

文章编号: 2096-1618(2017)06-0577-07

超快速星历的实测信息和预报信息 反演大气可降水量的误差分析

段晓梅^{1,2}, 曹云昌², 马尚昌¹

(1. 成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225; 2. 中国气象局气象探测中心, 北京 100081)

摘要:在近实时观测水汽中,需要精确的卫星星历文件。为了确定 IGU 的实测星历和预报星历对 PWV 的误差影响,采用陆态网 2016 年 GPS 站点的观测数据和 GAMIT 软件,利用从 IGS 中心下载 IGU 的实测星历和预报星历分别反演 PWV ,并以精度最高的 IGF 为标准,确定二者对 PWV 的影响。结果表明:IGU 的实测星历和预报星历的轨道误差为 4.5 cm,造成 PWV 的误差约为 0.09 mm,用两种方法反演的 PWV 在均方差上都小于 0.3 mm,平均偏差不超过 0.06 mm,相关系数达到 99%,说明 IGU 的实测 PWV 和预报 PWV 在变化上有很好的 consistency。以 IGF 为标准,最终星历和 IGU 实测星历的均方根误差约为 0.327 mm,与 IGU 预报星历的均方根误差约为 0.16 mm,使用实测星历比预报星历误差增大 0.167 mm,差别不大,对 PWV 的结果影响较小,表明使用 IGU 的实测星历和预报星历可以满足近实时遥测水汽的需求。

关键词:气象探测技术;大气可降水量;超快速星历;轨道误差;GPS;水汽探测

中图分类号: TN967.1

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcui.2017.06.001

0 引言

GPS、GLONASS、BEIDOU 和 GALILEO 四大卫星导航系统统称为 GNSS,即全球卫星导航系统(global navigation satellite system)^[1],其中,GPS 用于遥感水汽观测在中国已广泛应用。曹云昌、李成才等^[2-3]从不同方面开展了一系列的研究,不但完善了地基 GPS 遥测水汽的技术,同时也为 GPS 技术在中国的本地化发展做出了贡献。水汽在空间大地测量、天气学、大气环境科学等范畴扮演非常重要角色,是气象上非常重要的一个参数,也是大气中时空变化最活跃的成分之一,而生成云和降水必须要有充足的水汽,这对天气和气象变化有显著影响,因此研究水汽也有重要意义,水汽不仅是大气能量传输的重要途径,同时平衡全球的热量交换,对于提高预报模式的结果有决定性影响。运用 GPS 技术遥测大气中的水汽,相比于传统手段具有高精度、高时空分辨率、成本低、不受天气情况影响等优点,其应用研究和应用范围得到极大的发展^[4-5]。

在 GPS 反演大气可降水量(PWV)这一项技术中,为了获得高精度的对流层延迟值,需要提供尽可能精确的卫星星历文件。按照 GNSS 国际服务(the international GNSS service,IGS)中心提供 4 种卫星轨道坐标

的星历文件,精度由低到高分别为广播星历、超快速星历、快速星历和最终星历,其中,最终星历和快速星历属于事后处理星历,广播星历和超快速星历属于预报星历^[6]。Rocken 等提出用预报轨道计算的 GPS/ PWV 的误差比用精密轨道计算的 GPS/ PWV 提高了 0.7 mm,改进 GPS 卫星预报轨道的精度是提高 GPS/ PWV 的一个有效途径。曹云昌等^[2]分析了轨道误差对 GPS 遥测水汽的影响,并与探空比较发现运用精密预报星历能够满足近实时遥测水汽的要求。刘旭春等^[7]通过解算哈尔滨 GPS 跟踪站,结果表明广播星历的轨道误差对 PWV 影响较大,不利于实时预报。IGS 中心从 2000 年起开始提供能实时获取的超快速星历(IGU),以便满足用户的需求,每一个 IGU 文件的轨道弧长是 48 h,前 24 h 为实测的轨道值,后 24 h 为预报的轨道值,IGU 星历文件每天发布 4 次,即 6 h 更新一次,分别在 UTC 时间 3:00,9:00,15:00,21:00 发布,在事后 3 h 获得^[6,8],这就意味着利用超快速星历探测水汽在一定程度上能满足某些用户的需求。

基于 GPS 探测水汽的原理,结合陆态网的原始观测数据,先使用 TEQC 对数据质量进行评估,再使用 GAMIT 软件分别对超快速星历 00 时(即 UTC:21 时)的实测部分和预报部分的观测数据进行处理,并提取试验测站的 PWV ,比较 IGU 星历前后 24 h 对 PWV 的影响。

1 地基 GPS 遥测水汽的原理

鉴于 GPS 卫星在定位中发射的信号在穿过大气层时,受到电离层电子、平流层和对流层大气折射等作用,使信号的传递速度变慢和路径弯曲,从而形成信号在时间上的延迟,引起 GPS 定位误差^[9]。这种延迟往往可以分对流层延迟(ZTD)和电离层延迟。按照电离层延迟与频率的相关性,使用两个频率观测值的线性组合消除,精度可达 mm 级^[10]。而对流层延迟的90 %是由大气中的干空气产生的,称为干延迟或者静力延迟(ZHD),剩余的10 %是由水汽的湿延迟(ZWD)引起的,则大气静力延迟和湿延迟共同组成对流层总延迟。为了求得 PWV,需要先从总延迟中减去静力延迟,将得到的湿延迟与大气可降水量建立比较严格的正比关系,就可以精确地求解大气水汽总量^[11]。

1.1 天顶静力延迟的计算

Elgered 等^[12]在假设流体力学平衡,理想气体的条件下,得到 ZHD 表达式:

$$ZHD = [(0.002279 \pm 0.0000024)] \frac{P_0}{f(\varphi,H)} \quad (1)$$

$$f(\varphi,H) = 1 - 0.00266\cos2\varphi - 0.00028H \quad (2)$$

式中, P_0 为 GPS 接收机高度处的气压(单位: hPa), φ 为测站纬度, H 为观测站点海拔高度(单位: km), 通常地面气压的观测精度一般能达到 0.5 hPa, 所以对 ZHD 的估算精度可达1 mm^[11]。

1.2 大气可降水量 PWV 的计算

从测量得到的天顶总延迟(ZTD)中减去天顶静力延迟(ZHD),就可以得到天顶湿延迟(ZWD),其数值大约为 0 ~ 500 mm。运用式(3)可计算出地基 GPS 遥感水汽的 PWV^[13],即

$$PWV = \Pi \cdot ZWD \quad (3)$$

其中转换因子:

$$\Pi = \frac{10^6}{[R_v(\frac{k_3}{T_m} + k'_2)]} \quad (4)$$

T_m 称作加权平均温度(单位: K), 可以用地面温度计算: $T_m = a + b \cdot T_s$, 式中, T_s 为地面温度。Bevis 等^[13]给出经验系数 $a = 70.2, b = 0.72$; 李建国等^[14]利用中国的探空资料,给出了北京地区的回归系数, $a = 44.05, b = 0.81$ 。

水汽的气体常数:

$$R_v = 461.495 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)} \quad (5)$$

k_3, k'_2 为折射系数,一般都采用 Thayer 提供的值:

$$k_3 = (3.776 \pm 0.014) \times 10^5 \text{ K}^2 \cdot \text{hPa}^{-1} \quad (6)$$

$$k'_2 = k_2 - k_1(\frac{R_d}{R_w}) = 16.48 \text{ K} \cdot \text{hPa}^{-1} \quad (7)$$

$$\text{hPa} = 10^2(\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2})$$

注意单位变换,因 PWV 常取雨量单位 mm,需把湿延迟转换为 mm。

1.3 GPS 水汽测量误差

在对流层总延迟量的观测过程中,会产生多种误差,分别有卫星轨道误差、接收机坐标误差、气压观测误差、多路径效应误差等,总的误差大约有 1.7 mm^[2,6],其中 GPS 轨道误差是遥测水汽的重要误差源,确定各种星历误差对水汽监测的影响,对满足气象实时监测需求具有一定的指示作用。

2 轨道误差对 PWV 的影响

按照 IGS 服务中心提供的星历产品,表 1 列出了几种星历产品的具体轨道精度及采样间隔等详细信息^[15]。

表 1 IGS 卫星星历及轨道估计精度

产品名称	类型	精度	延时	更新	采样间隔
广播星历(BRDC)	轨道	~ 100 cm	实时	--	每天
	钟差	~ 5 ns(RMS)			
超快速星历(IGU 预报部分)	轨道	~ 5 cm	实时	每天 03,09,15,21 时(UTC)	每 15 min
	钟差	~ 3 ns(RMS)			
超快速星历(IGU 观测部分)	轨道	~ 3 cm	实时	每天 03,09,15,21 时(UTC)	每 15 min
	钟差	~ 150 ps(RMS)			
快速星历(IGR)	轨道	~ 3 cm	17 ~ 41 h	每天 17 时(UTC)	每 15 min
	钟差	~ 75 s(RMS)			
最终星历(IGF)	轨道	~ 2.5 cm	12 ~ 18 d	每周四	每 15 min
	钟差	~ 75 ps(RMS)			

通常卫星轨道误差和基线向量的关系可以表示为

$$\mathrm{d}x \approx \mathrm{d}r \times \frac{l}{r}$$

(8)

式中, $\mathrm{d}x$ 为基线向量的误差, l 为基线的长度, $\mathrm{d}r$ 为轨道误差, r 为卫星到测站的距离。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,此误差平均由电离层延迟、对流层天顶干延迟和天顶湿延迟贡献,实际上,湿延迟的影响要比这小,为确保精度取 $1/3$ 作为系数^[15]。则天顶湿延迟可写为

$$ZWD \approx \frac{1}{3} \mathrm{d}x = \frac{1}{3} \mathrm{d}r \times \frac{l}{r}$$

(9)

根据地基 GPS 遥测水汽的基本原理可知,大气水汽含量与天顶湿延迟的关系为

$$PWV = \Pi \times ZWD$$

(10)

式中, Π 为转换系数,可通过地面温度估算,数值约为 0.15 左右,对式(9)、(10)全微分,天顶湿延迟误差 E_{ZWD} 可写为

$$E_{ZWD} \approx \frac{1}{3} \mathrm{d}r \times \frac{l}{r}$$

(11)

大气可降水量误差按式(10)换算可得:

$$E_{PWV} \approx \Pi \mathrm{d}r \times \frac{l}{3r} = 0.05 \mathrm{d}r \times \frac{l}{r}$$

(12)

GPS 卫星轨道的平均高度约为 20200 km,至地面观测站点的最大间隔约为 25000 km,假设轨道误差有 10 cm,对于 1000 km 的基线,所引起的基线向量误差约为 4 mm, ZWD 的误差约为 1.3 mm,转换为 PWV 的误差约为 0.2 mm^[16]。

3 观测数据的获取及准备

在进行 GPS 数据处理前,首先要获取 GPS 观测数据,并进行相应的数据质量检查。文中 GPS 观测数据来自于中国大陆构造环境监测网络(简称:陆态网),

包括北京十三陵(BJSH),黑龙江漠河(HLMH),新疆若羌(XJWQ),云南大姚(YNCX)共 4 个 GPS 站,导航文件和 IGU 文件可以从 IGS 网站上下载,解算时间为 2016 年 10 月 12 日-11 月 10 日,GPS 站采用的接收机类型为 Trimble NETR8,天线型号为 Trimble 59800。

TEQC 由 UNAVCO Facility (美国卫星导航系统与地壳形变观测研究大学联合体)研制的为地学研究 GPS 监测站数据管理服务的公开免费软件,主要功能有格式转换、编辑和质量检核^[17]。得到相应的观测数据后,使用 TEQC 对原始观测数据从数据完整率、多路径效应及周跳数等方面进行质量检查,命令为:teqc+qc-nav *.16n *.16o,针对检查结果汇总 S 文件可查看观测值的相关统计信息,包括采样时间长度、数据采样率、多路径效应影响、观测历元数与周跳数比值等^[18]。由于篇幅有限,表 2 统计了 4 个站点 30 d 的平均结果,每天观测时间长度为 24 h,数据采样率为 30 s。

按照 GNSS 水汽观测规范标准,要求观测数据完整率(合格文件观测历元数与理论历元数的比值) $\geq 93\%$,L1 波段载波相位观测多路径效应 $MP1 \leq 0.5$ m,L2 波段载波相位观测多路径效应 $MP2 \leq 0.5$ m,观测历元数与周跳数比值($o/slps$) ≥ 100 ^[19]。由结果可知,4 个站点的数据利用率(%)均达到 96% 以上,其大小反映了地面接收机采集数据的能力,值越大,说明接收数据的能力越强。 $MP1$ 、 $MP2$ 分别表示 L1、L2 载波多路径效应影响,该值可以反映扼流圈天线对多路径的抑制效果,其值越小,表明抗多路径效应的能力越强^[20],表中各测站的 $MP1$ 、 $MP2$ 均小于 0.5,符合 GNSS 水汽观测规范标准。 $o/slps$ 有时也可以用 $CSR = 1000/(o/slps)$ 表示,该值能够反映出接收机锁星的能力,表 1 中 4 个站点的 CSR 平均值都小于 0.5,值越小说明 GPS 接收机的周跳修复能力越强。由此可见,观测数据质量都符合要求。

表 2 测站统计数据平均值

	#expt	#have	利用率/%	MP1	MP2	o/slps
BJSH	24021.07	23880.73	99.57	0.25	0.24	23880.73
HLMH	24217.53	24513.90	99.90	0.29	0.30	21923.23
XJWQ	24321.00	23498.63	96.60	0.30	0.29	23498.63
YNCX	24590.03	24279.77	98.67	0.28	0.28	4045.70

4 误差分析

4.1 解算方案

从 IGS 中心下载 2016 年 10 月 12 日-11 月 10 日的超快速星历,经数据质量检查合格后分别使用 IGU 的实测星历和预报星历利用 GAMIT 软件对各测站进行分步解算,并每一小时提取一个大气可降水量的值^[21],具体解算方案设置见表 3。解算成功后可查看相应时段下的最终结果文件^[5],其中,单天解标准化均方差 *NRMS* 值(normalized root mean square)是衡量 GAMIT 解算结果质量的一个重要指标^[8],它是表示单时段解算出的基线值偏离其加权平均值的程度,通常 *NRMS* 值越小,基线解算的精度越高,反之,解算精度越低^[14]。一般来说 *NRMS* 值应小于 0.5,理想值应小于 0.3,若大于 0.5 就意味着在解算过程中没有消除周跳,或许某一参数的模型设置有误^[22]。分别使用超快速星历的实测轨道(前 24 h)和预推轨道(后 24 h)数据进行解算,其解算结果精度如图 1 所示。从图 1 中可以发现,二者的 *NRMS* 值变化一致,都在 0.2 左右上下波动,最大值不超过 0.25,由此可得 GAMIT 解算结果质量指标符合要求。

表 3 GAMIT 解算方案表

参数项设置	参数值
Choice of Experiment	BASELINE
Choice of Observable	LC_AUTCLN
Elevation Cutoff	15
Zenith Delay Estimation	YES
Zenith Constraints	0.5
Interval zen	2
MAP	GMF
Zenith Model	PWL
Inertial frame	J2000
Interval zen	2
Antenna Model	AZEL
Yaw Model	YES

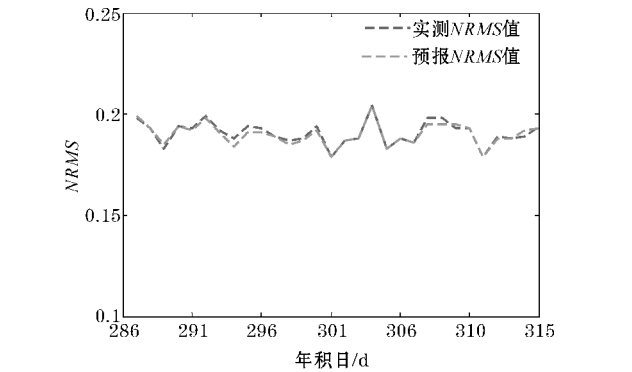


图 1 NRMS 时间分布图

4.2 结果分析

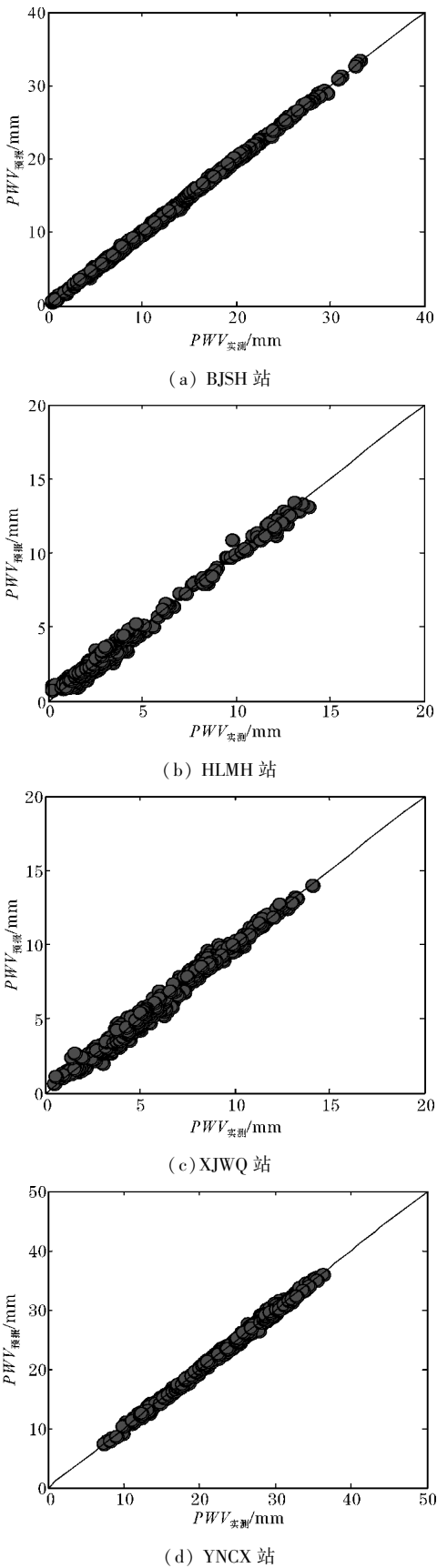


图 2 各站 IGU 实测 PWV 与预报 PWV 散点图

图 2 显示了各站 IGU 实测轨道和预报轨道解算 PWV 的散点图,由图 2 可知,散点近似均匀分布在 $y=x$ 线上,二者反演的 PWV 结果在数值上相当接近,表 4 统计了测站对比分析的结果,表明各站用两种方法反演的均方差都小于 0.3 mm,平均偏差不超过 0.06 mm,二者的相关系数都达到 99 %,说明 IGU 实测的 PWV 和 IGU 预报的 PWV 在变化上有很好的 consistency。表 6 统计了 IGU 实测星历和预报星历的轨道误差,由于篇

幅有限,表中只列出 20 颗卫星的坐标轨道误差(其中第四颗卫星缺失),由表 6 的统计结果可知,卫星的实测轨道与预报轨道之间的坐标误差较小,造成实际的平均轨道误差只有 4.3 cm,根据式(8)~(12)可知,若对于 1000 km 的基线,所引起的基线向量的误差约为 1.78 mm,ZWD 的误差约为 0.59 mm,转换为 PWV 的误差约为 0.09 mm,小于理论上假设的误差值,对 PWV 的产生影响较小。

表 4 各站 IGU 实测轨道和预报轨道反演 PWV 精度结果

站点	样本量	平均偏差/mm	相对方差/%	均方差/mm	相关系数
BJSH	720	0.03	1.18	0.17	0.999
HLMH	720	0.06	6.4	0.28	0.995
XJWQ	720	0.05	4.9	0.32	0.994
YNCX	720	0.02	1.3	0.34	0.998

表 5 IGU 实测星历与预报星历的坐标轨道误差/cm

卫星	X 坐标	Y 坐标	Z 坐标
PG01	1.6	-1.8	-0.4
PG02	-3.6	1.6	-1.6
PG03	1.8	-0.2	0.3
PG05	-2.4	0.3	-5.5
PG06	0.2	-2.4	-1.7
PG07	-1.9	-4.2	2.8
PG08	1.8	0.2	-0.8
PG09	1.4	-1.6	2.3
PG10	2.1	1.9	-3.5
PG11	1	1.7	-3.3
PG12	-6	0.8	3
PG13	1.8	0.8	-1.8
PG14	2.4	-1.9	1
PG15	-1.8	5.5	-7.9
PG16	2.5	-1.7	-7.1
PG17	0.1	1.9	0.9
PG18	3.3	3.3	-2.3
PG19	-1.6	3.1	0.8
PG20	-0.7	-0.9	-3.5

以精度最高的最终精密星历(IGF)为标准^[23],应用 2016 年 10 月 12 日-11 月 10 日各测站的观测资料,利用 GAMIT 软件解算大气可降水量并与 IGU 实测轨道和预报轨道星历解算的大气可降水量进行对比(见表 4),可以看出,最终星历和 IGU 实测星历的平均误差大约为 0.07 mm,均方根误差约为 0.327 mm,与

IGU 预报星历的平均误差大约为 0.03 mm,均方根误差约为 0.16 mm,二者相差不大,满足气象观测的需求,且最终星历计算的 PWV 值总体上略大于 IGU 星历计算的 PWV 值。

表 6 IGF 与 IGU 实测和 IGU 预报星历计算 PWV 的结果比较

站点	样本量	对比方式	平均误差/mm	均方根误差/mm
BJSH	720	IGF 星历与 IGU 实测	0.06	0.209
		IGF 星历与 IGU 预报	0.03	0.118
HLMH	720	IGF 星历与 IGU 实测	0.08	0.293
		IGF 星历与 IGU 预报	0.02	0.104
XJWQ	720	IGF 星历与 IGU 实测	0.07	0.386
		IGF 星历与 IGU 预报	0.02	0.209
YNCX	720	IGF 星历与 IGU 实测	0.09	0.419
		IGF 星历与 IGU 预报	0.07	0.209

5 结论

基于 GPS 遥测水汽的原理和 GAMIT 软件,选取 BJSH、HLMH、XJWQ、YNCX 4 个站点的观测数据,使用 IGU 的实测星历和预报星历分别解算 PWV,并将结果进行对比分析发现:

(1)IGU 的实测星历和预报星历的轨道误差为 4.5 cm,造成 PWV 的误差约为 0.09 mm,小于理论上假设的误差值;

(2)各站用两种方法反演的 PWV 在均方差上都小于 0.3 mm,平均偏差不超过 0.06 mm,二者相关系数都达到 99 %,说明 IGU 实测 PWV 和预报 PWV 在变化

上有很好的-致性,对 PWV 的结果影响较小,满足气象应用的需求。

(3)以精度最高的最终精密星历(IGF)为标准,最终星历和 IGU 实测星历的平均误差大约为0.07 mm,均方根误差约为0.327 mm,与 IGU 预报星历的平均误差大约为0.03 mm,均方根误差约为0.16 mm,使用实测星历比预报星历在均方根误差上增大0.167 mm,差别不大。

(4)由于二者对 PWV 的影响较小,所以在实际数据处理中,若 IGU 实测星历文件缺失,可以选择预报星历代替解算,反之,若预报星历缺失,可以选择实测星历代替解算,在实际应用中可以及时获取 IGU 星历,进而满足近实时探测水汽的需求。

参考文献:

- [1] G Gueroa, J Jones, J Dousa, et al. Review of the state-of-the-art and future prospects of the ground-based GNSS meteorology in Europe[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, 9(11): 125.
- [2] 曹云昌, 方宗义, 夏青. 轨道误差对近实时 GPS 遥感水汽的影响研究[J]. *气象科技*, 2004, 32(4): 229-232.
- [3] 李成才, 毛节泰, 李建国, 等. 全球定位系统遥感水汽总量[J]. *科学通报*, 1999, 44(3): 333-336.
- [4] 张云涛, 程伯辉, 白征东, 等. 应用 GAMIT 软件处理卫星定位数据大气水汽方法的研究[J]. *导航定位学报*, 2014, 2(1): 30-33.
- [5] 王志强, 李军. GAMIT 使用指南[J]. *全球定位系统*. 2002, 27(2).
- [6] 李征航, 丁文武, 李昭. GPS 广播星历的轨道误差分析[J]. *大地测量与地球动力学*, 2008, 28(1): 50-54.
- [7] 刘旭春, 张正禄, 张鹏, 等. GPS 反演大气综合水汽含量的影响因素分析[J]. *测绘科学*, 2007, 32(2): 21-23.
- [8] Choi K K, Ray J, Griffiths J, et al. Evaluation of GPS orbit prediction strategies for the IGS ultra-rapid products[J]. *GPS Solutions*, 2013, 17(3): 403-412.
- [9] 姜英明, 郭金运, 高士民, 等. 区域 CORS 数据自动处理系统[J]. *全球定位系统*, 2016, 41(5): 117-121.
- [10] 韦丽英, 赵建吉. GPS 测量水汽简介及建站要求[J]. *广西气象*, 2006, 27(3): 73-74.
- [11] 付琦琼, 李巾, 张璵. GPS 水汽资料在江西强对流天气预报中的初步应用[J]. *气象与减灾研究*, 2011, 34(3): 36-40.
- [12] Elgered G, Divis J L, Herring T A, et al. Geodesy by radio interferometry: water vapor radiometry for estimation of the wet delay[J]. *Res Geophys*, 1991, 96(B4): 6541-6555.
- [13] Bevis M, Businger S, Chiswell S R, et al. 1994. GPS meteorology: Mapping zenith wet delays onto precipitable water[J]. *J Appl Meteor*, 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(3): 283-292.
- [15] 高旺, 高成发, 潘树国, 等. 基于快速星历的 GAMIT 高精度基线解算研究[J]. *测绘科学*, 2015, 40(2): 22-25.
- [16] 金慧华, 白征东, 过静琚, 等. 地基 GPS 反演水汽影响因素分析[J]. *测绘科学*, 2008, 32(4): 65-67.
- [17] 吕浩, 张友阳, 陈正生, 等. TEQC 及其绘图软件在 GNSS 数据预处理中的改进研究[J]. *海洋测绘*, 2015, 35(2): 69-72.
- [18] 张亦梅, 刘可, 李垠. 应用 TEQC 对湖北省陆态网络连续站的观测数据进行质量分析[J]. *大地测量与地球动力学*, 2011, 31(z2).
- [19] 周梁, 曹云昌, 梁宏, 等. 地基 GPS 水汽监测在人工影响天气中应用[J]. *内蒙古科技*, 2017, 36(2): 351-355.
- [20] 王广海, 高文刚. TEQC 在 GPS 多路径效应中的观测质量分析[J]. *测绘与空间地理信息*, 2012, 35(12): 90-92.
- [21] 岳迎春, 陈春明, 赵雪莲. GPS 数据解算对流层天顶总延迟探讨[J]. *地理空间信息*, 2008, 6(3): 30-31.
- [22] 鄂栋臣, 詹必伟, 姜卫平, 等. 应用 GAMIT/GLOBK 软件进行高精度 GPS 数据处理[J]. *极地研究*, 2005, 17(3): 173-182.
- [23] 何秀凤. 基于超快速星历的数值天气预报可行性研究[J]. *河南大学学报*, 2015, 43(3): 267-270.

Error Analysis of Inversion of Atmospheric Precipitable Water Vapor by Measured and Forecast of Ultra-rapid Ephemeris

DUAN Xiao-mei^{1,2}, CAO Yun-chang², MA Shang-chang¹

(1. College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081, China)

Abstract: Accurate satellite ephemeris files are needed in the NRT water vapor remote sensing. In this paper, in order to determine the influence of measured and forecast of IGU ephemeris on the error of *PWV*, the observed data from Terrestrial GPS network were processed by using the GAMIT software and the *PWV* is retrieved respectively by using the measured and predicted ephemeris files downloaded from IGS website, and the highest accuracy of IGF is used as the standard to determine the impact of the IGU on the *PWV* error. The results show that the orbit error of the measured and the predicted IGU ephemeris is 4.5 cm, resulting in *PWV* error of about 0.09 mm. The mean square error of the *PWV* retrieved by the measured and predicted IGU ephemeris is less than 0.3 mm, and the average deviation is not more than 0.06 mm. Moreover, the correlation coefficient is 99 %, which indicates that the measured *PWV* and forecast *PWV* have a great consistency on the changing trend. Based on the IGF, the mean square error of atmospheric precipitation is about 0.327 mm and 0.16 mm by using the measured and predicted of IGU ephemeris respectively, which has little effect on *PWV* results. Therefore, the IGU ephemeris can meet the requirement of GPS NRT water vapor remote sensing.

Keywords: meteorological detection technology; *PWV*; IGU ephemeris; orbit error; GPS; water vapor detection