

一种应用于实时深空干涉测量的电离层时延修正方法

韩松涛^{1,2}, 谢剑锋¹, 王美¹, 李黎¹

(1. 北京航天飞行控制中心 航天飞行动力学技术重点实验室, 北京 100094;

2. 中国科学院 国家天文台, 北京 100012)

摘要: 针对“嫦娥4号”中继星任务S频段信标信号的高精度实时干涉测量需求, 结合深空测控干涉测量系统采用的稀疏标校工作模式, 研究验证了一种面向测控模式实时干涉测量的电离层时延修正方法。首先分析了电磁波经电离层传播的延迟机理及特性; 基于深空站历史观测数据, 通过自相关函数分析验证了天顶向TEC的周日特性; 在此基础上, 结合深空干涉测量中心数据处理设备软件系统, 讨论了电离层时延修正方法; 通过任务期间的实测数据处理分析, 验证了所提方法可以将实时测量精度提升1~3 ns, 对低仰角跟踪弧段, 该技术方法优势更为明显。该方法为后续深入推进深空测控干涉测量系统在任务中的实时应用提供了技术储备。

关键词: 干涉测量; 深空网; 电离层; TEC; 嫦娥4号中继星

中图分类号: TN961

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2019)03-0232-04

DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2019.03.005

引用格式: 韩松涛, 谢剑锋, 王美, 等. 一种应用于实时深空干涉测量的电离层时延修正方法[J]. 深空探测学报, 2019, 6(3): 232-235, 300.

Reference format: HAN S T, XIE J F, WANG M, et al. A method of ionosphere delay calibration in real-time deep space interferometric tracking[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2019, 6(3): 232-235, 300.

引言

“嫦娥4号”中继星于2018年5月21日发射, 运行于地月拉格朗日L2点的Halo轨道, 为后续着巡组合体月球背面软着陆巡视勘察提供测控通信中继服务^[1]。中继星搭载S频段DOR侧音转发器, 用于支持地面测控系统进行DOR/ Δ DOR跟踪测量, 相对于以往“嫦娥3号”, 再入返回飞行试验任务的X波段观测, S频段信标受电离层时延的影响更为明显, 对深空测控干涉测量系统的高精度实时测量提出进一步挑战。

深空测控干涉测量系统于2013年初步建成, 目前已形成以佳木斯66 m、喀什35 m、南美撒帕拉35 m深空测控天线以及位于北京航天飞行控制中心的中国深空网干涉测量中心为主体的布局, 此外纳米比亚18 m测控天线也配置了干涉测量采集终端, 并开展了验证性测试^[2-3]。测控天线主要承担航天器的遥测、遥控任务, 因此干涉测量通常采用稀疏标校模式^[4-5], 即在组成基线的两测站入站前、以及出站后进行射电源标校, 对实时测量而言, 只能采用“射电源-航天

器”(Quasar-Spacecraft, Q-S)标校跟踪模式, 以佳木斯-喀什基线为例, 标校射电源与中继星的跟踪时间间隔通常在5~6 h左右。相对于标准 Δ DOR模式采用的小角距、短时交替模式, 测控干涉测量系统的“射电源-航天器”跟踪模式无法实现测量误差的时间域、空间域约束, 原理上已无法通过射电源标校实现介质时延的高精度修正。

本文在分析电磁波经电离层传播的延迟机理及特性基础上, 结合历史观测数据, 评估验证区域天顶向TEC(Total Electron Content)的周日特性, 依托深空干涉测量中心数据处理设备, 给出了实时干涉测量的电离层时延修正方法; 并基于任务期间的实测数据处理分析, 对比验证本文提出的电离层修正方法的有效性。

1 电离层时延特性分析

1.1 基本概念

电离层通常是指从地面60~70 km以上至约1 000 km的大气层, 太阳使该区域的大气发生电离, 从而具有密度较高的带电粒子, 对无线电信号产生折

射、反射、散射以及吸收等作用。无线电信号穿过电离层时，传播速度会发生改变，传播路径也会发生弯曲，产生时延效应^[6]，电离层的折射使电磁波相位传播速度（相速）加快，波内能量速度（群速）减慢^[7]。

电离层群时延可表征为^[8-9]

$$\Delta\rho_{ion} = \frac{40.28}{f^2} \int_r^{s_y} N_e ds = \frac{40.28}{f^2} TEC \quad (1)$$

其中： TEC 表示沿电磁波传播路径的电子总量，即底面积为 1 m^2 贯穿整个电离层柱体内所含的电子数。通常以 $TECU$ 表示 TEC 的单位， $1TECU = 1 \times 10^{16}$ 电子数/ m^2 。

1.2 TEC周日特性分析

电离层受太阳辐射、地磁活动等多种控制因素的影响，其中，太阳活动对 TEC 的影响最显著。电离层的电子浓度受太阳辐射的影响随着地球自转而不断变化，使得 TEC 具有明显的周日变化特性^[10]，图1显示了喀什深空站通过布置双频GPS接收机获取的连续10余天的 TEC 量值（已转化为天顶向的 $VTEC$ ，起始时间为BJT：2018-05-18 00:00:00），采样点间隔为60 s，个别间断数据由于记录数据不完整引起。

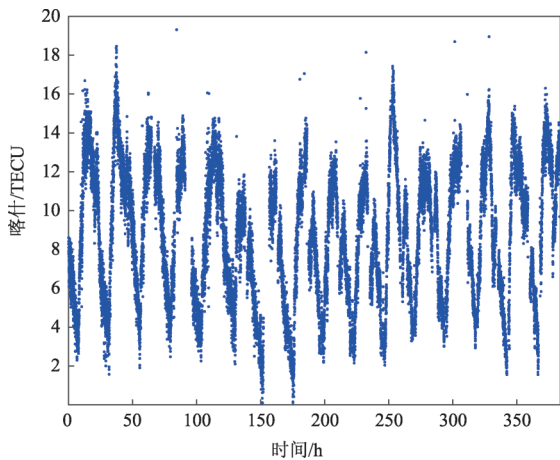


图1 喀什深空站实测 TEC 量值统计
Fig. 1 TEC Value of KSH deep space station

由图中 TEC 的分布特性，可观察到 TEC 存在较为明显的周日变化特性，利用自相关分析方法验证此周日特性。自相关函数反映了信号与其本身在不同时刻的相似程度，是一种时间域的统计度量方法，归一化的自相关函数定义为

$$\rho_\tau = \frac{R(t, \tau)}{R(t, 0)} \quad (2)$$

其中： $R(t, 0)$ 表示信号与其本身在同一时刻的相关

函数值，对于随机信号这一值为最大值，而对于周期信号，这一函数值理论上应表现出一定的周期特性。以喀什深空站记录数据为例，图2显示了归一化自相关函数图。对自相关函数进行FFT（Fast Fourier Transformation）变换，分析主要周期分量，可知在 1.1588×10^{-5} Hz处，存在明显峰值，对应的周期值为 $1/1.1588 \times 10^{-5} = 86296$ s，验证了 TEC 的周日变化特性，此外，电离层还有着明显的太阳周循环变化、年变化、季节变化等长周期特性^[11]。

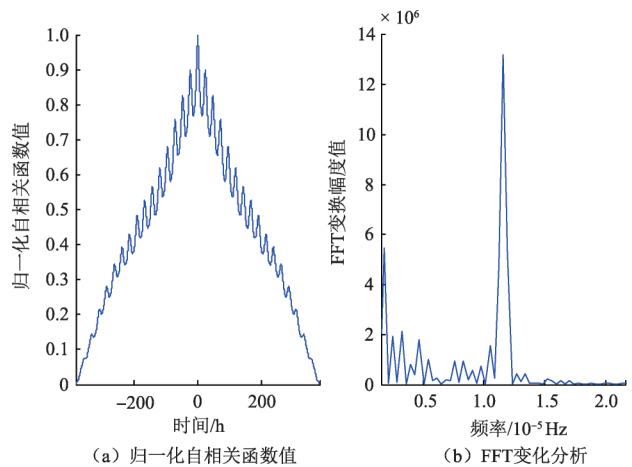


图2 自相关函数图及周期分量分析
Fig. 2 Auto correlation and period analysis

2 处理方法流程

在电离层特性分析基础上，基于周日变化特性，依托深空干涉测量中心数据设备软件系统，设计实时深空干涉测量电离层时延修正方案如下：

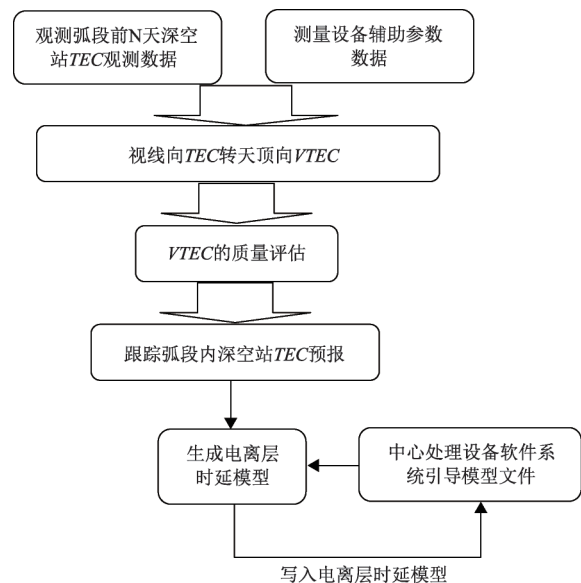
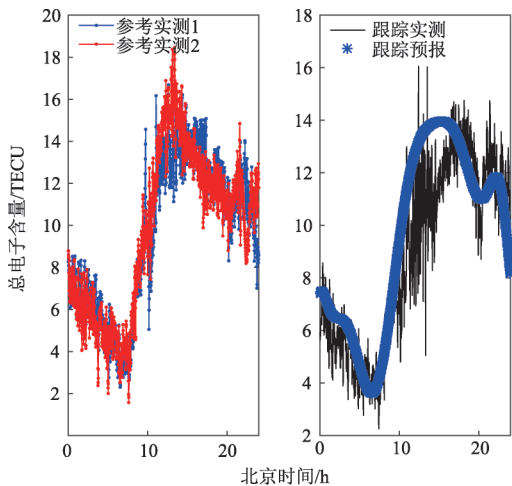


图3 处理方法流程图
Fig. 3 Flow chart of processing algorithm

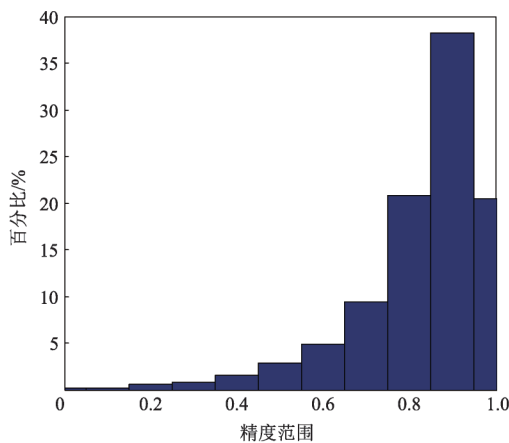
①通常基于跟踪弧段前3天左右内的深空站 TEC 实测数据；②由于测站配置的 GPS 双频接收机提供的 TEC 为视线向的测量值，首先依据电离层投影函数转化为天顶向的 $VTEC$ 值，文献[12]比较了各类电离层投影函数的性能，不失一般性可选取三角函数型投影函数；③对连续序列的 $VTEC$ 进行质量评估，剔除异常时间段观测量，基于周日特性，以日积秒为自变量、 $VTEC$ 为变量拟合多项式模型，模型阶数可视拟合残差动态调整；④依据模型系数及跟踪弧段的日积秒，计算测站 $VTEC$ 量值；⑤结合中心数据处理软件系统中的跟踪弧段内目标高度角等信息，经投影函数转化计算视线向的 TEC 预测值；⑥基于公式 (1) 实现电离层时延的计算，并更新相关处理引导模型。

图4以喀什深空站2018年5月26日为例，显示了应用本文论述的方法获取的电离层预测值 TEC_p 与实际值 TEC_c 的比较，其中定义预报精度如下

$$P = 1 - \frac{|TEC_p - TEC_c|}{TEC_c} \quad (3)$$



(a) 预报结果对比



(b) 精度分布直方图

图4 预报精度分析

Fig. 4 Prediction accuracy analysis

统计分析表明，约75%以上的数值预报精度 > 80%，而低预报精度的数值多是由于实测参数值的噪声引起。

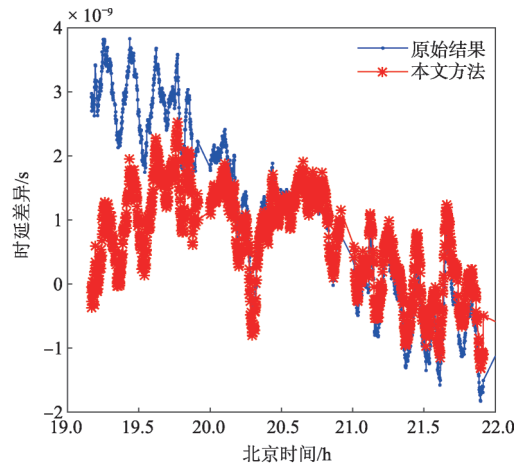
3 实验结果比对分析

选取2018年5月22日中继星地月转移弧段的跟踪过程为例，对比分析本文算法对实时测量精度的改进情况。表1统计了该跟踪弧段的目标跟踪参数情况，其中采样带宽2 MHz，2 bit量化，VSI记录格式。

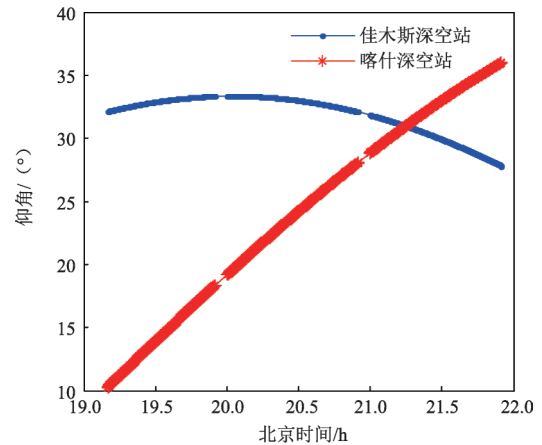
表1 干涉测量系统参数
Table1 Interferometric tracking parameters

跟踪时间(北京时间)	跟踪目标
13:10~13:50	0316+413
19:10~19:55	中继星
20:00~20:55	中继星
21:00~21:55	中继星

图5 (a) 比较了原始处理系统的时延测量结果与理论真值的差异 (图中蓝色线条) 以及本文方法最



(a) 时延残差对比



(b) 观测弧段的天线仰角

图5 比对分析

Fig. 5 Comparison analysis

终获取的时延结果与理论真值的差异(图中红色线条),其中利用环境参数实测数据的事后处理时延结果作为理论真值。

本文方法可以明显改进时延观测量精度,在低仰角弧段改进优势更为明显,如图5(b)中19:10~19:40弧段内喀什深空站的仰角在 15° 以下(佳木斯站整个跟踪弧段的仰角约在 30°),改进程度约在1~3 ns;在高仰角情况,改进程度原理上受基线测站分布构型影响,即与测站天顶向电离层的差分VTEC有关。以事后实测介质修正结果作为参考基准,可以看出采用电离层周日变化相关性分析方法未能有效预报出电离层的高频波动(10~12 min量级,峰峰值 ± 0.5 ns),但是仍可以修正电离层时延的主要趋势量。需要说明的是,通过引入电离层时延修正,一方面直接修正航天器跟踪弧段期间的时延观测量;另一方面通过对标校射电源的修正,从而提升由标校射电源获取的系统时延参考值的精度。

4 结 论

本文针对深空测控干涉测量系统实时测量问题,依托深空站配置的环境参数测量设备,基于电离层周日变化相关性,设计实现了一种区域电离层时延短期预测及修正方法。该方法简洁明晰,且充分利用了测站配置资源,该方法性能受基线测站构型、天线指向角、测站天顶向电离层特性、以及跟踪弧段等因素影响,在“嫦娥4号”中继星工程任务中得到了初步验证应用,针对本文试验示例情况,可改进测量精度1~3 ns。需要指出的是,电离层特性与太阳活动、地磁等关系密切,需要进一步开展深入研究和大量验证,以提升工程应用的可靠性和稳定性。

参 考 文 献

- [1] 中国新闻网. 嫦娥四号中继星“鹊桥”顺利进入使命轨道运行:中国 [EB/OL]. [2018-06-14]. http://news.ifeng.com/a/20180614/58718025_0.shtml.
- [2] 唐歌实,韩松涛,陈略,等. 深空网干涉测量技术在嫦娥3号任务中应用分析[J]. 深空探测学报,2014,1(2):146-149.
TANG G S, HAN S T, CHEN L, et al. Analysis on interferometric tracking technology by China deep space network in the Chang'e-3 mission[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2014, 1(2): 146-149.
- [3] 路伟涛. 中国深空探测干涉测量系统性能分析[C]//2018VLBI科学技术与应用研讨会. 上海: 2018VLBI科学技术与应用研讨会, 2018.
- LU W T. Analysis on China deep space interferometric tracking system [C]//Workshop of 2018 VLBI Science Technology and Application. Shanghai: Workshop of 2018 VLBI Science Technology and Application, 2018.
- [4] 唐歌实,韩松涛,曹建峰,等. 深空网测控模式DeltaDOR测量建模与精度分析[J]. 力学学报,2015,47(1):24-30.
TANG G S, HAN S T, CAO J F, et al. Model and analysis of Δ DOR tracking by China DSN with TT&C mode [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2015, 47(1): 24-30.
- [5] HAN S T, TANG G S, CHEN L, et al. Analysis on first delta-DOR tracking by China DSN in CE'3 project[C]//IEEE Signal Processing Conference. HangZhou: IEEE, 2014.
- [6] 杨力. 大气对GPS测量影响的理论与研究[D]. 郑州: 中国人民解放军信息工程大学, 2001.
YANG L. Theoretical study on troposphere effect on GPS [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2001.
- [7] 魏子卿,葛茂荣. GPS相对定位的数学模型[M]. 北京: 测绘出版社, 1998.
- [8] 王雪艳,郭承军. 区域电离层TEC建模及其在磁暴上的应用[J]. 全球定位系统,2017,42(3): 7-10.
WANG X Y, GUO C J. Modeling of regional ionospheric TEC and its application in magnetic storm [J]. GNSS World of China, 2017, 42(3): 7-10.
- [9] 王楠,付海洋,李索,等. 基于频带分割法反演电离层TEC参数[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017, 15(2): 198-205.
WANG N, FU H Y, LI S, et al. Retrieving ionospheric TEC based on the split-spectrum method [J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017, 15(2): 198-205.
- [10] 康娟. 全球卫星导航系统电离层建模方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
KANG J. Research on ionosphere modeling method for GNSS [D]. Changsha: Hunan University, 2015.
- [11] 霍星亮,袁运斌,欧吉坤. 基于GPS资料研究中国区域电离层TEC的周日变化、半年度及冬季异常现象[J]. 自然科学进展, 2005, 15(5): 626-630.
HUO X L, YUAN Y B, OU J K. Research on China regional ionosphere TEC period based on GPS [J]. Progress in Natural Science, 2005, 15(5): 626-630.
- [12] 王建平. 中国及周边地区电离层TEC短期预报方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008.
WANG J P. Research on short period prediction of TEC for China regional area [D]. Xian: Xidian University, 2008.

作者简介:

韩松涛(1982-),男,博士后,主要研究方向:深空探测轨道测定技术、干涉合成孔径雷达技术。

通信地址:北京市海淀区北清路26号(100094)

电话:(010)66365901

E-mail:justdoit_doing@126.com

(下转第300页)

An Autonomous Celestial Navigation Method for Deep Space Probe Based on Coplanar Constraint Aided Measurement

MA Xin¹, NING Xiaolin¹, LIU Jin², LIU Gang¹

(1. Research Institute of Frontier Science, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. School of Instrumentation Science and Optoelectronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

3. School of Information Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: Measurement error is the main factor that affects the accuracy of the autonomous navigation system for deep space exploration. In this paper, aiming at restraining the measurement error of autonomous navigation system, an autonomous celestial navigation method of deep space probe based on coplanar constrained auxiliary measurement is proposed. Based on the model of the system nonlinear inequality geometric plane constraints, Sequential Quadratic Programming (SQP) is used to deal with the nonlinear inequality constraints of deep space probe autonomous celestial navigation system, which directly aids in reducing the measurement error of the deep space probe autonomous navigation system. CKF-SQP, nonlinear constrained filtering method with measurement optimization, estimates the states of deep space probe autonomous navigation system to further reduce the system random error. Simulation results show that the proposed method can effectively suppress the measurement error and achieve high-precision autonomous navigation of deep space probes. The method can provide a feasible high-precision autonomous navigation method for deep space probe.

Key words: deep space exploration; autonomous navigation; celestial navigation; nonlinear constraints; SQP

High lights:

- The model of nonlinear inequality geometric plane constraints of the autonomous celestial navigation system is established.
- Compared with other nonlinear programming method, Sequential Quadratic Programming (SQP) is used to deal with the nonlinear inequality constraints of deep space probe autonomous celestial navigation system, and directly reduce the measurement error.
- SQP-CKF is proposed to estimate the states of deep space probe autonomous navigation system to further reduce the system random error.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 朱恬]

(上接第235页)

A Method of Ionosphere Delay Calibration in Real-Time Deep Space Interferometric Tracking

HAN Songtao^{1,2}, XIE Jianfeng¹, WANG Mei¹, LI Li¹

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Aerospace Flight Dynamics, Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094, China;

2. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: A method of ionosphere delay calibration is proposed for real time interferometric tracking with sparse calibration mode, in order to realize high accuracy tracking in Chang'E-4 relay satellite mission. The theory of ionosphere delay is analyzed, then, diurnal character of TEC (Total Electron Content) is testified with instrumental data observed in deep space stations. Based on the above discussion, software in deep space interferometric tracking center is updated. Experimental result testifies the effectiveness of the method, where delay observable accuracy is improved by 1~3 ns, especially in low elevation angle case. The method in this paper benefits the application in real-time tracking with deep space stations.

Key words: interferometric tracking; deep space network; ionosphere; TEC; Chang'E-4 relay satellite

High lights:

- Diurnal character of TEC is testified by auto correlation analysis with instrumental data observed in deep space stations.
- Model of ionosphere VTEC is constructed based on historical observations, then regional VTEC is predicted with the model.
- Accuracy of delay observable is improved by 1~3 ns for the experimental tracking arc, while the effectiveness is more obvious in low elevation angle case.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 朱恬]