

利用时间序列分析预报电离层 TEC

陈 鹏¹ 姚宜斌¹ 吴 寒¹

(1 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘 要:以 IGS 发布的电离层总电子含量(total electron content, TEC)数据为样本,利用时间序列分析进行预报。将 TEC 时间序列分解为趋势项、周期项和随机项的组合,并利用相关系数和偏相关系数确定模型阶数。对 IGS 提供的 2008 年 TEC 数据进行预报分析,结果表明,采用时间序列分析能达到较高精度,预报 7 d 时的平均相对精度为 87.75%,预报精度大于 60%的预报值占有所有预报值的 95%以上,预报精度大于 85%的预报值占有所有预报值的 72.6%,95.3%的预报残差小于±3 TECU。

关键词:电离层;总电子含量;时间序列分析;预报

中图法分类号:P228.42

测量电离层中的总电子含量,研究其变化规律并对其进行预报是一项重大的研究课题^[1-3]。20 世纪 90 年代兴起的 GPS 技术,为电离层研究带来了飞跃式的发展,成为了精度最高的电离层探测方法^[4-6]。目前,常见的电离层预报模型有 Klobuchar 模型、Bent 模型、IRI 模型等^[1]。GPS 单频接收机一般采用 Klobuchar 模型^[7],但在一天内它只能预报出电子含量的 50%~60%,最乐观的情形下也不超过 75%,且对夜间的预报具有明显的不合理性。由于影响电离层的因素很多,人们对各因素间的相互关系、变化规律等尚未完全搞清,这些模型的精度一般都不高。因此,有必要对电离层 TEC 的精确预报进行研究。

本文利用时间序列分析的方法对 TEC 数据进行预报。时间序列是按时间顺序的一组数字序列^[8]。时间序列分析就是利用这组数列,应用数理统计方法加以处理,以预测未来事物的发展^[9]。目前,IGS 每 2 h 给出全球经度方向间隔 5°、纬度方向间隔 2.5°格网的 TEC。本文采用 IGS 提供的全球电离层 TEC 数据,利用时间序列分析进行预报,检验预报的精度。

1 利用时间序列预报 TEC

TEC 数据可以用时间序列的形式表达,

$TEC(t_i)$ 是 t_i 时刻的 TEC 值。将 $TEC(t_i)$ 分解为 3 个部分:趋势变化、周期性变化、随机性变化^[9]。根据不同情况,TEC 序列可表示为:

$$TEC(t_i) = TEC(t_i)_T + TEC(t_i)_P + TEC(t_i)_S \tag{1}$$
$$TEC(t_i) = TEC(t_i)_P \times (TEC(t_i)_T + TEC(t_i)_S) \tag{2}$$

式中, $TEC(t_i)_T$ 为趋势项; $TEC(t_i)_P$ 为周期项; $TEC(t_i)_S$ 为随机项。本文将 TEC 时间序列分解为式(2)所示的形式。

在时间序列分析之前,需要进行必要的数据预处理。首先,计算季节指数,将周期性变化从时间序列中分离,得到一组不含周期项的序列;然后,利用格拉布斯检验法或狄克松检验法^[10]进行粗差探测,剔除异常值,并利用拉格朗日插值法对时间序列进行修补,再利用多项式拟合法将趋势项从时间序列中分离(由于短期 VTEC 时间序列的趋势变化不显著,该项工作可以不进行),并进行中心化和差分,得到一组零均值的平稳时间序列(随机项)。

根据所用时间序列的物理背景,本文选用比较普遍适用的 ARMA(p, q)模型^[8]进行时间序列分析。设 $\{x_t\}$ 为电离层总电子含量 TEC 所构成的时间序列,且满足:

$$x_t = \varphi_1 x_{t-1} + \varphi_2 x_{t-2} + \cdots + \varphi_p x_{t-p} + \varepsilon_t \tag{3}$$

其中,

$$\varepsilon_t = a_t - \theta_1 a_{t-1} - \cdots - \theta_q a_{t-q}$$

(4)

把式(4)代入式(3),得到普遍形式:

$$\begin{aligned} x_t - \varphi_1 x_{t-1} - \varphi_2 x_{t-2} - \cdots - \varphi_p x_{t-p} = \\ a_t - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} - \cdots - \theta_q a_{t-q} \end{aligned}$$

(5)

其中, $\{a_t\}$ 为白噪声序列; p, q 为模型阶数。

引进线性推移算子 B :

$$Bx_t = x_{t-1}, B^k x_t = x_{t-k}$$

(6)

并令

$$\begin{aligned} \varphi(B) &= 1 - \varphi_1 B - \varphi_2 B^2 - \cdots - \varphi_p B^p \\ \theta(B) &= 1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \cdots - \theta_q B^q \end{aligned}$$

(7)

则式(5)可表示为:

$$\varphi(B)x_t = \theta(B)a_t$$

(8)

当 $\theta_i=0$ 时,模型可转化为自回归 AR(p)模型,当 $\varphi_i=0$ 时,模型可转化为滑动平均 MA(q)模型。模型阶数 p, q 的选择主要依靠自相关系数和偏自相关系数进行判断,并参考 AIC 准则和 BIC 准则^[8]。回归完成之后,进行方差分析和参数显著性检验,验证模型的有效性,并对模型阶数作进一步调整,重复以上过程直到得到较好的结果。

2 数据比较与分析

本文使用时间序列的时域分析部分,利用 IGS 提供的全球电离层 TEC 结果进行未来一周的 TEC 预报。取 2008 年年积日 1~14、101~114、201~214、301~314 等 4 个时间段内高纬度(75°N,125°E)、中纬度(45°N,125°E)和低纬度(5°N,125°E)电离层格网 TEC 数据为时间序列样本进行 TEC 时间序列分析和预报,分别用前 1~7 d 和前 2~7 d 的 TEC 值,利用 ARMA(p, q)模型预报后 7 d 的 TEC 值。把 ARMA(p, q)每天预报的 TEC 数据分别与 IGS 发布的 TEC 进行比较。定义相对精度 P :

$$P = 1 - \frac{|I_{\text{pre}} - I_{\text{igs}}|}{I_{\text{igs}}}$$

(9)

式中, I_{pre} 为预报的电离层 TEC; I_{igs} 为 IGS 发布的 TEC。

图 1 给出了 2008 年年积日 208~214 日(2008 年 7 月 26 日至 8 月 1 日)TEC 预报结果值与原始值的比较结果。图中横坐标表示预报的天数,纵坐标表示 TEC。从图中可以看出,利用时间序列分析进行 TEC 预报,精度较高。

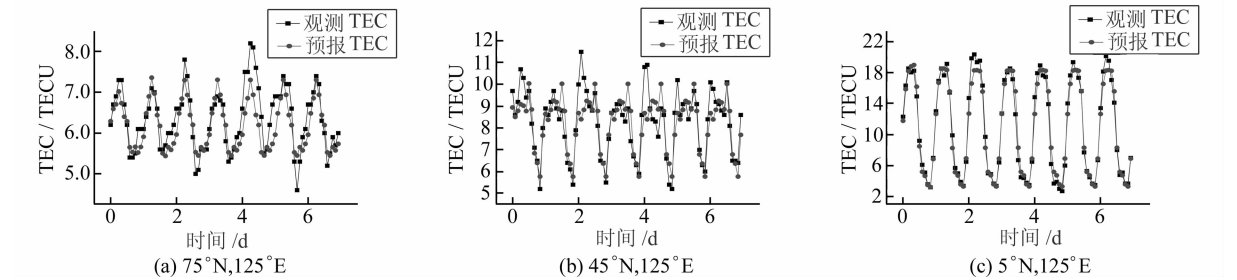


图 1 2008 年年积日 208~214 日 TEC 预报结果
Fig. 1 TEC Forecast Results of 208-214 Days in 2008

图 2 给出了 TEC 原始值与预报值之差。图中,横坐标表示数据的数目,纵坐标是预报残差,单位是 TECU。从图 2 可看出,对于全部数据,在 7 d 之内的大多数情况下,TEC 预报精度在±3 TECU (IGS 所给精度范围之内)之内。表 1 给出了预报残差的分类百分比统计表,超过 60%的预报值残差在±1 TECU 以内,与图 2 反映的情况一致,而且随着预报天数的增加,预报的精度逐渐降低。

为了增加本文中 TEC 预报模型与其他模型的可比性,图 3 给出了所有格网数据在 4 个时段中预报 7 d 时的相对精度。从图 3 可知,本文中预报 TEC 模型,预报 7 d 时的平均相对精度为 87.8%,预报精度大于 85%的预报值占有所有预报

值的 78.6%。

表 1 4 个时段预报值残差 Δ 的分类百分比统计
计表(7 d 数据)

| Tab. 1 Predicted Residual Value Δ Category Percentage Tables of Four Times | | | | |
|--|--------------|---------------------|---------------------|--------------|
| 预报 天数 | Δ< 1 TECU | 1 TECU≤Δ <2 TECU | 2 TECU≤Δ <3 TECU | Δ≥ 3 TECU |
| 1 | 69.4 | 18.1 | 6.9 | 5.6 |
| 2 | 75.0 | 16.7 | 3.5 | 4.9 |
| 3 | 73.6 | 17.4 | 4.9 | 4.2 |
| 4 | 75.0 | 20.8 | 3.5 | 0.7 |
| 5 | 60.4 | 27.8 | 6.9 | 4.9 |
| 6 | 60.4 | 19.4 | 13.9 | 6.3 |
| 7 | 63.9 | 21.5 | 8.3 | 6.3 |

为了分析纬度变化对 TEC 预报精度的影响,

图 4 给出了 4 个时段高纬、中纬和低纬格网预报 7 d 的平均预报结果。从图 4 可以看出,高纬度格网预报误差最小,中纬度格网次之,低纬度格网(5°N)的预报误差最大,但也很少超过±2 TECU。

表 2 和表 3 分别给出了 4 个时段利用前 2~7 d

和前 1~7 d 数据预报后 7 d 数据的残差分类统计表。从表 2 和表 3 中可以看出,预报精度大致随着预报时间的增加而逐渐降低。对比表 2 和表 3 可以看出,在预报天数相同时,采用 7 d 数据的预报精度和采用 6 d 数据的预报精度相当,没有明显差异。

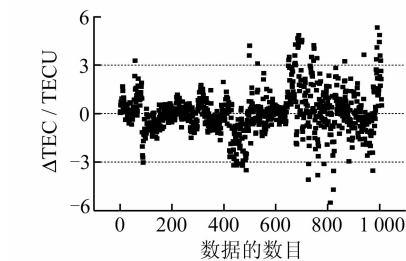


图 2 所有预报值的预报残差
Fig. 2 Predicted Residual Value of All Forecast Results

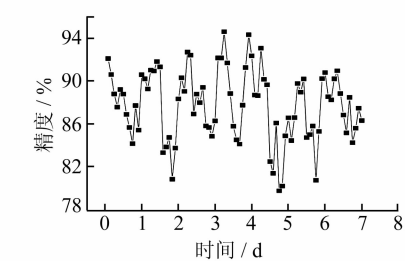


图 3 预报 7 d 时的相对精度
Fig. 3 Relative Accuracy of 7 d Forecast Value

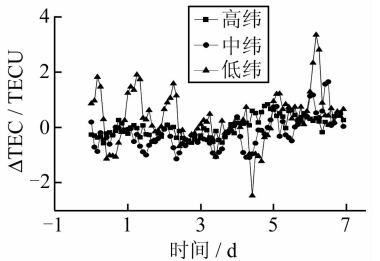


图 4 不同纬度数据预报结果比较
Fig. 4 Forecast Results Comparison of Different Latitude Data

表 2 采用 7 d 数据的预报结果
Tab. 2 Forecast Results of 7 d Data

| 纬度 | 指标 | 预报天数 | | | | | | | 平均 |
|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | |
| 75°N | 中误差 | 0.81 | 0.76 | 0.70 | 0.66 | 0.77 | 0.79 | 0.77 | 0.75 |
| | 相对精度 | 83.02 | 80.99 | 81.36 | 82.08 | 81.83 | 81.97 | 82.33 | 81.94 |
| 45°N | 中误差 | 0.87 | 0.86 | 0.92 | 0.89 | 0.95 | 1.05 | 1.08 | 0.95 |
| | 相对精度 | 91.66 | 91.38 | 91.09 | 91.32 | 90.79 | 90.60 | 90.48 | 91.05 |
| 5°N | 中误差 | 1.48 | 1.55 | 1.56 | 1.48 | 1.52 | 1.61 | 1.67 | 1.55 |
| | 相对精度 | 89.77 | 91.13 | 91.49 | 91.93 | 91.30 | 90.94 | 90.71 | 91.04 |

表 3 采用 6 d 数据的预报结果
Tab. 3 Forecast Results of 6 d Data

| 纬度 | 指标 | 预报天数 | | | | | | | 平均 |
|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | |
| 75°N | 中误差 | 0.69 | 0.73 | 0.70 | 0.68 | 0.79 | 0.83 | 0.82 | 0.75 |
| | 相对精度 | 84.69 | 81.27 | 81.53 | 82.03 | 81.68 | 81.42 | 81.54 | 82.02 |
| 45°N | 中误差 | 0.89 | 0.88 | 0.93 | 0.90 | 0.96 | 1.07 | 1.09 | 0.96 |
| | 相对精度 | 91.58 | 91.19 | 90.92 | 91.13 | 90.62 | 90.41 | 90.31 | 90.88 |
| 5°N | 中误差 | 1.46 | 1.49 | 1.53 | 1.45 | 1.51 | 1.62 | 1.67 | 1.53 |
| | 相对精度 | 89.57 | 91.22 | 91.47 | 91.97 | 91.25 | 90.83 | 90.57 | 90.98 |

全球地磁指数 K_p 可以反映磁场波动的剧烈程度,而磁场的波动可以扰乱电离层。一般地, K_p 指数大于 5 说明有或大或小的地磁风暴,而小于 5 则说明地磁场比较安静。图 5 给出了各个时段地磁指数 K_p 的平均值,从图中可以看出各个时段 K_p 值均较小,各个时段内地磁场变化较小,电离层比较稳定。表 4 给出了分时段预报精度统计表,对照图 5 和表 4 可以看出,预报的精度和地磁指数 K_p 存在一定关系。

表 4 分时段预报精度统计表

| | 时段 1 | 时段 2 | 时段 3 | 时段 4 |
|----------|-------|-------|-------|-------|
| 中误差/TECU | 1.27 | 1.57 | 0.69 | 0.81 |
| 相对精度/% | 85.65 | 86.06 | 93.89 | 86.44 |

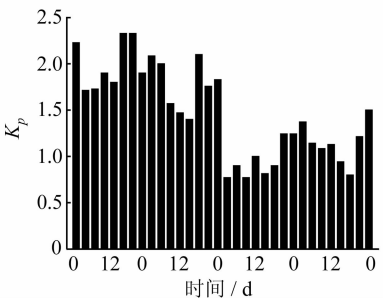


图 5 各个时段内平均地磁指数 K_p 值
Fig. 5 Average Geomagnetic Index K_p of Each Time

3 结 语

时间序列法预报 TEC 是基于数学方法的全

新预报方法。该方法可用于全球或者局部区域的 TEC 预报,只需要足够长的 TEC 时间序列,就可以利用时间序列分析短期预报该地区的 TEC,其本质就是把样本数据中隐含的数据变化的内在规律延伸到与其相邻的数据段内。本文利用时间序列分析进行电离层预报得到了很好的预报结果,表明利用时间序列进行 TEC 预报是可行的。实际上,电离层总是随纬度、经度呈现复杂的空间变化,并且具有昼夜、季节、年、太阳黑子周期等变化。本文只是进行了电离层预报的初探,选取的数据较少,而且均为电离层相对安静时期,该方法的精度和可靠性还需要进一步验证。

参 考 文 献

[1] 李征航,黄劲松. GPS 测量与数据处理[M]. 武汉:武汉大学出版社,2005

[2] 刘瑞源,刘顺林,徐中华,等. 自相关分析法在中国电离层短期预报中的应用[J]. 科学通报, 2005; 2 781-2 785

[3] Liu Z, Gao Y. Ionospheric TEC Predictions over a Local Area GPS Reference Network[J]. GPS Solutions, 2004(8): 23-29

[4] 李征航,陈锴. GNSS 电离层延迟模型的数学统一与方法扩展[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2007,32(8):699-703

[5] 蔡昌盛,高井祥,李征航. 利用 GPS 监测电离层总电子含量的季节性变化[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2006,31(5): 451-453

[6] Liu Z, Skone S, Gao Y, et al. Ionospheric Modeling Using GPS Data[J]. GPS Solutions, 2005(9): 63-66

[7] Klobuchar J A. Ionospheric Time2delay Algorithm for Single Frequency GPS Users[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronics System AES, 1986,23(3):231-325

[8] 王燕. 应用时间序列分析(第二版)[M]. 北京:中国人民大学出版社,2008

[9] Erdogan H, Arslan N. Identification of Vertical Total Electron Content by Time Series Analysis[J]. Digital Signal Progress,2009(6):740-749

[10] 张方仁,张金通. 测量误差的统计分布和检验[M]. 北京:中国计量出版社,1991

第一作者简介:陈鹏,博士生,主要从事 GPS 数据处理研究。
E-mail:chenpeng0123@gmail. com

TEC Prediction of Ionosphere Based on Time Series Analysis

CHEN Peng¹ YAO Yibin¹ WU Han¹

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: TEC is predicted by time series analysis through the ionosphere data sample released by International GPS Service. Time series of the TEC is decomposed into the trend item, periodic term and random item, then they are computed respectively. The number of model order is determined using the correlation coefficient and partial correlation coefficient. Predicted analysis of test is carried out through the data in 2008, the results indicate that the method can achieve high accuracy. The average relative accuracy of 7 d is 87. 75%. The predicted value with its accuracy greater than 60% shares more than 95% of the total predicted value, greater than 60% has 72. 6% of the total predicted value, and 95. 3% of predicted residual is less than ± 3 TECU.

Key words: ionosphere; TEC; time series analysis; predict

About the first author: CHEN Peng, Ph.D candidate, majors in GPS data processing.
E-mail: chenpeng0123@gmail. com