利用 GPS 监测中国地壳的垂向季节性变化

张飞鹏^① 董大南^② 程宗颐^① 程明康^③ 黄 斌^①

(^①中国科学院上海天文台, 国家天文观测中心, 天文地球动力学联合研究中心, 上海 200030; ^②Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA 91109, USA; ^③Center for Space Research, University of Texas at Austin, TX 78759, USA.
E-mail: zfp@center.shao.ac.cn)

摘要 通过归算中国 GPS(全球定位系统)基准网 1999~2001 年近 3 年的观测数据, 监测到了振幅为 3~10 mm 的高程季节性变化. 并通过大气压、非潮汐海洋负荷、雪和地表水的质量负荷变化引起的地壳垂向季节性位移, 可以解释所监测到的季节性变化的大部分. 但 GPS 估计的季节性变化结果与质量负荷预报结果存在明显的系统性差别, 合理的物理解释有待更长的 GPS 站坐标时间序列的获得和更进一步的研究.

关键词 地壳运动 垂向季节性变化 GPS 质量负荷位移

长期以来, 利用 GPS(全球定位系统)技术监测地壳运动仅限于地壳的水平形变分量研究, 这是因为短期(6~7 天)的 GPS 观测资料虽然水平定位精度可达 2~3 mm, 而垂直方向却只有 5~10 mm. 因此, 利用相隔一段时间(几年)的几期短期 GPS 复测资料来监测 1~30 mm 的水平地壳形变是可能的, 而要监测 10 mm 以内的垂直地壳形变则是不可能的. 但是, 至今全球已积累了几百个 GPS 观测站长达几年的每日连续观测资料, 使得利用这些资料监测地壳的垂直运动, 尤其是垂向季节性运动成为可能^[1~5]. 本文所指的季节项包含周年和半年项两个部分.

了解地壳的垂向季节性运动有助于精确测定测站高程. 由于短时间的 GPS 连续观测无法捕捉到长周期的地壳运动信息, 目前把高程方向较低的定位精度主要归咎于信号传播改正的模型误差或其他因素. 实际上, 地壳的垂向季节性运动幅度可达厘米量级^[4], 若能准确模拟地壳的垂向季节性运动并对高程计算值进行改正, 将有助于提高高程测定的精度.

在季节性尺度上精确测定测站高程显然有助于提高地固参考架在季节性尺度上的稳定性. 地固参考架由均匀分布在全球的、与地壳基岩直接相连的基准站坐标来维持. 目前的地固参考架随基准站坐标一起给出了测站的线性运动速度, 以维持参考架的长期稳定性. 实际上, 除了地面站随板块漂移产生的运动外, 还存在由于地面质量负荷(大气、地表水、冰川、非潮汐海水波动)变化所引起的周年弹性响应^[6,7], 且主要体现在高程方向. 另外, 由于地面温度的周年变化, 地壳基岩的热胀冷缩也会引起地面站的周年运动^[5]. 如果考虑维持地固参考架在季节性尺

度上的稳定性, 则必须研究地壳运动的季节性变化. 众所周知, 地球引力场模型一般是在地固参考系中表达的, 研究地球引力场的季节性变化显然需要在季节性尺度上稳定的地固参考架^[8,9]. 另外, 研究地面站的季节性运动也同样需要在季节性尺度上稳定的地固参考架.

研究地壳的垂向季节性运动对于地壳构造学研究具有重要意义. 地壳垂直方向的运动可分为两部分, 一部分是构造运动引起的; 另一部分是非构造运动引起的, 如地表质量负荷变化等引起的地壳弹性响应. 地质学意义上的地壳垂向运动是指由构造运动所引起的那部分垂直运动. 因此我们必须把由非构造运动引起的地壳垂向运动从我们所获得的总的地壳垂向运动中分离出来, 方能获得地质学家所关心的地壳垂向构造运动信息.

Dong 等人^[5]利用全球几百个 IGS 站的 GPS 观测数据研究了地壳的垂向季节性运动, 但其中所包含的中国站甚少. 1998 年 9 月, 在中国地壳运动网络工程(以下简称网络工程)的支持下, 在中国大陆建成了包含 25 个站的 GPS 基准网, 并从 1999 年开始实现每天 24 小时连续观测, 这为研究中国大陆地壳的垂向季节性运动提供了前所未有的机会. 本文利用这 25 个基准站近 3 年的连续观测资料对这些站的垂向周年变化作了研究, 以期对维持这些基准站在周年尺度上的稳定性有所帮助, 并同时获得中国大陆地壳垂向周年变化的初步图像.

1 测站坐标时间序列分析

中国大陆 GPS 基准网的概况见表 1. 我们利用这

表 1 GPS 基准网概况

测站	站名	东经/(°)	北纬/(°)
房山	BJFS	115.892	39.6086
十三陵	BJSH	116.224	40.2505
长春	CHAN	125.444	43.7906
德令哈	DLHA	97.378	37.3805
鼎新	DXIN	100.200	40.9837
广州 ^{a)}	GUAA	113.340	23.1847
海拉尔	HLAR	119.741	49.2704
蓟县	JIXN	117.530	40.0760
昆明	KMIN	102.798	25.0295
拉萨	LHAS	91.104	29.6573
泸州	LUZH	105.414	28.8724
琼中	QION	109.845	19.0294
上海	SHAO	121.200	31.0996
绥中	SUIY	130.908	44.433
泰安	TAIN	117.123	36.214
和田	TASH	75.234	37.775
乌鲁木齐	URUM	87.601	43.808
武汉	WUHN	114.357	30.532
乌什	WUSH	79.210	41.202
西安	XIAA	108.986	34.178
下关	XIAG	100.255	25.608
厦门	XIAM	118.083	24.450
西宁	YNIN	101.774	36.601
盐池	YANC	107.437	37.778
永兴岛	YONG	112.335	16.834

a) 广州站由于数据质量太差, 在分析时没有采用

些站 1999 年 1 月 4 日~2001 年 12 月 8 日近 3 年的连续 GPS 观测资料, 解算这些站的地心三维直角坐标, 从而获得了上述诸站坐标的时间序列。通过对高程残差时间序列进行分析获得了各站垂向周年运动的结果。数据处理过程大致如下。

1.1 测站坐标解算

用 JPL(Jet Propulsion Laboratory, 美国喷气推进实验室)的 GIPSY-OASIS II (简称 GIPSY)软件, 采用精密单点定位(precise point positioning, 简称 PPP)方案^[10]和伪无基准算法^[11]获得各测站每天的站坐标松弛解。PPP 方案为 JPL 所推荐。使用这个方案, 我们可以逐站进行计算, 这不仅能节省计算时间, 而且某个观测质量差的站的数据不会影响其他站的计算结果。所谓伪无基准算法就是使用并固定由 JPL 提供的用无基准算法确定的卫星轨道、卫星钟参数及 EOP 参数, 但不固定任何测站进行解算, 其目的在于让被解算的站坐标能充分自由地调整而不至因约束的不当使网形遭到破坏。在不固定任何测站(每个测站坐标的先验精度为 1000 m)这个意义上它是无基准的, 在固定由 JPL 提供的卫星轨道、卫星钟参数和 EOP 参

数这个意义上它又是有基准的, 因此我们称它为伪无基准算法。采用的基本观测量是 L_1 , L_2 载波相位和 P 码伪距, 截止高度角为 15° , 数据采样间隔为 300 s, 观测模型为非差的消除电离层影响的线性组合, 所有测站等权。计算对流层折射改正时采用 GIPSY 软件内置的天顶延迟模型^[12]和 Niell 映射函数。测站坐标考虑了固体潮、极潮改正以及潮汐部分的海洋质量负荷改正。海洋负荷改正考虑 11 个分潮波的影响, 包括半日波 M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , 周日波 K_1 , O_1 , P_1 , Q_1 , 双周波 M_f , 月波 M_m , 以及半年波 S_{sa} 。海洋负荷系数(振幅和相位)基于 CSR4.0 海潮模型, 由 M. S. Bos 和 H. G. Sherneck 提供(<http://www.oso.chalmers.se/~loading/>)。待估参数包括: 站坐标、模糊度参数、每 5 分钟估计一次对流层天顶延迟和站钟改正。在所有计算结束后, 对各站每天的接收机天线高进行了仔细的核对和修正。

1.2 参考架的统一

无基准算法的实质是在解算时尽量保持地面网形的内禀特性(基线长度及基线间的夹角)不变而允许其有整体旋转^[11], 所以由 JPL 用无基准算法所得的卫星轨道及其对应的 EOP 参数所决定的参考系每天是不一样的, 必须通过 7 参数转换把每日站坐标的松弛解转换到统一的参考系中去。由于地壳的垂向季节性运动量级很小(毫米量级), 对其研究需要在稳定的、自身没有季节性变化的参考架中进行。遗憾的是, 目前还没有一个在季节性尺度上稳定的参考架。实际上, 参考架是由在全球分布的一些台站来维持的。我们只能尽可能多地选择一些全球均匀分布的台站作为向某一参考系转换的基准, 以期各站的季节性变化能够相互抵消, 得到一个基本没有季节性变化的参考架。Dong 等人^[5]的模拟估计表明, 用 36 个核心站维持的全球参考架其周年项季节性变化在垂向上为亚毫米级。对于 4~10 mm 的垂向周年变化, 同一时间尺度上亚毫米级的参考架精度不会掩盖所研究台站的垂向季节性变化信息。本文研究的是中国地区的高程季节性变化, 实现参考系转换的台站应尽量远离中国地区。如果选择该地区或其周边台站作为基准, 则这些台站的季节性运动将影响所研究台站的结果。考虑两种极端情况: 若其季节性运动与所研究台站的季节性运动同相, 则会削弱所研究台站的季节性变化振幅; 若反相, 则会虚假地增强所研究台站的季节性变化幅度。因此, 对于本文的区域

性高程季节性变化研究,在尚无季节尺度上稳定的参考系的情况下,最好的办法是在远离研究区域、全球性地选择一些比较好的台站来实现参考架的统一。

作为一项常规服务,JPL使用GIPSY软件和无基准算法解得全球分布的最能体现ITRF参考系的每天约40个IGS站的坐标松弛解;利用这些松弛解和这些IGS站在ITRF中的坐标,JPL进而获得每天的从松弛解到ITRF的变换7参数,并在互联网上公布,以供使用伪无基准算法的用户将其得到的每个解算弧段的松弛解转换到统一的ITRF参考系中去。JPL筛选出的用来计算转换7参数的IGS站一般都比较稳定,观测情况良好,利用这些站解得的7参数应该还是比较可靠的。因此,为了减少因归算参考站数据带来的大量计算、筛选工作,我们选择JPL提供的转换7参数来实现参考架的统一。ITRF2000是2001年新发表的地固参考系,与前几代ITRF参考系系列相比,具有更好的无整体旋转特性和更统一的尺度,是目前进行空间大地测量研究的理想框架。幸运的是,JPL最近在网上提供了松弛解到ITRF2000的变换7参数(即x文件)。我们就利用这些参数将我们解得的站坐标的松弛解转换到ITRF2000参考系中。经这样转换后,就得到了每个站基本上在同一个稳定参考系下的坐标时间序列。

实际上,利用JPL的x文件提供的7参数来实现参考架的统一并非最佳选择,因为x文件提供的7参数是供全球用户使用的,其所选台站要尽可能全球均匀分布,这样,中国的个别站和中国周边的一些站也被JPL用来解算转换参数。其中,中国参与参考架解算的台站以及它们参与解算的天数为:LHAS 307天,SHAO 55天,URUM 24天,WUHN 310天,数据段长度为1080天。如前所述,这些台站的季节性运动可能会影响所研究台站的数值估计。所幸这样的站在JPL用来计算变换7参数的约40个站中只占约1/10,且并非每天采用,对我国台站季节性运动的估计结果可能产生的影响甚小。实际上,对测站季节性变化的研究和无季节性变化参考架的实现是一个逐步迭代、相互促进的过程。

1.3 时间序列分析

从Farrell^[13]给出的格林函数值可以看出,由质量负荷引起的水平方向位移为垂直方向的

这样,水平方向的季节性变化幅度也比垂直方向小,周年项振幅只有高程方向的1/10~1/3^[7]。因此,本文着重研究垂向运动的季节性变化。我们利用QOCA(Quasi-Observation Combination Analysis)软件(<http://gipsy.jpl.nasa.gov/qoca>)对测站坐标时间序列进行分析。首先将GPS测站坐标时间序列与协方差一起作为准观测量输入到QOCA软件,用separate mode获得扣除坐标和速度先验值的坐标残差时间序列。然后利用QOCA的时间序列分析程序,同时估算得到各台站对应历元1999.0时刻的坐标改正、速度改正、半年项和周年项的振幅和相位(共6个参数)。QOCA同时提供最小二乘解和稳健估计解。由于我们能够获得的时间序列不是很长,且1999年的GPS观测数据质量较差,解得的站坐标野值较多;考虑到稳健估计方法在野值较多时仍能获得可信的估计结果,所以我们选择由稳健估计得到的振幅和相位值。

时间序列中的周期项用正弦函数拟合如下:

$$u(t) = a \sin[\omega(t - t_0) + \varphi_0],$$

其中,振幅 a 和初始相位(简称相位) φ_0 为待估参数;对于周年项, $\omega = 2\pi$ /年;对于半年项, $\omega = 4\pi$ /年;初始历元 $t_0 = 1999.0$, t 以年为单位。

有些台站的时间序列存在明显的跳跃,这可能是由于天线高的异常变动或天线变动前后高度测量误差引起的,也可能是由其他原因引起的,如模型误差或周围环境的变化等。例如,TAIN站在2000年2~8月份发生了天线漏水(顾国华,私人通信),从其坐标时间序列中可以看到明显的异常变化(见图1);2000年8月初,安装了天线防水罩,计算结果显示观测数据恢复正常。另外,WUHN站于2000年4~8月份、XNIN站于2001年4月10日左右分别发生了天线漏水。2001年11月14日17:26,在新疆青海交界位于北纬36°12',东经90°54'处发生了8.1级地震。从离震中最近的DLHA站的坐标时间序列(图2)可以看出,地震前后(以2001.87为界)DLHA站有明显的位移。为了克服这种序列偏差对季节项估计的影响,在每个明显跳跃点处估计一个阶跃函数,与季节项同时估计。我们在2001.87时刻处估计的DLHA站各方向平均位移为:东向-10.55 mm,北向-6.77 mm,垂向11.72 mm(向上为正)。

图 1 TAIN 站天线漏水引起的序列异常

从估计结果看来，高程的周年变化比半年变化更为显著，所以这里主要研究周年项。图版 I (a)(附本刊后，下同)中带误差椭圆的箭头给出的是由 GPS 测得的各站高程的周年变化，矢量长度表示振幅，矢量末端的误差椭圆代表拟合误差。由误差椭圆可以看出，估得的参数精度较高。矢量的方向表示相位，相位 $\varphi_0 = 0^\circ$ 对应于图中正东(水平向右)方向。由 φ_0 的值可推出周年变化最大振幅出现的时间，如 $\varphi_0 = 0^\circ$ 表示向上最大振幅在 3 月底，向下最大振幅在 9 月底，依此类推。估得的振幅、初始相位及拟合中误差在表

2 给出。

作为验证，我们与 Dong 等人^[5]所估计的 3 个中国站(拉萨、上海、西安)的垂向周年变化结果进行比较。实际上，拉萨和上海的 IGS 站与网络工程基准站是重合的，而西安的 IGS 站(XIAN)和网络工程基准站(XIAA)是分开的。Dong 等人^[5]解算的是 IGS 永久站，所估计的 3 个站的振幅和相位分别为(http://gipsy.jpl.nasa.gov/qoca/soln/ver_ann.jpl): 拉萨 3.83 mm/355.60°, 上海 4.06 mm/268.09°, 西安 3.97 mm/286.90°。可见，拉萨站的振幅几乎一致(差 0.03 mm)，相位符合

表 2 由 GPS 测得的周年垂向运动

站名	振幅/mm	误差/mm	初相/(°)	误差/(°)
BJFS	8.63	0.42	276.71	2.89
BJSH	5.46	0.34	242.47	3.57
CHAN	7.26	0.80	275.92	4.22
DLHA	4.54	0.41	259.87	4.96
DXIN	5.47	0.34	264.08	3.41
HLAR	9.11	0.28	269.88	1.80
JIXN	5.54	0.31	283.99	3.24
KMIN	8.76	0.49	342.12	3.10
LHAS	3.86	0.47	1.85	6.04
LUZH	6.96	0.36	313.54	2.99
QION	9.43	0.43	291.68	2.81
SHAO	2.53	0.43	248.15	11.39
SUIY	5.92	0.58	270.96	4.75
TAIN	6.38	0.45	299.42	3.93
TASH	2.79	0.38	231.44	7.99
URUM	8.01	0.41	262.17	2.59
WUHN	5.93	0.43	288.14	4.43
WUSH	5.46	0.33	220.80	3.54
XIAA	7.76	0.40	270.09	2.90
XIAG	11.34	0.47	325.65	2.28
XIAM	4.33	0.44	299.94	6.09
YNIN	5.69	0.34	312.42	3.35
YANC	5.26	0.32	293.54	3.34
YONG	4.42	0.93	317.60	11.94

达到 1 mm^[5]. 由海洋潮汐引起的海洋质量负荷变化在计算时已经进行了改正, 由 S_{sa} 波引起的半年变化已经从时间序列中消去.

在地球表面的流体圈中, 大气和各态水的质量迁移引起的地表负荷变化具有明显的季节性特征, 将不可避免地引起地壳的垂向季节性运动^[6,7]. 大气质量负荷变化会引起高程方向的线性^[14,15]和季节性^[3,5]变化. 大气负荷通过两个途径影响地面高程: 一是直接对陆地产生的压力及变化, 这多反映在内陆区域; 二是海洋对大气的响应, 引起海底高程的变化, 从而产生对沿海海岸区域和洋中岛屿的影响. 除了潮汐引起的海洋质量负荷变化外, 还存在非潮汐的海水质量迁移, 主要由海面风的驱动、大气压的变化、热汽交换、以及流体动力学原因引起^[5]. 积雪和地表水储量的季节性变化引起的地壳垂向季节性运动也不容忽视^[4]. 这些因素在我们的 GPS 数据处理中均未考虑改正.

这里分别考虑大气、海洋、积雪和地表水质量负荷的影响. 质量负荷引起的弹性地球形变由格林函数方法^[13,16,17]计算. 计算地表质量负荷时, 分别采用了下述数据模型. 计算大气质量负荷时, 大气压采用

采样间隔为 6 h 的 NCEP(National Center for Environmental Prediction)数据. 计算非潮汐海洋负荷时, 采用了 TOPEX/Poseidon 卫星测高计测得的时变海面地形, 空间分辨率为 1° × 1°, 时间分辨率为 10 d. 计算大气、非潮汐海洋贡献时海洋的响应采用反变气压计模型. 计算雪和地表水质量负荷时, 雪的覆盖和土壤水分的变化由 NCEP/DOE AMIP-II 同化模型计算得到, 并用 CMAP 降水数据对土壤水分进行调整(详见文献[5]). 由质量负荷时间序列得到的地表垂向位移序列可以估计出各因素季节性变化的振幅和相位, 初始历元亦为 t₀ = 1999.0. 图版 I (b)给出了各因素质量负荷周年变化的振幅和相位(表示方法与图版 I (a)相同), 其中, 粉红色、蓝色、绿色和红色箭头分别对应于大气、土壤水分、雪和海洋非潮汐质量负荷. 这些因素的综合效应可以由图版 I (b)中各测站处表示各种因素的箭头的矢量和来获得(可以证明这样做是合理的). 图版 I (a)中红色箭头给出的就是大气、土壤水分、雪和海洋非潮汐质量负荷所引起的周年垂向运动的综合效应.

比较图版 I (a)中的红色和蓝色箭头可以发现, 绝大部分台站的 GPS 结果和地球物理模型预测结果在相位上符合得很好, 尤其对于 CHAN, HLAR, JIXN, KMIN, LHAS, SUIY, TAIN, URUM, WUHN, XIAG, XIAM, YANC, YONG 站. 这说明由上述模型计算的质量负荷引起的垂向周年运动在所考虑的时间范围内可以解释 GPS 测得的垂向周年运动的大部分. 个别站在相位上相差较大, 如 DLHA, BJSH, SHAO, TASH, WUSH, XIAA 站. 由图版 I (a)的相位比较可以发现一个非常有趣的现象: GPS 估计的周年变化在时间上超前于质量负荷数据预报的变化, 而且有系统性的趋势. 这说明应该存在另外一个因素对地表垂向季节性变化有重要的贡献. 由图版 I (a)可以看出, TAIN 站无论对于相位还是振幅, GPS 结果和质量负荷预报结果都符合得相当好. 实际上, 鉴于前面提到的 TAIN 站的天线漏水事故, 这样好的符合很可能只是一种巧合.

从振幅的比较来看, 约一半台站的 GPS 结果与地球物理预测振幅基本一致, 如 BJSH, CHAN, DLHA, DXIN, JIXN, KMIN, LHAS, LUZH, SUIY, TAIN, WUHN, XNIN, YANC 站; 对于另一半台站, GPS 所估振幅明显大于地球物理预报结果, 有的甚至在 2 倍以上. 这可能有几个方面的原因: (1) 由大气压、非潮汐海洋负荷、雪和土壤水分负荷变化所引起的地表垂向季节性变化还不足以完全解释 GPS 测

图 3 强降雪对 URUM 站高程的影响

得的结果。(2) 由于中国 GPS 基准网的稳定观测时间不是很长, 且 1999 年的观测数据质量并不是很好, 可能会影响对季节性变化的估计。(3) 我们直接利用了 Farrell 给出的格林函数^[13]来计算质量负荷引起的地球弹性形变。Farrell 使用的是比较老的 Gutenberg-Bullen A 地球模型, 在计算格林函数时可能不够精确¹⁾。例如, 若 Farrell 的格林函数绝对值在质量负荷附近偏小, 就会导致以上由质量负荷得到的周年振幅偏小的结果。(4) 在计算质量负荷时, 所采用的地球物理模型是全球模型, 中国地壳的数据精度可能不是很高。例如, 如果能够利用中国的土壤水分数据计算其造成的地球弹性形变, 应该可以得到更精确的结果。遗憾的是, 目前还找不到这样的模型。(5) 一些突发事件可能会影响 GPS 的观测结果。如 2000 年 10 月下旬到 2001 年 2 月底, 新疆的部分地区连续出现强降雪天气, 主要发生在北疆的阿勒泰、塔城、伊犁、昌吉和东疆的哈密地区、巴州的巴音布鲁克, 这些地区分布在乌鲁木齐周围。在这段时间内, URUM 站的垂向形变可能会比同化模型计算的值更大。从 GPS 测得的 URUM 站的高程时间序列(图 3)可以看出, 在 2000.8~2001.2 时间段内, URUM 站的高程有明显的下降。这一结果证实了我们的推测。

3 讨论与结论

从中国地区用 GPS 解得的近 3 年的站坐标时间序列可以估计出振幅为 3~10 mm 的垂向季节性变化。为了寻找引起垂向季节性变化的原因, 我们计算了由大气压、海洋非潮汐负荷、雪和土壤水分的质量负

荷所引起的季节性高程变化。比较 GPS 结果和质量负荷预报结果可见二者具有很好的一致性, 这说明质量负荷可以大部分解释 GPS 解得的垂向季节性变化。从二者的比较还可看出, 两种结果之间尚存在系统性的差别: GPS 估得的季节性变化在振幅上系统地偏大, 在相位上系统地超前。这表明, 除了质量负荷影响外, 还有一些因素可能引起季节性的地壳垂向视运动, 如基岩的热胀冷缩、对流层折射改正中大气模型的季节性误差、相位中心模型误差和多路径效应、软件和解算策略的影响、共同的轨道系统误差、参考系的影响等等^[5]。下面分别讨论 3 种因素的影响。

(i) 基岩的热胀冷缩。由于地表温度的季节性变化, 基岩的热胀冷缩也会引起地壳的季节性位移。中国位于北半球的中纬度地区, 根据 Dong 等人^[5]的计算, 基岩热胀冷缩引起的地壳周年垂向运动的振幅为 0.5 mm 或更小, 相位约为 210° (假定最高温度在 7 月 15 日)。若取振幅 0.5 mm, 相位 210° , 将基岩热胀冷缩与以上大气、海洋、雪和地表水的贡献同时考虑, 将使图版 I (a) 中 GPS 测得的振幅和相位与地球物理预报值在大部分台站呈现靠拢的趋势。

(ii) 天线相位中心模型。Hatanaka 等人^[18]的研究表明, GPS 坐标解的季节性变化与接收机天线相位中心模型有关, 相位中心模型误差将使季节性振幅增大几毫米, 这可能是本文所估季节性振幅系统地偏大以及相位与质量负荷估计值有系统偏差的一个原因。

(iii) 参考架。对本研究而言, 参考架的选择和

1) Guo J Y, Ning J S, Deng H T. More accurate asymptotic values and precise computation of the load Love numbers <https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb2002-47-18-1370>

定义非常重要。GPS 解经参数转换归算到 ITRF2000 参考系后,是相对于地球形状中心(CF)的,而质量负荷预报结果则相对于固体地球的质量中心(CE)^[5,19]。CF 相对于整个地球系统的质量中心(CM)的变化称为地心变化。由于用来解算转换 7 参数的台站本身的季节性运动并未考虑,因此,经 7 参数转换后的 GPS 解所在的参考架将发生季节性的运动,这等价于参考系原点(即由基准站定义的 CF)的季节性变化。Dong 等人^[5]的估算表明,对于 4 mm 振幅的季节性地心变化,CF 与 CE 的差别只有 0.08 mm(地心变化的 2%)。如果忽略这么小的差别,可以认为 CE 与 CF 是一致的。无基准的 GPS 解是相对于 CM 的,经 7 参数转换到 ITRF2000 后,则相对于由有限数量的基准站定义的 CF。Dong 等人^[5]的研究表明,由有限数量的基准站表达的形状中心与由无限密的全球均匀分布的基准站定义的理论形状中心的差别可以引起亚毫米级甚至更大振幅的季节性变化。因此,地心定义的不一致也可能对 GPS 解与质量负荷预报的季节性变化之间的系统偏差有一定的贡献。

为了得到中国大陆地壳垂向季节性运动更可靠的 GPS 监测结果,还有待获得更长时间的观测数据。对于 GPS 测得的高程季节性变化的物理解释也还需要进行大量细致的工作。最近有研究表明,利用 VLBI 研究高程的季节性变化基本上支持 GPS 的结果,但在少数台站与 GPS 结果有较明显的差别(郑大伟,私人通信)。这说明对于地壳垂向季节性运动的研究尚需深化以及不同的技术进行相互印证。

致谢 对方鹏博士、朱文耀研究员提供数据及郭俊义教授、顾国华研究员、傅容珊教授、李力刚博士与作者的有益讨论表示衷心感谢。计算所用的 GIPSY 软件由 JPL 提供。本工作受国家重点基础研究发展规划项目(G1998040703)、国家自然科学基金“九五”重点项目(批准号:19833030)、国家自然科学基金(批准号:40174008)和上海市科学发基金(01JC14058)资助。

参 考 文 献

1 Gross S, Larson K. Annual signals in continuous GPS time series. *Eos Trans AGU*, 1998, 79: F182

2 Soudarin L, Crétau J F, Cazenave A. Vertical crustal motions from the DORIS space-geodesy system. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(9): 1207~1210

3 Mangiarotti S, Cazenave A, Soudarin L, et al. Annual vertical crustal motions predicted from surface mass redistribution and observed by space geodesy. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(B3): 4277~4291

4 vanDam T M, Wahr J, Milly P C D, et al. Crustal displacements due to continental water loading. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(4): 651~654

5 Dong D N, Fang P, Bock Y, et al. Anatomy of apparent seasonal variations from GPS derived site position time series. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(B4): ETG 9-1~ETG 9-16

6 Stolz A, Larden D R. Seasonal displacement and deformation of the earth by the atmosphere. *J Geophys Res*, 1979, 84(B11): 6185~6194

7 venDam T M, Blewitt G, Heflin M G. Atmospheric pressure loading effects on Global Positioning System coordinate determinations. *J Geophys Res*, 1994, 99: 23939~23950

8 Cheng M K, Tapley B D. Seasonal variations in low-degree zonal harmonics of the Earth's gravity field from satellite laser ranging observations. *J Geophys Res*, 1999, 104: 2667~2682

9 Dong D, Gross R S, Dickey J O. Seasonal variations of the Earth's gravitational field: An analysis of atmospheric pressure, ocean tidal and surface water excitation. *Geophys Res Lett*, 1996, 23: 725~728

10 Zumberge J F, Heflin M B, Jefferson D C, et al. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(B3): 5005~5017

11 Heflin M, Bertiger W, Blewitt G, et al. Global geodesy using GPS without fiducial sites. *Geophysical Research Letters*, 1992, 19(2): 131~134

12 Webb F H, Zumberge J F. An Introduction to GIPSY/OASIS-II, JPL-D11088. Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, 1997

13 Farrell W E. Deformation of the Earth by surface loads. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 1972, 10(3): 761~797

14 McCarthy D D, ed. International Earth Rotation Service, IERS conventions (1996), IERS Technical Note 21. Observatoire de Paris, July, 1996

15 vanDam T M, Wahr J M. Displacements of the Earth's surface due to atmospheric loading: Effects on gravity and baseline measurements. *Journal of Geophysical Research*, 1987, 92(B2): 1281~1286

16 Longman I M. A Green's function for determining the deformation of the Earth under surface mass loads: 1. Theory. *Journal of Geophysical Research*, 1962, 67(2): 845~850

17 Longman I M. A Green's function for determining the deformation of the Earth under surface mass loads: 2. Computations and numerical results. *Journal of Geophysical Research*, 1963, 68(2): 485~496

18 Hatanaka Y, Sawada M, Horita A, et al. Calibration of antenna-radome and monument-multipath effect of GEONET—Part 2: Evaluation of the phase map by GEONET data. *Earth, Planets and Space*, 2001, 53(1): 23~30

19 Dong D N, Dickey J O, Chao Y, et al. Geocenter variations caused by atmosphere, ocean and surface ground water. *Geophys Res Lett*, 1997, 24: 1867~1870

(a) GPS 解得的(带误差椭圆)和质量负荷预报的高程周年变化; (b) 由大气(粉红色)、海洋(红色)、积雪(绿色)、地表水(蓝色)的负荷变化分别引起的地壳垂向季节性变化