

文章编号: 1001-1595(2010)05-0491-06

约束条件对 GPS 水汽层析解算的影响分析

于胜杰^{1,2}, 柳林涛¹, 梁星辉^{1,2}

1. 中国科学院 测量与地球物理研究所动力大地测量学重点实验室, 湖北 武汉 430077; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049

Influence Analysis of Constraint Conditions on GPS Water Vapor Tomography

YU Shengjie^{1,2}, LIU Lintao¹, LIANG Xinghui^{1,2}

1. Key Laboratory of Dynamic Geodesy, Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Various constraint conditions used in the tomography are presented in detail firstly. Then, their effects on the results of the tomography are analyzed based on two simulated GPS networks with different altitudes. As the results shown, with the water vapor changing gently in horizontal direction, the weight matrix of horizontal constraints have a large effect on the result of the tomography. In addition, with small altitude differences between stations in the GPS network it will be difficult to detect the water vapor only using the GPS technique, and the solution of the tomography relies highly on the accuracy of a prior information from other water vapor detectors. However, with great altitude difference between stations, the dependence of the tomography solution on a prior information is decreased obviously, and thus it can be got a reliable result even without a prior information.

Key words: GPS meteorology; water vapor; tomography; constraint condition

摘 要: 对水汽层析中用到的各种约束条件进行详细阐述, 并利用模拟的两个 GPS 网分析约束条件对层析解算的影响。结果表明, 当水汽在水平方向变化较为平缓时, 水平约束方程的权阵对层析结果具有较大的影响。当 GPS 网测站间的相对高差较小时, 仅利用 GPS 技术很难实现对水汽的准确监测, 且层析结果的可靠性在很大程度上依赖于先验信息的精度。但是, 对于测站间相对高差较大的 GPS 网来说, 层析结果对先验信息的依赖性明显减弱, 即使不采用其他观测手段获取的先验信息, 也能得到可靠的层析解。

关键词: GPS 气象学; 水汽; 层析; 约束条件

中图分类号: P228

文献标识码: A

基金项目: 国家自然科学基金(NSFC40574009)

1 引言

水汽是大气中活跃多变的成分, 在大气能量传输和天气系统演变中起着非常重要的作用^[1]。然而, 传统的气象观测手段, 如无线电探空仪、气象卫星和微波辐射计等, 由于观测时间间隔长、观测精度低和价格昂贵等缺点, 无法实现对水汽的高时空分辨率监测。近年来, 在 Bevis 等提出地基 GPS 气象学研究的基础上^[2], Flores 等尝试利用层析技术来获取水汽的三维分布^[3], 为气象学研究提供了新的观测手段。但是, 由于局域网内有限的 GPS 接收机及它们在空间的特定分布, 某一时间段内穿过对流层的射线数目是有限的, 且分布不均匀, 这直接导致了层析模型观测方程的不适定性, 成为 GPS 水汽层析技术必须克服的关键问题之一。

为解决这一问题, 国内外学者进行了大量的研究^[4-11]。Flores 等通过附加水平、垂直约束方程的方法解决了观测方程的不适定性, 并指出要想仅利用 GPS 技术获取水汽的三维分布, 测站间必须具有较大的相对高差^[3]。宋淑丽等利用高斯加权函数构建水平约束方程, 并将数值预报结果作为先验信息对垂直方向上的网格进行约束^[7]。Champollion 等利用了标准大气参数作为约束信息^[8], 而 Skone 等将无线电探空仪的观测结果作为垂直约束信息^[9]。毕研盟等在水平方向上采取了平滑约束, 并将无线电探空仪的观测结果作为垂直约束信息, 结果表明该先验信息对解算结果具有很大影响^[10]。上述研究均采用附加约束条件的方法来解决观测方程的不适定性问题, 但是, 他们仅采用某一约束条件实现层析解算, 而对约束条件的适用性及对层析结果的影响缺乏系统的

比较和分析。

为了系统地研究约束条件在层析解算中的作用,本文在介绍了各种约束条件的基础上,通过模拟试验详细研究了在不同水汽条件下,不同约束条件对层析解算的影响,为GPS水汽层析技术更好地应用于气象学研究提供了参考。同时,还考虑了GPS网中测站间相对高差的影响,这也为用于气象研究的区域GPS网的布设提供了理论依据。

2 GPS水汽层析的基本原理

GPS卫星发射的无线电信号在穿过对流层时,由于对流层折射的影响而产生一定的延迟,该延迟可以表示为如下形式^[9]

$$\Delta L = 10^{-6} \int_{path} N ds \quad (1)$$

其中, N 为大气折射率,可以表示为静力学折射率 N_h 和湿折射率 N_w 之和,这样由水汽所引起的湿延迟 SWD (slant wet delay) 就可以表示为:

$$SWD = 10^{-6} \int_{path} N_w ds \quad (2)$$

在高精度的GPS数据处理软件中,一般将测站至卫星方向上的斜路径延迟表示为天顶延迟参数与映射函数的乘积,并将大气折射的各向异性部分模型化为南北方向和东西方向的梯度参数,在数据处理中与其他参数一并解算。在获得了以上参数后,可以重构斜路径上的湿延迟^[3]

$$SWD = m_w(e)L_w + \cot e(G_N^w \cos \phi + G_E^w \sin \phi) + R \quad (3)$$

其中, L_w 为天顶方向的湿延迟参数; m_w 为湿映射函数; e 和 ϕ 分别为卫星的高度角和方位角; G_N^w 和 G_E^w 分别为南北向、东西向的水汽梯度信息; R 为数据处理过程中生成的残差。

通过对GPS数据处理得到 SWD 后,还无法直接解算式(2)所示的积分方程以得到湿折射率参数,于是引入层析技术,将整个局域网上空的对流层按经度、纬度和大地高方向划分为许多小网格,并假设该网格内的湿折射率参数在一段时间内(如30 min)为一定值。这样,就可以将该积分形式(2)转化为求和的形式。

按经度、纬度和大地高方向对每一网格逐一编号,并令 x_i 表示网格 i 内的湿折射率参数,则对某一射线 j 来说,该路径上的湿延迟可以表示为如下的求和的形式

$$\sum s_{ij} x_i = SWD_j \quad (4)$$

其中, s_{ij} 表示射线 j 穿过网格 i 的长度,当射线不穿过网格 i 时,其值为0。

将所有的湿延迟参数 SWD 均表示为上述的求和形式,然后将其表示为矩阵形式:

$$AX = B \quad (5)$$

其中, X 为未知参数向量,即所有网格的大气湿折射率参数; B 为所有的 SWD 参数组成的观测值向量; A 为系数矩阵,其第 j 行第 i 列的元素表示第 j 条射线穿过第 i 个网格的长度。

对GPS水汽层析来说,由于射线的分布情况,有些网格是没有射线穿过的,这就导致了该观测方程的不适定性。解决这个问题最常用的方法是附加一定的约束条件,该约束条件可以是根据空间的相关性而建立的约束方程,也可以是利用其他观测手段得到的先验约束信息。结合上述观测方程和约束条件,便可以利用最小二乘法进行水汽层析解算。下面将对这些约束信息进行详细的介绍。

3 各种约束条件的形式及意义

3.1 利用水汽参数在空间的相关性建立的约束方程

由于大气中的水汽在空间分布上的连续性,一般利用网格在空间的位置建立起网格的湿折射率参数与其周围网格参数之间的数学关系。Flores等列出了该约束方程的基本形式^[3]

$$0 = w_1 x_1 + \dots + w_j - 1 x_j - 1 - x_j + w_{j+1} x_{j+1} + \dots \quad (6)$$

其中, x_j 为网格 j 的湿折射率参数; w_i 为系数,其值一般根据该网格与网格 j 的距离来确定。该平滑约束一般应用于同一层的网格之间,宋淑丽等利用了高斯加权函数的方法来确定系数的值^[7],即

1. 当 i 与 j 位于不同层时, w_i 值为0;
2. 当 i 与 j 位于同一层时,其值由式(7)确定

$$w_i = \frac{e^{-\frac{d_{i,j}^2}{2\sigma^2}}}{\sum_{ii} e^{-\frac{d_{ii,j}^2}{2\sigma^2}}} \quad (7)$$

其中, $d_{i,j}$ 为网格 i 与网格 j 之间的距离; ii 为与 j 同一层的其他网格; σ 为平滑因子。

在垂直方向上,针对湿折射率参数随着高度的增加而指数递减的特性,采取指数相关性建立起参数间的关系^[3]。假设平均湿折射率廓线符合指数变化规律,则其表达形式为^[12]

$$N(z) = N_s e^{-z/H} \quad (8)$$

其中, N_s 为地表面的湿折射率; z 为大气高度; H

为水汽标高, 通常取 1~2 km。

根据式(8), 可以建立相邻两层网格的水汽参数间的关系。假设较低一层的高度和湿折射率分别为 h_1 和 N_1 , 相邻的较高一层的高度和湿折射率分别为 h_2 和 N_2 , 则两相邻层的湿折射率间的约束关系可以表示为

$$N_2/N_1 = e^{(h_1 - h_2)/H} \quad (9)$$

3.2 利用先验信息建立的约束方程

上文提到了在层析解算中用到的各种先验信息, 如数值预报结果、标准大气参数和无线电探空仪的观测结果等; 在有的文献中^[3,7], 也提到了最上层零约束, 即将最上层网格的湿折射率参数约束为零, 这其实也可以归结为一种先验信息。在本文中, 将利用多年的无线电探空观测数据, 对某地的湿折射率参数进行统计分析, 得到其均值和标准差, 并将该统计结果作为先验信息建立约束方程。该统计信息的优点在于, 它可以应用到该地任何时间的层析试验中, 避免了针对某一特定时刻选择合适先验信息的繁杂。利用上述信息建立约束方程的数学模型可表示为

$$HX = (L_1 \ L_2 \ \dots \ L_m \ \dots \ L_k)^T \quad (10)$$

其中, k 为对流层在大地高方向划分的层数; L_1, L_2, \dots, L_m 均为 ij 维行向量(ij 为同一层内水平网格的数目), $L_m = [x_{m0}, x_{m0}, \dots, x_{m0}]$ 。由于利用无线电探空数据的统计结果为每个网格赋值, 所以 H 取为单位阵, x_{m0} 为第 m 层高度处无线电探空数据的统计均值。同时, 利用无线电探空数据在各个高度上的统计标准差可建立起该约束方程的权阵。

图 1 为利用武汉地区某无线电探空站点 2003~2006 年的观测数据, 得到的该地全年和某一月份(这里取的是 7 月份)的统计结果。在下面的模拟试验中, 将分别使用这两种不同精度的先验信息作为约束条件, 分析先验信息的精度对层析结果的影响。

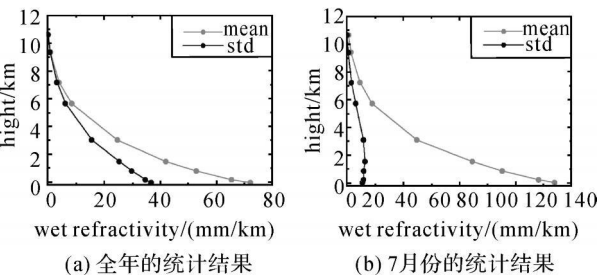


图 1 无线电探空数据的统计分析结果

Fig. 1 The statistics result of the radiosonde observations

4 模拟试验

下面将利用模拟试验来验证各种约束条件对层析解算的影响。层析的区域设定为 30.4° N~30.8° N, 113.9° E~114.3° E, 大地高方向上为 0~10 km。在该区域内模拟了 8 个测站用于层析试验, 测站的位置分布及水平网格的划分情况如图 2 所示(这里将该 GPS 网络称为 GPS 网 1)。在这 8 个测站中, 大地高最大为 131 m, 最小为 25 m, 测站间大地高的最大差值为 106 m。在大地高方向上, 分辨率设定为 1 km。这样在该层析试验中, 一共需要解算 $4 \times 4 \times 10 = 160$ 个湿折射率参数。

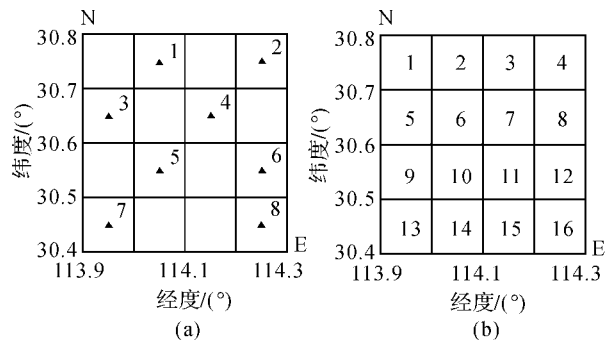


图 2 测站的位置分布和水平网格的划分情况

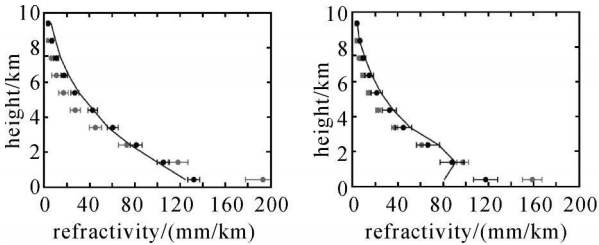
Fig. 2 The distribution of the stations and the voxels used in the tomography

利用无线电探空仪的观测结果模拟出每个网格的湿折射率值, 并结合当天卫星的实际位置和层析区域的网格划分情况, 模拟出接收机至卫星连线方向上的湿延迟参数(卫星截止高度角取为 5°), 并在此基础上加入一定的观测误差, 生成用于层析的观测值 SWD 。为了分析层析模型对各种水汽条件的监测能力, 利用武汉地区 2006 年 7 月某两天的无线电探空结果模拟了湿折射率真值的两种情况: 情况 1 为水汽分布的一般情况, 即水汽湿折射率随着高度的增加而严格地减小, 情况 2 为一特殊情况, 即在一定高度内存在湿折射率随高度的增加而增加的情况。采用如下三种方法进行层析解算:

1. 水平方向上采用高斯加权函数进行平滑约束, 垂直方向上采用指数规律进行约束, 并对最顶层采取零约束;
2. 水平方向上采用高斯加权函数进行平滑约束, 垂直方向上采用 7 月份的水汽统计结果进行约束(该约束信息精度较高)。
3. 水平方向上采用高斯加权函数进行平滑

约束,垂直方向上采用全年的水汽统计结果进行约束(该约束信息精度偏低)。

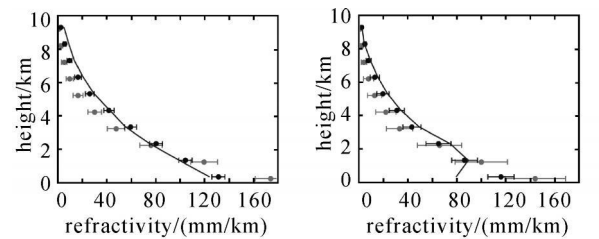
图3和图4为层析解算的结果。从图中可以看出,对于水汽真值1来说,只有方法2的结果与真值符合的较好。这说明利用该GPS网,仅采用GPS技术,而不采用其他观测手段提供的先验信息,是无法实现对水汽的准确监测的。另外,通过对方法2和方法3的结果比较发现,只有利用高精度的先验信息作为约束才能得到可靠的解算结果。但对于水汽真值2来说,即使利用方法2,即利用较高精度的先验信息作为约束,也无法监测在较低层出现的水汽随高度的增加而增加的情况。为了从数值上反映层析解算结果的误差情况,对其进行统计分析,其均方根误差(root mean square, RMS)见表1。



(a) 利用水汽真值1进行的试验 (b) 利用水汽真值2进行的试验

图3 模拟试验的层析结果。其中实线表示的是模拟的水汽真值,灰色误差棒表示方法1的结果,黑色误差棒表示方法2的结果

Fig. 3 The result of the simulation experiment. The solid line is the simulated refractivity, and the grey and black error bars are the results of the method 1 and method 2, respectively



(a) 利用水汽真值1进行的试验 (b) 利用水汽真值2进行的试验

图4 模拟试验的层析结果。其中实线表示的是模拟的水汽真值,灰色误差棒表示方法3的结果,黑色误差棒表示方法2的结果

Fig. 4 The result of the simulation experiment. The solid line is the simulated refractivity, and the grey and black error bars are the results of the method 3 and method 2, respectively

表1 层析结果的均方差误差

Tab. 1 The RMS of the tomography solution

	RMS(真值 1)		RMS(真值 2)	
	GPS 网 1	GPS 网 2	GPS 网 1	GPS 网 2
方法 1	24.2	6.9	26.3	4.2
方法 2	4.4	4.3	12.6	2.7
方法 3	18.9	14.8	22.4	13.8

上面所采用的三种解算方法,在水平方向上均采用高斯加权函数进行平滑约束,其系数的大小主要取决于平滑因子 σ 值的选取。为了分析高斯加权函数中 σ 的取值对层析结果的影响,采用方法2对水汽真值1的情况进行模拟解算。结果表明,当 σ 取2到30之间的整数值时,层析结果的均方根误差最大为4.59mm,最小为4.21mm。这说明,在对本文所模拟的水平方向变化平缓的水汽情况来说,平滑因子 σ 的取值对层析结果的影响很小。另外,在实际的解算中,水平约束方程权阵的确定也是必须要解决的一个问题。图5为水平约束方程的误差和解算结果的均方根误差的对应关系。从图中可以看出,其权值的大小对层析解算的结果具有十分显著的影响,当其标准差由小变大时(即权值由大变小时),解算结果的均方根误差明显变大,且趋于稳定。

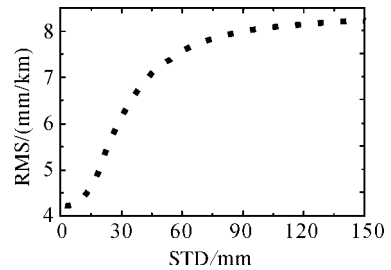


图5 水平约束方程的标准差与层析结果的均方根误差的对应关系

Fig. 5 The relationship between the standard deviation of the horizontal constraint conditions and RMS of the tomography solution

为了实现对真值2所示水汽情况的准确探测,可以采取如下三种方案:一是采用更高精度的先验信息;二是增加局域网中测站的数目;三是优化GPS测站的分布(这里仅考虑测站在高度方向上的分布)。从图4的结果看出,先验信息的精度对层析结果具有很大的影响,因此,采用方案1显然有利于水汽的准确监测。从增加测站数的角度

讲, 测站的增加意味着观测射线的增加, 这将降低观测方程的不适定性, 从而得到符合实际情况的解。因此, 这里不再对前两个方案做讨论, 仅对测站间相对高差对水汽层析的影响进行讨论。

在上述 GPS 网的基础上, 将测站 4, 5, 8 的大地高由原来的 25 m, 131 m, 34 m 提高到 1 025 m, 1 131 m 和 1 034 m (将提高大地高后的 GPS 网络称为 GPS 网 2), 这样测站间的相对高差最大达到 1 106 m。仍利用上面的方法进行解算, 图 6 为解算结果。从图中可以看出, 两种方法均可准确地监测到水汽随高度的变化情况, 尤其是对于水汽情况 2, 测站间的相对高差提高后, 即使仅利用 GPS 技术, 而不采用其他的先验信息, 也可以得到较准确的三维水汽分布。同样将层析结果的误差进行统计分析, 其误差如表 1 所示。从中可以看出, 提高测站间的相对高差, 使得各种方法的均方根误差均有所减小。这也说明了测站间相对高差较大的 GPS 网对层析模型来说是有利的。

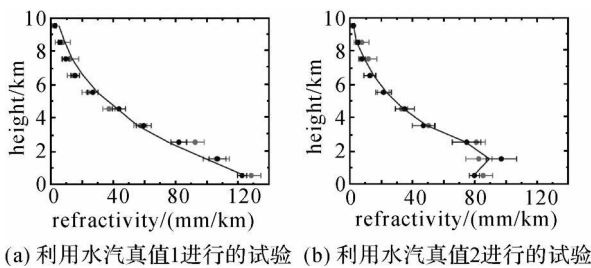


图 6 模拟试验的层析结果。其中实线表示的是模拟的水汽真值, 灰色误差棒表示方法 1 的结果, 黑色误差棒表示方法 2 的结果

Fig. 6 The result of the simulation experiment. The solid line is the simulated refractivity, and the grey and black error bars are the results of the method 1 and method 2, respectively

为了从数学上分析两个层析模型的优劣, 对其进行数值分析。由于观测方程的秩亏性, 将观测方程和水平约束方程的系数阵作为一个整体的矩阵进行分析。对两个 GPS 网来说, 该矩阵的秩均等于待求参数的个数, 其奇异值分解 (singular value decomposition, SVD) 结果如表 2 所示。从表中可以看出, 利用 GPS 网 2 所建立的层析模型, 在附加同样水平约束的情况下, 其系数阵奇异值的最小值已由原来的 10^{-8} 量级提高到了 0.99。这说明利用 GPS 网 2 建立的层析模型是优于 GPS 网 1 的层析模型的, 同时也验证了上面提到的层析结果对先验信息依赖性降低的问题。

表 2 奇异值分解结果

Tab. 2 The result of the singular value decomposition of the coefficient matrix

	奇异值最大值	奇异值最小值
GPS 网 1	27.62	2.29×10^{-8}
GPS 网 2	28.29	0.99

5 结 论

利用测站间相对高差不同的两个 GPS 网建立的模拟试验, 本文详细研究了各种约束条件对 GPS 水汽层析模型的影响。主要结论如下:

1. 当局域 GPS 网测站间相对高差较小时, 仅将利用相关性建立的约束方程作为约束条件, 不能对水汽随高度的分布进行准确的监测。
2. 采用其他观测手段获得的水汽资料作为先验信息, 将提高 GPS 层析结果的可靠性。但先验信息的精度对层析结果具有十分重要的影响, 在先验信息精度较低的情况下, 很可能导致层析结果与真值偏离较大。
3. 当水汽在水平方向的变化较为平缓时, 水平约束方程的权阵对 GPS 水汽的层析结果具有较大的影响。
4. 先验信息在不同 GPS 网中的作用有较大差异。当局域 GPS 网间测站相对高差较小时, 先验信息对层析模型具有很大的影响。但当 GPS 测站间的高差较大时, 即使仅利用 GPS 技术, 而不采用其他观测手段提供的先验信息, 也可对水汽进行准确的监测。

基于上述结论, 在布设应用于气象学研究的局域 GPS 网时, 应根据实际情况尽量提高测站间的相对高差。另外, 应尽量辅以其他的水汽观测资料, 利用 GPS 水汽层析技术获得的高时空分辨率的水汽分布信息, 为城市的中尺度数值预报服务。

参考文献:

[1] ROCKEN C, WARE R, VAN HOVE T. Near Real-time GPS Sensing of Atmospheric Water Vapor[J]. Geophysical Research Letters, 1997, 24: 3221-3224.

[2] BEVIS M, BUSINGER S, HERRING T, et al. GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System [J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97(D14): 15787-15801.

[3] FLORES A, RUFFINI G, RIUS A. 4D Tropospheric Tomography Using GPS Slant Wet Delays [J]. Annales Geophysicae, 2000, 18: 223-234.

- [4] HIRAHARA K. Local GPS Tropospheric Tomography [J]. *Earth, Planets and Space*, 2000, 52(11): 935-939.
- [5] GRADINARSKY L P, JARLEM ARK P. Ground-based GPS Tomography of Water Vapor: Analysis of Simulated and Real Data[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2004, 82(1B): 551-560.
- [6] 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. (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.)
- [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] CHAMPOLLION C, MASSON F, BOUIN M N, et al. GPS Water Vapor Tomography: Preliminary Results from the ESCOMPTE Field Experiment [J]. *Atmospheric Research*, 2005, 74(1-4): 253-274.
- [9] SKONE S, HOYLE V. Troposphere Modeling in a Regional GPS Network[J]. *Journal of Global Positioning Systems*, 2005, 4(1-2): 230-239.
- [10] BI Y, MAO J, LI C. Preliminary Results of 4D Water Vapor Tomography in the Troposphere Using GPS[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2006, 23(4): 551-560.
- [11] TROLLER M, GEIGER A, BROCKMANN E, et al. Determination of the Spatial and Temporal Variation of Tropospheric Water Vapour Using CGPS Networks[J]. *Geophysical Journal International*, 2006, 167(2): 509-520.
- [12] ELŐSEGUI P, RUIS A, DAVIS JL, 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.

(责任编辑: 丛树平)

收稿日期: 2009-12-21

修回日期: 2010-03-09

第一作者简介: 于胜杰(1983—), 女, 博士生, 研究方向为 GPS 数据处理和地基 GPS 气象学。

First author: YU Shengjie(1983—), female, PhD candidate, majors in GPS data processing and ground-based GPS meteorology related research.

E-mail: shengjieyu@asch.whigg.ac.cn

(上接第 490 页)

空网导航数据的测量和计算公式[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.)

- [6] YAN Jianguo. Planetary Spacecraft Precision Orbit Determination and Planetary Gravity Field Research [R]. Shanghai: Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, 2009. (颜建国. 行星探测器精密定轨及行星重力场模型研究[R]. 上海: 中国科学院上海天文台, 2009.)
- [7] PAVLIS D, POULOSE S, MCCARTHY J. GEODYN II System Description: 1-5 [R]. Greenbelt: Hughes STX Corp, 2006.
- [8] ULLMAN R E. SOLVE Program: Mathematical Formulation and Guide to User Input [R]. Greenbelt: NASA Goddard Space Flight Center, 1994.
- [9] SMITH D E, LERCH F J, NEREM R S, et al. An Improved Gravity Model for Mars: Goddard Mars Model 1 [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98(E11): 20871-20889.
- [10] GAPCYNKI J P, TOLSON R H, MICHAEL W H J. Mars Gravity Field: Combined Viking and Mariner 9 Results [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1977, 82(28): 4325-4327.
- [11] LORELL J, BORN G H, CHRISTENSEN E J, et al. Gravity Field of Mars from Mariner 9 Tracking Data [J]. *Icarus*, 1973, 18(2): 304-316.
- [12] SEIDELMANN P K, ABALAKIN V K, BURSA M, et al. Report of the IAU/IAG Working Group on Cartographic Coordinates and Rotational Elements of the Planets and Satellites: 2000 [J]. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 2002, 82(1): 83-111.
- [13] STANDISH E M. JPL Planetary and Lunar Ephemerides: DE405/LE405 [R]. California: Jet Propulsion Laboratory, 1998: 1-18.
- [14] HEISKANEN W A, MORITZ H. *Physical Geodesy* [M]. San Francisco: W H Freeman and Company, 1967.
- [15] KAULA W M. *Theory of Satellite Geodesy. Applications of Satellite to Geodesy* [M]. Waltham: Blaisdell Pub Co, 1966.
- [16] TAYPLEY B, RIES J, BETTADPUR S, et al. GGM02—An Improved Earth Gravity Field Model from GRACE [J]. *Journal of Geodesy*, 2005, 79(8): 467-478.

(责任编辑: 丛树平)

收稿日期: 2010-01-05

修回日期: 2010-04-02

第一作者简介: 颜建国(1980—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为行星探测器精密定轨及行星重力场模型。

First author: YAN Jianguo(1980—), male, PhD, lecture, majors in planetary spacecraft precision orbit determination and planetary gravity field.

E-mail: jgyan_511@163.com