

地基 GPS 技术遥感香港地区大气水汽含量

刘焱雄 H B Iz 陈永奇

(香港理工大学土地测量与地理资讯学系, 香港九龙红磡)

摘 要 提出了分段多项式方法计算大气水汽含量,并结合无线电高空气象探测资料,分析并评估了地基 GPS 遥感技术的精度。香港地区的可降水份计算结果表明,地基 GPS 遥感技术的精度为 1 mm~ 2 mm

关键词 GPS 水汽含量;可降水份

分类号 P228.42; P407

对流层中的水汽是复杂气象过程形成的载体,也是空间大地测量的主要误差来源。实际上,大气中水汽含量不足 5%,但是,由于其快速变化和时空上分布不规则,很难精确描述它的运动规律和变化特性。大气水汽含量与降雨直接关联,所以,对水汽的研究成为现代气象学的重要组成部分。近几年兴起的 GPS 气象学正是这一研究的纵深发展。根据 GPS 接收机的位置, GPS 遥感大气水汽含量分为地基和空基两种技术。空基 GPS 遥感技术需要将 GPS 接收机置于低轨卫星平台,耗资大而难以实现,且目前可供研究的数据少。地基 GPS 技术的数据获取方法简单,可供研究的数据多,是当前研究的重点。

美国、欧共体及日本等国家和地区的大学和研究机构纷纷立项研究地基 GPS 气象学,国内这一领域的研究成果不多。本文首先给出了对流层湿分量时延与可降水份(PWV)的关系,并采用地基 GPS 观测数据,提出利用分段多项式方法计算大气水汽含量。然后,鉴于 GPS 固定站无地面气象资料的现状,提出了温度和气压的内插法,并简化了无线电探空资料中水汽含量的提取方法。最后,对比了两种技术的结果。

1 GPS 湿分量时延与可降水份的关系

空间大地测量中,习惯用湿分量时延(WZD)表征对流层中水汽对 GPS 信号的影响, GPS 湿分量时延的大小反映了大气中水汽含量的多少。大气科学中,常用可降水份表征大气水汽含量,可降水份定义为单位面积上空的所有水汽凝结成液态水时的等效水柱高度。湿分量时延与可降水份的转换关系可表示为^[1,4,7]:

$$WZD = K \cdot d \cdot PWV \tag{1}$$

式中, WZD 为天顶方向的湿分量时延(因为可降水份是天顶方向的); d 为液态水的密度; K 为转换因子,其计算公式为^[1,7]:

$$K = 10^6 / [d \cdot R_v / (T_m + k_2) + k_3] \tag{2}$$
$$T_m = \int (P_v / T) dh / \int (P_v / T^2) dh$$

式中, R_v 为水汽的气体常数; k_2 , k_3 为大气常数; T_m 为加权平均温度; T 为测站天顶方向上某点的绝对温度(K); P_v 为同一点的水汽压(mbar)。

2 可降水份的估计

2.1 分段多项式模型

大气的水汽含量长时间内变化无规律,但是,短时间内(如 30 min)可以认为有一定的变化规律。一般采用分段多项式描述这种变化规律。

假定 M 和 N 为两相邻分段节点的历元号,其可降水份的大小分别为 X_m 和 X_n ,于是, M 和 N 间的任意历元 t 上的可降水份为:

$$X_t = X_m + (X_n - X_m) * (t - M) / (N - M) \tag{3}$$

分段节点数的选取根据气象条件来确定,通常每 2 h 设定一个节点。当天气变化较为剧烈时,以每 30 min 一个节点为宜。

2.2 顾及可降水份参数的观测方程

可降水份的最大值约为 70 mm,等效的湿分量时延为 40 mm。所以,可降水份的估计只能应用相位观测值。假设接收机 i 于历元 t 接收到卫星 j 的相位观测值为:

$$\varphi_i^j(t) = (f/c) (P_i^j - d_{ion} + d_{trop}) + f(T_i - T^j) - N_i^j \tag{4}$$

式中, P_i^j 为接收机与卫星间的几何距离; d_{ion} 和

d_{trop} 分别为电离层和对流层时延; T_i 和 T^j 为接收机和卫星的钟差; N_i^j 为整周模糊度参数; f 和 c 分别为信号频率和光速。

假定对流层在测站上各方位对称,则任意方向的对流层时延量可由天顶方向的时延表示:

$$d_{\text{trop}} = W_i \cdot f_w + D_z \cdot f_z \tag{5}$$

式中, D_z 为天顶方向的干分量时延(DZD); W_i 为天顶方向的湿分量时延,即式(1)中的 WZD ; f_z 和 f_w 为对应的投影函数,它们与高度角有关。

顾及式(1),用 X_i 表示可降水份,将式(5)代入式(4),得到考虑可降水份参数 X_i 的观测方程:

$$\begin{aligned} h_i(t) = & (f/c)(P_i^j - d_{\text{ion}} - Kdf_w X_i + \\ & + f_z D_z) + f(T_i - T^j) - N_i^j \end{aligned} \tag{6}$$

式(6)中干分量时延 D_z 为已知值,由经验公式计算。顾及式(3),由现有的GPS解算技术,经LC的双差组合消除 d_{ion} 和 T_i 、 T^j 后,不难估计出各节点上的可降水份 X_n (n 为节点序号)。

2.3 地面温度和气压值的内插

由前所述,计算干分量时延 D_z 必须使用经验模型,现有的Saastamoinen(SAAS)法、Hopfield法和Black法都需要用到地面气压和温度资料。然而,中国境内的IGS永久站和香港差分GPS站都没有地面气象记录资料,为此,选用邻近的气象站资料,采用加权平均方法推算GPS站上的温度和气压值:

$$y = \sum (x_i / s_i) \sum (1 / s_i) \tag{7}$$

式中, x 代表温度或气压的观测值; s 为气象站至GPS站的距离。

气压值的大小与测站高程有关。为了便于全球气压资料的分析 and 比较,国际气象服务组织(WMO)规定,气象站的气压量测值要转化为等效的海平面气压。这样,气压值的内插要分两步,首先按式(7)内插出GPS站海平面上的气压值,然后投影到测站的实际高程面上。

3 由高空探测资料提取大气水汽含量

为了比较GPS遥感水汽含量的精度,本文介绍由无线电探空(radiosonde)资料提取大气水汽含量的方法。高空的水汽压沿路径积分后,可得到可降水份的大小,即

$$PWV = \frac{1}{d} \int_H P_v dh \tag{8}$$

式中, d 为液态水的密度; P_v 为测站上空某点的水汽压; h 为对应高度。

因高空探测资料只提供上层大气温度气压和

相对湿度的离散观测序列,可将式(8)简化为:

$$PWV = \sum [(h_2 - h_1)(d_1 + d_2)/2] / d \tag{9}$$

式中, h_1 、 h_2 和 d_1 、 d_2 分别表示各离散层底部和顶部的高程和水汽密度。水汽密度 d 可由气态方程推出:

$$d = P_v / (R_v T) \tag{10}$$

式中, P_v 为水汽压; R_v 为水汽常数; T 是绝对湿度。由相对湿度计算水汽压公式见文献[6]。

4 香港地区结果分析

4.1 观测数据

试验选用了上海、武汉、拉萨、西安、台湾5个IGS永久GPS站和香港差分GPS站。GPS观测数据为1997年2月9日至3月11日(年积日40~70),历时一个月。GPS卫星星历为IGS精密星历。选用香港地区的地面和高空气象观测资料,邻近香港差分GPS站的4个气象站位置见表1。

表1 地面气象站的位置和高度

Tab. 1 The Position and Elevation of Hong Kong Meteorological Stations

气象站名	纬度 $1(^{\circ}')$	经度 $1(^{\circ}')$	海拔 高 /m	至香港差分GPS站的距离 /km
香港天文台	22 18 13	114 10 19	31.8	10.25
常洲岛	22 12 04	114 01 36	71.9	10.54
打鼓岭	22 31 50	114 09 13	12.0	28.35
京士柏(高空探测站)	22 18 47	114 10 14	64.8	10.42

4.2 干分量时延计算

由式(7)内插出香港差分GPS站上的气压值,见图1,并由SAAS公式计算干分量时延,见图2。

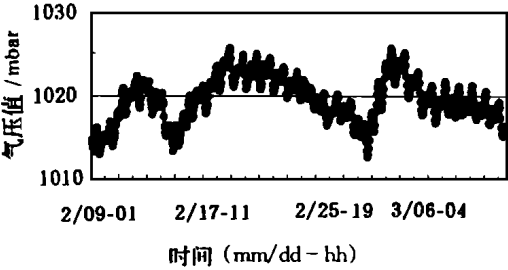


图1 香港差分GPS站气压值的变化曲线

Fig. 1 The Pressure Variations at HK DGPS Station

干分量时延主要受气压值的支配。气压每天出现周期性的变化,相应的干分量时延也呈现相应的变化。由于香港的面积很小,插值点海平面气

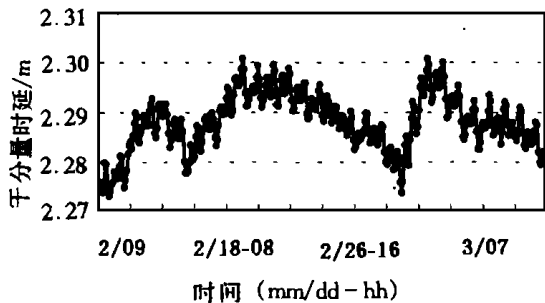


图 2 干分量时延的变化曲线

Fig. 2 The Variations of Dry Zenith Delay

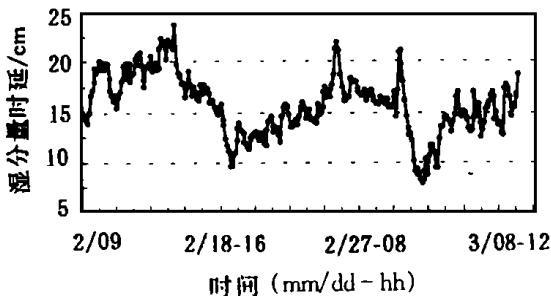


图 3 湿分量时延的变化曲线

Fig. 3 The Variations of Wet Zenith Delay

压值与 3 个地面气象站的记录值相差不到 1 mbar,温度的插值较差更小,所以,完全可以忽略插值误差的影响。SAAS 公式的精度为几 mm^[2,3,5],这里也忽略不计 D_z 的计算误差。

为了便于比较,图 3 给出了湿分量时延的变化曲线,湿分量时延在 8 cm~ 24 cm 之间变化,曲线的变化规律与对应的干分量时延并无明显相关,这表明干湿空气对 GPS 信号的时延是两个独立的过程

4.3 GPS 遥感可降水份的精度分析

无线电高空探测可降水份的精度取决于相对湿度剖面的观测精度。现有资料表明,相对湿度剖面的量测精度优于 3.5%,等效的可降水份精度优于 1 mm^[8]。这里暂不讨论高空探测可降水份的精度,简单地认为由此得到的可降水份是真值

图 4 给出了由 GPS 数据计算可降水份的变化曲线,图 5 显示了它的估计精度。图 5 中的曲线表明, GPS 遥感可降水份的估计精度介于 0.5~ 1 mm 之间。由于气象台每天只发射两次无线电探空气球,每天相应的可降水份观测值也只有两个。为了便于比较,这里只选用每 8 点和 20 点 GPS 遥感的可降水份值。图示期间,最大的可降水份为 35 mm,最小的只有 13 mm,平均值为 25 mm。图 6 给出了地基 GPS 技术和高空无线电探测技术计算的可降水份之差。很明显,两者之差并无系统性差异,残差均匀分布在零分线附近。统计结果

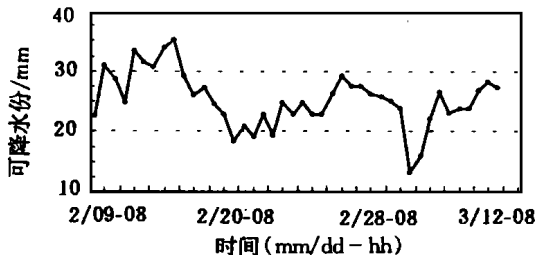


图 4 由地基 GPS 技术计算的可降水份

Fig. 4 The PWV from Ground-based GPS Technique

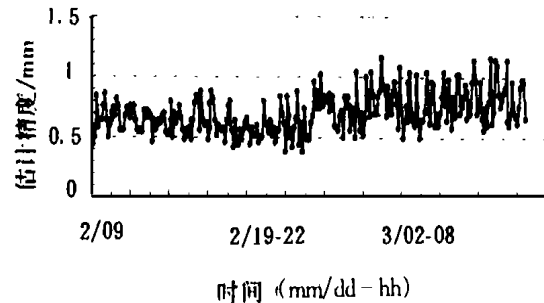


图 5 可降水份的估计精度

Fig. 5 The Uncertainty of the PWV Estimation

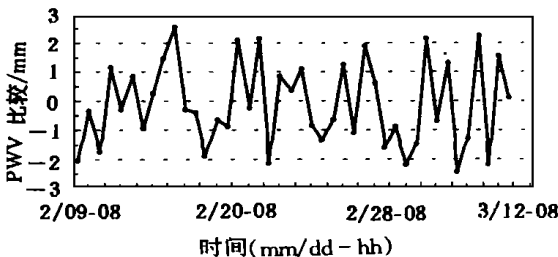


图 6 两种方式计算出的可降水份比较

Fig. 6 The Difference Between the PWV Derived from GPS and That of Radiosonde

显示,最大差异为 2.5 mm,最小为 - 2.5 mm,整个观测期间 1997 年 2 月 9 号~ 1997 年 3 月 11 号 (31 d) 的平均差异为 0.1 mm, 85% 以上的差值分布在 ± 2 mm 以内。在当前的观测条件和容许精度下,认为地基 GPS 技术可以作为一项新的有效手段,从时间和空间上加密现有的高空探测站分布,用于区域或全球水汽含量的遥感。

上述的计算没有顾及干分量时延模型的误差,本文中转换因子 K 的计算也直接采用了高空探测资料,如何标定干分量时延模型的精度和利用地面观测资料准确地计算转换因子 K ,将是今后研究工作的难点和重点。

致谢: 本研究得到香港理工大学的资助,香港天文台、香港海道测绘处提供高空探测数据和 GPS 数据,刘大杰教授在本文撰写中给以悉心指教,在此一并致谢。

参 考 文 献

1

Bevis M, Businger S, *et al.* GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97(14): 15 787~ 15 801

2

Bevis M, Businger S. GPS Meteorology and the International GPS Service. In: *Proceedings of IGS 95 Workshop*, 1995

3

Nam Y S, Da Kuang, Schutz B E. Comparison of GPS Estimates of Wet Tropospheric Delays with WVR Measurements. In: *Proceedings of the 9th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS- 96)*, Missouri, 1996. 641~ 646

4

Baker H C, Dodson A H, Moore T. The Use of Ground-based GPS for Water Vapor Estimation. In: *Proceedings of the ION GPS- 97*, 1997. 179~ 186

5

Gendt G, Beulter G. Consistency in the Troposphere Estimations Using the IGS Network. In: *Proceedings of IGS 95 Workshop*, 1995. 115~ 127

6

刘基余,李征航,王跃虎,等.全球定位系统原理及其应用.北京: 测绘出版社, 1993

7

陈俊勇.地基 GPS遥感大气水汽含量的误差分析.测绘学报, 1998, 27 (2)

8

Borbas E. Determination of the Precipitable Water Vapor for a Fixed Site Using Global Positioning System Technique. *Journal of the Hungarian Meteorological Service*, 1997, 101(4): 261~ 273

Monitoring the Water Vapor Content in the Atmosphere in Hong Kong Through Ground-based GPS Technique

Liu Yanxiong H B Iz Chen Yongqi

(Department of Land Surveying and Geo-Informatics, The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong)

Abstract Ground-based GPS technique is rapidly growing in remote sensing water vapor content in the atmosphere. In this paper, the problem of extracting water vapor content information from GPS data is examined. A new approach, namely as piecewise linear method has been proposed in the estimation of precipitable water vapor through Hong Kong DGPS station observations. Considering no meteorological measurements, a simple interpolated method weighted by distance is developed to perform the interpolation using the meteorological observations around Hong Kong DGPS station. To evaluate the attainable accuracy of water vapor content sensed by GPS, radiosonde data, which are collected locally by Hong Kong Observatory, are used to calculate the precipitable water vapor. One-month results of precipitable water vapor from both ground-based GPS technique and radiosonde method exhibit very good agreement within 1 mm~ 2 mm.

Key words GPS; water vapor content; precipitable water vapor