

地基 GPS 反演大气水汽总量的初步试验*

何 平 徐宝祥 周秀骥 王红艳

(中国气象科学研究院,北京 100081)

提 要

1998 年 5~6 月的“海峡两岸及邻近地区暴雨试验”(HUAMEX)期间,同时进行了小规模的地基 GPS 长时间连续估测大气水汽总量的外场试验。试验中应用探空和地面降水资料与 GPS 反演结果进行了比较分析。地基 GPS 反演的大气水汽总量与探空得到的大气水汽总量,两者随时间演变的趋势一致,两者估算的水汽总量平均偏低 6.5 mm,两者偏差的均方差为 4.3 mm。GPS 反演的大气水汽总量随时间明显的呈周期性变化,平均周期为 7.2 天。从 GPS 反演的大气水汽总量随时间演变图上可以清楚地看出水汽的积累与释放过程,并与地面降水存在一定的对应关系,地面降水大多发生在 GPS 反演的水汽总量处于相对高值且变化率较大的时候。

关键词: GPS 干延迟 湿延迟 水汽总量

引 言

水汽在大气物理过程中扮演着极其重要的角色,对大气水汽总量及其演变的测量,有助于对风暴系统的结构和演变、地气系统的能量平衡等问题的研究。运用 GPS 技术估算大气水汽总量是 20 世纪 90 年代发展起来的一种有潜力有实用价值的新方法。1992 年 Bevis 等人提出了采用地基 GPS 估算大气水汽含量的原理,1993 年美国进行了 GPS/STORM 观测试验,并采用“相对 GPS”方案(在参考站引入微波辐射计 WVR 消除差分误差)对数据进行了处理,稍后,在对 GPS/STORM 试验获取的资料进行处理的过程中,Dean^[1]和 Bevis^[2]又提出了反演大气水汽总量的“纯 GPS”方案(无需 WVR 定标)。在国内,近几年也开始了这方面的研究工作^[3~6]。特别是,在 1998 年 5、6 月的“海峡两岸及邻近地区暴雨试验”期间,我们进行了组建地基 GPS 接收站进行实际探测的试验,以期获得有关大气水汽总量的信息。试验是成功的,初步结果显示出地基 GPS 反演水汽总量是一种有前途的遥感技术。

1 外场试验与 GPS 资料的处理

在 1998 年的“海峡两岸及邻近地区暴雨试验”期间,于汕头、阳江两地分别建立了

* 本文由科技部攀登专项 95-专-3 及 G1998040906-12 资助。

2000-07-13 收到,2001-02-04 收到修改稿。

GPS 临时接收站,汕头的 GPS 接收机建在地面气象观测场内,阳江 GPS 站位于距地面气象观测场约 2 m 处。从 5 月 5 日起至 6 月 26 日试验结束,上述两站的 GPS 接收机进行了连续观测。同期,海口地震观测系统的 GPS 接收站也参加试验进行了连续观测。表 1 给出试验所用 GPS 接收机性能参数及站点的地理数据。

表 1 GPS 站点地理数据及所用 GPS 接收机性能参数简表

站名	经度	纬度	海拔高度(m)	仪器型号	单/双频	测距标称精度
汕头	116°41′	23°24′	7.3	TurboRogue	双频	2 mm ± 10 ⁻⁶
阳江	111°58′	21°52′	23.8	TurboRogue (5 月 5 日至 6 月 2 日)	双频	2 mm ± 10 ⁻⁶
				ASHTECH Z-12(6 月 3 日至 6 月 26 日)	双频	2 mm ± 10 ⁻⁶
海口	116°21′	21°2′	13.9	TurboRogue	双频	2 mm ± 10 ⁻⁶

试验期间汕头、阳江、海口 3 站获得的 GPS 原始数据,采用了 GAMIT 软件进行处理,处理中参与联合运算的有:海口、上海、天津、TSKB(日本)、IRKT(俄罗斯)、Kitab(乌兹别克)等 9 个 GPS 测站的数据。处理得到了间隔为每 0.5 h 一次的总延迟量。由于接收机采用的是双频接收机,电离层延迟已在处理过程中被对消掉,总延迟量为中性大气延迟量。

2 大气水汽总量的估算方法

各站 GPS 数据处理得到的基本量是中性大气延迟量,它应由干延迟和湿延迟两部分组成。干延迟量可根据测站的地面气压及地理坐标计算出来,本文采用了 Elgered 等人^[7]的公式:

$$Z_d = (2.2779 \pm 0.0024) \frac{P_0}{f(\lambda, H)} \quad (1)$$

式中: P_0 为测站地面气压, λ 为地理纬度, H 为测站海拔高度, $f(\lambda, H) = (1 - 0.00266 \cos(2\lambda) - 0.00028 H)$, 湿延迟量由实测的总延迟量减去干延迟量求得。

大气水汽总量 W_p (Precipitable Water) 定义为:垂直方向气柱内的水汽全部折算成液态水的高度。它与湿延迟量 (d) 之间存在一定的关系。Businger 等人^[8]给出的经验关系为:

$$W_p = \Pi \times d \quad (2)$$

$$\Pi = \frac{10^6}{\rho_w R_v [k_3 / T_m + k'_2]}$$

其中, ρ_w 是水汽密度, R_v 是水汽的气体常数, T_m 是加权平均温度^[9]

$$T_m = \frac{\int (P_v / T) dz}{\int (P_v / T^2) dz} \quad (3)$$

$k'_2 = k_2 - mk_1$, $m = M_w / M_d$ 是水汽与干空气的克分子量之比。 k_1, k_2, k_3 是大气折射指数 N ^[9] 实验公式中的系数

$$N = k_1 \frac{P_d}{T} + k_2 \frac{P_v}{T} + k_3 \frac{P_v}{T^2} \quad (4)$$

P_d 是干空气压强, P_v 是水汽压。II 是与气象参数有关的系数, II 通常可用一定常系数 0.156 来近似, 为简化处理, 本文采用 II = 0.156 进行计算。

3 试验初步结果与讨论

我们对试验期间上述 3 站获得的 GPS 连续观测资料进行了处理, 通过上述的处理, 估算出间隔为 0.5 h 一次的大气水汽总量, 与当地探空资料计算出的大气水汽总量进行了比较。图 1 给出的是试验期间汕头站探空与 GPS 反演的水汽总量的对比结果, 以及地面逐时降水资料。横坐标为观测时间, 主纵坐标为水汽总量(单位: mm), 次纵坐标为降水量(单位: mm/h)。图中, 连续曲线为 GPS 反演的水汽总量, 圆点为探空资料计算出的大气水汽总量, 柱形条为降水量。

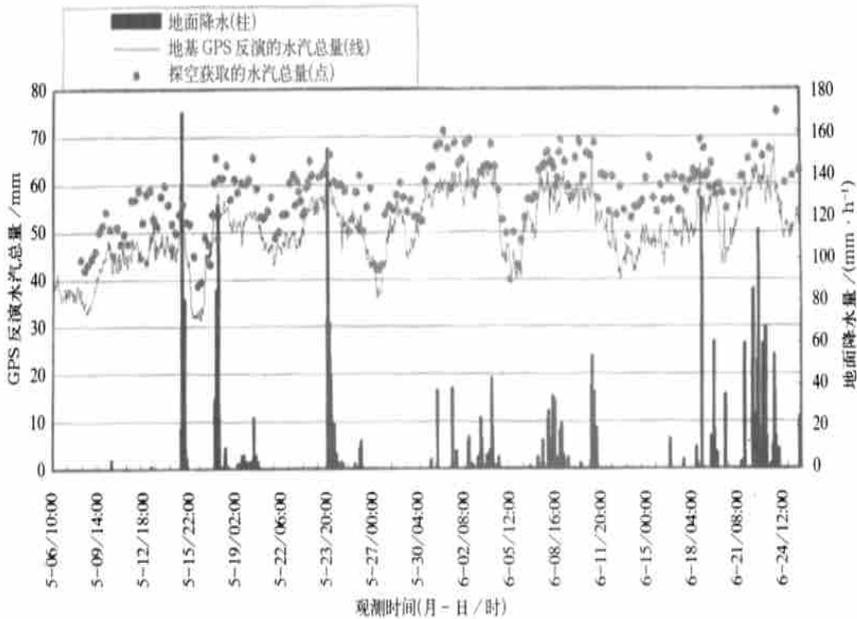


图 1 1998 年 5~6 月汕头站地面降水量 GPS 与探空资料反演水汽总量的对比

从图 1 中可以看出, GPS 反演的水汽总量与探空计算的结果相比变化趋势一致, 图 2 给出两者偏差(探空与 GPS 值之差)的概率分布曲线(样本数为 205), GPS 反演的水汽总量比探空计算的结果平均偏低 6.5 mm, 偏差的均方差为 4.3 mm。

GPS 连续观测的特点, 使 GPS 反演的水汽总量具有很高的时间精度, 从时间上近乎连续的水汽总量演变图中, 我们可以看出, 大气水汽总量存在不同尺度的周期性变化。图 1 中, 振幅变化较大, 平均振幅为 33 mm 的波动的周期为 7.2 天。

GPS 反演的水汽总量较好地反应出水汽积累和释放过程,水汽总量大致是以迅速增加、相对稳定、迅速降低的规律呈周期变化,而这一点在探空资料上的反应不明确。

由图 1 还可以看出,水汽总量随时间变化的总趋势是逐渐增加的,这可能和大气湿度随季节的变化有关,5 月份湿度较小、6 月份湿度较大。表 2 给出 5、6 月份水汽总量统计值,可以看出,水汽总量随季节有比较明显的变化,5、6 两月水汽总量平均值相差 6.9 mm,对应湿延迟的变化约 4cm 左右。

另外,我们将 GPS 反演的水汽总量与地面实测的逐时累积降水量资料进行了比较,如图 1。从图上可以看出,GPS 反演水汽总量变化周期和地面降水发生的周期基本相同。地面降水大多发生在 GPS 反演水汽总量处于相对高值且变化率较大的时候。

4 结束语

本文对“海峡两岸及邻近地区暴雨试验”中获取的 GPS 与气象资料进行了反演水汽总量的对比分析。结果表明:GPS 反演的大气水汽总量与探空计算的大气水汽总量,两者随时间演变的趋势一致;GPS 反演的水汽总量随时间明显的呈周期性变化,能较好地反应出与天气过程相伴随的水汽积累和释放过程。GPS 反演的水汽总量与地面实测的逐小时累积降水量资料进行的比较表明,两者存在较好的对应关系,地面降水大多发生在 GPS 反演的水汽总量处于相对高值且变化率较大的时候。

本文仅对“海峡两岸及邻近地区暴雨试验”中获取的 GPS 资料进行了常规的处理和初步的对比分析,我们将对此作进一步的分析研究。初步的对比分析结果表明,地基 GPS 技术用于大气水汽总量的观测具有很多突出优点,是一项很有潜力的探测技术。

致谢:从 GPS 原始数据到中性大气总延迟的计算由国家地震局第一地形变监测中心的李延兴研究员、胡新康先生完成,在此表示衷心感谢。

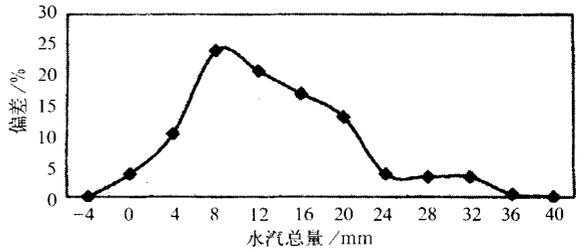


图 2 1998 年 5 ~ 6 月汕头站探空与 GPS 反演水汽总量的偏差分布

表 2 汕头 1998 年 5 ~ 6 月水汽总量统计 (mm)

月份	水汽总量 平均值	水汽总量 最大值	水汽总量 最小值
5	46.9	62.3	31.7
6	53.9	68.4	40.0
差值	6.9	6.1	8.3

参考文献

- 1 Duan J, Bevis M. GPS meteorology: direct estimation of the absolute value of precipitable water. *J Appl. Meteor.*, 1996, **35**: 830 ~ 838.
- 2 Bevis M, Busiger S, Chiswell T, et al. GPS meteorology: mapping zenith wet delays onto precipitable water. *J Appl. Meteor.*, 1994, **33**: 379 ~ 386.
- 3 李成才,毛节泰.全球定位系统遥感水汽总量.科学通报,1999,44(3).

- 4 彭红,葛润生,周秀骥. GPS 在大气探测中的应用. 大气遥感论文集. 北京:气象出版社,1997.
- 5 毛节泰,李建国. 使用 GPS 系统遥感中国东部地区水汽分布(1) ——原理和回归分析. 国家卫星气象中心:全球定位系统 ——气象学研究论文汇编,1997.12~20.
- 6 杨红梅,葛润生,徐宝祥. 用单站探空资料分析对流层气柱水汽总量. 气象,1998,24(9):8~11.
- 7 Elgered G, Davis J L, Herring T A, et al. Geodesy by radio interferometry: water vapor radiometry for estimation of the wet delay. *J Geophys. Res.*, 1991, **96**: 6 541 ~ 6 555.
- 8 Businger T. The promise of GPS in atmospheric monitoring. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, **77** (1): 5~18.
- 9 Davis J L, Herring T A, Shapiro I I, et al. Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length. *Radio Sci.*, 1985, **20**: 1593~1607.

THE PRELIMINARY EXPERIMENT ON DERIVING INTEGRATED ATMOSPHERIC WATER VAPOR FROM GROUND BASED GPS

He Ping Xu Baoxiang Zhou Xiuji Wang Hongyan
(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract

The field experiment named "HUAMEX" was conducted in China from May to June 1998. In this experiment, a regional GPS-network that included three ground-based GPS receiving stations (Shantou, Yangjiang and Haikou) was established to estimate integrated atmospheric water vapor (IWV) continuously. The comparison of IWV estimates derived from GPS and radiosonde observations for a 51-day period at Shantou station is given. Both have an average bias of 6.5 mm, and the root-mean-square difference is 4.3 mm. The IWV derived from GPS varies with time and it has an obvious period of 7.2 days in average. Moreover, the IWV derived from GPS is compared with the observed surface integrated precipitation hour by hour. The comparison of GPS-derived IWV and integrated surface precipitation indicates that there is a good coincidence between them. The variation period of GPS-IWV is similar to that of surface precipitation. From the time-series of IWV estimated from GPS, the accumulating and releasing processes of water vapor are obvious.

Key words: GPS Dry delay Wet delay Integrated atmospheric water vapor