

地基 GPS 准实时反演三峡地区 大气可降水量的研究

王贵文¹ 王泽民¹ 杨 剑¹

(1 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘 要:探讨了利用地基 GPS 气象学原理反演大气可降水量 (precipitable water vapor, PWV) 及其变化的可行性。从理论上分析了在缺少地面气象资料时用模型估计气象元素对反演 PWV 的影响,分析了用 IGS 超快速星历代替 IGS 最终精密星历准实时计算 PWV 的可行性。利用三峡地区 13 个监测点连续 48 h 以上的跟踪数据联合国内的几个 IGS 站,使用 GAMIT 软件进行了数据处理。

关键词:地基 GPS;天顶延迟的干分量;天顶延迟的湿分量;大气可降水量

中图法分类号:P228.42

GPS 信号穿过大气对流层时会产生路径延迟,根据气体性质可将延迟分为干分量延迟 (zenith hydrostatic delay, ZHD) 和湿分量延迟 (zenith wet delay, ZWD),而 ZWD 主要由大气中的水汽引起。国际上的许多机构进行了相关的研究,著名的有美国的 GPS/STORM 试验、CLAM 试验,日本的 GPSNET 网气象研究,德国、荷兰也有数次大规模的试验研究^[3]。我国的上海、香港、台湾、北京等地也先后开展了 GPS 气象学的试验,上海天文台、香港理工大学等机构对 GPS 气象学进行了深入的研究。国内外的研究表明, GPS 探测大气水汽含量的精度已经接近水汽辐射计 (WVR) 的精度。本文对地基 GPS 准实时监测三峡地区大气可降水量进行了研究。

1 用模型估计气象元素计算 ZHD 的误差分析

ZHD 可以通过地面实测气象数据和经验模型得到,常用的模型有 Saastamoinen 模型、Hopfield 模型、Black 模型,计算公式分别如下:

$$d_{\text{S}}^{\text{Z}} = 0.227\ 7 \times (P/F(\varphi, H)) \tag{1}$$
$$d_{\text{H}}^{\text{Z}} = 1.552(h - H) \times (P/T) \tag{2}$$
$$d_{\text{B}}^{\text{Z}} = 0.234\ 3 \times (T - 4.12) \times (P/T) \tag{3}$$

式中, d_{S}^{Z} 、 d_{H}^{Z} 、 d_{B}^{Z} 分别表示三模型计算得到的 ZHD; $F(\varphi, H) = 1 - 0.002\ 6 \times \cos 2\varphi - 0.000\ 28 \times H$; $h = 40.082 + 0.148\ 98 \times (T - 273.16)$ 。其中, φ 表示测站纬度 (rad); H 表示测站高程 (km); P 表示气压 (mbar); T 表示温度 (K)。

从式 (1)~式 (3) 可以看出,要得到 ZHD, 必须知道测站的温度、气压等气象元素,而实际操作过程中,由于各种条件的限制,某些测站可能缺少一些气象元素。下面利用其他测站的资料通过数学模型估计缺少的气象元素,并对估计气象元素给计算结果造成的影响进行研究。

在式 (1)~式 (3) 中,假定温度 T 已知,气压 P 对干延迟的影响可以通过误差传播定律得到,则

$$\sigma_{d_{\text{S}}} = \frac{0.227\ 7}{F(\varphi, H)} \sigma_P \tag{4}$$
$$\sigma_{d_{\text{H}}} = \left(0.231\ 2 - \frac{0.952\ 0 + 1.552H}{T} \right) \sigma_P \tag{5}$$
$$\sigma_{d_{\text{B}}} = \left(0.234\ 3 - \frac{0.965\ 3}{T} \right) \sigma_P \tag{6}$$

取比较极端的最为不利的情况,即 $\varphi=0, T=333.16\ \text{K}, H=0\ \text{km}$, 显然,实际的观测中误差系数比上述情况要小,可以得到 $\sigma_{d_{\text{S}}}=0.228\ 6\sigma_P$, $\sigma_{d_{\text{H}}}=0.228\ 3\sigma_P, \sigma_{d_{\text{B}}}=0.231\ 4\sigma_P$ 。

通过以上研究,可以得到在不利情况下的 P 对 ZHD 和 PWV 的影响较小,见表 1。在没有实测地表气压时,通过标准大气模型估计,即

$$P = P_r(1 - 0.000\ 022\ 6(H - H_r))^{5.225} \quad (7)$$

式中, P_r 、 H_r 分别是参考站的地面气压及高程; P 、 H 分别是所求站的气压及高程。

同理,假定测站气压 P 已知, Saastamoinen 模型与温度无关,在 $T = 223.16\text{ K}$ 、 $P = 1\ 200\text{ mbar}$ 、 $H = 5\text{ km}$ 的极端不利情况下,温度对 ZHD 的影响非常小。

表 1 气压对大气干延迟和大气可降水量的影响
Tab.1 Influence of Pressure Error on PWV and ZHD

P/mbar	ZHD/mm	PWV/mm
0.4	0.92	0.15
0.8	1.84	0.30
1.2	2.76	0.45
2.0	4.60	0.75
3.0	6.90	1.13

2 卫星轨道误差对 PWV 的影响

在实际应用中, PWV 的准实时计算比事后处理具有更广泛的应用价值,要实现 PWV 的准实时计算,只能利用预报轨道。在 IGS 提供 IGU 超快速星历之前,预报轨道 IGP 相对于精密轨道只能达到 1 m 左右的精度,为了降低轨道误差对 PWV 计算的影响,有很多种方法,如根据精度指标加权的方法和对部分轨道根数估计进行轨道改进。Ge 等人通过利用精度指标删除坏的卫星信息后,利用加权法再加以约束得到的对流层天顶延迟的中误差小于 6 mm。但是这些方法使用起来很复杂。Ge 的研究表明,卫星的轨道误差在小于 25 cm 时,轨道误差对 PWV 计算的影响可以忽略^[7]。广播星历的精度显然难以满足要求,IGS 最终的综合精密星历大约滞后 2 周,不能用于 PWV 的准实时计算,IGS 发布的超快速星历(Ultra-rapid)能够外推 24 h,宣称轨道精度优于 10 cm。超快速星历可以用于 PWV 的准实时计算,不需要进行复杂的轨道改进。本文分别使用这两种 IGS 星历进行数据处理。

3 试验结果分析

本文选取三峡地区滑坡变形监测的部分基准点作为试验网,对库区的 PWV 进行了反演。整个试验网选取 13 个点,分别为 ZG02、XS03、

BD04、WS05、FJ06、WX07、YY08、KX09、WZ10、FD11、WL12、CS13、JJ15,如图 1 所示。本试验从 2005 年 8 月 10 开始,13 个点同时连续观测 48 h 以上,观测在年积日 222、223、224 三天内进行,各测站均采用 Trimble5700 接收机观测,采样间隔为 30 s。由于笔者收集到的地面气象资料不齐全,无法完全利用实测资料计算干延迟,对于缺少的气象资料采用模型估计。

GPS 数据处理采用 GAMIT/GLOBK 软件,每隔 1 h 设定一个对流层天顶延迟参数,卫星高度截止角为 10°,对测站坐标进行较强的约束。利用区域 GPS 网计算每个测站上空的 PWV 时,原则上可以利用 GAMIT 等双差软件消除各种误差的影响。但是对于距离较近的测站卫星高度角非常接近,卫星信号传播路径基本相同,天顶延迟的相关性很强,解算时,大部分延迟量都被抵消,获得的只是测站间相对的 PWV,所以应使 GPS 网中有大于 500 km 的长基线,以减小相关性。本试验网的 GPS 基准站沿长江分布,在数据处理时引入了上海、武汉、昆明、北京等 4 个 IGS 站。

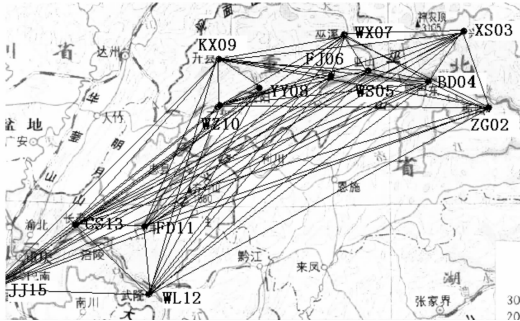


图 1 三峡地区 GPS 气象研究试验网
Fig.1 GPS/Meteorology Research Net in Three Gorges Area

数据处理采用 ITRF2000 全球参考框架,空间惯性系采用 J2000,星历分别采用 IGS 最终综合精密星历和 IGS 超快速预报星历,对流层延迟模型采用 Saastamoinen 模型。

对数据处理的结果进行整理可以得到每个监测站每隔 1 h PWV 变化的时间序列图。限于篇幅,这里仅列出 WS05、FJ06、FD11、WL124 四个测站第 222~224 d 的 PWV 变化时间序列,如图 2 所示。

从图 2 可以看出:① PWV 的变化非常复杂,随机性非常强,这就验证了对流层延迟变化很快,难以模型化。② 使用 IGS 最终星历和 IGS 超快速星历计算得到的 PWV 差异很小,实际数据的对比表明,这种差异在 1 mm 左右,因此,IGS 超

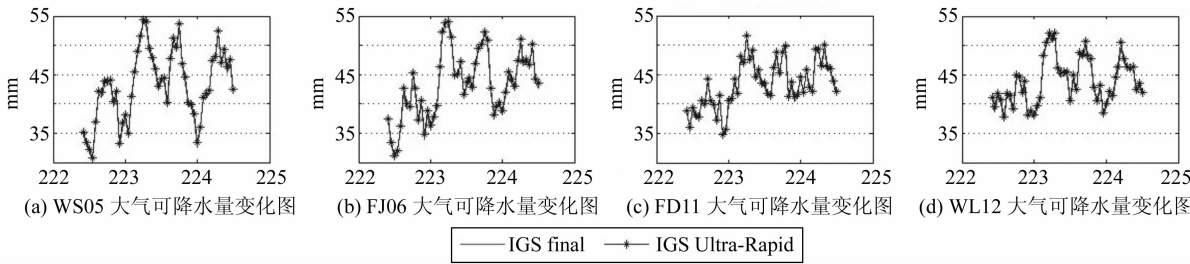


图 2 监测点 PWV 变化曲线

Fig. 2 PWV Lines of Monitoring Points

快速星历能够满足准实时 PWV 计算的需要。
③ 对比各监测站的时间序列变化不难看出,各监测站的 PWV 变化趋势显示出很强的一致性,特别是距离较近的点(如 WS05、FJ06)在整体变化上是一致的,只有局部的微小差异。④ 从整体来看,第 222 d 的 PWV 变化比 223 d、224 d 的变化要快一些,且变化幅度大些,这一点可能与当时的气象条件有关。第 222 d,整个三峡库区的地表气温普遍很高,地表温度的变化导致对流层的强烈对流过程,从第 223 d 下午开始,笔者所监测的 YY08 点太阳热辐射大幅度减弱,其他测站的情况大致与 YY08 一致,所以 223、224 两天的 PWV 的变化要相对弱一些。

4 结 语

- 1) 利用地基 GPS 气象技术可以在较短的时间尺度上灵敏地监测到 PWV 的变化,可以实现准实时的监测,IGS 发布的超快速星历能够满足这种需要。
- 2) 分析表明,用模型推算气象元素在缺少实测气象资料的情况下是一个可行的办法,在实际监测中,尽可能地使用实测资料分离对流层延迟的干分量。
- 3) 本试验由于数据来源有限,试验结果缺乏水汽辐射计(WVR)数据等实测资料外部检核,在实际应用中,GPS 计算得到的 PWV 与 WVR 实测结果之间的系统性差异需要根据实际情况进行

标定,这些工作有待于进一步研究。

参 考 文 献

[1] 陈俊勇. 地基 GPS 遥感大气水汽含量的误差分析[J]. 测绘学报,1998,27(2):113-118
[2] 李征航,徐晓华,罗佳,等. 利用 GPS 观测反演三峡地区对流层湿延迟的分布及变化[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2003,28(4):393-396
[3] 宋淑丽,朱文耀,廖新浩. 地基 GPS 气象学研究的主要问题及最新进展[J]. 地球科学进展,2004,19(2):250-259
[4] Bevis M, Businger S, Chiswell S R, et al. GPS Meteorology: Mapping Zenith Wet Delays onto Precipitable Water[J]. Journal of Applied Meteorology, 1994, 33: 379-386
[5] King R W, Bock Y. Documentation for the GAMIT GPS Analysis Software[R]. Massachusetts Institute of Technology, University of California, 2002
[6] 章红平,刘经南,朱文耀,等. 利用地基 GPS 技术反演武汉地区大气可降水量[J]. 天文学进展,2005,23(2):169-179
[7] Ge M, Calais E, Haase J. Reducing the Satellite Orbit Error Effects in Near Real-Time GPS Zenith Tropospheric Delay Estimation for Meteorology[J]. Geophysics Research Letters, 2000, 27: 1 915-1 918

第一作者简介:王贵文,博士生。现主要从事 GNSS 导航与定位理论及其在地球动力学中的应用研究。
E-mail: gwwang80@163.com

Ground-Based GPS Nearly Real-Time Inversion of Precipitable Water Vapor over Three Gorges Area

WANG Guiwen¹ WANG Zemin¹ YANG Jian¹

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: The feasibility of precipitable water vapor distribution and variation with ground-

参 考 文 献

[1] 王慧,吴云东,张永生. 面阵 CCD 数字航测相机影像几何拼接误差模型与分析[J]. 测绘学院学报, 2003,20(4):257-262

[2] 林宗坚,宣文玲,孙杰,等. 由小面阵 CCD 组合构成宽角航空相机[J]. 测绘科学, 2005,30(1):94-98

[3] Heier H, Hinz A. Results from the Digital Modular Camera DMC [C]. ASPRS, Washington D C, USA, 2002

[4] Hinz A, Dörstel C, Heier H. DMC: the Digital Sensor Technology of Z/I Imaging[C]//Fritsch D, Spiller R. Photogrammetric Week 2001. Heidelberg: Wichmann Verlag, 2001:93-103

[5] Heier H, Kiefner M, Zeitler W. Calibration of the Digital Modular Camera DMC[C]. FIG 22nd Inter-

national Congress, Washington D C, USA, 2002

[6] Zeitler W, Dörstel C, Jacobsen K. Geometric Calibration of the DMC: Method and Results[C]. ASPRS, Denver, USA, 2002

[7] Hinz A, Dörstel C, Heier H. Digital Modular Camera: System Concept and Data Processing Workflow [C]. IAPRS, Amsterdam, 2000

[8] 朱述龙,钱曾波. 遥感影像镶嵌时拼接缝的消除方法[J]. 遥感学报,2002,6(3):183-187

[9] 张永红,林宗坚,张继贤. 基于匹配与平差的镶嵌方法[J]. 中国图像图形学报,2001,6(4):338-342

第一作者简介:潘俊,博士生。现主要从事立体无缝影像数据库、影像融合、影像恢复及质量评价等方面的研究。
E-mail:hero_pj@126.com

A Multi-scale Radiometric Re-processing Approach for Color Composite DMC Images

PAN Jun¹ WANG Mi¹

(1 State Key Laboratory for Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: On the basis of analyzing the characters and causes of such phenomenon, a multi-scale radiometric re-processing approach to improve the quality of images is proposed. The approach employs a multi-scale adjustment scheme and can locate the exact position of seam-line and color transition area automatically. Experimental results indicate that the proposed approach is feasible and can improve the quality of images effectively.

Key words: digital mapping camera images; radiometric; post-processing; multi-scale

About the first author: PAN Jun, Ph.D candidate, majors in stereo seamless image database, image fusion, image restoration and quality evaluation.

E-mail: hero_pj@126.com

+++++

(上接第 763 页)

based GPS meteorology is discussed, the influence of meteorological measurements errors using interpolated surface meteorological data is analyzed when meteorological data is absent. The feasibility of computing PWV with IGS ephemerides is discussed. With 48 hours continuous GPS monitoring data of 13 points, the PWV time serials are extracted out. When processing the GPS data, the GAMIT software is used combined with some IGS stations in China.

Key words: ground-based GPS; ZHD;ZWD;PWV

About the first author: WANG Guiwen, Ph.D candidate,majors in the theory of GNSS navigation and its application in geodynamics.
E-mail: gwwang80@163.com