

一种网络RTK参考站模糊度快速解算方法

王守华^{*①②③} 吴黎荣^{②③} 尤志奇^{②③} 付文涛^③ 纪元法^{②③}

^①(桂林电子科技大学信息与通信学院 桂林 541004)

^②(桂林电子科技大学认知无线电与信息处理省部共建教育部重点实验室 桂林 541004)

^③(卫星导航定位与位置服务国家地方联合工程研究中心 桂林 541004)

摘要: 针对由于存在大气因素的干扰,网络载波相位差分技术(RTK)参考站模糊度解算会受到影响,同时当新卫星升至预先设置的截止高度角以上时,需要较长的初始化收敛时间,该文提出一种网络RTK参考站模糊度快速解算方法。该方法先利用电离层加权策略,辅助基线模糊度的快速解算,再采用扩展卡尔曼滤波(EKF)技术估计浮点模糊度,利用部分模糊度解算方法,最后通过最小二乘模糊度降相关(LAMBDA)算法和比率(RATIO)检测对模糊度进行固定解算。实验结果表明,该方法可以显著提高网络RTK参考站模糊度的固定率和缩短初始化收敛时间。

关键词: 网络RTK; 模糊度解算; 部分模糊度固定; 电离层加权法

中图分类号: TN927

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)08-2324-10

DOI: 10.11999/JEIT200059

A Fast Ambiguity Solution Method for Network RTK Reference Station

WANG Shouhua^{①②③} WU Lirong^{②③} YOU Zhiqi^{②③}

FU Wentao^③ JI Yuanfa^{②③}

^①(College of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

^②(Key Laboratory of Cognitive Radio and Information Processing of Guilin University of Electronic Technology, Ministry of Education, Guilin 541004, China)

^③(National Engineering Research Center for Satellite Navigation, Positioning and Position Service, Guilin 541004, China)

Abstract: Due to the interference of atmospheric factors, the ambiguity resolution of network Real Time kinematic (RTK) reference stations is affected, and when new satellites rise above the preset cutoff height, a longer initialization convergence time is required. A fast ambiguity solution method for Network RTK reference stations is proposed. Firstly, the ionosphere weighting strategy is used to assist the fast resolution of baseline ambiguity. Then, Extended Kalman Filter(EKF)is used to estimate ambiguity floating solution; The partial ambiguity solution method is adopted. Finally, the ambiguities are fixed in combination with Least squares AMBiguity Decorrelation Adjustment(LAMBDA) and RATIO detection. Experiments results show that this method can significantly improve the ambiguity fixation rate of network RTK reference stations and shorten the initialization convergence time.

Key words: Network RTK; Ambiguity resolution; Partial ambiguity fixed; Ionosphere weighted method

收稿日期: 2020-10-15; 改回日期: 2021-04-06; 网络出版: 2021-06-03

*通信作者: 王守华 wshgluet@163.com

基金项目: 认知无线电与信息处理省部共建教育部重点实验室主任基金(CRKL190105), 广西自然科学基金(2018JJA170154), 广西科技项目(AA17202033), 广西区级研究生教育创新计划项目(YCSW2021180)

Foundation Items: The Key Laboratory of Cognitive Radio and Information Processing, Ministry of Education (Guilin University of Electronic Technology (CRKL190105), The Foundation of Guangxi Natural Science Foundation (2018JJA170154), The Department of Science and Technology of Guangxi Zhuang Autonomous Region (AA17202033), The Innovation Project of Guangxi Graduate Education (YCSW2021180)

1 引言

随着卫星导航定位技术应用领域不断扩大及全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)的发展和建设, 常规实时动态定位(Real Time Kinematic, RTK)技术的作业范围已不能满足用户需要, 网络RTK技术则应运而生, 该技术利用多个参考站组成一个参考站网络, 为该网络覆盖范围内的流动站提供高精度差分改正数据, 从而最大限度扩展了观测基线长度。其中网络RTK参考站模糊度解算质量的好坏将直接影响终端用户定位的实时性和可靠性^[1], 对于网络RTK参考站模糊度解算, 电离层延迟是除对流层延迟和伪距多径误差以外制约模糊度分解的最大因素之一^[2], 由于其在时间和空间上存在着较大的无序性和复杂的变化趋势, 通过模型建立和站星双差解算不能完全消除, 从而影响网络RTK高精度定位的整个结果^[3], 网络RTK定位原理如图1所示。

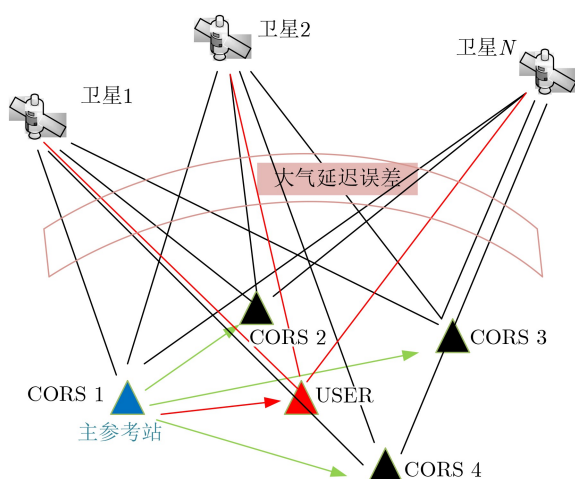


图1 网络RTK定位原理图

为此, 众多学者对上述问题进行了研究, 周乐韬等人^[4]使用Kalman滤波方法实现了参考站间模糊度的快速解算, 该方法使用CA码与相位的电离层无关组合解算宽巷模糊度, 再利用Kalman滤波对L1模糊度进行估计, 并使用模糊度失相关搜索算法, 动态确定模糊度, 但该方法与电离层无关对基线长度也不敏感。丁乐乐等人^[5]基于非线性组合的双差模糊度固定, 通过Kalman滤波对观测方程的方差协方差进行估计, 在此基础上, 采用最小二乘模糊度降相关(Least squares AMBIGUITY Decorrelation Adjustment, LAMBDA)对模糊度进行固定, 但此方法仍需解决的问题是: (1)卫星升降时模糊度固定成功率的问题; (2)存在周跳时模糊度固定的成功率问题。高旺等人^[6]提出了一种基于部

分固定策略的GNSS组合网络长基线部分模糊度快速解算方法, 该方法通过建立无电离层模型来实现长距离基准站间模糊度快速固定。

已有研究中大多未考虑随着全球导航卫星系统增加, 卫星数成倍增多, 对于低仰角卫星对应的大气残差等系统性偏差依然存在, 这是制约网络RTK参考站模糊度快速准确解算的主要因素。基于此, 本文根据已知基线和电离层延迟信息对电离层进行加权, 再采用扩展卡尔曼滤波技术估计浮点模糊度, 利用部分模糊度解算方法, 最后通过LAMBDA算法和RATIO检测对模糊度进行固定解算。最后分析模糊度固定前后大气因子变化关系, 约束整周模糊度固定值, 逐历元进行反馈下一步解算, 从而达到网络RTK高精度定位下一阶段解算要求。

2 GNSS网络RTK参考站数据解算模型

隐去方程中接收机和卫星上下标, 用下标表示载波频率, GNSS网络RTK参考站双差数据解算模型为

$$\left. \begin{aligned} \phi_1 &= \rho + T - u_1 I_1 + \lambda_1 a_1 + \varepsilon_1 \\ \phi_2 &= \rho + T - u_2 I_1 + \lambda_2 a_2 + \varepsilon_2 \\ p_1 &= \rho + T + u_1 I_1 + e_1 \\ p_2(i) &= \rho + T + u_2 I_1 + e_2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

双频作差得模糊度与电离层延迟的线性关系为

$$\left. \begin{aligned} \phi_1 - \phi_2 &= -(u_1 - u_2) I_1 + \lambda_1 a_1 - \lambda_2 a_2 + \varepsilon_1 - \varepsilon_2 \\ p_1 - p_2 &= (u_1 - u_2) I_1 + e_1 - e_2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中, ϕ_1 和 ϕ_2 分别表示GNSS双频上的双差载波相位观测值, p_1 和 p_2 分别是对应的伪距观测值, ρ 为卫星到测站的几何距离, T 为双差对流层延迟, I_1 为其中一频率的双差电离层延迟, a_1 和 a_2 为双差整周模糊度, λ_1 和 λ_2 为已知的波长, ε_1 , ε_2 , e_1 和 e_2 分别为GNSS双频上载波相位和伪距的随机噪声误差。同时由1阶电离层延迟与频率的平方成反比, 可得

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= 1 \\ u_2 &= \lambda_2^2 / \lambda_1^2 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

3 电离层加权策略

前文的作差解算模型中消除了卫星到测站的几何距离, 同时也意味着精确的已知的测站信息将不能使用, 但利用已知的先验信息对电离层参数进行加权约束, 可以辅助基线模糊度的快速解算^[7-9]。由文献^[7]可知, 当电离层标准偏差处于厘米级, 电离层加权后模糊度解算成功概率仍接近1, 同时电离层延迟信息的加入是随机作用在整个随机过程中的, 其大小维持从零开始的 ± 2 m偏差范围。为了

增强伪距观测方程的可靠性, 加权策略采用高斯马尔可夫模型, 降低参数求解的相关性, 提高了解算效率, 达到辅助模糊度快速解算目的^[10-13]。权重的选值根据基线长度, 选定*i*=10 cm, 其标准通过模糊度固定前后历元双差电离层延迟的标准偏差而定。下面将伪距双差方程与双差载波相位观测方程联立, 采用高斯马尔可夫模型解算式(1)^[14-16], 得到

$$E \left(\begin{pmatrix} \phi_1 - \rho \\ \phi_2 - \rho \\ p_1 - \rho \\ p_2 - \rho \\ I_1 \end{pmatrix} \right) = \begin{pmatrix} \mathbf{W} & -u_1 \mathbf{E} & \lambda_1 i \\ \mathbf{W} & -u_2 \mathbf{E} & \lambda_2 i \\ \mathbf{W} & u_1 \mathbf{E} & \\ \mathbf{W} & u_2 \mathbf{E} & \\ & & i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T \\ I_1 \\ a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中, $E(\cdot)$ 为期望算子, \mathbf{E} 为单位矩阵, \mathbf{W} 是矩阵形式写出的映射函数系数, i 为加入的电离层先验信息, 相应的随机过程模型为

$$D \left(\begin{pmatrix} \phi_1 - \rho \\ \phi_2 - \rho \\ p_1 - \rho \\ p_2 - \rho \\ I_1 \end{pmatrix} \right) = \begin{pmatrix} c_{\phi_1}^2 & & & & \\ & c_{\phi_2}^2 & & & \\ & & c_{p_1}^2 & & \\ & & & c_{p_2}^2 & \\ & & & & c_i^2 \end{pmatrix} \otimes (D_n^T D_n) \otimes (D_m^T W_m D_m) \quad (5)$$

式中, $D(\cdot)$ 表示色散算子, $c_{\phi_1}^2, c_{\phi_2}^2, c_{p_1}^2$ 和 $c_{p_2}^2$ 分别为GNSS双频上的非差载波相位观测值和伪距的方差因子, c_i^2 表示电离层伪观测的方差因子, D_n 是接收机之间的差分算子, D_m 是卫星之间的差分算子, W_m 模拟卫星海拔依赖性的权重矩阵, \otimes 表示Kronecker乘积。

对于网络RTK参考站间的数据处理, 此模型的双差电离层观测值样本值*i*一开始设置为零, 而站间单差电离层方差因子 c_i^2 选择与基线长度相关得先验精度模型为

$$c_i = l \times 9.9 \times 10^{-4} \quad (6)$$

式中, l 是指基线长度, 以m为单位。

4 模糊度的解算

对于上式的解算, 状态向量参数用 $\mathbf{a} = (\mathbf{a}_1^T, \mathbf{a}_2^T)^T, \mathbf{b} = (\mathbf{T}^T, \mathbf{I}_1^T)^T$ 联合表示, 模糊度的解算通常分3个步骤, 处理流程如图2所示。

第1步浮点解算。忽略模糊度参数*a*的整数约束, 基于最小二乘思想, 通过扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman filter, EKF)技术得到浮点解及其协方差矩阵:

$$\begin{bmatrix} \hat{a} \\ \hat{b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{\hat{a}\hat{a}} & Q_{\hat{a}\hat{b}} \\ Q_{\hat{b}\hat{a}} & Q_{\hat{b}\hat{b}} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, \hat{a} 为包含双差模糊度参数*a*的实数值, \hat{b} 为包括天顶对流层延迟和双差电离层延迟参数*b*的实数值, Q_{aa} 和 Q_{bb} 分别为相应的方差-协方差矩阵。

第2步模糊度解算方案。采用优化的部分模糊度解算方法, 从滤波器获得的浮点解选择性地输入到LAMBDA算法进行处理, 得到*a*的整数值 \tilde{a} , 这意味着此过程是从实数的*n*维空间到整数的*n*维空间的映射, 设映射 $F: R^n \rightarrow Z^n$, 则

$$\tilde{a} = F(\hat{a}) \quad (8)$$

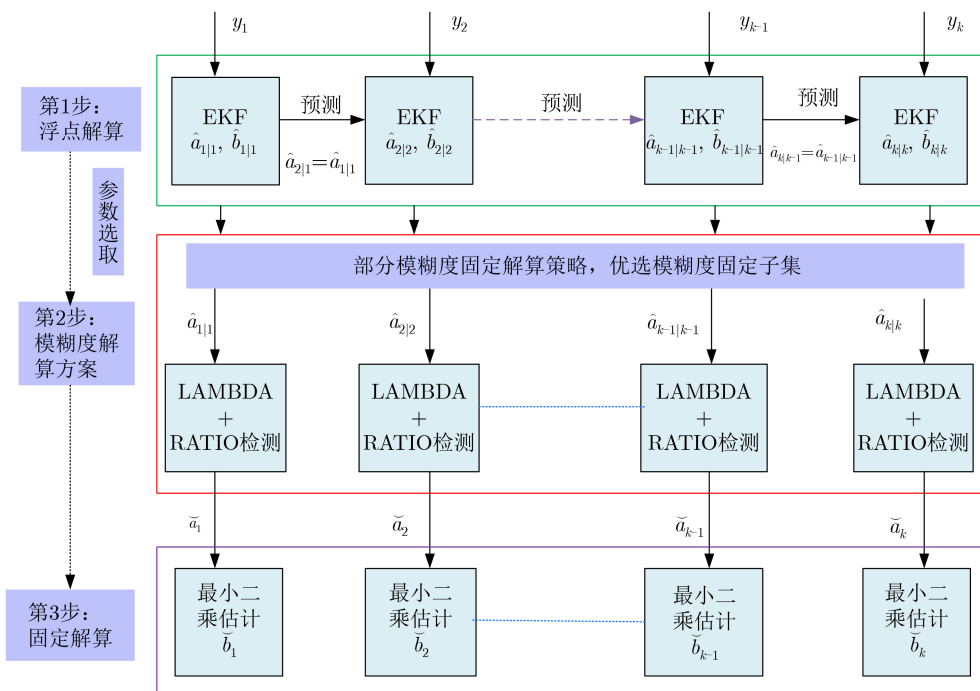


图2 网络RTK参考站模糊度解算步骤流程图

由于LAMBDA处理始终输出整数解，为了提高 \check{a} 可靠性和正确性，采用RATIO比率检测

$$\text{RATIO} = \frac{\|\hat{a} - \check{a}\|_{Q_{\hat{a}}}^2}{\|\hat{a} - \check{a}_{(2)}\|_{Q_{\hat{a}}}^2} \quad (9)$$

式中， \check{a} 表示由搜索空间搜索出的整数解和次整数解 $\check{a}_{(2)}$ ，通常当RATIO阈值大于1/2时，模糊度整数解被认为固定通过。

第3步固定解算。通过第2步计算出模糊度整数解 \check{a} 用于最终求解出确定值 \check{b}

$$\check{b} = \hat{b} - Q_{\hat{b}\hat{a}} Q_{\hat{a}\hat{a}}^{-1} (\hat{a} - \check{a}) \quad (10)$$

可以得出估计大气延迟误差的精度取决于第2步中估计整数模糊度的高质量。

5 改进部分模糊度固定解算方法

本文在对网络RTK参考站模糊度解算数据处理过程中，如图2所示，每个时期 y_k 都在重复由LAMBDA和RATIO检测来对模糊度进行解算。通常在通过RATIO检测之前，应用第4节第1步获得的模糊度浮点解必须收敛，该收敛时间可能长达数十分钟，同时对于每个历元都重复固定解算，根据上一个历元来比较确定当前的解，这是为了确保随着时间的推移保证当前值正确。但是如果结果包含初升的卫星，尽管RATIO检测可防止错位的整数解固定，但会影响之前已经接受的整数模糊度在内的完整性。

考虑到GNSS系统的增多，卫星数成倍增加，固定所有的模糊度参数是没有必要的^[17-19]，在保证参与的卫星数足够的情况下，Teunissen等人^[20]首先提出了部分模糊度解算(Partial Ambiguity Resolution, PAR)的概念，通过选取模糊度部分子集进行固定可减小模糊度固定失败的风险，并分析了基于无几何模型的部分模糊度固定解算效果。现基于PAR思想，提出了一种优化的部分模糊度固定方法(Majorization Partial Ambiguity Resolution, M-PAR)用于网络RTK参考站模糊度解算方案，通过设定卫星仰角选择阈值和根据固定子集选择最优子集，既充分利用低仰角的卫星数据参与浮点解解算，相比全部数据检测又缩短了收敛时间，提高了模糊度固定率。该方法的具体步骤如下：

(1)首先设置初始化时间段为10~20历元，在该历元内采用EKF技术得到浮点解 $\hat{x} = \begin{bmatrix} \hat{a} \\ \hat{b} \end{bmatrix}$ ，及其方差-协方差矩阵 $Q_{\hat{x}} = \begin{bmatrix} Q_{\hat{a}\hat{a}} & Q_{\hat{a}\hat{b}} \\ Q_{\hat{b}\hat{a}} & Q_{\hat{b}\hat{b}} \end{bmatrix}$ ，且不做

模糊度整数解算，以提高浮点解精度和减少初始化过程的收敛时间。

(2)对所有非参考卫星进行仰角序列排序得

$$\text{ele} = \{e_1, e_2, \dots, e_n | e_1 < e_2 < \dots < e_n\} \quad (11)$$

考虑到一般可见卫星数量分布情况，设置截止高度角阈值为 $e_{\text{cut}} = e_1$ 为 25° ，排除不参与解算的卫星，选出初始模糊度固定子集 \check{a}_{par1} ，及其对应的浮点解 \hat{a}_1 和方差协方差矩阵 $Q_{\hat{a}_1}$ ，使用LAMBDA进行搜索固定，当满足以下3个条件即得到 \check{a}_{par1} 。

(a) 根据子集及方差协方差矩阵计算的模糊度bootstrapping取整成功率 P 满足： $P \geq P_0$ (P_0 为设定阈值99.9%)；

(b) 使用LAMBDA算法得到的整数解进行RATIO检测，且大于设定的RATIO阈值1/2；

(c) 仰角限值迭代时，应满足模糊度子集中模糊度数量大于设定的最小卫星数(10颗)；

(3) 若不满足上述3个条件，则使 $e_{\text{cut}} = e_i$ (其中 $e_i, i = 2, 3, \dots, n$ ， i 的值根据仰角迭代的次数确定)排除不参与解算的卫星，继续进行模糊度搜索获取 \check{a}_{par1} 。当模糊度子集 \check{a}_{par1} 固定后，再根据固定子集的浮点解 \hat{a}_1 和方差协方差矩阵选择模糊度的固定子集 \check{a}_{par2} ，计算式为

$$\left. \begin{aligned} \check{a}_{\text{par2}} &= \hat{a}_2 - Q_{\hat{a}_2\hat{a}_1} Q_{\hat{a}_1}^{-1} (\hat{a}_2 - \check{a}_{\text{par1}}) \\ Q_{\check{a}_{\text{par2}}} &= Q_{\hat{a}_2} - Q_{\hat{a}_2\hat{a}_1} Q_{\hat{a}_1}^{-1} Q_{\hat{a}_1\hat{a}_2} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

(4)将得到整数解通过RATIO检测，如果检测结果满足要求，则输出模糊度固定解 \check{a} ；否则，返回步骤(1)继续下一个历元解算，直至结束。

6 数据处理对比实验

6.1 电离层加权策略：减少模糊度解算初始化时间

现采集NGS网站的CORS网2019年10月17日的数据对所提方法进行实验，选择的一组基线长度为100 km，观测时间为2 h，采样率为10 s，卫星截止高度角阈值设置为 25° 。考虑相同的数据集的电离层，现使用 $i = 10$ cm加权值对式(4)和式(5)进行建模，此时双差电离层标准偏差 σ 为20 cm，这意味着双差电离层延迟的幅度允许在99.9%的时间内在 $\pm 10\sigma = \pm 2$ m的范围内变化。

图3给出了前50 min未加权电离层模型数据处理得到的卫星数、RATIO比值和RATIO测试结果图(1=通过，0=失败)。同时图4为加权电离层模型同一数据得到的结果。

当参考卫星发生变化时，需要重新建立观测方程并初始化。从图3和图4可知，除了首次初始化，后面两次都对参考卫星进行了更新。在观测时间内共进

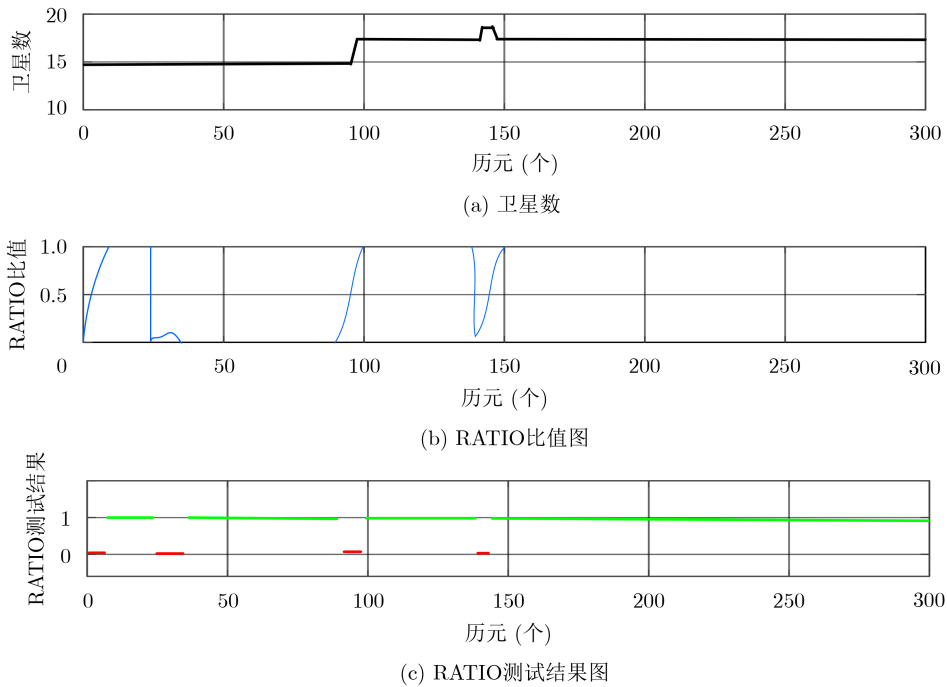


图3 未加权电离层模型处理结果

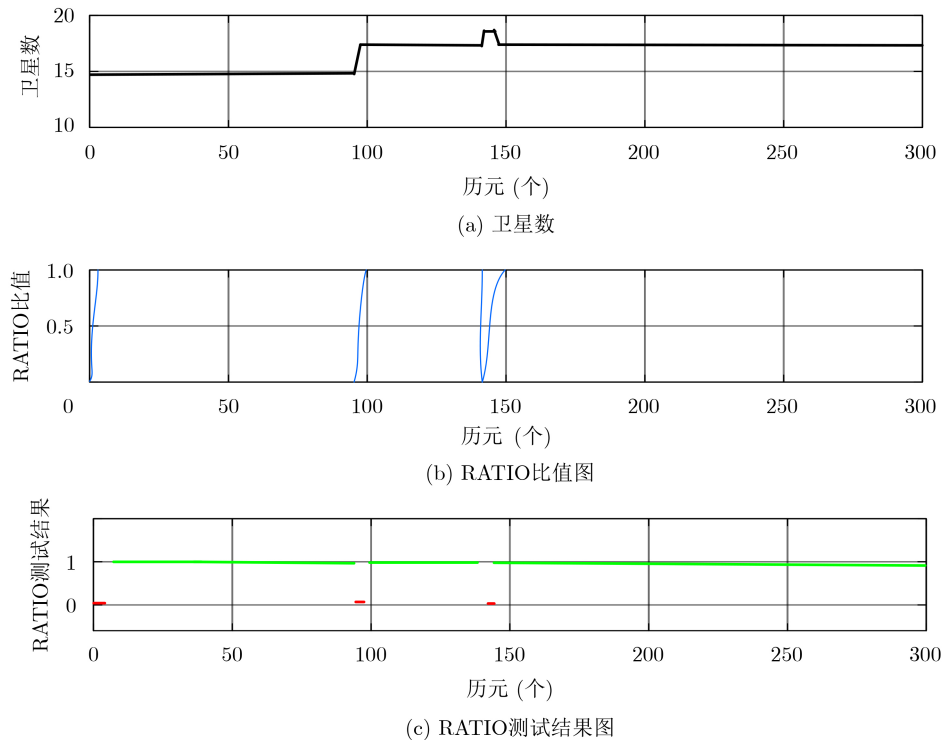


图4 电离层加权模型处理结果

行了3次初始化, 经过比对验证可以看出, 与未使用电离层加权值模型解算相比, 加权后不管是解算开始后的初始化时间还是新卫星上升时的收敛时间都得到缩减, 初始化收敛时间从未加权的约6 min减少到只有1 min, 同时对于两颗卫星上升时相比从未加权的60 s和32 s收敛时间到只要15 s和11 s。

6.2 改进部分模糊度固定解算: 提高固定率和解算速度

随着卫星增多, 如果低仰角卫星过多参与解算对定位结果影响严重, 为了进一步分析本文提出的优化的部分模糊度的优势。下面引入两种方法进行数据实验对比, 第1种由FAR算法处理; 第2种由常规PAR算法处理。图5为100 km基线

时同一数据不同模糊度解算方法的RATIO值对比图。

根据图6中PDOP曲线序列图可以看出，曲线值整体低于2.5，说明卫星空间分布良好，测站可以接收到卫星信息。由图5看出相比于FAR和常规PAR算法的RATIO检测结果，所提M-PAR算法的RATIO值最为平稳且较高值多，说明得到的固定解更可靠，更精确。同时也能看到随着卫星升起下降或接收受到影响，RATIO值会陡然下降上升或不平稳甚至达到0时也不能固定的程度。

下面为了验证提出算法的定位解算优势，数据采集时间共5000个历元，时间间隔1 s。且通过图6可以看出在这段时间内卫星存在多次下降、上升过程，且卫星数一直保证足够。其中图7为全模糊度固定解算下得到的网络RTK参考站的3维基线序列，E表示东方向坐标，N代表北方向坐标，U代表天方向坐标；图8为在3种解算方法下处理得到的3维基线分量序列图。其中固定解用蓝线表示，浮点解用绿线表示，绿线和蓝线交界处即为初始化时间。

表1给出了对应的基于不同模糊度解算方法的固定率和初始化时间的统计结果，表2给出了基于不同解算方法的定位结果绝对误差统计，其中，“Float/fix”表示对浮点解和固定解混合统计，“Fix”表示仅对固定解做统计。

因为本次所用数据是在中长基线情况下，所以在不采取部分固定策略全部数据解算的模糊度解算方案固定率最低仅有18.6%，且初始化过程的收敛时间最长到61.3 min，说明不剔除初升、下降和不适合参与解算的卫星情况下，观测量解算不可靠，模糊度基本难以固定。

FAR, PAR和M-PAR算法都是单历元解算的，由图8和表1可以看出总共对采集的历元数据进行了近4700次的解算对比验证。采用FAR算法和PAR算法，固定率分别达到82.3%和92.6%，开始的初始化时间也分别减少到270 s和20 s，说明两者都能剔除一些不适合参与解算的卫星，且相比全部数据处理方法能显著提高参考站模糊度的固定率。而本文提出的M-PAR算法不仅缩短了浮点解的收敛时间，

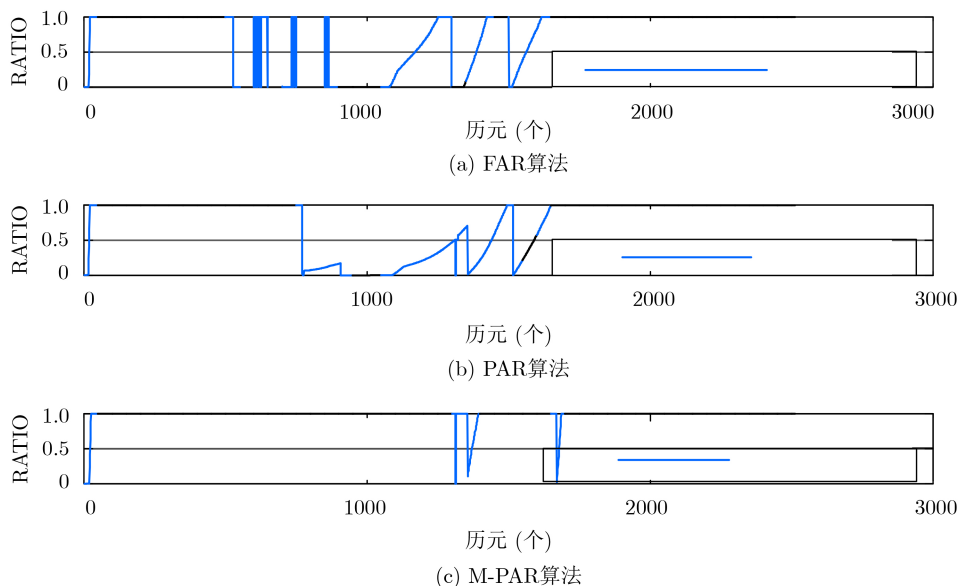


图5 不同模糊度解算方法的RATIO值对比

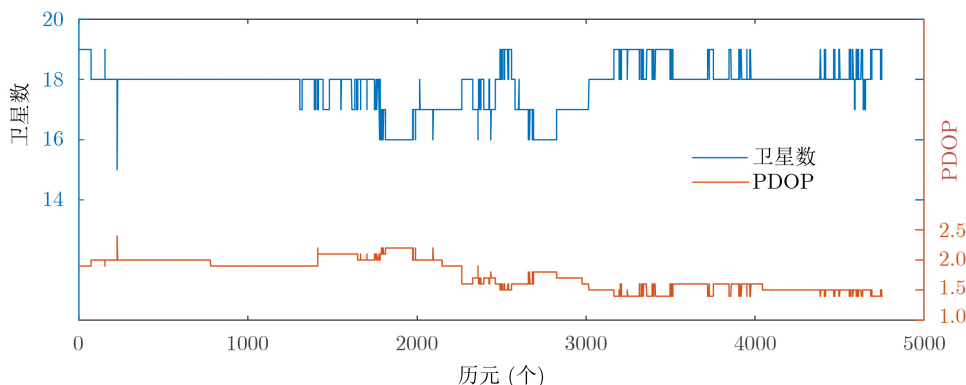


图6 可见卫星数量及空间分布PDOP序列图

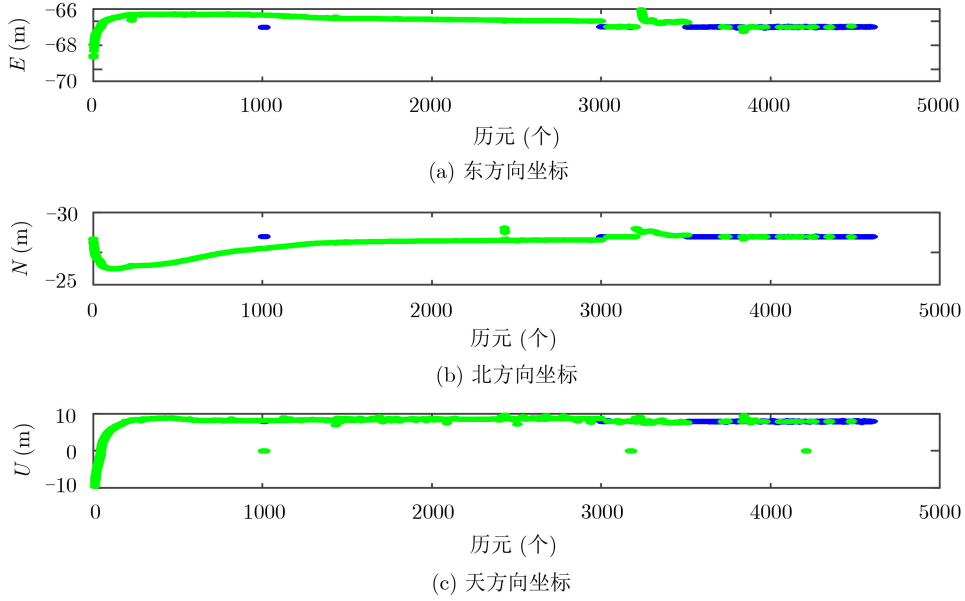
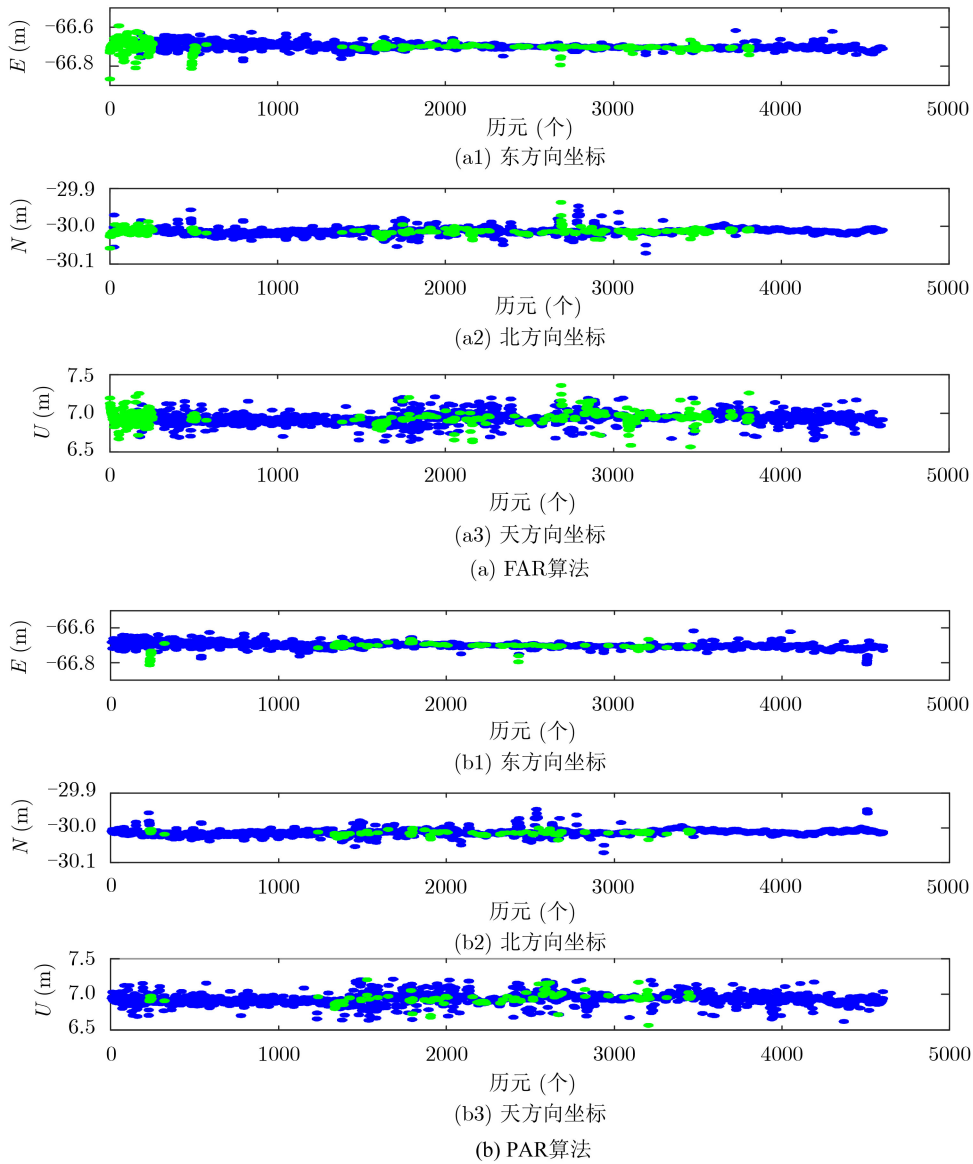


图7 全模糊度固定解算方法的3维基线序列



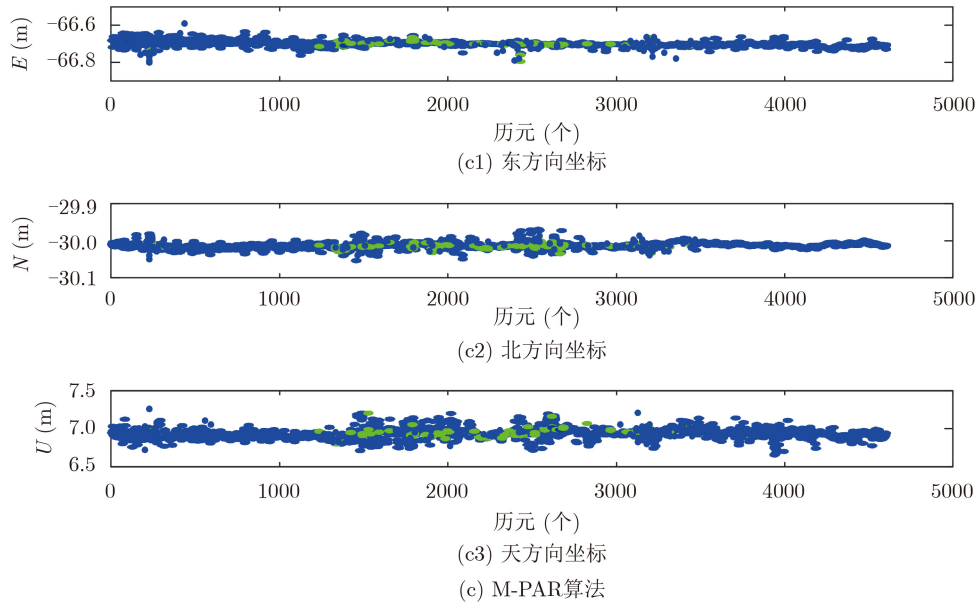


图8 不同模糊度解算方法的3维基线序列

表1 不同解算方法的固定率和初始化时间对比

模糊度解算方法	模糊度固定率(%)	初始化时间(s)
LAMBDA(全)	18.6	3680
FAR	82.3	270
PAR	92.6	20
M-PAR	97.6	20

表2 不同解算方法的定位结果绝对误差(m)

模糊度解算方法	ΔE	ΔN	ΔU
FAR(Float/fix)	0.375	0.224	0.544
PAR(Float/Fix)	0.162	0.112	0.205
M-PAR(Float/Fix)	0.045	0.068	0.104
FAR(Fix)	0.113	0.141	0.231
PAR(Fix)	0.013	0.012	0.063
M-PAR(Fix)	0.008	0.010	0.032

模糊度固定率提高到97.6%，且由表2也可直观得到定位精度效果达到最优，东北天方向都处于分米-厘米级。该结果说明M-PAR算法能有效提高解算效率和固定成功率，且得到厘米级基线定位值。

此外，还描绘出了电离层加权后模糊度固定前后双差电离层标准偏差与观测历元的函数关系如图9所示，对于这两个双差电离层延迟，参考卫星都使用各自相对较高的参考卫星，从图9可以看出，对于模糊度处在浮点解时，电离层精度保持在分米-厘米级，随着模糊度值固定，电离层精度提高到厘米-毫米级。尤其当电离层变化剧烈时，使用电离层参数加权方法可以大幅削弱由此带来的基准站和监测站之间的剧烈变化。可知电离层延迟精度的提高势必会降低电离层对模糊度估值的影响，可以约束整周模糊度固定值，逐历元反馈到下一步解算，从而达到网络RTK高精度定位下一阶段解算要求。

7 结束语

本文提出一种网络RTK参考站模糊度快速解算方法，该方法使用电离层加权策略，根据先验信息对双差电离层施加合理的约束，达到辅助基线模糊度的快速解算，再采用扩展卡尔曼滤波技术估计浮点模糊度，利用部分模糊度解算方法，优选模糊

注： ΔE 表示东向误差； ΔN 表示北向误差； ΔU 表示天向误差

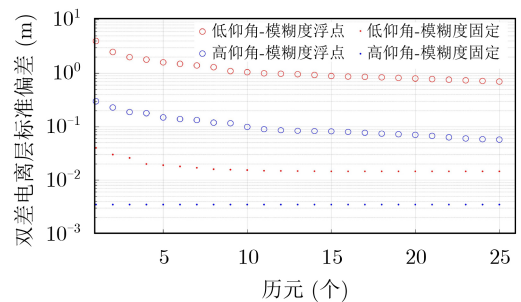


图9 模糊度固定前后的双差电离层延迟的标准偏差示例

度固定子集，最后结合LAMBDA和RATIO检测对模糊度进行固定解算。该方法缩短了网络RTK中长基线模糊度初始化收敛时间，克服了卫星升降时模糊度固定成功率问题。同时相比FAR和常规PAR方法不仅减少了网络RTK参考站模糊度解算初始化时间，且提高了模糊度的固定率和基线的定位精度。

参考文献

[1] TEUNISSEN P J G. Success probability of integer GPS ambiguity rounding and bootstrapping[J]. *Journal of*

- Geodesy*, 1998, 72(10): 606–612. doi: [10.1007/s001900050199](https://doi.org/10.1007/s001900050199).
- [2] 范建军, 雍少为, 王飞雪. 基于卡尔曼滤波的多径误差消除及双频模糊度快速估计方法研究[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(5): 1075–1079.
- FAN Jianjun, YONG Shaowei, and WANG Feixue. Study on multipath mitigation and dual-frequency fast ambiguity estimation based on Kalman filter[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(5): 1075–1079.
- [3] ODIJK D, ARORA B S, and TEUNISSEN P J G. Predicting the success rate of long-baseline GPS+Galileo (Partial) ambiguity resolution[J]. *The Journal of Navigation*, 2014, 67(3): 385–401. doi: [10.1017/S037346331400006X](https://doi.org/10.1017/S037346331400006X).
- [4] 周乐韬, 黄丁发, 袁林果, 等. 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): 37–42. doi: [10.3321/j.issn:1001-1595.2007.01.007](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-1595.2007.01.007).
- ZHOU Letao, HUANG Dingfa, YUAN Linguo, *et al.* A Kalman filtering algorithm for online integer ambiguity resolution in reference station network[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2007, 36(1): 37–42. doi: [10.3321/j.issn:1001-1595.2007.01.007](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-1595.2007.01.007).
- [5] 丁乐乐, 张小红, 于兴旺, 等. 网络RTK双差模糊度解算成功率的提高[C]. 第二届中国卫星导航学术年会电子文集, 上海, 2011.
- DING Lele, ZHANG Xiaohong, YU Xingwang, *et al.* Network RTK double difference ambiguity resolution success rate of increase[C]. Electronic Collection of the 2nd China Satellite Navigation Annual Conference, Shanghai, China, 2011.
- [6] 高旺, 高成发, 潘树国, 等. 基于部分固定策略的多系统长距离基准站间模糊度快速解算[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2017, 42(4): 558–562.
- GAO Wang, GAO Chengfa, PAN Shuguo, *et al.* Fast ambiguity resolution between GPS/GLONASS/BDS combined long-range base stations based on partial-fixing strategy[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(4): 558–562.
- [7] BOCK Y, GOUREVITCH S A, COUNSELMAN III C C, *et al.* Interferometric analysis of GPS phase observations[J]. *Manuscripta Geodaetica*, 1986, 11(4): 282–288.
- [8] WANG Shengli, DENG Jian, OU Jikun, *et al.* Three-step algorithm for rapid ambiguity resolution between reference stations within network RTK[J]. *The Journal of Navigation*, 2016, 69(6): 1310–1324. doi: [10.1017/S037346331600031X](https://doi.org/10.1017/S037346331600031X).
- [9] 祝会忠, 徐爱功, 高猛, 等. BDS网络RTK中距离参考站整周模糊度单历元解算方法[J]. 测绘学报, 2016, 45(1): 50–57.
- ZHU Huizhong, XU Aigong, GAO Meng, *et al.* The algorithm of single-epoch integer ambiguity resolution between middle-range BDS network RTK reference stations[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(1): 50–57.
- [10] 吴康良, 罗晨曦, 杨药. 随机模型对BDS/GPS长基线解算精度的影响[J]. 大地测量与地球动力学, 2018, 38(4): 386–389, 406.
- WU Kangliang, LUO Chenxi, and YANG Di. The effect of stochastic model on the accuracy of BDS/GPS long baseline solution[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2018, 38(4): 386–389, 406.
- [11] ODIJK D, VERHAGEN S, and TEUNISSEN P J G. Medium-distance GPS Ambiguity Resolution with Controlled Failure Rate[M]. KENYON S, PACINO M C, and Marti U. *Geodesy for Planet Earth*. Berlin, Germany, Springer, 2012.
- [12] SASI G and RAO B. Ionospheric delay estimation for improving the global positioning system position accuracy[J]. *IETE Journal of Research*, 2008, 54(1): 23–29. doi: [10.1080/03772063.2008.10876178](https://doi.org/10.1080/03772063.2008.10876178).
- [13] 刘鸣, 柴洪洲, 董冰全. 北斗网络RTK基准站间整周模糊度快速确定方法[J]. 信息工程大学学报, 2016, 17(6): 760–763. doi: [10.3969/j.issn.1671-0673.2016.06.023](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-0673.2016.06.023).
- LIU Ming, CHAI Hongzhou, and DONG Bingquan. Algorithm of instantaneous integer ambiguity resolution for reference stations of BDS network RTK[J]. *Journal of Information Engineering University*, 2016, 17(6): 760–763. doi: [10.3969/j.issn.1671-0673.2016.06.023](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-0673.2016.06.023).
- [14] SUN R, HAN K, HU J, *et al.* Integrated solution for anomalous driving detection based on BeiDou/GPS/IMU measurements[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2016, 69: 193–207. doi: [10.1016/j.trc.2016.06.006](https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.06.006).
- [15] 张晋升, 李成钢, 何冰, 等. 区域电离层估计方法在网络RTK中的应用[J]. 导航定位学报, 2018, 6(3): 107–112. doi: [10.3969/j.issn.2095-4999.2018.03.020](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-4999.2018.03.020).
- ZHANG Jinsheng, LI Chenggang, HE Bing, *et al.* Application of regional ionospheric parameter estimation in network RTK[J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2018, 6(3): 107–112. doi: [10.3969/j.issn.2095-4999.2018.03.020](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-4999.2018.03.020).
- [16] SCHAFFRIN B and BOCK Y. A unified scheme for processing GPS dual-band phase observations[J]. *Bulletin Géodésique*, 1988, 62(2): 142–160.
- [17] 陈凯, 孙希延, 纪元法, 等. 基于载波相位差分的形变监测高精度定位算法[J]. 计算机应用, 2019, 39(4): 1234–1239. doi: [10.11772/j.issn.1001-9081.2018071454](https://doi.org/10.11772/j.issn.1001-9081.2018071454).
- CHEN Kai, SUN Xiyan, JI Yuanfa, *et al.* High-precision positioning algorithm for deformation monitoring based on carrier phase difference[J]. *Journal of Computer Applications*, 2019, 39(4): 1234–1239. doi: [10.11772/j.issn.1001-9081.2018071454](https://doi.org/10.11772/j.issn.1001-9081.2018071454).
- [18] 王守华, 陆明炽, 孙希延, 等. 基于无迹卡尔曼滤波的

- iBeacon/INS数据融合定位算法[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(9): 2209–2216. doi: [10.11999/JEIT180748](https://doi.org/10.11999/JEIT180748).
- WANG Shouhua, LU Mingchi, SUN Xiyan, *et al.* iBeacon/INS data fusion location algorithm based on unscented Kalman filter[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(9): 2209–2216. doi: [10.11999/JEIT180748](https://doi.org/10.11999/JEIT180748).
- [19] 王守华, 李云柯, 孙希延, 等. 基于低成本接收机的双天线测姿算法[J]. 计算机应用, 2019, 39(8): 2381–2385. doi: [10.11772/j.issn.1001-9081.2018122554](https://doi.org/10.11772/j.issn.1001-9081.2018122554).
- WANG Shouhua, LI Yunke, SUN Xiyan, *et al.* Dual-antenna attitude determination algorithm based on low-cost receiver[J]. *Journal of Computer Applications*, 2019, 39(8): 2381–2385. doi: [10.11772/j.issn.1001-9081.2018122554](https://doi.org/10.11772/j.issn.1001-9081.2018122554).
- [20] TEUNISSEN P J G, JOOSTEN P, and TIBERIUS C. Geometry-free ambiguity success rates in case of partial fixing[C]. Proceedings of 1999 National Technical Meeting of the Institute of Navigation, San Diego, 1999.
- 王守华: 1975年生, 男, 博士生, 教授, 研究方向为信号处理、卫星导航.
- 吴黎荣: 1993年生, 男, 硕士生, 研究方向为网络RTK.
- 尤志奇: 1996年生, 男, 硕士生, 研究方向为北斗高精度定位.
- 付文涛: 1989年生, 男, 硕士, 研究方向为卫星导航.
- 纪元法: 1975年生, 男, 博士, 教授, 研究方向为卫星导航、信号处理.

责任编辑: 马秀强