



融合ECMWF格网数据的水汽层析精化方法

赵庆志¹ 姚宜斌² 辛林洋²

1 西安科技大学测绘科学与技术学院,陕西 西安,710054

2 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

摘要:全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)层析技术是获取对流层三维水汽信息的重要途径之一。然而,传统水汽层析方法在构建层析模型时缺少足够的初始先验信息,导致层析模型设计矩阵结构不稳定,层析解算结果精度较差。针对上述情况,提出了一种融合欧洲中尺度天气预报中心(European Center for Medium-Range Weather Forecasting, ECMWF)格网数据精化层析模型反演水汽的方法。该方法通过ECMWF ERA-Interim再分析资料数据集提供的格网数据计算得到层析区域各网格内的水汽密度初值,将其作为先验初始信息附加到传统层析模型中对模型精化。在层析模型解算时,顾及层析模型先验信息权比对层析结果的影响。为了验证提出方法的有效性,以中国香港卫星定位参考站网(satellite positioning reference station network, SatRef)实测GNSS和气象数据为例进行实验,并以实验区域的无线电探空数据为基准验证该方法的可行性及精度。实验结果表明,提出的方法能够明显提高层析结果的精度,反演水汽的均方根误差(root mean squared error, RMSE)由原来的1.82 g/m³减小到了1.07 g/m³,改善率为41.2%。此外,所提方法在平均绝对偏差(mean absolute error, MAE)、偏差(Bias)和标准差(standard deviation, STD)等方面也均优于传统层析方法。

关键词:水汽层析;设计矩阵;欧洲中尺度天气预报中心;无线电探空仪

中图分类号:P228.41

文献标志码:A

水汽虽然在大气中所占的比重较小,却是天气变化研究中最重要气象元素之一^[1]。因此,获取高时空分辨率的大气水汽分布信息对暴雨等灾害天气的预报和预警具有重要意义^[2]。传统水汽探测手段获得的水汽时空分布不均,且分辨率较低,难以满足中小尺度天气变化监测的需求。20世纪90年代,Bevis等^[3]提出了全球定位系统(global positioning system, GPS)气象学的概念,并证明了利用GPS数据获取大气可降水量(precipitable water vapor, PWV)的可行性。此后,国内外众多学者在该方面做了大量的相关研究和论证^[4-7]。

PWV是由多条卫星信号上的水汽信息投影到天顶方向上的均值,不能反映三维的水汽空间变化。针对该问题,Braun等^[8]借鉴医学上的计算机断层扫描(computed tomography, CT)技术,提出了全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)对流层层析的概念,Flores等^[4]利用该技术实现区域三维水汽的重构,与欧

洲中尺度天气预报中心(European Center for Medium-Range Weather Forecasting, ECMWF)格网数据进行对比,证明了该技术获取对流层水汽时空变化的可行性。此后,对流层水汽层析技术在网格划分、射线利用率、模型解算和联合多系统水汽反演方面均取得了快速发展^[7,9-12]。

首先,传统层析技术将研究区域划分成若干网格,并假设每个网格内的水汽密度在给定的时段内为一常数;然后,利用完整穿过研究区域的大量卫星信号去重构层析区域的水汽空间分布^[4]。由于受卫星星座、接收机几何位置分布的影响及层析区域选择的特定性,上述方法并不能保证层析区域内划分的每个网格均有卫星信号穿过,因此,仅利用观测数据建立的方程无法求出层析区域内所有网格的水汽密度值^[7]。传统解决方法是对层析网格附加各种约束信息,如水平约束、垂直约束和边界约束等。但如果附加约束不合理,最终层析结果可能会失真^[13-14]。实验证明,对于层析区域内测站间相对高差不大的情

况,先验信息对层析结果有十分重要的影响。针对该情况,利用气象、电离层和气候星座观测系统(constellation observing system for meteorology, ionosphere and climate, COSMIC)掩星数据反算层析区域网格内的水汽密度作为初值,并通过实验证明了该方法的可行性^[15]。

本文借鉴文献[15]的思想,尝试将ECMWF第4代产品ERA-Interim 格网数据计算的水汽密度值作为初始信息附加到层析模型中,达到精细化层析模型的目的。其主要思想是利用ECMWF ERA-Interim 格网数据计算得到层析区域每个网格内的水汽密度初值,再利用实测卫星信号对其进行修正。更重要的是该方法能够克服层析模型的法方程在求逆过程中的不稳定现象。此外,本文在层析模型解算时同时顾及了各类先验信息对层析结果的影响。

1 层析基本原理

1.1 层析模型建立

通过对GNSS 实测数据进行处理可以得到卫星至接收机倾斜路径上的湿延迟(slant wet delay, SWD),结合测站相应的气象信息可以获得卫星至接收机信号路径的水汽含量(slant water vapor, SWV),其表达式如下:

$$SWV = 1 \times 10^{-6} \times \int_s \rho_v ds \quad (1)$$

式中, s 表示卫星信号的射线路径; ρ_v 表示大气水汽密度(单位为 $g \cdot m^{-3}$)。

对式(1)离散化可得如下线性方程:

$$SWV^p = \sum_{ijk} (A_{ijk}^p \times X_{ijk}) \quad (2)$$

式中, SWV^p 表示完整穿过层析区域的射线路径上的水汽含量(单位为mm); A_{ijk}^p 为射线 p 在网格 (i, j, k) 内的截距(单位为km); X_{ijk} 为 (i, j, k) 网格内的水汽密度。将式(2)写成矩阵形式,可得到传统层析方法的观测方程:

$$y_{m \times 1} = A_{m \times n} \cdot x_{n \times 1} \quad (3)$$

式中, y 表示SWV观测值组成的列向量; m 表示SWV值的总个数; A 表示大量完整穿过层析区域的信号在每个网格的截距组成的系数矩阵; n 表示研究区域内要反演的未知数的总个数; x 是要求的未知量,在本文中表示水汽密度。

1.2 约束条件

并不是所有网格都有卫星信号穿过,所以无法直接对式(3)进行求逆运算。通常,需要对待

求参数附加约束条件来解决该问题^[16]。本文附加两种约束条件,在水平方向上,利用高斯加权函数方法对水平网格进行约束^[17];在垂直方向上,基于指数分布建立垂直网格间的约束关系^[18]。

可以得到传统方法的层析模型:

$$\begin{pmatrix} A_{m \times n} \\ H_{m \times n} \\ V_{m \times n} \end{pmatrix} \cdot x_{n \times 1} = \begin{pmatrix} y_{m \times 1} \\ 0_{m \times 1} \\ 0_{m \times 1} \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中, H 和 V 分别表示水平约束和垂直约束的系数矩阵。

2 水汽层析模型精化方法

尽管附加额外的约束条件(水平约束和垂直约束)可以进行层析法方程的求逆运算,但层析区域内卫星信号穿过的网格数目有限,层析模型的设计矩阵是大而稀疏的离散矩阵,求逆过程中层析法方程并不稳定。此外,附加的约束条件是根据经验所得,某些情况下并不合理,可能会导致层析结果偏离其真值。针对该情况,本文提出了融合ECMWF格网数据精化层析模型的方法。首先,该方法利用ECMWF格网数据计算层析区域内每个网格的水汽密度初值;然后,将其作为先验信息附加到传统层析模型中,改善层析模型的稳定性。

2.1 利用ECMWF格网数据计算水汽密度初值

ECMWF的第4代产品ERA-Interim可提供最小空间分辨率为 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ 的全球再分析资料,包括每天00:00、06:00、12:00、18:00时次的温度、相对湿度等格网资料,如图1中★所在位置所示,★表示ECMWF格网点。通过这些资料可以计算出ECMWF格网点所在位置的水汽密度。

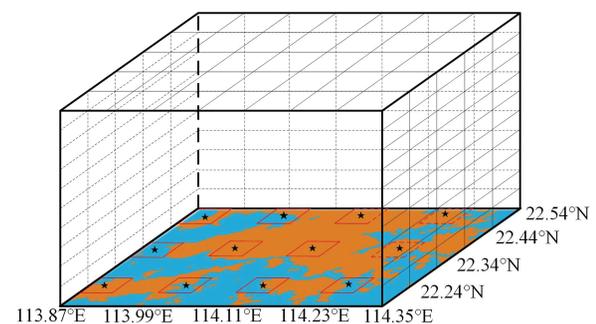


图1 层析区域网格划分示意图

Fig.1 Division of Tomography Area

由水汽状态方程 $w = \rho_v \times R_v \times T$ 可得:

$$\rho_v = \frac{w}{R_v \times T} \quad (5)$$

式中, w 表示水汽分压(单位为 hPa); $R_v = 461.5 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T 表示温度。其中,水汽压可根据下式计算:

$$e = R_H \times \exp(-37.2465 + 0.213166T_s - 0.000256908T_s^2) \quad (6)$$

式中, T_s 表示测站的绝对温度(单位为 K); R_H 表示相对湿度。

2.2 融合 ECMWF 数据的层析模型建立

首先,计算出 ECMWF 格网点所在网格内的水汽密度值;然后,利用反距离加权法插值得出层析区域内其他格网内的水汽密度初值。基于 ECMWF 格网数据计算得到的水汽密度初值可写成以下形式:

$$\begin{bmatrix} 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_{v1}^{\text{ECMWF}} \\ \vdots \\ \rho_{vn}^{\text{ECMWF}} \end{bmatrix}_{i \times j \times k} \quad (7)$$

式中, ρ_{vn}^{ECMWF} 表示利用 ECMWF 格网数据计算或插值得到的第 n 个网格的水汽密度初值;下标 i, j 和 k 分别表示在经度、纬度和高程方向上划分的网格个数。式(7)写成矩阵形式为:

$$I_{n \times n} \cdot x_{n \times 1} = \rho_{vn \times 1}^{\text{ECMWF}} \quad (8)$$

此时联立方程(4)和方程(8),即可得到精化后的层析模型:

$$\begin{pmatrix} A_{m \times n} \\ H_{m \times n} \\ V_{m \times n} \\ I_{n \times n} \end{pmatrix} \cdot x_{n \times 1} = \begin{pmatrix} y_{m \times 1} \\ 0_{m \times 1} \\ 0_{m \times 1} \\ \rho_{vn \times 1}^{\text{ECMWF}} \end{pmatrix} \quad (9)$$

本文对式(9)提出了一种顾及层析模型各类方程先验信息的解算方法。

2.3 顾及各类方程先验信息的层析模型解算

假设式(9)中各类方程的权阵为 P ,则未知参数可表示成如下形式:

$$\hat{X} = (B^T P B)^{-1} (B^T P L) \quad (10)$$

式中, $B = [A H^T V^T I^T]$, $L = [y \ 0 \ 0 \ \rho_v]$, $P = \text{diag}(P_A, P_H, P_V, P_I)$ 。由于层析模型是由不同类型的方程组成,因此,如何有效地确定各类信息的最优权值是获取高精度层析结果的关键之一。本文基于各类信息的后验残差和一致性检验方法确定层析模型的权比信息。

1)计算层析模型各类方程的后验残差:

$$V_{\text{eq}} = B \hat{X} - L \quad (11)$$

式中,eq 可代表 GPS、水平约束、垂直约束或 ECMWF。

2)计算各类方程的验后单位权方差 $\hat{\sigma}_{0_{\text{eq}}}^2$ [19]:

$$\hat{\sigma}_{0_{\text{eq}}}^2 = \frac{V_{\text{eq}}^T P_{\text{eq}} V_{\text{eq}}}{n_{\text{eq}} - \text{tr}(N^{-1} N_{\text{eq}})} \quad (12)$$

式中, n_{eq} 是不同类型方程的总个数; tr 为对应矩阵的秩; $N_{\text{eq}} = B_{\text{eq}}^T P_{\text{eq}} B_{\text{eq}}$ 。

3)计算方差分量的合并方差 [20]:

$$\hat{\sigma}_{0_{\text{eq}}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (n_i - 1) \hat{\sigma}_{0_i}^2}{\sum_{i=1}^m (n_i - 1)} \quad (13)$$

式中, $\hat{\sigma}_{0_i}^2$ 为各类方程的验后单位权方差; m 为层析模型中某一类型方程的总个数。

4)利用 Bertlett 检验 [19] 验证计算的各类验后单位权方差是否在统计意义上一致,并计算统计量 $\chi_{0_{\text{eq}}}^2$:

$$\chi_{0_{\text{eq}}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (n_i - 1) \ln \frac{\hat{\sigma}_{0_{\text{eq}}}^2}{\hat{\sigma}_{0_i}^2}}{1 + \frac{\sum_{i=1}^m (n_i - 1)^{-1} - [\sum_{i=1}^m (n_i - 1)]^{-1}}{3(m - 1)}} \quad (14)$$

当计算的统计量小于给定临界值时,认为计算的各类方程的验后单位权方差在统计学上相等;否则,更新各类信息权比并重新计算。

5)更新层析模型中各类方程的权比:

$$P_{\text{eq}}^j = \frac{c}{\hat{\sigma}_{0_{\text{eq}}}^2} \cdot P_{\text{eq}}^{(j-1)}, \text{eq} = \text{GPS, H, V, ECMWF} \quad (15)$$

式中, j 表示迭代次数; c 为任意值,本文中 $c = \hat{\sigma}_{0_{\text{GPS}}}^2$ 。

3 精度验证

3.1 数据介绍及处理策略

选取中国香港 SatRef 网中 12 个 GPS 站和对应气象站 2014-03-25—2014-04-19 共 26 天的数据进行层析实验,此外,选取层析区域内的无线电探空站作为检验,如图 2 所示。

选取的 GPS 数据利用 GAMIT (GPS analysis software at massachusetts institute of technology) 的 10.5 版本进行处理, GPS 观测数据的采样率为 30 s。为了忽略信号弯曲对层析结果的影响,每台接收机上的信号截止高度角均设置为 10° [21]。天顶总延迟 (zenith total delay, ZTD) 和

在东西、南北方向上的对流层梯度参数分别每0.5 h和每2 h估计一次。为了获取测站上的绝对ZTD参数,选取3个基线超过500 km的国际GNSS服务站SHAO、BJFS和LHAZ参与数据解算^[22]。天顶静力学延迟(zenith hydrostatic delay, ZHD)可利用经验模型和实测地表气压精确求出^[23]。因此,计算得到天顶湿延迟(zenith wet delay, ZWD),利用地表气温和区域加权平均温度模型计算得到PWV。利用湿投影函数和梯度参数将PWV投影到斜路径方向上得到斜路径水汽含量(slant water vapor, SWV)。

3.2 层析策略

利用探空数据可以得到不同高度上精确的水汽廓线信息^[24-25],因此,本文利用探空站多年的数据计算得到其平均水汽垂直分布信息,用以确定层析区域的垂直边界。

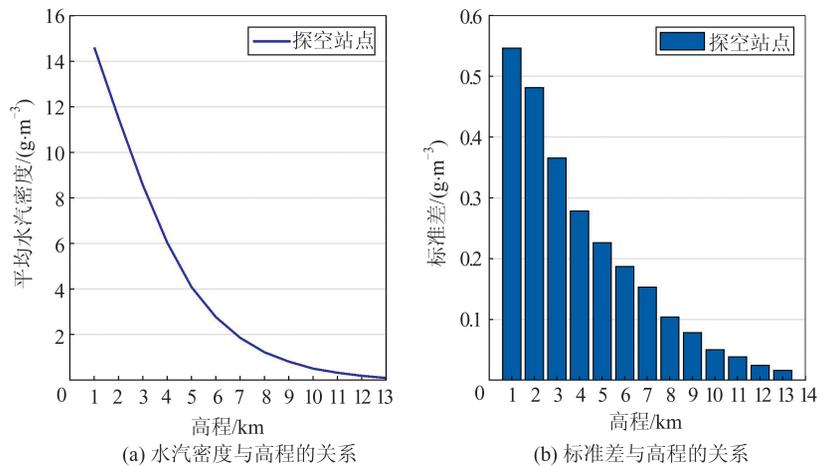


图3 探空站1974—2014年的平均水汽密度分布及标准差

Fig.3 Average Water Vapor Density and STD of Radiosonde from 1974 to 2014

由图3可以看出,当高程为10 km时,水汽密度小于 0.1 g/m^3 ,标准差小于 0.01 g/m^3 。本文实验选取10 km作为研究区域的垂直边界,并假定10 km以上的水汽密度为0。研究区域范围为 $113.87^\circ\text{E}\sim 114.35^\circ\text{E}$, $22.19^\circ\text{N}\sim 22.54^\circ\text{N}$ 。网格划分:水平分辨率经度方向为 0.06° (约6.6 km),纬度方向为 0.05° (约5.9 km),垂直分辨率为0.8 km,研究区域共有 $7\times 8\times 13$ 个网格。采用均方根误差(root mean squared error, RMSE)、平均绝对偏差(mean absolute error, MAE)、偏差(Bias)和标准差(standard deviation, STD)作为评定该方法的指标。

实验中采用两种层析方法对水汽密度进行反演,方法1:传统层析方法,利用式(4)建立的层析模型;方法2:融合ECMWF格网数据精化层析



图2 GNSS测站和无线电探空站地理位置分布图

Fig.2 Geographic Distribution of GNSS and Radiosonde Stations

基于层析区域内探空站(如图2中●所示)1974—2014年40年的探空数据,计算得到该区域在垂直方向上的水汽密度廓线,并统计其标准差,如图3所示。

模型的方法,利用式(9)建立的层析模型。

3.3 IWV对比

对不同层析方法得到的综合水汽含量(integrated water vapor, IWV)进行分析,实验时段为2014-03-25—2014-04-19共26天的数据。根据层析结果得到探空站所在网格位置上的IWV,并与探空数据计算结果相比较。图4给出了每天在UTC 00:00和UTC 12:00的统计结果;表1给出了26天的统计信息。

由图4可得,两种方法得到的IWV与探空数据对比均有很好的 consistency。但通过计算(见表1)发现,方法2反演得到IWV的RMSE、STD、MAE和Bias均优于方法1的结果,说明本文提出的融合ECMWF格网数据精化层析模型的方法略优于传统方法。



图 4 不同方案与探空数据计算的 IWV 对比

Fig.4 Comparison of IWV Time Series Derived from Radiosonde and Various Tomographic Results

表 1 对比计算 IWV 的统计结果/mm

Tab.1 Statistical Results of IWV/mm

数据对比	RMSE	STD	Bias	MAE
方法 1 与探空数据	3.81	6.00	2.51	3.16
方法 2 与探空数据	3.54	5.90	2.08	2.92

通过不同方法反演水汽计算得到的 IWV 与探空数据计算结果对比发现,两种方法的 RMSE、STD、Bias 和 MAE 相差很小,说明两种层析方法结果与探空结果均具有很好的一致性,但这并不能保证反演水汽的三维垂直分布一定正确。由于任意互换研究区域内垂直方向上两层的位置, IWV 的总值保持不变,但水汽的三维垂直分布发生了很大的变化,为了进一步检验水汽反演结果在垂直方向上的精度,分别对 2014-04-02 UTC 00:00 和 2014-04-10 UTC 12:00 反演得到的水汽垂直廓线进行对比,如图 5 所示。选取这两个历元的数据进行对比是因为这两个历元分别对应着研究时段内最大和最小的 IWV。

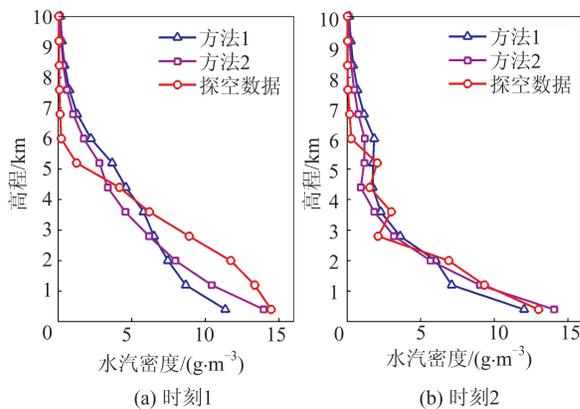


图 5 两种方法与探空数据水汽密度廓线对比

Fig.5 Water Vapor Density Profile Derived from Radiosonde and Various Tomographic Results

由图 5 可以看出,方法 1 和方法 2 反演水汽得到的三维垂直分布与探空计算结果均有很好的-一致性,通过计算得出,方法 2 在两个时刻反演的水汽结果 RMSE 分别为 1.65 g/m^3 和 1.01 g/m^3 ,

均优于方法 1 的 RMSE (分别为 2.12 g/m^3 和 1.34 g/m^3),这说明融合 ECMWF 格网数据反演水汽的垂直分布也优于传统方法。

3.4 水汽密度廓线对比

为了检验水汽反演结果在垂直方向上的精度,对层析时段(2014-03-25—2014-04-19)内共 52 个历元的层析结果进行分析。图 6 给出了两种方法在 2014-03-25—2014-04-29 不同层上的水汽分布情况。由于第 9 到第 13 层水汽密度值相差不大,因此,图 6 中未给出不同层之间的分割线。

由图 6 可以看出,方法 2 反演的水汽密度分布与探空数据计算结果有更好的一致性。由两种方法的 RMSE 也可以得出,本文提出的方法其水汽反演结果优于传统方法。

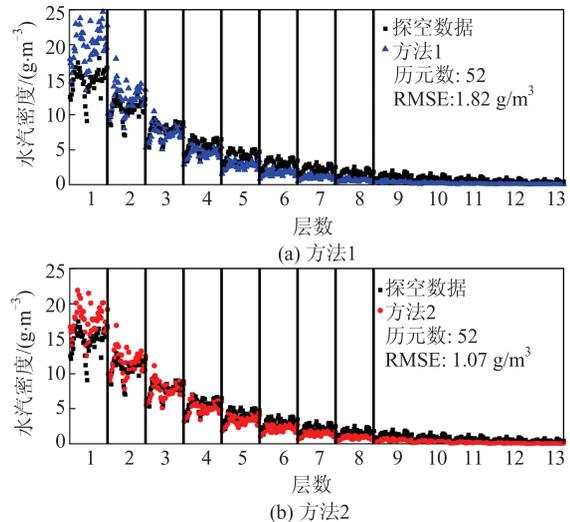


图 6 不同方法水汽层析结果对比(2014-03-25—2014-04-19)

Fig.6 Comparison of Tomographic Results with Different Methods(2014-03-25—2014-04-19)

此外,对每天两种方法反演水汽的精度进行统计,利用反演得到的水汽信息计算无线电探空站所在位置的水汽密度值,并分别与探空数据计算结果进行对比。图 7 给出了每天两种方法与探空数据对比的 RMSE;表 2 给出了 26 天不同方案与探空数据对比的统计结果。

由图 7 可以看出,方法 2 反演得到的水汽密度的 RMSE 均小于方法 1 的结果;通过对 26 天的结果进行统计(见表 2)可以看出,方法 2 反演得到的水汽密度在 RMSE、MAE 和 Bias 方面均优于方法 1 的结果。这说明利用 ECMWF 格网数据对传统层析模型进行精化后,层析结果较传统方法有所改进。

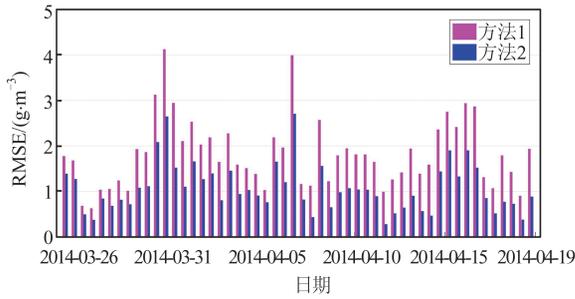


图7 两种方法层析结果与探空对比的RMSE
Fig.7 RMSE of Two Methods Compared with Radiosonde

表2 层析结果与无线电探空仪对比误差统计/(g·m⁻³)

Tab. 2 Statistical Results of Water Vapor Density Between Radiosonde and Different Methods/(g·m⁻³)

与探空数据对比	RMSE			MAE			Bias		
	均值	最大值	最小值	均值	最大值	最小值	均值	最大值	最小值
方法1	1.82	4.11	0.62	1.21	2.57	0.47	-0.15	0.46	-0.77
方法2	1.07	2.70	0.28	0.78	1.84	0.23	-0.11	0.41	-0.68

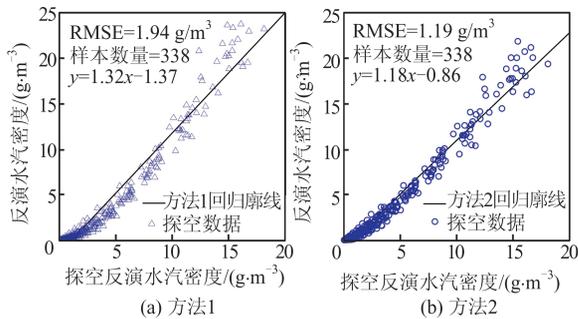


图8 不同方法与探空数据对比水汽密度采样点分布图
Fig.8 Scatter Plots of Water Vapor Density Between Different Methods and Radiosonde

由统计的338个采样样本可得,对方法2层析结果进行随机采样得到的 $RMSE=1.19\text{ g/m}^3$ 优于方法1的层析结果的 $RMSE=1.94\text{ g/m}^3$ 。此外,由采样样本的分布也可以看出,方法2得到的采样样本分布与其回归廓线具有更好的符合性。融合ECMWF格网数据精化层析模型后,方法2将其回归廓线斜率由原来的1.32降到1.18, RMSE由原来的 1.94 g/m^3 减小到 1.19 g/m^3 ,进一步体现了本文提出方法的优越性。

3.6 整体精度检验

为进一步验证本文提出方法对整体重构结果的质量,选取6天的数据进行了如下实验:在其他设置不变的情况下,只利用研究区域内11个测站进行层析实验,而另外一个测站(HKSC)作为检验测站。首先,利用GPS观测值和实测气象数据计算HKSC测站上的SWV;然后,与水汽反演得到的SWV进行对比,并计算每天每小时一次的RMSE,如表3所示。

3.5 水汽密度随机采样对比

由图6可知,水汽密度在不同高度上的数值相差较大,只将某一层的数据进行对比并没有说服力,因此,为了消除人为选取数据对对比结果的影响,对实验时段(2014-03-25—2014-04-19)内两种方法反演得到的水汽密度进行随机采样,并将采样样本(共338个)与相对应的探空数据计算结果进行对比,得到不同方法与探空数据对比的水汽密度采样分布图如图8所示。

表3 不同层析方法得到的水汽密度精度统计/mm

Tab. 3 RMSE of Water Vapor Density for Different Methods/mm

日期	RMSE	
	方法1	方法2
2014-03-25	4.76	4.25
2014-03-30	4.17	3.18
2014-04-06	6.54	5.66
2014-04-10	2.34	1.95
2014-04-17	2.15	1.94
2014-04-23	4.83	2.19

由表3可以看出,在选取的7天中,方法2反演的SWV的RMSE均小于方法1的结果,体现了本文提出方法对整体重构结果的有效性。

4 结语

针对传统层析方法的缺点,提出了融合ECMWF格网数据精化水汽层析模型的方法。首先,利用ECMWF ERA-Interim格网数据计算层析区域每个网格内的水汽密度初值;然后,将其作为先验信息加入层析模型。该方法增加了法方程求逆过程中的稳定性,使层析结果更加趋于真值。针对层析模型中各类方程权比确定的问题,提出了一种基于各类信息后验残差和一致性检验确定各类方程权比信息的方法。

利用中国香港GPS网26天的实测GPS和气象数据进行实验,验证了本文方法的可行性。将探空数据计算的水汽密度作为真值,发现本文提出的方法较传统方法能够有效地提高层析结果

的精度,反演水汽密度的RMSE由原来的 1.82 g/m^3 减小到了 1.07 g/m^3 ,Bias和MAE也分别从 -0.15 g/m^3 、 1.21 g/m^3 减小到 -0.11 g/m^3 、 0.78 g/m^3 ,这说明本文方法在RMSE、Bias和MAE等方面均优于传统层析方法。此外,在IWV、水汽密度廓线和整体精度对比方面,本文方法也均优于传统方法,进一步证实了本文提出方法的优越性。

致谢:感谢IGRA提供的探空数据资料,ECMWF提供的温度、相对湿度等网格数据,以及中国香港地政总署提供的实验数据。

参 考 文 献

- [1] Huang Yong, Zhai Jing, Qiu Xuexing. Analysis of a Convective Weather Process Based on Remote Sensing Data in the Huaihe River Basin[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2013, 29(2): 19-26 (黄勇,翟菁,邱学兴. 淮河流域一次强对流性天气过程的遥感观测分析[J]. 气象与环境学报, 2013,29(2):19-26)
- [2] Rocken C, Ware R, Van Hove T, et al. Sensing Atmospheric Water Vapor with the Global Positioning System[J]. *Geophysical Research Letters*, 1993, 20(23): 2 631-2 634
- [3] Bevis M, Businger S, Herring T A, 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
- [4] Flores A, Ruffini G, Rius A. 4D Tropospheric Tomography Using GPS Slant Wet Delays[J]. *Annales Geophysicae*, 2000, 18(2): 223-234
- [5] Troller M, Burki B, Cocard M, et al. 3-D Refractivity Field from GPS Double Difference Tomography [J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(24), DOI: 10.1029/2002GL015982
- [6] Perler D, Geiger A, Hurter F. 4D GPS Water Vapor Tomography: New Parameterized Approaches [J]. *Journal of Geodesy*, 2011, 85(8): 539-550
- [7] Chen Biyan, Liu Zhizhao. Voxel-Optimized Regional Water Vapor Tomography and Comparison with Radiosonde and Numerical Weather Model[J]. *Journal of Geodesy*, 2014, 88(7): 691-703
- [8] Braun J, Rocken C, Meertens C, et al. Development of a Water Vapor Tomography System Using Low Cost L1 GPS Receivers[C]. The 9th ARM Science Team Meeting Proceedings, San Antonio, Texas, USA, 1999
- [9] Yao Yibin, Zhao Qingzhi. Novel, Optimized Approach of Voxel Division for Water Vapor Tomography [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2017, 129(1): 57-70
- [10] Yao Yibin, Zhao Qingzhi. Maximally Using GPS Observation for Water Vapor Tomography [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(12): 7 185-7 196
- [11] Zhao Qingzhi, Yao Yibin, Yao Wanqiang. A Troposphere Tomography Method Considering the Weighting of Input Information [J]. *Annales Geophysicae*, 2017, 35(6): 1 327-1 340
- [12] Zhao Qingzhi, Yao Yibin, Cao Xinyun, et al. An Optimal Tropospheric Tomography Method Based on the Multi-GNSS Observations [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(2): 234
- [13] Bender M, Raabe A. Preconditions to Ground Based GPS Water Vapour Tomography [J]. *Annales Geophysicae*, 2007, 25(8): 1 727-1 734
- [14] Rohm W, Bosy J. Local Tomography Troposphere Model over Mountains Area [J]. *Atmospheric Research*, 2009, 93(4): 777-783
- [15] Xia Pengfei, Cai Changsheng, Dai Wujiao, et al. Three-Dimensional Water Vapor Tomography Using Ground-Based GPS and COSMIC Occultation Observations [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(8): 892-896 (夏鹏飞,蔡昌盛,戴吾蛟,等. 地基GPS联合COSMIC掩星数据的水汽三维层析研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013,38(8):892-896)
- [16] Bender M, Dick G, Ge M, et al. Development of a GNSS Water Vapor Tomography System Using Algebraic Reconstruction Techniques [J]. *Advances in Space Research*, 2011, 47(10): 1 704-1 720
- [17] Song Shuli, Zhu Wenyao, Ding Jincai. Shanghai GPS Network Tomography Vapor Three-Dimensional Distribution to Improve Numerical Forecast Humidity Field [J]. *Journal of China Sci Bulletin*, 2005, 50(20): 2 271-2 277
- [18] Elosegui P, Ruis A, Davis J L, et al. An Experiment for Estimation of the Spatial and Temporal Variations of Water Vapor Using GPS Data [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 1998, 23(1): 125-130
- [19] Guo Jiming, Yang Fei, Shi Junbo, et al. An Optimal Weighting Method of Global Positioning System (GPS) Troposphere Tomography [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, 9(12): 5 880-5 887
- [20] Perera G, Carrasco H, Diaz V, et al. Mathematical Statistics: On the Hartley-Bartlett Test [J]. *Internation-*

- tional Journal of Mathematical Education in Science and Technology*, 1996, 27(4): 553-559
- [21] Mendes V B. Modeling the Neutral-Atmospheric Propagation Delay in Radiometric Space Techniques [D]. Fredericton, New Brunswick, Canada: University of New Brunswick, 1999
- [22] Rocken C, Hove T V, Johnson J, et al. GPS/STORM-GPS Sensing of Atmospheric Water Vapor for Meteorology [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1995, 12(3): 468-478
- [23] Saastamoinen J. Contributions to the Theory of Atmospheric Refraction [J]. *Bulletin Geodesique*, 1972, 105 (1):279-298
- [24] Niell A E, Coster A J, Solheim F S, et al. Comparison of Measurements of Atmospheric Wet Delay by Radiosonde, Water Vapor Radiometer, GPS, and VLBI [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2001, 18(6): 830-850
- [25] Adeyemi B, Joerg S. Analysis of Water Vapor over Nigeria Using Radiosonde and Satellite Data [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2012, 51(10): 1 855-1 866

A Method to Sophisticate the Water Vapor Tomography Model by Combining the ECMWF Grid Data

ZHAO Qingzhi¹ YAO Yibin² XIN Linyang²

1 College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China

2 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Objectives: GNSS tomography technique is one of the most important methods to obtain the three-dimensional water vapor information. However, due to lack of enough initial prior information in the process of building the tomography model, the design matrix of tomography model is unstable and the tomographic result is poor, which has become an urgent problem to be resolved. **Methods:** First of all, the grid data derived from European Center for Medium-Range Weather Forecasting (ECMWF) is used to calculate the initial value of water vapor density in every voxel of interest area. And then, sophisticating the traditional tomography modeling using the calculated initial water vapor values. Finally, the influence of weightings of different equations in tomography model on tomographic result is also considered. **Results:** Comparing to the traditional methods, the proposed approach can enhance the accuracy of tomographic result by 41.2%, and its root mean squared error (RMSE) decreases from 1.82 g/m³ to 1.07 g/m³. Additionally, the mean absolute error (MAE), Bias and standard deviation (STD) also show a better performance than those of the traditional methods. **Conclusions:** The purpose is to improve the accuracy of tomographic water vapor profiles and used to sophisticate the established tomography model.

Key words: water vapor tomography; design matrix; European Center for Medium-Range Weather Forecasting (ECMWF); radiosonde

First author: ZHAO Qingzhi, PhD, associate professor, specializes in GNSS water vapor inversion. E-mail: zhaqingzhia@163.com

Foundation support: The China Postdoctoral Science Foundation Program (2020M673442); the National Natural Science Foundation of China (41904036); the Natural Science Basic Research Plan in Shaanxi Province of China (2020JQ-738).

引文格式: 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):1131-1138. DOI:10.13203/j.whugis20190323(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):1131-1138. DOI:10.13203/j.whugis20190323)