

中文核心期刊要目总览

- 中国科技核心期刊
- 中国科学引文数据库(CSCD)中国科技论文与引文数据库(CSTPCD)
- •中国科技论文与与文数据库(CSIPCD)
- •中国学术期刊又洞奴据库(CSAD) •中国学术期刊(网络版)(CNKI)

中国超星期刊域出版平台国家科技学术期刊开放平台

• 中文科技期刊数据库

• 万方数据知识服务平台

- •荷兰文摘与引文数据库(SCOPUS)
- •日本科学技术振兴机构数据库 (JST)

高轨道目标电离层折射修正方法研究

刘 琨,袁志刚,周 晨,赵家奇,朱庆林,董 翔,王海宁,盛冬生

Study on ionospheric refraction error correction method for high orbit target

LIU Kun, YUAN Zhigang, ZHOU Chen, ZHAO Jiaqi, ZHU Qinglin, DONG Xiang, WAND Haining, and SHENG Dongsheng

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12265/j.cjors.2020216

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

拉萨地区电离层长期变化特性研究

Long-term ionospheric characteristics over Lhasa 电波科学学报. 2018. 33(6): 701-707

基于抛物方程的短波电离层传播数值模拟研究

Numerical simulation of ionospheric propagation loss at HF based on parabolic equation 电波科学学报. 2019, 34(5): 545-551

一种基于分步线性最优估计的全球中低纬区域电离层ff,重构方法

A method of ionospheric foF2 reconstruction in low and middle latitudes of the world based on stepwise linear optimal estimation

电波科学学报. 2021, 36(1): 36-42

我国中低纬地区电离层f_E经验模型初步研究

Preliminary study on ionospheric f E empirical model in middle and low latitudes of China

电波科学学报. 2021, 36(1): 74-80

一种新的电离层区域重构方法

A new ionosphere region reconstruction algorithm 电波科学学报. 2020, 35(6): 949-955

基于地基GNSS和COSMIC掩星数据吸收的三维电离层电子密度重构方法

Three-dimensional ionospheric electron density reconstruction by data ingestion of ground-based GNSS and COSMIC occultation measurements

电波科学学报. 2019, 34(3): 322-329



关注微信公众号,获得更多资讯信息

刘琨, 袁志刚, 周晨, 等. 高轨道目标电离层折射修正方法研究[J]. 电波科学学报, 2021, 36(5): 692-696. DOI: 10.12265/j.cjors.2020216 LIU K, YUAN Z G, ZHOU C, et al. Study on ionospheric refraction error correction method for high orbit target[J]. Chinese journal of radio science, 2021, 36(5): 692-696. (in Chinese). DOI: 10.12265/j.cjors.2020216

高轨道目标电离层折射修正方法研究

刘琨^{1,2} 袁志刚² 周晨² 赵家奇² 朱庆林¹ 董翔^{1,2} 王海宁¹ 盛冬生¹ (1. 中国电波传播研究所,青岛 266107; 2. 武汉大学电子信息学院,武汉 430079)

摘 要 为了满足高轨道目标高精度测控的需要,提出了基于双频 GNSS 的空间投影法和自适应网格法两种电离层距离折射误差修正方法,并对比分析了两种方法在不同仰角、角径时电离层距离折射误差修正精度.分析结果显示:对于 2.0 GHz 电波信号而言,在较高仰角 (仰角 > 45°)处,空间投影法和自适应网格法修正精度较高,均优于 0.2 m;在低仰角和大角径时,空间投影法修正剩余快速增大,修正精度快速降低恶化,达到米量级,而自适应网格法修正精度则不受仰角和角径的影响.这表明:自适应网格法电离层距离修正精度高,适用性强,且便于工程应用,可为提高高轨道目标的测控精度提供有力支撑.

关键词 电离层; 高轨道目标; 折射误差修正; 空间投影法; 自适应网格法

中图分类号 P352.3 文献标志码 A 文章编号 1005-0388(2021)05-0692-05 **DOI** 10.12265/j.cjors.2020216

Study on ionospheric refraction error correction method for high orbit target

LIU Kun^{1,2} YUAN Zhigang² ZHOU Chen² ZHAO Jiaqi² ZHU Qinglin¹ DONG Xiang^{1,2} WAND Haining¹ SHENG Dongsheng¹

(1. China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao 266107, China; 2. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract In order to meet the need of high precision measurement and control for deep space and high orbit targets, two ionospheric refraction error correction methods based on dual frequency GNSS are proposed, which are space projection method and adaptive mesh method, and the accuracy of ionospheric range refraction error is compared and analyzed when the elevation angle and angle diameter are different. The analysis results indicate that when the correction residual of spatial projection method and adaptive grid method is smaller, and the correction accuracy is better than 0.2 m for 2.0 GHz radio-wave signal with the elevation $> 45^{\circ}$. With the decrease of elevation angle or the increase of angle diameter, the correction residual of space projection method increases rapidly, and the correction accuracy decreases to the order of m, while the correction residual of adaptive grid method has higher correction accuracy, and has stronger applicability for different elevation angles targets, which is more suitable for ionospheric refraction error in engineering.

Keywords ionosphere; high orbit target; refraction error correction; space projection method; adaptive mesh method

收稿日期: 2020-09-21

资助项目:国家自然科学基金(61971385,61901424)

联系人: 刘琨 E-mail: liukun8010@126.com

引 言

电离层作为近地空间重要组成部分,当电波信号从中穿过时,电子密度及其不均匀分布使得电波信号传播速度变慢、路径发生弯曲,从而导致雷达等测控设备探测目标的距离、俯仰角、速度产生一定的偏差,即为折射误差^[1].电离层是色散介质,对 3.0 GHz 以下频段电波信号影响最为显著,且频率越低影响越大^[2],电离层折射误差成为 S 及以下频段的导航、定位及测控等设备重要的误差源之一^[3-7],需要予以修正.需要说明的是,本文只研究和分析电离层距离折射误差修正方法,俯仰角和速度等折射误差的修正方法不作讨论.

为了消除电离层引起的卫星导航、雷达测控等 系统测量误差,国内外多位学者提出了克罗布歇 (Klobuchar)、NeQuick 和国际参考电离层 (internation reference ionosphere, IRI) 等电离层模型以及观测数 据同化电离层模型的方法等[8-15].陈学军等分析比较 了 Klobuchar 模型、IRI 模型和中国参考电离层模型 航天器在外弹道测量中的修正精度[16];美国夸家林 导弹试验基地利用 GPS 计算电离层距离折射误差, 用于 P 波段雷达折射误差修正^[17];李川川、刘琨给出 了 S 频段雷达的电离层修正方法^[18]. 上述研究基于 电离层经验模型计算电离层距离折射误差,且忽略 电离层水平不均匀性,可一定程度减小和修正电离 层引起的折射误差,但由于模型构建未用或较少用 到我国电离层观测数据,这使得在我国不同地区使 用时,模型精度均受到一定影响,难以满足工程中越 来越高测控精度的需要.

本文针对轨道高度大于2000km的高轨道目标 高精度折射误差修正的需要,开展高精度折射误差 修正新方法研究,给出了基于GNSS的空间投影法 和自适应网格法两种电离层距离折射误差修正方 法,并比较分析两种方法在不同仰角、角径时误差修 正精度及适用性.

1 电离层距离折射误差修正方法

电离层距离折射误差主要包含延迟效应和弯曲效应,当目标仰角大于 3°时,弯曲效应可忽略不计^[18], 电离层距离折射误差即为电离层延迟.对于轨道高 于 2 000 km 的目标而言,电波信号几乎穿过了全部 电离层,电离层延迟 ΔR 与电离层路径总电子含量 (total electron content, TEC)存在着对应关系^[19]:

$$\Delta R = \frac{40.3}{f^2} \text{TEC.} \tag{1}$$

由式(1)知,对于3°仰角以上的高轨道目标,高 精度电离层距离折射误差关键在于获取目标路径电 离层 TEC,其计算方法可参考相关文献[20],在此不 再复述.

1.1 空间投影法

空间投影法如图 1 所示, 在某一时刻t₀, 当目标 与附近卫星之间的距离满足一定条件时, 则认为目 标到 GNSS 接收机的穿刺点 (intersect pierce point, IPP) 位置的垂直总电子含量 (vertical TEC, VTEC)(记 作VTEC_{IPP0}) 与观测卫星到接收机 IPP 点处的 VTEC (记作VTEC_{IPP0}) 相等, 即

 $VTEC_{IPPo}(\theta_{o}, \phi_{o}, t_{0}) = VTEC_{IPPi}(\theta_{i}, \phi_{i}, t_{0}).$ (2)

式中: θ_o、θ_i表示目标及卫星的经度; φ_o、φ_i表示目标和 卫星的纬度.目标及卫星的天顶角分别为e_o、e_i, 由式 (2)可得出:

 $STEC_{IPPo}(\theta_{o}, \phi_{o}, t_{0}) \times S(e_{o}) = STEC_{IPPi}(\theta_{i}, \phi_{i}, t_{0}) \times S(e_{i}).$ (3)





在空间投影法中,选择距离目标最近的卫星,即选择距目标角径 $\psi = \sqrt{(\theta_i - \theta_o)^2 + (\phi_i - \phi_o)^2}$ 最小的卫星,先计算其路径电子含量STEC_{IPP},由式(3)计算对应路径电离层总电子含量STEC_{IPP},再由式(1)得到设备工作频率对应的电离层距离折射误差.

1.2 自适应网格法

在自适应网格法中,假设在一段时间 ($t_0 \sim t_i$)内 卫星到接收机 IPP 点VTEC_{IPF}大小不变,随时间向西 运动,运动位置用太阳时角S表示^[20],有

$$S_{\rm i} = \theta_{\rm o} + (t_{\rm i} - t_{\rm o})/15.$$
 (4)

式中,时间 t 单位为小时.

角径相应地改写为

$$\psi = \sqrt{(S_{\rm i} - \theta_{\rm o})^2 + (\phi_{\rm i} - \phi_{\rm o})^2}.$$
 (5)

事实上,空间投影法将空间距离作为选择可用 GNSS 卫星的依据,即在某一时刻,选取的卫星与目标之间的角径最小.此时,角径ψ为固定网格,仅与 IPP 点经纬度相关.在自适应网格法中,角径的划分 考虑了电离层的地方时效应,将时间和 IPP 点的经度 相互融合,以太阳时角替代经度,在一定时间范围内 选取与目标时空角径最小的卫星.此时,角径则不再 是固定的网格,而是融合时间信息的自适应网格.

2 不同方法修正精度分析与比较

利用国际 GNSS 服务组织 (International GNSS Service, IGS) 基准站 TIDB 站 (-35.4°, 148.9°)2016 年 年积日为25~27天的GPS数据,以卫星 PRN7为目 标星,分析和校验上述两种方法的电离层距离折射 误差修正效果,结果如图2所示.先计算目标星 PRN7 对应路径电子含量,再转化距离折射误差修正量 ΔR₀,并以此作为比较基准 (假定设备的工作频率 f₀为 2.0 GHz). 空间投影法和自适应网格法所得到的 电离层距离折射误差ΔRmax、ΔRata分别用蓝色线和红 色线表示, ΔR_u(黑色线) 是文献 [18] 方法计算结果. IRI 模型及其他常用方法修正精度均低于上述方法, 在此不再给出.可以看出:在高仰角处,距离折射误 差 ΔR_{map} 、 ΔR_{ada} 与真实值 ΔR_{o} 具有较好的一致性;而在 低仰角处, 文献 [18] 方法和空间投影法计算误差较 大. 这表明: 在高仰角时, 上述方法修正精度均较理 想;而低仰角,只有自适应网格法修正效果较为理 想,其他两种方法则修正精度有所降低.



图 2 自适应网格法和空间投影法修正效果一致性分析 Fig. 2 Analysis of the consistency between adaptive mesh method and space projection method

相应地,图 3 分别给出空间投影法、自适应网格 法和文献 [18] 方法计算的距离折射误差修正剩余 ∇R_{map} (蓝色线)、 ∇R_{ada} (红色线)和 ∇R_{Li} (黑色线),其中: $\nabla R_{map} = \Delta R_{map} - \Delta R_0$; $\nabla R_{Li} = \Delta R_{Li} - \Delta R_0$; $\nabla R_{ada} = \Delta R_{ada} - \Delta R_0$.可以看出:在仰角大于 45°的高仰角处,空间投影法和自适应网格法修正精度较高,修正剩余 ∇R_{Li} 、 ∇R_{ada} 、 ∇R_{map} 较小,一般小于 0.2 m;随着仰角的降低, 文献 [18] 方法和空间投影法修正剩余则快速增大, 修正精度快速降低恶化,而自适应网格法修正剩余 则几乎不受仰角变化的影响,且比其他两种方法的 修正剩余均小得多.





为了进一步分析空间投影法和自适应网格法电 离层误差修正效果,图4给出了两种方法修正剩余 ∇*R*_{map}、∇*R*_{ada}随目标仰角变化情况.可以看出:文献[18] 方法修正剩余随着仰角降低快速增大,在15°仰角 时,修正剩余甚至超过1.5 m,误差修正精度不够理 想;相比较而言,空间投影法修正剩余在低仰角有所 改进,但修正剩余也达到1.0 m,该方法在低仰角有所 改进,但修正剩余也达到1.0 m,该方法在低仰角处 修正精度有待进一步提高;自适应网格法修正剩余 一般小于0.2 m,且与目标仰角大小几乎无关,电离 层距离折射误差得到有效修正.上述结果表明,自适 应网格法修正精度较高,且不受目标仰角大小的影 响,较好地满足了低仰角时高轨道目标高精度折射 修正的需要,具有较高的工程应用价值.



图 4 自适应网格法和空间投影法修正剩余随仰角分布 Fig. 4 Correcting residual distribution with elevation angle of adaptive mesh method and space projection method

表1给出上述三种距离折射误差修正方法的统计分析.自适应网格法距离折射误差修正剩余的均值和均方根分别为0.03m和0.13m,较其他两种方法的修正剩余更小,修正精度更高.

表 1 不同距离折射误差修正方法统计分析 Tab. 1 Statistical analysis of refraction error correction methods at different distances

修正方法	均值/m	均方差/m
文献[18]方法	-0.20	0.48
空间投影法	-0.17	0.29
自适应网格法	0.03	0.13

将其余 GPS 卫星依次作为目标星,统计分析空 间投影法和自适应网格法电离层距离折射误差修正 精度,如图 5 所示.可以看出,对于所有 GPS 卫星而 言,自适应网格法误差修正剩余∇R_{ada}均明显小于空 间投影法的修正剩余∇R_{map},这进一步表明了自适应 网格法具有更高的修正精度,对所有卫星普适性更 强,且不受目标仰角大小的影响.即自适应网格法具 有更高的修正精度和适用性,建议在深空及高轨目 标测控等工程中可优先考虑选用自适应网格法进行 电离层距离折射误差修正.





3 结 论

本文针对高分、探月、火星探测等重大项目的高 精度电离层距离折射误差修正的需要,提出了适用 于轨道高于2000km目标的空间投影法和自适应网 格法,并比较分析了两种方法的修正精度及不同仰 角、角径时的适用性.结果表明:对于2.0GHz电波 信号而言,在大于45°的高仰角处,空间投影法和自 适应网格法距离折射误差修正精度较高,修正剩余 小于0.2m;在低仰角时,空间投影法修正精度快速 降低恶化,距离折射误差修正剩余大于0.5m,有时 甚至达到1m量级,而自适应网格法修正剩余不受 目标仰角大小影响,即自适应网格法较时空投影法 修正精度更高,适用性强,特别在低仰角处,自适应 网格法优势更为显著.

另外分析表明,当选用的卫星距离目标越近,角 径越小时,空投影法和自适应网格法距离折射修正 精度就越高.需要指出的是,本文仅用到 GPS 卫星数 据进行误差计算,为了确保每个时刻 GPS 数据可用 性,采用距离目标星最近、角径最小的卫星.事实上, 由于 GPS 数据有限,某些时刻所选用的卫星距离目 标星较远、角径较大,这一定程度上影响了电离层距 离折射误差修正精度.随着 GNSS 系统建设和完 善,特别是我国北斗系统全面建成,在视卫星超过 30颗,可用于折射误差修正的 GNSS 卫星数量将越 来越多,可用的 GNSS 卫星角径也将大为减小,这意 味着电离层距离折射修正精度可得到进一步的改进和 提高.

参考文献

- [1] SKOLNIK M I. 雷达手册[M]. 王军, 林强, 米慈中, 等译. 2版. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [2] 焦培楠,张忠治.雷达环境与电波传播特性[M].北京:电 子工业出版社,2007.
- [3] 刘利生,吴斌,吴正荣,等.外弹道测量精度分析与评定[M].北京:国防工业出版社,2010.
- [4] 黄智, 袁洪. 基于空间统计方法的电离层折射修正技术
 [J]. 空间科学学报, 2012, 22(2): 209-215.
 HUANG Z, YUAN H. Ionospheric refraction correction based on spatial statistic for china region[J]. Chinese journal of space science, 2012, 22(2): 209-215. (in Chinese)
- [5] 张仁芳, 权坤海, 梁丽屏. 火箭主动段外测系统电离层折 射修正[J]. 飞行器测控学报, 1982, 1(1): 50-62.
- [6] 曾科军. 单脉冲雷达测量的电离层折射修正的研究[J]. 飞行器测控学报, 2006, 25(6): 31-33.

ZENG K J. Researches on the refractive correction of the ionosphere in mono-pulse radar measurement[J]. Journal of spacecraft TT&C technology, 2006, 25(6): 31-33. (in Chinese)

- [7] 刘夫体,刘宗伟. 靶场测量数据电离层折射误差修正方法[J].导弹试验技术,2010(3):64-66.
- [8] 赵金生. 实时电离层格网数据精度评估[J]. 空间科学学报, 2020, 40(6): 1024-1029.

ZHAO J S. Assessment of ionospheric real-time data[J]. Chinese journal of space scinence, 2020, 40(6): 1024-1029. (in Chinese)

[9] 郭靖,方学立,郭文玲,等.一种新的电离层区域重构方法 [J].电波科学学报,2020,35(6):949-955. GUO J, FANG X L, GUO W L, et al. A new ionosphere region reconstruction algorithm[J]. Chinese journal of radio

science, 2020, 35(6); 949-955. (in Chinese)

- [10] 王健, 党亚民, 王虎. 全球电离层延迟建模及精度分析
 [J]. 测绘工程, 2019, 28(2): 17-21.
 WANG J, DANG Y M, WANG H. Modeling global iono-spheric delay and its accuracy analysis[J]. Engineering of surveying and mapping, 2019, 28(2): 17-21. (in Chinese)
- [11] 李涌涛, 马洪磊, 李建文, 等. iGMAS全球电离层TEC格网 产品精度分析[J]. 测绘科学, 2021, 46(2): 7-14.
 LIYT, MAHL, LIJW, et al. Accuracy analysis of iG-MAS global ionospheric TEC grid products[J]. Science of surveying and mapping, 2021, 46(2): 7-14. (in Chinese)
- [12] FORSYTHE V V, AZEEM I, CROWLEY G, et al. Ionospheric vertical correlation distances: estimation from isr data, analysis, and implications for ionospheric data assimilation[J]. Radio science, 2021, 56(2). DOI: 10.1029/2020 RS007177.
- [13] 欧明, 甄卫民, 徐继生, 等. 利用数据同化技术实现区域电 离层TEC重构[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(8):1075-1080.

OU M, ZHEN W M, XU J S, et al. Regional ionospheric TEC reconstruction by data assimilation technique[J]. Geomatices and Information Science of Wuhan University, 2017, 42(8): 1075-1080. (in Chinese)

- [14] 张静, 刘经南, 李丛. 国际参考电离层模型的研究与探讨
 [J]. 桂林理工大学学报, 2017, 37(1): 114-119.
 ZHANG J, LIU J N, LI C. Research and discussion on the International Reference Ionosphere model[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2017, 37(1): 114-119. (in Chinese)
- [15] 李博峰, 项冬. 4种全球卫星导航系统实时动态定位效果 评估[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(12): 1895-1900.

LI B F, XIANG D. Evaluation and comparison of four methods for global navigation satellite systems real-time kinematic position[J]. Journal of Tongji University(natural science), 2015, 43(12); 1895-1900. (in Chinese)

[16] 陈学军,赵军,王西京,等.几种电离层模型折射修正效果 检验[J].飞行器测控学报,2016,35(3):182-187. CHEN X J, ZHAO J, WANG X J, et al. Validating effects of ionospheric delay correction models[J]. Journal of spacecraft TT&C technology, 2016, 35(3): 182-187. (in Chinese)

- [17] HUNT S M, CLOSE S, COSTER A J, et al. Equatorial atmospheric and ionospheric modeling at Kwajalein missile range[J]. Lincoln Laboratory journal, 2000, 12(1): 45-64.
- [18] 李川川,刘琨,朱庆林,等. S波段雷达探测中的高精度电波折射修正方法[J]. 空军预警学院学报, 2019, 33(6): 405-408.
 LI C C, LIU K, ZHU Q L, et al. Method of high-precision refraction error correction in S-band radar detection[J]. Journal of Air Force Early Warning Academy, 2019, 33(6): 405-408. (in Chinese)
- [19] 刘琨, 吕江涛, 朱庆林, 等. 电波环境水平不均匀性对雷达 探测精度影响研究[J]. 空军预警学院学报, 2020, 6(5): 335-339.
 LIU K, LYU J T, ZHU Q L, et al. Study on effect of horizontal inhomogeneity of radiowave environment on radar detection accuracy[J]. Journal of Air Force Early Warning Academy, 2020, 6(5): 335-339. (in Chinese)
- [20] 王晓岚, 马冠一. 基于双频GPS观测的电离层TEC与硬件 延迟反演方法[J]. 空间科学学报, 2014, 34(2): 168-179.
 WANG X L, MA G Y. Derivation of TEC hardware delay based on dual-frequency[J]. Chinese journal of space scinence, 2014, 34(2): 168-179. (in Chinese)

作者简介

刘琨 (1979—), 男, 山东人, 中国电波传播研 究所高级工程师, 武汉大学博士研究生, 研究方向为 电波环境监测、电波折射修正等.

袁志刚 (1974—),男,湖北人,武汉大学教授, 博士生导师,研究方向为电离层、磁层探测及电离 层磁层耦合等.

周晨 (1983—), 男, 湖北人, 武汉大学教授, 博士生导师, 研究方向为电离层和磁层探测等.