

# 组合 GPS/GLONASS 观测数据的三维水汽层析

董州楠<sup>1</sup> 蔡昌盛<sup>1</sup>

1 中南大学地球科学与信息物理学院,长沙市麓山南路 932 号,410083

**摘 要:** 基于香港卫星定位参考站网(SatRef)15 个测站共 6 d 的数据,联合 GPS 和 GLONASS 进行对流层三维水汽层析实验。结果表明,相比 GPS 单系统,GPS/GLONASS 组合系统能显著增加信号穿越的网格数量,提高层析水汽分布的精度,平均改善率为 36%。  
**关键词:** 水汽层析;GPS;GLONASS;对流层  
**中图分类号:** P228 **文献标识码:** A

国内外学者在三维水汽层析方面已经开展大量研究工作<sup>[1-3]</sup>,但是已有成果大多基于 GPS 观测数据。多卫星系统组合可以增加可见卫星数,改善卫星的空间几何分布,从而提高层析方法探测水汽的能力。本文基于香港卫星定位参考站网(Hong Kong satellite positioning reference station network,SatRef)的 GPS/GLONASS 观测数据研究多系统组合对对流层水汽层析结果的影响。

## 1 地基 GNSS 水汽层析

### 1.1 斜路径对流层湿延迟估计

对流层为非色散介质,因此对流层延迟不能像电离层延迟那样通过双频观测值的组合进行消除,在精密定位中通常将其作为未知参数同其他参数一并求解。实际参数估计过程中,将每个测站的天顶延迟作为一个未知参数进行估计,再通过投影函数投影到信号路径方向上。对流层延迟模型如下:

$$T = \Delta L_z^d M_d + \Delta L_z^w M_w + \Delta L_{\text{gradient}} \quad (1)$$

式中, $T$  表示信号路径方向的对流层总延迟, $\Delta L_z^d$  和  $\Delta L_z^w$  分别表示测站天顶对流层干、湿延迟, $M_d$  和  $M_w$  分别是对流层干、湿延迟投影函数, $\Delta L_{\text{gradient}}$  表示水平梯度。相比相对定位,精密单点定位技术(precise point positioning,PPP)可以直接获取单个测站天顶方向的绝对湿延迟,且数据处理简单。鉴于此,本文采用 GPS/GLONASS 组合精密单点定位方法估计对流层延迟参数<sup>[4]</sup>。

### 1.2 水汽层析原理

通过将 GNSS 地面网上空的对流层在水平

和垂直方向上离散化成网格,并假设每个独立网格内的水汽密度值在一定的时间内为常量,根据斜路径方向上的水汽量(slant water vapor, SWV)等于 GNSS 信号经过的所有网格水汽含量之和<sup>[1]</sup>,得到层析的观测方程为:

$$\text{SWV}^p = \sum_{ijk} l_{i,j,k}^p \rho_{i,j,k} \quad (2)$$

式中,SWV 由 GNSS 数据处理结合水汽转化因子  $\Pi$  获得, $i,j,k$  分别表示纬度、经度和高程方向划分的网格编号, $l_{i,j,k}^p$  表示信号  $p$  所穿越第  $(i,j,k)$  网格的距离, $\rho_{i,j,k}$  表示相应网格的水汽密度。

实际上,由于卫星的几何分布、地面网测站的空间分布及层析时间分辨率的限制,总会有某些网格当中没有信号穿过,导致层析方程病态不适应。可以通过加入水平约束、垂直约束<sup>[1]</sup>使用奇异值分解(singular value decomposition,SVD)方法<sup>[5]</sup>求解层析方程。这种非迭代解法虽然对层析初值不敏感,但是层析结果的精度较差。而迭代法虽然要求精度较高的初值,但迭代后结果的精度更高。考虑到迭代法与非迭代法各自的优缺点,本文联合使用非迭代与迭代算法进行层析实验,将 SVD 分解的结果作为乘法代数重构算法(multiplicative algebraic reconstruction technique,MART)<sup>[6]</sup>的初值。

## 2 实验与结果分析

使用香港卫星定位参考站网(SatRef)15 个测站 2014 年年积日 152、182、213、244、274、305 d 的观测数据。数据采样率 30 s,卫星截止高度角

设为 $10^{\circ}$ 。由于水汽主要分布在近地表 $10\text{ km}$ 以下,因此水汽层析高度设为距地表 $10\text{ km}$ ,每 $500\text{ m}$ 划分为一层。水平网格的划分方案为:纬度范围 $22.2^{\circ}\sim 22.6^{\circ}\text{N}$ ,间隔为 $0.08^{\circ}$ ,共划分为5个网格;经度范围 $113.85^{\circ}\sim 114.36^{\circ}\text{E}$ ,间隔为 $0.085^{\circ}$ ,共划分为6个网格。层析时间窗口取值 $30\text{ min}$ ,精密单点定位解算使用的是欧空局(ESA)发布的精密卫星轨道和钟差数据,天顶延迟模型采用Saastamonien模型,投影函数使用GMF投影函数<sup>[7]</sup>,转换因子 $\Pi$ 直接使用GPT2w模型<sup>[8]</sup>计算。利用探空数据结果来验证GNSS反演结果,其中探空数据使用的是美国怀俄明大学(UW)在线提供的香港京士柏探空站的探空数据,层析垂直约束取实验前3 d探空水汽均值。层析水平格网划分如图1所示。

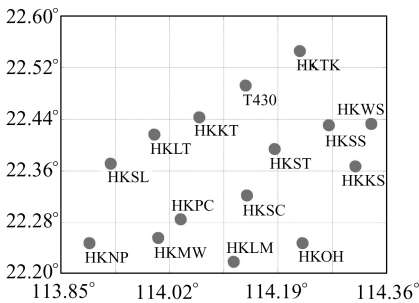


图1 香港卫星定位参考站网三维层析水平格网划分示意图

Fig.1 The division of horizontal voxels of SatRef for water vapor tomography

使用中南大学开发的精密单点定位处理软件<sup>[9]</sup>MIPS-PPP解算天顶对流层延迟(zenith total delay, ZTD)。为验证MIPS-PPP软件估计ZTD的可靠性,使用MIPS-PPP软件求解各天BJFS站的天顶对流层延迟参数,并与IGS分析中心提供的对流层产品进行比较。实验设定位置解的三维坐标均收敛到 $10\text{ cm}$ 以内时认为坐标解已收敛,并开始统计ZTD。MIPS-PPP和IGS的ZTD产品之间的偏差均值及标准偏离(STD)见表1。由表1可知,MIPS-PPP软件解算的ZTD产品与IGS分析中心产品的平均偏差在 $2\text{ cm}$ 左右,偏差的STD小于 $1\text{ cm}$ ,满足层析实验要求。

限于篇幅,图2只给出了2014年年积日152 d(GPS时 $06:00\sim 19:00$ )GPS系统和GPS/GLONASS组合系统在层析窗口 $30\text{ min}$ 内穿过格网的合格信号总数和对应层析时间窗口有信号穿越的网格总数。实验中,部分GLONASS卫星信号不理想,在数据处理时剔除。可以看出,在组合系统下,相同的层析时间窗口观测获得的信号数量明显增多。在GPS单系统和GPS/GLO-

NASS组合系统下有信号穿越的网格数量明显增加,特别是在某些时段,如图2(b)中 $13:30\sim 14:00$ 有信号穿越的网格数量由459个增加到508个,信号穿过更多的网格可以增加这些网格层析结果的精度和可靠性。

表1 MIPS-PPP软件解算ZTD与IGS ZTD产品的统计结果

Tab.1 Statistic results of ZTD between MIPS-PPP and IGS products		
年积日	均值 /mm	标准偏离 / mm
152	9.7	8.6
182	17.4	9.1
213	9.5	7.3
244	21.5	7.4
274	23.2	7.8
305	19.0	6.1

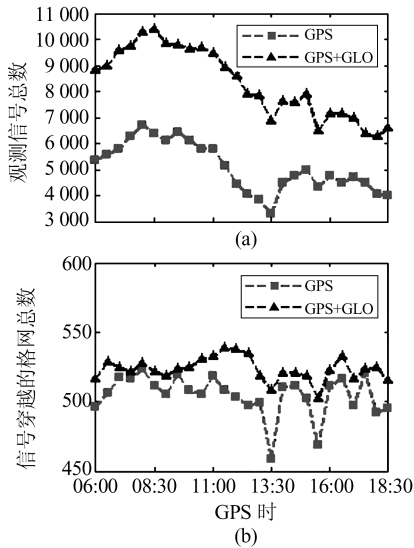


图2 2014年年积日152 d(GPS时 $06:00\sim 19:00$ )层析窗口合格信号总数和有信号穿越网格数量

Fig.2 Number of qualified rays and voxels crossed by rays on June 1, 2014(GPST  $06:00\sim 19:00$ )

图3给出了2014年年积日152、182、213、244、274、305 d GPS时 $12:00\sim 12:30$  GPS单系统层析廓线、GPS/GLONASS组合系统层析廓线和探空廓线的对比。可以看出,三者变化趋势较为一致。但相比于GPS单系统,组合系统大多数情况下在探空站附近内插的廓线与探空廓线符合得更好,如图3(c)在高程 $7\text{ km}$ 位置处,GPS单系统结果与探空数据结果存在较大偏差,但组合系统在此处与探空数据符合较好,说明组合系统结果更加稳定可靠。在低高度处GNSS层析解较探空数据的偏差较大,其原因在于探空数据的时间分辨率低、GNSS反演水汽的精度限制以及水汽密度值在低高度处变化较大。

为评价组合系统对于层析水汽三维分布整体精度的影响,层析计算中首先去掉HKSC站的观

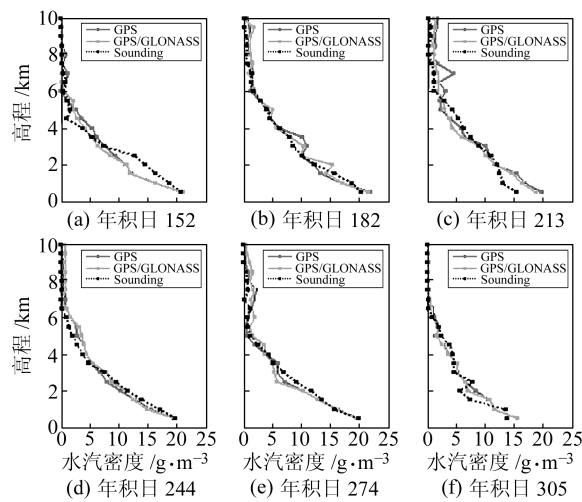


图 3 GPS 单系统和 GPS/GLONASS 组合系统层析廓线和探空廓线的对比

Fig. 3 Water vapor density profile derived from GPS, combined system and radiosonde

测数据,将该站数据处理获得的斜路径水汽含量(SWV)作为参考值进行层析解的检核。利用 HKSC 站观测的信号在各个网格中的截距,运用式(3)求解 SWV,并与参考值 SWV 比较。表 2 统计了 GPS 单系统和 GPS/GLONASS 组合系统层析解计算的 SWV 与参考值偏差的标准偏离值。可以看出,除年积日 244 d 外,组合系统偏差的 STD 值较 GPS 单系统均有明显减小,平均改善率为 36%。

表 2 层析时段天气状况及层析结果与 PPP 结果偏差的 STD

Tab. 2 Weather condition, STD of tomographic results and PPP-derived results during experiment

年积日	天气	风向	风力	GPS/ mm	GPS/GLONASS /mm
152	多云	微风	小于 3 级	2.2	1.5
182	多云	东风	微风	1.3	1.1
213	多云	微风	小于 3 级	4.2	1.0
244	阵雨	微风	小于 3 级	0.3	1.2
274	阵雨	微风	小于 3 级	1.4	0.9
305	多云	微风	小于 3 级	1.5	1.2

图 4 给出了 2014 年年积日 152 d GPS 时 12:00~12:30 GPS 单系统和组合系统层析获得的三维水汽分布图。由于水汽密度随着高度的增加而减小,且在高层区域分布比较均匀,因此图中只给出了 5 km 以下的水汽分布。可以看出,在近地表 3 km 以下水汽密度变化较大,GPS 单系统和组合系统的层析水汽分布结果在高程方向上均能反映出水汽随高度的递减变化,而在 2 km 处 GPS 单系统和组合系统层析获得的水汽分布存在较大偏差。从前面的分析可知,GPS/GLONASS 组合系统具有更好的精度与可靠性,由此可以判断图 4(b)更能反映水汽的实际分布状况。

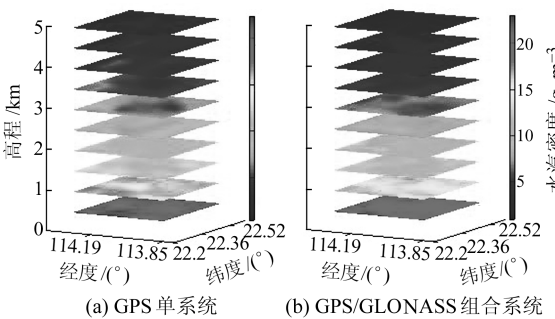


图 4 2014 年年积日 152 d GPS 时 12:00~12:30 GPS 单系统和组合系统层析三维水汽分布

Fig. 4 Comparison between GPS-only and integrated GPS/GLONASS 3-D tomographic water vapor distribution on June 1, 2014(GPST 12:00-12:30)

3 结 语

多 GNSS 系统组合会明显增加层析信号的数量,改善信号在层析区域的空间几何分布。本文基于香港卫星定位参考站网 15 个测站 2014 年共 6 d 的 GNSS 观测数据进行对流层三维水汽层析实验。结果表明,较 GPS 单系统,GPS/GLO-NASS 组合系统层析窗口中合格信号数量和有信号穿越的网格数量均有明显增加;通过探空数据的检验,层析结果与探空结果符合较好,但组合系统的结果更加稳定、可靠;GPS 单系统和组合系统的层析水汽分布结果在高程方向上均能反映出水汽随高度的递减变化,组合系统可以明显提高层析水汽整体的分布精度,平均改善率为 36%。

参考文献

[1] Flores A, Ruffini G, Rius A. 4D Tropospheric Tomography Using GPS Slant Wet Delays[J]. Annales Geophysicae, 2000, 18(2): 223-234

[2] 宋淑丽. 地基 GPS 网对水汽三维分布的监测及其在气象学中的应用[D]. 上海:中国科学院上海天文台, 2004(Song Shuli. Sensing Three Dimensional Water Vapor Structure with Ground based GPS Network and the Application in Meteorology [D]. Shanghai: Shanghai Astronomical Observatory, CAS, 2004)

[3] 毕研盟, 杨光林, 聂晶. 基于 Kalman 滤波的 GPS 水汽层析方法及其应用[J]. 高原气象, 2011, 30(1): 109-114 (Bi Yanmeng, Yang Guanglin, Nie Jing. Method of GPS Water Vapor Tomography Based on Kalman Filter and Its Application[J]. Plateau Meteorology, 2011, 30(1): 109-114)

[4] 蔡昌盛, 夏朋飞, 史俊波, 等. 利用 GPS/GLONASS 组合精密单点定位方法估计天顶对流层延迟[J]. 大地测量与地球动力学, 2013(2): 54-57 (Cai Changsheng, Xia Pengfei, Shi Junbo, et al. Estimation of Zenith Tropospheric Delay Using Combined GPS/GLONASS PPP Method[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2013(2): 54-57)