

GPS 监测水汽与水汽辐射计数据的对比研究^{*}

陈俊平¹⁾ 王解先^{1,2)} 陆彩萍³⁾

- (1) 同济大学测量与国土信息系, 上海 200092
(2) 现代工程测量国家测绘局重点实验室, 上海 200092
(3) 上海瑞恒房地产评估事务所有限公司, 上海 200021

摘要 针对水汽辐射计观测数据和并址的 GPS 观测数据, 用 GAMIT 软件求解了台站的天顶总延迟和湿项延迟。运用湿项延迟与水汽含量之间的转换关系, 对 GPS 监测的大气可降水量与水汽辐射计观测的水汽含量进行了对比研究, 得出结果: 由 GAMIT 解算出的水汽含量与 WVR 观测值的差值平均值为 0.02 mm, 均方差为 0.02 mm, 由气象文件求出的水汽含量与 WVR 观测值的差值平均值为 0.03 mm, 均方差为 0.02 mm。表明用地面 GPS 监测大气水汽含量是完全可行的。

关键词 水汽辐射计 天顶总延迟 湿项延迟 可降水量 GPS 数据

中图分类号: P412.13 文献标识码

STUDY ON COMPARISON BETWEEN WATER VAPOR VALUE CALCULATED BY GPS AND OBSERVED BY WVR

Chen Junping¹⁾, Wang Jiexian^{1,2)} and Lu Caiping³⁾

- (1) *Department of Surveying and Geomatics, Tongji University, Shanghai 200092*
(2) *Key Laboratory of Modern Engineering Surveying, Shanghai 200092*
(3) *Shanghai Ruiheng Estate Appraiser Ltd., Shanghai 200021*

Abstract This paper analyzes the precipitable water vapor value calculated from GPS data and observed by WVR (Water Vapor Radiometer). Using GAMIT, we have calculated the tropospheric delay and obtained the wet zenith delays over the station. Following the discussed relation between wet zenith delay parameters and precipitable water vapor, we have calculated the precipitable water vapor over the area. Comparing it with what is observed by WVR, we get the result that the average difference is 0.02 mm with RMS of 0.02 mm. At the same time, we have calculated the precipitable water vapor using the weather observations on ground. It shows that the average difference is 0.03 mm with RMS of 0.02 mm. So with the ground based GPS, we can monitor the precipitable water vapor continuously and effectively.

Key words : water vapor radiometer, tropospheric delay, wet zenith delay, precipitable water vapor, GPS data

* 收稿日期: 2004-11-11

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40234039)

作者简介: 陈俊平, 男, 1980年生, 江西宜春人, 博士生, 主要从事 GPS 理论与应用研究

1 引言

GPS 信号大气延迟分为电离层延迟和对流层延迟。电离层延迟可通过双频技术完全消除; 对流层延迟分为两部分, 由大气中所有大气分子的偏振位移引起的称为干项, 由水分子的偶极距引起的称为湿项。其中干项比较稳定, 用合适的模型可得到较好的改正, 湿项引起的附加延迟虽然只有几十厘米, 但其变化很不规则, 受云雾等瞬时因素的影响, 目前还没有高精度的改正模型, 但可以利用水汽辐射计较精确地测定其影响。然而辐射计价格昂贵, 使用也不方便, 所以在一般情况下, 只能采用引入待估参数的方法来估计湿项引起的附加延迟值。

针对以上情况, 为了研究 GPS 监测大气可降水量, 本文收集了水汽辐射计观测数据和并址的 GPS 观测数据, 运用 GAMIT 软件求解了台站的天顶总延迟和湿项延迟。利用所建立的湿项延迟与水汽含量之间的转换关系, 求得了水汽含量。并对 GPS 监测大气可降水量与水汽辐射计观测的水汽含量进行了对比研究。

2 水汽辐射计与气象文件

水汽辐射计可以测定卫星信号传播路径上水汽对信号传播的影响。水汽辐射计一般至少使用两个频率, 一个在 22.235 GHz 的水汽吸收线附近, 另一个为 31.4 GHz, 对凝结的液态水很敏感, 利用水汽辐射计求得的对流层湿分量的精度可优于 1 cm。

水汽辐射计虽然可达到很高的精度, 但价格较为昂贵(远高于 GPS 接收机的价格), 也较为笨重, 一般都是固定安装在某点, 如房顶或地势开阔的地方, 从而限制了广泛应用的可能性。

对于并址的 GPS 台站, 其气象观测文件(MET data)记录了水汽辐射计附近的气象元素, 包括大气压(单位为巴, 即 1 000 hPa)、温度(摄氏度)、露点(度)和相对湿度(%)。根据气象文件的数据, 运用对流层折射改正模型, 能够求得测站在天顶方向的总延迟 Δ_S 。

3 利用 GPS 监测大气可降水量

3.1 对流层延迟改正模型

常用的对流层延迟改正模型有: 霍普菲尔德(HopField)改正模型、萨斯塔莫宁(Saastamoinen)模型等。GAMIT 软件中使用的改正模型为萨斯塔莫宁模型。其公式为^[1]:

$$\Delta_S = \frac{0.002\ 277}{\sin E'} \left[P_s + \left(\frac{1.255}{T_s} + 0.05 \right) \right] e_s - \frac{a}{\tan^2 E'} \quad (1)$$

式中, $a = 1.16 - 0.15 \times 10^{-3} h_s + 0.716 \times 10^{-8} h_s^2$ (h_s 为测站高度), Δ_S 为天顶方向对流层改正, T_s 为干温, P_s 为气压, e_s 为水气压, E' 为高度角 E 的改正值。

3.2 天顶湿延迟的计算

某测站的天顶总延迟为 Δ_S , 将 Δ_S 分段作为参数参与 GPS 定轨定位数据处理, 解算出总的天顶延迟量, 从总延迟量中扣除天顶干延迟, 即得到天顶湿延迟。

由于大气比较符合理想气体方程和流体静力学方程, 根据 Saastamoinen 模型, 可以得出天顶干延迟 Δ_{Sd} 与地面气象资料的关系式^[2,3]:

$$\Delta_{Sd} = 10^{-6} \frac{k_1 R}{g_m M_d} P_s \quad (2)$$

其中, k_1 、 R 、 M_d 、 P_s 分别为大气折射率的实验常数, $k_1 = 77.60\text{ K/hPa}$, 理想气体普适常数 $R = 8.314\text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$, 干大气摩尔质量 $M_d = 28.9644\text{ g/mol}$, P_s 为地面气压(hPa), g_m 为垂直大气柱质量中心的引力加速度, $g_m = 9.784/f(\varphi, h_s)$ 。

$$f(\varphi, h_s) = 1 - 0.002\ 66 \cos(2\varphi) - 0.000\ 28 h_s \quad (3)$$

这里, φ 为接收站纬度, h_s 为相对于旋转椭球的 GPS 测站高程, 单位为 km。将常数代入可得到天顶干延迟计算公式如下:

$$\Delta_{Sd} = 0.002\ 276\ 8 P_s / f(\varphi, h_s) \quad (4)$$

从总的天顶延迟中减去天顶干延迟, 可得湿项延迟 Δ_{Sw} :

$$\Delta_{Sw} = \Delta_S - \Delta_{Sd} \quad (5)$$

3.3 天顶湿延迟与可降水量的转换

根据气象学中可降水量(P_w)的定义^[4], 可得出天顶湿延迟 Δ_{Sw} 与可降水量 P_w 之间的关系为:

$$P_w = \Pi \times \Delta_{Sw} \quad (6)$$

其中, Π 为比例因子, 有如下关系:

$$\Pi^{-1} = 10^{-6} [\rho R_w (k_3 / T_m + k'_2)] \quad (7)$$

其中, $k'_2 = k_2 - k_1 M_w / M_d = 16.52\text{ K/hPa}$, k_2 、 k_3 为大气折射率实验常数, 分别取为 $k_2 = 64.79\text{ K/hPa}$, $k_3 = 3.776 \times 10^5\text{ K}^2/\text{hPa}$; 水汽的摩尔质量 $M_w = 18.0152\text{ g/mol}$; $R_w = R / M_w = 461.524\text{ J/kgK}$; 大气的平均温度 T_m (K) 定义为:

$$T_m = \int_{h_s}^{\infty} \frac{e}{T} dh / \int_{h_s}^{\infty} \frac{e}{T^2} dh \quad (8)$$

其中, e 为水汽压, T 为大气温度(K)。

Bevis^[5] 等利用多年探空仪资料计算发现, T_m 与地面温度 T_s (K) 的线性计算公式为:

$$T_m = 70.2 + 0.72 T_s \quad (9)$$

由式(6)、(7)、(9)就能将天顶湿延迟 Δ_{Sw} 转为可降水量 P_w 。

4 数据对比研究

实验使用的水汽辐射计观测数据来源于并址的加拿大卡尔加里大学 UOFC 站, 并下载了附近的 AHID、ALBH、AZCN、BLYN、DRAO 等 IGS 台站当天的观测数据。

实验思路是在某一站收集到水汽辐射计观测数据和气象文件的情况下, 考察不同方法得到的该站的天顶湿延迟以及水汽含量。实验过程设计为:

1) 对各测站每小时加一个天顶方向的延迟参数, 用 GAMIT 软件对基线进行单天解。解算出各测站的总天顶延迟^[6], 利用前面介绍的模型解算出干项延迟量, 从而求得湿项延迟。

2) 由气象观测文件, 利用 Saastamoinen 模型直接计算出测站的总天顶延迟, 扣除干项延迟, 求得湿项延迟。

在 UOFC 站上, 将由 WVR 观测到的天顶湿延迟, 由 GAMIT 计算出的天顶湿延迟, 以及由气象观测文件计算出的天顶湿延迟进行对比统计, 如图 1 所示; 由 GAMIT 计算出的天顶湿延迟减去 WVR 的观测值, 由气象文件计算出的天顶湿延迟量中减去 WVR 的观测值, 将此两种差值进行对比统计, 如图 2 所示。

由图 1、图 2 的对比结果可看出, 剔除掉 0 点到 5 点这段时间内的观测数据, 由 GAMIT 计算得出的天顶湿延迟与由 WVR 观测得出的天顶湿延迟,

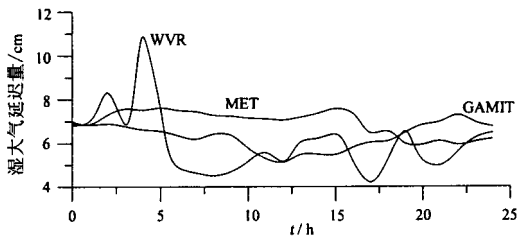


图 1 湿大气延迟对比情况

Fig. 1 Comparison between wet zenith delay values

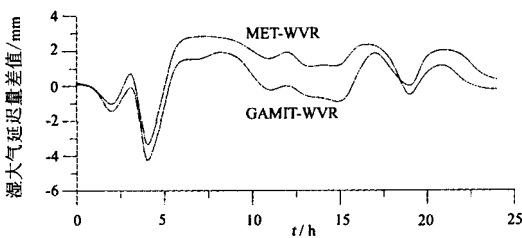


图 2 湿大气延迟量差值对比

Fig. 2 Difference between calculated wet zenith delay values and WVR observations

两者在数值上非常接近, 其差值不超过 2 cm, 利用气象观测文件通过 Saastamoinen 模型计算得出的天顶湿延迟, 与 WVR 的天顶湿延迟观测值也非常接近, 在数值上也不超过 3 cm。这充分表明, 由 GAMIT 软件求定的天顶湿延迟与水汽辐射计的观测结果是一致的, 也说明了用地面 GPS 来遥感大气水汽含量是可行的, 并且在水汽辐射计较多的情况下, 将水汽辐射计的观测结果回代到 GPS 的基线解算过程中, 将会大大提高 GPS 测量在垂直方向的精度。

统计 UOFC 站天顶方向的水汽含量情况如图 3 所示:

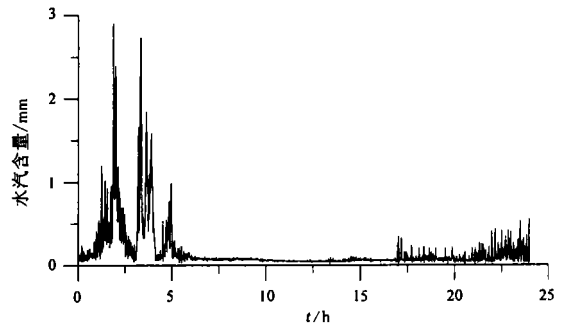


图 3 WVR 测定天顶方向水汽含量

Fig. 3 Zenith water vapor observed by WVR

由图 3 可看出, 水汽辐射计(WVR)测定的水汽含量, 在 0 点到 5 点这段时间内, 水汽含量的抖动比较厉害, 这与图 1 所示 UOFC 在该天的天顶湿延迟抖动情况相一致。

对水汽含量的观测值剔除 0 点到 5 点这段时间, 采用线性内插的方法, 可求出在整点时刻的水汽含量。将 WVR 观测的水汽含量与用 GAMIT 解算出的水汽含量以及用气象文件直接求出的水汽含量进行对比, 具体统计情况如图 4 所示。由 GAMIT 解算出的水汽含量与 WVR 水汽观测值的差值, 与由气象文件直接计算求出的水汽含量与 WVR 的水汽观测值的差值进行对比, 具体情况如图 5 所示。

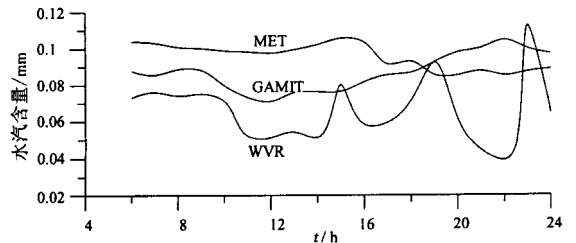


图 4 6~24 点时间段内的水汽含量对比情况

Fig. 4 Comparison between water vapor values from 6^h to 24^h

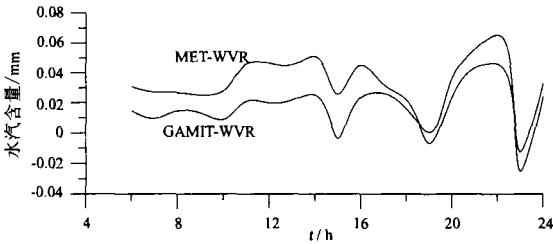


图5 6~24点时间段上计算出的水汽含量与WVR观测值的差值对比

Fig. 5 Difference between calculated water vapor and WVR observations from 6^h to 24^h

由图4、5可看出,在水汽辐射计观测较稳定的状态下,由GAMIT解算出的水汽含量与水汽辐射计的观测值非常接近,平均差值为0.02 mm,均方差为0.02 mm;由气象观测文件直接求出的水汽含量与水汽辐射计的观测值也很接近,平均差值为0.03 mm,均方差为0.02 mm。对比结果表明,由GPS基线解算出的水汽含量与WVR的观测值是一致的,说明了地面GPS探测大气可降水量是可行的。

5 结论

并址的水汽辐射计测得的天顶湿延迟与由GAMIT软件求得的天顶湿延迟相比较,两者之差不超过2 cm;利用地面气象观测资料通过Saastamoinen模型计算得出的天顶湿延迟与WVR的天顶湿延迟观测值也非常接近,在数值上不超过3 cm。这说明在考虑对流层折射的情况下,由GAMIT软件求得的天顶湿延迟与水汽辐射计的观测结果是一致的。

由GAMIT解算得出的天顶湿延迟得到的天顶方向水汽含量,与水汽辐射计的观测值进行对比,两者平均差值为0.02 mm,均方差为0.02 mm,由气象观测文件直接求出的水汽含量与水汽辐射计的

观测值也很接近,平均差值为0.03 mm,均方差为0.02 mm。说明由GPS基线解算出的水汽含量与WVR天顶方向水汽含量观测值是一致的,证明了地面GPS探测大气可降水量的可行性。

References

- 1 Saastamoinen J. Contributions to the theory of atmospheric refraction[J]. *Bulletin Geodesique*, 1972, 106: 279 - 298.
- 2 王小亚,朱文耀,严豪健,程宗颐.地面GPS探测大气可降水量的初步结果[J]. *大气科学*, 1999, 23(5): 605 - 612.
- 2 Wang Xiaoya, Zhu Wenyao, Yan Haojian and Cheng Zongyi. Preliminary results of precipitable water vapor monitored by ground based GPS[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1999, 23(5): 605 - 612. (in Chinese)
- 3 曲建光.由Saastamoinen和Hopfield模型推算水汽含量的比较与分析[J]. *测绘工程*, 1999, 8(4), 22 - 27.
- 3 Qu Jianguang. Comparison and analysis of integrated water vapor calculated from Saastamoinen and Hopfield models[J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 1999, 8(4), 22 - 27. (in Chinese)
- 4 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.
- 4 Chen Junyong. On the error analysis for the remote sensing of atmospheric water vapor by ground based GPS[J]. *Acta Geodetica et Cartographica Sinica*, 1998, 27(2), 113 - 118. (in Chinese)
- 5 Bevis M, et al. GPS meteorology, remote sensing of atmospheric water vapor using the GPS[J]. *JGR*, 1992, 98: 15 787 - 15 801.
- 6 Documentation for the GAMIT GPS Analysis Software, Release 9.8, Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology, Scripps Institution of Oceanography, University of California at San Diego, 1999.