

文章编号: 0253 - 9993 (2006) 06 - 0781 - 04

区域 GPS 网检测水汽量的应用研究

王 勇^{1,2,4}, 柳林涛¹, 郝晓光¹, 肖建华³, 王厚之³, 许厚泽¹

(1. 中国科学院 测量与地球物理研究所, 湖北 武汉 430077; 2. 河南理工大学 测绘与国土信息工程学院, 河南 焦作 454000; 3. 武汉市勘测设计研究院, 湖北 武汉 430022; 4. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘 要: 针对武汉地区 GPS 气象网进行了两方面的研究, 首先是武汉地区 GPS 气象网的水汽含量的可靠性研究, 将 GPS 水汽含量与无线电探空数据比较, 得到两者差值的均方根为 4.64 mm, 相关系数为 0.951; 其次是独立区域 GPS 网的对流层延迟研究. 通过 3 个网外辅助站的对流层延迟与无网外辅助站的对流层延迟的比较, 经过线性回归分析, 推导了无网外辅助站对流层延迟的修正模型, 其精度可以达到 4.24 cm. 该模型为无网外辅助站对流层延迟的解算提供了一种新的方法, 可以减少网络维持的费用和 GPS 解算对流层天顶延迟的时间.

关键词: 连续运行卫星定位服务系统; 水汽含量; 对流层延迟; 无线电探空

中图分类号: P406 **文献标识码:** A

Application study of the precipitable water vapor with regional GPS network

WANG Yong^{1,2,4}, LIU Lin-tao¹, HAO Xiao-guang¹, XIAO Jian-hua³, WANG Hou-zhi³, XU Hou-ze¹

(1. Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China; 2. School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 3. Wuhan Geotechnical Engineering and Surveying Institute, Wuhan 430022, China; 4. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: There were two applications about the GPS meteorology network in Wuhan region. Firstly it was the reliable research of precipitable water vapor (PWV) of the GPS meteorology network in Wuhan region. With the comparison of GPS precipitable water vapor and the data of radiosonde, the root mean square was 4.64 mm and the correlation coefficient was 0.951. Secondly it was the study of the Zenith Tropospheric Delay (ZTD) of independent regional GPS network. With the comparison between ZTD of three auxiliary stations and ZTD of none auxiliary stations, it analyzed the two ZTD with the method of linearity regression and concluded the modify model of ZTD with none auxiliary stations, which the precision amounts to 4.24 cm and can be used to GPS meteorology. With the modify model of ZTD we can apply a new method for ZTD calculation of none auxiliary stations which can decrease the fee of the network and calculated time of GPS ZTD.

Key words: GPS continuous operational reference system; precipitable water vapor (PWV); zenith tropospheric delay; radiosonde

我国地处东亚季风区, 是世界上多旱涝灾害地区. 每年洪涝受灾面积和成灾面积占全国受灾面积和成灾面积总数的 47% ~ 90%^[1]. 1949 年以来, 水灾已成为我国最重要的自然灾害之一, 导致的经济损失也最严重. 引发水灾的重要原因为暴雨的发生. 暴雨对人类的危害之一是造成山洪爆发, 江河泛滥, 形成暴

收稿日期: 2006-06-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40574009); 中国科学院百人计划资助项目

作者简介: 王 勇 (1978-), 男, 江西宁都人, 博士研究生. E-mail: wangyong@asch.whigg.ac.cn

雨洪水。矿区每逢暴雨，往往山洪爆发。山洪夹带大量泥沙、石块和煤块，使得山体、植被严重被破坏，导致破坏面延伸到自然保护区缓冲带，采空区沙漠化加速，这给煤矿和当地人民造成了严重的经济损失和不必要的麻烦。因而，气象预报尤其是对暴雨的预报对于煤炭行业来说也是不可少的。

相对于无线电探空仪、微波辐射计、卫星观测等常规方法 GPS技术应用于探测地球大气中的水汽具有以下优点：时间分辨率高，精度高，仪器价格低廉，全天候观测等。水汽随时空的变化对气象预报特别是水平尺度 100 km 左右、生命史只有几个小时的中小尺度灾害性天气（暴雨、冰雹、雷雨、龙卷风等）的监视和预报有特别重要的意义^[2,3]。将地基 GPS监测的连续水汽含量（precipitable water vapor, PWV）同化到数值天气预报模式中，也可提高数值预报模式初始场的精度。30 min甚至更短的采样率使得 GPS-PWV 特别适合为快速推断恶劣的雷暴雨天气提供资料。为了更加充分利用现有的连续运行卫星定位服务系统资源和服务于短期中小尺度灾害性天气的监视和预报，很有必要对现行的连续运行卫星定位服务系统进行 GPS气象学的研究。

GPS反演可降水量的过程如下：计算对流层延迟。在载波相位观测方程^[4]中将对流层延迟作为未知参数，在解算结果中将对流层延迟作为 GPS处理结果的改正值；分离出对流层湿延迟，根据测站大气压和测站位置坐标采用干延迟模型^[5-7]计算干延迟，对流层延迟与干延迟差值即为湿延迟；计算可降水量。通过湿延迟与可降水量之间的函数关系^[6-8]可以求出可降水量。

本文针对武汉地区 GPS气象网进行了两方面的研究：GPS水汽含量的可靠性研究及与实际降雨的比较；独立区域 GPS网的对流层延迟研究。

1 GPS水汽含量的可靠性研究

为了武汉地区 GPS气象网的正常运行与使用，首先需要对该网 GPS水汽含量的可靠性进行检验。本文对无线电探空水汽含量、武汉地区逐时实际降雨量与 GPS水汽含量进行比较，根据比较结果来分析 GPS水汽含量的可靠性。

GPS水汽含量的获取首先要求得 GPS对流层延迟，再利用大气压、温度数据根据一定的模型转换为水汽含量。对流层延迟的解算利用武汉地区 GPS气象网 2005年第 244~326日（年积日）的 GPS测站数据，采用高精度定位定轨软件 GAM II和国际 GPS服务（international GPS service, IGS）精密星历、计算方式采用松弛解模式（RELAX）解算出测站天顶对流层延迟，逐天解算。GPS数据的采样间隔为 30 s，每天的观测时间为通用协调时间（universal time coordinated, UTC）00 00—24 00。在用 GAM II处理 GPS数据时，基线长度应长于 500 km，这样得到的各测站的湿延迟是独立的估计值；否则，结果会有偏差，这个偏差对于整个 GPS网来说是一个常数（时间函数，与空间无关），从而得到的湿延迟为测站间的相对估计值^[3,6,9-11]。为了使求解出来的对流层延迟为独立的估计值，本研究添加了北京房山、上海佘山、拉萨 3个 IGS站，与武汉地区 GPS气象试验网的 GPS数据一起解算，这样得到的对流层延迟为独立估计值。

GPS数据处理完成后，对流层延迟可以从解算结果中提取出来，利用 Saastmoinen模型结合气压数据、测站坐标可以算出对流层干延迟，对流层延迟与干延迟作差得到湿延迟，经过转换可以得到水汽含量。为了检验 GPS水汽含量的可靠性，选取了 WHCD和 WHDH两站的 GPS水汽含量作为研究对象，将 GPS水汽含量与无线电探空水汽含量进行比较，如图 1所示。

由图 1可知，每一次降雨过程都会伴随有 GPS水汽含量和无线电探空水汽含量的曲线到达一个峰值，这说明 GPS水汽含量的变化可以为实际降雨的预报提供参考。在 GPS水汽含量与无线电探空的比较中，可以发现两者

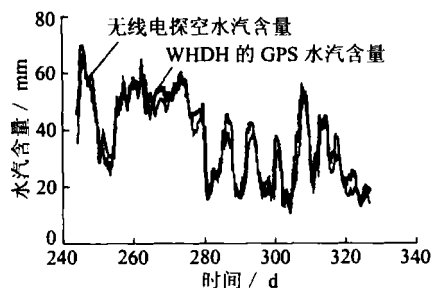


图 1 GPS水汽含量与无线电探空水汽含量的比较

Fig. 1 The comparison of GPS/PWV and radiosonde/PWV

在数值上非常接近, 在发展趋势上也一致. 计算两者间的均值、均方根和相关系数, 结果如下: WHDH - Radiosonde, 均值为 1.7 mm, 均方根为 4.64 mm, 相关系数为 0.95; WHCD - Radiosonde, 均值为 -1.4 mm, 均方根为 5.37 mm, 相关系数为 0.94. 这说明 GPS水汽含量与无线电探空水汽含量非常吻合, 也证明了武汉地区 GPS气象网 GPS水汽含量的可用性.

2 独立区域 GPS网的对流层延迟研究

在利用双差技术软件 GAM II解算区域 GPS气象网每个测站上空的水汽含量时, 可以把卫星钟差影响消除掉. 但对于较近的两个测站, 卫星高度角非常接近, 卫星信号传输到测站的路径基本相同, 大气延迟也基本相同, 天顶延迟的相关性很强. 在利用双差技术解算时, 获得的水汽含量为测站间的相对水汽含量, 不能准确计算出各测站上空的绝对的水汽含量值. 为了获得区域 GPS网各测站的水汽含量的绝对值, 方法有两种: 加入水汽辐射计 (water vapor radiometer) 辅助求出测站水汽含量; GPS网中有长于 500 km 的长基线以减少其相关性.

文献 [2, 3] 中探讨了最佳网外长距离辅助站的个数, 认为 3 个网外辅助站可以达到解算绝对 GPS水汽含量值. 本文针对武汉地区 GPS气象网的数据, 对加入 3 个长距离网外辅助站和不加网外辅助站的 GPS对流层延迟进行了比较, 以武汉地区 GPS气象网中 WHDH 站为例, 如图 2 所示.

以 3 个网外长距离辅助站为标准, 不加入长距离网外辅助站的武汉地区 GPS气象网对流层延迟的计算结果与加入 3 个网外辅助站的结果存在一个系统偏差, 两者的变化趋势比较一致. 经过计算, 两曲线之间差值的均值为 10.13 cm, 均方根为 4.86 cm, 相关性达到了 0.859. 由于同一测站的气象要素一致, 算出的静力学延迟相同, 湿延迟即为对流层延迟与静力学延迟的差值, 按照 0.15 的转换关系转换为水汽含量, 可以发现两条曲线之间的水汽含量差值的均值为 11.9 mm, 均方根为 7.3 mm. 两者之间存在一个较大的系统差.

从图 2 可以看出, 无网外辅助站的对流层延迟与 3 个网外辅助站的对流层延迟变化趋势一致, 存在一个系统差. 不需网外辅助站, 经过一定的转换, 将无网外辅助站的对流层延迟转换为与加入 3 个网外辅助站后结果相一致的对流层延迟, 从而大大减少了网络维持的费用和 GPS解算对流层天顶延迟的时间.

由于无网外辅助站对流层延迟曲线与 3 个网外辅助站对流层延迟曲线之间具有很好的相关性 (相关性超过了 0.85), 因而可以对两者进行线性回归分析. 由于只包含一个自变量的回归方程, 因而假定回归方程^[12]为

$$y = a_0 + a_1 x, \quad (1)$$

式中, y 为 3 个网外辅助站的对流层延迟; a_0, a_1 为未知的回归参数; x 为无网外辅助站的对流层延迟.

根据回归分析理论, 结合无网外辅助站对流层延迟与 3 个网外辅助站对流层延迟数据, 可以求出无网外辅助站的对流层延迟转换模型为

$$D_{ZT} = 0.750D_{ZT0} + 0.713, \quad (2)$$

式中, D_{ZT} 为修正后的对流层延迟, m; D_{ZT0} 为无网外辅助站的对流层延迟, m.

根据得到的对流层延迟转换模型和无网外辅助站的对流层延迟数据, 可以计算出修正后的对流层延迟, 将该对流层延迟与无网外辅助站的对流层延迟进行比较, 如图 3 所示. 由图 3 可以看出, 修正后的对流层延迟与 3 个网外辅助站的对流层延迟在数值上与 3 个网外辅助站的对流层延迟接近, 曲线变化趋势也基本一致. 计算两者之间的均值、均方根和相关系数分别为 1.5 mm, 4.24 cm, 0.859. 这样修正后的对

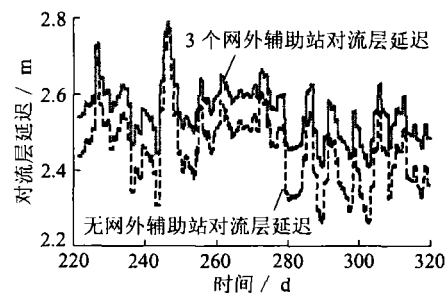


图 2 3 个网外辅助站与无网外辅助站的对流层延迟比较

Fig. 2 The comparison between ZTD of three auxiliary stations and ZTD of none auxiliary stations

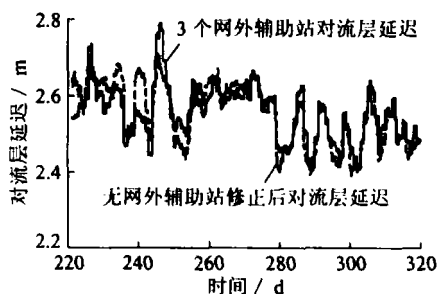


图 3 3个网外辅助站与无网外辅助站修正后的对流层延迟比较

Fig. 3 The comparison between modified ZID of none auxiliary stations and ZID of three auxiliary stations

(2) 通过 3个网外辅助站的对流层延迟与无网外辅助站的对流层延迟的比较, 经过线性回归分析, 推导了无网外辅助站对流层延迟的修正模型, 与 3个网外辅助站的对流层延迟比较, 该模型的精度可以达到 4.24 cm, 足以满足 GPS气象的应用. 该模型为无网外辅助站对流层延迟的解算提供了一种新的方法, 可以减少网络维持的费用和 GPS解算对流层天顶延迟的时间.

感谢湖北省气象局王海军、武汉市勘测设计研究院李江卫、黄兵杰提供无线电探空资料和 GPS数据!

参考文献:

- [1] 张小玲, 陶诗言, 张顺利. 长江流域梅雨锋暴雨灾害研究 [M]. 北京: 气象出版社, 2004. 3~5.
- [2] 谷晓平. GPS水汽反演及降雨预报方法研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
- [3] 宋淑丽. 地基 GPS网对水汽三维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.
- [4] 周忠谟, 易杰军, 周琪. GPS卫星测量原理与应用 [M]. 北京: 测绘出版社, 1999. 129~130.
- [5] Businger S, Chiswell S R, Bevis M. The promise of GPS in atmospheric monitoring [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1996, 77: 5~18.
- [6] 曲建光. GPS遥感气象要素的理论与应用研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2005.
- [7] Emardson T R, Elgered G. Three months of continuous monitoring of atmospheric water vapor with a network of GPS receivers [J]. J. Geophys Res, 1998, 103 (D2): 1 807~1 820.
- [8] Liou YueAn, Huang Chengyung, Teng Yutun. Precipitable water observed by grounded-based GPS receivers and microwave radiometry [J]. Earth Planets Space, 2000, 52: 445~450.
- [9] Duan J, Bevis M, Fang P. et al. GPS meteorology: direct estimation of the absolute value of precipitable water [J]. J. Appl Meteorol, 1996, 35: 830~838.
- [10] 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 (4): 393~396.
- [11] James H Foster. GPS meteorology and the phenomenology of precipitable water [D]. Hawaii: Hawaii University, 2002.
- [12] 刘大杰, 陶本藻. 实用测量数据处理方法 [M]. 北京: 测绘出版社, 2000. 1~3.

流层延迟在精度上与加入 3个网外辅助站的对流层延迟相同.

该模型的确立, 对于无网外辅助站的区域 GPS网确定独立的对流层延迟具有很好的价值.

3 结 论

(1) 武汉地区 GPS水汽含量与无线电探空水汽含量的比较, 两者差值的均方根为 4.64 mm, 相关系数为 0.95, 这说明了武汉地区 GPS网 GPS水汽含量可以满足气象应用的要求.