

地面 GPS 观测探测大气可降水汽量的方法和前景

王小亚 朱文耀 严豪健

(中国科学院上海天文台 上海 200030)

丁 金 才

(上海气象局 上海 200030)

摘 要

介绍了利用地面 GPS 观测探测大气可降水汽量 (PWV) 的基本原理和方法及其在气象学和天文定位上的应用。地面 GPS 测量的 PWV 估计的主要误差源自天顶湿延迟的估计。为了提高天顶湿延迟的估计精度,根据大气湿分量随时间变化的特性,天顶湿延迟的估算可采用确定性参数估计和随机模型估计。采用这些方法能有效地提高 GPS 精密定位中高程测量的精度,且其估算的 PWV 的精度可达 $1-2\text{mm}$, 足以满足天气预报和气候研究的需要。简述了大气分布的非球对称性对 PWV 估计的影响并评述了利用地面 GPS 测量探测 PWV 的前景。

关键词 天顶湿延迟 — 确定性参数估计 — 随机模型估计 — 可降水汽量

分类号 : P128.15

1 引 言

全球卫星导航定位系统 (GPS) 由一组从事导航、授时和相对定位而向用户发射无线电信号的卫星组成,这些无线电信号从 GPS 卫星到地面接收机的传播过程中受到大气的影发生了延迟。其中经过电离层发生的延迟叫电离层延迟;经过中性大气的延迟分为两部分:由大气干分量引起的延迟叫干延迟,由水汽分量引起的延迟叫湿延迟。电离层延迟具有频散性,通过双频观测可得到很好的消除。但中性大气引起的延迟不是频散型的,不能用双频的方法消除。其中,干延迟随时间变化较稳定,一般能用地面气象资料精确模拟;而湿延迟由于水汽随空间和时间变化很快且不均匀,很难用地面气象资料精确模拟,从而成为空间大地测量研究的主要误差源之一^[1]。目前已找到了几种方法来消除它,其中水汽辐射计 (WVR) 的使用就相当有效。但由于 WVR 制作费用昂贵且不适宜在有雨的情况下使用,同时不同类型的 WVR 使用不同的反演公式等也会带来误差,这就促使空间技术工作者去寻找其它方法^[2]。

根据天顶湿延迟参数的统计学特性, 可以将天顶湿延迟用一个随机过程来估计, 也可以把它看作在短时间内是相对稳定的并用一个分段参数模型来估计. 利用这些估算模型不仅在 GPS 精密定位中明显地提高了高程测定的精度, 也为地面 GPS 测量估算大气可降水汽量 (PWV) 提供了一种有效的方法^[1,3]. 可降水汽量是气象学上一个重要的物理量, 是指在某一时刻大气中的水汽在达到饱和时凝结成水全部降落所产生的降水量. 其定义为:

$$PWV = \frac{1}{\rho_l} \int_h^\infty \rho_w dz = \frac{1}{\rho_l R_w} \int_h^\infty \frac{e}{T} dz \quad (1)$$

其中, $R_w = R/M_w$, M_w 是水汽的摩尔质量, 其值为 $18.0152 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$; R 为摩尔气体常数 ($8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$); ρ_w 为水汽的密度; ρ_l 为液态水的密度; e 为水汽压 (mbar); T 为大气温度 (K); h 为接收站海拔高度.

由地面 GPS 观测得到的天顶湿延迟通过乘一个因子就可转换成可降水汽量, 这个因子是湿大气折射常数和大气加权平均温度的函数, 大气加权平均温度是随时间和空间变化的, 需要优先估计和计算^[4], 才能求得转换因子, 转换因子的近似值为 $0.015^{[5]}$.

经过实验和研究, 发现由地面 GPS 观测推导的 PWV 与 WVR 所测结果符合很好^[5]. 通过模拟计算还发现由 GPS 估计的 PWV 对气候研究有一定贡献, 它可产生信噪比达 4 的变热信号^[6]. 这些都说明由地面 GPS 观测可得出足够精确的 PWV 估计来满足气象学的需要. 由于可降水汽量 PWV 等价于水汽的垂直积分, 而水汽有一个由水分子中电荷分布不对称造成的永久性偶极矩, 因而使得大气折射率对水汽十分敏感, 每摩尔水汽的折射率是干空气的 17 倍. 同时, 水汽还直接和与水相变有关的巨大潜热相联系, 而潜热反过来对大气的垂直稳定度、暴风雨的形成和演变以及地、气系统径向辐射能量平衡有显著的影响. 因此, 地面 GPS 测量不仅对定位而且对天气预报和全球气候研究都有很重要的意义^[7].

2 地面 GPS 观测探测 PWV 的原理

在无线电波段, 大气折射率对水汽特别敏感, 因而利用 GPS 资料可以得到包含水汽信息的天顶湿延迟^[7].

在球对称大气假设和忽略地形不规则情况下, 可以把对流层延迟 $\Delta\sigma$ 写成天顶延迟 $\Delta\sigma_z$ 与映射函数 m 的乘积^[8,9]:

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_z \cdot m(z, p) = \Delta\sigma_{zd} \cdot m_d(z, p) + \Delta\sigma_{zw} \cdot m_w(z, p) \quad (2)$$

其中下标 d 和 w 分别对应于干大气和湿大气, m_d 和 m_w 分别是相应的映射函数; z 为 GPS 卫星的天顶距, p 为气象参数. 天顶延迟定义为^[10]:

$$\Delta\sigma_z = 10^{-6} \int_h^\infty N dz \quad (3)$$

其中 h 为接收站海拔高度; N 为大气折射指数, 它可以表示成:

$$N = (k_1 p_d / T) / Z_d + (k_2 e / T + k_3 e / T^2) / Z_w$$

这里 p_d 和 e 分别为干大气压强 (mbar) 和水汽压 (mbar); T 为温度 (K); Z_d 和 Z_w 是压缩因子; k_1 、 k_2 、 k_3 为大气折射常数, 其取值见表 1。大多数作者都选用 Thayer 提供的值, 其精度最高。

表 1 不同作者采用的大气折射常数及其误差^[4]

作 者	$k_1/\text{K}\cdot\text{mbar}^{-1}$		$k_2/\text{K}\cdot\text{mbar}^{-1}$		$k_3/10^5\text{K}^2\cdot\text{mbar}^{-1}$	
	采用值	误差	采用值	误差	采用值	误差
Smith 和 Werntraub (1953)	77.607	± 0.013	71.6	± 8.5	3.747	± 0.031
Thayer (1974)	77.604	± 0.014	64.79	± 0.08	3.776	± 0.004
Hasaeaw 和 Stokesburv (1975)	77.600	± 0.032	69.40	± 0.15	3.701	± 0.003
Bevis M, Businger S, 和 Chiswell S.(1993)	77.60	± 0.05	70.4	± 2.2	3.739	± 0.012

根据理想气体状态方程和流体静力学平衡方程可得天顶干延迟^[10]:

$$\Delta\sigma_{zd} = 0.0022768p_s/f(\varphi, h) \quad (4)$$

其中, p_s 为地面气压 (mbar),

$$f(\varphi, h) = 1 - 0.00266 \cos 2\varphi - 0.00028h \quad (5)$$

φ 为接收站的纬度; h 为测站的海拔高度, 单位为 km。

同时可得天顶湿延迟:

$$\Delta\sigma_{zw} = 10^{-6}(k'_2 + k_3/T_m) \int_h^\infty e/Tdz \quad (6)$$

这里, $k'_2 = k_2 - k_1M_w/M_d$, M_d 为干大气的摩尔质量, 其值为 $28.9644 (\text{g}\cdot\text{mol}^{-1})$; T_m 为引入的大气加权平均温度:

$$T_m = \frac{\int_h^\infty e/Tdz}{\int_h^\infty e/T^2dz} \quad (7)$$

将天顶湿延迟和 PWV 联系起来, 可推导出它们之间的关系即:

$$PWV = \Pi \times \Delta\sigma_{zw}$$

$$\Pi = 10^6 [\rho_1 R_w (k_3/T_m + k'_2)]^{-1} \quad (8)$$

从 (8) 式可以看到, 求转换因子 Π 的关键是求 T_m 。Bevis 等人^[4] 利用多年的无线电探空仪 (Radiosonde) 资料发现了线性计算公式: $T_m = 70.2 + 0.72T_s$, T_s 为地面温度, 利用它得到的天顶湿延迟转换到 PWV 的误差仅为 2%。另外, 利用数值天气预报 (NWP) 模型也可计算 T_m , 其得到的转换误差小于 1%。可见 PWV 的误差主要还是来自天顶湿延迟的估计, 要提高它的精度就需在研究影响天顶湿延迟估计精度的因素上下功夫, 这也是目前 GPS 气象学研究较活跃和较有前途的领域之一^[7]。

利用地面气象资料通过公式 (4) 计算出天顶干延迟, 就可在从 GPS 观测估计的天顶延迟中扣除得到天顶湿延迟, 再通过转换公式就可求得 PWV , 使得地面 GPS 观测和气象学联系起来, 这就是地面 GPS 气象学的主要原理。

3 地面 GPS 观测探测 PWV 的方法

GPS 信号定位主要有伪距定位和相位测量两种。通常情况下, 一般 GPS 接收机只能收到 C/A 码, 因而, 在精密定位测量中须用相位测量。相位测量的观测方程中包括各种系统偏差和随机误差, 主要包括 SA 或 AS 政策引起的误差、卫星和接收站钟差、卫星轨道误差、接收站坐标误差、多路径效应、相位观测误差、大气延迟及相位模糊度等。目前这些误差大都可被削弱或消除。其中, SA 或 AS 政策引起的误差可用单差法消除; 卫星钟差也可通过单差法消除; 接收站钟差可以作为参数进行估计, 也可用双差法和卫星钟差一起消去; IGS(International GPS Service) 的成立对 GPS 卫星定轨起了很大作用, 其定轨精度可达 10cm, 其轨道的预报精度也可达 20—30cm^[11]; 同时各基准站的坐标已能用新技术测得很准, 精度达亚厘米量级^[12], 这对提高天顶湿延迟的估计是有好处的; 接收机的设计和 GPS 测量的截止高度角一般大于 15°, 使得多路径效应被大大削弱; 相位观测误差很小, 可忽略不计; GPS 双频接收机的广泛使用可将电离层延迟效应基本消去。大气干延迟可用地面气象资料精确模拟; 相位模糊度作为参数可与对流层延迟一起估计, 从而用 GPS 观测可得较精确的天顶湿延迟估计^[8,9]。

由于湿延迟不能用地面气象资料精确模拟, 故用参数对其进行模拟。通常截止高度角大于 15°, 这时干延迟映射函数和湿延迟映射函数差别很小, 而且各种映射函数的差别也小, 所以通常可将干、湿映射函数都取为简单的 $\sec(z)$ 形式^[8]。但在截止高度角较小时, 要选用那些也适用于低高度角情况的模型 (如 CFA2.2 模型, Yan 等发展的新映射函数^[13,14] 等)。当干、湿映射函数取为相同时, 则可以将大气天顶延迟作为参数进行估计, 然后减去天顶干延迟得到天顶湿延迟。

根据对用水汽辐射计 (WVR) 测量的天顶方向大气湿分量随时间变化的结果分析可知用一阶高斯-马尔科夫随机过程或随机游动过程来模拟天顶方向的湿延迟, 不仅可以消除模型改正中的系统误差, 而且可以很好地模拟湿延迟的随机误差^[3,9]。一阶高斯-马尔科夫随机过程的离散形式可简单表示为^[1,3,9]:

$$\begin{aligned}\rho(j+1) &= m \cdot \rho(j) + \varepsilon \\ m &= e^{-\frac{t_{j+1}-t_j}{\tau_\sigma}} = e^{-\frac{\Delta t}{\tau_\sigma}} \\ E(\varepsilon_j) &= 0 \\ E(\varepsilon_j \varepsilon_j) &= \sigma_\varepsilon^2 \cdot \delta_{ij} = \frac{1}{2} \tau_\sigma \sigma_0^2 \cdot [1 - m^2] \cdot \delta_{ij}\end{aligned}\quad (9)$$

其中, $\rho(j)$ 表示第 j 个历元的湿延迟的待估参数, 可以用卡尔曼滤波或建立在现代时空域公式基础上的相关级的最佳滤波来估算^[1,8,9,15]; τ_σ 和 σ_ε^2 分别为随机过程的相关时间和方差, 是随机过程的两个重要参数, 它们的选取对结果有较大影响, 通常不同站的观测结果有不同的 τ_σ 和 σ_ε^2 值, 可先根据实践经验选取不同的 τ_σ 和 σ_ε^2 值估算, 最后再与利用 Tralli^[3,16] 发展的方法归算 WVR 测量的结果得到的值进行比较, 选取较合理的 τ_σ 和 σ_ε^2 值^[9]; σ_0^2 为相应的连续过程的方差。

在一阶高斯-马尔可夫随机过程中, $\tau_\sigma \rightarrow \infty$ 时就是随机游动过程, 其离散形式为:

$$\begin{aligned}\rho(i+1) &= \dot{\rho}(i) + \varepsilon \\ \sigma_\varepsilon^2 &= \Delta t \cdot \sigma_0^2\end{aligned}\quad (10)$$

在随机过程的分析方法中, 每个观测历元都有一个状态待估参数, GAMIT 软件的最新版本对此随机过程进行了简化, 采用了分段线性方法的随机模型。其方法简述如下:

每隔一定的时间间隔 k 取一个状态待估参数, 设相邻两个状态待估参数为 $\rho(i)$ 和 $\rho(i+k)$, 其状态方程为:

$$\begin{aligned}\rho(i+k) &= e^{\frac{t_{i+k}-t_i}{\tau_\sigma}} \rho(i) + \bar{\varepsilon}_i \\ E(\bar{\varepsilon}_i) &= 0 \\ E(\bar{\varepsilon}_i \bar{\varepsilon}_j) &= \frac{1}{2} \tau_\sigma \left[1 - e^{-2\frac{t_{i+k}-t_i}{\tau_\sigma}} \right] \cdot \sigma_0^2 \cdot \delta_{ij}\end{aligned}\quad (11)$$

同时设湿延迟在 i 和 $i+k$ 之间的观测历元 j 满足线性变化, 则:

$$\rho(j) = \rho(i) + \frac{j-i}{k} (\rho(i+k) - \rho(i)) \quad i \leq j \leq i+k \quad (12)$$

将 (11)、(12) 式代入相位观测方程, 就可得以 $\rho(i)$ ($i=1-m, m$ 为所取的结点数)、相位模糊度等为未知数的法方程, 这就是所谓的混合算法, 它用带结点的线性样条 (linear spline) 函数以 30min 的间隔使天顶延迟参数化, 并把每个结点作为一阶高斯-马尔科夫过程处理, 从而得到一组最小二乘估值, 达到以较少的计算获得连续估值的目的^[8]。

另外一种更简单的分段参数的确定性估计方法是认为在一段时间内 (比如 120min 为一段) 天顶湿延迟不变。GPS 资料分析软件 GAMIT 的老版本就是这样使用最小二乘法来处理对流层延迟的^[17], 但它不能充分反映湿延迟的时变性, 因而在 GPS 资料处理中会引起误差。

天顶湿延迟通过以上最小二乘参数估计或卡尔曼滤波随机估计得出后, 再通过 Bevis 等提出的 T_m 的线性计算公式或数值预报模型 (NWP) 得出转换因子, 就可求出 PWV 时间序列。在应用中, 基线长度应长于 500km, 才能得到天顶湿延迟的绝对估计^[5,8]。否则, 结果会有偏差, 这个偏差对整个网来说是一个常数 (即它是时间的函数而与空间无关), 从而只能得到天顶湿延迟的精确相对估计。想要得到它的绝对估计, 需有一个 WVR 来改正这个偏差^[5,7]。目前, 有人发现降低截止高度角可减小相关性而得到天顶湿延迟的绝对估计, 但降低截止高度角可能会使多路径效应大大增强, 从而降低 PWV 的估计精度。所以这还需要进一步的研究, 充分考虑多路径效应和两站湿大气的相关性, 合理选择截止高度角和基线长度。通常截止高度角取为 15° , 基线长度选为 500—1000km^[1,5,7]。

4 PWV 水平梯度的探讨

上述的分段参数估计和随机模型估计可以模拟由于水汽的时变性所引起的天顶湿延迟的波动。但是水汽空间变化的尺度较小, 而且也很不均匀, 这样就存在水汽所引起的天顶湿延迟的空间变化的研究, 即 PWV 的空间变化的情况。

Gardner^[18] 在 1977 年推导了光学波段的大气折射率水平梯度对激光测距的影响的一阶表达式。在他的推导中, 尽管由于水汽对光学波段的折射率贡献很小而被忽略, 但他发现在低高度角时从地面压强梯度和地面温度梯度推出水汽对时延的影响可达厘米量级的水平, 且与高度角有关。在 10° 高度角时, 不同方位角的时延差异最大可达 5cm; 在 20° 高度角时达 1.25cm。而水汽对无线电波段的时延影响更大, 且水汽对时延的影响随空间变化更厉害, 这意味着对 GPS 测量在截止高度角降低时必需考虑方位不对称性的影响。

随着 WVR 性能的改进, Rocken 等人^[2] 在四个方向 (正南、正北、正西、正东) 上分别以高度角 90° 、 30° 、 42° 同时进行了 WVR 观测, 这个观测就是一个 Orthogonal Tip Curve 观测, 它由 4 个天顶观测和 30° 、 42° 高度角的 4 个基本方向的各个观测共 12 个测量组成, 给出了每个 Orthogonal Tip Curve 观测的天顶湿延迟结果 (30° 、 42° 高度角的延迟也转换成天顶湿延迟)。四个天顶观测的差异表示了仪器噪声和一次 Orthogonal Tip Curve 观测时间内 (10min) 水汽的时变, 它标志了方位变化可探测的噪声水平。在较低高度角时四个方位角上天顶湿延迟的差别明显高于此噪声水平, 最大可达 3cm, 这对未来更精确的天顶湿延迟测量是要考虑的误差之一。

Macmillan^[19] 对 VLBI 资料进行了方位不对称性的改正, 发现改正后的基线重复率有很大提高。对 5998km 的基线, 基线重复率从原来的 9.1 mm 提高到 7.3mm, χ^2/f 也从 3.6 提高到 2.0 (χ^2 表示基线对线性速度模型的拟合, f 为自由度数)。这说明方位不对称性对结果的影响还是很明显的。

以上尽管是分析方位不对称性在实际测量技术或仪器上的影响, 但在本质上都是说明大气确实存在不对称性而且对经过大气传播的信号有影响, 因而其结论也对由地面 GPS 观测推导的天顶湿延迟或 PWV 适用。目前已有作者对 GPS 资料也采用方位不对称的模型来处理^[7,17]。

5 GPS- PWV 在气象学和定位上的应用

利用地面 GPS 观测资料, 可以通过求天顶湿延迟来得到 PWV 的时间序列。Yuan 等人^[6] 通过模拟大气数据研究了 GPS 基本测量变量 (湿延迟和可降水汽量等) 随 CO_2 含量的变化情况, 发现加倍的 CO_2 模拟中具有较高的水汽含量, 使得热带和中纬度地区的湿延迟和可降水汽量明显增加。天顶湿延迟最大可增加 40mm 以上, 误差约为 10mm; PWV 变热信号最大约有 7mm, 误差为 1—2mm, 即信噪比可达 4。这说明 PWV 和天顶湿延迟对气候变化颇具敏感性。比较不同时段 PWV 资料可以用于研究全球或区域性气候的变化情况。

随着地面 GPS 所得到的 PWV 地面覆盖率和时间分辨率的提高, 对监测沿干线的水汽通量辐合和 中层对流层冷锋引起的水汽垂直积分的减少是很有利的。而这两者都与天气的恶化如暴风雨等有关, 这使得地面 GPS 探测大气技术可用于恶劣天气的预报^[7]。1993 年 5 月做的 GPS/STORM 现场实验^[20] 充分证明地面 GPS 估计的 PWV 结果与 WVR 测得的结果符合得很好, 差别在 1—2mm 以内; 并且证明了 PWV 的波动与干线移动通过站网的过程相对应, 实验期间随着干线的缓慢移动, 就发生了 100 多次龙卷风 (其中包括一次 F-4 级强龙卷风), 以前的实验也证明 PWV 的快速变化与恶劣的天气对应。实验期间还发生了相对冷的干空气触发了对流层对流而引起了许多地方出现大冰雹、台风或龙卷风, 冷、干空气在

地面冷锋或干线上空的侵入形成高空冷锋 (CFA), 这在通常的地面观测中是无法探测到的, 但在 GPS 资料推导的 PWV 中相应信息是相当显著的, 且是先于地面冷锋的^[7]。这表明地面 GPS 观测监测恶劣天气是可能的。但与气候研究不同的是: 该项工作需要实时的 GPS 观测资料、气象资料及精密的、近实时轨道或预报轨道来求出高精度、高时间分辨率的近实时 PWV 。目前 SOPAC(Scripps Orbit and Permanent Array Center)^[21] 已提供了好几种快速轨道: pred A、pred B、pred C 和 pred D 等。其中, pred D 可提供 24 小时的近实时轨道, 它和定期轨道(事后处理的轨道)对 PWV 的影响之差仅为几毫米甚至亚毫米。因而在毫米测量水平上, 快速轨道并不会对 PWV 估计产生额外的偏差。这在某种程度上保证了气象预报所需的准确性和快速性的特点。这个实验充分显示了地面 GPS 探测大气这一技术可为天气预报提供有效的服务。

另外, 水汽垂直积分代表着有效的潜热总量, 因而地面 GPS 观测探测大气可降水汽量可为天气预报特别是数值天气预报 (NWP) 模型提供一个有力的约束条件^[7], 从而不但为一般天气预报准确度的提高提供了一种手段, 而且为用改进的 NWP 模型重新计算天顶湿延迟也有帮助, 进而对更好的解算相位模糊度为天文定位服务也有不可忽视的作用^[5]。

6 结 语

综上所述, 利用地面 GPS 观测资料可以较好地得到天顶湿延迟的估值, 从而得到 PWV 估计, 而实时或事后 GPS 资料处理所求得的 PWV 精确估计可为天气预报和气候研究提供很好的服务, 这一点越来越引起气象学界的重视。同时, 天顶湿延迟的估计技术, 特别是随机过程的引入, 可以很好地为高精度天文定位服务, 提供高精度和高时间分辨率的天顶湿延迟, 为没有 WVR 测站的精密大地测量提供了一个很好的估计湿延迟的方法。而且, 与 WVR 和无线电探空仪 (Radiosonde) 相比, 地面 GPS 探测提供 PWV 序列不需要特别的仪器, 仅需要对 GPS 大地测量的副产品进行数据处理和计算, 得到的结果可与用其它两种技术通过复杂的反演公式或模型进行计算才能获得的 PWV 估值相比拟, 甚至更好。GPS 观测又以它的接收机质量小、便宜而易形成全球性广泛分布的连续运行观测网为更高精度 PWV 的取得提供了有利条件。目前 IGS 的几个数据分析中心都已将 PWV 的估计作为日常工作的一部分, 并已考虑综合或混合各分析中心的 PWV 估计值得到平均的 PWV 估计序列, 提供气象部门使用。

参 考 文 献

- 1 Dixon T H et al. J. Geophys. Res., 1991, 90(B2): 2397
- 2 Rocken C et al. IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing, 1991, 29: 3
- 3 Tralli D M, Lichten S M. Bull. Geod. 1990, 64: 127
- 4 Bevis M et al. Journal of Applied Meteorology, 1994, 33: 379
- 5 Rocken C et al. Geophys. Res. Lett., 1993, 20: 2631
- 6 Yuan L I et al. J. Geophys. Res., 1993, 98(D8): 14925
- 7 Businger S et al. Bulletin of the American Meteorological Society, 1996, 77: 5
- 8 Duan J et al. Journal of Applied Meteorology, 1996, 35: 830
- 9 Herring T A, Davis J L, Shapiro I I. J. Geophys. Res., 1990, 95(B8): 12561

- 10 Askne J, Nordius H. Radio Sci., 1987, 22: 379
- 11 Kowba J, Mireault Y. IGS Analysis Coordinator Report . International GPS Service for Geodynamics ,1995 Annual Report, 1996: 45
- 12 Boucher C et al. Result and Analysis of the ITRF94 (IERS Technical Note 20), 1996
- 13 Davis J L et al. Radio Sci., 1985, 20:1593
- 14 Yan H J, Ping J S. A. J., 1995, 110: 934
- 15 Treuhaft R N, Lanyi G E. Radio Sci, 1987, 22: 251
- 16 Tralli D M et al. J. Geophys. Res., 1988, 93(B6): 6545
- 17 Dodson A H et al. Journal of Geodesy, 1996, 70: 188
- 18 Gardner C S. Applied Optics, 1977, 16: 2427
- 19 Macmillan D S. Geophys. Res. Lett., 1995, 22: 1041
- 20 Rochen C et al. Journal of Atmospheric And Oceanic Technology. 1994, 12: 468
- 21 Fang P, Bock Y. Scripps Orbit and Permanent Array Center 1995 Report to IGS. International GPS Service for Geodynamics, 1995 Annual Report, 1996: 103

Methods and Promise on Monitoring Precipitable Water Vapor by Ground-based GPS

Wang Xiaoya Zhu Wenyao Yan Haojian

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

Ding Jincai

(Shanghai Meteorological Bureau, Shanghai 200030)

Abstract

This paper provides an overview of applying ground-based GPS to monitoring the precipitable water vapor above GPS receiver sites. The wet delay due to water vapor which is highly variable and inhomogeneous is difficult to be precisely estimated by surface meteorological data. But it can be estimated by multi-parameters estimates and stochastic processes, such as first-order Gauss-Markov process and random walk process. The derived zenith wet delay can be readily transformed into an estimation of precipitable water vapor. This transformation is well achieved by multiplying the zenith wet delay by a factor. Many tests have proved that Ground-based GPS technique can offer not only both high accuracy and high temporal resolution of estimates of precipitable water vapor, but also potential facilities in nearly real time estimation of precipitable water vapor. With the rapid growth of regionally and globally continuously operating ground-based GPS networks, it is good opportunity to observe distributions of precipitable water vapor with high spatial and temporal resolutions. The results have been proved to be valuable in regional or global climate analysis and short-range numerical weather predictions. In addition, GPS-derived precipitable water vapor may provide a powerful constraint for numerical weather prediction models. This is also helpful to improve the zenith wet delay estimate for relative positioning.

Key words Zenith wet delay—Deterministic parameter estimation—Stochastic process estimation—Precipitable Water Vapor