

# 导航卫星信号湿延迟 参数化模型和数值模式的比较\*

曹云昌<sup>1,2</sup>, 陈永奇<sup>1</sup>, 李炳华<sup>3</sup>, 方宗义<sup>2</sup>

(1. 香港理工大学土地测量与地理资讯学系; 2. 国家卫星气象中心; 3. 香港天文台)

**摘要:** 对高精度导航卫星处理软件(GAMIT)确定的卫星信号湿延迟和香港天文台中尺度数值模式(ORSM)所计算的湿延迟进行了比较,发现二者相关系数为 0.99,偏差为 3mm,平均绝对偏差为 26.7mm,基本不存在系统性的偏差。卫星在天顶时,两者偏差最小,随着卫星仰角的降低,偏差增大,在天顶角 70-80°时,两者确定信号湿延迟平均绝对偏差可达 30mm。

**关键词:** 湿延迟; 射线追踪; GNSS; GPS

中图分类号: P207 文献标识码: A 文章编号: 1008-9268(2005)05-0001-05

## 1 引言

在全球卫星导航系统的定位中,轨道误差已不再是主要的误差来源,通过全球卫星定位系统服务局(IGS, International GPS service)的努力,最终星历的误差可以控制在厘米级。电离层延迟一般可通过双频改正而消除<sup>[1]</sup>,而对流层大气对导航卫星信号的延迟的确定,是影响最终定位精度的重要因素之一。

对流层大气对导航卫星信号的延迟,在天顶方向上可达 250 cm 左右,可分为“静力延迟”(又称为“干延迟”)和“湿延迟”两项。其中静力延迟可以很好地由地面气象参数确定,精度可达 0.5mm;另一部分是由水汽影响引起的,称为“湿延迟”。

在高精度的导航卫星定位软件中,对湿延迟的确定,包括 Hopfield 模型、Black 模型<sup>[2]</sup>、Saastomoinen 模型等<sup>[3]</sup>。这些模型所确定的湿延迟通常误差较大,在天顶方向上,有时误差就可达几厘米。所以高精度的定位软件通常采用参数化模型方法,依照一定的大气模型,用天顶湿延迟和它在东西、南北方向上的梯度作参数<sup>[4]</sup>,模型化斜路径湿延迟,把它加入到观测方程求解,从而提高湿延迟的估计精度和导航卫星的定位精度。

以往研究证实这种方法可以很好地确定天顶方向的湿延迟。由此方法确定的湿延迟换算到大

气垂直方向上的总水汽含量和探空对比,精度可达 1-2mm<sup>[5][6]</sup>。斜路径上的水汽和微波辐射计的比较,可达 1.3mm<sup>[7]</sup>。而用此模型确定的大气斜路径的湿延迟的精度,目前的验证研究还较少,因此,对此参数化模型的研究,一方面将有助于对导航卫星湿延迟的测定,提高导航卫星应用的定位精度,另一方面,可以得到斜路径湿延迟的算法,进而利用斜路径的湿延迟,确定空间大气水汽的三维分布<sup>[8]</sup>,促进 GPS 气象学的应用。

## 2 方法

### 2.1 GAMIT 软件中湿延迟的参数化模型

在 GAMIT 软件中,大气对导航卫星信号的延迟可写为:

$$SPD(\theta) = ZHD \cdot m_d(\theta) + ZWD \cdot m_w(\theta) + NID(\theta, \lambda) \quad (1)$$

SPD 为对流层大气对信号的总延迟, ZHD 为天顶方向的静力延迟, ZWD 为天顶方向的湿延迟, NID 为大气延迟的非各向同性部分,  $\theta, \lambda$  分别是卫星的天顶角和方位角。  $m_d(\theta), m_w(\theta)$  分别为干映射函数和湿映射函数。

大气延迟的非各向同性部分通常认为是水汽在空间的不均匀分布引起的, NID 可以写为:

$$NID = m_g(\theta) \cdot (G_{ns} \cos \lambda + G_{ew} \sin \lambda) \quad (2)$$

$G_{NS}$  和  $G_{EW}$  为水平延迟梯度,  $m_g(\theta)$  为延迟梯度映射函数,采用 Chen<sup>[9]</sup>(1997)的模型:

\* 收稿日期: 2005 07 18

$$m_g(\theta) = 1. / (\sin\theta \cdot \text{tg}\theta + C) \quad (3)$$

$$C = 0.03$$

GAMIT 软件中确定的湿延迟参数化模型可写为:

$$SWD = ZWD \cdot m_w(\theta) + NID(\theta, \lambda) \quad (4)$$

## 2.2 中尺度数值模式(ORSM)对斜路径湿延迟的计算

根据 Davis<sup>[10]</sup> (1985) 所确定的公式, 中性大气折射指数可写为

$$N = k_1 R_d \rho + \left( k_2 - k_1 \frac{R_d}{R_v} \right) \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2} \quad (5)$$

$k_1 = 77.6 \text{ KhPa}^{-1}$ ,  $k_2 = 72.10 \text{ K hPa}^{-1}$ ,  $k_3 = 3.75 \times 10^5 \text{ K}^2 \text{ hPa}^{-1}$ ,  $R_d = 287.05 \text{ Jkg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ,  $R_v = 461.50 \text{ Jkg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ,  $\rho$  为空气密度,  $e$  为水汽压,  $T$  为大气温度。

对折射指数积分, 可得到中性大气对卫星信号的延迟, 静力延迟为:

$$\Delta L_d = 10^{-6} \int_L k_1 R_d \rho ds \quad (6)$$

湿延迟为:

$$\Delta L_w = 10^{-6} \int_L \left[ \left( k_2 - k_1 \frac{R_d}{R_v} \right) \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2} \right] ds \quad (7)$$

卫星信号在大气中的传播是一个复杂的问题, 其路径通常采用三维射线追踪算法<sup>[11]</sup> 来确定。

## 2.3 射线追踪算法

射线追踪算法大致可归为数值法和解析法。本文主要采用打靶算法来计算卫星信号的射线路径。

导航卫星信号在大气中要受到大气的折射作用, 而大气又是一种非均匀介质, 因此, 确定卫星信号路径比较复杂, 另外, 由于数值模式常采用  $p$  坐标或  $\sigma$  坐标或其他与地形有关的坐标系, 每层的高度在空间各点都在变化, 所以要确定卫星信号路径在模式中的坐标, 或者卫星信号路径与模式各层交点的坐标, 更为复杂。

确定卫星信号的路径就是求它和模式层的一系列交点的三维坐标。为了计算的方便, 模式地形和 GPS 接收机也作为模式的两个层来计算。也就是如果模式有  $n$  层的话, 那么计算一条信号路径需要就算  $n+2$  个交点。根据模式层的高度和接收机的坐标, 以及 GPS 接收机观测的卫星的高度角和方位角, 来计算交点的坐标。因为随地形变化和大气状态的改变模式层高度水平方向上各不相同, 所

以在计算卫星信号路径时, 需要使用迭代算法来精确确定其路径。

交点从接收机位置开始, 向上逐层计算。给定接收机的经度  $\lambda_0$  和纬度  $\varphi_0$  和高度  $h_0$ , 以及卫星的方位角  $\bar{\omega}$  和天顶角  $\theta$ , 计算卫星信号路径采用如下算法:

(1) 假设  $j$  代表模式层, 首先令  $j = n+2$ ;

(2) 第一个交点就是接收机所在的位置, 所以坐标

$$\varphi_{n-2} = \varphi_0, \lambda_{n+2} = \lambda_0, h_{n+2} = h;$$

(3) 令  $j = n-1$ , 令其经度纬度的初估值 ( $\varphi_j, \lambda_j$ ) 为刚计算的上一交点的经纬度;

(4) 将海平面气压  $P_s$ , 模式地形高度  $Z_0$ , 温度  $T$ , 比湿  $q$  内插到 ( $\varphi_j, \lambda_j$ ) 所在的气柱;

(5) 计算第  $j$  层 ( $\varphi_j, \lambda_j$ ) 处的模式高度, 根据海平面气压和模式层气压和静力平衡方程可以很容易求解。

(6) 如果模式层高度低于接收机的高度, 说明接收机在此模式层之上, 忽略此层交点, 并且令此层交点的坐标等于接收机坐标, 重复步骤(3);

(7) 计算 ( $\varphi_j, \lambda_j$ ) 处第  $j$  层和第  $j+1$  层的高度差,  $\Delta Z = Z_j - Z_{j+1}$ ;

(8) 根据卫星的天顶角计算出第  $j$  层相对第  $j+1$  层的水平距离

$$\Delta S_h = \Delta Z \cdot \text{tg}\theta \quad (8)$$

然后计算在经度和纬度方向上的变化;

$$\Delta e = \Delta S_h \cdot \sin\bar{\omega}, \Delta n = \Delta S_h \cdot \cos\bar{\omega} \quad (9)$$

然后换算成经纬度;

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta n}{\alpha_{bc} + Z_j}, \Delta\lambda = \frac{\Delta e}{\alpha_{bc} + Z_j} \quad (10)$$

(9) 第  $j$  层的交点坐标为

$$\varphi_j = \varphi_{j+1} + \Delta\varphi, \lambda_j = \lambda_{j+1} + \Delta\lambda,$$

$$Z_j = Z_{j+1} + \Delta Z$$

(10) 如果  $j > 1$ , 重复步骤(3), 然后得到信号路径和模式层的所有交点。

在计算卫星路径时, 考虑到大气折射, 地球曲率, 卫星高度角需要进行订正, 考虑到模式层高度的水平变化, 需要通过迭代算法, 来计算卫星信号路径与模式层的交点。

## 3 实验和结果

香港地政署已经在香港地区建立了 12 个永久性的地基 GPS 参考站(见表 1), 它以 5 秒的数据采样率连续地把经过质量检验的数据以几分钟的延

迟传输给用户单位。现在,香港天文台作为其主要用户之一,已经建立了GPS探测大气水汽的准实

时监测系统,预报员开始用它作为现时和短期天气预报的重要参考。

表1 香港地区12个地基GPS参考站

站点	名称	B			L		H	
HKFN	Fan Ling	N22°	21′	32.29412″	E114°	8′	17.40609″	6375070.263
HKKT	Kam Tin	N22°	18′	33.9373″	E114°	3′	59.63436″	6375076.657
HKLT	Lam Tei	N22°	16′	58.02409″	E113°	59′	47.84432″	6375175.041
HKMW	Mui Wo	N22°	7′	16.46278″	E114°	0′	11.43814″	6375286.412
HKNP	Ngong Ping	N22°	6′	52.3031″	E113°	53′	37.95″	6375443.901
HKOH	Obelisk Hill	N22°	6′	47.3493″	E114°	13′	42.78789″	6375259.978
HKPC	Peng Chau	N22°	9′	0.83871″	E114°	2′	16.22571″	6375101.988
HKSC	Stonecutter	N22°	11′	14.20091″	E114°	8′	28.27647″	6375094.394
HKSL	Siu Lang Shui	N22°	14′	12.74751″	E113°	55′	40.73278″	6375156.467
HKSS	Shap Sze Heung	N22°	17′	44.3575″	E114°	16′	9.45642″	6375084.431
HKST	Sha Tin	N22°	15′	36.11778″	E114°	11′	3.27018″	6375313.811
HKWS	Wong Shek	N22°	17′	55.87628″	E114°	20′	7.35829″	6375108.67

ORSM 是香港天文台用于日常天气预报的区域天气预报模式,每天运行8次,提供未来几天的天气预报,它通过同化各种观测资料,包括雷达、卫星、探空、自动气象站的数据,得到每天的分析场资

料。在试验中我们就采用了ORSM模式的分析场,来作为GPS大气模型的验证资料。表2是实验中用到的模式分析场的要素资料。

表2 模式分析场资料要素

范围	105 - 130° E 15 - 30° N
分辨率	0.25° N * 0.25° E
模式层	Surface, 950, 925, 900, 850, 800, 700, 600, 500, 400, 300, 200, 100hPa
变量	平均海平面气压, 模式地形高度, 温度, 温度露点差和位势高度

计算了2005年6月15-25日的Siu Lang Shui(HKSL)和Stone Cutter(HKSC)两个站的GAMIT处理的GPS大气湿延迟模型,同时用ORSM模式计算了倾斜路径的大气湿延迟。在GAMIT资料处理中,使用了IGS的最终星历。在GAMIT模型中,对于10度角以下的观测,由于多路径的影响,通常在估计参数时并不使用,所以,GPS大气模型截止到10°的高度角,也就是天顶角80°,对于斜路径湿延迟,不同天气,不同仰角,导航卫星信号穿过大气路径的不同,湿延迟变化很大,卫星信号的湿延迟,可以从30cm到2m多之间变化。图3是GAMIT大气模型和天气数值模式计算的斜路径湿延迟的散点图,可以看出:GAMIT的参数化大气模型和数值模式吻合较好,两者相关

系数为0.988。回归系数1.0146, GPS略大于数值模式。统计的两者偏差为3.2mm,均方根误差为26.7mm。

GPS大气斜路径的湿延迟模型与天顶角存在密切的关系,为此把天顶角每10°作一统计平均(0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-60, 60-70, 70-80),计算各个天顶角范围的GPS和ORSM的差的绝对值(见图2)。可以看出:两者平均绝对偏差在天顶时较小,0-10°为6mm,随着天顶角的增大,两者偏差增加,在70-80°时,平均绝对偏差达到30mm。其实从公式4不难看出, GPS大气斜路径的湿延迟模型误差主要决定于天顶湿延迟的误差,并受到湿延迟映射函数的放大,而湿延迟映射函数是卫星天顶角的函数。

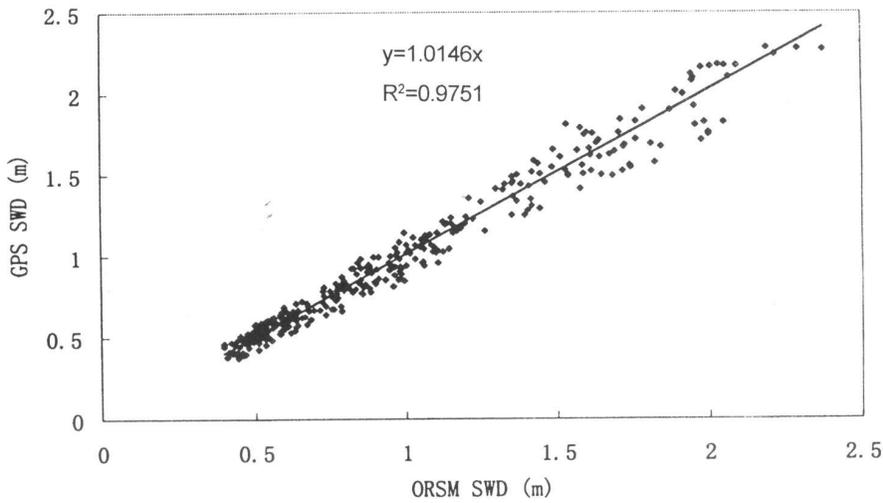


图1 GAMIT的斜路径湿延迟和数值模式 ORSM 计算值的散点图

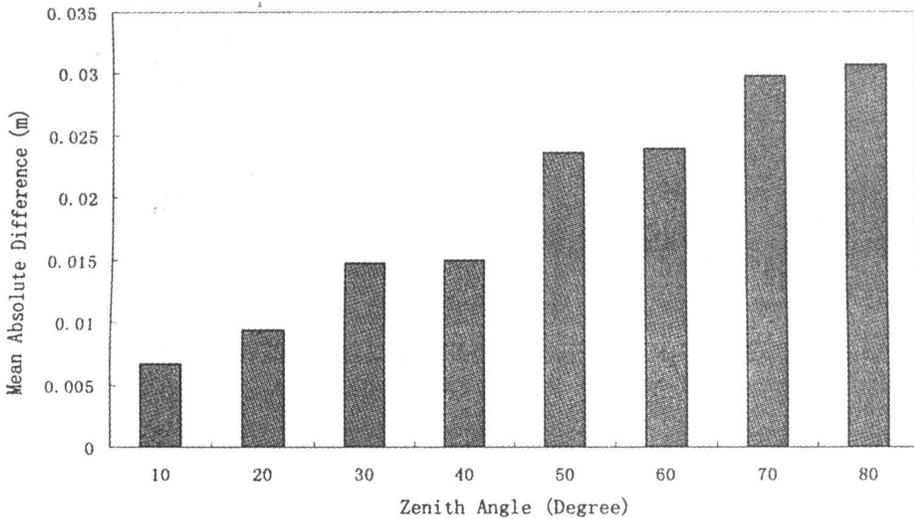


图2 不同高度角 GAMIT与数值模式斜路径湿延迟 平均绝对偏差

## 4 结论和讨论

通过对GAMIT 软件中湿延迟参数化模型和数值模式中的湿延迟进行对比,可以发现: GAMIT 参数化大气模型可以较好模拟大气中的湿延迟,基本上能够反映大气的湿延迟总体变化特征,具有较好的精度,在天顶时为 6mm 左右,而且两者确定的湿延迟基本不存在系统性的偏差。

以往 Braun<sup>[9]</sup> 比较过 GPS 斜路径水汽和水汽辐射计的结果,得到  $y = 1.01x + 0.3$  的回归公式,  $rms = 2.3mm$ ,如果取湿延迟和水汽的换算系数  $\Pi = 0.15$  来换算,则湿延迟的  $rms = 15.3mm$ 。结合本文的结果可以看出: Braun 统计的 GPS 和水汽

辐射计的湿延迟均方根要小于本文统计的 GPS 和数值模式均方根。这可能由以下原因造成:

(1) 因为水汽辐射计在雨天误差极大, Braun 主要比较了晴天的情况,大气中湿延迟的非各向同性部分较小;而本文中试验取得的数据正值香港地区的雨季,降水较多,大气的非各向同性的湿延迟较大,所以其均方根误差较大。

(2) 大气非各向同性部分仅用东西和南北方向两个梯度来模拟,还比较简单,如多估计几个方向上的梯度,模拟效果可能会更好。

(3) 计算中用到的特定分辨率的中尺度数值模式的分析场也对结果有所影响。

## 感谢

感谢香港 RGC 项目 (B. 34. 37. Q609) 的资助和香港天文台提供资料和设施用于研究。感谢麻省理工学院大气行星学系允许使用 GAMIT 软件。

## 参考文献

- [ 1 ] 甄卫民, 吴健, 曹冲, 电离层不均匀性对 GPS 系统的误差影响分析[ J ]. 电波科学学报, 1998, 13( 2), 123 - 126
- [ 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( D14) 15787 - 15801.
- [ 3 ] Rocken C, Ware R, VanHove T, et al. Sensing atmospheric water vapor with the global positioning system[ J ]. Geophys Res Lett, 1993, 20( 23); 2631 - 2634.
- [ 4 ] Bar Sever, Y. E., P. M. Kroger, Estimating horizontal gradients of tropospheric path delay with a single GPS receiver[ J ]. J. Geophys. Res., 1998, 103, 5019 - 5035.
- [ 5 ] 张守信, GPS 技术和应用[ M ]. 国防工业出版社, 北京, 2004
- [ 6 ] Saastamoinen, J., Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites[ A ]. The Use of Artificial Satellites for Geod

esy, Geophys[ C ]. Monogra. American Geophysical union, Washington, D. C., 1972

- [ 7 ] Braun, J., C. Rocken, et al. Comparisons of line of sight water vapor observations using the global positioning system and a pointing microwave radiometer [ J ]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2003, 20, 606 - 612
- [ 8 ] Flores A. G., Ruffini A. Rius 4D Tropospheric Tomography Using GPS Slant Wet Delays[ J ]. Ann. Geophysicae, 2000, 18, 223 - 234
- [ 9 ] Chen, G., and T. A. Herring, Effects of atmospheric azimuth asymmetry on the analysis of space geodetic data[ J ]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102, 20489 - 20502
- [ 10 ] 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[ J ]. Radio Sci., 1985, 20, 1593 - 16071
- [ 11 ] Cerveny, V., Seismic ray theory[ R ]. Cambridge University Press, Cambridge, 2001

作者简介: 曹云昌 (1968 - ), 男, 山东人, 博士。

陈永奇 男, 香港理工大学土地测量与地理资讯学系, 讲习教授,

李炳华 男, 香港天文台, 高级科学主任。

## Comparison of the slant wet delay of GNSS signal between parameterized model and numeric weather model calculations

CAO Yun chang<sup>[ 1 ] [ 3 ]</sup>, CHEN Yong qi<sup>[ 1 ]</sup>, LI Ping hua<sup>[ 2 ]</sup>, FANG Zong yi<sup>[ 3 ]</sup>

( 1. The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 2. The Hong Kong Observatory, Hong Kong  
3. National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081)

**Abstract:** We examined the accuracy of wet slant delay extracted by double differenced method against ORSM - an operating numeric weather model in the Hong Kong observatory on the near real time basis. The accuracy of the DD method is primarily dominated by that of the estimate of wet zenith delay and multiplied by the wet mapping function. It determines the wet slant delay with 3 mm bias and 27 mm root mean square error against the ORSM model. At low elevation angle, the mean absolute difference can reach 30mm.

**Keywords:** Slant wet delay; ray tracing method; GPS, GNSS