

一种适用于大规模用户的非差网络 RTK 服务新方法

邹璇^{1,2} 李宗楠¹ 唐卫明¹ 施闯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 中国科学院测量与地球物理研究所大地测量与地球动力学国家重点实验室,湖北 武汉,430077

摘要:首先证明了非差网络实时动态定位(real time kinematic, RTK)与广域精密单点定位(precise point positioning, PPP)-RTK 用户模糊度解算结果的一致性,并利用前者的模糊度可快速固定而后者无需用户与基准站间实时数据通讯的特性,提出了一套适用于大规模用户的非差网络 RTK 服务模式。按照新模式处理了湖北省连续运行参考站系统的一组实时数据,并与采用原有服务模式的解算结果进行比较,定量评估了新服务模式在实时应用中的定位精度及可靠性。结果表明,对于基准站间平均距离约为 120 km 的区域增强网,网内用户一般只需几个历元进行初始化,便可获得平面方向 1~2 cm、高程方向 6.3 cm 的快速实时精密定位服务;并且一旦用户完成模糊度初始化,区域增强系统可同时服务的用户数量将不再受限制;与采用原有非差网络 RTK 模式时 94.274% 的服务有效性相比,新模式的服务有效性高达 99.914%,有效填充了原有服务模式下由于用户周边基准站区域增强信息中断引起的“服务空隙”。

关键词:非差网络 RTK;广域 PPP-RTK;无缝衔接;大规模用户;实时精密单点定位

中图法分类号:P228.41

文献标志码:A

广域精密单点定位-实时动态定位(precise point positioning-realtime kinematic, PPP-RTK)与非差网络 RTK 是实时精密单点定位(real time precise point positioning, RTPPP)技术发展的两个主要研究方向^[1-7]。由于两者的误差改正信息难以相互替代,因此,在按照现有方法进行处理模式切换时存在模糊度需重新初始化的问题,导致用户定位结果的精度不连续甚至中断。此外,虽然地球科学研究中对快速实时精密定位的应用需求巨大,但与常规双差网络 RTK 技术类似,用户非差网络 RTK 处理模式下需实时获取周边基准站的区域增强信息^[8-9],这无疑使用户与基准站间存在较大的实时数据通讯负担,限制了整个区域增强系统可同时服务的用户数量,制约了全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)技术在地球科学研究中进一步的推广和应用。而在广域 PPP-RTK 数据处理模式下,仅需在现有 RTPPP 的基础上采用通讯卫星等手段广播发送每颗卫星的极大相位延迟(un-

calculated phase delay, UPD),就可以同时满足大规模用户的实时精密定位应用需求。

如能实现从非差网络 RTK 向广域 PPP-RTK 服务的无缝衔接,可改变现有非差网络 RTK 的数据通讯模式。此时,用户在模糊度快速固定后不再需要获取周边基准站的增强信息,这将大幅减轻整个区域增强系统的实时数据通讯负担,显著增加系统可同时服务的精密定位用户数量。

1 非差网络 RTK 与广域 PPP-RTK 模糊度解算结果的一致性

用下标 W 表示宽巷观测值,所采用的卫星宽巷 UPD 为 h_w , MW (Melbourne-Wübbena) 组合观测值的多历元均值为 M_w ,在广域 PPP-RTK 处理模式下可解算得到宽巷模糊度 N_w :

$$N_w = M_w - h_w \quad (1)$$

固体潮、大洋潮、相对论效应、天线相位中心、

收稿日期:2013-09-22

项目来源:大地测量与地球动力学国家重点实验室开放基金资助项目(SKLGED2013-4-9-E);国家自然科学基金资助项目(41304028);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20130141120005);国家 863 计划资助项目(2014AA123101)。

第一作者:邹璇,博士,主要从事非差网络 RTK 及高精度数据处理方面的研究。E-mail:supermanzx1982@sina.com

对流层延迟等误差可根据已有模型改正,接收机硬件延迟可通过星间单差或参数估计的方式消除,采用精密卫星轨道和精密卫星钟差产品以避免轨道和钟误差的影响,上述误差在下文公式推导中不再加以复述。

对于每个基准站,固定测站坐标为已知真值,利用式(1)所得 N_w 按照式(2)计算每颗可视卫星方向的宽巷观测值残差,即非差网络 RTK 模式下的宽巷区域增强信息 $Omc_w^{[10]}$:

$$\begin{aligned} Omc_w &= \lambda_w L_w + \lambda_w N_w - \rho + ct = \\ &(\lambda_w L_w + \lambda_w M_w - \rho + ct) - \lambda_w h_w = \\ &Atm_w - \lambda_w h_w \end{aligned} \quad (2)$$

其中, λ_w 为宽巷波长; L_w 为宽巷观测值; ρ 为测站卫星间几何距离; c 为真空中的光速; t 为卫星和接收机钟差; Atm_w 为测站卫星方向宽巷观测值对应的电离层延迟和残余的对流层延迟误差。

由于卫星 UPD 的整数部分与整周模糊度难以有效分离,只能对其小数部分进行估计。与其真值相比,卫星 h_w 中包含某一整数偏差,式(2)中的 Atm_w 并不一定是测站卫星方向真实的大气延迟影响。不过由于每颗可视卫星于不同基准站处计算所得 Atm_w 包含的整数偏差相同,因此不会影响 Atm_w 在小区域内的位置相关性。利用用户周边至少 3 个基准站的 Omc_w 进行平面拟合建模,并内插得到用户处精确的宽巷区域增强信息 $Omc_{wu}^{[6]}$:

$$\begin{aligned} Omc_{wu} &= x(Atm_{w0} - \lambda_w h_w) + y(Atm_{w1} - \\ &\lambda_w h_w) + z(Atm_{w2} - \lambda_w h_w) = \\ &Atm_{wu} - \lambda_w h_w \end{aligned} \quad (3)$$

其中, 0、1、2 为基准站索引号; x 、 y 、 z 为平面拟合系数, $x+y+z=1$ 。

对比式(2)和式(3)可知,由于基准站处生成 Omc_w 所需 N_w 与基准站在广域 PPP-RTK 模式下的宽巷模糊度解算结果相同,因此利用 Omc_{wu} 与 h_w 在用户处分别采用非差网络 RTK 和广域 PPP-RTK 模式所得宽巷模糊度的解算结果同样保持一致性。

类似于式(1)~式(3)对宽巷模糊度的推导可进一步证明,采用同一组卫星 L_1 观测值的 UPD,非差网络 RTK 和广域 PPP-RTK 模式下用户 L_1 模糊度解算结果相同。因此,当采用同一套卫星轨道、钟差、UPD 产品,相一致的 Omc ,以及同样的误差改正模型时,非差网络 RTK 模式下解算的宽巷模糊度和 L_1 模糊度可以直接用于该用户的广域 PPP-RTK 数据处理。

2 适用于大规模用户的非差网络 RTK 服务模式

2.1 实时卫星轨道和卫星钟差产品

武汉大学卫星导航定位技术研究中心自 2009 年开始参与国际 GNSS 服务(International GNSS Service, IGS)实时实验计划,并于 2009 年 6 月由 IGS 实时数据流工作组的 GNSS 数据中心授权成立了亚太地区最早的数据转发中心。采用武汉大学自主研发的 PANDA 软件,对全球分布近 100 个 GPS 基准站的高采样率实时数据流进行解算。实时解算得到的卫星轨道精度为 3~5 cm,钟差精度为 0.1~0.3 ns,能够满足 RTPPP 模糊度固定的应用需要。

2.2 实时卫星 UPD 产品

利用接收到的实时精密卫星轨道和卫星钟差产品,以及全球约 100 个或区域多个基准站的实时观测数据,在固定测站坐标为已知真值的条件下进行 RTPPP。利用全部基准站的 IF 模糊度浮点解和 MW 模糊度浮点解,实时生成卫星 UPD 产品^[2]。

2.3 实时区域增强产品

利用实时估计的卫星 UPD 以及实时精密卫星轨道和卫星钟差产品对每个区域增强基准站分别进行广域 PPP-RTK 解算,获得同一基准下的非差模糊度固定解。此时便可得到每个基准站处消除模糊度和坐标影响的 L_1 、 L_2 载波相位非差观测值残差, P_1/CA 伪距非差观测值残差,以及基准站处的天顶对流层延迟残余误差,并将其作为区域增强产品实时发送给网内用户^[11]。

2.4 实时服务模式

根据 §1 对非差网络 RTK 和广域 PPP-RTK 处理模式下用户模糊度解算结果一致性的推导证明,并利用前者的用户模糊度可快速固定而后者无需用户与基准站间实时数据通讯的特性,本文提出的适用于大规模用户的非差网络 RTK 服务模式如图 1 所示。

用户在利用近似坐标内插得到相应的区域增强信息后,按照非差网络 RTK 模糊度固定三步法进行模糊度快速解算^[11]。当用户快速、有效固定至少 4 颗卫星的宽巷模糊度和 L_1 模糊度后,不再需要获取周边基准站的区域增强信息,此时将模糊度固定结果以及内插得到的天顶对流层延迟残余误差作为已知真值,并结合接收到的卫星 UPD 信息,便可即刻获得广域 PPP-RTK 模式下

厘米级的精密定位服务。对于随后历元新出现的模糊度参数,按照广域 PPP-RTK 方法进行模糊度解算^[2]。如可固定模糊度的卫星数少于 4 颗,则重新采用非差网络 RTK 方法进行模糊度快速初始化。由于卫星 UPD、实时卫星轨道和实时卫星钟差只与卫星相关,并且可以进行数十

秒至数分钟的短期预报^[1,12],因此以上信息可采用广播的方式由通讯卫星播发给用户,这将极大降低用户与基准站间的实时数据通讯负担。一旦完成用户模糊度快速初始化,新的非差网络 RTK 系统可同时服务的用户数量将不再受制约。

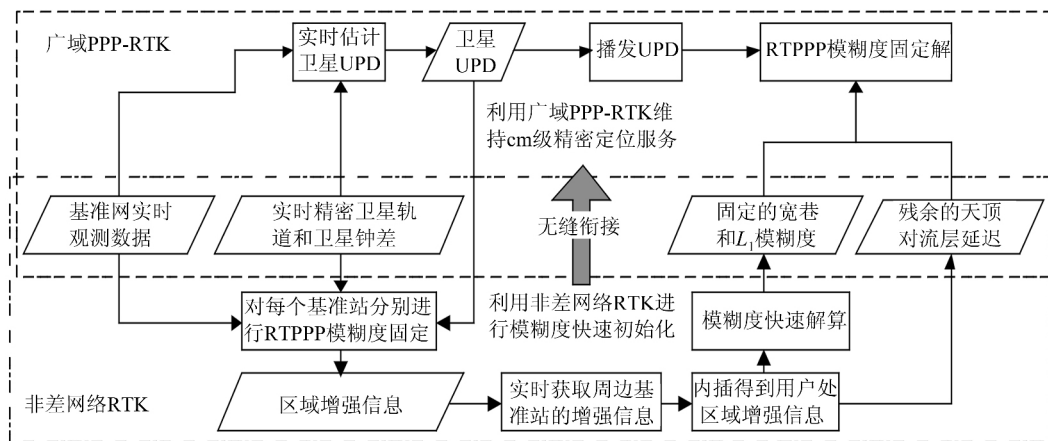


图 1 适用于大规模用户的非差网络 RTK 服务模式

Fig. 1 New Undifferenced Network Scheme for Massive Users

3 非差网络 RTK 新服务模式的有效性测试

3.1 实时数据准备

采用湖北省连续运行参考站系统(continuous operational reference system, CORS) 2013-05-07 采样间隔为 1 s 的一组实时数据,对本文提出的非差网络 RTK 服务新模式进行验证分析,整个测试网的位置分布如图 2 所示。为确定测站的真实坐标作为对比分析时的基准,利用 PANDA 软件将全部 32 个测站与周边 IGS 站连续多天的观测数据按照静态网解模式进行联合解算,得到每个测站在 ITRF08 框架当前时刻的精确坐标^[13]。

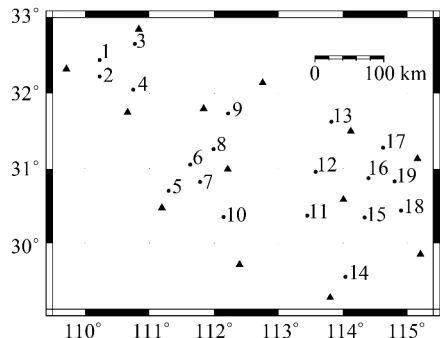


图 2 实时观测站点分布示意图

Fig. 2 Configuration of Real-Time Sites

3.2 服务模式的有效性测试

采用实时精密卫星轨道和卫星钟差产品,按照 § 2 提出的服务模式进行实时测试,并将测试结果与采用原有服务模式的定位结果进行对比分析。本文算例总计进行了 15 h 的测试,如图 2 所示设定了 13 个基准站和 19 个检测站,基准站间平均距离为 120 km。表 1 的统计结果表明,新服务模式在多达 99.914% 的时段内可为用户提供厘米级实时精密定位服务。而采用原有服务模式时,由于基准站处实时数据传输延迟/中断和非差模糊度未能有效固定等原因的影响,某些时段无法为检测站提供周边基准站处的区域增强信息,从而导致用户无法进行精密定位。原有服务模式下的服务有效性为 94.274%,明显低于新的服务模式。分析认为,这主要是由于卫星 UPD 信息由所有基准站共同维持,并且可以进行数分钟的短期预报,某一个或多个基准站的数据中断不会影响到卫星 UPD 实时估计的有效性。因此,新的服务模式可以有效填充原有服务模式下由于区域增强信息中断引起的“服务空隙”,从而为用户提供更加连续、可靠的精密定位服务。

更为重要的是,采用原有非差网络 RTK 服务模式时,用户与基准站间需一直保持实时数据通讯以获得指定基准站的区域增强信息。新模式充分利用广域 PPP-RTK 的技术特点,测区内用户在 99.914% 的情况下仅需接收由通讯卫星或

其他通讯手段广播发送的同一组卫星 UPD、卫星轨道、卫星钟产品,用户与基准站间的实时数据通讯量仅为原有服务模式的 1%。并且,在绝大多数的情况下,检测站快速实现 RTPPP 模糊度首次固定后便可一直采用广域 PPP-RTK 模式持续获得厘米级的定位结果。此时,由于用户所需精密定位信息可以采用广播的模式统一发送,因此,系统可同时服务的用户数量将不再受用户与基准站间实时通讯能力的限制。

此外,从表 1 的统计结果也可以发现,在新的非差网络 RTK 服务模式,本文算例中各检测站定位精度都略低于原有服务模式,尤其在高程方向表现得更为明显。分析认为这主要是因为新的服务模式下,实时精密卫星轨道和卫星钟差的残余误差会影响 RTPPP 定位精度。此外,与原有非差网络 RTK 处理模式相比,广域 PPP-RTK 模式下检测站的天顶对流层延迟需实时估计,而天顶对流层延迟的估值精度会影响检测站在高程方向的定位精度。因此,如能在目前的实时卫星轨道和卫星钟差估计过程中加入更多的区域增强基准站观测数据,将得到更适合本区域的实时精密卫星轨道和卫星钟差产品,此时用户的定位精度也将得到进一步提升。

表 1 非差网络 RTK 精密定位测试结果

Tab.1 Statistics of Positioning Tests in URTK

模式		新				原有			
检测站	有效性	定位精度/cm			有效性	定位精度/cm			
编号	/%	N	E	U	/%	N	E	U	
1	99.764	1.7	1.3	7.1	93.609	1.4	1.3	4.2	
2	99.802	1.7	1.4	7.0	93.683	1.4	1.2	4.1	
⋮	⋮							⋮	
19	99.961	1.6	1.3	6.0	94.166	1.2	1.2	4.0	
平均	99.914	1.6	1.4	6.3	94.274	1.2	1.2	4.0	

为了进一步展示本文所提出非差网络 RTK 新服务模式的有效性,图 3~4 给出了检测站 8 在两种模式下的实时逐历元精密定位结果。如图 3 所示,检测站 8 在第一个历元利用区域增强信息快速完成 RTPPP 模糊度首次固定后,在随后历元采用广域 PPP-RTK 方法持续获得平面 1~2 cm、高程 10 cm 左右的实时定位结果。图 4 中定位结果存在的空白部分则是原有服务模式由于无法获取周边基准站区域增强信息而引起的“服务空隙”,这一问题在新模式下得到了有效解决(见图 3)。其余各检测站均能得到类似的结果,限于文章篇幅在此不逐一列举。

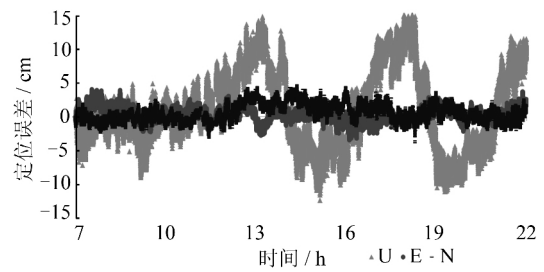


图 3 检测站 8 在新服务模式下的定位结果

Fig. 3 Positioning Errors of Site 8 in the New URTK Scheme

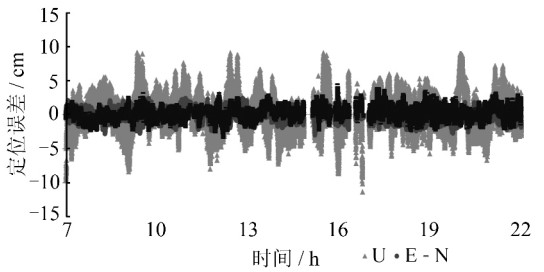


图 4 检测站 8 在原有服务模式下的定位结果

Fig. 4 Positioning Errors of Site 8 in the Existing URTK Scheme

4 结 语

本文证明了非差网络 RTK 与广域 PPP-RTK 用户模糊度解算结果在采用同一套卫星轨道、钟差和 UPD 产品时的一致性,并利用前者的用户模糊度可快速固定而后者无需用户与基准站间实时数据通讯的特性,提出了一套适用于大规模用户的非差网络 RTK 服务模式。此外,本文还设计了相应的实时测试方案验证新服务模式的可行性和有效性。

按照本文给出的实时服务模式,非差网络 RTK 用户仅需在模糊度初始化期间获取周边基准站的区域增强信息,在 RTPPP 模糊度有效固定后则无需提供用户与基准站间的实时数据通讯服务,这一服务模式将大幅减轻整个区域增强系统的实时数据通讯负担,解决现有方法可同时服务用户数量受限的问题。此外,由于卫星 UPD 信息由所有基准站共同维持,并且可以进行数分钟的短期预报,某一个或多个基准站的数据中断不会影响卫星 UPD 实时估计的有效性,因此新的服务模式可以有效填充原有服务模式下由于增强信息中断引起的“服务空隙”。以上特性为 GNSS 快速实时精密定位技术未来在滑坡监测、地震监测、精细农业、车辆船舶飞机精密导航定位等领域更加广泛的应用提供了可能,数以万计不

同类型用户同时获得快速实时厘米级定位服务的梦想必将成为现实。

参 考 文 献

- [1] Ge M R, Gendt G, Rothacher M, et al. Resolution of GPS Carrier-Phase Ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with Daily Observations [J]. *Journal of Geodesy*, 2008, 82(7): 389-399
- [2] Geng J H, Teferle F N, Meng X, et al. Towards PPP-RTK: Ambiguity Resolution in Real-Time Precise Point Positioning [J]. *Advances in Space Research*, 2010, 47: 1 664-1 673
- [3] Li X, Ge M, Zhang H, et al. A Method for Improving Uncalibrated Phase Delay Estimation and Ambiguity-Fixing in Real-Time Precise Point Positioning [J]. *J Geod*, 2013, DOI: 10.1007/s00190-013-0611-x
- [4] Ge M R, Zou X, Dick G, et al. An Alternative Network RTK Approach Based on Undifferenced Observation Corrections [C]. GNSS, Portland, Oregon, 2010
- [5] Teunissen P J G, Odijk D, Zhang B. PPP-RTK: Results of CORS Network-Based PPP with Integer Ambiguity Resolution [J]. *Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviation, Series A*, 2010, 42(4): 223-230
- [6] Zou X, Ge M R, Tang W M, et al. URTK: Undifferenced Network RTK positioning [J]. *GPS Solutions*, 2012, DOI: 10.1007/s10291-012-0277-5
- [7] Zhang Xiaohong, Li Xingxing, Guo Fei, et al. Server-Based Real-Time Precise Point Positioning and Its Application [J]. *Chinese J Geophys*, 2010, 53(6): 1 308-1 314(张小红, 李星星, 郭斐, 等. 基于服务系统的实时精密单点定位技术及应用研究 [J]. *地球物理学报*, 2010, 53(6): 1 308-1 314)
- [8] Tang Weiming, Liu Jingnan, Liu Hui, et al. A Modified Combined Bias Interpolation Method for GNSS Network RTK [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(12): 1 156-1 159(唐卫明, 刘经南, 刘晖, 等. 一种 GNSS 网络 RTK 改进的综合误差内插方法 [J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2007, 32(12): 1 156-1 159)
- [9] Zhou Letao, Huang Dingfa, Xu Rui, et al. A New Network RTK: Augmentation Reference Station [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(1): 76-80(周乐韬, 黄丁发, 徐锐, 等. 一种网络 RTK 新技术: 增强参考站 [J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2008, 33(1): 76-80)
- [10] Li X X, Zhang X H, Ge M R. Regional Reference Network Augmented Precise Point Positioning for Instantaneous Ambiguity Resolution [J]. *Journal of Geodesy*, 2011, 85(3): 151-158
- [11] Zou Xuan, Tang Weiming, Shi Chuang, et al. Instantaneous Ambiguity Resolution for PPP-RTK Using Regional Ground-Based Augmentation Information [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2014, 34(1): 78-83(邹璇, 唐卫明, 施闯, 等. 区域地基增强 PPP-RTK 模糊度快速固定方法研究 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2014, 34(1): 78-83)
- [12] Shi C, Lou Y D, Song W W, et al. A Wide Area Real-Time Differential GPS Prototype System in China and Result Analysis [J]. *Survey Review*, 2011, 43(322): 351-360
- [13] Liu J N, Ge M R. PANDA Software and its Preliminary Result of Positioning and Orbit Determination [J]. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, 2003, 8(2): 603-609

A New Undifferenced Network RTK Scheme for Massive Users

ZOU Xuan^{1,2} LI Zongnan¹ TANG Weiming¹ SHI Chuang¹ LIU Jingnan¹

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

² State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China

Abstract: In this contribution, we show the ambiguity consistency between an undifferenced network RTK (URTK) and wide-area PPP-RTK. We make full use of rapid ambiguity fixing in URTK and the lack of the need for real-time communication between users and reference stations in wide-area PPP-RTK, to develop a new scheme to provide URTK services. It is a hard task for existing URTK to realize real-time rapid precise positioning easily for massive numbers of users. Positioning precision and
(下转第 1265 页)

Long-Term Stability of Reference Stations by Taking Non-tectonic Deformation into Account

QIAN Chuang¹ LIU Hui¹ DING Zhigang² ZHENG Hongyan¹

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

² Shandong CompStar Navigation Technology Co., Zibo 255086, China

Abstract: Continuously operating reference stations can provide continuous and reliable original data for surface displacement studies. Multiple reference stations' position time series (Coordinate time series) may reflect surface subsidence and movement trends in the region, and is the basis for further research on linear and non-linear change in the movement. In this paper, continuously operating reference station network in Jiangxi (JXCORS) is researched as an example. The phenomena of linear and non-linear changes in Jiangxi were studied based on the establishment of the position series for three years at each reference station. For the linear variation, local plane deformation is small (The difference of average rate and dominant direction with the nearby sites are less than 1 mm/a and 1.63° respectively, the change of elevation direction is comparative stable). The average lifting speed and settlement speed are 1.887 mm/a and 0.906 mm/a respectively. For the non-linear change, the vertical position of the reference stations has a semi-annual cycle, which is partially caused by hydrological load.

Key words: CORS; position time series; velocity field; ground settlement; non-tectonic deformation

First author: QIAN Chuang, PhD, specializes in high-precision GNSS data processing. E-mail: qforever112358@gmail.com

Corresponding author: LIU Hui, PhD, professor. E-mail: loweliu@263.net

Foundation support: The National 863 Program of China, No. 2012AA12A209.

(上接第 1246 页)

the availability for the proposed scheme and the old one were validated with the real-time data from HBCORS in China. Test results verify that, for a reference network with a station separation of about 120 km, user ambiguities can be fixed in several epochs, with real-time positioning precision for a user in the horizontal and vertical directions are 1 to 2 cm and 6.3 cm, respectively. Once the user ambiguities are successfully fixed, the new URTK service can support an almost unlimited number of users. In comparison with the 94.27% service effectiveness of the existing URTK scheme, the new scheme can fill these service gaps and provide users with more reliable and continuous service.

Key words: undifferenced network RTK; wide-area PPP-RTK; seamless transition; massive users; real-time precise point positioning

First author: ZOU Xuan, PhD, specializes in undifferenced network RTK and high accuracy data processing. E-mail: supermanzx1982@sina.com

Foundation support: The Open Foundation of the State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, No. SKLGED2013-4-9-E; National Natural Science Foundation of China, No. 41304028; Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (SR-FDP), No. 20130141120005; the National 863 Program of China, No. 2014AA123101.