**DOI**:10.3876/j.issn.1000－1980.2015.03.013

# 基于超快速星历的数值天气预报可行性研究

王俊杰,何秀凤

(河海大学卫星及空间信息应用研究所,江苏 南京　210098)

**摘要**:为实时获取高时空分辨率的大气水汽场,基于地基 GPS 遥感大气水汽原理,结合香港 CORS 网的实测数据进行处理,根据大气可降水量(PWV)解算过程中超快速星历预报部分的时间跨度不同,设计了 3 个方案,并比较了各方案中最终精密星历、超快速星历和探空资料解算得到的 PWV 序列。结果表明,利用超快速星历估计 PWV 与最终精密星历结果一致,其精度满足气象预报等实时业务的要求。

**关键词**:GPS;大气可降水量;超快速星历;数值天气预报

**中图分类号**:P405　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1000－1980(2015)03－0267－04

## Study on feasibility of numerical weather forecasting using ultra-rapid ephemeris

**WANG Junjie, HE Xiufeng**

(*Institute of Satellite Navigation and Spatial Information System*, *Hohai University*, *Nanjing* 210098, *China*)

**Abstract**: In order to obtain a real-time atmospheric water vapor field of high temporal and spatial resolution, based on the principle of remote sensing of atmospheric precipitable water vapor (PWV) using a ground-based GPS, the observed data at certain stations in the Hong Kong CORS network were processed. According to the different time spans in calculating PWV with ultra-rapid ephemeris, three schemes were designed. In each scheme, PWV data calculated with final precise ephemeris, ultra-rapid ephemeris, and radiosonde data were compared. The results show that the predicted PWV data of the ultra-rapid ephemeris agree with those of the final precise ephemeris, and its accuracy satisfies the requirements of real-time service, such as weather forecasting.

**Key words**: GPS; atmospheric precipitable water vapor; ultra-rapid ephemeris; numerical weather forecasting

在强对流天气的演变过程中,水汽变化十分迅速,水汽场的分布、垂直输送和相变是制约强对流天气发展的动力机制之一。因此,高时空分辨率地获取大气水汽场是准确分析天气系统演变、进行监测与预报气象的关键环节之一[1]。从 20 世纪 90 年代开始,利用地基 GPS 来精确估算大气可降水量(PWV)已被广大学者所证实[2-6],利用最终精密星历和地基 GPS 静止平台获得的水汽精度可以达到 1 mm,满足数值天气预报的精度要求[7]。此外,地基 GPS 安装便捷,成本低,可全天候工作,且时空分辨率高于常规水汽监测方法,因此在数值天气预报方面有广阔的应用前景[7-8]。然而最终精密星历延迟为 13 d,不能满足气象预报等实时业务的需求。从 2000 年 3 月 10 日开始,IGS 中心开始提供可实时获取的超快速星历,这意味着利用超快速星历的预报轨道和预报钟差能一定程度上满足某些用户要求[9]。

笔者基于地基 GPS 遥感大气水汽原理,结合香港 CORS 网的观测数据进行处理,根据计算过程中采用超快速星历预报部分的时间跨度不同,设计了 3 个方案,并分别比较最终精密星历、超快速星历和探空资料解算得到的 PWV 序列,探讨利用超快速星历估计 PWV 用于数值天气预报的可行性。

## 1　地基 GPS 遥感大气水汽原理

GPS 信号在传播过程中会受到中性大气层和电离层的影响而产生延迟和弯曲。其中,电离层延迟部分

**收稿日期**:2014－06－24

**基金项目**:国家自然科学基金(41274017);江苏省科技支撑计划(BE2010316)

**作者简介**:王俊杰(1989—),男,福建建瓯人,博士研究生,主要从事 GNSS 导航与定位和 GPS 气象学研究。E-mail:junjie.wang@hhu.edu.cn

可利用电离层的弥散特性通过双频接收机消除99%,中性大气层延迟可表示为[10]

$$T_{\mathrm{D}} = 10^{-6}\int N_{\mathrm{d}}\mathrm{d}s + 10^{-6}\int N_{\mathrm{w}}\mathrm{d}s = H_{\mathrm{D}} + W_{\mathrm{D}} \tag{1}$$

式中:$N_{\mathrm{d}}$、$N_{\mathrm{w}}$——干、湿折射率指数;$H_{\mathrm{D}}$——静力学延迟;$W_{\mathrm{D}}$——湿延迟。

通过映射函数,将中性大气层延迟转换到天顶方向,则天顶总延迟 $Z_{\mathrm{T}}$ 为

$$Z_{\mathrm{T}} = Z_{\mathrm{H}} + Z_{\mathrm{W}} \tag{2}$$

式中:$Z_{\mathrm{H}}$——天顶静力学延迟;$Z_{\mathrm{W}}$——天顶湿延迟。

$Z_{\mathrm{T}}$ 可利用 GAMIT 等高精度 GPS 数据处理软件求解, $Z_{\mathrm{H}}$ 可通过 Saastamoinen 模型估计得到:

$$Z_{\mathrm{H}} = \frac{(2.279 \pm 0.0024)P_{\mathrm{s}}}{1 - 0.00266\cos(2\lambda) - 0.00028H} \tag{3}$$

式中:$P_{\mathrm{s}}$——测站地表气压;$\lambda$——测站地理纬度;$H$——测站的海拔高度。

由式(2)、式(3)可分离得到 $Z_{\mathrm{W}}$,而 PWV 与 $Z_{\mathrm{W}}$ 成比例关系

$$P_{\mathrm{W}} = \frac{10^6}{\left(K'_2 + \frac{K_3}{T_{\mathrm{m}}}\right)R_{\mathrm{v}}}Z_{\mathrm{W}} \tag{4}$$

式中:$P_{\mathrm{W}}$——大气可降水量;$T_{\mathrm{m}}$——地表加权平均温度;$K'_2$、$K_3$、$R_{\mathrm{v}}$——常数[2]。

## 2 实验数据与方案

实验数据采用香港 CORS 网中6个参考站2011年年积日152~181共30 d(6月1—30日)的观测文件和气象文件,6个参考站分别为粉岭(HKFN)、小冷水(HKSL)、昂坪(HKNP)、昂船洲(HKSC)、石碑山(HKOH)和黄石(HKWS)。观测文件采样间隔为5 s,气象文件每分钟记录一次温度、气压、相对湿度等数据。下载香港地区 King's Park 探空站相应时段的数据,以验证地基 GPS 遥感大气水汽的精度。

方案设置 PWV 时间分辨率为1 h,为求解各参考站上的绝对 PWV,Duan 等[3]指出需引入一定数量的 IGS 跟踪站使网中存在长度大于500 km 的基线。因此实验选取上海(SHAO)、昆明(KUNM)、菲律宾(PIMO)和新加坡(NTUS)等4个 IGS 跟踪站,并下载相应时段的数据。香港地区濒临海域,且所选 IGS 跟踪站离海较近,因此需在解算中引入海潮模型。此外,采用 GAMIT 软件进行 PWV 解算,还要涉及解算模式、映射函数和大气荷载模型等参数的设置。用 GAMIT 求解 PWV 的方案具体设置如下:解算模式为 BASELINE,惯性参考框架为 J2000,迭代次数为1-ITER,观测值类型为 LC_AUTCLN,对流层先验模型为 Saastamoinen 模型,对流层延迟参数估计方法为 PWL(分段线性拟合),对流层延迟参数为25个,映射函数为 VMF1,卫星截止高度角为10°,气象数据来源于 RNX UFL GPT 50,海潮模型为 Otl_FES2004.grid,大气荷载模型为 atmdisp_cm.2011,星历为 IGS 最终精密星历/超快速星历。

## 3 最终精密星历和超快速星历计算结果比较

IGS 中心提供的星历产品包括最终精密星历、快速精密星历、超快速星历和广播星历,轨道精度依次降低[11-12]。最终精密星历广泛应用于高精度的 GPS 数据事后处理;超快速星历轨道弧长48 h,包含前24 h 基于跟踪站观测值计算得到的精密星历(观测部分)和后24 h 的预推星历(预测部分),可作为实时使用。IGS 部分星历产品及质量指标见文献[12]。

由文献[12]可知,超快速星历每天更新4次,每天 UTC 时21 h 发布的超快速星历的时间跨度可满足之后第2天的 GPS 数据处理,此时 GPS 数据处理完全采用超快速星历的预报部分。采用超快速星历对实验数据逐天进行处理,根据计算过程中采用超快速星历预报部分的时间跨度不同,设计如下3个方案:(a)只采用预报部分(IGU_24);(b)前12 h 采用观测部分,后12 h 采用预报部分(IGU_12);(c)只采用观测部分(IGU_00)。符号中的数字表示采用的超快速星历中预报部分的时长。解算得3个方案各站的 PWV 序列,分别与采用最终精密星历的计算结果和 King's Park 探空 PWV 进行比较。图1为小冷水站(HKSL)方案(a)的情况,图中上部是最终精密星历、超快速星历和探空数据解算得到的 PWV 序列,下部为最终精密星历和超快速星历计算结果的差值。表1给出了 HKSL 站3个方案最终精密星历和超快速星历计算结果差值($P_{\mathrm{W\_igs}}-P_{\mathrm{W\_igu}}$)的统计情况。

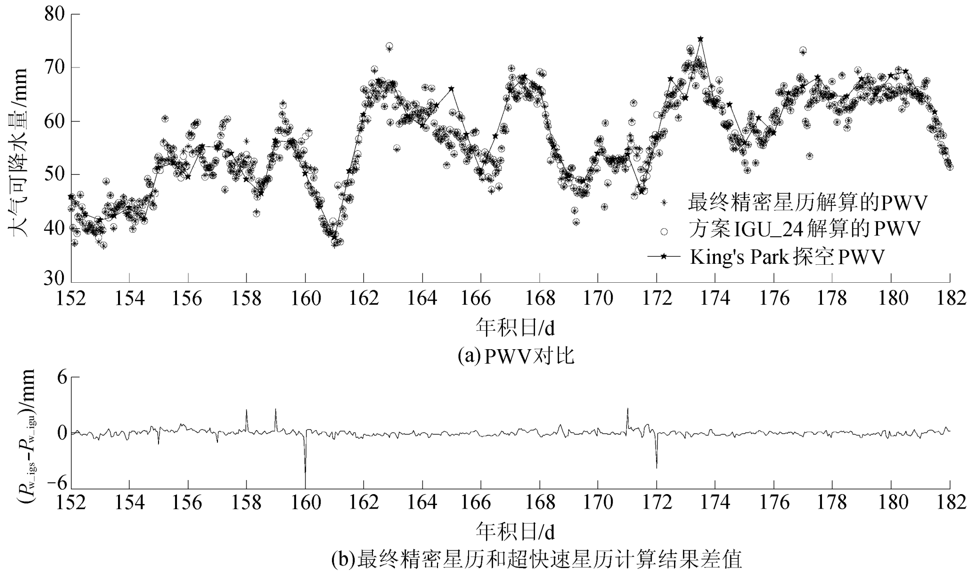


**图 1　方案 IGU_24 与最终精密星历和探空资料解算的 PWV 序列比较**

**Fig. 1　Comparison of PWV time series caculated with scheme IGU_24 for ultra-rapid ephemeris final precise ephemeris, and radiosonde data**

**表 1　最终精密星历和超快速星历计算结果的差值统计**

**Table 1　Difference between PWV data obtained by final precise ephemeris and ultra-rapid ephemeris**　mm

| 方案 | 差值 | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 最小值 | 最大值 | 均值 | 标准差 |
| IGU_24 | −5. 12 | 2. 66 | −0. 033 5 | 0. 392 4 |
| IGU_12 | −5. 60 | 0. 65 | −0. 047 7 | 0. 319 5 |
| IGU_00 | −2. 09 | 2. 06 | −0. 002 6 | 0. 206 1 |

从图 1 和表 1 可看出,HKSL 站 3 个方案中超快速星历、最终精密星历和探空资料解算的 PWV 序列在趋势上基本一致,且超快速星历和最终精密星历的结果在数值上相当接近,计算结果的最大差异不超过 6 mm。而且随着方案中采用的最终精密星历时长的增加,标准差逐渐减小,计算结果的最大差异也减小到 2 mm。进一步绘制各站 3 个方案的均值和标准差柱状图,如图 2 所示(柱状图的高度表示均值,误差棒的半长表示标准差)。由于均值与标准差量级差异较大,为了更好地体现均值的差异,将其扩大 100 倍。同时计算各站 3 个方案中超快速星历与最终精密星历和探空资料解算的 PWV 序列的相关系数和均方根误差 RMS 的均值,结果见表 2。

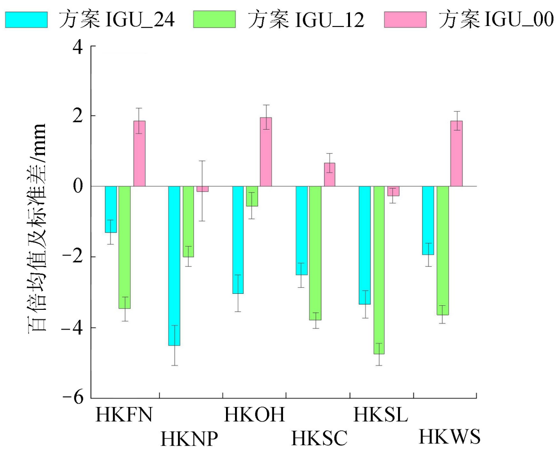


**图 2　各站百倍均值及标准差**

**Fig. 2　One hundred times the mean and standard deviation at each station**

从图 2 可以看出,各站 3 个方案中超快速星历与最终精密星历解算的 PWV 序列的平均偏差在 0. 1 mm 以内,且除 HKNP 和 HKSC 这 2 个测站外,其他各站随着方案中采用的最终精密星历时长的增加,标准差均逐渐减小。由表 2 可知,地基 GPS 的计算结果与探空资料计算结果的相关系数都在 0. 91 以上,RMS 均值在 4 mm 右左,验证了地基 GPS 遥感大气水汽精度的稳定可靠性。各站分别以最终精密星历与超快速星历解算的 PWV 序列的相关系数均在 0. 99 以上,RMS 均值在 0. 4 mm 左右。由此可见,采用超快速星历得到的 PWV 与精密星历结果一致,其精度满足气象预报等实时业务的要求。总之,地基 GPS 技术可精确测定大气层中的水汽含量和可降水量,利用超快速星历可实时连续监测大气层中可降水量的动态变化过程。因此,基于超快速星历估计的PWV为提高预报降水精度和准确

性提供了有力的参考。

## 4 结 语

**a.** 与探空 PWV 相比,地基 GPS 的计算结果具有较强的相关性,验证了地基 GPS 监测大气水汽变化算法的正确性,与常规的探测方法相比具有全天候、实时、连续性等独特优势,为中小尺度天气预报提供有力依据。

**b.** 最终精密星历解算的 PWV 与采用超快速星历解算的 PWV 具有较好的一致性,即使只采用星历精度较低的超快速星历预报部分进行 PWV 解算,亦能满足数值天气预报等实时业务的精度要求。

**c.** 随着方案中采用的精密星历时长的增加,总体上 PWV 序列差值的标准差逐渐减小,可见解算时引入星历精度较高的星历有助于改善 PWV 的精度,但亦存在如 HKNP 和 HKSC 之例外,因此在数值天气预报的实际应用中,及时获取并更新计算用的超快速星历,不仅可以提高结果的精度,而且可以通过多次计算结果的比较,提高数值天气预报的准确性。

**表2 各站相关系数及均方根误差均值**

**Table 2 Average correlation coefficient and root-mean-square error at each station**

| 组合 | 相关系数 $r$ | RMS 均值/mm |
|---|---|---|
| IGU_24 vs. IGS | 0.9986 | 0.4203 |
| IGU_12 vs. IGS | 0.9993 | 0.3026 |
| IGU_00 vs. IGS | 0.9986 | 0.3790 |
| IGU_24 vs. RS | 0.9122 | 4.2584 |
| IGU_12 vs. RS | 0.9173 | 4.2132 |
| IGU_00 vs. RS | 0.9162 | 4.1958 |
| IGS vs. RS | 0.9135 | 4.3031 |

注:IGS 和 RS 分别表示最终精密星历和探空资料的计算结果。

**参考文献:**


[1] 郭洁,李国平. 地基 GPS 探测水汽的发展与气象业务应用[J]. 大地测量与地球动力学,2007,27(专刊):35-42. (GUO Jie, LI Guoping. Ground-based GPS in remote sensing of water vapor: development and application [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2007, 27(Special):35-42. (in Chinese))

[2] BEVIS M,BUSINGER S,CHISWELL S,et al. GPS meteorology-mapping zenith wet delays onto precipitable water[J]. Journal of Applied Meteorlolgy,1994,33:379-386.

[3] DUAN J,BEVIS M,FANG P,et al. GPS meteorology: direct estimation of the absolute value of precipitable water[J]. Journal of Applied Meteorlolgy,1996,35:830-838.

[4] ROCKEN C,van HOVE T,WARE R. Near real-time GPS sensing of atmospheric water vapor[J]. Geophysical Research Letters, 1997,24(24):3221-3224.

[5] TREGONING P,BOERS R,O' BRIEN D,et al. Accuracy of absolute precipitable water vapor estimates from GPS observations [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,1998,103(D22): 28701-28710.

[6] WANG Junjie,HE Xiufeng. Regional PWV estimation using interpolated surface meteorological data from NCEP CFSv2 [C]// SUN Jiadong, JIAO Wenhai, WU Haitao, et al. China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2013 Proceedings. Berlin: Springer Verlag Berlin Heidelberg,2013:229-238.

[7] 徐韶光,熊永良,刘宁,等. 利用地基 GPS 获取实时可降水量[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2011,36(4):407-411. (XU Shaoguang, XIONG Yongliang, LIU Ning, et al. Real-time PWV obtained by ground GPS[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011,36(4):407-411. (in Chinese))

[8] 魏浩瀚,何秀凤. 利用区域 GPS 观测网探测夏季降雨中大气可降水量[J]. 河海大学学报:自然科学版,2011,39(4):454-457. (WEI Haohan, HE Xiufeng. Detection of precipitable water vapor during summer rainfall using regional GPS network[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2011,39(4):454-457. (in Chinese))

[9] FANG P,GENDT G,SPRINGER T,et al. IGS near real-time products and their applications[J]. GPS Solution,2001,4(4):2-8.

[10] 常亮. 基于 GPS 和 NCEP 观测信息的 InSAR 大气延迟改正方法研究[D]. 南京:河海大学,2011.

[11] 宋佩颖,丁晓光. 基于 IGS 超快速星历的高精度实时 GPS 测量[J]. 测绘工程,2009,18(4):17-20. (SONG Peiying, DING Xiaoguang. The application of IGS ultra-rapid ephemeris in high-precision real-time GPS survey[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2009,18(4):17-20. (in Chinese))

[12] IGS Central Bureau. IGS Products[EB/OL]. [2009-07-18]. http://igs.org/components/prods.html.