

中国区域 VTEC 模型 Kriging 算法研究

黄 玲¹ 章红平¹ 徐培亮² 王 成¹ 刘经南¹

1 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,湖北 武汉,430079

2 日本京都大学,日本 京都,611-0011

摘要:为了对区域电离层延迟进行实时模型化,利用中国区域 GPS 实测资料,基于球冠谐函数模型、低阶球谐函数模型、多项式模型和 Kriging 内插方法,构建了电离层延迟模型。重点讨论了电离层垂直总电子含量 (vertical total electron content, VTEC) 的空间变异性、相关性的统计计算和 Kriging 内插估计方法,实现了中国区域 VTEC 格网实时建模。验证结果表明,高纬度地区 VTEC 拟合精度优于低纬度地区,Kriging 内插估计和多项式模型结果的拟合内符合精度明显优于球冠谐函数模型和低阶球谐函数模型。但多项式拟合的格网,其方差则存在明显的边际效应,拟合区域中央精度较高,区域边缘地带精度明显下降;Kriging 算法估计的格网点 VTEC 方差更符合实际情况,穿刺点多的地方,格网点精度较高。

关键词:电离层;VTEC;Kriging 内插;半变异函数;球冠谐函数模型;低阶球谐函数模型;多项式模型

中图法分类号:P228.41

文献标志码:A

电离层延迟是全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)导航定位的最严重误差源之一。精确的电离层延迟改正信息可加快精密单点定位(precise point positioning, PPP)的收敛,从而达到提高实时和后处理定位精度和收敛速度,也在一定程度上扩展了全球导航系统的应用模式及服务范围。众多学者总结并验证了多种全球和区域电离层延迟模型^[1-3]。其中,基于单层模型(single layer model, SLM)假设的二维地基 GNSS 区域电离层延迟模型的精度较高,易于实现且能满足实时性需求。其他广泛运用的区域模型主要有多项式模型、低阶球谐函数模型和球冠谐函数模型等^[1-3]。

然而,电离层是受太阳活动和地球磁场等综合影响、变化复杂的开放系统,电离层延迟在空间域上具有一定的相关性。而常用于地质统计学中的 Kriging 空间内插估计方法充分考虑了观测数据之间的空间相关性和变异性,可有效描述区域化变量的空间结构特征及其随机性的变化^[4]。因此,将 Kriging 内插应用到电离层延迟估计中,可很好地改善电离层延迟估计的效果。该内插方法已普遍应用于采矿、自然资源与环境、水文学、土

壤科学、地质学、地理信息系统、遥感、气象学、地球科学及其他有关时空变量的研究领域^[4-5]。与本文直接相关的具体应用有电离层垂直总电子含量 (vertical total electron content, VTEC)、估计^[6-7]、实时重构区域电离层 F2 层临界频率 foF2 以及预测其他 F2 层电离层参数^[8-9]。广域增强系统(Wide Area Augmentation System, WAAS)目前已采用了 Kriging 空间相关内插方案^[6],国际 GNSS 服务 (International GNSS Services, IGS) 电离层分析中心(Universitat Politècnica de Catalunya, UPC) 也基于该方法建立全球电离层 (total electron content, TEC) 格网^[7],在国内,众多学者也对此展开了相关研究并取得理想效果^[10-12]。

本文从电离层延迟实时模型化的精确性、有效性和可靠性出发,精选了中国区域陆态网络 85 个跟踪站的 GNSS 数据,在详细分析中国区域电离层延迟空间变异和相关特性的基础上,实现了用 Kriging 内插估计电离层延迟,结合常用区域模型实时建模,并对 IGS 最终电离层产品进行一致性综合对比分析,验证了 Kriging 空间内插方法的优越性。

收稿日期:2014-10-17

项目资助:国家自然科学基金重点项目(41231064);国家高技术研究发展计划(863)(2014AA123101);中央高校基本科研业务费专项资金(2042016kf0061)。

第一作者:黄玲,博士生,主要从事 GNSS 电离层建模与反演研究。huangling_gnss@whu.edu.cn

通讯作者:章红平,博士,教授。hpzhang@whu.edu.cn

1 电离层延迟 Kriging 算法

Kriging 算法从区域化变量的变异性和平相关性出发,根据无偏估计和最优估计原则,确定待估点周围采样点权重的分配,最后利用采样点的线性组合求得待估点的内插估值。在 Kriging 算法中,半变异函数和协方差函数是尤为重要的概念。

1.1 半变异函数与协方差函数关系

在 Kriging 内插估计理论中,半变异函数用来描述观测量之间空间相关性,其定义为区域化变量 $Z(x)$ 在任意间隔 h 的两点 x 和 $x+h$ 处的值之差的方差的一半^[4],其一般形式为 $\gamma(x+h, x)$,简记为 $\gamma(h)$:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{var}(Z(x+h) - Z(x)) =$$

$$\frac{1}{2} E(Z(x+h) - Z(x))^2 -$$

$$\frac{1}{2} (E(Z(x+h)) - E(Z(x)))^2$$

在二阶平稳假设下,对任意距离 h ,有:

$$E[Z(x+h)] = E(Z(x)) \quad (1)$$

因此,

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E(Z(x+h) - Z(x))^2 \quad (2)$$

其中, $E(\cdot)$ 为变量期望; $\text{var}(\cdot)$ 为方差计算。式(1)表明 Z 的期望是局部平稳的,式(2)表明观测量之间的协方差只与距离有关。

变异函数与协方差函数的关系^[5]为:

$$C(x_k, x_l) = \sigma_{\infty}^2 - \gamma(x_k, x_l) = c_0 - \gamma(x_k, x_l) \quad (3)$$

其中, $C(x_k, x_l)$ 、 $\gamma(x_k, x_l)$ 分别为两个采样点 x_k 、 x_l 观测量的协方差和变异函数。当达到一定距离时,变异函数趋于基台值 σ_{∞}^2 或 c_0 。达到此值时,说明两个测量值 $Z(x_k)$ 与 $Z(x_l)$ 之间不再有空间相关性。

样本变异函数的经验计算公式为:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{h-\delta, h+\delta}^{N(h)} (Z(x_k) - Z(x_l))^2 \quad (4)$$

由于不规则采样点间的距离不可能准确为 h 的倍数,所以有容许误差 δ ; $N(h)$ 为容许距离范围内的点对数量。

1.2 Kriging 内插估计电离层延迟

采用普通克里金法(ordinary Kriging, OK)将待估点 x_0 处的电离层延迟估计值 $\hat{I}(x_0)$ 表达为周

围一定范围内穿刺点(ionospheric pierce point, IPP)点电离层延迟观测量的加权线性组合:

$$\hat{I}(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i I(x_i) \quad (5)$$

其中, $\lambda_i (i=1, 2, \dots, N)$ 为各 IPP 点观测量 $I(x_i)$ 的权重因子。

设计 $I(x_0)$ 为待估点 x_0 处观测量的直值,则 $\hat{I}(x_0)$ 估计误差的期望值为:

$$\begin{aligned} E(\hat{I}(x_0) - I(x_0)) &= E\left(\sum_{i=1}^N \lambda_i I(x_i) - I(x_0)\right) = \\ &\sum_{i=1}^N \lambda_i E(I(x_i)) - E(I(x_0)) = \\ &E(I(x_0)) \left(\sum_{i=1}^N \lambda_i - 1\right) \end{aligned} \quad (6)$$

为满足无偏性条件,令式(6)为零,则:

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \quad (7)$$

估计值 $\hat{I}(x_0)$ 和真值 $I(x_0)$ 之间的差异,即估计误差的方差可利用变异函数表示为:

$$\begin{aligned} \text{var}(\hat{I}(x_0) - I(x_0)) &= 2 \sum_{i=1}^N \lambda_i \gamma(x_i, x_0) - \\ &\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \lambda_i \lambda_j \gamma(x_i, x_j) - \gamma(x_0, x_0) \end{aligned}$$

在式(7)的限制条件下,为使估计误差的方差达到最小,引入拉格朗日乘数因子 μ ,构建拉格朗日函数^[5]:

$$L(\lambda, \mu) = \text{var}(\hat{I}(x_0) - I(x_0)) - 2\mu(\sum_{i=1}^N \lambda_i - 1)$$

计算拉格朗日函数对 λ_i 的偏导数并置零,得:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N \lambda_i \gamma(x_i, x_j) + \mu &= \gamma(x_j, x_0), j = 1, 2, \dots, N \\ \sum_{i=1}^N \lambda_i &= 1 \end{aligned} \quad (8)$$

即

$$\begin{bmatrix} \gamma_{11} & \cdots & \gamma_{1N} & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & 1 \\ \gamma_{N1} & \cdots & \gamma_{NN} & 1 \\ 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_N \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{10} \\ \gamma_{20} \\ \vdots \\ \gamma_{N0} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

记为:

$$\mathbf{A}\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{b}$$

解算式(9)即可得出权重因子 λ_i 和拉格朗日

乘数因子 μ , 从而求得 Kriging 估计方差 $\hat{\sigma}_{OK}^2$:

$$\hat{\sigma}_{OK}^2 = \sum_{i=1}^N \lambda_i \gamma(x_0, x_i) - \gamma(x_0, x_0) + \mu \quad (10)$$

2 中国区域数据处理与结果分析

本文采用中国陆态网 85 个站 2012 年第 218~224 天的 GPS 数据, 并按照实时建模的方式进行数据处理, 模型拟合范围为 $5^\circ\sim60^\circ\text{N}$ 、 $70^\circ\sim140^\circ\text{E}$, 数据处理时间间隔为 1 min, 并在时空域上进行适当约束。其中, 多项式、低阶球谐函数和球冠谐函数模型的阶次分别为 8 阶次、5 阶次和 8 阶 6 次。图 1 为所选取的测站(红色五角星)和第 220 天中国区域地方时 14:00 穿刺点(绿色圆点)的分布情况。

由于很多测站缺乏 P_1 观测值, 本文利用 P_2 、CA 码观测值提取电离层延迟原始观测信息, 并采用组合相位观测值 $L_4 = L_1 - L_2$, 对 $P_4 = P_2 - \text{CA}$ 进行 Kalman 滤波平滑。对于硬件延迟差分码偏差(differential code biases, DCB), 本文采用全球电离层延迟球谐函数建模方式求解卫星 DCB, 再利用卫星 DCB 和球谐系数从区域测站电离层延迟原始观测信息分离区域测站接收机 DCB。从区域原始电离层延迟信息剔除硬件延迟偏差后, 再进行区域电离层 TEC 实时建模。

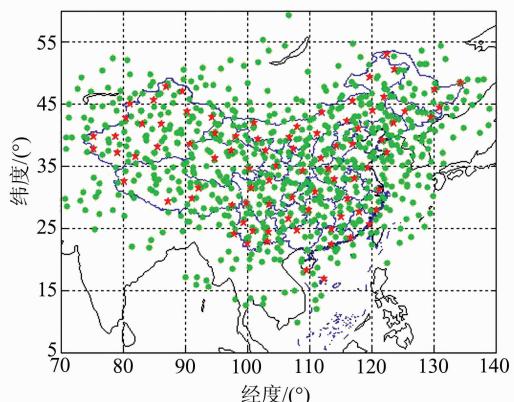


图 1 中国区域监测站和 IPP 点分布

Fig. 1 Distribution of GPS Stations and IPPs in China

2.1 半变异函数模型的确定

由式(9)可知, 求解各观测量的权重, 需准确计算待估点一定范围内任意两个已知点的半变异函数值, 因此, 半变异函数理论拟合模型的恰当选取是保证 Kriging 内插结果准确性和可靠性的先决条件。常用的变异函数模型有球状模型、指数模型^[6-7]和线性模型^[8-10]。

本文根据实测数据来选取适合于中国区域的半变异函数模型来进行数据拟合时, 点对间隔设

置为 100 km, 最小点对个数为 8, 最佳点对个数取为 30, 距离容限 $\delta(h)$ 为 30 km, 拟合半径为 2 000 km。图 2 给出了 2012 年第 220 天的球状模型(红线)和指数模型(蓝线)半变异函数拟合情况。为了说明数据的整体拟合效果, 本文以 2 h 为时间间隔来绘制时间节点处的拟合函数图。

由图 2 可以看出, 尽管在某些时刻指数模型比球状模型的拟合残差均方根(root mean square, RMS)小, 但在点对距离为 0 时, 半变异函数为负值, 与实际理论式(2)相悖; 另外, 在拟合范围内, 球状模型与经验半变异函数的符合程度优于指数模型。因此, 本文选取球状模型作为半变异函数拟合模型。

2.2 4 种建模结果比较与分析

为评定电离层 TEC 建模精度, 本文统计了单历元观测路径上 TEC 拟合残差的均方根和格网点估计精度, 并将建模结果与 IGS 发布的最终电离层延迟产品进行比较。

图 3 所示为 Kriging 内插(黑点)、球冠谐函数模型(spherical cap harmonic analysis, SCHA)(红点)、低阶球谐函数模型(spherical harmonic, SPH)(蓝点)和多项式模型(polynomial, POLY)(绿点)在 DOY218~224 的所有历元 TEC 观测量的 RMS 时间序列分布和 RMS 均值对比情况。从结果的对比分析得出, 在中国区域地方时 10:00~20:00, POLY 的内符合 RMS 在 1~3 TECU, Kriging、SCHA 和 SPH 的内符合 RMS 分别为 3 TECU、5 TECU 和 5 TECU 左右; Kriging 内插和 POLY 内符合 RMS 较其他两者的内符合 RMS 平滑度好。整体上, POLY 的效果最好, 其均值都在 3.5 TECU 以内, Kriging 内插效果其次, RMS 均值在 1.2~4 TECU, 优于 SCHA 和 SPH 模型。

值得注意的是, 多项式、低阶球谐函数和球冠谐函数模型均属于函数基模型, 利用有效观测值, 采用整体最优估计准则估算出模型系数, 再计算待估点电离层 TEC 值。而与函数基模型不同, Kriging 内插方法属于局部最优估计, 利用全局的空间相关函数, 以及待估点周围一定范围内的 TEC 观测量进行内插, 当该范围内搜索不到足量的 IPP 点时, 该待估点无法获取估值(如图 1, 由于在中国区域的 4 个角落缺乏观测值, 该部分区域的格网点无法进行 Kriging 内插, 将其视为无效格网点)。而与其他内插方法相比, 该方法可获得待估点的估计精度^[5]。因此, 对于内符合精度相当的 Kriging 空间内插和多项式模型, 根据方

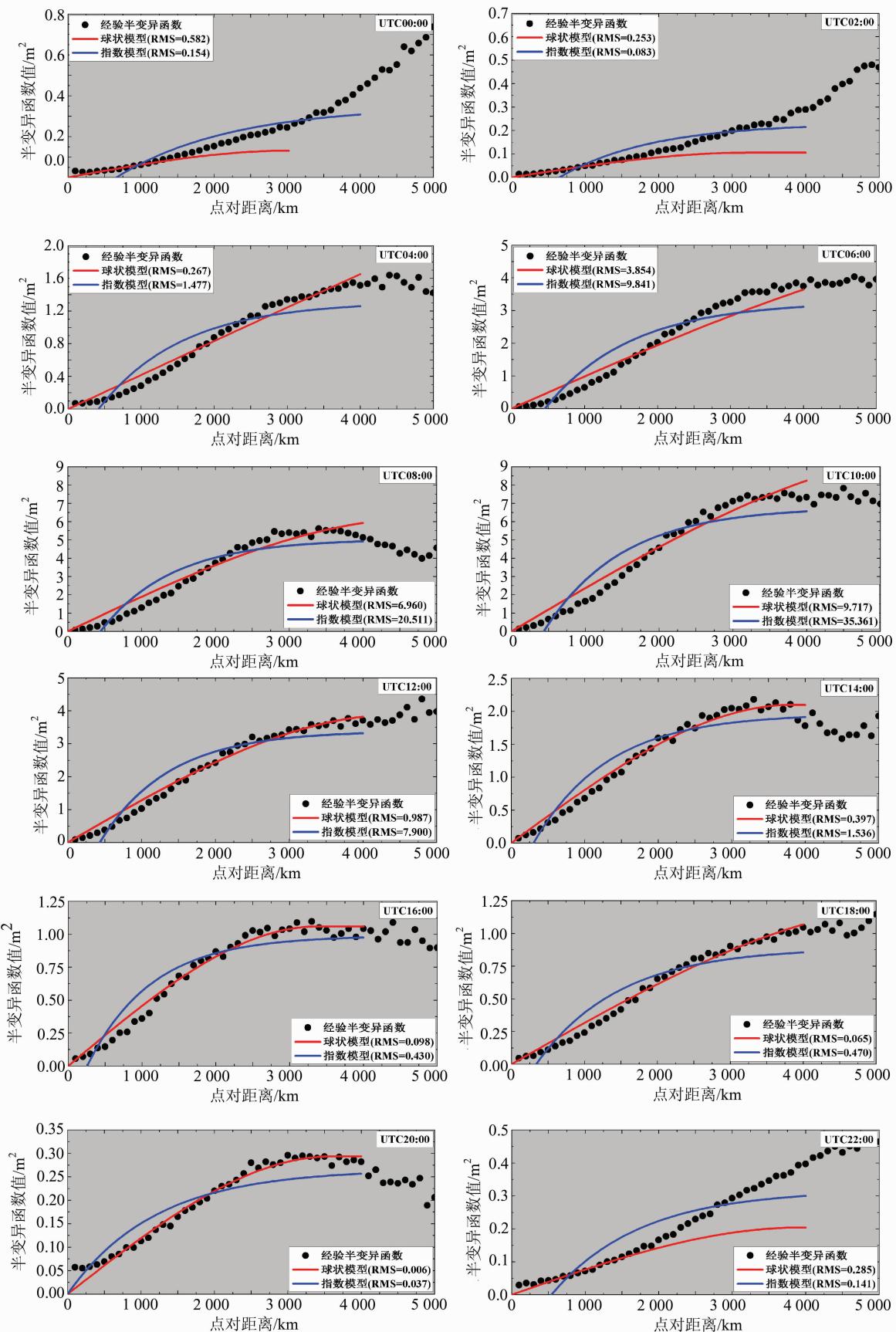


图 2 经验半变异函数及其拟合函数分布

Fig. 2 Distribution of Empirical Semivariogram and Its Fitting Function

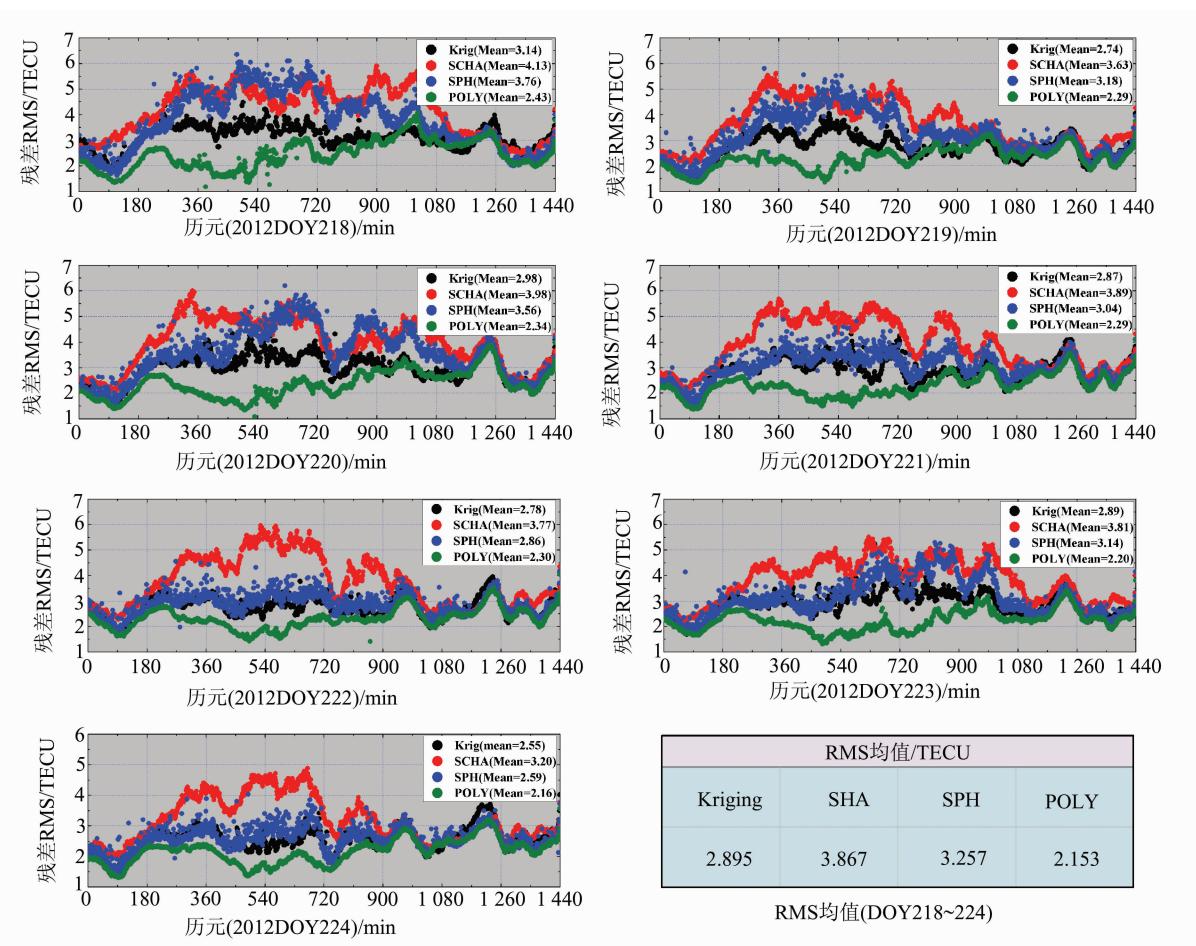


图 3 4 种区域电离层延迟模型实时建模结果精度对比

Fig. 3 Precision of Four Real-Time Ionospheric Delay Modeling Results in Comparison

差-协方差传播定律估计格网点 VTEC 估值精度,进一步对比分析两者的差异。图 4 给出了第 218 天中国区域地方时早、中、午、晚不同时刻两者的格网点 VTEC 估计精度对比结果(左列空白处为 Kriging 无效格网点)。从图中可以看出,Kriging 空间内插的格网点估计精度在整体上明显且很大程度上优于多项式模型。在中国区域地方时 08:00,Kriging 空间内插得到的整个中国区域及周边的格网点估计精度都在 3 TECU 以内;多项式的格网点估计精度呈明显的发散趋势,在中心区域($25^{\circ} \sim 40^{\circ}$ N)估计精度较高,都在 0~10 TECU 范围内,而该范围以外最高可达 50 TECU 以上,精度远远低于 Kriging 空间内插。中国区域地方时 14:00~20:00,由于电离层处于一天中的活跃期,电子密度变化大,格网点估计精度都有所降低。从左列分布云图看出,Kriging 空间内插精度存在一种簇聚现象,即其内插精度与穿刺点密度和纬度高低相关,即中低纬度估计精度明显高于低纬和高纬地区,且穿刺点密集处格网估计

精度高于穿刺点稀疏区域,符合理论与实际情况。整体上,在穿刺点分布范围内,其格网点估计精度一般在 3 TECU 左右,中国周边区域则在 10~15 TECU 左右;到夜间 22:00 时,整个区域大部分格网点估计精度在 3 TECU 以内。而相同时刻,多项式模型格网估计精度发散趋势非常明显,在区域中心精度较高,边缘区域尤其是区域角落精度与 Kriging 结果相比大大降低,且发散速度较快,边际效应非常显著。

为充分验证本研究中 Kriging 区域模型化效果及其可靠性,定义中国区域 2.5° (纬度) $\times 5^{\circ}$ (经度)的格网点,以 IGS 最终电离层延迟产品(global ionospheric maps, GIM)为参考^[13](GIM 的标称精度为 2~8 TECU, <http://igswww.unavco.org/components/prods.html>),比较了 12 个时段节点处 4 种模型的中国地区电离层图(China regional ionospheric maps, CRIM)与 GIM 在格网点处的差异,并统计了格网差值的均值和 RMS。为进行统一对比,以 Kriging 内插格网为基准,无

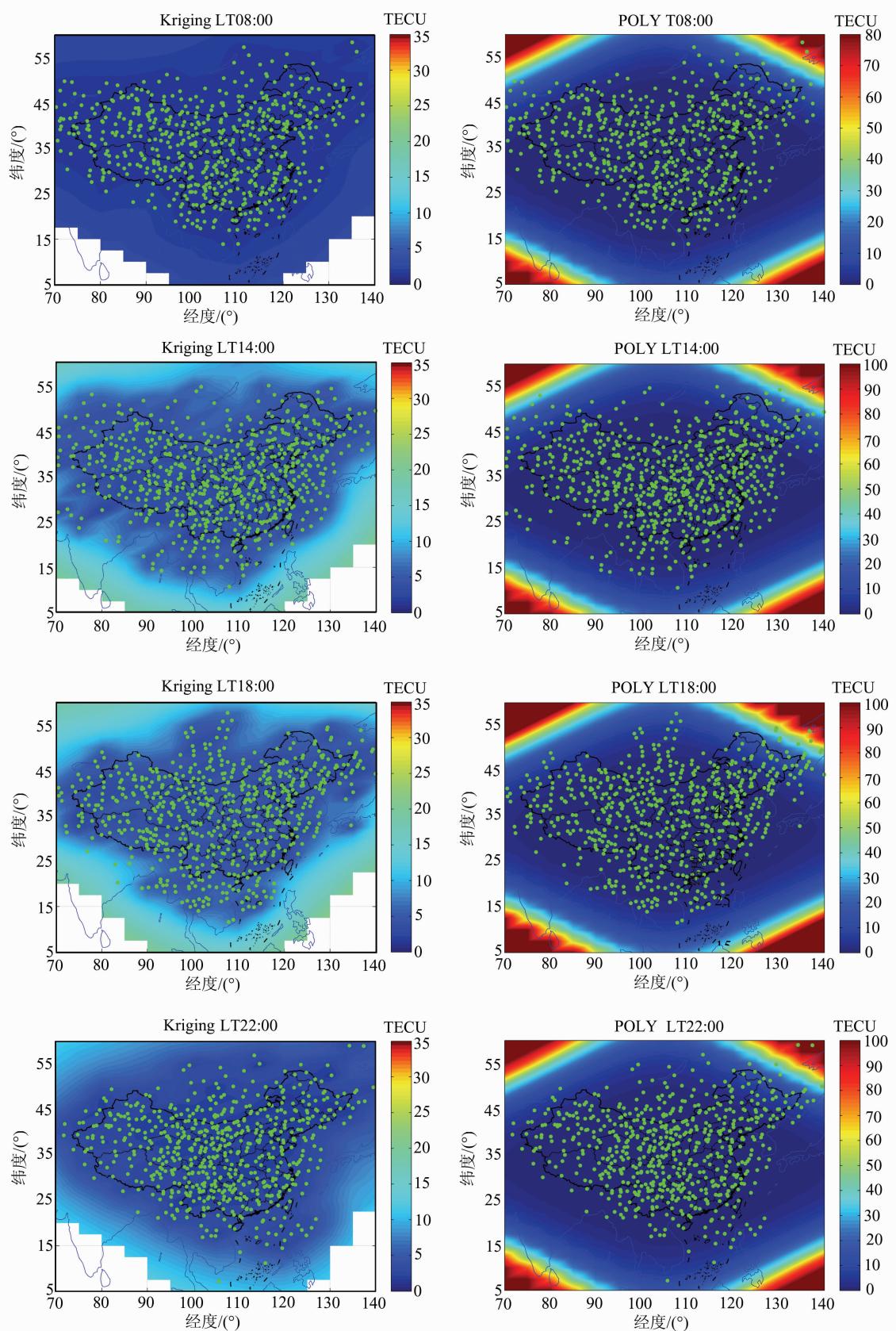


图 4 DOY218 不同地方时 Kriging 和 POLY 格网点估计精度对比

Fig. 4 GRID VTEC Estimation Precision of Kriging and POLY in Comparison at Different Local Time (DOY218)

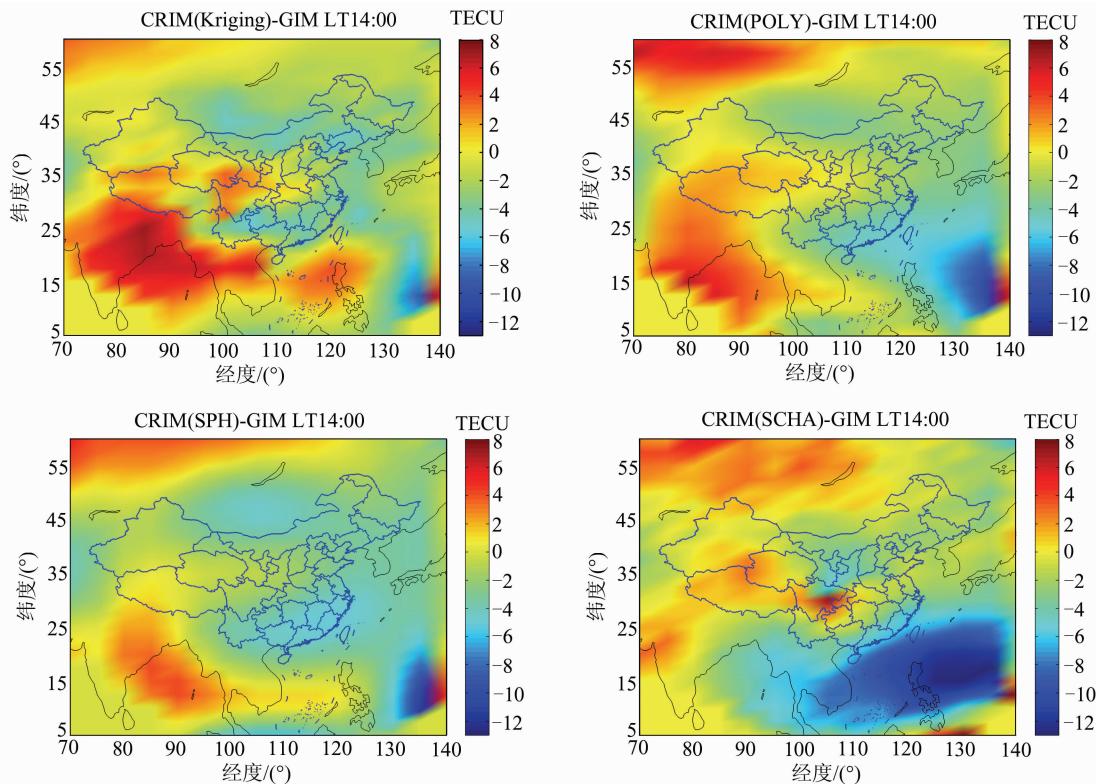


图 5 中国区域地方时 14:00(DOY218)4 种区域模型与 IGS GIM 的差异分布

Fig. 5 Difference Between Four Regional Models and IGS GIM at China Local Time 14:00 (DOY218)

效格网点与 GIM 相应格网点的 VTEC 差值强制约束为零。

图 5 为 4 种区域模型与 GIM 在 2012 年第 218 天中国区域地方时 14:00 的格网差异整体分布情况,其差异均在 $-10 \sim 7$ TECU,中心区域精度优于 4 个角落区域精度。Kriging 和 POLY 分别与 GIM 在中心区域的差值都在 $-4 \sim 2$ TECU, SPH 格网差值在 -5 TECU 以内,SCHA 差值在 $-4 \sim 4$ TECU。整体上,在有效格网范围内,Kriging 内插和多项式模型优于其他两种模型。另外,4 种结果都表明区域电离层 TEC 拟合精度都与纬度存在一定关系,高纬度地区的模型拟合精度普遍高于低纬度地区,这与电离层随纬度变化的趋势一致。由于低纬度地区受太阳辐射影响大,大气电离活动活跃,“双驼峰”、电离层气泡等特有的电离层异常结构^[3]都会降低模型拟合效果。

图 6 统计了第 218 天 4 种区域模型结果分别与 GIM 的差异 RMS。其中,尤其是在 14:00 左右,SCHA 和 SPH 结果与 GIM 的差异较大。从整体来说,Kriging 内插效果与 GIM 的差异最小,都在 6 TECU 以内,多项式模型其次。表 1 统计了 218~224 天 Kriging 内插格网结果 CRIM 与 GIM 在时段节点处的差异 RMS 和均值(mean)。

从表 1 可以看出,区域模型值比 GIM 偏低,电离层平静时段两者差异较小,RMS 都在 $1 \sim 4$ TECU;而在中国区域地方时 14:00~20:00,两者差异较其他时段大,其 RMS 在 6 TECU 左右,其原因主要是该时段太阳活动剧烈导致电离层变化程度较大,且中国区域大部分处于中低纬度带;另外,IGS 电离层分析中心选取的中国区域监测站较少,且 GIM 空间分辨率低,而 Kriging 属于局部最优估计,这也会对两者差异造成一定程度影响。

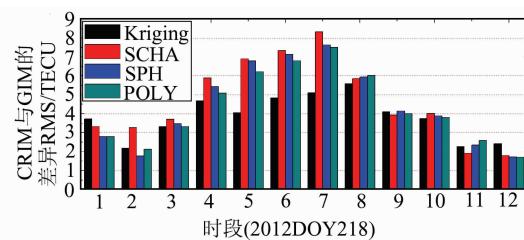


图 6 4 种模型结果与 GIM 的差异 RMS 统计

Fig. 6 RMS of Difference Between Four Models and GIM

3 结语

本文依据空间变异理论和 Kriging 空间内插实现了中国区域电离层 TEC 延迟的实时模型化。

表1 Kriging 内插结果 CRIM 与 GIM 的差异

Tab. 1 Difference Between CRIM and GIM Using Kriging Algorithm

年积 日	差异 /TECU	时段											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
218	RMS	3.90	2.28	3.42	5.02	4.11	4.85	5.12	5.60	4.11	3.80	2.27	2.52
	mean	-1.61	-1.36	-1.20	-0.61	-0.52	-1.18	0.64	1.38	0.46	0.52	0.44	-1.36
219	RMS	3.19	2.56	4.28	4.17	4.66	4.25	3.36	3.82	3.02	2.57	1.88	2.11
	mean	-1.95	-1.34	0.94	-1.44	0.28	-0.92	-0.95	-2.04	-2.07	-0.34	-0.12	-0.72
220	RMS	2.78	2.14	3.18	4.56	5.43	6.17	5.94	4.84	3.68	4.38	2.48	1.88
	mean	-1.54	-0.87	-0.76	-0.62	-0.28	0.43	1.96	1.18	-0.13	1.43	0.05	-0.96
221	RMS	2.98	2.41	3.42	5.23	4.60	6.78	8.92	3.27	3.32	3.79	2.20	1.92
	mean	-0.60	-1.57	-1.68	-0.53	-0.15	-0.03	2.81	-0.52	-0.30	0.47	-0.56	-1.34
222	RMS	2.86	2.16	3.57	3.46	4.49	6.23	4.52	4.45	2.82	3.24	1.92	1.64
	mean	-1.14	-0.10	-0.25	0.10	0.42	1.06	-0.53	-0.31	-1.02	-0.35	-0.43	-0.43
223	RMS	2.85	2.30	2.73	4.95	5.96	4.25	4.53	8.23	4.09	5.48	3.60	2.04
	mean	-0.38	-1.0	-1.0	-0.46	1.39	-0.02	0.62	1.79	-0.37	0.89	-0.36	-0.89
224	RMS	2.29	2.23	2.06	3.42	3.86	5.39	5.40	4.42	2.61	2.25	1.90	1.74
	mean	-1.01	-1.59	-1.24	-1.73	-0.27	-0.38	-0.40	-0.90	-1.68	-1.24	-1.0	-0.96

实测数据处理表明,经验半变异函数的拟合模型宜采用球状模型。通过多种建模结果对比与分析,针对中国区域特征(跨度较大,且位于中低纬度地区,电离层 TEC 变化程度大),虽然多项式模型估计内符合精度与 Kriging 内插相当,并明显优于低阶球谐函数和球冠谐函数模型,但多项式模型格网点估计精度低于 Kriging,且边际效应较为明显,在区域角落地区易出现负值;而 Kriging 方法考虑到了电离层 TEC 的空间相关性和变异性,格网点估计精度较高,更适用于中国等电离层变化复杂的国家和地区。

参 考 文 献

- [1] Zhang Hongping, Han Wenhui, Huang Ling, et al. Modeling Global Ionospheric Delay with IGS Ground-based GNSS Observation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(10): 1 186-1 189(章红平, 韩文慧, 黄玲, 等. 地基 GNSS 全球电离层延迟建模[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(10): 1 186-1 189)
- [2] Liu Jingbin. Modeling Regional Ionosphere Using GPS Measurements over China by Spherical Cap Harmonic Analysis Methodology[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(8): 792-795(柳景斌. 利用球冠谐分析方法和 GPS 数据建立中国区域电离层 TEC 模型[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008, 33(8): 792-795)
- [3] Zhang Hongping. Study on GPS-based China Regional Ionosphere Monitoring and Ionosphere Delay Correction[D]. Shanghai: Shanghai Astronomical Observatory Chinese Academy of Sciences, 2006(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)
- [4] Hou Jingru, Huang Jingxian. Theories and Methods of Geostatistics[M]. Beijing: Geology Press, 1990(侯景儒, 黄竞先. 地质统计学的理论与方法[M]. 北京: 地质出版社, 1990)
- [5] Sarma D D. Geostatistics with Applications in Earth Sciences[M]. New Delhi: Capital Publishing Company, 2002
- [6] Blanch J. An Ionospheric Estimation Algorithm for WAAS Based on Kriging[C]. ION GPS, Portland, OR, 2002
- [7] Orús R, Hernández-Pajares M, Juan J M, et al. Improvement of Global Ionospheric VTEC Maps by Using Kriging Interpolation Technique[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2005, 67: 1 598-1 609
- [8] Stanislawskal J G. The Kriging Method of the Instantaneous Mapping[J]. *Adv Space Res*, 2002, 29(6): 945-948
- [9] Liu Runyuan, Liu Guohua, Wu Jian, et al. Ionospheric foF2 Reconstruction and Its Application to the Short-Term Forecasting in China Region [J]. *Chinese J Geophys*, 2008, 51(2): 300-306(刘瑞源, 刘国华, 吴健, 等. 中国地区电离层 foF2 重构方法及其在短期预报中的应用[J]. 地球物理学报, 2008, 51(2): 300-306)
- [10] Mao Tian, Wan Weixing, Sun Lingfeng. Central and Northern China TEC Map Using the Kriging Method[J]. *Chinese J Space Sci*, 2007, 27(4): 279-285(毛田, 万卫星, 孙凌峰. 用 Kriging 方法构建中纬度区域电离层 TEC 地图[J]. 空间科学学报, 2007, 27(4): 279-285)
- [11] Wang Jun. Monitoring and Application of GNSS Regional Ionospheric TEC[D]. Beijing: Institute of Geodesy and Geodynamics Chinese Academy of Sur-

- veying and Mapping, 2008(王军. GNSS 区域电离层 TEC 监测及应用[D]. 北京: 中国测绘科学研究院, 2008)
- [12] Li Zishen. Study on the Mitigation of Ionospheric Delay and the Monitoring of Global Ionospheric TEC Based on GNSS/Compass[D]. Wuhan: Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2012(李子申. GNSS/Compass 电离层时延修正及 TEC 监测理论与方法研究[D]. 武汉: 中国科学院测量与地球物理研究所, 2012)
- [13] Hernández-Pajares M, Juan J M, Sanz J, et al. The IGS VTEC Maps: A Reliable Source of Ionospheric Information Since 1998[J]. *Journal of Geodesy*, 2009, 83(3/4): 263-275

VTEC Modeling with Kriging Algorithm over China Area

HUANG Ling¹ ZHANG Hongping¹ XU Peiliang² WANG Cheng¹ LIU Jingnan¹

¹ Research Center of GNSS, Wuhan University, Wuhan 430079, China

² Kyoto University, Kyoto 611-0011, Japan

Abstract: For real-time regional VTEC(vertical total electron content) modeling over China, ionospheric modeling is realized based on spherical cap harmonic functions, low-degree spherical harmonic functions, polynomial models and Kriging interpolation techniques. This paper focuses on the spatial variability and relevance of VTEC and Kriging interpolation methodology to achieve real-time regional VTEC modeling using China regional GPS data. Results indicate that fitting accuracy in the high latitude areas is better than in lower latitude areas, Kriging interpolation and polynomial modeling show better performance than the spherical cap harmonic function and low-degree spherical harmonic function. But polynomial modeling has a marginal effect as fitting precision decreases rapidly while the distance to the center of the modeling region is increased. The variance of grid VTEC estimated using Kriging algorithm, in contrast conforms closely to the actual situation, with shows higher precision when the number of IPPs increases over the region.

Key words: ionosphere; VTEC; Kriging interpolation; semivariogram; spherical cap harmonic function model; low-degree spherical function model; polynomial model

First author: HUANG Ling, PhD candidate, specializes in the GNSS ionospheric modeling and reversion. E-mail: huangling_gnss@whu.edu.cn

Corresponding author: ZHANG Hongping, PhD, professor. E-mail: hpzhang@whu.edu.cn

Foundation support: The Key Project of the National Natural Science Foundation of China, No. 41231064; the National High Technology Research & Development Program of China (863 Program), No. 2014AA123101; the Fundamental Research Funds for the Central Universities, No. 2042016kf0061.