引文格式:张文颖,周晨,高帅和,等.亚皮秒级星地时频比对微波链路大气修正技术研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(11):2391-2399.DOI:10.13203/j.whugis20230452

Citation:ZHANG Wenying,ZHOU Chen,GAO Shuaihe,et al.Atmospheric Correction Technology for Subpicosecond Satellite Earth Time Frequency Comparison Microwave Link[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(11):2391-2399.DOI:10.13203/j.whugis20230452

亚皮秒级星地时频比对微波链路大气修正技术研究

张文颖[1] 周 晨[2] 高帅和[3] 申文斌[1,4] 郭燕铭[3,5] 张首刚[3]

1 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

2 武汉大学电子信息学院,湖北 武汉,430072

3 中国科学院国家授时中心,陕西 西安,710600

4 武汉大学测绘遥感信息工程全国重点实验室,湖北 武汉,430079

5 中国科学院大学,北京,100039

摘 要:发展空间高精度原子钟组是国内外空间前沿科学探索和时频体系建立的重要研究方向。其中,如何建立高精度星地时差测量比对链路,客观、准确评价空间钟组效能,促进高精度时频基准应用,是建立空间时频体系迫切需要形成的核心能力。在整个星地时频比对链路中,大气传输误差是最大的误差来源,因此大气传输误差的修正是星地时频比对的关键。针对中国空间站星地微波时频链路长期高稳定度需求,分析了空间传输环境中电离层和对流层的影响,提出了"三频链路"组合对消方法,分别构建了电离层和对流层的误差修正模型。利用上、下行链路消除对流层的非色散效应影响;借助两个下行链路计算同一路径的电离层总电子含量,进而修正电离层引起的时延误差;采用模型修正、微波辐射计实测结合的方式,修正了高频信号对流层色散误差。结果表明,该误差修正模型可实现亚皮秒量级测量精度的星地微波时间传递。其精度满足中国空间站时间频率传递稳定度指标,可进一步支撑冷原子光钟1×10^{-18}量级的长期稳定度需求。

关键词:中国空间站;时频比对;星地微波链路;大气误差修正;对流层误差修正;电离层误差修正

中图分类号:P228 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-04-25

DOI:10.13203/j.whugis20230452 **文章编号**:1671-8860(2025)11-2391-09

Atmospheric Correction Technology for Subpicosecond Satellite Earth Time Frequency Comparison Microwave Link

ZHANG Wenying[1] *ZHOU Chen*[2] *GAO Shuaihe*[3] *SHEN Wenbin*[1,4] *GUO Yanming*[3,5] *ZHANG Shougang*[3]

1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Electronic Information School, Wuhan University, Wuhan 430072, China

3 National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China

4 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

5 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract: **Objectives**: The development of high-precision atomic clocks in space is an important research direction for cutting-edge scientific exploration and time-frequency system establishment both domestically and internationally. Among them, how to establish a high-precision satellite ground time difference measurement in comparison link, objectively and accurately evaluate the effectiveness of the space clock group, and promote the application of high-precision time-frequency benchmarks is an urgent core capability that

基金项目:国家自然科学基金面上项目(12273045);国家自然科学基金重点研发项目(2021YFC2802502);国家自然科学基金重点项目(42030105)。

第一作者:张文颖,实验师,研究方向为空间高精度时频传递。wyingzhang@sgg.whu.edu.cn

通信作者:高帅和,正高级工程师。gaoshuaihe@ntsc.ac.cn

needs to be formed to establish a space time-frequency system. In the entire satellite ground time-frequency comparison link, atmospheric transmission error is the largest source, so the correction of atmospheric transmission error is the key to satellite ground time-frequency comparison. **Methods**: We focus on the long-term high stability requirements of the satellite ground microwave time-frequency link of the Chinese space station, analyze the impact of the ionosphere and troposphere in the space transmission environment, propose a "three frequency link" combination cancellation method, and construct error correction models for the ionosphere and troposphere respectively. We use uplink and downlink to eliminate the non-dispersion effect in the troposphere, and use two downlink links to calculate the total ionospheric electron content of the same path, thereby correcting the delay error caused by the ionosphere. At the same time, we used a combination of model correction and microwave radiometer measurements to correct the tropospheric dispersion error in the high-frequency signals. **Results**: The results indicate that the error correction model can achieve satellite to ground microwave time transfer with measurement accuracy below 1 picosecond. **Conclusions**: The accuracy meets the time frequency transmission stability index of the Chinese space station, which can further support the long-term stability requirements of the 1×10^{-18} level cold atomic clock.

Key words: China space station; time-frequency comparison; satellite to ground microwave link; atmospheric error correction; tropospheric error correction; ionospheric error correction

空间时频基准具备广域覆盖的优势,且受益于微重力环境,拓展了高精度时频基准的应用范围。由欧洲空间局主导的欧洲先进原子钟计划(atomic clock ensemble in space, ACES)于2024年在国际空间站搭载冷原子微波钟、主动氢钟,实现不确定度和日稳定度达3×10^{-16}量级的空间时频基准能力,研究冷原子物理现象,检验相对论[1-4]。此外,欧洲空间局也布局了搭载空间光钟(space optical clocks, SOC)的计划,预计将长期稳定度5×10^{-17}量级的空间光钟安装到国际空间站上[5-7]。

目前,中国空间站高精度时频实验系统已于2022-10-31随空间站梦天舱发射成功[8],将在指标调优和性能评估后在轨常态运行,届时将建成国际领先的空间时频系统,为中国建成世界唯一的、高精度的天地一体化综合授时服务体系奠定基础。相比ACES计划,中国载人航天空间站高精度时频科学实验系统已搭载了冷原子光钟,长期稳定度已提升至5×10^{-17}量级[9-10]。同时,地面建设了与空间载荷配套的地面比对分析验证系统,在地面布置了微波比对设备,支撑空间站高精度时间频率系统性能测试、科学实验和工程应用。

随着空间站及光钟技术的飞速发展,实现超高精度时间比对已成为原子钟评价、科学研究和扩大应用的迫切要求[11]。为满足空间冷原子光钟1×10^{-18}量级的长期稳定度,需要亚皮秒级星地微波时频比对链路。双向卫星时间频率传递(two-way satellite time and frequency transfer, TWSTFT)是目前实现高精度星地时间比对和应用的最佳途径之一,因为路径相同、方向相反,大部分时延误差均可抵消。早在1962年,美国海军天文台(the U.S. naval observatory, USNO)和英国国家物理实验室合作,利用卫星将位于美国海军天文台与英国皇家格林威治天文台(the royal Greenwich observatory, RGO)的时钟进行了一次卫星双向时间传递实验,得到RGO的时间标准比USNO提前了$2\,234\pm20\,\mu s$[12-13]。ACES计划的微波链路应用TWSTFT技术预计实现6 ps的星地比对精度[14]。爱因斯坦重力探测器项目在ACES的基础上进一步提高精度,预期时差测量精度仍在皮秒量级[15]。欧洲航天局于2022年提出的中型航天任务采用类似的微波链路,通过数天测量累积的方式实现星地时钟的频率稳定度比对[16]。GRACE(gravity recovery and climate experiment)在轨实现了更高精度的双向时差测量[17],其传输路径较为理想,不涉及对流层误差影响。国内空间高精度时差测量链路主要集中在北斗卫星导航领域,L频段测量链路可实现星地高精度时间传递精度优于0.5 ns,Ka频段测量链路可实现高精度星地和星间时间传递精度优于0.3 ns[18]。

通过对诸多误差因素分析可知,链路穿过的大气环境造成的信号扰动是对链路时延稳定性造成影响的主要因素。1989年,JESPERSEN[19]指出双向卫星时间传输系统在低仰角和电子含量异常高等条件下,不能忽略射线路径的非互易性。同年LIEBE等[20]研究了雾、云条件下的微波

和毫米波传播中衰减延迟特性，证明了Mie散射理论的瑞利近似。2008年，HOBIGER等[21]提出了一种射线追踪算法，高精度地模拟大气路径延迟并实时确定对流层斜延迟；2013年，又开发了一种基于地面站气象传感器输入的半经验对流层修正模型[22]。2014年，PIESTER等[23]研究了TWSTFT昼夜分量中影响测量稳定性的卫星运动、环境温度、电离层、湿度等可能因素。2019年的ITU-R建议[24]提供了估算地面和倾斜路径上大气气体衰减的3种方法。2020年，BARON等[25]研究了中高层大气射线传播的高级模型，并导出考虑了地磁场引起的辐射极化和塞曼效应的分子和原子氧谱线。2023年，ZHANG等[26]研究了基于星地微波链路、考虑电离层高阶项引起的频移影响。

本文主要针对中国空间站高精度时频实验系统，研究了星地微波时频链路中大气时延误差的影响，提出了“三频链路”组合对消方法，利用上、下行链路消除对流层的非色散效应影响；借助两个下行链路计算同一路径的电离层总电子含量，进而修正电离层引起的时延误差；采用模型修正、微波辐射计实测结合的方式，修正了高频信号对流层色散误差，星地微波链路时频传递原理示意图见图1。本文给出的改正模型可实现亚皮秒量级测量精度的星地微波时间传递，满足中国空间站时间频率传递稳定度指标，进一步支撑冷原子光钟1×10^{-18}量级的长期稳定度需求。本文紧密耦合国家载人航天空间站高精度原子钟组在轨评估的需求，以及空间高精度时频基准应用的需求，在国家重大航天工程的需求中牵引新技术的发展。

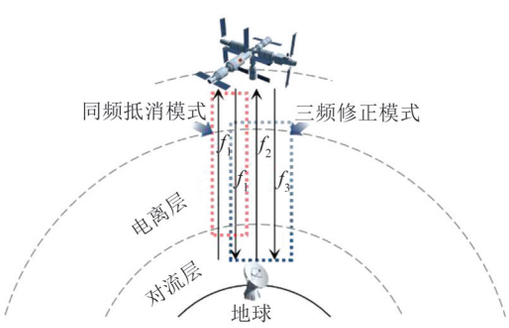


图1　星地微波链路时频传递原理示意图

Fig. 1　Schematic Diagram of Time-Frequency Transmission Principle in Microwave Link

1　大气误差分析

地球大气层分为中性大气层和电离层，中性大气层和电离层对无线电波传播都具有十分重要的影响，主要包括电波信号的吸收、相位变化、传播时延，频率色散、极化旋转和多径效应等。对于定位、导航和授时系统而言，对于电波时延的影响主要包括传播介质导致的时延和传播信号偏折导致的时延。

在传统的大气电波折射修正中，一般大于3 GHz的星地链路，只考虑对流层大气的非色散延迟。但是在空间站实际应用中，由于电波传播修正的指标要求是0.7 ps，所以针对实际需求，需要考虑电离层误差、对流层色散时延误差、对流层非色散时延误差和上下行传播路径差4点因素。

1.1　电离层误差分析

电离层传输误差$\delta_{f_1}^{\mathrm{ion}}$与传输路径上的电子密度总数$n_e$相关，计算公式如下[27-29]：

$$\delta_{f_1}^{\mathrm{ion}}=\left(\frac{K_1}{f_1^2}\pm\frac{K_2(B_0\cos\theta)}{f_1^3}\right)n_e \tag{1}$$

式中，B_0是地球磁场，$B_0=3.12\times10^{-5}$ T；$K_1=40.3\ \mathrm{m^2/s^2}$；$K_2=1.128\,3\times10^{12}\ \mathrm{m^3/(s\cdot Akg)}$。

利用全球地基GNSS网络可以计算得到全球总电子含量（total electron content，TEC）的分布，例如国际卫星导航服务（international GNSS service，IGS）就提供这样的数据。图2为计算得到的西安和上海天顶方向电子含量连续3天的变化。

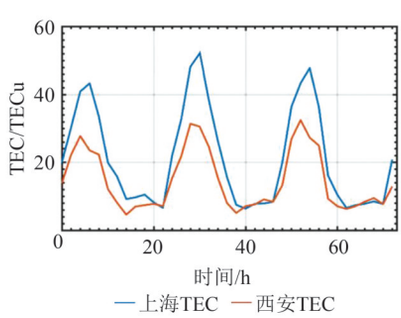


图2　西安和上海天顶方向VTEC连续3天变化

Fig. 2　Continuous 3-Day Variation of VTEC in the Zenith Direction of Xi'an and Shanghai

电离层除了一阶效应，还有二阶效应，二阶效应和背景TEC、磁场以及电波的极化有关。由于电离层时延误差和频率有关，本文计算了上海和西安3个频率f_1（~30 GHz）、f_2（~20 GHz）和f_3（~26 GHz）分别在天顶方向的时延一阶和二阶，如图3所示。从图3可以看出，电离层一阶延迟在几十到上百个皮秒左右，二阶延迟在1×10^{-3} ps量级。对应中国空间站星地微波时频链路0.7 ps的电波传播修正的指标要求，电离层的延迟需要进行改正。

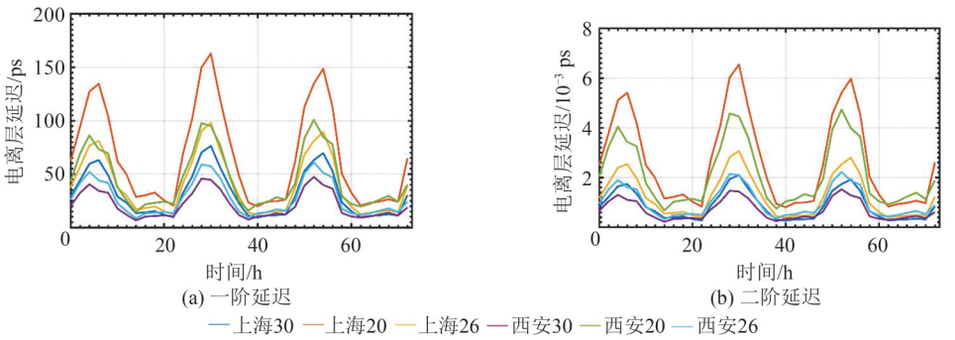


图3 西安和上海典型频率电离层延迟

Fig. 3 Typical Frequency Ionospheric Delays in Xi'an and Shanghai

1.2 对流层误差分析

精度要求不高时,可认为对流层电波传播是非色散的。但中国空间站的时频传递精度要求很高,在经过两次差分后,所剩下的对流层色散时延误差仍然是影响星地时频比对的重要因素。利用中尺度数值天气预报模型(weather research and forecasting model,WRF),给出典型地点和时间下对流层压强、水汽压和温度的剖面,见图4。

对流层非色散时延误差主要通过对流层大气温湿压建模进行计算,基于中尺度气象模型WRF,本文计算了2019年10月1日—30日西安和上海两地的对流层非色散时延,如图5(a)所示。对流层色散时延误差主要是由于对流层大气中的水汽分子、沉降粒子和氧分子的弛豫转动吸收引起的,见图5(b)。可以看出,对流层大气的非色散时延在(6~8)× 10^3 ps,色散时延在7~12 ps。因此,对流层的色散和非色散延迟都是星地微波时频比对需要考虑的重要因素。

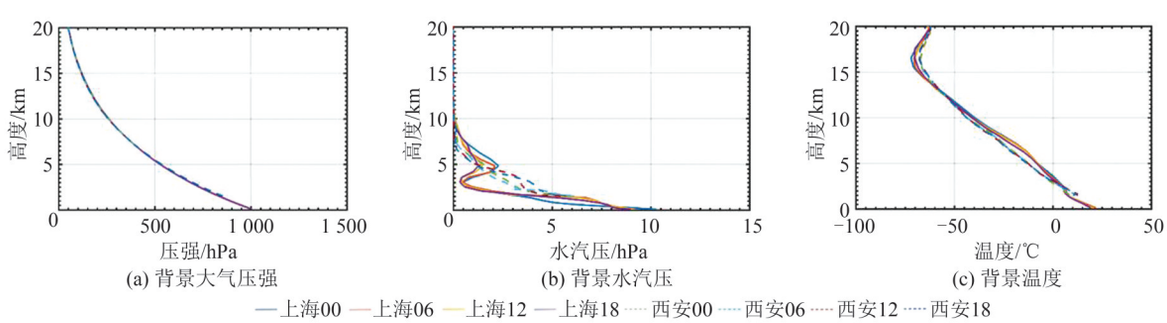


图4 WRF下的典型时间地点下的对流层误差

Fig. 4 Tropospheric Errors at Typical Time and Location Under the WRF Model

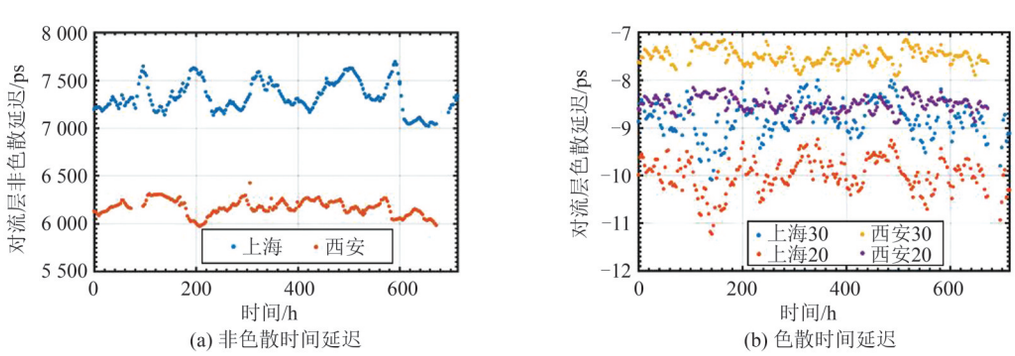


图5 2019年10月西安和上海的对流层大气时延

Fig. 5 Time Delay of the Tropospheric Atmosphere in Xi'an and Shanghai in October 2019

从以上分析可以看出,时频信号传播受大气影响,主要包括电离层传输误差及对流层传输误差,前者影响在几十到上百个皮秒左右,后者影响在纳秒级。在三频修正时差测量体制中,可利用上下行链路消除对流层的非色散效应影响,借助两个下行链路可计算同一路径的电离层TEC,进而修正电离层引起的时延误差。但由于高频信号中对流层色散的存在,还会和电离层色散产生交叉作用,影响电离层时延的校正。因此,计算精确的双频对流层色散时延之差是大气传输

误差修正的关键。

2　大气误差改正

目前,中国空间站和地面系统有两条上行链路f_1(~30 GHz)和f_2(~20 GHz),两条下行链路f_1(~30 GHz)和f_3(~26 GHz)。下面论证在不考虑路径非对称、相对论效应等因素下,对于实际的上下行链路的大气误差改正。

2.1　电离层改正模型

由于电离层的色散特性,载波信号穿过电离层时产生的电离层延迟与信号频率的平方成反比。电离层活动受到很多因素的影响,并且大部分地区IGS跟踪站不够密集,导致IGS总电子含量图某些地区精度不高,所以消除或减弱电离层延迟误差最有效的方法就是利用两个不同频率的信号消除电离层折射误差。目前,许多TWSTFT时间比对站都具有这样的条件,比如有些站配置了GPS双频接收机。中国科学院国家授时中心基于TWSTFT的转发式测轨网也配备有导航双频接收机。日本情报通信研究机构研究人员也利用准天顶卫星系统中的双频接收机消除电离层引起的双向时频传递中的电离层时延误差[30]。当这两种不同频率信号沿着同一路径到达用户接收机时,通过精确测定信号到达接收机的时间差,就能分别反推出它们各自所受到的电离层延迟,这种方法被称为双频改正数。只要精确确定两种频率信号到达接收机的时间差或者双频伪距观测值后,就能准确计算出这两种信号电离层延迟改正量。

由于系统设计时,已经设计了两个下行链路,基于两个下行频率,可以正好消除同一路径的电离层总电子含量,但是由于对流层色散的存在,会影响电离层一阶色散的计算,需要特殊的算法进行消除。对于两个下行频率f_1(~30 GHz)和f_3(~26 GHz),双频接收机有如下观测方程:

$$\Delta T_{f_1}(G)=t_G-t_s+\delta_{f_1}^{\mathrm{tro}}+\delta_{f_1}^{\mathrm{ion}} \tag{2}$$

$$\Delta T_{f_3}(G)=t_G-t_s+\delta_{f_3}^{\mathrm{tro}}+\delta_{f_3}^{\mathrm{ion}} \tag{3}$$

式中,$\Delta T(G)$表示地面站记录的时延;t_G和t_s分别表示地面时和卫星时;δ^{tro}和δ^{ion}分别表示对流层和电离层引起的时延误差;下角标f_1和f_3分别对应两个下行频率。

电离层误差是TEC与频率的函数,由上述观测方程可知,只要获得两个频点上的伪随机噪声码传播的距离差,即可解算出各自信号传播路径上的双向电离层时延误差值,另外将两个方程联立整理后可反推出电离层总电子含量,即:

$$\begin{cases} n_e= \dfrac{\Delta T_{f_1,f_3}(G)-\Delta\delta_{f_1,f_3}^{\mathrm{tro}}}{\left(\dfrac{K_1}{f_1^2}\pm\dfrac{K_2(B_0\cos\theta)}{f_1^3}\right)-\left(\dfrac{K_1}{f_3^2}\pm\dfrac{K_2(B_0\cos\theta)}{f_3^3}\right)} \\ \Delta T_{f_1,f_3}(G)=\Delta T_{f_1}(G)-\Delta T_{f_3}(G) \\ \Delta\delta_{f_1,f_3}^{\mathrm{tro}}=\delta_{f_1}^{\mathrm{tro}}-\delta_{f_3}^{\mathrm{tro}} \end{cases} \tag{4}$$

根据式(1)即可计算各频率的电离层折射误差。

电离层二阶色散由地球磁场和背景电子密度决定。在太阳活动极大年,典型电离层STEC=200 TECu,电离层二阶色散效应约为0.6 ps。此外,在太阳活动事件或者电离层暴时,电离层STEC有可能更大,此外电离层二阶色散效应还会影响电离层一阶色散效应的计算。

2.2　对流层改正模型

对流层误差计算是通过大气再分析数据构建对流层气象环境,然后计算折射率,插值得到微波链路传播路径上的折射率,再利用三维射线追踪算法获取对流层折射误差。

对流层从地球表面开始向高空伸展,直至对流层顶,即平流层的起点为止。它的高度因纬度而不同,在低纬度地区大约为17~18 km,在中纬度的地区高10~12 km,在高纬度地区只有8~9 km。对流层是中性气体,没有被太阳射线电离。对流层色散的主要原因是氧分子、水汽分子和大气沉降粒子的弛豫吸收,其中水汽分子的影响最大。由于目前的精度要求,对流层色散必须考虑。此外,由于对流层色散的存在,还会和电离层色散产生交叉作用,影响电离层时延的校正。因此对于对流层色散延迟的计算,需要结合微波辐射计和相应的高精度大气模型。一般情况下,当信号频率小于15 GHz时,认为对流层时延只与卫星高度角、相对湿度、大气压和温度等参数有关。利用近42年的ERA5再分析数据,西安站和上海站的地面温湿压样本如图6所示。严格来讲,信号穿过对流层是与频率相关的,它会对双向时频传递的比对产生一定程度的影响,量级在10 ps左右,这些影响可使用模型修正。

基于再分析数据,考虑可能的地面站点,利用三维射线追踪生成海量的对流层色散延迟样本分析对流层色散延迟情况,构建双频对流层色散延迟之差与表面干压P_d、水汽压P_w、温度T等相关参数的关系,形成对流层色散时延模型。

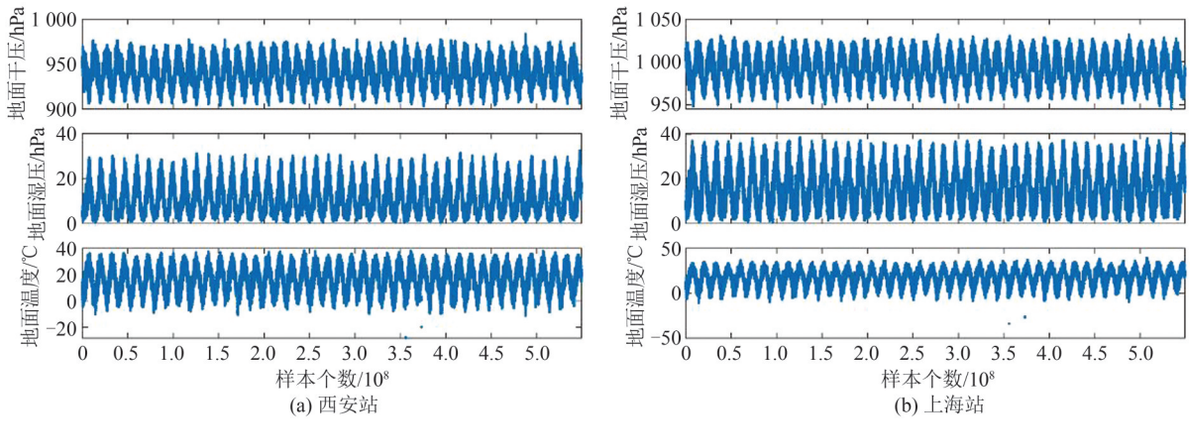


图6 西安和上海两站地面温湿压样本

Fig. 6 Ground Temperature, Humidity, and Pressure Samples at Xi'an and Shanghai Stations

对流层折射修正模型假设天顶方向的双频对流层色散延迟差为表面干压P_d、水汽压P_w以及温度T的线性函数,同时通过映射函数将天顶方向投影至任意仰角,尽管大地测量应用中存在多种映射函数,这里使用简单的一阶近似值,忽略了延迟的方位角相关性,这种简单的模型适用于所有站点。虽然可以用空间大地测量中使用的任何现代函数取代这个简单函数,但仰角在10°以上时,这些映射函数精度几乎相同。

对于三频方案,需构建两套模型,一套对应上下行链路,一套对应双下行链路,前者用于计算上下行链路对流层色散延迟差,后者用于计算电离层影响。

上下行链路(频率分别为f_1和f_2)的对流层折射修正模型为:

$$\Delta\delta^{\mathrm{tro}}_{f_1,f_2}=\frac{a_0P_d+a_1P_w+a_2T+a_3}{\sin\theta_{el}}+a_4 \tag{5}$$

双下行链路(频率分别为f_1和f_3)的对流层折射修正模型为:

$$\Delta\delta^{\mathrm{tro}}_{f_1,f_3}=\frac{b_0P_d+b_1P_w+b_2T+b_3}{\sin\theta_{el}}+b_4 \tag{6}$$

式中,$\Delta\delta^{\mathrm{tro}}_{f_1,f_2}$和$\Delta\delta^{\mathrm{tro}}_{f_1,f_3}$分别为对应的对流层时延误差修正量;$\theta_{el}$表示仰角;表面干压$P_d$、水汽压$P_w$、温度$T$通过地面设备测量得到;$a_0$~$a_4$、$b_0$~$b_4$分别为两套模型的系数,建模时得到。

两站对流层色散时延模型与三维射线追踪结果对比及残差分布如图7所示。其中图7(a)~7(d)的上下部分分别对应为频率f_1、f_2(以下简称12)和频率f_1、f_3(以下简称13)。对应各模型三维射线追踪模型如下:

西安站链路12射线追踪模型为:

$$y=(-9.394\,9\times10^{-5}P_d+0.027\,996P_w-0.005\,820\,5T+0.576\,45)m_f+0.008\,412\,6 \tag{7}$$

西安站链路13射线追踪模型为:

$$y=(0.001\,142\,9P_d+0.011\,254P_w-0.004\,363\,8T+0.017\,621)m_f+0.017\,782 \tag{8}$$

上海站链路12射线追踪模型为:

$$y=(-0.004\,157\,2P_d+0.017\,792P_w-0.008\,086\,2T+4.767\,2)m_f+0.009\,160\,6 \tag{9}$$

上海站链路13射线追踪模型为:

$$y=(-0.000\,273\,04P_d+0.008\,980\,2P_w-0.004\,998\,4T+1.460\,4)m_f+0.019\,116 \tag{10}$$

从图7中可以看到,模型与三维射线追踪结果较为符合。西安站链路12模型和链路13模型的误差均方根(root mean square,RMS)分别为0.104 ps和0.041 ps;上海站链路12模型和链路13模型的误差RMS分别为0.172 ps和0.081 ps,均可满足中国空间站精度指标要求。

图8和图9分别计算了西安站和上海站构建的模型残差与地面站所在位置的地面温湿压数据的影响,结合各射线追踪模型中表面干压P_d、水汽压P_w、温度T的系数均较小,进一步证实了模型对地面站所在位置的地面温湿压测量数据并不敏感。

3 结 语

本文研究了星地大气传输环境对双向微波测量的影响效应分析及误差修正方法,包括电离层以及对流层对双向微波测量的影响效应分析

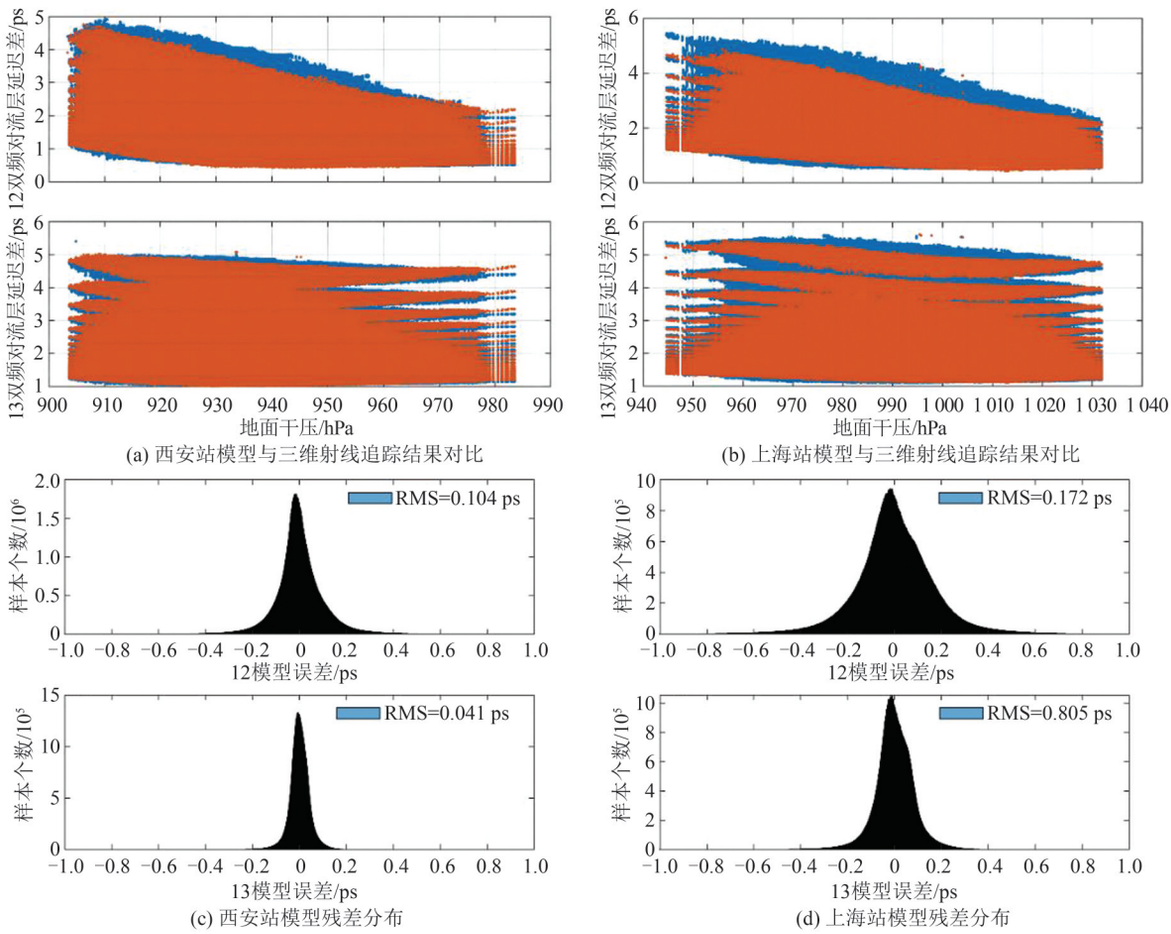


图 7　西安和上海两站对流层色散时延模型及残差分布

Fig. 7　Model and Residual Distribution of Tropospheric Dispersion Delay at Xi'an and Shanghai Stations

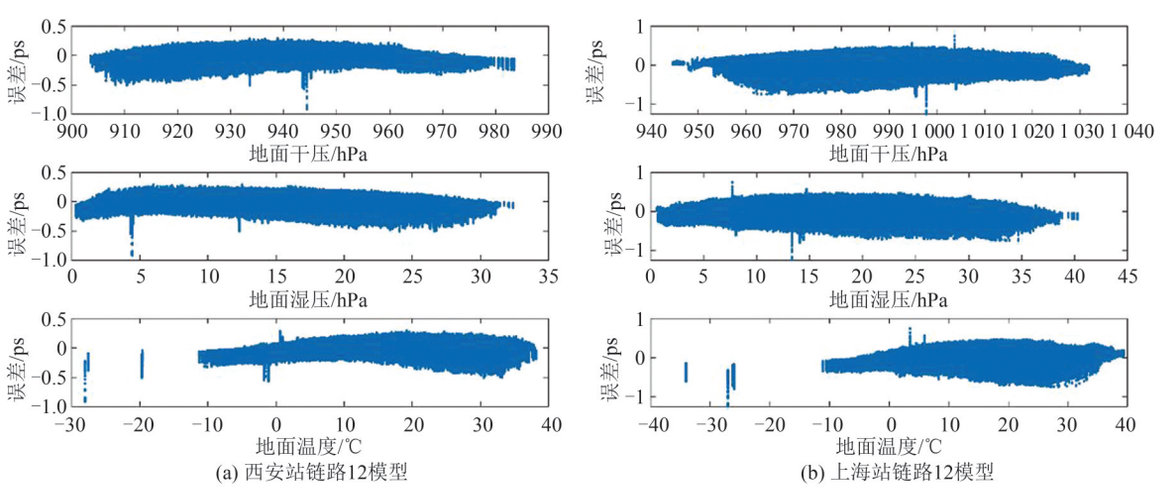


图 8　西安和上海站链路 12 模型对流层色散时延模型残差随地面温湿压变化

Fig. 8　Residual of the Tropospheric Dispersion Delay Model at Xi'an and Shanghai Stations Link 12 Models Varies with Surface Temperature, Humidity, and Pressure

及误差修正。电离层对微波的影响主要包括一阶色散和二阶色散影响。一阶色散较大，时延在几十到一百多皮秒，对双向微波测量影响较大。二阶色散较小，时延在 1×10^{-3} ps 量级，一般可忽略不计，但电离层 STEC 较大时，也会影响双向微波测量，建议在地面测站放置一套 GNSS-TEC 空间环境实时监测预警系统。

对流层对微波的影响主要包括色散和非色散效应。非色散延迟较大，在纳秒量级，色散延迟在 7～12 ps。针对空间站高精度微波时频传递需求，

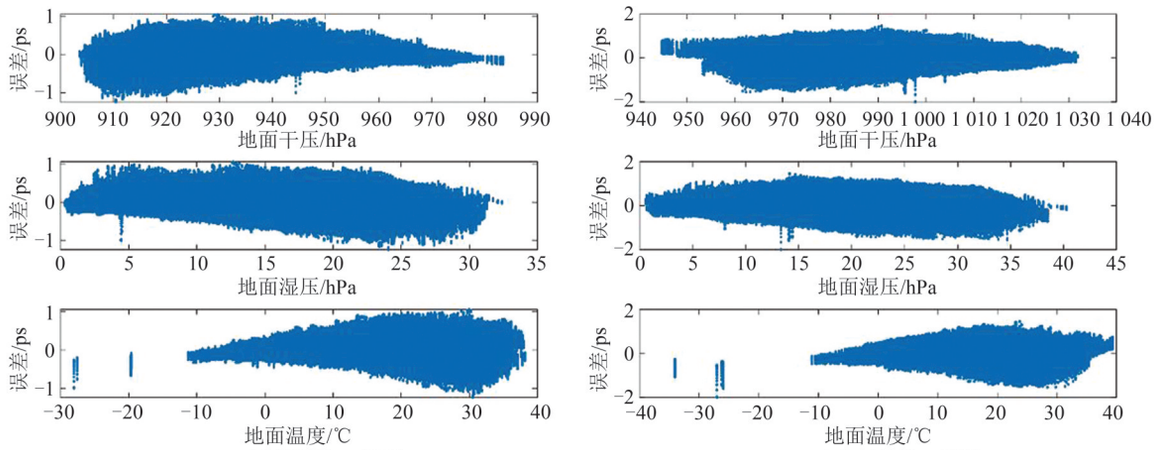


图9 西安和上海站链路13模型对流层色散时延模型残差随地面温湿压变化

Fig. 9 Residual of the Tropospheric Dispersion Delay Model at Xi'an and Shanghai Stations Link 13 Models Varies with Surface Temperature, Humidity, and Pressure

需要考虑对流层色散和非色散效应的影响。

在电离层折射修正中,首先利用双下行链路伪距计算STEC,再代入各链路完成其电离层折射修正。由于计算STEC采用双下行链路伪距,该伪距需事先消除除大气误差外的各项误差,因而其精度依赖其他各项误差的修正精度。

在对流层折射修正中,通过拟合各种气象条件下双链路对流层折射误差之差来构建对流层折射修正模型。通过ERA5再分析数据和高精度三维射线追踪技术,分别构建了适用于两个地面站的大气传输误差修正模型。基于该模型,微波链路对流层误差修正后的残差在0.2 ps以内,满足中国空间站星地时频长期稳定度要求。

参 考 文 献

[1] LAURENT P, MASSONNET D, CACCIAPUOTI L, et al. The ACES/PHARAO Space Mission [J]. *Comptes Rendus Physique*, 2015, 16(5): 540-552.

[2] MEYNADIER F, DELVA P, LE PONCIN-LAFITTE C, et al. Atomic Clock Ensemble in Space (ACES) Data Analysis [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2018, 35(3): 035018.

[3] 申文斌, 张朋飞, 申子宇, 等. 中国空间站微波链路引力红移检验仿真实验[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(6): 849-854.
SHEN Wenbin, ZHANG Pengfei, SHEN Ziyu, et al. Simulation Test of Gravitational Redshift by Microwave Links of China Space Station [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(6): 849-854.

[4] SAVALLE E, GUERLIN C, DELVA P, et al. Gravitational Redshift Test with the Future ACES Mission[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2019, 36(24): 245004.

[5] SCHILLER S, GÖRLITZ A, NEVSKY A, et al. Optical Clocks in Space [J]. *Nuclear Physics B — Proceedings Supplements*, 2007, 166: 300-302.

[6] RIEHLE F. Optical Clock Networks [J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(1): 25-31.

[7] ORIGLIA S, PRAMOD M S, SCHILLER S, et al. An Optical Lattice Clock Breadboard Demonstrator for the I-SOC Mission on the ISS[C]// 2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC), Munich, Germany, 2017.

[8] 梦天舱飞入空间站[EB/OL]. (2022-11-01) http://sc.people.com.cn/n2/2022/1101/c345167-40176376.html.
Mengtian Module Flies into the Space Station [EB/OL]. (2022-11-01) http://sc.people.com.cn/n2/2022/1101/c345167-40176376.html.

[9] 中国载人空间站科学实验与技术试验设施用户使用手册[EB/OL]. (2019-04-01) https://www.cmse.gov.cn/gfgg/201904/P020200225328481496691.pdf.
User Manual for Scientific and Technical Testing Facilities of Chinese Manned Space Stations [EB/OL]. (2019-04-01) https://www.cmse.gov.cn/gfgg/201904/P020200225328481496691.pdf.

[10] 陈江. 空间站高精度时频系统若干关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
CHEN Jiang. Research on some Key Technologies of High-Precision Time-Frequency System in Space Station[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017.

[11] GUO Y M, GAO S H, BAI Y, et al. A New

Space-to-Ground Microwave-Based Two-Way Time Synchronization Method for Next-Generation Space Atomic Clocks[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(3): 528.

[12] STEELE J M, MARKOWITZ W, LIDBACK C A. Telstar Time Synchronization[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1964, IM-13(4): 164-170.

[13] 张朋飞, 申文斌, 徐炜, 等. 利用高精度时频信号测定重力位[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(9): 62-69.
ZHANG Pengfei, SHEN Wenbin, XU Wei, et al. Determining the Gravity Potential by High Precision Time-Frequency Signal[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology* (*Natural Science Edition*), 2022, 50(9): 62-69.

[14] 刘利. 相对论时间比对理论与高精度时间同步技术[D]. 郑州: 信息工程大学, 2004.
LIU Li. Relativistic Theory of Time Transfer and Techniques of Clock Synchronization[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2004.

[15] 杨文可, 孟文东, 韩文标, 等. 欧洲空间原子钟组ACES与超高精度时频传递技术新进展[J]. 天文学进展, 2016, 34(2): 221-237.
YANG Wenke, MENG Wendong, HAN Wenbiao, et al. Advances in Atomic Clock Ensemble in Space of Europe and Ultraprecise Time and Frequency Transfer[J]. *Progress in Astronomy*, 2016, 34(2): 221-237.

[16] SCHILLER S, TINO G M, GILL P, et al. Einstein Gravity Explorer —A Medium-Class Fundamental Physics Mission[J]. *Experimental Astronomy*, 2009, 23(2): 573-610.

[17] ALTSCHUL B, BAILEY Q G, BLANCHET L, et al. Quantum Tests of the Einstein Equivalence Principle with the STE-QUEST Space Mission[J]. *Advances in Space Research*, 2015, 55(1): 501-524.

[18] 张首刚, 高帅和, 白燕, 等. 一种基于三频模式的高精度星地时间比对方法及系统: CN113671543A[P]. 2021-11-19.
ZHANG Shougang, GAO Shuaihe, BAI Yan, et al. High-Precision Satellite-Ground Time Comparison Method and System Based on Three-Frequency Mode: CN113671543A[P]. 2021-11-19.

[19] JESPERSEN J. Impact of Atmospheric Non-Reciprocity on Satellite Two-Way Time Transfer[C]// The 43rd Annual Symposium on Frequency Control, Denver, CO, USA, 1989.

[20] LIEBE H J, MANABE T, HUFFORD G A. Millimeter-Wave Attenuation and Delay Rates Due to Fog/Cloud Conditions[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1989, 37(12): 1617-1612.

[21] HOBIGER T, ICHIKAWA R, KOYAMA Y, et al. Fast and Accurate Ray-Tracing Algorithms for Real-Time Space Geodetic Applications Using Numerical Weather Models[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113(D20): 2008JD010503.

[22] HOBIGER T, PIESTER D, BARON P. A Correction Model of Dispersive Troposphere Delays for the ACES Microwave Link[J]. *Radio Science*, 2013, 48(2): 131-142.

[23] PIESTER D, BAUCH A, FUJIEDA M, et al. Studies on Instabilities in Long-Baseline Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer (TWSTFT) Including a Troposphere Delay Model[C]//The 39th Annual Precise Time and Time Interval Meeting, Long Beach, California, USA, 2007.

[24] Attenuation by Atmospheric Gases and Related Effects: ITU-R P.676[S]. ITU-R, 2019.

[25] BARON P, OCHIAI S, DUPUY E, et al. Potential for the Measurement of Mesosphere and Lower Thermosphere (MLT) Wind, Temperature, Density and Geomagnetic Field with Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder 2 (SMILES-2)[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2020, 13(1): 219-237.

[26] ZHANG P F, SHEN W-B, WANG C X, et al. Higher Order Ionospheric Effects in Testing Gravitational Redshift by Space Frequency Signal Transfer[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2023, 679: A86.

[27] HOQUE M M, JAKOWSKI N. Higher Order Ionospheric Effects in Precise GNSS Positioning[J]. *Journal of Geodesy*, 2007, 81(4): 259-268.

[28] HOQUE M M, JAKOWSKI N. Mitigation of Higher Order Ionospheric Effects on GNSS Users in Europe[J]. *GPS Solutions*, 2008, 12(2): 87-97.

[29] HOQUE M M, JAKOWSKI N. Estimate of Higher Order Ionospheric Errors in GNSS Positioning[J]. *Radio Science*, 2008, 43(5): 2007RS003817.

[30] YOKOTA S, TAKAHASHI Y, FUJIEDA M, et al. Accuracy of Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer via Non-Geostationary Satellites[J]. *Metrologia*, 2005, 42(5): 344-350.