



## 附加高水平分辨率PWV约束的GNSS水汽层析算法

张文渊, 郑南山, 张书毕, 丁楠, 戚铭心, 王昊

引用本文:

张文渊, 郑南山, 张书毕, 等. 附加高水平分辨率PWV约束的GNSS水汽层析算法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(11): 1627–1635.

ZHANG Wenyuan, ZHENG Nanshan, ZHANG Shubi, et al. GNSS Water Vapor Tomography Algorithm Constrained with High Horizontal Resolution PWV Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(11): 1627–1635.

---

## 相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

### GNSS水汽层析的自适应代数重构算法

Adaptive Algebraic Reconstruction Algorithms for GNSS Water Vapor Tomography

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(9): 1318–1327 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20190387>

### 融合InSAR和GNSS的三维形变监测:利用方差分量估计的改进SISTEM方法

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(10): 1598–1608 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210113>

### 融合GNSS PWV、风速与大气污染观测的河北省春季PM<sub>2.5</sub>浓度模型研究

Spring PM<sub>2.5</sub> Concentration Model in Hebei Province Based on GNSS PWV, Wind Speed and Air Pollution Observation

武汉大学学报·信息科学版. 2019, 44(8): 1198–1204 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20170340>

### 联合GNSS/LEO卫星观测数据的区域电离层建模与精度评估

Regional Ionospheric Modeling and Accuracy Assessment Using GNSS/LEO Satellites Observations

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(2): 262–269,295 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20190252>

### 一种使用抗差估计的保护水平重构方法

A Method of Protection Level Reconstruction Based on Robust Estimation

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(1): 96–102 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20190043>



# 附加高水平分辨率PWV约束的GNSS水汽层析算法

张文渊<sup>1,2,4</sup> 郑南山<sup>1,2</sup> 张书毕<sup>1,2</sup> 丁楠<sup>3</sup> 戚铭心<sup>1,2</sup> 王昊<sup>3</sup>

1 中国矿业大学自然资源部国土环境与灾害监测重点实验室,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 江苏师范大学地理测绘与城乡规划学院,江苏 徐州,210019

4 大地测量和摄影测量研究所,苏黎世联邦理工大学,瑞士 苏黎世,8093

**摘要:**全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)水汽层析技术凭借高精度、低成本、全天候等优点成为获取高时空分辨率水汽三维分布的重要手段之一。引入遥感卫星提供的高分辨率水汽信息,首次提出附加高水平分辨率大气可降水量(precipitable water vapor, PWV)约束的GNSS水汽层析算法,对现有水汽层析算法的约束条件进行补充和改进。首先对高分辨率PWV观测值进行校正,然后基于二次加密划分的层析体素块构造PWV约束方程,通过将PWV约束方程融合到GNSS层析模型来改善模型的约束条件,进而优化层析结果质量。利用徐州地区2017-08的GNSS观测数据和风云三号A星(Fengyun-3A, FY-3A)遥感水汽数据对该算法的可行性及精度进行验证,分别以高精度的探空水汽廓线和ERA5三维水汽密度场为参考值对层析结果进行评估。实验结果表明,所提算法反演的水汽廓线和三维水汽分布均优于传统层析算法,各类精度指标都有了显著改善,其中平均均方根误差由 $2.73\text{ g/m}^3$ 减小为 $1.78\text{ g/m}^3$ ,反演精度提高了34.80%,进一步表明所提算法可有效改善层析结果质量,有助于获取高精度和高可靠性的三维大气水汽分布。

**关键词:**全球导航卫星系统;高水平分辨率大气可降水量;水汽层析;探空数据;ERA5

**中图分类号:**P228

**文献标志码:**A

大气水汽是重要的温室气体之一,具有复杂的时空变化特性,其对天气变化、气候演变以及生态环境都有着重要的影响<sup>[1-2]</sup>。传统探测手段受观测成本、观测间隔、测站分布等因素影响,难以实现对大气水汽的高精度、高分辨率监测<sup>[3]</sup>。文献[4]提出GPS气象学概念,并利用GPS观测网成功反演大气可降水量(precipitable water vapor, PWV),此外,还指出了密集的GPS斜路径水汽观测值具有层析三维水汽场的潜力。基于此,文献[5]率先发展了GPS水汽层析技术,利用层析成像技术重构了夏威夷地区的大气水汽三维分布信息,验证了GPS层析技术反演三维大气水汽的可行性。目前,凭借全天候监测、高时空分辨率、不受天气影响以及监测成本低等优势,地基全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)水汽层析技术已成为大气水汽监

测领域的研究热点<sup>[3]</sup>。

在GNSS水汽层析模型中,受GNSS卫星星座和地面观测站分布的影响,“盒形”层析区域与“倒锥形”GNSS信号会产生空间几何形态的不匹配性,导致三维层析模型中大量的体素块无法被GNSS信号线穿刺,进而引起层析观测方程的秩亏性,造成GNSS层析技术的不适定问题<sup>[6]</sup>。近年来,国内外众多学者通过添加约束条件、优化网格划分、联合多系统观测值、融合多源数据、改进解算算法等改善这一问题<sup>[5-17]</sup>。构造约束条件是常用的方法之一,文献[5]在层析模型中引入平行约束和垂直约束条件,用于估计空白体素块的水汽参数。文献[7]利用高斯加权平均函数确定水平约束中周围体素块的权重,使层析结果趋于真实的大气水汽分布;文献[8]在水平方向采用均值滤波器进行平滑处理,利用二阶Lapla-

收稿日期:2021-01-29

项目资助:国家自然科学基金(41974039, 41774026, 41904013);自然资源部国土环境与灾害监测重点实验室开放基金(LEDMD2021B13)。

第一作者:张文渊,博士生,主要从事GNSS水汽层析技术研究。zhangwy@cumt.edu.cn

通讯作者:郑南山,博士,教授。znshcumt@163.com

rian算子确定周围不同体素块的权重信息;先验约束条件也是常用的约束信息之一,文献[5]利用探空数据高精度和高垂直分辨率的优势,将其作为先验信息加入对流层层析系统中。随后,欧洲中尺度天气预报中心(European Center for Medium-Range Weather Forecasting, ECMWF)格网数据、数值预报模式、大气红外探测仪(atmospheric infrared sounder, AIRS)数据等逐渐被作为先验观测信息约束GNSS层析模型<sup>[12-14]</sup>。文献[15-16]提出了基于全球气温气压(global pressure and temperature 2w, GPT2w)模型和遗传算法的优化GNSS层析算法;文献[17]建立了基于B样条函数的对流层层析模型;文献[18]开发了实时GNSS层析系统,用于近实时的天气预测和分析。

目前,高水平分辨率的PWV水汽信息逐步融合到GNSS层析模型中,文献[19-20]利用干涉合成孔径雷达(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)影像反演出的高分辨率PWV差分观测信息构造出新型层析模型约束条件,改善了层析结果质量。但是,该方法通常需要借助全球水汽背景场将PWV差分信息转换为完整PWV观测值后才能构造约束信息<sup>[20]</sup>,这影响了高分辨率InSAR水汽信息的精度。目前,美国中分辨率成像光谱仪(moderate resolution imaging spectroradiometer, MODIS)、欧洲中分辨率成像光谱仪(medium resolution imaging spectrometer, MERIS)、中国中分辨率成像光谱仪(medium resolution spectral imager, MERSI)等遥感传感器同样可以提供高分辨率的完整PWV观测信息,并且这类遥感传感器的时间分辨率要明显高于大多数的InSAR传感器<sup>[21]</sup>。

本文引入风云三号A星(Fengyun-3A, FY-3A)上的MERSI传感器提供的高分辨率PWV观测数据,记为FY PWV,充分利用其空间分布特点,提出附加高水平分辨率PWV约束的GNSS水汽层析算法。该算法首先利用高分辨率PWV观测值构造出PWV约束方程,然后将PWV约束方程与GNSS信号观测方程相融合,进而提高层析结果的可靠性和精度。本文利用中国江苏徐州地区的GNSS观测网数据和FY PWV数据进行实验分析,并以该地区的无线电探空数据和ERA5再分析资料对本文所提的优化算法进行了验证分析。

## 1 对流层水汽层析原理

GNSS观测信号在穿过对流层时,受大气水汽影响导致观测信号产生大气延迟,称为斜路径湿延迟(slant wet delay, SWD),其可表示为湿折射率沿着信号方向从接收机到对流层顶的积分<sup>[5]</sup>:

$$SWD = \int N_w ds \quad (1)$$

式中, $s$ 表示GNSS信号的传输路径; $N_w$ 为湿折射率。为了反演研究区域的三维水汽密度分布,可以将SWD转换为斜路径水汽含量(slant water vapor, SWV)<sup>[4]</sup>,计算如下:

$$SWV = SWD \cdot \Pi \quad (2)$$

式中, $\Pi$ 表示转换因子,可根据大气加权平均温度确定<sup>[4]</sup>。在对流层层析中,通过对三维层析区域进行离散化获得许多均匀分布的体素块,利用体素块中心点处的水汽密度值来代表该体素块的水汽密度值,并且假设体素块的水汽密度值在一个层析历元内为常数<sup>[6]</sup>。则卫星信号从测站到对流层层顶穿过众多体素块,可构成如下层析观测方程<sup>[5]</sup>:

$$SWV = \sum_{ijk} l_{ijk} \cdot x_{ijk} \quad (3)$$

式中,SWV表示卫星信号路径上的水汽含量值; $l_{ijk}$ 和 $x_{ijk}$ 分别表示卫星信号在位于第 $k$ 层、第 $i$ 行、第 $j$ 列体素块的截距长度以及该体素块的水汽密度。

此外,由于层析区域内大量的体素块未被GNSS观测信号穿过,导致了层析观测方程的不适定性,通常采用附加水平约束和垂直约束的算法来进行解算,本文采用常见的基于高斯加权函数的水平约束和基于指数函数的垂直约束对GNSS层析模型进行约束<sup>[5,7]</sup>。

## 2 附加高分辨率PWV约束的GNSS层析模型

### 2.1 FY PWV获取及校正

FY-3A气象卫星是中国第二代极轨气象卫星,其设计目标是解决三维大气探测,大幅度提高全球资料获取能力,提高云区和地表特征遥感能力<sup>[22]</sup>。该卫星于2008-05-07成功发射,其搭载有微波温度计、微波湿度计和MERSI等遥感仪器。其中MERSI共设有20个光谱通道,5个通道可用于近红外水汽探测,通过通道



比方法可以反演出大气可降水含量<sup>[22]</sup>。MER-SI 传感器提供的 PWV 产品代表的是遥感影像中每个像素点的 PWV 值,可以从风云卫星遥感数据服务网官网下载(<http://satellite.nsmc.org.cn>)。

受云层、地表反射光谱不确定等因素影响,遥感传感器观测的 FY PWV 水汽产品存在一定的观测误差,将其用于构造约束条件前,需要先对其进行校正<sup>[23]</sup>。目前常用的方法是利用 GNSS 数据反演的 PWV 信息对 FY PWV 进行校正。国内外众多学者比较了 GNSS PWV 的反演精度,发现其与探空数据比较的均方根误差(root mean square error, RMSE)为 1~2 mm,可以认为 GNSS PWV 的精度满足 PWV 校正的要求<sup>[23]</sup>。基于 GNSS 全天候运行的优势,可以通过处理 GNSS 数据获取与 FY PWV 影像同一时刻的 GNSS PWV 值。此外,通常情况下 PWV 影像像素点与 GNSS 测站的位置并非完全重合,因此在 FY PWV 的校正过程中,根据 PWV 像素点到 GNSS 测站的距离来确定最接近的遥感像元,选取距离 GNSS 测站最近的像素点作为最接近遥感像元,并将其作为待校正的 FY PWV<sup>[23]</sup>,计算如下:

$$\text{FY PWV}_{\text{校正}} = a \times \text{FY PWV}_{\text{初始}} + b \quad (4)$$

式中,  $\text{FY PWV}_{\text{初始}}$  和  $\text{FY PWV}_{\text{校正}}$  分别表示校正前后的 PWV 观测值;  $a$  和  $b$  为模型系数。基于该校正模型,可以对其余的 FY PWV 观测值进行校正,进而获得高精度的 FY PWV 水汽分布信息。

## 2.2 附加的 FY PWV 约束条件

GNSS PWV 观测值通常表示 GNSS 测站垂直方向上大气水汽的水汽密度积分值,同理, FY PWV 可以看作 FY 像素点位置处垂直方向上的水汽密度积分值,计算如下:

$$\text{FY PWV} = \int_s^{\text{top}} \rho(h) dh \quad (5)$$

式中,  $\rho(h)$  表示垂直方向上的水汽密度值;  $h$  为垂直方向高度; top 表示对流层顶部;  $s$  表示地表。基于 GNSS 层析模型中均匀分布的体素块,式(5)可离散化为:

$$\text{FY PWV} = \sum_{k=1}^l x_k \cdot h_k \quad (6)$$

式中,  $x_k$  和  $h_k$  分别表示第  $k$  层体素块的水汽密度和高度。

在 GNSS 水汽层析模型中,通常假设同一体素块内的水汽密度处处相等,如图 1(a) 所示,用体素块中心位置处(黑点)的水汽密度值

代表该体素块的水汽密度值。因此,一列体素块的水汽密度含量在垂直方向上的积分仅对应于一个 PWV 观测值。但是, FY PWV 数据的空间分辨率为  $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ , 明显高于三维层析模型的水平分辨率,这导致数十个 FY PWV 观测值集中分布在一列层析体素块中,无法有效利用这些高分辨率 PWV 信息。为了充分利用 FY PWV 观测值,构造尽可能多的 FY PWV 约束方程,本文对 GNSS 层析网格进行再划分,如图 1(b) 所示,即对初始的层析区域进行二次加密划分,基于高分辨率的网格划分构造 PWV 约束。

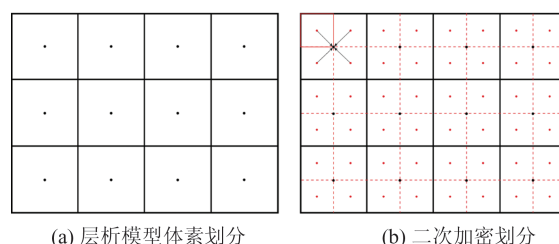


图 1 体素块划分及二次加密划分

Fig.1 Voxels Division and Secondary Densified Division

具体步骤如下:

1) 将初始的层析体素块均匀划分为 4 个小体素块(图 1(b) 中的红色体素块), 每个小体素块中心位置处(红点)的水汽密度值代表这一小体素块的水汽密度值。

2) 根据 FY PWV 像素点的空间分布位置, 将同一列小体素块内的所有 FY PWV 的均值作为该列小体素块的约束 PWV 观测值。

3) 结合约束 PWV 观测值和小体素块的分布位置构造初始 PWV 约束方程为:

$$\text{PWV}_{\text{FY}} = A_{\text{FY}} \cdot Y \quad (7)$$

式中,  $\text{PWV}_{\text{FY}}$  表示每列小体素块的约束 PWV 观测值组成的列向量;  $A_{\text{FY}}$  表示对应的 PWV 约束的系数矩阵;  $Y$  表示每个小体素块的水汽密度未知参数组成的列向量。

4) 由于式(7)的未知向量  $Y$  是小体素块的水汽密度值, 而 GNSS 层析模型中观测方程的未知数是大体素块的水汽密度值, 若将每个小体素块的水汽密度值作为水汽层析模型的待求参数, 则未知参数的数量将增加 3 倍, 加剧了 GNSS 层析模型的病态性。因此, 本文取 4 个小体素块的水汽密度的均值作为大体素块的水汽密度值, 构造转换公式如下:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/4 & 1/4 & 0 & 0 & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 1/4 & 1/4 & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & \ddots & \ddots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1/4 & 1/4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/4 & 1/4 & 0 & 0 & 0 & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 1/4 & 1/4 & 0 & \cdots & \cdots \\ \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & 0 & 0 & 1/4 & 1/4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix} \quad (8)$$

将式(8)记为  $X = M \cdot Y$ ,  $X$  表示 GNSS 层析模型的未知参数向量,  $M$  表示转换矩阵。

5) 结合式(8)将初始 PWV 约束方程转换为 GNSS 层析模型的 PWV 约束方程:

$$PWV_{FY} = A_{FY} \cdot M^{-1} \cdot X \quad (9)$$

### 2.3 GNSS 层析模型解算

基于常用的约束方程, 结合构造的 PWV 约束方程, 附加高水平分辨率 PWV 约束的 GNSS 水汽层析方程为:

$$\begin{bmatrix} SWV_{GNSS} \\ PWV_{FY} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{GNSS} \\ A_{FY} M^{-1} \\ A_H \\ A_V \end{bmatrix} \cdot X \quad (10)$$

式中,  $SWV_{GNSS}$  表示 GNSS SWV 的观测向量;  $A_{GNSS}$  表示由 GNSS 卫星信号在三维层析模型中的截距信息组成的观测矩阵;  $A_H$  和  $A_V$  分别表示水平约束和垂直约束对应的观测矩阵。针对不同类型的约束条件, 本文按照等权的策略进行处理<sup>[19-20]</sup>。基于代数重构算法避免求逆、收敛快等优点<sup>[11]</sup>, 利用该算法对上述层析方程组进行解算, 计算如下:

$$x_j^{k+1} = x_j^k + \lambda \frac{a_{i,j}}{\sum_{j=1}^n a_{i,j}^2} (SWV_i - \sum_{j=1}^n a_{i,j} x_j^k) \quad (11)$$

式中,  $x_j^k$  表示第  $k$  次迭代过程中第  $j$  个体素块的水汽密度值;  $\lambda$  表示松弛因子, 在迭代过程中起到调节收敛的作用<sup>[11]</sup>;  $a_{i,j}$  表示层析矩阵  $A$  的第  $i$  行、第  $j$  列的元素;  $SWV_i$  表示观测列向量  $SWV$  第  $i$  行的元素;  $\sum_{j=1}^n a_{i,j} x_j^k$  表示层析重建值。

## 3 层析实验与结果分析

### 3.1 层析方案设置

本文利用 2017-08 中国江苏徐州卫星参考站网中 6 个均匀分布的 GNSS 测站的观测数据进行实验分析, 研究区域为  $116.50^\circ E \sim 117.94^\circ E$ ,  $33.90^\circ N \sim 34.46^\circ N$ 。图 2 展示了 GNSS 测站的地理位置分布, 其中蓝色点表示徐州地区探空站的位置, 6 个 GNSS 测站的高程范围为 31 ~ 46 m 左右, 因此高程变化对三维层析模型的影响忽略不计。参考现有研究中有关层析网格划分的设

定<sup>[5-18]</sup>, 考虑到徐州地区稀疏型 GNSS 站网的分布特点, 层析模型水平分辨率设置为  $0.18^\circ \times 0.14^\circ$ , 垂直分辨率采用非均匀分层方式进行划分<sup>[11]</sup>。此外, 根据徐州地区 10 年的历史探空资料确定最优的层析顶层高度为 11 km<sup>[11]</sup>。

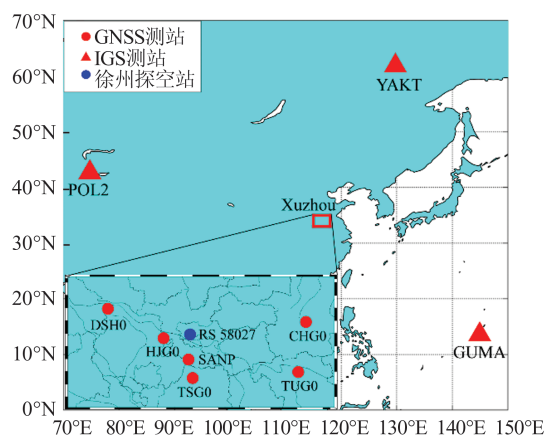


图2 徐州地区 GNSS 测站分布

Fig. 2 Distribution of GNSS Stations in Xuzhou

在 GNSS 数据处理方面, 利用 GAMIT 10.6 软件处理 GNSS 观测数据, 并引入 3 个国际卫星导航服务 (International GNSS Service, IGS) 站 (GUMA 站、POL2 站、YAKT 站) 的观测数据进行处理, 以获取高精度的天顶对流层延迟 (zenith tropospheric delay, ZTD) 观测值<sup>[11]</sup>。同时, 采用 Saastamoinen 模型估计天顶静力学延迟 (zenith drostatic delay, ZHD)<sup>[24]</sup>, 选用 VMF1 湿映射函数计算 GNSS SWV 值<sup>[25]</sup>。利用 GNSS 数据估计 ZTD 和梯度信息的时间分辨率为 5 min。在风云水汽遥感影像的选取中, 选用 24 幅置信度大于 95% 的风云遥感水汽影像参与到层析实验中<sup>[23]</sup>。本文采用传统层析算法和附加高水平分辨率 PWV 约束的水汽层析算法进行三维大气水汽反演的对比实验。

### 3.2 二维水汽廓线对比

本文以徐州地区探空站的水汽廓线数据为参考值, 对两种层析算法反演的层析结果进行精度评定。探空站只在世界协调时间 (coordinated universal time, UTC) 00:00 和 UTC 12:00 两个时刻提供高精度垂直水汽廓线信息, 而本文的层析时段则根据 FY PWV 的获取时间而确定, 两者存在一定的时间差异性。通过分析

发现,部分 FY PWV 影像的观测时间在 UTC 00:00 左右,因此,根据 GNSS 层析模型中同历元内水汽参数为常量这一假设条件,利用探空数据对观测时间在 UTC 11:30—00:00 和 UTC 00:00—00:30 两个时段的 FY PWV 影像对应的层析结果进行精度评定,以保证层析结果验证的有效性。图 3 列出了 24 幅高分辨率 PWV 影像的获取时间,其中有 12 幅影像符合要求,分别对应 12 个层析时段。因此,本文利用探空原始观测数据对这 12 个层析历元的层析结果的反演精度进行评估。

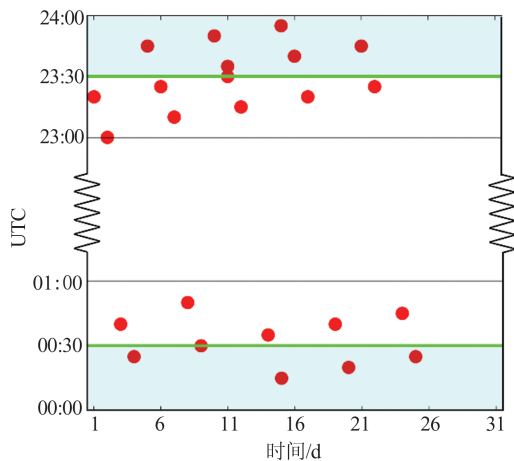


图 3 24 幅 FY PWV 影像的获取时间分布  
Fig. 3 Acquisition Time Distribution of 24 FY PWV Images

图 4 展示了不同气象条件下两种算法得到的层析水汽廓线信息和原始探空水汽廓线。由图 4 可以看出,两种层析算法得到的水汽廓线均与探空水汽廓线相一致,并且本文算法的一致性优于传统算法。在 4 km 以下的层析区域通常含有丰富的水汽信息,精确的水汽廓线对分析降雨、台风等极端天气具有重要作用<sup>[11]</sup>,该高度范围内本文算法反演的水汽廓线与探空数据更为契合。

图 5 展示了层析时段内两种算法结果的 RMSE 对比。由图 5 可知,在绝大多数层析历元内,本文算法的反演精度明显高于传统算法,对应的平均 RMSE 从  $2.79 \text{ g/m}^3$  降到  $1.74 \text{ g/m}^3$ ,层析结果的精度提高了 37.63%。综上,相较于传统 GNSS 层析算法,附加高分辨率 PWV 约束的优化层析算法能够获得更高质量的水汽廓线信息。

### 3.3 三维水汽分布对比

尽管探空数据提供的高精度水汽廓线可以准确地评定层析廓线质量,但无法全面评估层析三维

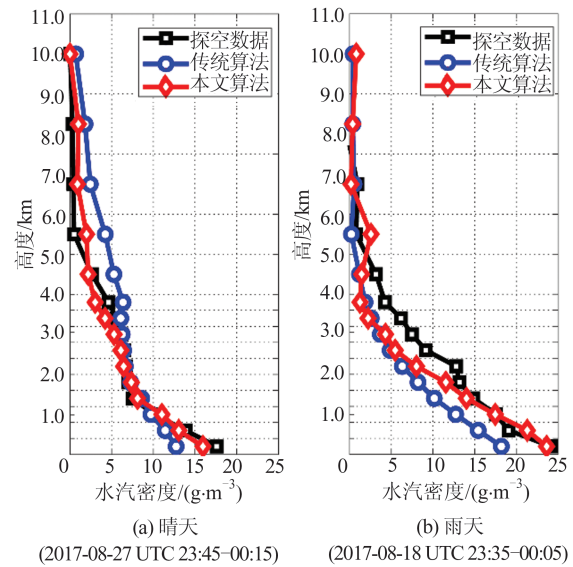


图 4 两种算法在不同天气条件下的层析水汽廓线对比  
Fig. 4 Comparison of Tomographic Water Vapor Profiles Derived from Two Algorithms Under Different Weather Conditions

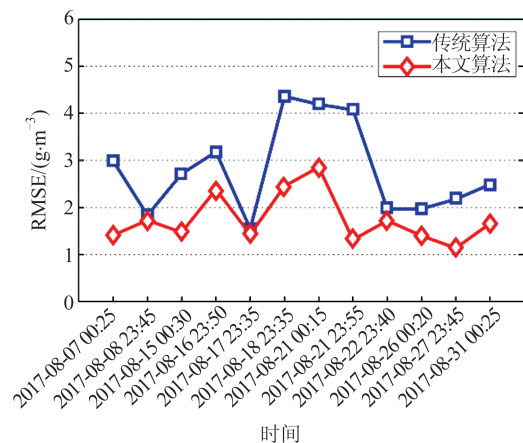


图 5 两种算法反演结果的 RMSE 对比  
Fig. 5 Comparison of the RMSE of the Tomographic Results Derived from Two Algorithms

水汽场的反演精度。为了进一步分析优化算法在反演高精度三维水汽场方面的表现,本文以 ERA5 数据提供的高时空分辨率三维水汽密度信息作为参考值,分别对两种算法的层析结果进行精度评定。为了保证 ERA5 参考数据与层析结果的时间和空间一致性,采用时间域的三次样条插值算法和空间域的反距离加权插值算法对逐小时分辨率的 ERA5 数据进行插值<sup>[26]</sup>,获得 24 个层析时段内每个体素块的参考水汽密度值(water vapor density, WVD)。图 6 展示了所有层析历元内 ERA5 数据与两种层析结果的平均误差的三维分布图,每个体素块的误差由 ERA5 数据减去层析结果数据获得。

由图 6 可以看出,本文算法反演的水汽三维分



布误差明显小于传统算法,尤其在0~2 km的近地层范围内,通过引入FY PWV约束条件,层析水汽场的质量得到显著提升。

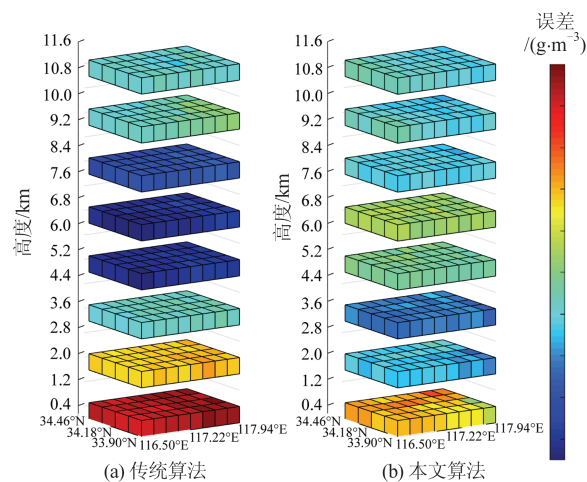


图6 两种层析算法反演的三维水汽分布的平均误差对比

Fig. 6 Comparison of Mean Errors of 3D Water Vapor Distribution Derived from Two Algorithms

图7展示了两种层析结果与探空数据以及ERA5数据的散点分布图,黑线代表斜率为1的直线,散点拟合直线越靠近黑线,说明层析结果与参考数据的一致性越好。

由图7可以发现,以探空数据为参考值,散点拟合直线的斜率由传统算法的0.815 5提升到本文算法的0.955 9;与ERA5数据相比,两种层析算法的斜率分别为0.750 8和0.886 5,表明本文算法的层析结果的整体质量要优于传统算法,进一步论证了附加高分辨率PWV约束的层析算法

在反演大气三维水汽场方面的优势。

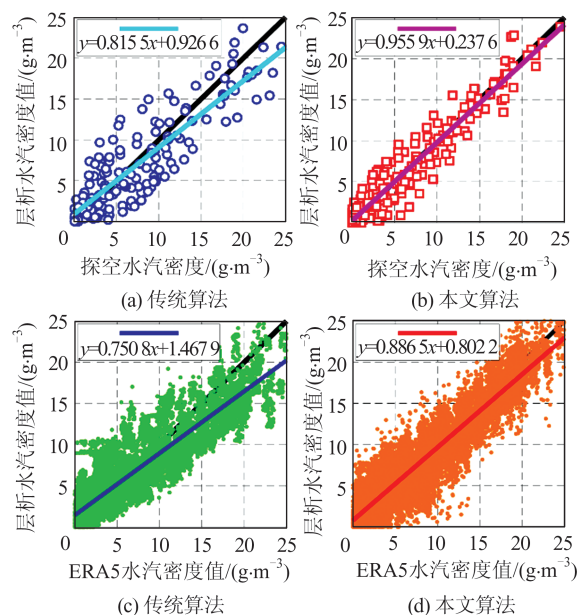


图7 两种算法的层析结果与探空数据和ERA5数据的散点分布图

Fig. 7 Scatter Plots of the Tomography Results with Radiosonde Data and ERA5 Data Derived from Two Algorithms

### 3.4 不同高度层析精度对比

考虑到大气水汽垂直分布极不均匀,低层水汽含量相比于高层水汽有量级上的差异,本节进一步比较两种层析算法在不同高度上的反演精度。图8展示了分别以探空数据和ERA5数据为参考值,两种层析结果在不同高度上的RMSE、标准偏差(standard deviation, STD)以及相对误差。

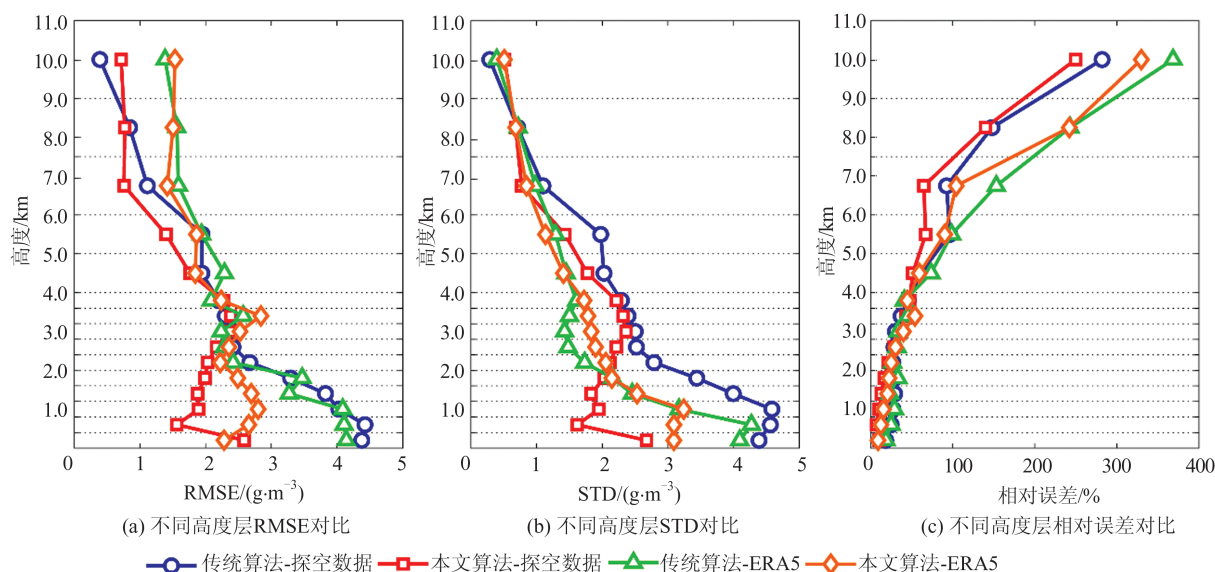


图8 两种算法的层析结果在不同高度上的反演精度对比

Fig. 8 Comparison of Retrieval Accuracy of the Tomography Results Derived from Two Algorithms at Different Altitudes

由图8可以看出,本文算法的反演精度在绝大多数高度上均优于传统算法。基于两类参考数据,层析结果的平均RMSE由 $2.73\text{ g/m}^3$ 降低到 $1.78\text{ g/m}^3$ ,平均STD由 $2.48\text{ g/m}^3$ 降低到 $1.71\text{ g/m}^3$ ,两个精度指标分别降低了34.80%和31.05%。此外,在0~2 km的近地范围内,本文算法的RMSE和STD值分别为 $2.28\text{ g/m}^3$ 和 $2.42\text{ g/m}^3$ ,明显优于传统算法的 $3.90\text{ g/m}^3$ 和 $3.71\text{ g/m}^3$ 。此外,该范围的平均相对误差由25.93%降低为13.86%。表明了高分辨率遥感水汽信息对于改善三维水汽层析场的反演精度有重要作用。

## 4 结 语

本文基于高分辨率风云遥感水汽数据,首次提出附加高水平分辨率PWV约束的GNSS水汽层析算法。根据高分辨率FY PWV的空间分布位置建立了附加PWV约束方程,将其融入到传统GNSS层析模型。

利用2017-08中国江苏徐州地区24幅风云水汽遥感影像和同步的GNSS实测数据,系统地比较分析了本文算法与传统算法的层析结果的质量及精度。实验结果表明:(1)以原始探空水汽廓线为参考值评估层析结果的质量,与传统算法相比,附加PWV约束的层析算法的平均RMSE由 $2.79\text{ g/m}^3$ 降低为 $1.74\text{ g/m}^3$ ,反演精度提高了37.63%。(2)利用ERA5数据提供的三维水汽分布信息对层析结果进行精度评定,本文算法的三维层析结果的平均RMSE为 $1.83\text{ g/m}^3$ ,优于传统算法的 $2.67\text{ g/m}^3$ 。(3)综合考虑两类参考数据,层析结果的RMSE由 $2.73\text{ g/m}^3$ 减小为 $1.78\text{ g/m}^3$ ,反演精度提高了34.80%。在0~2 km的近地层范围内,本文算法反演的水汽廓线和三维水汽分布均优于传统算法,该范围内整体反演精度提高了38.16%,展示出高水平分辨率遥感水汽数据在改善GNSS层析结果方面的巨大潜力。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang K, Manning T, Wu S, et al. Capturing the Signature of Severe Weather Events in Australia Using GPS Measurements [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 8(4):1 839-1 847
- [2] Wang X, Zhang K, Wu S, et al. The Correlation Between GNSS-derived Precipitable Water Vapor and Sea Surface Temperature and Its Responses to El Niño - Southern Oscillation [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 216: 1-12
- [3] Yao Yibin, Zhang Shun, Kong Jian. Research Progress and Prospect of GNSS Space Environment Science [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1 408-1 420 (姚宜斌, 张顺, 孔建. GNSS空间环境学研究进展和展望[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1 408-1 420)
- [4] Bevis M, Steven B, Thomasa H. GPS Meteorology Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using Global Positioning System [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1992, 97 (D14): 15 787-15 801
- [5] Flores A, Ruffini G, Rius A. 4D Tropospheric Tomography Using GPS Slant Wet Delays [J]. *Annales Geophysicae*, 2000, 18(2):223-234
- [6] Rohm W. The Ground GNSS Tomography-Unconstrained Approach [J]. *Advances in Space Research*, 2013, 51:501-513
- [7] Song S, Zhu W, Ding J, et al. 3D Water-Vapor Tomography with Shanghai GPS Network to Improve Forecasted Moisture Field [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(5): 607-614
- [8] He Lin, Liu Lintao, Su Xiaoqing, et al. Algebraic Reconstruction Algorithm of Vapor Tomography [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(1): 32-38 (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)
- [9] Zhao Qingzhi, Yao Yibin, Luo Yiyong. A Method to Improve the Utilization of Observation for Water Vapor Tomography by Adding Assisted Tomographic Area [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(9): 1 203-1 208, 1 222 (赵庆志, 姚宜斌, 罗亦泳. 附加辅助层析区域提高射线利用率的水汽反演方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2017, 42(9): 1 203-1 208, 1 222)
- [10] Hu Peng, Huang Guanwen, Zhang Qin, et al. A Multi-GNSS Water Vapor Tomography Method Considering Boundary Incident Signals [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2020, 49(5): 557-568 (胡鹏, 黄观文, 张勤, 等. 顾及边界入射信号的多模水汽层析方法[J]. 测绘学报, 2020, 49(5): 557-568)
- [11] Zhang Wenyuan, Zhang Shubi, Zuo Doumei, et al. Adaptive Algebraic Reconstruction Algorithms for GNSS Water Vapor Tomography [J]. *Geomatics*



- and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(9): 1 318-1 327(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): 1 318-1 327)
- [12] Zhao Qingzhi, Yao Yibin, Xin Linyang. A Method to Sophisticate the Water Vapor Tomography Model by Combining the ECMWF Grid Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(8): 1 131-1 138(赵庆志, 姚宜斌, 辛林洋. 融合ECMWF格网数据的水汽层析精化方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(8): 1 131-1 138)
- [13] Haji-Aghajany S, Amerian Y, Verhagen S, et al. An Optimal Troposphere Tomography Technique Using the WRF Model Outputs and Topography of the Area[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12: 1 442
- [14] Benevides P, Catalao J, Nico G, et al. 4D Wet Refractivity Estimation in the Atmosphere Using GNSS Tomography Initialized by Radiosonde and AIRS Measurements: Results from a 1-week Intensive Campaign [J]. *GPS Solutions*, 2018, 22(4): 91
- [15] Zhao Q, Yao W, Yao Y, et al. An Improved GNSS Tropospheric Tomography Method with the GPT2w Model [J]. *GPS Solutions*, 2020, 24(60): 974
- [16] Yang F, Guo J, Shi J, et al. A GPS Water Vapor Tomography Method Based on a Genetic Algorithm [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2020, 13: 355-371
- [17] Haji-Aghajany S, Amerian Y, Verhagen S. B-spline Function-based Approach for GPS Tropospheric Tomography [J]. *GPS Solutions*, 2020, 24(88): 1 005
- [18] Sá A, Rohm W, Fernandes R M, et al. Approach to Leveraging Real-time GNSS Tomography Usage [J]. *Journal of Geodesy*, 2021, 95(8): 1 464
- [19] Benevides P, Nico G, Catalao J, et al. Bridging In-SAR and GPS Tomography: A New Differential Geometrical Constraint [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(2): 697-702
- [20] Heublein M, Alshawaf F, Erdnütz B, et al. Compressive Sensing Reconstruction of 3D Wet Refractivity Based on GNSS and InSAR Observations [J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(2): 197-217
- [21] He J, Liu Z Z. Comparison of Satellite-Derived Precipitable Water Vapor Through Near-Infrared Remote Sensing Channels [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(12): 10 252-10 262
- [22] Wang Xi, Li Wanbiao. Retrieval of Clear Sky Moisture Profiles in the Pacific Using Measurements of MWHS from FY-3A Satellite [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2013(1): 47-54(王稀, 李万彪. 应用FY-3A/MWHS资料反演太平洋海域晴空大气湿度廓线[J]. 热带气象学报, 2013(1): 47-54)
- [23] Liu Bei, Wang Yong, Lou Zesheng, et al. The MODIS PWV Correction Based on CMONOC in Chinese Mainland [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(10): 1 207-1 215(刘备, 王勇, 娄泽生, 等. CMONOC观测约束下的中国大陆地区MODIS PWV校正[J]. 测绘学报, 2019, 48(10): 1 207-1 215)
- [24] Saastamoinen J. Contributions to the Theory of Atmospheric Refraction [J]. *Journal of Geodesy*, 1972, 105: 279-298
- [25] Landskron D, Böhm J. Refined Discrete and Empirical Horizontal Gradients in VLBI Analysis [J]. *Journal of Geodesy*, 2018, 92(12): 1 387-1 399
- [26] Chang L, Gao G, Jin S, et al. Calibration and Evaluation of Precipitable Water Vapor from MODIS Infrared Observations at Night [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53: 2 612-2 620

## GNSS Water Vapor Tomography Algorithm Constrained with High Horizontal Resolution PWV Data

ZHANG Wenyuan<sup>1,2,4</sup> ZHENG Nanshan<sup>1,2</sup> ZHANG Shubi<sup>1,2</sup> DING Nan<sup>3</sup>  
QI Mingxin<sup>1,2</sup> WANG Hao<sup>3</sup>

- 1 Key Laboratory of Land Environment and Disaster Monitoring, Ministry of Natural Resources, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China
- 2 School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China
- 3 School of Geography, Geomatics and Planning, Jiangsu Normal University, Xuzhou 210019, China
- 4 Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, Zurich 8093, Switzerland

**Abstract: Objectives:** Global navigation satellite system (GNSS) tomography technique has become one of the most potential techniques for retrieving the three-dimensional (3D) distribution of water vapor with the advantages of high precision observations, low cost and all-weather monitoring. **Methods:** High horizontal resolution water vapor information provided by remote sensing satellites is introduced. We propose a GNSS water vapor tomography algorithm constrained with high horizontal resolution precipitable water vapor (PWV) data for the first time, which supplements and improves the constraints of existing water vapor tomography algorithms. In the proposed algorithm, firstly, the high horizontal resolution PWV observations are calibrated, and then the PWV constraint equations are constructed based on the densified tomographic voxels. Finally, the PWV constraint equations are included into the GNSS tomography model, which optimizes the constraint conditions and improves the tomographic results. **Results:** GNSS data and remote sensing water vapor data from FY-3A satellite over Xuzhou area, China in August 2017 are used to assess the feasibility and accuracy of the proposed algorithm. Taking the high-precision radiosonde water vapor profile and 3D water vapor density field from ERA5 as reference values, it can be observed that the proposed algorithm is superior to traditional method in retrieving water vapor profile and 3D water vapor distribution. Three kinds of accuracy indexes of the tomographic results have been significantly improved using the proposed method, with the mean root mean square error (RMSE) decreasing from  $2.73 \text{ g/m}^3$  to  $1.78 \text{ g/m}^3$ , showing an improvement of 34.80%. **Conclusions:** This highlights that the improved tomography algorithm has significant potential to reconstruct the accurate and reliable 3D atmospheric water vapor distribution.

**Key words:** global navigation satellite system (GNSS); high horizontal resolution precipitable water vapor; water vapor tomography; radiosonde; ERA5

**First author:** ZHANG Wenyuan, PhD candidate, specializes in GNSS tomography technology. E-mail: zhangwy@cumt.edu.cn

**Corresponding author:** ZHENG Nanshan, PhD, professor. E-mail: znshcumt@163.com

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China (41974039, 41774026, 41904013); the Open Research Fund of Key Laboratory of Land Environment and Disaster Monitoring, Ministry of Natural Resources, China University of Mining and Technology (LED2021B13).

**引文格式:** ZHANG Wenyuan, ZHENG Nanshan, ZHANG Shubi, et al. GNSS Water Vapor Tomography Algorithm Constrained with High Horizontal Resolution PWV Data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(11): 1627–1635. DOI: 10.13203/j.whugis20210055 (张文渊, 郑南山, 张书毕, 等. 附加高水平分辨率PWV约束的GNSS水汽层析算法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(11): 1627–1635. DOI: 10.13203/j.whugis20210055)