度降水的研究. 高原气象, 2005, **24** (1): 91~96
Cao Yunchang, Fang Zongyi, Li Chengcai, et al. Test on monitoring meso/micro scale precipitation in Beijing using GPS data and satellite image. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2005, **24** (1): 91~96
- [37] 曹云昌, 方宗义, 夏青. GPS 遥感的大气可降水量与局地降水关系的初步分析. 应用气象学报, 2005, **16** (1): 54~59
Cao Yunchang, Fang Zongyi, Xia Qing. Relationship between GPS precipitable water vapor and precipitation. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2005, **16** (1): 54~59
- [38] 李树勇, 王斌. GPS “射线打靶” 模式高效数值方法的研究及其并行实现. 计算物理, 2001, **18** (6): 491~496
Li Shuyong, Wang Bin. The time saving numerical method for GPS/Met observation operator and its parallel computing Chinese. *Journal of Computational Physics* (in Chinese), 2001, **18** (6): 491~496
- [39] 张朝林, 陈敏, Kuo Ying-Hwa 等. “00.7” 北京特大暴雨模拟中气象资料同化作用的评估. 气象学报. 2005, **63** (6): 922~932
Zhang Chaolin, Chen Min, Kuo Ying-Hwa, et al. Numerical assessing experiments on the individual components impact of themeteorological observation network on the “00.7” torrential rain in Beijing. *Acta Meteorological Sinica* (in Chinese), 2005, **63** (6): 922~932
- [40] 曹云昌, 陈永奇, 李柄华, 等. 导航卫星信号湿延迟化模型和数值模式的比较. 全球定位系统, 2005, **5**: 1~5
Cao Yunchang, Chen Yongqi, Li Binghua, et al. Comparison of the slant wet delay of GNSS signal between parameterized model and numeric weather calculations. *Global Positioning System* (in Chinese), 2005, **5**: 1~5
- [41] 周义炎, 吴云, 乔学军, 等. GPS 掩星技术和电离层反演. 大地测量与地球动力学, 2005, **25** (2): 29~35
Zhou Yiyang, Wu Yun, Qiao Xuejun et. GPS occultation technique and ionospheric inversion. *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 2005, **25** (2): 29~35
- [42] 吴云, 乔学军, 周义炎. 利用地基 GPS 探测震前电离层 TEC 异常. 大地测量与地球动力学, 2005, **25** (2): 36~40
Wu Yun, Qiao Xuejun, Zhou Yiyang. Presesmic ionospheric TEC anomaly detected by ground-based GPS. *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 2005, **25** (2): 36~40
- [43] 金双根, Wang J, 章红平, 等. GPS 实时监测和预报电离层电子含量. 天文学报, 2004, **45** (2): 213~215
Jin Shuanggen, Wang J, Zhang Hongpin et al. Monitoring and predicting the real time ionospheric electron content by means of GPS. *Acta Astronomica Sinica* (in Chinese), 2004, **45** (2): 213~215
- [44] 章红平, 朱文耀, 黄斌, 等. 利用 GPS 探测电离层异常中的高斯过程处理方法. 天文学进展, 2005, **23** (4): 363~370
Zhang Hongpin, Zhu Wen Yao, Huang Cheng, et al. Gaussian random process and its application for detecting the ionospheric disturbances using GPS. *Progress in Astronomy* (in Chinese), 2005, **23** (4): 363~370
- [45] 孔璐. GPS 掩星技术探测技术. 气象仪器装备, 2002, **2**: 22~24
Kun Lu. GPS occultation observational technology. *Meteorology Instrumental and Equipment* (in Chinese), 2002, **2**: 22~24
- [46] 王鑫, 薛震刚, 杜晓勇, 等. GPS-LEO 掩星探测地球大气的方法. 全球定位系统, 2002, **5**: 14~20
Wang Xin, Xue Zhengang, Du Xiaoyong, et al. Method of GPS-LEO occultation measurements of atmosphere. *GPS World of China* (in Chinese), 2002, **5**: 14~20
- [47] 张训械, 胡雄, 曾桢. 欧洲 ACE+掩星观测计划. 全球定位系统, 2002, **60**: 16~20
Zhang Xunxie, Hu Xiong, Zeng Zhen. Europe ACE+ Oc-cultation Project. *GPS World of China* (in Chinese), 2002, **60**: 16~20
- [48] 郭鹏, 洪振杰, 张大海. COSMIC 计划. 天文学进展.

- 2002, **20** (4): 324~336
- Guo Peng, Hong Zhenjie, Zhang Dahai. COSMIC Project. *Progress in Astronomy* (in Chinese), 2002, **20** (4): 324~336
- [49] 蒋虎, 黄城, 严豪健. 空间 GPS 无线电掩星反演大气参数方法及其应用. *地球科学进展*, 2000, **15** (5): 565~570
- Jiang Hu, Huang Cheng, Yan Haojian. Inversion of terrestrial atmospheric parameters using spaceborne GPS radio occultation and its application. *Advance in Earth Science* (in Chinese), 2000, **15** (5): 565~570
- [50] 蒋虎. 空基 GPS 遥感地球大气参数方法研究. *测绘学报*, 2001, **30** (3): 238~241
- Jiang Hu. Remote sensing of terrestrial atmospheric parameters by space-borne GPS radio occultation. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica* (in Chinese), 2001, **30** (3): 238~241
- [51] 徐晓华, 李征航, 罗佳. 利用 GPS 掩星资料反演地球中性大气参数折射角方法研究. *武汉大学学报*, 2003, **28** (5): 598~592
- Xu Xiaohua, Li Zhenhang, Luo Jia. Inversion of earth's neutral atmospheric parameters and bending angles with GPS occultation data. *Geomatics and Information Science of Wuhan University* (in Chinese), 2003, **28** (5): 598~592
- [52] 盛峥, 黄思训, 方涵先. 基于 GPS 掩星技术反演大气参数模型的优化. *全球定位系统*, 2004, **6**: 36~41
- Sheng Zheng, Huang Sixun, Fang Hanxian. The influence of high voltage transmit electrical wire on static GPS measurement. *Globe Positioning System* (in Chinese), 2004, **6**: 36~41
- [53] 胡雄, 张训诚, 吴小成, 等. 山基 GPS 掩星观测实验及其反演原理. *地球物理学报*, 2006, **49** (1): 22~27
- Hu Xiong, Zhang Xunjie, Wu Xiaocheng, et al. Mountain-based GPS observations of occultation and its inversion theory. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 2006, **49** (1): 22~27