文章编号：1674－9057(2012)04－0524－04　　doi:10.3969/j.issn.1674－9057.2012.04.013

基于 IGS 站不同区域可降水量变化对比分析

文鸿雁[1a,1b]，潘元进[1a,1b]，何美琳[1a,1b]，孙刚臣[1c]，刘立龙[1a,1b]，罗满建[1a,2]

（1. 桂林理工大学 a. 测绘地理信息学院；b. 广西空间信息与测绘重点实验室；c. 土木与建筑工程学院，广西 桂林 541004；
2. 广西壮族自治区测绘地理信息局，南宁 530004）

摘　要：基于 GPS 反演技术的理论与方法，利用 IGS 站开放的观测数据和精密星历数据，选取北京、武汉、上海 3 个 IGS 站观测数据，通过 GAMIT 软件解算处理，得出 3 个站天顶方向对流层延迟量。由对流层延迟量和区域的平均温度，根据经验模型反演得出其大气水汽含量，并与探空水汽含量进行了比较，得出两者具有较好的一致性。同时分析了上述 3 个区域水汽变化特征，反演出大气水汽含量能较好反映区域天气参数的差异。

关键词：IGS 站；大气水汽含量（PWV）；探空数据；区域水汽变化

中图分类号：P228.4　　**文献标志码：**A

由于 IGS 产品在测量数据处理中的广泛应用，且其可靠性和稳定性都得以证明，所以 GPS 应用气象学也得到了国内外不少学者的研究，目前该项技术已进入到实际应用阶段。作为大气分析的一个重要参数——大气水汽含量（PWV），通过 GPS 反演得出的精度已经可以达到 mm 级的精度。与探空 PWV、水汽辐射计等传统的探测技术相比，GPS－PWV 有着分辨率高、实时性更强且费用低等优势[1]。本文基于 GPS 反演大气水汽含量的理论模型，应用 IGS 参考站进行数据处理，分析得出了国内不同区域天顶方向对流层的变化情况，经过经验模型的反演得出其大气水汽含量，与探空 PWV 相比，得出其精度。结合区域反演 PWV 值分析不同区域水汽变化情况，且得出了台风对相关区域 PWV 值的影响。

1　GPS 反演 PWV 理论与关键模型

GPS 反演大气水汽含量是在 GPS 载波信号通过对流层时产生对流层延迟量的基础上发展起来的[2]。早期，在测量数据处理方面这种延迟量是作为误差源来处理的，后来由于该延迟量与空间气象参数有着直接关系，所以被用来作为气象学研究的可靠技术。在反演大气水汽含量 PWV 过程中（图 1），几个关键模型对反演精度起着决定性的作用，如干延迟模型、加权平均温度模型。这几个模型都是通过概率统计的方法，经过对大气参数，如温度、气压、水汽压等进行统计分析得出的，下面着重分析这两个模型。

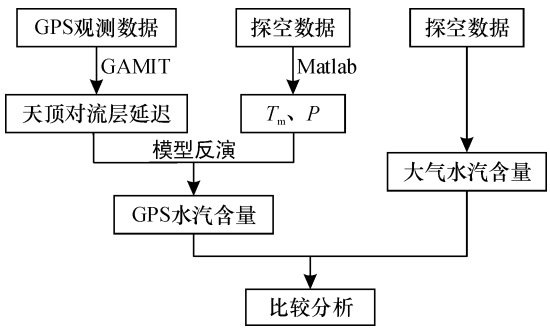

图 1　GPS 反演大气水汽含量全过程

Fig. 1　GPS whole processing inversion of atmospheric water vapor content

收稿日期：2011－12－14

基金项目：国家自然科学基金项目（41064001；41071294）；广西科技攻关项目（桂科攻 0816006－4）；广西区研究生科研创新项目（2011105960816M13）

作者简介：文鸿雁（1963—），男，博士，教授，研究方向：精密工程测量与专题信息系统，why@glite.edu.cn。

引文格式：文鸿雁，潘元进，何美琳，等. 基于 IGS 站不同区域可降水量变化分析对比研究［J］. 桂林理工大学学报，2012，32（4）：524－527.

1.1　干延迟模型

用 GAMIT 软件处理所得是天顶方向总的对流层延迟量，其包括湿延迟和干延迟，而湿延迟量由于变化无规律，很难用模型来统计，而干延迟量相对稳定，受气温、气压和水汽压等气象因素影响，很容易用概率统计的方向来模型化。有了干延迟量就可以直接求出湿延迟量，所以干延迟的求解精度直接影响到整个水汽反演的精度。常用的天顶方向干延迟模型有萨斯塔莫宁模型(Saastamoinen)、霍普费尔德模型(Hopfield)、勃兰克模型(Black)3 种模型。经过与实际测量气象数据资料比较后认为，Saastamoinen 模型相对于其他两种模型求得的天顶干延迟量精度更高[3]。下面对该模型进行介绍。

$$\begin{cases}\Delta L_{z,S}^{d} = 0.2277 \cdot \dfrac{P}{F(\varphi,h_0)},\\ F(\varphi,h_0) = 1 - 0.0026 \cdot \cos 2\varphi - 0.00028h_0。\end{cases} \tag{1}$$

其中：φ 为测站纬度(°)；h_0 为测站海拔高(km)；P 为测站地面气压(hPa)；$\Delta L_{z,S}^{d}$ 为由 Saastamoinen 模型计算得到的天顶干延迟 (cm)。由上述模型可以看出该模型对测站坐标解算精度要求相对较高，受测站纬度和高程的影响较大。

1.2　加权平均温度模型

由 ΔL_z^{total} 中分离出 ΔL_z^{d} 之后，就得到天顶湿延迟 ΔL_z^{W}。天顶湿延迟与大气可降水量 PWV 之间的关系为

$$PWV = \prod \cdot \Delta L_s^{W}, \tag{2}$$

式中：无量纲转换因子 $\prod$ 的近似值为 0.15，其实际计算公式[3] 为

$$\prod = \frac{10^6}{\rho_l \cdot \dfrac{R}{m_w} \cdot \left[\dfrac{k_3}{T_m} + k_2 - \dfrac{m_w}{m_d} \cdot k_1\right]}。 \tag{3}$$

上式中除了 T_m 大气加权平均温度的值是未知，其余几个变量都是已知值。所以加权平均温度是影响反演精度的又一重要参数。

最常用计算 T_m 的是 Bevis 模型

$$T_{m,B} = 70.2 + 0.72T_s。 \tag{4}$$

这种方法是从单因素考虑的，最大优点是估算 T_m 简便，只有一个变量即地表温度 T_s，加权平均温度 T_m 随 T_s 的地理和季节变化反映出了地理和季节变化[4]。其实该模型是一种通用模型，但对于部分区域精度可能存在差异，所以建议建立区域的加权平均温度模型。本文由于气象资料有限，未建立区域模型，所以引用 Bevis 模型。

2　探空资料统计及 GAMIT 解算分析

2.1　探空站介绍

探空站作为气象学研究有力的工具，与 IGS 站类似，可以从网上下载其探空数据，目前国内已经在不同的区域建立了大概 100 多个站（图 2），每个站都有相应的编号，在下载数据时可以查看该编号。探空数据可以单天下载，也可以按月份下载，其应用可以根据个人需要，本文选取了北京站(54511)、上海站(58362)、武汉站(57494) 3 个站的探空数据（由于西安站未建立探空站，所以无参考数据）。获取探空站数据就可以得出各项气象参数，这些气象参数可以拿来统计建立各种气象模型，如加权平均温度、干延迟模型等。本文由于只是进行水汽含量的对比分析，所以查得 2010－07－25—08－23 的 60 组探空水汽含量 PWV 值，以此作为对比的参考量。

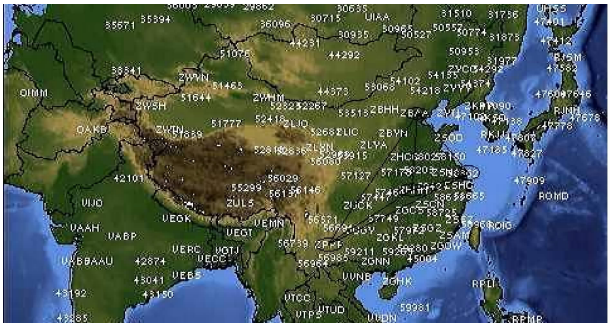

图 2　国内探空站分布图

Fig. 2　Domestic sounding station map

2.2　GAMIT 软件处理及数据分析

使用 GAMIT 软件进行 GPS 数据处理，需要对控制文件的几个关键参数进行设置，以 IGS 提供的当前历元测站坐标作为近似坐标，天线相位中心进行 ELEV（高度角函数法）改正，采用 Saastamoinen 对流层改正模型及 Niell 映射函数，按照 PWL（分段线性法）每隔 2 h 估计一组测站天顶对流层延迟。本文选取了北京站（bjfs）、上海站（shao）、武汉站（wuhn）、西安站（xian），由于西安站数据不充足，未对其进行处理。

通过解算得出天顶方向对流层延迟量，再基

于模型反演的出水汽含量 PWV 值，如图 3 ~ 图 5 所示。图中虚线是探空水汽含量值，其观测数据每天只有 2 个，分别是 0 时和 12 时，本文选取的是 2010 - 07 - 25—08 - 23 共 30 d 的数据；实线是通过 GPS 反演得出的 PWV 值，通过 GAMIT 解算得出对流层解是按 2 h 进行解算的，所以单天解可以得出 13 个值，为了与探空值对照比较，选取 GPS - PWV 值时也是按照 0 时和 12 时进行选取的。由图分析可知，变化趋势基本一致，GPS/PWV 与探空 PWV 相关系数最小值为 0.801，相关性较好。

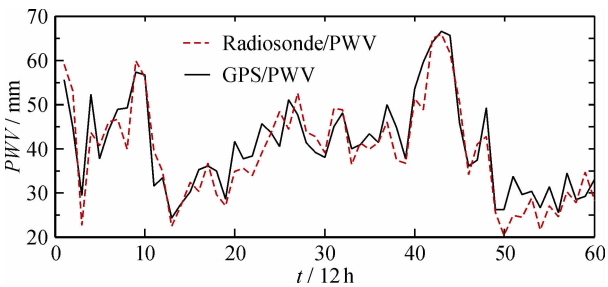

图 3 北京房山站(bjfs)GPS - PWV 与探空 PWV 比较

Fig. 3 Comparison of GPS/PWV and radiosonde/PWV at Beijing Fangshan station (bjfs)

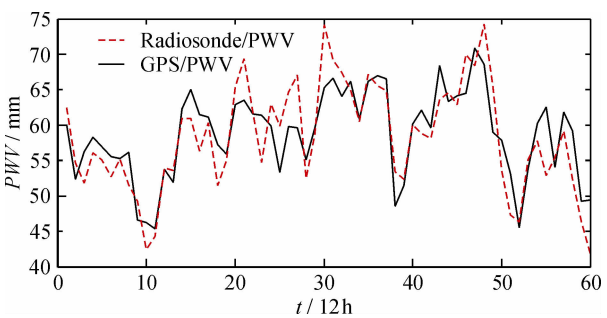

图 4 上海站(shao)GPS - PWV 与探空 PWV 比较

Fig. 4 Comparison of GPS/PWV and radiosonde/PWV at Shanghai station (shao)

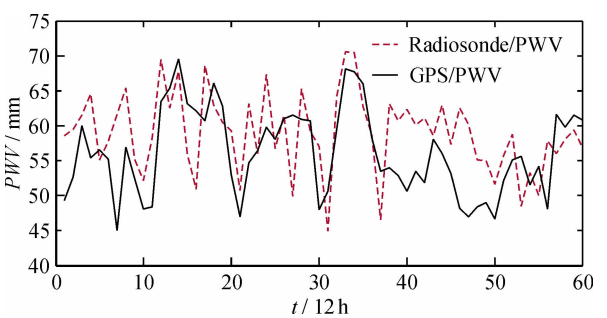

图 5 武汉站 (wuhn) GPS - PWV 与探空 PWV 比较

Fig. 5 Comparison of GPS/PWV and radiosonde/PWV at Wuhan station (wuhn)

GPS 反演值与探空 PWV 值精度情况如表 1，其中上海站精度相对较好，且与探空值相关性较好，而武汉站精度相对较差，其最小差值为 0.35 mm，最大差值为 11.58 mm，探空数据时间序列值变化较大，但 GPS 反演 PWV 值与探空 PWV 值变化趋势相近，3 个站反演的精度都可以达到 mm 级的精度。

表 1 GPS/PWV 与无线电探空/PWV 比较

Table 1 GPS/PWV compared with radiosonde/PWV

精度指标	GPS/PWV - Radiosonde/PWV		
	北京	上海	武汉
均值/mm	1.424	0.430	2.837
标准差	4.408	3.961	6.160
相关系数	0.827	0.849	0.801

注：均值为 30 d 观测数据平均值；无线电探空数据为各地观测值。

2.3 不同区域水汽变化情况分析

国内每年的 7、8 月是全年降水量比较充足的月份，而各个区域降水量情况变化较大，尤其南、北方变化较大，北方相对于南方降水量较小一些。本文通过 GPS 反演大气水汽含量得出了北京、上海、武汉 3 个地区 30 d 的水汽值，如图 6 所示。

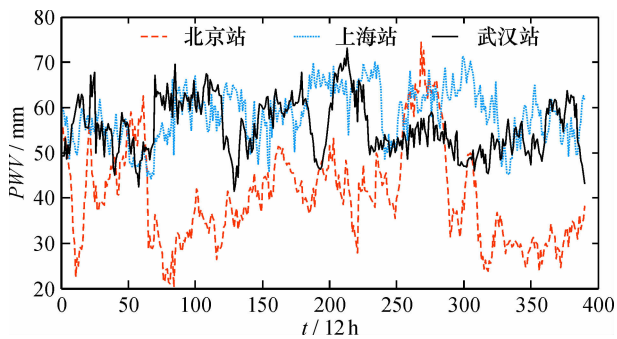

图 6 区域 GPS - PWV 变化情况

Fig. 6 Regional variation of GPS - PWV

可以看出，区域水汽含量变化明显，上海地区水汽相对较高，这可能与上海市 8 月份受到第 9 号超强台风“梅花”北上影响，使得降水量增加；北京地区降水量少，是由于北京地处北方，雨量相对较少，而曲线凸起的地方是北京地区极端天气的体现，其 PWV 值最大为 74.44 mm；而 2010 年武汉地区 8 月份气候相对往年有些反常，降水量较多，使得温度较低。每个区域单日的可降水量变化较大，这是因为 8 月份为雷雨季节，可降水量变化明显。上海站与武汉站所处地理纬度相

近，所以其区域降水量较北京房山站多一些。

3 结　论

本文探讨了 GPS 反演大气水汽含量的关键步骤及关键模型，提出了建立区域模型以提高反演精度。利用 IGS 参考站数据进行天顶方向对流层延迟量解算，经过模型反演得出大气水汽含量 PWV 值，通过与探空数据进行比较，得出了 GPS 反演 PWV 值的精度可以达到 mm 级的精度，且相关性较好，说明这一技术的可靠性和可用性。

通过 GPS 反演得出的水汽含量可以很好地反映水汽变化情况，不同区域在同一季度的变化明显。水汽含量受台风影响明显，8 月份上海站受台风影响，水汽含量明显增多。南北方由于地理纬度的不同，区域的降水量也有所不同，南方相对于北方雨水量较多一些。

参考文献：

[1] 李征航，黄劲松. GPS 测量与数据处理［M］. 武汉：武汉大学出版社，2005.

[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] 李征航，张小红. 卫星导航定位新技术及高精度数据处理方法［M］. 武汉：武汉大学出版社，2009.

[4] 王勇，柳林涛，郝晓光，等. 武汉地区 GPS 气象网应用研究［J］. 测绘学报，2007，36（2）：141－145.

[5] 王勇，梁洪有，柳林涛. GPS 气象的可靠性检核研究［J］. 测绘科学，2006，31（5）：122－123.

[6] 于胜杰，柳林涛. 水汽加权平均温度回归公式的验证与分析［J］. 武汉大学学报：信息科学版，2009，34（6）：741－744.

[7] 刘旭春，张正禄，张鹏，等. GPS 反演大气综合水汽含量的影响因素分析［J］. 测绘科学，2007，32（2）：21－23.

[8] 张双成，叶世榕，刘经南，等. 基于 IGS 超级跟踪站的近实时 GPS 气象研究及应用［J］. 测绘科学，2008，33（2）：93－95.

[9] 王晓英，戴仔强，曹云昌，等. 中国地区地基 GPS 加权平均温度 T_m 统计分析［J］. 武汉大学学报：信息科学版，2011，36（4）：412－416.

[10] 朱爽，姚宜斌，张瑞天. 天顶对流层延迟计算方法研究［J］. 大地测量与地球动力学，2011，31（3）：120－123.

Comparison of Precipitation Changes in Different Regions Based on IGS Station

WEN Hong-yan[1a,1b], PAN Yuan-jin[1a,1b], HE Mei-lin[1a,1b], SUN Gang-chen[1c], LIU Li-long[1a,1b], LUO Man-jian[1a,2]

(1. a. *College of Surverying, Mapping and Geoinformation*; b. *Guangxi Key Laboratory for Spatial Information and Geomatics*; c. *College of Civil Engineering, Guilin University of Technology, Guilin* 541004, *China*; 2. *Guangxi Bureau of Surveying, Mapping and Geoinformation, Nanning* 530004, *China*)

Abstract: Data from three IGS observation stations (Beijing, Wuhan and Shanghai) is selected by the open observational data and precise ephemeris data of IGS stations. GAMIT software is used to calculate the zenith direction troposphere detention quantity based on GPS inverse technology. From the experience models, atmospheric water vapor content is obtained by tropospheric delay and regional mean temperature. Compared with radio sound data, the conclusion is that the two methods have good accordance. After analysis of the 3 variation characteristics of regional water, the inversion of atmospheric water vapor content can well reflect the regional difference of weather parameter.

Key words: IGS station; atmospheric water vapor content (PWV); radiosonde data; regional variation of water vapor