

文章编号: 1000-050X(2000)05-0400-04

# 利用地面气象观测资料确定对流层加权平均温度<sup>\*</sup>

刘焱雄<sup>1</sup> 陈永奇<sup>2</sup> 刘经南<sup>3</sup>

(1 武汉测绘科技大学 GPS 研究中心, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

(2 香港理工大学土地测量与地理资讯学系, 香港九龙红磡)

(3 武汉测绘科技大学校长办公室, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

**摘要** 地基 GPS 气象学的核心思想是通过垂直方向上 GPS 信号的湿分量延时确定出可降水分, 而这两个物理量之间的转换必须使用对流层加权平均温度。本文首先讨论了上述转换估计中加权平均温度的几种逼近方式及其容许误差, 然后利用香港地区的地面和高空气象资料, 采用逐步回归分析方法, 建立了适合香港地区的对流层加权平均温度计算公式, 通过数据分析表明, 这个公式有效地消除了在香港地区使用 Bevis 经验公式引起的系统误差, 较好地满足了地基 GPS 气象应用中实时性和高精度的要求。本研究也充分表明, 在地基 GPS 气象研究中, 应该利用本地区的气象资料来确定适合本地区的估计对流层加权平均温度的经验公式。

**关键词** 对流层加权平均温度; 转换参数; 逐步回归分析

**分类号** P228.4 **文献标识码** A

地基 GPS 气象学中, 垂直方向上 GPS 信号的湿分量延时 WZD 至可降水分 PWV 的转换公式<sup>[1~3]</sup>为:

$$PWV = F \cdot WZD$$

$$F = 10^6 / [d \cdot R_v (k_3 / T_m + k'_2)] \quad (1)$$

式中,  $d$  是液态水密度, 其物理常数为  $d = 10^3$ ;  $R_v$  为水汽的气体常数,  $R_v = 461.495$ ;  $k'_2$  和  $k_3$  是大气物理参数, 它们的经验值分别为  $k'_2 = 22.13$  (中误差为  $\pm 2.20$ ),  $k_3 = 3.739 \times 10^5$  (中误差为  $\pm 0.012 \times 10^5$ )<sup>[3]</sup>;  $T_m$  是对流层加权平均温度, 它是测站上空水汽压和绝对温度沿天顶方向的积分值, 其定义为<sup>[3~5]</sup>:

$$T_m = \int (e/T) \cdot dh \Big/ \left( \int (e/T^2) \cdot dh \right) \quad (2)$$

式中,  $e$  和  $T$  分别为测站天顶方向上某点的水汽压和绝对温度。由于  $e$  和  $T$  的分布随时间和空间变化, 式(2)计算出的  $T_m$  也具有时空变化特性, 所以, 式(1)中的转换参数  $F$  并非一个常数, 它是  $T_m$  的函数。

气象预报中需要提供实时的可降水分观测值, 这就要求实时解算垂直湿分量延时和转换参数  $F$ 。现有的地基 GPS 技术可以保证实时计算垂直湿分量延时, 而实时计算转换参数  $F$  必须实

时计算对流层加权平均温度  $T_m$ 。由于水汽的空间分布极不规则, 时变特性非常复杂, 不可能得到式(2)的严密积分值, 所以, 如何实时、高精度地计算对流层加权平均温度成为地基 GPS 气象应用中的关键问题<sup>[1]</sup>。

## 1 几种逼近 $T_m$ 的近似方法

为了满足实际应用的需要, 国外学者提出了几种近似计算  $T_m$  的方法, 国内有关这方面的文献则很少。

### 1.1 近似积分值

虽然不能直接得到式(2)的严密积分值, 但如附加一些条件, 式(2)仍然是可积的。Askne 等人给出了 3 个假设条件: ①对流层的气体为理想气体, 满足水汽静力学方程; ②温度沿高程的递减速率为  $\alpha$ ; ③水汽压沿高程的变化为  $e = e_0 \cdot (P/P_0)^\lambda$ , 其中  $e_0$  和  $P_0$  分别为地面水汽压和总气压值;  $e$  和  $P$  分别为任意高度的水汽压和总气压值;  $\lambda$  为递减参数。

基于这 3 个假设, Askne 等给出了如下积分公式<sup>[4]</sup>:

收稿日期: 2000-03-29.

\*香港理工大学 GV366 资助项目。

$$T_m = T_0 \left( 1 - \frac{R\alpha}{(\lambda + 1) \cdot g} \right) \quad (3)$$

式中,  $T_0$  为地面绝对温度;  $R$  为气体常数;  $g$  为重力加速度。

### 1.2 常数

由于转换参数  $F$  在 1/6.5 附近波动, Baker 等人建议将  $F$  当作常数, 即  $F = 1/6.5^{[9]}$ 。将  $F$  的值回代到式(1), 得  $T_m = 269.7\text{K}$ 。这表明, 如果  $F$  为常数,  $T_m$  也为常数。

### 1.3 Bevis 公式

对流层中的水汽绝大部分位于地面上空 2~3km 的范围内。美国夏威夷大学的 Bevis 教授等人认为, 对流层加权平均温度应该与地面绝对温度  $T_0$  之间存在着强相关关系, 为此, 他们利用美国本土的高空探测资料, 拟合出如下经验公式<sup>[3]</sup>:

$$T_B = 70.2 + 0.72 T_0 \quad (4)$$

式中,  $T_B$  代表  $T_m$  的估值, 其精度为 4.7K。

### 1.4 数值积分法

水汽分布在地面上空 12km 以内的区域, 而无线电探空气球可以提供地面至 20 多 km 高空的温度、湿度和气压观测剖面, 所以, 根据探空资料提供的水汽压和绝对温度垂直观测剖面, 式(2)可用数值积分方法逼近:

$$T_m = \frac{\sum (h_2 - h_1) e / T}{\sum (h_2 - h_1) e / T^2} \quad (5)$$

式中,  $h_2$  和  $h_1$  为相邻两次观测的高度值;  $e$  和  $T$  分别为  $h_2$  到  $h_1$  的平均水汽压和绝对温度。这是目前公认最为精确的对流层加权平均温度计算方法<sup>[7,8]</sup>。文献[9]的研究结果表明, 上述数值积分中逼近误差和气象元素观测误差的综合影响小于 1K。

## 2 对流层加权平均温度的容许误差

为保证式(1)的转换精度优于 1mm, 这里首先考察对流层加权平均温度的容许误差。显然地, 除加权平均温度误差外, 大气物理参数的误差也必然影响转换参数的精度。式(1)中, 取  $F$  对  $k'_2$ 、 $k_3$  和  $T_m$  的微分得:

$$dF = \frac{10^6}{d \cdot R_v \cdot (k_3 + T_m \cdot k'_2)^2} (-T_m^2 \cdot dk'_2 - T_m \cdot dk_3 + k_3 \cdot dT_m) \quad (6)$$

假设  $k'_2$  和  $k_3$  的中误差分别为  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$ ,  $T_m$  的中误差为  $\sigma_T$ , 这三者之间相互独立。由方差传播定律, 得  $F$  的中误差  $\sigma_F$  为:

$$\sigma_F = \frac{10^6}{d \cdot R_v \cdot (k_3 + T_m \cdot k'_2)^2} \cdot \sqrt{(T_m^2 \cdot \sigma_1)^2 + (T_m \cdot \sigma_2)^2 + (k_3 \cdot \sigma_T)^2} \quad (7)$$

为了确定可能出现的转换参数的最大误差  $\Delta_F$ , 式(7)必须选择合适的  $T_m$ 。由于  $\sigma_F$  是  $T_m$  的增函数, 取最大的  $T_m$  即可得到  $\Delta_F$ 。香港地区最大的  $T_m$  为 300K, 将它和  $d$ 、 $R_v$ 、 $k'_2$ 、 $k_3$  的参数值代入式(7), 得到  $\Delta_F$  和  $\sigma_T$  的关系为:

$$\Delta_F = 0.5595 \times 10^{-3} \sqrt{1.2075 + \sigma_T^2} \quad (8)$$

表 1 列出了几组  $\Delta_F$  和  $\sigma_T$  的对应关系。垂直湿分量延时不会超过 0.5m, 假定  $WZD = 500\text{mm}$ , 由转换参数误差引起的等效可降水误差见表 1。显然, 对流层加权平均温度的精度决定了转换参数的精度, 如果要保证式(1)中可降水的转换精度优于 1mm, 那么, 对流层加权平均温度的精度必须优于 3.4K。

表 1 对流层加权平均温度误差与转换参数最大误差的对应关系

Tab. 1 The Relationship between  $\Delta_F$  and  $\sigma_T$

$\sigma_T / \text{K}$	$\Delta_F$	可降水误差/mm
1	0.000 8	0.4
2	0.001 2	0.6
3	0.001 8	0.9
4	0.002 3	1.15
5	0.002 9	1.45

## 3 逐步回归分析

### 3.1 4 种逼近方法的缺陷

1) 利用式(3)计算对流层加权平均温度, 必须首先确定参数  $\alpha$  和  $\lambda$ 。 $\alpha$  和  $\lambda$  具有时空变化特征, 特别是  $\lambda$  的确定非常困难, 不同地区、不同季节, 参数  $\lambda$  的变化非常大。另外, 其 3 个假设条件很不精确。因此, 在实际应用中, 很少采用式(3)。

2) 如果假定  $F$  为常数 1/6.5, 当加权平均温度在 230K~310K 之间变化时, 对应的转换参数误差的变换范围为 -0.022~0.023, 等效的可降水误差超过 5mm (假定  $WZD = 400\text{mm}$ ), 这么大的转换误差是无法接受的。因此, 在气象应用中不能假定  $F$  为常数 1/6.5。

3) 数值积分方法是目前最精确的方法。国际气象组织在全球拥有上千个高空探测站, 由于维持费用的原因, 它们只在每天早晚 8 点(北京时间)同时探测全球的气压、温度和湿度的垂直观测

剖面。这样,基于探空资料的数值积分方法只能计算出早晚8点的加权平均温度,其他时间段没有探空资料,也无法计算加权平均温度。因此,数值积分方法无法满足加权平均温度计算的实时性要求。

4)Bevis公式可以满足加权平均温度的实时性要求,但是,4.7K的加权平均温度误差引起的转换参数误差可达0.0029,等效的可降水误差为1.45mm。另外,对流层加权平均温度与气象条件和地理因素有关,适于美国的Bevis公式是否适合于亚洲地区还需要验证。

本文利用数值积分方法计算了香港地区13个月的对流层加权平均温度(图1)。同时,采用Bevis公式,根据香港的地面温度观测资料,计算出同一时间、同一地点对应的对流层加权平均温度,两种方法的差异见图2。由于数值积分方法被公认为足够精确,图3显示的差异即为Bevis公式引起的误差。明显地,图中曲线的许多部分超出了3.4K的容许限差,这就表明,Bevis方法并不适合于香港地区,必须探索一个新的方法计算香港地区的对流层加权平均温度。

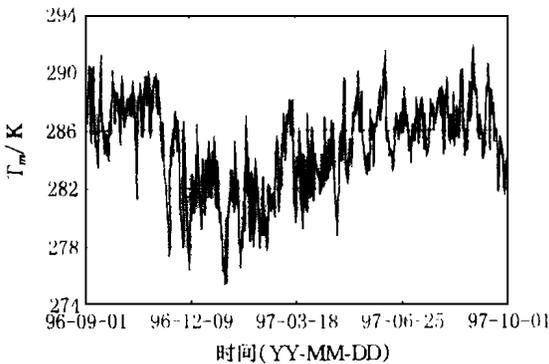


图1 对流层加权平均温度

Fig. 1 The  $T_m$  Calculated from Radiosonde Data

### 3.2 逐步回归分析方法

由于很难得到严密的积分值计算对流层加权

平均温度,这里拟采用回归分析方法。对流层加权平均温度是水汽压和绝对温度的函数积分,而水汽主要集中在离地面4km以内的区域,所以,加权平均温度与地面气象元素之间存在相关关系。这里,首先根据地面气象元素及其组合与加权平均温度的相关关系,建立回归分析方程,然后采用逐步回归分析的思想,剔除不显著的因变量,确定最优的回归方程。

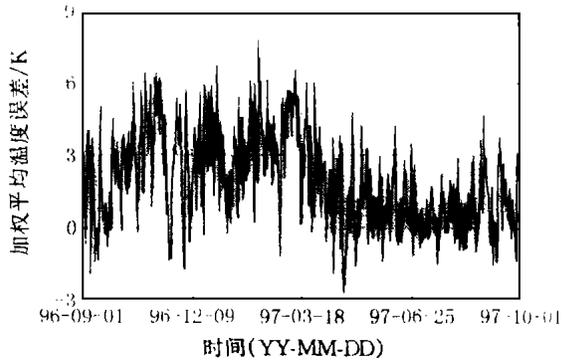


图2 Bevis方法引起的加权平均温度误差

Fig. 2 The  $T_m$  Error Caused by Bevis Method

表2列出了13个月(1996年9月~1997年10月)的对流层加权平均温度与地面气象元素的相关系数。表中的 $t_0$ 为地面摄氏温度。很明显,加权平均温度与地面气象元素之间存在着强相关关系。为此,建立如下回归方程:

$$T_m = b_0 + b_1 \cdot t_0 + b_2 \cdot P_0 + b_3 \cdot e_0 + b_3 \cdot \frac{e_0}{T_0} + b_3 \cdot \frac{e_0^2}{T_0^2} + b_3 \cdot \frac{P_0}{T_0} \quad (9)$$

为了得到最优回归方程,这里采用了逐步回归分析方法,具体算法见文献[10]。根据假设检验,逐步剔除不显著的参数,保留所有的显著变量,最后得到最优回归方程为:

$$T_S = 272.4 + 0.556 t_0 \quad (10)$$

式中, $T_S$ 表示加权平均温度的估值,其中误差为1.7K。

表2 对流层加权平均温度与地面气象元素的相关系数

Tab. 3 The Correlation Coefficients between  $T_m$  and Meteorological Parameters

$T_m \propto t_0$	$T_m \propto P_0$	$T_m \propto e_0$	$T_m \propto e_0/T_0$	$T_m \propto e_0^2/T_0^2$	$T_m \propto P_0/T_0$
0.830	-0.653	0.763	0.759	0.755	-0.814

## 4 结果分析

为了验证式(10)的准确性,笔者采用了1998

年9月1日至10月30日的探空资料,计算出该时间段的对流层加权平均温度,然后利用式(10)和地面温度预报了对应时段的 $T_S$ ,两者的差异见图3。从图3的误差分布可以看出,全部误差小

于 3.4K, 这段时间的平均误差为 -0.33K, 离散度为 1.68K。由此可见, 式(10)的结果是可靠的。

逐步回归分析的结果与 Bevis 公式非常相似, 这两个公式都只包含地面温度, 现在比较两者的差异。由 Bevis 公式和地面温度观测值, 计算出 1998 年 9 月 1 日至 10 月 30 日的加权平均温度估值  $T_B$ ,  $T_B$  与  $T_S$  之间的差异见图 4, 它们的平均差值为 1.3K, 很明显, 这是系统性差异。

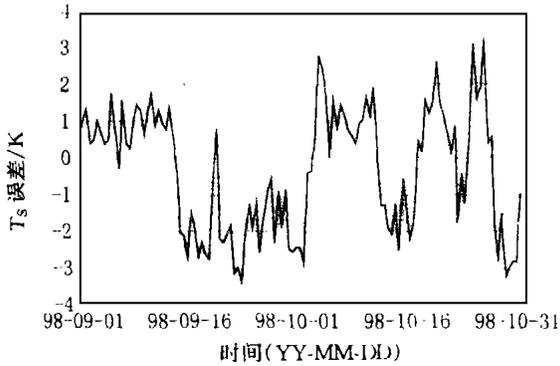


图 3 预报的加权平均温度  $T_S$  与实际的  $T_m$  的差异

Fig. 3 The Difference between the Predicted  $T_S$  and the Actual  $T_m$

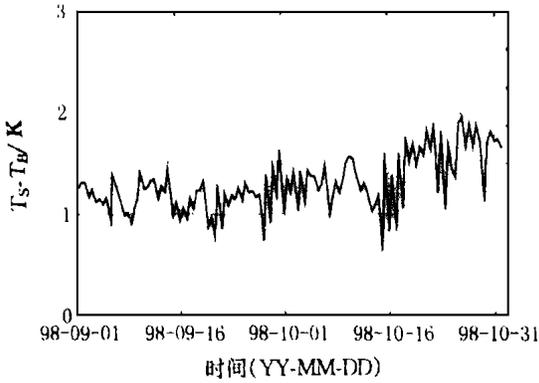


图 4  $T_B$  和  $T_S$  的系统性差异

Fig. 4 The Difference between  $T_S$  and  $T_B$

以上分析可以看出, 根据香港地区的探空资料和地面观测数据, 采用逐步回归分析方法可以得到一个经验公式, 这个公式仅仅利用了地面温度观测值, 可以实时计算对流层加权平均温度, 其计算精度能够满足地基 GPS 气象应用中湿分量延时至可降水分的转换精度要求。同时, 这个公

式有效地消除了 Bevis 公式引起的系统误差, 更好地服务于香港及周边地区的地基 GPS 气象应用。

致谢: 感谢香港天文台提供探空数据和地面观测数据。

### 参 考 文 献

- 1 陈俊勇. 地基 GPS 遥感技术中的误差分析. 测绘学报, 1998, 27(2)
- 2 刘焱雄, Iz H B, 陈永奇. 地基 GPS 技术遥感香港地区大气水汽含量. 武汉测绘科技大学学报, 1999, 24(3): 245~248
- 3 Bevis M, Businger S, Chiswell S, et al. GPS Meteorology: Mapping Zenith Wet Delays onto Precipitable Water. Journal of Applied Meteorology, 1994, 33: 379~386
- 4 Askne J, Nordius H. Estimation of Tropospheric Delay for Microwaves from Surface Weather Data. Radio Science, 1987, 22(3): 379~386
- 5 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 Science, 1985, 20(6): 1593~1607
- 6 Baker H C, Dodson A H, Moore T. The Use of Ground-based GPS for Water Vapor Estimation. The 9th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Missouri, 1996
- 7 Duan J P, Bevis M, Fang P, et al. GPS Meteorology: Direct Estimation of the Absolute Value of Precipitable Water. Journal of Applied Meteorology, 1996, 35: 830~838
- 8 Ingold T, Peter R, Kampfer N. Weighted Mean Tropospheric Temperature and Transmittance Determination at Millimeter-wave Frequencies for Ground-based Applications. Radio Science, 1998, 33(4): 905~918
- 9 Liu Y X. Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using GPS Data in the Hong Kong Region; [Ph. D Dissertation]. Hong Kong: Hong Kong Polytechnic University, 1999
- 10 丁月蓉, 郑大伟. 天文数据处理方法. 南京: 南京大学出版社, 1990

刘焱雄, 男, 32 岁, 博士, 讲师。现从事 GPS 气象学研究。代表成果: GPS 气象学中垂直干分量延时的精确确定; 利用 GPS 技术监测香港地区的大气水汽含量。

E-mail: yxliu@gpscenter.wtusm.edu.cn

## Determination of Weighted Mean Tropospheric Temperature Using Ground Meteorological Measurement

LIU Yanxiong<sup>1</sup> CHEN Yongqi<sup>2</sup> LIU Jingnan<sup>3</sup>

(1 GPS Research Center, WTUSM, 129 Luoyu Road, Wuhan, China, 430079)

(2 Department of Land Surveying and Geo-informatics, The Hong Kong Polytechnic University, HungHom, Kowloon, Hong Kong)

(3 Presidential Secretariat, WTUSM, 129 Luoyu Road, Wuhan, China, 430079)

**Abstract** The weighted mean tropospheric temperature is a critical parameter in the conversion of wet zenith delay to precipitable water vapor in GPS meteorology. Four existing methods, namely, approximate close form, constant method, Bevis method and numerical integration, were developed to perform this conversion. However, the approximate close form is very difficult to realize due to their three assumptions; the constant method induces a large error in the conversion. The Bevis method has a systematic error in the calculation of weighted mean temperature and the numerical integration cannot provide the weighted mean temperature in real-time from the radiosonde data because of the restriction of maintenance costs. The conversion parameter from wet zenith delay to precipitable water vapor is a function of weighted mean tropospheric temperature. We find that the admissible error of weighted mean temperature should be smaller than 3.4K if the conversion accuracy is better than 1mm. The weighted mean temperature is strongly correlated to the surface meteorological measurement based on the correlation analysis of 13 months surface and upper-air meteorological data in Hong Kong. An empirical formula, which is a function of surface temperature, is established using sequential regression analysis method based on these surface and upper-air meteorological measurements. Another two months data are used to demonstrate the validation of this new empirical formula. This real-time formula satisfies the requirement of both real-time and accuracy in GPS meteorology, and it is able to eliminate the systematic error caused by the Bevis method in the Hong Kong region. These results also exhibit that the empirical formula for weighted mean tropospheric temperature should be determined using regional meteorological measurements in the GPS meteorology application.

**Key words** weighted mean tropospheric temperature; conversion parameter; sequential regression analysis

---

LIU Yanxiong, male, 32, Ph. D. lecturer. His research interest is GPS meteorology. His main researches are determination of hydrostatic zenith delay for GPS meteorology application; remote sensing of atmospheric water vapor content using GPS data in the Hong Kong region.  
Email: yxliu@gpscenter.wtusm.edu.cn