

联合 GPS 基准站和验潮站数据确定 海平面绝对变化

焦文海¹ 魏子卿¹ 郭海荣² 符 养³

(1 西安测绘研究所, 西安市雁塔路中段 1 号, 710054)

(2 信息工程大学测绘学院, 郑州市陇海中路 66 号, 450052)

(3 北京大学物理学院, 北京市海淀区中关村, 100871)

摘 要: 采用中国地壳运动观测网络工程厦门基准站的 GPS 观测数据以及厦门验潮站的验潮数据, 计算了厦门海域的海平面绝对变化速度, 并就高程变化问题作了深入讨论, 表明点位高程变化呈周期性, 几期 GPS 连续观测受其影响不能得出实际的高程线性变化速率, 指出了要监测验潮站的地壳垂直运动, 最好采用多年连续的 GPS 观测数据。

关键词: 验潮站; 海平面; GPS; 地壳垂直运动

中图法分类号: P229; P228.42

利用长期连续的 GPS 观测数据, 可以监测地面点高程随时间的变化^[1], 即用 GPS 技术可以确定验潮站水准点的地壳垂直形变, 结合验潮数据获得的海平面相对变化, 可以确定海平面的绝对变化^[2]。用验潮数据计算海平面的相对变化技术已很成熟, 文献[3]收集了我国沿海 42 个验潮站从 20 世纪 50 年代到 70 年代的验潮资料, 采用动态抗差模型计算了我国沿海平均海面及其升降变化, 认为我国 42 个验潮站分布的滨海南北距离约 1.8 万 km, 地壳平均升降小于 0.1mm/a, 在计算海面的升降计算时, 可以忽略。在这一前提下, 从宏观上得出我国近海海平面的上升速率约 0.621mm/a, 但采用平均的方法不能得到特定点处海平面的变化规律。本文采用中国地壳运动观测网络工程厦门基准站的 GPS 数据以及厦门验潮站的验潮数据, 计算了厦门海域的海平面绝对变化速度, 并就高程变化问题作了深入讨论。

1 基本原理

GPS 技术和验潮数据结合确定海平面的绝对变化, 实际上是以参考椭球面为验潮站水准点变化的参考基准, 用 GPS 技术确定验潮站水准点

的地壳垂直形变; 以水尺零点为海平面变化的参考基准, 用验潮数据确定海平面相对验潮站水尺零点的变化, 假定验潮站水准点和验潮站水尺零点处的地壳垂直形变相同, 间接获得验潮站处的绝对海平面变化。高精度 GPS 数据与验潮数据联合确定海平面绝对变化的模型为^[4]:

$$\Delta\zeta = \Delta H' - \Delta H_0 \quad (1)$$

式中, ΔH_0 为观测时间间隔内验潮站水准点的垂直地壳形变; $\Delta H'$ 为观测时间间隔内验潮站处海平面的绝对变化; $\Delta\zeta$ 为观测时间间隔内验潮得出的相对平均海面变化。如果将式(1)两边同时除以观测的时间间隔, 可得到平均海面的绝对变化速度 $\Delta H'$, 即

$$\Delta H' = \Delta H_0 + \Delta\zeta \quad (2)$$

可以看出, 绝对平均海面变化速度等于验潮站地壳垂直形变与相对海平面变化速度的代数和。

1.1 验潮站水准点垂直地壳形变的确定方法

确定一点的垂直地壳形变, 关键问题是高精度地获得该点的大地高。目前, GPS 观测时段一般以 1d 为一个时段, 将验潮站观测的 GPS 数据与已知站的 GPS 观测数据联合处理, 可得到当天验潮站的水准点大地高。获得验潮站水准点的垂直变化有两种方案: ① 进行多期 GPS 联测, 然后

将这几期的结果进行线性拟合,即可得到点位的高程变化,这时忽略了点位高程的周期性变化;
②如果是连续多年观测,可得到高程的时间序列,采用合适的时间序列分析方法可分离出高程变化的周期项和线性项,线性项就是要解算的地壳垂直形变速度 ΔH_0 。点位的高程可写为:

$$H(t) = H(t_0) + \Delta H_0(t - t_0) + \sum_{i=1}^n A_i \cos\left(\frac{2\pi}{T_i}(t - t_0) + \psi\right) \quad (3)$$

式中, $H(t_0)$ 为历元 t_0 时刻的验潮站高程; ΔH_0 为验潮站垂直地壳形变速度; $H(t)$ 为 t 时刻的验潮站高程; 第三项为高程的周期变化部分, 其中, i 为考虑的周期个数; A_i 为振幅; T_i 为周期; ψ 为周期变化的初相位。根据式(3), 在知道了具体的周期后, 采用最小二乘平差法即可获得验潮站的地壳垂直形变速度 ΔH_0 。

1.2 验潮站处相对海平面变化的确定方法

海面受许多动态因素的影响, 如受半日潮和全日潮、半月潮和全月潮、半年潮和全年潮的影响, 受月球近点轨道周期 8.847a 和月球轨道升交点运动周期 18.621 9a 的影响。此外, 还受全球温度上升造成的平均海平面升降的影响。总之, 海面的动态变化可以分为平均海面部分、线性变化部分和周期性变化部分三部分, 具体可写成^[3]:

$$\zeta(t) = \zeta(t_0) + \Delta\dot{\zeta}(t - t_0) + \sum_{i=1}^n B_i \cos\left(\frac{2\pi}{T_i}(t - t_0) + \Phi_i\right) \quad (4)$$

式中, $\zeta(t_0)$ 为历元 t_0 时刻的平均海面; $\Delta\dot{\zeta}$ 为海平面相对变化速度; 第三项为周期变化部分, 其中, n 为考虑的潮波数; B_i 为周期变化的振幅; T_i 为各潮波的周期; t 为时间变量; Φ_i 为周期变化的初相位。在式(4)中, 各潮波的周期是已知的, 同样可以根据最小二乘估计出海平面的相对变化速度 $\Delta\dot{\zeta}$ 。

2 地面点高程变化的讨论

要确定验潮站的地壳垂直形变, 有必要对地面点高程变化的特性作深入分析。地面点高程方向的变化特性不同于水平方向, 水平方向运动主要由板块运动引起, 其线性运动的振幅远大于其他地球物理因素引起的周期运动的振幅。因此, 线性运动是水平运动的主要特征, 它的量级约几 cm/a, 较易用 GPS 定期复测获得。而高程方向线

性速度的监测要困难得多, 其原因之一是 GPS 技术在高程方向的测量精度要比水平方向低 2~3 倍; 二是台站高程方向的运动由诸多地球物理因素引起, 以季节性变化为主, 较小量级的 (mm/a) 线性运动与诸多振幅较大的周期运动融合在一起, 只有通过较长时间的连续观测和精细频谱分析才能得到可靠的高程运动结果^[1, 3]。

台站高程的季节变化包括极潮、海潮、大气潮、非潮汐海洋负荷变化、地下水变化等。确定点位高程时, GPS 技术本身也可引起台站高程坐标的变化, 如 GPS 卫星天线相位中心变化等。极潮变化周年项的振幅在 0.1 mas 左右, 由它引起的台站坐标高程方向的周年变化可达 4 mm。海潮改正正在 GPS 数据处理时已经考虑, 但由于存在分潮波频率偏差和海潮模型系数对有些台站误差较大等因素, 由海潮引起高程方向的周年变化在计算中不可能完全消除, 海潮改正的残余部分可以引起台站坐标的周年变化。大气潮在 GPS 数据处理时没有考虑, 主要受到气象资料的限制。根据 GFZ 的大气潮计算结果, 有些台站大气潮引起高程的周年变化可达 4 mm, 有些台站半年变化项可达 1.8 mm。海洋非潮汐改正是由海风、大气压变化和海洋热交换使海洋质量发生变化引起的。根据 T/P 卫星资料计算, 该项改正的周年项在低纬度和沿海地区有 2~3 mm。

目前, GPS 处理软件采用的 Niell 大气映射模型采用流体静力学原理来估计总的天顶延迟参数。该方法对估计大气天顶湿延迟不是十分有效, 使大气湿分量的季节性变化影响高程结果, 这种影响在低截止角 (小于 15°) 特别明显。接收机天线相位中心变化和多路径变化也会引起高程结果的变化, 接收机天线相位中心改正利用实验室对不同方向和不同高度角的信号延迟给出的改正表, 但实验室的检测结果与野外观测的条件有一定差别, 天线相位中心随着季节温度的变化而变化, 相位中心模型的误差可能导致数据处理结果产生季节性变化。GPS 卫星天线相位中心有 dm 级的误差, 同时由于 GPS 卫星的运行周期是半个恒星日, 对同一测站而言, 每天早 4 min 回到前一天测站与 GPS 星座同样的几何配置, 这就使测站与卫星星座的几何配置有一个周年的变化, 而 GPS 的多路径效应强烈依赖于这个几何配置。太阳辐射压摄动是 GPS 卫星定轨的主要误差源, 它主要来自 GPS 卫星太阳翼板的指向误差。总之, 影响台站坐标高程周期性变化的因素非常复杂, 其中, 极潮、海潮等因素的影响可以通过模型

较准确地描述,但大气潮、非潮汐海洋负荷变化、地下水变化以及 GPS 技术本身等因素造成的影响由于技术及认识的限制,还不能准确地描述,但其整体影响的量级在 mm 级^[1,5]。

3 计算分析

分离出验潮站所在海域的海平面绝对变化速度,需要有两个基本条件:①能得到验潮站的地壳垂直形变速度;②能得到验潮站的海平面相对变化速度。这要求在验潮站附近设立 GPS 连续运行基准站。在我国的基本验潮站中,目前满足这两点的只有厦门验潮站。中国地壳运动观测网络工程厦门基准站位于厦门验潮站东北约 1.2km 处,这两个站所处的地质条件都比较稳定,在这么近的距离范围内,可基本认为两点的地壳垂直形变速度相同。

3.1 验潮数据的处理及结果

为了得到厦门海域的海平面绝对变化速度,笔者收集了厦门验潮站 1954 ~ 1997 年约 44a 的验潮观测数据,对这些数据进行预处理剔除明显的粗差后,计算了厦门验潮站的平均海平面变化速度。计算时采用两种方案:①采用中数法,用 1960.01.01 ~ 1978.08.11 验潮资料计算的厦门验潮站平均海平面高为 3 566.800mm,用 1979.01.01 ~ 1997.08.11 年验潮资料计算的厦门验潮站平均海平面高为 3 589.047mm,由这两组资料计算出 1960 ~ 1997 年期间的平均海平面上升速率为 1.17mm/a;②用式(4)计算出厦门验潮站 1954 ~ 1997 年的平均海平面变化速率为 0.88 mm/a。另外还发现,厦门验潮站海平面有明显的年、半年周期以及半月周期变化,18.61a 的交点潮周期并不明显。方案①未考虑数据弧段内海平面的上升速度,相比较而言,方案②更显严谨,因此,本文采用方案②的计算结果。

3.2 GPS 基准站数据的处理及结果

为了获得高精度的点位坐标并分析高程变化,基准的稳定性很重要。为此, GPS 数据分析时,采用 GAMIT/GLOBK(10.04)软件,选用相同的 IGS 站作为已知站,这些 IGS 站是 TSKB、USUD、SHAO、WUHN、IRKT、KUNM、LHAS、URUM、SELE。单天解时,计算采用这些点的 ITRF2000 坐标(历元 1998.0),并给其坐标加 1σ 的约束,轨道采用 IGS 的精密轨道,给其 10⁻⁸ 的约束,采用轨道松弛解,并顾及到测站的固体潮、海潮和极潮改正,对流层采用 Niell 模型,高度截

止角为 5°。单天解采用 GLOBK 作整体平差,参考框架仍采用 ITRF2000,坐标稳定点采用 TSKB、USUD、SHAO、IRKT、LHAS、SELE。计算大地高时,采用 GRS80 椭球。

厦门基准站于 1999 年 3 月初开始连续运行,采用上述方案,与国内其他网络工程基准站综合解算,得到该站 1999 年 065 天到 2002 年 151 天约 3.2a 的高程时间序列结果。采用 Coiflets 小波滤波器对厦门基准站高程的时间序列进行分析,结果见图 1,图中纵坐标的单位为 mm。从图 1 可以看出,高程方向有明显的周年运动和半年运动,半年运动的振幅约 3 ~ 5mm,周年运动的振幅约 4mm。两周年的周期振幅出现异常,厦门站还存在长周期运动,线性运动表明,厦门站地壳呈缓慢上升趋势,上升速度约 1.5mm/a,这与文献[1]计算的全球 178 个 IGS 台站中 70%点的高程方向线性速度仅为 1 ~ 2 mm/a 量级基本符合。周期运动的振幅远大于线性运动速度,因此,很难用间隔几期的 GPS 观测结果准确地确定点的地壳垂直运动速度。

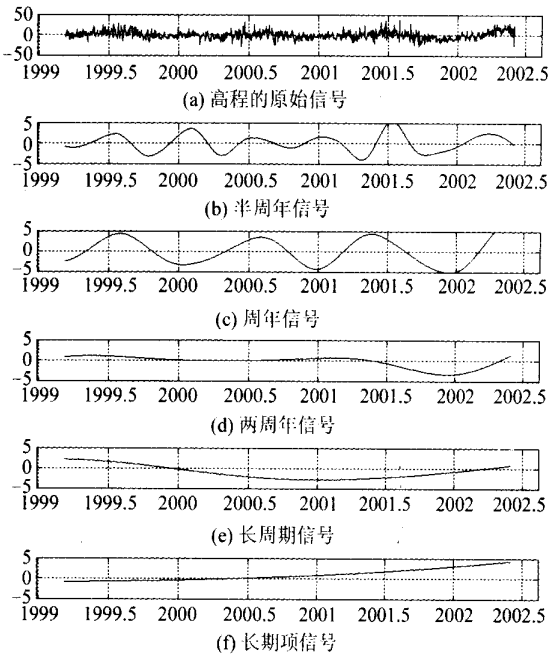


图 1 厦门基准站高程变化的时间序列分析结果
Fig. 1 Xiamen Reference Station Height Time Series and Its Analysis Results

4 结 语

联合高精度 GPS 定位数据和验潮观测数据,可以确定验潮站所处海域的海平面绝对变化速度。验潮数据获得的海平面变化结果是海平面绝

对变化和验潮站垂直地壳形变的综合结果,海平面相对变化是周期运动和线性运动的综合变化结果。同样,点位的高程变化也是周期运动和线性运动的综合结果,点位的高程变化具有明显的半周年、周年周期,周期运动的振幅远大于线性运动量级。因此,间隔几年的 GPS 观测,由于周期运动的影响,不能准确得到点位的地壳垂直形变速度。在验潮站附近设立 GPS 连续运行基准站,以获得高程变化的时间序列,采用适当的频谱分析分离出周期运动的周期,再进一步提取出高程的线性变化速度,进而从验潮数据得到的相对海平面变化中分离出海平面绝对变化的速度是必要的。采用这一方案,以厦门验潮站为例,发现厦门海域的海平面绝对变化呈上升趋势,其值为 2.4mm/a。

需指出的是,本文中 GPS 数据的时间段为 1999~2002 年,而验潮数据的时间段为 1954~1997 年,两者并不重合,这对结果的可信性虽有一定影响,但并不影响总的趋势。如果采用更长观测时段重合的数据,相信会获得更准确、更精细的海平面绝对变化结果。

致谢:本文的 GPS 数据由中国地壳运动观测网工程西安数据共享子系统提供,在这里表示感谢。

参 考 文 献

1 符 养. 中国大陆现今地壳形变与 GPS 坐标时间序列分析: [博士论文] . 上海: 中国科学院上海天文台, 2002

2 Teferle N. Continuous GPS Measurements at UK Tide Gauge Sites, 1997~2000. ION GPS 2000, Salt Lake, 2000

3 文援兰, 杨元喜. 我国近海平均海面及其变化的研究. 武汉大学学报·信息科学版, 2001, 26(2): 127~132

4 胡建国. 利用高精度 GPS 定位技术建立我国陆海垂直运动监测网. 测绘学报, 1999, 28(4): 283~289

5 Mangiarotti S, Cazenave A. Annual Vertical Crustal Rotations Predicted from Surface Mass Redistribution and Observed by Space Geodesy. J. Geophys. Res., 2001, 106 (B3): 4 277~4 291

第一作者简介: 焦文海, 博士, 高级工程师。主要研究方向为空间大地测量、卫星导航定位等。
E-mail: jiaowh0927@163.com

Determination of the Absolute Rate of Sea Level by Using GPS Reference Station and Tide Gauge Data

JIAO Wenhai¹ WEI Ziqing¹ GUO Hairong² FU Yang³

(1 Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, 1 Middle Yanta Road, Xi'an 710054, China)

(2 Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, 66 Middle Longhai Road, Zhengzhou 450052, China)

(3 Institute of Physics, Beijing University, Zhongguancun, Haidian District, Beijing 100871, China)

Abstract: The rate of absolute mean sea level of Xiamen sea area is derived from the data of Xiamen tide gauge station and Xiamen GPS fiducial station of crustal movement observation network of China. The height variety is discussed in this paper. It is shown that height has spread and periodic variations. So the precision rate of vertical land movement can not be obtained only from several GPS campaigns.

Key words: tide gauge station; mean sea level; GPS; vertical crustal movement

About the first author: JIAO Wenhai Ph. D. senior engineer. His major research interest includes spatial geodesy and satellite navigation positioning, etc.
E mail: jiaowh0927@163.com

(责任编辑: 晓平)