

利用单基站GPS数据建立电离层VTEC模型

李秀海¹ 杜国明² 王明爽¹ 张为成¹ 张玉娟¹

(1. 黑龙江工程学院 测绘工程学院 黑龙江 哈尔滨 150050; 2. 鞍钢大孤山铁矿采矿车间 辽宁 鞍山 114046)

Modeling Vertical Total Electron Content of the Ionosphere Using Single Station GPS Data

LI Xiuhai, DU Guoming, WANG Mingshuang, ZHANG Weicheng, ZHANG Yujuan

摘要:介绍几种常用的电离层VTEC模型。通过利用哈尔滨市CORS观测网络的单基站GPS双频观测数据建立多种电离层VTEC模型,并对建模成果进行分析与研究。结果表明,模型选择和GPS卫星空间分布对建模有较大影响。

关键词:电离层;GPS;总电子含量;建模

一、引言

电离层总电子含量(total electron content, TEC)是反映电离层特性的一个重要参数,电离层延迟误差的大小与GPS信号到接收机传播路径的总电子含量成比例。因此,研究监测与预报TEC的变化规律对于建立精确的电离层延迟改正模型具有十分重要的意义^[1]。另外,监测TEC的变化规律对电离层物理研究、太阳活动监测、空间环境天气预报、地震预报研究也具有重要意义。目前,全国各地已建立了许多连续运行参考站系统(CORS),在网络覆盖区域内的工程测量、控制测量、地籍测量、地壳形变监测、摄影测量及城市地理基础信息获取等方面发挥了重要的作用,同时,其稳定的数据源也为大气层、电离层监测提供了基础。本文利用哈尔滨市CORS网络的单基站GPS双频观测数据,研究利用不同拟合模型建立区域TEC模型的方法,得到了一些有益的结论。

哈尔滨市CORS由哈尔滨市勘测设计研究院承担建设,于2007年2月正式启动,同年7月建成运行。系统采用Trimble公司的虚拟参考站技术,在阿城、哈西、方台、对青、双城地区建设5个基准站,使用Trimble双频双星系统的GPS接收机观测,GPS基站平均间距50 km,覆盖哈尔滨市城区、阿城区、呼兰区及周边县市区约32 000 km²。

二、几种常用区域电离层VTEC模型

电离层TEC是方向的函数,其数值与信号传播

路径的高度角及方位角有关,为研究TEC的时空变化,常采用天顶方向的总电子含量(vertical TEC, VTEC)来进行讨论。电离层总电子含量的建模是指VTEC的建模,而传播路径的TEC一般由GPS双频数据反演而得,作为电离层VTEC建模的观测值。区域电离层VTEC模型常用以下几种。

1. 球谐函数模型

球谐函数模型表示如下

$$Y_{\text{VTEC}} = \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{k=0}^n [A_n^k \cos(k\lambda_s) + B_n^k \sin(k\lambda_s)] P_n^k(\cos \phi_m) \quad (1)$$

式中 n 为阶数; k 为次数; $P_n^k(\cos \phi_m)$ 为 n 阶 k 次缔合勒让德函数; A_n^k 、 B_n^k 为模型待估系数; ϕ_m 为穿刺点的地磁纬度; λ_s 为过穿刺点的经线与过地心与太阳连线的经线之间的夹角。设任意观测时刻 t 的太阳时角为 W_{GHA} ,则 λ_s 按以下公式计算

$$\lambda_s = \lambda_{\text{IPP}} + W_{\text{GHA}} = \lambda_{\text{IPP}} - \lambda_{\text{SUN}} = (UT - 12) \times 15 + \lambda_{\text{IPP}} \quad (2)$$

式中 UT 为世界时; λ_{IPP} 、 λ_{SUN} 分别为穿刺点和太阳的地理纬度。

由于低阶次与高阶次的缔合勒让德多项式函数数值相差较大,实用上采用所谓的“正常化球谐函数”^[2]。

2. 多项式电离层VTEC模型

该模型是将电离层穿刺点的VTEC看做是太阳时角差 $S - S_0$ 和纬差 $B - B_0$ 的函数。其具体表达式为^[3]

收稿日期:2010-11-19

基金项目:黑龙江工程学院重点基金资助项目(Z08003)

作者简介:李秀海(1963—),男,吉林磐石人,博士生,副教授,主要从事GNSS应用研究及工程测量专业教学工作。

$$Y_{VTEC} = \sum_{i=1}^n \sum_{k=0}^m C_{ik} (B - B_0)^i (S - S_0)^k \quad (3)$$

式中 C_{ik} 是待估参数; B_0 是测区中心点的纬度; S_0 为测区中心点 (B_0, λ_0) 在该时段中央时刻 t_0 时的太阳时角; $S - S_0 = (\lambda - \lambda_0) + (t - t_0)$; 对于利用单基站双频 GPS 数据建模, 测区中心点一般选接收机所处的地理位置 λ 为穿刺点的地理经度 t 为观测时刻。

3. 高次曲面电离层 VTEC 模型

1999 年 Coco 提出用六系数二次曲面模型拟合区域电离层 VTEC, 其表达式为^[4]

$$Y_{VTEC} = C_0 + C_1\phi + C_2L + C_3\phi^2 + C_4L^2 + C_5\phi L \quad (4)$$

2000 年, A. Komjathy 等提出如下平面模型^[5]

$$Y_{VTEC} = C_0 + C_1\phi + C_2L \quad (5)$$

式(4)和式(5)中, L 是穿刺点日固坐标系下的经度 $L = \lambda + 15$; λ, ϕ 是穿刺点的地理经纬度。

当利用 GPS 双频观测数据建模时, 一般以斜向总电子含量 TEC 作为观测值, 观测方程如下^[6]

$$Y_{TEC} + B = Pf(z) Y_{VTEC} \quad (6)$$

式中 B 为 GPS 硬件延迟偏差影响; $Pf(z)$ 为投影函数, 本文选择 $Pf(z) = 1/\cos z$; z 为电离层穿刺点的天顶距。

三、建模实例及结果分析

1. 建模方案

前面介绍的电离层 VTEC 模型, 一般情况下在时段为几个小时内具有较好的建模效果。因此, 建模时选择时段长度为 4 h 的 GPS 观测数据, 这里以哈尔滨市 CORS 网络中的各站 GPS 时间为 2007 年 9 月 19 日 16—20 时的观测数据建模。对双频 GPS 数据首先进行周跳探测和修复, 以便获取高精度 L4 观测值, 按 L4 代替 P4 法计算观测量 Y_{TEC} ^[3]。GPS 卫星星历从 IGS 网站下载 SP3C 格式精密星历, 因精密星历采样率为 15 min, 而 GPS 双频观测数据采样率为 30 s, 须通过分段拟合求出观测时刻的卫星位置, 进而求穿刺点坐标。本文利用拉格朗日内插技术确定观测时刻的卫星位置^[2]。单层电离层模型高度取 350 km, 卫星高度截止角设为 15° 。由 TEC 观测值和穿刺点坐标组成误差方程, 组成法方程并答解法方程, 求出未知参数, 最终建立电离层 VTEC 模型。

为比较不同基站、不同模型的建模精度, 选择对青、阿城、双城、方台、哈西 5 个基站分别建模。选择式(5)作为模型 1, 式(4)为模型 2; 对球谐函数模型式(1), 当 $n_{max} = 3$ 时, 得到的模型称为模型 3; 对式(3), 当 $n = 2, m = 3$ 时, 得到的模型称为模型 4。

对以上 4 种模型, 分别利用各基站 GPS 双频数据建模。

2. 建模结果及分析

各站每种模型的内符合精度由模型残差计算, 其结果如表 1 所示。为研究单基站电离层 VTEC 建模的外符合精度, 选择对青站和双城站两个有代表性的基站建模, 分别推算哈西站和方台站的电离层 VTEC, 验证两个基站所建模型的外推精度。所选择的哈西站离对青站最近, 而方台站离双城站最远。外符合精度如表 2 所示。在 5 个基站建模中, 对青站和阿城站各模型提取的 VTEC 结果相似, 而其他 3 站各模型计算的 VTEC 相近, 限于篇幅, 取对青和双城两站对 2 号和 10 号卫星观测的数据计算的 VTEC 时序图代表两种建模结果, 如图 1、图 2 所示。

表 1 各基站各模型 VTEC 计算中误差 TECU

基站	模型内符合精度 m_0			
	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4
对青	± 0.51	± 0.39	± 0.27	± 0.26
阿城	± 0.51	± 0.38	± 0.27	± 0.26
双城	± 0.51	± 0.33	± 0.23	± 0.25
方台	± 0.51	± 0.33	± 0.22	± 0.24
哈西	± 0.51	± 0.33	± 0.22	± 0.25

表 2 哈西站和方台站各模型的外符合精度 TECU

测站	模型 1	模型 2	模型 4	模型 7
哈西	± 0.26	± 1.59	± 0.29	± 3.77
方台	± 0.17	± 0.27	± 0.46	± 0.11

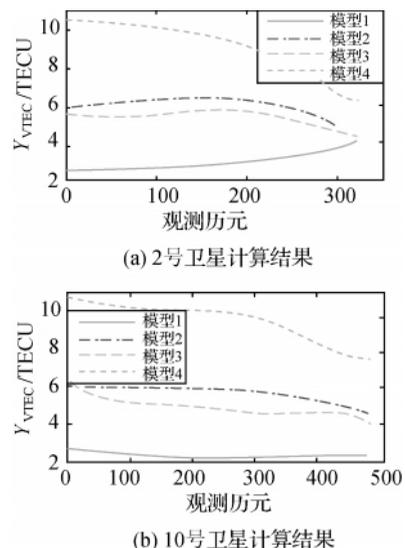


图 1 对青站电离层 VTEC 建模结果

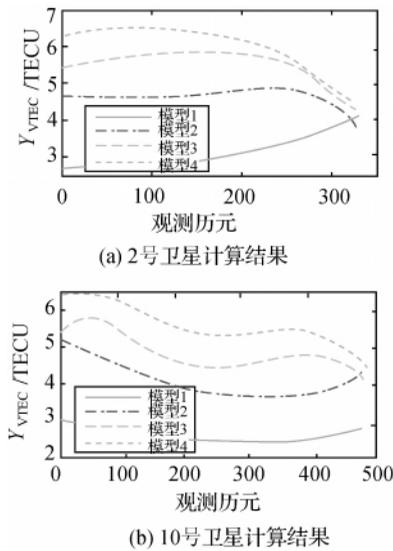


图2 双城站VTEC建模结果

由表1可以看出,各种模型对基站并不敏感,主要是由于各基站相距不远,各基站在某一时间段内的可视卫星大致相同,各基站观测卫星的电离层穿刺点空间分布相差不大。从模型的拟合效果来看,模型1拟合效果最差,在各基站的拟合中误差均达到 ± 0.51 TECU,说明模型1拟合不足,对于高精度要求的VTEC测量,该模型是不适合的。而模型3、模型4拟合精度最高,比模型1的精度提高近一倍。模型2的拟合精度介于模型1和模型3、模型4之间。

由表2可知,利用对青站的模型推算哈西站对各观测卫星的VTEC值,即使两站很近,对青站模型2、模型4的外符合精度仍很差。而双城站虽离方台站最远,但双城站模型的外符合精度都很高,表明双城站建模效果较好,同时也说明对于单基站建模,如果网络范围不是很大,任何一个基站的VTEC建模皆可达到很好的效果。

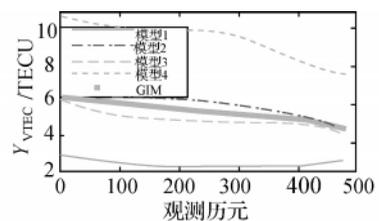
从图1可以看出,模型1除前述的具有拟合精度较差外,计算的VTEC值明显偏小;模型2、模型3的结果基本相同;而模型4计算的结果普遍偏高。模型1和模型4计算的TEC最大相差约8 TECU左右,这样的结果显然值得怀疑。在图2中,除模型1计算的VTEC值较小外,其他各模型计算的VTEC值相差不大。

进一步分析对青站和阿城站与其他3站计算结果的差异可知,在理论上,由于这些基站相距不远,它们对相同卫星的电离层穿刺点相差不大,其电离层在小区域内VTEC的观测结果也应相近^[7],出现大的差异可能是模型不完善或数据处理存在缺陷。通过仔细分析和对比,发现对青站和阿城站使用的

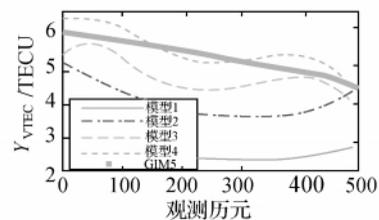
是对PRN2、PRN6、PRN27、PRN29、PRN10 GPS卫星观测的双频数据,而双城等其他3站使用的是对PRN2、PRN6、PRN24、PRN29、PRN10 GPS卫星观测的双频数据数据。虽然仅相差一颗卫星的数据,但双城、哈西及方台3站在观测时间的GPS卫星穿刺点的空间分布比较均匀,GPS卫星图形结构较好,利用其数据进行VTEC反演时,平差计算的误差方程系数矩阵、法方程等具有较好的结构,计算的结果较稳定。相比之下,对青站和阿城站两站则卫星空间分布不均,致使一些对卫星空间分布比较敏感的模型计算结果相差较大。在模型4中,VTEC是太阳时角差和地磁纬度差的函数,对卫星的空中分布敏感,而二次曲面函数模型2、球谐函数模型3对卫星空间分布不敏感,因而计算结果相对稳定。

为验证单基站所建模型的VTEC计算结果的可靠性,这里利用对青站和双城站对PRN10号卫星观测的VTEC成果,与在IGS网站所下载的2007年9月19日的全球电离层图(GIM)成果进行比较。由于GIM成果是每2h在规则格网的VTEC值,因此需进行时空内插得到与观测PRN10号卫星在观测历元的VTEC,两者的比较如图3所示。

在图3中,两个基站的模型1与GIM成果相差较大,说明模型1建模效果不好。而双城站其他各模型的VTEC与GIM基本吻合,说明双城站的VTEC建模是成功的;而对青站的模型2、3计算的VTEC与GIM符合较好,但模型4的结果则与GIM相差较大。考虑到GIM发布的格网点VTEC中误差在 ± 1.5 TECU左右,可以认为与GIM符合较好的模型的成果是可靠的。



(a) 对青站10号卫星计算的VTEC与GIM比较



(b) 双城站10号卫星计算的VTEC与GIM比较

图3 单基站建模与GIM比较

(下转第32页)

数据及功能操作, 通过在“神州遨游”系统平台上的运行试验, 达到了良好的可视化显示效果。

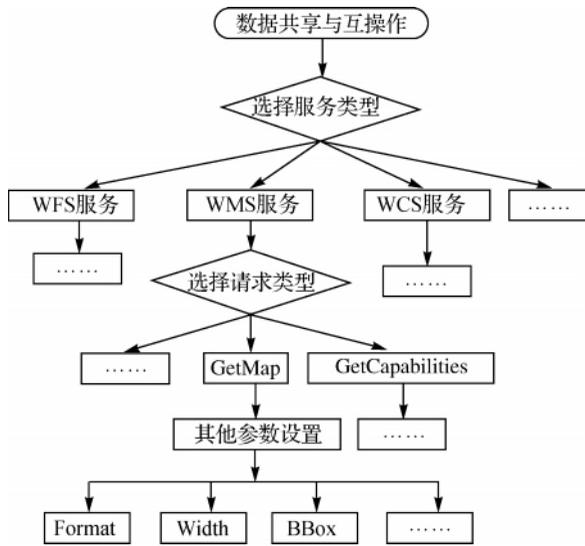


图5 OGC Web 服务设计图

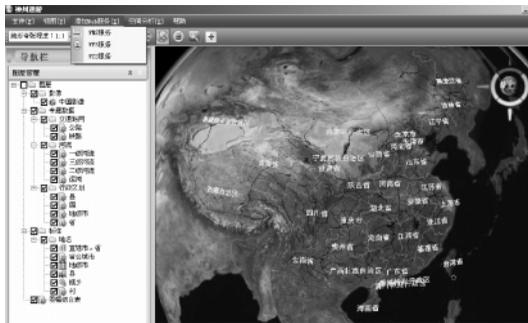


图6 浏览金字塔影像

参考文献:

[1] 贾文珏, 陈玉敏, 龚健雅, 等. 基于 Web Services 的 OGC 地图服务实现方法 [J]. 测绘信息与工程, 2004, 29(4): 1-2.

[2] 李芳, 邱群勇, 汪小钦. 基于 OGC 规范的遥感影像数据服务研究 [J]. 测绘信息与工程, 2009, 34(4): 30-32.

[3] 沈盛斌, 吴华意. 自组织金字塔模型的 WMS 客户端方法 [J]. 测绘信息与工程, 2008, 33(2): 26-28.

[4] 单玉红, 陈玉敏, 朱欣焰, 等. 基于 Web Services 的分布式地理信息发布技术研究 [C] // 2003 年中国智能自动化会议论文集 (下册). 北京: [s. n.], 2003.

[5] 陈能成, 宁锋, 陈泽强, 等. 地球空间 Web 服务数据交换机制的设计与实现 [J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(36): 117-119.

[6] 龚健雅, 高文秀. 地理信息共享与互操作技术及标准 [J]. 地理信息世界, 2006(3): 20-29.

[7] 贾永华, 李玉祥, 王亮, 等. 基于 Web Services 的地图服务组件的设计和开发 [J]. 地理空间信息, 2006(1): 55-57.

[8] 宋关福, 罗灵军. Service GIS 与面向服务的地理信息共享 [C] // 2009 年中国地理信息产业论坛暨第二届教育论坛就业洽谈会论文集. 北京: [s. n.], 2009.

[9] 陈航, 吴升. 使用开源软件构建 WMS 服务器: PHP 等开源工具在 WebGIS 中的应用 [J]. 科技创新导报, 2008(15): 37.

[10] 张兴国, 梁小英. 基于 .net 的 WMS 的实现技术研究 [J]. 安徽农业科学, 2009, 37(3): 1235-1237.

[11] SONG Xiaofeng, RUI Xiaoping, HOU Wei et al. An OGC Standard-oriented Architecture for Distributed Coal Mine Map Services [J]. Science Direct, 2008, 18(3): 381-385.

(上接第 25 页)

四、结束语

对于单基站建模, 电离层 VTEC 模型和观测卫星的分布对电离层 VTEC 建模有明显的影响, 参数较少的平面拟合模型建模效果较差; 而参数较多的球谐函数模型及多项式电离层 VTEC 模型建模效果较好。如果观测卫星的空间几何分布不好, 选择的模型不合适, 会使电离层 VTEC 估计失真; 反之, 如果观测卫星分布均匀, 选择模型合适, 将能够取得较好的建模效果。另外, 在单基站建模中, 球谐函数模型和二次曲面函数模型对卫星空间分布不敏感。

参考文献:

[1] 王小亚, 朱文耀. GPS 监测电离层活动的方法和最新进展 [J]. 天文学进展, 2003, 21(1): 33-34.

[2] 何玉晶. GPS 电离层延迟改正及其扰动监测的分析研究 [D]. 郑州: 信息工程大学, 2006: 20-29.

[3] 刘经南, 陈俊勇, 张燕平, 等. 广域差分 GPS 原理与方法 [M]. 北京: 测绘出版社, 1999.

[4] KOMJATHY A, SPARKS L, MANNUCCI T, et al. An Assessment of the Current WAAS Ionospheric Correction Algorithm in the South American Region [C] // Proceedings of ION GPS 2002. Portland City: OR, 2002: 1286-1296.

[5] COCO D. GPS—Satellites of Opportunity for Ionospheric Monitoring [J]. Innovation, 1991(10): 47-50.

[6] 袁运斌, 欧吉坤. GPS 观测数据中的仪器偏差对确定电离层延迟的影响及处理方法 [J]. 测绘学报, 1999, 28(2): 19-23.

[7] 黄文耿, 陈艳红, 沈华, 等. 用 GPS 观测研究电离层 TEC 水平梯度 [J]. 空间科学学报, 2009, 29(2): 183-186.