

引用格式: XUE Xi-ping, LI Chun-lai, ZHANG Hong-bo, *et al.* Real-time Correction Method of Air Phase Disturbance of Antenna Array Based on GNSS Difference[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, **49**(9):0901001

薛喜平, 李春来, 张洪波, 等. 利用 GNSS 差分的天线阵大气相位扰动实时修正方法[J]. 光子学报, 2020, **49**(9):0901001

利用 GNSS 差分的天线阵大气相位扰动实时修正方法

薛喜平^{1,2,3}, 李春来^{1,2,3}, 张洪波^{1,2,3}, 孔德庆^{1,2,3}, 董亮⁴, 苏彦^{1,2,3},
朱新颖^{1,2}, 戴舜^{1,2}, 李俊铎^{1,2}, 李臣^{1,2}, 武宇翔^{1,2,3}, 汪赞^{1,2,3}

(1 中国科学院国家天文台, 北京 100101)

(2 中国科学院月球与深空探测重点实验室, 北京 100101)

(3 中国科学院大学, 北京 100049)

(4 中国科学院云南天文台, 昆明 650000)

摘要:提出了一种基于全球导航卫星系统差分的天线阵大气相位扰动实时修正方法,以高稳定度的原子钟作为外频标,利用导航卫星载波相位的单差与历元上的双差,并通过星历扣除由于卫星运动引起的相位变化,在周跳检测和修正后,通过长周期的拟合消除卫星轨道和站坐标误差的影响,最后通过双频或多频信号实现两地电离层和对流层扰动的实时测量.在国家天文台北京密云站和云南昆明站分别部署了一套全球导航卫星接收设备,进行异地大气相位扰动实时修正方法的实验验证.利用双频载波相位测量数据对第三频率进行修正,结果表明,在不同天气条件下修正后的大气相位扰动均方根达到 1.9 mm,表明该方法可用于射电天文和深空探测中天线阵的大气相位扰动修正.

关键词:大气测量;天线组阵;全球导航卫星系统;载波相位差分;大气相位扰动

中图分类号:P228

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20204909.0901001

Real-time Correction Method of Air Phase Disturbance of Antenna Array Based on GNSS Difference

XUE Xi-ping^{1,2,3}, LI Chun-lai^{1,2,3}, ZHANG Hong-bo^{1,2,3}, KONG De-qing^{1,2,3},
DONG Liang⁴, SU Yan^{1,2,3}, ZHU Xin-ying^{1,2}, DAI Shun^{1,2}, LI Jun-duo^{1,2},
LI Chen^{1,2}, WU Yu-xiang^{1,2,3}, WANG Zan^{1,2,3}

(1 National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

(2 Key Laboratory of Lunar and Deep Space Exploration, Chinese Academy of Science, Beijing 100101, China)

(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(4 Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650000, China)

Abstract: A real-time correction method based on Global Navigation Satellite System difference is proposed for the atmospheric phase disturbance of the antenna array. The atomic clock with high stability is used as the external frequency standard, the single difference of the carrier phase and the double

基金项目:国家自然科学基金(No.U1831114)

第一作者:薛喜平(1984—),男,助理研究员,博士研究生,主要研究方向为射电天文技术、信号处理等.Email: xuexp@bao.ac.cn

导师:李春来(1965—),男,研究员,硕士,主要研究方向为深空探测、陨石学、空间碎片、撞击事件、行星遥感等.Email: Liel@bao.ac.cn

通讯作者:孔德庆(1978—),男,研究员,博士,主要研究方向为天线组阵技术、深空通信与导航等.Email: kdq@bao.ac.cn

收稿日期:2020-05-21;录用日期:2020-07-02

<http://www.photon.ac.cn>

difference on the epoch between the two stations are utilized, and the phase change caused by the satellite movement is deducted through the ephemeris. After the cycle slip detection and correction, the satellite orbit and the coordinate error of the station are eliminated through the long period fitting. Finally, the real-time measurement of ionospheric and tropospheric disturbances in two places is realized by dual frequency or multi frequency signals. A set of Global Navigation Satellite System receiving equipment was deployed at Miyun Observing Station and Kunming Observing Station of the National Astronomical Observatory of the Chinese Academy of Sciences, to verify the real-time correction method of atmospheric phase disturbance. The results show that the root-mean-square of the corrected atmospheric phase disturbance reaches 1.9 mm, modified by using the dual frequency carrier phase, under different weather conditions. The results indicate that the method can be used for the correction of the atmospheric phase disturbance of the antenna array in radio astronomy and deep space exploration.

Key words: Atmospheric measurement; Antenna array; Global Navigation Satellite System; Carrier phase difference; Atmospheric phase perturbation

OCIS Codes: 010.1285; 010.1330; 010.7030; 040.1240; 110.0670; 120.5050; 350.4010

0 引言

射电天文与深空探测技术的迅猛发展,对大型射电望远镜的性能提出了新的需求.然而,由于大口径天线和低噪声接收机研制技术的限制,单个天线性能已经到了极限状态,通过中小天线组阵的方法是获得更高天线性能的主要途径^[1].天线组阵具有视场大、可靠性高、维护方便和灵活性好等优点,已经成为射电天文技术和深空探测技术的重点发展方向^[2].

天线阵的信号合成性能很大程度上取决于各天线的信噪比、信号间的相位差估计精度和相位修正精度.由于地球大气的扰动造成各天线信号的相位波动,导致天线信号间相关性变差,尤其是在高频段以及恶劣天气情况下,将严重影响信号的相位估计精度和信号合成性能^[3-4].根据甚大天线阵(Very Large Array, VLA)的观测数据,在 X 频段(中心频率 8.5 GHz)合成损失达到 18%,Ka 频段(中心频率 34.0 GHz)合成损失达到 83%^[5].所以,在天线阵接收微弱信号时,尤其是 Ka 及以上高频段信号,必须对大气相位扰动进行修正.

大气延迟可分为对流层延迟与电离层延迟,电离层延迟可通过多频信号或长周期修正模型进行修正.对流层延迟随时间、空间的变化快,难以通过已知的模型进行修正,是影响天线阵相位估计的主要因素^[6-7].由于大气相位扰动的短时相关性,大气相位修正的时间尺度应短至几分之一秒,无法利用射电天文常用的短时偏开校正的模式,必须采用实时的相位修正方法^[8].利用全球定位系统(Global Positioning System, GPS)时延测量也可以实现信号的相位修正,但传统的 GPS 测量方法延迟时间过长,要达到毫米级及更高的精度,会有几个小时的延迟,难以实现实时修正,目前主要应用于实时性要求不高的气象预报领域^[9-10].深空网(Deep Space Network, DSN)进行了水汽辐射计与校准天线时延测量的对比试验,表明水汽辐射计能够有效地探测大气延迟,是大气相位扰动修正测量的重点发展方向之一,但辐射计在阴雨天时存在失真和饱和的问题^[11-12].

为此,提出利用全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)接收机载波相位差分技术实现大气相位扰动的实时修正.两站以高稳定的原子钟作为外频标,利用两站导航卫星载波相位的单差与在历元上的双差,扣除由于卫星运动引起的相位变化,在周跳修正后,通过长周期的拟合消除卫星轨道和站坐标误差的影响,最后通过双频或多频信号实现电离层和对流层扰动差分的测量,从而可以实现不同频率的天线阵相位差的实时修正.在北京密云和云南昆明两个卫星地面站部署了 GNSS 接收设备,接收设备部署在距离 GRAS1 和 GRAS2 天线 100 m 的范围内,利用北斗卫星频率 B_1 、 B_2 对频率 B_3 的相位扰动进行修正.

1 大气相位扰动差分修正方法

导航卫星在天区广泛分布,可充分利用多种导航卫星信号的载波相位进行差分测量,实现大气相位扰动高精度的实时修正,图 1 为天线阵大气相位扰动修正方法示意图.

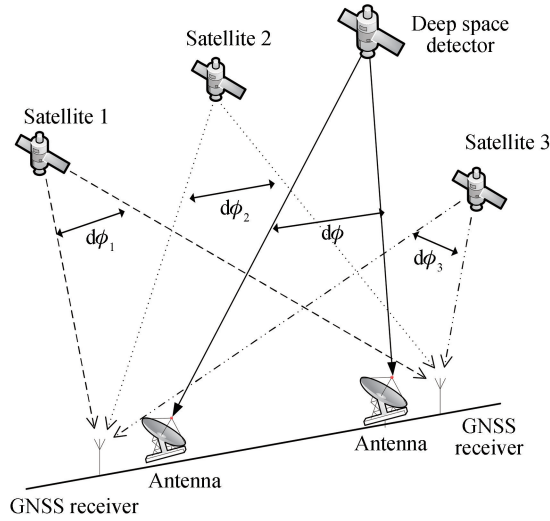


图 1 天线阵大气相位扰动修正方法示意图

Fig.1 Diagram of correction method for atmospheric phase disturbance of antenna array

1.1 载波相位差分

假设两台 GNSS 数据接收机的接收天线相位中心位于 k 和 m 处,同时对卫星 i 进行载波相位测量,测量值可分别表示为^[13-14]

$$\phi_k(t) = \phi(t) + \lambda^{-1}r_k(t) + f[\tau_k(t) + \tau(t)] + N_k(t) + \beta_k(t) + \delta_k(t) + \epsilon_k(t) \quad (1)$$

$$\phi_m(t) = \phi(t) + \lambda^{-1}r_m(t) + f[\tau_m(t) + \tau(t)] + N_m(t) + \beta_m(t) + \delta_m(t) + \epsilon_m(t) \quad (2)$$

式中, t 为信号接收时刻, $\phi_k(t)$ 和 $\phi_m(t)$ 是接收机所测的随时间变化的载波相位, $\phi(t)$ 是卫星发射信号的初始载波相位, λ 为载波的波长, r_k 和 r_m 为卫星与观测站之间的几何距离, τ_k 和 τ_m 为接收机时钟误差, $f[\tau_k(t) + \tau(t)]$ 为接收机钟差和卫星钟差引起的载波相位误差, τ 为卫星时钟误差, N_k 和 N_m 为整周模糊度, β_k 和 β_m 为电离层相位延迟, δ_k 和 δ_m 为对流层相位延迟, ϵ_k 和 ϵ_m 为相位测量误差。

对卫星 i 两接收天线 k 和 m 信号的测量载波相位单差,即式(1)减式(2),可得

$$\phi_{km}(t) = \lambda^{-1}r_{km}(t) + f\tau_{km}(t) + N_{km} + \beta_{km}(t) + \delta_{km}(t) + \epsilon_{km}(t) \quad (3)$$

式中, $\phi_{km}(t)$ 为 $\phi_k(t)$ 和 $\phi_m(t)$ 的差分,即载波相位单差数据; $r_{km}(t)$ 为 r_k 和 r_m 的差分; N_{km} 为 N_k 和 N_m 的差分; $\tau_{km}(t)$ 为 τ_k 和 τ_m 的差分; $\beta_{km}(t)$ 为 β_k 和 β_m 的差分; $\delta_{km}(t)$ 为 δ_k 和 δ_m 的差分; $\epsilon_{km}(t)$ 为 ϵ_k 和 ϵ_m 的差分.对载波相位单差是为了消除由卫星钟差、卫星轨道误差等导致的载波相位误差。

1.2 载波相位上的历元间差分

将式(3)中 t 时刻历元的相位单差数据与 t_0 时刻历元的单差数据进行差分,获得载波相位双差,即

$$\Delta\phi_{km}(t) = \lambda^{-1}\Delta r_{km}(t) + \Delta\beta_{km}(t) + \Delta\delta_{km}(t) + \Delta\epsilon_{km}(t) \quad (4)$$

式中, Δ^* 代表在 t 时刻历元与 t_0 时刻历元相应值的差值.载波相位双差消除了由接收机钟差、整周模糊度等导致的载波相位误差。

1.3 周跳检测与修正

以 Canon 提出的差分模型为基础^[15],提出利用卫星多普勒频移观测值进行周跳检测与修正的方法.方法主要分为周跳识别、周跳定位以及周跳修正三个步骤.采用载波相位双差和多普勒频移双差进行线性组合构成载波相位周跳检测量,再根据相应的检测量判断标准与阈值,确定周跳发生的历元时刻,通过对检测量取整运算获得周跳修正数值,最后对载波相位双差结果进行周跳修正.检测与修正量计算公式为

$$V = \langle [\Delta\phi_{km}(t) - \Delta\phi_{km}(t_0)] - \int_{t_0}^t \Delta D_{km} dt \rangle \quad (5)$$

式中, V 为周跳检测与修正量, t 和 t_0 为历元观测时刻, $\Delta\phi_{km}(t)$ 和 $\Delta\phi_{km}(t_0)$ 为站间载波相位历元间双差; $\Delta D_{km}(t)$ 和 $\Delta D_{km}(t_0)$ 为站间多普勒频移历元间双差, $\langle \cdot \rangle$ 为针对载波相位整周的四舍五入取整符号。

1.4 卫星轨道误差修正

假设卫星接收天线的相位中心坐标已经过长时间测量获得,卫星的星历数据可通过卫星的实时广播或网络实时获得.通过星历中的卫星轨道数据计算卫星与两接收天线的位置差与 t_0 时刻历元的差分.即对式(4)中的路径差 $\Delta r_{km}(t)$ 进行计算,设其对应的相位值为 $\Delta\phi_{r,km}(t)$,带入式(4)可得

$$\Delta\beta_{km}(t) + \Delta\delta_{km}(t) = \Delta\phi_{km}(t) - \Delta\phi_{r,km}(t) - \Delta\epsilon_{km}(t) \quad (6)$$

式中, $\Delta\beta_{km}(t) + \Delta\delta_{km}(t)$ 为在观测频率为 f 时的大气相位扰动,包含了电离层和对流层大气相位扰动.忽略测量误差,式(5)变为

$$\Delta\beta_{km}(t) + \Delta\delta_{km}(t) = \Delta\phi_{km}(t) - \Delta\phi_{r,km}(t) \quad (7)$$

1.5 载波相位长周期拟合与修正

载波相位通过长周期拟合消除接收机坐标误差和卫星轨道误差.利用多项式拟合方法对式(7)中的 $\Delta\beta_{km}(t) + \Delta\delta_{km}(t)$ 进行拟合,利用最小二乘法确定拟合系数.根据需要也可以采用拉格朗日拟合和切比雪夫拟合等方法.将式(7)中的数据减去拟合的长周期数据,差值即为该卫星方向上的两地大气相位扰动,包括电离层大气扰动和对流层大气扰动.

1.6 电离层和对流层扰动的估计

考虑到式(6)的大气相位扰动同时存在电离层和对流层大气扰动,且两种大气扰动的特点不同,为了计算不同频率的大气扰动,需要根据双频或多频载波相位分别计算电离层和对流层大气扰动.

假设观测的卫星频率为 f_1 和 f_2 ,由于电离层引起的载波相位超前与频率成反比^[16-18],则电离层大气扰动可分别表示为

$$\Delta\beta_{km}(t, f_1) + \Delta\delta_{km}(t, f_1) = \Delta\phi_{km}(t, f_1) - \Delta\phi_{r,km}(t, f_1) \quad (8)$$

$$\Delta\beta_{km}(t, f_2) + \Delta\delta_{km}(t, f_1)f_2/f_1 = \Delta\phi_{km}(t, f_2) - \Delta\phi_{r,km}(t, f_1)f_2/f_1 \quad (9)$$

将 $\Delta\beta_{km}(t, f_1)f_1 = \Delta\beta_{km}(t, f_2)f_2$ 带入式(9),可得

$$\Delta\beta_{km}(t, f_1)f_1/f_2 + \Delta\delta_{km}(t, f_1)f_2/f_1 = \Delta\phi_{km}(t, f_2) - \Delta\phi_{r,km}(t, f_1)f_2/f_1 \quad (10)$$

联立式(8)和(10),可解得频率为 f_1 的电离层和对流层大气相位扰动分别为

$$\Delta\beta_{km}(t, f_1) = \frac{\Delta\phi_{km}(t, f_2)f_1f_2 - \Delta\phi_{km}(t, f_1)f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (11)$$

$$\Delta\delta_{km}(t, f_1) = \Delta\phi_{km}(t, f_1) - \Delta\phi_{r,km}(t, f_1) - \frac{\Delta\phi_{km}(t, f_2)f_1f_2 - \Delta\phi_{km}(t, f_1)f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (12)$$

所以,频率为 f_i 时总的大气相位扰动可以表示为

$$\begin{aligned} \Delta\omega(t, f_i) = \Delta\beta_{km}(t, f_1)f_1/f_i + \Delta\delta_{km}(t, f_1)f_i/f_1 = & \frac{[\Delta\phi_{km}(t, f_2)f_1f_2 - \Delta\phi_{km}(t, f_1)f_2^2]f_1}{(f_1^2 - f_2^2)f_i} + \\ & \frac{[\Delta\phi_{km}(t, f_1) - \Delta\phi_{r,km}(t, f_1)]f_i}{f_1} - \frac{[\Delta\phi_{km}(t, f_2)f_1f_2 - \Delta\phi_{km}(t, f_1)f_2^2]f_i}{(f_1^2 - f_2^2)f_1} \end{aligned} \quad (13)$$

2 实验观测数据验证

建立了利用 GNSS 差分的天线阵大气相位扰动实时修正实验系统,图 2 为实验系统组成示意图.在国家天文台的北京密云站和云南昆明站分别布设了 1 套 GNSS 接收装置,设备包括 GNSS 接收天线、GNSS 接收机以及数据采集与传输设备.GNSS 接收机的下变频和数字采样设备均由氢原子钟 10 MHz 频标信号作为外频标,其短期频率稳定度高达 $3.3 \times 10^{-13}/s$.通过外频标信号的锁定,可以消除由于接收机本振的相位漂移产生的相位波动和采样周期的差异.实验系统从 2019 年 7 月至 2019 年 9 月共进行了 30 余天观测,包括 GPS、伽利略和北斗的全部卫星数据.

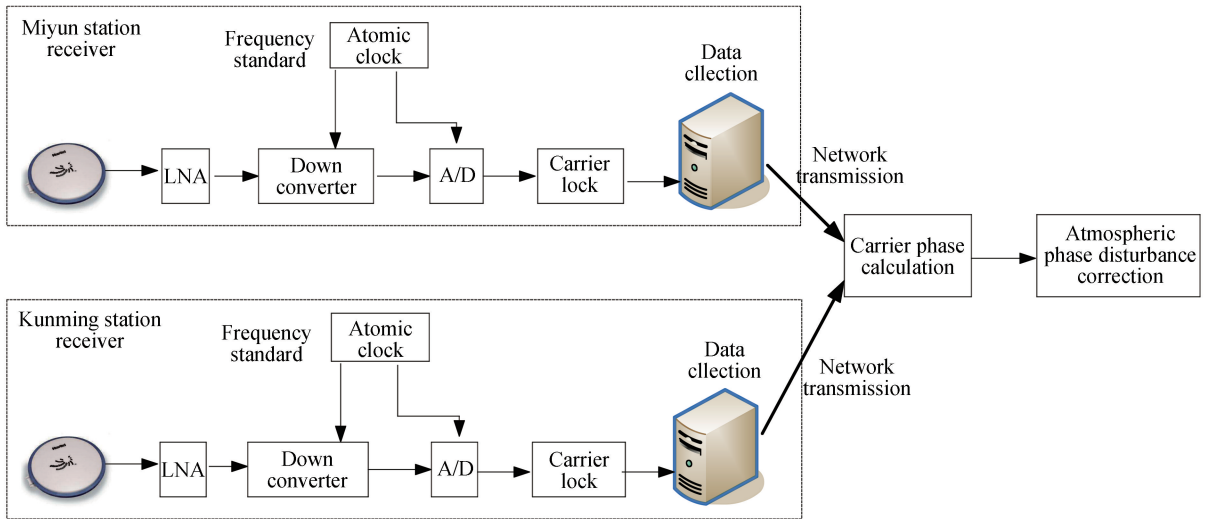


图 2 实验系统组成示意图
Fig.2 Diagram of test system

2.1 周跳修正

利用 1.3 节基于卫星多普勒频移的周跳检测与修正方法进行周跳检测、定位与修正.图 3(a)为 GPS09 卫星在 2019 年 7 月 27 日 5 时 48 分至 2019 年 7 月 27 日 6 时 21 分的载波相位双差结果,显示周跳发生在 2019 年 7 月 27 日 6 时 01 分 37 秒.图 3(b)为周跳修正后的载波相位双差,在 2019 年 7 月 27 日 6 时 01 分 37 秒处的周跳得以修正.

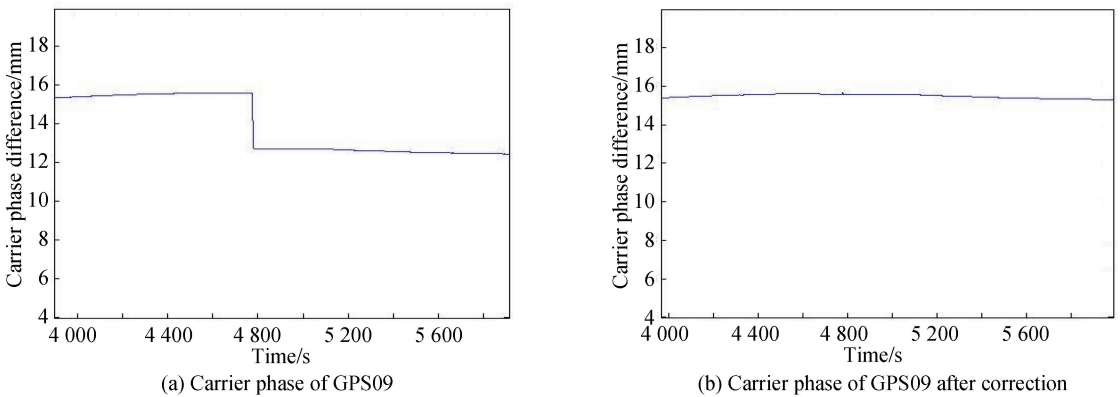


图 3 周跳修正前后对比(4 777 s)
Fig.3 Comparison of cycle slip before and after correction (4 777 s)

2.2 载波相位双差长周期拟合

图 4(b)和图 5(b)分别为 2019 年 8 月 1 日和 2019 年 7 月 28 日 BD02、BD08 和 BD13 的频率 B_1 实际测量的大气相位扰动.其中包括了电离层和对流层大气扰动.对比不同导航卫星测量的大气扰动,可以看出在同一时间段,不同卫星的大气相位扰动与信号传输的路径相关,在站心地平直角坐标系中各颗卫星的空间位置如表 1 所示.

图 4(b)显示大气相位发生剧烈抖动.根据当时天气记录,2019 年 8 月 1 日 1 时 30 分左右北京密云站区域为雷阵雨天气.雷电导致密云站区域大气发生剧烈变化,大气相位抖动明显.图 5(b)显示大气相位变化缓慢.根据当时天气记录,2019 年 7 月 27 日 11 时 15 分左右,北京密云站区域天气为多云,电离层和对流层都没有剧烈的变化.

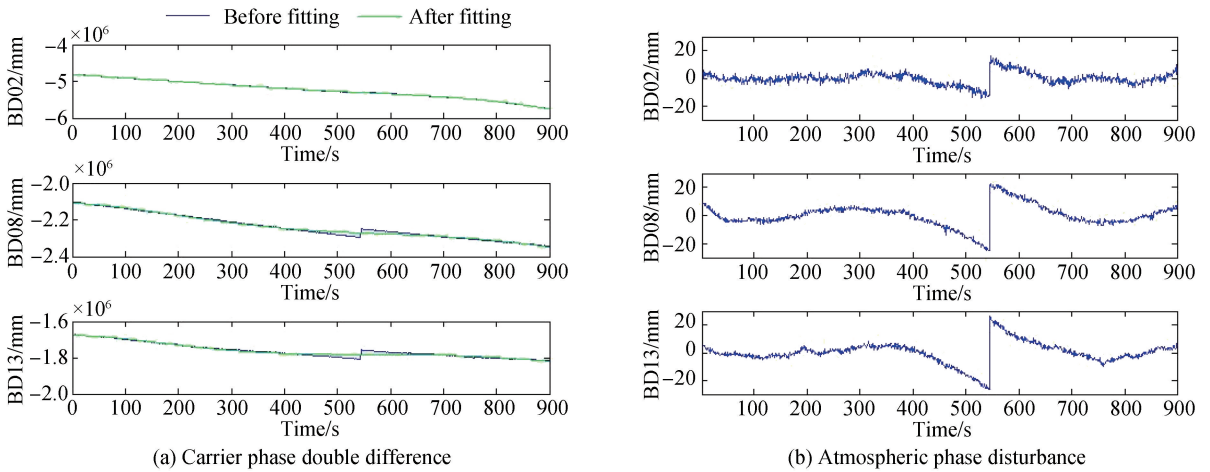


图4 载波相位大气扰动(2019年8月1日)
Fig.4 Carrier phase atmospheric disturbance (Aug. 1, 2019)

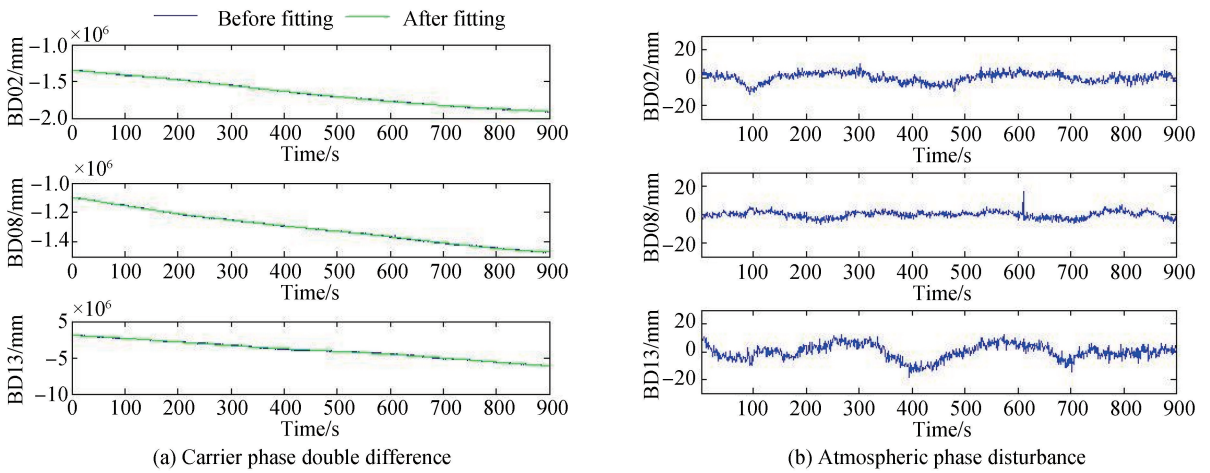


图5 载波相位大气扰动(2019年7月27日)
Fig.5 Carrier phase atmospheric disturbance (Jul. 27, 2019)

表1 卫星的空间位置(平均值)

Table 1 Space position of satellite (average)

Station center	Time	Aug.1, 2019 1:30-1:45			Jul.27, 2019 11:15-11:30		
		Satellitenumber	BD02	BD08	BD13	BD02	BD08
Miyun	Azimuth/(°)	224.74	204.07	212.23	226.26	163.05	211.22
	Pitch/(°)	31.66	62.53	39.51	33.96	58.77	20.98
Kunming	Azimuth/(°)	218.44	147.08	198.15	220.96	112.41	76.49
	Pitch/(°)	53.32	81.14	61.10	55.70	63.00	80.01

2.3 电离层和对流层扰动估计

图6(a)和图7(a)是BD02、BD08和BD13卫星的三个观测频率 B_1 、 B_2 和 B_3 分别测得的大气相位扰动,包括了电离层大气扰动和对流层大气扰动.通过 B_1 和 B_2 频率观测值计算 B_1 的电离层扰动,通过 B_3 和 B_2 频率观测值计算频率 B_2 的电离层扰动,通过 B_1 和 B_3 频率观测值计算频率 B_3 的电离层扰动.扣除电离层扰动后,每颗卫星的三个观测频率的对流层大气相位扰动如图6(b)和图7(b)所示.图6(b)和图7(b)局部图像放大如图8(b)和图9(b)所示,明显可以看出,电离层修正后,各导航卫星不同观测频率测得的大气相位扰动基本一致,充分说明可以应用导航卫星载波相位差分的方法进行天线阵大气相位扰动的测量.

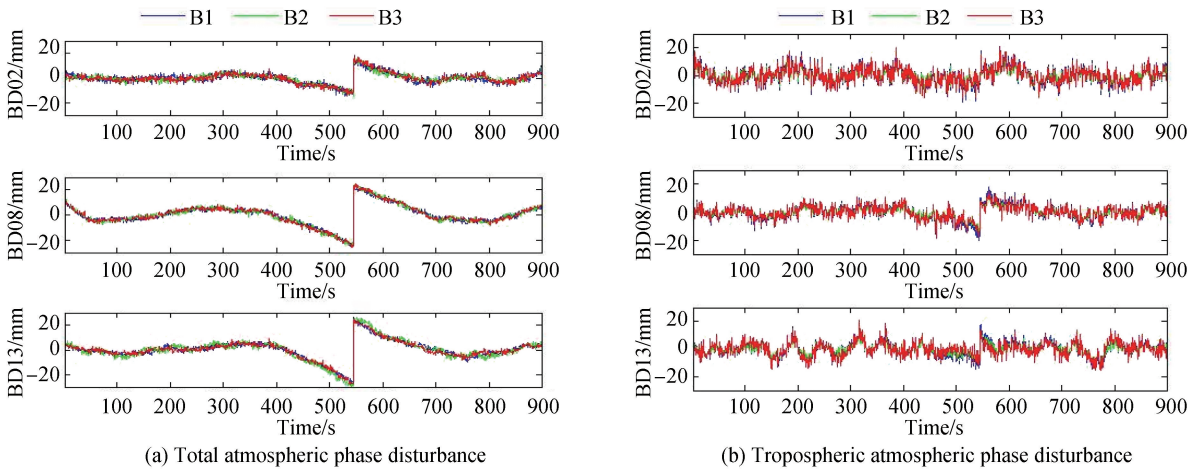


图 6 电离层大气扰动和对流层大气扰动(2019年8月1日)

Fig.6 Ionospheric and tropospheric atmospheric disturbances (Aug. 1, 2019)

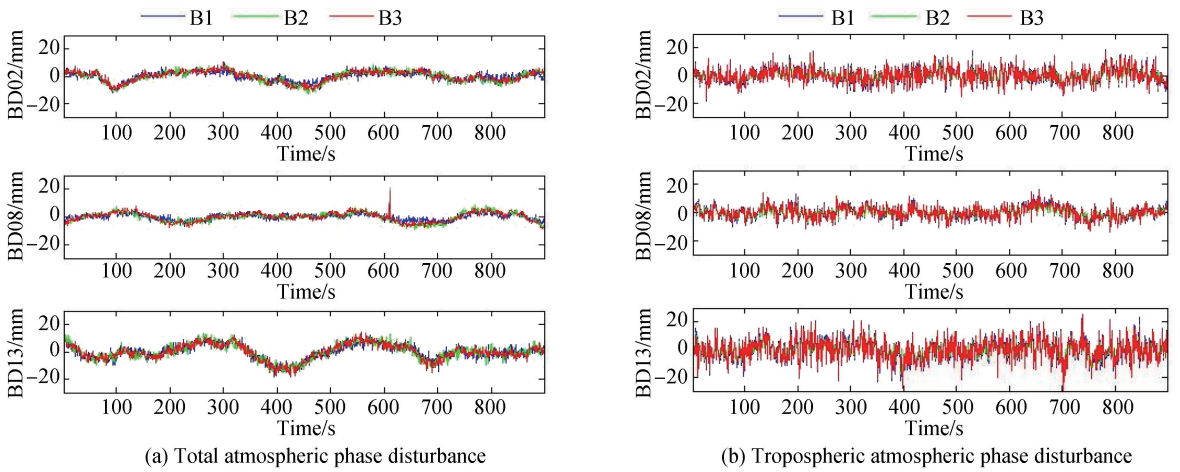


图 7 电离层大气扰动和对流层大气扰动(2019年7月27日)

Fig.7 Ionospheric and tropospheric atmospheric disturbances (Jul. 27, 2019)

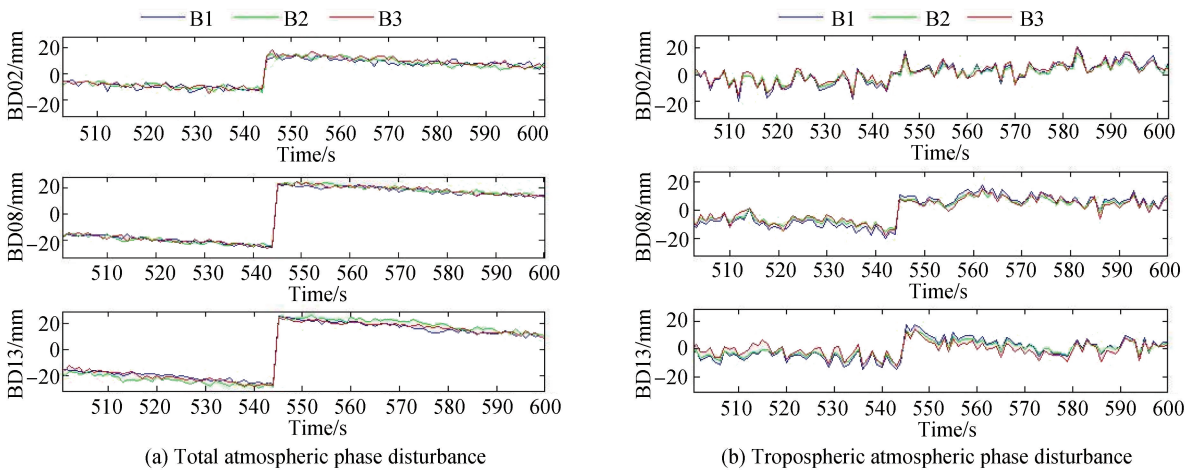


图 8 电离层大气扰动和对流层大气扰动局部放大(2019年8月1日)

Fig.8 Partial magnification drawing of ionospheric and tropospheric atmospheric disturbances (Aug. 1, 2019)

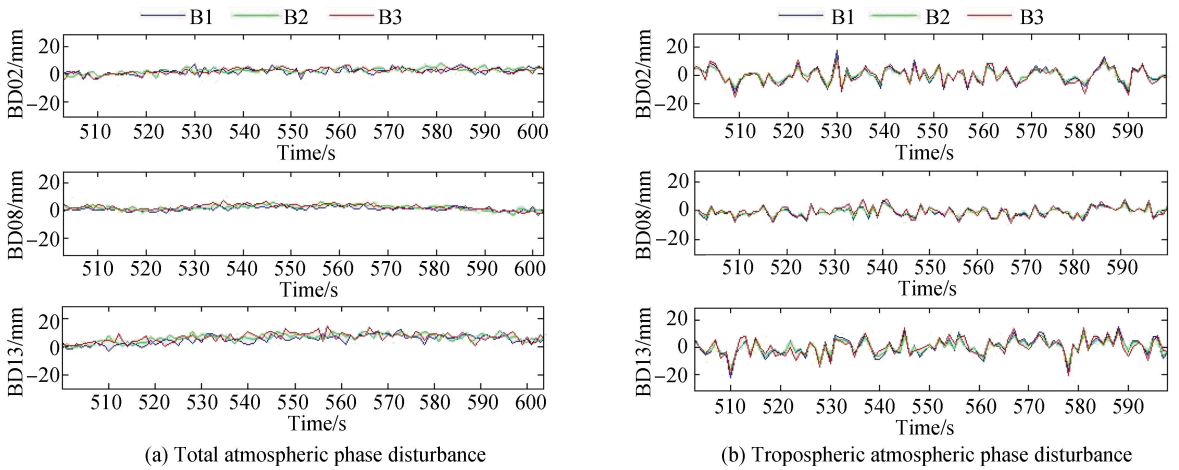


图9 电离层大气扰动和对流层大气扰动局部放大(2019年7月27日)

Fig.9 Partial magnification drawing of ionospheric and tropospheric atmospheric disturbances (Jul. 27, 2019)

2.4 大气扰动修正方法的验证

分别利用BD02、BD08和BD13卫星的 B_1 和 B_2 频率的观测数据估计频率 B_3 的总的大气相位扰动,与 B_3 实际观测到的总的大气相位扰动进行比较,图10(a)和11(a)为2019年8月1日和2019年7月27日的频率 B_3 大气相位扰动实测值与估计值.三颗卫星的 B_3 的实测大气相位扰动与估计大气扰动的差异很小,二者差值如图10(b)和11(b)所示.表2给出了三颗卫星的 B_3 大气相位扰动修正前和修正后的均方根.图12给出了试验期间30天内频率 B_3 的大气相位扰动修正结果,大气扰动修正前RMS平均为4.4 mm,修正后RMS平均为1.9 mm.

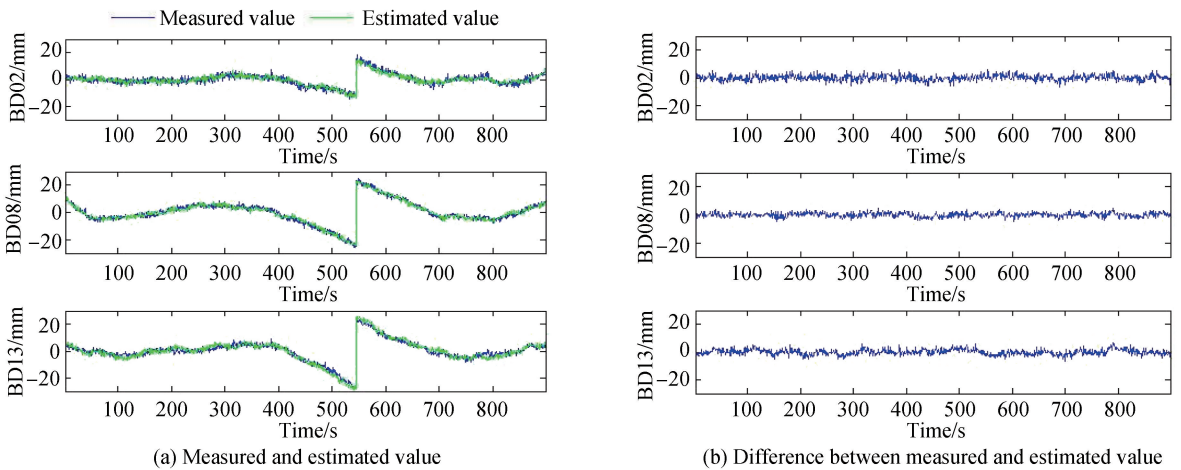


图10 修正后的大气相位扰动(2019年8月1日)

Fig.10 Atmospheric disturbance after correction (Aug. 1, 2019)

同时,利用统计学的Pearson相关系数描述大气扰动实测值与估计值之间的相关性.2019年8月1日三颗卫星的Pearson相关系数分别为0.9113、0.9826和0.9820.2019年7月27日三颗卫星的Pearson相关系数分别为0.9567、0.9514和0.9304.Pearson相关系数接近1,充分说明二者成线性相关.可利用GNSS多个频率测得的大气扰动去估计深空探测卫星信号的大气相位扰动.

表2 大气扰动修正前后均方根

Table 2 RMS of atmospheric disturbance before and after correction

Time	Aug. 1, 2019 1:30-1:45			Jul. 27, 2019 11:15-11:30		
Satellite number	BD02	BD08	BD13	BD02	BD08	BD13
RMS before correct/mm	4.6	8.4	7.9	3.7	3.3	5.9
RMS after correct/mm	2.0	1.5	2.0	1.9	1.6	2.9

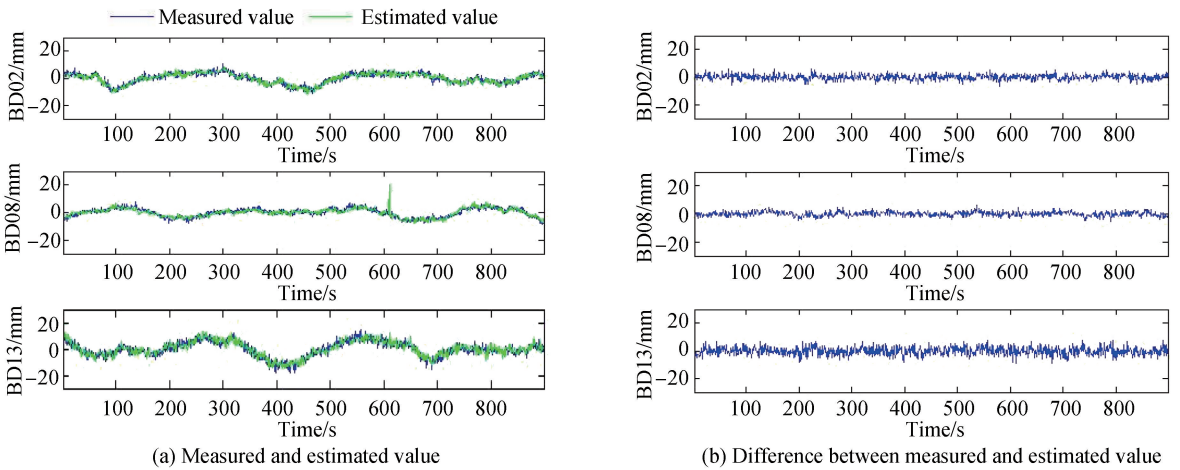


图 11 修正后的大气相位扰动(2019 年 7 月 27 日)
Fig.11 Atmospheric disturbance after correction (Jul. 27, 2019)

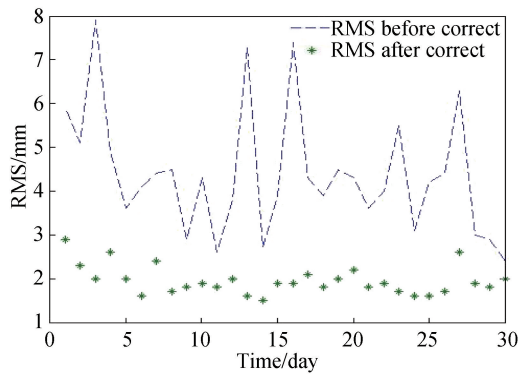


图 12 大气扰动修正前后均方根
Fig.12 RMS of atmospheric disturbance before and after correction

3 结论

本文提出了利用 GNSS 差分的天线阵大气相位扰动实时修正方法.通过差分的方法消除卫星钟差、接收机钟差、站坐标误差、轨道误差以及传播路径引起的误差;通过载波信号的多普勒频移数据修正周跳;通过长周期的拟合消除卫星轨道和站坐标误差的影响;最后通过双频或多频信号实现两地电离层和对流层扰动的实时测量.实验结果表明,GNSS 载波相位差分方法能够应用于天线阵大气相位扰动的测量,修正后平均 RMS 达到 1.9 mm,基本消除了大气扰动导致的相位波动.如果采用更高测量精度的 GNSS 接收设备,可以获得更好的效果.

下一步根据 GNSS 测量得到的大气相位扰动进行插值拟合,结合水汽辐射计进行 Ka 等高频段大气扰动修正方法的进一步研究和试验验证.并通过坐标位置拟合在探测器方向上的大气相位扰动,对天线阵的修正效果进行验证.

参考文献

- [1] LI Hai-tao, LI Yu-hua, KUANG Nai-xue. The array antenna group in the detection of deep space technology[J]. *Journal of Flight Measurement and Control*, 2004, **23**(4): 57-60.
李海涛,李宇华,匡乃雪. 深空探测中的天线组阵技术[J]. *飞行器测控学报*,2004,**23**(4):57-60.
- [2] YU Deng-yun, SUN Ze-zhou, MENG Lin-zhi, et al. History and future of Mars exploration[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2016, **3**(2): 108-113.
于登云,孙泽洲,孟林智,等. 火星探测发展历程与未来展望[J]. *深空探测学报*,2016,**3**(2):108-113.
- [3] NESSEL J A, ACOSTA R J. Directivity of a sparse array in the presence of atmospheric-induced phase fluctuations for deep space communications[J]. *NASA Technical Reports Server*, 2010, **2010**: 1-16.
- [4] SHI Xue-shu, JIAO Yi-wen, MA hong. Analysis of the influence of atmospheric turbulence on the phase of deep space

- antenna array[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2017, **4**(6): 571-575.
史学书, 焦义文, 马宏. 大气湍流对深空天线组阵相位影响分析[J]. 深空探测学报, 2017, **4**(6): 571-575.
- [5] D'ADDARIO L R. Estimates of atmosphere-induced gain loss for the deep space network array[J]. *Interplanetary Network Progress Report*, 2005, **160**: 165.
- [6] WANG Jun-gang, CHEN Jun-ping, WANG Jie-xian, *et al.* Assesment of tropospheric delay correction model over China [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, **41**(12): 1656-1663.
王君刚, 陈俊平, 王解先, 等. 对流层经验改正模型在中国区域的精度评估[J]. 武汉大学学报信息科学版, 2016, **41**(12): 1656-1663.
- [7] DAI Wu-jiao, CHEN Zhao-hua, KUANG Cui-lin, *et al.* Modeling regional precise tropospheric delay[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, **36**(4): 392-396.
戴吾蛟, 陈招华, 匡翠林, 等. 区域对流层模型建模[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, **36**(4): 392-396.
- [8] ZHANG Kai. Research on atmospheric phase disturbance correction technology of deep space exploration antenna array [D]. University of Chinese Academy of Sciences, 2017.
张凯. 深空探测天组阵大气相位扰动修正技术研究[D]. 中国科学院大学, 2017.
- [9] WANG Xin-long, LI Ya-feng. Applicability analysis of four troposphere delay error models in GPS[J]. *Electronics Optics & Control*, 2008, **15**(11): 5-9.
王新龙, 李亚峰. GPS 定位中 4 种对流层延迟修正模型适应性分析[J]. 电光控制, 2008, **15**(11): 5-9.
- [10] YIN Hai-tao, HUANG Ding-fa, XIONG Yong-liang, *et al.* New model for tropospheric delay estimation of GPS signal [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, **32**(5): 454-457.
殷海涛, 黄丁发, 熊永良, 等. GPS 信号对流层延迟改正新模型研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2007, **32**(5): 454-457.
- [11] HE Zhan-ke. Comparison of two methods for estimating tropospheric delay in satellite orbit[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2008, **22**(z1): 45-48.
何战科. 卫星测定轨中两种对流层延迟估算方法的比较[J]. 电子测量与仪器学报, 2008, **22**(z1): 45-48.
- [12] WANG Jun-gang, CHEN Jun-ping, WANG Jie-xian. Analysis of tropospheric propagation delay mapping function models in GNSS[J]. *Progress in Astronomy*, 2014, **32**(3): 383-394.
王君刚, 陈俊平, 王解先. GNSS 对流层延迟映射模型分析[J]. 天文学进展, 2014, **32**(3): 383-394.
- [13] HUANG Ding-fa, ZHANG Qin, ZHANG Xiao-hong, *et al.* Principles of satellite navigation and positioning [M]. Wuhan University Press, 2015.
黄丁发, 张勤, 张小红, 等. 卫星导航定位原理[M]. 武汉大学出版社, 2015 年.
- [14] MAO Jian, ZHU Chang-qing, GUO Ji-fa. A new global zenith tropospheric delay model[J]. *Geomatics Information Science of Wuhan University*, 2013, **38**(6): 684-688.
毛健, 朱长青, 郭继发. 一种新的全球对流层天顶延迟模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2013, **38**(6): 684-688.
- [15] REN Yong-chao, WANG Shun-xi, FANG Rong-xin. Phase cycle slip detection of single frequency carrier based on doppler shift[J]. *Journal of Geomatics*, 2010, **35**(1): 8-9.
任永超, 汪顺喜, 方荣新. 基于多普勒频移的单频载波相位周跳探测[J]. 测绘信息与工程, 2010, **35**(1): 8-9.
- [16] CHEN Li, FENG Jian, ZHEN Wei-min. The study of ionospheric scintillation by using GPS signals[J]. *GNSS World of China*, 2006, **31**(5): 9-12.
陈丽, 冯健, 甄卫民. 利用 GPS 进行电离层闪烁研究[J]. 全球定位系统, 2006, **31**(5): 9-12.
- [17] NIKOLAY N Z, VADIM E G, EKATERINA A D, *et al.* Technique for calculating the ionospheric phase advance and dual frequency mode of measuring ionospheric TEC[J]. *Advances in Space Research*, 2020: 563-570.
- [18] LI Ya-qian, ZHU Wen-yue, QIAN Xian-mei. Numerical simulation of propagation performance of super-continuum laser in turbulent atmosphere[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, **48**(10): 1001002.
李雅倩, 朱文越, 钱仙妹. 超连续谱激光在湍流大气中传输特性的数值仿真研究[J]. 光子学报, 2019, **48**(10): 1001002.