

文章编号: 1004-4965 (2007) 05-0510-05

区域 GPS 网对流层延迟直接推算可降水量研究

王勇^{1,2}, 刘严萍¹, 柳林涛², 王宇亮¹, 许厚泽²

(1. 河北理工大学交通与测绘学院, 河北 唐山 063009;
2. 中科院测量与地球物理研究所, 湖北 武汉 430077)

摘 要: 针对武汉地区 GPS 气象网资料进行 GPS 对流层延迟直接推算可降水量的研究。推导了对流层延迟直接推算可降水量的模型, 并对模型结果进行检验。从武汉东湖站 GPS 对流层延迟与无线电探空可降水量的比较中可知, 两者具有很好的相关性, 相关系数达到 0.931; 由该站对流层延迟转换的可降水量与无线电探空可降水量的比较可得, 均方根为 4.45 mm, 相关系数为 0.905, 对流层延迟转换的可降水量与 GPS 可降水量的均方根为 2.23 mm, 相关系数为 0.988。说明在没有气象数据的地区, 对流层延迟直接推算的可降水量可以作为气象短期预报的参考依据。

关 键 词: 对流层延迟; 可降水量; GPS 气象网

中图分类号: P412.13

文献标识码: A

1 引 言

水汽随时空的变化对气象预报特别是水平尺度约 100 km、生命史只有几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^[1-2]。将地基 GPS 监测的连续 PWV (Precipitable Water Vapor, 可降水量)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 分钟甚至更短的采样率使得 GPS 可降水量特别适合为快速推断恶劣的雷暴雨天气提供资料。

GPS 气象学(GPS-Meteorology)1992 年由 Michael Bevis 提出。地面 GPS 探测大气基本原理^[3]是: 综合各种技术, 得到精确站坐标和精密 GPS 卫星轨道(由 IGS 分析中心解算出), 反求噪声的大气效应(其中主要是湿大气影响), 并作为气象研究中的有用信号, 与气象参数相联系, 得到可降水量(气候研究和天气预报中很重要的参数)。GPS 反演可降水量的过程是: (1) 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, 在解算结果中对流层延迟作为 GPS 处理结果的改正值得到。

(2) 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^[3, 5]计算干延迟, 对流层延迟与干延迟差值即为湿延迟。(3) 计算可降水量。通过湿延迟与可降水量之间的函数关系^[5-6]求出可降水量。

在 GPS 反演的湿延迟、可降水量的可信度方面, 很多学者对其与水汽辐射计、无线电探空数据进行比较^[6-10], 得到了 GPS 可降水量可以达到与水汽辐射计、无线电探空接近的精度, 并可进行可降水量的预报。本人在对武汉地区 GPS 气象网 GPS 数据处理时, 分别采用了精密星历和快速预报星历计算对流层延迟, 发现两者结果数值基本一致, 相关性也达到 99%^[11], 说明 GPS 解算中星历的影响不是很大。

对流层延迟与可降水量具有很好的相关性, 在缺少地面气象数据的时间段或没有地面气象数据的测站上, 可以利用 GPS 对流层延迟直接推算可降水量, 为气象短期预报提供参考依据。曲建光^[5]利用 GPS 可降水量的变化与对流层延迟的变化推算了对流层延迟转换可降水量的模型, 以此模型结果推算的可降水量与湿延迟推导的可降水量进行比较, 得到两者的均方根为 1.7 mm。

本文通过无线电探空可降水量与 GPS 对流层延迟的比较, 利用线性回归和最小二乘法推导了对流层延迟直接推算可降水量的模型。由此模型推算的可降水量与无线电探空和 GPS 的可降水量的比较, 验证模型的精度。

2 武汉地区 GPS 气象网简介

武汉地区 GPS 气象网主要由 8 个 GPS 测站组成(图 1), 分别设在汉口、东湖、汉南、新洲、蔡甸、黄陂、

收稿日期: 2006-05-19; 修订日期: 2006-12-31

基金项目: 国家自然科学基金(40574009); 中国科学院百人计划项目; 河南省重点科技攻关项目(072102360054)共同资助

作者简介: 王勇, 男, 江西宁都人, 博士, 硕士生导师, 研究方向: GPS 数据处理和 GPS 气象学。E-mail: wangyongjz@126.com

九峰、咸宁，其中前 6 个 GPS 测站于 2005 年 7 月正常运行，咸宁于 2005 年 12 月正常运行。由于本文处理的 GPS 数据为 2005 年 9~11 月的，故本文主要对前 6 个 GPS 测站组成的网络进行处理，GPS 测站基线最长为 91 371.49 m，最短为 7 719.707 m，平均为 48 100 m。

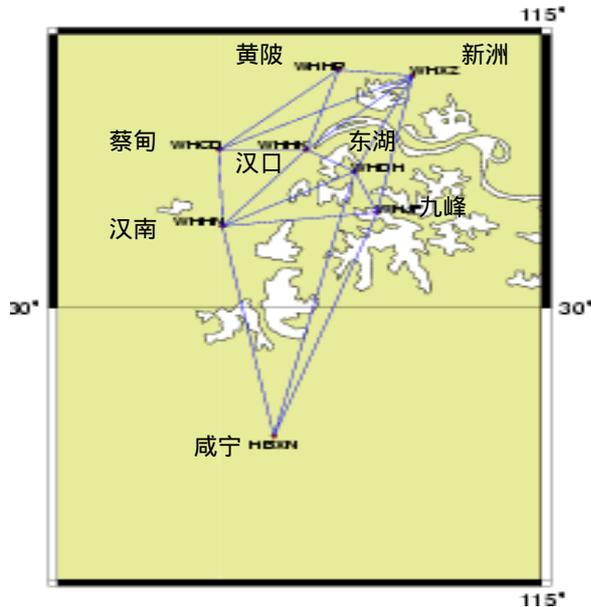


图 1 武汉地区 GPS 气象网

3 GPS 对流层延迟与无线电探空的降水量的比较

在缺少地面气象数据的时段或没有地面气象数据的测站上，GPS 对流层延迟直接推算可降水量是很有意义的工作。为获得 GPS 对流层延迟与无线电探空可降水量之间的关系，首先要对这两个系列的数据进行比较。

利用武汉地区 GPS 气象网 2005 年第 244~326 日（年积日）的 GPS 数据，采用高精度定位定轨软件 GAMIT 和精密星历、计算方式采用松弛解模式解算出对流层延迟，逐天解算。GPS 数据的采样间隔为 30 s，每天观测时间为 UTC 时间 00:00~24:00。在用 GAMIT 处理 GPS 数据时，基线长度应大于 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），从而得到的对流层延迟为测站间的相对估计值^[2, 5, 12-14]。为了使求解出来的对流层延迟为独立的估计值，本研究将北京房山（BJFS）、上海（SHAO）、拉萨（LHAS）3 个 IGS 站，与武汉地区 GPS 气象网数据联合解算，这样得到的对流层延迟为独立估计值。根据湖北省气象局提供的武汉地区无线电探空资料（2005 年 244~326 日），我们可以计算出在该时间段内的无线电探空可降水量。

对流层延迟可以从 GAMIT 软件解算结果中直接提取出来，结合武汉地区无线电探空可降水量，对武汉地区

GPS 气象网内的 WHCD（蔡甸）、WHDH（东湖）、WHHP（黄陂）、WHXZ（新洲）4 个测站的对流层延迟和无线电探空可降水量序列进行比较（图 2，见 512 页）。图 2 中黑色、蓝色、青色、紫色曲线分别代表 WHCD（蔡甸）、WHDH（东湖）、WHHP（黄陂）、WHXZ（新洲）4 个测站的对流层延迟变化，红色曲线代表武汉站的无线电探空的降水值。由图可以看出，4 站的对流层延迟与无线电探空的降水值在数值上大小并不相等，但两者的变化曲线具有很高的—致性，对流层延迟的变化可以较好地反映降水量的变化。分别将无线电探空可降水量与 WHCD、WHDH、WHHP、WHXZ 4 个测站的对流层延迟进行比较，得到相关系数见表 1。由表 1 和图 2 可得出，对流层延迟与可降水量具有很好的相关性（超过 90%），在缺少地面气象数据的时段或没有地面气象数据的测站上，可以利用 GPS 对流层延迟直接推算可降水量，为气象学短期预报提供参考依据。

表 1 4 站 GPS 对流层延迟与武汉站无线电探空的降水量的相关系数

站名	WHCD (蔡甸)	WHDH (东湖)	WHHP (黄陂)	WHXZ (新洲)
相关系数	0.9186	0.9334	0.9268	0.9319
样本数/个	160	160	160	160

4 对流层延迟直接推算可降水量

为了实现对对流层延迟直接推算可降水量，可以利用对流层延迟与无线电探空可降水量之间的关系推导出其转换模型。由于无线电探空资料时间为 2005 年 244~326 日，共 83 天数据，为了检验对流层延迟与降水量的转换模型转换的可靠性，需要用无线电探空可降水量与其比较。采用 244~284 日（共 41 天）的无线电探空数据用于建立转换模型，285~326 日（共 42 天）的无线电探空资料用于结果验证。

根据线性回归理论和最小二乘法，结合 WHDH（东湖）测站的对流层延迟数据和武汉无线电探空可降水量，可以求出该站的对流层延迟（ZTD）转换可降水量模型，即： $PWV = -333.055 + 0.147 \times ZTD$ ，其中 PWV，ZTD 单位均为 mm。为了对对流层延迟转换降水量的模型进行精度验证，利用实际探空资料和模型推算的可降水量（数据时间为 285~326 日），绘制点聚图（图 3）来说明两者之间是否存在线性关系（图中横轴为探空可降水量，纵轴为对流层延迟推算的可降水量，单位均为 mm）。由图 3 可以说明，探空资料与对流层延迟推算的可降水量之间有明显的线性关系。为了检验对流层延迟转换降水量的模型的可靠性，拟利用对流层延迟模型直接推算的可降水量、由湿延迟转换的可降水量（以下简称 GPS 可降水量）和无线电探空可降水量三者相互比较。

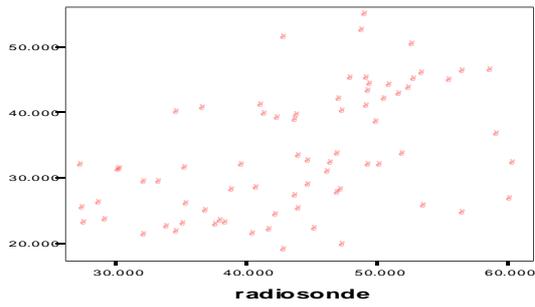


图 3 东湖站对流层延迟推算的可降水量与武汉站探空可降水量点聚图 横轴为探空可降水量, 纵轴为对流层延迟推算的可降水量, 单位为 mm。

采用武汉地区 GPS 气象网 2005 年的 285 ~ 326 日的对流层延迟结果, 采用对流层延迟与可降水量的转换模型, 求出相应的可降水量值。将这些可降水量值与 GPS 可降水量、无线电探空可降水量进行比较 (图 4), 分析对流层延迟转换可降水量的模型的准确度。图 4 中黑色、蓝色、红色曲线分别代表对流层延迟转换的、GPS 和无线电探空的可降水量。3 种曲线的变化趋势一致, 它们之间的均值、绝对值均值、均方根、相关系数结果见表 2。

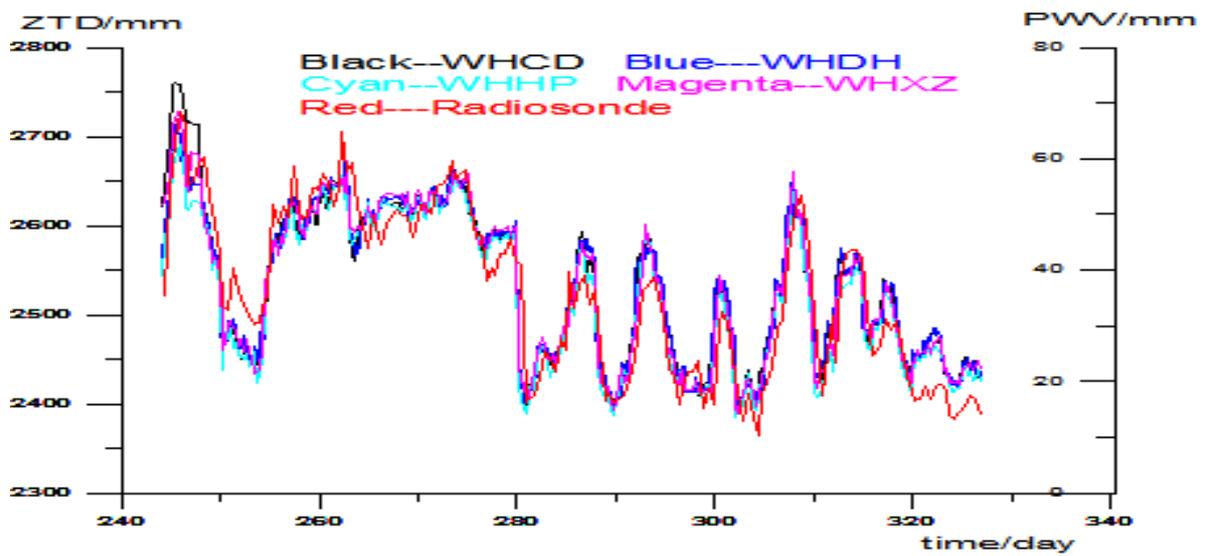


图 2 4 站的 GPS 对流层延迟与武汉无线电探空可降水量的分布 黑色、蓝色、青色、紫色曲线分别代表 WHCD (蔡甸)、WHDH (东湖)、WHHP (黄陂)、WHXZ (新洲) 4 个测站; 红色曲线代表武汉站的无线电探空。

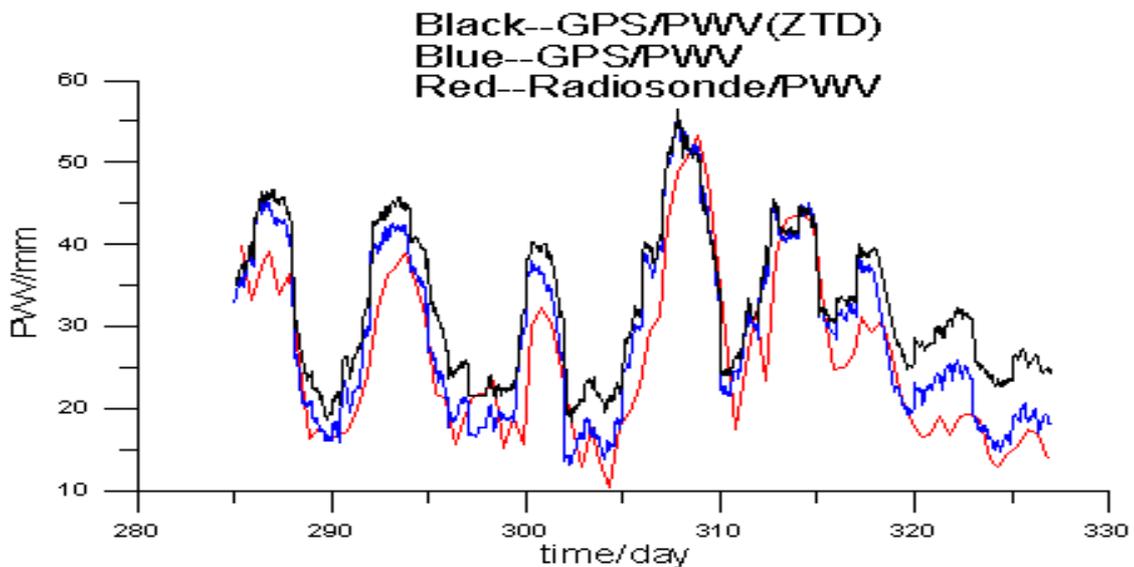


图 4 东湖站对流层延迟转换的可降水量与 GPS 可降水量、武汉站无线电探空可降水量的分布 黑色、蓝色、红色曲线分别代表对流层延迟转换的、GPS 和无线电探空。单位均为 mm。

表 2 东湖站对流层延迟推算的可降水量、GPS 可降水量与武汉站无线电探空的比较

可降水量比较	样本数/个	均值/mm	绝对值均值/mm	均方根/mm	相关系数
GPS 与无线电探空	82	3.05	4.13	3.97	0.931
流层延迟推算的与无线电探空	82	6.49	6.94	4.45	0.905
流层延迟推算的与 GPS	82	3.44	3.50	2.23	0.988

由于无线电探空站设在武汉市东部的西湖区，与 WHDH (东湖) 站不在同一处，从表 2 中可看出，WHDH 站的对流层延迟推算的可降水量与无线电探空降水量的均方根为 4.45 mm，相关系数达到 0.905；GPS 可降水量与无线电探空降水量的均方根为 3.97 mm，相关系数为 0.931。对流层延迟推算的可降水量、GPS 可降水量与无线电探空降水量的均方根接近或略大于 4 mm，其中主要的原因 GPS 测站与无线电探空站不在一处，故存在一定的偏差。对流层延迟推算的可降水量与 GPS 降水量的均方根为 2.23 mm，相关系数达到 0.988，这说明对流层延迟可以直接进行降水量的推算。

5 小 结

通过对流层延迟与无线电探空降水量的比较和对流层延迟直接转换可降水量模型的推算及其结果验证，得到以下结论：

(1) GPS 测站的对流层延迟与可降水量具有很好的相关性，两者的相关系数超过 0.9。

(2) 对流层延迟推算的可降水量与无线电探空可降

水量的均方根为 4.45 mm，相关系数达到 0.905；对流层延迟推算的可降水量与 GPS 降水量的均方根为 2.23 mm，相关系数达到 0.988。

由于数据资料的限制，对流层延迟直接推算降水量的模型可以进一步改善。如：(1) 采取并址的探空资料和 GPS 测站推导计算模型；(2) 采用较长时段的观测资料进行模型的推导和精度验证。

对流层延迟与可降水量具有很好的相关性，在缺少地面气象数据的时间段或没有地面气象数据的测站上，可以利用 GPS 对流层延迟直接推算可降水量，为气象学短期预报提供参考依据。

致 谢：感谢湖北省气象局的王海军、武汉市勘测设计研究院的李江卫提供无线电探空资料和 GPS 数据！

参 考 文 献：

- [1] 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.
- [2] 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：中科院上海天文台，2004.
- [3] BUSINGER S, CHISWELL S R, BEVIS M, et al. The promise of GPS in atmospheric monitoring[J]. *Bullet of the American Meteorological Society*, 1996, 77 (1) : 5-18.
- [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] 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.
- [6] LIOU Yuei-An, HUANG Cheng-Yung, TENG Yu-Tun. Precipitable water observed by grounded-based GPS receivers and microwave radiometry[J]. *Earth Planets Space*, 2000, 52: 445-450.
- [7] ROCKEN C, HOVE T, JOHNSON J, et al. GPS/STROM-GPS sensing of atmospheric water vapor for meteorology[J]. *Journal of Atmospheric Oceanic Technology*, 1995, 12(3): 468-478.
- [8] PACIONE R, FIONDA E, FERRARA R, et al. Comparison of atmospheric parameters derived from GPS, VLBI and a ground-based microwave radiometer in Italy[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2002, 27 (3) : 309-316.
- [9] 王勇, 柳林涛, 刘根友. 基于水汽辐射计与 GPS 湿延迟的对比研究[J]. *大地测量与地球动力学*, 2005 (3) : 110-113.
- [10] 谷晓平, 王长耀, 王汶. GPS 水汽遥感中的大气干延迟局地订正模型研究[J]. *热带气象学报*, 2004, 20 (6) : 679-703.
- [11] 王勇, 柳林涛, 郝晓光, 等. 准实时地基 GPS 降水量的解算方案与可靠性研究[J]. *热带气象学报*, 2007, 23 (2) : 177-181.
- [12] DUAN J, BEVIS M, FANG P, et al. GPS Meteorology: Direct estimation of the absolute value of precipitable water[J]. *Journal of Applied*

Meteorology, 1996, 35 (6) : 830-838.

[13] 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.

[14] JAMES H Foster. GPS Meteorology and the Phenomenology of Precipitable Water[D]. Hawaii: Hawaii University, 2002.

THE STUDY OF DIRECTLY CALCULATING PRECIPITABLE WATER VAPOR WITH ZENITH TROPOSPHERIC DELAY OF GPS NETWORK

WANG Yong^{1,2}, LIU Yan-ping¹, LIU Lin-tao², WANG Yu-liang¹, XU Hou-ze²

(1. College of Traffic and Surveying, Hebei Polytechnic University, Tangshan 063009, China;

2. Institute of Geodesy & Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China)

Abstract : With the data of GPS Meteorology Network in the region of Wuhan, the article discusses the study of directly calculating precipitable water vapor with GPS zenith tropospheric delay. Comparisons of radiosonde precipitable water vapor and GPS zenith tropospheric delay at the Donghu station of Wuhan indicate good correlation between them with the correlative coefficient at 0.931. A model of directly calculating precipitable water vapor is derived and the model results are proof-tested. The root mean square of GPS precipitable water vapor and radiosonde is 4.45 mm and the correlative coefficient is 0.901 in the comparison between the precipitable water vapor of zenith tropospheric delay and radiosonde data. The root mean square is 2.23 mm and the correlative coefficient is 0.988 in the comparison between the precipitable water vapor of zenith tropospheric delay and GPS/PWV. It is shown that the precipitable water vapor of zenith tropospheric delay can be considered as the reference of short-range forecast in regions without meteorological data.

Key words: tropospheric zenith delay; precipitable water vapor; GPS Meteorology Network