

文章编号: 1004-4965 (2004) 06-0697-07

GPS 水汽遥感中的大气干延迟局地订正模型研究

谷晓平^{1, 2, 3}, 王长耀¹, 王 汶¹

(1. 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101; 2. 中国农业大学, 北京 100094;

3. 贵州省气象中心, 贵阳 550002)

摘 要: 在 GPS 遥感水汽过程中, 大气干延迟模型的精度直接影响水汽遥感的精度。根据广东清远站 1995 ~ 2001 年的气象探空资料, 计算了 GPS 水汽测量中的实际大气干延迟。在此资料基础上, 利用地面气象要素建立了大气干延迟的年和分月局地订正模型。分析结果表明, 年模型的精度优于目前广泛使用的普适模型; 月模型与年模型相比, 效果不是很明显, 建立局地分月订正模型意义不大; 在对高度角的敏感程度上, 局地模型略大些; 当高度角小于 75° 时, 大气干延迟弯曲路径与直线路径之差 ΔS 随天顶角增大而迅速增大。

关 键 词: GPS 水汽遥感; 大气干延迟; 订正模型

中图分类号: P426.1.3

文献标识码: A

1 引 言

国内外大量研究表明 GPS 技术可以作为一项新的水汽探测有效手段, 从时间和空间上加密现有的探空站, 用于区域或全球水汽含量的遥感^[1]。

GPS 水汽遥感原理是^[2]: 在 GPS 卫星信号到达 GPS 接收机的过程中, 信号经过大气发生延迟。电离层延迟可通过双频观测基本消除。中性大气延迟可以通过 GPS 数据解算出来。中性大气延迟可以分为干、湿两个分量, 其中干分量可用地面气象资料通过公式精确算出, 大气延迟减去干延迟便得到湿延迟, 湿延迟乘以一个转换系数就可得到大气水汽含量。

在计算过程中, 一般干延迟的计算是采用“普适性”模型, 目前应用较多的有 Saastamoinen(SA)模型和 Hopfield(H)模型。在这些模型中, 干延迟的订正公式都是在很理想化的大气条件下推导得出的, 如假设气温以常数随高度递减(一般为 -6.5 K/km), 水汽压随高度减小服从指数律等。然而在实际大气中, 大气温湿廓线是千变万化的, 在我国 GPS 水汽遥感中如采用这些普适模型不一定能获得最优订正效果^[3]。

2002 年启动的中意国际合作项目“洪水风险规划、监测和实时预报集成系统”, 拟在广东省的滨江流域建立一个 GPS 水汽监测网, 以获得近实时的水汽数据, 为洪水预警

收稿日期: 2003-10-27; 修订日期: 2004-03-08

基金项目: 中意合作项目“洪水风险规划、监测和实时预报的集成系统”资助

作者简介: 谷晓平(1968-), 女, 贵州人, 在读博士研究生, 主要从事 GPS/MET 研究。

预报和防洪决策服务。为此本文选择靠近滨江流域的探空站清远,进行 GPS 水汽遥感中的干延迟的订正模型研究。

2 实际大气干延迟的计算原理

大气延迟的路径表示如下^[4-6]

$$\Delta L = \int_s (n-1) ds \quad (1)$$

式中 ΔL 为大气延迟, n 是大气的折射率指数, s 是路径。

在实际应用中,常用大气折射率代替折射率指数

$$N = 10^6 (n-1) \quad (2)$$

式中 N 是大气折射率。

根据 Essen 和 Froome 公式 (1993) N 可写成

$$N = (n-1)10^6 = c_1 \frac{P}{T} + c_2 \frac{P_V}{T} + c_3 \frac{P_V}{T^2} \quad (3)$$

式中 T 为绝对温度(K), P 为大气压(hPa), P_V 为水汽分压(hPa), c_1 、 c_2 、 c_3 为气体常数。

将式 (3) 代入式 (1), 得到

$$\Delta L = c_1 10^{-6} \int_s \frac{P}{T} ds + c_2 10^{-6} \int_s \frac{P_V}{T} ds + c_3 10^{-6} \int_s \frac{P_V}{T^2} ds \quad (4)$$

$$\Delta L_d = c_1 10^{-6} \int_s \frac{P}{T} ds \quad (5)$$

式中 ΔL_d 为大气干延迟, S 为从测站高程 H_0 到 GPS 卫星高度 H_s 的路径长度。

当有了实测的探空资料,就可以利用式 (5) 进行干延迟计算了。

3 资料处理

本文所使用的资料来源于国家气象局资料中心。由于高空探测站点分布比较稀疏,滨江流域内无高空探测站,为此本文选择了离滨江流域最近的探测站清远站作为试验的地点,进行 GPS 水汽遥感中的大气干延迟订正模型研究。

资料包括 1996~2001 年的逐日 00、12 时的各气压层的气象资料。

由于气球在上升过程存在许多不稳定因素,达到的高度各异。为此首先要剔除探测层数不足以及露点温度差特小的样本。

大气干延迟主要是由对流层引起的,但是对流层以上的平流层大气对干项订正亦有 15%左右的贡献^[5]。在计算干延迟时,一般考虑从地面到 100km 高度之间大气层的分布结构就足够了。但是气球探测根本到不了 100km,因此需要根据标准大气进行实测探空资料的续补。

标准大气是铅直方向温度、气压和密度按一种假定的规律分布的模式大气,它基本能反映中纬度地区的大气年平均状况。多年来国际上曾出现过多种标准大气模式,目前公认

的最佳模式是 1976 美国标准大气。由于大气时空状态的复杂性，1976 美国标准大气应用于中国可能存在一定的差异。为此本研究采用李延兴根据我国华北探空资料和美国 1976 标准大气模型提出的中国标准大气模型^[7]（表 1），描述如下。国内学者也有过研究^[8]。

表 1 标准大气模型层面

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
高度/km	0	10	11.5	13.5	20	32	47	51	72	86	91
温度 /K	288.15										
温度梯度 /K/km	-5.613	-2.083	-0.985	0	0.990	2.756	0	-2.678	-1.957	0	
气压 /hPa	1013.25										

在实测资料到达不了的高度，则用标准大气来代替，每层大气温度和气压的计算方法如下^[7]

$$T_i = T_{i-1} + \alpha(r_i - r_{i-1}) \quad (6)$$
$$P_i = P_{i-1} e^{\frac{-r_{i-1} + r_i}{H_i}} \quad H_i = \frac{RT_i}{mg} \quad g = \frac{1}{2}(g_i + g_{i+1})$$
$$g_i = g_0 - 3.0855 \times 10^{-3}(r_i - r_{i-1}) + 0.75 \times 10^{-6}(r_i - r_{i-1})$$

式中 T_i 、 T_{i-1} 分别为第 i 层大气上界和下界温度(单位:K,下同), α 为温度梯度(K/km), P_i 、 P_{i-1} 分别为第 i 层上界和下界的气压(hPa), H 为特征高度(km), R 为气体通用常数(8.31 J/K·mol), m 为空气分子量(29g/mol), g 是重力加速度(m/s²), g_0 为标准重力加速度(9.80665 m/s²), r_i 、 r_{i-1} 分别为第 i 层大气高度上界和下界(m)。

4 局地订正模型的建立与分析

根据上述续补好的探空资料，将大气分层，对公式(5)进行积分，在求得每份探空资料对应的实际大气干延迟后，进行一系列拟合试验。

4.1 订正模型的建立

经研究发现， ΔL_d 与地面气象要素存在较好的相关性。 ΔL_d 与地面气压、温度、温度露点差、水汽压的相关系数分别为 0.73、0.68、0.66、0.66。图 1 显示了大气干延迟与地面气压的关系图。在图 1 中样本明显分成 2 类，可能是其它气象要素如水汽压、温度的影响造成的。

表 2 列出了部分因子组合建立模型的模拟效果，模型形式为 $\Delta L_d = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x$ (a_i 为系数， x 为气象要素)。

从表 2 可见，3 种订正模型的效果相差不大，为此本文选择最简单的线性订正模型

$$\Delta L_d = 2.3034 P_s \quad (7)$$

式中 ΔL_d 代表大气干延迟(mm)， P_s 是测站大气压(hPa)。

4.2 订正效果分析

目前已经提出的具有普适性的干延迟模型主要如下^[7]：简化 Hopfield 模型、NATO 模

型、Davis_Gold_Saastamoinen 模型、Saastamoinen 模型、Goad 模型、Hopfield 模型、Chao_Hopfield 模型、Davis 模型、Marini 模型、Black 模型、Kouba 模型、Baby 模型、Herring 模型等。其中 Saastamonien 模型 (SA) 和 Hopfield 模型 (H) 较为常用。SA 模型和 H 模型的计算公式分别如下。

SA模型：
$$\Delta L_d = 2.2768 \times P_s / (1 - 0.00266 \times \cos 2\theta - 0.00028 \times H_s) \tag{8}$$

H模型：
$$\Delta L_d = 155.2 \times 10^{-7} \times P_s / T_s \times [40136 + 148.72 \times (T_s - 273.16) - H_s] \tag{9}$$

式中 θ 是测站纬度($^{\circ}$)， H_s 是测站的高度 (m)， T_s 为测站温度(K)，其它同上。

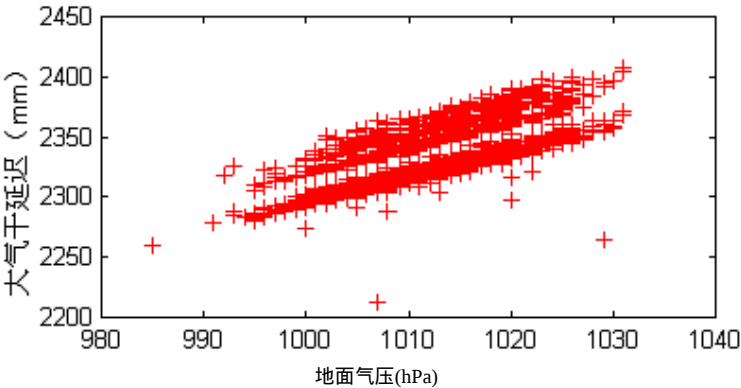


图 1 大气干延迟与地面气压的关系

表 2 不同订正模型的效果与实际值的比较 (样本数: 3380)

模型序号	因子组合	均方差/mm	绝对误差/mm	相对误差/%	相关系数	F 检验值
1	P_s	15.56	13.14	0.56	0.73	3742.2
2	T_s	16.58	13.12	0.56	0.68	2894.1
3	T_d	17.00	13.61	0.58	0.66	2589.7
4	e	17.04	13.69	0.59	0.66	2557.9
5	P_s/T_s	15.92	12.70	0.54	0.71	3420.8
6	P_s/e	17.95	14.11	0.61	0.61	1974.9
7	$P_s/T_s, T_d, e$	15.32	12.68	0.54	0.74	1323.4
8	$P_s/T_s, e$	15.92	12.70	0.55	0.71	1710.8
9	P_s, T_s, T_d, e	15.28	12.71	0.55	0.74	1000.1
10	$P_s/T_s, P_s$	15.45	12.90	0.55	0.73	1938.8
11	P_s	15.57	13.16	0.56	0.73	3742.2

注： P_s 为地面气压(hPa)； T_s 为地表温度(K)； T_d 为地表温度露点差 (K)； e 为地表水汽压(hPa)。10~11 模型中 a_i 预设为 0，显著水平 5%的置信度 $F_{0.05}<5$ 。

本文也采用以上 2 种模型分别计算大气干延迟，并与实际值进行了比较，误差见表 3。通过比较可以看出：局地模型与普适模型相比，在订正效果上有了很大的改进，均方差和绝对误差均减少近 50%，局地模型的计算结果更接近真实值。SA 模型和 H 模型的效果是非常接近的，其计算值与真实值相比普遍偏小。因此为了提高 GPS 水汽遥感的精度，根据测站所在地或相近地点的往年气象探空资料重新建立干延迟的订正模型，是非常必要的。

表 3 订正模型的误差比较

订正模型	均方差 / mm	绝对误差 / mm
局地模型	15.57	13.16
SA 模型	27.57	22.89
H 模型	27.28	22.48

4.3 模型对高度角的敏感性分析

由于各模型模拟的都是天顶延迟，而对推算大气水汽有用的时间延迟是 GPS 的大气实际延迟部分，其与卫星高度角密切相关。模型之间的差异还表现在对高度角的敏感程度上。弯曲路径与直线路径之差 ΔS 随高度角 ϕ (°) 变化均成对数曲线 ($\Delta S = a \log \phi$) (图 2)。虽然曲线基本重叠，但是 3 种模型 ΔS 随高度角变化的系数 a 不同，本地模型、SA 模型、H 模型计算的 a 值分别为 552.23、540.87、541.20，说明了本地模型对高度角的影响略敏感些。不同模型的详细比较见表 4。

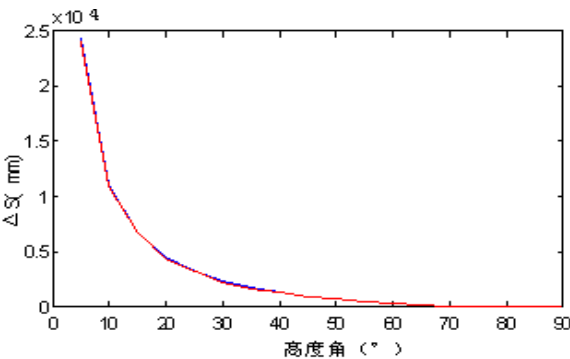


图2 弯曲路径与直线路径之差 ΔS 随高度角变化

表 4 不同模型随高度角变化的比较 ($P_s=1008\text{hPa}$, $T_s=23.2$) 单位：mm。

高度角	1	2	3	4	高度角	1	2	3	4	高度角	1	2	3	4
5°	24318.25	259.95	252.53	7.42	35°	1726.16	39.50	38.37	1.13	65°	240.00	25.00	24.28	0.72
10°	11049.43	130.47	126.75	3.72	40°	1290.29	35.25	34.24	1.01	70°	149.01	24.11	23.42	0.69
15°	6649.02	87.54	85.04	2.50	45°	961.73	32.04	31.13	0.91	75°	81.91	23.46	22.79	0.67
20°	4466.74	66.23	64.35	1.88	50°	709.10	29.58	28.73	0.85	80°	35.82	23.01	22.35	0.66
25°	3172.08	53.61	52.08	1.53	55°	512.60	27.66	26.87	0.79	85°	8.87	22.74	22.09	0.65
30°	2321.83	45.31	44.02	1.29	60°	359.19	26.16	25.41	0.75	90°	0	22.66	22.01	0.65

注：(1) 本地模型：各高度角的干延迟与 90°时的差值；(2) 各高度角下本地模型与 S 模型的差值；
(3) 各高度角下本地模型与 H 模型的差值。(4) 各高度角下 S 模型的差值与 H 模型的差值。

表4显示了不同模型之间的差异随高度角的变化情况。很明显，随高度角的减小，模型之间的差异也在迅速加大。在高度角大于75°时，弯曲路径与直线路径之差 ΔS 较小；当高度角小于15°时， ΔS 将随高度角减小而迅速增大。

4.4 不同时间段模型的差异

根据清远站1995~2001年的实际观测资料计算的干延迟结果表明，干延迟随时间变化

而不断变化。干延迟年变化是一个单峰曲线（图3），最低值出现在夏季。干延迟年变化主要是由于海陆热力性质不同所引起的。冬季地表较冷，大陆上空气柱变冷收缩，洋面上空的空气流向陆地上空，故陆地上最高气压出现在冬季，干延迟的高值也相应出现在冬季，夏季情况则与冬季相反。从干延迟的季节变化幅度来看，也是冬季较高，夏季较低。春、夏、秋、冬季的变率依次为14.23mm、11.74mm、13.38mm、17.82mm。干延迟的日变化则与天气系统的移动及演变有关（图4）。

干延迟存在时间周期变化特征，因而就存在这样一个问题：用全年数据建立的模型是否适用于各个月份和季节？

为了便于分析与比较，本文建立了分月模型，并与年模型做比较。

从表 5 可以看出，月模型和年模型相比，差异较小，但在不同季节订正误差不同，5~9 月较小，其它月份略大。总的来说，分别建立单月订正模型意义不大。

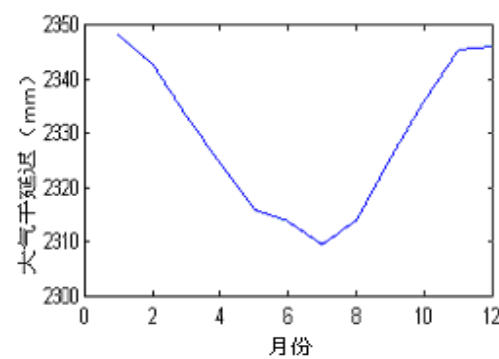


图3 大气干延迟距平的年变化

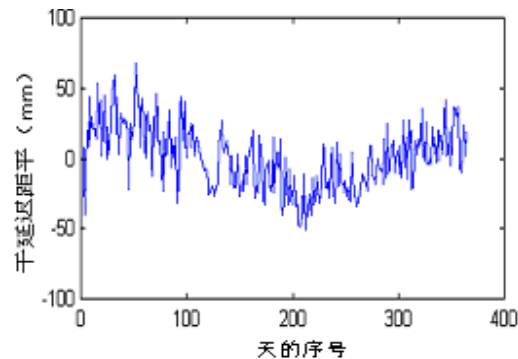


图4 大气干延迟距平的日变化

表 5 分月模型与年模型用于月订正的比较（mm）

序号	样本	均方差 1	均方差 2	差值
1	326	18.31	18.49	0.18
2	289	16.96	17.16	0.20
3	313	15.59	15.65	0.06
4	253	14.40	14.41	0.01
5	249	13.89	13.89	0.00
6	231	13.79	13.88	0.09
7	259	14.03	14.10	0.07
8	271	12.27	12.44	0.17
9	272	13.03	13.33	0.30
10	316	14.51	14.70	0.19
11	317	18.05	18.06	0.01
12	284	17.51	17.53	0.02

注：均方差 1——分月模型；均方差 2——年模型。

5 结 论

（1）为了提高 GPS 遥感水汽的精度，有必要根据测站所在地或附近站点往年的气象

探空资料建立订正模型, 其订正精度比 SA、H 等普适模型高。

(2) 根据现有探空资料分月订正模型的订正效果来看, 没有必要建立局地分月订正模型。

(3) 在对高度角的敏感程度上, 局地模型略大; 当高度角小于 75° 时, 弯曲路径与直线路径之差 ΔS 随高度角减小而迅速增大, 会带来很大的误差。因此在 GPS 水汽遥感时应选择高度角大于 75° 的卫星。

参 考 文 献:

- [1] 王小亚, 朱文耀, 严豪健. 地面GPS探测大气的最新进展[J]. 地球科学进展, 1997, 12: 519-527.
- [2] BEVIS M, BUSINGER S, HERRING T A, et al. GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system[J]. *J Geophys Res*, 1992, 97: 787-801.
- [3] 陈洪滨, 吕达仁. GPS测量中的大气路径延迟订正[J]. 测绘学报, 1996(2): 127-132.
- [4] SAASTAMOINEN J. Contributions to the theory of atmospheric refraction[J]. *Bull Geod*, 1973, 107: 13-34.
- [5] ROCKEN C R, WARE R H, VAN HOVE T, et al. Sensing Atmospheric Water Vapor with the Global Positioning System[J]. *Geophysical Research Letters*, 1993, 20: 2631-2634.
- [6] 刘基余, 李征行, 王跃虎. 全球定位系统原理及其应用[M]. 北京: 测绘出版社, 1993. 10.
- [7] 李延兴. GPS测量大气折射改正[J]. 地壳形变与地震, 1998(1): 21-30.
- [8] 吴 兑, 陈位超. 海口西郊海岸地带低层大气结构研究[J]. 热带气象学报, 1995, 11: 123-132.

RESEARCH ON THE LOCAL CORRECTION MODEL OF ATMOSPHERIC DRY DELAY IN GPS REMOTE SENSING WATER VAPOR

GU Xiao-ping^{1,2,3}, WANG Chang-yao¹, WANG Wen¹

(1. Institute of Remote Sensing Application, CAS, Beijing 100101, China;

2. China Agricultural University, Beijing 100094, China;

3. Guizhou Meteorological Center, Guiyang 550002, China)

Abstract: The precision of atmospheric dry delay model is closely correlative with GPS water vapor's accuracy in the process of GPS remote sensing. Radiosonde data (from 1996 to 2001) at Qingyuan are used to calculate the exact values of the atmospheric dry delay. Base on these calculations and the surface meteorological parameters, the local year and month correction models of dry delay at the zenith angle of 0 are established by statistical methods. The analysis result shows that the local model works better and is slight more sensitive to altitude angle than universal models and that it is not necessary to build models for each month due to the slight difference between year model and month model. Furthermore, when the altitude angle is less than 75° , the difference between curve path and straight path increases rapidly with altitude angle's decrease.

Key words: GPS remote sensing water vapor; atmosphere dry delay;
local correction model