



# 非差非组合PPP的广域星间单差天顶 电离层模型及其验证

伍冠滨<sup>1,2</sup> 陈俊平<sup>1,2</sup> 白天阳<sup>1</sup> 伍晓劭<sup>3</sup> 胡金林<sup>3</sup>

1 中国科学院上海天文台,上海,200030

2 中国科学院大学天文与空间科学学院,北京,100049

3 上海华测导航技术股份有限公司,上海,201799

**摘要:**高精度电离层修正是非差非组合精密单点定位(precise point positioning, PPP)加速收敛的重要前提。首先基于参考站网台站观测数据,以非差非组合精密单点定位提取的电离层延迟作为建模数据源,提出一种基于多项式模型的估计天顶电离层延迟参数以及卫星硬件延迟的单差电离层模型。然后开发了服务端和客户端相应软件系统,服务端提取电离层延迟和进行单差建模,并将模型参数播发给客户端作为电离层约束进行非差非组合精密单点定位。最后在欧洲地区通过PPP提取电离层进行拟合实验,结果表明,广域地区GPS和俄罗斯GLONASS(global navigation satellite system)单系统电离层模型内外符合精度分别为1 TECu(total electron content unit)和3 TECu。采用电离层约束的非差非组合动态精密单点定位,统计136个1 h时段的定位结果,发现在附加电离层约束PPP实验中,78个时段(57.35%)收敛时间在5 min内,97个时段(71.32%)在10 min内,122个时段(89.7%)在15 min内,132个时段(97.06%)在25 min内;在无约束PPP实验中,上述收敛时间内结果分别为15个(11.03%)、64个(47.06%)、91个(66.91%)、110个(80.88%)。

**关键词:**非差非组合;精密单点定位;电离层模型;广域星间单差;快速收敛

**中图分类号:**P228

**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)精密定位中最重要的误差影响因素之一。传统的精密单点定位(precise point positioning, PPP)采用消电离层组合观测值来消除电离层延迟的影响,对于单频用户一般使用模型改正或者外部的电离层产品来削弱其影响<sup>[1]</sup>。传统的电离层产品或模型是基于伪距或者相位平滑伪距的方式来提取电离层延迟<sup>[2]</sup>。非差非组合PPP观测方程中保留了电离层延迟参数,因此高精度的先验的电离层信息有助于非差非组合PPP快速收敛。

高精度的实时电离层模型对于实时的快速高精度定位有十分重要的作用<sup>[3]</sup>。在GNSS研究和应用中,通常涉及经验模型和非经验模型两类电离层模型<sup>[4]</sup>。经验模型主要包括国际参考电离层(international reference ionosphere, IRI)模型、Bent模型和Klobuchar等模型。研究表明,即

使根据最佳的电离层经验模型计算出的月平均总电子含量(total electron content, TEC)值效果也只有75%~80%,其精度不能满足高精度的GNSS用户的需求<sup>[5]</sup>;非经验模型大多基于GNSS双频观测值构建电离层模型,其中对于区域、广域应用最广泛的是多项式模型(polynomial model, POLY),其精度要好于经验模型。国际GNSS服务(International GNSS Service, IGS)下属的不同国际分析机构如欧洲定轨中心(Centre for Orbit Determination in Europe, CODE)、欧洲空间局(European Space Agency, ESA)、加拿大能源矿产资源部(Energy, Mines and Resources, EMR)、美国喷气动力实验室(Jet Propulsion Lab, JPL)和武汉大学在薄层的条件下,采用球谐函数模型对全球电离层TEC分布进行拟合,并发布各自的电离层网格产品,精度在2~8 TECu之间<sup>[6-11]</sup>。文献[12-15]基于多频多系统数据对中国

收稿日期:2020-08-09

项目资助:广东省重点研发计划(2018B030325001);国家重点研发计划(2018YFB0504300);国家自然科学基金(11673050)。

第一作者:伍冠滨,硕士生,研究方向为精密单点定位。wuguanbin@shao.ac.cn

通讯作者:陈俊平,博士,研究员。junping@shao.ac.cn

区域或全球范围的电离层建模进行分析,但受观测噪声和多路径误差的影响,伪距观测值精度较低,所以建模精度不高。为提高提取精度,文献[16]采用非差非组合 PPP 技术提取电离层延迟值;文献[17]将非差非组合 PPP 提取的电离层观测值用于单频动态 PPP,获得分米级精度,虽然非差非组合 PPP 的提取精度高于伪距、相位平滑伪距的提取精度,但其提取误差依然可以达到几个 TECu;文献[18]利用 PPP 固定解提取电离层观测值,其提取精度优于 1 TECu。

本文提出了一种广域电离层建模的新方法并建立了相应的数据服务系统。首先基于非差非组合 PPP 函数模型,通过坐标约束和模糊度固定的方法对广域跟踪网观测数据提取出电离层

$$\begin{cases} P_i = \rho + c(dt_r - dt^s) + C_i I^s + M^s T + B_{r,i} - B_i^s + \epsilon_P \\ L_i = \rho + c(dt_r - dt^s) - C_i I^s + \lambda_i N_i^s + M^s T + b_{r,i} - b_i^s + \epsilon_L \end{cases} \quad (1)$$

式中, $i$ 表示频率号; $s$ 表示卫星号; $P$ 表示伪距观测值; $L$ 表示相位观测值; $\rho$ 表示测站到卫星的几何距离; $c$ 表示光速; $dt_r$ 表示接收机钟差; $dt^s$ 表示卫星钟差;当 $i=1$ 时, $C_i=1$ ,当 $i=2$ 时, $C_i=f_1^2/f_2^2$ , $f$ 表示频率; $I$ 表示在第一频点的斜路径电离层延迟; $M$ 表示天顶对流层到斜路径方向的投影函数; $T$ 表示天顶对流层延迟; $N$ 表示相位观测值的模糊度参数; $B_r$ 表示接收机硬件延迟; $B^s$ 表示卫星硬件延迟; $b_r$ 表示接收机相位延迟; $b^s$ 表示卫星相位延迟; $\epsilon_P$ 、 $\epsilon_L$ 分别表示伪距、相位测量噪声。

卫星钟差使用外部的无电离层(ionosphere free, IF)组合的钟差产品,把产品修正的钟差记

$$\begin{cases} P_i = \rho + c(d\bar{t}_r - d\bar{t}^s) + C_i I^s + M^s T + C_i \beta (dB_r - dB^s) + \epsilon_{P_i} \\ L_i = \rho + c(d\bar{t}_r - d\bar{t}^s) - C_i I^s + \lambda_i N_i^s + M^s T + d_{IF,r} - d_{IF}^s + b_{r,i} - b_i^s + \epsilon_{L_i} \end{cases} \quad (5)$$

式中, $dB_r = B_{r,1} - B_{r,2}$ ; $dB^s = B_1^s - B_2^s$ 。

由于 $dB_r$ 、 $dB^s$ 参数与电离层参数、相位模糊

$$\begin{cases} P_i = \rho + c(d\bar{t}_r - d\bar{t}^s) + C_i \bar{I}^s + M^s T + \epsilon_{P_i} \\ L_i = \rho + c(d\bar{t}_r - d\bar{t}^s) - C_i \bar{I}^s + \lambda_i \bar{N}_i^s + M^s T + \epsilon_{L_i} \end{cases} \quad (6)$$

则可得到等效电离层参数 $\bar{I}^s$ 和等效模糊度 $\bar{N}_i^s$ :

$$\begin{cases} \bar{I}^s = I^s + \beta (dB_r - dB^s) \\ \lambda_i \bar{N}_i^s = (\lambda_i N_i^s + b_{r,i} - b_i^s) + (d_{IF,r} - d_{IF}^s) + C_i \beta (dB_r - dB^s) \end{cases} \quad (7)$$

基于式(6),对于坐标精确已知的参考站,可采用约束测站坐标的非差非组合 PPP 计算等效斜路径电离层延迟。

计算过程中,对于固定模糊度的卫星,其获取的等效电离层延迟值可直接作为广域电离

延迟值;然后采用单差的垂直总电子含量(vertical total electron content, VTEC)多项式模型消除接收机硬件延迟对电离层建模的影响,为适应实时需求,采用短时建模方式,每隔 10 min 生成一套电离层模型参数。用户端接收来自服务端的电离层模型参数,采用电离层约束的方法以实现实时快速高精度定位<sup>[19]</sup>。

## 1 非差非组合 PPP 电离层延迟提取

非差非组合 PPP 函数模型将斜路径电离层延迟作为待估参数保留在观测方程中,在 PPP 解求其他参数的同时提取电离层延迟值<sup>[20]</sup>。这样的非差非组合 PPP 的观测方程可简单表示为:

为 $d\bar{t}^s$ ;在定位中,由于接收机硬件延迟可被接收机钟差所吸收,所以得到新的接收机钟差参数 $d\bar{t}_r$ 。二者计算如下<sup>[21]</sup>:

$$d\bar{t}^s = dt^s + \frac{d_{IF}^s}{c} \quad (2)$$

$$d\bar{t}_r = dt_r + \frac{d_{IF,r}}{c} \quad (3)$$

式中,

$$\begin{cases} d_{IF,r} = \alpha B_{r,1} + \beta B_{r,2} \\ d_{IF}^s = \alpha B_1^s + \beta B_2^s \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\alpha = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2}$ ; $\beta = -\frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}$ 。

将式(2)、(3)、(4)代入式(1)中,可得:

度参数线性相关,参数之间无法分离,因此,式(5)可以改写为:

层模型的原始观测值。对于未固定模糊度卫星,当非差非组合 PPP 收敛一段时间后,电离层参数方差在设定的阈值范围内时,解得的斜路径电离层延迟值也可以作为电离层建模的观测值。

## 2 广域星间单差电离层改正模型

斜路径电离层延迟通常表示为投影函数以及天顶电离层延迟的组合:

$$I^s = F \cdot m^s \cdot V_{\text{TEC}}^s \quad (8)$$

式中,  $F$  表示第一频点由 TECu 单位向距离单位的转换系数,  $F = (40.28 \times 10^{16}) / f_1^2$ ;  $m^s$  表示电离层投影函数,  $m^s = 1 / \cos Z'$ ,  $Z' = \arcsin [R_E \sin(\alpha z) / (R_E + H)]$ ,

$$\begin{aligned} \Delta \bar{I}^s = \bar{I}^s - \bar{I}^r = & (F \cdot m^s \cdot V_{\text{TEC}}^s + D_r - D^s) - (F \cdot m^r \cdot V_{\text{TEC}}^r + D_r - D^r) = \\ & (F \cdot m^s \cdot V_{\text{TEC}}^s - D^s) - (F \cdot m^r \cdot V_{\text{TEC}}^r - D^r) \end{aligned} \quad (10)$$

式中, 上标  $s, r$  分别代表卫星号和参考卫星号。由式(10)可知, 单差建模可以消除接收机端的硬件延迟。

对于区域乃至广域(如一个洲的面积)覆盖的台站网, 区域内天顶电离层延迟 VTEC 通常采用多项式进行建模, 其模型表达如下:

$$V_{\text{TEC}} = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m E_{ij} (\varphi - \varphi_0)^j (S - S_0)^i \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \Delta \bar{I}^s = & \left\{ F \cdot m^s \cdot \left[ \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m E_{ij} (\varphi^s - \varphi_0)^j (S^s - S_0)^i \right] - D^s \right\} - \\ & \left\{ F \cdot m^r \cdot \left[ \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m E_{ij} (\varphi^r - \varphi_0)^j (S^r - S_0)^i \right] - D^r \right\} \end{aligned} \quad (12)$$

基于式(12)解算电离层延迟系数时, 必须为每一个测站的每个卫星系统选择一颗参考卫星, 可选择高度角最高的卫星。卫星端硬件延迟无法通过星间单差消除, 与电离层 VTEC 参数一起估计并播发给用户。

利用多个测站组成的参考站网求解天顶电离层模型参数和卫星硬件延迟时, 对建模时段内每个历元所有测站以及所有卫星系统的法方程进行叠加<sup>[22]</sup>。

星间单差模型求解的是卫星硬件延迟相对值, 在为每个系统组法方程时, 必须选择一颗卫星作为约束, 且同一个卫星系统, 整个建模时段只选一颗约束卫星<sup>[23]</sup>。

为满足实时性要求, 模型必须有短期预报高精度的特点, 上述建模可采用参考时刻前后短时期内的数据, 并设置最优的多项式阶数<sup>[24]</sup>。

建模过程中, 每个时段内实际所用到的站是不一样的, 每个建模时段内的参考中心理论上也是不尽相同的。因此, 多项式模型的中心点应该基于实际参与建模测站的分布进行计算。此外, 多项式模型是以卫星穿刺点的垂直天顶电离层延迟作为模型的观测值, 在计算建模中心时也应

$H = 450 \text{ km}$ ,  $R_E$  为地球半径,  $z$  为测站天顶距,  $\alpha = 0.9782$ ;  $V_{\text{TEC}}^s$  为天顶电离层延迟。

结合式(6)、(7), 非差非组合 PPP 求取的等效斜路径电离层延迟可表示为:

$$\bar{I}^s = F \cdot m^s \cdot V_{\text{TEC}}^s + D_r - D^s \quad (9)$$

式中,  $D_r = \beta dB_r$ ;  $D^s = \beta dB^s$ 。

选定一个参考卫星, 进行等效斜路径星间单差:

式中,  $n, m$  分别为纬度、经度对应的阶数;  $E_{ij}$  为模型待估参数;  $\varphi, \varphi_0$  分别为观测时刻卫星电离层穿刺点大地纬度、建模中心大地纬度;  $S, S_0$  分别为观测时刻太阳时角、建模中心的太阳时角。

将式(11)代入式(10)可得到最终模型:

考虑每个站参与建模的观测值数目, 加权计算建模中心点的大地坐标。

广域单差电离层模型在解求天顶电离层 VTEC 模型参数的同时也解算了卫星端的硬件延迟。为保证卫星端硬件延迟的解算精度, 设定每颗卫星的最少斜路径电离层延迟观测数据量, 当卫星的观测数量少于限值时, 需要对其进行剔除。

## 3 用户端电离层约束

§2 中的星间单差电离层模型估计的天顶电离层延迟以及卫星端硬件延迟都是相对于参考卫星。用户可通过以上计算的多项式系数计算天顶电离层延迟 VTEC, 从而利用式(12)获取相对等效斜路径电离层延迟  $\Delta \bar{I}^s$ , 并对非差非组合 PPP 定位进行电离层延迟约束。引入电离层虚拟观测值<sup>[25]</sup>, 把  $\Delta \bar{I}^s$  作为虚拟观测值加到观测方程中。同样地, 可选取卫星高度角最高的卫星作为参考星。为方便表述, 这里设以最后一颗(第  $n$  颗)卫星为参考星, 加入电离层单差虚拟观测值后, 观测方程可改写为:

$$\begin{bmatrix} P_1^1 \\ L_1^1 \\ P_2^1 \\ L_2^1 \\ \vdots \\ P_n^n \\ L_n^n \\ \Delta\bar{I}^1 \\ \vdots \\ \Delta\bar{I}^{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{u} & \mathbf{E} & \mathbf{M} & \mathbf{C} & \mathbf{E} \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{K} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{dt} \\ T \\ \bar{I} \\ N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_P \\ \epsilon_L \\ \epsilon_{\Delta\bar{I}} \end{bmatrix}, \mathbf{Q}_P, \mathbf{Q}_L, \mathbf{Q}_{\Delta\bar{I}} \quad (13)$$

式中,左式中元素下标表示频率,上标表示卫星号; $\Delta\bar{I}$ 表示电离层虚拟观测值; $\mathbf{u}, \mathbf{x}$ 分别表示坐标参数系数矩阵、坐标参数矩阵; $\mathbf{E}, \mathbf{dt}$ 分别表示单位矩阵、不同卫星系统的接收机钟差矩阵; $\bar{I}$ 为等效斜路径电离层延迟; $\epsilon_P, \epsilon_L, \epsilon_{\Delta\bar{I}}$ 分别表示伪距、相位、电离层单差虚拟观测值的观测噪声; $\mathbf{Q}_P, \mathbf{Q}_L, \mathbf{Q}_{\Delta\bar{I}}$ 分别表示伪距、相位、电离层单差虚拟观测值的方差矩阵; $\mathbf{K}$ 表示电离层单差约束的系数矩阵,去掉全为 0 的行和列,假设最后一颗(第  $n$  颗)卫星为参考星,则可表示为:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 0 & -1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & 1 & -1 \end{bmatrix}_{(n-1) \times n} \quad (14)$$

式(13)中伪距和相位观测值的观测方程和式(5)中保持一致,依然采用部分固定模糊度的方法进行参数解算,式中增加的电离层单差约

束,与建模完全自治,从而可实现非差非组合 PPP 的快速收敛。

### 4 广域星间单差天顶电离层模型实验分析

基于上述模型和定位算法,开发了相应数据处理系统。系统包括服务端及用户端两部分。服务端的主要任务是对地面跟踪站利用非差非组合 PPP 提取高精度的电离层观测值,通过一定的质量控制,进行广域单差电离层建模。从服务端到用户端,对电离层和卫星硬件延迟参数进行编码,使用网络播发或者卫星播发给用户。用户接收到播发的数据流后,通过解码获得模型参数就可以进行等效电离层单差值重构,用于非差非组合 PPP 的电离层约束。其流程如图 1 所示。

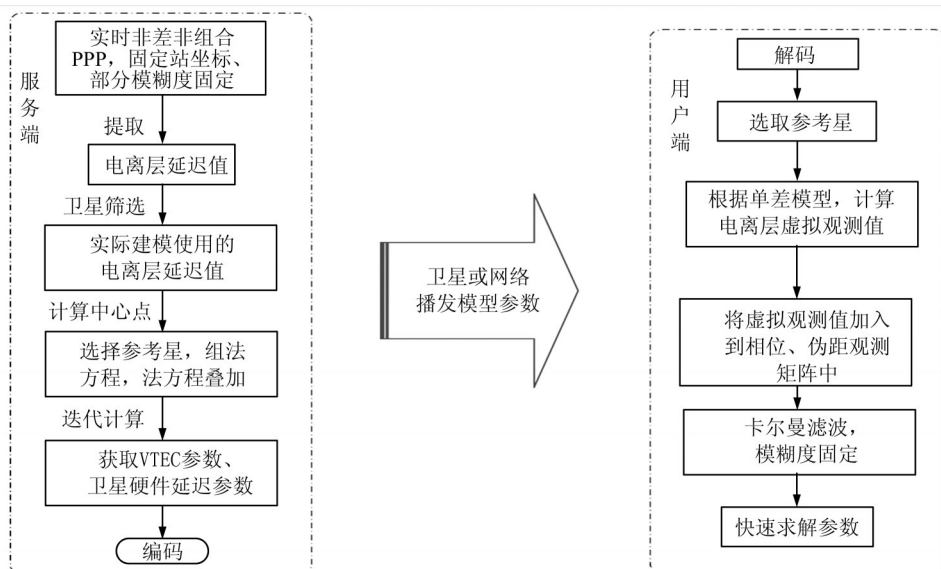


图 1 服务端到用户端的流程图  
Fig.1 Flowchart of Server to Client

为了测试上述广域星间单差电离层模型、用户端约束模型以及图 1 中的软件系统,选取了欧洲 58 个 IGS 站进行实验。测站几乎覆盖了整个欧洲及周边,选取了 2018-11-04 的 30 s 采样率观

测数据作为服务端 PPP 提取电离层延迟值的观测数据,选取 1 s 采样率的观测数据进行 PPP 验证模型效果。由于很大一部分实验测站没有欧盟的伽利略(Galileo)系统和北斗卫星导航系统

(BeiDou navigation satellite system, BDS)的观测数据,所以本文主要针对GPS和GLONASS两个系统进行分析。此外,从实验测站中进一步选取

58、39、29和18个测站数据,分析测站分布个数对模型精度的影响。实验区域测站分布如图2所示。

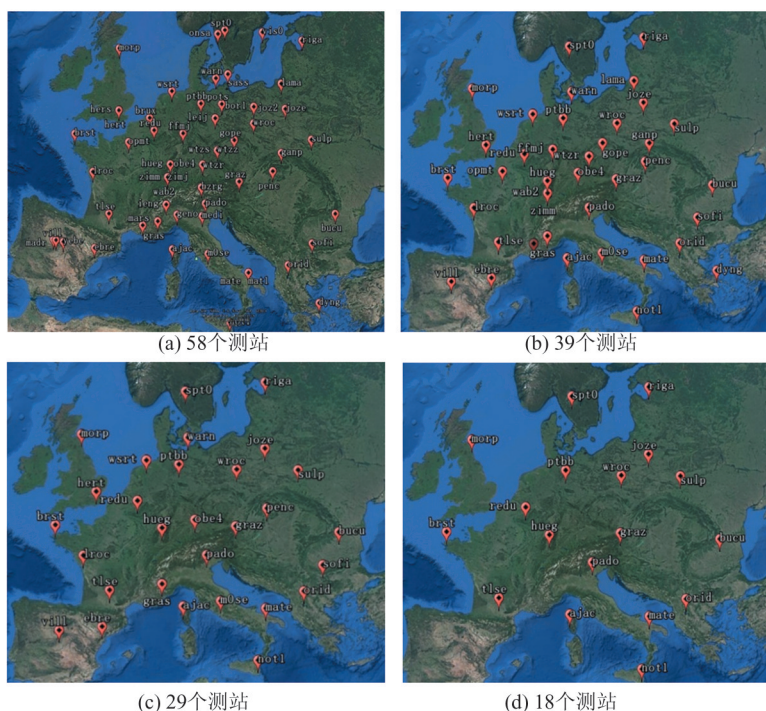


图2 实验区域测站分布

Fig.2 Distribution of Stations in Experimental Area

本文实验采用上海华测导航技术股份有限公司的CORSPPP2010程序进行服务端的多系统电离层延迟值提取,按照上述模型在服务端进行广域电离层建模。CORSPPP2010是上海华测导航技术股份有限公司针对PPP-rtk技术采用非差非组合PPP模型开发的服务端程序,包含了卫星钟差计算模块、实时相位偏差改正模块、区域/广域大气改正模块,相应地为非差非组合PPP用户提供实时卫星钟差(uncalibrated phase delay, UPD)、实时相位偏差改正(fractional cycle bias, FCB)、区域/广域大气模型改正的产品。SWASPPP是CORSPPP2010所服务的用户程序,与CORSPPP2010在模型算法上保持一致,可以接受CORSPPP2010实时解算的卫星钟差、UPD/FCB、区域/广域大气改正产品来进行快速高精度定位。

上述两套程序采用部分模糊度固定的策略,对模糊度进行固定。由于GLONASS频分多址的原因,所以没有对GLONASS系统进行模糊度固定,只对其进行卡尔曼滤波采用其浮点解。根据宽巷模糊度具有长波长更容易进行模糊度固定的特性,为提高模糊度固定的成功率,程序先

把卡尔曼滤波计算的浮点模糊度组合成宽窄巷模糊度。由于模糊度中含有接收机端和卫星端的UPD,实际上计算的组合宽窄巷模糊度是不具有整周特性的,要进行模糊度固定,先要恢复其整周特性。选定一个参考卫星进行卫星间单差以消除接收机端UPD的影响,同时使用UPD成品进行卫星端的UPD修正。其UPD产品亦通过该程序的FCB估算模块进行计算。在宽巷模糊度固定时执行以下策略:(1)采用直接取整法对浮点模糊度小数部分小于0.25周的浮点解直接取整;(2)利用最小二乘模糊度降相关平差法(least-square ambiguity decorrelation on adjustment, LAMBDA),对宽巷模糊度进行搜索;(3)综合步骤(1)、(2)获得最终的宽巷整周模糊度。以宽巷的单差浮点模糊度为观测值、宽巷的单差整周模糊度为观测真值,与L1、L2的单差浮点模糊度组成观测方程,进行滤波更新,获得更新后的L1、L2单差浮点模糊度。对L1、L2的窄巷UPD进行修正,利用LAMBDA搜索法进行N1单差模糊度搜索,根据宽巷单差整周模糊度和N1单差模糊度确定N2单差整周模糊度。同理,N1模糊度固定后,对其他参数进行更新。

为适应电离层的变化,建模数据弧长为 20 min,以建模时段的中间时刻作为建模参考时刻,每隔 10 min 估计一套  $4 \times 4$  阶 VTEC 多项式参数和卫星端硬件延迟参数。在此基础上,使用 SWASPPP 程序进行非差非组合动态 PPP 定位收敛效果的验证。

#### 4.1 电离层内符合精度

计算内符合精度时,对每个测站选取每个系统高度角最高的卫星作为该系统的参考星,每颗星电离层延迟值与参考星电离层延迟值作差来获得电离层延迟值的单差值。通过建模获得的多项式模型参数和卫星端硬件延迟值计算的电离层延迟值单差值与服务端提取的电离层延迟值差值作差,得到不同卫星的斜路径方向上的残差。图 3 是协调世界时 (universal time coordinated, UTC) 03:00—22:00, GRAZ、HUEG、REDU 3 个站在不同的建模站数条件下得到的电离层模型内符合均方根误差 (root mean squared error, RMSE) 值。

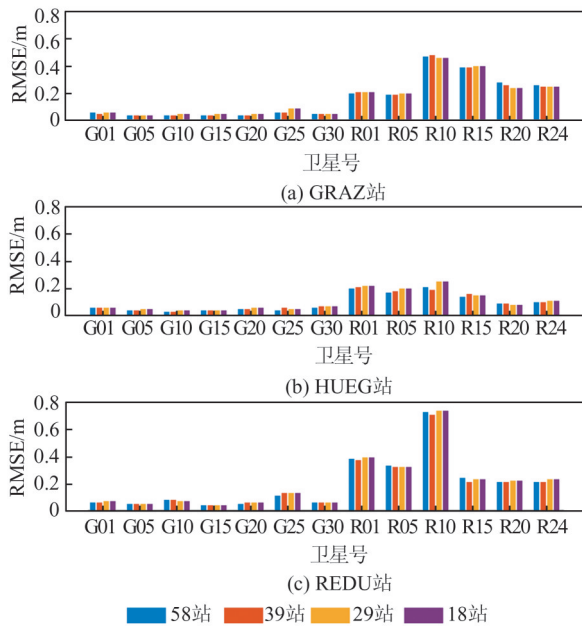


图 3 广域星间单差电离层模型内符合 RMSE

Fig.3 Internal RMSE of Wide-Area Between-Satellite Single-Difference VTEC Ionospheric Model

#### 4.2 电离层外符合精度

电离层外符合精度的计算与内符合精度一样,但是所用到的站为建模未使用的测站。实验中剔除 GRAZ、HUEG、REDU 3 个测站重新进行建模,然后计算出这 3 个测站的外符合 RMSE 如图 4 所示。

由图 3、4 可知, GPS 系统采用该模型,以提取

的电离层延迟单差值为基准,基本可达到 1 个 TECu (约 0.16 m) 以内的精度,而 GLONASS 系统可达到 3 个 TECu (约 0.48 m) 以内的精度,并且内外符合精度相近。由上述逐渐减少建模使用站的实验可以看出,在站分布较为均匀的情况下,从 58 个站到 18 个站的内外符合精度并未产生明显的下降。

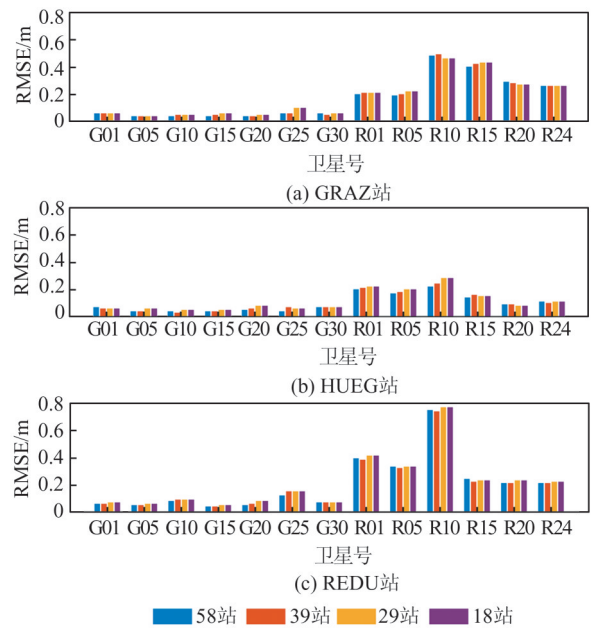


图 4 广域星间单差电离层模型外符合 RMSE

Fig.4 External RMSE of Wide-Area Between-Satellite Single-Differenced VTEC Ionospheric Model

#### 4.3 非差非组合 PPP 收敛测试

按照式 (13) 进行非差非组合精密单点定位,其中电离层参数约束按照式 (12) 组法方程。其定权方法如下:

$$v = (a^2 + \frac{a^2}{\sin^2 e}) \cdot k \quad (15)$$

$$W = \frac{1}{v} \quad (16)$$

式中,  $v$  为方差;  $a$  根据以往实验验证确定, 本文设  $a = 0.1$ ; 对 GPS 系统,  $k = 10$ , 对 GLONASS 系统,  $k = 50$ ;  $e$  为卫星高度角;  $W$  为权。

首先把每个站从 04:00—21:00 分成不重叠的若干个时段, 每个时段长度为 1 h, 然后进行附加电离层约束和无约束非差非组合动态 PPP 定位模式下的定位比较其首次收敛时所需的时间。以 IGS 机构提供的 IGS 站周天解文件中的坐标作为每个测站的坐标真值。由于电离层主要对水平方向的定位结果产生影响, 为验证模型对定位的影响, 本文实验以水平方向的定位收敛时间作为参考。若水平方向误差连续 600 历元不超过

0.05 m, 则认为 PPP 定位结果已经收敛<sup>[26]</sup>。以 GRAZ 站的两个时段为例, 其动态坐标与真值差值在东/北/天顶 (east/north/up, E/N/U) 3 个方向上的时间序列如图 5 所示。

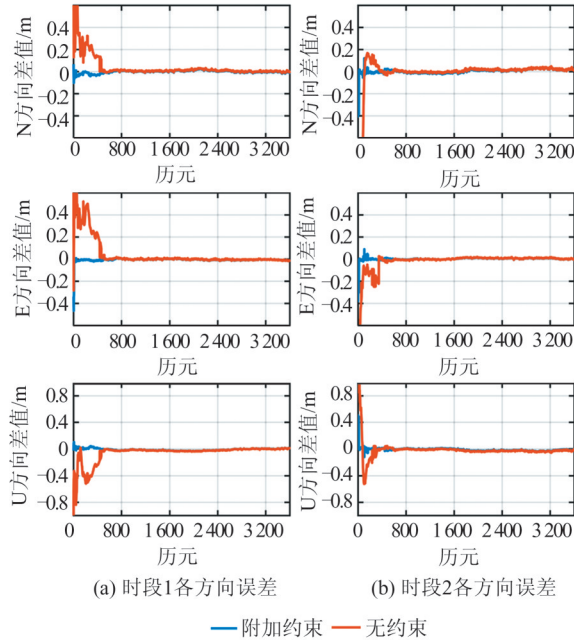


图5 GRAZ站两个时段附加电离层约束与无电离层约束获取的动态坐标与真值差值序列  
Fig.5 Comparison of Difference Time Series of Kinematic Coordinates with and Without Ionosphere Constraint of Station GRAZ

GRAZ、HUEG 站的附加电离层约束和无约束的 PPP 首次收敛时间对比分别如图 6、7 所示。

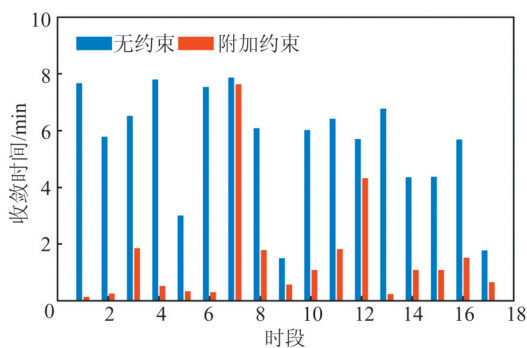


图6 GRAZ 测站附加电离层约束与无电离层约束动态 PPP 的收敛时间  
Fig.6 Comparison of Convergence Time with and Without Ionosphere Constraint of Station GRAZ

由图 5、6 和图 7 可以看出, 大部分时段中, 附加电离层约束的 PPP 效果要远好于无约束的 PPP。但也存在一些提升幅度不大的时段, 通过其他实验验证可知, 不同的定权策略导致提升效果不同。现阶段的定权策略并不能反映最有效的约束权, 是

经验权, 可能导致约束效果不佳。对于精细化的定权策略, 需要后续再进行深入的研究。

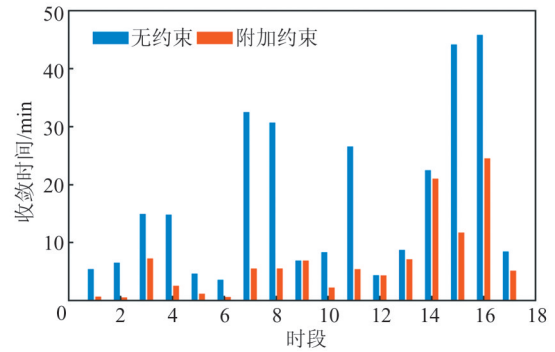


图7 HUEG 测站电离层约束与无电离层约束动态 PPP 的收敛时间  
Fig.7 Comparison of Convergence Time with and Without Ionosphere Constraint of Station HUEG

为了验证模型的约束效果, 选取建模区域中 FFMJ、GRAS、GRAZ、HUEG、LEIJ、REDU、WTZR、ZIM2 这 8 个站采用 1 s 采样率的观测文件进行动态 PPP。为了比较附加电离层约束与无电离层约束 PPP 的收敛效果, 分别对两种模式的收敛时间、收敛提升效果进行统计, 共获得 136 个统计时段, 其统计结果分别如表 1、2 所示。表 1 中, 括号外的数字为时段个数, 括号内的百分数为占总量的百分比。

表 1 收敛时间统计表

Tab.1 Statistics of Convergence Time

收敛时间指标	附加电离层约束	无约束
5 min 内收敛	78 (57.35%)	15 (11.03%)
10 min 内收敛	97 (71.32%)	64 (47.06%)
15 min 内收敛	122 (89.7%)	91 (66.91%)
25 min 内收敛	132 (97.06%)	110 (80.88%)
25 min 以上收敛	4 (2.94%)	26 (19.12%)

表 2 收敛时间提升百分比统计表

Tab.2 Statistics of Convergence Time Improvement Effect

收敛效果指标	个数	占总量 (136 个) 百分比/%
有收敛提升	124	91.18
提升 20% 以上	113	83.09
提升 50% 以上	95	69.85

由表 1 可以看出, 附加电离层约束 PPP 中, 78 个时段收敛时间在 5 min 内, 97 个时段在 10 min 内, 122 个时段在 15 min 内, 132 个时段在 25 min 内, 4 个时段在 25 min 以上, 分别占时段总数的 57.35%、71.32%、89.7%、97.06% 和 2.94%; 在无

约束PPP中,上述收敛时间内时段个数分别为15、64、91、110、26,分别占时段总数的11.03%、47.06%、66.91%、80.88%和19.12%。由表2可知,收敛时间有提升的时段共有124个,占统计总数的91.18%;收敛时间提升超过20%以上的时段有113个,占统计总数的83.09%;收敛时间提升50%以上的有95个,占统计总数的69.85%。从实验结果可以看出,通过附加广域单差电离层模型约束的PPP收敛速度较无约束的PPP有显著的提升。

## 5 结 语

本文通过非差非组合PPP的方法提取出电离层延迟信息,建立了基于多项式模型的单差VTEC多项式模型。利用欧洲参考站网数据进行电离层单差建模,并通过用户端PPP的收敛时间和精度检验广域电离层单差建模效果,其结论如下:

1) 本文提出的广域电离层模型内外符合精度为:GPS系统卫星1个TEC<sub>u</sub>左右,GLONASS系统卫星3个TEC<sub>u</sub>左右。由于电离层模型采用了星间单差,消除了接收机端的硬件延迟,因此用户端无须分离本身的硬件延迟即可以使用模型参数用于本文电离层模型约束下的非差非组合PPP定位。

2) 相比无约束的动态PPP收敛时间,附加电离层模型约束动态PPP收敛时间大幅缩短。其中缩短的时段、收敛时间缩短20%以上的时段和收敛时间缩短50%以上的时段分别占总时段数的91.18%、83.09%和69.85%,提升效果明显。

3) 本文采用服务端非差非组合PPP电离层延迟提取及建模,通过参数播发给用户端进行附加电离层约束的PPP,由于服务端和用户端采用相同的定位策略,模型的内外符合精度较高,在应用上具有很好的实用性以及可操作性。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang Xiaohong, Li Xingxing, Guo Fei, et al. Realization and Precision Analysis of Single-Frequency Precise Point Positioning Software[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(8):783-787 (张小红,李星星,郭斐,等.GPS单频精密单点定位软件实现与精度分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2008,33(8):783-787)
- [2] Fang Chenghe, Chen Junping, Lan Xiaoqi, et al. Research on BeiDou Wide Area Real-Time Differential Ionospheric Delay Grid Correction Based on BDS/GPS Observations [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2019, 39(2):169-177 (房成贺,陈俊平,兰孝奇,等.联合BDS/GPS的北斗广域差分实时电离层延迟格网改正方法研究[J]. 大地测量与地球动力学,2019,39(2):169-177)
- [3] Li Xingxing, Ge Maorong, Zhang Hongping, et al. A Method for Improving Uncalibrated Phase Delay Estimation and Ambiguity-Fixing in Real-Time Precise Point Positioning [J]. *Journal of Geodesy*, 2013, 87(5):405-416
- [4] Liu Changjian. Study on Modeling Method and Model Quality Control of Ionosphere Based on GNSS[D]. Henan: Information Engineering University, 2011 (刘长建. GNSS电离层建模方法与质量控制研究[D]. 河南:信息工程大学,2011)
- [5] Yuan Yunbin. Study on Theories and Methods of Correcting Ionospheric Delay and Monitoring Ionosphere Based on GPS [D]. Wuhan: Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2002 (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:中国科学院研究生院测量与地球物理研究所,2002)
- [6] Schaer S. Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System [D]. Switzerland: University of Bern, 1999
- [7] Feltrns J, Schaer S. IGS Products for the Ionosphere [J]. *Proceeding of the IGS Ac Workshop*, 1998: 225-232
- [8] Feltens J. Development of a New Three-Dimensional Mathematical Ionosphere Model at European Space Agency/European Space Operations Centre [J]. *Space Weather the International Journal of Research & Applications*, 2007, 5(5):177-180
- [9] Ghoddousi-Fard R, Héroux P, Danskin D, et al. Developing a GPS TEC Mapping Service over Canada [J]. *Space Weather—The International Journal of Research & Applications*, 2011, 9(6):1-10
- [10] Zhang H, Xu P, Han W, et al. Eliminating Negative VTEC in Global Ionosphere Maps Using Inequality-Constrained Least Squares [J]. *Advances in Space Research*, 2013, 51(6):988-1 000
- [11] Hernández-Pajares M, Roma-Dollase D, Krankowski A, et al. Methodology and Consistency of Slant and Vertical Assessments for Ionosphere Electron Model [J]. *Journal of Geodesy*, 2017(2):1-10
- [12] Zhang Hongping, Han Wenhui, Huang Ling, et al. Modeling Global Ionospheric Delay with IGS Ground-based GNSS Observations [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)
- [13] Tang W M, Jin L, Xu K. Proformance Analysis of Ionosphere Moitoring with BeiDou CORS Observational Data [J]. *Journal of Navigation*, 2014, 67(3):511-522
- [14] Zhang Rui. Theory and Method on Multimode GNSS Real-Time Refinement Ionospheric Modeling and Its Application[D]. Wuhan: Wuhan University, 2013 (张瑞. 多模 GNSS 实时电离层精化建模及其应用研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2013)
- [15] Xiong Bo, Wan Weixing, Ning Baiqi, et al. Investigation of Mid-Latitude and Low-Latitude Ionosphere Based on BDS, GLONASS and GPS Observations [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(11): 3 586-3 599 (熊波, 万卫星, 宁百齐, 等. 基于北斗、GLONASS 和 GPS 系统的中低纬度电离层特性联合探测[J]. 地球物理学报, 2014, 57(11):3 586-3 599)
- [16] Zhang Baocheng, Ou Jikun, Li Zishen, et al. Determination of Ionospheric Observabels with Precise Point Positioning[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(4):950-957 (张宝成, 欧吉坤, 李子申, 等. 利用精密单点定位求解电离层延迟[J]. 地球物理学报, 2011, 54(4):950-957)
- [17] Li Wei, Cheng Pengfei, Bi Jinzhong. Regional Ionosphere Delays' Calibration and Accuracy Assessment Based on Uncombined Precise Point Positioning[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(10):1 200-1 203 (李玮, 程鹏飞, 秘金钟. 利用非组合精密单点定位提取区域电离层延迟及其精度评定[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(10):1 200-1 203)
- [18] Rovira-Garcia A, Juan J M, Sanz J, et al. A Worldwide Ionosphere Model for Fast Precise Point Positioning[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2015, 53(8):4 596-4 604
- [19] Fang Chenghe. Research on GNSS Differential Code Bias and Real-time Ionospheric Delay Correction Calculation [D]. Nanjing: Hohai University, 2017 (房成贺. GNSS 硬件延迟解算及实时电离层延迟改正方法研究[D]. 南京: 河海大学, 2017)
- [20] Zhang Hongping, Gao Zhouzheng, Niu Xiaoji, et al. Research on GPS Precise Point Positioning with Un-differential and Un-combined Observations [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(12): 1 396-1 399 (章红平, 高周正, 牛小骥, 等. GPS 非差非组合精密单点定位算法研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(12): 1 396-1 399)
- [21] Zhou Feng, Dong Danan, Li Pan, et al. Influence of Stochastic Modeling for Intersystem Biases on Multi-GNSS Undiferenced and Uncombined Precise Point Positioning[J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(3):59-65
- [22] Xiao Yugang, Wang Zheng, Chen Hua, et al. A Precise Multi-GNSS Data Processing Algorithm with Double Difference Observations Based on the Normal Equation Stacking Technique [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2018(10):88-92 (肖玉钢, 王峥, 陈华, 等. 法方程叠加的多模 GNSS 双差精密算法[J]. 测绘通报, 2018(10):88-92)
- [23] Zhang Hui, Hao Jinming, Liu Weiping, et al. GPS/BDS Precise Point Positioning Model with Receiver DCB Parameters for Raw Observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(4):495-500, 592 (张辉, 郝金明, 刘伟平, 等. 估计接收机差分码偏差的 GPS/BDS 非组合精密单点定位模型[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(4):495-500, 592)
- [24] Fu Wei, Yao Wanqiang, Chen Peng, et al. Polynomial Based Accuracy and Validation of Regional Ionospheric Modeling [J]. *Beijing Surveying and Mapping*, 2018, 32(10):1 219-1 225 (付伟, 姚顽强, 陈鹏, 等. 基于多项式的区域电离层建模精度分析与验证[J]. 北京测绘, 2018, 32(10):1 219-1 225)
- [25] Zhou Feng, Dong Danan, Li Weiwei, et al. GAMP: An Open-Source Software of Multi-GNSS Precise Point Positioning Using Undiferenced and Uncombined Observations [J]. *GPS Solutions*, 2018, 22(2):1-10
- [26] Zhou Chengsong, Peng Yue, Zhang Xiaohong, et al. A Study of Method in Determining the Precise Point Positioning Convergence Time [J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2016, 4(1):80-87 (周承松, 彭月, 张小红, 等. 精密单点定位收敛时间的确定方法研究[J]. 导航定位学报, 2016, 4(1):80-87)

## Wide-Area Between-Satellite Single-Difference VTEC Ionospheric Model and Its Assessment for Undifferenced and Uncombined PPP

WU Guanbin<sup>1,2</sup> CHEN Junping<sup>1,2</sup> BAI Tianyang<sup>1</sup> WU Xiaomeng<sup>3</sup> HU Jinlin<sup>3</sup>

1 Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China

2 School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Shanghai Huace Navigation Technology Co. Ltd, Shanghai 201799, China

**Abstract: Objectives:** High-precision ionospheric correction is an important prerequisite for undifferenced and uncombined precise point positioning (PPP) with fast convergence capability. Different from the traditional use of pseudoranges to extract ionospheric information, the ionospheric accuracy obtained by PPP with fixed ambiguity is higher. **Methods:** A wide-area vertical total electron content (VTEC) ionospheric model is developed based on a reference network, where the VTEC of each station is extracted from the undifferenced and uncombined PPP approach. The proposed VTEC model is expressed in the between-satellite single-differenced polynomial function of the sites' latitude and solar hour angle. A data processing procedure and software system are developed for both processing server and user PPP client. In the server part, the VTEC ionospheric delay of the whole network is estimated, the VTEC polynomial function is established and the model parameters are broadcasted to the PPP clients. In the user PPP client, real-time positioning using the broadcasted wide-area VTEC parameters are performed. **Results:** Experiments using the GNSS network in the European region are performed, and results show that the internal RMSE (root mean squared error) and external RMSE of the derived VTEC model is around 3 TECUs and 1 TECU for the GLONASS (global navigation satellite system) and GPS, respectively. User kinematic PPP test results using the new VTEC ionospheric model show that, 78 of the whole 136 (57.35%) kinematic undifferenced and uncombined PPP hourly samples converge in 5 minutes, where for 97 samples (71.32%) converge in 10 minutes, 122 samples (89.7%) converge in 15 minutes and 132 samples (97.06%) converge without 25 minutes. In the unconstrained PPP experiment, the results in the above convergence time are 15 (11.03%), 64 (47.06%), 91 (66.91%), and 110 (80.88%), respectively. **Conclusions:** Experiments show that single-difference VTEC ionospheric model has a huge improvement in the accuracy of extracting the ionosphere and shortening the real-time PPP convergence time in a wide-area.

**Key words:** undifferenced and uncombined; precise point positioning; ionospheric model; wide-area between-satellite single-difference; fast convergence

**First author:** WU Guanbin, postgraduate, specializes in precise point positioning. E-mail: wuguanbin@shao.ac.cn

**Corresponding author:** CHEN Junping, PhD, professor. E-mail: junping@shao.ac.cn

**Foundation support:** The Key Research and Development Program of Guangdong Province (2018B030325001); the National Key Research and Development Program of China (2018YFB0504300); the National Natural Science Foundation of China (11673050).

**引文格式:** WU Guanbin, CHEN Junping, BAI Tianyang, et al. Wide-Area Between-Satellite Single-Difference VTEC Ionospheric Model and Its Assessment for Undifferenced and Uncombined PPP[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(6): 928-937. DOI:10.13203/j.whugis20190319 (伍冠滨, 陈俊平, 白天阳, 等. 非差分组合 PPP 的广域星间单差天顶电离层模型及其验证[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(6): 928-937. DOI:10.13203/j.whugis20190319)