

对比分析电离层 TEC 对测量精度的影响

The Influence of Ionospheric TEC on Measurement Accuracy is Compared and Analyzed

单中秋 荆伟

Zhongqiu Shan Wei Jing

临海市测绘院 中国·浙江台州 317000

Linhai Surveying and Mapping Institute, Taizhou, Zhejiang, 317000, China

摘要: TEC 又称电离层电子浓度总含量, 是研究电离层时需要考虑的一个重要参量。在理论上, 测量 TEC 含量是随时间而变化的, 它可以很好地反映电离层本身的特性, 通过分析电离层 TEC 的短期预报, 从而精确测量信号传播改正。论文分别通过频谱分析法和时间序列的自回归模型 (AR 模型) 法来分析电离层 TEC 的短期预报。首先通过频谱分析法对原始数据进行拟合, 计算得到的拟合残差从而建立自回归模型, 进而分析电离层 TEC 的短期预报效果; 其次通过时间序列的自回归模型参数估计及 F 检验法分析得到电离层 TEC 的短期预报效果。

Abstract: TEC, also known as the total ionospheric electron concentration, is an important parameter to be considered in the study of the ionosphere. Theoretically, the measured TEC content changes with time, which can well reflect the characteristics of the ionosphere itself. By analyzing the short-term prediction of Ionospheric TEC, we can accurately measure the signal propagation correction. In this paper, the short-term prediction of Ionospheric TEC is analyzed by spectrum analysis and autoregressive model (AR model) of time series. Firstly, the spectrum analysis method is used to fit the original data and calculate the fitting residual, so as to establish the autoregressive model, and then analyze the short-term prediction effect of Ionospheric TEC; Secondly, the short-term prediction effect of Ionospheric TEC is obtained by estimating the parameters of autoregressive model of time series and analyzing the F-test method.

关键词: TEC; 频谱分析法; AR 模型; 电离层; 短期预报; 测量

Keywords: TEC; spectrum analysis method; AR model; the ionosphere; short term forecast; measurement

DOI: 10.12346/se.v4i1.6407

1 研究现状及分析

目前, 根据全球范围内的电离层 TEC 监测站所获得的测量数据, 利用测量数据建立合适的预报模型, 保证导航定位的精度。迄今为止, 电离层的预报模型主要有 Klobuchar 模型、国际参考电离层 IRI (International Reference Ionosphere) 模型、FAIM 模型等。利用 GPS 单频观测时, 通常采用 Klobuchar 模型进行电离层延迟改正, 但在一天中它也只能预报出电子含量的 50%~60%, 最理想的情形也不高于 75%, 且在夜间预报时产生错误。因此, 要提高 GPS 导航和定位的精度, 就需要对电离层活动进行有效监测, 精确地确定电离层 TEC, 在此基础上建立电离层延迟改正模

型, 以消除电离层对导航定位精度的影响。

自 GPS 建成运行以来, 许多电离层工作者和研究机构投入到 GPSTEC 的测量原理与数据处理方法的研究中, 取得了大量的成果。其中, 作为美国重要的空间实验室的美国喷气动力实验室 (JPL), 随后欧洲空间局 (ESA) 等机构也加入进来, 它们对电离层 TEC 的预报模型的算法有了进一步的改进, 并将观测得到的测量数据利用预报模型进行分析之后在 IGS 网站上发布其分析后的产品 GIM。这些机构通过很好完成上述工作, 便建立了一整套的全球 TEC 预报系统, 这个系统按一定的时间频率在网上公布并绘制 TEC 预报图, 除此之外, 诸多国家也利用此技术建立了该地区的

【作者简介】单中秋 (1969-), 男, 中国浙江临海人, 本科, 工程师, 从事工程测量研究。

TEC 现报系统。

近年来,一种通过 GNSS 信号推算电离层中电子密度的电离层 CT 技术,由于具有在全球范围内都有很好的测量效果,激发了电离层 TEC 建模与预报的众多工作者的兴趣。Liu 等利用层析技术处理区域 GPS 观测网络数据对加拿大区域上空电离层 TEC 建模并进行了几分钟到 30 分钟的预报,取得了较好的预报效果。Orhan Arikan 等利用层析技术对 IRI 模型进行了改善。虽然层析技术对较短时间内的预报具有较好的效果,但由于其模型不够简单,数据处理比较麻烦,这也限制了它的应用。利用时间序列分析理论和方法对电离层 TEC 预报由于数据处理量少,建模相对简单,模型有很好的外延性,适应于电离层 TEC 的预报,因此成为目前电离层预报研究的一个热点。

2 频谱分析法

频谱分析是将随时间变化的测量数据利用傅里叶级数变换将其转换为频率域进行分析处理,这样原始的观测数据在频率域中就呈现为具有一定周期性的函数,有利于很好地判断其复杂的周期数据。由于电离层 TEC 变化具有一定的变化规律,其变化由不同频率的余弦波和正弦波组成的谐波叠加而成,因此地面 GPS 观测站在对电离层 TEC 进行测量时,可以按照一定的时间间隔,在某些特定的时间点上数据采样,然后根据时间序列进行分析计算^[1]。频谱分析的预处理是频谱分析的重要一步,包括对序列的中心化和标准化处理以及平稳性检验等。严格来讲,频谱分析只有对平稳的序列进行处理时才会出现较好的效果,对于非平稳时间序列处理时会产生虚假成分,处理后的数据会有较大误差,因此需要将非平稳序列进行平稳化处理,即消除趋势项等。

2.1 频谱分析法的测量原理

由地面的基准站测量得到电离层 TEC 的数据采用频谱分析法进行处理,其趋势项可以用:

$$F(t) = c_0 + c_1 t + c_2 t^2 \quad (1)$$

拟合,当然也可以用其他简单的初等函数进行拟合,如一次函数 $F(t) = mt + n$ 或对数函数 $F(t) = m \ln(t) + n$ 等。实践表明,样本容量不太大的序列,通过一些简单的数学函数就能够将一些简单的趋势项消除。在程序编写时,通常利用 polyfit 命令来实现,这样既操作简单又可以很快地得到该模型中所需的参数。

2.1.1 测量周期项的确定

测量周期项其实是一个比较简单的公式序列,首先要对其周期性进行分析,建立出整体的预报模型,然后使这个预报模型在周期性变化的影响因素下形成一个变量,此时这个变量便具有了一定的周期性特征,最后再通过推理和计算形成具有这个周期性特征成分的电离层 TEC。当测量周期性特征成分确定后,将观测的原始数据去掉趋势项后得到残差值,利用傅里叶级数变换对残差值中蕴含的周期进行确定^[2]。

序列的周期项一般假定为:

$$V(t) = a_0 + \sum_{i=1}^{\infty} A_i \sin(\omega_i + \varphi_i) \quad (2)$$

其中, A_i 、 ω_i 、 φ_i 分别为第 i 个分波的振幅、频率和相位; a_0 为常数。令: $a_i = A_i \sin \varphi_i$, $b_i = A_i \cos \varphi_i$, 经过傅里叶变换则整个公式就可以转化为:

$$V(t) = a_0 + \sum_{i=1}^{\infty} (a_i \cos(\omega_i t) + b_i \sin(\omega_i t)) \quad (3)$$

把趋势项去掉之后的假定电离层 TEC, 余下的序列被称之为 P_i ($i=1,2,\dots,n$)。我们常常假定 $V(t)$ 有 k 个谐波分量(简称分波),也即实验周期的个数, k 分波每个各有 $n/1, n/2, \dots, n/k$ 年的周期,在第 i 个分波的实际周期为 $T_i = n/i$ ($i=1,2,\dots,k$), 频率 $\omega_i = 2\pi/n$, 则周期项公式就可以表示为:

$$V(t) = a_0 + \sum_{i=1}^{\infty} \left(a_i \cos\left(\frac{2\pi i}{n} t\right) + b_i \sin\left(\frac{2\pi i}{n} t\right) \right) \quad (4)$$

2.1.2 测量周期的显著性检验

按照一般情况,假定的 k 个周期为实验周期,其主要周期的确定,利用 F 分布检验法对它进行一定的显著性检验,为的是能够确定主要周期。一种曲线的回归拟合应该是随机序列频谱展开,在此基础上进行的显著性检验就是回归效果的检验,我们利用第 i 个分波的回归方差 σ_i^2 (自由度为 2) 与剩余方差 $\sigma^2 - \sigma_i^2$ (自由度为 $n-2-1$) 之比服从 F 分布。即:

$$F_i = \frac{\sigma_i^2/2}{(\sigma^2 - \sigma_i^2)/(n-2-1)} \quad (5)$$

其中, σ_i^2 为整个序列的方差, $\sigma_i^2 = (a_i^2 + b_i^2)/2$, a_i 、 b_i 是周期项中的傅里叶系数。给定显著水平 α , 根据查表可得 F_α 。若 $F_i > F_\alpha$, 则该分波对应的周期是显著的。反复进行上述步骤,当发现周期不显著时则停止进行检验,并将主要周期记录下来^[3]。若一共选了 q 个主要周期,则周期项变为:

$$V(t) = a_0 + \sum_{m=1}^q \left(a_{im} \cos\left(\frac{2\pi i}{n} t\right) + b_{im} \sin\left(\frac{2\pi i}{n} t\right) \right) \quad (6)$$

2.1.3 建立频谱分析测量模型

采用上述模型,得到的周期项再加上趋势项便形成了频谱分析法的预报模型。

$$H(t) = F(t) + V(t) = c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + a_0 + \sum_{m=1}^q \left[a_{im} \cos\left(\frac{2\pi i}{n} t\right) + b_{im} \sin\left(\frac{2\pi i}{n} t\right) \right] \quad (7)$$

2.2 频谱分析法对电离层 TEC 的分析

频谱分析法在较长的序列和动态的资料有一定的优势,是因为动态资料可以容易地判断出周期成分,然而

对于非平稳的动态资料，我们应该先对其作平稳化处理工作，即趋势项的去除，与此同时，周期成分就成了一个比较明显的序列，然后进行周期性的分析（见图 1）。

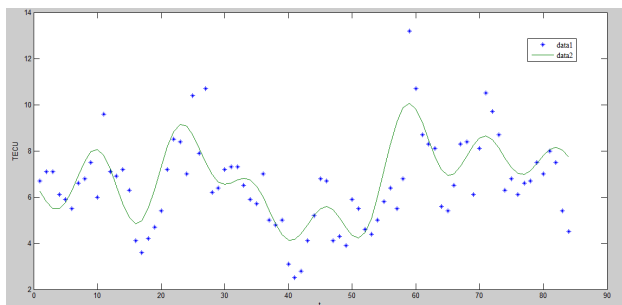


图 1 频谱周期性分析拟合图

3 自回归模型测量法

自回归模型测量法分析就是通过分析变量随时间变化的历史过程，揭示其变化发展的规律，分析预测未来发展的状态。利用地面监测系统对电离层 TEC 进行监测时，自回归模型法作为分析数据的一种较为合适的方法，与此同时，建立一个动态预测模型并对未来电离层变化进行预测^[4]。所谓自回归模型法的参数估计，就是在模型的结构和阶次已经确定的情况下，对模型参数进行估计，所建立的模型是实际时间序列的“最佳”拟合模型。

但是，在实际过程中，电离层 TEC 是通过一定的测量手段获得，不可避免地含有一些随机误差，在这样的情况下，普通的最小二乘法难以满足结果的最优性，因此在自回归模型法的基础上加入整体最小二乘法的思想，既在考虑本身观测值的误差的同时，又考虑了与其相关的前一个或前几个时刻的测量值的误差，再利用最小二乘法求其参数，为得到更准确的数据提供保证。

论文应用频谱分析测量法和时间序列的分析理论和方法对电离层 TEC 进行预报，首先是利用频谱分析测量法对 2012 年 1 月 1—7 号的总共 84 个的原始数据进行建模，得到较为简单的频谱分析模型，用简单的初等函数确定模型的趋势成分，去掉趋势项后，利用傅里叶函数将周期项进行确定，利用 F 分布检验法确定主要周期，将趋势项与周期项相加得到频谱分析法的预报模型。再用时间序列分析法对剩余的残差序列进行分析处理，避开了简单的 AR 模型，利用 F 检验法对模型阶数的确定，采用最小二乘法对模型参数进行估计，以此才能够得到较高拟合精度的模型。

3.1 自回归模型测量参数

模型测量参数和阶数的确定是整个模型建立的核心问题，因此，我们首先确定模型参数和阶数，然后再分析和探讨自回归模型的主要特征。因此在对原始数列进行平稳化的预处理后，必须先对模型中的参数进行确定，在采用不同的方法时会出现不同的误差，误差较大说明精度较低，误差较

小则精度较高。首先采用自相关函数和偏相关函数对原始时间序列进行考察以及对模型阶数的确定则通常利用 AIC、BIC 准则。吴贤铭与 Pandit 二人都从系统本身的特性出发，进而提出了一种动态系统（Dynamic Data System ,DDS）建模的理论，基于如下的 ARMA (n, n-1) 模型对时间序列进行统一建模。

$$z(t) - \phi_1 z(t-1) - \dots - \phi_p z(t-p) = a(t) + \theta_1 a(t-1) + \dots + \theta_{n-1} a(t-n+1) \quad (8)$$

当 n 逐渐逼近无穷时，AR (n) 则可以任意精度逼近 ARMA (p, q) 模型。由此说来，我们就可以利用有限阶的 AR 模型对其进行分析，在估计参数时 AR 模型相对简单，计算量和存储量较小，从而对传统建模方法有了很大的提高。我们只有对过去的变化特征有很好地掌握，才能建立完善的模型使得拟合精度较高，则再进一步预测未来变化特征越有价值，就越接近真实测量值。

3.2 自回归模型的 F 检验法

在自回归模型的发展过程中，模型阶数的确定一直是人们关注的问题，其理论的研究方法也广泛地应用在人们的生产生活中。然而模型阶数越高，所需的信息就越多。因此，在信息量一定的前提下，参数越多，产生的误差也就越大，模型的实用性也就越差，但反过来说，模型参数越少，拟合残差就会越大。这样我们就需要统筹兼顾两个方面，既要让它拟合残差尽量的小也要自回归模型更加实用。基于已知的 n 个观测数据 $(z(i), i = 1, 2, \dots, n)$ 从低阶到高阶对模型参数进行确定，然后根据 F 检验法对其进行验证以便获得合适的模型，下面就对 F 检验法进行简单的介绍。

设有观测数据 $(z(1), z(2), \dots, z(n))$ ，先设阶数 p, n 为观测序列的长度，则建立自回归 AR 模型为：

$$z(t) = z(t-1)\phi_1 + z(t-2)\phi_2 + \dots + z(t-p)\phi_p + a(t) \quad (9)$$

在考虑 p-1 阶模型：

$$z(t) = z(t-1)\phi_1 + z(t-2)\phi_2 + \dots + z(t-p-1)\phi_{p-1} + a(t) \quad (10)$$

先对 (10) 式进行单独平差，求得相对高阶模型的参数与残差平方和 S_1 ，然后，在对 (11) 式同样进行平差，获得相对的低阶模型的参数和残差平方和 S_2 。构造统计量：

$$F = \frac{\frac{S_1 - S_2}{p_1 - p_2}}{\frac{S_2}{n - p_2}} \sim F(p_2 - p_1, n - p_2) \quad (11)$$

设定显著性水平 α ，一般选取 $\alpha = 0.05 \sim 0.10$ （对应的置信度为 90%~95%）。如果计算获得 $F > F_\alpha(p_2 - p_1, n - p_2)$ 时，说明存在显著性差异，低阶模型并不适用于建立该模型，可采用升阶建模；反之，则认为低阶模型适用。原本用于动态信号处理的频谱分析法用作处理电离层 TEC，能够达到较好的拟合效果。再利用时间序列分析中的 AR 模型进行残差处理，时间序列分析本身就是按照周期性

的变化进行分析,正好符合电离层 TEC 的变化规律,以此进行残差处理能够达到较好的效果。论文将利用组合方法对经过中国哈尔滨市的经度上空的电离层 TEC 进行研究,计算模型的精度进而分析出与模型有关的有益的结论。比原有的单一方法预报更具有精度较高,所需数据少,简单易行的优点。

3.3 自回归模型法对测量电离层 TEC 的分析

利用自回归模型法中的自回归 AR 模型入手,通过先对其基本概念和公式的了解,其次简单地介绍了一下模型参数及确定阶数的方法,主要介绍应用最小二乘进行参数求解的方法以及选取 F 检验法,对模型的定阶起到了较好的效果(见图 2)。

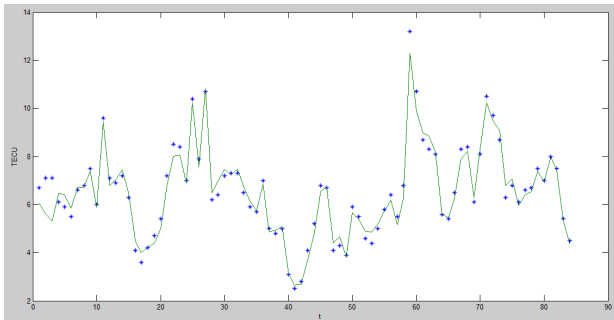


图 2 自回归模型拟合图

通过分析上述自回归模型,确定了整个测量建模的核心环节,而且它也作为单独的一个理论被人们所研究,所以简单地讲参数一旦确定,模型迎刃而解。再利用自回归模型进行问题的研究时,有很多的参数估计方法可供选择,常见的有相关矩估计、最大似然估计、最小二乘估计等等。最小二乘估计是常用的最佳估计算法,相对于矩估计来说它属于精估计,这种方法相对简化和实用。单一的频谱分析方法,在测量电离层 TEC 时误差较大,不能得到较好的效果,因此

将频谱分析方法与原始的时间序列作差,得到的残差序列再用 AR 模型进行拟合,自回归 AR 模型能将与时间有关的序列进行很好的分析与处理。将两种分析方法结合称之为组合方法,因此用组合方法对电离层 TEC 进行分析将能得到较好效果。

4 结语

作为研究电离层特性的一项重要指标即电离层总电子含量 TEC,我们分别采用了频谱分析法和自回归模型法相比较的方式来分析和预报电离层 TEC,进而对电离层做更加深入的了解。原本用于动态信号处理的频谱分析法用作处理电离层 TEC,能够达到较好的拟合效果。与此同时,利用时间序列模型法分析电离层总电子含量 TEC 进而进行残差处理。

自回归模型法本身就是按照周期性的变化进行分析,正好符合电离层 TEC 的变化规律,以此进行残差处理能够达到较好的效果。论文将两种不同的方法分别运用到了对电离层总电子含量 TEC 短期预报分析的研究上,给出了各自的特点。通过计算各模型的测量精度进而分析出与模型有益的结论,这比原有的单一方法测量更具有精度较高,所需数据少,简单易行的优点。

参考文献

- [1] 吴怀宇.时间序列分析与综合[M].武汉:武汉大学出版社,2004.
- [2] 博克斯.时间序列分析预测与控制[M].顾岚主,译.北京:中国统计出版社,1997.
- [3] 刘派,卢文喜,徐威.基于频谱分析法的锦州市地下水位动态预报[J].人民黄河,2011,33(2):62-63.
- [4] 吴春勇,张岩,李泽文.浅谈频谱分析法及其在降水量预报方面的应用[J].中国环境管理,2007,40(3):40-42.