

文章编号:1671-8860(2008)05-0479-05

文献标志码:A

几种地基 GPS 区域电离层 TEC 建模方法的比较及其一致性研究

柳景斌^{1,2} 王泽民¹ 章红平³ 朱文耀³

(1 武汉大学测绘学院中国南极测绘研究中心,武汉市珞喻路129号,430079)

(2 SIRF技术有限公司,上海市新金桥路28号,201206)

(3 中国科学院上海天文台,上海市南丹路80号,200030)

摘要:利用 GPS 实测资料实现了中国区域电离层电子含量建模,比较和评估了多项式模型、三角级数模型和低阶球函数模型的监测精度及存在的问题。研究表明,在平静电离层的条件下,多项式模型和低阶球函数模型拟合的精度较好,但前者存在明显的边际效应;三角级数模型在用于大区域拟合时精度较差;高纬度地区模型拟合的精度要优于低纬度地区。根据这些模型参数设置的特点以及电离层本身的变化分布规律,分析了这些差异存在的原因。

关键词:GPS; 电离层; 区域电离层模型; 精度; 边际效应

中图法分类号:P228.42

为了利用 GPS 双频无线电信号研究电离层在时间和空间上的分布与变化规律,通常利用 GPS 资料对电离层电子含量在时间和空间上建模。有关学者提出了许多基于 GPS 观测值的电离层模型,包括全球模型和区域模型。其中,最基本也是最主要区域电离层模型有多项式模型 (Komjathy, 1997)、三角级数模型^[1,2]和低阶球函数模型 (Wilksom 等, 1995)。为了分析比较上述三种模型应用于中国区域的精度及可用性,本文用这三种模型分别处理了中国境内近 40 个 GPS 观测站 2004 年全年的数据,以 GIM 模型 (CODE) 为参照,综合比较了这三个模型结果的一致性及其在时间与空间分布上的差异,并根据这些模型参数设置的特点以及电离层本身的变化分布规律,分析了这些差异存在的原因。

1 地基 GPS 区域电离层建模方法

1.1 电离层单层模型及投影函数

通常,电离层处在离地面约 50~2 000 km 的高度范围内^[3],在大约 300 km 高度处,电离层中

的自由电子密度最大。GPS 电离层研究中,通常引入单层模型来代替整个电离层,即假设所有的自由电子都集中在某一高度 H 处的一个无限薄的球面上 (Manucci 等, 1999)。假设电离层薄层高度为 H ,地球平均半径为 R ,卫星到地面接收机信号传播路径与电离层薄层的交点叫电离层穿刺点 (ionospheric pierce point, IPP),在接收机处,卫星的天顶距为 z ,在穿刺点处的天顶距为 z' ,则有:

$$z' = \arcsin \left[\frac{R}{R+H} \cos z \right] \quad (1)$$

本文采用 $H=428 \text{ km}$ ^[4]。

GPS 信号感应的是其信号传播方向路径上的电离层总电子含量 (TEC),通常借助于电离层投影函数 mf 实现倾斜路径上的电子含量 (TEC) 到单层模型 (即穿刺点处) 垂直方向上电子含量 (VTEC) 之间的映射,从而实现电离层模型参数化。一般将 mf 视为卫星高度角 (天顶距) 的函数,定义为 ipp 处斜距电离层延迟与垂直电离层延迟的比值:

$$mf(z') = \text{TEC}(ipp, z') / \text{TEC}(ipp, 0) =$$

$$\text{TEC}(\text{ipp}, z') / \text{VTEC}(\text{ipp}) \quad (2)$$

常用的电离层投影函数有很多种,本文采用其中最简单的三角函数模型 SLM 投影函数(Sardon, 1997):

$$mf(z') = 1/\cos(z') \quad (3)$$

1.2 多项式电离层模型

多项式模型是将 VTEC 看作是纬度差 $\varphi - \varphi_0$ 和太阳时角差 $S - S_0$ 的多项式函数,其具体表达式为:

$$\text{VTEC} = \sum_{i=0}^n \sum_{k=0}^m E_{ik} (\varphi - \varphi_0)^i (S - S_0)^k \quad (4)$$

式中, n 和 m 为多项式的阶数; φ_0 为测区中心点的地理纬度; S_0 为测区中心点 (φ_0, λ_0) 在该时段中央时刻 t_0 时的太阳时角,即 $S - S_0 = (\lambda - \lambda_0) + (t - t_0)$; λ 为穿刺点的地理纬度; t 为观测时刻; E_{ik} 为多项式模型系数。本文取 $n=4$, $m=5$, 模型的参数个数为 $5 \times 6 = 30$ 。

1.3 三角级数电离层模型

若记 ϕ_m 为卫星电离层星下点 SIP 的地磁纬度, t_{SIP} 为 SIP 的地方时, $h = 2\pi(t_{\text{SIP}} - 14)/24$, 则根据 VTEC 的时空变化特点, 可将 VTEC 的周日变化表示为以下几个部分影响的合成: A_1 (与地方时和纬度以外因素有关的综合变化)、 $\sum_i^{N_2} \{A_i \phi_m^i\}$ (仅与纬度有关的变化)、 $\sum_i^{N_3} \{A_i h^i\}$ (仅与地方时有关的变化)、 $\sum_{i=1, j=1}^{N_1, N_J} \{A_i \phi_m^i h^j\}$ (与纬度和地方时有关的综合变化项)、 $\sum_{i=1}^{N_4} \{A_{i1} \cos(ih) + A_{i2} \sin(ih)\}$ (与地方时有关的周期变化综合影响项), 其中, A_i 为待估的 VTEC 参数变量。调整 A_i 的序号, 合成以上各项变化, 可得三角级数电离层 VTEC 模型如下:

$$\text{VTEC} = A_1 + \sum_{i=1}^{N_2} \{A_{i+1} \phi_m^i\} + \sum_{i=1}^{N_3} \{A_{i+N_2+1} h^i\} + \sum_{i=1, j=1}^{N_1, N_J} \{A_{i+N_2+N_3+1} \phi_m^i h^j\} + \sum_{i=1}^{N_4} \{A_{2i+N_2+N_3+N_1+1} \cos(ih) + A_{2i+N_2+N_3+N_1+1} \sin(ih)\} \quad (5)$$

其中, $\phi_m = \phi_i + 0.064 \cos(\lambda_i - 1.617)$; ϕ_i 为 SIP 的地理纬度; λ_i 为地理经度。本文取 $N_2 = 0$, $N_3 = N_1 = N_J = 1$, $N_4 = 6$, 即模型参数个数为 $3 + 2 \times 6 = 15$ 个^[2,5,6]。

1.4 低阶球函数模型

用低阶球函数拟合区域电离层模型的具体形式如下:

$$\text{VTEC} = \sum_{n=0}^N \sum_{k=0}^n (A_n^k \cos k\lambda' +$$

$$B_n^k \sin k\lambda') P_n^k(\cos \phi_m) \quad (6)$$

式中, N 为球函数的阶数; A_n^k 、 B_n^k 为待估球函数系数; $P_n^k(\cos \phi_m)$ 为缔合勒让德函数; λ' 为过穿刺点的经线与过地心-太阳连线的经线之间的夹角; ϕ_m 为地磁纬度,且

$$\lambda' = (\lambda_{\text{IPP}} - \lambda_{\text{SUN}}) = \lambda_{\text{IPP}} + 15.0 \text{ (UT} - 12\text{)} \quad (7)$$

$$\phi_m = \sin^{-1}(\sin \varphi_M \sin \varphi_{\text{IPP}} + \cos \varphi_M \cos \varphi_{\text{IPP}} \cos(\lambda_{\text{IPP}} - \lambda_M)) \quad (8)$$

其中, φ_M 、 λ_M 为地球磁北极在地理坐标系中的坐标,它们是随时间变化的。本文采用四阶球函数进行拟合,即 $N = 4$, 球函数系数个数为 25 个。

1.5 GIM 全球电离层模型

本文在分析与评价上述三个局部电离层模型时,均与全球电离层模型 GIM 进行比较。GIM 模型是由欧洲定轨中心 CODE 开发的,采用了球谐函数展开式来描述全球电离层总电子含量的时空分布及变化,其数学模型如下 (Schaer 等, 1998):

$$E_v(\beta, s) = \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^n \tilde{P}_{nm} (\sin \beta) (\tilde{C}_{nm} \cos ms + \tilde{S}_{nm} \sin ms) \quad (9)$$

其中, β 为穿刺点的地理纬度或地磁纬度,取决于采用的坐标系; $s = \lambda - \lambda_0$ 为穿刺点的日固经度, λ 是穿刺点的经度, λ_0 是太阳的经度; n_{\max} 为球函数展开式的最高阶数; \tilde{P}_{nm} 为正规化的 n 阶 m 次缔合勒让德函数; \tilde{C}_{nm} 、 \tilde{S}_{nm} 为未知的球谐系数,即全球电离层模型参数。

球谐函数的零阶项 C_{00} 代表了该时刻全球电离层总电子含量的平均值,此时,全球电离层总电子含量的个数可表述为 $n_e = 4\pi R'^2 C_{00}$, $R' = R + H$, 是电离层薄球壳的半径。

2 数据处理及硬件延迟偏差的剔除

本文利用的 GPS 数据主要来自中国区域的两个多功能 GPS 连续运行跟踪网——中国地壳运动 GPS 监测网和上海地区 GPS 综合应用网,其中,中国地壳运动 GPS 监测网由 25 个遍布全国的台站组成,上海地区 GPS 综合应用网由 14 个台站组成,主要覆盖了上海市及周边的江、浙、皖三省的部分地区,这两个网包含了中国境内的 5 个 IGS 跟踪站 (SHAO、WUHN、TWTF、URUM 和 LHAS)。

利用 GPS 伪距观测值计算电离层总电子含量 TEC 的表达式如下:

$$TEC = -\frac{1}{40.28} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (\Delta P_2 P_1 - \Delta B_{12}^S + \Delta B_{12}^R)$$

其中, $\Delta P_2 P_1 = P_2 - P_1$, 其观测精度约为 0.5 m。本文采用载波相位观测值对 $\Delta P_2 P_1$ 进行 Kalman 滤波处理, 得到的观测精度约为 0.15 m。

为了剔除接收机和卫星的硬件延迟偏差的影响, 将每天的硬件延迟偏差 ($\Delta B_{12}^S, \Delta B_{12}^R$) 分别设为一个参数。在数据处理前, 对全网每天的数据进行建模, 并联合前、后各 1 d 的数据(确保连续两天的硬件延迟偏差解的平滑), 以最小二乘法估计硬件延迟偏差, 并从 GPS 组合观测值 $\Delta P_2 P_1$ 中剔除, 获得“干净”的电离层观测值(TEC)。

为保证三种模型处理结果的可比性, 本文采用相同的建模方法。将 TEC 观测值按 2 h 分段进行建模, 每个时段一组模型参数, 每天有 12 组模型参数, 由最小二乘法解算模型参数值。时段之间进行适当的约束, 以保证时段间的连续性。

本文处理了 2004 年全年中国区域两个 GPS 跟踪网的观测数据。数据采样间隔为 30 s, 截止高度角取 20°, 卫星坐标采用国际 IGS 组织发布的 GPS 卫星精密星历, 测站坐标根据一年多的 GPS 观测资料进行整体平差得到, 精度优于 1 cm, 区域覆盖范围是北纬 10°~55°, 东经 70°~145°。

3 三种建模方法结果的分析与比较

3.1 拟合精度的比较

为了评价上述三种模型对区域电离层的总体拟合精度, 本文求 1 d 内所有穿刺点处模型值(VTEC)与观测值之差(残差)的均值与方差, 比较了 2004 年 366 d 的残差均值与方差, 如图 1 所示。三种模型全年的残差均值与方差(单位: TECU)分别为 (-0.02, 3.74)、(0.77, 5.26) 和 (0.05, 3.76)。

从图 1 可以发现:

1) 多项式模型和低阶球函数模型的残差均值较小, 且较平稳, 表明这两个模型的计算结果与 GPS 电离层 TEC 观测值基本一致, 没有明显的系统偏差; 三角级数模型的残差均值约 0.8 TECU, 这表明该模型存在系统偏差, 解算结果也不稳定。

2) 多项式模型与低阶球函数模型的残差较一致, 总体上这两个模型的拟合精度较接近; 而三角级数模型的残差均值及方差较大, 这表明三角级数模型监测电离层的精度较差, 且不稳定。从

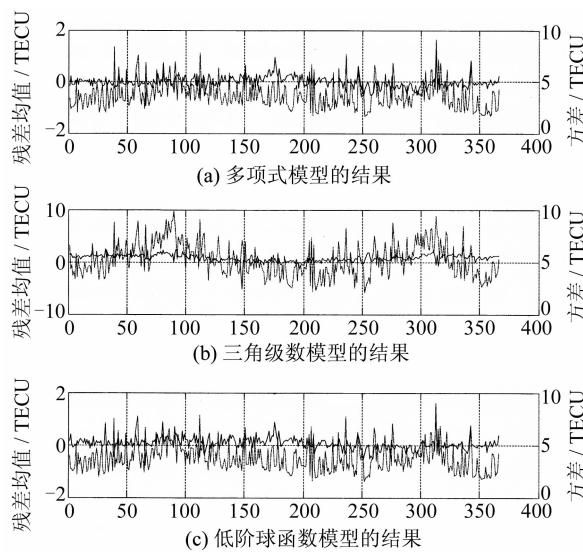


图 1 三种区域电离层模型的残差

Fig. 1 Overall Residual of Three Used Regional Models

模型的参数设置上分析, 三角级数模型尽管在经度以及时间维(地方时)采用三角级数进行了建模, 但是在纬度方向的变化以及随经纬度的综合变化, 模型未能很好地描述。因此, 三角级数模型适合于在局部区域小范围的电离层建模, 甚至能覆盖较长时段(如拟合周日变化), 但不适合应用于大区域的电离层建模^[7,8]。

3) 从图 1 中可看到, 第 313 d(2004 年 11 月 8 日), 三个模型的残差均值及方差均较大(6~10 TECU 或更大)。分析其原因, 发现该天及前一天的太阳地磁活动较剧烈, 部分时段的 K_p 系数大于 8。太阳地磁活动剧烈时, 一方面, GPS 观测值本身的观测精度会受到影响, 噪声较大; 另一方面, 此时的电离层活动变化也很剧烈, 模型模拟的精度也会较差。图 2 给出了 2004 年 11 月 7~8 日的电离层模型残差与 K_p 系数的变化细节。可以看出, 太阳地磁活动剧烈时, 电离层残差的大小在白天可能是平静时期的 3 倍, 而晚上则和平静时期接近。但是, 由于 K_p 系数为全球性指标, 而本文考虑的是局部电离层, 因此笔者认为, 图 2 并不能说明电离层模型残差与 K_p 系数在时间上的关系, 即不能说 K_p 系数增大多长时间以后, 电离层残差会变大。实际上, 考虑到本文采用的 IGS 站的大部分位于东八区, 电离层残差的峰值基本上发生在本地时间 14 时, 这与其他学者的研究结果是一致的, 同时也从另一个角度说明, 即使在太阳地磁活动较剧烈的时间, 太阳辐射的影响仍然是电离层形成及变化的主要原因。

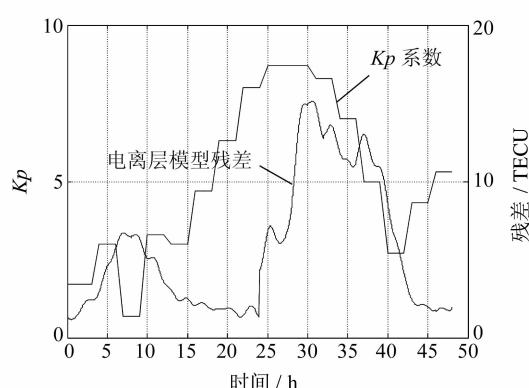


图2 2004年11月7~8日的电离层模型残差与K_p指数

Fig. 2 Residual of Regional Models and K_p Index in Nov. 7-8, 2004

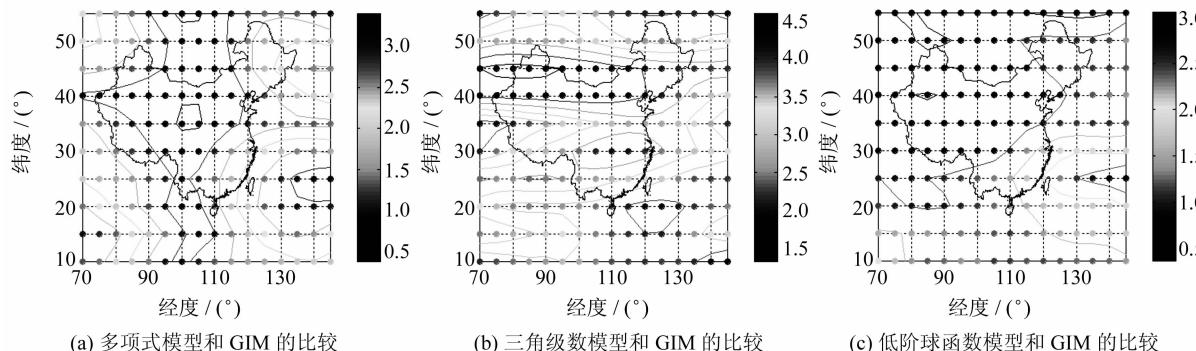


图3 电离层模型差值随空间的分布

Fig. 3 Spatial Distribution of Model's Difference

1) 多项式模型在拟合较大区域的数据时,在区域的中心有较高的精度(< 1 TECU);在区域的边界,尤其是四个角落,精度明显较差,差值达到3 TECU以上。这是因为当区域较大时,区域的球面特征便不能忽略,然而模型的参数设置未考虑这种区域的球面性,在边缘区域,其模型误差会比较明显。本文将这种中心区域精度较高、而边缘区域精度较差的现象称之为区域电离层模型的边际效应。

2) 低阶球函数模型的边际效应最小,在中心区域,差值在1 TECU以内;在边界的大部分区域,差值也在1.5 TECU左右,仅个别格网点处的差值达到了3 TECU。

3) 由于参数设置不适合大范围的区域电离层建模,总体上,三角级数模型的拟合精度较差,在大部分区域,其差值都大于3 TECU。

4) 三个模型的结果都表明区域电离层模型拟合的精度与纬度有一定的关系,高纬度地区(如北纬40°或以上)的拟合精度普遍要好于低纬度地区。笔者认为,一方面,低纬度地区受太阳活动

3.2 三模型空间适用范围的比较

为了比较区域电离层模型误差在空间域上的分布,在区域内定义 $5^\circ \times 5^\circ$ 的格网点,以GIM模型(CODE)为参考(因为实测数据不足以覆盖整个区域,本文以GIM模型为参考),计算每个格网点处的区域电离层模型值与GIM模型值之差(定义为“差值”),时间分辨率为1 min。对1 d内每一格网点处的差值取平均,作为该格网点处的差值均值。将所有格网点处的差值均值画成一张等高线图,就能清楚地看到格网点处差值的大小。图3分别为多项式模型、三角级数模型和低阶球函数模型在同一天的结果。

分析全年其他天的数据有类似的结果。从图3可以发现:

影响更明显,电离层的变化更加激烈;另一方面,低纬度地区特有的电离层结构,如电离层在赤道两边的“双驼峰”等异常结构^[5,6],都会使拟合残差变大。

4 结语

本文提到的三种区域电离层模型均是对区域电离层的数学拟合,且它们在一定条件下可以认为是等价的。但是,由于不同的模型参数设置的不同,其拟合的效果以及适用的范围也是不同的。实用中,应根据三种模型的上述特点及应用要求选取适当的模型。高纬度地区模型拟合的精度要优于低纬度地区。在电离层剧烈变化的情况下,三种区域模型均可能有较差的精度。

参考文献

- [1] Georgiadou Y, Kleusberg A. On the Effects Ionospheric Delay on Geodetic Relative GPS Positioning [J]. *Manuscripta Geodaetica*, 1998, 13(1): 1-8

- [2] Georgiadou Y. Modeling the Ionosphere for an Active Control Network of GPS Stations[D]. Delft: Delft University of Technology, 1994
- [3] Brunini C, Meza A. A New Ionosphere Monitoring Technology Based on GPS[J]. *Astrophysics and Space Science*, 2004, 290: 415-429
- [4] Schaer S. Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System[D]. Bern: University of Bern, 1999
- [5] 袁运斌. 基于 GPS 的电离层监测及延迟改正理论与方法的研究[D]. 武汉: 中国科学院测量与地球物理研究所, 2002
- [6] 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
- [7] 袁运斌, 欧吉坤. 广义三角级数函数电离层延迟模型[J]. *自然科学进展*, 2005, 15(8): 1 015-1 019
- [8] 袁运斌, 霍星亮, 欧吉坤. 精确求定 GPS 信号的电离层延迟的模型与方法研究[J]. *自然科学进展*, 2006, 16(1): 40-48

第一作者简介: 柳景斌, 博士生。研究方向为 GPS 电离层以及 GPS 导航与精密定位等。
E-mail: ljb04@163.com

Comparison and Consistency Research of Regional Ionospheric TEC Models Based on GPS Measurements

LIU Jingbin^{1,2} WANG Zemin¹ ZHANG Hongping³ ZHU Wenyao³

(1) Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2) SiRF Technology Inc., 28 New Jinqiao Road, Shanghai 201206, China)

(3) Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, 80 Nandan Road, Shanghai 200030, China)

Abstract: TEC information from 2004 all-year GPS measurements on more than 40 continuous-operation stations over China is resolved, these TEC data are modeled by three commonly used regional models: poly model(Poly), trigonometric series model(TRI) and low-degree spheric function model(LSF). The results show that Poly and LSF models are consistent with GIM model(CODE), but the former is degraded by marginal effect, and TRI model have noticeable bias to GIM model, which alarms us this model is not suitable for the region, just for the local. Furthermore, the accuracy on high latitude area is better than that on lower latitude area.

Key words: GPS; ionosphere; regional ionospheric model; accuracy; marginal effect

About the first author: LIU Jingbin, Ph. D candidate, majors in GPS precise positioning and navigation, GPS-based ionosphere specially.
E-mail: ljb04@163.com

本刊入选日本科学技术社数据库

日本科学技术社 3 月 19 日公布的 2008 年收录期刊表中, 有 767 种中国期刊入选, 其中包括《武汉大学学报·信息科学版》。日本科学技术社数据库是在《科学技术文献速报》基础上发展起来的网络版, 由 JST 出版, 被誉为世界六大著名检索系统之一。