



武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860,CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目：亚皮秒级星地时频比对微波链路大气修正技术研究
作者：张文颖，周晨，高帅和，申文斌，郭燕铭，张首刚
DOI：10.13203/j.whugis20230452
收稿日期：2024-02-25
网络首发日期：2024-03-26
引用格式：张文颖，周晨，高帅和，申文斌，郭燕铭，张首刚. 亚皮秒级星地时频比对微波链路大气修正技术研究[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版).
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20230452>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20230452

引用格式：

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), 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20230452 (ZHANG Wenying, ZHOU Chen, GAO Shuaihe, et al. Research on Atmospheric Correction Technology for Subpicosecond Satellite Earth Time Frequency Comparison Microwave Link[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 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国家重点实验室, 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，我们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、微波辐射计实测相结合的方式，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 E-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

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

ZHANG Wenying¹ ZHOU Chen² GAO Shuaihe^{3*} SHEN Wenbin^{1, 4}

GUO Yanming^{3,5} ZHANG Shougang³

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

收稿日期：2024-02-25

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，助理实验师。研究方向为空间高精度时频传递。wyingzhang@sgg.whu.edu.cn

通讯作者：高帅和，正高级工程师。gaoshuaihe@ntsc.ac.cn

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 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 E-18 level cold atomic clock. **Keywords** 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)拟于 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 $3E-16$ 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 $5E-17$ 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(China Space Station, CSS)高精度时频实验系统已于 2022 年 10 月 31 日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,为我国建成世界唯一的、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 $5E-17$ 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 E-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(the National Physical Laboratory, NPL)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 $2234 \pm 20\mu\text{s}$ ^{[12][13]}。ACES 计划的微波链路应用 TWSTFT 技术预计实现 6ps 的星地比对精度^[14]。EGE(Einstein Gravity Explorer)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]。STE-QUEST

(Space-Time Explorer and Quantum Equivalence Principle Space Test)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0.5ns,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0.3ns^[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等人^[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等人^[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,Hobiger等人^[22]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。2014年,Piester和Bauch等人^[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三种方法。2020年Baron等人^[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,张朋飞等人^[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。

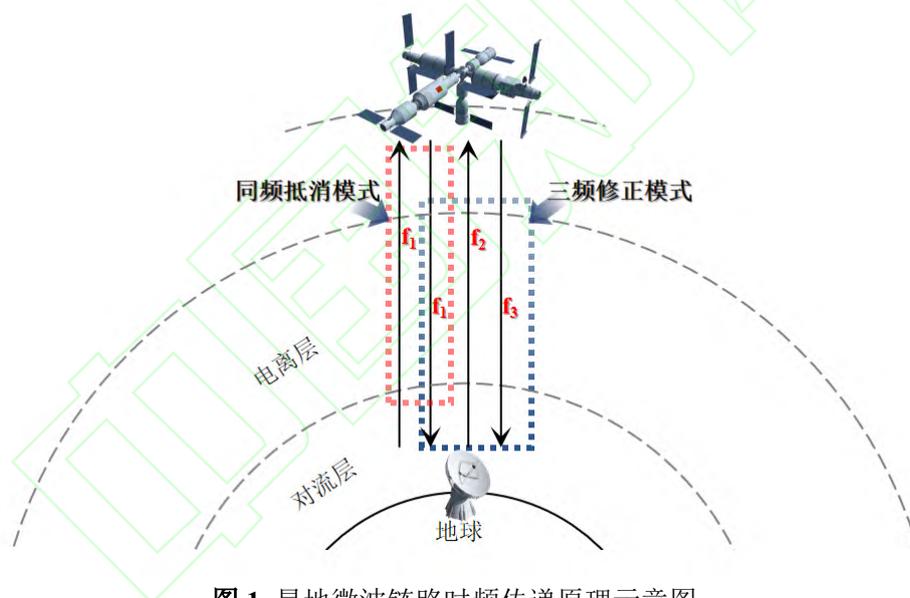


图1 星地微波链路时频传递原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of time-frequency transmission principle in microwave link.

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”组合抵消方法,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。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 E-18 量级的长期稳定度需求。本研究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。

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,以及多径效应等。对于定位、导航和授时(PNT)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3GHz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0.7ps,所以针对实际需求,需要考虑如下4点因素:1)电离层误差;2)对流层色散时延误差;3)对流层非色散时延误差;4)上下行传播路径差。

1.1 电离层误差分析

电离层传输误差 $\delta_{f_1}^{ion}$ 与传输路径上的

电子密度总数 n_e (Slant Total Electron Content, STEC) 相关,计算公式如下^[27-29]:

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

其中, B_0 是地球磁场,取值 $B_0 = 3.12 \times 10^{-5} \text{T}$; K_1 和 K_2 分别取值 $K_1 = 40.3 \text{m}^2 \text{s}^{-2}$, $K_2 = 1.1283 \times 10^{12} \text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{Akg}^{-1}$ 。

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为计算得到上海和西安天顶方向电子含量(VTEC)连续3天变化。

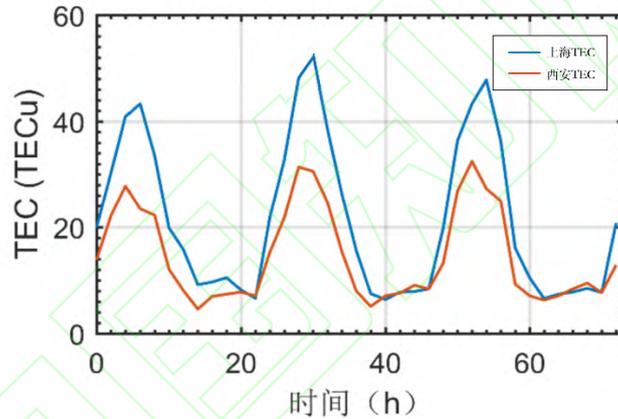


图2 上海和西安天顶方向 VTEC 连续3天变化

Fig. 2 Continuous 3-day variation of VTEC in the zenith direction of Shanghai and Xi'an

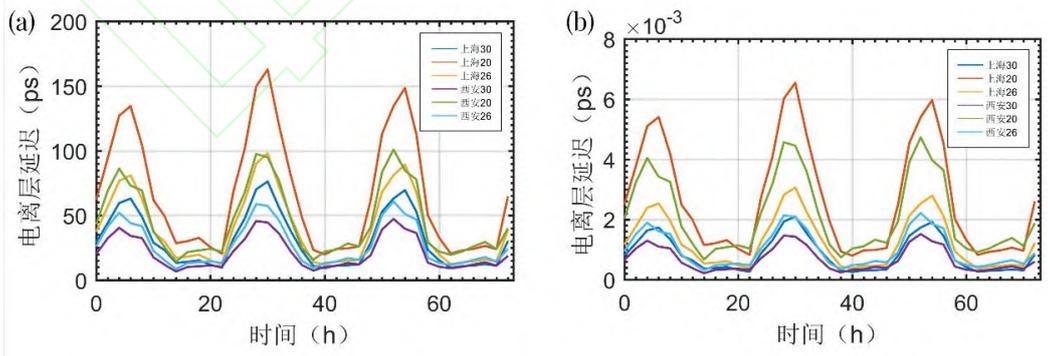


图3 上海和西安典型频率电离层延迟。(a) 一阶延迟;(b) 二阶延迟。

Fig. 3 Typical frequency ionospheric delays in Shanghai and Xi'an. (a) First order delay; (b) Second order delay

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

中可以看出, 电离层一阶延迟在几十到上百个皮秒左右, 二阶延迟在 10^{-3} ps 量级。对应中国空间站星地微波时频链路 0.7ps 的电波传播修正的指标要求, 电离层的延迟需要进行改正。

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。

利用中尺度气象模型 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, 如图 4 所示。

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)。从图中, 我们可以看出对流层大气的非色散时间延迟在 $6 \times 10^3 \sim 8 \times 10^3$ ps, 色散时间延迟在 7~12ps。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。

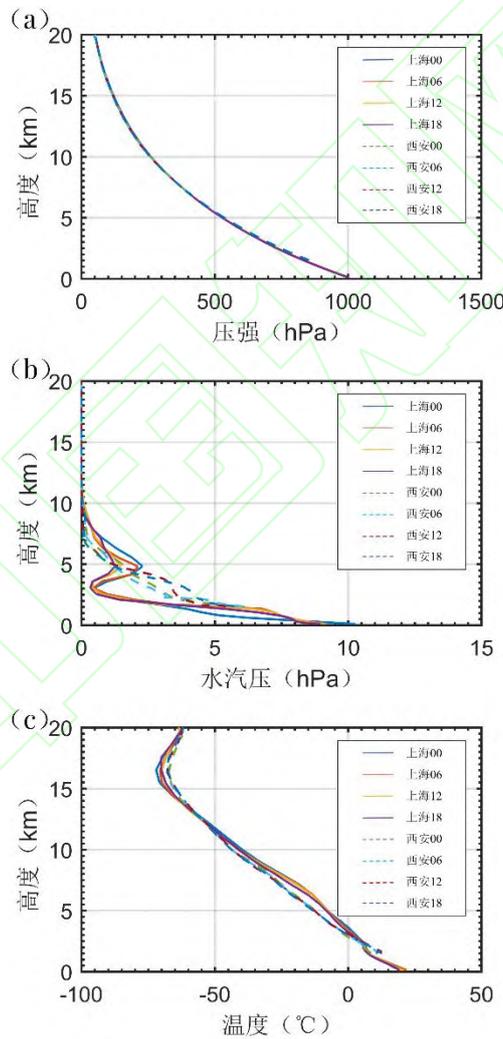


图 4 中尺度气象模型 WRF 下的典型时间地点下的对流层误差。(a) 背景大气压强; (b) 背景水汽压; (c) 背景温度。

Fig. 4 Tropospheric errors at typical time and location under the mesoscale meteorological model WRF. (a) Background atmospheric pressure; (b) Background water vapor pressure; (c) Background temperature

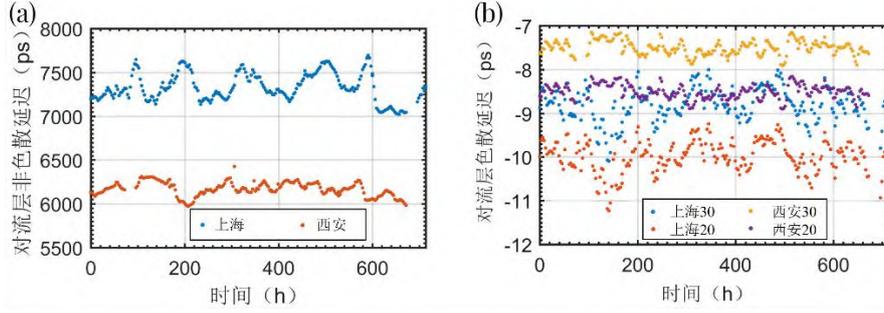


图 5 2019 年 10 月西安和上海的对流层大气的时间延迟。(a) 非色散时间延迟；(b) 色散时间延迟。

Fig. 5 Time delay of the tropospheric atmosphere in Xi'an and Shanghai in October 2019. (a) Non dispersive time delay; (b) Dispersion time delay

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总电子含量，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。在日本，NICT 研究人员也利用 QZSS (The quasi-zenith satellite

system) 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，就能分别反推出他们各自所受到的电离层延迟，我们把这种方法称为双频改正数。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 STEC，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：

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

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

其中， $\Delta T(G)$ 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 f_1 和 f_3 。

电离层误差是总电子含量与频率的函数，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，即可计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：

$$\begin{cases} n_e = \frac{\Delta T_{f_1 f_3}(G) - \Delta \delta_{f_1 f_3}^{tro}}{\left(\frac{K_1}{f_1^2} + \frac{K_2(B_0 \cos \theta)}{f_1^3}\right) - \left(\frac{K_1}{f_3^2} + \frac{K_2(B_0 \cos \theta)}{f_3^3}\right)} \\ \Delta T_{f_1 f_3}(G) = \Delta T_{f_1}(G) - \Delta T_{f_3}(G) \\ \Delta \delta_{f_1 f_3}^{tro} = \delta_{f_1}^{tro} - \delta_{f_3}^{tro} \end{cases} \quad (4)$$

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 17 至 18 公里，在中纬度的地区高 10 至 12 公里，在高纬度地区只有 8 至 9 公里。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 15GHz 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 10ps 左右，这些影响可使用模型修正。

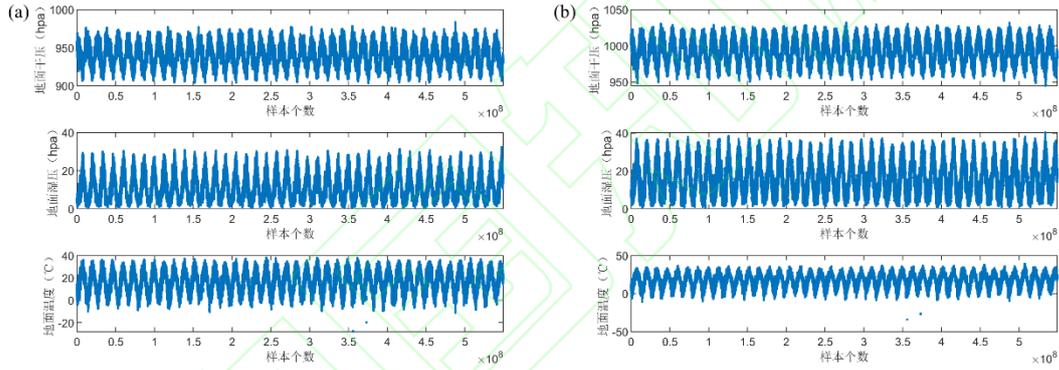


图 6 两站地面温湿压样本。(a) 西安站；(b) 上海站。

Fig. 6 Ground temperature, humidity, and pressure samples at Xi'an and Shanghai stations.

(a) Xi'an Station; (b) Shanghai Station

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。

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 、温度 T 以及的线性函数，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。

对于上下行链路（频率分别为 f_1 和 f_2 ），对流层折射修正模型为：

$$\Delta\delta_{f_1, f_2}^{tro} = \frac{a_0 \cdot P_d + a_1 \cdot P_w + a_2 \cdot T + a_3}{\sin \theta_{el}} + a_4 \quad (5)$$

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：

$$\Delta\delta_{f_1, f_3}^{tro} = \frac{b_0 \cdot P_d + b_1 \cdot P_w + b_2 \cdot T + b_3}{\sin \theta_{el}} + b_4 \quad (6)$$

其中, $\Delta\delta_{f_1, f_2}^{tro}$ 和 $\Delta\delta_{f_1, f_3}^{tro}$ 分别为对应的对流层时延误差修正量, θ_{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, $a_0 \sim a_4$ 、 $b_0 \sim b_4$ 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)~(d) 的上下部分分别对应为频率 1、2 和频率 1、3。对应各模型三维射线追踪模型分别为:

西安站链路 12(对应于上下行链路频率分别为 f_1 和 f_2) 射线追踪模型为:

$$y = (-9.3949 \times 10^{-5} P_d + 0.027996 P_w - 0.0058205 T + 0.57645) m_f + 0.0084126 \quad (7)$$

西安站链路 13(对应于双下行链路频率分别为 f_1 和 f_3) 射线追踪模型为:

$$y = (0.0011429 P_d + 0.011254 P_w - 0.0043638 T + 0.017621) m_f + 0.017782 \quad (8)$$

上海站链路 12(对应于上下行链路频率分别为 f_1 和 f_2) 射线追踪模型为:

$$y = (-0.0041572 P_d + 0.017792 P_w - 0.0080862 T + 4.7672) m_f + 0.0091606 \quad (9)$$

上海站链路 13(对应于双下行链路频率分别为 f_1 和 f_3) 射线追踪模型为:

$$y = (-0.00027304 P_d + 0.0089802 P_w - 0.0049984 T + 1.4604) m_f + 0.019116 \quad (10)$$

从图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 RMS 分别为 0.104ps 和 0.041ps; 上海站链路 12 模型和链路 13 模型的误差 RMS 分别为 0.172ps 和 0.081ps, 均可满足中国空间站精度指标要求。

同时, 图 8 计算了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。

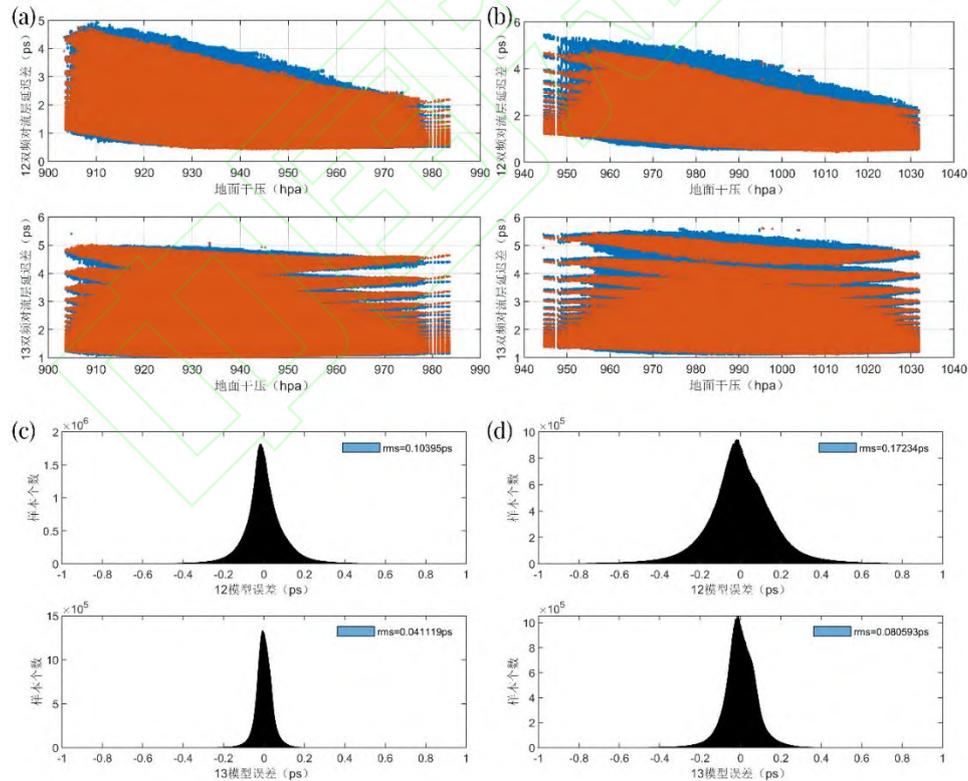


图 7 两站对流层色散时延模型及残差分布。(a) 西安站模型与三维射线追踪结果对比; (b) 上海站模型与三维射线追踪结果对比; (c) 西安站模型残差分布; (d) 上海站模型残差分布。

Fig. 7 Model and residual distribution of tropospheric dispersion delay at Shanghai and Xi'an

stations. (a) Comparison between Xi'an station model and 3D ray tracing results; (b) Comparison between Shanghai station model and 3D ray tracing results; (c) Residual distribution of Xi'an station model; (d) Residual distribution of Shanghai station model

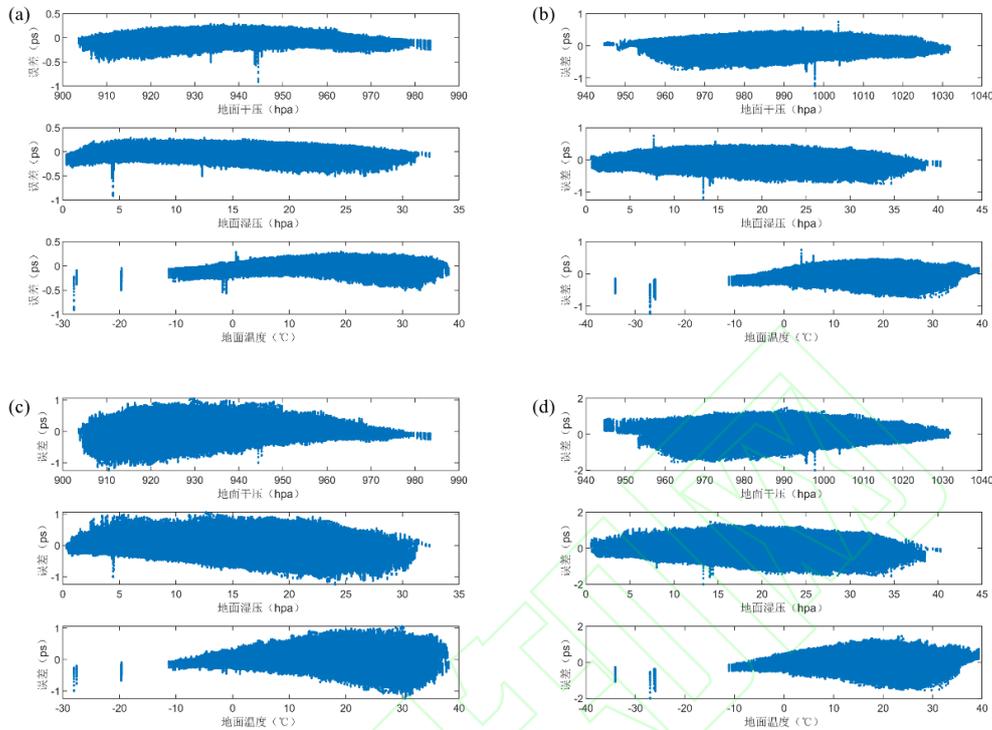


图 8 两站对流层色散时延模型残差随地面温湿压变化。(a) 西安站链路 12 模型; (b) 上海站链路 12 模型; (c) 西安站链路 13 模型; (d) 上海站链路 13 模型。

Fig. 8 Residual of the tropospheric dispersion delay model at Shanghai and Xi'an stations varies with surface temperature, humidity, and pressure. (a) Xi'an Station link 12 Model; (b) Shanghai Station link 12 Model; (c) Xi'an Station link 13 Model; (d) Shanghai Station link 13 Model

3 结论

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及误差修正。

电离层对微波的影响主要包括一阶色散以及二阶色散影响。一阶色散较大,时延在几十到一百多皮秒,对双向微波测量较大影响。二阶色散较小,时延在 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 7~12ps。针对空间站高精度微波

时频传递需求,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,再代入各链路完成各链路的电离层折射修正。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 0.2ps 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] A P L, B D M, C L C, 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): 35018.
- [3] SHEN Wenbin, ZHANG Pengfei, SHEN Ziyu, XU Rui, GAO Yuping. 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. (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.)
- [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.
- [8] YU Jianbin. Mengtian module flies into the space station[N]. *People's Daily*. (余建斌. 梦天舱飞入空间站[N]. *人民日报*.)
- [9] China Manned Space Engineering Office. User Manual for Scientific and Technical Testing Facilities of Chinese Manned Space Stations[Z]. 2023. (中国载人航天工程办公室. 中国载人空间站科学实验与技术试验设施用户使用手册[Z]. 2023.)
- [10] CHEN Jiang. Research on Several Key Technologies of High Precision Time Frequency Systems for Space Stations[D]. University of Chinese Academy of Sciences, 2017. (陈江. 空间站高精度时频系统若干关键技术研究[D]. 中国科学院大学, 2017.)
- [11] Guo Y, Gao S, 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] ZHANG Pengfei, SHEN Wenbin, XU Wei, et al. Determining the gravity potential by high precision time-frequency signal[J]. *J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech. (Natural Science Edition)*. 2022, 50(9): 62-69. (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.)
- [14] LIU Li. Relativistic theory of time transfer and techniques of clock synchronization[D]. Information Engineering University, 2004. (刘利. 相对论时间比对理论与高精度时间同步技术[D]. 解放军信息工程大学, 2004.)
- [15] 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(02): 221-237. (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(02): 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]. *Physics*. 2014.
- [18] ZHANG Shougang, GAO Shuaihe, BAI Yan, et al. A high-precision satellite ground time comparison method and system based on three frequency mode [P]. CN202110554869.0. 2021-11-19. (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 [P]. CN202110554869.0. 2021-11-19.)
- [19] Jespersen J. Impact of atmospheric non-reciprocity on satellite two-way time transfer[C]. 1989.
- [20] Liebe H J, Manabe T, Hufford G A. Millimeter-wave attenuation and delay rates due to fog/cloud condition[J]. *IEEE Trans Antennas & Propag.* 1989, 37(12): 1617-1623.
- [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*. 2008, 113: D20302.
- [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]. 2007.
- [24] Ix-Itu. Attenuation by atmospheric gases and related effects[S]. 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.
- [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).
- [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: 344-350.

网络首发:

标题: 亚皮秒级星地时频比对微波链路大气修正技术研究

作者: 张文颖, 周晨, 高帅和, 申文斌, 郭燕铭, 张首刚

收稿日期: 2024-02-25

DOI:10.13203/j.whugis20230452

引用格式:

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),2024,DOI: 10.13203/j.whugis20230452 (ZHANG Wenying, ZHOU Chen, GAO Shuaihe, et al. Research on Atmospheric Correction Technology for Subpicosecond Satellite Earth Time Frequency Comparison Microwave Link[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2024,DOI: 10.13203/j.whugis20230452)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别，请以正式出版文件为准！

您感兴趣的其他相关论文：

空间激光链路时频传递算法及仿真分析

陈俊平, 王彬, 孟文东, 张晶宇

武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(7): 1082-1088.

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20230165>

北斗高精度时频服务理论方法与应用

施闯, 郑福, 楼益栋, 王玉琢, 张爱敏, 张首刚, 张东, 宋伟, 王梦, 林元挥, 王浩源

武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(7): 1010-1018.

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20230205>

北斗三号系统时频体系设计与实现

卢望, 武建峰, 袁海波, 申建华, 孟轶男, 宿晨庚, 陈颖

武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(8): 1340-1348.

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20200529>