

高阶电离层延迟对 GPS 坐标时间序列的影响分析

姜卫平^{①*}, 李昭^②, 邓连生^②, 夏传义^②

① 武汉大学卫星导航定位技术研究中心, 武汉 430079;

② 武汉大学测绘学院, 武汉 430079

* 联系人, E-mail: wpjiang@whu.edu.cn

2013-04-24 收稿, 2013-07-30 接受, 2014-02-11 网络版发表

国家高技术研究发展计划(2012AA12A209)和国家自然科学基金(41074022, 41374033)资助

摘要 基于高阶电离层延迟改正模型, 确定了不同阶次电离层延迟对双频 GPS 载波信号的影响量, 并根据国际地球自转与参考系统服务(international earth rotation and reference systems service, IERS)协议 2010 推荐的最新模型, 对全球均匀分布的 109 个国际 GNSS 服务(international GNSS service, IGS)跟踪站 1999~2003 年的全球定位系统(global positioning system, GPS)数据重新进行了精密处理, 量化了高阶电离层延迟对全球 GPS 坐标时间序列的贡献. 研究结果表明, 高阶电离层延迟改正会造成较大的测站速度变化, 在赤道附近的测站垂直速度变化最大可达约 1 mm a^{-1} ; 能显著降低赤道附近测站垂直分量及亚洲南部测站南北分量的加权均方根(weighted root mean square, WRMS), 最佳改善效果达 10%(中国 LHAS 站南北分量); 可有效减小 IGS 基准站各种不同周期信号的振幅; 据此, 提出高阶电离层延迟可能是造成中纬测站垂直周年、东西方向半年及低纬测站垂直半年运动的主要原因之一.

关键词

高阶电离层延迟
GAMIT/GLOBK
全球 GPS 数据
重新处理
加权均方根分析
频谱分析

电离层延迟是全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)导航与定位的主要误差源之一. 目前, 大多数 GPS 精密数据处理仅考虑了一阶电离层延迟改正. 近年来, 国内外学者就高阶电离层延迟对 GPS 定位的影响展开了广泛深入的研究. 研究表明, 忽略高阶电离层延迟会造成定位的厘米级甚至更大的误差^[1-9], 并导致 GPS 坐标时间序列出现虚假的周日、季节性及年际变化信号^[1,2], 这种信号可能被错误地解释成潮汐效应以及地壳运动. 忽略二阶电离层效应不仅会造成测站南北方向较强的半年振荡, 而且还会造成测站的周日变化^[1,2]; 同时, 未模型化的二、三阶电离层延迟可能是造成 IGS 基准站南北方向残差时间序列近年周期振荡的原因^[9]. 深入研究电离层高阶项(包括二、三阶项延迟)对 GPS 坐标时间序列的贡献, 有利于建立更精确的地球参考框架及更合理地解释地壳监测网络跟踪站的运动特

征. 因此, 目前 IGS 中心发布的全球 IGS 基准站数据重新处理计划已将二阶电离层改正纳入最新数据处理策略(<http://acc.igs.org/reprocess2.html>).

本文研究了 GPS 精密数据处理中的高阶电离层延迟改正建模方法, 确定了不同阶次电离层延迟对双频 GPS 载波信号的影响量, 在此基础上根据 IERS 协议 2010 推荐的最新模型, 采用 GAMIT 软件对全球均匀分布的 109 个 IGS 跟踪站在电离层活动高峰期 1999~2003 年的 GPS 数据进行了重新处理, 分别从时间域及频率域入手量化了高阶电离层延迟对 GPS 坐标时间序列的贡献.

1 高阶电离层延迟模型及其对双频 GPS 载波信号的影响量级

扩展至四阶的载波相位电离层延迟量可表示为^[10]

引用格式: 姜卫平, 李昭, 邓连生, 等. 高阶电离层延迟对 GPS 坐标时间序列的影响分析. 科学通报, 2014, 59: 913-923

Jiang W P, Li Z, Deng L S, et al. Impact of higher order ionospheric delay on continuous GPS coordinate time series (in Chinese). Chin Sci Bull (Chin Ver), 2014, 59: 913-923, doi: 10.1360/972012-1785

$$\delta\rho_{1,P} = -\frac{s_1}{f^2} - \frac{s_2}{f^3} - \frac{s_3}{f^4} - \frac{s_4}{f^5}, \quad (1)$$

其中, $\delta\rho_{1,P,1} = -\frac{s_1}{f^2}$, $\delta\rho_{1,P,2} = -\frac{s_2}{f^3}$, $\delta\rho_{1,P,3} = -\frac{s_3}{f^4}$,

$\delta\rho_{1,P,4} = -\frac{s_4}{f^5}$, 分别表示一、二、三、四阶延迟量. 式中:

$$\begin{cases} s_1 = 40.309 \int_{r_T}^{\bar{r}_R} N_e dl, \\ s_2 = 1.1284 \times 10^{12} \int_{r_T}^{\bar{r}_R} N_e B \cos \theta dl, \\ s_3 \approx 812.42 \int_{r_T}^{\bar{r}_R} N_e^2 dl, \\ s_4 \approx 4.55 \times 10^{13} \int_{r_T}^{\bar{r}_R} N_e^2 B \cos \theta dl, \end{cases} \quad (2)$$

N_e 表示自由电子密度; B 为站星连线与电离层薄层交叉点(即电离层穿刺点)处的地磁场强度, 通常假定电离层薄层高度为 300~450 km^[4]; θ 表示卫星信号矢量与地磁场强度矢量在电离层交叉点处的夹角. 不同阶次电离层延迟量之间的近似关系可表示为

$$\begin{cases} \delta\rho_{1,P,1} \approx -\frac{1.2 \times 10^{20}}{f^2}, \quad \frac{\delta\rho_{1,P,2}}{\delta\rho_{1,P,1}} \approx \frac{2.8 \times 10^5}{f}, \\ \frac{\delta\rho_{1,P,3}}{\delta\rho_{1,P,2}} \approx \frac{7.2 \times 10^7}{f}, \quad \frac{\delta\rho_{1,P,4}}{\delta\rho_{1,P,3}} \approx \frac{1}{f} (5.6 \times 10^5 + 2.3 \times 10^3). \end{cases} \quad (3)$$

表 1 给出了不同阶次电离层延迟对双频 GPS 载波信号的影响量^[10]. 从表 1 可以看出, 为了获得毫米级高质量、一致性的计算结果, GPS 测量数据处理需考虑二、三阶电离层延迟改正, 对于太阳活动峰年期间的 GPS 观测数据尤其重要; 四阶项的影响小于三阶项的 0.1%, 对 GPS 观测值的影响可以忽略不计. 本文的高阶电离层延迟特指二、三阶电离层延迟.

2 GPS 数据处理

IERS 协议 2010 建议, 未来地球参考框架的建立需考虑高阶电离层影响^[10]. 为了确定高阶电离层延迟对 IGS 基准站坐标时间序列的影响, 我们设计了一组对比实验, 根据 IERS 协议 2010 推荐的最新模型^[10], 并结合近年来国际上关于全球 GPS 数据处理的优秀经验^[9,11-13], 采用精密的数据处理策略对全球均匀分布的 109 个 IGS 基准站观测数据进行重新处理. 实验 a 仅计算一阶电离层延迟, 实验 b 考虑二、三阶电离层延迟影响^[9]. 除电离层延迟的处理方式不同以外, 实验 a 和 b 的其余数据处理策略完全相同. IGS 基准站分布如图 1 所示, 软件平台为 GAMIT/GLOBK (V10.4)^[14,15].

GAMIT 10.4 通过设置 sestbl.文件中的 Ion model=

表 1 不同阶次电离层延迟对 GPS 双频信号的影响量

频率(MHz)	观测技术	$\delta\rho_{1,P,1}$ (mm)	$\delta\rho_{1,P,2}$ (mm)	$\delta\rho_{1,P,3}$ (mm)	$\delta\rho_{1,P,4}$ (mm)
1228	GPS(L2)	-8.0×10^4	-1.8×10^1	-1.1×10^0	-5.0×10^{-4}
1575	GPS(L1)	-4.8×10^4	-8.5×10^0	-3.9×10^{-1}	-1.4×10^{-4}

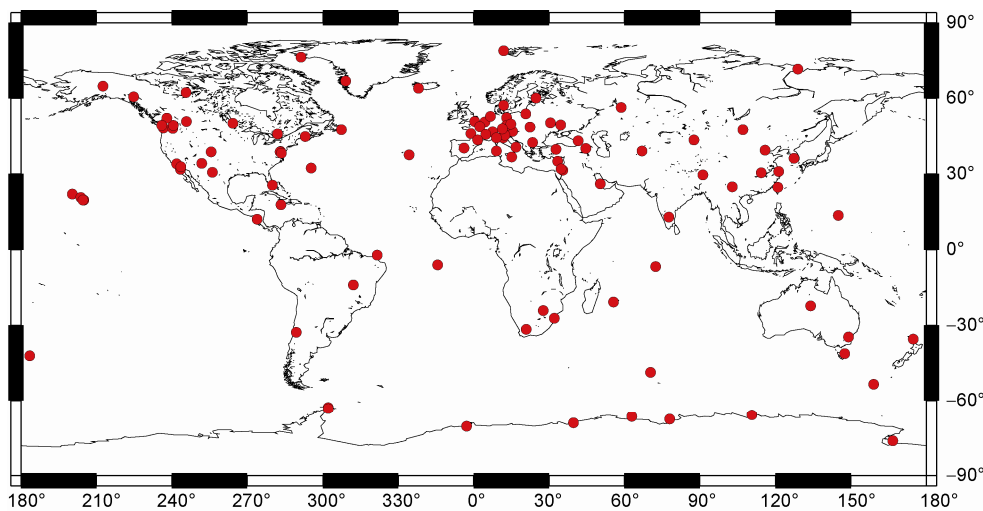


图 1 GPS 数据处理选取的 109 个 IGS 基准站分布

GMAP 及 Map field=IGRF11 或者 Map field=DIPOLE, 同时在工程目录下新建 ionex 目录用于存放日电离层文件, 并启用 sh_gamit 命令的 -ion 选项实施二、三阶电离层改正, 默认状态为关闭, 即仅计算一阶电离层延迟. 二、三阶电离层延迟量的具体计算公式分别为^[14]

$$\begin{cases} \delta\rho_{1,P,2} = -\frac{1.1283 \times 10^{12} \int N_e B \cos \theta dL}{f_i^3}, \\ \delta\rho_{1,P,3} = -\frac{812.37519 \int N_e^2 dL}{f_i^4}, \end{cases} \quad (4)$$

各变量定义与式(2)相同. 式(4)的系数根据实际经验确定, 较式(2)相比更为精确. 其中,

$$\begin{cases} \int N_e B \cos \theta dL = \text{dot}(B, \text{uni_vec}) \times \text{STEC}, \\ \int N_e^2 dL \approx \eta N_{\max} \int N_e dl \approx 0.66 \times \\ \left(\frac{(20-6) \times 10^{12}}{(4.55-1.38) \times 10^{18}} \times (\text{VTEC} - 4.55 \times 10^{18}) + 20 \times 10^{12} \right) \\ \times \text{STEC}, \end{cases} \quad (5)$$

式中, *uni_vec* 表示卫星至接收机传播信号单位矢量, *dot* 表示 *uni_vec* 与地磁场强度矢量 *B* 的点积. N_{\max} 表示沿电子密度廓线的最大电子密度值, η 为形状因子 (~0.66), VTEC 和 STEC 分别表示垂直总电子含量 (vertical total electron content, VTEC) 及沿信号传播路径的总电子含量 (slant total electron content, STEC), 单位为 (electrons m^{-2}), STEC 由 VTEC 及投影函数计算. 2001 年第 252 天及以后采用改进的单层投影函数:

$$F(z) = \frac{1}{\cos z'}, \quad \sin z' = \frac{R_E}{R_E + H} \sin(\alpha z), \quad (6)$$

第 252 天以前采用单层投影函数:

$$F(z) = \frac{1}{\cos z'}, \quad \sin z' = \frac{R_E}{R_E + h_i} \sin(z), \quad (7)$$

式中, z 为接收机接收信号处的天顶距, R_E 为地球平均半径 (~6371 km), z' 为传播信号位于电离层薄层穿刺点处的天顶距, H 为改进单层投影函数模型最佳近似薄层高度 (~506.7 km)^[14], α 为常数 (~0.9782), h_i 为电离层薄层距地球表面的高度.

GAMIT10.4 读取的全球 VTEC 数据由欧洲定轨中心 (Center for Orbit Determination in Europe, CODE) 提供 (<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/ionex/>

[yyyy/ddd/codgddd0.yyi.Z](http://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/ionex/)), 时间分辨率在 1998 年第 87 d 以前为 24 h, 之后为 2 h. 综合考虑 VTEC 产品的时间分辨率及电离层活动的频繁性, 将观测时段选为 1999~2003 年. 另外, 考虑到国际地磁场参考模型 (international geomagnetic reference field, IGRF) 相对于同轴倾斜偶极磁场模型的优越性^[9], 选用最新发布的 IGRF11 获取站星连线与电离层薄层穿刺点处的地磁场强度 B , 用于计算电离层二阶延迟量. 1998 年第 87 天及以后电离层薄层高度假设为 450 km^[14]. 地磁场强度随不同高度而变化, 为了保证一致性, 这里将地磁场高度固定为 450 km. 考虑到一周内测站位置变化缓慢, 可以忽略. 本文仅处理每周三的 GPS 数据, 其结果既能反映测站的长期变化趋势, 又可以提高工作效率.

本文采用的数据策略为: 数据处理过程中同时解算卫星轨道、地球定向参数 (earth orientation parameter, EOP)、测站坐标、对流层延迟及水平梯度参数, 测站位置施加松弛约束 (IGS 核心站 5 cm, 非核心站 10 cm); 尽可能计算模糊度固定解^[9]; 卫星截止高度角设置为 10° , 并根据验后相位残差对观测值进行重新定权^[11]; 计算固体潮、海潮、极潮改正, 其中海潮负载模型采用 FES2004^[16]; 对流层投影函数采用维也纳投影函数 VMF1^[17]; 不考虑大气潮汐影响; 计算先验对流层干分量延迟所需的气压及温度数据由测站 RINEX 格式的气象文件 (.m) 提供^[18], 无气象文件的测站则采用 VMF1 数值天气模型提供的数据; 不计算非潮汐大气压改正^[11]; 启用绝对天线相位中心改正模型^[19] (igs08_1636.atx); 最后对获得的周日坐标时间序列剔除粗差后采用 GLOBK 实施基准转换, 获取 ITRF08 框架下的测站速度及坐标时间序列^[15]. 基准转换仅估计平移量及旋转量 6 个参数, 以减小未模型化非潮汐大气压负载造成的基准扭曲^[20].

3 数据分析与讨论

本文从实验 a 和 b 造成的 IGS 基准站速度及其不确定度, 坐标时间序列的加权均方根 (weighted root mean square, WRMS) 及频谱特征变化入手研究高阶电离层延迟对 GPS 坐标时间序列的影响.

3.1 高阶电离层延迟对基准站长期速度及不确定度的影响

图 2 给出了实验 a 和 b 得到的基准站 N, E, U 分

量速度及其不确定度差值分布, 可以分析未模型化高阶电离层延迟对全球 IGS 基准站的长期速度及不确定度的影响. 考虑到速度不确定度的可靠性及采用观测数据跨越时段的局限性(5 a), 这里仅估计连续坐标时间序列超过 1.5 a(GPS周 78), 且对于同一测站跨越时段最长的 IGS 基准站速度.

图 2 的统计结果表明, 高阶电离层延迟对于 IGS 基准站的长期线性速度有一定影响, 但对于速度不确定度基本无影响. 中低纬度区域影响较大, 高纬地

区较小(OHIG 除外); U 分量的影响最大, 赤道附近测站 U 分量的变化最大可达约 1 mm a^{-1} (GUAM 站, 西太平洋; KOKB 站, 夏威夷); 水平分量的速度影响较小, 不超过 0.5 mm a^{-1} . 另外, 忽略高阶电离层延迟改正可能导致北半球测站 U 分量的过低及南半球测站 U 分量的过高估计. 为了获得更为可靠的测站垂直速度应用于气象学及冰后回弹、海平面变化等地球动力学研究, 对赤道附近测站进行高精度数据处理时需考虑高阶电离层延迟的影响.

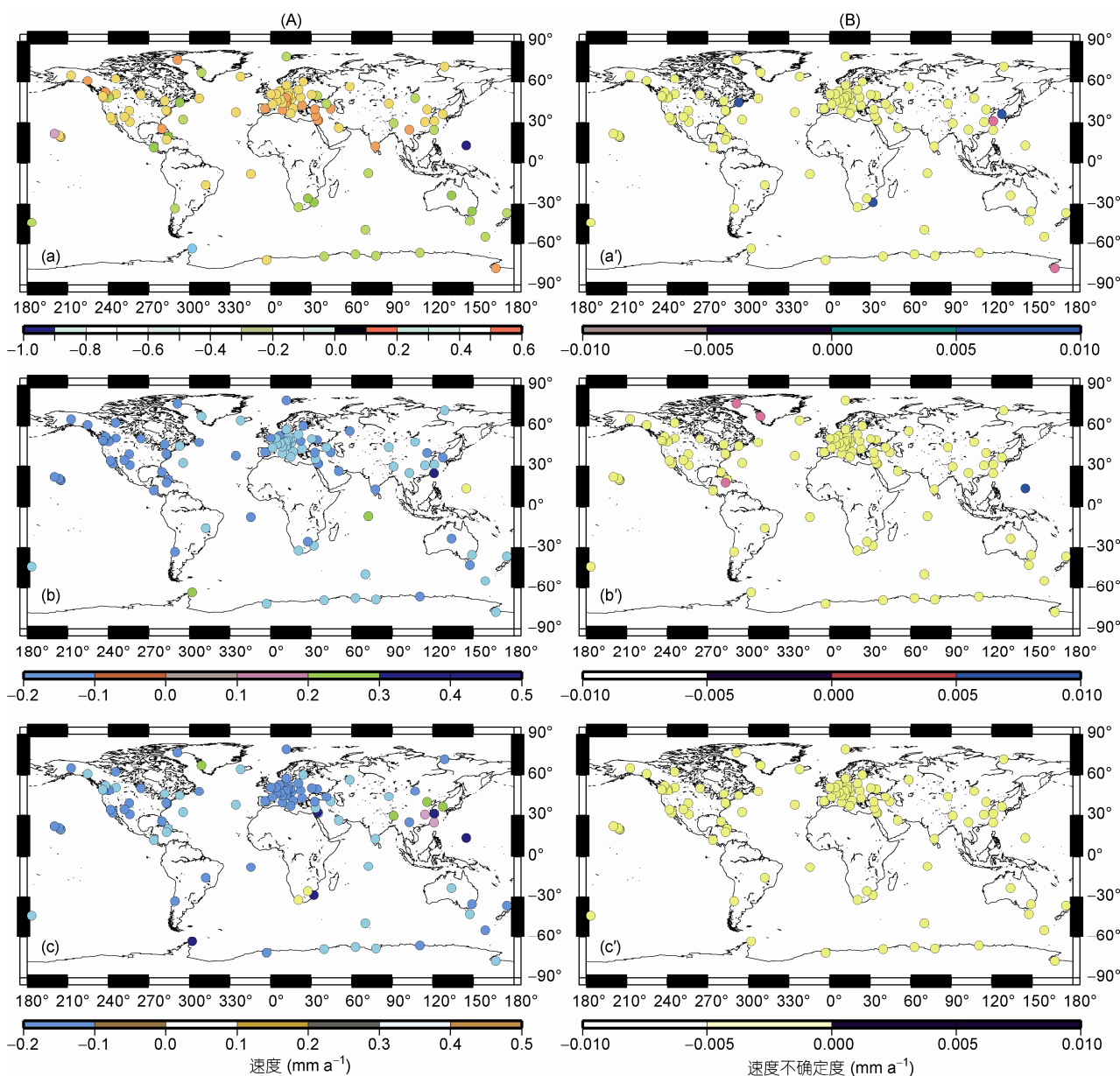


图 2 高阶电离层延迟改正造成的 IGS 站速度(A)及不确定度(B)差值分布
(a)和(a'), (b)和(b'), (c)和(c')分别为 U, E, N 分量

3.2 高阶电离层延迟对 GPS 坐标时间序列 WRMS 的影响分析

为了研究高阶电离层延迟对 IGS 基准站位移时间序列精度的影响,分别计算了高阶电离层延迟改正前后测站坐标时间序列的 WRMS. 假设 $\omega_{neu}(i)=1/sig_{neu}(i)^2$, GPS 坐标时间序列的 WRMS 定义为

$$wrms_{neu}(gps) = \sqrt{\frac{\sum_1^{ndat} \omega_{neu}(i) \left(gps_{neu}(i) - \frac{\sum_1^{ndat} \omega_{neu}(i) \cdot gps_{neu}(i)}{\sum_1^{ndat} \omega_{neu}(i)} \right)^2}{\sum_1^{ndat} \omega_{neu}(i)}}}, \quad (8)$$

式中 $gps_{neu}(i)$, $sig_{neu}(i)$ 及 $wrms_{neu}(gps)$ 分别表示 GPS 测站在 i 时刻的 N, E, U 分量位移、不确定度及 WRMS, $ndat$ 表示时间序列长度, 单位为 GPS 周. 为了保证统计结果的可靠性, 这里同样仅统计连续坐标时间序列超过 1.5 a 的 IGS 基准站 WRMS. 改正前后的测站 WRMS 变化值及其变化率空间分布如图 3 所示, 负值表示 WRMS 减小. WRMS 变化率的定义为

$$\Delta WRMS_{neu} \% = \frac{\Delta wrms_{neu}}{wrms_{neu_original}} \times 100, \quad (9)$$

式中 $\Delta WRMS_{neu}$ 表示 NEU 分量的 WRMS 变化率, $\Delta wrms_{neu}$ 为图 3(A) 所示的各分量 WRMS 变化值, $wrms_{neu_original}$ 表示未经高阶电离层延迟改正获得的测站各分量坐标时间序列 WRMS.

从图 3 可以看出, 多数测站(66%)的垂向 WRMS 经高阶电离层延迟改正后减小, 其中赤道附近测站改善效果最显著, 如北纬 13° 的 IISC 站 4% 的垂向 WRMS 可以由高阶电离层延迟解释; 测站 N 分量的 WRMS 变化呈现显著的地域性特征, WRMS 减小的测站数目占测站总数的 47%, 主要聚集在亚洲南部, 减小量约为 4%~10%, 包括中国区域的 5 个测站, 其中 LHAS 站 WRMS 减小量达 10%; E 分量的改善效果最弱, 仅能使得 33% 测站的 WRMS 减小, 主要集中在大洋洲、美洲及亚洲沿海地带. 尽管如此, 计算高阶电离层延迟改正对欧洲区域测站 N 分量的 WRMS 不但没有改进, 相反会使得多数测站的 WRMS 增大约 5%~10%.

3.3 高阶电离层延迟导致的 GPS 坐标时间序列频谱特征的变化

为了研究在观测值层面进行高阶电离层延迟改

正造成的基准站周期运动特征, 本文采用 CATS 软件获得了实验 a 和 b 得到的 ITRF08 框架下的坐标时间序列功率谱密度(power spectrum density, PSD)^[21]. 对同一测站的 2 组 PSD 求差, 其差值即描述了高阶电离层延迟的贡献. 改正前后各纬度地区部分代表性 IGS 基准站的 PSD 差异图如图 4~6 所示. (a)和(a'), (b)和(b'), (c)和(c')依次为 N, E, U 分量 PSD 结果; 图中蓝、红色曲线分别表示考虑高阶电离层延迟影响前后获得的 PSD, 图中黑色曲线表示高阶项改正造成的 PSD 变化值, 正值表示信号能量减弱, 即周期振幅减小, 负值则表示周期振幅增大. ALGO, BRAZ 站周期大于 3 a 的信号频谱趋于稳定, 为了强调测站的较短周期变化趋势, 图 4 及 6 中的横坐标被裁剪为 3 a.

从图 4~6 可以看出, 高阶电离层延迟会造成 IGS 基准站各种周期性信号振幅的变化, 且对不同纬度区域测站及同一测站 N, E, U 分量的影响各不相同. 低纬 BRAZ 站影响最大, 高纬 SYOG 站次之, 中纬 ALGO 站最小; U 分量影响最大, 约为 N 和 E 分量的 5~10 倍. 计算高阶电离层延迟改正可显著减小中纬 ALGO 站的 U 分量周年及 E 分量半年振幅, 减小幅度分别达 12% 和 30%, 然而 E 分量 $T < 0.5$ a 的部分高频信号振幅却呈现增大的趋势; 对于低纬区域的 BRAZ 站, 考虑高阶电离层延迟影响使得 N 分量多数周期信号的振幅减小, 能够解释 N 和 U 分量分别约 15% 及 30% 的半年运动, 但是会显著增大 E 分量的半年运动(41%)及 E 和 U 分量 $T > 1$ a 的信号振幅. 高纬地区的 SYOG 站经高阶项改正后 N 分量 $T \approx 130$ d, E 分量 $T \approx 422$ d 及 U 分量 $T \approx 337$ d 的信号振幅显著减小, 减小幅度分别达 44%, 54% 及 8%, 但是会造成各分量明显的半年运动.

从本文计算得到的所有其他 IGS 基准站的频谱特征来看, 相同纬度带内测站表现为相似的频谱特征, 由此可以得出结论, 忽略高阶电离层延迟改正会造成 IGS 基准站坐标时间序列的失真, 导致各种虚假周期信号的产生. 同时, 可以认为高阶电离层延迟可能是造成中纬测站垂直周年及东西方向半年、低纬测站垂向半年运动的主要原因之一. 计算高阶电离层延迟改正对于全球基准站(尤其是低纬区域测站)非线性运动的正确物理解释具有不可忽视的作用.

4 结论

本文从高阶电离层延迟改正的建模方法出发,

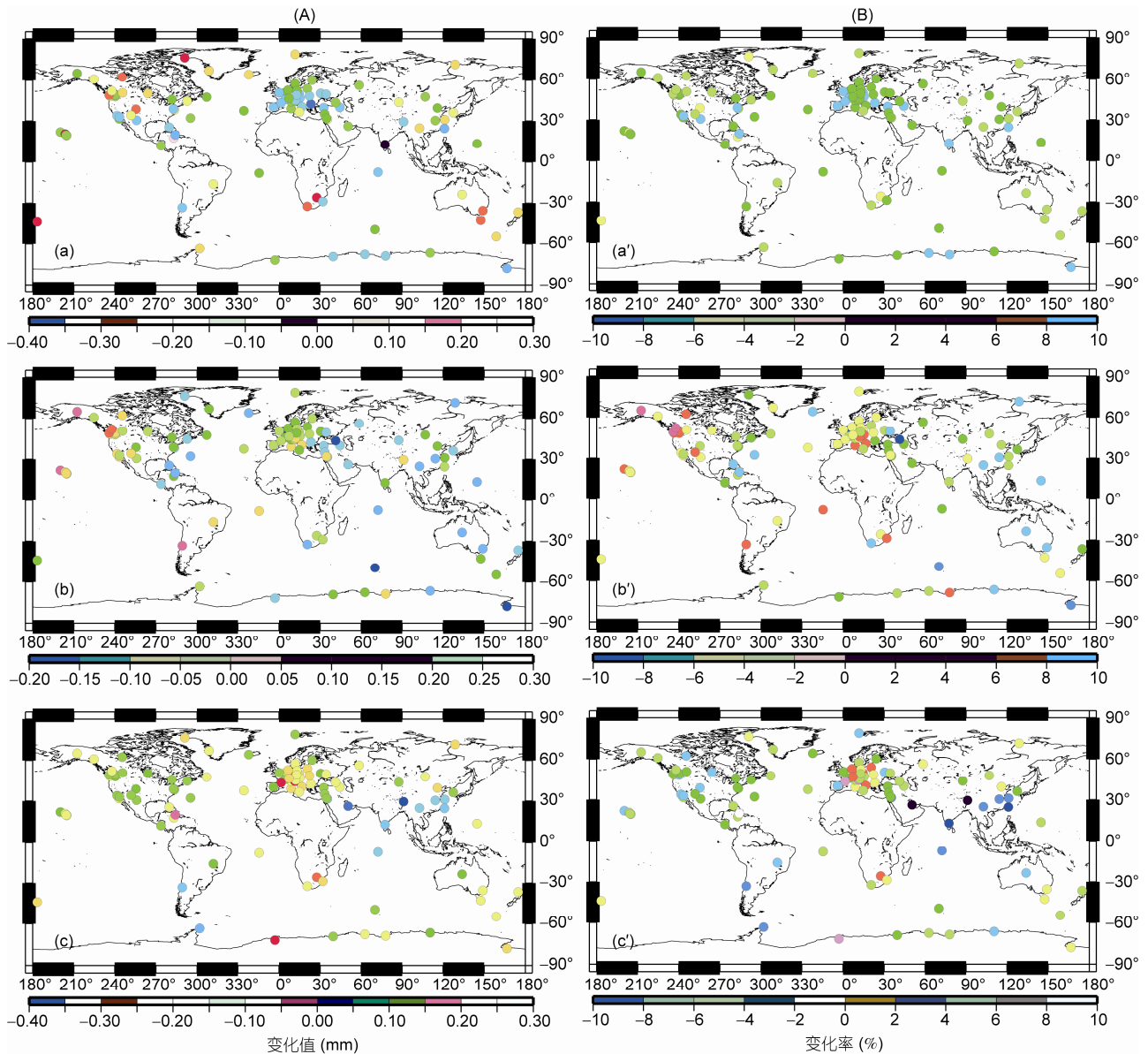


图3 高阶电离层延迟改正造成的IGS基准站WRMS变化值(A)及变化率(B)
(a)和(a'), (b)和(b'), (c)和(c')分别为U, E, N分量

探讨了不同阶次电离层延迟对双频GPS载波信号的影响量,并对全球均匀分布的109个IGS跟踪站1999~2003年的GPS数据进行了重新处理,确定了高阶电离层延迟对全球IGS基准站坐标时间序列的贡献,得出了如下结论:

(1) 高阶电离层延迟改正会造成较大的测站速度变化,赤道附近测站U分量的速度变化最大可达约 1 mm a^{-1} .忽略高阶电离层延迟改正会导致北半球测站U分量的普遍过低及南半球测站U分量的普遍过高估计.

(2) 顾及高阶电离层延迟影响能显著降低赤道附近测站的U分量及亚洲南部测站N分量的坐标时间序列WRMS.其中,中国区域LHAS站N分量WRMS改善效果最明显,减小幅度达10%.

(3) 计算高阶电离层延迟改正能有效减小中纬测站U分量周年、E分量半年、低纬测站U分量半年及高纬地区E分量约422d的周期振幅,由此可以认为高阶电离层延迟可能是造成中纬测站垂直周年及东西方向半年、低纬测站垂向半年运动的主要原因之一.

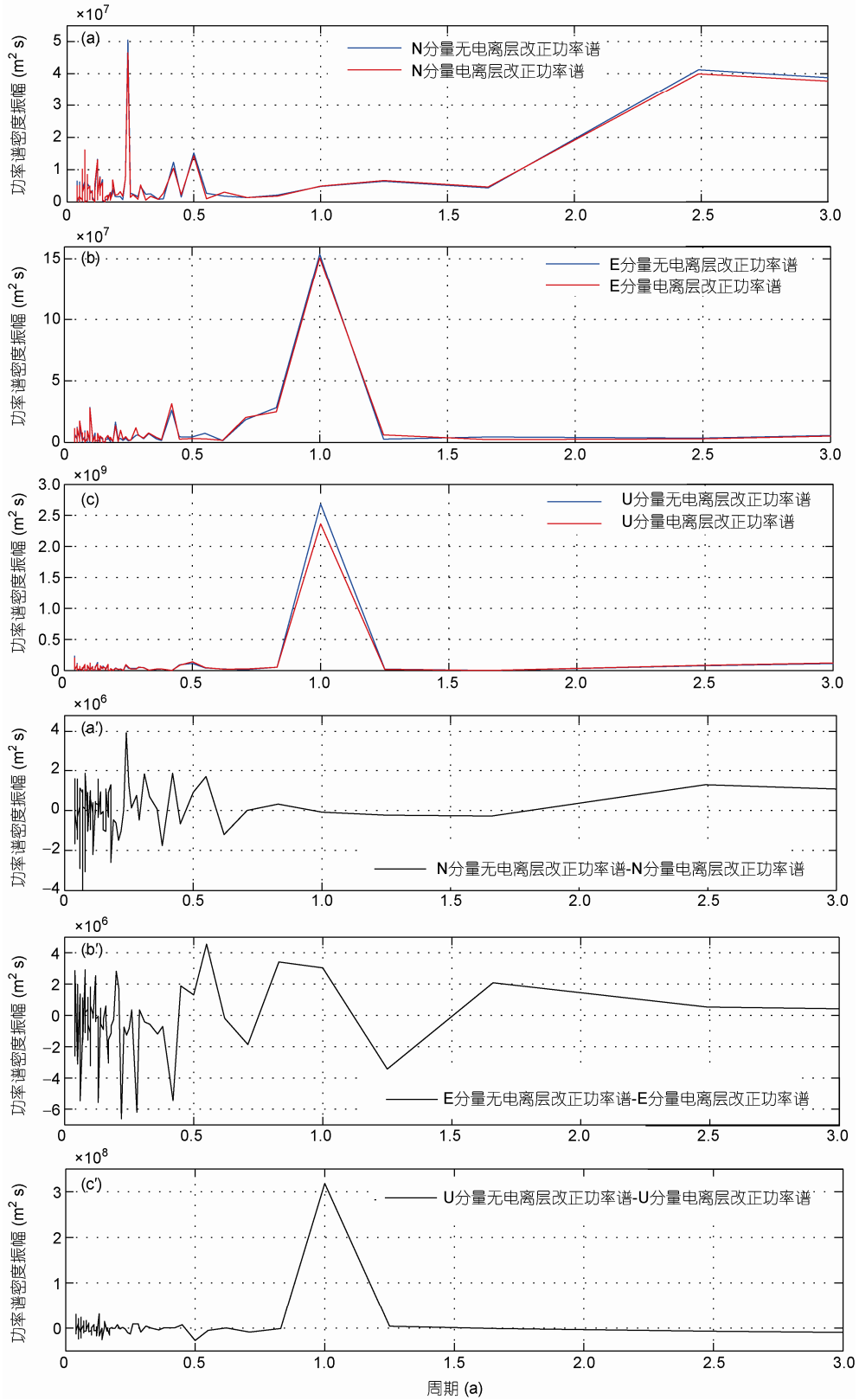


图4 高阶电离层延迟改正前后ALGO站频谱特征及变化
(a)和(a'), (b)和(b'), (c)和(c')分别为N, E, U分量

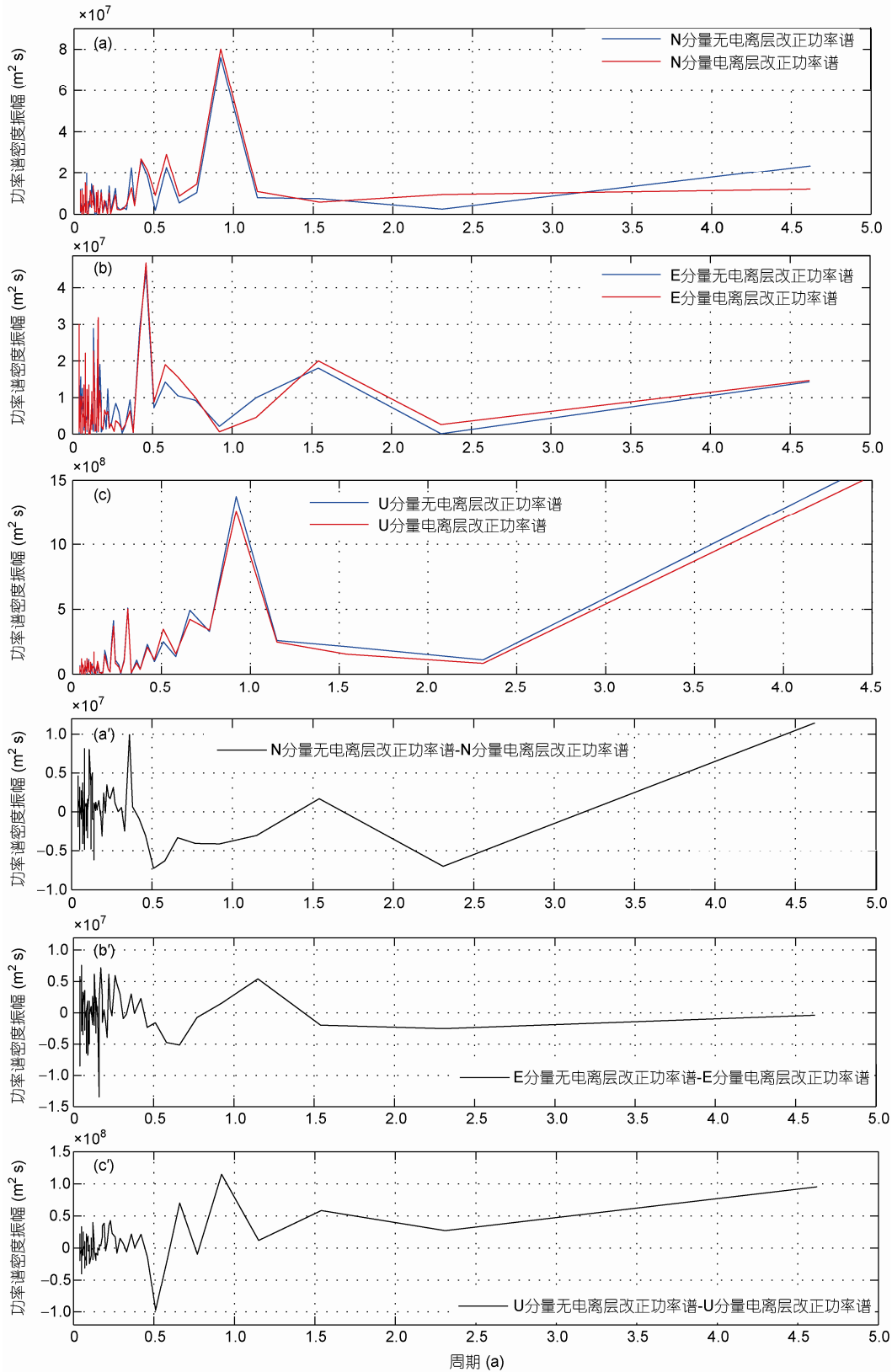


图5 高阶电离层延迟改正前后的SYOG站频谱特征及变化
(a)和(a'), (b)和(b'), (c)和(c'')分别为N, E, U分量

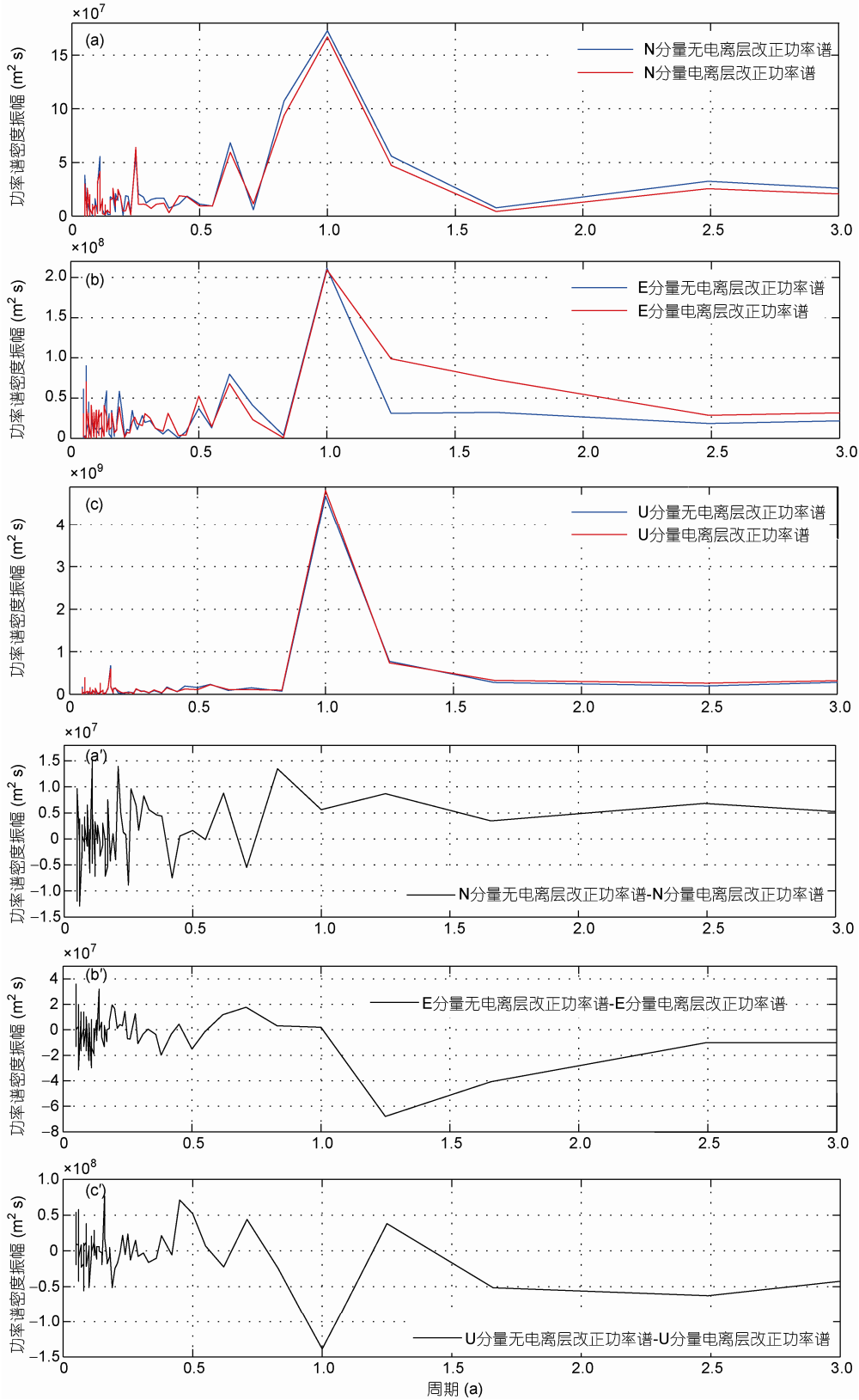


图 6 高阶电离层延迟改正前后的 BRAZ 站频谱特征及其变化

(a)和(a'), (b)和(b'), (c)和(c')分别为 N, E, U 分量

致谢 感谢 King R W 博士在本文 GPS 数据处理过程中给予的建议和帮助, 美国 MIT 提供的 GAMIT/GLOBK 软件, 以及 Williams S D P 博士提供的 CATS 软件.

参考文献

- 1 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, doi: 10.1029/2003GL017639
- 2 Fritsche M, Dietrich R, Knöfel C, et al. Impact of higher-order ionospheric terms on GPS estimates. *Geophys Res Lett*, 2005, 32, doi: 10.1029/2005GL024342
- 3 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: 1372–1384
- 4 刘西凤, 袁运斌. 我国中纬度地区 GPS 定位中的电离层二阶项延迟影响分析与研究. *中国科学: 地球科学*, 2010, 40: 658–662
- 5 刘西凤, 袁运斌, 霍星亮, 等. 电离层二阶项延迟对 GPS 定位影响的分析模型与方法. *科学通报*, 2010, 55: 1162–1167
- 6 张双成, 涂锐, 张勤, 等. 电离层二阶项模型的构建及其变化规律分析研究. *测绘学报*, 2011, 40(增刊): 105–110
- 7 Chen W, Gao S, Hu C W, et al. Effects of ionospheric disturbances on GPS observations in low latitude area. *GPS Solut*, 2008, 12: 33–41
- 8 Zhang H P, Lv H X, Li M, et al. Global modeling 2nd-order ionospheric delay and its effects on GNSS precise positioning. *Sci China Phys Mech Astron*, 2011, 54: 1059–1067
- 9 Petrie E J, King M A, Moore P, et al. Higher-order ionospheric effects on the GPS reference frame and velocities. *J Geophys Res*, 2010, 115, doi: 10.1029/2009JB006677
- 10 Petit G, Luzum B. IERS Conventions 2010. Technical Report, Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie(France), Frankfurt am Main. 2010
- 11 Tregoning P, Watson C. Atmospheric effects and spurious signals in GPS analyses. *J Geophys Res*, 2009, 114, doi: 10.1029/2009JB006344
- 12 Steigenberger P, Schaer S, Lutz S, et al. CODE contribution to IGS reprocessing: Status and perspectives. EGU General Assembly, 2009
- 13 Rothacher M, Angermann D, Artz T, et al. GGOS-D: Homogeneous reprocessing and rigorous combination of space geodetic observations. *J Geod*, 2011, 85: 679–705
- 14 Herring T A, King R W, McClusky S C. GAMIT reference manual (release 10.4). Massachusetts Institute of Technology, 2010
- 15 Herring T A, King R W, McClusky S C. GLOBK reference manual (release 10.4). Massachusetts Institute of Technology, 2010
- 16 Lyard F, Lefevre F, Letellier T, et al. Modelling the global ocean tides: Modern insights from FES2004. *Ocean Dyn*, 2006, 56: 394–415
- 17 Boehm J, Schuh H. Vienna Mapping Functions in VLBI analyses. *Geophys Res Lett*, 2004, 31, doi: 10.1029/2003GL018984
- 18 Tregoning P, Herring T A. Impact of a priori zenith hydrostatic delay errors on GPS estimates of station heights and zenith total delays. *Geophys Res Lett*, 2006, 33, doi: 10.1029/2006GL027706
- 19 Schmid R, Steigenberger P, Gendt G, et al. Generation of a consistent absolute phase center correction model for GPS receiver and satellite antennas. *J Geod*, 2007, 81: 781–798
- 20 Tregoning P, van Dam T. Effects of atmospheric pressure loading and seven-parameter transformation on estimates of geocenter motion and station heights from space geodetic observations. *J Geophys Res*, 2005, 110, doi: 10.1029/2004JB003334
- 21 Williams S D P. CATS: GPS coordinate time series analysis software. *GPS Solut*, 2008, 12: 147–153

Impact of higher order ionospheric delay on continuous GPS coordinate time series

JIANG WeiPing¹, LI Zhao², DENG LianSheng² & XIA ChuanYi²

¹*GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China;*

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

Based on the higher order ionospheric delay correction model, impact magnitude of different order ionospheric delay on GPS double frequency carrier signals with different frequencies has been determined. Then GPS data of 109 globally distributed IGS stations spanning from 1999 to 2003 have been reprocessed to quantify the contributions of higher order ionospheric delay to global GPS coordinate time series using GAMIT with state of the art models according to IERS Conventions 2010. Results show that higher order ionospheric delay correction would result in large velocity change. The vertical velocity of stations near the equator reaches up to about 1 mm a^{-1} , which should not be neglected in high precision GPS data processing. Considering the impact of higher order ionospheric delay could also remarkably reduce the vertical WRMS of stations near the equator and the North WRMS of stations in South Asia, among which station LHAS in China exhibits the best improvement by about 10% in the North component. Moreover, it could effectively reduce the amplitudes of various periodical signals, therefore plays very important role in the geophysical explanations of the non-linear variations in the GPS coordinate time series. The annual amplitude in the Up component and the semi-annual amplitude in the East component of stations in middle latitudes, together with the vertical semi-annual amplitude of stations in low latitudes and the signal with periods as about 422 days in the East component of stations in high latitudes are effectively reduced after higher order ionospheric delay correction, thus we propose that the second and third order ionospheric delay is probably one of the main reasons that cause the vertical annual and East-West semi-annual motions of middle-latitude stations as well as the vertical semi-annual motion of low-latitude stations.

higher order ionospheric delay, GAMIT/GLOBK, global GPS reprocessing, weighted root mean square analysis, spectrum analysis

doi: 10.1360/972012-1785