

# 基于反投影方法的对流层延迟三维层析研究<sup>\* 1</sup>

赵庆志<sup>1,2)</sup> 张书毕<sup>1,2)</sup>

(1)中国矿业大学环境与测绘学院,徐州 221008  
(2)江苏省资源环境信息工程重点实验室,徐州 221008)

**摘 要** 利用 GAMIT/GLOBK 软件解算美国地基 GPS 监测网数据,获得天顶对流层总延迟,并基于反投影方法虚拟对流层斜路径总延迟量,解算了对流层延迟密度。运用层析技术分析该地区对流层延迟三维特征,结果表明,反投影方法估算的天顶对流层总延迟与 GAMIT 解算的结果相差很小,最大残差小于 5 mm,中误差为 4.1 mm。

**关键词** GAMIT/GLOBK 软件;反投影方法;层析技术;对流层延迟;水汽密度

**中图分类号**:P412

**文献标识码**:A

## RESEARCH ON 3D TROPOSPHERIC DELAY TOMOGRAPHY BASED ON BACK-PROJECTION METHOD

Zhao Qingzhi<sup>1,2)</sup> and Zhang Shubi<sup>1,2)</sup>

(1)School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008  
(2)Key Laboratory of Resources and Environmental Information Engineering of Jiangsu Province, Xuzhou 221008)

**Abstract** Tropospheric delay density is resolved with the ground-based GPS monitoring network data in USA solved by the GAMIT/GLOBK software based on tropospheric slant path total delay virtualized by back-projection method. Tropospheric delay 3D feature is analyzed by the method of tomography. The result shows that zenith total delay solved by two methods is small, the maximum error is less than 5 mm, and the mean square is 4.1 mm.

**Key words**: GAMIT/GLOBK software; back-projection method; tomography technique; tropospheric delay; vapor density

## 1 引言

对流层延迟是 GPS 信号穿过大气层时受到对流层的影响产生的。对流层延迟可分为流体静力学延迟 (HD, Hydrostatic Delay) 和湿延迟 (WD, Wet Delay)。研究表明:对流层延迟主要为流体静力学延迟<sup>[1,2]</sup>。湿延迟由大气中的水汽引起,虽然湿延迟只占整个对流层延迟的小部分,但在大气中的变

化却相当剧烈和频繁,目前很难采用一个固定的模型将其精确求出。对流层上空的水汽时间序列是进行气象预报,特别是中小水平尺度灾害性天气的监视和预报的重要探测要素,所以对暴雨的预报起着至关重要的作用<sup>[3]</sup>。

对流层延迟三维层析是通过求解对流层延迟密度来反映对流层延迟在空间的三维分布情况。求解对流层延迟三维层析一般是通过移动网格法<sup>[4]</sup>把

\* 收稿日期:2013-01-20

作者简介:赵庆志,男,1989 年生,硕士,主要研究方向为 GPS 数据处理及应用. E-mail: zhaqingzhia@sina.com

对流层延迟密度作为未知数,而实际问题中观测值的数量较少且分布不均,考虑到天顶方向对流层延迟是各站点斜路径延迟在天顶方向上投影的加权平均值,并且天顶方向对流层延迟的精度和时间分辨率都比较高<sup>[5]</sup>,针对上述问题,本文提出一种基于反投影方法求解对流层延迟密度,为求解对流层延迟三维层析提供一种新的思路。

2 反投影方法层析原理<sup>[6-9]</sup>

2.1 层析原理

设每一个网格的对流层延迟密度为  $x_{i,j,k}$ ,第  $p$  条信号穿过网格  $i,j,k$  的长度为  $d_{i,j,k}^p$ 。则第  $p$  条观测值对应的观测方程为:

$$\sum_i \sum_j \sum_k d_{i,j,k}^p x_{i,j,k} = STD^p \tag{1}$$

式中, $STD^p$  表示第  $p$  条 GPS 信号斜路径方向对流层总延迟量, $i,j,k$  表示网格的位置。

2.2 反投影方法虚拟斜路径延迟量

实际观测中,由于 GPS 信号经过的网格并不均匀;在高度截止角为  $15^\circ$  的情况下,每台接收机大概能接收到 5~6 条观测信号线,在解算观测方程的时候会出现秩亏的情况。针对此现象提出了反投影方法。

1) 用 GAMIT/GLOBK 软件解算<sup>[8]</sup> 出测站在天顶方向上对流层总延迟量 ZTD 和东西、南北方向延迟梯度项  $G_{WE}$  和  $G_{NS}$ 。

2) 利用反投影函数把 ZTD 和东西、南北方向上的梯度在不同方位角和高度角的观测线上进行斜路径延迟加密,得到  $STD_{A,ele}$ :

$$STD_{A,ele} = ZTD \frac{1}{f(ele)} + G_{NS} \frac{\partial f}{\partial ele} \cos A + G_{WE} \frac{\partial f}{\partial ele} \sin A \tag{2}$$

式中, $A$  为方位角, $ele$  为高度角, $f$  为投影函数, $G_{WE}$  和  $G_{NS}$  分别为东西、南北方向上的投影函数, $STD_{A,ele}$  表示 GPS 信号经过的斜路径方向对流层总延迟量。

3) 把层析区域分成若干大小相等的立体网格,计算  $STD_{A,ele}$  经过的网格编号以及经过的长度  $d_{i,j,k}^p$ 。

4) 假设每一个网格对 GPS 信号在天顶方向上的延迟为  $x_{i,j,k}$ ,观测方程可以写成:

$$STD_{A,ele} - \sum_i \sum_j \sum_k d_{i,j,k}^p x_{i,j,k} = \delta_{A,ele} \tag{3}$$

通过最小二乘平差求  $x_{i,j,k}$ 。

3 算例计算

采用 2009 年 4 月 1 日(年积日第 091 天)美国地基 GPS 监测网的 SG01、SG04、SG08、SG09、SG16 和 SG72 共 6 个测站的数据进行试验,以 SG01 测站

为例。层析水平区域网格划分如图 1 所示,经度变化是  $97.2^\circ \sim 97.8^\circ W$ ,格距大小为  $0.1^\circ$ ;纬度变化是  $36.3^\circ \sim 36.9^\circ N$ ,格距大小为  $0.1^\circ$ ;垂直方向从地面开始到 9.6 km 高度,每 800 m<sup>[10]</sup> 一层,共 10 层;共  $6 \times 6 \times 10$  个网格。

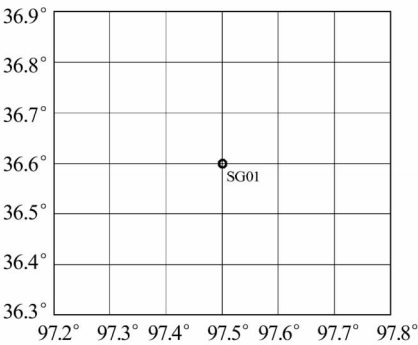


图1 美国地基 GPS 监测网水平网格划分  
Fig. 1 Horizontal grids of the ground-based GPS monitoring network in USA

原始观测数据利用 GAMIT/GLOBK 软件计算出精确的站坐标,然后把精确的站坐标代回 GAMIT 中对待求测站进行强约束,反算出 SG01 测站对流层天顶延迟的绝对量,天顶延迟和大气梯度每 1 小时计算一次;再利用反投影方法虚拟斜路径计算 SG01 测站在不同高度和方位角的斜路径总延迟量。采用美国标准大气模型 Niell 地图函数模型。斜路径总延迟量为:

$$STD(e,\varphi) = m_{wet}(e)ZWD + m_{dry}(e)ZHD + m_{\Delta}(e) [G_{NS}\cos(\varphi) + G_{WE}\sin(\varphi)] + R_e \tag{4}$$

式中, $ZHD$ 、 $ZWD$  分别为天顶干、湿延迟量, $m_{dry}(e)$ 、 $m_{wet}(e)$  为干、湿映射函数, $G_{NS}$ 、 $G_{WE}$  为南北、东西方向延迟梯度项, $e$ 、 $\varphi$  为 GPS 接收机到卫星的斜路径的高度角和方位角, $R_e$  表示残差项。

根据建立的观测方程通过平差求得对流层延迟密度,然后进行对流层延迟三维层析。

4 试验结果与分析

4.1 反投影方法的精度检验

图 2 为 2009 年 4 月 1 日由 GAMIT 软件计算的天顶对流层总延迟量和通过反投影方法估算的天顶对流层总延迟量的关系图,图 3 是两种方法计算的 SG01 测站天顶对流层总延迟量的残差图。由图 2、3 可以看出,反投影方法估算的天顶对流层延迟量和 GAMIT 解算的天顶对流层延迟量相差很小,最大残差小于 5 mm,中误差为 4.1 mm,变化趋势也很稳合,证明了反投影方法的正确性。

表 1 是通过 GAMIT 软件与反投影方法计算得到的 SG01 测站天顶对流层总延迟。

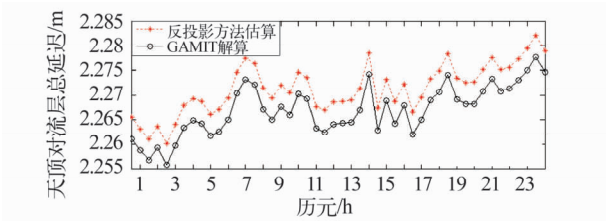


图2 不同方法计算的 SG01 测站天顶对流层延迟

Fig.2 Zenith total delay of the SG01 station solved by different methods

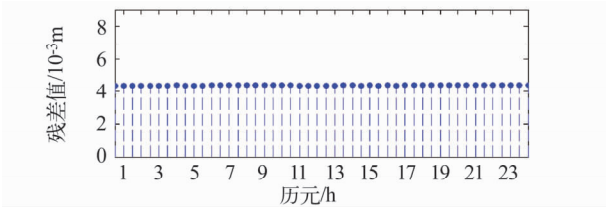


图3 两种方法的残差值

Fig.3 Residuals between two methods

表 1 用 GAMIT 软件与反投影方法计算的 SG01 测站天顶总延迟 (单位:m)

历元	天顶总延迟	
	GAMIT 计算的 ZTD	反投影方法 估算的 ZTD
1	2.261 2	2.265 3
2	2.258 8	2.262 1
3	2.256 9	2.259 2
4	2.259 3	2.262 2
5	2.255 8	2.258 8
6	2.259 8	2.255 1
7	2.263 5	2.267 7
8	2.264 9	2.269 0
9	2.264 3	2.268 2
10	2.261 8	2.266 1
11	2.262 7	2.266 4
12	2.265 0	2.269 3
13	2.270 3	2.273 8
14	2.273 1	2.266 6
15	2.272 1	2.262 9
16	2.267 1	2.266 9
17	2.265 1	2.262 0
18	2.267 6	2.258 8
19	2.266 0	2.271 2
20	2.270 3	2.272 4
21	2.269 2	2.271 4
22	2.263 3	2.270 5
23	2.262 5	2.269 8
24	2.264 1	2.273 4

由表 1 可知,假定以 GAMIT 软件解算的 SG01 测站的天顶对流层总延迟为标准,通过反投影方法计算的天顶对流层总延迟最大误差小于 5 mm,最小误差大于 4 mm;两者之间存在一定的系统误差,经分析可能是未加入边界约束等原因引起的。

4.2 对流层延迟密度三维层析

图 4 为 2009 年 4 月 1 日 00—01 时一小时的 对流层平均延迟密度三维分布图。从图 4 可以看出, 对流层平均延迟密度从 800 m 的 1.4 左右很快缩小 到 0.2 左右,符合大气水汽的分布趋势,也在一定程 度上证明了该方法的正确性。

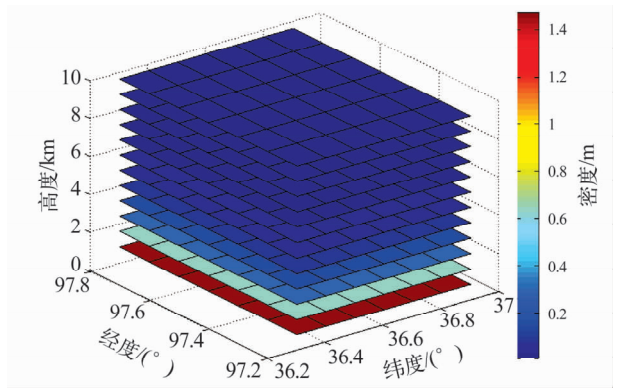


图4 对流层延迟密度层析

Fig.4 Tomography chart of tropospheric delay density

4.3 分层对流层延迟密度分布

图 5 为 00—01 时层析得到的从地面到 3.2 km 的 分层对流层平均密度分布图,可以看出从第一层 到第四层每一层对流层延迟密度的变化,直观地反 映了每一层对流层延迟密度的分布情况,也间接反 映了每一层水汽的分布特征。

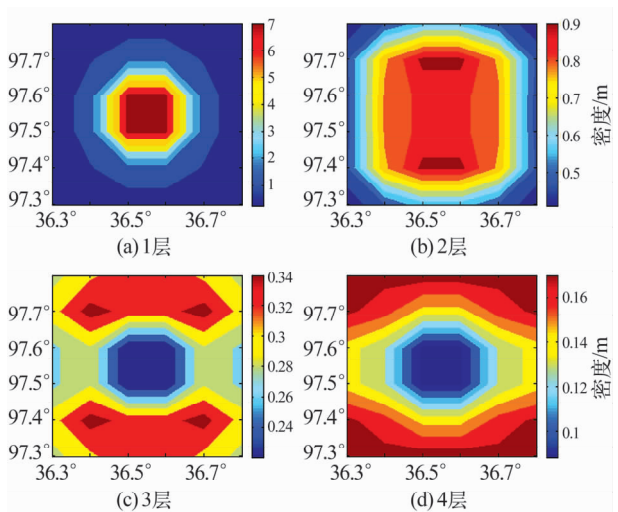


图5 分层对流层延迟密度分布

Fig.5 Layered chart of tropospheric delay density

4.4 水汽日变化分析

图6是2009年4月1日在海拔800 m处SG01区域对流层延迟密度日变化的总体趋势图。由分析可得,当天该地区白天对流层延迟密度较低,夜晚对流层延迟密度较高,直接反映了SG01区域白天水汽含量较低,夜晚水汽含量高。在晚上7点以后水汽含量突然增高,说明可能会出现降水。

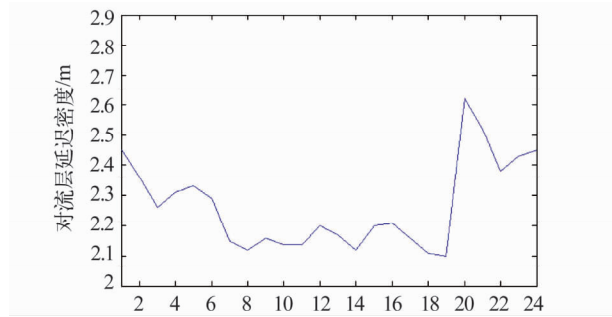


图6 SG01 3 km处对流层延迟密度日变化量  
Fig.6 Diurnal variation of tropospheric delay density of the SG01 station in 3 km

5 结束语

利用区域GPS监测网数据,提出了反投影方法虚拟斜路总径延迟的思路。利用GAMIT/GLOBK软件及运用层析技术分析某地区对流层延迟密度三维变化。结果表明,SG01所在地区大气水汽总体变化趋势是低层大气水汽的含量远远高于高层,并且随着海拔增高,水汽含量逐级降低;在同一时间不同高度上,水汽含量变化也不相同。当然也存在着一些不足:比如未加入边界约束,这将是进一步提高结果精度的研究重点。

利用GPS观测信息来计算对流层延迟密度,进而反映水汽三维特征变化,对天气预报和气候监测提出一种新思路。通过试验表明,利用反投影函数方法来解决此类问题具有可行性、实用性和先进性,在一些沿海地区,可作为水汽分析、天气预报和气候预测的方法。

参 考 文 献

1 Bevis M, et al. GPS meteorology-remote-sensing of atmospheric water - vapor using the global positioning system [ J ] .

Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 1992, 97 (D14): 15 787 - 15 801.

2 Chen G and Herring T A. Effects of atmospheric azimuthal asymmetry on the analysis of space geodetic data[ J]. Journal of Geophysical Research-Solid Earth, 1997, 102 (B9): 20 489 - 20 502.

3 宋淑丽, 朱文耀, 廖新浩. 地基GPS气象学研究的主要问题及最新进展[ J]. 地球科学进展, 2004, 19 (2): 250 - 259. ( Song Shuli, Zhu Wen Yao and Liao Xinhao. The main problems and latest developments of ground-based GPS meteorology[ J]. Advances in Earth Science, 2004, 19 (2): 250 - 259 )

4 Flores A, Rius A and Ruffini G. 4D tropospheric tomography using GPS slant wet delays[ J]. AnnGeophys. , 2000, 18: 223 - 224.

5 闫文林. 基于CORS参考站精密定位的对流层三维层析技术[ D]. 中国矿业大学, 2010. ( Yan Wenlin. Tropospheric three-dimensional tomography based on CORS reference station precision positioning D]. CUMT, 2010 )

6 董春来, 等. 基于JSCORS层析连云港沿海水汽的三维特征分析[ J]. 测绘通报, 2011 (12): 29 - 32. ( Dong Chunlai, et al. Three-dimensional tomography analysis of Li-anyungang costal water vapor based on JSCORS[ J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2011 (12): 29 - 32 )

7 丁金才. GPS气象学及其应用[ M]. 北京: 气象出版社, 2009. ( Ding Jincai. GPS meteorology and applications[ M]. Beijing: Meteorological Press, 2009 )

8 岳迎春, 陈春明, 吴北平. GPS数据解算对流层天顶总延迟探讨[ J]. 测绘信息与工程, 2008, 33 (4): 30 - 32. ( Yue Yingchun, Chen Chunming and Wu Beiping. Research on GPS data solve zenith tropospheric delay [ J]. Journal of Geomatics, 2008, 33 (4): 30 - 32 )

9 宋淑丽. 地基GPS网对水汽三维分布的监测及其在气象上的应用[ D]. 中国科学院上海天文台, 2004. ( Song Shuli. The application of ground-based GPS network for monitoring three-dimensional distribution of water vapor on Meteorology[ D]. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, 2004 )

10 毕研盟. 应用全球定位系统(GPS)遥感大气水汽的研究[ D]. 北京大学, 2006. ( Bi Yanmeng. The study of global positioning system (GPS) remote sensing of atmospheric water vapor[ D]. Beijing University, 2006 )