



基于多系统的GNSS三维水汽层析质量评价方法

高枫林, 丁楠, 张克非, 张书毕, 张文渊, 闫香蓉

A quality evaluation method of 3D water vapor tomography based on multi-GNSS observations

GAO Fenglin, DING Nan, ZHANG Kefei, ZHANG Shubi, ZHANG Wenyuan, and YAN Xiangrong

引用本文:

高枫林, 丁楠, 张克非, 等. 基于多系统的GNSS三维水汽层析质量评价方法[J]. *全球定位系统*, 2024, 49(3): 107–114. DOI: [10.12265/j.gnss.2024004](https://doi.org/10.12265/j.gnss.2024004)

GAO Fenglin, DING Nan, ZHANG Kefei, et al. A quality evaluation method of 3D water vapor tomography based on multi-GNSS observations[J]. *Gnss World of China*, 2024, 49(3): 107–114. DOI: [10.12265/j.gnss.2024004](https://doi.org/10.12265/j.gnss.2024004)

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12265/j.gnss.2024004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

非均匀分层对GNSS水汽三维层析的影响

Effect of non-uniform layering on 3D water vapor chromatography of GNSS

全球定位系统. 2019, 44(2): 46–53

基于北斗三号的大气水汽探测性能初步分析

Preliminary analysis of atmospheric water vapor detection performance based on BDS-3

全球定位系统. 2021, 46(1): 89–97, 111

基于重庆CORS的水汽电离层实时监测方法研究及平台构建

Research on real-time monitoring method of water vapor ionosphere and platform construction based on Chongqing CORS

全球定位系统. 2019, 44(4): 89–95

基于超快速星历进行实时反演大气水汽总量的可行性研究

Study on Feasibility of Real time Retrieval of Precipitable Water Vapor Based on Ultra-rapid Ephemeris

全球定位系统. 2018, 43(1): 54–59

基于BDS精密星历产品的水汽探测性能分析

Performance analysis of water vapor detection based on BeiDou precise ephemeris products

全球定位系统. 2019, 44(5): 91–99

不同饱和水汽压模型对GNSS反演可降水量的影响分析

Analysis of influence of different saturated water vapor pressure models on GNSS inversion precipitable water

全球定位系统. 2020, 45(6): 55–63



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.12265/j.gnss.2024004

基于多系统的 GNSS 三维水汽层析质量评价方法

高枫林¹, 丁楠¹, 张克非², 张书毕², 张文渊², 闫香蓉³

(1. 江苏师范大学地理测绘与城乡规划学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学环境与测绘学院, 江苏 徐州 221116;
3. 兰州交通大学测绘与地理信息学院, 兰州 730070)

摘要: 本文基于提出的水汽层析廓线评价指标 (tomographic profic fit score, TPFS), 首次对 GPS、北斗卫星导航系统 (BeiDou Navigation Satellite System, BDS)、GLONASS 和 Galileo 4 个系统的水汽层析结果进行了精度评估。结果表明: 各 GNSS 水汽层析解算结果差异较小, 最大均方根误差 (root-mean-square error, RMSE) 差距在 11% 之内, 其中 BDS 水汽层析表现最好, GLONASS 水汽层析表现最差。相较于 GPS、GLONASS、Galileo, BDS 在低层区域 (2 406 m 以下) 具有更好的层析解算优势。尤其在底层, BDS 与 GPS、GLONASS、Galileo 的 RMSE 相比分别改进了 3.2%、16.2%、5.2%。此外, 在层析水汽廓线 TPFS 对比中, BDS 平均 TPFS 最小; 在暴雨天气下 BDS 水汽廓线 TPFS 最低, 相较于 GPS、GLONASS、Galileo 改进了 25.2%、31.5%、32.8%。

关键词: 大气水汽; GNSS; 水汽层析; 质量评价; 代数重构

中图分类号: P228.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1008-9268(2024)03-0107-08

0 引言

水汽作为地球大气圈中最重要的气体之一, 对平衡大气能量、调节气候等方面起着至关重要的作用。因此, 精确探测水汽信息对气象预测、环境监测、生态保护等具有重要的应用价值。当前卫星导航领域正处于快速发展的阶段, 自从我国建成北斗三号 (BeiDou-3 Navigation Satellite System, BDS-3) 以来, 以 GPS、北斗卫星导航系统 (BeiDou Navigation Satellite System, BDS)、GLONASS、Galileo 为主的 GNSS 为实现高精度大气水汽探测奠定了重要的基础。

目前, 已有不少学者利用 GPS、BDS、GLONASS 和 Galileo 观测数据估计对流层天顶延迟 (zenith total delay, ZTD) 并将反演得到的大气可降水量 (precipitable water vapor, PWV) 进行对比, 评估 GNSS 水汽探测精度和可靠性^[1-3]。通过 GNSS 数据得到的斜路径湿延迟 (slant wet delay, SWD) 产品可以进行层析处理获取水汽廓线信息, 有助于进一步提高天气预报和气象研究的准确性^[4]。Crespi 等^[5]首次使用 GPS、GLONASS 和 Galileo 观测数据进行对流层水汽层析实验。夏朋飞等^[6]利用精密单点定位 (precise point

positioning, PPP) 技术反演水汽三维信息, 比较了仅 GPS、GLONASS 在水汽层析过程中信号穿刺网络的个数。侯建辉^[7]利用 Kalman 滤波算法对济南区域进行水汽三维层析实验, 分析了单 GPS 和单 BDS 模式下层析结果精度, 包括标准差 (standard deviation, STD)、平均绝对误差 (mean absolute error, MAE)、均方根误差 (root mean squared error, RMSE) 和相关系数。Wang 等^[8]使用 GPS 和 BDS 观测数据进行水汽层析研究, 发现仅使用 BDS 数据即可获得高精度的层析结果。Zhao 等^[9]利用贵州区域 6 个站点 7 天观测数据进行 PPP 处理, 比较了单 GPS、BDS 和 GLONASS 模式下 SWD 数量和层析结果的 RMSE 和相对误差 (relative error, RE)。

STD、MAE、RMSE、RE、相关系数等指标是传统 GNSS 水汽层析领域常用的评价指标。其中, STD 用于评估层析结果的离散程度; MAE 用于衡量层析值与探空真值之间的绝对差异; RMSE 用于衡量层析值与探空真值之间的平均误差大小; RE 反映层析值与探空真值之间的相对差异, 相关系数用来评估层析值与探空真值的一致性。MAE 对较大误差和较小误差给予了相同的权重, 不能全面评估参数变化较大

收稿日期: 2024-01-09

资助项目: 国家自然科学基金项目 (41730109; 41904013)

通信作者: 丁楠 E-mail: metdingnan@163.com

的 GNSS 水汽层析; STD 和 RMSE 对异常值敏感, 当存在极端值或异常值将影响层析结果的评估; 相关系数只能衡量线性关系, 对于非线性关系需要其他指标进行评估. 此外, RMSE 只能反映水汽层析结果的平均误差, 且由于采集点过少, 无法直观地对整体水汽廓线进行评价. 因此, 本文提出了一个层析廓线评价指标 (tomographic profile fit score, TPFS) 用于评价层析水汽廓线与探空廓线的贴合程度, 基于 GAMIT/GLOBK10.71 软件对香港地区 10 个连续运行参考站 (continuously operating reference stations, CORS) 2022 年 7 月份共 31 天的 GPS、BDS、GLONASS 和 Galileo 数据进行处理, 分别将 4 个系统解算得到的 SWD 作为观测值进行层析实验, 验证各 GNSS 的水汽层析精度.

1 GNSS 水汽层析原理

1.1 GNSS 水汽层析模型

图 1 所示为基于体素块参数化的水汽层析模型图, 也是目前常用的层析区域模型化方法, 它将卫星信号的 SWD 作为观测值, 建立 SWD 与未知水汽参数、信号分段湿延迟路径之间的函数关系, 从而反演出水汽的三维分布信息^[10].

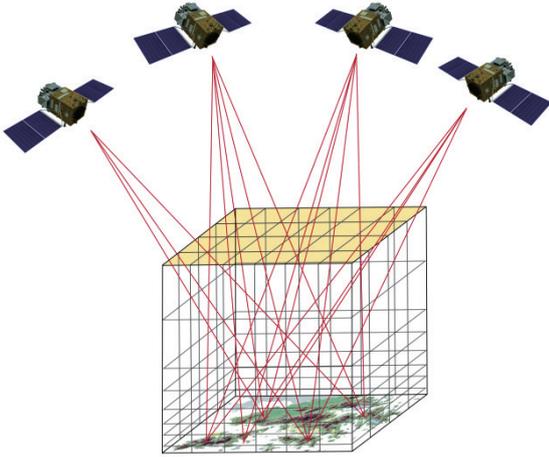


图 1 基于体素块参数化的 GNSS 层析模型图

假设每个体素块中的水汽分布均匀且在一段时间内水汽密度恒定, 将各个体素块内的水汽密度作为未知参数进行求解, 根据信号经过各个体素块内的截距长度, 列出层析观测方程

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \text{SWD}_1 \\ \text{SWD}_2 \\ \vdots \\ \text{SWD}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \mathbf{A}\mathbf{x} \quad (1)$$

式中: SWD_m 为第 m 条信号的斜路径水汽含量; \mathbf{B} 为 SWD 观测值向量; a_{mn} 为第 m 条信号经过编号 n 的体素块内的截距长度; x_n 为第 n 个体素块内的水汽密度; \mathbf{A} 为系数矩阵, 由信号射线穿过各个体素块的截距构成.

1.2 GNSS 水汽层析约束条件

由于网格划分方法的局限性, 部分体素块没有卫星信号穿过, 使得观测方程出现不适定性^[11]. 为了解释稀疏观测方程系数矩阵问题, 求解出对应无信号穿过体素块内的水汽参数, 需要增加约束方程. 本文附加了水平约束、垂直约束和顶层约束条件. 在水平方向上采用高斯加权函数方法确定水平约束矩阵的权系数值^[12]; 考虑到大气水汽垂直分布特征, 在垂直方向上采用自适应非均匀指数分层方法^[13]; 对于顶层体素网格, 将水汽密度等于 0.1 g/m^3 的高度作为顶层. 根据观测方程与约束方程即可构成 GNSS 层析方程组

$$\begin{cases} \mathbf{A}_{\text{GNSS}} \cdot \mathbf{X} = \mathbf{B} \\ \mathbf{A}_W \cdot \mathbf{X} = 0 \\ \mathbf{A}_V \cdot \mathbf{X} = 0 \\ \mathbf{A}_H \cdot \mathbf{X} = \mathbf{H}_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, \mathbf{A}_{GNSS} 、 \mathbf{A}_W 、 \mathbf{A}_V 、 \mathbf{A}_H 分别为观测值系数矩阵、水平约束系数矩阵、垂直约束系数矩阵和顶层约束系数矩阵; \mathbf{X} 为水汽密度向量; \mathbf{B} 、 \mathbf{H}_0 分别为 SWV 观测值向量和顶层约束观测值向量.

1.3 GNSS 水汽层析方程组解算

常用的解算 GNSS 水汽层析方程组的方法主要有奇异值分解法 (singular value decomposition, SVD)^[14]、Kalman 算法^[15]、代数重构法 (algebraic reconstruction technique, ART)^[16] 等. 相较于 SVD 和 Kalman 滤波, ART 算法在处理非线性、非高斯分布数据时有更好的鲁棒性, 且具有较强的自适应学习能力和抗噪声干扰能力^[17-19], 可以根据输入数据的特征进行动态调整和优化. 王维等^[20] 验证了 ART 算法应用于对流层水汽层析的可行性, 证实 ART 算法迭代收敛速度较快, 能够获得可靠的层析结果. 因此, 本文采用 ART 算法对层析方程组进行解算.

ART 算法的基本思想是通过迭代的方式逐个计算每条 GNSS 信号的层析重构值与观测值的差值, 修正待求水汽参数, 直到满足一定的收敛条件终止迭代, 获得最终解. 其算法公式为

$$x^{k+1} = x^k + \lambda \frac{a_{i,j}}{\sum_{j=1}^n a_{i,j}^2} (\text{SWD}_i - \sum_{j=1}^n a_{i,j} x_j^k) \quad (3)$$

式中: x_j^k 为第 k 次迭代时第 j 个体素块内水汽密度; λ 为松弛因子; a_{ij} 为系数矩阵 A 第 i 行、第 j 列的元素; SWD_i 为观测值向量第 i 行的元素。

2 层析廓线评价指标

传统的 GNSS 水汽层析评价指标主要有 STD、MAE、RMSE、相关系数等。STD 只能反映数据的波动程度,不能反映其分布形状;MAE 将较大误差和较小误差赋予了同样的权重,不能很好地评价水汽层析效果;STD 和 RMSE 对异常值极端值或异常值较为敏感从而影响层析结果的评估;相关系数只能衡量线性关系,对于非线性关系需要其他评价指标。

因此,本文提出了一个评价指标 TPFS 用于衡量层析水汽廓线与探空廓线的贴合程度。层析廓线评价指标 TPFS 通过分别对离散的探空数据和层析反演数据进行非线性拟合以获得任意高度处的水汽密度值,基于高密度采集拟合后同一高度处的探空水汽密度参考值 X_{RS} 和层析水汽密度值 X ,两者差值即为 $X_{RS}-X$ 。由于水汽绝大部分集中在低层,高度 2 km 以下涵盖了对流层约一半的水汽^[21],低层与高层之间的水汽变化存在显著差异,因此对不同高度层的水汽密度差值进行加权可以更加准确地反映层析能力。所以层析廓线评价指标 TPFS 表示为

$$TPFS = w_1 \sqrt{\sum_{i=1}^{n_1} (X_{RS1}^i - X^i)^2} + w_2 \sqrt{\sum_{i=1}^{n_2} (X_{RS2}^i - X^i)^2} + \dots + w_k \sqrt{\sum_{i=1}^{n_k} (X_{RSk}^i - X^i)^2} \quad (4)$$

式中: $w_j(j=1,2,\dots,k)$ 为水汽廓线权重因子,表示第 j 层水汽含量占总水汽含量的比值; $n_j(j=1,2,\dots,k)$ 为第 j 层采集拟合后水汽密度差值的数量; X_{RSj}^i 、 $X_j^i(i=1,2,\dots,n_j; j=1,2,\dots,k)$ 分别为第 j 个高度层内第 i 个探空水汽密度参考值和层析水汽密度值。

由于单位面积水汽柱内 1 mm 的大气可降水量 (precipitable water vapor, PWV) 等价于 1 kg 水的质量,即 1 mm 的 PWV 相当于 1 000 g 的水汽在单位面积水汽柱中凝结成水^[22],因此 PWV 与每层水汽含量的关系可以表示为

$$H_1 \times \rho_1 + H_2 \times \rho_2 + \dots + H_k \times \rho_k = PWV \times 1000 \quad (5)$$

式中: $H_j(j=1,2,\dots,k)$ 为单位面积水汽柱第 j 层的高度,单位为 m; $\rho_j(j=1,2,\dots,k)$ 为第 j 个高度层对应的水汽密度,单位为 g/m^3 ; 则 $H_j \times \rho_j(j=1,2,\dots,k)$ 即为第 j 个

高度层对应的水汽含量。所以第 j 层水汽廓线权重因子 w_j 表示为

$$w_j = \frac{H_j \times \rho_j}{H_1 \times \rho_1 + H_2 \times \rho_2 + \dots + H_k \times \rho_k} \times 100\% \quad (6)$$

式中, $H_j(j=1,2,\dots,k)$ 、 $\rho_j(j=1,2,\dots,k)$ 含义与式 (5) 相同。相比于 RMSE 只能反映水汽层析结果的平均误差且采集点过少,TPFS 能够更加准确、综合地对整体水汽廓线进行评价,TPFS 值越小说明反演后的水汽廓线与探空廓线的贴合程度越高。

3 层析实验

3.1 实验区域

测站密度对水汽层析结果具有重要影响,测站数量的增多有助于提高层析解算结果^[23]。为了更加明显地对比各 GNSS 水汽层析结果,本文选用香港卫星定位参考站网 (Satellite Positioning Reference Station Network, SatRef) 其中分布较为均匀的 10 个测站 2022 年 7 月共 31 天年积日第 182—212 的观测数据。测站位置如图 2 所示,黄色实心圆表示 10 个香港 CORS 站的位置,红色实心五角形表示京士柏探空气象站的位置。京士柏探空气象站提供每日两次 (UTC 0 时和 UTC 12 时) 探空数据,该数据具有极高的垂直分辨率和精度,作为本实验的参考真值对层析反演数据进行验证与分析。

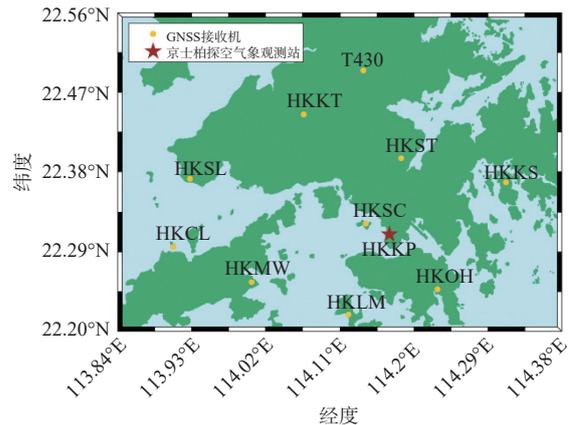


图 2 香港区域参考站和探空站位置分布图

3.2 实验方案

本文使用 GAMIT10.71 对香港 10 个 CORS 站的 GNSS 观测数据进行解算,从而获取层析观测值。为了减少信号弯曲对层析结果的影响,将卫星截止高度角设置为 10° ;映射函数模型设置为 VMF1;由于测站之间的距离较近,需要同时引入 3 个及以上的长基线外网国际 GNSS 服务 (International GNSS Service,

IGS) 辅助站进行联合解算以削弱参数估计的相关性, 本实验引入的外网辅助站为 GAMG、KITG 和 SIN1。

实验区域的纬度范围为 22.20°N~22.56°N, 经度范围为 113.84°E~114.38°E, 考虑所划分的水平网格数量和位于底层的香港 CORS 站的覆盖率, 纬度方向每隔 0.09°划分成 4 个网格, 经度方向每隔 0.09°划分成 6 个网格, 共划分了 4×6 个格网区域。本实验以水汽密度等于 0.1 g/m³ 的高度作为层顶, 层析垂直范围为地面至 10 473 m, 垂直方向采用非均匀指数分层方法划分了 10 层, 各层高度分别为 350 m、350 m、

350 m、374 m、442 m、540 m、694 m、973 m、1 641 m、4 759 m。

本文基于 ART 算法进行水汽参数解算, 选取各层析时段前 3 个 UTC 时刻体素块中心插值处的水汽密度均值作为水汽层析 ART 算法的迭代初值。Yang 等^[24] 以香港为研究区域, 研究了层析时间窗口和采样率对水汽层析结果的影响, 建议将层析时间窗口设置为 10 min, 采样速率设置为 300 s, 本文采用该方案进行层析实验。图 3 为 2022 年 7 月 1 日 UTC 0 时层析窗口宽度 10 min 内所穿过层析区域的 GPS/BDS/GLONASS/Galileo 斜路径湿延迟。

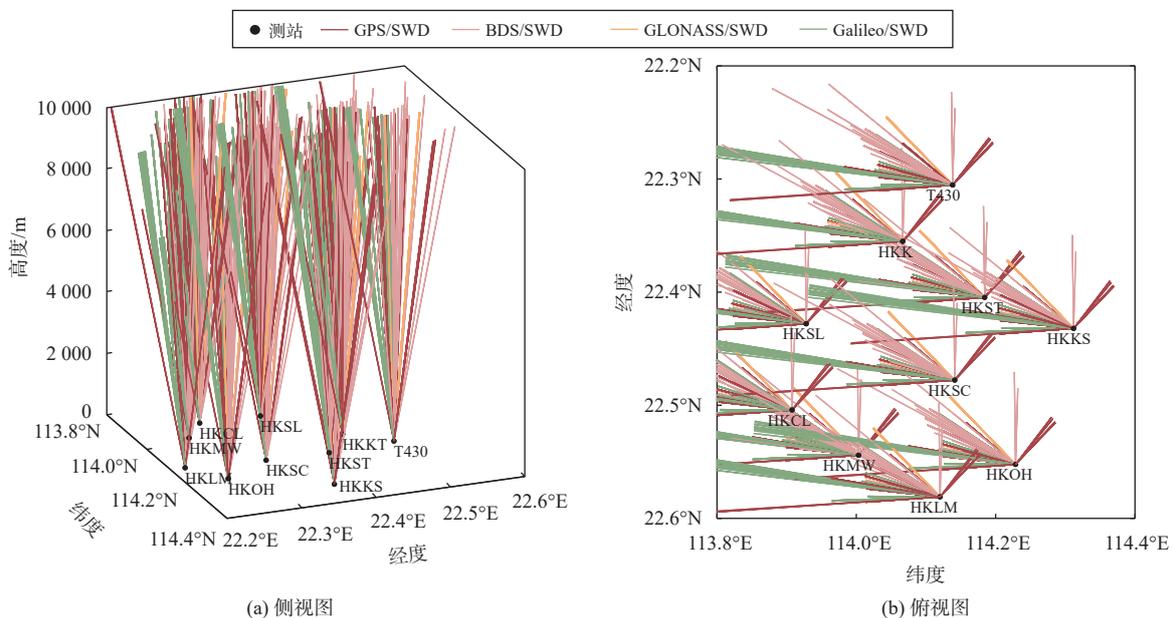


图 3 10 min 窗口穿过层析区域的 GPS/BDS/GLONASS/Galileo 斜路径湿延迟

4 结果分析

4.1 信号分布比较

表 1 显示了实验期间每天各 GNSS 平均卫星信号数量和平均信号覆盖率, 其中信号覆盖率是指卫星信号穿刺体素块数量占总体素块数量的百分比。从统计结果可以得出, GPS 的信号数量最多, 是 GLONASS 的近 2 倍, BDS 和 Galileo 平均信号数量接近, 但是 4 个卫星系统信号穿过的体素块覆盖率差异并不明

表 1 各 GNSS 系统平均信号数量与穿过体素块的平均覆盖率

系统	平均信号数量	平均覆盖率/%
GPS	211	71.6
BDS	156	61.2
GLONASS	116	64.8
Galileo	159	66.0

显。由此可见, 信号覆盖率的大小不仅取决于卫星信号数量, 还取决于信号几何分布, 这也说明这 4 个卫星系统的信号分布区间是极为相似的。

4.2 层析每日解分析

图 4 为实验时段内各 GNSS 层析解算结果的 MAE 和 RMSE 时间序列对比图。从图 4 可以看出, 在探空站位置使用不同 GNSS 观测数据的层析结果是相似的, MAE 和 RMSE 精度相差不大。各 GNSS MAE 最大值均出现在年积日 184 处, 最小值均出现在年积日 204 处; 各 GNSS RMSE 最大值均出现在年积日 200 处, 最小值均出现在年积日 204 处。当月 BDS 数据有 38.7% 的试验 MAE 小于其他 3 个系统, 有 45.2% 的试验 RMSE 小于其他 3 个系统; Galileo 数据有 32.3% 的试验 MAE 小于其他 3 个系统, 有 32.2% 的试验 RMSE 小于其他 3 个系统; GPS 有 29% 的试验 MAE 小于其他 3 个系统, 有 22.6% 的试

验 RMSE 小于其他 3 个系统. 故在层析每日解精度对比中 BDS 略优于其他 3 个系统.

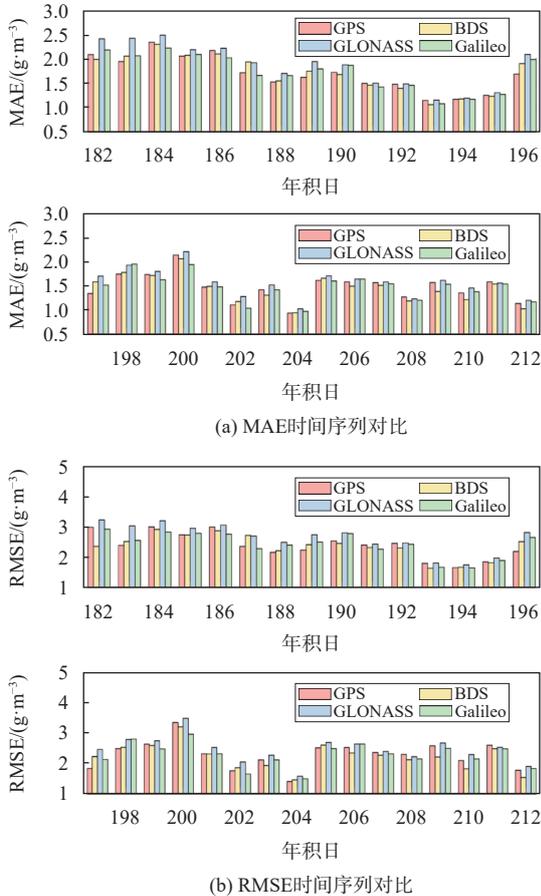


图 4 各 GNSS 层析结果 MAE 和 RMSE 时间序列对比图

表 2 给出了实验阶段各 GNSS 层析结果的平均 RMSE 和平均 MAE. 由表 2 可得, BDS 相较于其他三个系统均具有更低值, 说明 BDS 数据整体解算精度高于其他 3 个系统. 但总体来看, 各 GNSS 的水汽层析解算精度差异较小, 最大 RMSE 差距在 11% 以内, 最大 MAE 差距在 9% 以内.

表 2 各 GNSS 层析结果与探空数据对比的平均 RMSE 和平均 MAE $g \cdot m^{-3}$

系统	RMSE	MAE
GPS	2.316	1.574
BDS	2.271	1.565
GLONASS	2.517	1.699
Galileo	2.331	1.590

4.3 不同高度层析结果分析

图 5 给出了实验期间各 GNSS 在不同高度层与探空数据对比的平均 RMSE. 从图 5 中可看出, 各

GNSS RMSE 从低层到高层均呈现先增大后减小并趋近于 0 的变化规律. 各 GNSS 在低层 1~6 层 (2 406 m 以下) 解算精度相对较差, 其中 BDS 数据在低层的 RMSE 值均低于其他 3 个系统, 说明 BDS 相比其他 3 个系统在低层区域层析解算中更具有优势. 尤其是在底层, BDS 与 GPS、GLONASS、Galileo 的 RMSE 相比分别得到了 3.2%、16.2%、5.2% 的改进. 在第 7 层 (2 406~3 100 m) Galileo 的 RMSE 精度最高, 相较于 GPS、BDS 和 GLONASS 的 RMSE 精度分别提高了 1.2%、2.9%、7.5%. 在第 8~10 层 (3 100 m 以上) GPS 的 RMSE 值均低于其他 3 个系统, 即在高层 GPS 解算精度优于其他 3 个系统, 相较于 BDS、GLONASS 和 Galileo 平均 RMSE 精度分别提高了 5.2%、5.7% 和 2.2%. 由于高层水汽参数值本身就很小, 所以各 GNSS 层析结果的 RMSE 差距不可能很大, 说明 BDS 在低层水汽含量大的区域 (3 000 m 以下) 有优秀的表现, 而在高层虽然不如 GPS, 但是两者 RMSE 差异很小.

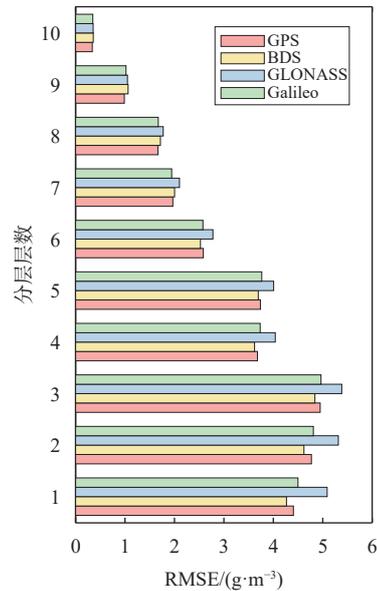


图 5 各 GNSS 在不同高度层与探空数据对比的平均 RMSE

4.4 水汽廓线 TPFS 分析

本实验基于 100 m 高度分辨率采集探空水汽密度参考值和层析水汽密度值, 选取 2021 年 7 月份不同高度层水汽含量占比的均值作为 TPFS 的权重因子, 不同高度层的高度与层析模型垂直分层高度一致, 从低层到高层 TPFS 权重因子分别为 15.22%、13.13%、11.34%、10.36%、10.18%、9.94%、9.58%、9.01%、7.8%、3.44%. 图 6 为实验时段内各 GNSS 层析水汽廓线 TPFS 时间序列对比图. 各 GNSS TPFS

最小值均在年积日 207 处, 最大值均在年积日 200 处. 当月 BDS 数据有 45.2% 的试验 TPFS 小于其他 3 个系统, Galileo 数据有 29% 的试验 TPFS 小于其他 3 个系统, GPS 有 25.8% 的试验 TPFS 小于其他 3 个系统. 故在每日层析水汽廓线 TPFS 对比中 BDS 优于其他 3 个系统.

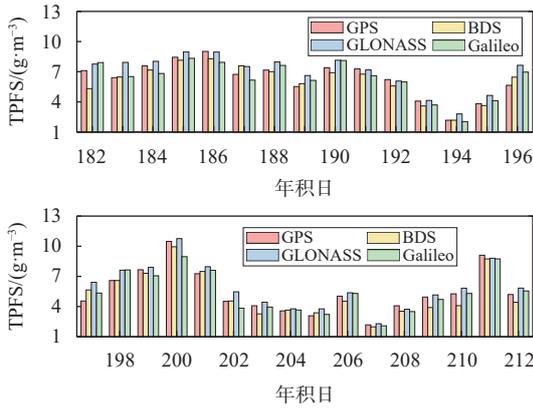


图 6 各 GNSS 层析水汽廓线 TPFS 时间序列对比图

总体来说, 层析每日 TPFS 与 RMSE 变化基本保持一致, 有个别天 (年积日 188、201、205、208、211) 两个指标结果存在差异. 存在差异的这几天各 GNSS 的 RMSE 值非常接近, 而 TPFS 考虑到低层与高层之间的水汽变化存在显著差异, 对不同高度层的水汽密度差值进行加权, 因此 TPFS 能够更加准确地反映各 GNSS 水汽层析能力.

表 3 给出了实验阶段各 GNSS 层析水汽廓线平均 TPFS. 由表 3 可得, 与 GPS、GLONASS 和 Galileo 相比, BDS 平均 TPFS 最小. 但总体来看, 各 GNSS

层析水汽廓线 TPFS 差异较小, 最大 TPFS 差距在 15% 以内.

表 3 各 GNSS 系统层析水汽廓线平均 TPFS $g \cdot m^{-3}$

项目	GPS	BDS	GLONASS	Galileo
TPFS	5.878	5.612	6.436	5.854

4.5 不同天气情况分析

对流层水汽含量对降水的形成和分布具有显著影响 [25-26]. 进一步研究对流层水汽含量与降水的关系, 对于理解和预测气候变化、改善水资源管理等具有重要意义.

本文以 2022 年 7 月 1 日 (年积日 182) UTC 0 时和 2022 年 7 月 24 日 (年积日 205) UTC 0 时的层析水汽廓线为例, 结合探空数据进行验证和分析. 其中年积日 182 当天受到强台风暹芭的影响出现狂风骤雨及雷暴, 降雨量超过 100 mm, 属于暴雨天气; 年积日 205 当天天文台气温上升至当月最高温度 36.1°, 是自香港 1884 年有记录以来七月份的最高气温, 属于高温无雨天气.

图 7 展示了不同天气情况下各 GNSS 层析水汽廓线与探空水汽密度的对比情况. 年积日 182 UTC 0 时 GPS、BDS、GLONASS 和 Galileo 的 TPFS 分别为 $7.111 g/m^3$ 、 $5.318 g/m^3$ 、 $7.761 g/m^3$ 、 $7.909 g/m^3$, 其中 BDS 水汽廓线 TPFS 最小, 相较于 GPS、GLONASS、Galileo 得到了 25.2%、31.5%、32.8% 的改进. 年积日 205 UTC 0 时 GPS、BDS、GLONASS 和 Galileo 的 TPFS 分别为 $3.085 g/m^3$ 、 $3.379 g/m^3$ 、 $3.772 g/m^3$ 、 $3.221 g/m^3$, 其中 GPS 水汽廓线 TPFS 最小, 相较

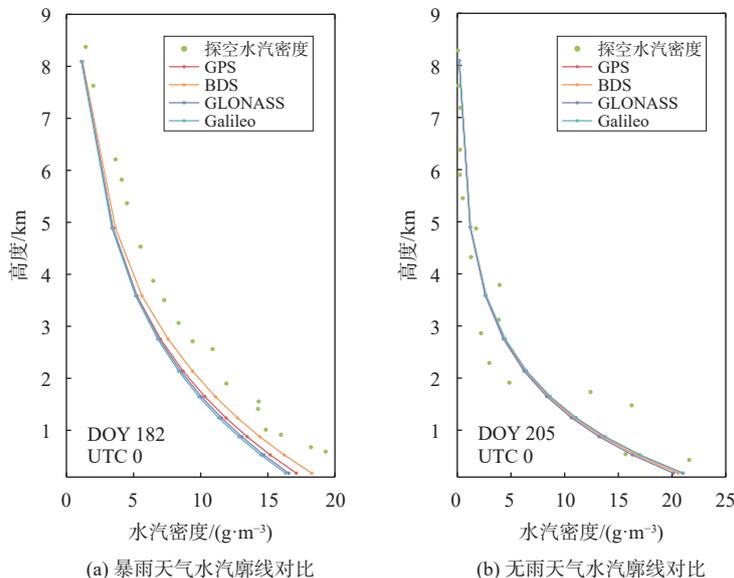


图 7 不同天气情况下各 GNSS 层析水汽廓线与探空水汽密度对比图

BDS、GLONASS、Galileo 得到了 8.7%、18.2%、4.2% 的改进。两个不同天气情况相比,无雨天气下 GPS、BDS、GLONASS 和 Galileo 的 TPFS 均比暴雨天气小,说明水汽不稳定的暴雨天气一定程度上影响了水汽层析的质量。

由于年积日 205 UTC 0 时高温炎热,缺乏降水,导致地表附近的水汽无法凝结成雨滴而保持在大气当中,使得低层水汽密度较高,而随着海拔的升高水汽密度迅速下降,在 2.5 km 以上区域水汽密度由 15 g/m^3 迅速减少至 5 g/m^3 。因此,与年积日 182 UTC 0 时相比,年积日 205 UTC 0 时的水汽廓线更加陡峭。

从图 7 还可以看出,与无雨炎热天气相比,暴雨天气下各 GNSS 水汽廓线分布相对分散。可能是暴雨天气下大气水汽在各高度层发生剧烈的水汽传输运动,导致单位时间内水汽的变化率加快,所以层析结果不如无雨天气稳定。

5 结 语

本文选取了香港地区 10 个 CORS 站 2022 年 7 月份共 31 天的观测数据,基于提出的水汽层析廓线评价指标 TPFS,全面分析和比较了 GPS、BDS、GLONASS 和 Galileo 水汽三维层析结果,并结合探空站数据进行验证和分析,得到以下结论。

1) 实验期间 GPS 平均信号数量最多,GLONASS 平均信号数量最少,BDS 和 Galileo 平均信号数量接近,但是各 GNSS 信号穿过的体素块覆盖率差异并不明显,说明这 4 个卫星系统的信号分布区间极为相似。

2) 各 GNSS 的水汽层析解算精度差异较小,最大 RMSE 差距在 11% 之内,其中 BDS 水汽层析表现最好,GLONASS 水汽层析表现最差。相较于 GPS、GLONASS、Galileo, BDS 在低层区域 (2 406 m 以下) 具有更好的层析解算优势。尤其是在底层, BDS 与 GPS、GLONASS、Galileo 的 RMSE 相比分别得到 3.2%、16.2%、5.2% 的改进。

3) 根据从低层到高层水汽含量逐渐减少、层析能力逐层降低的特征,本文设计的水汽廓线指标 TPFS 相较于传统水汽层析评价指标能够提供更加准确、综合的水汽廓线评估, TPFS 值越小说明反演后的水汽廓线与探空廓线的贴合程度越高。在层析水汽廓线 TPFS 对比中, BDS 平均 TPFS 最小;在暴雨天气下 BDS 水汽廓线 TPFS 最低,相较于 GPS、GLONASS、Galileo 得到了 25.2%、31.5%、32.8% 的改进。

由于本文仅选取一个月份的观测数据进行层析实验,后续将扩大时间范围,处理一年或以上的观测

数据,分析不同月份各 GNSS 水汽层析结果精度以及整年变化规律。

参考文献

- [1] 高志钰,李建章,刘彦军,等.利用 BDS 数据反演大气可降水量及其精度分析[J].测绘通报,2019(5): 35-38,47.
- [2] 郑志卿,张克非,李龙江,等.基于 MGEX 站多系统 GNSS 反演大气可降水量精度评估[J].全球定位系统,2022,47(5): 100-110.
- [3] WU Z L, LU C X, HAN X J, et al. Real-time shipborne multi-GNSS atmospheric water vapor retrieval over the South China Sea[J]. GPS solutions, 2023, 27(4): 179. DOI:10.1007/s10291-023-01519-0
- [4] 张克非,李浩博,王晓明,等.地基 GNSS 大气水汽探测遥感研究进展和展望[J].测绘学报,2022,51(7): 1172-1191.
- [5] CRESPI M G, LUZIETTI L, MARZARIO M. Investigation in GNSS ground-based tropospheric tomography: benefits and perspectives of combined Galileo, Glonass and GPS constellations[J/OL]. (2023-11-20)[2024-01-09]. Geophysical research abstracts, 2008. <https://meetings.copernicus.org/www.cosis.net/abstracts/EGU2008/03643/EGU2008-A-03643.pdf>
- [6] 夏朋飞,叶世榕,江鹏. GPS/GLONASS 组合精密单点定位技术在三维水汽层析中的应用[J].大地测量与地球动力学,2015,35(1): 72-76.
- [7] 侯建辉.地基 Beidou/GPS 大气水汽反演及其应用研究[D].济南:山东建筑大学,2021.
- [8] WANG X Y, WANG X L, DAI Z Q, et al. Tropospheric wet refractivity tomography based on the BeiDou satellite system[J]. Advances in atmospheric sciences, 2014(31): 355-362. DOI: 10.1007/s00376-013-2311-0
- [9] ZHAO Q Z, YAO Y B, CAO X Y, et al. Accuracy and reliability of tropospheric wet refractivity tomography with GPS, BDS, and GLONASS observations[J]. Advances in space research, 2019, 63(9): 2836-2847. DOI: 10.1016/j.asr.2018.01.021
- [10] 丁楠.地基 GNSS 水汽层析关键技术研究[D].徐州:中国矿业大学,2018.
- [11] ROHM W. The ground GNSS tomography – unconstrained approach[J]. Advances in space research, 2013, 51(3): 501-513. DOI: 10.1016/j.asr.2012.09.021
- [12] 宋淑丽,朱文耀,丁金才,等.上海 GPS 网层析水汽三维分布改善数值预报湿度场[J].科学通报,2005,50(2): 2271-2277.
- [13] 王昊,丁楠,张文渊,等. GNSS 水汽层析的自适应非均匀指数分层方法[J].测绘学报,2022,51(3): 327-339.
- [14] GOLUB G H, REINSCH C. Singular value decomposition and least squares solutions[J]. Numerische mathematik, 1970, 14(5): 403-420. DOI: 10.1007/BF02163027
- [15] KALMAN R E. A new approach to linear filtering and

- prediction problems[J]. *Journal of basic engineering*. 1960, 82(1): 35-45. DOI:10.1115/1.3662552
- [16] GORDON R, BENDER R, HERMAN G T. Algebraic reconstruction techniques (ART) for three-dimensional electron microscopy and x-ray photography[J]. *Journal of theoretical biology*, 1970, 29(3): 471-476. DOI: 10.1016/0022-5193(70)90109-8
- [17] 何林, 柳林涛, 苏晓庆, 等. 水汽层析代数重构算法 [J]. *测绘学报*, 2015, 44(1): 32-38.
- [18] 于胜杰, 万蓉, 付志康. 代数重构算法在 GNSS 水汽层析解算中的应用 [J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2016, 41(8): 1113-1117,1124.
- [19] 张文渊, 张书毕, 左都美, 等. GNSS 水汽层析的自适应代数重构算法 [J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2021, 46(9): 1318-1327.
- [20] 王维, 王解先. 基于代数重构技术的对流层水汽层析 [J]. *计算机应用*, 2011, 31(11): 3149-3151.
- [21] 李超, 魏合理, 王珍珠, 等. 合肥地区大气水汽标高变化特征的统计研究 [J]. *大气与环境光学学报*, 2008(2): 115-120.
- [22] 闫香蓉, 杨维芳, 李得宴, 等. 基于水汽垂直指数分布特征的 PWV 快速层析方法 [J]. *全球定位系统*, 2024, 49(2):61-68. DOI:10.12265/j.gnss.2023164
- [23] ZHAO Q Z, ZHANG K F, YAO W Q. Influence of station density and multi-constellation GNSS observations on troposphere tomography[J]. *Annales geophysicae*, 2019, 37(1): 15-24. DOI:10.5194/angeo-37-15-2019
- [24] YANG F, SUN Y L, MENG X L, et al. Assessment of tomographic window and sampling rate effects on GNSS water vapor tomography[J]. *Satellite navigation*, 2023, 4(1): 7. DOI: 10.1186/s43020-023-00096-4
- [25] 李敏姣, 张雪芹, 解承莹. 青藏高原上对流层水汽“典型异常年”成因分析 [J]. *高原气象*, 2014, 33(5): 1197-1203.
- [26] 刘晶, 周玉淑, 杨莲梅, 等. 伊犁河谷一次极端强降水事件水汽特征分析 [J]. *大气科学*, 2019, 43(5): 959-974.

作者简介

高枫林 (2000—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为 GNSS 气象学. E-mail: 2020221538@jsnu.edu.cn

丁楠 (1989—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为 GNSS 气象学. E-mail: metdingnan@163.com

张克非 (1964—), 男, 教授, 博士, 研究方向为 GNSS 大气遥感、太空资源探测与利用、智慧农业大数据平台、空间环境管理. E-mail: profkzhang@cumt.edu.cn

张书毕 (1965—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为区域变形监测、GNSS 精密单点定位、GNSS 气象学. E-mail: 1336072804@qq.com

张文渊 (1996—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为 GNSS 水汽层析. E-mail: zhangwy@cumt.edu.cn

闫香蓉 (1999—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为 GNSS 气象学. E-mail: xr_1229@163.com

A quality evaluation method of 3D water vapor tomography based on multi-GNSS observations

GAO Fenglin¹, DING Nan¹, ZHANG Kefei², ZHANG Shubi², ZHANG Wenyuan², YAN Xiangrong³

(1. School of Geography, Geomatics and Planning, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China;

2. School of Environment and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou

221116, China; 3. Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In this paper, we present an evaluation of the water vapor tomography results from four systems-GPS, BDS, GLONASS, and Galileo in terms of accuracy, using the proposed water vapor tomography profile evaluation index TPFs. The results show that the differences in the water vapor tomography solving results of each GNSS are negligible, with the maximum RMSE difference being within 11%. Among these, BDS performs the best in water vapor tomography, while GLONASS performs the worst. Compared with GPS, GLONASS, and Galileo, BDS has a significant advantage in the lower layer (below 2 406 m). In particular, in the bottom layer, BDS shows a respective improvement of 3.2%, 16.2%, and 5.2% in RMSE compared to GPS, GLONASS, and Galileo. Furthermore, in the comparison of TPFs of tomography water vapor profiles, BDS has the smallest average TPFs and the lowest TPFs of water vapor profiles under heavy rainfall, which is improved by 25.2%, 31.5%, and 32.8% compared to GPS, GLONASS, and Galileo.

Keywords: atmospheric water vapor; Global Navigation Satellite System (GNSS); water vapor tomography; quality evaluation; algebraic reconstruction technique (ART)