

利用地基 GPS 测量大气水汽廓线的方法

曹云昌^{1,3} 陈永奇¹ 李炳华² 方宗义³

(1 香港理工大学; 2 香港天文台; 3 国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要 GPS 倾斜路径的湿延迟反映了大气中水汽的三维非均匀分布, 通过准确确定空间各卫星对地面各接收机的倾斜路径湿延迟, 就可以利用断层扫描技术, 确定大气层中水汽的三维分布和变化, 从而增加目前还相对缺乏的大气水汽探测。文章就这方面介绍了国际上利用地基 GPS 测量倾斜路径大气湿延迟的两类方法(单点定位方法和双差定位方法)以及应用断层扫描技术利用这些观测进行水汽廓线遥感探测的两类方法(附加约束法和卡尔曼滤波法), 并对这些方法的优缺点进行了初步的比较和探讨。

关键词 湿延迟 层析 遥感 水汽廓线

引言

利用地基 GPS 进行大气水汽的遥感探测始于 20 世纪 90 年代。GPS 卫星发射的无线电波信号在穿过大气层时, 要受到电离层电子和平流层、对流层大气的折射延迟。通过准确测定对流层延迟, 大气静力学延迟可以利用地面气压和大气模型精确模拟^[1], 估计出大气的湿延迟部分。利用湿延迟和水汽含量的关系, Bevis 和 Rocken 等通过试验证明, 通过在地面建立连续运行的 GPS 参考站, 可以连续监测站点上空整层大气的水汽含量——大气可降水量, 精度可达 2 mm^[2,3], 与水汽辐射计以及探空相当。这种探测方法仪器经济, 稳定可靠, 全天候探测, 时间分辨率高, 因此受到气象工作者广泛关注。美国国家海洋大气局(NOAA)预报系统实验室(FSL)等在 1994 年建立了世界上第一个地基 GPS 气象示范网络, 来评价地基 GPS 气象学的理论和工程基础, 扩展 GPS 观测对于天气预报、气候监测和卫星遥感的定标检验方面的应用^[4], 通过 10 年的检验, 目前即将移交业务运行。其他国家、地区以及我国也都随后建立了类似的 GPS 气象运行系统^[5]。

GPS 探测的天顶方向上的水汽总量, 不能直接提供水汽的廓线分层信息, 这一定程度影响了它在

数值预报和分析方面的应用。利用 GPS 可以观测到大气延迟的水平梯度信息, 反映了大气折射率分布的三维结构^[6], GPS 气象学家开始尝试利用这些新的产品信息来研究大气延迟和水汽的三维结构, 提出了一些计算大气倾斜路径延迟的方法^[7,8], 倾斜路径的延迟进而可以转换为倾斜路径的水汽^[9], 这样在地面密集布设 GPS 接收机, 接收来自天空各个方向的卫星数据, 就形成了对其上大气的断层扫描, 通过一定的模型, 可以重建大气参数的三维结构(层析), 获取大气三维结构的折射率或水汽廓线信息。

1 用 GPS 确定倾斜路径延迟和水汽的方法

在高精度的 GPS 软件处理中, 通常使用 GPS 观测量(伪距和载波相位)或观测量的组合(如用两站的观测量作差称单差, 如用两个卫星的单差作差称为双差)组成观测方程, 所以确定倾斜路径湿延迟的方法可分为直接非差(观测量本身)估计斜路径延迟法和从双差残差到非差残差估计斜路径延迟法。

1.1 直接非差估计斜路径延迟法

对于 GPS 非差载波相位的观测方程可写为:

$$\rho = \rho_0 + \delta\rho_{\text{ion}} + \delta\rho_{\text{trop}} + c\delta t_r - c\delta t_s - \lambda N_0 + \varepsilon$$

香港 RGC/B. 34. 37. Q609 项目资助

作者简介: 曹云昌, 男, 1968 生, 博士, 副研究员, 主要从事卫星气象方面的研究, Email: caoyc@nsmc.cma.gov.cn

收稿日期: 2005 年 6 月 24 日; 定稿日期: 2005 年 9 月 21 日

其中 c 为光速, λ 为载波信号波长, ρ 为接收机载波相位观测量, ρ 为卫星至接收机的实际距离, $\delta\rho_{\text{ion}}$ 为电离层延迟, $\delta\rho_{\text{trop}}$ 为斜路径对流层延迟, δt_r 为接收机钟差, δt_s 为卫星钟差, N_0 为载波相位的整周模糊数, ε 为其他因素的误差, 斜路径的延迟为:

$$D_{\text{sp}} = \delta\rho_{\text{trop}} = (\rho - \rho) + \delta\rho_{\text{ion}} - c\delta t_s - \lambda N_0 + \varepsilon$$

为得到精确的倾斜路径延迟, 必须消除式中 cm 级误差因素, 首先要保证得到高精度 mm 级站坐标估计, 然后消除电离层延迟, 接收机和卫星钟差, 及其他因素如海潮, 相对论效应、卫星天线相位中心改正的影响, 并且正确确定整周模糊度。这种方法又称为精确单点定位技术 (Precise Point Positioning)^[10], 直接适用于如 GIPSY/OASIS 等使用非差观测量估计参数的软件。这种方法的关键是消除各种误差和正确确定整周模糊度, 一般使用 L1 观测量, 而宋淑丽等则发展了 LC 组合观测量的算法^[11]。

当使用 L1 观测量时, 整周模糊度为整数, 比较容易确定, 在接收机和卫星钟差, 海潮影响, 相对论效应、卫星天线相位中心改正模型精确模拟后, 确定精确的斜路径延迟需要好的电离层延迟模型。

当使用相位组合观测量 LC 时, 组合波长变为

$$\varphi_{LC} = \frac{f_1^2 \varphi_1 \lambda_1 - f_2^2 \varphi_2 \lambda_2}{f_1^2 - f_2^2}$$

f_1, f_2 是卫星信号的两个频率, λ_1, λ_2 是相应的波长, φ_1, φ_2 是两个相位观测量。方程中可以消去电离层延迟参数, 但由于此时整周模糊度不再具有整数特性, 所以模糊度的分离成为一个算法的关键。

计算出斜路径的总延迟后, 斜路径的湿延迟可以由如下公式获得:

$$D_{\text{sw}} = D_{\text{sp}} - m(\theta) D_{\text{zd}}$$

D_{sw} 是斜路径湿延迟, D_{sp} 是斜路总径延迟, D_{zd} 是天顶干延迟, $m(\theta)$ 为映射函数。

1.2 从双差残差到非差残差估计法

利用双差观测量来估计位置和大气延迟等参数时 (如 GAMIT 和 BERNESE 软件), 假设最后的残差主要是由大气折射率非各向同性造成的, 倾斜路径延迟可从大气模型的拟合和最后的残差相加得到。由于残差是双差, 首先需要将双差残差转变为非差残差^[12]。

设在历元时刻 t 接收机 A、B 同步观测卫星 1

和卫星 2, 观测分别为 $\varphi_1^A, \varphi_1^B, \varphi_2^A, \varphi_2^B$, 则单差为:

$$S_1^{AB} = \varphi_1^A - \varphi_1^B \quad S_2^{AB} = \varphi_2^A - \varphi_2^B$$

$$\text{再组成双差为: } d^{AB} = s_1^{AB} - s_2^{AB}$$

$$\text{矩阵形式可写成: } DS = d$$

由单差方程形成双差方程, 方程数少 1, 因此, 假设 S 为 n 行, 则 d 只有 $n-1$ 行, 所以从双差无法得到单差, 必须附加约束条件, 即:

$$\begin{bmatrix} w_1 & w_2 & w_3 & \dots & w_n \\ 1 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & -1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & \dots & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1^{ij} \\ S_2^{ij} \\ S_3^{ij} \\ \vdots \\ S_n^{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum w_{ks}^{ij} \\ d_{12}^{ij} \\ d_{13}^{ij} \\ \vdots \\ d_{1n}^{ij} \end{bmatrix}$$

假设 $\sum w_{ks}^{ij} = 0$, 则解以上方程可得到单差, 从单差到非差的求解也是同样的过程。

假设估计的天顶延迟为 D_{zd} , 水平延迟梯度 G_{NS} 和 G_{EW} , 非差残差为 σ , 则斜路径的天顶总延迟为

$$D_{\text{sp}}(\theta, \lambda) = m(\theta)(D_{\text{zd}} + \cot\theta)(G_{\text{NS}}\cos\lambda + G_{\text{EW}}\sin\lambda) + \sigma$$

斜路径的湿延迟为

$$D_{\text{sw}}(\theta, \lambda) = m(\theta)(D_{\text{zw}} + \cot\theta)(G_{\text{NS}}\cos\lambda + G_{\text{EW}}\sin\lambda) + \sigma$$

1.3 斜路径的水汽含量估算

采用同 GPS 大气可降水汽量相同的算法, 由地面温度计算加权平均温度^[13, 14]:

$$T_m = a + bT_s$$

估计出换算系数

$$\Pi = 10^6 \left[R_v \left(\frac{k_3}{T_m} + k'_2 \right) \right]^{-1}, R_v = 461.495 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}, k'_2 = k_2 - mk_1, m \text{ 为水汽和干空气的分子质量比。 } k_1, k_2, k_3 \text{ 源于大气折射率 } N \text{ 的表达式: } N = k_1 \left(\frac{p_d}{T} \right) + k_2 \left(\frac{p_v}{T} \right) + k_3 \left(\frac{p_v}{T^2} \right), p_d \text{ 和 } p_v \text{ 分别为干空气和水汽的分压, } T \text{ 为绝对温度。}$$

$$\text{斜路径的水汽含量为: } V_{\text{sw}} = \Pi D_{\text{sw}}$$

2 CT 技术在水汽廓线测量中的应用

断层扫描技术 (CT: Computerized Tomography) 最初由 20 世纪 50 年代美国医生 Oldendorf 引入, 后来广泛用于医学、地质、物探等领域, 是从外部无损获取目标内部参数分布的有效方法。卫星平台探测

的出现,使人类可以从大气圈外对地球大气进行观测,从而把该项技术引入了大气遥感探测领域^[15]。

2.1 GPS 观测对大气的层析扫描

图 1 为应用地基 GPS 观测对大气进行层析的垂直切面示意图。每个格点的水汽组成未知向量 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$, 各个格点按经度、纬度、高度依次排序。

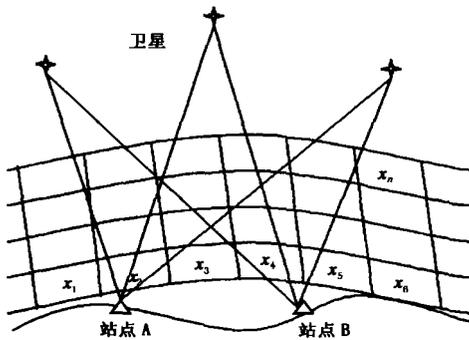


图 1 层析的垂直切面图

设观测的倾斜路径的水汽总量为 $B = (b_1, b_2, \dots, b_m)^T$, 首先计算倾斜路径所穿过的层析网格, 再沿倾斜路径的网格积分, 设 H 为积分系数矩阵, 那么

$$HX = B + \varepsilon$$

$$H = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix}$$

ε 为观测误差。积分系数矩阵中的系数就是求倾斜路径与每层相交点值的插值系数, 插值方法可采用 4 点双线性内插方法或更复杂的内插方法。

一般来说, 由于 GPS 观测的局限, 方程 H 一般是秩亏的, 对于以上方程还不能直接求解, 通常可以通过附加约束或使用 Kalman 滤波进行求解。

2.2 附加约束方法

附加约束方法就是附加约束方程^[16, 17]。包括水平方向约束方程和垂直方向约束方程, 通过增加约束条件, 使方程满足有解条件。水平约束通常假设水平方向上每点都与邻近的格点数值相关, 相关程度与距离的平方成反比, 也就是采用距离相关的高斯加权函数, 形成约束方程:

$$H_1 X = 0$$

H_1 为水平约束方程, X 为未知系数矩阵。 H_1 的系数可以按照以下公式计算:

$$h_{i_1 j_1 k}^{i_2 j_2 k} = \begin{cases} 1, & \text{当 } i = i_1, j = j_1 \\ -\frac{e^{-\frac{d_{i_1 j_1 k}^2}{2\sigma^2}}}{\sum_{i_1=1}^{n_e} \sum_{j_1=1}^{m_e} e^{-\frac{d_{i_1 j_1 k}^2}{2\sigma^2}}} & \text{其他情况} \end{cases}$$

式中, i, j, k 代表所计算网格的三维位置, i_1, j_1, k 代表其他网格的位置, $d_{i_1 j_1 k}$ 为其他网格到所计算网格的距离, σ 为平滑因子, n_e, m_e 为水平格点数。垂直约束假设也可以采用类似于水平方向的高斯加权函数, 或者假设垂直方向上参数以指数形式递减, 到某一高度为零进行约束, 或者用数值模式、其他独立观测(探空或雷达)的廓线信息作为约束。

2.3 Kalman 滤波方法和误差协方差阵

使用 Kalman 滤波方法求解, 首先要了解参数向量随时间变化的模型, 在模型的基础上, 加入观测来估计参数的变化。

假设未知向量 X 为高斯白噪声过程, 系统噪声和观测噪声的方差分别是 Q, R , 假设每个格点的参数向量符合随机行走过程, 则未知向量可以通过以下线性 Kalman 滤波进行递推求解。

设 $P(k|k-1)$ 是向量 $X(k|k-1)$ 由 $(k-1)$ 到 k 步递推的更新方差, $P(k-1|k-1)$ 是 $X(k-1|k-1)$ 第 $(k-1)$ 步对应的方差, 那么向量 X 可利用以下 3 式进行递推:

$$X(k|k) = X(k|k-1) + K_g(k) \cdot [B(k) - H \cdot X(k|k-1)]$$

$$K_g(k) = P(k|k-1) \cdot H^T / [H \cdot P(k|k-1) \cdot H^T + R]$$

$$P(k|k-1) = P(k-1|k-1) + Q$$

其中 K_g 为 Kalman 增益。在线性 Kalman 滤波中, 最关键的问题是确定系统噪声的方差 Q 。对于大气折射率, Treuhaft 和 Lany 给出了折射率的方差算法^[18], Grandinarsky 则对该算法进行了修改, 修改后的算法如下^[19]。

定义折射率的空间相关函数为:

$$D_x(r, R) = E\{[x(r+R) - x(r)]^2\}$$

假设空间相关函数仅决定于两点的距离, 则

$$D_x(R) = \frac{R^{2/3}}{1 + (R/L)^{2/3}} C^2$$

R 为水平距离, C 和 L 为经验系数, 可根据具体的资料计算得到。

当考虑高度变化和大气运动时,可定义同一时刻两点距离为 R_{3d} , 不同时刻两点距离为 R_{4d} 。

$$R_{3d}^2 = R^2 + C_0(h_i - h_j)^2$$

$$R_{4d}^2 = C_0(h_i - h_j)^2 + (V \cdot T)^2$$

C_0 为权重系数。从而

$$Q_{ij} = \left[\frac{R_{4d}^{2/3}}{1 + (R_{4d}/L)^{2/3}} - \frac{R_{3d}^{2/3}}{1 + (R_{3d}/L)^{2/3}} \right] C^2 e^{-(h_i - h_j)/h_{sc}}$$

h_{sc} 为层析总高度, 对于水汽也可考虑采用类似的方法计算误差协方差阵, C_0 、 V 为权重系数。

3 地基 GPS 大气水汽廓线测量存在的问题

3.1 斜路径延迟的算法

无论是双差估计算法和非差直接估计算法, 目前来看, 都还有不完善的地方。对双差估计算法来说, 大气的三维非各向同性, 不仅体现在水平延迟梯度和映射函数上, 而且体现在后处理的残差上。显然, 只估计两个方向上的延迟梯度, 对算法的精确性方面会有一定的影响。同时, 映射函数的选择和低仰角时的误差也是值得特别关注的。残差的处理更具有挑战性, 要从残差中把非大气部分的影响(如多路径)消除掉, 而且还受“残差平均为零”假设的限制。这一假设, 对于长基线组成的站网, 估计的大气参数不存在系统误差情况下可以适用, 但对于区域性的小网来说, 这一条件并不能满足。同时, 在算法中各种参数都要被估计出来, 造成计算资源的浪费。

非差算法虽然不需要较大的站网, 甚至单站就可以解算, 但需要有精密的卫星轨道和星钟误差参数, 扣除各种误差因素, 来获取倾斜路径的延迟, 这在实时处理时就很难做到, 在以后的气象应用上也会受到限制, 而且各种误差模型参数化和精确化, 模糊度分解就变得特别重要, 特别是电离层延迟误差和模糊度的分解。所以开展更多的斜路径延迟算法的研究是特别需要的。

3.2 层析模型的缺秩问题

在利用地面 GPS 接收机进行观测时, 和一般 CT 技术不同的是, 卫星是有限的, 并且轨道是固定的, 因此, 对于层析区域, 总有扫描不到的死角和盲点, 而且还存在侧边界问题。因为我们无法知道层析区域以外的情况, 所以穿越侧边界的观测量对层析的解算不起作用。这样减少了可用的观测量, 使侧边界未知且无法求解。所以层析模型所组成的观测方程是缺秩的, 方程的解是不适定(ill-posed)的。

对这个问题的解决方法是附加约束和 Kalman 滤波方案, 或者使用变分的方法, 补充先验信息。对于附加约束而言, 垂直约束显得极为重要, 要依靠其他独立的观测, 如探空或雷达, 给出廓线的先验分布。对于 Kalman 滤波而言, 则要给出变量预报模型的误差协方差矩阵, 其有效算法在目前气象领域还是比较困难的一个问题。使用变分方法是气象领域常用的算法, 通过附加背景场及其误差协方差阵, 来获取最小方差意义下的最佳估计。这种方法算法比较成熟, 但如何在观测和背景之间给定适当的权, 还有很大的主观任意性。

3.3 层析结果的评价和验证

目前, 在大气层析方面, 倾斜路径延迟的验证, 开展得比较多, 认为目前倾斜路径的延迟估计可以达到 $10 \text{ mm}^{[20]}$ 。但对倾斜路径水汽和层析的结果验证研究还比较少, 主要有 Shoji 等人利用水汽辐射计对比验证倾斜路径水汽^[21], Grandinarsky 对层析后的折射率和探空结果的对比^[19], 宋淑丽对层析后的水汽和模式的结果进行了验证^[17]。验证研究少的原因在于水汽廓线的研究还处于概念证明的初步发展阶段, 模型相对简单, 模型采用的坐标系统和气象观测和模型的坐标系统不一致, 因此和模型相匹配的观测和资料少之又少, 验证起来比较困难。所以开展这方面的研究, 一方面应采用与气象观测相匹配的坐标系统, 发展复杂化的层析模型系统, 另一方面, 开展外场试验, 直接把不同独立观测的资料与层析结果进行对比。

4 展望

大气中水汽分布和变化的研究, 对数值模式、天气预报和分析, 气候监测和预测意义深远。对水汽的探测, 目前虽然有多种手段, 获取了不少资料, 但对水汽的三维分布结构和变化了解得还远远不够。因此利用导航卫星系统进行水汽三维结构的探测研究, 有重要的现实意义。随着伽利略计划的实施, 俄罗斯 Glonass 系统的恢复和中国北斗二代的实施, 用于遥感探测水汽廓线的卫星越来越多, 地面站网系统也越来越密, 利用全球分布的站网来探测全球大气的水汽廓线条件也越来越成熟; 另一方面, 空基的 GPS 卫星对地观测, 在对对流层下部水汽的探测还较为困难, 地基的观测正好作为空基探测资料的补充, 并可以提高空基资料反演质量, 因此, 随着将

来 GPS 观测系统的发展,这一技术将会得到更大的发展和完善。

参考文献

- [1] Elgered G. Tropospheric radio path delay from ground-based Microwave radiometry [G] // Atmospheric Remote Sensing by Microwave Radiometry. New York: John Wiley & Sons Inc, 1993: 215– 218.
- [2] Bevis M, Businger S, Herring T A, et al. GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system [J]. J. Geophys. Res., 1992, 97(D14): 15787– 15801.
- [3] Rocken C, Ware R, VanHove T, et al. Sensing atmospheric water vapor with the global positioning system [J]. Geophys. Res. Lett., 1993, 20(23): 2631– 2634.
- [4] Wolfe D E, Gutman S I. Developing an operational, surface-based, GPS, water vapor observing system for NOAA: Network design and results [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 17(4): 426– 440.
- [5] 曹云昌, 方宗义, 夏青. 地基 GPS 探测应用研究进展[J]. 南京气象学院学报, 2004, 27(4): 555– 572.
- [6] Bar-Sever Y E, Kroger P M. Estimating horizontal gradients of tropospheric path delay with a single GPS receiver [J]. J. Geophys. Res., 1998, 103: 5019– 5035.
- [7] Ware R H, Alber C, Rocken C, et al. Sensing integrated water vapor along GPS ray paths [J]. Geophys. Res. Lett., 1997, 24(4): 417– 420.
- [8] Flores A G, Rius R A. 4D Tropospheric tomography using GPS slant wet delays [J]. Ann. Geophysicae, 2000, 18: 223– 234.
- [9] 李成才, 毛节泰. GPS 地基遥感大气水汽总量分析[J]. 应用气象学报, 1998, 9(4): 470– 477.
- [10] Zumberge J F, Heflin M B. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks [J]. Journal of Geophysical Research, 102(B3): 5005– 5018.
- [11] 宋淑丽, 朱文耀, 程宗颐, 等. GPS 信号斜路径方向水汽含量的计算方法[J]. 天文学报, 2004, 45(3): 338– 346.
- [12] Alber C, Ware R, Rocken C, et al., Obtaining single path phase delays from GPS double difference [J]. Geophysical Research Letters, 27(7): 2661– 2664.
- [13] Bevis M S, Chiswell B S. GPS meteorology: Mapping zenith wet delays onto perceptible water [J]. J. Appl. Meteor., 1994, 33: 379– 386.
- [14] 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[J]. 气象学报, 1999, 57: 283– 291.
- [15] 蒋蓓, 荀毓龙. 卫星遥感大气的层析扫描反演方法[J]. 环境遥感, 1996, 11(1): 59– 67.
- [16] Braun J C, Liljegren R J. Comparisons of line-of-sight water vapor observations using the global positioning system and a pointing microwave radiometer [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2003, 20: 606– 612.
- [17] 宋淑丽. 地基 GPS 网对水汽分布的监测及其在气象学中的应用[D]. 上海: 中国科学院上海天文台, 2004.
- [18] Treuhalt R N, Lanyi G E. The effect the dynamic wet troposphere on radio interferometric measurements [J]. Radio Sci., 1987, 22: 251– 265.
- [19] Grandinarsky L P. Ground-based GPS Tomography of water vapor: Analysis of simulated and Real Data [J]. J. Meteor. Society of Japan 2004, 82(1b): 551– 560.
- [20] Braun J, Rocken C, Ware R. Validation of single slant water vapor measurement with GPS [J]. Rad. Sci., 2001, 36: 459– 472.
- [21] Yoshinori Shoji, Hajime Nakamura, Tetsuya Iwabuchi, et al. Tsukuba GPS dense net campaign observation: improvement of GPS analysis of slant path delay by stacking one-way postfit phase residuals [C] // Proceeding of International Workshop on GPS Meteorology, 2003.

Approaches to Atmospheric Water Vapor Profile Sounding by GPS

Cao Yunchang^{1,3} Chen Yongqi¹ Li Pinghua² Fang Zongyi³

(1 Hong Kong Polytechnic University; 2 Hong Kong Observatory; 3 National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081)

Abstract: The slant wet delay of GPS signals is subjected to the non-uniform distribution of the water vapor in the atmosphere. The three dimensional field of water vapor can be recovered by the computerized tomography (CT) method through accurately determining the slant wet delays from satellites to antennas on the ground. Two sorts of methods for determining the slant wet delays, the point precise positioning (PPP) and the double-difference method, are introduced. Two CT approaches for obtaining the water vapor profiles (Gaussian constraint and the Kalman filtering) are discussed.

Key words: slant wet delay, computerized tomography, remote sensing, water vapor profile