

地面 GPS 探测大气可降水量的初步结果

王小亚 朱文耀 严豪健 程宗颐

(中国科学院上海天文台, 上海 200030)

丁金才

(上海中心气象台, 上海 200030)

摘 要 地面全球定位系统 (GPS) 探测大气可降水量时空分布的可行性和可靠性研究, 对地面 GPS 用于提高预报降水和恶劣天气的准确性和气候变化的研究具有重要作用。收集了覆盖于全国的 23 个站和我国周边的 6 个国际 GPS 服务 (IGS) 基准站为期 6 d 的 GPS 观测资料, 组成了一个 GPS 气象学的区域性地面实验网, 进行了我国首次 GPS 气象学试验。归算用的软件是在美国麻省理工学院 GPS 分析软件 GAMIT 基础上发展起来的上海天文台 GPS 精密定轨定位软件 SHAGAP。为了提高对流层天顶延迟的监测精度和分辨率, 我们采用了分段的参数估计和随机过程相结合的估算方法来处理对流层延迟, 由此获得了分辨率分别为 2 h 和 30 min, 精度好于 1 cm 的天顶延迟量。通过天顶干延迟和天顶湿延迟的分离和天顶湿延迟到可降水量的转换, 得到了精度为 1~2 mm 的可降水量的计算结果。将这些结果与实测探空仪资料计算的结果相比较, 两者基本符合, 试验的结果初步验证了地面 GPS 观测为气象服务的可行性和可靠性。同时指出了今后地面 GPS 在气象上应用的现实性。

关键词 全球定位系统 (GPS) 天顶湿延迟 可降水量 无线电探空仪

1 引言

在大地测量学中, 信息处理的噪声常常是地球物理学研究的信号。GPS 的全称是全球定位系统 (Global Positioning System), 它在定位、导航和授时等领域中的应用, 通常总是将大气的影响作为噪声予以改正和消除^[1]。自 90 年代起, 随着 GPS 应用和测量精度的提高, 这种噪声已成为探测可降水量的有用信号, 由此形成了一门新兴的学科——GPS 气象学。这是一门随着 GPS 测量技术的发展, 由卫星动力学、大地测量学、地球物理学和气象学交叉派生出的新兴学科, 它包括两个领域: 空间 GPS 气象学和地面 GPS 气象学^[2], 它们在国外、国内的发展情况见文献[3,4]。空间 GPS 气象学目前在国内还处于研究阶段, 这里我们主要谈地面 GPS。常规的 GPS 精密测量中, 通常采用双频相位观测量作为资料处理的基本量, 相位观测的精度一般接收机都可达 1 mm 量级, 这相对于伪距观测量本身的精度是非常高的。但它由于得到的是相位的小数部分, 因而从卫星到地面接收站的距离存在一个波长的整数倍差, 这个整数通常叫做整周模糊度, 当用双频消除电离层对 GPS 信号的延迟和双差消除卫星和接收机钟差等时, 这个数不再是整数, 而是一个实数, 对它的估计有多种方法, 这里不再叙述, 详见有关 GPS 的文献^[1]。我们目前所用的 GPS 资料处理软件是在 GAMIT (美国麻省理工学院

GPS 分析软件包)基础上发展起来的上海天文台 GPS 精密定轨定位软件 SHAGAP^[5],可计算出对流层天顶总延迟,它是由天顶干延迟和天顶湿延迟共同组成的^[4,6]。天顶干延迟是由大气干分量引起的延迟在天顶方向的投影,由于干大气较符合理想气体方程和流体静力学平衡方程,因而可用理论公式通过地面气象资料较精确地估计。天顶湿延迟是由大气中水汽分量引起的信号延迟在天顶方向的投影,由于水汽的时变性和空间分布的不均匀性,它不能用地面气象资料较精确地估计,但可用地面 GPS 观测的分段参数估计或随机模型得到较好的估计。目前的 SHAGAP 版本就是用分段的参数估计法和随机模型相结合的方法来处理对流层延迟,即两个节点之间的天顶延迟是随时间线性变化的,而节点的天顶延迟服从随机过程^[6,7]。这种方法的优点是可用最小的计算量得到天顶延迟的序贯估计,即天顶延迟的时间序列。在截止高度角取为 15° 的情况下,干映射函数和湿映射函数可取为一样,从而可估计出 GPS 观测的天顶总延迟^[7]。利用地面气压资料可计算出天顶干延迟,从而可得到天顶湿延迟的估计^[6,8]。天顶湿延迟几乎正比于水汽的垂直积分^[6,9],而水汽的垂直积分等价于气象学上的可降水量(P_{wv})。在气象学上,它有着重要的作用,它所代表的大气潜热总量与水的相变有直接的关系,因而对天气预报特别是恶劣天气的预报有着重要的作用^[2]。水汽在气象中的重要作用使得水汽探测技术的提高对降水和恶劣天气预报的准确性和对气候及其变化的理解力的提高有不可估量的作用。

2 实验简述

我们收集了 1996 年 7 月 26 日到 7 月 31 日期为 6 d 的 29 个站的 GPS 资料,包括覆盖全国的 23 个站和我国周边的 6 个国际 GPS 服务(IGS)基准站。同时还收集了全国 9 个站的地面气象数据和无线电探空仪资料。GPS 观测是用高精度的双频 P 码接收机进行的,观测了在 15° 截止高度角以上的所有 GPS 卫星。探空仪资料是一天两次。地面气象资料用的是常规的地面观测资料,一天仅有 2 或 4 批数据,因而我们用简单的线性内插得到所需时刻的地面气象资料。虽然一天中气压和温度变化不大(尤其对气压),但是为了保证地面 GPS 结果的可靠性,在与探空仪资料计算结果进行比较时,采用了每 2 h 估计一个天顶延迟的结果,没有采用 30 min 一个值的结果(有较高时间分辨率地面气象资料,30 min 的计算才较有意义)。其中,我们所用的地面气压精度为 1 hPa,地面温度精度为 1°C 。地面气压是影响天顶干延迟估计的主要因素,1 hPa 的气压精度可产生 2.3 mm 量级的天顶干延迟误差,这给天顶湿延迟的分离带来了额外的误差;地面温度是用来求天顶湿延迟到可降水量的转换系数,它的精度对转换系数的影响较小,一般在没有地面温度的情况下也可用近似的 0.15 常数转换^[9]。

3 地面 GPS 观测估计可降水量

3.1 天顶延迟的 GPS 估计

利用 SHAGAP 软件,我们分别对 1996 年 7 月 26~31 日(年积日为 208~213 天)的为期 6 d 的 29 个站的资料和围绕着上海的有连续 24 h GPS 观测的 5 个站的资

料进行了处理。由于 29 个站中绝大多数观测仅有每天 00~12 (UTC, 下同) 的 GPS 观测, 因而我们只对每天这 12 h 的资料进行了处理。在估算中采用了分区平差的方法, 站坐标等作为全局量, 在整个 12 h 时段内解算; 天顶延迟作为局部量, 每 2 h 估计一次, 其结果见图 1。为了能清晰地进行比较, 以下图中所给出的相对天顶延迟是天顶延迟相对一个先验值给出的, 同一个站的先验值在 6 d 的计算中是不变的。图 1 分别给出了上海和长春站的相对天顶延迟和误差结果, 棒的中点代表相对天顶延迟值, 它的一半代表天顶延迟估计的精度。从图 1 可看到, 天顶延迟估计的精度可好于 1 cm。

图 2 给出了利用 5 个连续 GPS 观测站资料估计的上海站 7 月 30~31 日每 1 h 天顶延迟的结果。把它与非连续的 29 个站 GPS 资料获得的上海站的天顶延迟结果进行比较, 发现非连续的 GPS 观测估计结果与连续的 GPS 观测资料估计的结果基本相符。

同时, 为了比较不同采样密度对天顶延迟结果的影响, 图 3a、b 分别给出了上海和长春两站在 7 月 30~31 日每 2 h 天顶延迟估计的结果; 图 4a、b 是这两个站在

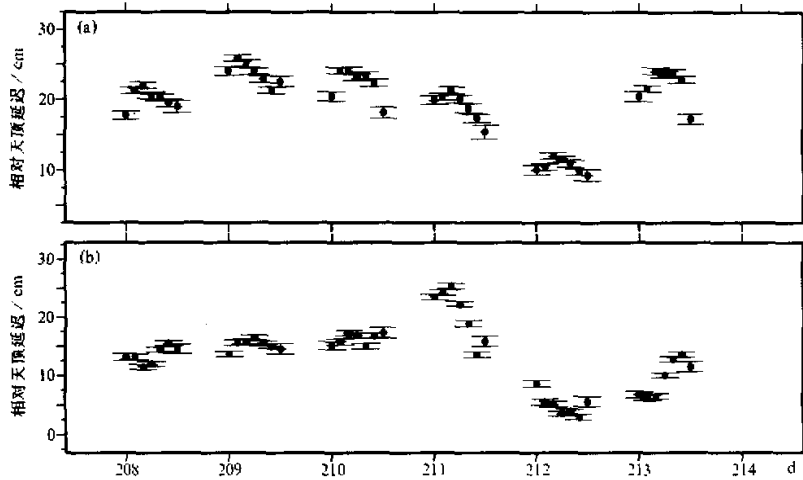


图 1 7 月 26~31 日相对于先验值的天顶延迟估值

(a) 上海站的天顶延迟及误差 (先验值为 241.95 cm); (b) 长春站的天顶延迟及误差 (先验值为 235.06 cm)

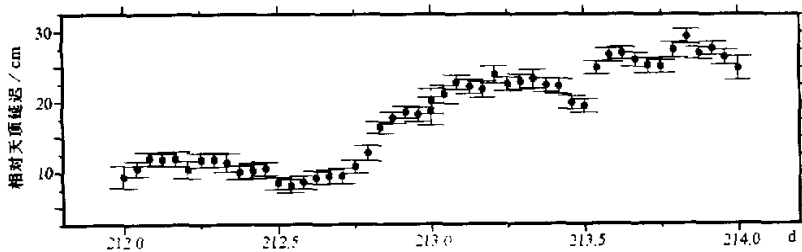


图 2 从 5 个站的连续 GPS 观测资料所估算的上海站的天顶延迟 (相对于先验值 241.95 cm)

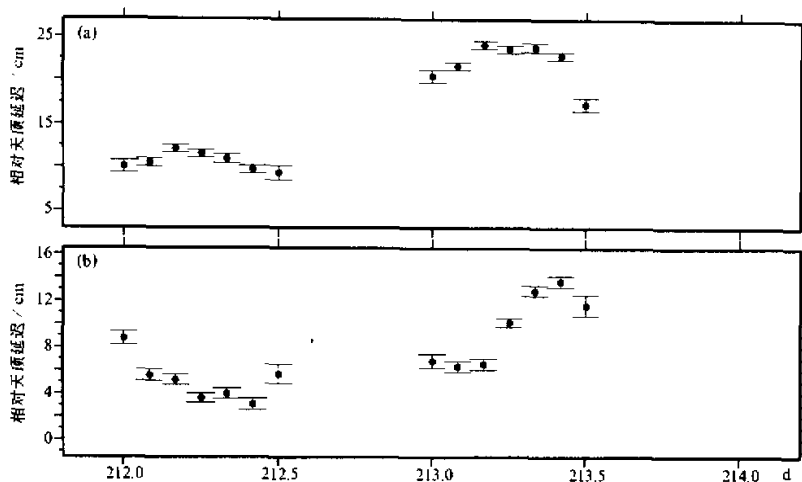


图3 29个站计算的7月30~31日每2h采样间隔的天顶延迟估值(相对于先验值)

(a) 上海站的天顶延迟及误差(先验值为241.95 cm); (b) 长春站的天顶延迟及误差(先验值为235.06 cm)

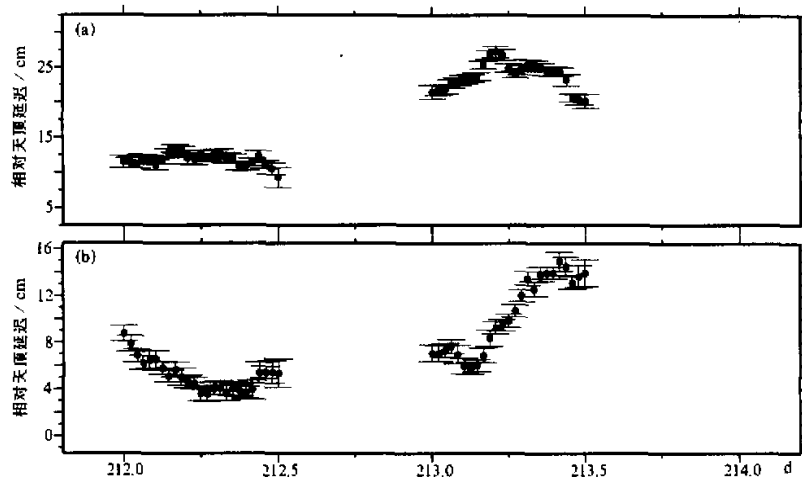


图4 29个站不连续观测计算每30 min采样间隔的天顶延迟估计(相对于先验值)

(a) 上海站的天顶延迟及误差(先验值为241.95 cm); (b) 长春站的天顶延迟及误差(先验值为235.06 cm)

同一时段上的每30 min天顶延迟的估计结果,所采用的估计方法是弱约束的分段线性节点随机游动模型^[6,7]。结果表明:两者符合得相当好,在对应点上基本重合,这充分说明用此混合模型在很短间隔里(如30 min)估计天顶延迟还是可靠的。这一点在今后利用地面GPS技术预报天气变化是至关重要的,它说明了地面GPS观测提供高密度的近实时的可降水量是可能的,这比目前利用探空气球资料得到的12 h间隔的可降水

量的时间分辨率大有提高。由于我们用的是 IGS 精密轨道, 其内符精度可达 5 cm, 因而仅考虑了站坐标、大气参数和模糊度的估计。我们的基线长于 500 km, 因而计算的天顶延迟是绝对的, 但其整周模糊度的解算百分比较低。我们对放开和固定模糊度所得的天顶延迟进行了比较, 发现两者的天顶延迟估计精度差不多, 但其值稍有偏差。到底哪一个更好, 还需要准确的探空仪资料所求得的可降水量来比较判断。

3.2 天顶湿延迟的分离

由于干大气较符合理想气体方程和流体静力学方程, 可得出天顶干延迟与地面气象资料的关系式^[8]

$$\Delta\sigma_{zdd} = 10^{-6} \frac{k_1 R}{g_m M_d} p_s, \quad (1)$$

其中 k_1 、 R 、 M_d 、 p_s 分别为大气折射率的实验常数 (取 $k_1 = 77.60 \text{ K/hPa}$), 理想气体普适常数 $[8.314 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}]$, 干大气摩尔质量 (28.9644 g/mol) 和地面气压 (hPa); g_m 为垂直大气柱质量中心的引力加速度, 其值可取为 $g_m = 9.784 / f(\varphi, h_0)$

$$f(\varphi, h_0) = 1 - 0.00266 \cos 2\varphi - 0.00028 h_0, \quad (2)$$

这里, φ 为接收站的纬度; h_0 为相对于旋转椭球体的 GPS 测站高度, 单位为 km。将常数代入可得 Davis^[10] 天顶干延迟计算公式 (单位为 m)

$$\Delta\sigma_{zdd} = 0.0022768 p_s / f(\varphi, h_0). \quad (3)$$

这样可计算出天顶干延迟, 从天顶总延迟中扣除天顶干延迟就可得天顶湿延迟。从 (3) 式可看出 $\Delta\sigma_{zdd}$ 的计算精度直接取决于地面气压的测量精度。为了精细地分离出天顶湿延迟, 在 GPS 观测时精密测量地面气压参数是必要的。

3.3 天顶湿延迟到可降水量的转换

通过大气折射率积分分离出的天顶湿延迟计算公式和气象学中可降水量的定义可得出天顶湿延迟 $\Delta\sigma_{zw}$ 和可降水量 (P_{wv}) 之间的关系^[6]:

$$P_{wv} = \Pi \times \Delta\sigma_{zw}, \quad (4)$$

其中, Π 为比例因子, 有如下关系

$$\Pi = 10^5 [\rho_1 R_w (k_3 / T_m + k'_2)]^{-1}, \quad (5)$$

其中, $k'_2 = k_2 - k_1 M_w / M_d = 16.52 \text{ K/hPa}$, k_2 和 k_3 为大气折射率实验常数 (分别取为 64.79 K/hPa 、 $3.776 \times 10^5 \text{ K}^2/\text{hPa}$), M_w 为水汽的摩尔质量 (18.0152 g/mol); $R_w = R / M_w$; ρ_1 为液态水的密度 ($1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$); T_m 为大气平均温度 (K), 定义为

$$T_m = \int_{h_0}^{\infty} \frac{e}{T} dh / \int_{h_0}^{\infty} \frac{e}{T^2} dh, \quad (6)$$

其中, e 为水汽压, T 为大气温度 (K)。

Bevis 等^[9] 利用多年的探空仪资料计算发现 T_m 和地面温度 T_s (K) 的一个线性计算公式: $T_m = 70.2 + 0.72T_s$, 利用它得到的天顶湿延迟到 P_{wv} 的转换误差约为 2%。另

外, 经过不同季节、气候的计算, 发现比例因子 Π 是随季节、气候而变化的, 它的近似值为 0.15。我们用 T_m 的线性计算公式计算的 Π 和近似值为 0.15 的常数分别对天顶湿延迟进行了转换, 两者还是有差别的, 如图 5 所示。

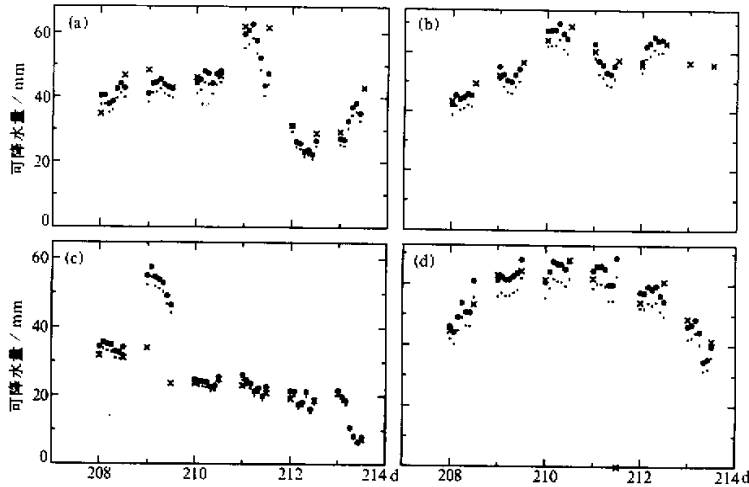


图 5 利用 29 个站不连续观测计算得到每 2 h 采样的天顶延迟值来估计可降水量的结果以及用无线电探空仪资料计算的可降水量的结果

(.) 0.15 的常数转换 GPS— P_{wv} 结果; (•) 利用地面温度转换的 GPS— P_{wv} 结果;

(×) 探空仪测定的 P_{wv} 武汉 211 天 12 时无探空仪资料, 故在画图时落在轴上

(a) 长春站的 GPS— P_{wv} 和探空仪— P_{wv} 结果; (b) 北京站的 GPS— P_{wv} 和探空仪— P_{wv} 结果;

(c) 西宁站的 GPS— P_{wv} 和探空仪— P_{wv} 结果; (d) 武汉站的 GPS— P_{wv} 和探空仪— P_{wv} 结果

4 探空仪可降水量的估计

根据可降水量定义和水汽的状态方程及水汽的存在范围, 可得

$$P_{wv} = \frac{1}{\rho_l R_w} \int_{h_0}^H \frac{e}{T} dh, \quad (7)$$

式中 ρ_l 为液态水密度, R_w 为水汽的气体常数, 取为 $461.524 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; e 为水汽压 (hPa), 它可根据气体的温度 t ($^{\circ}\text{C}$) 和露点 t_d ($^{\circ}\text{C}$) 来求得; T 为大气的绝对温度; H 为积分高度。一般 H 达对流层顶时, e 趋于零。 P_{wv} 单位通常取为 mm。

利用探空仪资料计算 P_{wv} 时, 通常采用 (7) 式的离散形式

$$P_{wv} = \frac{1}{\rho_l R_w} \sum_{i=1}^N \frac{e_i}{T_i} \Delta h_i, \quad (8)$$

Δh_i 为某一层气柱的厚度, e_i 和 T_i 分别为该气层的平均水汽压和平均温度。 e_i 按指数内插方法从相邻两层的探空仪资料求得。

$$e_i = e_{i1} \cdot 10^{-\beta(h_i - h_{i1})}, \quad (9)$$

式中 e_{i1} 为该气层底部的水汽压, h_i 为该气层中间层高度, h_{i1} 为该气层顶部高度, β 为系数, 可从该气层的底部和顶部的水汽压 e_{i1} 、 e_{i2} 和高度 h_{i1} 、 h_{i2} 来求得。

$$\beta = \frac{\lg e_{i1} - \lg e_{i2}}{h_{i2} - h_{i1}}, \quad (10)$$

T_i 按线性内插方法求得。

有时气象资料所给出的是各等压面上的比湿 q , 根据它的定义和大气静力学方程 $dP/dh = -\rho g$, 可得

$$P_{wv} = -\frac{1}{\rho_1 g} \int_{P_0}^0 q dP = -\frac{1}{\rho_1 g} \sum_{i=1}^N q_i \Delta P_i, \quad (11)$$

式中 g 为重力加速度, ΔP_i 为等气压层顶部和底部的气压差, q_i 为该层的平均比湿, 可按指数内插方法求得。

5 结果比较与结论

图 5 给出了探空仪测量与 GPS 测量所估计的 P_{wv} 结果的比较。从图中可以看到, 除了西宁站在 209 天的两个点和长春站在 211 天 12 时的那一个点, GPS 估计的可降水量和探空仪估计的结果偏差较大外, 其他所有点, 两者基本相符, 9 个站 6 d 的 0.15 的转换结果与探空仪可降水量结果平均差为 -3.12 mm, 均方差为 3.34 mm; 9 个站 6 d 的地面温度转换的结果与探空仪结果的平均差为 -1.01 mm, 均方差为 3.74 mm。对偏差较大的点, 我们查了当时的天气图, 西宁在 209 天有雨, 似乎 GPS 推得的可降水量更接近于当时的天气情况, 至于长春站在 211 天 12 时两者结果偏差较大的原因需进一步研究。

上面的计算是我们的初步试验, 所用的 GPS 资料是非连续的, 地面气象资料精度较低, 探空仪资料采样密度较稀。尽管如此, 我们从得到的各种比较和结果来看, 用地面 GPS 探测大气可降水量是可行的, 其内符精度或者说形式误差可达 2 mm, 证明了地面 GPS 观测对气象有重要意义, 它可以真实可靠地反映大气中水汽变化的状况。另外, 与探空仪资料相比, 它可以提供几乎连续的可降水量估计和易形成操作简便、花费少的观测网, 这些为探测可降水量在时间、空间上的分布提供了切实可行的条件。同时还应该指出的是地面 GPS 在气象学上的应用是 GPS 在大地测量应用上的副产品, 大地测量上的 GPS 观测站可同时作为 GPS 气象学应用的 GPS 站, 地面 GPS 在大地测量和气象学上的应用会互相促进和发展, 这样使得地面 GPS 观测在今后气象上的各种应用有了现实的经济基础和客观条件。

参 考 文 献

- 1 Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. and Collins, J., 1992, *GPS Theory and Practice*, New York: Springer.

- 2 Businger, S., Chiswell, S. R., Bevis, M. et al., 1996, The promise of GPS in atmospheric monitoring, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 17(1), 5~18.
- 3 黄栋、黄城、李金岭等, 1997, GPS无线电掩星技术监测地球大气, *地球科学进展*, 12(3), 217~223.
- 4 王小亚、朱文耀、严豪健、丁金才, 1997, 地面GPS探测大气的最新进展, *地球科学进展*, 12(6), 519~527.
- 5 朱文耀、程宗颐、熊永清等, 1997, 利用GPS技术监测青藏高原地壳运动的初步结果, *中国科学 (D辑)*, 27(5), 385~389.
- 6 王小亚、朱文耀、严豪健、丁金才, 1998, 地面GPS观测探测大气可降水汽量的方法和前景, *天文学进展*, 16(2), 135~142.
- 7 Duan, J. P., Bevis, M., Fang, P. et al., 1996, GPS meteorology: direct estimation of the absolute value of precipitable water, *Journal of Applied Meteorology*, 35, 830~838.
- 8 Askne, J. and Nordius, H., 1987, Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data, *Radio Sci.*, 22, 379~386.
- 9 Bevis, M., Businger, S., Chiswell, S. et al., 1994, GPS meteorology: mapping zenith wet delays onto precipitable water, *Journal of Applied Meteorology*, 33, 379~386.
- 10 Davis, J. L., Herring, T. A., Shapiro, I. I. et al., 1985, Geodesy by radio interferometry: effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length, *Radio Sci.*, 20(6), 1593~1607.

Preliminary Results of Precipitable Water Vapour Monitored by Ground-Based GPS

Wang Xiaoya, Zhu Wenyao, Yan Haojian, Cheng Zongyi

(Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030)

Ding Jincai

(Shanghai Meteorological Bureau, Shanghai 200030)

Abstract With the development of the surveying technique of GPS, GPS meteorology becomes an emerging subject, which is a ramification of such disciplines as satellite dynamics, geodesy, geophysics and meteorology. Monitoring distribution of precipitable water vapor in time and space by means of GPS survey can play a vital part in upgrading the precision of predicting precipitation and inclement weather, and enhancing the understandability of climate change. In this paper, we have collected six-day GPS data provided by 23 national stations and six neighboring IGS global stations. These stations form a local meteorological GPS network for ground experiment. We have carried out the first GPS-based meteorological experiment in China. All data reduction has been completed by utilizing the software system of Shanghai Astronomical Observatory for GPS precise orbit determination and precise positioning, named SHAGAP which is developed from the software GAMIT. In order to improve the monitoring precision and resolution of tropospheric zenith delay, the hybrid approach, using a batch least squares estimator but parameterizing the zenith delay by a linear spline with knots at 30-minute intervals and treating the knots as a Gauss-Markov process, is employed to deal with the tropospheric zenith delay. Thus, we have obtained zenith delay with resolutions of two hours and 30 minutes respectively, and with the precision better than one centimeter. After separating dry and wet zenith delay and transforming wet zenith delay into precipitable water vapor, precipitable water vapor is derived with a precision up to 1~2 mm. Having compared the results based on GPS with those based on radiosonde data, we find out coincidence does exist between both results. Our experiment has, to some extent, proved the feasibility of providing some service for meteorology by ground-based GPS survey.

Key words Global Positioning System (GPS) zenith wet delay precipitable water vapor
radiosonde