

文章编号:1001-1595(2007)03-0256-06

中图分类号:P228.4

文献标识码:A

## GPS/VRS 实时网络改正数生成算法研究

黄丁发<sup>1</sup>, 李成钢<sup>1</sup>, 吴耀强<sup>2</sup>, 吕弋培<sup>2</sup>, 周乐韬<sup>1</sup>, 陈维锋<sup>2</sup>, 廖华<sup>2</sup>, 熊永良<sup>1</sup>, 刘经南<sup>3</sup>

(1. 西南交通大学 GPS 卫星应用工程中心, 四川 成都 610031; 2. 四川省地震局, 四川 成都 610014; 3. 武汉大学 卫星导航定位技术研究中心, 湖北 武汉 430079)

### Study of the Real-Time Network Correction Generation Approach for GPS/VRS Technique

HUANG Ding-fa<sup>1</sup>, LI Cheng-gang<sup>1</sup>, WU Yao-qiang<sup>2</sup>, LV Yi-pei<sup>2</sup>, ZHOU Le-tao<sup>1</sup>,  
CHEN Wei-feng<sup>2</sup>, LIAO Hua<sup>2</sup>, XI ONG Yong-liang<sup>1</sup>, LIU Jing-nan<sup>3</sup>

(1. The Center of Geomatic Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Sichuan Seismology Bureau, Chengdu 610014, China; 3. Center of GNSS, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** The methodology of the network correction generation approach is improved. The systemic error mitigating method for both the atmospheric delay and orbital error are proposed here to enhance the accuracy and the reliability of the precise centimeter level GPS/VRS positioning based on reference station network. Test data acquired from SGRSN (Sichuan GPS Reference Station Network) are used in the VENUS (VRS Enhanced Utility Software) system to evaluate the performance of the modeling techniques. The results demonstrate that distance dependent errors can be effectively modeled suitable for long range GPS CORS network with station distance of 80 km or longer, the accuracy of the atmospheric correction is about 2 to 4 centimeter and the orbital correction error can be of sub-millimeter level.

**Key words:** GPS; VRS (Virtual Reference Station); network RTK; ionospheric correction; tropospheric correction; orbital correction

**摘要:** 为提高厘米级网络 GPS/VRS 实时动态定位的精度和可靠性, 系统地探讨 VRS 网络实时改正数的生成模型, 并提出适用于中长距离参考站网络的电离层、对流层以及卫星轨道改正数计算的改进算法。结合四川 GPS 参考站网络 (SGRSN) 以及自主开发的虚拟参考站软件平台 VENUS 系统, 对上述改正数生成算法进行试验验证, 结果表明其大气误差改正数精度为 2~4 cm, 轨道误差的影响可基本消除, 满足 80 km 以上中长距离稀疏参考站网络厘米级实时动态定位服务要求。

**关键词:** GPS; 虚拟参考站; 网络 RTK; 电离层改正数; 对流层改正数; 轨道改正数

## 1 前言

本世纪初, 以虚拟参考站 (VRS, Virtual Reference Station) 技术为代表的网络实时动态定位技术 (网络 RTK) 的兴起, 使得建立参考站网络式 GPS 服务体系成为当前 GPS 技术应用发展的最新趋势。在全球范围内, 面向厘米级高精度实时动态定位服务的多功能连续运行参考站系统 (CORS) 相继建立, 并成为重要的地理空间数据基础设施<sup>[1,2]</sup>。与常规 RTK 技术相比, 网络

RTK 技术具有精度和可靠性高, 服务范围大, 精度分布均匀等优点。网络 RTK 中空间相关误差改正的精度, 受参考站网络分布、密度, 以及当地大气状况等多种因素影响, 因此, 要实现厘米级实时动态定位服务, 通常对参考站网络布设有较为严格的限制。在中纬度地区 (如: 德国的 SAPOS 以及瑞典的 SWEPOS), 其参考站间距最大值为 70 km 左右; 而在靠近赤道的低纬度地区 (如新加坡的 SIMRSN、香港的 TCGPSA), 由于电离层扰动剧烈, 其参考站间距一般小于 40 km<sup>[3]</sup>。密集

收稿日期: 2006-08-03; 修回日期: 2007-03-30

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40271091); 教育部博士点基金项目 (20040613025)

作者简介: 黄丁发 (1963), 男, 湖北阳新人, 教授, 博导, 主要从事 GPS 系统理论与应用、3S 集成等方面的研究。

E-mail: dfhuang@home.swjtu.edu.cn

布设参考站网络的方式,虽利于空间相关误差的建模,提高系统服务性能,但会大大增加CORS的建设和运营成本。研究表明参考站间距在70~100 km左右的稀疏CORS系统将日益成为未来发展的方向。例如2005年底建成的四川GPS观测参考站网络(SGRSN)包含12个参考站、参考站平均间距81 km,采用自主开发的增强虚拟参考站系统VENUS<sup>[13]</sup>,有效覆盖范围超过60 000 km<sup>2</sup>。而在地广人稀的澳大利亚维多利亚省,其GPSnet网络平均基线长度甚至达到100 km以上。

本文针对长距离厘米级网络RTK定位,详细探讨了VRS网络实时改正的算法模型,并将其应用于自主开发的GPS虚拟参考站软件平台VENUS系统,基于SGRSN试验网络,实现了大区域厘米级RTK定位服务。

## 2 VRS网络改正数的计算

虚拟参考站(VRS)技术利用地面布设的多个参考站组成CORS网络,通过融合各参考站的观测信息,建立精确的空间相关误差修正模型,在流动站附近产生一个物理上不存在的虚拟参考站。VRS位置一般通过流动站用户接收机的单点定位解来确定,故VRS与流动站间距离通常只有十几米,只要能够生成VRS的观测值或RTCM差分改正数,就可以在VRS和用户站间实现短距离常规差分解算。VRS相位观测值可由式(1)表示:

$$\varphi_V^k(\text{VRS}) = \varphi_A^k + \frac{1}{\lambda} d_{AV} + \frac{1}{\lambda} I_{AV}^k + \frac{1}{\lambda} T_{AV}^k + \frac{1}{\lambda} O_{AV}^k + \frac{1}{\lambda} M_{AV}^k + \varepsilon_{AV}^k \quad (1)$$

相位观测值      几何配置      空间相关改正数      随机误差项

其中,  $\lambda$  为载波相位波长,  $\varphi_V^k$  为载波相位观测值,  $d_{AV}$  为站星间几何距离,  $I$  为电离层延迟,  $T$  为对流层偏差,  $O$  为卫星轨道偏差,  $M$  为多路径效应误差,  $\varepsilon$  为接收机噪声;  $i, k$  为卫星标号;  $\alpha, \beta$  分别为单差及双差因子;  $A, V$  为主参考站及VRS标号; 令  $S = \alpha I + \beta T + O$ , 则  $S$  为空间相关误差; 而  $M$  以及  $\varepsilon$  属于随机或伪随机误差, 通过适当的选址、采用ChockRing天线以及高质量的接收机可以控制在很小的范围。因此VRS观测值模型可以简化为

$$\varphi_V^k(\text{VRS}) = \varphi_A^k + \frac{1}{\lambda} d_{AV} + \frac{1}{\lambda} S_{AV}^k \quad (2)$$

相位观测值      几何配置      空间相关改正数

由公式(2)可知,VRS观测值实际上由参考站相位观测值、几何距离以及空间相关误差改正数组成,其中仅第三项空间相关误差项为未知值,需要通过建立适当的计算模型进行估计,获得高质量VRS观测值的关键是精确计算空间相关改正数  $S$ 。

空间相关误差主要由电离层延迟误差、对流层延迟误差以及卫星轨道误差组成,在早期的网络RTK区域内插模型(如线性组合模型等)中,由于空间相关误差在差分观测值残差中占有主导地位,均采用直接将参考站网络的差分观测值残差带入网络区域内插模型,利用流动站概略位置信息( $X_V, Y_V, Z_V$ )来计算空间相关改正数估值的单一模型处理模式<sup>[4~6]</sup>。上述方法在中短密集型参考站网络试验中取得成功,可获得5~10 cm左右的网络改正数精度以及厘米级网络RTK定位结果。但随着参考站网络间距的增大,各种空间相关误差的相关特性明显减弱,在时间和空间上呈现更为无序和复杂的变化趋势,难以采用单一模型进行模拟。

为提高网络改正数精度,就需要进行误差分类建模以构建精密改正数计算模型。在网络基线上载波相位整周模糊度正确固定后,即可实现网络内各种精确系统误差信息的提取,然后将其引入相应的计算模型分别进行计算,可实现减少模型偏差、提高改正精度的目标。

### 2.1 顾及MSIDs的电离层改正数计算模型

电离层改正数计算模型,通常将双差电离层改正数  $I_{i,n}$  表示为平面坐标差( $X_{i,n}, Y_{i,n}$ )的线性函数或者低阶趋势面,即  $I_{i,n} = f(X_{i,n}, Y_{i,n})$ ,然后利用用户所在位置信息,将内插模型参数转化为用户位置电离层改正数。构成用户位置电离层改正数  $I_u$  的内插计算公式:

$$I_u = \bar{I} \cdot \bar{I}^{-1} = \sum_{i=1}^{n-1} \bar{I}_i I_i \quad (3)$$

其中,  $\bar{I} = (I_1, \dots, I_i, \dots, I_{n-1})$  是各参考站基线双差电离层延迟矢量;  $\bar{I}^{-1} = (\bar{I}_1, \dots, \bar{I}_i, \dots, \bar{I}_{n-1})$  是各基线对应的内插系数矢量。

由参考文献[7]可知,在正常电离层活动状况下,线性内插模型(LIM)是较优的电离层区域内

插模型,对于100 km 以下的参考站网络,其精度可达2~3 cm,甚至对于200 km 的中长距离参考站网络,精度仍优于5 cm。在电离层活动异常情况下,中尺度电离层行进式扰动(MSTIDs)所产生的电离层电子密度不均匀,将对100 km 以上尺度的参考站网络造成不利影响,使电离层改正数精度及可靠性大大降低<sup>[8]</sup>。MSTIDs 的平均周期10~30 min,水平尺度100~200 km,平均速度100~300 m/s。当参考站网络间距大于MSTIDs 时,MSTIDs 对局部区域和部分卫星所造成的电离层扰动误差就无法被线性区域内插模型所分辨,其最大误差往往大于20 cm,严重影响流动用户载波相位整周未知数初始化及RTK 定位精度。

为避免MSTIDs 对100 km 以上中长距离参考站网络的影响,可采用电离层预报模型,即利用MSTIDs 期间电离层延迟误差在时间上的相关性,当双频流动用户成功初始化后反馈的电离层延迟信息及区域内插改正数之间差异较大时(存在MSTIDs),采用用户反馈的电离层延迟信息作为下一个历元内插区域内该位置电离层信息的预报值,重新建立加密的区域内插模型。有

$$I_u = \sum_{i=1}^{n-1} I_i(R) + \sum_{i=n+1}^{n+k} I_i(F) \quad (4)$$

式中, $I_i(R)$  为参考站网络基线上的双差电离层延迟量; $I_i(F)$  指上一历元双频流动用户反馈的电离层延迟; $i$  为参考站编号。由于预报值 $I_i(F)$  能准确反映用户位置及其周围数十公里范围内的MSTIDs 变化,因此随着区域内双频用户预报信息量的增加,MSTIDs 影响可望得到有效控制。

图1 为采用6 个南加州GPS 观测网络数据的电离层改正结果。可知,在午后1 个小时时间内,连续发生了多个周期的MSTIDs,使双差电离层延迟误差峰值达到30 cm。MSTIDs 期间,常规区域内插模型误差随电离层扰动而上下波动,最大误差超过20 cm。但采用了电离层预报模型改正后的误差曲线,受MSTIDs 影响较小,最大偏差小于5 cm,预报模型精度达1.5 cm。

电离层预报模型要求双频用户端具有向服务器实时反馈电离层延迟误差信息的能力,因此需要在用户端接收机建立必要的软硬件接口。由于

目前还没有标准电离层误差信息电文的数据传输格式,因此在扩展和应用上仍存在一定局限。

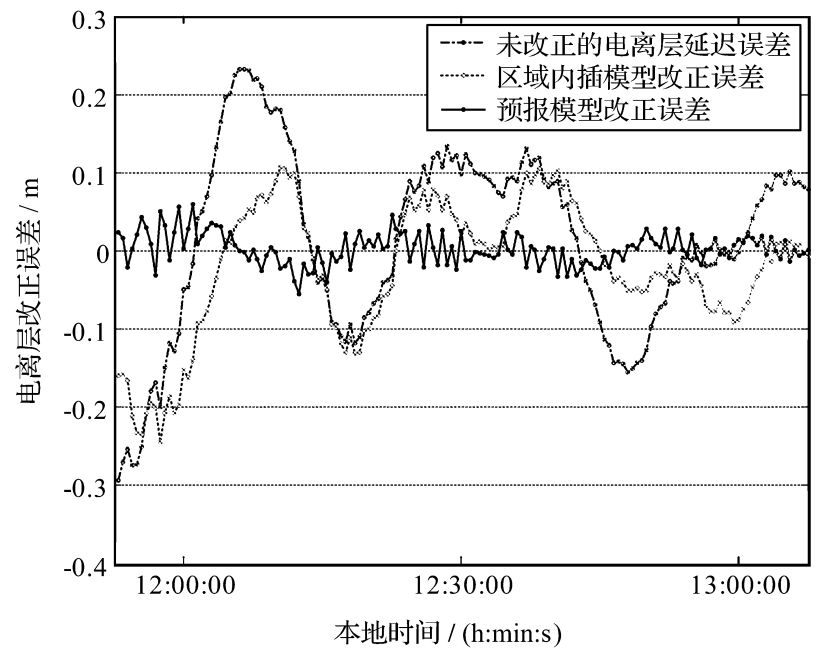


图1 电离层预报改正模型误差

Fig.1 Errors of ionospheric delay prediction model

## 2.2 改进的对流层改正数计算模型

对流层延迟误差受高程方向因子影响显著,当流动站与参考站间高程差异达到900 m 时,其对区域内插模型的负面影响值可达6.8 cm。为消除上述高程方向模型偏差影响,将对流层先验模型相对纠正结果引入网络区域内插模型中,建立了自主修正高程方向偏差的距离相关模型(MHDM),如公式(5)所示<sup>[9]</sup>。

$$\begin{aligned} \text{Tr}_u^{ik} &= \sum_{j=1}^n a_j \text{Tr}_j^{ik}(h_j) = \sum_{j=1}^n a_j (\text{Tr}_j^{ik} + \\ & \quad \text{模型估值} \\ & \quad \sum_{j=1}^n a_j d \text{Tr}(h_j)^{ik} \\ & \quad \text{高程方向修正} \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $u, j$  分别代表流动用户以及各参考站; $i, k$  为卫星号; $n$  为网络中参考站的数量; $a_j = \frac{c_j}{c}$  为内插模型系数; $c_j = \frac{1}{d_j}$ ;  $c = \sum_{j=1}^n c_j$ ;  $d_j$  为各参考站与用户接收机之间的距离。

$\text{Tr}_j^{ik}$  为网络基线上双差对流层延迟量,而 $d \text{Tr}(h_j)^{ik}$  为各基线上的先验模型相对改正量,可由下式确定:

$$d \text{Tr}(h_j)^{ik} = d \text{Tr}^z(h_j) \times (mf(b_h)^k - mf(a_h)^i) \quad (6)$$

$$d \text{Tr}^z(h_j) = \text{ZTD}(h_j) - \text{ZTD}(h_u) \quad (7)$$

其中,  $ZTD$  为天顶对流层延迟;  $mf$  为天顶对流层延迟  $Tr_z^s$  的映射函数;  $h_j = h_j - h_u$  为参考站与用户位置间高差。

MHDI M 模型由模型估计值和高程修正值两部分构成, 充分考虑水平和高程方向对流层延迟误差的影响因素, 因此较常规对流层网络改正模型有更高的精度(如图2)。

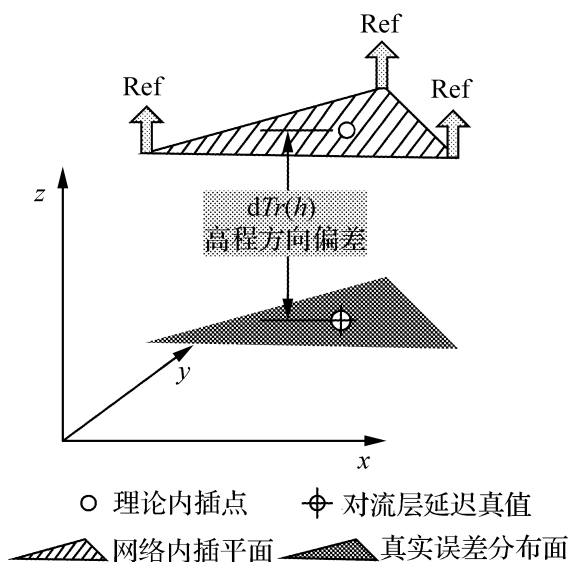


图2 MHDI M改正模型示意图

Fig.2 Illustrations of MHDI M model

### 2.3 轨道改正数计算模型

常规网络 RTK 轨道改正误差可达 6 ~ 8 mm, 由于未将卫星轨道误差与其他距离相关误差进行分离, 因此很难对卫星轨道误差改正数的质量进行监测和控制。VRS 轨道改正数法综合利用 IGS 精密预报星历和 GPS 广播星历信息, 实现卫星轨道改正数的直接计算和预报, 其试验精度达 0.02 ~ 0.06 mm, 使轨道误差对 100 km 以内的动态 RTK 影响减弱为亚毫米级, 非常适用于 GPS/VRS 网络厘米级动态 RTK 定位的精密轨道误差改正<sup>[10]</sup>。

VRS 轨道改正数的计算公式为

$$Cor O_{VRS} = R_{uA}(brd) - R_{uA}(igu) \quad (8)$$

其中,  $R(brd)$  为广播星历计算的双差站星几何距离;  $R(igu)$  为 IGS 精密预报星历计算的双差站星几何距离。

由参考文献[10]中的 VRS 轨道改正数精度理论推算方法可知, 经过 VRS 轨道改正数纠正, 广播卫星轨道误差在 100 km 范围内仅为 0.1 ~ 0.2 mm, 其对基线解算结果影响仅为  $4 \times 10^{-9}$ , 对 100 km 范围内的网络 RTK 定位结果影响小于 0.4 mm。

## 3 试验与分析

四川省 GPS 观测网络(SGRSN)一期工程包括

成都(CHDU)、郫县(PIXI)、仁寿(RENS)、简阳(JYAN)和中江(ZHJI)共5个连续运行参考站, 各参考站均装备 Trimble 5700SE 参考站型接收机和天宝 Choke Ring 天线。试验采用(DOY) 264/05, 11:15:00 到 13:00:00 的双频相位观测数据, 采样间隔 1 s, 卫星截止角设为 8°。试验网络平均基线长 87 km, 如图 3 所示。分别选择 CHDU 及 JYAN 为流动站, 则参考站与流动站间平均高程差异分别达到 450 m 和 500 m, 如图 4 所示。

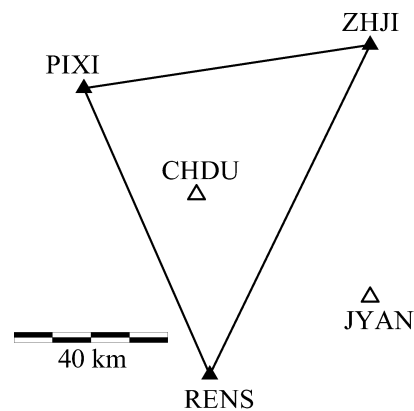


图3 SGRSN 试验网络

Fig.3 Test network of SGRSN

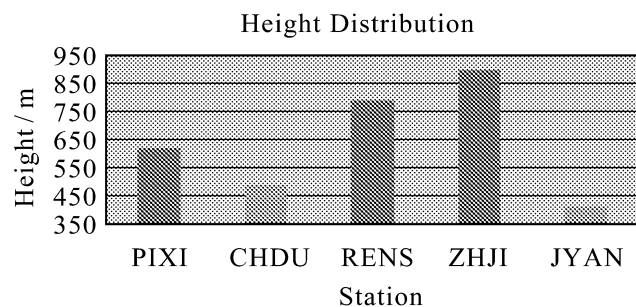


图4 高程分布差异

Fig.4 Difference of CORS height

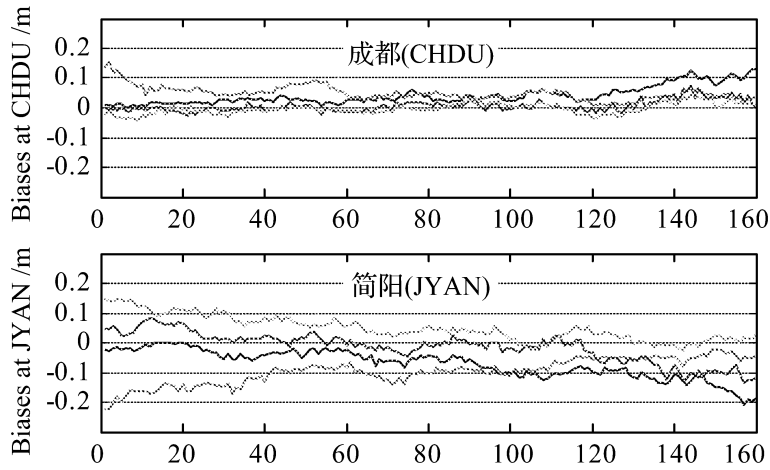
在数据处理中, 首先将天顶对流层延迟与基线向量一起作为待估参数进行基线解算, 采用参考站网络在线解算技术, 在双差整周末知数固定后可获得精确的双差对流层延迟及电离层延迟连续观测量<sup>[11]</sup>。采用 IGS 精密预报星历及 GPS 广播星历, 可获得各参考站位置卫星轨道误差。上述信息构成基本的参考站网络观测信息, 将其引入改正数生成算法, 与流动站位置真实的改正数信息进行比较, 即可评定系统网络改正数精度。

### 3.1 网络改正数试验与结果分析

将电离层改正数及对流层改正数合并可构成大气改正数用于分析, 大气改正结果如图 5, 表 1 所示, 而轨道改正结果见图 6, 表 2。

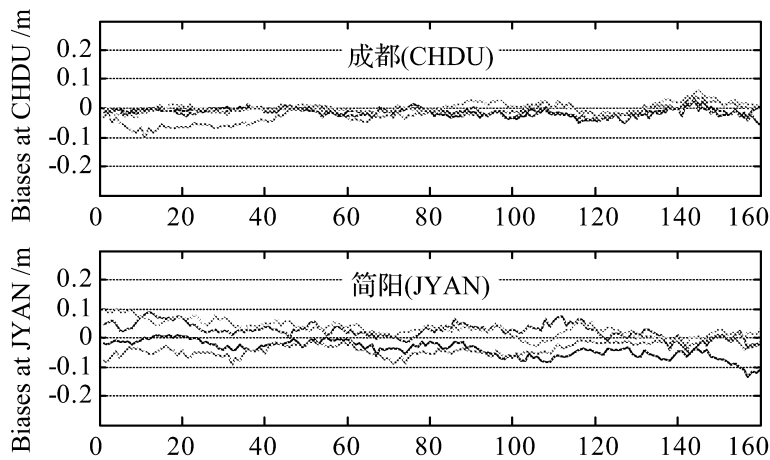
由图 5 及表 1 可知, 在网内测试点 CHDU(基线距离 42 km), 常规内插法大气改正精度为 5 ~ 6 cm, 最大误差超过 10 cm, 误差波动曲线显示有

较大的系统性误差存在(尤其对低高度角卫星SV1/3而言);MHDIM模型结果则维持5cm以内原点上下平缓波动,改正精度达到2~3cm,系统性误差得到很好的消除。在网外测试点JYAN(基线距离57km),常规内插法改正精度大幅下降,仅为8~11cm,最大偏差超过20cm,已无法满足RTK定位要求;MHDIM结果略有下降,但仍保持4~5cm的精度水平。因此MHDIM对流层改正模型精度大大高于常规模型结果。



(a) 常规内插模型

(a) Conventional interpolation model



(b) MHDIM 模型

(b) MHDIM model

图5 MHDIM大气改正法与常规网络内插改正法的改正误差分析

Fig.5 Accuracy analysis of improved atmospheric biases correction model

表1 大气改正数精度统计

Tab.1 Statistics of accuracy between different atmospheric correction models

流动站位置	常规内插模型精度/m				MHDIM模型精度/m			
	SV1	SV3	SV20	SV23	SV1	SV3	SV20	SV23
CHDU	0.051	0.055	0.020	0.018	0.018	0.036	0.020	0.017
JYAN	0.085	0.106	0.053	0.065	0.049	0.044	0.036	0.042

在图6以及表2中,常规内插法仅在实验网络中心位置的CHDU站位置轨道误差改正效果明显,最大偏差仅为0.4mm;但在网外JYAN,其

改正精度急剧下降,最大偏差达到2.6~6.2mm,各历元改正误差随时间呈现大幅波动,改正效果不明显。VRS轨道改正数法在各流动站位置均保持0.02~0.06mm稳定的改正精度,在网内,卫星轨道残余误差影响仅为常规内插法的1/10,在网外为常规内插法的1/30到1/50,大大提高了轨道误差改正精度和可靠性。

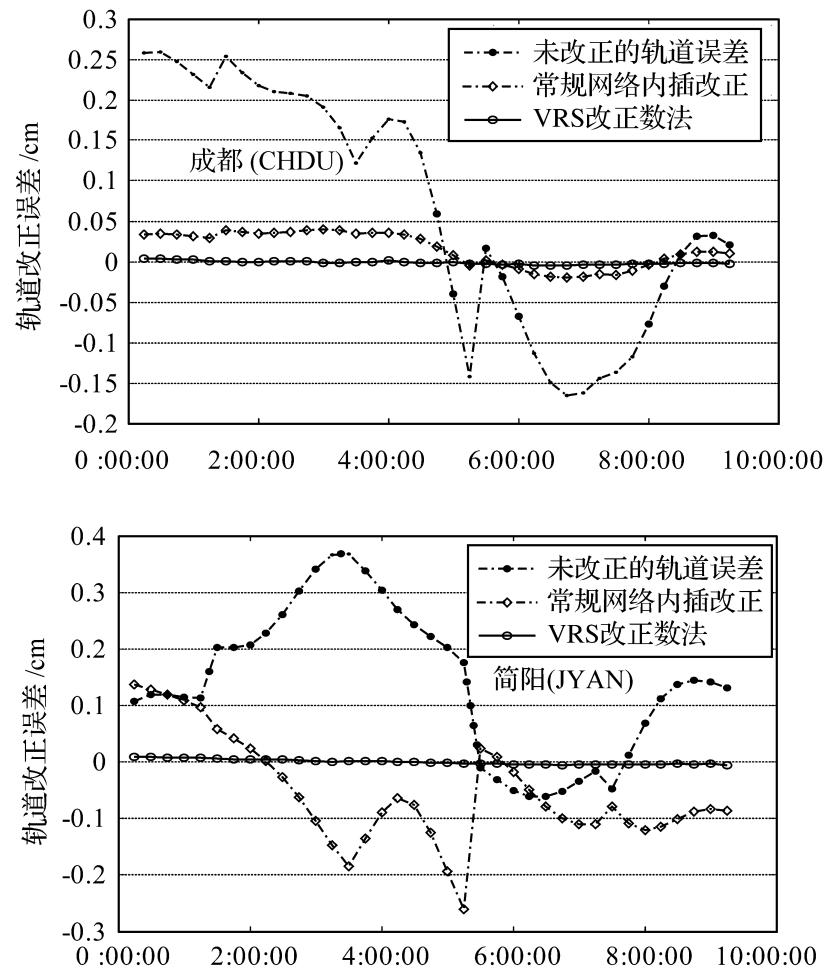


图6 VRS轨道改正法与常规网络内插改正法的改正误差比较

Fig.6 The comparison of orbital biases between the VRS and conventional interpolation method

表2 卫星轨道改正数精度统计

Tab.2 Statistics between different orbital error correction methods

流动站位置	卫星轨道误差/cm		
	未改正	常规内插模型改正	VRS轨道改正
CHDU	0.1605	0.0261	0.0026
JYAN	0.1918	0.1074	0.0047

### 3.2 VRS/RTK定位试验与精度分析

将上述网络改正数算法集成于自主开发的虚拟参考站软件平台VENUS系统中,并应用于四川GPS虚拟参考站网络试验,如图7,其结果见图8,表3。

由RTK试验可知,采用精化改正数模型后,在地形变化较大区域(高程差异达到500m),采用稀疏参考站网络(3个参考站,平均基线长

87 km),即可实现水平方向2 cm,高程方向4 cm到5 cm的厘米级RTK结果,且从RTK定位精度分布情况看,除由于网络数据传输延迟(采用CDMA)和多路径效应等因素干扰外,系统性误差得到更好的消除,因此无论在水平和高程方向RTK结果均呈现较为理想的正态性分布曲线,验证了改正数算法的有效性。

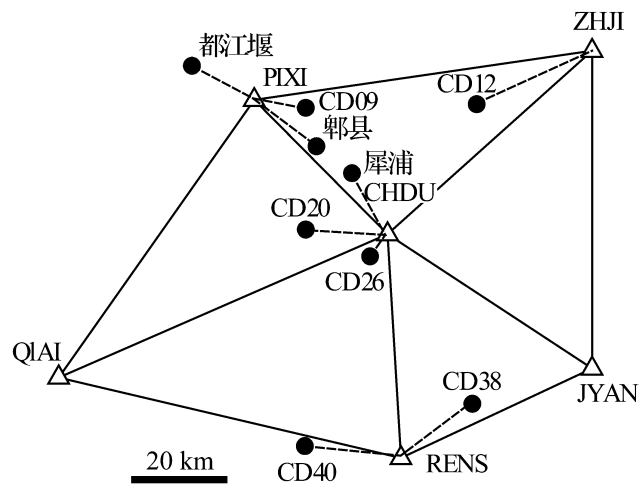


图7 四川GPS虚拟参考站网络试验

Fig.7 Network RTK positioning based on Schuan GPS/VRS network

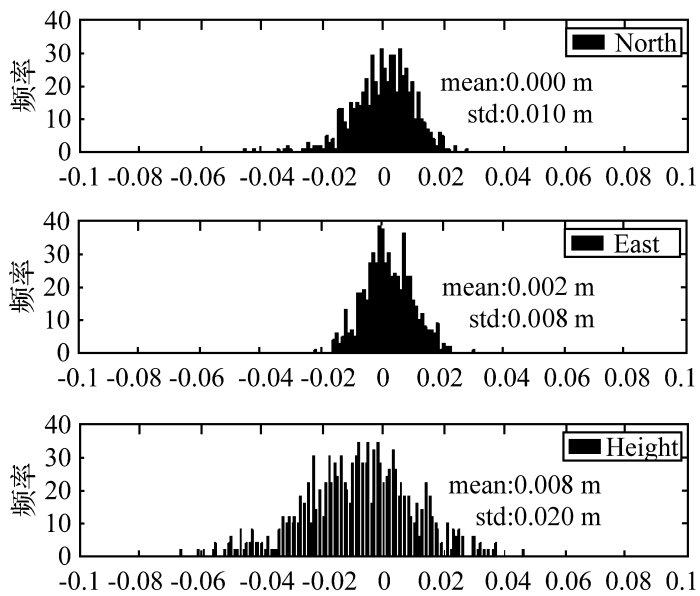


图8 犀浦测试点RTK定位误差分布

Fig.8 Distribution of the RTK positioning Result at Xipu

表3 网络RTK精度统计

Tab.3 Accuracy of Network RTK positioning

基线向量	网络RTK定位结果/mm	
	mean	std
北方向	0	10.0
东方向	2	8.0
垂直方向	8	20.0
基线长度	0.2	12.9

网络,实现厘米级高精度实时动态定位精度,必须在现有误差建模技术基础上建立更优的网络改正数算法模型及VRS观测值模型。文中将电离层预报模型、MHDIM大气改正数模型、VRS轨道改正数模型应用于全面支持DGPS/RTK技术的通用VRS观测值计算模型,基于四川省GPS连续观测网络以及自主研发的虚拟参考站软件平台VENUS系统,实现了80 km以上中长距离参考站网络2~4 cm的大气误差改正以及亚毫米级的卫星轨道误差改正精度,最终实现了具有较高可靠性的基于Internet的VRS厘米级网络实时动态差分定位服务,其实验网内水平精度为2~3 cm,垂直精度为4~5 cm。

致谢:本项目研究受国家自然科学基金项目(402-71091),教育部博士点基金资助项目(200406130-25),教育部优秀教师资助计划(2003109)资助,四川省地震局提供GORS支持,在此表示感谢!

参考文献:

- [1] RIZOS C, HAN S. Reference Station Network Based RTK Systems: Concepts & Progress[J]. Wuhan University Journal of Nature Sciences, 2003, 8(2B): 566-574.
- [2] VOLLATH U, BUECHERL A, LANDAU H, PAGELS C, WAGNER B. Multi-base RTK Positioning Using Virtual Reference Stations[A]. Proc ION GPS2000[C]. Salt Lake City [s.n.], 2000. 123-131.
- [3] CRAUG R, ZHANG ke-fei, RIZOS C. Improved Atmospheric Modeling for Large-scale High-precision Positioning Based on GNSS CORS Networks in Australia [A]. International Symposium on GPS/ GNSS 2004[C]. Sydney: [s.n.], 2005.
- [4] WANNINGER L. Improved Ambiguity Resolution by Regional Differential Modeling of the Ionosphere [A]. 8th Int Tech. Meeting of the Satellite Div of the U.S. Institute of Navigation[C]. California: Palm Springs, 1995. 55-62.
- [5] GAO Y, Li Z. Carrier Phase Based Regional Area Differential GPS for Decimeter-level Positioning and Navigation [A]. 10th Int Tech Meeting of the Satellite Div of the U.S. Institute of Navigation[C]. Nashville: Springs, 1997. 91-97.
- [6] HAN S, RIZOS C. Instantaneous Ambiguity Resolution for Medium-range GPS Kinematic Positioning Using Multiple Reference Stations [A]. International Association of Geodesy Symposia, Advances in Positioning and Reference Frames [C]. Rio de Janeiro: Springer, 1997. 283-288.
- [7] LI Cheng-gang, HUANG Ding-fa, ZHOU Le-tao, XU Rui. Improved Atmospheric Delay Mitigating Method for High-Precision GNSS Positioning Based on Reference Station Network

(下转第339页)

4 结论

为将网络RTK技术应用于中长距离参考站

- [9] ZHOU Cheng-hu, LI Jun. Research into Geo-spatial Metadata [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2000, 25(6): 579-585. (周成虎, 李军. 地球空间元数据研究[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2000, 25(6): 579-585.)
- [10] PAN Qiong. Research on GIS Raster Data Storage Based on Oracle [J]. Journal on Zhejiang Education Institute, 2004, (1): 44-49. (潘琼. GIS栅格数据在Oracle中的存储研究[J]. 浙江教育学院学报, 2004, (1): 44-49.)
- [11] XU Han-wei, FENG Xue-zhi. The Research on Storage Theory for Spatial Data [J]. Application Research of Computers, 2003, 20(2): 39-41. (许捍卫, 冯学智. 空间数据存储机制研究[J]. 计算机应用研究, 2003, 20(2): 39-41.)
- [12] CHEN Shu-peng, LU Xue-jun, ZHOU Cheng-hu. Introduction to Geography Information System [M]. Beijing: Science Press, 1999. (陈述彭, 鲁学军, 周成虎. 地理信息系统导论[M]. 北京: 科学出版社, 1999.)
- [13] WANG Ying-hui. Spatial Data Organization and Implementation Based on ORDB [J]. Computer Engineering and Applications, 2003, 39(4): 45-47. (王映辉. 基于ORDB的GIS空间数据组织与实现[J]. 计算机工程与应用, 2003, 39(4): 45-47.)
- [14] LI Hong-yan, LI Zhan-huai. Research on Dynamic Schema Modification in ORDBMS [J]. Journal of Software, 2000, 11(10): 1390-1396. (李红燕, 李战怀. ORDBMS中动态模式修改的研究[J]. 软件学报, 2000, 11(10): 1390-1396.)

(责任编辑: 丛树平)

### (上接第261页)

- [A]. International Symposium on GPS/ GNSS 2005 [C]. Hong Kong: [s.n.], 2005.
- [8] WANNINGER L. The Performance of Virtual Reference Stations in Active Geodetic GPS-networks under Solar Maximum Conditions [A]. Proc ION GPS 99 [C]. Nashville: TN, 1999. 1419-1427.
- [9] LI Cheng-gang, HUANG Ding-fa, ZHOU Dong-wei, et al. Study of the Real-Time Precise Orbit Biases Correction Technique for the GPS/ VRS Network [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2007, 27(1): 96-99. (李成钢, 黄丁发, 周东卫, 等. GPS/ VRS网络实时精密轨道改正算法研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2007, 27(1): 96-99.)
- [10] ZHOU Le-tao, HUANG Ding-fa, LI Cheng-gang. Improved Ambiguity Online Resolution for GPS Reference Station Network [A]. International Symposium on GPS/ GNSS 2005 [C]. Hong Kong: [s.n.], 2005.
- [11] ZHOU Le-tao, HUANG Ding-fa, YUAN Lin-guo, LI Cheng-gang. A Kalman Filtering Algorithm for Online Integer Ambiguity Resolution in Reference Station Network [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2007, 36(1): 35-42. (周乐韬, 黄丁发, 袁林果, 李成钢. 网络RTK参考站间模糊度动态解算的卡尔曼滤波算法研究[J]. 测绘学报, 2007, 36(1): 35-42.)
- [12] HUANG Ding-fa, ZHOU Le-tao, LIU Jing-nan, XIONG Yong-liang. Internet Based VRS/ RTK Positioning Algorithm and Experiment [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007, 32(3): 220-224. (黄丁发, 周乐韬, 刘经南, 熊永良. 基于Internet的VRS/ RTK定位算法模型与实验研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2007, 32(3): 220-224.)
- [13] HUANG Ding-fa, XIONG Yong-liang, YUAN Lin-guo. Global Positioning System (GPS): Theory and Practice [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2006. (黄丁发, 熊永良, 袁林果. 全球定位系统(GPS)——理论与实践[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2006.)

(责任编辑: 雷秀丽)