

文章编号:1004-9045(2008)04-0346-05

## 地基 GPS 不同水汽反演方法的误差分析

徐桂荣, 陈波, 万蓉, 李武阶, 冯光柳

(中国气象局武汉暴雨研究所, 武汉 430074)

**摘要:**利用湖北宜昌 2007 年观测的 GPS 对流层天顶延迟数据,对采用不同水汽反演方法计算的对流层可降水量  $PW$  的正确度和精密度进行对比分析。结果显示:不同天顶干延迟计算模型对 GPS  $PW$  的精密度影响不大,但对其正确度有明显的影响,与探空  $PW$  相比,Hopfield 模型计算的 GPS  $PW$  的平均偏差最小,Saastamoinen 模型的平均偏差次之,而 Black 模型的平均偏差最大;大气加权平均温度对 GPS  $PW$  的正确度有重要影响,对其进行本地化订正可以明显减小 GPS  $PW$  与探空  $PW$  的偏差,但对 GPS  $PW$  的精密度影响不大;GPS  $PW$  与探空  $PW$  的相关性受大气水汽含量的影响,当大气水汽含量较低( $PW \leq 65$  mm)时,两者的相关系数可达 0.92,两者的平均偏差为 3.8 mm,偏差的均方差为 6.4 mm,而当大气水汽含量较大时,GPS  $PW$  与探空  $PW$  的偏差会增大,两者的相关系数会变小,这可能与 GPS 水汽反演方法有关;GPS  $PW$  比探空  $PW$  偏小,这可能是由两种探测方法的不同所造成的系统偏差。

**关键词:**地基 GPS;可降水量;正确度;精密度

**中图分类号:**P426.1+5 **文献标识码:**A

### 1 引言

GPS 气象学(GPS/MET)于 20 世纪 80 年代后期最先在美国起步,它利用 GPS 理论和技术来遥感地球大气,进行气象学的理论和方法研究,如测定大气温度及水汽含量,监测气候变化等。当 GPS 卫星发出的信号穿越大气层中对流层时,由于大气成分的折射而产生信号时延。特别是水汽会导致独特而显著的 GPS 信号时延,这种延迟量近似正比于沿信号传播路径上的大气水汽的总含量。Bevis 等<sup>[1]</sup>在 1992 年推导出了湿延迟、可降水量和大气加权平均温度三者之间的函数关系式,这使地基 GPS 测量可降水量资料真正在气象上定量使用成为可能。20 世纪 90 年代中期以来,我国也逐步开展了地基 GPS 观测在气象学中的应用研究和业务试验工作<sup>[2]</sup>。由于 GPS 系统对大气的测量不仅精度高、空间覆盖面大,而且不受天气条件影响,能全天候地对大气进行监测,GPS 测量已成为常规探空观测水汽的有效补充,并在气象科学研究和业务领域得到了广泛的应用。

然而,GPS 反演可降水量  $PW$ (Precipitable Water)的准确度直接影响到 GPS  $PW$  定量使用的效果。我国学者试验发现,GPS  $PW$  与由探空资料计算得到的  $PW$  相比,两者平均偏差小的可以达到 0.1 mm,其偏

差的均方差约为 2.0 mm<sup>[3]</sup>,而两者平均偏差大的可以达到 6.5 mm,其偏差的均方差为 4.3 mm<sup>[4]</sup>。因此 GPS  $PW$  的准确度分析和提高 GPS  $PW$  准确度是 GPS 观测网建立后定量使用 GPS  $PW$  时必须首先完成的工作。湖北地基 GPS 水汽监测网从 2006 年开始布网建设,2007 年已有 10 个 GPS 站进行水汽监测试验,待 GPS 水汽监测网完成建设后将有近 30 个 GPS 站,届时可以对长江中游区域大气水汽状况进行监测。由于宜昌 GPS 观测样本较多,同时宜昌又是高空探空站,因此,本文利用宜昌 2007 年观测的 GPS 对流层天顶延迟数据,采用不同的水汽反演方法计算得到 GPS  $PW$ ,并将 GPS  $PW$  与由探空资料计算得到的  $PW$  进行对比分析,用以评估不同水汽反演方法的正确度和精密度。

### 2 数据和方法

利用地基 GPS 资料来反演  $PW$  的主要步骤如下:

(1)利用 GAMIT 或 Bernese 等软件解算 GPS 对流层天顶总延迟  $ZTD$ 。

(2)利用地面气压、气温等资料,采用某种干(或静力)延迟计算模型来求解天顶干延迟  $ZHD$ 。

(3)天顶总延迟  $ZTD$  减去天顶干延迟  $ZHD$  就可以得到天顶湿延迟  $ZWD$ ,将天顶湿延迟  $ZWD$  乘上一个转换系数  $II$  可以转换得到大气可降水量  $PW$ ,即:

收稿日期:2008-02-15;定稿日期:2008-04-15

基金项目:国家自然科学基金(40575011)、中国气象局武汉暴雨研究所科研业务项目(0604)、中国气象局武汉暴雨研究所开放基金(IHR2007G01)、湖北省气象局科技发展基金(2007Z03)共同资助

作者简介:徐桂荣,男,1973 年生,工程师,博士,主要从事暴雨监测技术与应用研究。E-mail:grxu2007@gmail.com

$$\begin{cases} PW=II \times ZWD \\ ZWD=ZTD-ZHD \end{cases} \quad (1)$$

常用的计算天顶干延迟的三种经验模型分别有 Saastamoinen 模型<sup>[5]</sup>, Hopfield 模型<sup>[6]</sup>和 Black 模型<sup>[7]</sup>, 它们的具体形式分别为:

$$\begin{cases} ZHD_s=0.2277 \frac{P_s}{F(\varphi, H)} \\ F(\varphi, H)=1-0.0026 \cos(2\varphi)-0.00028H \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} ZHD_H=1.552(h-H) \frac{P_s}{T_s} \\ h=40.082+0.14898(T_s-273.16) \end{cases} \quad (3)$$

$$ZHD_B=0.2343(T_s-4.12) \frac{P_s}{T_s} \quad (4)$$

式(2)–(4)中, 天顶干延迟的单位是 cm,  $P_s$  为地面气压(单位为 hPa),  $T_s$  为地面绝对温度,  $H$  为测站海拔高度(单位为 km),  $\varphi$  是测站纬度(单位为弧度), 下标 S、H 和 B 分别代表 Saastamoinen 模型、Hopfield 模型和 Black 模型。

天顶湿延迟  $ZWD$  转换为可降水量  $PW$  公式中的转换系数  $II$  的表达式如下<sup>[8]</sup>:

$$\begin{cases} II=\frac{10^6}{\rho_w R_v (\frac{k_3}{T_m} + k_2)} \\ k_2=k_2-k_1 \frac{M_w}{M_d} \end{cases} \quad (5)$$

式中  $\rho_w$  为液态水密度,  $R_v$  是水汽气体常数,  $M_w$ 、 $M_d$  分别为水汽和干空气分子摩尔质量,  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  为大气折射系数, Thayer<sup>[9]</sup>给出的数值为:  $k_1=(77.604 \pm 0.014) \text{ K} \cdot \text{hPa}^{-1}$ ,  $k_2=(64.79 \pm 0.08) \text{ K} \cdot \text{hPa}^{-1}$ ,  $k_3=(3.776 \pm 0.004) \text{ K}^2 \cdot \text{hPa}^{-1}$ ,  $T_m$  为大气加权平均温度, 其定义式为<sup>[10]</sup>:

$$T_m = \frac{\int_H^\infty (\frac{e}{T}) dz}{\int_H^\infty (\frac{e}{T^2}) dz} \quad (6)$$

式(6)中测站高度  $H$  的单位为  $m$ ,  $e$  为水汽压,  $T$  为绝对温度。

转换系数  $II$  为无量纲数, 其值与  $T_m$  的大小有关。由于难以求得(6)式中  $T_m$  的严密积分值, 一般常取转换系数  $II=0.15$  (根据(5)式可知, 相当于取  $T_m$  为经验常数  $256.18 \text{ K}$ ), 或者利用地面和探空资料对(6)式中  $T_m$  进行数值积分, 然后利用地面温度等对  $T_m$  进行统计建模, 如 Bevis 等(1992)利用地面温度  $T_s$  建立的统计模型  $T_m=70.2+0.72T_s$ <sup>[11]</sup> (以下简称 Bevis  $T_m$  模型)。

试验值的准确度反映了系统误差和随机误差的综合, 表示了试验结果与真值的一致程度; 正确度反映系统误差的大小, 是指在一定的试验条件下, 所有系统误差的综合, 而精密性(即精度)反映了随机误差

大小的程度, 是指在一定的试验条件下, 多次试验值的彼此符合程度<sup>[11]</sup>。在检验 GPS  $PW$  的准确度时常用高精度水汽辐射计或探空资料计算的  $PW$  来作为参考值, 由于湖北境内目前尚未有高精度水汽辐射计观测点, 因此, 本文选取探空资料计算得到的  $PW$  作为检验 GPS  $PW$  准确度的参考值, GPS  $PW$  的正确度(即平均偏差 Bias)和精密性(即均方差 mean-root-square error)分别用式(7)和式(8)计算:

$$PW_{Bias} = \frac{\sum_{i=1}^n (PW_{G_i} - PW_{S_i})}{n} \quad (7)$$

$$PW_{MRSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (PW_{G_i} - PW_{S_i})^2}{n}} \quad (8)$$

式(7)、(8)中  $PW_{Bias}$ 、 $PW_{MRSE}$  分别表示 GPS  $PW$  的正确度和精密性,  $PW_{G_i}$  和  $PW_{S_i}$  分别表示第  $i$  次测量对应的 GPS  $PW$  和探空  $PW$ ,  $n$  为样本容量。

为了考查 GPS 不同水汽反演方法计算得到的 GPS  $PW$  的正确度和精密性, 本文利用宜昌 2007 年 GAMIT 软件解算得到的 GPS 对流层天顶延迟数据, 分别采用不同水汽反演方法来求解 GPS  $PW$ , 并将之与探空  $PW$  进行对比分析。在求解 GPS  $PW$  时, 干延迟计算模型分别采用 Saastamoinen 模型、Hopfield 模型和 Black 模型; 而在计算转换系数  $II$  时, 分别对  $T_m$  取常数(即  $II=0.15$ )、Bevis  $T_m$  模型和  $T_m$  本地化模型。宜昌  $T_m$  本地化模型是利用宜昌 2002—2006 年地面和探空资料进行统计分析得到, 并用宜昌 2007 年地面和探空资料计算的  $T_m$  (以下简称探空  $T_m$ ) 来对  $T_m$  模型进行检验。探空  $PW$  是利用宜昌 2007 年地面和探空资料计算得到。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 宜昌 $T_m$ 本地化模型的构建

本文利用宜昌 2002—2006 年地面和探空资料进行统计分析得到了宜昌  $T_m$  本地化模型  $T_m=42.05+0.84T_s$  (以下简称  $T_m$  本地化模型)。为对  $T_m$  本地化模型的可用性进行评估, 文中分别采用 Bevis  $T_m$  模型和  $T_m$  本地化模型来计算求解宜昌 2007 年  $T_m$ , 并将之与宜昌 2007 年探空  $T_m$  进行对比分析, 其结果见表 1。

表 1 模拟  $T_m$  与探空  $T_m$  的对比结果

$T_m$ 模型	相关系数	平均偏差/K	均方差/K
Bevis $T_m$ 模型	0.9686	6.8	1.9
$T_m$ 本地化模型	0.9686	0.2	1.7

从表 1 中可以看到,  $T_m$  本地化模型和 Bevis  $T_m$  模型模拟得到的  $T_m$  都与探空  $T_m$  具有很好的相关性, 其

相关系数都达到了 0.9686,但  $T_m$  本地化模型的准确度明显高于 Bevis  $T_m$  模型, $T_m$  本地化模型的平均偏差为 0.2 K,其均方差为 1.7 K,而 Bevis  $T_m$  模型的平均偏差为 6.8 K,其均方差为 1.9 K。由此可见, $T_m$  本地化模型能比 Bevis  $T_m$  模型更好地逼近探空  $T_m$ 。

### 3.2 GPS 不同水汽反演方法的对比分析

基于宜昌 2007 年 GAMIT 软件解算得到的 GPS 对流层天顶延迟数据,本文分别采用不同水汽反演方法来求解 GPS  $PW$ ,并将之与探空  $PW$  进行对比分析,用以评估不同水汽反演方法的正确度和精密度,所得结果见表 2。

从表 2 中可见,在同一种  $T_m$  模型下,以  $T_m$  本地化模型为例,对干延迟模型分别采用 Saastamoinen 模型、Hopfield 模型和 Black 模型计算得到的 GPS  $PW$  与探空  $PW$  均具有较好的相关性,两者的相关系数均达到 0.73 左右;另外,采用不同的干延迟模型计算得到的 GPS  $PW$  的精密度没有明显的差别,其与探空  $PW$  差值的均方差在 14.1~14.2 mm 之间;但采用不同干延迟模型对计算得到的 GPS  $PW$  的正确度有明显的影响,与探空  $PW$  相比,Hopfield 模型计算得到的 GPS

表 2 2007 年宜昌 GPS  $PW$  与探空  $PW$  的对比结果

$T_m$ 模型	干延迟模型	相关系数	平均偏差/mm	均方差/mm
$T_m=$ 常数	Saastamoinen	0.7298	-10.0	14.0
	Hopfield	0.7279	-8.9	14.0
	Black	0.7246	-14.8	14.1
Bevis $T_m$ 模型	Saastamoinen	0.7351	-8.8	14.0
	Hopfield	0.7336	-7.6	14.0
	Black	0.7286	-13.7	14.1
$T_m$ 本地化模型	Saastamoinen	0.7357	-8.1	14.1
	Hopfield	0.7344	-6.9	14.1
	Black	0.7291	-13.1	14.2

$PW$  的平均偏差最小,其值为 6.9 mm,Saastamoinen 模型的平均偏差次之,其值为 8.1 mm,而 Black 模型的平均偏差最大,其值为 13.1 mm。此外,从表 2 中还可以看到,采用不同的  $T_m$  模型对计算得到的 GPS  $PW$  的正确度有重要影响,以 Hopfield 模型为例,对  $T_m$  取常数(即  $II=0.15$ )计算得到的 GPS  $PW$  与探空  $PW$  的平均偏差为 8.9 mm,采用 Bevis  $T_m$  模型时计算得到的 GPS  $PW$  与探空  $PW$  的平均偏差减小为 7.6 mm,而采用  $T_m$  本地化模型时计算得到的 GPS  $PW$  与探空  $PW$  的平均偏差进一步减小至 6.9 mm,由此可见,对  $T_m$  进

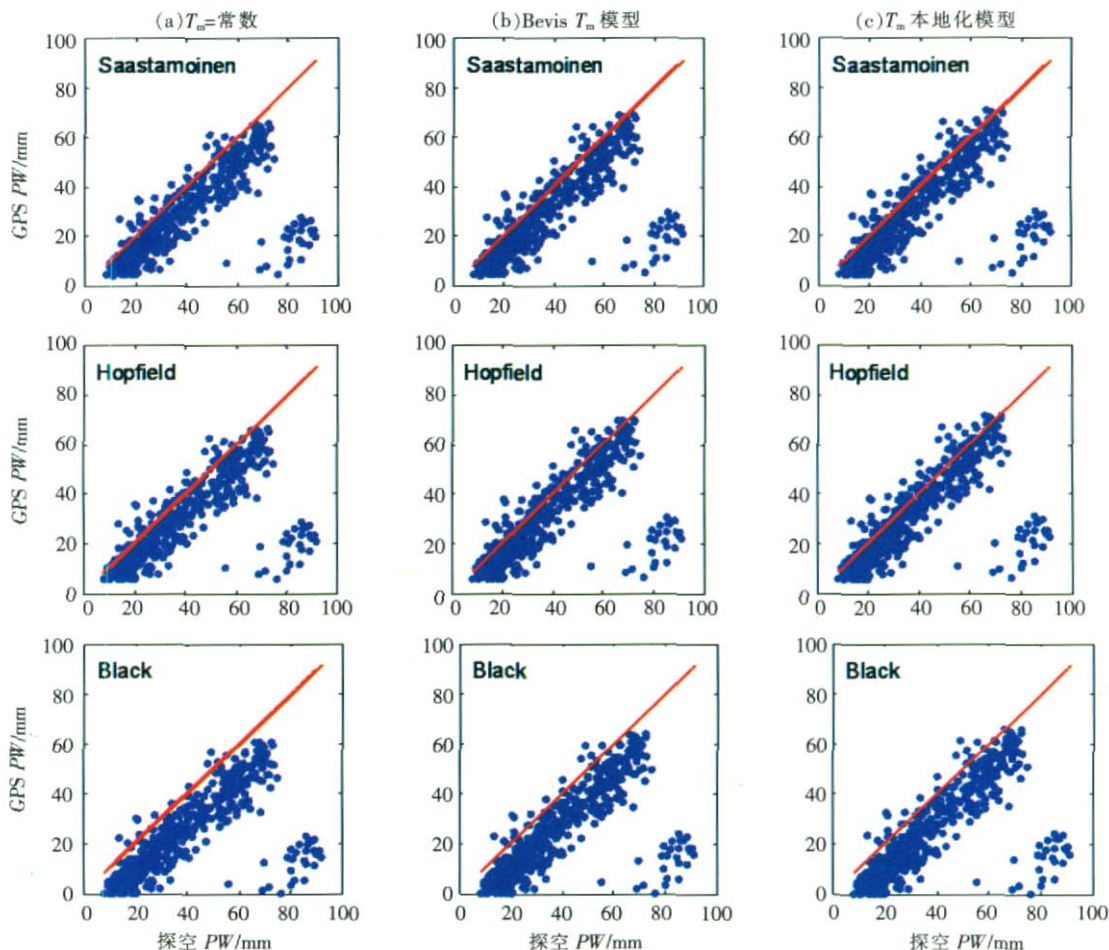


图 1 2007 年宜昌 GPS  $PW$  与探空  $PW$  之间相关关系的散点图  
(图中圆点为与探空  $PW$  值相对应的 GPS  $PW$  值,直线为 GPS  $PW$  与探空  $PW$  无偏差时的等值线)

行本地化订正可以明显减小 GPS  $PW$  与探空  $PW$  的偏差;然而,采用不同的  $T_m$  模型对计算得到的 GPS  $PW$  的精密度的影响不大,以 Hopfield 模型为例, $T_m$  模型分别采用常数、Bevis  $T_m$  模型和  $T_m$  本地化模型计算得到的 GPS  $PW$  与探空  $PW$  差值的均方差在 14.0~14.1 mm 之间。图 1 给出了 2007 年宜昌 GPS  $PW$  与探空  $PW$  之间相关关系的散点图,从图 1 中可以看到,GPS  $PW$  整体上比探空  $PW$  偏小,表 2 中 GPS  $PW$  与探空  $PW$  的平均偏差均为负值也证实了这一点,这种偏差可能是由两种探测方法的不同所造成的系统误差;另外,从图 1 中还可以看到,GPS  $PW$  与探空  $PW$  的偏差受大气水汽含量(或可降水量  $PW$ )的一定影响,当  $PW$  较小时( $PW \leq 65$  mm),GPS  $PW$  与探空  $PW$  的偏差较小,而当  $PW$  较大时( $PW \geq 65$  mm),GPS  $PW$  与探空  $PW$  的偏差较大,如图 1 中各小图中右下角一块散点所示,当大气水汽含量较大时,GPS  $PW$  比探空  $PW$  明显偏小,下节将对这个问题做进一步分析。

### 3.3 大气水汽含量对 GPS $PW$ 准确度的影响分析

为进一步分析大气水汽含量对 GPS  $PW$  的准确度的影响,表 3 给出了 2007 年宜昌大气水汽含量较小( $PW \leq 65$  mm)时 GPS  $PW$  与探空  $PW$  的对比分析结果。

表 3 2007 年宜昌  $PW \leq 65$  mm 时 GPS  $PW$  与探空  $PW$  的对比结果

$T_m$ 模型	干延迟模型	相关系数	平均偏差/mm	均方差/mm
$T_m$ =常数	Saastamoinen	0.9184	-6.9	6.2
	Hopfield	0.9176	-5.7	6.3
	Black	0.9177	-11.5	6.3
Bevis $T_m$ 模型	Saastamoinen	0.9207	-5.7	6.3
	Hopfield	0.9202	-4.5	6.3
	Black	0.9198	-10.6	6.3
$T_m$ 本地化模型	Saastamoinen	0.9210	-5.1	6.4
	Hopfield	0.9205	-3.8	6.4
	Black	0.9200	-10.1	6.4

从表 3 中可见,当大气水汽含量较小时,GPS  $PW$  与探空  $PW$  的相关系数相比于表 2 有明显的增加,GPS  $PW$  的正确度和精密度也有显著提高。以  $T_m$  模型采用  $T_m$  本地化模型和干延迟模型采用 Hopfield 模型为例,当  $PW \leq 65$  mm 时,与表 2 中的情况相比,GPS  $PW$  与探空  $PW$  的相关系数由 0.7344 增加到 0.9205,两者的平均偏差也由 6.9 mm 减小至 3.8 mm,两者偏差的均方差也由 14.1 mm 减小至 6.4 mm。现有的研究也表明,在 2~3 月份可降水量较小( $PW \leq 35$  mm)时,GPS  $PW$  与探空  $PW$  的平均偏差为 0.1 mm,两者偏差的均方差约为 2.0 mm<sup>[3]</sup>;而在 5~6 月份可降水量较大( $PW$  可达 65 mm 以上)时,GPS  $PW$  与探空  $PW$  的平均偏差为 6.5 mm,两者偏差的均方差为 4.3 mm<sup>[4]</sup>。由此可见,大气水汽含量会对 GPS  $PW$  的准确度产生影响,当大气水汽含量较小时,GPS  $PW$  与探空  $PW$  具有很好的相关性,两者的平均偏差和偏差的均方差都较小,而当大气水汽含量较大时,GPS  $PW$  与探空  $PW$  的相关系数就会减小,两者的平均偏差和偏差的均方差都会增大。

大气水汽含量影响 GPS  $PW$  的准确度可能与什么因素有关呢?图 2(a)和 2(b)分别给出了 2007 年宜昌所有  $PW$  和  $PW \leq 65$  mm 时 GAMIT 软件解算的 GPS 天顶延迟 ZTD 与探空  $PW$  之间相关关系的散点图。从图 2 可以看到,在考虑所有  $PW$  情况下,GPS 天顶延迟 ZTD 与探空  $PW$  具有很好的相关性,两者的相关系数  $r=0.9012$ ;而在考虑  $PW \leq 65$  mm 情况下,GPS 天顶延迟 ZTD 与探空  $PW$  仍具有很好的相关性,两者的相关系数  $r=0.9008$ 。由此可以初步确定,大气水汽含量的多少对 GAMIT 软件解算 GPS 天顶延迟并没有影响,或者说,大气水汽含量影响 GPS  $PW$  的准确度与 GAMIT 软件解算 GPS 天顶延迟的算法无关。但是,利用 GPS 水汽反演方法由 GPS 天顶延迟 ZTD 计算得到的 GPS

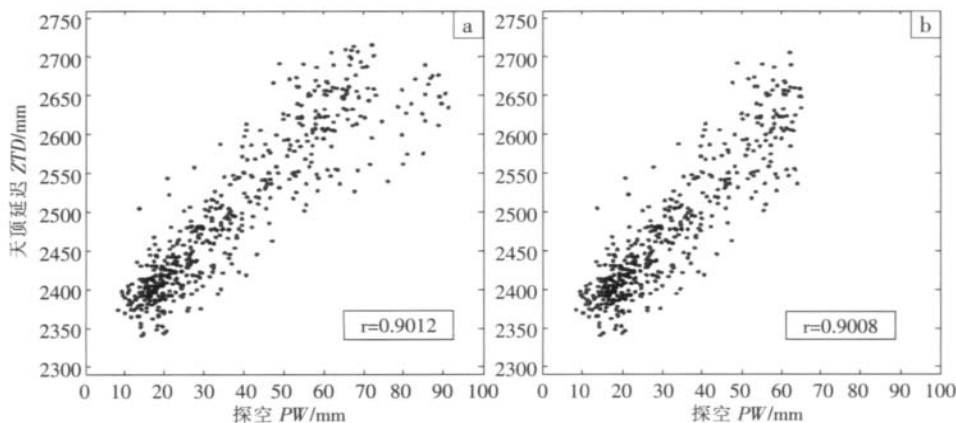


图 2 2007 年宜昌 GPS 天顶延迟 ZTD 与探空  $PW$  之间相关关系的散点图

(a 所有  $PW$ ; b  $PW \leq 65$  mm, 圆点为与探空  $PW$  相对应的 GPS 天顶延迟 ZTD 值,  $r$  为 GPS 天顶延迟 ZTD 与探空  $PW$  的相关系数)

$PW$  的准确度却受大气水汽含量(或  $PW$ )的影响。因此,可以初步确定,大气水汽含量影响 GPS  $PW$  的准确度可能与 GPS 水汽反演方法有关,这个问题值得进一步研究。

#### 4 结论与讨论

利用湖北地基 GPS 水汽监测网中宜昌站 2007 年观测的 GPS 对流层天顶延迟数据,采用不同的 GPS 水汽反演方法计算 GPS  $PW$ ,并将 GPS  $PW$  与探空  $PW$  进行对比分析,考查了 GPS 不同水汽反演方法计算的 GPS  $PW$  的正确度和精密性,得到如下结论:

(1)不同天顶干延迟计算模型对 GPS  $PW$  的精密性影响不大,但对 GPS  $PW$  的正确度有明显的影响,与探空  $PW$  相比,Hopfield 模型计算的 GPS  $PW$  的平均偏差最小,Saastamoinen 模型的平均偏差次之,而 Black 模型的平均偏差最大。

(2)大气加权平均温度对 GPS  $PW$  正确度有重要影响,对其进行本地化订正可明显减小 GPS  $PW$  与探空  $PW$  的平均偏差,但对 GPS  $PW$  精密性影响不大。

(3)GPS  $PW$  与探空  $PW$  的相关性受大气水汽含量的影响,当大气水汽含量较低( $PW \leq 65$  mm)时,两者的相关系数可达 0.92,两者的平均偏差为 3.8 mm,两者偏差的均方差为 6.4 mm,而当大气水汽含量较大时,GPS  $PW$  与探空  $PW$  的平均偏差会增大,两者的相关系数也会变小,这可能与 GPS 水汽反演方法有关,而与 GAMIT 软件解算 GPS 天顶延迟无关。

(4)GPS  $PW$  整体上比探空  $PW$  偏小,这可能是由两种探测方法的不同所造成的系统偏差。

因此,要提高 GPS  $PW$  的准确度,应该通过比较选择合适的反演方法,同时有必要对大气加权平均温度进行本地化订正。另外,大气水汽含量对 GPS  $PW$  准确度的影响是一个值得重视的问题。

#### 参考文献:

- [1] Bevis M, Businger S, Herring T, et al. GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system[J]. J Geophys Res, 1992, 97:15787-15801.
- [2] 李国平,黄丁发.GPS 遥感区域大气水汽总量研究回顾与展望[J].气象科技, 2004, 32(4):201-205.
- [3] 刘焱雄, H B Iz, 陈永奇.地基 GPS 技术遥感香港地区大气水汽含量[J].武汉测绘科技大学学报, 1999, 24(3):245-248.
- [4] 何平,徐宝祥,周秀骥,等.地基 GPS 反演大气水汽总量的初步试验[J].应用气象学报, 2002, 13(2):179-183.
- [5] Saastamoinen J. Contributions to the theory of atmospheric refraction [J]. Bull Geod, 1973, 107: 13-34.
- [6] Hopfield H S. Tropospheric effect on electromagnetically measured range: Prediction from surface weather data [J]. Radio Sci, 1971, 6 (3):357-367.
- [7] Black H D, Eisner A. Correcting satellite Doppler data for tropospheric effects[J]. J Geophys Res, 1984, 89(D2):2616-2626.
- [8] Bevis M, Businger S, Chiswell S R, et al. GPS meteorology: Mapping zenith wet delays onto precipitable water[J]. J Appl Meteor, 1994, 33: 379-386.
- [9] Thayer D. An improved equation for the radio refractive index of air[J]. Radio Sci, 1974, 9:803-807.
- [10] Davis J L, Herring T A, Shapiro I I, et al. Geodesy of radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length[J]. Radio Sci, 1985, 20:1593-1607.
- [11] 李云雁,胡传荣. 试验设计与数据处理[M].北京:化学工业出版社教材出版中心, 2005.

## Error Analysis on Precipitable Water Derived from Ground-based GPS with Various Methods

XU Gui-rong, CHEN Bo, WAN Rong, LI Wu-jie, FENG Guang-liu

(Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430074)

**Abstract:** Based on the ground-based GPS zenith delay data observed at Yichang in Hubei Province in 2007, precipitable water ( $PW$ ) is derived with various methods and error analysis on GPS  $PW$  is carried out. The results show that the correctness of GPS  $PW$  depends on dry zenith delay model, compared with  $PW$  obtained from radiosonde data (Sonde  $PW$ ), the bias of Hopfield model is the smallest while that of Black model is the biggest, and the bias of Saastamoinen model is between them; moreover, the correctness of GPS  $PW$  is also affected by atmospheric weighted mean temperature ( $T_m$ ), constructing a local model for  $T_m$  can significantly reduce the bias between GPS  $PW$  and Sonde  $PW$ ; however, the precision of GPS  $PW$  is hardly affected by dry zenith delay model and  $T_m$ . Furthermore, the correlation between GPS  $PW$  and Sonde  $PW$  is affected by  $PW$ , in the case of small  $PW$  ( $PW \leq 65$  mm), the correlation coefficient between them reaches 0.92 with a bias of 3.8 mm and a mean-root-square error of 6.4 mm, but with the increasing  $PW$ , the correlation coefficient reduces while the bias and mean-root-square error increase. In addition, GPS  $PW$  is small than Sonde  $PW$  on the whole, which might be due to the system error of the two instruments.

**Key words:** Ground-based GPS; Precipitable water; Correctness; Precision