



研究与开发

基于SUMT修正法的差分码偏差和电离层TEC估计

廖思明, 尚俊娜, 苏明坤

(杭州电子科技大学通信工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘 要: 基于球谐函数, 实现区域电离层建模, 并对区域差分码偏差 (differential code bias, DCB) 与总电子含量 (total electron content, TEC) 进行解算。对于格网处垂直总电子含量 (vertical total electron content, VTEC) 出现的异常值, 提出一种序列无约束最小化技术 (sequential unconstrained minimization technique, SUMT) 修正法进行修正, 利用国际全球导航卫星系统服务 (International GNSS Service, IGS) 网络的6个测站双频观测数据, 建立了电离层VTEC区域模型, 并估算了31天的卫星频间DCB, 将估算值与电离层分析中心中国科学院 (Chinese Academy of Sciences, CAS) 发布的产品进行对比分析, 结果显示: 所有的卫星差值都在0.42 ns以内, 其中87.5%的卫星差值在0.4 ns以内, 78.1%的卫星差值在0.2 ns以内, 频间DCB的平均偏差基本小于0.4 ns。此外, 估算的全球定位系统 (global positioning system, GPS) 卫星DCB序列的标准差 (standard deviation, STD) 值小于0.1 ns。建立了经纬度范围为 $5^{\circ}\text{E}\sim 25^{\circ}\text{E}$ 、 $40^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 的电离层区域模型, 将VTEC建模结果与CAS发布的全球电离层地图 (global ionospheric map, GIM) 产品做差比较, 结果显示整体时间点的差值均处于4 TECU以内, 且超过90%的区域差值在2 TECU以内, 表明估算的结果与CAS产品具有良好的一致性。

关键词: 差分码偏差; TEC估计; 电离层建模; SUMT修正法

中图分类号: TN967.1

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025028

Estimation of differential code bias and ionospheric TEC based on the SUMT correction method

LIAO Siming, SHANG Junna, SU Mingkun

School of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China

Abstract: The modeling of the regional ionosphere was implemented based on spherical harmonic functions, and the regional differential code bias (DCB) and total electron content (TEC) were calculated. To correct anomalies in vertical total electron content (VTEC) values at grid points, a sequential unconstrained minimization technique (SUMT) correction method was proposed. Using dual-frequency observation data from six International GNSS Service (IGS)

收稿日期: 2024-09-27; 修回日期: 2024-12-10

通信作者: 尚俊娜, shangjn@hdu.edu.cn

network stations, a regional ionospheric VTEC model was established, and the satellite inter-frequency DCB for one month were estimated. These estimates were compared with the products published by the ionosphere center of the Chinese Academy of Sciences (CAS), and an accuracy analysis was performed. The results show that all satellite DCB differences were within 0.42 ns, with 87.5% of the differences within 0.4 ns and 78.1% within 0.2 ns. The average deviation of the inter-frequency DCB was generally less than 0.4 ns, and the standard deviation (STD) of the estimated GPS satellite DCB sequence was less than 0.1 ns. A regional ionospheric model with a latitude and longitude range of $5^{\circ}\text{E}\sim 25^{\circ}\text{E}$ and $40^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{N}$ was established. The VTEC modeling results were compared with the GIM products released by CAS, showing that the overall time-point differences were within 4 TECU, with over 90% of regional differences within 2 TECU. The estimated results exhibit good consistency with the CAS products.

Key words: differential code bias, TEC estimation, ionospheric modeling, SUMT correction method

0 引言

在过去几十年中,全球定位系统(global positioning system, GPS)已被广泛用于导航和定位领域。地球的电离层作为一种色散介质,会导致GPS信号在传播过程中发生延迟,进而引发GPS导航和定位的误差^[1]。为了避免这一问题,需要对电离层延迟进行解算。总电离层延迟或总电子含量(total electron content, TEC)的主要部分可以通过双频GPS测量技术来提取^[2]。在进行TEC估算时,必须考虑差分码偏差(differential code bias, DCB),即不同频率之间的内部延迟差异。如果忽略DCB的影响,可能会导致米级的误差,甚至造成TEC估计值为负^[3]。同时,太阳活动会影响电离层TEC的总体变化^[4]。

随着电离层研究的不断深入,近年来越来越多的学者提出了不同的电离层建模和修正方法。2005年,袁运斌等^[5]提出一种改进的广义三角级数函数电离层延迟模型,提高了基于GPS的局部电离层延迟信息的精度。2008年,章红平等^[6]提出地基GPS区域电离层多项式模型与硬件延迟统一解算分析方法,可以有效地削弱短时弧段建模带来的影响。2012年,章红平等^[7]又提出地基全球导

航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)全球电离层延迟建模方法,研究表明数据源的量可以提升解算结果的稳定性。2015年, Li等^[8]提出一种将球谐函数和广义三角级数函数相结合的方法,有效提高了全球电离层地图(global ionospheric map, GIM)的准确率和分辨率。2016年,赵东旭等^[9]提出将电离层作为单层建立球谐函数模型,其解算结果与国际全球导航卫星系统服务(International GNSS Service, IGS)发布的产品符合度极高。2019年,黄小东等^[10]针对高纬度区域电离层格网输出值出现负值和零值的现象,提出一种不等式约束算法和最小二乘法结合的方法,进行异常值修正,其解算结果与欧洲定轨中心(Center for Orbit Determination in Europe, CODE)的产品符合度较高。2023年,刘宇^[11]提出一种平差增权的方法对格网点垂直总电子含量(vertical total electron content, VTEC)异常值进行修正,其解算结果与中国科学院(Chinese Academy of Sciences, CAS)的产品符合度较高。同年, Feng等^[12]证明了太阳活动确实能够影响电离层TEC。此外,地球磁场同样对电离层产生影响^[13]。2023年,徐磊^[14]采用稀疏核函数的方法,提升了对电离层提取的精度。2024年,尚靖哲^[15]等通过双



频观测值比较当前不同斜路径电子含量提取方法对GIM精度的影响,得出非差非组合精密单点定位技术比相位平滑伪距技术的解算精度更高。尽管这些研究为电离层TEC的估算提供了大量的理论支持和技术参照,但仍然面临一些挑战,特别是如何更精确地处理复杂的误差源,如DCB、太阳活动和其他环境因素的影响。因此,本文提出了一种基于序列无约束最小化技术(sequential unconstrained minimization technique, SUMT)修正法的电离层TEC估算方法,通过优化目标函数有效修正电离层TEC中的异常值。与传统的平差增权法相比, SUMT修正法具有更强的收敛性、稳定性和灵活的约束处理能力,从而为电离层TEC估算提供了更高效、准确的解决方案。

本文对局部区域DCB和电离层进行分析,选取IGS测站中的GOPE、GRAS、PTBB、POTS、ONSA、GRAZ共6个测站在2022年连续31天(DOY60—DOY91)的数据进行参数解算,采用双频GPS技术进行DCB估算,并用低阶球谐函数模型对电离层穿透点(ionospheric pierce point, IPP)进行建模,针对格网点VTEC出现异常值的现象,提出一种SUMT修正法进行修正,得到建模修正后的电离层TEC解算结果。将解算的DCB和VTEC估算值与CAS产品进行对比分析,并将修正后的VTEC估算值和采用平差增权修正方法修正后的VTEC估算值均与CAS产品进行比较,结果表明,采用SUMT修正法的解算值相较采用平差增权修正法具有更高的精度,其解算结果更贴合CAS产品。

1 双频GPS差分码偏差估算方法

DCB根据其来源可以分为两种主要类型:频内差分码和频间差分码。同一频率的差分码偏差作差后抵消电离层延迟,其差分码偏差可以由观测文件直接计算得到;频间差分码偏差则需要考

虑电离层延迟。本文主要考虑频间偏差,在电离层延迟不可抵消的情况下,进行频间差分码偏差估算。

1.1 频间偏差估算方法

由于电离层延迟取决于观测值的频率,一阶电离层延迟可以通过双频伪距或载波相位测量来隔离,而高阶电离层折射效应通常被忽略,这是因为其占电离层延迟的比例非常小。双频伪距或载波相位测量的无几何(geometry-free, GF)组合可以表示为:

$$P_4^S = P_{1,j}^{i,S} - P_{2,j}^{i,S} = (I_{1,j}^{i,S} - I_{2,j}^{i,S}) + c \cdot \text{DCB}_j^{i,S} + c \cdot \text{DCB}_j^S \quad (1)$$

$$L_4^S = L_{1,j}^{i,S} - L_{2,j}^{i,S} = (I_{1,j}^{i,S} - I_{2,j}^{i,S}) + \lambda(b_{1,j}^{i,S} - b_{2,j}^{i,S}) + \lambda(N_{1,j}^{i,S} - N_{2,j}^{i,S}) \quad (2)$$

其中, P_4^S 和 L_4^S 分别为GF组合的伪距和载波相位观测值, $P_{1,j}^{i,S}$ 和 $L_{1,j}^{i,S}$ 分别为频率1上的码距和相位观测值, 其中 j 、 i 、 S 分别为接收机、卫星号和卫星系统, $I_{1,j}^{i,S}$ 为电离层延迟, 此处载波相位中电离层延迟实际值取负, $\text{DCB}_j^{i,S}$ 和 DCB_j^S 分别为不同卫星系统的卫星和接收机的DCB, 此处DCB的单位为时间, $N_{1,j}^{i,S}$ 为模糊度参数, $b_{1,j}^{i,S}$ 为相位仪器延迟, 通常由模糊度参数吸收, c 表示真空中的光速, λ 表示波长。

1.2 电离层残差法

在使用载波相位观测对伪距观测进行平滑处理之前, 应消除载波相位观测中的周期滑移和粗误差。本文的双频伪距码观测和电离层残差观测都用于检测周跳和粗误差。电离层残差法也称GF组合, 表示为:

$$\text{GF} = L_{1,j}^{i,S} - L_{2,j}^{i,S} = (I_{1,j}^{i,S} - I_{2,j}^{i,S}) + \lambda(b_{1,j}^{i,S} - b_{2,j}^{i,S}) + \lambda(N_{1,j}^{i,S} - N_{2,j}^{i,S}) \quad (3)$$

由于 $b_{1,j}^{i,S}$ 为相位仪器延迟, 通常由模糊度参数吸收, 因此, 式(3)可简化为:

$$\text{GF} = L_{1,j}^{i,S} - L_{2,j}^{i,S} = (I_{1,j}^{i,S} - I_{2,j}^{i,S}) + \lambda(N_{1,j}^{i,S} - N_{2,j}^{i,S}) \quad (4)$$

将相邻历元间的GF作差, 得:

$$\begin{aligned} & GF(n) - GF(n-1) = \\ & L_{1,j}^{i,S}(n) - L_{2,j}^{i,S}(n) - (L_{1,j}^{i,S}(n-1) - L_{2,j}^{i,S}(n-1)) \quad (5) \end{aligned}$$

同一频率相邻历元间的相位观测值可以从观测文件得到, 若 $GF(n) - GF(n-1)$ 的值很小, 则认为无周跳; 若 $GF(n) - GF(n-1)$ 的值超过一定阈值, 则判断有周跳出现, 可以通过差分修复法、组合滤波法等方法进行修复。

1.3 载波相位平滑法

在进行电离层残差探测并修复周跳后, 进行载波相位平滑伪距观测, 在一个恒定的弧段内, 通过 L_4^S 平滑 P_4^S 可以得到更加平滑的观测值 $\tilde{P}_{4,t}^S$:

$$\tilde{P}_{4,t}^S = \omega_t P_4^S(t) + (1 - \omega_t) P_{4,\text{prd}}(t) \quad (t > 1) \quad (6)$$

其中, t 为历元编号, ω_t 表示与历元 t 相关的权重因子。

$$\begin{aligned} P_{4,\text{prd}}(t) &= \tilde{P}_{4,t}^S(t-1) + \\ & [L_4^S(t) - L_4^S(t-1)](t > 1) \quad (7) \end{aligned}$$

其中, 当 $t=1$ 时, 表示一个观测弧的第 1 个历元, 此时 $\tilde{P}_{4,t}^S = P_4^S$ 。

电磁波在传播介质中引起的电离层延迟修正幅度可表示为:

$$I_{k,j}^{i,S} = \frac{40.28}{f_k^2} \int \text{Ne} \, ds = \frac{40.28}{f_k^2} \text{STEC} \quad (8)$$

其中, f_k 为频率 k 处的载波相位频率, Ne 表示路径 s 中的电子密度, $\int \text{Ne} \, ds$ 表示沿信号路径展开的积分, STEC 为倾斜路径上的电子总含量。将式 (8) 代入式 (1), 得到以下观测方程:

$$\begin{aligned} \tilde{P}_{4,t}^S &= \frac{40.28(f_2^{S^2} - f_1^{S^2})}{f_1^{S^2} \cdot f_2^{S^2}} \text{STEC} + \\ & c \cdot \text{DCB}^{i,S} + c \cdot \text{DCB}_j^S \quad (9) \end{aligned}$$

2 电离层模型

2.1 电离层穿透点

假设所有的自由电子都聚集在一个厚度无穷小的高度 H 的壳层中, 采用单层模型对电离层模

型进行简化, 其中 H 对应最大电子密度的高度。卫星和接收机之间的每个信号都会在单层上产生一个穿透点, 称为电离层穿透点 (ionospheric pierce point, IPP), 穿透点的位置可以由观测文件和 SP3 格式星历文件的接收机位置和卫星位置进行解算得到。

2.2 投影函数

电子密度会随着高度的变化而变化, 当高度角大于一定角度时, 各种投影函数对电离层建模精度的影响都是差不多的, 因此, 本文采用三角投影函数, 单层模型通常用于将倾斜的电离层延迟转换为沿每条瞄准线的天顶路径, 也就是 VTEC, 可以表示为:

$$\text{VTEC} = M(z_j^{i,S}) \cdot \text{STEC} \quad (10)$$

$$M(z_j^{i,S}) = \cos \left(\arcsin \left(\frac{R}{R+H} \sin(z_j^{i,S}) \right) \right) \quad (11)$$

其中, $M(z_j^{i,S})$ 为映射函数, $z_j^{i,S}$ 表示接收机处的天顶距离, $R=6371 \text{ km}$, 表示地球半径, $H=450 \text{ km}$,

表示单层高度, $\frac{40.28 \cdot (f_2^{S^2} - f_1^{S^2})}{f_1^{S^2} \cdot f_2^{S^2}}$ 表示与双频相关的

常数, 用 $1/J^S$ 代替。将式 (10) 代入式 (11), 得到以下观测方程:

$$\begin{aligned} J^S \cdot M(z_j^{i,S}) \cdot \tilde{P}_{4,t}^S &= \\ \text{VTEC} + J^S \cdot M(z_j^{i,S}) \cdot (c \cdot \text{DCB}^{i,S} + c \cdot \text{DCB}_j^S) \quad (12) \end{aligned}$$

3 球谐模型

3.1 球谐函数建模

球谐函数适用于全球尺度的电离层 VTEC 模拟, 可表示为:

$$\begin{aligned} \text{VTEC} &= \\ \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^n \tilde{P}_{n,m}(\sin \beta) (A_{nm} \cos m\lambda + B_{nm} \sin m\lambda) \quad (13) \end{aligned}$$

其中, n 为球谐函数最大阶数, $\tilde{P}_{n,m}$ 表示正则化的勒让德函数, β 和 λ 表示日固地磁坐标系下穿透点的经、纬度, A_{nm} 和 B_{nm} 表示电离层模型系数。



将式 (12) 代入式 (13) 可得:

$$J^S \cdot M(z_j^{i,S}) \cdot (\tilde{P}_{4,t}^S - c \cdot \text{DCB}^{i,S} - c \cdot \text{DCB}_j^S) = \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^n \tilde{P}_{n,m}(\sin \beta)(A_{nm} \cos m\lambda + B_{nm} \sin m\lambda) \quad (14)$$

其中, $\text{DCB}^{i,S}$ 、 DCB_j^S 、 A_{nm} 、 B_{nm} 均为待估算参数, 由于观测值的数量远远大于未知参数的数量。根据上述理论, 利用 GPS 双频观测资料, 用最小二乘法可以估算出 DCB 和电离层系数。

由于卫星与接收机的 DCB 呈线性相关, 直接分离它们是不可行的。为了消除秩亏, 对每个系统 S 的所有卫星 DCB 施加零均值条件, 可表示为:

$$\sum_{i=0}^{n^S} \text{DCB}^{i,S} = W^S \quad (15)$$

其中, n^S 为卫星号, W^S 为缺失卫星 DCB 之和的负值, 当无缺失卫星时, 满足 $W^S=0$ 。相应地, 在观测方程中加入卫星端偏差总和为 0 作为基准约束条件。将式 (14) 化简后可以表示为矩阵形式:

$$v = B\hat{x} - l \quad (16)$$

$$B = \frac{1}{J^S \cdot M(z_j^{i,S})} [1 \quad 1 \quad \tilde{P}_{00} \cdot \sin \beta \quad \tilde{P}_{10} \cdot \sin \beta \quad \cdots \quad \tilde{P}_{nm} \sin(\beta) \sin(m\lambda)] \quad (17)$$

$$\hat{x} = [\text{DCB}^{i,S} \quad \text{DCB}_j^S \quad A_{00} \quad A_{10} \quad \cdots \quad B_{nm}]^T \quad (18)$$

$$l = \tilde{P}_{4,t}^S \quad (19)$$

其中, $\hat{x}$ 表示卫星 $\text{DCB}^{i,S}$ 、接收机 DCB_j^S 和电离层模型参数 A_{nm} 、 B_{nm} , B 为参数设计矩阵, l 和 v 分别表示真实观测值和观测残差。

基于球谐函数方程建模流程如图 1 所示。

$$\begin{cases} f(x) = \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^n \tilde{P}_{n,m}(\sin \beta)(A_{nm} \cos m\lambda + B_{nm} \sin m\lambda) \\ P(x) = [\min \{0, \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^n \tilde{P}_{n,m}(\sin \beta)(A_{nm} \cos m\lambda + B_{nm} \sin m\lambda)\}]^2 \end{cases} \quad (22)$$

其中, $x=[\beta, \lambda]$, σ_k 为惩罚因子, k 通常从 1 开始,

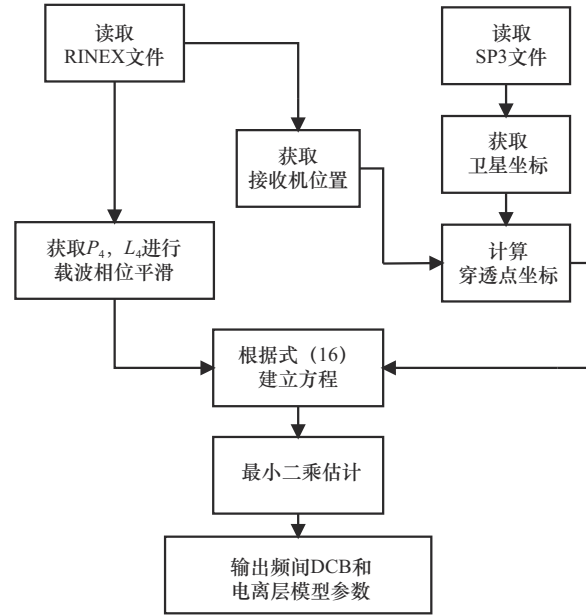


图 1 基于球谐函数方程建模流程

3.2 SUMT 修正法

本文针对电离层建模中格网点 VTEC 出现负值的问题, 提出了一种 SUMT 修正法, 修正 VTEC 值, 对小于 0 的 VTEC 值进行惩罚。

$$\begin{cases} \text{VTEC} = \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^n \tilde{P}_{n,m}(\sin \beta)(A_{nm} \cos m\lambda + B_{nm} \sin m\lambda) \\ \text{VTEC} \geq 0 \end{cases} \quad (20)$$

其中, 第 1 个方程为目标函数, 第 2 个方程为约束函数, 约束后的 VTEC 值大于或等于 0, 即

$\sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^n \tilde{P}_{n,m}(\sin \beta)(A_{nm} \cos m\lambda + B_{nm} \sin m\lambda)$ 大于或等于 0, 因此构建扩展惩罚函数表示为:

$$\min F(x, \sigma_k) = \min f(x) + \sigma_k P(x) \quad (21)$$

$P(x)$ 为惩罚函数, $\frac{\partial F}{\partial \beta}=0$, $\frac{\partial F}{\partial \lambda}=0$, $\nabla^2 F$ 正定时, 原约束问题有最优解, 将出现异常值对应格网点的CAS产品的VTEC值作为误差比对量。本文将CAS产品的VTEC值记为 $Q(x)$, 误差方程表示为:

$$W = \min F(x, \sigma_k) - Q(x) \quad (23)$$

W 值可以有一定的误差, 本文将 W 值设置为 $[-3, 3]$ 效果最优, 这个误差范围作为可接受范围, 若解算出来的 W 值超过这个范围, 可以认为惩罚力度不够, 则 $\sigma_{k+1} = \gamma \sigma_k$, 将惩罚因子进行递增, $\gamma > 1$, 继续进行惩罚, 直到 W 的值在可接受范围内。

SUMT修正法流程如图2所示。

4 实验分析

为了分析算法的有效性, 本文选取IGS测站中的GOPE、GRAS、PTBB、POTS、ONSA、GRAZ共6个测站在2022年连续31天(DOY60—DOY91)的数据进行参数解算, 采样率为30 s; 卫星截止高度角设为 10° , 避免高度角过低对建

模精度产生影响; 周跳处理采用电离层残差方法。为了分析DCB估算所得数据的精度, 本文采用CAS分析中心提供的电离层产品作为参考值, 并将实验结果与CAS产品进行对比分析。

4.1 GPS频间偏差解算结果分析

由于多站解算精度比单站解算高, 本文所有的解算都采用多站解算方式。以CAS发布的DCB产品作为参考, 通过比较P-DCB(估算的DCB值)和CAS-DCB之间的平均偏差、STD以及一致性, 判断P-DCB的准确性。年积日DOY60—DOY64卫星频间估计偏差P-DCB与CAS-DCB对比如图3所示。由图3可知, P-DCB和CAS-DCB的整体趋势是高度一致的, DCB数值为 $-8 \sim 8$ ns, 每天的DCB数值变化幅度微小, 整体的重合度较高, 部分卫星有微小偏差。由此可知, 年积日DOY60—DOY64的P-DCB和CAS-DCB之间具有高度一致性。在年积日DOY60—DOY64的差值对比方面, 所有的卫星差值都在0.42 ns以内, 其中87.5%的卫星差值在0.4 ns以内, 78.1%的卫星差值在0.2 ns以内, 整体的差值波动

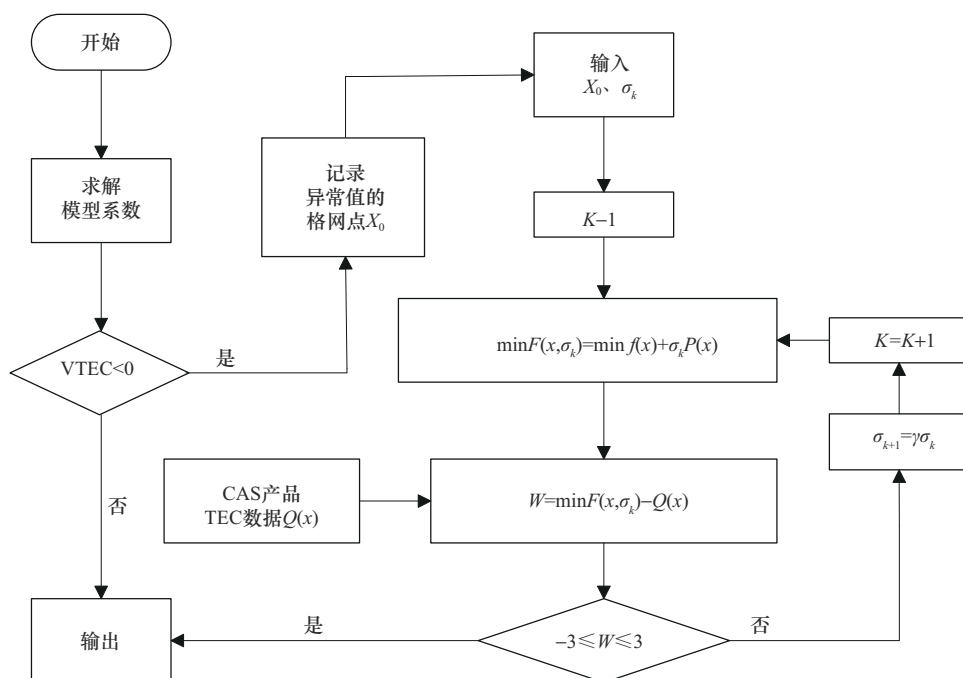


图2 SUMT修正法流程



较小, 这可以说明, P-DCB 的估算精度良好。

年积日 DOY60—DOY91 卫星频间估算偏差 P-DCB 与 CAS-DCB 的平均偏差和差值对比如图 4 所示。由图 4 可知, 31 天的平均偏差 P-DCB 和 CAS-DCB 的数值走向保持高度一致, 差值基本在 0.4 ns 之内, 只有个别卫星差值为 0.4 ns, 因为个

别卫星观测数据比较少, 不能做到准确估算。

年积日 DOY60—DOY91, P-DCB 和 CAS-DCB 的 STD 值如图 5 所示, P-DCB 和 CAS-DCB 的时间序列如图 6 所示。由图 5 可知, P-DCB 的 STD 值变化不大, 基本在 0.1 ns 以内, 这说明每天估算的 DCB 值偏差较大, 稳定性较高。由图 6 可

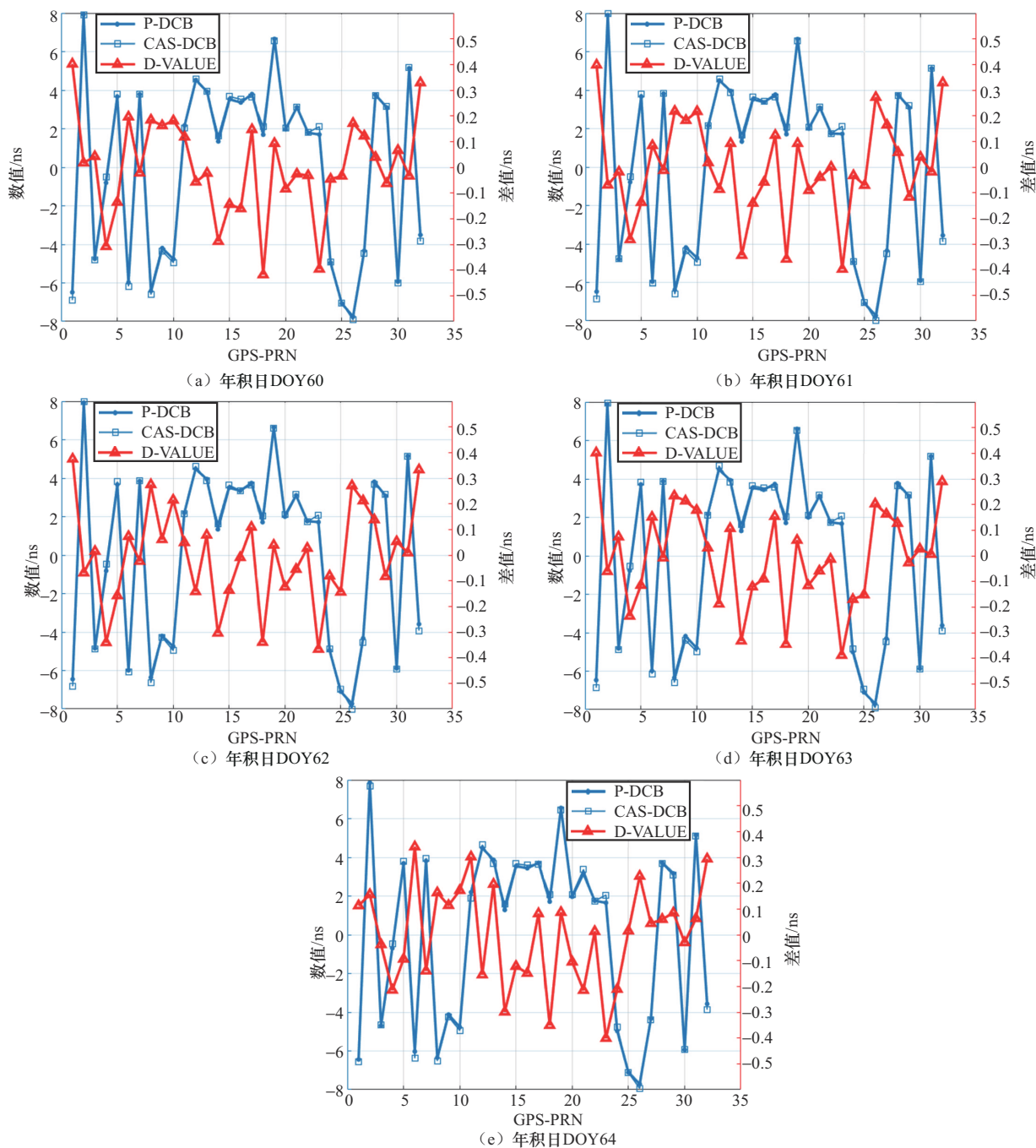


图3 年积日 DOY60—DOY64 卫星频间估算偏差 P-DCB 与 CAS-DCB 对比

知, DCB 值在 $-10 \sim 10$ ns, 并且每天的变化波动比较平缓, 稳定性较高, 对比 P-DCB 和 CAS-DCB 的时间序列, 可以看出两者的变化幅度都不大, 吻合度较高, 这说明 P-DCB 解算的数据比较准确。

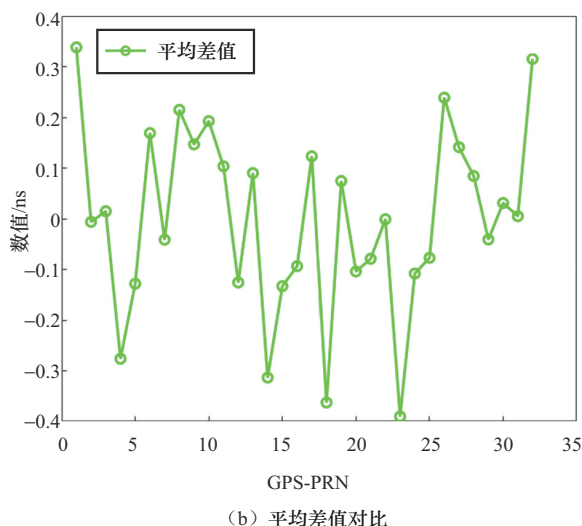
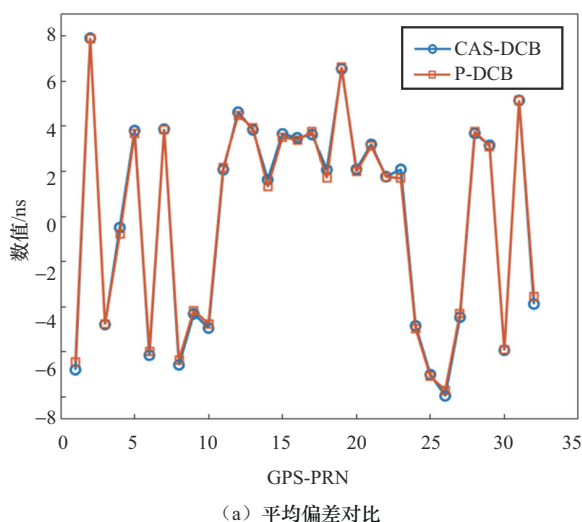


图4 年积日 DOY60—DOY91 卫星频间估算偏差 P-DCB 与 CAS-DCB 的平均偏差和差值对比

4.2 TEC 建模分析

基于球谐函数模型, 选取 6 个 IGS 观测站, 建立了经纬度范围 $40^{\circ}\text{N} \sim 60^{\circ}\text{N}$ 、 $5^{\circ}\text{E} \sim 25^{\circ}\text{E}$ 区域内的电离层模型, 球谐函数估算的建模区域上方在年积日 DOY60 一天内的 VTEC 变化如图 7 所示。球谐函数估算的 GOPE 测站上方在年积日 DOY60 一天内的 VTEC 变化如图 8 所示。由于电

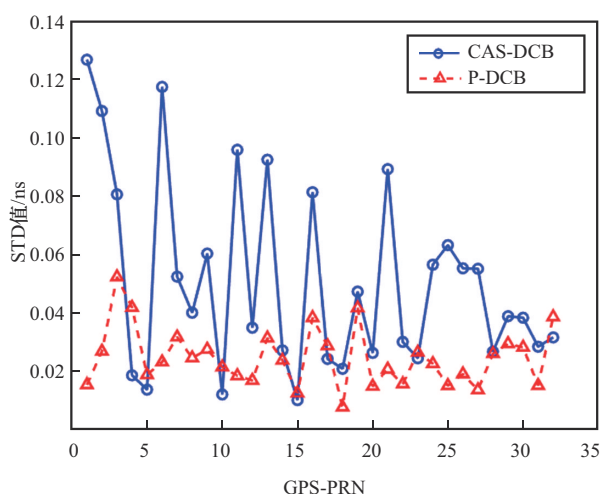
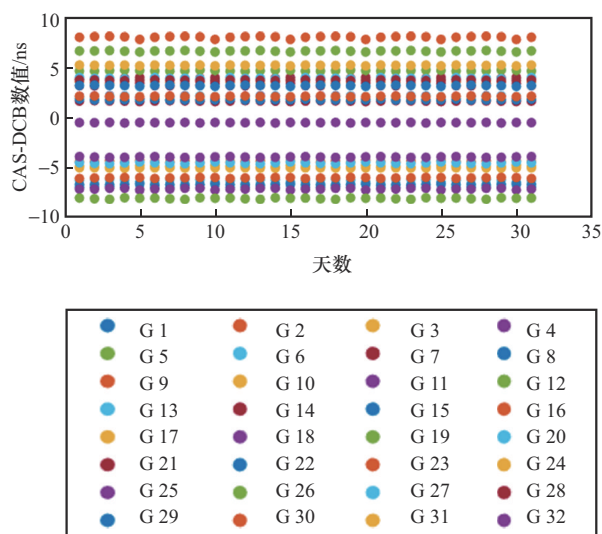


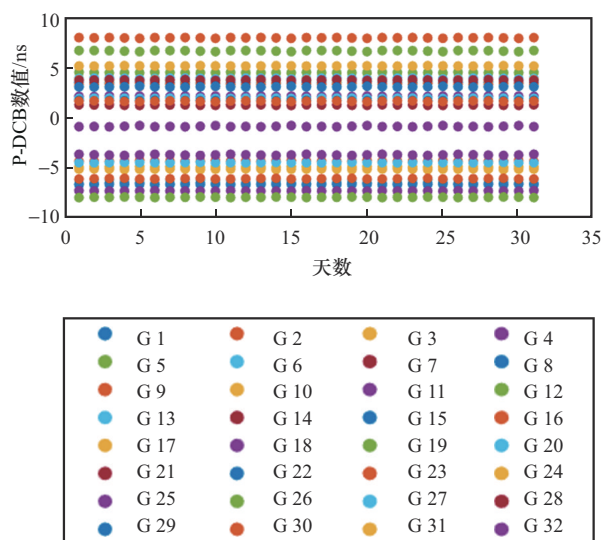
图5 年积日 DOY60—DOY91, P-DCB 和 CAS-DCB 的 STD 值

离层 TEC 值受太阳辐射的影响, 在一天内的电离层 TEC 值会随着白天和黑夜的交替而发生周期性变化。在白天, 该区域大气接收到的太阳辐射强度较大, 导致电离层 TEC 的值相应增加; 在夜晚, 该区域大气接收到的太阳辐射强度减弱, 电离层 TEC 的值相应减小。由图 7 和图 8 可知, 测站天顶方向电离层总电子含量在 24 h 内呈余弦变化趋势, 总体上呈现白天变化剧烈而夜间变化平稳的趋势。在一天中的前 12 h, VTEC 呈现增长变化, 后 12 h 呈现减缓变化。

经纬度范围为 $40^{\circ}\text{N} \sim 60^{\circ}\text{N}$ 、 $5^{\circ}\text{E} \sim 25^{\circ}\text{E}$ 的建模区域在年积日 DOY60 一天内的 VTEC 分布变化如图 9 所示。图 9 中的 12 张图对应着一天中以 2 h 为时间间隔的 12 个时间段, 可以清晰地看到区域在一天之内的电离层 VTEC 变化。0—10 时电离层 VTEC 处于逐步增大的阶段, 大约在 10 时达到峰值, 接近 90 TECU; 10—16 时电离层 VTEC 处于逐渐减小的阶段; 18—22 时电离层 VTEC 处于平稳阶段, 变化不大。此外, 纬度对电子含量也有影响, 纬度越低, 电子含量越高。由图 9 可知, 该区域的最大值通常出现在低纬度地区, 特别是在 $40^{\circ}\text{N} \sim 48^{\circ}\text{N}$, 进一步说明了低纬度地区为电离层活跃区的客



(a) 不同卫星号的CAS-DCB数值



(b) 不同卫星号的P-DCB数值

图6 年积日DOY60—DOY91,P-DCB和CAS-DCB的时间序列

观性。总体而言,图9的VTEC分布变化与实际情况符合度较高。将建模估算值与CAS发布的GIM产品值进行比较,得到观测值与产品值之间的差异,通过计算差值来评估建模的准确性。

建模区域VTEC与CAS产品的差值在年积日DOY60一天内的VTEC分布变化如图10所示。图10中的各子图左边为SUMT修正法,各子图右边为平差增权修正法。从图10可以看

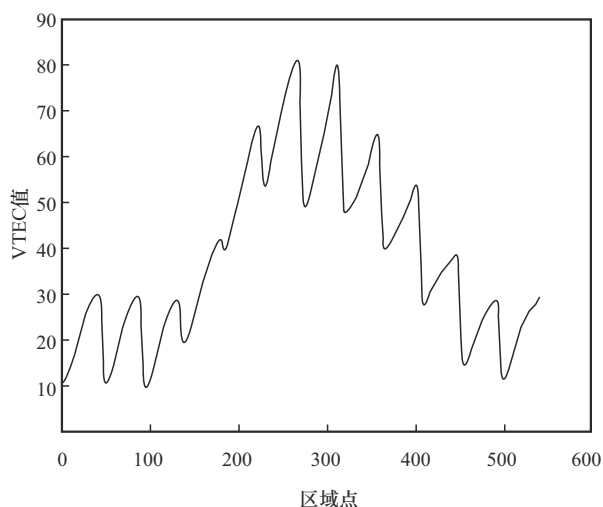


图7 建模区域上方在年积日DOY60一天内的VTEC变化

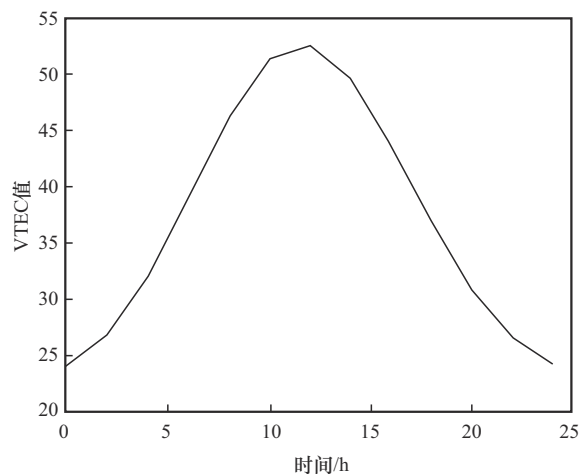


图8 GOPE测站上方在年积日DOY60一天内的VTEC变化

出,一天内的每一个时间段都有差值的变化,差值的分布也呈现出一定的规律,最大差值基本出现在低纬度,这可能是由于低纬度地区电离层的电子密度受太阳活动的影响较大,该区域的电子密度变化较为复杂,在预测模型中较难准确捕捉。SUMT修正后差值的最大值为4 TECU,出现在12时,这进一步说明太阳辐射对电子含量的影响,2/3时间的差值都在2 TECU以内,少数时间出现3 TECU的差值。超过90%区域的VTEC差值在2 TECU以内。平差增权法修正后差值的最大值为4 TECU,出现在0时、2时、12时和14时,只有1/3时间的差值在2 TECU以

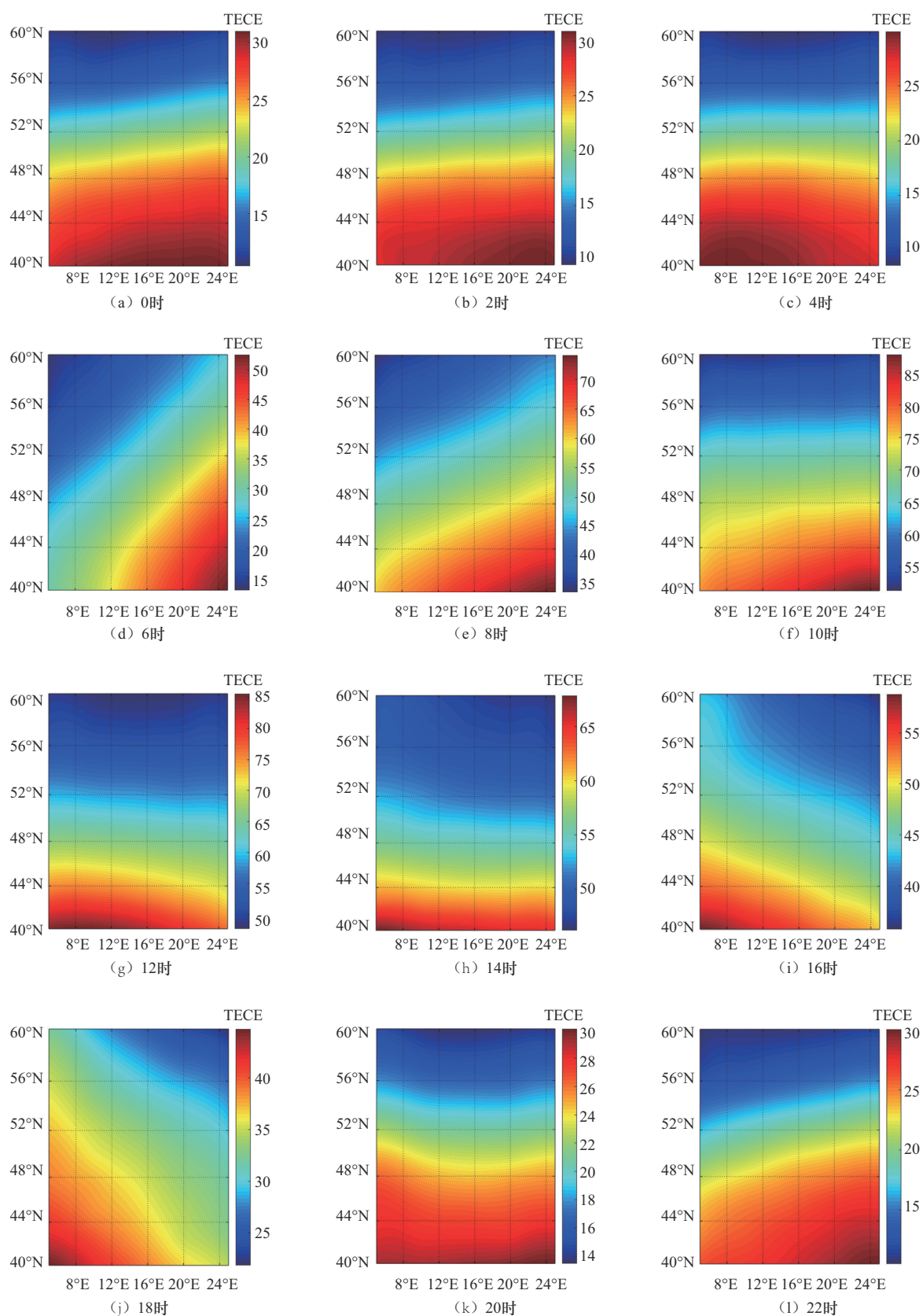


图9 建模区域在年积日DOY60一天内的VTEC分布变化

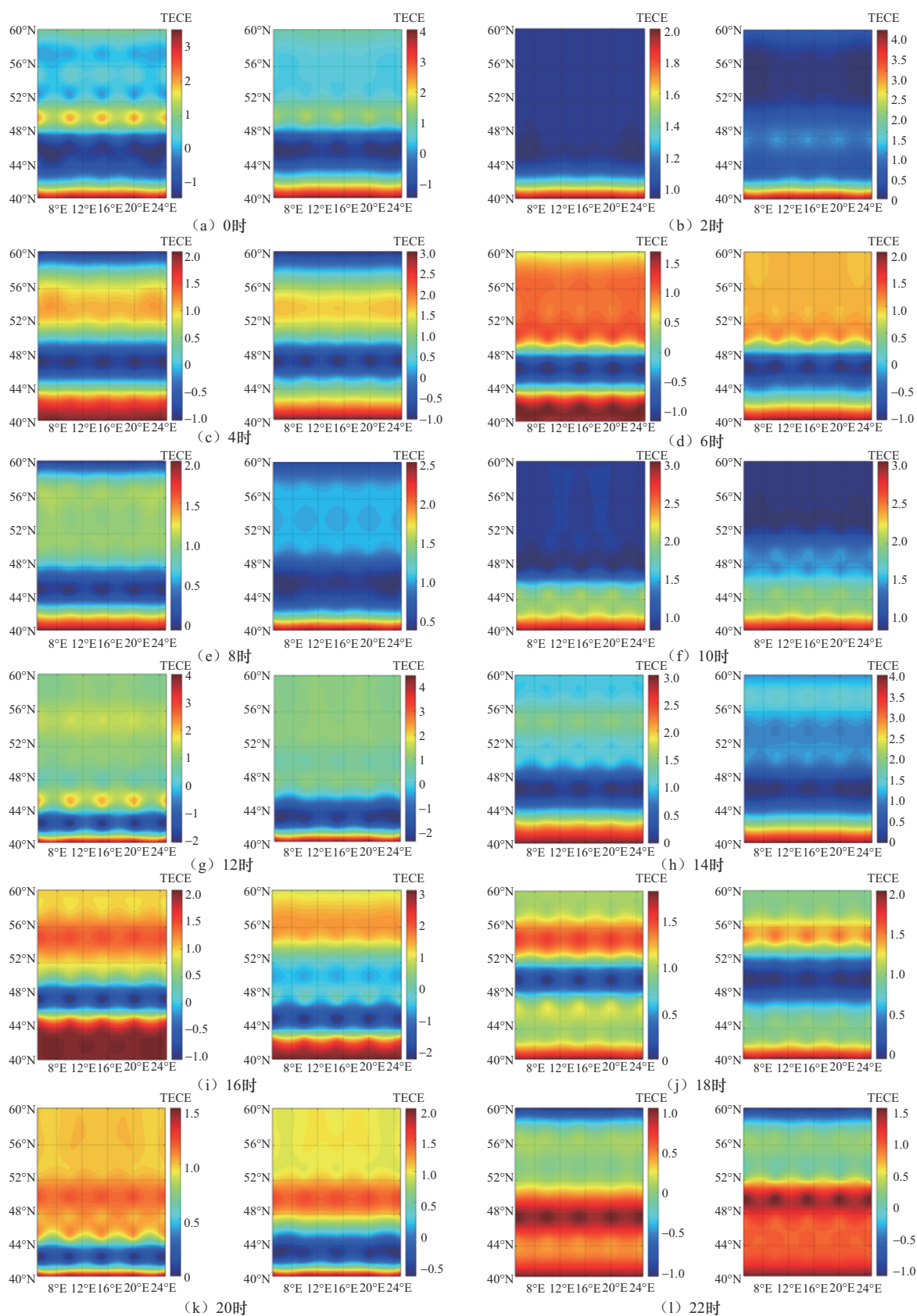


图10 建模区域VTEC与CAS产品的差值在年积日DOY60一天内的VTEC分布变化

内。从整体来看, SUMT修正法的解算值比平差增权修正法的解算值精度更高, 解算结果更贴合CAS产品。

5 结束语

基于球谐函数进行DCB解算和区域电离层VTEC建模, 本文采用了基于SUMT的修正算法, 修正了VTEC出现异常值的情况, 利用IGS提供的6个测站的观测数据, 解算了GPS频间偏差, 并建立了区域电离层VTEC模型, 分析了DCB解算的可靠性和VTEC建模的精度, 将GPS频间偏差DCB解算结果与CAS的DCB产品进行对比分析, 将本文建立的区域电离层VTEC模型与CAS发布的GIM产品进行对比分析, 结果表明, 采用SUMT修正法得到的解算值相较采用平差增权修正法的具有更高的精度, 且与CAS产品更为吻合。

参考文献:

- [1] 李征航, 张小红. 卫星导航定位新技术及高精度数据处理方法[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2009.
LI Z H, ZHANG X H. New technologies in satellite navigation and positioning and high-precision data processing methods[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2009.
- [2] JIN S G, WANG J, ZHANG H P, et al. Real-time monitoring and prediction of ionospheric electron content by means of GPS[J]. Chinese Astronomy and Astrophysics, 2004, 28(3): 331-337.
- [3] ZHANG H P, XU P L, HAN W H, et al. Eliminating negative VTEC in global ionosphere maps using inequality-constrained least squares[J]. Advances in Space Research, 2013, 51(6): 988-1000.
- [4] 刘立波, 万卫星, 陈一定, 等. 电离层与太阳活动性关系[J]. 科学通报, 2011, 56(7): 477-487.
LIU L B, WAN W X, CHEN Y D, et al. The relationship between the ionosphere and solar activity[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(7): 477-487.
- [5] 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): 1015-1019.
YUAN Y B, OU J K. Ionospheric delay model based on generalized trigonometric series function[J]. Progress in Natural Science, 2005, 15(8): 1015-1019.
- [6] 章红平, 施闯, 唐卫明. 地基GPS区域电离层多项式模型与硬件延迟统一解算分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2008, 33(8): 805-809.
ZHANG H P, SHI C, TANG W M. United solution to polynomial VTEC modeling and DCB analysis using ground-based GPS observations[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2008, 33(8): 805-809.
- [7] 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): 1186-1189, 1261-1262.
ZHANG H P, HAN W H, HUANG L, et al. Modeling global ionospheric delay with IGS ground-based GNSS observations[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2012, 37(10): 1186-1189, 1261-1262.
- [8] LI Z S, YUAN Y B, WANG N B, et al. SHPTS: towards a new method for generating precise global ionospheric TEC map based on spherical harmonic and generalized trigonometric series functions[J]. Journal of Geodesy, 2015, 89(4): 331-345.
- [9] 赵东旭, 遆鹏, 谭诗腾, 等. 一种北斗卫星差分码偏差估计方法[J]. 测绘通报, 2016(5): 14-17.
ZHAO D X, TI P, TAN S T, et al. An estimating method of differential code biases for Bei Dou satellites[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2016(5): 14-17.
- [10] 黄小东, 涂锐, 刘金海, 等. 基于不等式约束算法改善高纬度地区GNSS电离层建模精度[J]. 大地测量与地球动力学, 2019, 39(7): 722-727.
HUANG X D, TU R, LIU J H, et al. Inequality constraints algorithm to improve the high latitudes GNSS ionosphere modeling accuracy[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2019, 39(7): 722-727.
- [11] 刘宇. GNSS差分码偏差及电离层建模研究[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2023.
LIU Y. Research on GNSS differential code bias and ionospheric modeling[D]. Guilin: Guilin University of Electronic Technology, 2023.
- [12] FENG J D, ZHANG Y B, LI W, et al. Analysis of ionospheric TEC response to solar and geomagnetic activities at different solar activity stages[J]. Advances in Space Research, 2023, 71(5): 2225-2239.
- [13] 娄广振. 磁暴期电离层扰动监测及其对GNSS定位性能评估[D]. 济南: 山东建筑大学, 2024.
LOU G Z. Monitoring of ionospheric disturbances during magnetic storms and their impact on GNSS positioning performance[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2024.
- [14] 徐磊. GNSS区域电离层精细化建模理论与方法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
XU L. Research on theories and methods for fine-scale modeling of GNSS regional ionosphere[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.



- [15] 尚靖哲, 葛海波. 基于双频组合观测值的 GNSS 全球电离层建模比较[J]. 中国新技术新产品, 2024(5): 1-4, 34.

SHANG J Z, GE H B. Comparison of GNSS global ionospheric modeling based on dual-frequency combined observations[J]. New Technology & New Products of China, 2024(5): 1-4, 34.



尚俊娜 (1979-), 女, 博士, 杭州电子科技大学通信工程学院教授, 主要研究方向为卫星导航与组合导航。

[作者简介]



廖思明 (1999-), 男, 杭州电子科技大学通信工程学院硕士生, 主要研究方向为导航系统电离层参数估计等。



苏明坤 (1986-), 男, 博士, 杭州电子科技大学通信工程学院讲师、硕士生导师, 主要研究方向为卫星导航系统与室内定位。