

引用格式:刘立龙,田祥雨,黎峻宇,等. GPS广播电离层模型精化方法[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(5): 30-34
Liu Lilong, Tian Xiangyu, Li Junyu, et al. GPS broadcast ionosphere model refinement method[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(5): 30-34

GPS 广播电离层模型精化方法

刘立龙 田祥雨 黎峻宇 陈雨田

(桂林理工大学测绘地理信息学院,广西空间信息与测绘重点实验室,桂林 541004)

摘要 电离层延迟是影响定位的主要误差源之一,与电离层电子含量(TEC)密切相关。Klobuchar 模型是 GPS 单频用户在实时定位中消除电离层延迟的有效方法,其精度在太阳活动低年只有 50%~60%。针对 TEC 时间序列的随机噪声和 Klobuchar 模型参数设置的局限性采取两种不同的改进策略,以双频修正法计算值作参考,利用广西连续运行参考系统(CORS)监测站数据进行解算并分析不同优化策略的效果,研究表明,针对 TEC 时间序列的精化模型,Kalman 滤波处理策略效果最优,加权最小二乘法效果最差,该处理策略改进效果整体差于模型参数的估计修正策略;模型参数修正方法以 14 参数模型修正效果为最优,10 参数次之,8 参数最差,另外模型的计算效率也是其适用性的考量标准之一。

关键词 电子含量 Klobuchar 模型 随机噪声 参数修正

中图分类号 P228.4; **文献标志码** A

电离层总电子含量是描述电离层形态和结构的一个重要参量^[1-3],它与电波信号传播的时间延迟和相位延迟相关^[4,5]。对于全球卫星导航系统(GNSS)单频接收机用户,电离层延迟只能通过电离层模型或算法消除。一般来说可分为三类^[6,7]:广播电离层模型(BIM)、经验电离层模型、全球电离层图(GIM)。BIM 由于模型结构简单被广泛应用于单频 GNSS 用户的导航定位。GPS 广播模型 Klobuchar 的准确程度在太阳活动低年仅有 50%~60%^[8,9],为满足单频用户导航定位高精度的需要,不同的 Klobuchar 模型精化方案被提出^[10-13]。文献[10,12]通过修正电离层模型参数,使之更加符合电离层的区域变化特性,文献[11,13]改变模型的表达形式,试图修正夜间延迟和初始相位值固定引入的模型误差,两种方案都取得较好的改正效果。针对电离层电子含量(TEC)时间序列存在的随机噪声误差采取不同的策略进行最优拟合,针对模型自身参数设置的局限性利用实测数据求解模型的各项参数,统计分析不同改进策略的优化效果。

2018 年 8 月 15 日收到 国家自然科学基金(41664002, 41704027)、广西自然科学基金(2017GXNSFDA198016, 2015GXNSFAA139230, 2017GXNSFBA198139)、广西空间信息与测绘重点实验室基金(16-380-25-05, 15-140-07-03, 16-380-25-01, 16-380-25-27)、广西高校(教育厅中青年能力提升项目)科研项目(KY2016YB189, 2017KY0267)和广西“八桂学者”岗位专项资助
第一作者简介:刘立龙(1974—),男,汉族,湖南衡阳人,博士,教授。
E-mail: hn-liulilong@163.com。

1 模型基本原理

1.1 双频改正法

双频该正法是由于电离层对无线电波的色散效应,可以精确求定不同频率信号的时间延迟,进而反推不同频率信号的电离层延迟。其利用两个频率的载波和伪距同时进行测量可基本修正电离层延迟,精度达到 95%^[14],通过载波相位平滑伪距的方法,可以获得高精度 TEC 绝对值^[15]。计算原理如下:

$$\begin{cases} P_4 = P_1 - P_2 = I_1 - I_2 + DCB^S + DCB_R \\ L_4 = L_1 - L_2 = - (I_1 - I_2) - \lambda (b_1 - b_2) - \lambda (N_1 - N_2) \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: P_4 、 L_4 分别为伪距和载波的平滑值; P_1 、 P_2 为双频伪距观测值; L_1 、 L_2 为双频载波观测值; I_1 、 I_2 分别为不同频率观测值的电离层延迟误差; DCB 为频间差分偏差; λ 为波长; b 为卫星和接收机的载波硬件偏差; N 为整周模糊度。对接收机、卫星的硬件延迟偏差和电离层延迟同时作为参数进行估计^[2],得到载波平滑伪距的电离层电子含量。

1.2 Klobuchar 模型

Klobuchar 模型由 Bent 模型演变而来,采用三角余弦函数形式,根据电离层周日变化的振幅和周期设置参数,基本反映了电离层的时空变化特征。模型原理如下:

$$T_g = A_1 + A_2 \cos \frac{2\pi}{A_4}(t - A_3) \quad (2)$$

式(2)中: T_g 为电离延迟误差; A_1 为夜间时延迟; A_2

为余弦函数振幅; A_3 为余弦函数周期; A_4 为余弦函数振幅。

1.2.1 针对 TEC 时间序列的优化策略

根据 Klobuchar 模型的 TEC 时间序列带有随机噪声误差的问题,分别采用加权最小二乘多形式模型、Kalman 滤波算法、sys4 小波算法处理 TEC 时间序列,消除和减弱时间序列信号的噪声误差,得到高精度的 TEC 计算结果。具体的计算步骤如下:

- (1)采用 TEQC 软件对实测数据文件进行数据预处理,获取 Klobuchar 模型建模所需参数。
- (2)构建 klobuchar 模型,计算电离层 TEC,得到 TEC 时间序列。
- (3)分别利用加权最小二乘多形式模型、Kalman 滤波、sys4 小波三种方法处理 TEC 时间序列信号,获得 2 h 分辨率的 TEC 时序结果。

建模及精化流程如图 1 所示,其中:TEQC 是 GNSS 数据预处理和质量检查软件,广泛应用于 GNSS 数据编辑和数据质量检核,功能强大^[1]。

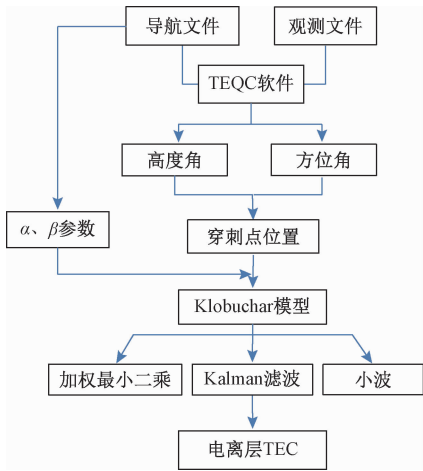


图 1 3 种 TEC 时间序列模型精化方案

Fig.1 Three TEC time series model refinement schemes

1.2.2 针对模型参数设置的优化策略

Klobuchar 模型是三角余弦函数模型,其参数设置考虑了电离层周日尺度上振幅和周期的变化,直观简洁地反映了电离层的周日变化特性。但是其夜间时延迟固定为 5 ns、初始相位固定位 14 h 的局限限制了模型的有效性。针对模型本身参数设置上的问题,分别对模型的广播 8 参数、夜间时延迟、初始相位等参数利用实测数据不断进行估计改正,分别构建 Klobuchar 8 参数模型、10 参数模型和 14 参数模型,获取实时改正的模型参数,提升模型的改正效果。其中 8 参数模型同北斗广播电离层模型原理相同,利用实测数据估计 Klobuchar 8 模型参数,进而求得电离层 TEC。10 参数模型是在 8 参数的基础

上,引入时间对于夜间时延迟的改正。即 $A_1' = A_1 + B(t - t_0)$, 其中 A_1' 为精化的夜间时延迟, B 为待估系数, t_0 为默认初始时间, t 为穿刺点地方时。14 参数模型是在 10 参数的基础上引入纬度对于初始相位的改正,即 $A_3 = \sum_{i=0}^3 \gamma_i \varphi_M^i$, 其中, A_3 为精化的初始相位, γ_i 为待估系数, φ_M^i 为穿刺点地磁纬度。

2 实验分析

2.1 数据获取和处理

获取广西 CORS 监测站桂林市境内 8 个测站的观测数据,通过 TEQC 对原始观测数据进行预处理,筛选卫星数据、通过质量检核获取卫星的高度角、方位角,构建 Klobuchar 模型,针对不同的优化策略对 Klobuchar 模型进行精化改进。以双频改正算法的计算结果为参考值,对比分析不同模型的优化效果。

2.2 模型优化策略分析

选取灌阳站 2015 年某一天的实测数据进行双频改正计算电离层 TEC, Klobuchar 模型 3 种不同的时序处理策略计算电离层 TEC 结果如图 2 所示。由图 2 可得,3 种 Klobuchar 优化方案计算效果都仅有 60% 左右,其中 kalman 滤波计算效果略优于小波和最小二乘算法的计算效果,但总的来看 3 种 TEC 时间序列处理策略的优化效果并不显著。

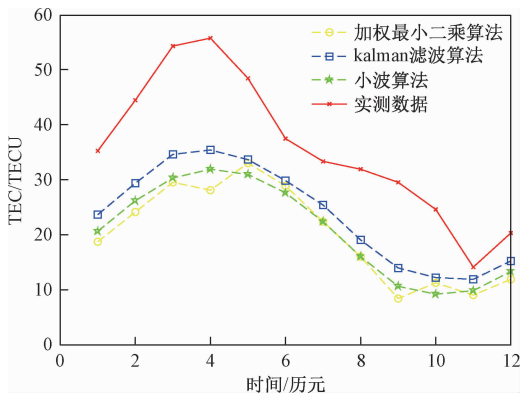


图 2 桂林市灌阳站 3 种 Klobuchar 优化模型解算结果

Fig.2 Calculation results of 3 Klobuchar optimization models for Guanyang station in Guilin

选取灌阳站 2015 年某一天的实测数据进行双频改正计算电离层 TEC,利用计算结果作为背景场分别对 Klobuchar 8 参数模型、10 参数模型、14 参数模型进行参数改正估计,求定参数后进而计算电离层 TEC。各个精化改进模型计算结果如图 3 所示。由图 3 可得精化的 3 种模型明显优于 Klobuchar 模型,其中 14 参数模型解算结果优于 10 参数模型,10 参数模型优于 8 参数模型。统计各个改正模型参数

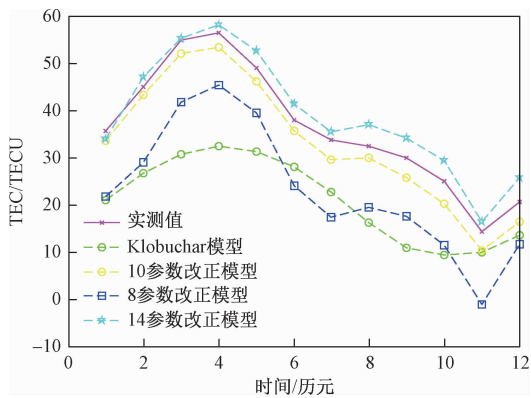


图3 桂林市灌阳站 Klobuchar 模型及其 3 种参数优化模型解算结果

Fig. 3 Calculation results of Klobuchar and its 3 parameters optimization models solution for Guanyang Station in Guilin

估计和 TEC 计算时间,14 参数模型耗时 63 s,10 参数模型 43 s,8 参数模型耗时 33 s。综上,14 参数模型耗时最多,8 参数模型耗时最少。

为了评估不同优化策略的解算效果,引入相对精度 P 和均方根误差 $RMSE$ 验证各个精化改进模型计算电离层 TEC 的精度:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n 1 - \frac{|I_K - I_{dual}|}{I_{dual}}}{n} \times 100\%$$

(3)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_K - I_{dual})^2}$$

(4)

采用 Klobuchar 模型和提出的 2 种优化策略分别解算广西 8 个 CORS 监测站 2015 年某一天的电离层电子含量,以双频修正算法的解算值为参考,统计 2 种优化策略不同种精化方法的相对精度和均方根误差,结果如表 1 所示。

由表 1 可以看出,Kalman 滤波 Klobuchar 模型 8 站平均修正精度为 67.15%,小波 Klobuchar 模型修正精度为 65%,加权最小二乘 Klobuchar 模型修正精度为 64.80%。由此得出,Klobuchar 模型的解算 TEC 时间序列随机噪声偏差较小,针对此问题的优化策略改进效果并不显著。而参数改正精化模型中 8 参数模型 8 站平均修正精度为 80.66%,10 参数模型为 82.58%,14 参数模型为 86.76%。由此可知基于 TEC 时间序列随机噪声偏差的模型修正效果整体差于基于模型参数的修正。这也说明 Klobuchar 模型参数设置上的不足明显限制了其解算效果,故针对此问题的优化改进策略效果显著。这为 GPS 广播模型 Klobuchar 的精化提供了理论依据。

3 结论

利用广西 CORS 监测站实测数据对 GPS 广播模型 Klobuchar 不同优化策略的精化模型进行改正效果分析,实验得出以下结论。

- (1)TEC 时间序列的处理策略,以 Kalman 滤波方法效果最优,小波方法效果略差,加权最小二乘方法效果最差。同时基于 TEC 时间序列随机噪声偏差的模型修正效果并不显著,这说明 Klobuchar 模型计算得到的 TEC 时间序列随机噪声偏差较小。
- (2)模型参数修正方法中 14 参数模型修正效果最好,10 参数模型效果次之,8 参数模型效果最差。且对比第一种优化策略,模型参数修正方法整体修正效果更显著。
- (3)统计了参数修正模型算法的计算时间,14 参数修正模型效果虽然最优,但其计算耗时最多。8 参数改进模型效果略差,但是其计算耗时最少。在

表 1 不同 Klobuchar 模型优化策略精度统计

Table 1 Precision statistics of optimization strategies for different Klobuchar models

模型	参数	灌阳站	资源站	阳朔站	荔浦站	黄沙站	永福站	兴安站	龙胜站	平乐站	平均
Klobuchar	$P/\%$	63.46	68.96	63.82	68.90	59.51	66.11	55.03	65.75	66.76	63.94
	$RMSE$	18.69	17.50	18.73	20.14	21.61	16.47	15.54	19.53	21.55	18.52
K-Klobuchar	$P/\%$	69.91	72.09	67.51	71.52	69.34	73.70	57.10	70.80	68.88	67.15
	$RMSE$	9.74	10.47	9.75	10.13	9.65	11.47	12.57	9.54	11.88	10.41
WKlobuchar	$P/\%$	66.53	67.45	60.78	69.80	64.88	67.12	57.12	66.35	68.45	65.00
	$RMSE$	13.45	14.32	12.33	12.14	16.69	13.38	12.68	14.68	16.77	13.70
LS-Klobuchar	$P/\%$	64.55	6.55	66.55	66.55	66.55	66.55	66.55	66.55	66.55	64.80
	$RMSE$	17.43	15.27	16.55	18.55	19.09	14.55	15.10	17.88	19.43	16.80
8 参数模型	$P/\%$	78.58	80.78	81.68	80.11	83.18	79.78	81.38	79.78	77.33	80.66
	$RMSE$	7.55	7.65	9.01	8.54	8.32	7.44	10.02	8.33	9.23	8.35
10 参数模型	$P/\%$	82.76	82.53	82.23	81.44	84.34	85.78	80.32	81.23	85.71	82.58
	$RMSE$	7.10	6.43	6.08	6.08	7.22	7.44	8.55	7.43	7.34	7.04
14 参数模型	$P/\%$	88.78	92.33	85.22	84.12	88.68	89.58	81.78	83.59	88.79	86.76
	$RMSE$	5.33	5.07	6.16	5.42	6.45	6.44	6.89	5.89	6.05	5.95

实际应用中精度和运算效率都会是模型适用性的影响因素,针对模型参数改正策略的适用性还需进一步研究。

致谢:感谢广西测绘院提供的 CORS 站数据。

参 考 文 献

- 1 章红平,平劲松,朱文耀,等. 电离层延迟改正模型综述[J]. 天文学进展,2006,24(1):16-26
Zhang Hongping, Ping Jinsong, Zhu Wen Yao, et al. Overview of ionospheric delay correction models[J]. Progress in Astronomy, 2006, 24(1): 16-26
- 2 姚宜斌,张 顺,孔 建. GNSS 空间环境学研究进展和展望[J]. 测绘学报,2017,46(10):1408-1420
Yao Yibin, Zhang Shun, Kong Jian. GNSS research progress and prospect of space environment[J]. Journal of Surveying and Mapping, 2017,46(10): 1408-1420
- 3 黄良珂,陈 军,李 琛,等. 利用 IGS 电离层格网产品分析电离层峰值变化特性[J]. 科学技术与工程,2018,18(18):212-217
Huang Liangke, Chen Jun, Li Chen, et al. Analyses on ionospheric delay peak value using IGS ionospheric grid product[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(18): 212-217
- 4 Chen J, Huang L, Liu L, et al. Applicability analysis of VTEC derived from the sophisticated Klobuchar model in China[J]. International Journal of Geo-Information, 2017, 6(3):1-15
- 5 Wang N, Yuan Y, Li Z, et al. Improvement of Klobuchar model for GNSS single-frequency ionospheric delay corrections[J]. Advances in Space Research, 2016, 57(7):1555-1569
- 6 张小红,李征航,蔡昌盛. 用双频 GPS 观测值建立小区域电离层延迟模型研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2001,26(2):140-143,159
Zhang Xiaohong, Li Zhenghang, Cai Changsheng. Establishment of a small-area ionospheric delay model using dual-frequency GPS observations[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2001,26(2): 140-143,159
- 7 袁运斌,欧吉坤. 基于 GPS 数据的电离层模型和电离层延迟改正新方法研究[J]. 中国科学院研究生院学报,2002(2):209-214
Yuan Yunbin, Ou Jikun. Ionospheric model based on GPS data and new method of ionospheric delay correction[J]. Journal of Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2002(2): 209-214
- 8 蔡成辉,刘立龙,黎峻宇,等. 基于改进的 Klobuchar 模型建立南宁市区域电离层延迟模型[J]. 大地测量与地球动力学,2015,35(5):797-800,806
Cai Chenghui, Liu Lilong, Li Junyu, et al. Based on the improved Klobuchar model, a regional ionospheric delay model for Nanning Urban area is established[J]. Geodesy and Geodynamics, 2015, 35(5): 797-800,806
- 9 刘 宸,李海峰,冯 绪. Klobuchar 电离层模型精化进展[J]. 测绘科学技术学报,2017,34(5):455-460
Liu Chen, Li Haifeng, Feng Xu, et al. Progress in the refinement of ionospheric models[J]. Journal of Surveying and Mapping Science and Technology, 2017, 34(5): 455-460
- 10 刘 宸,刘长建,冯 绪,等. 适用于不同尺度区域的 Klobuchar-like 电离层模型[J]. 测绘学报,2016,45(增刊2):54-63
Liu Chen, Liu Changjian, Feng Xu, et al. Klobuchar-like ionospheric model suitable for different scales[J]. Journal of Surveying and Mapping, 2016, 45(S2): 54-63
- 11 余 明,郭际明,过静琚. GPS 电离层延迟 Klobuchar 模型与双频数据解算值的比较与分析[J]. 测绘通报,2004(6):5-8
Yu Ming, Guo Jiming, Guo Jingjun. Comparison and analysis of Klobuchar model of GPS ionospheric delay and solution values of dual frequency data[J]. Surveying and Mapping Bulletin, 2004(6): 5-8
- 12 李维鹏,李建文,戴 伟. Klobuchar 电离层延迟改正模型精化方法的研究[J]. 测绘科学,2009,34(5):49-51
Li Weipeng, Li Jianwen, Dai Wei. Klobuchar ionospheric delay correction model refinement method[J]. Surveying and Mapping Science, 2009, 34(5): 49-51
- 13 赵 威,张成义. Klobuchar 模型的实用分析与改进[J]. 空间科学学报,2013,33(6):624-628
Zhao Wei, Zhang Chengyi. Practical analysis and improvement of Klobuchar model[J]. Journal of Space Science, 2013, 33(6): 624-628
- 14 聂文锋,胡伍生,潘树国,等. 利用 GPS 双频数据进行区域电离层 TEC 提取[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2014,39(9):1022-1027
Nie Wenfeng, Hu Wusheng, Pan Shuguo, et al. TEC extraction from regional ionosphere using dual-frequency GPS data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2014, 39(9): 1022-1027
- 15 Jin R, Jin S, Feng G. M_DCB: Matlab code for estimating GNSS satellite and receiver differential code biases[J]. GPS Solutions, 2012, 16(4):541-548

GPS Broadcast Ionosphere Model Refinement Method

LIU Li-long, TIAN Xiang-yu, LI Jun-yu, CHEN Yu-tian
(College of Geomatic Engineering and Geoinformatics, Guilin University of Technology ,
Guangxi Key Laboratory of Spatial Information and Geomatics, Guilin 541004, China)

[**Abstract**] Ionospheric delay is one of the main error sources affecting the location , which is closely related to the ionospheric electron content (TEC). Klobuchar model is an effective method for eliminating ionospheric delay in real-time positioning of GPS single-frequency users. Its precision is only 50% ~60% in low solar activity years. Aiming at the limitation of the random noise of TEC time series and the parameter setting of Klobuchar model, two different improvement strategies are adopted. The results of different optimization strategies are calculated and analyzed with the data of Guangxi CORS monitoring station. The results show that the Kalman filtering strategy for the refined model of TEC time series has the best effect, and the weighted least square method has the worst effect. TEC time series refined strategy is worse than the estimation correction strategy for the model parameters. The model parameters correction method takes the 14-parameter model as the best, the 10-parameter model is the second, and the 8-parameter model is the worst. In addition, the computational efficiency of the model is also one of the criteria for its applicability.

[**Key words**] electron content Klobuchar model random noise parameter correction