

基于改进的 Klobuchar 模型建立 南宁市区域电离层延迟模型

蔡成辉^{1,2,3} 刘立龙^{1,2,3} 黎峻宇^{1,2,3} 林国标^{1,2,3}

1 广西矿冶与环境科学实验中心,桂林市建干路 12 号,541004
2 桂林理工大学测绘地理信息学院,桂林市建干路 12 号,541004
3 广西空间信息与测绘重点实验室,桂林市建干路 12 号,541004

摘 要:以最小二乘曲面拟合模型为背景场,利用南宁市区域 CORS 网实测数据,对 Klobuchar 模型的初始相位、振幅和夜间时延值不断改正,建立南宁市区域电离层延迟模型。结果表明,改进的 Klobuchar 模型精度有显著提高。
关键词:电离层延迟;Klobuchar 模型;初始相位;振幅;夜间时延值
中图分类号:P228 **文献标识码:**A

电离层延迟是单频 GNSS 接收机应用中最主要的误差来源^[1]。对电离层延迟的准确模拟和预报难度较大,尤其是在低纬度地区^[2-3]。近年来,随着各城市区域 CORS 网的建立,许多学者利用已知参考站实测数据来建立区域性的电离层延迟模型^[4-5],取得了较高的精度。常用的区域电离层延迟改正模型有三角级数模型^[6]、多项式模型^[7]和 Klobuchar 模型^[8]等。三角级数模型适合于小范围的电离层建模,但不能很好地反映纬度方向的变化以及随经纬度的综合变化,监测电离层的精度较差,且不稳定;多项式模型仅需几个模型系数就可以很好地反映测区上空电离层的变化特性,但需要依赖 GNSS 实测数据^[5];Klobuchar 模型基于 8 个广播参数,计算简单,可以对电离层延迟进行实时解算,但其精度仅为 50~60%^[9]。文献[10]提出 14 参数的 Klobuchar 改正模型,对模型的初始相位引入纬度改正,模型的精度有所提高,但局限于中纬度地区。针对上述问题,本文利用处于低纬度地区的南宁市 CORS 网观测资料,对 Klobuchar 模型的初始相位、振幅以及夜间时延值进行改进,建立南宁市区域电离层模型。

1 Klobuchar 基本模型

Klobuchar 电离层延迟模型表达式为^[11]:

$$I_2(t) = \begin{cases} A_1 + A_2 \cos\left[\frac{2\pi(t-A_3)}{A_4}\right], & |t-A_3| < \frac{A_4}{4} \\ A_1, & t \text{ 为其他值} \end{cases} \quad (1)$$

式中, I_2 是垂直方向电离层延迟量,单位为 s; t 是接收机至卫星连线与电离层交点处的地方时,单位为 s; A_1 为夜间时延常数,取值 5 ns; A_2 为白天余弦函数的振幅,由广播星历参数 α_n 求得:

$$A_2 = \begin{cases} \sum_{n=0}^3 \alpha_n \varphi_M^n, & A_2 \geq 0 \\ 0, & A_2 < 0 \end{cases} \quad (2)$$

初始相位 A_3 对应余弦曲线极点的地方时,一般取当地时间 14:00(即 50 400 s); A_4 为余弦曲线的周期,由广播星历参数 β_n 求得:

$$A_4 = \begin{cases} \sum_{n=0}^3 \beta_n \varphi_M^n, & A_4 \geq 72\,000 \\ 72\,000, & A_4 < 72\,000 \end{cases} \quad (3)$$

式(2)、式(3)中的 φ_M 是电离层穿刺点的地磁纬度,单位为 Semicircle。

2 模型的时间特性

2.1 初始相位和振幅随时间变化特性

Klobuchar 模型固定了初始相位,即任意穿

刺点处,VTEC 在当地时间 14:00 出现峰值。选取均匀分布在中国的 4 个 IGS 站进行实验(图 1),结果表明,不同穿刺点处 VTEC 达到最大值的时间不同,而峰值不同主要与大气电离层辐射电波的辐射通量和电子含量的产生与消失平衡有关。可见,初始相位的固定会使模型产生较大误差,为此,以最小二乘曲面拟合模型为背景场,利用实测数据的准确性对初始相位不断进行改正,表示为 $t'=t+\Delta t$ 。根据导航电文中给出的 α 系数计算的白天余弦函数振幅 A_2 也不够精确(图 2)。将振幅改正为 $A_2(1+k_1)$,基于曲面拟合模型,对参数 k_1 进行非线性迭代求解。

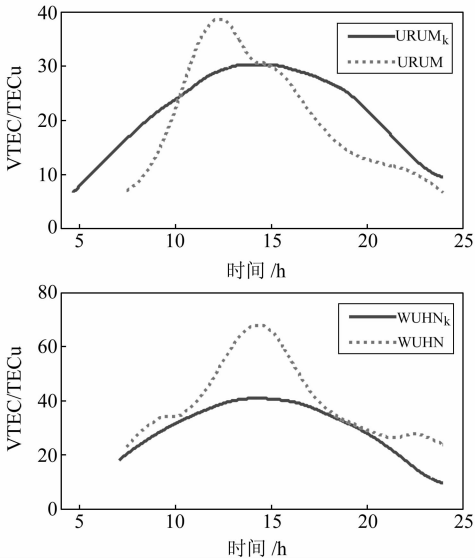


图 2 基于 Klobuchar 模型和曲面拟合模型白天振幅的比较(URUM_k表示 Klobuchar 模型值)
Fig. 2 Comparison the amplitude of the day based on various models

2.2 夜间时延值随时间变化特性

Klobuchar 模型在进行电离层延迟改正时,将夜间时延值固定为常数,即 $A_1=5\text{ ns}$,相当于 9.2 TECu 。相关资料表明,夜间 VTEC 与太阳活动有关,一个太阳活动周期内,IGS 综合的各大 GPS 服务机构所发布的全球夜间 VTEC 平均值在 $3\sim 20\text{ TECu}$ 之间。可见,固定 A_1 为模型引入了 $20\%\sim 30\%$ 的误差^[10]。如图 3 所示,URUM、BJFS、WUHN 和 LHAZ 站基于 Klobuchar 模型的夜间 VTEC 值基本为 9.2 TECu ,而基于曲面拟合模型的夜间 VTEC 则随时间不断变化,且时间与 VTEC 表现为近似余弦函数关系。为此,对 Klobuchar 模型的夜间时延值 A_1 进行改正,使其具有随时间变化的特性,表示为:

$$A_1+k_2\cos\left[\frac{2\pi(t'-A_3)}{A_4}\right]$$

3 改进模型的建立

采用南宁市区域 CORS 网 5 个 CORS 站

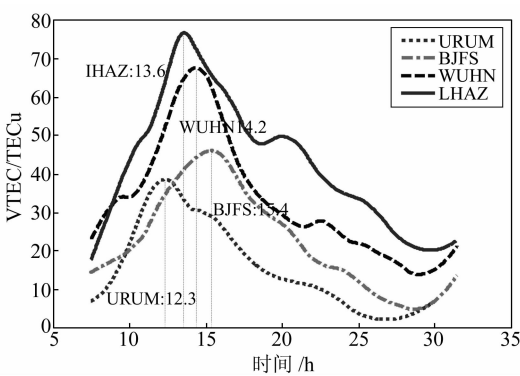
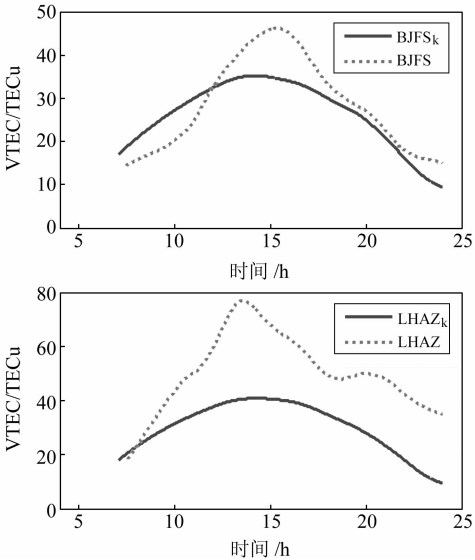


图 1 URUM、BJFS、WUHN 和 LHAZ 站出现峰值情况
Fig. 1 Peak situation form different IGS station



2009 年第 127~131 d 的实测数据,用最小二乘曲面拟合法建立南宁市区域电离层延迟模型,选取 4 个空间边长较大的 CORS 站进行建模,剩余 1 个站检核模型精度,每 4 h 建立一个模型。曲面拟合模型的内符合精度为 4.21 cm ,外符合精度为 5.64 cm ,因此本文的模型精度分析以曲面拟合模型的电离层延迟值作为真值。

通过对 Klobuchar 模型进行初始相位、振幅和夜间延迟值的改进,建立南宁地区实际区域电离层延迟模型:

$$I_2(t)=\begin{cases} A_1+A_2(1+k_1)\cos\left[\frac{2\pi(t'-A_3)}{A_4}\right], & |t'-A_3|<\frac{A_4}{4} \\ A_1+k_2\cos\left[\frac{2\pi(t'-A_3)}{A_4}\right], & t' \text{ 为其他值} \end{cases} \tag{4}$$

式中, k_1 、 k_2 是振幅改正参数,可通过非线性迭代求解,且收敛快; t' 是基于曲面拟合模型改正的初

始相位;其他参数参照 Klobuchar 模型。

建立模型时,将广播星历提供的电离层改正参数作为初始值,利用实测数据的准确性对模型初始相位不断改正,对模型振幅附加改正参数

k_1 、 k_2 。由于模型是非线性的,为避免求解参数时出现局部最优解情况,对参数 k_1 、 k_2 采用非线性迭代求解,直至收敛为止。得到各参数值后,即可求出电离层的延迟值。

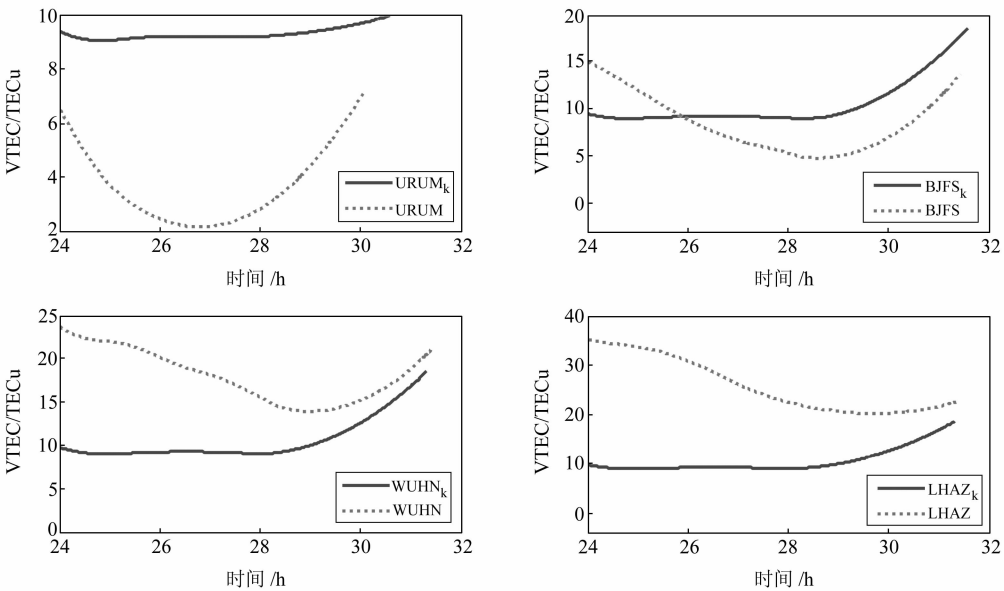


图 3 基于 Klobuchar 模型和曲面拟合模型夜间 VTEC 的比较
Fig. 3 Comparison of the delay value of night based on various models

4 模型精度分析

利用实验区域 5 个参考站 2009 年 127~130 d

的数据建立曲面拟合模型(其中一个站作为检核站),对比分析 Klobuchar 模型和改进的 Klobuchar 模型的精度(图 4)。

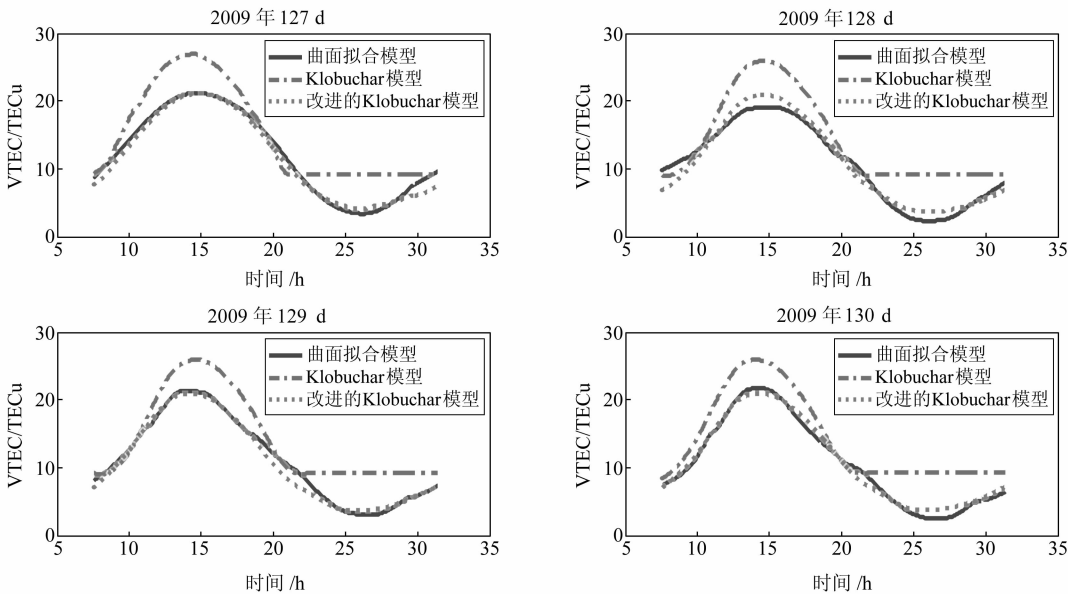


图 4 不同模型计算的 VTEC 对比
Fig. 4 Comparison of VTEC calculated with various models

由图 4 看出,改进的 Klobuchar 模型更趋近于“真实值”。为更加清楚地比较改进模型与 Klobuchar 基本模型对电离层的改正效果,引用 Klobuchar 模型相对于曲面拟合模型的改正率算法:

$$P = \left(1 - \frac{|I_s(t) - I_{k_i}(t)|}{I_s(t)}\right) \times 100\%, i = 1, 2 \quad (5)$$

式中, $I_s(t)$ 和 $I_{k_i}(t)$ 分别为 t 时刻曲面拟合模型和 Klobuchar 模型的电离层延迟改正量, k_1 和 k_2 分别代表 Klobuchar 基本模型和改进的 Klo-

buchar 模型。

将 1 d 划分为 6 个时段,每 4 h 一个时段,5 d 共 30 个时段。两种模型的残差和改正率分别如图 5 和表 1 所示。由图 5 和表 1 可知,改进的 Klobuchar 模型残差基本稳定在 1 TECu,原模型则在 2~8 TECu 之间波动;改进模型在 12~16、16~20、28~32 这 3 个时段改正率优于 92%,而原模型仅在 0~8 和 20~24 时段改正率达到 80%,在 28~32 时段改正率低于 30%。由于改进模型的改正效果有限,在 24~28 时段改正效果一般。总体而言,改进模型在 6 个时段的改正精度达到 89%以上,优于原模型的 69%。

对两种模型改正效果优于 60%、80%和 90%的数据进行统计分析。由表 2 可知,Klobuchar 模型的改正效果有限,优于 60%的在观测数据中占 70%左右,优于 90%的仅占 17%左右,且在不

同年积日波动较大。对 Klobuchar 模型进行改进后,改正效果优于 60%的占观测数据比例达到 90%以上,优于 90%的达到 58%。由此可见,改进模型的改正效果更好。

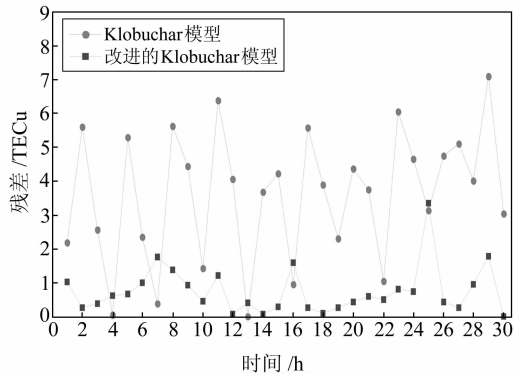


图 5 Klobuchar 模型改进前后的精度对比
Fig. 5 Accuracy with Klobuchar model and improved model

表 1 Klobuchar 模型改进前后的改正率
Tab. 1 Correction percentage of Klobuchar model and improved model

时段	127 d/%		128 d/%		129 d/%		130 d/%		131 d/%	
	基本模型	改进模型	基本模型	改进模型	基本模型	改进模型	基本模型	改进模型	基本模型	改进模型
[8,12]	83.15	92.02	96.75	85.22	99.85	96.36	77.93	97.45	68.28	66.25
[12,16]	72.21	98.65	68.29	92.24	81.39	99.54	78.25	97.78	75.99	97.72
[16,20]	86.35	97.91	73.08	94.41	75.47	98.32	78.69	96.53	65.41	98.12
[20,24]	99.51	93.69	82.54	94.31	89.67	82.67	89.08	94.69	72.40	82.83
[24,28]	64.02	82.40	72.83	43.12	46.82	92.20	92.16	74.15	61.55	85.56
[28,32]	34.43	85.13	20.86	98.50	26.31	97.87	2.47	83.71	50.77	99.70

表 2 模型改进前后改正效果统计
Tab. 2 Correction effect of Klobuchar model and improved model

年积日	127 d/%		128 d/%		129 d/%		130 d/%		131 d/%	
	基本模型	改进模型	基本模型	改进模型	基本模型	改进模型	基本模型	改进模型	基本模型	改进模型
≥60%	79.69	100.00	72.78	85.59	71.81	100.00	72.66	89.00	74.85	85.95
≥80%	40.41	84.84	31.85	70.55	46.62	86.77	35.63	83.41	13.70	62.10
≥90%	22.21	66.78	17.35	50.1	27.46	65.97	14.76	65.85	6.59	44.41

5 结 语

利用南宁市 CORS 网实测数据对 Klobuchar 模型进行改进,结果表明,改进的 Klobuchar 模型改正率较原模型提高了 20%以上。鉴于本文实验数据获取有限,改进模型在其他区域的适用情况有待进一步验证。

致谢:感谢广西测绘局和 IGS 中心分别提供 CORS 网实测数据和 IGS 站实测数据。

参考文献

[1] 霍星亮. 基于 GNSS 的电离层形态监测与延迟模型研究[D]. 武汉:中国科学院测量与地球物理研究所, 2008(Huo Xingliang. Monitoring of Ionospheric Morpholpgy and Study of Ionospheric Delay Model Based on GNSS[D]. Wuhan:Institute of Geodesy and Geophysics, CAS, 2008)

[2] Huo X L, Yuan Y B, Ou J K, et al. Monitoring the Day-time Variations of Equatorial Ionospheric Anomaly Using IONEX Data and CHAMP GPS Data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(1): 105-114

[3] 张勇,张斌,马能武. 单频 GPS 接收机的电离层延迟改正模型研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2012, 32(2):69-73 (Zhang Yong, Zhang Bin, Ma Nengwu, et al. On Model of Ionospheric Delay Corrcetion for Single-Frequency GPS Receiver[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2012, 32 (2):69-73)

[4] 耿长江,唐卫明,章红平. 利用 CORS 系统实时监测电离层变化[J]. 大地测量与地球动力学, 2008, 28(5):105-108 (Geng Changjiang, Tang Weiming, Zhang Hongping, et al. Real-Time Monitoring of Ionosphere Changes by CORS [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2008,28(5): 105-108)

(下转第 806 页)