

袁林果, 丁晓利, 陈 武等. 香港 GPS 基准站坐标序列特征分析. 地球物理学报, 2008, 51(5): 1372~ 1384

Yuan L G, Ding X L, Chen W, et al. Characteristics of daily position time series from the Hong Kong GPS fiducial network. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, 51(5): 1372~ 1384

## 香港 GPS 基准站坐标序列特征分析

袁林果<sup>1</sup>, 晓利<sup>1</sup>, 陈 武<sup>1</sup>, 郭志和<sup>2</sup>, 陈少彬<sup>2</sup>, 洪本善<sup>3</sup>, 周锦添<sup>4</sup>

1 香港理工大学土地测量与地理咨询学系, 香港九龙

2 香港特别行政区政府地政总署测绘处, 香港北角

3 逢甲大学土地管理学系, 台湾台中

4 香港理工大学土木及结构工程学系, 香港九龙

**摘 要** 利用香港 GPS 连续运行参考站网络 2001 年 1 月至 2007 年 8 月的观测资料, 全面深入地分析了 12 个基准站坐标序列特征. 本文采用主成分空间滤波算法去除公共误差, 来提高坐标序列的信噪比, 并采用最大似然估计准则定量估计滤波后坐标序列的噪声特性, 计算了地球表面质量负荷(包括大气、非潮汐海洋、积雪和土壤水)对香港 GPS 基准站坐标序列的影响. 研究结果表明: 香港 GPS 基准站坐标序列具有高度的空间相关性, 其公共误差具有较强的季节性变化特征; 地表质量负荷变化引起的香港地壳形变可以解释公共误差序列中约为 3mm 的垂向周年变化, 经过质量负荷改正后的公共误差序列与高阶电离层误差高度相关; 滤波后坐标序列的噪声特性可以用可变白噪声加闪烁噪声模型来描述, 顾及闪烁噪声所计算的速度误差要比只考虑可变白噪声计算的速度误差大 2~ 6 倍; 基准站间存在达 1.5 mm/yr 的相对水平运动, 揭示香港地区存在活动断层; 部分基准站坐标具有明显的振幅为 1~ 2 mm 本地季节性变化, 所有测站的残差序列也表现出强烈的季节性变化.

**关键词** GPS, 时间序列分析, 空间滤波, 最大似然估计, 噪声特性

文章编号 0004-5733(2008)05-1372-13

中图分类号 P228

收稿日期 2007-03-17, 2008-06-16 收修定稿

## Characteristics of daily position time series from the Hong Kong GPS fiducial network

YUAN Lin-Guo<sup>1</sup>, DING Xiao-Li<sup>1</sup>, CHEN Wu<sup>1</sup>, KWOK Simon<sup>2</sup>,  
CHAN Siu-Bun<sup>2</sup>, HUNG Pen-Shan<sup>3</sup>, CHAU Kam-Tim<sup>4</sup>

1 Department of Land Surveying and Geoinformatics, The Hong Kong Polytechnic University, Kowloon, Hong Kong

2 Geodetic Survey Section, Lands Department, Hong Kong SAR, Hong Kong

3 Department of Land Management, Feng-Chia University, Taichung, Taiwan

4 Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Kowloon, Hong Kong

**Abstract** Characteristics of daily position time series from January, 2001 to August, 2007 at 12 stations in the Hong Kong GPS fiducial network are investigated in this paper. A spatial filtering algorithm based on principal component analysis is employed to remove the common mode errors from the daily position time series. The noise characteristics of the filtered position time series are assessed by the method of maximum likelihood estimation. Contributions from atmospheric, nontidal oceanic, snow and soil moisture mass loading are evaluated. The results indicate that spatial filtering is an effective way to improve the precision of position time series and provide better resolution for detecting local deformation signals. The common mode errors have strong

基金项目 香港特别行政区研究资助局项目(PolyU5157/05E; PolyU5161/06E)和香港理工大学基金项目(GY-F81)资助.

作者简介 袁林果, 男, 1980 年生, 博士研究生, 2004 年在西南交通大学获硕士学位, 主要从事 GPS 数据处理和地壳形变分析研究.

E-mail: linguo.yuan@polyu.edu.hk

seasonal variation. The observed ~ 3 mm annual vertical variation of the common mode errors can be explained by the joint contribution of these seasonal surface mass redistributions. After removing these surface mass loading effects the residual common mode errors are highly related to the higher-order ionospheric effects. The noise in the filtered position time series can be described as a combination of variable white noise plus flicker noise. The velocity uncertainties are about 2 ~ 6 times larger if only variable white noise is assumed. The maximum relative horizontal velocity between the sites is 1.5 mm/yr, which indicates some local fault activities. In addition, there are obvious 1~ 2 mm local seasonal signals in the filtered position time series of some sites. The residual scatters of all filtered time series also show strong seasonal characteristics.

**Keywords** GPS, Time series analysis, Spatial filtering, Maximum likelihood estimation, Noise characteristics

## 1 引言

近 10 多年来, 在国际 GNSS 服务(International GNSS Service, 简称 IGS) 机构的推动下, 国际上 GPS 连续运行参考站网络与日俱增, 广泛应用于大地测量和地球动力学的许多领域<sup>[1~4]</sup>, 将 GPS 应用于地学研究推向了一个崭新的阶段. 香港地处中国华南块体东南边缘, 地震和地质学研究表明地质构造运动不明显, 是否存在活动断层尚存争议<sup>[5, 6]</sup>. 大地测量手段(如电磁波测距、GPS 等技术)是监测地壳形变最直接、有效的观测手段. 以前大地测量观测手段基本上采用定期(一年或半年)观测方式, 难以检测到小于 mm/yr 级的形变信息. 由于香港地区地壳形变量小, 加上受观测精度的限制, 利用大地测量技术对该地区地壳形变特征的研究一直处于空白. 因此, 在该地区利用 GPS 连续参考站网进行地壳形变监测具有重要的科学意义.

研究和分析由 GPS 观测资料处理得到的坐标序列特征是研究地壳形变的重要基础. 研究基准站坐标序列特征不仅有助于了解各种地球物理现象对基准站位置的影响规律, 而且可以对各种误差模型进行修正, 进一步提高 GPS 基准站位置的精度. 本文将介绍 GPS 连续运行参考站在香港地壳形变的监测和研究中所取得的成果, 旨在获得该地区亚 mm/yr 级的区域地壳形变信息. 首先运用主成分空间滤波算法去除公共误差, 来提高坐标序列的信噪比, 然后采用最大似然估计准则定量地估计滤波后坐标序列的噪声特性, 详细分析了基准站坐标序列的频谱特征和季节性变化特点, 并计算了大气、非潮汐海洋、积雪和土壤水质量负荷效应对香港测站坐标序列的影响.

## 2 GPS 观测资料与数据处理

香港特别行政区政府地政总署于 2000 年开始建立了香港 GPS 连续运行参考站网络. 该项目分两期完成: 第一期于 2000 年分别在香港西部和北部布设了 6 个 GPS 连续运行参考站; 为了扩展网络的覆盖范围, 第二期于 2004 年在大屿山、港岛和香港东部地区布设了另外 6 个 GPS 连续运行参考站(如图 1(见文后图 10 前)所示). 该网络自 2001 年 1 月运行以来, 获取了大量的观测资料. 本文对香港 GPS 连续运行参考站网络 2001 年 1 月至 2007 年 8 月的观测资料进行分析处理. 其中第一期布设的 6 个基准站观测资料的时间跨度为 6.7 年, 第二期布设的 6 个基准站的时间跨度约为 3.1 年.

香港 GPS 基准站的数据处理采用 GAMIT/GLOBK 软件<sup>[7, 8]</sup>(版本 10.3)完成. 数据处理策略主要包括三个步骤<sup>[9]</sup>: 区域网基线解算、区域网无约束解和全球网无约束解的融合, 以及坐标参考框架的确定. 首先, 运用 GAMIT 获得 12 个香港基准站及周边 10 个 IGS 站(BJFS、DAEJ、GUAM、KUNM、LHAS、NTUS、PIMO、SHAO、SUWN 和 WUHN)的区域单天无约束解; 然后, 利用 GLOBK 将前一步所得到的区域单天无约束解和 SOPAC(Scripps Orbital and Permanent Array Center)提供的 IGS 全球单天无约束解一起进行无约束平差; 最后, 利用 GLOBK 确定 IGS05 核心站的单天解与参考框架 ITRF2005 之间的相似变换 7 参数, 从而获得香港基准站在全球参考框架 ITRF2005(International Terrestrial Reference Frame 2005)下的单天原始坐标序列, 如图 2 所示. 为了清楚起见, 图中的坐标序列去除了线性项.

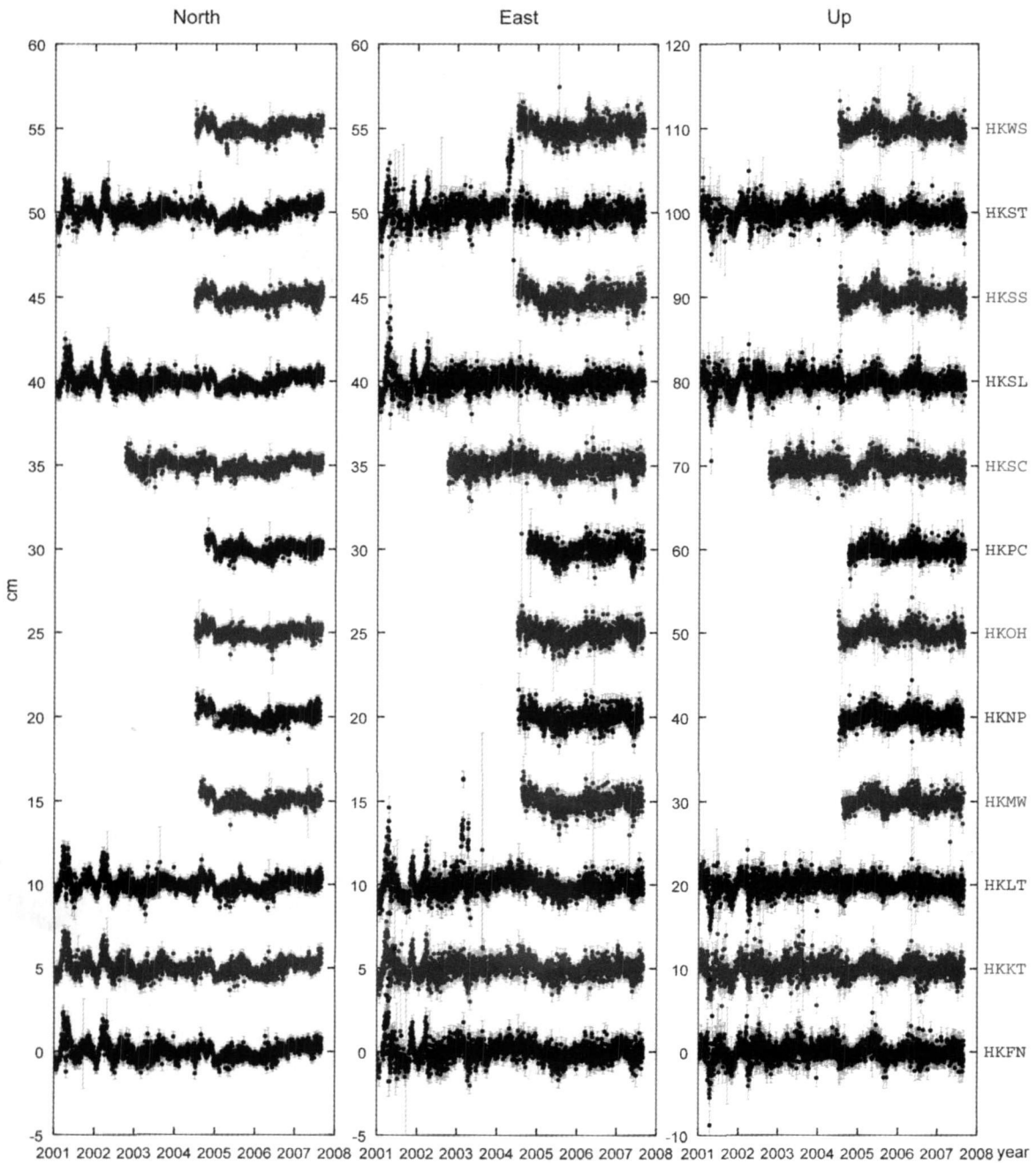


图2 测站原始坐标序列

Fig. 2 Raw coordinate time series of stations

### 3 测站坐标序列分析

#### 3.1 空间滤波

从图2的结果可以看出, 基准站原始坐标序列具有高度的空间相关性, 且相对较大的区域公共形变特征掩盖了相对较小的网内部形变特征, 同时也

影响基准站速度及其精度的估算. 对于GPS区域网坐标序列, 目前国际上通用的做法是采用区域滤波方法<sup>[10, 11]</sup>去除所谓的公共误差(Common Mode Errors, CME)来提高GPS区域网坐标序列的信噪比. Dong等<sup>[12]</sup>提出了一种更稳健的空间滤波技术, 即采用主成分分析和K-L(Karhunen-Loeve)变换进行空间滤波.

本文采用改进的主成分空间滤波算法, 和文献 [12] 不同的是, 本文在滤波前只去掉了坐标序列中的线性项和由各种原因引起的点位突变项(如: 由仪器或天线变更引起的位移、远场大地震引起的同震位移、或由某些未知的原因引起的点位变化等), 而保留了周期项. 这是因为对于面积较小的香港本地网来讲(约 50 km<sup>2</sup>), 整个网也具有周期性变化的特点. 另外, 为提高滤波的有效性和可靠性, 本文采用递归的方式实现主成分滤波.

对于 GPS 区域网, 设有  $n$  个基准站, 进行了  $m$  天观测, 则坐标序列分量(纬度、经度或高程)可表示为  $X(t_i, x_j) (i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n)$ . 利用主成分分析方法可将坐标序列  $X(t_i, x_j)$  分解成相互正交的空间特征向量和相应的时间函数, 即<sup>[12]</sup>

$$X(t_i, x_j) = \sum_{k=1}^n a_k(t_i) v_k(x_j), \quad (1)$$

式中,  $a_k$  为与时间相关的第  $k$  个主成分分量(PC),  $v_k$  则为与基准站相关的空间特征向量. 通常, 空间特征向量按它们所对应的特征值由大到小的顺序排列, 从而使第一主成分为携带整个网信息最多的一维变量, 它往往反映整个网的共同变化模式; 越靠后的主成分分量, 所携带的整个网的信息越少, 它们往往反映基准站自身的变化规律.

图 3 给出了由主成分分析求得的香港基准站网的前三个主成分空间向量. 图 3 的结果说明第一主成分空间向量具有非常一致的空间分布模式. 第一主成分对坐标序列各分量(纬度、经度和高程)的贡献率分别是 93.9%、94.2% 和 84.6%; 而第二主成分贡献率仅为 0.9%、1.0% 和 2.5%; 第三主成分贡献率仅为 0.9%、0.9% 和 2.3%. 由于第二、三主成分空间向量随基准站变化较大, 因此它们不能反映整个网的共同变化特征, 而第一主成分包含了坐标序列绝大部分信息, 且只有第一主成分空间向量具有一致性特征, 因此本文将第一主成分定义为整个网的“公共误差<sup>[12]</sup>”, 即

$$\varepsilon(t_i) = a^1(t_i) \sum_{k=1}^n v^k(x_j)/n, \quad (2)$$

主成分空间滤波的步骤如下:

- (1) 利用加权最小二乘算法从原始坐标序列中去掉线性速度和点位突变项;
- (2) 对前一步求得坐标序列进行主成分分析, 由(2)式计算公共误差, 并扣除公共误差中的线性趋势项;
- (3) 从原始坐标序列中扣除公共误差, 得到“滤

波后坐标序列”;

(4) 用滤波后坐标序列重新估计线性速度和点位突变项, 再从原始坐标序列中扣除;

(5) 重复第(2)至(4)步, 直至公共误差序列趋于稳定为止. 实际操作过程中, 一般重复 4 次即可.

经上述滤波方法得到的坐标序列不仅有效地去除了公共误差的影响, 而且保留了基准站在 ITRF2005 中的精确坐标和速度. 应用空间滤波方法分别将坐标序列的纬度、经度和高程三个分量的信噪比提高了约 2.8、3.4 和 2.1 倍. 滤波前坐标序列分量的平均重复性(加权均方根误差)为 2.77 ± 0.36 mm、3.91 ± 0.24 mm 和 7.17 ± 0.65 mm; 滤波后坐标序列分量的重复性为 0.99 ± 0.13 mm、1.15 ± 0.20 mm 和 3.37 ± 0.30 mm.

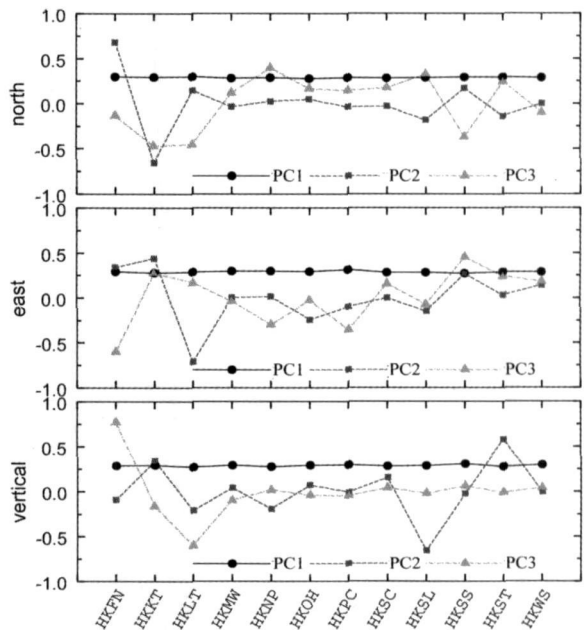


图 3 前三个主成分空间向量

Fig. 3 The three leading PC spatial eigenvectors

### 3.2 最大似然估计

为拟合滤波后的坐标序列, 本文建立了如下函数模型<sup>[11, 13]</sup>:

$$y(t_i) = a + bt_i + \sum_{j=1}^{j_0} o_j H(t_i - T_j) + \sum_{m=1}^{m_0} c_m \sin(2\pi f_m t_i + \varphi_m) + v_i, \quad (3)$$

式中,  $a$  为常数项,  $b$  为线性速度,  $o_j$  为在  $T_j$  时刻基准站的位移,  $c_m$  和  $\varphi_m$  是频率为  $f_m$  的周期信号的振幅和相位,  $v_i$  代表噪声.  $H(t_i - T_j)$  为阶梯函数. 通

常假定  $v_i$  为白噪声, 应用加权最小二乘法来求解 (3) 式中位置参数及其误差. 但是大量资料分析表明, 由 GPS 连续观测资料得到的坐标序列中的噪声不仅含有白噪声, 而且含有有色噪声<sup>[14-16]</sup>. 若忽略有色噪声的影响, 则速度误差往往被高估约 4 倍, 甚至一个数量级, 从而导致不正确的地球物理解释. 为顾及有色噪声的影响, 目前最优的做法是, 采用最大似然准则将 (3) 式中函数模型的未知参数和噪声分量一起进行估计.

所谓最大似然估计就是选择适当的噪声模型, 确定各噪声分量的大小, 使得坐标序列的残差  $\hat{\delta}$  与其协方差的联合概率密度的自然对数为最大<sup>[13, 16]</sup>

$$\begin{aligned} \text{MLE} = \ln[ \text{lik}(\hat{\delta}, \mathbf{C}) ] = & -\frac{1}{2} [ \ln(\det \mathbf{C}) \\ & + \hat{\delta}^T \mathbf{C}^{-1} \hat{\delta} + N \ln(2\pi) ], \end{aligned} \quad (4)$$

式中,  $N$  为时间序列的长度,  $\mathbf{C}$  是协方差矩阵,  $\hat{\delta}$  为 (3) 式采用相同的协方差矩阵  $\mathbf{C}$  用加权最小二乘法求得的残差. 协方差矩阵  $\mathbf{C}$  可以表达若干随机噪声过程<sup>[13, 17]</sup>, 例如白噪声、可变白噪声、功率谱噪声 (包括闪烁噪声和随机游走噪声)、一阶高斯马尔可夫噪声等, 以及它们的组合. 在本文测试中选用了 6 种噪声: 白噪声 (WH)、可变白噪声 (VW)、闪烁噪声 (FN)、随机游走噪声 (RW)、功率谱噪声 (PL)、一阶高斯马尔可夫噪声 (GM). 把它们分为两组, 一共测试了 10 种噪声模型: WH、FN+WH、RW+WH、PL+WH、GM+WH 和 VW、FN+VW、RW+VW、PL+VW、GM+VW.

因为忽略坐标序列中周期信号会使最大似然估计过高地估计噪声分量<sup>[17]</sup>, 所以本文采用谱分析来搜索坐标序列中的周期信号. 应用 Lomb-Scargle 谱分析<sup>[18]</sup> 方法得到的香港基准站滤波后坐标序列的堆积频谱如图 4 所示. 图 4 结果表明: 三个坐标分量都存在明显的周年和半年信号, 且频率越低其功率谱越大, 这说明坐标序列中含有有色噪声. 因此, 本文在最大似然估计的函数模型中包含了周年和半年信号.

#### 4 地表质量负荷对香港地壳形变影响的定量计算

GPS 观测得到的地球形变信息中通常包含了非构造形变的影响<sup>[3, 4, 19]</sup>, 通过对 GPS 基准站坐标序列的分析, 寻求引起非构造形变的地球物理机制并对其影响进行改正可以进一步提高 GPS 对地壳

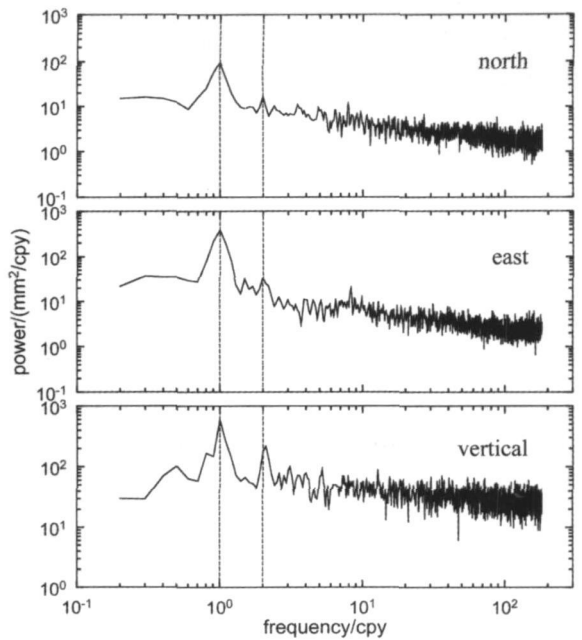


图 4 滤波后坐标序列的堆积频谱

Fig. 4 Stacked power spectra of the filtered position time series

形变的检测精度. 引起地壳非构造形变的地球物理因素主要包括两大类. 第一类是潮汐形变, 包括固体潮、海洋潮和极潮. 这类形变目前已经建立了较为精确的计算模型, 在我们的 GPS 观测数据处理中已做了相应的改正. 固体潮和极潮改正采用 IERS2003 标准模型<sup>[20]</sup>, 海洋潮模型采用 NA O99b 模型<sup>[21]</sup>. 第二类是地球表面流体圈中的大气和各态水的质量迁移引起的地表质量负荷变化, 主要包括大气、非潮汐海洋、积雪和土壤水等质量负荷. 这类形变在我们的 GPS 数据处理中未作改正, 因此有必要在数据后处理中予以考虑.

质量负荷引起的弹性地球形变通常采用负荷格林函数方法计算<sup>[3, 22]</sup>. 本文分别考虑大气、非潮汐海洋、积雪和土壤水质量负荷对香港地壳形变的影响. 计算地表质量负荷时, 采用了以下数据模型. 大气压数据采用 NCEP/NCAR Reanalysis 1 (<http://www.cdc.noaa.gov/cdc/data.ncep.reanalysis.html>) 气压数据, 时间分辨率为 6h, 空间分辨为  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ . 非潮汐海洋数据来源于 JPL ECCO Ocean Data Assimilation (<http://ecco.jpl.nasa.gov/external/>) 洋底压力模型, 纬度范围为  $78^\circ\text{S} \sim 78^\circ\text{N}$ , 空间分辨率为  $1^\circ$ , 但从纬度  $10^\circ$  开始到赤道减为  $0.3^\circ$ , 时间分辨率为 12h. 积雪和土壤水数据从 NCEP-DOE Reanalysis 2 (<http://www.cdc.noaa.gov/cdc/data.ncep>,

reanalysis2. gaussian. html) 获得, 空间分辨率为  $1.875^\circ$  (经度)  $\times 1.904^\circ$  (平均纬度), 时间分辨率为 24 h. 在计算大气、积雪和土壤水质量负荷时, 应用了反变气压计模型. 对于时间分辨率高于 24 h 的大气压和非潮汐海洋数据, 在计算出质量负荷引起的形变后, 然后进行 24 h 平均, 得到每天的坐标改正序列.

对于香港 GPS 基准站来讲, 计算得到的各个基准站质量负荷改正差异小于 0.1 mm. 因此, 质量负荷改正主要针对 GPS 公共误差序列, 各个站的差异很小, 均可忽略不计.

## 5 结果与分析

### 5.1 公共误差

图 5 为公共误差序列图, 相对应的 Lomb-Scargle 频谱如图 6 所示. 从图 5 和图 6 可以看出, 北分量和高程分量具有明显的周年和半年信号, 北分量的半年信号比周年信号强. 但是东分量的周年和半年信号却不明显. 基于 FN + WH 噪声模型估计的周年和半年信号如图 5 中实线所示, 它们的振幅和相位估值见表 1.

为了剖析引起公共误差的成因, 首先计算了大气、非潮汐海洋、积雪和土壤水质量负荷引起香港地区测站位置变化, 其坐标改正序列如图 7 所示. 从图 7

的结果可以看出, 4 项质量负荷引起形变主要是垂直方向, 垂向的形变量约为水平方向的 5 倍, 而且主要集中在季节性项(主要是周年项), 同时伴随有线性变化. 大气负荷效应对香港位置改正最大, 垂向最大值与最小值之差达 15 mm, 其次是土壤水负荷效应改正. 非潮汐海洋负荷影响垂向只有 1 mm 左右, 水平方向小于 1 mm. 由于香港地区靠近赤道, 积雪负荷效应对 GPS 坐标序列的影响可以忽略不计.

扣除质量负荷效应改正后的公共误差序列如图 8 所示, 其季节性周期信号的振幅和相位估值见表 1. 结果表明对于季节性变化来讲, 垂向周年变化显著地减少, 其振幅从改正前的  $3.22 \pm 1.05$  mm 减为  $0.93 \pm 0.95$  mm, 水平方向上也略有改善(主要是东方向); 但是半年项在其三个方向均未得到改善. 同时, 改正前后公共误差重复性在垂向减小了 0.3 mm, 水平方向没有明显的改善.

对比图 5 和图 8 可以发现, 2001~2003 年期间的较大误差并没有因为负荷改正而减小, 呈现系统性的偏移, 并且在北方向上高达 2 mm 的半年变化. 这些迹象都表明, 其误差来源主要是 GPS 观测值中的高阶电离层误差<sup>[23~25]</sup>. 文献[25]指出由于香港地处低纬地区, GPS 观测值受电离层扰动影响大, 特别是 2001~2003 年间太阳活动强烈, 在 3 月份和 9 月份表现剧烈(文献[25]中图 3 所示), 与本文公共误差特性相吻合. 仔细观察图 8 即可发现,

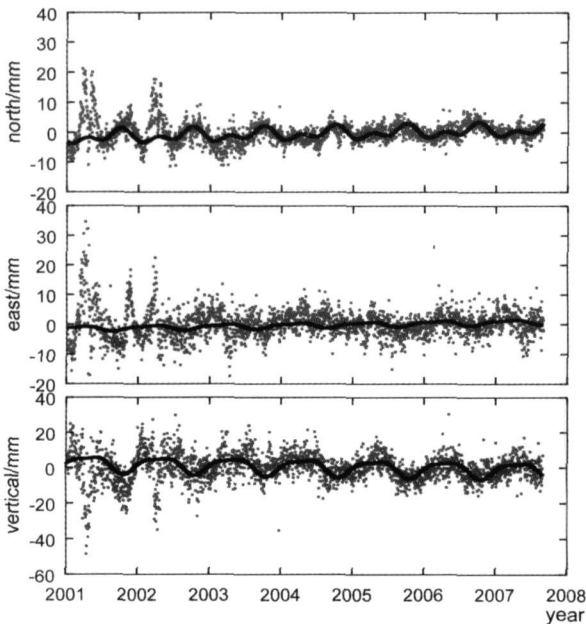


图 5 公共误差序列

Fig. 5 Time series of Common Mode Errors

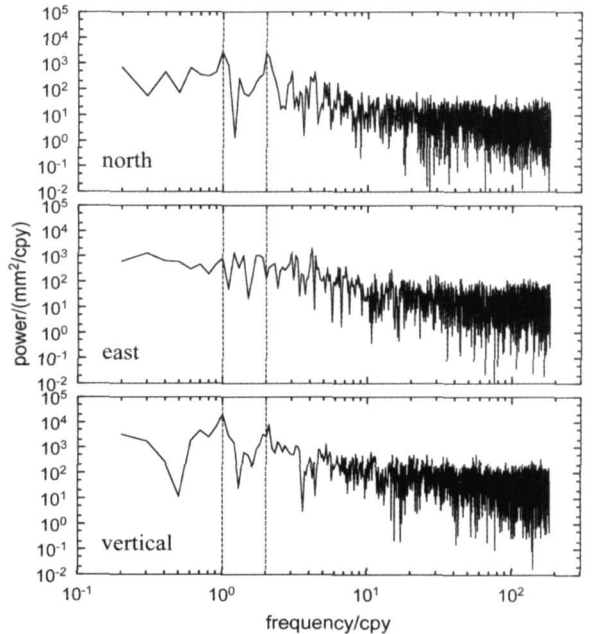


图 6 公共误差序列频谱

Fig. 6 Power spectra of the CME time series

表 1 基于 FN+ WH 噪声模型的公共误差序列季节性信号的振幅和相位估值

Table 1 Estimated seasonal parameters of the CME time series and their uncertainties ( $1\sigma$ ) based on FN+ WH model

坐标分量	负荷改正前				负荷改正后			
	周年		半年年		周年		半年年	
	振幅/mm	相位/ $^{\circ}$	振幅/mm	相位/ $^{\circ}$	振幅/mm	相位/ $^{\circ}$	振幅/mm	相位/ $^{\circ}$
N	$0.89 \pm 0.42$	$217 \pm 27$	$2.10 \pm 0.29$	$258 \pm 8$	$0.86 \pm 0.42$	$189 \pm 28$	$2.19 \pm 0.30$	$258 \pm 8$
E	$1.54 \pm 0.60$	$10 \pm 22$	$0.82 \pm 0.43$	$253 \pm 30$	$0.94 \pm 0.60$	$35 \pm 37$	$0.81 \pm 0.43$	$257 \pm 30$
U	$3.22 \pm 1.05$	$340 \pm 18$	$2.44 \pm 0.74$	$58 \pm 17$	$0.93 \pm 0.95$	$92 \pm 59$	$2.38 \pm 0.68$	$50 \pm 16$

注: 本表及以下表格的所有相位延迟均参照于 1 月 1 日。

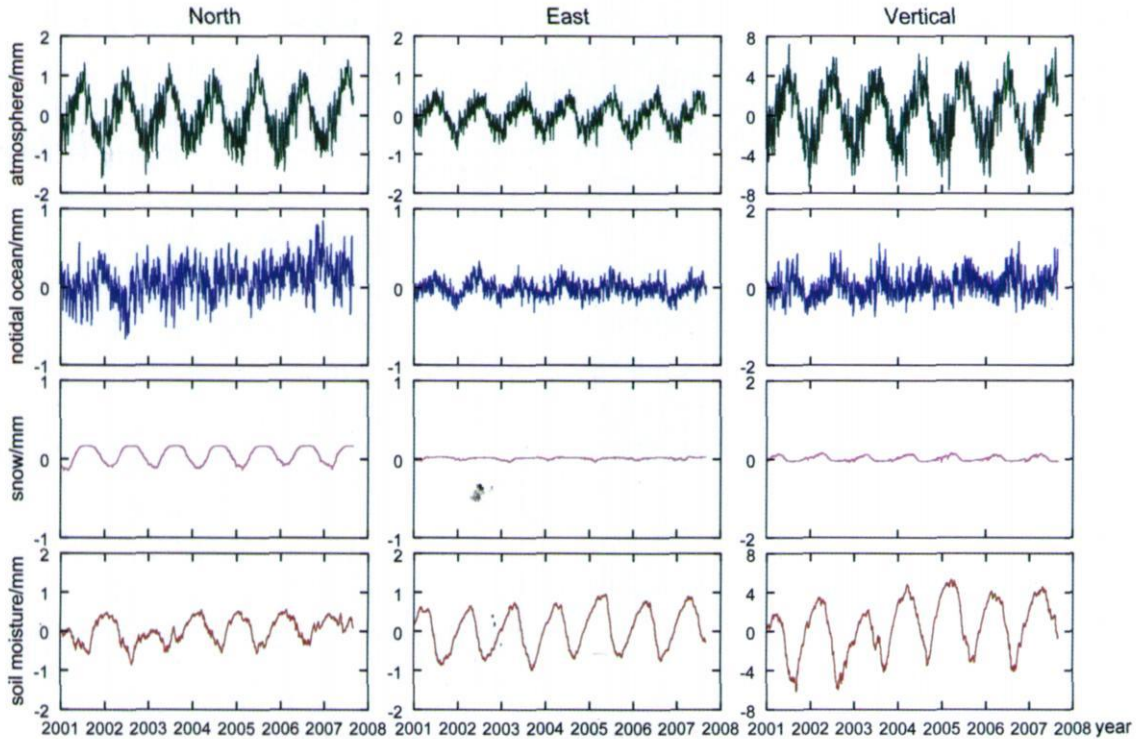


图 7 大气、非潮汐海洋、积雪和土壤水负荷引起的香港地区测站位置变化序列

Fig. 7 The deformation time series caused by atmospheric, nontidal oceanic, snow and soil moisture mass loading in Hong Kong

对应于 2001~2003 年间的 3 月和 9 月, 基准站坐标分量分别系统性地向北、东和下偏移, 量级高达 20 mm、30 mm 和 50 mm, 这与文献[23, 24]的结果一致。另外, 文献[24]指出高阶电离层误差在北方向也产生明显的半年信号。因此, 本文认为公共误差序列的北方向上的半年信号大部分是由于高阶电离层误差所致, 尽管短周期海洋潮汐、大气潮汐等负荷的混频效应<sup>[26]</sup>也可能引起这样的半年运动。高程分量上的半年信号是否也是由高阶电离层延迟所致, 尚有待进一步研究。以上的分析结果表明, 高阶电离层误差是影响香港地区 GPS 基准站位置精度进一步提高的主要因素。

## 5.2 噪声特性

本文测试的 10 种噪声模型中, 哪一种噪声模型对坐标序列来说是简单又有效的呢? 通常来讲, 最大似然估计值(MLE) 越大, 噪声模型越有效。蒙特卡罗模拟实验表明: 当两种模型的 MLE 之差  $\delta ML$  大于 3.0 时, 两种模型具有可区分性(95% 的显著水平)<sup>[13]</sup>。图 9 给出了 WH 噪声模型与其他 9 种噪声模型之间的平均  $\delta ML$  值。从图中可以直观地看出, 最有可能的模型是 FN+ VW、RW+ VW、PL+ VW 和 GM+ VW 四种模型。值得注意的是, VW 噪声模型明显优于 WH、FN+ WH、RW+ WH、PL+ WH 和 GM+ WH 五种噪声模型。这说明在以前的参考

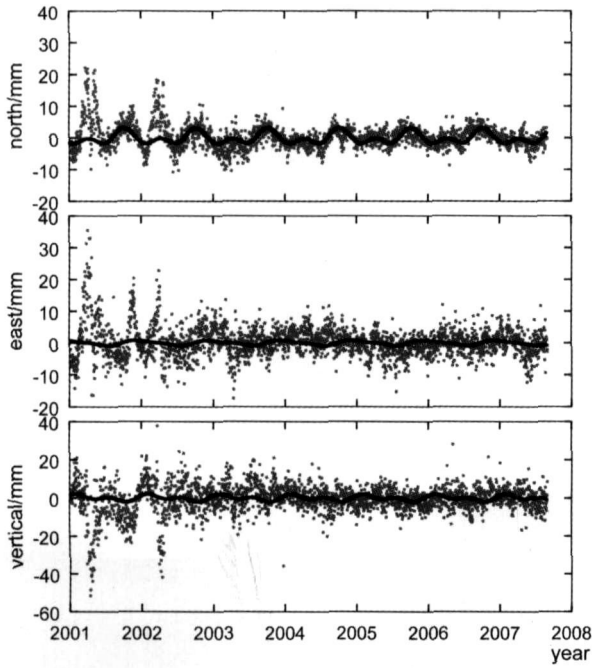


图 8 地表质量负荷效应改正后的公共误差序列  
 Fig. 8 Time series of Common Mode Errors after removing surface mass loading effects

文献中,把白噪声模型参数当作常数来对待是不够的<sup>[14-16]</sup>;同时也说明在做 GPS 时间序列分析时,考虑 GPS 处理软件输出的误差估值是十分重要的。

为了进一步确定最优的噪声模型,设 FN+ VW 模型为零假设,运用上述蒙特卡罗实验准则,结果只有 GM+ VW 模型拒绝零假设,从统计上来讲为最优模型。尽管如此,基于以下几个原因,本文仍采用 FN+ VW 模型作为最优模型。首先,以前的文献分析表明 GPS 坐标序列中的有色噪声和闪烁噪声相一致<sup>[14-16]</sup>;其次,假定有色噪声为一阶高斯马尔可夫噪声时,所求得交叉频率误差太大,而理论上应该为常数<sup>[17]</sup>;最后,基于 FN+ VW 模型计算的速度误差要比 GM+ VW 模型大,因此选择 FN+ VW 模型虽然保守一些,但可靠性较强。

表 2 列出了基于 FN+ VW 模型的测站坐标序列的噪声参数估值和重复性(WRMS)。三个坐标分量的平均可变白噪声系数分别为  $0.35 \pm 0.04$ ,  $0.28 \pm 0.05$  和  $0.40 \pm 0.04$ , 相当于平均白噪声分别为  $1.0 \pm 0.1$  mm、 $1.1 \pm 0.2$  mm 和  $4.3 \pm 0.4$  mm。为了比较滤波前后噪声的变化情况,本文基于 FN+ WH 模型计算了公共误差序列的噪声参数。三个坐标分量的白噪声估值分别为  $1.32 \pm 0.08$  mm、 $2.50 \pm 0.10$  mm 和  $3.72 \pm 0.21$  mm; 对应的闪烁噪声分别为  $8.24 \pm 0.30$  mm/yr<sup>1/4</sup>、 $11.89 \pm 0.45$  mm/yr<sup>1/4</sup> 和  $20.62 \pm$

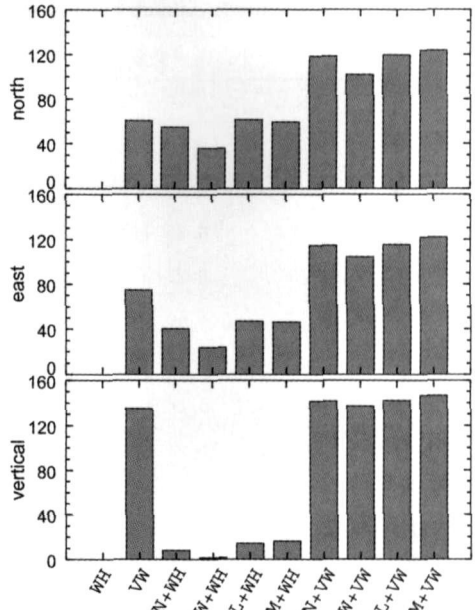


图 9 WH 噪声模型和其他 9 种噪声模型之间的平均  $\delta ML$  值

Fig. 9 Average  $\delta ML$  values with respect to the WH model  
 $0.84$  mm/yr<sup>1/4</sup>。由此可见,通过空间滤波技术,可有效地降低有色噪声对坐标序列的影响,但对白噪声的影响不大。

### 5.3 测站速度及其精度

基于 FN+ VW 模型估计的 ITRF2005 测站速度及其精度如表 3 所示。从表 3 中可以看出,顾及有色噪声所计算的速度误差要比只考虑可变白噪声计算的速度误差大 2~6 倍。对香港地区内部来讲,观测资料长度为 6.7 年的测站的水平速度误差小于  $0.2$  mm/yr, 观测资料长度为 3 年左右的测站的水平速度误差小于  $0.5$  mm/yr; 所有测站的垂直速度误差也都小于  $0.5$  mm/yr。图 10 给出了其他测站相对于测站 HKFN 的水平速度场。从整体上来讲,基准站的相对速度有向东南方向增加的趋势,但 HKNP 和 NKOH 两站表现异常。结合图 10 中断层分布可以发现,大屿山基准站 HKNP 以  $1.44 \pm 0.32$  mm/yr 的相对速度向  $S30 \pm 15^\circ W$  方向移动,与石壁断层的走向一致;香港岛基准站 HKOH 以  $1.17 \pm 0.42$  mm/yr 的相对速度向  $S48 \pm 20^\circ W$  方向移动,同样与田下山断层的走向一致。这很大程度上说明石壁断层和田下山断层目前为活动断层,而且表现为走滑断层。关于其构造形变解释,将另文讨论。由于观测时间较短,速度误差还较大。随着坐标序列长度的增加,将使站间相对速度的微小变化进



表 2 基于 FN+ VW 模型的测站坐标序列的噪声参数估值和重复性

Table 2 Noise amplitude estimates and repeatabilities of the filtered position time series based on FN+ VW model

测站	长度/年	可变白噪声系数			闪烁噪声/(mm/yr <sup>1/4</sup> )			重复性/mm		
		N	E	U	N	E	U	N	E	U
HKFN	6.7	0.34	0.25	0.36	1.14	2.43	2.98	1.03	1.25	3.67
HKKT	6.7	0.33	0.23	0.37	1.26	1.80	3.08	0.95	1.04	3.26
HKLT	6.7	0.30	0.26	0.37	1.89	2.03	4.27	0.95	1.17	3.36
HKMW	3.1	0.34	0.25	0.40	1.24	1.52	<u>0.00</u>	0.85	0.95	2.92
HKNP	3.1	0.45	0.40	0.49	1.96	2.91	<u>0.00</u>	1.19	1.56	3.70
HKOH	3.2	0.39	0.32	0.45	2.18	3.77	2.91	1.13	1.50	3.83
HKPC	2.9	0.35	0.26	0.36	0.96	1.03	<u>0.00</u>	0.85	0.94	2.82
HKSC	4.9	0.32	0.24	0.36	1.33	1.42	2.40	0.93	0.98	3.44
HKSL	6.7	0.32	0.24	0.37	1.28	1.62	3.80	0.92	1.05	3.50
HKSS	3.2	0.42	0.32	0.43	2.31	1.70	1.56	1.24	1.21	3.35
HKST	6.7	0.33	0.25	0.41	1.20	1.62	2.15	0.92	1.09	3.43
HKWS	3.2	0.37	0.31	0.41	0.72	1.22	<u>0.00</u>	0.88	1.13	3.14
均值		0.35±0.04	0.28±0.05	0.40±0.04	1.46±0.50	1.92±0.77	2.89±0.87	0.99±0.13	1.16±0.20	3.37±0.30

注: 本表带下划线的项是由于时间序列较短、高程白噪声相对较大使得最大似然估计计算的闪烁噪声为零. 在这种情况下, 表 3、表 4 和表 5 中相对应的带下划线的参数误差用平均放大倍数(基于 FN+ VW 模型所求得参数误差相对于基于 VW 模型所求得参数误差的比值)进行放大.

表 3 基于 FN+ VW 模型估计的 ITRF2005 基准站速度及其精度

Table 3 Estimated ITRF2005 velocities and their uncertainties (1 $\sigma$ ) based on the FN+ VW model

测站	速度/(mm/yr)			放大系数		
	N	E	U	N	E	U
HKFN	-13.63±0.08	31.15±0.16	1.49±0.23	3.26	5.23	2.52
HKKT	-14.22±0.09	31.19±0.12	0.77±0.23	3.76	4.63	2.83
HKLT	-14.00±0.13	31.73±0.14	0.91±0.31	5.26	4.56	3.60
HKMW	-14.27±0.18	31.70±0.22	<u>0.54±0.38</u>	4.06	4.35	<u>2.55</u>
HKNP	-14.87±0.28	30.42±0.41	<u>0.65±0.48</u>	4.38	4.84	<u>2.55</u>
HKOH	-14.41±0.29	30.28±0.49	0.22±0.46	5.44	6.80	2.46
HKPC	-13.56±0.15	31.21±0.16	<u>1.99±0.38</u>	3.25	3.14	<u>2.55</u>
HKSC	-13.61±0.16	32.13±0.17	0.02±0.36	3.10	3.12	1.88
HKSL	-13.93±0.09	31.97±0.12	0.44±0.29	3.91	4.20	3.16
HKSS	-13.87±0.30	31.31±0.23	-0.60±0.27	5.51	4.16	1.87
HKST	-13.92±0.10	32.07±0.13	0.94±0.20	3.60	4.00	2.05
HKWS	-14.20±0.11	31.81±0.18	<u>-0.26±0.36</u>	2.49	3.08	<u>2.55</u>

一步得到确认. 以上分析结果表明, 利用香港 GPS 连续运行参考站网络可对基准站间亚 mm 级的速度变化进行探测, 发现微小的断层活动信息.

### 5.4 本地季节性变化

如前所述, 在滤波过程中只保留了测站坐标线性项以及点位突变项, 因此滤波后的时间序列已经扣除了整网共有的季节性变化, 使得我们能够有效

地探测本地季节性变化. 图 4 频谱分析已经表明, 在滤波后坐标序列的每个分量均存在明显的周年和半年信号. 表 4 和表 5 分别列出了测站本地周年和半年信号的振幅和相位估值及精度. 分析表 4 和表 5 可以看出, 部分测站的周年信号都比较明显, 三个坐标分量的振幅分别高达 0.7 mm、1.5 mm 和 2.2 mm; 而半年信号相对较弱, 三个坐标分量

的振幅最大值分别为 0.3 mm、0.4 mm 和 0.9 mm。值得注意的是, 本地周年信号和公共误差中的周年信号基本处于同一量级水平。在分析 GPS 周年信号来源时, 以前的参考文献<sup>[3, 4, 19]</sup>主要集中在大尺度因素对测站高程的周年变化影响, 如大气、非潮汐海洋、积雪和土壤水等负荷效应, 而未讨论与测站自身紧密相关的小尺度周年变化以及对水平位置周年变

化的影响。本文分析表明, 小尺度周年变化同样能引起测站水平方向高达 1.5 mm 和高程方向高达 2.2 mm 的周年变化, 其影响不容忽视。

进一步对基准站坐标序列残差的分析表明, 所有基准站坐标序列的残差同样表现出非常强烈的季节性变化特征。以测站 HKFN 为例, 图 11 清楚地说明了残差序列具有夏天大、冬天小的季节性变化特

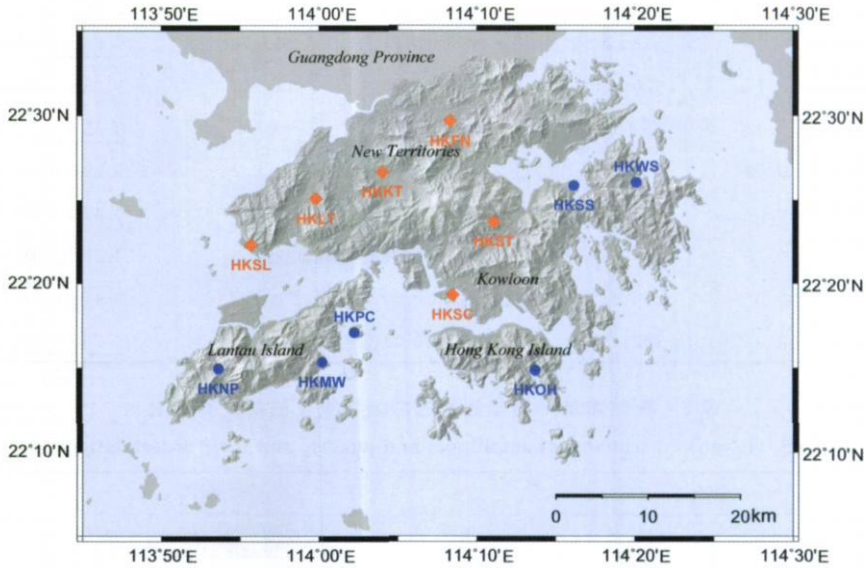


图 1 香港 GPS 连续运行参考站分布图

2000 年所建的基准站由菱形表示; 2004 年所建的基准站由圆形表示。

Fig. 1 Distribution of the Hong Kong GPS reference stations

Stations established in 2000 are marked with diamonds, while stations established in 2004 are shown as dots.

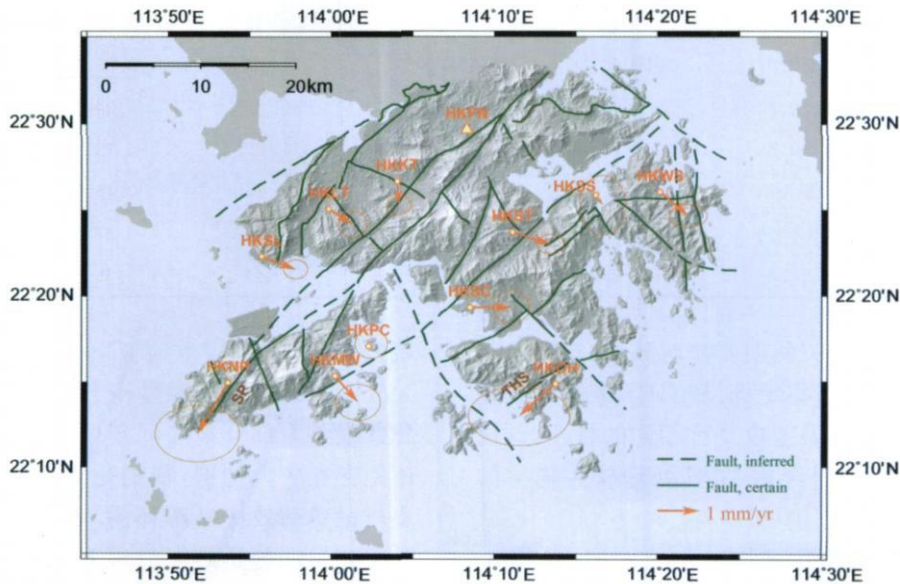


图 10 相对于基准站 HKFN 的水平速度场(误差椭圆为 95%置信水平)

图中 SP 代表石壁断层, THS 代表田下山断层

Fig. 10 Station horizontal velocities and their uncertainties at 95% confidence level relative to HKFN

SP denotes Shek Pik fault, and THS denotes Tin Ha Shan fault.

表 4 测站本地周年信号的振幅和相位估值及其精度

Table 4 Estimated annual amplitudes and phases, and their uncertainties ( $1\sigma$ )

测站	N		E		U	
	振幅/mm	相位/ $^{\circ}$	振幅/mm	相位/ $^{\circ}$	振幅/mm	相位/ $^{\circ}$
HKFN	0.41 $\pm$ 0.07	310 $\pm$ 9	0.86 $\pm$ 0.13	70 $\pm$ 9	0.93 $\pm$ 0.19	251 $\pm$ 12
HKKT	0.67 $\pm$ 0.07	214 $\pm$ 6	1.14 $\pm$ 0.10	196 $\pm$ 5	0.50 $\pm$ 0.19	336 $\pm$ 22
HKLT	0.30 $\pm$ 0.10	146 $\pm$ 19	0.49 $\pm$ 0.11	337 $\pm$ 13	2.24 $\pm$ 0.25	133 $\pm$ 6
HKMW	0.15 $\pm$ 0.11	317 $\pm$ 41	0.14 $\pm$ 0.13	127 $\pm$ 51	<u>1.38<math>\pm</math>0.23</u>	<u>34<math>\pm</math>10</u>
HKNP	0.46 $\pm$ 0.16	348 $\pm$ 20	0.98 $\pm$ 0.23	83 $\pm$ 14	<u>0.66<math>\pm</math>0.28</u>	<u>230<math>\pm</math>23</u>
HKOH	0.67 $\pm$ 0.17	59 $\pm$ 15	0.62 $\pm$ 0.29	13 $\pm$ 26	1.05 $\pm$ 0.29	285 $\pm$ 16
HKPC	0.63 $\pm$ 0.09	274 $\pm$ 8	1.46 $\pm$ 0.10	58 $\pm$ 4	<u>0.32<math>\pm</math>0.25</u>	<u>274<math>\pm</math>42</u>
HKSC	0.34 $\pm$ 0.09	57 $\pm$ 15	0.76 $\pm$ 0.10	278 $\pm$ 7	0.29 $\pm$ 0.19	168 $\pm$ 41
HKSL	0.35 $\pm$ 0.07	33 $\pm$ 12	0.08 $\pm$ 0.09	106 $\pm$ 64	0.43 $\pm$ 0.23	292 $\pm$ 30
HKSS	0.31 $\pm$ 0.18	119 $\pm$ 34	1.52 $\pm$ 0.14	223 $\pm$ 5	0.75 $\pm$ 0.19	81 $\pm$ 16
HKST	0.33 $\pm$ 0.07	268 $\pm$ 12	0.22 $\pm$ 0.09	255 $\pm$ 24	0.44 $\pm$ 0.16	13 $\pm$ 23
HKWS	0.21 $\pm$ 0.07	129 $\pm$ 19	0.56 $\pm$ 0.11	223 $\pm$ 11	<u>0.73<math>\pm</math>0.25</u>	<u>341<math>\pm</math>17</u>

表 5 测站本地半周年信号的振幅和相位估值及其精度

Table 5 Estimated semiannual amplitudes and phases, and their uncertainties ( $1\sigma$ )

测站	N		E		U	
	振幅/mm	相位/ $^{\circ}$	振幅/mm	相位/ $^{\circ}$	振幅/mm	相位/ $^{\circ}$
HKFN	0.18 $\pm$ 0.05	202 $\pm$ 16	0.17 $\pm$ 0.09	55 $\pm$ 32	0.13 $\pm$ 0.16	169 $\pm$ 71
HKKT	0.19 $\pm$ 0.05	301 $\pm$ 16	0.38 $\pm$ 0.07	319 $\pm$ 11	0.25 $\pm$ 0.15	308 $\pm$ 35
HKLT	0.17 $\pm$ 0.07	33 $\pm$ 24	0.29 $\pm$ 0.08	13 $\pm$ 16	0.88 $\pm$ 0.19	293 $\pm$ 12
HKMW	0.03 $\pm$ 0.08	94 $\pm$ 128	0.10 $\pm$ 0.09	350 $\pm$ 52	<u>0.11<math>\pm</math>0.11</u>	<u>215<math>\pm</math>85</u>
HKNP	0.18 $\pm$ 0.12	167 $\pm$ 36	0.44 $\pm$ 0.17	326 $\pm$ 22	<u>0.37<math>\pm</math>0.24</u>	<u>326<math>\pm</math>38</u>
HKOH	0.23 $\pm$ 0.12	211 $\pm$ 31	0.24 $\pm$ 0.20	85 $\pm$ 49	0.39 $\pm$ 0.23	87 $\pm$ 34
HKPC	0.06 $\pm$ 0.07	201 $\pm$ 60	0.05 $\pm$ 0.07	351 $\pm$ 89	<u>0.30<math>\pm</math>0.20</u>	<u>183<math>\pm</math>13</u>
HKSC	0.12 $\pm$ 0.06	93 $\pm$ 31	0.15 $\pm$ 0.07	280 $\pm$ 26	0.24 $\pm$ 0.16	190 $\pm$ 39
HKSL	0.17 $\pm$ 0.05	195 $\pm$ 18	0.17 $\pm$ 0.07	334 $\pm$ 22	0.72 $\pm$ 0.17	97 $\pm$ 14
HKSS	0.32 $\pm$ 0.13	228 $\pm$ 23	0.30 $\pm$ 0.10	11 $\pm$ 19	0.46 $\pm$ 0.17	228 $\pm$ 21
HKST	0.07 $\pm$ 0.05	13 $\pm$ 42	0.20 $\pm$ 0.07	60 $\pm$ 20	0.31 $\pm$ 0.14	15 $\pm$ 26
HKWS	0.11 $\pm$ 0.06	339 $\pm$ 28	0.12 $\pm$ 0.08	71 $\pm$ 41	<u>0.66<math>\pm</math>0.19</u>	<u>145<math>\pm</math>18</u>

征,这可能是与温度有关的误差源所致,如对流层延迟、天线热噪声、测站不稳定等.和GPS坐标中误差序列对比可以发现,中误差也具有相同的特性,这也检验了选择误差模型时考虑GPS处理软件输出的误差估值是必要而且正确的.

## 6 进一步提高香港地区GPS观测结果精度的探讨

如前所述,通过空间滤波可以有效地分离出区

域公共误差,探测本地亚mm级的地壳形变特征.大气、非潮汐海洋、积雪和土壤水质量负荷可以解释公共误差大部分垂向周年季节性变化,但两者之间还是存在较大差别,特别是半周年变化是不能用地表质量负荷效应来解释的.虽然可以定性分析出高阶电离层误差是最大的误差来源,但是其他因素不容忽视.同样,对于影响水平方向达1.5mm和垂向达2.2mm本地季节性变化,目前还不能给出定量的分析结果.下面分别就引起公共误差和本地季节性变化两方面的因素做简单分析和讨论.

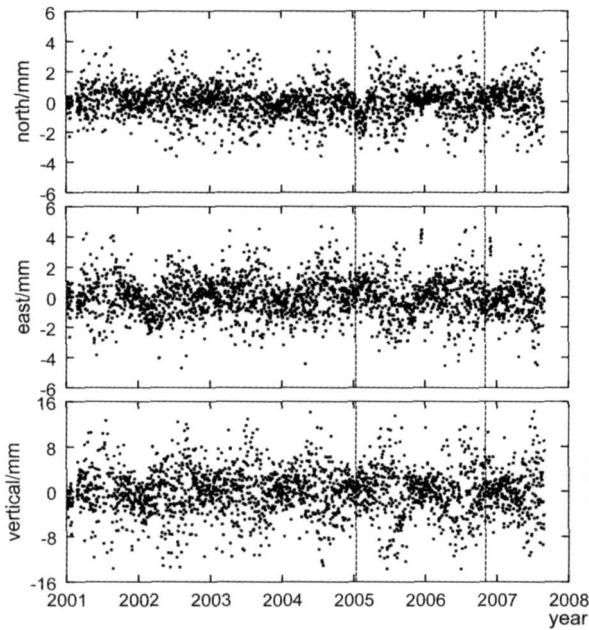


图 11 基准站 HKFN 的残差序列

Fig. 11 Daily residuals of the filtered time series of HKFN

## 6.1 引起公共误差的其他因素

(1) 参考框架实现途径的影响. 本文采用分布计算的办法, 利用香港周围 10 个 IGS 站来连接区域网基线解算结果和全球网基线解算结果. 全球网解算结果由于随时间解算策略、软件版本发生改变等因素影响, 其解算结果在时间尺度上精度不一致, 通常精度越来越高; 另外, 全球网与区域网解算结果由于软件版本、解算策略等影响, 同样存在不一致性. 这样, 造成了区域网呈现系统性的变化. 其次, 通过 IGS 核心站实现的全球参考框架本身的不稳定性也会造成区域公共误差<sup>[3]</sup>. 将于 2008 年底完成的 IGS 全球 GPS 数据重新处理和分析项目有望提高参考框架的精度.

(2) 海潮改正残差、大气压潮汐 (S1 和 S2 潮波) 的影响. 由于香港地处沿海, 海岸线复杂, 使得海潮改正误差比内陆测站大得多; 而且, 香港位于低纬地区, 易受大气压潮汐影响. 目前, 大气压潮汐还没有精确的模型改正. 这两种短周期潮汐负荷由于混频效应<sup>[26]</sup> 也可能引起测站位置较大的季节性变化.

(3) 解算整周模糊度的影响. 在我们区域网 GAMIT 数据处理中, 窄巷整周模糊度固定只有 50% ~ 60%. 绝大部分是由于香港本地网和 10 个 IGS 站构成的图形几何结构不好造成的, 香港本地网内部整周模糊度基本上可以完全固定. 这也引起区域公共误差, 主要集中在东分量和高程分量.

## 6.2 引起本地季节性变化的因素

(1) 标墩的不稳定性. 这包括标墩本身的不稳定因素和标墩基础随季节温度变化产生不同程度的热胀冷缩. 3 个基准站 (HKFN、HKPC 和 HKSC) 建在楼顶, 其中 HKFN 为 1.7m 不锈钢天线架, HKPC 和 HKSC 为 0.5m 高的钢筋混凝土柱子; 而其他 9 个测站均建在山上, 标墩是由 5m 高的钢筋混凝土柱子和混凝土基础构成, 并有倾斜仪检测柱子的稳定性. 分析倾斜仪数据表明, 柱子存在约为 5mm 的水平摆动. 尽管通过一天的平均其影响可以忽略不计, 但是假如存在周期性变化, 同样存在混频效应的影响<sup>[26]</sup>. 把建在楼顶的 3 个基准站滤波后的坐标序列和其他基准站做初步对比分析, 并未发现显著的异常. 但不能说明他们之间没有区别, 需要进一步利用倾斜仪数据做定量分析.

(2) 多路径效应误差. 多路径效应误差主要跟测站周围的环境有关. 对于固定测站来讲, 多路径效应误差随卫星轨道周期运动而具有周期性重复特征, 是目前 GPS 误差研究的热点和难点问题之一. 这种误差目前还难以有效地建模, 而且对长期季节性影响机理尚不清楚.

## 7 结 语

(1) 香港 GPS 基准站原始坐标序列具有高度的空间相关特性, 利用主成分空间滤波算法可有效去除公共误差, 大大削减有色噪声的影响, 从而提高坐标序列的信噪比. 公共误差具有区域季节性变化的特征.

(2) 在扣除大气、非潮汐海洋、积雪和土壤水质量负荷效应后, 发现高阶电离层误差很可能是香港 GPS 基准站位置误差的主要来源. 因此, 在 GPS 数据处理中, 需定量对 GPS 高阶电离层误差进行建模改正.

(3) 最大似然估计结果表明, 滤波后坐标序列中的噪声可以简单地用可变白噪声加闪烁噪声模型来描述. 若不顾及有色噪声的影响, 测站速度误差将被过高地估计约 2~6 倍. 总的说来, 利用香港 GPS 连续运行参考站网络可以得到小于 0.5 mm/yr 量级的三维相对速度场.

(4) 基准站间存在明显的相对运动特征, 相对水平速度达 1.5 mm/yr, 相对垂直速度高达 2.5 mm/yr. 香港地区地壳应力变化以及断层活动特征, 尚待进一步研究.

(5) 香港 GPS 连续运行参考站网内存在明显的本地季节性周期变化, 同时测站残差也表现出冬天小、夏天大的季节性变化特性. 与测站密切相关的小尺度因素和区域性的大尺度因素对 GPS 坐标序列的季节性变化贡献基本处于同一量级水平.

致谢 向 JPL 的董大南博士在地表质量负荷改正计算的帮助并与作者的有益讨论表示衷心感谢. 本文第一作者受香港理工大学博士研究生奖学金(RGLV)资助.

### 参考文献(References)

- [ 1 ] Segall P, Davis J L. GPS applications for geodynamics and earthquake studies. *Annu. Rev. Earth. Pl. Sc.*, 1997, **25**: 301~ 336
- [ 2 ] Herring T A. Geodetic applications of GPS. *P. IEEE*, 1999, **87**(1): 92~ 110
- [ 3 ] Dong D, Fang P, Bock Y, et al. Anatomy of apparent seasonal variations from GPS-derived site position time series. *J. Geophys. Res.-Sol. Ea.*, 2002, **107**(B4), 2075, doi: 10. 1029/ 2001JB000573
- [ 4 ] 张飞鹏, 董大南, 程宗颐. 利用 GPS 监测中国地壳的垂向季节性变化. *科学通报*, 2002, **47**(18): 1370~ 1377  
Zhang F P, Dong D N, Cheng Z Y, et al. Seasonal vertical crustal motions in China detected by GPS. *Chinese Sc. Bull.*, 2002, **47**(21): 1772~ 1780
- [ 5 ] Pun W K, Ambraseys N N. Earthquake Data Review and Seismic Hazard Analysis for the Hong-Kong Region. *Earthquake Eng. Struc.*, 1992, **21**(5): 433~ 443
- [ 6 ] Ding Y Z, Lai K W. Neotectonic fault activity in Hong Kong: evidence from seismic events and thermoluminescence dating of fault gouge. *J. Geol. Soc. London*, 1997, **154**: 1001~ 1007
- [ 7 ] Herring T A, King R W, McClusky S C. GAMIT Reference Manual: GPS Analysis at MIT version 10. 3. Cambridge: Mass. Inst. of Technol., 2006
- [ 8 ] Herring T A, King R W, McClusky S C. GLOBK Reference Manual: Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program version 10. 3. Cambridge: Mass. Inst. of Technol., 2006
- [ 9 ] Dong D, Herring T A, King R W. Estimating regional deformation from a combination of space and terrestrial geodetic data. *J. Geodesy*, 1998, **72**(4): 200~ 214
- [ 10 ] Wdowinski S, Bock Y, Zhang J, et al. Southern California Permanent GPS Geodetic Array: Spatial filtering of daily positions for estimating coseismic and postseismic displacements induced by the 1992 Landers earthquake. *J. Geophys. Res.-Sol. Ea.*, 1997, **102**(B8): 18057~ 18070
- [ 11 ] Nikolaidis R. Observation of geodetic and seismic deformation with the global positioning system. San Diego: Univ. of Calif., 2002
- [ 12 ] Dong D, Fang P, Bock Y, et al. Spatiotemporal filtering using principal component analysis and Karhunen - Loeve expansion approaches for regional GPS network analysis. *J. Geophys. Res.-Sol. Ea.*, 2006, **111**(B3), B03405, doi: 10. 1029/ 2005JB003806
- [ 13 ] Langbein J. Noise in two-color electronic distance meter measurements revisited. *J. Geophys. Res.-Sol. Ea.*, 2004, **109**(B4), B04406, doi: 10. 1029/ 2003JB002819
- [ 14 ] Zhang J, Bock Y, Johnson H, et al. Southern California Permanent GPS Geodetic Array: Error analysis of daily position estimates and site velocities. *J. Geophys. Res.-Sol. Ea.*, 1997, **102**(B8): 18035~ 18055
- [ 15 ] Mao A L, Harrison C G A, Dixon T H. Noise in GPS coordinate time series. *J. Geophys. Res.-Sol. Ea.*, 1999, **104**(B2): 2797~ 2816
- [ 16 ] Williams S D P, Bock Y, Fang P, et al. Error analysis of continuous GPS position time series. *J. Geophys. Res.-Sol. Ea.*, 2004, **109**(B3), B03412, doi: 10. 1029/ 2003JB002741
- [ 17 ] Williams S D P, Willis P. Error analysis of weekly station coordinates in the DORIS network. *J. Geodesy*, 2006, **80**( 8 - 11): 525~ 539
- [ 18 ] Press W H. Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing. 2nd ed. Cambridge [Cambridgeshire]; New York: Cambridge University Press, 2002, xxvi, 994
- [ 19 ] 王 敏, 沈正康, 董大南. 非构造形变对 GPS 连续站位置时间序列的影响和修正. *地球物理学报*, 2005, **48**( 5 ): 1045~ 1052  
Wang M, Shen Z K, Dong D N. Effects of non-tectonic crustal deformation on continuous GPS position time series and correction to them. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, **48**(5) : 1045~ 1052
- [ 20 ] McCarthy D D, Petit G. IERS Conventions ( 2003 ). IERS Tech. Note 32. Frankfurt am Main, Germany: Int. Earth Rotation and Ref. Syst. Serv., 2004
- [ 21 ] Matsumoto K, Takanezawa T, Ooe M. Ocean Tide Models Developed by Assimilating TOPEX/POSEIDON Altimeter Data into Hydrodynamical Model: A Global Model and a Regional Model around Japan. *Journal of Oceanography*, 2000, **56**(5): 567~ 581
- [ 22 ] Farrell W E. Deformation of Earth by Surface Loads. *Rev Geophys. Space Ge.*, 1972, **10**(3): 761
- [ 23 ] Fritsche M, Dietrich R, Knofel C, et al. Impact of higher-order ionospheric terms on GPS estimates. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, **32**(23), L23311, doi: 10. 1029/ 2005GL024342
- [ 24 ] Kedar S, Hajj G A, Wilson B D, et al. The effect of the second order GPS ionospheric correction on receiver positions. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, **30**(16), 1829, doi: 10. 1029/ 2003GL017639
- [ 25 ] Chen W, Gao S, Hu C W, et al. Effects of ionospheric disturbances on GPS observation in low latitude area. *Gps Solut.*, 2008, **12**(1): 33~ 41
- [ 26 ] Penna N T, King M A, Stewart M P. GPS height time series: Short-period origins of spurious long-period signals. *J. Geophys. Res.-Sol. Ea.*, 2007, **112**(B2), B02402, doi: 10. 1029/ 2005JB004047

( 本文编辑 胡素芳 )