

## 深空干涉测量对流层经典模型改进

柴恬怡<sup>1,2</sup>, 路伟涛<sup>2</sup>, 马 宏<sup>1</sup>, 焦义文<sup>1</sup>, 张爱迪<sup>1</sup>, 张 宇<sup>1</sup>

(1 航天工程大学电子与光学系 北京 101416;

2 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)

**摘要:** 对流层延迟修正误差是深空干涉测量的重要误差源之一。通过修正对流层经典天顶延迟模型和 Niell 映射函数 NMF (Niell Mapping Function) 构建了一种高精度区域对流层延迟模型。首先, 结合我国深空网喀什深空站对流层延迟实测数据, 对 Saastamoinen 模型的适用性进行分析, 通过线性最小二乘拟合修正天顶干延迟参数, 模型精度相对改善 29.6%; 然后, 针对 NMF 低仰角情况下映射偏差较大的问题, 构建偏差函数模型, 显著改善了低仰角下的映射性能, 经实测数据验证: 仰角在 0°~30° 时, 对流层延迟模型偏差相对改善约 30%。改进后的对流层区域模型估计精度高, 可为我国深空干涉测量对流层延迟修正提供参考。

**关键词:** 对流层误差修正; 天顶模型; 映射模型

中图分类号: P228 文献标志码: A 文章编号: 2095-1000(2023)01-0037-06

DOI: 10.12347/j.ycyk.20220217004

引用格式: 柴恬怡, 路伟涛, 马宏, 等. 深空干涉测量对流层经典模型改进[J]. 遥测遥控, 2023, 44(1): 37-42.

## Improvement of classical tropospheric model for deep space interferometry

CHAI Tianyi<sup>1,2</sup>, LU Weitao<sup>2</sup>, MA Hong<sup>1</sup>, JIAO Yiwen<sup>1</sup>, ZHANG Aidi<sup>1</sup>, ZHANG Yu<sup>1</sup>

(1. Department of Electronic and Optical Engineering, Space Engineering University, Beijing 101416, China;

2. Key Laboratory of Science and Technology on Aerospace Flight Dynamics, Beijing Aerospace Flight Control Center, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Tropospheric delay correction error is one of the important error sources of deep space interferometry. In this paper, a high-precision regional tropospheric delay model is constructed by modifying the classical tropospheric zenith delay model and Niell Mapping Function (NMF). Firstly, the applicability of Saastamoinen model was analyzed based on the tropospheric delay data measured at Kashi Deep Space Station of China's Deep Space Network. The zenith stem delay parameters were modified by linear least square fitting, and the model accuracy was improved by 29.6%. Then, aiming at the problem of large mapping deviation of NMF at low elevation angle, a deviation function model was constructed, which significantly improved the mapping performance at low elevation angle. The measured data verified that the tropospheric delay model deviation was relatively improved by about 30% when elevation angle was 0°~30°. The tropospheric regional model proposed in this paper has high estimation accuracy and can provide reference for tropospheric delay correction in deep space interferometry in China.

**Keywords:** Tropospheric error correction; Zenith model; Mapping model

**Citation:** CHAI Tianyi, LU Weitao, MA Hong, et al. Improvement of classical tropospheric model for deep space interferometry [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(1): 37-42.

## 引 言

甚长基线干涉测量是近年航天射电领域的热点研究技术之一, 它具有测量精度高、作用距离

远等优点, 在深空探测中应用前景广泛<sup>[1]</sup>。干涉测量误差可分为系统误差和无线信道误差: 系统误差主要包括系统噪声误差、时钟同步误差、设备相位抖动误差和站址误差; 无线信道误差主要包

基金项目: 航天工程大学科技委基础加强计划 (2019-JCJQ-JJ-134)

通信作者: 马宏 (mahong\_0108@163.com)

收稿日期: 2022-02-17 修回日期: 2022-03-29

括对流层和电离层误差、太阳等离子体误差<sup>[2]</sup>。其中, 对流层误差是影响干涉测量精度的重要因素之一。

对流层是非色散介质, 范围从地面至地面以上约 60 km 处。对流层延迟是指电磁波信号经过大气层时受到非色散介质的影响, 从而发生信号在方向和速度上改变所产生的延迟<sup>[3]</sup>。对流层延迟分为干燥气体引起的干延迟和水汽引起的湿延迟, 其中干延迟约占总延迟的 90%, 湿延迟约占总延迟的 10%<sup>[4]</sup>。

当前, 修正对流层延迟主要有外部修正法、参数估计法和模型改正法。外部修正法成本昂贵, 在空间和时间上的分辨率较低, 参数估计法处理步骤繁琐, 因此, 模型改正法成为对流层延迟误差修正研究的主要部分<sup>[5]</sup>。

模型改正法通过对流层天顶延迟 (Zenith Tropospheric Delay, ZTD) 与映射函数 (Mapping Functions, MF) 进行对流层延迟模型构建。对流层天顶延迟模型主要包括: Hopfield 模型、Saastamoinen 模型、UNB3 模型和 GPT2w 模型<sup>[6]</sup>。Hopfield 模型将大气温度下降率假设为常数, 计算干延迟的精度为 2 cm, 计算湿延迟的精度为 5 cm<sup>[7]</sup>。Saastamoinen 模型利用大气折射廓线及干、湿对流层和干平流层各层的边界值所建立映射函数是将天顶对流层延迟模型投影到任意仰角方向上, 因此, 选择一个高精度的映射函数对于提高对流层延迟精度至关重要。常用的映射函数主要包括 Neil 映射函数、维也纳映射函数 (Vienna Mapping Functions 1, VMF1) 和全球映射函数 (Global Mapping Function, GMF)<sup>[8]</sup>。Neill 利用了北美地区探空气象站的资料建立了一个全球映射函数模型, 模型输入年积日和测站坐标, 考虑南北半球和季节的非对称性。Neill 模型被广泛于深空干涉测量领域<sup>[7]</sup>。文献[8]利用不同纬度 USB 设备的实测数据分析了 NMF 模型和 GMF 模型, 实验结果表明: NMF 映射函数精度较高。文献[9]表明: 映射函数精度主要受大气模型的偏离和映射函数连分式系数展开形式选取的影响。文献[10]确定干映射参数  $a$  为响应 NMF 模型精度的主要影响参数, 对参数  $a$  进行最小二乘处理可提高模型精度。

上述对流层延迟天顶模型和映射函数估计精度较高, 但主要采用国外测站数据构建, 在我国测站区域的适用性还需进一步分析<sup>[11]</sup>。NMF 模型

在仰角大于 30° 时, 修正偏差均小于 15 cm, 仰角小于 30° 时, 修正偏差较大<sup>[8]</sup>。基于此, 本文结合我国深空网喀什深空站实测对流层延迟数据、大气参数数据 (大气温度、湿度、压强) 对 Saastamoinen 模型和 Neill 映射函数进行分析, 构建对流层延迟改进模型, 并进行实验验证。

## 1 对流层经典模型性能分析

对流层延迟 ( $d_{\text{DELAY}}$ ) 是将电波传播斜路径上的折射误差看成对流层天顶延迟 ( $d_{\text{ZTD}}$ ) 与映射函数 ( $f_{\text{MF}}$ ) 的乘积<sup>[7]</sup>:

$$d_{\text{DELAY}} = d_{\text{ZTD}} \times f_{\text{MF}} \quad (1)$$

$d_{\text{ZTD}}$  是仰角等于 90° 时的对流层延迟, 然后通过  $f_{\text{MF}}$  可以得到其他观测仰角条件下的对流层延迟。如果对流层天顶延迟模型存在误差, 则该误差将通过  $f_{\text{MF}}$  传递到所有仰角的模型值, 即天顶延迟模型是全仰角影响因素。Saastamoinen 模型如式 (2) 所示:

$$\begin{cases} d_{\text{DELAY}_D} = 0.002\,277 \times \frac{P}{f(\varphi, h)} \\ d_{\text{DELAY}_W} = 0.002\,277 \times \frac{e}{f(\varphi, h)} \left( \frac{1\,255}{T} + 0.05 \right) \\ f(\varphi, h) = 1 - 0.002\,66 \cos(2\varphi) - 0.000\,28h \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $d_{\text{DELAY}_D}$  为对流层延迟干延迟,  $d_{\text{DELAY}_W}$  为对流层延迟湿延迟,  $\varphi$  表示测站纬度 (单位: rad),  $P$ 、 $T$  和  $e$  表示地表处的气压 (单位: m), 温度 (单位: K) 和水汽压 (单位: Mbar),  $h$  为测站高程 (单位: m)。由于 Saastamoinen 模型采用分层积分来描述中性大气, 且湿延迟模型中温度梯度计算精确<sup>[8]</sup>, 因此被广泛应用在深空干涉测量对流层误差修正中。

NMF 模型包括干映射函数和湿映射函数, 干映射函数如式 (3) 所示<sup>[10]</sup>:

$$m_d(E) = \frac{1 + \frac{a_d}{1 + \frac{b_d}{1 + c_d}}}{\sin E + \frac{a_d}{\sin E + \frac{b_d}{\sin E + c_d}}} + \left( \frac{1}{\sin E} - \frac{1 + \frac{a_{ht}}{1 + \frac{b_{ht}}{1 + c_{ht}}}}{\sin E + \frac{a_{ht}}{\sin E + \frac{b_{ht}}{\sin E + c_{ht}}}} \right) \times h \quad (3)$$

湿映射函数如式 (4) 所示:

$$m_w(E) = \frac{1 + \frac{a_w}{1 + \frac{b_w}{1 + c_w}}}{\sin E + \frac{a_w}{\sin E + \frac{b_w}{\sin E + c_w}}} \quad (4)$$

其中,  $E$  为高度角 (单位: rad),  $h$  为测站高程 (单位: km),  $a_{ht} = 2.53 \times 10^{-5}$ ,  $b_{ht} = 5.49 \times 10^{-3}$ ,  $c_{ht} = 1.14 \times 10^{-3}$ 。  $a_d$ 、 $b_d$  和  $c_d$  均为干分量系数。

通过喀什深空站 2018 年 12 月 30 日对流层延迟模型值与实测值进行差值运算, 得到实验结果如下 (图 1 为对流层延迟模型值与实测值差值图)。

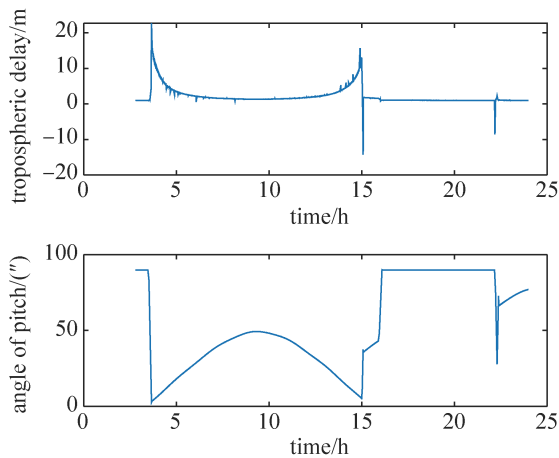


图 1 对流层延迟模型值与实测值差值(2018年12月30日)

Fig. 1 Difference between tropospheric delay model value and measured value (30 December 2018)

由图 1 可以看出: 不同仰角下对流层延迟偏差不一致, 表明 Niell 模型存在偏差。Niell 模型未利用我国地区的观测数据而建立, 因此, Niell 模型在我国深空站低仰角区域的映射性能还需进一步改善。

## 2 区域天顶模型参数修正

Saastamoinen 模型是一种典型的高精度天顶模型, 应用广泛<sup>[12]</sup>。但是对流层天顶模型精度影响所有仰角下的对流层延迟修正效果, 因此有必要分析 Saastamoinen 模型在我国深空站区域的适用性。

通过对喀什深空站 2018 年 12 月 5 日—2019 年 1 月 15 日中 33 天的天顶实测数据进行分析, 将实测气象数据代入 Saastamoinen 模型中解算出模型值, 与实测延迟值对比仿真, 得到实验结果如下

(图 2 为 ZTD 模型和实测对比仿真图)。

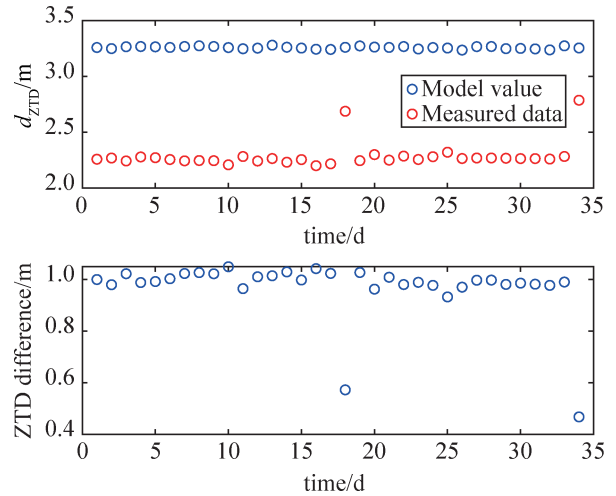


图 2 对流层天顶模型值与实测值对比

Fig. 2 Comparison between tropospheric zenith model values and measured values

由图 2 可以看出, 对流层天顶延迟模型值明显大于实测值。模型值相对稳定, 实测值个别点波动明显。模型值平均结果为 3.258 1 m, 实测值平均结果为 2.288 m, 模型值与实测值偏差均值为 0.970 1 m, 存在明显偏差。通过分析 Saastamoinen 模型规律, 确定干映射参数  $a$  为响应的主要影响参数<sup>[13]</sup>。Saastamoinen 模型干延迟公式如下。

$$ZTD_d = a \times \frac{P_0}{f(\phi, h_0)} \quad (6)$$

以实测所得天顶延迟值为观测值, 建立误差方程。

$$y = ax \quad (7)$$

其中,  $y$  为实测天顶干延迟值。通过对喀什深空站 2018 年 12 月 5 日—2019 年 1 月 5 日中 26 天的天顶数据进行仿真实验, 线性最小二乘拟合出  $a$  为 0.001 6。为了说明改进模型的有效性, 利用喀什深空站 2019 年 1 月 6 日—2019 年 1 月 15 日中 7 天数据进行验证, 结果如表 1 所示。

由表 1 可知: 喀什深空站 2019 年 1 月中 7 天修正前模型偏差约为 0.986 5 m, 修正后模型偏差约为 0.026 m, 修正精度提高一个量级, 修正效果明显。通过对喀什深空站 2019 年 1 月 8 日数据进行仿真, 实验结果如图 3 所示。

修正前模型值平均结果为 3.247 m, 实测值平均结果为 2.270 3 m。系数  $a$  修正后, 模型值平均结果为 2.287 9 m。模型差值图如图 3 所示。

表 1 喀什深空站 2019 年 1 月中 7 天对流层天顶延迟值

Table 1 7days tropospheric zenith delay of Kashi Deep Space Station in January 2019

日期	实测天顶延迟值(m)	模型偏差(m) (修正前)	模型偏差(m) (修正后)
2019年1月6日	2.269 8	0.989 2	0.027 5
2019年1月7日	2.268 4	0.991 6	0.028 2
2019年1月8日	2.270 3	0.977 5	0.017 7
2019年1月9日	2.249 3	1.001 3	0.041 4
2019年1月10日	2.264 3	0.982 0	0.022 2
2019年1月11日	2.260 4	0.972 9	0.018 4
2019年1月13日	2.283 7	0.991 2	0.026 3

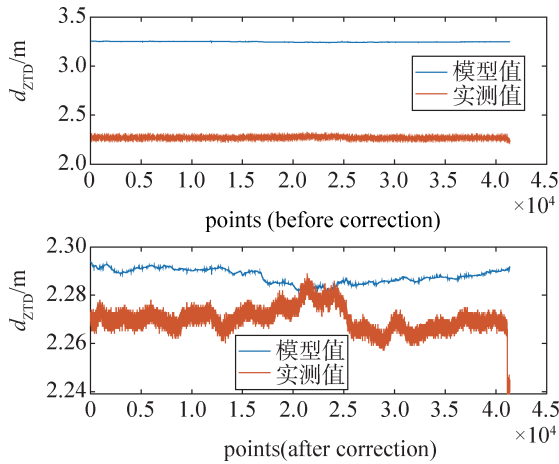


图 3 对流层天顶模型值与实测值对比(2019 年 1 月 8 日数据)

Fig. 3 Comparison of tropospheric zenith model values with measured values (data of January 8, 2019)

由图 4 可以看出, 修正前模型偏差平均结果为 0.977 5 m, 系数  $a$  修正后, 对流层天顶延迟偏差均值为 0.017 7 m, 提高了一个量级。

### 3 区域 Neill 模型参数修正

工程实践表明: 对流层延迟模型误差随仰角降低而显著增加<sup>[14]</sup>。因此, 映射函数在低仰角条件下的准确性还需进一步研究。通过分析 Neill 映射函数规律, 针对低仰角情况下模型值相较于实测值存在较大偏差, 构建误差模型, 如式 (8) 所示。使用喀什测深空站 2018 年 12 月 5 日—2019 年 1 月 5 日中 26 天低仰角 ( $0^\circ \sim 30^\circ$ ) 对流层延迟实测数据进行仿真实验。

$$d_{\text{delay}} - d_{\text{delay\_fact}} = d_{\text{ZTD}} \times \Delta n_{\text{NMF}} \quad (8)$$

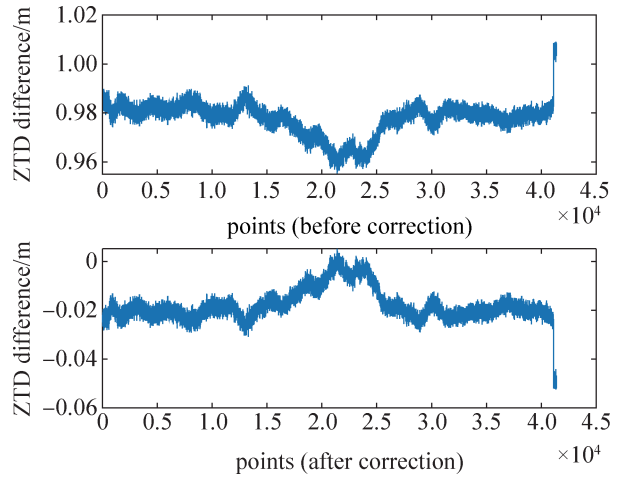


图 4 模型值和实测值差分值(2019 年 1 月 8 日 41 385 个数据)

Fig. 4 Difference between model value and measured value (data of January 8, 2019)

$$\Delta n_{\text{NMF}} = a \times \frac{1}{\sin \theta} \quad (9)$$

线性最小二乘拟合得到  $a$  的值为 0.287。再用喀什深空站 2019 年 1 月 6 日—2019 年 1 月 15 日中 7 天低仰角数据进行验证, 结果如表 2 所示。

表 2 喀什深空站 2019 年 1 月中 7 天  $15^\circ$  俯仰角下对流层延迟值

Table 2 Tropospheric delay at  $15^\circ$  elevation for 7 days at Kashi Deep Space Station in January 2019

日期	模型值(m) (修正前)	实测延迟值(m)	模型值(m) (修正后)	改善幅度
2019年1月6日	18.20	11.60	12.79	29.70%
2019年1月7日	18.21	11.78	12.79	29.80%
2019年1月8日	18.09	11.76	12.71	29.74%
2019年1月9日	18.12	11.30	12.73	29.75%
2019年1月10日	18.10	12.38	12.72	29.72%
2019年1月11日	18.02	11.54	12.66	29.74%
2019年1月13日	18.21	11.66	12.80	29.71%

由表 2 可知: 在仰角  $15^\circ$  时, 喀什深空站 2019 年 1 月中 7 天修正前模型值约为 18.14 m, 实测对流

层延迟约为 11.72 m，修正后模型值约为 12.74 m。使用喀什站 2018 年 12 月 10 日低仰角 ( $0^\circ\sim 30^\circ$ ) 数据进行进一步验证，修正前后对比图如图 5 所示。

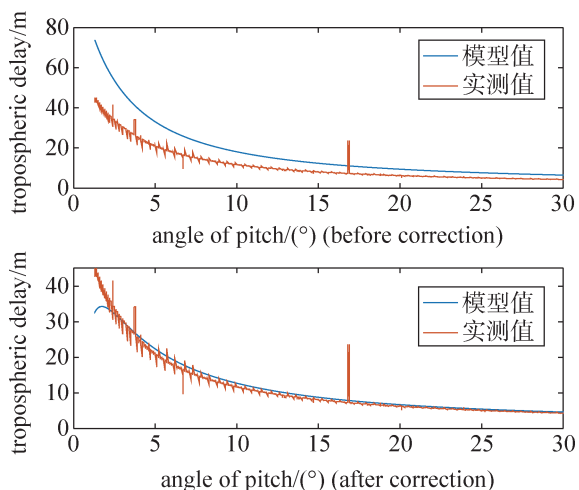


图 5 低仰角对流层延迟修正(2019年1月13日数据)

Fig. 5 Low elevation tropospheric delay correction (data of 13 January 2019)

由图 5 可以看出：在喀什深空站由 Niell 映射函数得到的对流层延迟值与实测偏差明显，模型对流层延迟均值为 17.992 1 m，实测延迟值均值为 11.522 6 m，且仰角越低，偏差越大。在修正后，两者偏差缩小，模型均值为 12.295 3 m。修正前后偏差如图 5 所示。

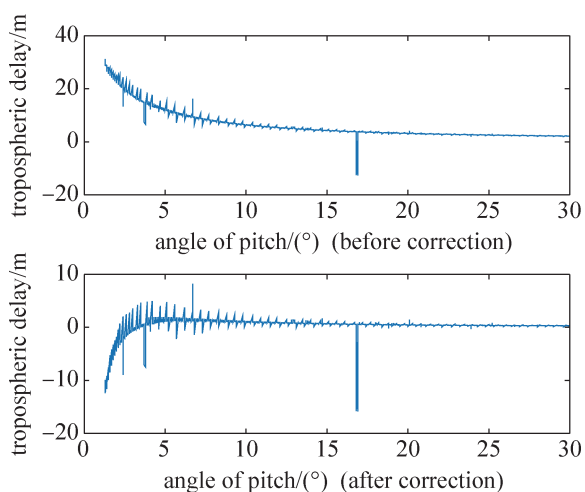


图 6 低仰角对流层延迟修正差值分布(2019年1月13日数据)

Fig. 6 Low elevation tropospheric delay corrected difference distribution (data of January 13, 2019)

由图 6 可以看出：修正前模型值与实测偏差明显，在仰角  $5^\circ$  时，与实测数据偏差为 12.67 m，修正幅度为 38.2%；在仰角  $10^\circ$  时，与实测数据偏差为 6.438 m，修正幅度为 35.4%；在仰角  $30^\circ$  时，与实测数据偏差为 2.164 m，修正幅度为 33.2%。修正后模型值与实测偏差较小，且偏差值稳定。在仰角  $5^\circ$  时，改进模型相对经验模型偏差为 10.74 m，与实测数据偏差为 1.92 m，修正改善幅度为 32.4%；在仰角  $10^\circ$  时，改进模型相对经验模型偏差为 5.414 m，与实测数据偏差为 1.272 m，修正改善幅度为 29.7%；在仰角  $30^\circ$  时，改进模型相对经验模型偏差为 1.879 m，与实测数据偏差仅为 0.284 1 m，修正改善幅度为 28.8%。

#### 4 结束语

本文首先对 Saastamoinen 模型进行适用性分析，利用喀什深空站 2018 年 12 月 5 日—2019 年 1 月 5 日中 26 天对流层延迟实测数据，通过线性最小二乘拟合天顶干延迟中的参数  $a$  为 0.001 6，利用喀什深空站 2019 年 1 月 6 日—2019 年 1 月 15 日中 7 天数据进行验证，修正前模型偏差约为 0.986 5 m，修正后模型偏差约为 0.026 m，对流层天顶模型精度提高了一个量级。

然后，通过分析 Niell 映射函数规律，针对低仰角情况下延迟值相较于实测值存在较大偏差，构建偏差函数，利用喀什深空站 2018 年 12 月 5 日—2019 年 1 月 5 日中 26 天低仰角 ( $0^\circ\sim 30^\circ$ ) 数据进行验证，在仰角  $15^\circ$  时，喀什深空站 2019 年 1 月 6 日—2019 年 1 月 15 日中 7 天修正前模型值约为 18.14 m，实测对流层延迟约为 11.72 m，修正后模型值约为 12.74 m，修正改善幅度为 30%。目前，适用于中国深空站对流层模型研究报道较少，因此，改进现有的经典模型来进一步提高对流层延迟修正精度，能够适应深空探测、射电天文和大地测量等多种任务的观测需求，对于我国深空探测干涉测量任务具有较好的工程应用价值，对我国深空站大气介质时延模型实时估计相关技术的研究将具有重要的理论研究意义和实用价值。

#### 参考文献

- [1] 李高, 许文波. 测控站对流层电波折射修正模型研究[J]. 无线电工程, 2015, (9): 61-64.  
LI Gao, XU Wenbo. The correction model study on radio

- wave refraction in troposphere[J]. Radio Engineering, 2015, (9): 61-64.
- [2] 路伟涛, 谢剑锋, 任天鹏, 等. 中国深空探测网干涉测量系统性能分析[J]. 遥测遥控, 2018, 39(6): 5-10, 43.  
LU Weitao, XIE Jianfeng, REN Tianpeng, et al. Performance analysis of China deep space net interferometry system[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2018, 39(6): 5-10, 43.
- [3] 良珂. 地基 GNSS 对流层天顶延迟改正模型与方法研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2014.
- [4] 杨祥, 喻国荣, 潘树国, 等. 一种综合的对流层延迟模型算法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013, (S2): 418-422.  
YANG Yang, YU Guorong, PAN Shuguo, et al. A comprehensive algorithm using fusion of tropospheric delay models[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2013, (S2): 418-422.
- [5] 杜晓燕, 乔江, 卫佩佩. 一种用于中国地区的对流层天顶延迟实时修正模型[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(1): 156-164.  
DU Xiaoyan, QIAO Jiang, WEI Peipei. Real-time correction model for zenith tropospheric delay applied to the Chinese region[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2019, 41(1): 156-164.
- [6] 高兴国, 刘焱雄, 冯义楷, 等. GNSS 对流层延迟映射函数影响分析比较研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2010, 35(12): 1401-1404.  
GAO Xingguo, LIU Yanxiong, FENG Yikai. Analysis of influence of mapping function on GNSS tropospheric delay[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2010, 35(12): 1401-1404.
- [7] 王丹, 淡鹏. 对流层经验映射函数模型精度分析[J]. 无线电工程, 2020, 50(8): 666-671.  
WANG Dan, DAN Pang. Precision analysis of tropospheric empirical mapping functions[J]. Radio Engineering, 2020, 50(8): 666-671.
- [8] 严豪健. 大气折射母函数方法、大气折射解析解和映射函数[J]. 中国科学院上海天文台年刊, 2004, (25): 22-32.  
YAN Haojian. THE generator function method analytic solution and mapping function in atmospheric refraction [J]. Annals of Shanghai Observatory Academia Sinica, 2004, (25): 22-32.
- [9] 路伟涛, 谢剑锋, 韩松涛, 等. 深空站区域对流层延迟模型构建及在嫦娥四号中的应用[J]. 中国科学: 技术科学, 2019, 49(11): 1286-1294.  
LU Weitao, XIE Jianfeng, HAN Songtao, et al. Construction of regional tropospheric delay model in deep space station and its application in Chang'E-4 mission[J]. Scientia Sinica Technologica, 2019, 49(11): 1286-1294.
- [10] LI W, YUAN Y, OU J, et al. New versions of the BDS/GNSS zenith tropospheric delay model IGGtrop[J]. Journal of Geodesy, 2015, 89(1): 73-80.
- [11] 马永超. 高精度对流层延迟建模与应用研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2020.
- [12] LI Wei, YUAN Yunbin, OU Jikun, et al. A new global zenith tropospheric delay model IGGtrop for GNSS applications[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(17): 2132-2139.
- [13] 马永超, 吕志平, 许国昌, 等. GTDM: 一种获取全球对流层延迟的新模型[J]. 测绘通报, 2021, (2): 72-76.  
MA Yongchao, LYU Zhiping, XU Guochang. GTDM: a new model for generating global tropospheric delay[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2021, (2): 72-76.
- [14] 姜君, 宋淑丽, 周伟莉. 对流层经验模型在中国 VLBI 站上的优化分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2020, 40(3): 231-235.  
JIANG Jun, SONG Shuli, ZHOU Weili. Optimization analysis of tropospheric delay empirical models on VLBI Sites in China[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2020, 40(3): 231-235.
- [作者简介]
- 柴恬怡 1997年生, 硕士研究生, 主要研究方向为深空干涉测量介质误差修正。
- 路伟涛 1985年生, 助理研究员, 主要研究方向为深空干涉测量。
- 马宏 1976年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为深空干涉测量。
- 焦义文 1985年生, 讲师, 硕士生导师, 主要研究方向为深空干涉测量。
- 张爱迪 1997年生, 硕士研究生, 主要研究方向为控制工程。
- 张宇 1996年生, 硕士研究生, 主要研究方向为雷达工程。

(本文编辑: 傅杰)