



基于陆基 GNSS 的电离层时间序列预报研究

摘要

为讨论不同时间序列模型对电离层垂直总电子含量(VTEC)的预报效果,在平静电离层条件下,采用载波相位平滑伪距法解算单站上空的电离层 VTEC 值,分别利用自回归积分滑动平均模型 (ARIMA) 与 Holt-Winters 指数平滑模型进行逐站建模,通过时长为 9 d 的样本序列实现 3 d 预报,并对预报值进行系统评估.结果表明,时间序列模型能够较好地反映预报期内的电离层 VTEC 变化情况,均方根误差均值不超 5 TECU.此外, Holt-Winters 乘法模型的预报值偏差最大,加法模型次之, ARIMA 模型在 11 个测站的相对精度都高于 Holt-Winters 指数平滑模型,且其均方根误差峰值最小,具有最高的预报精度.

关键词

电离层; VTEC 预报; ARIMA 模型; Holt-Winters 模型

中图分类号 P228

文献标志码 A

收稿日期 2021-01-15

资助项目 国家自然科学基金(41604018)

作者简介

陈雨田,男,博士生,研究方向为 GNSS 技术与应用. eyt19943@163.com

0 引言

电离层是地球大气的重要组成部分,其对无线电信号的反射作用是短波通信实现与发展的重要条件,同时电离层对电磁波的散射、折射和吸收效应是造成电离层延迟的重要因素,在卫星数据传输与导航、定位过程中,电离层延迟的削弱与改正一直是一个亟待解决的重要问题,也是目前研究的热点之一^[1-3].电离层垂直总电子含量 (Vertical Total Electron Content, VTEC) 是表征电离层状态的重要物理参数之一,它的大小直接决定了电离层对无线电信号的作用强弱,同时也是研究空间天气与灾害先兆的重要依据.基于此,白晓涛等^[4]通过暴时电离层 TEC 的响应研究,对磁暴发生前后电离层的时空变化特性进行了分析.也有学者基于电离层的时空扰动探索了地震监测和预报的新方法,其中通过震前 VTEC 的异常扰动来探索地震-电离层耦合关系成一种新的研究思路^[5-8].因此,对电离层 VTEC 的预报研究具有重要的现实意义.

对电离层的预报经历了经验模型、广播星历再到国际参考电离层等多个阶段^[9-11].这些传统方法往往需要依托大量的观测资料和建模参数,时效性较差,或易受模型自身缺陷及地理因素影响,不具有广泛的适用性.近年来,时间序列作为一种有效的短期预报方法被逐渐应用于电离层 VTEC 的预报工作中.自回归模型 (Auto Regressive Model, AR) 由于建模简单被最早引入电离层的预报研究^[12],在其基础上发展而来的自回归滑动平均模型 (Auto Regressive Moving Average Model, ARMA) 具有更高的精度与更广泛的适用性^[13].还有一些学者提出了基于自回归积分滑动平均模型 (Auto Regressive Integrated Moving Average Model, ARIMA) 以及 Holt-Winters 指数平滑法的 VTEC 短期预报方法,并获得了一些有益的结论^[14-16].

由于国际 GNSS 服务组织 IGS 提供的全球电离层模型 (Global Ionosphere Model, GIM) 的时间分辨率仅为 2 h,且在一些缺少跟踪站地区的拟合效果不佳,本文在电离层单层模型的基础上,拟利用多个陆基 GNSS 观测站的观测数据进行预报实验.考虑到伪距观测值精度较低,不能较好地描述电离层的实际特征,载波相位观测值虽然较前者解算精度有大幅提高,但无法回避模糊度的确定问题^[17],故采用载波相位平滑伪距法进行单站 VTEC 的解算.通过讨论不同空间分布的 16 个观测站的预报结果,分析不同时间序列模型的预报精度与空间

1 河海大学 地球科学与工程学院,南京,210098

适用性.结果表明,ARIMA 模型和 Holt-Winters 指数模型均能较好地预测电离层 VTEC 的短期变化,且 ARIMA 模型的预报精度更高.此外,3 种时间序列预报模型的误差在地理空间上的分布具有一致性,均方根误差的分布表明中纬度地区较低纬度地区具有更为稳定可靠的预报性能.

1 基本原理

1.1 载波相位平滑法求解 VTEC

通过双频消电离层方法,用户可以分别通过伪距观测值和载波相位观测值求解电离层 VTEC.但实际操作中,伪距观测值计算简单,但易受观测噪声影响,观测精度较低;而载波相位观测值虽然能提高 2~3 个量级的观测精度,但面临模糊度的确定问题.综合两者的优势与不足,载波相位平滑伪距法被提出,并用于电离层 VTEC 的快速解算.

实际计算过程中多颗卫星信号路径上的总电子含量一般批量处理,本文各变量皆采用向量计算,在不考虑多路径效应和观测噪声的情况下,无几何距离组合的伪距和载波相位观测方程可表示为

$$\begin{cases} P = \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2}\right) \cdot 40.28 \cdot \varepsilon_{\text{STEC}} + D_{r,12} + D_{12}^s, \\ L = -\left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2}\right) \cdot 40.28 \cdot \varepsilon_{\text{STEC}} + D_{r,12} + D_{12}^s + (\lambda_1 N_{r,1}^s - \lambda_2 N_{r,2}^s), \end{cases} \quad (1)$$

式中: f_1, f_2 分别为载波 L1 和 L2 的频率; $D_{r,12}$ 为接收机的码偏差值, D_{12}^s 为卫星码偏差值; $N_{r,1}^s$ 和 $N_{r,2}^s$ 为载波相位观测值的整周模糊度; $\varepsilon_{\text{STEC}}$ 表示信号传播路径上的电子含量.

由 Hatch 滤波的递推关系可以得到平滑伪距 P_{sm} , Hatch 滤波模型表达式如下:

$$\begin{cases} P_{\text{ex}}(k) = P_{\text{sm}}(k-1) + [L(k) - L(k-1)], \\ P_{\text{sm}}(k) = \omega(k)P(k) + [1 - \omega(k)]P_{\text{ex}}(k), \\ \omega(k) = 1/k, k < M, \\ \omega(k) = 1/M, k \geq M, \\ P_{\text{sm}}(0) = P(0), \end{cases} \quad (2)$$

式中, P_{ex} 为外推伪距, $\omega(k)$ 表示历元 k 的伪距权重, M 为平滑常数.

载波相位平滑伪距可以表示为

$$\hat{P}_{\text{sm}} = -\left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2}\right) \cdot 40.28 \cdot \varepsilon_{\text{STEC}} + D_{r,12} + D_{12}^s. \quad (3)$$

通过投影函数将 STEC 投影至穿刺点的垂直方向上得到 VTEC 值:

$$\varepsilon_{\text{VTEC}} = \cos\left(\arcsin\left(\frac{R}{R+H}\sin(\alpha z)\right)\right) \cdot$$

$$\left[-\frac{f_1 f_2}{40.28(f_1^2 - f_2^2)}(\hat{P}_{\text{sm}} - (D_{r,12} + D_{12}^s))\right], \quad (4)$$

式中, R 为地球半径, H 为电离层单层模型高度, α 为穿刺点的地心夹角, z 为天顶距.

1.2 ARIMA 模型简介

自回归积分滑动平均模型满足 ARIMA(p, d, q) 的形式,该模型的建立要求样本序列平稳,若平稳,则 d 取值为 0,若不平稳则对样本序列进行 d 阶差分至其平稳后根据其自相关与偏自相关特性确定其余模型参数,具体建模过程可参考文献[14].

由于电离层 VTEC 随太阳直射点的周日变化表现出明显的周期性(季节性),故本文采用季节性 ARIMA 模型进行预报,可记为 ARIMA(p, d, q) \times (P, D, Q),模型的一般表达如下:

$$\Phi(B)\Phi_s \nabla^d \nabla_s^D x_t = \Theta(B)\Theta_s(B)\varepsilon_t, \quad (5)$$

其中:

$$\begin{cases} \Phi_s(B) = 1 - \varphi_1 B^S - \dots - \varphi_p B^{pS}, \\ \Theta_s(B) = 1 - \theta_1 B^S - \dots - \theta_q B^{qS}, \end{cases} \quad (6)$$

式中: P, D, Q 分别为带有季节性的自回归阶数、差分次数和滑动平均阶数; S 为季节性周期, $\nabla_s^D = (1 - B^S)^D$ 是以周期 S 为步长的季节差分过程; $\Phi_s(B)$ 表示季节性自回归算子, $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_p$ 为季节性自回归参数; $\Theta_s(B)$ 表示季节性滑动平均算子, $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$ 为季节性滑动平均参数.

1.3 Holt-Winters 模型原理

电离层 VTEC 序列具有明显的趋势与周期性,利用简单的指数平滑模型并不能进行有效预报.针对季节性时间序列的 Holt-Winters 模型基于 3 个基本表达式,分别表示平滑、趋势和季节性^[18].若时间序列的趋势与季节成分具有可加性,则可以通过加法模型来进行描述,下述表达式分别为平滑公式、趋势公式、周期公式和预测公式:

$$\begin{cases} L_t = \alpha(X_t - S_{t-m}) + (1 - \alpha)(L_{t-1} + b_{t-1}), \\ b_t = \beta(L_t - L_{t-1}) + (1 - \beta)b_{t-1}, \\ S_t = \gamma(X_t - L_{t-1} - b_{t-1}) + (1 - \gamma)S_{t-m}, \\ F_{t+h} = L_t + hb_t + S_{t-m+h}. \end{cases} \quad (7)$$

若时间序列的趋势与季节成分具有相乘性,则可以用乘法模型来描述,平滑公式、趋势公式、周期公式和预测公式分别为

$$\begin{cases} L_t = \alpha(X_t/S_{t-m}) + (1 - \alpha)(L_{t-1} + b_{t-1}), \\ b_t = \beta(L_t - L_{t-1}) + (1 - \beta)b_{t-1}, \\ S_t = \gamma(X_t - L_{t-1} - b_{t-1}) + (1 - \gamma)S_{t-m}, \\ F_{t+h} = (L_t + hb_t)S_{t-m+h}, \end{cases} \quad (8)$$

式中, α, β, γ 为 0 到 1 区间上的平滑参数, α, β, γ 的值越大表示样本序列的平稳性越强, X_t 为样本序列, L_t 为序列的整体平滑值, b_t 为序列的趋势项, S_t 为季节(周期)成分, F_{t+h} 为预测值序列, m 为季节(周期)长度, h 为预测步长。

2 实验分析

2.1 数据准备与评价指标

本文通过 16 个 GNSS 观测站解算电离层 VTEC 值, 单点解算采用载波相位平滑伪距法以 15 min 为间隔, 得到每天共 96 个 VTEC 数据. 为方便建模, 以 1 h 为间隔每天选取 24 个 VTEC 值构成样本序列. 本文拟进行 3 d 的短期预报, 考虑到在时间序列建模过程中, 样本序列的长度会影响预报结果的准确性, 为了评价预报值的精确度, 实验定义了绝对精度 (P_{abs}) 和相对精度 (P_{rel}) 来进行评价:

$$P_{abs} \begin{cases} \Delta_{ave} = \frac{1}{n - m + 1} \sum_{i=m}^n |I_{pre[i]} - I_{[i]}|, \\ \sigma_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n - m + 1} \sum_{i=m}^n (I_{pre[i]} - I_{[i]})^2}, \end{cases} \quad (9)$$

$$P_{rel} = \frac{1}{n - m + 1} \sum_{i=m}^n \left(1 - \frac{|I_{pre[i]} - I_{[i]}|}{I_{[i]}} \right), \quad (10)$$

式中: m 和 n 分别为 VTEC 序列起始时刻与终止时刻的序号; $I_{pre[i]}$ 为预报值, $I_{[i]}$ 为真值, 即解算得到的 VTEC 值; Δ_{ave} 为预报值残差绝对值的均值; σ_{RMSE} 为预报值的均方根误差. 通过对预报期前等长的数据进行模拟预报, 使得绝对误差与相对误差最小, 便可确定样本序列的最佳长度。

本文对 2010 年年积日 342~344 的 VTEC 数据

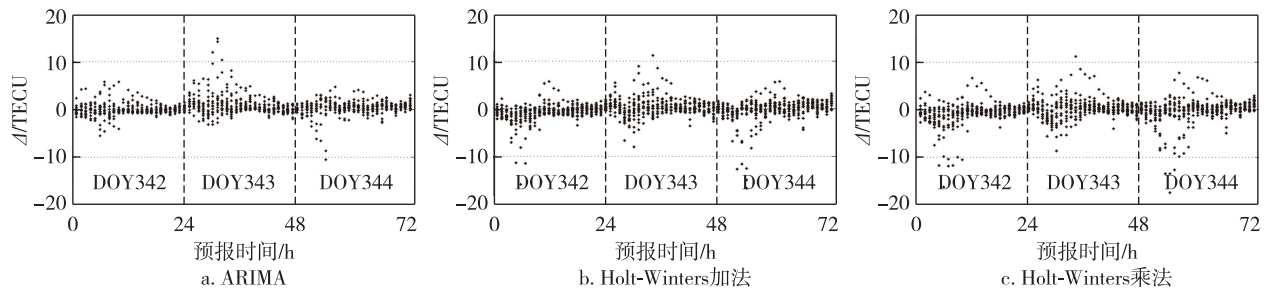


图2 预报值偏差统计

Fig. 2 Deviation of forecast values

进行提前 3 d 的模拟预报确定了当样本序列为 9 d 时, ARIMA 模型与 Holt-Winters 模型均能够取得最佳预报精度. 同时, 考虑到电离层 VTEC 易受空间天气的影响发生异常扰动, 故对实验期间(2010 年年积日 333~344)的地磁指数进行了分析。

图 1 给出了实验期间的 Dst 指数, 该指数用于表征全球的环电流强度, 单位为纳特斯拉 (nT), 当 Dst 小于 -50 nT 时表示有磁暴发生, 而图中数值均大于 -30 nT, 可以认为此时间段内电离层较为平静。

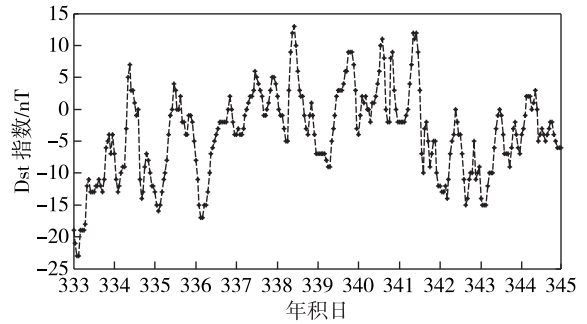


图1 实验期间的 Dst 指数

Fig. 1 Dst index during the experiment

2.2 精度分析

通过分析 ARIMA 模型与 Holt-Winters 指数平滑模型对 16 个测站预报值的偏差, 得到图 2. 图 2 中 ARIMA 模型预报值的偏差最为集中, 绝大多数偏差值都在 ± 3 TECU 以内, Holt-Winters 加法模型次之, 仅少量偏差值超过 ± 10 TECU, 而乘法模型的偏差最大, 最大偏差可超过 20 TECU。

表 1 给出了 3 种预报方法在预报期内 1 152 个 (16 个测站, 3 d, 每天 24 个预报结果) 偏差绝对值以 1, 2, 3 TECU 为节点的百分比统计结果, 3 种时间序列模型均能较好反映预测期内 VTEC 的变化, 绝对值小于 3 TECU 的偏差均可达 90% 以上, 其中 ARIMA 模型绝对值小于 1 TECU 的偏差达到 67.10%, 仅 6.08% 的

偏差绝对值大于 3 TECU,预报效果最好;Holt-Winters 加法与乘法模型预报精度较为接近,而乘法模型有 59.20%的偏差绝对值小于 1 TECU,9.98%的偏差绝对值大于 3 TECU,预报效果相对较差.

表 1 预报值偏差统计

预报方法	$\Delta < 1$ TECU	$1 \text{ TECU} \leq \Delta < 2$ TECU	$2 \text{ TECU} \leq \Delta < 3$ TECU	$\Delta \geq 3$ TECU
ARIMA	67.10	20.92	5.90	6.08
Holt-Winters 加法	59.03	25.61	8.07	7.30
Holt-Winters 乘法	59.20	23.35	7.47	9.98

图 3 给出了实验区域内的 16 个 GNSS 观测站 3 d 预报值相对精度的均值.从图中 3 种模型的预报情况可以看出:ARIMA 模型在 11 个测站的预报值相对精度的均值要高于 Holt-Winters 加法和乘法模型,而在 BJSH、LHAS、XIAA 和 XIAG 这 4 个测站上,ARIMA 模型预报值的相对精度仅略低于 Holt-Winters 模型.总体而言 ARIMA 模型具有最高的预报相对精度,而 Holt-Winters 加法与乘法模型的相对精度相差不大,加法模型在 10 个测站上的相对精度低于乘法模型,总体相对精度略低.

表 2 详细分析了 3 种预报模型在 16 个测站上预报值的绝对精度均值.结果表明,不同方法对不同测站预报值残差均值与均方根误差的大小具有一致性,且纬度较低的测站预报值的残差均值与均方根误差普遍大于纬度较高的测站(测站地理位置可参考图 4),如纬度较低的 QION 测站 ARIMA 模型预报值的 3 d 均方根误差均值达到了 3.01 TECU, Holt-

Winters 加法与乘法模型预报值的均方根误差均值分别为 3.97 和 4.11 TECU,而纬度相对较高的 BJSH 测站与之相对应的各模型预报值均方根误差均值分别为 0.84、0.92 和 0.97 TECU.从 16 测站的总体预报情况来看 ARIMA 的绝对误差最小.

表 2 预报值绝对精度分析

测站	P_{abs} 均值/TECU					
	ARIMA		Holt-Winters 加法		Holt-Winters 乘法	
	Δ_{ave}	σ_{RMSE}	Δ_{ave}	σ_{RMSE}	Δ_{ave}	σ_{RMSE}
BJSH	0.68	0.84	0.71	0.92	0.72	0.97
CHUN	0.63	0.80	0.69	0.90	0.66	0.86
DXIN	0.66	0.81	0.66	0.86	0.64	0.83
DLHA	0.62	0.81	0.90	1.05	1.25	1.48
LHAS	0.90	1.08	0.77	0.93	0.82	1.00
WUSH	0.66	0.88	0.82	1.15	0.75	1.06
XIAA	0.75	0.95	0.84	1.09	0.77	1.01
XIAG	1.94	3.14	1.87	2.82	1.65	2.99
KMIN	1.84	2.90	1.95	2.89	3.10	4.81
QION	2.46	3.01	3.04	3.97	3.33	4.11
XIAM	2.05	2.52	2.69	4.00	2.63	4.16
ZHNZ	0.77	0.97	0.90	1.18	0.83	1.09
URUM	0.59	0.70	0.64	0.80	0.98	1.16
TASH	0.78	1.04	1.12	1.50	1.32	1.79
XNIN	0.62	0.78	0.91	1.05	0.98	1.18
SHAO	0.97	1.22	1.28	1.56	1.15	1.43

为了更加细致地探讨均方根误差的周日变化,图 4 直观地给出了预报期内均方根误差的时空分布情况.从地理位置来看,均方根误差与地理经度并没有明显的相关性,而随地理纬度的降低表现出增大的趋势,如在 30°N 以上的测站,均方根误差预报期

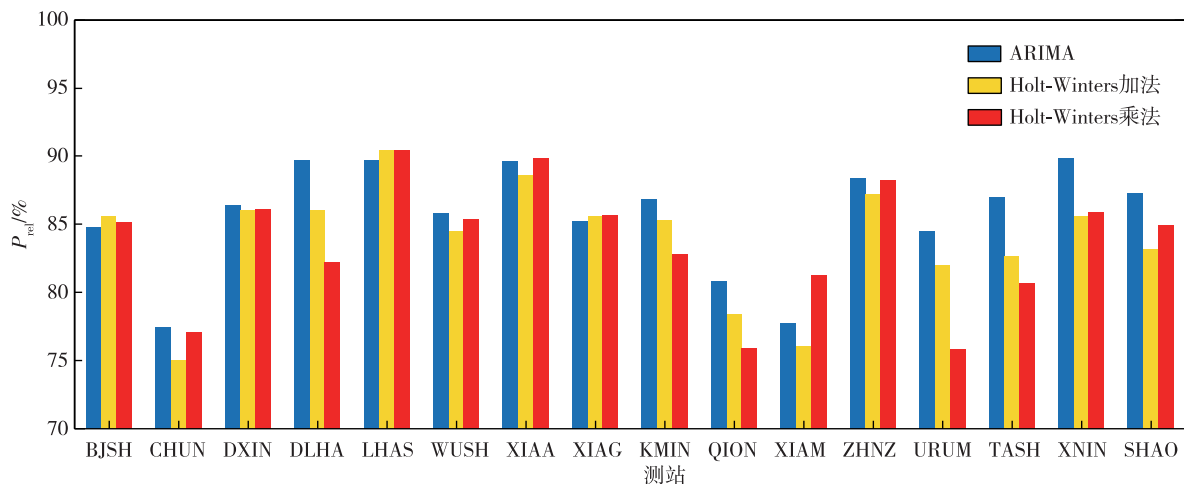


图 3 预报值相对精度

Fig. 3 Relative accuracy of forecast values

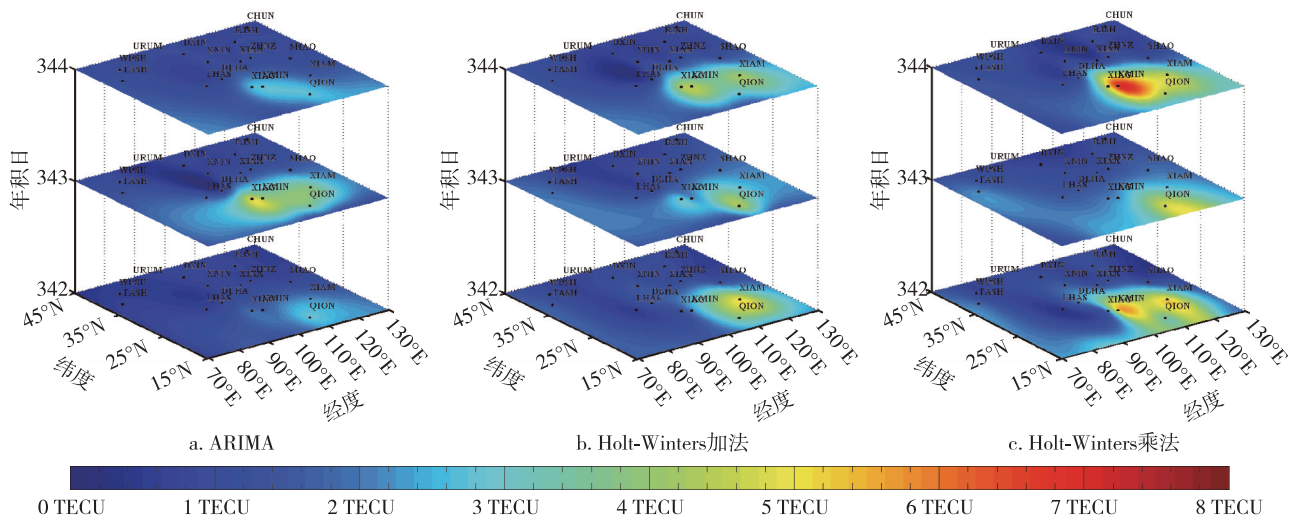


图4 均方根误差周日变化

Fig. 4 Diurnal variation of root mean square error

内均小于 3 TECU, 而纬度相对较低测站如 XIAG、KMIN、QION 和 XIAM 在预报期 3 d 内的均方根误差均大于其他测站。从预报时间来看, ARIMA 模型的均方根误差峰值出现在预报的第 2 天, 而 Holt-Winters 加法与乘法模型均表现为第 1 和第 3 天的均方根误差小于第 2 天, 与 ARIMA 模型恰好相反。从预报方法来看, ARIMA 模型的预报效果最好, 均方根误差单日峰值不超 5 TECU, 尤其在预报的第 1 与第 3 天, 各测站预报值的均方根误差均低于 3 TECU。加法模型从整体来看预报效果要优于乘法模型。

3 结语

本文利用 ARIMA 模型与 Holt-Winters 加法、乘法模型对 16 个 GNSS 观测站解算的 VTEC 时间序列进行预报, 通过分析预报值与实际解算结果的偏差和相对、绝对精度, 得到以下结论:

1) 从预报值精度随地理位置的变化来看, 纬度较高测站预报值的相对精度和绝对精度均高于纬度较低的测站。

2) 从预报模型本身而言, 3 种时间序列模型均能较好地预测实验区域上空电离层 VTEC 的变化趋势, 具有良好区域适用性。其中 ARIMA 模型的预报值偏差最小, 与实际解算值更加接近; ARIMA 模型在 11 个测站的相对精度都高于 Holt-Winters 模型, 且从整个区域均方根误差的时空分布来看, ARIMA 模型的均方根误差最小, 加法模型次之, 乘法模型的均方根误差最大。

本文基于陆基 GNSS 验证了不同时间序列模型

对电离层 VTEC 的预报精度, 具有一定的实际参考价值。但由于测站数据有限, 一些区域缺少有效的观测资料, 且电离层易受多种物理、化学因素影响, 电子含量与密度具有多层特性, 单层模型具有一定的局限性。通过电离层层析方法建立更加细致的电离层多层模型, 在今后有待进一步研究。

参考文献

References

- [1] 袁运斌, 霍星亮, 张宝成. 近年来我国 GNSS 电离层延迟精确建模及修正研究进展[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1364-1378
YUAN Yunbin, HUO Xingliang, ZHANG Baocheng. Research progress of precise models and correction for GNSS ionospheric delay in China over recent years[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1364-1378
- [2] Klobuchar J A. Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1987, 23(3): 325-331
- [3] 方涵先, 翁利斌, 杨升高. IRI、NeQuick 和 Klobuchar 模式比较研究[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(1): 1-7
FANG Hanxian, WENG Libin, YANG Shenggao, et al. The research of IRI, NeQuick and Klobuchar models[J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(1): 1-7
- [4] 白晓涛, 蔡昌盛. 基于北斗 GEO 卫星的磁暴期间电离层 TEC 响应分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2020, 40(2): 129-133
BAI Xiaotao, CAI Changsheng. Ionospheric TEC response analysis during magnetic storms based on Beidou GEO satellites[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2020, 40(2): 129-133
- [5] Carter B A, Kellerman A C, Kane T A, et al. Ionospheric precursors to large earthquakes: a case study of the 2011

- Japanese Tohoku Earthquake[J].Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics,2013,102:290-297
- [6] Hasbi A M, Momani M A, Mohd Ali M A, et al. Ionospheric and geomagnetic disturbances during the 2005 Sumatran earthquakes [J].Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2009, 71 (17/18): 1992-2005
- [7] 刘军,柴洪洲,刘长建,等.基于 CODE GIM 的震前电离层 TEC 异常分析[J].大地测量与地球动力学,2011,31(6):39-42,62
LIU Jun, CHAI Hongzhou, LIU Changjian, et al. Analysis based in CODE GIM of ionospheric TEC anomaly before earthquake [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2011, 31(6):39-42, 62
- [8] 王若鹏.地震电离层前兆短期预报研究[D].武汉:武汉大学,2012
WANG Ruopeng. Study on short-term forecasting of the ionospheric precursors of earthquake[D]. Wuhan: Wuhan University, 2012
- [9] 章红平.基于地基 GPS 的中国区域电离层监测与延迟改正研究[D].上海:中国科学院上海天文台,2006
ZHANG Hongping. Study on ionospheric monitoring and delay correction in China based on ground-based GPS [D]. Shanghai: Shanghai Astronomical Observatory, 2006
- [10] Tariku Y A. TEC prediction performance of IRI-2012 model during a very low and a high solar activity phase over equatorial regions, Uganda [J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2015, 120 (7): 5973-5982
- [11] Olawepo A O, Adeniyi J O, Oluwadare E J. TEC variations and IRI-2012 performance at equatorial latitudes over Africa during low solar activity [J]. Advances in Space Research, 2017, 59(7):1800-1809
- [12] 李秀海,郭达志.应用半参数 AR 模型的电离层 TEC 建模与预测[J].测绘科学,2011,36(2):149-151
LI Xiuhai, GUO Dazhi. Prediction of ionospheric total electron content based on semiparametric autoregressive model [J]. Science of Surveying and Mapping, 2011, 36 (2): 149-151
- [13] 陈鹏,姚宜斌,吴寒.利用时间序列分析预报电离层 TEC [J]. 武汉大学学报(信息科学版),2011,36(3):267-270
CHEN Peng, YAO Yibin, WU Han. TEC prediction of ionosphere based on time series analysis [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36 (3): 267-270
- [14] 张小红,任晓东,吴风波,等.自回归移动平均模型的电离层总电子含量短期预报[J].测绘学报,2014,43(2):118-124
ZHANG Xiaohong, REN Xiaodong, WU Fengbo, et al. Short-term TEC prediction of ionosphere based on ARIMA model [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2014, 43(2):118-124
- [15] 席广永,岳建平,周保兴.基于 Holt-Winter 的电离层延迟预报模型[J].测绘通报,2012(9):7-10
XI Guangyong, YUE Jianping, ZHOU Baoxing. The forecasting model of ionospheric delay based on Holt-Winter [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2012(9):7-10
- [16] 谢劲峰,陈军,黄良珂,等.基于 Holt-Winters 的电离层总电子含量预报[J].大地测量与地球动力学,2017,37(1):72-76
XIE Shaofeng, CHEN Jun, HUANG Liangke, et al. Ionospheric TEC prediction based on Holt-Winters models [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2017, 37(1):72-76
- [17] Psychas D, Verhagen S, Teunissen P J G. Precision analysis of partial ambiguity resolution-enabled PPP using multi-GNSS and multi-frequency signals [J]. Advances in Space Research, 2020, 66(9):2075-2093
- [18] Hyndman R, Koehler A, Ord K, et al. Forecasting with exponential smoothing [M]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008

Ionospheric time series forecast based on land-based GNSS

CHEN Yutian¹ YUE Dongjie¹

¹ School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098

Abstract In order to compare the forecast performance of different time series models, the carrier phase smoothing pseudo range method is used to calculate the ionospheric Vertical Total Electron Content (VTEC) over a single station under the condition of calm ionosphere. The Auto Regressive Integrated Moving Average (ARIMA) model and Holt Winters exponential smoothing model are used for station-by-station modeling. A 3-day forecast is achieved through a 9-day sample sequence, and the forecast values are systematically evaluated. The results show that the time series models can well reflect the change in ionospheric VTEC during the forecast period, and the mean square root errors are not more than 5 TECU. In addition, the Holt-Winters multiplicative model has the largest deviation in the forecast value, followed by the additive model. The ARIMA model has higher relative accuracy at the 11 stations than the Holt-Winters exponential smoothing model, and has the smallest root mean square error peak as well as the highest forecast accuracy.

Key words ionosphere; VTEC forecast; ARIMA model; Holt-Winters model