



一种适用于大尺度卫星导航定位基准站的网络RTK方法

舒宝, 何元浩, 王利, 周星, 张勤, 黄观文

引用本文:

舒宝, 何元浩, 王利, 等. 一种适用于大尺度卫星导航定位基准站的网络RTK方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(11): 1609–1619.

SHU Bao, HE Yuanhao, WANG Li, et al. A Network RTK Method for Large-Scale Satellite Navigation and Positioning Reference Stations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(11): 1609–1619.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[长距离GPS/BDS双系统网络RTK方法](#)

A Network Real-Time Kinematic Method for GPS and BDS Double Systems Between Long Range

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(2): 252–261 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20190352>

[星基反演TEC与地基GNSS TEC数据融合可行性分析](#)

Feasibility of the Data Fusion Between Space-Borne and Ground-Based TEC Products

武汉大学学报·信息科学版. 2020, 45(4): 557–564 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20180293>

[GNSS水汽层析的自适应代数重构算法](#)

Adaptive Algebraic Reconstruction Algorithms for GNSS Water Vapor Tomography

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(9): 1318–1327 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20190387>

[基于相空间重构和高斯过程回归的对流层延迟预测](#)

Tropospheric Delay Prediction Based on Phase Space Reconstruction and Gaussian Process Regression

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(1): 103–110 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20190018>

[SBAS星历改正数及UDRE参数生成算法分析](#)

Analysis of SBAS Ephemeris Correction and UDRE Generation Algorithm

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(1): 111–117 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20190033>



一种适用于大尺度卫星导航定位基准站的 网络RTK方法

舒 宝^{1,2,3} 何元浩^{1,2,3} 王 利^{1,2,3} 周 星⁴
张 勤^{1,2,3} 黄观文^{1,2,3}

1 长安大学地质工程与测绘学院,陕西 西安,710054

2 地理信息工程国家重点实验室,陕西 西安,710054

3 长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室,陕西 西安,710054

4 甘肃省测绘工程院,甘肃 兰州,730070

摘 要:网络实时动态测量(real-time kinematic, RTK)技术可为大范围区域用户提供实时高精度的定位服务,然而目前该技术对卫星导航定位(satellite navigation and positioning, SNAP)基准站网密度要求较高。为了满足稀疏大尺度SNAP基准站网区域的高精度定位服务需求,提出了一种基于虚拟大气约束(virtual atmosphere constraint, VAC)的网络RTK服务方法,首先构建非组合双差观测值模型,快速解算并固定SNAP基准站基线模糊度;然后提取基线大气延迟,分别建立斜路径电离层和天顶对流层误差模型;最后将内插的大气延迟及其精度信息作为虚拟观测值,提升终端RTK的定位性能。采用中国西北的SNAP基准站网数据(平均站间距为205.1 km)和网内外6个流动站数据进行RTK验证,结果表明,所提方法可以满足大尺度参考网下用户的高精度定位需求,相比传统的虚拟基准站技术,VAC服务模式下的终端定位精度、初始化速度平均分别提升61.64%和9.96%,该模式下测试终端固定解水平和高程方向的平均均方根分别为1.19 cm、2.73 cm;采用多次初始化进行验证,平均88.78%的时段在2个历元内即可完成初始化;VAC服务模式对大尺度SNAP基准站网内外用户均具有较好的适应性。

关键词:网络RTK;虚拟基准站;虚拟大气约束;大气建模误差;大尺度SNAP基准站网

中图分类号:P228

文献标志码:A

近年来,世界各主要国家和地区都在致力于建设和升级自己的全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS),包括中国的北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)、美国的GPS III、俄罗斯的GLONASS(global navigation satellite system) K系列卫星以及欧盟Galileo系统^[1-2]。多模GNSS观测值可以显著提升导航定位的可用性、可靠性,且有利于提升用户终端高精度定位的初始化速度及精度^[3-4]。

GNSS系统民用定位精度通常在米级左右,无法满足自动驾驶、精密农业、形变监测等高精度定位应用需求,基于地面卫星导航定位(satellite

navigation and positioning, SNAP)基准站网生成差分改正信息是提高终端用户导航定位精度的重要手段^[5-7]。实时区域高精度GNSS定位服务方法中主要包括网络实时动态测量(real time kinematic, RTK)技术和精密单点实时动态定位(precise point positioning-RTK, PPP-RTK)技术。相比PPP-RTK,通常网络RTK初始化速度更快,服务性能更稳定,工程化应用更广泛,在交通、农业、气象、工程建设以及地球科学研究等国民经济建设领域发挥着重要作用^[5, 8]。网络RTK技术利用区域内多个SNAP基准站数据,在基准站模糊度固定后,只需对大气延迟误差建模即可为区域内的流动站用户提供差分改正信息,进而

收稿日期:2021-04-24

项目资助:国家自然科学基金(42004024);中国博士后科学基金(2020M673321);陕西省自然科学基金基础研究计划(2021JQ-230);中央高校基础研究基金(300102261305)。

第一作者:舒宝,博士,讲师,主要从事GNSS高精度定位算法和应用研究。baos613@163.com

通讯作者:王利,博士,教授。wangli@chd.edu.cn

实现较大范围流动站的厘米级定位。目前使用最为广泛的是天宝公司的虚拟基准站技术,其主要优势是服务端不用发送 SNAP 基准站的物理坐标,保密性好^[9-10]。然而该技术一般要求 SNAP 基准站网的站间距为 40~70 km,随着 SNAP 基准站间距变大,站间大气延迟相关性降低,大气延迟建模精度必然下降,最终导致用户终端定位偏差严重甚至定位失败^[11-12]。尽管大多数国家已建立各自的地基增强网系统,部分国家和地区由于经济等原因还未建设 SNAP 基准站网或者站点相对稀疏^[13]。例如,作为非洲的第一大经济体的尼日利亚地区仅有 15 个 SNAP 基准站^[14]。

为了满足 SNAP 基准站网稀疏区域的导航定位、精密农业、地质灾害监测等 GNSS 实时高精度应用需求,本文提出一种基于虚拟大气约束(virtual atmosphere constraint, VAC)的网络 RTK 服务方法,首先构建非组合双差观测值模型,快速解算并固定 SNAP 基准站网的基线模糊度;然后充分顾及 SNAP 基准站的误差特性,分类建立大气误差模型;最后将内插的区域大气延迟及其精度信息用于构建虚拟观测值,提升 GNSS 终端用户的实时定位性能。

1 网络 RTK 服务流程

网络 RTK 服务流程如图 1 所示。图 1(a)给出了基于虚拟基准站技术的网络 RTK 服务流程图。流动站首先向服务端发送自身概略坐标;然后数据处理中心根据流动站概略位置,利用 SNAP 基准站网固定解基线提取的大气延迟和主参考站的观测值在流动站附近生成一个虚拟基准站;最后数据处理中心将虚拟观测值发送给用户。虚拟基准站技术一般要求 SNAP 基准站站间距不超过 70 km,该技术将建模后的大气延迟直接用于虚拟基准站观测值生成,会引入大气建模误差,当 SNAP 基准站距离较长或大气较为活

跃时,较大的建模误差会直接导致用户终端模糊度固定困难,即使成功固定模糊度,也难以保障其定位精度^[15]。

为了增强网络 RTK 算法对 SNAP 基准站网尺度的适应性,本文采用基于 VAC 的 RTK 定位方法,在固定 SNAP 基准站网基线模糊度并进行区域大气建模后,将用户位置到主参考站的大气及其精度内插信息作为虚拟观测值提升 RTK 终端的模糊度固定率及定位精度。图 1(b)展示了基于 VAC 的网络 RTK 服务流程,和虚拟基准站服务模式不同,VAC 模式中直接利用终端和距离最近的主参考站数据,采用中长距离 RTK 定位模型解算用户终端位置。VAC 模式下的网络 RTK 定位解算流程全部在服务端进行,具备以下优势:(1)大气约束模型强度可控,可有效兼顾 GNSS 定位终端的初始化速度及精度;(2)节省终端成本并有效降低终端功耗;(3)服务端可利用海量用户观测值信息精化大气模型,提升服务质量。

2 大尺度 SNAP 基准站网络 RTK 服务方法

2.1 SNAP 基准站网基线模糊度固定

固定 SNAP 基准站模糊度是网络 RTK 实现大气建模以及提供高精度差分信息的前提。对于网络 RTK 中的长距离基线,常用的解算模型是无电离层组合模型^[16],采用该模型时需首先基于 HMW (Hatch-Melbourne-Wübbena) 组合序列进行滑动平均,再固定宽巷模糊度。由于 HMW 组合的精度高度依赖伪距观测值,需要较长时间平滑才能实现宽巷模糊度固定^[17],而非组合模型可以通过添加电离层模型改正等方法辅助模糊度参数快速收敛,算法相对灵活^[18-19],且观测值噪声较低,因此本文采用非组合模型处理网络 RTK 基准站网基线数据,将天线相位中心、相位缠绕、干分量对流层延迟等误差改正后,非组合双差伪距和相位观测方程如下:

$$\begin{cases} P_{rb,k}^{pq} = \rho_{rb}^{pq} + \mu_k I_{rb,1}^{pq} + m_r^{pq} w_r - m_b^{pq} w_b + \epsilon_{P,k} \\ L_{rb,k}^{pq} = \rho_{rb}^{pq} - \mu_k I_{rb,1}^{pq} + m_r^{pq} w_r - m_b^{pq} w_b + \lambda_k N_{rb,k}^{pq} + \epsilon_{L,k} \end{cases} \quad (1)$$

式中, r 和 b 分别表示流动站和基准站; p 和 q 分别表示参考星和非参考星; k 表示信号频率; P 表示伪距观测值; L 表示换算为距离的相位观测值; λ 为波长; ρ 表示站-星几何距离; I_1 表示 f_1 频点的斜路径电离层延迟; μ_k 表示与频率相关的电离层延迟系数, $\mu_k = f_1^2 / f_k^2$; w 和 m 分别表示天顶对流层

延迟和对应的映射函数; N 为双差整周模糊度; ϵ_L 和 ϵ_P 分别表示相位和伪距的观测值噪声。已知网络 RTK 基准站的坐标,其基线解算误差观测方程如下:

$$E \begin{bmatrix} \delta P \\ \delta L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} & 0 \\ -\mathbf{A} & \mathbf{B} & \mathbf{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{w} \\ c \end{bmatrix} \quad (2)$$

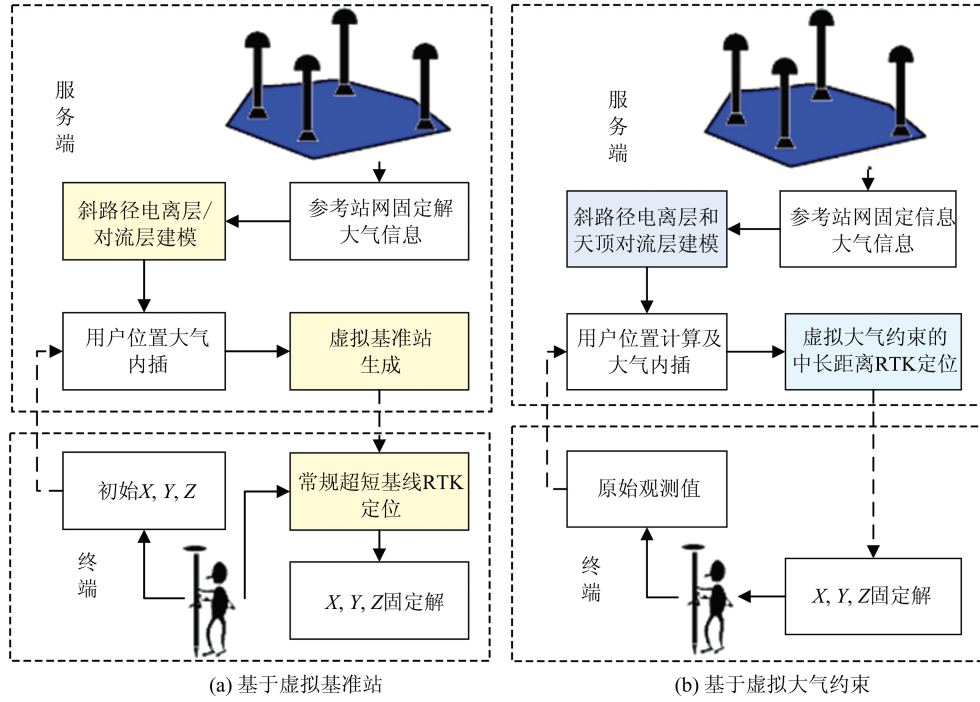


图 1 两种模式下的网络 RTK 服务流程

Fig.1 Flowchart of Network-RTK Service Methods Based on Two Modes

式中, $E[\cdot]$ 表示期望函数; δP 和 δL 分别为双差伪距和相位观测值残差向量; I 表示斜路径电离层延迟参数向量, A 是对应的系数矩阵; w 是天顶对流层延迟参数向量, B 是对应的系数矩阵; c 是模糊度参数向量, C 是对应的系数矩阵。根据式(2)可通过卡尔曼滤波或序贯最小二乘进行参数解算。模糊度固定是提取高精度大气延迟的前提, 为了提高模糊度固定率, 首先将原始的模糊度转换为宽巷和窄巷模糊度^[20-21]; 然后使用最小二乘模糊度降相关平差 (least-square ambiguity decorrelation adjustment, LAMBDA) 法固定宽巷和窄巷模糊度。宽巷模糊度固定后, 最后更新窄巷模糊度, 计算如下:

$$\begin{cases} \hat{c}_2 = \hat{c}_2 - Q_{\hat{c}_2 \hat{c}_1} Q_{\hat{c}_1 \hat{c}_1}^{-1} (\hat{c}_1 - \check{c}_1) \\ Q_{\hat{c}_2 \hat{c}_2} = Q_{\hat{c}_2 \hat{c}_2} - Q_{\hat{c}_2 \hat{c}_1} Q_{\hat{c}_1 \hat{c}_1}^{-1} Q_{\hat{c}_1 \hat{c}_2} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\hat{c}_1 = N_1 - N_2$, 表示宽巷模糊度; $\hat{c}_2 = N_1$, 表示窄巷模糊度; Q 是对应的方差协方差阵; \hat{c}_2 为直接解算的窄巷模糊度, \check{c}_1 为宽巷固定解; \bar{c}_2 为利用 \check{c}_1 更新后的窄巷模糊度。相比 \hat{c}_2 , \bar{c}_2 精度更高, 更容易固定。本文将模糊度参数固定后, 提取高精度的双差电离层 I_{rb}^{pq} 和对流层延迟 T_{rb}^{pq} , 计算如下:

$$I_{rb}^{pq} = \frac{1}{\mu_k^2 - \mu_j^2} [L_{rb,k}^{pq} - \lambda_k N_{rb,k}^{pq} - (L_{rb,j}^{pq} - \lambda_j N_{rb,j}^{pq})] \quad (4)$$

$$T_{rb}^{pq} = L_{rb,k}^{pq} - \rho_{rb}^{pq} - \lambda_k N_{rb,k}^{pq} + \mu_k^2 I_{rb}^{pq} \quad (5)$$

另外, 可采用约束最小二乘更新得到模糊度固定后的天顶对流层延迟:

$$\bar{w} = \hat{w} - Q_{\hat{w} \hat{c}} Q_{\hat{c} \hat{c}}^{-1} (\hat{c} - \check{c}) \quad (6)$$

式中, \hat{c} 和 \check{c} 分别表示模糊度的浮点解和固定解; \hat{w} 、 \bar{w} 分别表示模糊度固定前、后的天顶对流层估值。

2.2 电离层和对流层延迟分类建模

区域大气建模是网络 RTK 系统生成差分信息的关键环节, 网络 RTK 中常用的大气建模方法主要有基于距离的线性内插方法 (linear interpolation method based on distance, DIM)^[22]、线性内插法 (linear interpolation method, LIM)^[23] 和线性组合法 (linear combination method, LCM)^[24] 等, 文献[11]比较了常用的大气建模方法, 发现各种方法的建模精度相近。

本文提出的基于 VAC 的网络 RTK 服务方法中参与大气建模的是双差斜路径电离层和相对天顶对流层延迟, 以线性内插法为例, 电离层建模计算如下:

$$I_{AB}^{pq} = a_i^{pq} x_{AB} + b_i^{pq} y_{AB} \quad (7)$$

式中, $x_{AB} = x_B - x_A$, $y_{AB} = y_B - y_A$; (x_A, y_A) 、 (x_B, y_B) 分别为测站 A 与 B 高斯投影下的平面坐标; a 、 b 为大气模型系数。电离层误差与高程的相关性较小, 只需考虑水平相关的梯度即可。对流层与测站高度具有较强的相关性^[25-26], 当基准站间高

差较大时,即使在模型中增设和高程相关的参数,对流层的内插精度也会明显降低。因此,本文采用先验模型改正与大气建模相结合的方法。首先采用先验高精度对流层模型(如GPT2^[27]),将SNAP基准站网基线对流层延迟扣除和高差相关的部分,再把所有基线的对流层延迟信息归化到统一的高程面后进行建模^[28]。表达式如下:

$$\bar{w}_{AB,H_0} = a_w x_{AB} + b_w y_{AB} \quad (8)$$

式中, \bar{w}_{AB,H_0} 表示归化到统一高程面 H_0 后的站间单差天顶对流层延迟。所有基线的对流层信息都需要先用高精度先验对流层模型归化至该高程面。假设区域范围内有 n 条基线参与大气建模,对该区域每颗非参考卫星 q 的电离层与天顶对流层延迟进行建模,有:

$$\begin{bmatrix} I_1^{pq} \\ I_2^{pq} \\ \vdots \\ I_n^{pq} \\ \bar{w}_1 \\ \bar{w}_2 \\ \vdots \\ \bar{w}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 0 & 0 \\ x_2 & y_2 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x_1 & y_1 \\ 0 & 0 & x_2 & y_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & x_n & y_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_I^{pq} \\ b_I^{pq} \\ a_w \\ b_w \end{bmatrix} \quad (9)$$

式(9)通过最小二乘即可获得每颗非参考星的电离层模型系数以及天顶对流层建模系数,同时可得到每颗非参考卫星的电离层建模误差和天顶对流层建模误差,计算公式如下:

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}} \quad (10)$$

式中, v 表示SNAP基准站基线已知大气信息与根据估计模型系数计算大气信息的差值; i 表示基线序号。

2.3 虚拟大气约束的终端定位解算模型

为了解算终端的高精度位置信息,服务端需在区域范围内选取一个距离最近的SNAP基准站作为参考站,并构建流动站与参考站间的双差解算模型。为了加快定位终端的初始化速度,可采用§2.2中的建模系数内插得到的用户终端和参考站间的大气延迟,计算如下:

$$\begin{cases} I_{MV}^{pq,0} = a_I^{pq} x_{MV} + b_I^{pq} y_{MV} \\ \bar{w}_{MV,H_0}^0 = a_w x_{MV} + b_w y_{MV} \end{cases} \quad (11)$$

式中, $I_{MV}^{pq,0}$ 和 \bar{w}_{MV,H_0}^0 分别表示内插的斜路径电离层和天顶对流层延迟; M 和 V 分别表示参考站和流动站。由于 \bar{w}_{MV,H_0}^0 是基于高程面 H_0 内插得到

的,与流动站和参考站的实际高程不符,无法直接构建对流层虚拟大气约束,需进行大气延迟高程归算,计算如下:

$$w_{MV}^0 = \bar{w}_{MV,H_0}^0 + \Delta\text{trop} \quad (12)$$

式中, w_{MV}^0 表示归算后的单差天顶对流层延迟; Δtrop 表示流动站处实际高程面与高程面 H_0 的对流层延迟之差。本文中大气归算所用 Δtrop 是基于先验高精度对流层改正模型GPT2计算得到的。在得到流动站与参考站的大气建模信息后,即可构建虚拟大气观测值方程:

$$\begin{cases} I_{MV}^{pq,0} = I_{MV}^{pq} + \epsilon_{I^0}, \sigma_{I^0}^2 \\ w_{MV}^0 = w_V - w_M + \epsilon_{I^0}, \sigma_{w_{MV}^0}^2 \end{cases} \quad (13)$$

与网络RTK基线解算模型不同,此处流动站坐标需作为待估参数。虚拟大气信息约束下的RTK解算误差观测方程如下:

$$E \begin{bmatrix} \delta P \\ \delta L \\ I^0 \\ w_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & \mathbf{A} & B & 0 \\ A & -\mathbf{A} & B & C \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ \mathbf{w} \\ c \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中, dx 表示待估坐标参数; I^0 表示内插的斜路径电离层延迟向量; w_0 表示相对天顶对流层延迟; D 表示虚拟观测信息中天顶对流层延迟参数对应的系数矩阵;其他变量的含义和式(2)一致。

3 实验分析

3.1 实验数据及数据处理策略

为了评估基于大尺度SNAP基准站的网络RTK定位效果,如图2所示,本文共收集了中国西北2017年年积日第19天的10个SNAP基准站数据,其中4个作为SNAP基准站(蓝色三角形),用于提取大气延迟信息并建模,另外6个作为流动站(红色圆形),用于测试网络RTK算法的终端定位效果。根据Delaunay三角形构网规则,4个SNAP基准站共形成5条基线,平均站间距为205.1 km。

表1列出了所有流动站与其最近的SNAP基准站及间距,6个流动站中5个站在三角网的覆盖范围内,GNYL与SNAP基准站距离最远,该流动站与其最近的SNAP基准站LXJS距离为110.6 km;GNOL站在网形覆盖范围外,该站与其最近的SNAP基准站GNMR距离为110.2 km。所有的接收机型号均为TRIMBLE NETR9,版本号为4.85,天线型号为TRM59900.00,接收机同时支持GPS/BDS系统双频数据,数据采样率为15 s,数据采集时段接收机仅能获取北斗二号(BDS-2)观测数据。

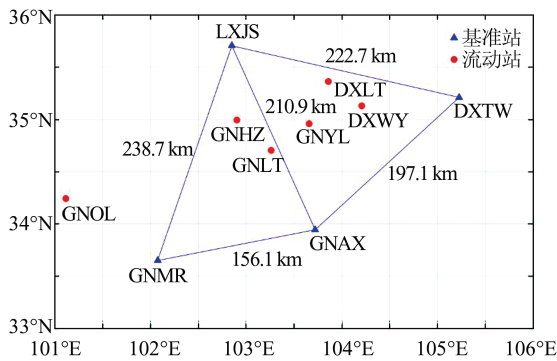


图2 实验基准站和流动站分布

Fig.2 Distribution of SNAP Reference Stations and Rover Stations

表 1 各流动站最近的 SNAP 基准站及其间距

Tab.1 Distance Between Rover Stations and Nearest SNAP Reference Stations

流动站	主参考站	间距/km
DXLT	LXJS	98.9
DXWY	DXTW	93.1
GNHZ	LXJS	79.0
GNLT	GNAX	90.8
GNYL	LXJS	110.6
GNOL	GNMR	110.2

在进行 SNAP 基准站基线解算和终端坐标解算时,截止高度角设置为 10° 。为了提高模糊度固定率,本文在宽窄巷模糊度固定的基础上采用部分模糊度固定方法,如果 LAMBDA 算法模糊检验失败,则采用最优解与次最优是否相等的方法选取模糊度子集,并重新尝试模糊度固定^[29]。为了确保固定解的定位精度,窄巷模糊度固定的卫星最小数目设置为 5。本文使用基于失败率的模糊度检验方法^[30],模糊度固定的失败率设置为 1%,该方法 ratio 检验阈值是随卫星数动态变化的。相比传统的恒定 ratio 阈值模糊度检验方法,该方法模糊度固定可靠性更高。为了验证基于虚拟大气的网络 RTK 定位算法效果,本文在生成流动站与主参考站间的大气建模信息的同时,还生成流动站近似坐标处的虚拟基准站观测值,采用两种网络 RTK 定位模式分别解算流动站坐标,并进行对比分析。

3.2 基准站模糊度固定效果分析

固定基准站载波相位模糊度是提取高精度大气信息以及进行建模的关键。图 3 给出了 5 条基线模糊度固定的卫星数,其中,横坐标表示 GPS 时(GPS time, GPST)。由于本文采用了部分模糊度固定算法,建模误差较大的卫星在模糊度固定时可直接被剔除。从图 3 中可以看出,尽

管参考站平均站间距超过 200 km,5 条基线模糊度固定率都较高;初始化后所有基线的模糊度固定率接近 100%;不考虑参考卫星,每条基线模糊度固定的卫星数在 9~15 颗左右。

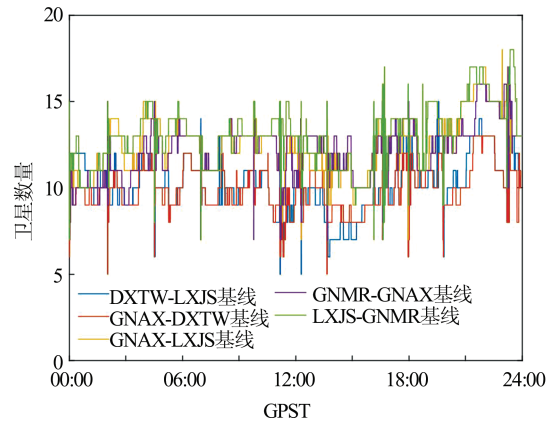


图 3 网络 RTK 基准站 5 条基线模糊度固定的卫星数

Fig.3 Ambiguity-Fixed Satellite Number of Five Network-RTK Baselines

除了固定率,另一项评价网络 RTK 的性能指标是初始化速度,在处理基线时每 40 个历元(10 min)初始化一次,一天共初始化 144 个时段。图 4 统计了 5 条基线宽巷和窄巷模糊度初始化速度的概率累计分布曲线。从图 4 中可以看出,窄巷模糊度有 90% 以上的时段在 20 个历元内(5 min)得到固定解;5 条基线有 95% 以上的时段可在 30 个历元内可以完成初始化。相比窄巷模糊度,宽巷模糊度所需的初始化时间更短。

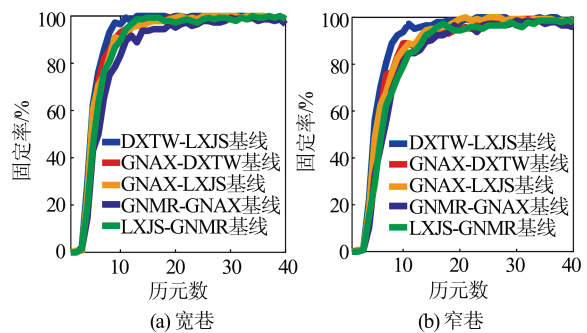


图 4 网络 RTK 基准站 5 条基线宽窄巷模糊度初始化速度的概率统计结果

Fig.4 Statistics Results of Probability of Wide-Lane and Narrow-Lane Ambiguity Initialization Speed for Five Network RTK Baselines

3.3 大尺度网络 RTK 大气延迟建模精度分析

流动站的定位性能和大气建模内插的精度密切相关。以 GNYL 站为例,首先分析电离层延迟的建模误差。图 5 分别给出了 GNYL-LXJS 基线 GPST 00:00—24:00 内 GPS 和 BDS 可视卫星

的双差电离层延迟结果(不同颜色代表不同卫星)。电离层延迟参考值是将流动站 GNYL 站作为基准站计算出来的。从图 5 中可以看出,由于参考站基线距离较长,双差电离层延迟较为显著,双差电离层延迟和电离层的活跃程度密切相关,在正午时段(GPST 05:00—07:00,对应地方

时 12:00—14:00),部分卫星的双差电离层延迟达 30 cm。另外,大尺度 SNAP 基准站网的电离层建模误差较大,部分时段建模误差达 10 cm,接近载波观测值波长的 1/2,若将该电离层建模值直接用于生成虚拟参考站观测值,将会引入对应数值的建模误差。

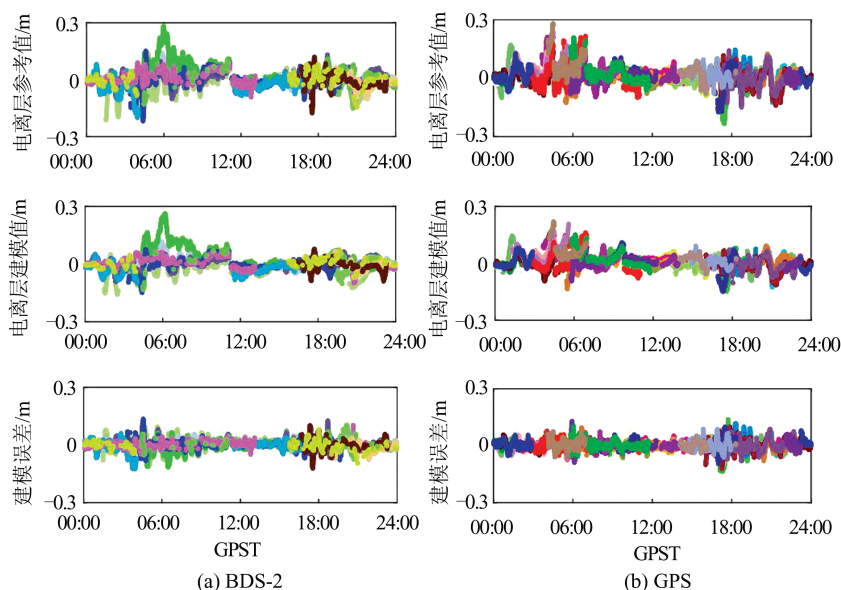


图5 GNYL-LXJS 基线电离层延迟模型内插值与参考值比较

Fig.5 Comparison of Interpolated and Reference Values of Ionosphere Delay at GNYL-LXJS Baseline

除了电离层延迟,对流层延迟建模误差也会对终端定位性能产生影响。和电离层模型一致,用于生成虚拟基准站观测值的双差对流层模型也采用线性内插法,与电离层建模不同的是,对流层建模前需采用先验高精度 GPT2 模型进行高程归化^[30]。

图 6 给出了 GNYL-LXJS 基线 GPST 00:00—24:00 GPS 和 BDS-2 可视卫星的双差对流层建模值及其误差。从图 6 可以看出,双差对流层延迟也为 30 cm,但相比电离层建模误差,对流层建模误差较小,BDS-2 和 GPS 卫星的双差对流层建模误差一般不超过 5 cm。

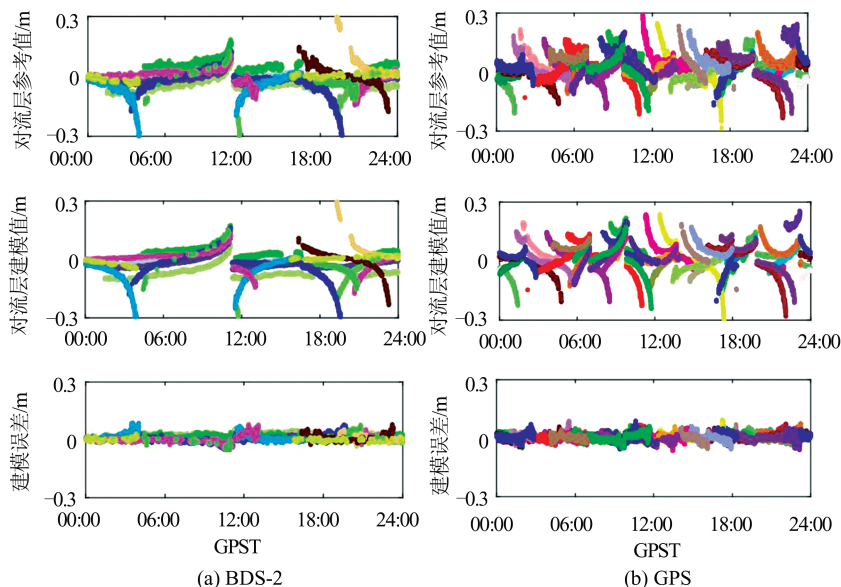


图6 GNYL-LXJS 基线对流层延迟模型内插值与参考值比较

Fig.6 Comparison of Interpolated and Reference Values of Troposphere Delay at GNYL-LXJS Baseline

图 7 给出了流动站 GNYL 与参考站 LXJS 间,相对天顶对流层湿延迟建模值与参考值的比较结果(红色为建模值,蓝色为参考值),天顶对流层延迟主要用于本文提出的大气虚拟观测值约束的网络 RTK 定位方法。从图 7 可以看出,该基线的天顶对流层建模误差一般在 1 cm 以内,个别时段达到了 2 cm。使用大气建模值时,需要提供对应的精度信息。本文中虚拟大气的精度信息主要参考式(10)计算的建模残差统计结果,在实际应用中可根据流动站与主参考的距离进行适当调整。

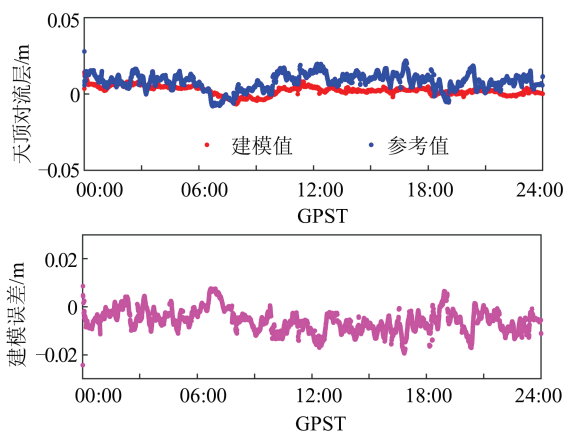


图 7 GNYL 站天顶湿分量模型内插值与参考值比较
Fig.7 Comparison of Interpolated and Reference Values of Zenith Troposphere Delay at GNYL Station

3.4 大尺度网络 RTK 终端定位性能分析

图 8 是 2017 年年积日第 19 天, GNYL 流动站基于虚拟基准站观测值和虚拟大气观测值约束两种服务模式下的模糊度固定解的定位结果。从图 8 中可以看出, VAC 模式下的定位误差整体小于虚拟基准站模式; VAC 模式下水平和高程方向的误差基本在 3 cm 以内, 而虚拟基准站模式下有较多历元水平方向的误差超过了 5 cm; 1 d 内 VAC 模式下水平和高程方向的均方根误差 (root mean square error, RMSE) 分别为 1.27 cm 和 2.81 cm, 虚拟基准站模式下水平和高程方向的均方根 (root mean square, RMS) 分别达 3.17 cm 和 6.06 cm。

图 9 给出了 GNYL 流动站在虚拟基准站和 VAC 两种服务模式下的 24 小时的固定卫星数情况。从图 9 可以看出, 虚拟大气约束下终端固定的卫星数明显多于虚拟基准站模式下的固定卫星数, 主要原因如下: (1) 当某颗卫星建模误差较大时 (如超过 $1/4$ 个波长), 由于直接引入了对应数值的大气误差, 虚拟基准站模式下模糊度很难

固定; 而 VAC 模式将大气延迟作为参数进行估计, 并为外部大气约束设置了相应精度信息, 该模式下参数估计残差小于虚拟基准站模式下建模误差。(2) 虚拟基准站模式下当 SNAP 基准站网多条基线的共视卫星均固定后才能生成对应的虚拟观测值, 因此参与终端定位的卫星仅限于成功生成虚拟基准站观测值的卫星, VAC 模式下, 即使没有生成该颗卫星的虚拟大气信息, 该卫星仍能参与终端定位解算, 其模糊度仍可能固定。由于采用了部分模糊度固定方法, 建模误差较大的卫星可以自动剔除, 两种服务模式下的终端模糊度固定率均较高, VAC 和虚拟基准站模式下 GNYL 站的固定率分别为 99.98% 和 99.85%。

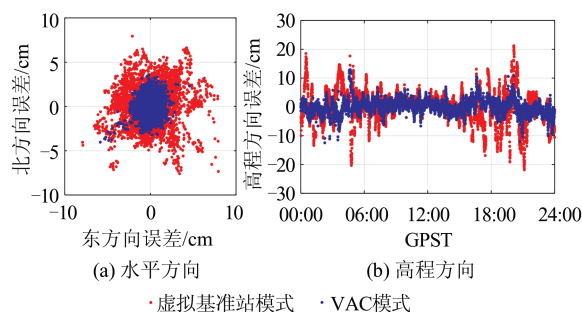


图 8 GNYL 流动站两种模式下的 RTK 固定解坐标误差

Fig.8 Coordinate Errors of Rover RTK Fixed Solution Based on Two Service Modes at GNYL Station

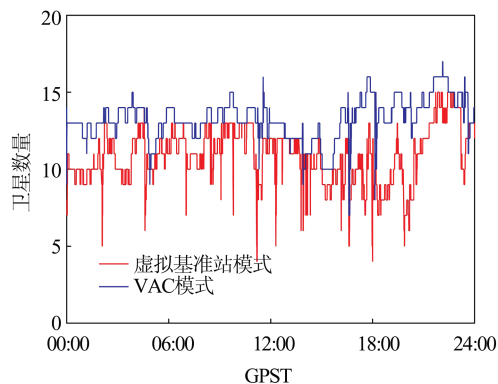


图 9 GNYL 流动站两种模式下的 RTK 固定卫星数
Fig.9 Satellite Number of RTK Fixed Solution Based on Two Service Modes at GNYL Station

表 2 分别是 VAC 模式 (M1) 和虚拟基准站模式 (M2) 下 6 个流动站的固定解 RMS 和固定率统计结果。从表 2 中可以看出, VAC 模式显著提高了长距离网络 RTK 的精度。无论是水平方向还是高程方向, VAC 模式下的定位误差都明显小于传统虚拟基准站模式, 传统虚拟基准站和 VAC 模式下流动站固定解水平方向的平均 RMS 分别为 3.58 cm 和 1.19 cm; 相比水平方向, 两种服务模

式下高程方向的定位精度差异更为显著,VAC和虚拟基准站模式下流动定位高程方向平均RMS分别为2.73 cm和7.37 cm,6个测站固定解的三维精度平均提升61.64%;流动站GNOL测站处在SNAP基准站构网范围外,相比网内流动站,该站的大气内插误差更大,此时虚拟基准站模式下该站的定位误差明显高于其他测站,其水平和高程方向的RMS分别达5.62 cm和11.35 cm,而VAC模式下该站的定位精度仍较高,水平和高程方向的RMS分别为1.54 cm和3.31 cm。相比虚拟基准站模式,VAC服务模式下的终端固定率更高,一天内6个测试站的平均固定率为99.69%。

表2 VAC(M1)和虚拟基准站(M2)服务模式下流动站RTK固定解RMS及固定率统计结果

Tab.2 The Positioning RMS and Fixed Rate of Rover RTK Solution Based on VAC (M1) and Virtual Reference Station(M2) Service Modes

流动站	东方向		北方向		高程方向		固定率/%	
	RMS/cm		RMS/cm		RMS/cm			
	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2
DXLT	0.79	2.64	0.88	2.61	2.72	7.60	99.49	99.39
DXWY	0.96	2.84	0.94	2.68	2.95	9.03	98.78	92.09
GNHZ	0.49	1.74	0.62	2.01	1.60	5.30	100	99.52
GNLT	0.60	1.43	0.86	1.98	2.98	4.86	99.98	99.30
GNYL	0.85	2.28	0.95	2.20	2.81	6.06	99.98	99.85
GNOL	1.03	4.05	1.14	3.89	3.31	11.35	99.91	92.92
平均值	0.79	2.50	0.90	2.56	2.73	7.37	99.69	97.18

除了定位精度,另一项评估RTK性能的重要指标是首次固定时间。采用多次初始化的方式进行RTK定位,每10 min重新初始化一次,一天共初始化144个时段。图10给出了GNYL测站分别采用虚拟基准站和VAC模式下首次固定时间的统计结果。从图10中可以看出,相比传统虚拟基准站模式,VAC模式下的流动站模糊度固定速度更快,虚拟基准站服务模式下约79.17%的时段在1~2个历元内完成初始化固定,VAC模式下88.89%的时段在1~2个历元内完成初始化。另外,虚拟基准站模式下超过4个历元完成初始化的时段数明显多于VAC服务模式,主要原因是部分时段大气较为活跃,由于直接引入了较大的大气误差,大尺度区域SNAP基准站网生成的虚拟基准站观测值令终端在短时间内难以完成初始化。

表3分别统计了两种服务模式下的6个流动站初始化时间百分比结果。从表3中可以看出,6个

流动站VAC模式下的首次固定所需的时间明显小于虚拟基准站模式,虚拟基准站模式1~2个历元能够固定时段数平均占比为78.82%,而VAC模式下1~2个历元固定的时段数占比为88.78%,平均提升9.96%。相比网内的5个流动站,网外测站GNOL提升效果尤为明显,虚拟基准站模式下64.58%的时段在4个历元内(1 min)完成初始化,而VAC模式中88.19%时段在4个历元内完成初始化。

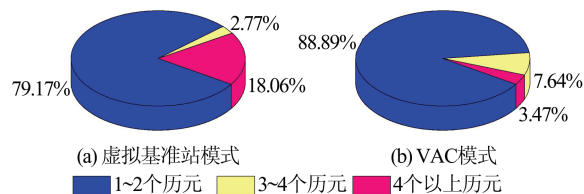


图10 GNYL流动站两种模式下的RTK初始化时间百分比统计结果

Fig.10 Statistics Results of RTK Initialization Time Based on Two Service Modes at GNYL Station

表3 VAC(M1)和虚拟基准站(M2)服务模式下的6个流动站RTK初始化时间百分比统计结果/%

Tab.3 Statistics Results of RTK Initialization Time of Six Rover Stations Based on Two Service Modes/%

流动站	1~2个历元		3~4个历元		4个以上历元	
	M1	M2	M1	M2	M1	M2
DXLT	90.28	76.39	2.78	1.39	6.94	22.22
DXWY	85.42	74.30	4.86	5.56	9.72	20.14
GNHZ	91.67	88.19	7.64	3.48	0.69	8.33
GNLT	95.14	90.97	4.17	0.00	0.69	9.03
GNYL	88.89	79.17	7.64	2.78	3.47	18.05
GNOL	81.25	63.89	6.94	0.69	11.81	35.42
平均值	88.78	78.82	5.67	2.32	5.56	18.87

4 结 语

本文推荐了一种适用于大尺度SNAP基准站的网络RTK服务方法,将内插的大气延迟及其精度信息作为虚拟观测值约束,提升终端RTK的定位性能。基于中国西北某省4个SNAP基准站生成的大气建模信息,和构网范围内外的6个流动站进行测试验证,得出以下结论:

1)SNAP基准站网尺度较大时,大气建模误差较大。西北区域的SNAP基准站网(平均距离205.1 km)部分时段多颗卫星电离层建模误差可超过10 cm;采用虚拟基准站方法时,由于直接引入较大的建模误差,终端卫星模糊度固定困难。

2)对于大尺度SNAP基准站网,相比虚拟基准站网络RTK服务方法,VAC网络RTK服务方

法能够显著提升终端的定位性能。虚拟基准站模式下网内外6个流动站定位固定解的水平和高程方向平均RMS分别为3.58 cm和7.37 cm, VAC服务模式下相应水平和高程的平均RMS分别为1.19 cm和2.73 cm。采用多次初始化进行终端RTK定位, VAC和虚拟基准站服务模式下, 分别有88.78%和78.82%的时段在2个历元内可以完成初始化, 相比虚拟基准站模式, VAC模式中终端初始化更快。

参 考 文 献

- [1] Yang Yuanxi, Xu Yangyin, Li Jinlong, et al. Progress and Performance Evaluation of BeiDou Global Navigation Satellite System: Data Analysis Based on BDS-3 Demonstration System[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2018, 48(5): 584-594 (杨元喜, 许扬胤, 李金龙, 等. 北斗三号系统进展及性能预测: 试验验证数据分析[J]. 中国科学: 地球科学, 2018, 48(5): 584-594)
- [2] Steigenberger P, Montenbruck O. Galileo Status: Orbits, Clocks, and Positioning [J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(2): 319-331
- [3] Zou X, Wang Y W, Deng C L, et al. Instantaneous BDS + GPS Undifferenced NRTK Positioning with Dynamic Atmospheric Constraints [J]. *GPS Solutions*, 2017, 22(1): 1-11
- [4] Teunissen P J G, Odolinski R, Odijk D. Instantaneous BeiDou+GPS RTK Positioning with High Cut-off Elevation Angles [J]. *Journal of Geodesy*, 2014, 88(4): 335-350
- [5] Rizos C, Satirapod C, Chen H Y, et al. GPS with Multiple Reference Stations: Surveying Scenarios in Metropolitan Areas[C]// The 6th South East Asian Surveyors Congress, Fremantle, Australia, 1999
- [6] Ge M R, Douša J, Li X X, et al. A Novel Real-Time Precise Positioning Service System: Global Precise Point Positioning with Regional Augmentation [J]. *Journal of Global Positioning Systems*, 2012, 11(1): 6-10
- [7] 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
- [8] Liu Jingnan, Liu Hui. Continuous Operational Reference System—Infrastructure of Urban Spatial Data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2003, 28(3): 259-264 (刘经南, 刘晖. 连续运行卫星定位服务系统: 城市空间数据的基础设施[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2003, 28(3): 259-264)
- [9] Li Chenggang. Generation and Distribution Technique of Precise Differential Corrections for GPS/VRS Network [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007 (李成钢. 网络GPS/VRS系统高精度差分改正信息生成与发布研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007)
- [10] Zhang Ming. Research on the Key Technologies of GPS/BDS Long-Range Network RTK [D]. Wuhan: Wuhan University, 2016 (张明. GPS/BDS长距离网络RTK关键技术研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2016)
- [11] Dai L W, Han S W, Wang J L, et al. Comparison of Interpolation Algorithms in Network-Based GPS Techniques [J]. *Navigation*, 2003, 50(4): 277-293
- [12] Zhang Shaocheng. The GPS/GLONASS Integrated CORS Network Atmosphere Modeling and RTK Algorithm Implementation [D]. Wuhan: Wuhan University, 2010 (张绍成. 基于GPS/GLONASS集成的CORS网络大气建模与RTK算法实现[D]. 武汉: 武汉大学, 2010)
- [13] Liu Jingnan, Liu Hui. Thought on Establishing a Continuous Operational Reference Station Network in China [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2003, 28(S1): 27-31 (刘经南, 刘晖. 建立我国卫星定位连续运行站网的若干思考[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2003, 28(S1): 27-31)
- [14] Ojigi L M. Leveraging on GNSS Continuously Operating Reference Stations (CORS) Infrastructure for Network Real Time Kinematic Services in Nigeria [C]. African Journal of Applied Research (AJAR), Tamale, Ghana, 2015
- [15] Shu Bao. Research on the Key Technologies of GNSS RT-PPP & RTK and Their Integrated Service Method [D]. Wuhan: Wuhan University, 2019 (舒宝. GNSS RT-PPP和RTK关键技术及其一体化服务方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2019)
- [16] Zhu Huizhong, Lu Yangyang, Xu Aigong, et al. A Network Real-Time Kinematic Method for GPS and BDS Double Systems Between Long Range [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(2): 252-261 (祝会忠, 路阳阳, 徐爱功, 等. 长距离GPS/BDS双系统网络RTK方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(2): 252-261)
- [17] Xu L W, Liu H, Shu B, et al. GLONASS Real-Time Wide-Lane Ambiguity Resolution with an Enhanced Geometry-Based Model for Medium-Range Baselines [J]. *Advances in Space Research*, 2018,

- 62(9): 2 467-2 479
- [18] Bock Y, Gourevitch S A, Counselmann C C, et al. Interferometric Analysis of GPS Phase Observations [J]. *Manuscripta Geodaetica*, 1986, 11 (4): 282-288
- [19] Odijk D. Stochastic Modelling of the Ionosphere for Fast GPS Ambiguity Resolution [J]. *Geodesy Beyond, Manuscripta Geodaetica*, 2000, DOI: 10.1007/978-3-642-59742-8_63
- [20] Yan Ziping, Ding Lele, Huang Enxing, et al. A New Method of Ambiguity Resolution in Network RTK Between Reference Stations [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(3): 295-298 (鄢子平, 丁乐乐, 黄恩兴, 等. 网络RTK参考站间模糊度固定新方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(3): 295-298)
- [21] Li J L, Yang Y X, Xu J Y, et al. GNSS Multi-Carrier Fast Partial Ambiguity Resolution Strategy Tested with Real BDS/GPS Dual- and Triple-Frequency Observations [J]. *GPS Solutions*, 2015, 19 (1): 5-13
- [22] Gao Y, Li Z, McLellan J F. Carrier Phase Based Regional Area Differential GPS for Decimeter-Level Positioning and Navigation [C]. The 10th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS 1997), Fort Worth, Texas, USA, 1997
- [23] Han S. Carrier Phase-Based Long-Range GPS Kinematic Positioning [D]. Sydney: University of New South Wales, 1997
- [24] Wanninger L. Improved Ambiguity Resolution by Regional Differential Modelling of the Ionosphere [C]. The 8th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS 1995), Nashville, Tennessee, USA, 1995
- [25] Yao Y B, Hu Y F, Yu C, et al. An Improved Global Zenith Tropospheric Delay Model GZTD2 Considering Diurnal Variations [J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2016, 23(3): 127-136
- [26] Xu Longwei. Research on the Key Technologies of Multi-frequency and Multi-GNSS Real-Time High Precision Positioning for Long-Range Network RTK [D]. Wuhan: Wuhan University, 2018 (徐龙威. GNSS多模多频实时大规模网络RTK高精度定位关键技术研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2018)
- [27] Lagler K, Schindelegger M, Böhm J, et al. GPT2: Empirical Slant Delay Model for Radio Space Geodetic Techniques [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(6): 1 069-1 073
- [28] Shi Xin, Lü Zhiwei, Sun Hang, et al. The Modification of Tropospheric Correction Bias in Vertical Direction in Network RTK [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2016, 36(9): 817-820 (石鑫, 吕志伟, 孙航, 等. 网络RTK对流层改正数高程方向偏差修正[J]. 大地测量与地球动力学, 2016, 36(9): 817-820)
- [29] Dai L, Eslinger D, Sharpe T. Innovative Algorithms to Improve Long Range RTK Reliability and Availability [C]. The 2007 National Technical Meeting of the Institute of Navigation, San Diego, California, USA, 2007
- [30] Verhagen S, Teunissen P J G. The Ratio Test for Future GNSS Ambiguity Resolution [J]. *GPS Solutions*, 2013, 17(4): 535-548

A Network RTK Method for Large-Scale Satellite Navigation and Positioning Reference Stations

SHU Bao^{1,2,3} HE Yuanhao^{1,2,3} WANG Li^{1,2,3} ZHOU Xing⁴
ZHANG Qin^{1,2,3} HUANG Guanwen^{1,2,3}

1 College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China

2 State Key Laboratory of Geographic Information Engineering, Xi'an 710054, China

3 Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China

4 Academy of Surveying and Mapping Engineering of Gansu Province, Lanzhou 730070, China

Abstract: Objectives: Network real-time kinematic (RTK) technology can provide real-time and high-precision positioning service for users over the wide range, however, the current technology depends on high

density of satellite navigation and positioning (SNAP) reference station network. To satisfy the high-precision positioning requirements based on the sparse reference station network, this paper recommends a network RTK service method based on virtual atmosphere constraint(VAC).**Methods:** Firstly, a non-combined double-difference observation model is constructed to solve and fix the network RTK baseline ambiguity quickly. Then, the baseline atmospheric delay is extracted and the slant path ionosphere and zenith troposphere are established respectively. Finally, the interpolated atmospheric delay and its accuracy information are regarded as virtual observations to improve the positioning performance of the terminal RTK. Based on a 205.1 km station spacing SNAP network from a northwest region, China, six rover stations inside and outside the network are used for terminal RTK verification.**Results:** The results show that the VAC network RTK service method can meet the needs of high-precision positioning users over large-scale reference networks. The terminal positioning accuracy and initialization speed by the VAC method are significantly improved by 61.64% and 9.96% compared with the traditional virtual reference station method. In this service mode, the average horizontal and vertical root mean squares of the fixed solution for the six terminals are 1.19 cm and 2.73 cm. Initializing RTK solution by a lot of times, 88.78% of periods can be fixed within 2 epochs for the six rover stations.**Conclusions:** The VAC service mode has good adaptability to both users inside and outside the large-scale SNAP base station network.

Key words: network real-time kinematic (RTK); virtual reference station; virtual atmosphere constraint; atmosphere modeling error; large-scale SNAP reference station network

First author: SHU Bao, PhD, lecturer, specializes in GNSS high-precision positioning algorithm and application. E-mail: baos613@163.com

Corresponding author: WANG Li, PhD, professor. E-mail: wangli@chd.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (42004024); China Postdoctoral Science Foundation (2020M673321); the Natural Science Basic Research Program of Shanxi Province(2021JQ-230); the Fundamental Research Funds for the Central Universities, CHD (300102261305).

引文格式: SHU Bao, HE Yuanhao, WANG Li, et al. A Network RTK Method for Large-Scale Satellite Navigation and Positioning Reference Stations[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(11):1609-1619. DOI:10.13203/j.whugis20210202(舒宝, 何元浩, 王利, 等. 一种适用于大尺度卫星导航定位基准站的网络 RTK 方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(11):1609-1619. DOI: 10.13203/j.whugis20210202)