

# 轨道误差对近实时 GPS 遥感水汽的影响研究

曹云昌 方宗义 夏青

(国家卫星气象中心,北京 100081)

**摘要** 利用 GPS 技术近实时探测水汽对于气象预报、气候研究具有重要的应用价值,而近实时探测需要使用 GPS 卫星的预报星历,预报星历的误差会直接影响到实时水汽探测的精度。利用从 IGS 资料处理中心下载的精密预报星历和最终星历,对 2000 年北京 GPS 水汽试验中的资料进行了解算,并结合探空资料计算的水汽进行了分析。结果表明:以探空为标准,使用精密预报星历计算的水汽总量均方根误差为 0.31 cm,最终星历为 0.30 cm,二者差别不大,为 0.01 cm,证明使用精密预报星历可以满足近实时探测水汽的要求。

**关键词** 大气可降水量 轨道误差 GPS 遥感

## 引言

应用 GPS 技术遥感大气可降水量,为天气和气候模式提供所需要的水汽信息,逐渐成为一种新型的大气探测手段。和其它水汽探测手段(常规探空、水汽辐射计、微波辐射计)相比,GPS 探测具有稳定可靠、全天候、资料时间分辨率高的特点<sup>[1]</sup>,近年来得到迅速发展。目前,许多国家的气象部门相继建立或正在建立地基 GPS 测量大气水汽的试验网。如日本已在 1998 年建成覆盖全国、站间距为 15 ~ 20 km、由 949 个站组成的观测网。美国由国家海洋大气管理局(NOAA)和美国大学大气研究中心(UCAR)建立并实时运行发布每小时水汽分布和电离层电子总量分布的覆盖美国的监测网。UCAR 组织的 Suomi Net 网,旨在利用全美以至全世界大学中大气科研力量建立和维持 GPS 水汽监测。欧洲许多国家在地基 GPS 气象遥感应用方面也发展得非常迅速,瑞士、挪威、法国、英国等都在着手进行观测网的建设和 GPS 遥感资料运用于数值模式的研究<sup>[2]</sup>。中国的部分地区也正在建立近实时的 GPS 监测水汽网。

监测 GPS 水汽需要尽可能精确的 GPS 卫星轨道,也就是精密的卫星星历。根据提供的方式,卫星

星历分为两种:后处理星历和预报星历。后处理星历是一些国家和地区,根据各自建立的跟踪站所获得的精密观测资料计算的卫星星历,它精度较高,但为事后星历,不能满足实时业务的需要;预报星历(如广播星历)选用参考历元的轨道参数,按照一定的摄动力模型(包括模型参数),外推出任意观测历元的卫星星历,它能满足实时业务的需要,但精度较前者低,且随着时间的外推而降低。为满足实时处理的需要,最可行的途径是使用预报星历。因此,确定星历误差对水汽监测的影响,即何种预报星历能满足气象实时监测业务的需要,就显得非常重要。

本文根据目前所获得的国际 GPS 服务局 IGS (International GPS Service)精密预报星历和最终星历,应用高精度定轨定位软件 GAMIT,对 2000 年北京 GPS 水汽试验的资料进行了解算,分析了轨道误差对水汽监测的影响。

## 1 GPS 测量水汽的原理及误差

由于 GPS 卫星发射的微波信号在穿过大气层时要受到大气的折射而延迟,可以通过对这种延迟的监测来反演大气折射率,进一步遥感大气参数,如大气可降水量等。

地基 GPS 遥感水汽就是把该延迟量作为待定

本研究得到 863 - 2002 AAI 35360“GPS 应用于大气三维结构监测技术”研究项目资助

作者简介:曹云昌,男,1968 年生,博士,助理研究员,主要从事 GPS 气象学和卫星气象的研究,E-mail: caoyc@ns.mc.cma.gov.cn

收稿日期:2003 年 6 月 30 日;定稿日期:2003 年 9 月 9 日

参数引入到观测方程和解算模型中,并逐项考虑误差的来源和消除办法,精密的大气延迟量(m m 级)就可以求解出来。大气延迟量可划分为电离层延迟、静力延迟和湿项延迟三部分。利用一定的解算模型,通过采用双频技术,几乎可以完全消除电离层延迟的影响。

静力延迟与地面观测量(气压)具有很好的相关,可以订正到 m m 量级。这样就得到了 m m 量级的湿项延迟。湿项延迟与大气可降水量  $I_{p_{wv}}$  可建立比较严格的正比关系,精确的水汽总量就可以求解出来<sup>[3]</sup>。

1.1 静力延迟项的计算

在卫星信号自外空传播至 1000 hPa 时静力延迟大约有 230 c m。在静力平衡的假设下,若地面气压观测的精度为 0.5 hPa,则这项延迟的估算精度优于 1 m m。Elgered 等(1991)给出了天顶流体静力学延迟公式<sup>[2]</sup>:

$$Z_n = [(2.279 \pm 0.0024)] \frac{p_0}{f(\lambda, H)} \quad (1)$$

其中  $p_0$  为地面气压(hPa),  $f(\lambda, H) = (1 - 0.00266\cos(2\lambda) - 0.00028H)$ ,  $\lambda$  为地理纬度,  $H$  为海拔高度(km)。

1.2 水汽总量的计算

从中性天顶延迟中减去静力天顶延迟  $Z_n$  而得到湿项延迟  $Z_w$ ,其数值大约为 0 ~ 40 c m,进一步采用以下关系将湿项延迟值转化为大气可降水量  $I_{p_{wv}}$ <sup>[3]</sup>:

$$I_{p_{wv}} = \Pi Z_w \quad (2)$$

式中  $\Pi$  的精确形式和参数可通过地面气温的观测和历史资料的统计建立:

$$\Pi = 10^6 \left| R_v \left| \frac{k_3}{T_m} + k_2' \right| \right|^{-1} \quad (3)$$

$$k_2' = k_2 - mk_1 \quad (4)$$

式中:  $R_v = 461.495 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ , 为水汽的气体常数;  $m$  为水汽和干空气的分子量比,  $T_m$  为加权平均温度,  $k_1, k_2, k_3$  源于大气折射率  $N$  的表达式:

$$N = k_1 \left| \frac{p_d}{T} \right| + k_2 \left| \frac{p_v}{T} \right| + k_3 \left| \frac{p_v}{T^2} \right| \quad (5)$$

式中  $p_d$  和  $p_v$  分别为干空气和水汽的分压,  $T$  为绝对温度。

加权平均温度  $T_m$ ,按下式计算:

$$T_m = \frac{\int (p_v/T) dz}{\int (p_v/T^2) dz} \quad (6)$$

式中  $p_v, T$  的定义同式(5),积分沿着整个大气垂直路径。 $T_m$  虽然随积分地区而变化,但可通过地面温度( $T_s$ )的观测来估算:

$$T_m = a + bT_s \quad (7)$$

式中  $a = 70.2, b = 0.72$ ,或由数值天气预报提供。

1.3 GPS 水汽测量中的误差

GPS 水汽测量中的误差可分为 GPS 轨道误差、多路径误差、相位测量误差、气压测量误差等,总的误差估计大约为 1.7 m m<sup>[4]</sup>。

2 卫星轨道误差及其对 GPS 大气可降水量的影响

目前,卫星星历有随卫星播发的广播星历,IGS 及 7 个分处理中心制作并发布的最终星历、精密预报星历、快速星历、超快速星历和每小时星历。其中,最终星历和快速星历都属于事后处理星历,其他为预报星历。根据 IGS 分析中心提供的资料,以下几种星历的轨道估计精度见表 1。

表 1 2000 年轨道估计精度

星历类型	误差/m	获取时间
广播星历	3.00	实时
CODE 预报星历*	0.2**	实时
IGS 超快速星历	0.2	实时
IGS 快速星历	0.1	19 h 后
IGS 最终星历	0.05	13 d 后

注: \* 表示欧洲定轨中心,IGS 资料分处理中心之一; \*\* 表示每个坐标 0.20 m 的误差是指 2~4 h 的外推,48 h 的外推约为 0.50 m

卫星轨道误差对基线向量的影响可用如下原则

确定<sup>[5]</sup>:  $dx \approx dR \cdot \frac{L}{R}$

其中  $L, dx$  为基线长度和基线向量的误差,  $R, dR$  为卫星距离和轨道误差。

假设由轨道误差引起的基线坐标垂直分量误差等于基线向量误差  $dz$ ,此误差平均由电离层延迟、对流层延迟和天顶湿延迟贡献<sup>[6]</sup>(实际计算表明,天顶湿延迟误差约为轨道误差的 1/4 ~ 1/10)。天顶湿延迟误差  $E_{z_{wd}}$  可写为:

$$E_{z_{wd}} \approx \frac{1}{3} dx = dR \frac{L}{3R}$$

大气可降水量误差  $E_{p_{wv}}$  按式(2)换算:

$$E_{p_{wv}} \approx IIR \frac{L}{3R} \quad (8)$$

GPS 卫星轨道平均高度约 20200 km, 距离地面测站的最大距离为 25000 km, 所以, 假设有 10 cm 的轨道误差, 则对 1000 km 的基线长度, 引起的基线向量误差约为 4 mm<sup>[7]</sup>, 在以上假设情况下, 天顶湿延迟的误差约为 1.3 mm, *I* 值约为 0.15, 转换为 *I*<sub>p<sub>wv</sub></sub> 的误差为 0.2 mm。

### 3 误差分析

#### 3.1 解算方案

本文从 IGS 资料中心下载了精密预报星历和最终星历, 利用 2000 年 6~8 月国家卫星气象中心、北京大学和北京市气象局等单位 GPS 水汽试验中北京市南郊资料, 用预报星历和最终星历分别计算了大气水汽总含量, 用标准层计算了探空水汽的总含量。使用 GAMIT 软件, 对 GPS 水汽试验的数据按照如下方案解算, GPS 站的地心坐标分量约束为 5 cm, 太阳光压用多项式光压模型, 用双频观测值消除电离层折射影响, 在先验模型改正的基础上每个测站每半小时估计一个天顶方向的对流层延迟。卫星轨道的误差约束为 10<sup>-8</sup>。

#### 3.2 结果分析

用精密预报星历和最终星历计算的水汽总含量差别并不大, 图 1 为计算的 6 月 13 日开始每半小时一次的水汽总含量点聚图。图 2 为预报星历和最终星历计算的大气可降水量的差, 可以看出, 除个别天数有较大差距外(因个别卫星的预报轨道位置较差), 大多数差别不大, 都不超过 0.8 mm。

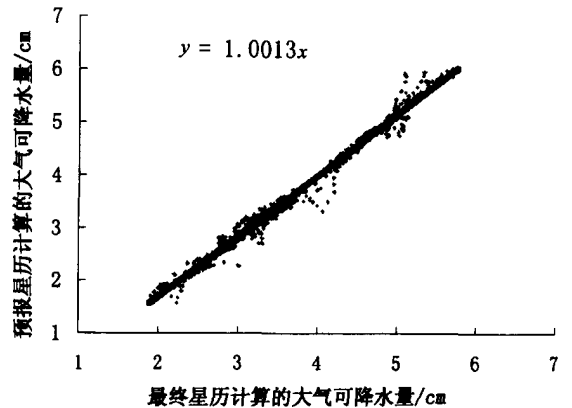


图 1 精密预报星历和最终星历计算的大气可降水量点聚图

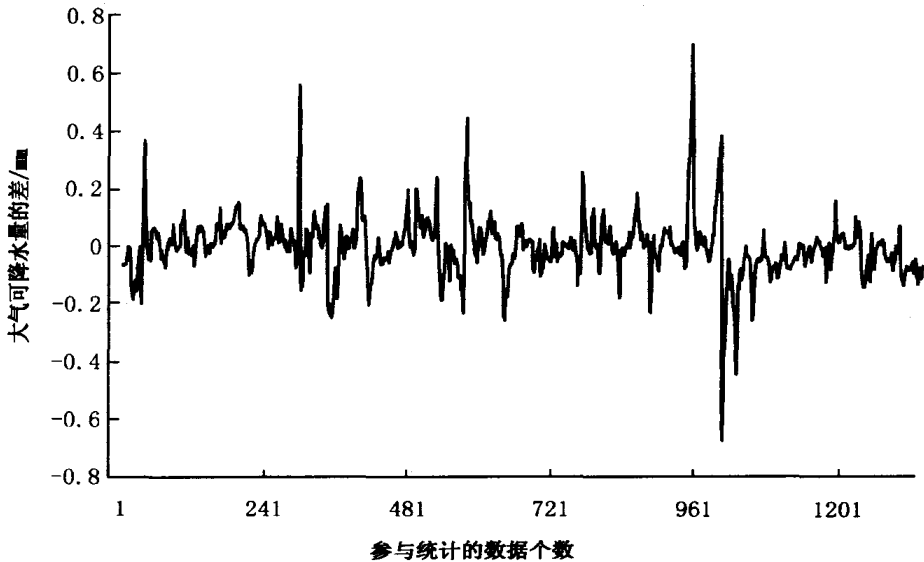


图 2 精密预报星历和最终星历计算的大气可降水量的差

应用 6 月 13 至 8 月 1 日 08:00 和 20:00 的探空标准层资料对北京市南郊的大气总水汽量和同时期精密预报星历及最终星历计算的大气可降水量作

一对比(见表 2)。可以看出, 使用精密预报星历和最终星历以及探空资料计算的总水汽量, 最终星历和探空之差的平均值为 0.04 cm, 精密预报星历与

探空之差为 0.08 cm,它们基本不存在系统性的偏差;精密预报星历和最终星历的均方根误差为 0.18 cm,如果以探空为准,最终星历与探空的均方根误差为 0.30 cm,精密预报星历与探空的均方根误差为 0.31 cm,使用预报星历比最终星历误差增大 0.01 cm。因此,使用精密预报星历进行近实时 GPS 水汽探测是可行的。

表2 GPS 遥感水汽和探空水汽的对比 cm

	平均误差	均方根误差
最终星历和探空	0.04	0.30
精密预报星历和探空	0.08	0.31
最终星历和精密预报星历	0.08	0.18

#### 4 结论和探讨

在近实时水汽测量中,不能不使用预报星历,由于轨道误差的增大,不可避免加大水汽测量上的误差。使用 IGS 提供的精密预报星历计算,以探空作基准,误差增加 0.01 cm。这说明,使用 IGS 精密预报星历和最终星历,计算的结果差别并不大,精密预报星历可以满足近实时监测水汽的要求。

GPS 大气可降水量和探空计算的大气可降水量均方根误差较大,可能是以下原因造成的:

(1) 由于探测方式不同,存在下风飘曳作用,两者在本质上存在差异。

(2) 计算探空资料时只有标准层,因此计算的结

果存在一定的误差。

(3) 08:00 探空资料正处于两天的交界处。GAMIT 解算时在两天交界处,由于观测方程数目减少一半,并且星历资料文件在交界处不连续,造成解算上的误差,这也是均方根误差较大的原因。

致谢:对中国地震局顾国华教授给予的指导和北京市气象局提供的探空和常规气象资料表示衷心的感谢。

#### 参考文献

- 1 方宗义,张运刚,刘志权,等. 全球定位系统——气象学(GPS/MET) 研究论文汇编. 北京:国家卫星气象中心,1999.12
- 2 Elgered G. Tropospheric Radio Path Delay from Ground-based Microwave Radiometry. *Atmospheric Remote Sensing by Microwave Radiometry*. New York:John Wiley & Sons Inc,1993.215-258
- 3 李成才,毛节泰,李建国,等. GPS 遥感水汽总量. *科学通报*, 1999,44(3):333-336
- 4 Bevis M, Businger S, Chiswell T, et al. GPS Meteorology: Mapping zenith wet delays onto precipitable water. *J. Appl. Meteor.*, 1994, 33:379-386
- 5 Rocken C, Ware R, Van Hove T, et al. Sensing atmospheric water vapor with the global positioning system. *Geophys. Res. Lett.*, 1993,20:2631-2634
- 6 Bauersima I. NAVSTAR/Global Positioning System (GPS), II. *Mitteilungen der Satelliten-Beobachtungsstation Zimmerwald*, No. 10. Astronomical Institute, University of Berne, 1983
- 7 Springer T A. Common Interests of the IGS and the IVS. *IVS 2000 General Meeting Proceedings*. Astronomical Institute, University of Berne, 2000

## Impact of Orbit Errors on Near Real-time GPS Water Vapor Remote Sensing

Cao Yunchang Fang Zongyi Xia Qing

(National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081)

**Abstract:** Near real-time (NRT) water vapor remote sensing by GPS is of great potential in weather forecasting and climate research. Availability and precision of the ephemeris are the key issues. The data from the 2000 Beijing GPS/VAPOR Experiment were processed by using the precisely predicted and final ephemeris files downloaded from IGS website, and GPS PWV (precipitable water vapor) was obtained. On the basis of the radiosonde water vapor, the PWV calculated from the predicted ephemeris shows a RMS of 0.31 cm, only 0.01 cm greater than that from the final. Therefore, the predicted ephemeris can meet the requirement of GPS NRT water vapor remote sensing.

**Key words:** precipitable water vapor, orbit errors, GPS remote sensing