

## GPS水汽监测中卫星轨道处理分析

赵峰<sup>1</sup>, 戴连君<sup>2</sup>, 方宗义<sup>3</sup>, 肖稳安<sup>1</sup>

(1 南京信息工程大学 遥感学院, 江苏 南京 210044 2 北京市信息资源管理中心, 北京 100088;  
3 中国气象局 国家卫星气象中心, 北京 100081)

**摘要:** 轨道误差是 GPS 水汽监测的重要误差来源, 对轨道误差对水汽监测的影响进行分析, 并研究 Neville 算法在预报精密星历轨道插值上的可行性, 实现近实时水汽监测的轨道插值处理, 为水汽监测奠定基础。

**关键词:** GPS; 水汽监测; 轨道插值

**中图分类号:** P413 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-2022(2007)01-0140-04

## Orbit Disposal and Analysis on GPS Water Vapor Sounding

ZHAO Feng<sup>1</sup>, DAI Lian-jun<sup>2</sup>, FANG Zong-yi<sup>3</sup>, XIAO Wen-an<sup>1</sup>

(1. School of Remote Sensing NUIST, Nanjing 210044 China

2. Beijing Information Resources Management Center Beijing 100088, China

3. National Satellite Meteorological Center, CMA, Beijing 100081, China)

**Abstract** Orbit error is a very important error source of water vapor sounding used in GPS. In order to deal with the orbit interpolation in real-time water vapor sounding, the orbit errors effect on water vapor sounding is analysed and the feasibility of precisely predicting ephemeris using Neville algorithm is studied. It is shown that the Neville algorithm can meet precisely predicted ephemeris interpolation on near real-time and lay a foundation for water vapor sounding.

**Key words** GPS; water vapor sounding; orbit interpolation

### 0 引言

水汽是大气的重要组成部分, 利用 GPS 连续跟踪站监测水汽能全天候地提供大气中可降水水汽含量的变化信息。随着对流层监测、电离层监测等实时或近实时应用的快速发展, 以及 GPS 资料数值预报模式上的应用前景<sup>[1-2]</sup>, 使得 GPS 水汽监测逐渐成为一种新型的大气探测和预报手段<sup>[3]</sup>。近几年, 我国上海、广州、北京等地相继建立了地基 GPS 水汽监测试验网, 以加强水汽监测方面的研究。

GPS 水汽监测中星历误差一直是一个不容忽视的问题, 预报星历选用参考历元的轨道参数, 外推出任意观测历元的卫星星历精度较低; 而精密星历虽精度较高, 但为事后星历, 两者都不能满足近实时业务的需要。为满足水汽监测的需要, 一般采用预报精密星历<sup>[4]</sup>。预报精密星历数据间隔 15 min, 为获

取任意历元的卫星位置, 需要进行轨道处理, 本文利用 Neville 算法对预报精密星历轨道插值精度分析, 实现近实时水汽监测轨道处理。

### 1 GPS水汽监测原理及误差分析

GPS 卫星发射的无线电信号穿过大气层时, 受到电离层电子和中性大气的折射影响而产生延迟, 电离层延迟可通过双频或电离层模型基本清除, 中性大气延迟分为天顶延迟和投影函数两部分。投影函数可根据实际情况由数学模型估计出, 而根据水汽微波辐射计的观测数据分析天顶湿延迟是一阶 Gauss-Markov 过程, 利用卡尔曼滤波把估值当作一个随机过程来处理<sup>[5]</sup>, 可估算出天顶延迟。

天顶延迟可分为天顶静力延迟和天顶湿延迟。由于干大气较符合理想气体方程和流体静力学平衡方程, 天顶静力延迟可用 Sastamoinen, Hopfield 等模

型精确地估计, 利用天顶延迟减去天顶静力延迟得到天顶湿延迟, 天顶湿延迟是由大气中水汽分量引起的延迟, 可利用其进一步遥感水汽含量<sup>[67]</sup>。

水汽监测对轨道精度要求较高, 为尽量减少轨道误差的影响, 目前主要采用双差定位处理方法, 大气可降水量误差  $\Delta_{pwv}$  与基线向量误差  $\Delta l$  存在如下对应关系<sup>[4]</sup>:

$$\Delta_{pwv} \approx 0.05 \Delta l \quad (1)$$

由 (1) 式可知分析轨道误差对水汽误差的影响主要就是分析轨道误差对基线向量的影响。相对定位求差中, 卫星轨道误差对基线影响一般用下式来估计<sup>[8]</sup>:

$$\frac{\Delta l}{l} = c \frac{\Delta R}{R} \quad (2)$$

其中:  $l$  为基线长,  $\Delta R$  为轨道误差,  $R$  为卫星距离。系数  $c$  一般取值为  $1/4 \sim 1/10$  其具体取值取决于基线向量的位置和方向、观测时段长短、观测的卫星数量及其几何分布等因素。相对定位中短基线对卫星星历误差影响有一定消除, 但同时会带来站间相关误差, 基线越短越严重。长基线能避免相关误差, 但要求有一定精度的星历, 基线越长精度要求越高, 预报精密星历才能满足近实时水汽监测的需求<sup>[9]</sup>。

## 2 轨道插值方法

GPS 卫星坐标处理通常采用坐标内插和拟合两种。GPS 预报精密星历时间间隔跨度比较大, 采用切比雪夫多项式拟合精度比较低<sup>[10]</sup>, 而拉格朗日内插法, 没有给出误差估计, 且不适合编程, 所以本文采用 Neville 算法进行内插。多项式插值 Neville 途径是一种由两个  $n-1$  次插值多项式构造一个  $n$  次插值多项式的方法<sup>[11]</sup>:

记  $p_{12}(x)$  是  $f(x)$  在  $x_1, x_2$  上的一次插值多项式, 同样  $p_{23}(x)$  表示  $f(x)$  在  $x_2, x_3$  上的一次插值多项式, 那么  $x_1, x_2, x_3$  上的二次插值多项式为:

$$p_{1,2,3}(x) = \frac{x_3 - x}{x_3 - x_1} p_{1,2}(x) + \frac{x - x_1}{x_3 - x_1} p_{2,3}(x) = \frac{1}{x_3 - x_1} \begin{vmatrix} x - x_1 & p_{1,2}(x) \\ x - x_3 & p_{2,3}(x) \end{vmatrix}$$

$p_{1,2,3}(x)$  是唯一的  $x_1, x_2, x_3$  上的二次多项式, 可以将  $n$  节点的插值多项式推广到  $n+1$  个节点的插值多项式:

$$p_{1,2,3,\dots,n,n+1}(x) = \frac{1}{x_{n+1} - x_1} \begin{vmatrix} x - x_1 & p_{1,2,\dots,n}(x) \\ x - x_{n+1} & p_{2,3,\dots,n+1}(x) \end{vmatrix} = \frac{x_{n+1} - x}{x_{n+1} - x_1} p_{1,2,\dots,n}(x) + \frac{x - x_1}{x_{n+1} - x_1} p_{2,3,\dots,n+1}(x)$$

公式中如果  $x_1 \leq x \leq x_{n+1}$  那么  $\frac{x_{n+1} - x}{x_{n+1} - x_1} \geq 0, \frac{x - x_1}{x_{n+1} - x_1} \geq 0$  意味着此公式为带权平均, 且权系数为正,  $p_{1,2,3,\dots,n,n+1}(x)$  得到的误差不会超过  $p_{1,2,\dots,n}(x)$  和  $p_{2,3,\dots,n+1}(x)$  两误差中大的那个, 有利于计算。

## 3 轨道插值的分析

为检验 Neville 插值的可行性, 用预报精密星历 2005 年 1 月 21 日 1 号的卫星数据进行比较分析。因为 Neville 插值的轨道精度与插值步长和阶数有密切联系, 下面利用程序插值数据进行分析来确定步长和阶数。

### 3.1 步长的确定

预报精密星历采样间隔为 15 min, 先选取 30 min 为步长进行多项式插值, 与预报精密星历提供的 15 min 处真实值进行比较。任取预报精密星历 10:00—16:00 时段的插值数据检验, 阶数随节点数的增加而增加。由图 1 可以看出, 达到 12 阶时预报精密星历插值精度达到分米级, 但再提高阶数轨道精度提高效果不明显, 且高阶多项式插值容易发

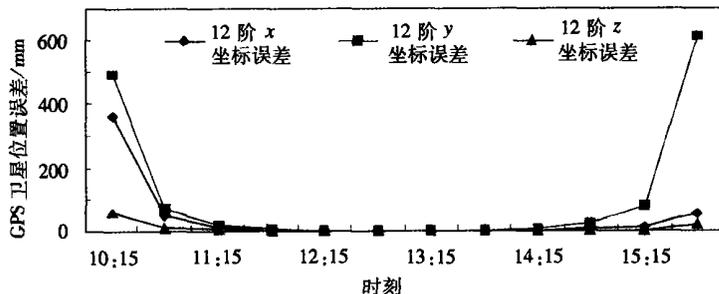


图 1 利用 2005 年 1 月 21 日 12 阶 30 min 步长多项式插值 GPS 卫星位置所得误差

Fig. 1 The error of GPS orbit interpolation using the polynomial of twelve-degree and thirty-minute time-step at January 21, 2005

生 Runge 振荡现象。为进一步提高插值精度, 减弱 Runge 振荡现象, 采取减小步长的措施。

用 15 m in 步长分段插值没有真实值可进行比较, 因此选取每天中间时刻段来比较分析, 结果见表 1, 可以看出 12 阶 30 m in 步长 10: 00—16: 00 时段多项式插值的中间时段精度很高, 插值误差在 2 mm 以内。所以全天轨道插值时可以采用插值点始终位于插值时段中间 1 h 内的方法来进行交叉插值。这样插出的全天 GPS 卫星坐标中间的 20 h 段插值误差都在 2 mm 以内, 所以可以利用这些值作为 15 m in 步长插值的比较值。

表 1 12 阶 30 m in 步长多项式插值中间时段误差

Table 1 The error of mid-period interpolation using the polynomial of twelve-degree and thirty-minute time-step mm

时刻	x 坐标误差	y 坐标误差	z 坐标误差
12 15	2	1	1
12 45	1	1	0
13 15	1	2	1
13 45	2	2	1

利用 30 m in 步长的多项式插出全天插值结果后, 再选取 10: 00—13: 00 时间段进行单独 12 阶

15 m in 步长多项式插值, 将插值结果与 30 m in 步长的插值进行比较得到误差值(图 2)。由 2 图可见, 两端误差明显下降, 达到厘米级精度。

通过图 1、2 同阶不同步长的比较可见, 通过减小步长, 两端精度提高明显, 图 2 选取 15 m in 步长插出的精度已完全能达到厘米级。所以利用 15 m in 步长进行全天插值效果更佳。

### 3.2 阶数的确定

确定 15 m in 步长插值后, 从图中 2 可以看出, 只在开头 15 m in 内和结束 30 m in 内两时段误差稍大, 中间时段误差都很小, 进一步验证了 Neville 算法插值的可操作性。下面通过不同阶数误差值来确定插值阶数, 通过比较可明显看出至少本文数据插值中 8 阶插值两端精度才能满足厘米量级(图 3)。通过综合分析, 8 阶以上的 Neville 插值公式能较好地利用 15 m in 步长将全天星历插值成 30 s 甚至更小, 并达到厘米级精度。

## 4 结论

(1) 通过不同阶数比较, 8 阶以上的插值可使全天星历达到厘米级精度, 9~11 阶甚至有可能达到毫米级, 但阶数过高, 反而会使精度降低, 考虑 15 m in 步长存在 2 mm 检验值误差, 一般选择

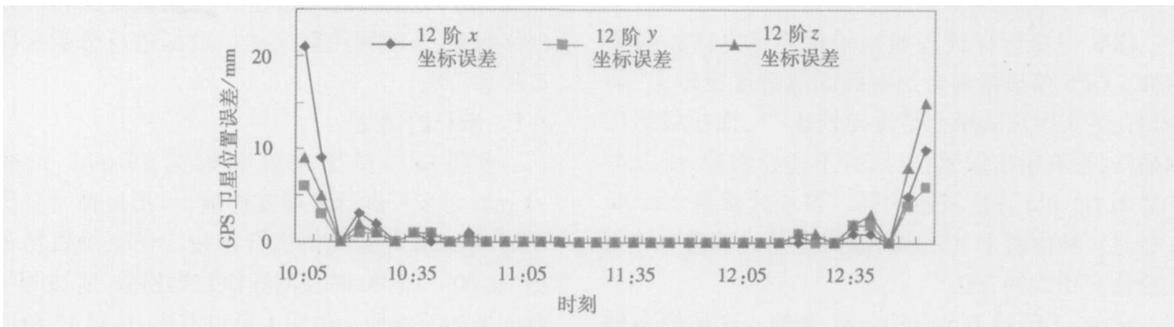


图 2 12 阶 15 m in 步长多项式插值 GPS 卫星位置误差

Fig. 2 The error of GPS orbit interpolation using the polynomial of twelve-degree and fifteen-minute time-step

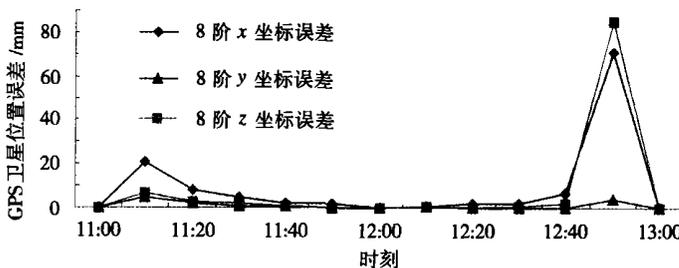


图 3 8 阶 15 m in 步长多项式插值 GPS 卫星位置误差

Fig. 3 The error of GPS orbit interpolation using the polynomial of eight-degree and fifteen-minute time-step

15 min 步长, 9~11 阶插值可满足水汽监测轨道处理。

(2) 本文讨论利用交叉插值的方法解决了全天星历 15 min 步长无检验值的问题, 同时又为降低步长提供可行性, 根据实际情况, 当需要插值的时间较短时, 可通过降低步长、调整交叉插值的时间间隔等措施进行进一步处理。

## 参考文献:

- [1] 袁招洪, 顾松山, 丁金才. 数值模式预报延迟量与 GPS 测量的比较研究 [J]. 南京气象学院学报, 2006, 29(5): 581-590
- [2] 袁招洪. GPS 资料在中尺度数值预报模式中的应用研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学电子工程系, 2004
- [3] 曹云昌, 方宗义, 夏青. 地空基 GPS 探测应用研究进展 [J]. 南京气象学院学报, 2004, 27(4): 555-572
- [4] 曹云昌, 方宗义, 夏青. 轨道误差对近实时 GPS 遥感水汽的影响研究 [J]. 气象科技, 2004, 32(4): 229-232
- [5] 杨力. 大气对 GPS 测量影响的理论和研究 [D]. 郑州: 中国人民解放军信息工程大学测绘学院, 2001: 36-38
- [6] 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
- [7] Rocken C, Hove T V, Johnson J, et al. GPS/STROM-GPS sensing of atmospheric water vapor for meteorology [J]. J Atmos Oceanic Technol, 1995, 12(3): 468-478
- [8] 李征航, 黄劲松. GPS 测量与数据处理 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2005
- [9] 李成才, 毛节泰. GPS 地基遥感大气水汽总量分析 [J]. 应用气象学报, 1998, 9(4): 470-476
- [10] 蔡艳辉, 程鹏飞, 李夕银. 卫星坐标的内插和拟合 [J]. 全球定位系统, 2003, 28(3): 10-13
- [11] William H P, Saul A T, William T, et al. Numerical recipes in C++ [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.