

地基 GPS 遥感大气水汽总量中的 “静力延迟”和“湿延迟”^{*}

李成才^{1,2)} 毛节泰¹⁾

1) (北京大学物理学院大气科学系, 北京 100871)

2) (香港科技大学海岸与大气研究中心, 香港九龙)

摘 要 介绍了静力延迟和湿延迟概念的由来, 推导了由对流层延迟计算水汽总量的一般公式; 与李延兴等提出的新模型进行了对比, 对其相应的观点提出讨论意见。认为国际上通用的 AN 模型比较严密地求解了对流层大气水汽总量, 不存在与“真值”相比偏小的问题。

关键词: 全球定位系统 (GPS); 大气水汽总量; 静力延迟; 湿延迟

文章编号 1006-9895 (2004) 05-0795-06 **中图分类号** P407 **文献标识码** A

1 引言

利用全球定位系统 (GPS) 遥感大气水汽总量是 20 世纪 90 年代国际上新兴的一门大气遥感技术, 它的基本原理建立在 GPS 定位技术、大气折射理论的基础上^[1~3]。这一遥感水汽的手段具有较高的精度, 同时具有时间分辨率高、设备维护简单、全天候观测不受云雨影响等优势^[4]。国际上先后建立了一些业务网络用于实时监测水汽的分布, 取得的水汽后处理结果与微波辐射计资料的长时间对比, 均方根误差在 1.0 mm 左右^[5,6]。利用 1997 年国内上海、武汉、拉萨等跟踪站和周边地区国家的跟踪站数据, 我们反演了上海、武汉水汽总量的变化, 与探空资料相比均方根偏差小于 5.0 mm^[7]。偏差较大主要是因为使用的地面气象资料 (主要是气压) 所在地与跟踪站位置相差几十公里, 探空站的位置与 GPS 跟踪站也不同, 探空水汽的计算只采用了标准层数据。2000 年, 由北京大学、国家卫星气象中心、北京市气象局联合在北京市及周边区县布设了中尺度的 GPS 观测网, 在南郊站 3 个月的观测与探空资料相比, 均方根误差为 2.9 mm^[8]。这一偏差可能还是主要来源于探空误差 (探空数据只用了标准层) 以及地面气压的观测和订正对静力延迟的计算。1998 年, 李延兴等利用两台 GPS 接收机在广东汕头、阳江的观测, 取得了与气象资料同步的数据, 提出“新的与国际上通用模型不同的水汽总量计算方法”^[9,10]。我们认为该研究成果区分了“水汽”和“干洁大气”在对流层延迟中的贡献, 但包含对“静力延迟”和“湿延迟”概念的误解, 特提出本文的观点, 对相应问题予以讨论。

2003-04-16 收到, 2003-09-30 收到修改稿

^{*} 国家 863 研究项目 2002AA135360-02 资助

2 电离层延迟、对流层延迟、静力延迟和湿延迟的概念

GPS 信号穿过大气层因折射而“延迟”，它是 GPS 测量的基本量伪距中的误差。其中因频散大气造成的延迟 (Dispersive delay) 主要集中在电离层，一般被称为“电离层延迟” (Ionospheric delay)，这部分延迟变化较大，在天顶方向约 1~15 m。由于 GPS 信号采用双频传送，并且人们已经知道电离层延迟与信号频率平方成反比^[11]，具体的大小依赖于电子数密度总量 (TEC)。电离层延迟误差可订正到毫米精度。

由非电离大气的折射造成的部分可称为“中性延迟” (Neutral delay)，由于这部分的大气主要集中在对流层，因此有人也称它为“对流层延迟 (Tropospheric delay)”^[4]，严格说来它是所有非频散大气造成的延迟 (Non-dispersive delay)^[2]。这部分延迟在数量上可达 250 cm 左右，它分为“静力延迟”和“湿延迟”两项。下面详细讨论这两项延迟的具体表达式：

设大气折射率为 n ，大气折射指数 N 定义为 $(n-1) \times 10^6$ ， N 与大气状态有关^[11]：

$$N = k_1 \frac{P_d}{T} + k_2 \frac{P_v}{T} + k_3 \frac{P_v}{T^2}, \quad (1)$$

其中， T 为大气温度， P_d 和 P_v 代表大气中干空气和水汽的分压， k_1 、 k_2 和 k_3 分别为物理常数。根据气体状态方程，有：

$$P_d = \rho_d R_d T, \quad (2)$$

$$P_v = \rho_v R_v T, \quad (3)$$

其中， ρ_d 和 ρ_v 分别为干空气和水汽的密度， R_d 和 R_v 分别为干空气和水汽的气体常数。由 (1) ~ (3) 式，并将 $\rho_d = \rho - \rho_v$ 代入，可得：

$$N = k_1 R_d \rho + (k_2 - k_1 \frac{R_d}{R_v}) \frac{P_v}{T} + k_3 \frac{P_v}{T^2}, \quad (4)$$

设 $k'_2 = k_2 - k_1 \frac{R_d}{R_v}$ ，上式就得到 Davis 等的结果^[12]：

$$N = k_1 R_d \rho + (k'_2 + \frac{k_3}{T}) \frac{P_v}{T}. \quad (5)$$

GPS 信号在天顶方向的“对流层延迟” ΔL 定义为

$$\Delta L = \int c dt = \int c \left(\frac{ds}{v} - \frac{ds}{c} \right) = \int \left(\frac{c}{v} - 1 \right) ds = \int N \times 10^{-6} ds, \quad (6)$$

其中， dt 为电磁波在实际大气中传输的时间与在真空中传输的时间差， $v = c/n$ 为电磁波在大气中的传输速度， ds 设为天顶方向。由 (4)、(6) 式得：

$$\Delta L = 10^{-6} \int k_1 R_d \rho ds + 10^{-6} \int \left(k'_2 + \frac{k_3}{T} \right) \frac{P_v}{T} ds. \quad (7)$$

令

$$\Delta L' = 10^{-6} \int k_1 R_d \rho ds, \quad (8)$$

$$\Delta L_w = 10^{-6} \int \left(k'_2 + \frac{k_3}{T} \right) \frac{P_v}{T} ds. \quad (9)$$

国际上通常把 (8) 式称为“静力延迟” (Hydrostatic delay)，(9) 式称为“湿延

迟”(Wet delay)^[4]。 $\Delta L'$ 在大气满足静力平衡并假设重力加速度为常数的情况下可积分与地面气压 P_0 成正比的结果。考虑到重力加速度随地理位置和海拔高度的关系，静力延迟可用以下公式^[13]计算：

$$\Delta L' = [(2.2779 \pm 0.0024)\text{mm hPa}^{-1}] \frac{P_0}{f(\lambda, H)}, \tag{10}$$

其中， $f(\lambda, H)=[1-0.00266\cos(2\lambda)-0.00028H]$ ， P_0 为地面气压 (hPa)， λ 为地理纬度， H 为海拔高度 (km)。如果大气不处于静力平衡状态，上式与实际的结果会产生 0.01%左右的误差，对应 0.2 mm 的天顶距，极端情况达到几毫米^[14]。 ΔL_w 被称为“湿延迟”，主要因为它是水汽极化分子对大气折射率的影响而产生的。相对于湿延迟而言，有人把静力延迟也称为“干延迟”(Dry delay)，这个称呼似乎并不确切，因为水汽的分压对折射率的影响也包含在静力延迟中，但该称呼并不妨碍水汽总量的精确计算。(9) 式可写为

$$\Delta L_w = 10^{-6} \left(\int k'_2 \frac{P_v}{T} ds + \int k_3 \frac{P_v}{T^2} ds \right). \tag{11}$$

设

$$T_m = \int \frac{P_v}{T} ds / \int \frac{P_v}{T^2} ds$$

为加权平均温度，统计发现 T_m 与地面气温成良好的线性关系^[1]：

$$T_m = a + bT_s.$$

因

$$\int \frac{P_v}{T^2} ds = \frac{1}{T_m} \int \frac{P_v}{T} ds,$$

由 (11) 得：

$$\Delta L_w = 10^{-6} \left(\int k'_2 \frac{P_v}{T} ds + \frac{1}{T_m} \int k_3 \frac{P_v}{T} ds \right) = 10^{-6} R_v \left(k'_2 + \frac{k_3}{T_m} \right) \int \rho_v ds, \tag{12}$$

而水汽总量 $W = \int \rho_v ds / \rho_w$ ，所以

$$W = 10^{-6} \left[\rho_w R_v \left(k'_2 + \frac{k_3}{T_m} \right) \right]^{-1} \Delta L_w. \tag{13}$$

公式 (10) 就是目前国际上通用的由 GPS 反演湿延迟再计算水汽总量的公式 (AN 模型)。

3 国际通行算法与文献 [9] 的联系与区别

文献 [9] 认为在上述的推导过程中，静力延迟项 (8) 中含有水汽的贡献，因而，计算的 $\Delta L'$ 大于实际干空气产生的增量，用 $\Delta L_w = \Delta L - \Delta L'$ 计算的值必将比它的“真值”小，因此，由 (13) 式计算的水汽值也偏小，并有试验数据存在的系统偏差为证。

如果特别求解因为水汽的存在导致的延迟增量，上述湿延迟量的计算值确实比这一“真值”小，然而从以上严密的推导可以看出，水汽总量偏小的结论是得不出的。分析对比文献 [9] 建立的新模型，我们不难看出二者的联系和区别：

文献 [9] 中推导如下：

由 (1)、(2) 式得:

$$N = k_1 R_d \rho_d + k_2 \frac{P_v}{T} + k_3 \frac{P_v}{T^2}, \tag{14}$$

$$\Delta L = 10^{-6} \int k_1 R_d \rho_d ds + 10^{-6} \int \left(k_2 + \frac{k_3}{T}\right) \frac{P_v}{T} ds, \tag{15}$$

(15) 式右边第一部分被文献 [9] 称为静力延迟或干延迟:

$$\Delta L_d = 10^{-6} \int k_1 R_d \rho_d ds. \tag{16}$$

利用

$$T_m = \int \frac{P_v}{T} ds / \int \frac{P_v}{T^2} ds,$$

将 (15) 式中第二部分写为

$$\Delta L'_w = 10^{-6} \left(\int k_2 \frac{P_v}{T} ds + \frac{1}{T_m} \int k_3 \frac{P_v}{T} ds \right) = 10^{-6} R_v \left(k_2 + \frac{k_3}{T_m} \right) \int \rho_v ds. \tag{17}$$

于是, AN 模型和文献 [9] 的模型可以总结为

$$\begin{cases} W = \Pi_1 \cdot \Delta L_w = \Pi_1 \cdot (\Delta L - \Delta L'_1), \\ W = \Pi_2 \cdot \Delta L'_w = \Pi_2 \cdot (\Delta L - \Delta L_d), \end{cases} \tag{18}$$

其中,

$$\Pi_1 = 10^6 \left[\rho_w R_v \left(k'_2 + \frac{k_3}{T_m} \right) \right]^{-1}, \quad \Pi_2 = 10^6 \left[\rho_w R_v \left(k_2 + \frac{k_3}{T_m} \right) \right]^{-1}.$$

可以说, 两者的公式推导都是严密的, 从上述公式计算水汽总量理论上应该完全相等。这里, $R_d = 287.05 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $R_v = 461.50 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $k_1 = 77.6 \text{ K hPa}^{-1}$, $k_2 = 72.0 \text{ K hPa}^{-1}$, $k_3 = 3.75 \times 10^5 \text{ K}^2 \text{ hPa}^{-1}$ ^[1], $k'_2 = 23.7 \text{ K hPa}^{-1}$ 。加权平均温度按照 $T_m = a + b' T_s$ 计算, 其中 $a = 70.2$, $b = 0.72$ ^[1] 来估算, $T_s = 300 \text{ K}$ 时, $T_m = 286 \text{ K}$, $\rho_w = 1.0 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$, 此时, $\Pi_1 = 0.1623$, $\Pi_2 = 0.1567$ 。可见, 两者按各自定义计算得到的湿延迟虽然是不同的, 但折算为水汽总量的比例系数也不同, 结果不存在利用 AN 模型计算的水汽就偏小的问题。二者的不同之处在于: AN 模型在推导过程中向应用静力平衡近似靠近, 结果得出一个可以利用地面气压反算的“静力延迟”; 文献 [9] 的模型强调把水汽和干洁大气对电磁波在对流层大气中传输的延迟完全分开, ΔL_d 与干空气的垂直积分质量相关, 然而进一步如何计算这一项比较复杂。在文献 [9] 中没有给出这一项的具体求解, 只提到“利用地面观测的气温 T_s 、大气压 P_0 和水汽分压 P_v 计算得到”。文献 [9] 需要在假设干空气的静力平衡条件下得到类似公式 (10) 的积分结果, 即这一干空气“静力延迟”与地面干空气分压成线形关系。在计算干空气分压 P_d 时需利用地面观测的气温 T_s 、大气压 P_0 和水汽分压 P_v 三个量的数值, 然后得到干空气的“静力延迟”这一项。我们认为地面观测的气温、气压、湿度的引入不会对最终结果有重大改进, 同前面计算干湿空气总的“静力延迟”只需要地面气压的观测值相比, 这样处理使问题复杂化了。虽然在计算加权平均温度 T_m 时也需要地面温度 T_s , 但精度要求不高。文献 [9] 却需要地面气温、气压和湿度的精密观测才可以计算干空气分压 P_d 。文献 [9] 提到的按 AN 模型计算的水汽总量与探空相比存在较大的系统偏差的问题, 应该是其他的因素造成。

4 总结

从上面的分析和讨论可以看出，AN 模型的推导过程是严格的；其推导目标将对流层延迟分为可以从地面气压计算的“静力延迟”以及与水汽总量成线性关系的“湿延迟”。这种分解虽然没有区分“纯粹由‘干大气’产生的增量”和“纯粹由‘水汽’产生的增量”，但对最终计算水汽没有影响，而且提供了观测中比较可行的方案。文献 [9] 提出的“新模型”彻底区分了水汽和干洁大气对对流层延迟的贡献，但由于湿度地面观测量的增加而使利用该模型进一步的水汽解算复杂化，没有理由因此发生“平均差” 9 mm 的改进这样的结果。

参 考 文 献

1 Bevis, M., S. Businger, T. A. Herring et al., GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System, *J. Geophys. Res.*, 1992, **97**, 15787~15801.

2 陈洪滨、吕达仁, GPS 测量中的大气路径延迟订正, *测绘学报*, 1996, **25** (2), 127~132.

3 Businger, S., S. R. Chiswell, M. Bevi, et al., The promise of GPS in atmospheric monitoring, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, **77**, 5~18.

4 Duan, J., M. Bevis, P. Fang et al., GPS meteorology: Direct estimation of the absolute value of precipitable water, *J. Appl. Meteor.*, 1996, **35**, 830~838.

5 Rocken, C., T. VanHove, and R. Ware, Near real-time GPS sensing of atmospheric water vapor, *Geophys. Res. Lett.*, 1997, **24**, 3221~3224.

6 SuomiNet, A real-time national GPS network for atmospheric research and education, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2000, **81**, 677~694.

7 李成才、毛节泰、李建国等, GPS 遥感水汽总量, *科学通报*, 1999, **44**, 333~336.

8 梁丰、李成才、王迎春等, 应用区域地基全球定位系统观测分析北京地区大气总水汽量, *大气科学*, 2003, **27**, 236~244.

9 李延兴、徐宝祥、胡新康等, 应用地基 GPS 技术遥感大气柱水汽量的试验研究, *应用气象学报*, 2001, **12**, 61~68.

10 李延兴、徐宝祥、胡新康等, 用地基 GPS 观测站遥测大气含水量和可降水量的理论基础与试验结果, *中国科学 (A 辑)*, 2000, **30**, 107~110.

11 Spilker, J. J., GPS Signal Structure and Performance Characteristics. GPS, Vol. I, The Institute of Navigation, ISBN O-936.406-00-3, 1980, 246pp.

12 Davis, J. L., T. A. Herring, I. I. Shapiro et al., Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length, *Radio Sci.*, 1985, **20**, 1593~1607.

13 Elgered, G., J. L. Divis, T. A. Herring et al., Geodesy by radio interferometry: water vapor radiometry for estimation of the Wet Delay. *J. Geophys. Res.*, 1991, **96**, 6541~6555.

14 Elgered, G., Tropospheric radio-path delay from ground-based microwave radiometry, *Atmospheric Remote Sensing by Microwave Radiometry*, 1993, 215~258.

The Concepts of Hydrostatic Delay and Wet Delay in Remote Sensing Water Vapor with Ground Based GPS Receivers

Li Chengcai^{1,2)} and Mao Jietai¹⁾

1) (*Department of Atmospheric Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871*)

2) (*Center for Coastal and Atmospheric Research, The Hong Kong University of Science and Technology, Kowloon, Hong Kong*)

Abstract The concepts of Hydrostatic Delay and Wet Delay in remote sensing water vapor using ground based GPS receivers are reviewed. The common formula of calculating precipitable water from GPS troposphere delay is inferred based on the refractive index and air state equation expressions. The comparison between the common formula used in many international studies in the GPS remote sensing field and the new one inferred by Li Yanxing et al. shows that the old common formula is accurate and suitable to retrieve precise water vapor, and it is impossible to cause any big error in using this formula.

Key words: Global Positioning System (GPS); atmospheric precipitable water; hydrostatic delay; wet delay