

文章编号: 1009-3850(2001)02-0023-08

# 大气传播延迟改正在 GAMIT 软件中的应用

张清志

(成都地质矿产研究所, 四川 成都 610082)

**摘要:** 卫星信号从 GPS 卫星发射到地面的过程中经过了以充满大气为介质的空间。电磁波在这种变化的介质中传播, 其传播的方向、速度、强度都可能随时改变。本文简略地介绍了大气传播延迟的产生及其对 GPS 测量的影响, 并就 GAMIT 软件对大气传播延迟的控制方法和所采用的改正模型做一简单介绍, 并对减弱和消除大气传播延迟的方法和手段进行了讨论。

**关键词:** 大气传播延迟; GAMIT 软件; GPS 卫星

中图分类号: P128.15

文献标识码: A

## Applications of the atmospheric propagation delay to the GAMIT software

ZHANG Qing-zhi

(Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610082, Sichuan, China)

**Abstract:** As the GPS signal travels from the GPS satellite to the receiver, it propagates through the atmosphere of the earth, where it is retarded and its path changed from a straight line to a curved one. If we take the simplified mathematical model for the observable to be one in which the signal is assumed to be propagating in a straight line and at the speed of light in vacuum, then the "atmospheric propagation delay" is defined to be the difference between the true electrical path length and this assumed straight line length, and may be implemented in the GAMIT software. The present paper deals with the generation and effects of the atmospheric propagation delay on the GPS measurements, controls of the GAMIT software on the atmospheric propaga-

收稿日期: 2001-03-05

tion delay, and methods for reducing and eliminating the multipath errors of the atmospheric propagation delay.

**Key words:** atmospheric propagation delay; GAMIT software; GPS satellite

## 1 概述

空间定位技术(VLBI, SLR 和 GPS)的发展使大地测量技术发生了根本性的改变,可用于对全球或局部地区实现高精度的动态和静态监测。但 VLBI(甚长基线测量, Very Long Baseline Interferometry, 简称 VLBI)和 SLR(卫星激光测距, Satellite Laser Ranging, 简称 SLR)存在着设备庞大,耗资巨大,不适合流动作业等特点。而 GPS(全球定位系统, Global Positioning System, 简称 GPS)具有高精度,多功能,高效率,设备轻便和全天候作业等特点,而得到广泛的应用。

GPS 卫星都运行在距地球约 20200km 的轨道上。GPS 定位的基本观测量是观测站(用户接收天线)至卫星(信号发射天线)的距离,它是通过测定卫星信号在该路经上的传播时间(时间延迟),或测定卫星载波信号相位在该路经上的变化周数(相位延迟)来导出的,这和理论的电磁波测距原理相似,只要已知卫星信号传播时间  $\Delta t$  和传播速度  $v$ ,就可得到卫星至观测站的距离  $\rho$ ,即:

$$\rho = v \cdot \Delta t$$

再根据已知的卫星瞬时坐标和测量学中的空间距离后方交会的原理,计算出用户接收机天线的位置和坐标。

## 2 大气传播延迟的提出

卫星信号从 GPS 卫星发射到地面的过程中经过了以充满大气为介质的空间。众所周知,大气层的组成非常复杂,由于地球引力的作用,大气层的主要质量(90%)都集中在距地球表面约 30km 的范围内,大气层的主要成分各种气体元素,此外,还不同程度地含有尘埃、云、雾、雨(水蒸气)、雪、水滴、冰晶等杂质,所有这些都与所处的空间位置及季节的变化而不同,就是同一地点同一季节的不同时刻彼此可能差异较大。电磁波在这种变化的介质中传播,其传播的方向,速度和强度都可能随时改变。若我们仍然简单地假定卫星信号,在这种随时变化的介质中是以光在真空中传播的方式来计算,那么就不恰当了。大气层对观测值的影响往往都超过了 GPS 所容许的精度范围(尤其对甚长基线观测)。如果卫星信号在传播过程中有  $6 \sim 8\mu\text{s}$  的误差,则其影响可达到  $180 \sim 240\text{cm}$ 。根据对电磁波传播的不同影响,一般可将大气层分为对流层和电离层。经研究表明,大气传播延迟(atmospheric propagation delay)伴随着卫星高度角的减少而增加,并且其改变值近似于卫星高度角的余割值(cosecant)的改变与这时天顶延迟(卫星高度角为  $90^\circ$  时的大气传播延迟)的乘积(表 1, 表 2)。大气传播延迟改正正是光的直线传播和电离层影响改正的补充。由于采用双频观测技术以及两观测站同步观测量求差和电离层模型改正,电离层的影响在很大程度上可以得到改正,尤其是短基线观测。

表 1 高度角对电磁波传播路径的影响

Table 1 The effects of the elevation angles of the satellite on the microwave propagation

| 高度角      | 90°  | 20°  | 15°  | 10°   | 5°    |
|----------|------|------|------|-------|-------|
| 干分量/m    | 2.31 | 6.71 | 8.81 | 12.90 | 23.61 |
| 湿分量/m    | 0.20 | 0.58 | 0.77 | 1.14  | 2.21  |
| 大气传播延迟/m | 2.51 | 7.29 | 9.58 | 14.04 | 25.82 |

表 2 由余割值计算的各项大气传播延迟改正值

Table 2 The adjustments for the atmospheric propagation delay calculated from the cosecant of elevation

| 高度角      | 90°  | 20°    | 15°    | 10°     | 5°      |
|----------|------|--------|--------|---------|---------|
| 余割值      | 1    | 2.92   | 3.86   | 5.75    | 11.47   |
| 干分量/m    | 2.31 | 6.752  | 8.9166 | 13.2825 | 26.495  |
| 湿分量/m    | 0.20 | 0.584  | 0.772  | 1.15    | 2.294   |
| 大气传播延迟/m | 2.51 | 7.3292 | 9.6886 | 14.4325 | 28.7897 |

大气传播延迟正是为了减少由于大气层的阻碍对计算结果的影响而定义,在计算过程中采用不同的大气改正模型,以达到对大气传播延迟的修正。在实际的应用中,我们通常将大气传播延迟分为干分量和湿分量两部分,干分量主要与地面的大气压力和温度有关,为构成大气传播延迟的主要部分;湿分量主要与信号传播路径上的大气湿度和高度有关,其通常定义为由于水蒸汽引起的相关延迟量。假定大气处于静水平衡,那么天顶延迟由于完整的模型化其标准偏差接近于 0.5mm。由干、湿延迟分量所构成的大气传播延迟几乎占去了所有的(90%~100%)大气传播延迟。如果在传播过程中没有水蒸汽出现,则可认为湿分量的影响为零,但这种情况往往是不可能的,在卫星信号传播的过程中水蒸汽通常是存在的。虽然利用水汽辐射计,能比较精确地测定信号传播路径的大气水含量,但由于设备过于庞大和昂贵,而不能普遍采用。

### 3 大气传播延迟的改正方法

在 GAMIT 的计算中,是如何来改正大气传播延迟的呢?根据美国麻省理工学院所发行的 GAMIT(1998),其采用了如下计算规则:

$$ATDEL(EL) = DRYZEN * DRYMAP(EL) + WETZEN * WETMAP(EL) \quad (1)$$

这里 ATDEL 为与卫星仰角(EL)有关的大气传播延迟, DRYZEN (dry zenith delay) 为天顶延迟分量, WETZEN (wet zenith delay) 为湿天顶延迟分量, DRYMAP 和 WETMAP 为与卫星仰角有关的干、湿大气传播延迟的数学模型。DRYMAP 和 WETMAP 的大小近似于卫星仰角的余割值,但这个“余割法则”有时会因为地球曲率及 GPS 卫星信号在传播过程中所经过的路径的弯曲程度不同而有较大偏差。有许多关于 DRYZEN, DRYMAP, WETZEN 和 WETMAP 科学研究的说明。在 GAMIT 中,只有很少的几个被试用。因为它们要么比较老,要么精度比较低。现在所用的模型,其精度都经过了严格的测试。选择它们对应的改正模型固然重要,但更重要的是对卫星仰角的限制(不能低于 15°,由表 1,表 2 可以看出卫星仰角限制的意义)。所有的天顶延迟模型在 GAMIT 的计算中是通过 sittbl 中所定义的关键词来控制的。下面举例加以说明。在 sittbl 中有以下内容:

| SITE             | FIX | —COORD.   | CONSTR. | —      | DZEN | WZEN | DMAP | WMAP | —MET. VALUE—         | WFOLE |
|------------------|-----|-----------|---------|--------|------|------|------|------|----------------------|-------|
| ALGO Algonquin   | NNN | 0. 02     | 0. 002  | 0. 010 | SAAS | SAAS | NMFH | NMFW | 1013. 25 20. 0 50. 0 | NONE  |
| CATO Castro Pead | NNN | 100. 100. | 100.    |        | SAAS | SAAS | NMFH | NMFW | 1013. 25 20. 0 50. 0 | NONE  |

式中的 DZEN 对应于 (1) 式中的 DRYZEN, 即干天顶延迟分量。它的缺省模型是 SAAS, 如果在 WFILE 栏存在一个关于测站的实际的气象观测文件, 那么 SAAS 改正模型 (见附录) 将从 W—FILE (Weather file, 包含了 SAAS 模型要用到的气象数据, 缺省值为 NONE) 中读取相关的气象数据, 否则将根据表中 —MET. VALUE— 给出的地球表面压力, 同时也在某种程度上依赖于站位的经度和纬度, 并通过地心引力随纬度的变异和测站高度的改变得到一个改正值。另外, 你还可自己定义一个干天顶延迟的约束值, 如 CNNN, 这里 NNN 为延迟约束值, 单位为厘米。如 C230 即设其延迟约束值为 230cm。

WZEN 为 (1) 式中的 WETZEN, 即湿天顶延迟分量。它用到的改正模型同样为 SAAS, 如果要以水蒸汽辐射计记录数据来决定湿天顶延迟, 那么就设置 WZEN 为 WVR (Water vapor radiometer), 否则, 将从 —MET. VALUE— 中读取温度值和相对湿度值 (温度为 20 °C, 湿度为 50%) 得到湿天顶延迟的改正值。如同干天顶延迟一样, 你也可以设定一个参数值 CNNN, 但是在湿天顶延迟中 NNN 的单位为毫米, 而非厘米。

DMAP 和 WMAP 分别为 (1) 式中的 DAYMAP 和 WETMAP。自 1996 年发行的 GAMIT 以来, 其缺省模型为 Arthur Niell 设计的 NMFH 和 NMFW 改正模型 (见附录)。取代了 1985 年由 Davis 等设计的 CFA-2.2 模型, 但现在的软件仍然可以利用这种 CFA 改正模型。

WFILE 栏允许你给一个包含每一测站的每一时刻的温度, 压力和湿度的文件名。虽然此文件的内容并不代表真实的大气层中当时的情况, 但在很大程度上应当相近。下面给出一个 WFILE 的例子:

Static met file for FOR2 Brush 2 1988 Day 148

END

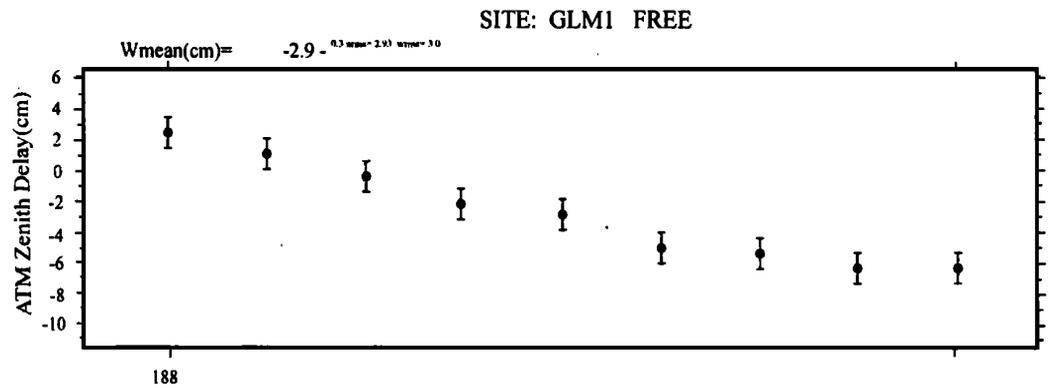
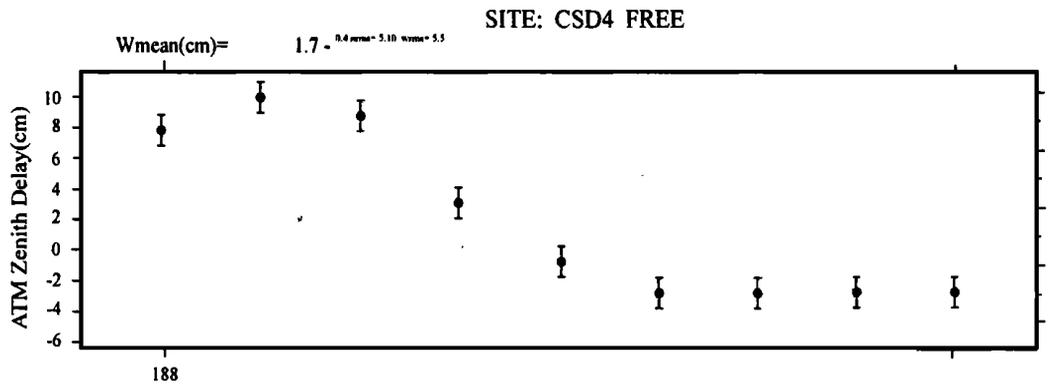
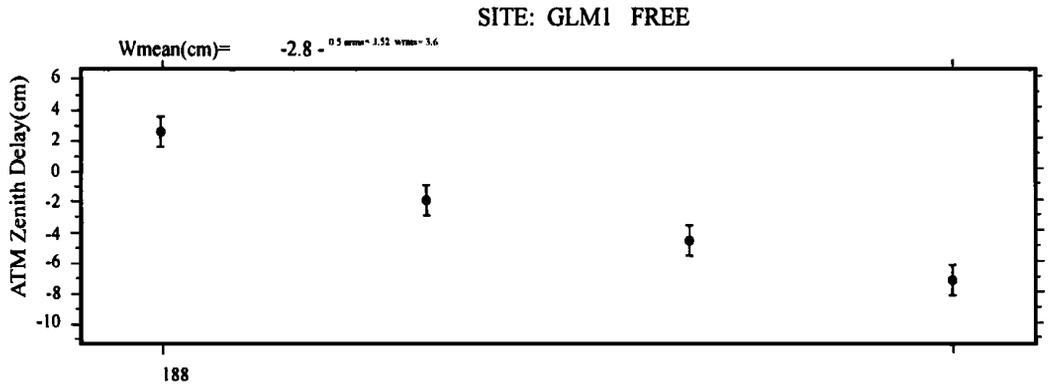
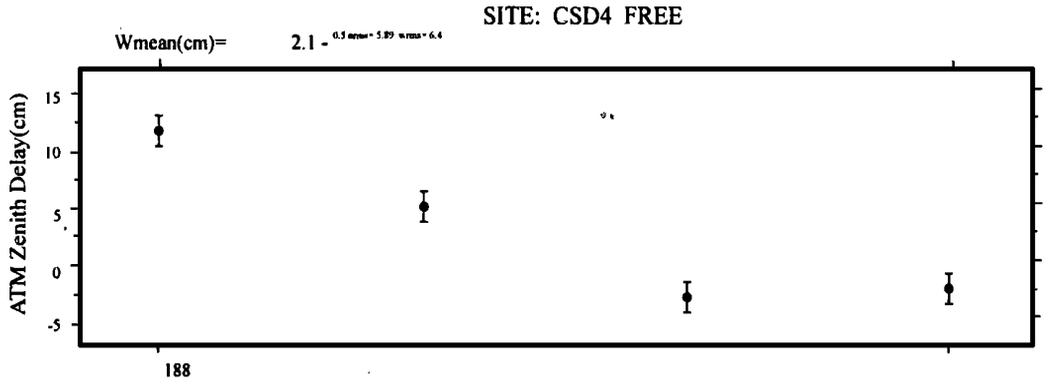
1988 148 2100 1988 149 0600 FOR2

| Time (UTC) |     |    |    | TEMP  | PRES  | REHUMID  |
|------------|-----|----|----|-------|-------|----------|
| YR         | DAY | HR | MN | LOCAL | LOCAL | LOCAL    |
|            |     |    |    | DEG C | MB    | PER CENT |
| 88         | 148 | 21 | 00 | 17.9  | 979.0 | 70.0     |
| 88         | 149 | 06 | 00 | 17.9  | 97    | 70.0     |

END 以前的所有文字为说明文字。紧跟的一行为开始观测时间和结束观测时间。紧跟的三行为程序读取数据的格式和单位。温度和压强通常以摄氏度 (°C) 和毫巴 (millibars), 湿度则以相对湿度给出 (%)。所有三项可以是在测站附近地区 (LOCAL) 也可以在海平面 (SEALEVEL) 上测量。时间以自由形式给出。

由于水蒸汽引起的大气传播延迟是不容易通过气象数据的模型化而完全改正。所以 GAMIT 在计算中允许你估计一个天顶延迟的改正值。对于局域网 (< 30km), 卫星的仰角值几乎都相等, 你可以根据“余割法则”估计一个天顶延迟值。所有的观测站其结果都与估计的天顶延迟紧密相关, SOLVE 在处理过程中分离天顶延迟也不会引起什么变化。只要你固定或者缩紧约束值, 对于每一测站的每一测段天顶延迟模型都能取得一个相应的参数, 在 sestbl. 中有如下控制参数和 sittbl. 中的参数同时起作用。





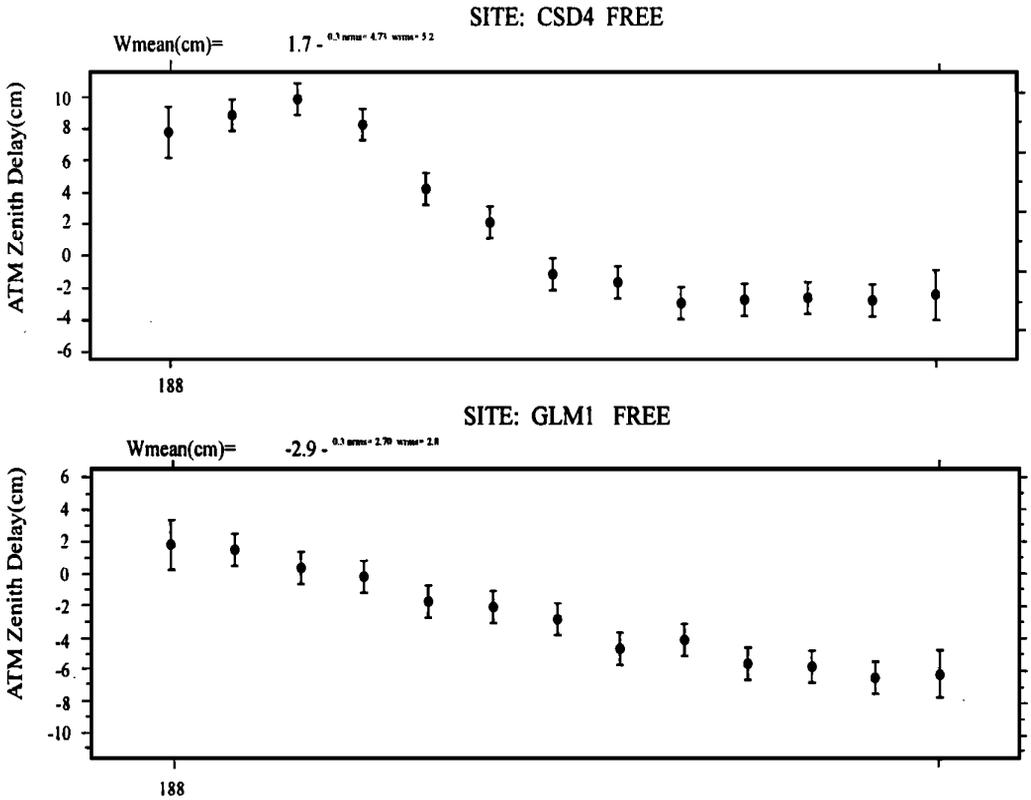


图 1 天顶延迟与 Number Zen 的关系

Fig. 1 Plots showing the relationship between the zenith delay and Number Zen

(2) 有条件的, 应利用水汽辐射计, 准确地测定电磁波在传播路径上的水汽积累量, 以便精确的计算大气湿分量的改正项。

(3) 利用相对定位的差分法来减弱对流层大气折射的影响, 基线较短时, 在大气条件稳定的情况下, 可有效地减弱上述大气折射的影响。

(4) 利用不同的频率进行观测(采用双频观测技术)和采用不断完善的改正模型。

(5) 观测站间进行同步观测量求差, 此法对于短基线小于30km而言, 效果尤为明显。

(6) 改进水汽辐射计, 使其小型化, 经济化, 普遍推广应用。

在本文的撰稿过程中, 陈智梁研究员和刘宇平研究员都提出了宝贵意见和建议。在此表示感谢。

#### 附录: <SAAS>

- \* P ————— Total pressure, mbars( mbars)
- \* T ————— Temperature deg( °C)
- \* Tk ————— Temperature Kelvin
- \* Phi ————— Geocentric latitude, radians
- \* Rh ————— Relative humidity( 0—1)

\* h ————— Elevation above the geoid, km  
 \*  $tk = t + 273.15$   
 $ffun = 1.0 - 0.266 * \cos(2.0 * \text{phi}) - 0.28 * h$   
 $e = rh * 6.11 * 10.0 * (7.5 * t / (t + 2.373))$   
 $saas = 0.2277 * (p + (0.1255 / tk + 0.5) * e) / ffun(\text{phi}, h)$

### <NMFH>

\*  $\text{sine} = \sin(\text{elev} * \text{deg2rad})$   
 \*  $\text{cose} = \cos(\text{elev} * \text{deg2rad})$   
 \*  $\text{beta} = b / (\text{sine} + c)$   
 \*  $\text{gamma} = a / (\text{sine} + \text{beta})$   
 \*  $\text{topcon} = (1.0 + a / (1.0 + b / (1.0 + c)))$   
 \*  $\text{deg2rad} = 3.14159265 / 180$   
 \* a, b, c — the a, b, and c coefficients in the continued fraction  
 \* form of Marini (小于  $15^\circ$ ,  $15^\circ \sim 75^\circ$ , 大于  $75^\circ$ )。  
 \*  $\text{hmf}(1)$  — delay mapping function  
 \*

$\text{hmf}(2)$  — d-mapping-function/d-elevation (dhmf2/d-el)

$$\text{hmf}(1) = \text{topcon} / (\text{sine} + \text{gamma})$$

$$\text{hmf}(2) = -\text{topcon} * \text{cose} / (\text{sine} + \text{gamma}) * *2 * (1.0 - a / (\text{sine} + \text{beta}) * *2 * (1.0 - b / (\text{sine} + c) * *2))$$

### <NMFV>

\*  $\text{wmf}(1)$  — delay mapping function  
 \*  $\text{wmf}(2)$  — d-mapping-function/d-elevation (dhmf2/d-el)  
 $\text{wmf}(1) = \text{topcon} / (\text{sine} + \text{gamma})$   
 $\text{wmf}(2) = -\text{topcon} / (\text{sine} + \text{gamma}) * *2 * (\text{cose} - a / (\text{sine} + \text{beta}) * *2 * \text{cose} * (1.0 - b / (\text{sine} + c) * *2))$

### 参考文献:

- [1] 周忠谟, 等. GPS 卫星测量原理与应用[M]. 北京: 测绘出版社, 1997.  
 [2] 陈智梁, 张选阳, 等. 中国西南地区地壳运动的 GPS 监测[J]. 科学通报, 1999, 44(8): 851—854.