

# GNSS RTK 定位技术的发展历程和机遇<sup>\*</sup>

宋伟<sup>1,2</sup> 毛威<sup>3</sup> 张益泽<sup>\*,2</sup>

- (1. 沈阳航空航天大学电子信息工程学院, 沈阳 110136;
2. 中国科学院上海天文台, 上海 200030;
3. 上海市金山区自然资源确权登记中心, 上海 200540)

**摘要:** 实时动态载波相位差分定位技术(RTK) 凭借其算法简单、收敛快、定位精度高和可靠性强等优点被广泛应用于测绘、监测、导航等方面。随着全球导航卫星系统(GNSS) 的不断发展和完善, 基于 GNSS 的 RTK 技术在理论算法、工程应用、数据处理等方面也取得了巨大的进步。本文对 RTK 定位技术进行详细综述, 重点介绍长基线 RTK 定位技术、多频多系统、部分模糊度固定算法、网络 RTK 定位技术和单频 RTK 算法的发展历程, 总结了影响 RTK 定位精度和可靠性的关键因素, 并讨论了卫星导航系统的进一步建设以及传感器技术的不断优化, 给 RTK 技术带来的新发展机遇。

**关键词:** RTK; 多频多系统; 长基线; 单频; 网络 RTK; 部分模糊度固定

**DOI:** 10. 16507/j. issn. 1006-6055. 2023. 03. 007

## Achievements and Opportunities in the Development of GNSS RTK Positioning Technology<sup>\*</sup>

SONG Wei<sup>1,2</sup> MAO Wei<sup>3</sup> ZHANG Yize<sup>\*,2</sup>

- (1. School of Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;
2. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;
3. Shanghai Jinshan District Natural Resource Title Confirmation and Registration Center, Shanghai 200540, China)

**Abstract:** Real-time Kinematic (RTK) is widely used in surveying and mapping, monitoring, navigation and other aspects due to its advantages of a simple algorithm, fast convergence, high positioning accuracy and outstanding reliability. With the continuous advancement of Global Navigation Satellite System (GNSS) technology, the GNSS RTK positioning mode has made significant progress in theoretical algorithms, engineering applications, and data processing. This paper reviews of RTK positioning technology, focusing on the development history of long-baseline RTK positioning technology, multi-frequency and multi-system, partial ambiguity fixed algorithm, Network RTK positioning technology and single-frequency RTK algorithm. Also, the critical factors affecting the accuracy and reliability of RTK positioning are summarized. Finally, it discussed the new development opportunities brought by RTK technology with the further construction of GNSS and continuous optimization of sensor technology.

**Keywords:** RTK; Multi-frequency Multi-GNSS; Long Baseline; Single Frequency; Network RTK Positioning; Partial Ambiguity

\* 国家自然科学基金“基于光纤时频传递的北斗空间信号精度提升方法研究”(41904034)

\*\* E-mail: zhyize@163.com; Tel: 021-34775225

18世纪中叶以来,人类历史上先后进行了三次工业革命。当前第三次信息革命方兴未艾,对人类社会生产和生活的影响仍在不断渗透,让处于当前历史节点的我们感受到了信息大爆炸带来的各项便利。全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)的出现让人们不再依赖天文星象和指南针等传统的导航方式,提高了人们获取时空信息的精度和实效性。凭借其全天候、高精度、高效率、高可靠性和低成本等特点已广泛应用于大地测量、地震海啸预警、精密授时、地球物理等领域<sup>[1]</sup>。GNSS自身导航服务精度可以达到米级,可以满足日常车辆、船舶等的定位需求,但仍无法满足实时高精度行业的应用需求<sup>[2]</sup>。尤其是随着互联网+和智能化时代的到来,人们对时空信息的准确性、可靠性和时效性提出了更高的要求。基于此,越来越多的专家学者投身于卫星导航定位技术的研究,使得其发展日新月异,各种导航定位模式不断推陈出新<sup>[3]</sup>。

卫星导航定位技术大致可以分为四代(图1),第一代伪距单点定位技术,其定位精度只能达到米级;第二代为差分定位技术,实时动态载波相位差分定位(Real Time Kinematic, RTK)技术就是其中的代表性技术,差分定位技术利用观测值误差在空间和时间上的相关性将其消除,使得卫星导航系统的定位精度有了大幅度的提高。为了克服传统RTK精度随着基线长度的增加而降低的缺点,第三代是以精密单点定位(Precise Point Positioning, PPP)和网络RTK为代表的各类技术。第四代的代表技术为PPP-RTK技术,其借用RTK误差处理的思想实现PPP模糊度快速固定,但目前该技术仍处于开发和早期应用阶段<sup>[4]</sup>。

差分定位技术最早由Remondis提出,极大地改善了GPS的定位精度<sup>[5]</sup>。Edward等<sup>[6]</sup>首次采用

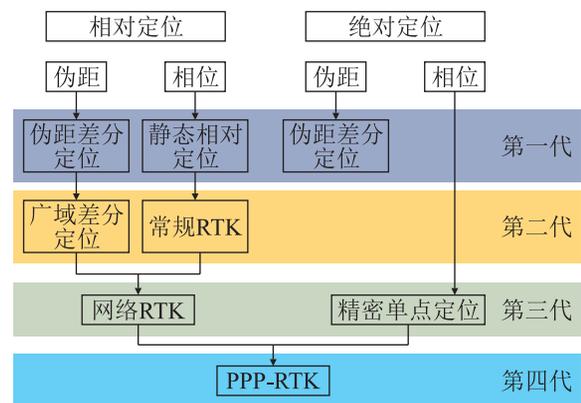


图1 卫星导航定位技术发展的四代历程

Fig.1 Four Generations of Satellite Navigation and Positioning Technology Development

载波相位观测值实现了厘米级的实时动态定位,RTK作为其中的代表性技术,也因此走进大众的视野,成为众多专家学者的研究热点。目前RTK技术已十分成熟,可在局域范围内实现厘米级的实时定位服务。众多学者对RTK定位技术的研究主要集中在以下几个方面:多频多系统、长基线解算、部分模糊度固定算法、单频RTK算法以及网络RTK技术。本文将从以上几个方面对RTK技术进行回顾与总结,阐述影响当前RTK定位性能的主要问题,并从多源信息融合、低轨卫星增强、北斗短报文辅助和RTK完好性等几个方面讨论未来RTK定位领域的发展机遇与挑战。

## 1 RTK 关键技术发展综述

### 1.1 多频多系统RTK

随着全球卫星定位系统(Global Positioning System, GPS)、格洛纳斯卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GLONASS)、北斗卫星导航系统(BeiDou Navigation Satellite System, BDS)和伽利略卫星导航系统(Galileo Satellite Navigation System, Galileo)的现代化,以及区域导航准天顶卫星系统(Quasi-Zenith Satellite System, QZSS)和

印度区域导航卫星系统(Navigation with Indian Constellation, NAVIC)的兴起,多频多系统GNSS数据处理和应用已成为GNSS发展的趋势。多系统GNSS联合解算可有效改善位置精度因子(Position Dilution of Precision, PDOP),提供更多的可用卫星。但各国卫星导航系统的时间基准、星座构型和信号构型等方面各有不同,由此造成用户位置解算时存在系统误差、时空基准不统一、函数模型优化困难等问题。如何更好地利用多个卫星导航系统的观测值达到更高精度、更具可靠性的定位结果一直是国内外众多学者的研究热点。Atinc等<sup>[7]</sup>研究了GLONASS与GPS双系统组合的定位模式并用全站仪进行定位评估,结果表明双系统组合可有效改善森林环境下的定位效果;He等<sup>[8]</sup>测试了GPS/BDS双系统下的定位效果,发现双系统的定位效果明显优于GPS单系统;汪亮等<sup>[9]</sup>研究了GPS/GLONASS/BDS三系统组合的定位性能,结果表明三系统组合定位精度明显优于双系统和单系统;Zhang等<sup>[10]</sup>对GPS+Galileo+QZSS三系统组合在不同基线条件的定位效果进行分析,发现QZSS系统的加入相较于GPS+Galileo双系统在定位精度和模糊度首次固定时间上都有明显提升;Odolinski等<sup>[11,12]</sup>使用GPS/BDS进行组合定位,并对不同的基线长度进行了测试,之后又将其拓展为GPS/Galileo/BDS/QZSS四系统组合,提高了模糊度固定率及定位精度;Tang等<sup>[13]</sup>使用NWP模型中的对流层参数进行中长基线的GPS/BDS组合定位,验证了NWP模型的准确性;王江林等<sup>[14]</sup>将双差模糊度替换成单差模糊度,并通过GPS/GLONASS/BDS组合系统验证了模型的正确性。

随着北斗三号卫星导航系统(BDS-3)的全面建成,针对BDS-3与其他系统的组合定位的相关

研究取得了不错的进展。Wu等<sup>[15]</sup>将BDS-3与GPS/Galileo进行组合,分析结果表明,BDS-3(B1C/B2a)的观测质量与GPS(L1L5)、Galileo(E1/E5a)相当,多系统组合定位精度明显高于双系统;Li等<sup>[16]</sup>在重叠频率下估算了两个卫星导航系统之间存在的系统偏差,实现了BDS-3/GPS/Galileo之间的互操作性;郑磊等<sup>[17]</sup>进行BDS-2/BDS-3/QZSS组合定位,研究结果表明BDS-3对BDS-2定位精度的提升优于QZSS;糜晓龙等<sup>[18]</sup>提出了基于单差模型的系统间偏差(Inter-System Bias, ISB)估计与应用算法,结果表明基于相同类型的接收机B1C-E1和B2a-E5a之间是不存在ISB的,而基于不同类型的接收机存在明显的ISB,此外,BDS-3和Galileo的组合RTK定位性能相对于单BDS-3和Galileo在模糊度固定成功率和定位精度上都有10%以上的提升;Shi等<sup>[19]</sup>推导出非差无电离层组合和双差的ISB模型,并求得BDS-2/BDS-3组合定位在流动站和基站接收机同时运行时系统间差分码偏差超过3.4 ns。

综上所述,多频多系统的定位模式在模糊度固定率及定位精度上都要优于单系统,尤其是在复杂环境和长基线两种情景下。但多频多系统组合定位同样面临着卫星数目过多造成的观测数据大量冗余的问题,这种问题导致模糊度固定率下降,严重影响定位的有效性<sup>[4]</sup>,如何在大量的数据中选择高效的子集进行快速定位,即部分模糊度固定策略开始被众多学者提出并不断优化。

## 1.2 长基线RTK定位

长基线RTK定位技术具有成本相对低廉、测量精度高等优点,也因此被广泛应用于地震位移信息获取、远距离时间同步、地壳形变监测等领域<sup>[20]</sup>。在长基线RTK定位模式下,误差主要来自于对流层和电离层,能否精确消除两类误差项是

实现长基线 RTK 定位的关键。Kubo 等<sup>[21]</sup>将双差对流层和双差电离层作为卡尔曼滤波状态量进行估计,提出同时估计电离层和对流层时延及其梯度的长基线相对定位算法;张钰玺等<sup>[22]</sup>分析了动态长基线情形下电离层延迟的时变特性,采用滑动窗口进行电离层建模预报,讨论了该方法在航空测量实际作业中的实施条件、定位精度及模糊度固定情况;Shu 等<sup>[23]</sup>在长基线 RTK 定位模式下引入相对天顶对流层模型作为约束,改进了模糊度的收敛时间;Hou 等<sup>[24]</sup>针对 GLONASS 系统,提出一种基于卡尔曼滤波器的数据处理策略来分析电离层固定、电离层加权和无电离层公式的整数可估计频分多址模型;Choi 等<sup>[25]</sup>将天顶对流层延迟当作未知参数通过卡尔曼滤波进行估计,以获得厘米级的定位结果,但该模型只做了近似处理,理论上并不完善;Takasu 等<sup>[26]</sup>开发了一种适用于 1000 公里的长基线 RTK 新策略,该策略包括了具有部分模糊度固定特性的整周模糊度解算方法,并对一次固定的整周模糊度进行严格的约束;Liu 等<sup>[27]</sup>提出了一种基于 BDS-3/Galileo 组合系统的超宽巷长基线 RTK 定位算法,给出了四频配置和三种不同的三频配置的无几何函数模型,并将双差电离层延迟作为未知参数进行估计,可以实现长基线瞬时分米级定位,同时降低矩阵维数,提高计算效率;Xu 等<sup>[28]</sup>开发了一种受 NWP 模型约束的中长基线 RTK 定位算法,基于 BDS/GPS 组合的 RTK 定位精度水平方向优于 3 cm,垂直方向优于 5 cm。

经过多年的技术沉淀,长基线 RTK 定位算法日趋成熟,但仍无法完全消除对流层和电离层的影响,同时长基线 RTK 定位容易受网络延迟和数据中断的影响,其模糊度固定率较低,模糊度首次固定时间较长,仍需进一步研究完善。

### 1.3 单频低成本 RTK

当前,大量商用的双频或多频测量型接收机价格昂贵、体积大且不方便携带。单频接收机凭借其价格低廉、体积较小、便于携带等优点受到越来越多厂家和研究机构的喜爱,研究单频低成本接收机的 RTK 定位具有可观的前景。但单频低成本接收机在载波相位测量中存在大量的周跳和粗差,导致其面临着较高的接收机噪声、多路径效应显著和模糊度难以固定等问题<sup>[29]</sup>。众多专家学者推动了低成本接收机的单频 RTK 定位理论算法的研究和应用。Takasu 等<sup>[30]</sup>评估了单频 GPS 接收机 RTK 的定位性能,并阐明了实际应用的各种问题;He 等<sup>[31]</sup>对比了双频 GPS 接收机和单频 BDS/GPS 双系统接收机的性能,发现两者单历元 RTK 定位的可用性和可靠性相当;Odolinski 等<sup>[32]</sup>对 BDS/GALILEO/QZSS/GPS 组合系统的单频 RTK 进行系统评估发现,多系统大大增加了观测模型的强度,提高了单频 RTK 的模糊度固定率;Liu 等<sup>[33]</sup>提出了一种 BDS/GPS 单频低成本导航定位 (Single-Frequency Inexpensive Navigation and Positioning, SINAP) 系统,利用低成本的 GNSS 接收机实现高精度、高稳定度的单频 RTK 定位,在数据处理中采用等速度 (Constant Velocity, CV) 和等加速度 (Constant Acceleration, CA) 动态模型实现 Kalman 滤波估计;Odolinski 等<sup>[34]</sup>研究了单频低成本接收机 GPS/BDS 双系统组合的 RTK 定位性能,并和双频单系统进行比较,结果表明针对测量型双系统的单频低成本接收机具有与双频单系统接收机相当的模糊度固定性能;Zhang 等<sup>[35]</sup>分析了 ublox 单频接收机在动态和静态两种模式下的定位性能,结果表明在静态开阔环境和动态环境下分别可达到亚厘米级和分米级定位;Li 等<sup>[36]</sup>基于车辆运动在短时间内通常服从低阶多项式这

一事实,通过施加基于位置的多项式约束,提出了一种实时单频周跳估计的有效方法;Lin等<sup>[37]</sup>将一种基于离群点检测概念的算法引入到GPS单频RTK定位过程中周跳的检测和修复中,以准确检测周跳发生的时间,并在各种模拟场景中准确估计周跳的大小;黄劲松等<sup>[38]</sup>基于几何关系模型的观测值残差法,通过历元间观测值差分求解载体位置,同时得到观测值的残差,进而判断是否存在周跳;邹璇等<sup>[39]</sup>通过选权迭代准确地定位到周跳的位置和大小。

由于手持设备中的GNSS芯片组取得了巨大的成功,几乎每一台移动智能手机都搭载了低成本GNSS模块。与大地测量和其他测量级接收机相比,包含智能手机平板电脑在内的智能设备GNSS原始观测值数据预处理以及导航定位性能的分析研究仍处于初级阶段,因此针对智能手机端的单频RTK定位研究也是当前的研究热点。从现有单频智能手机RTK定位研究来看,智能手机终端自身内置天线和GNSS定位模块等硬件性能较差,单GNSS系统RTK定位很难得到高精度定位结果,多GNSS系统组合RTK定位在静态水平方向能取得分米级定位精度<sup>[40-42]</sup>。

#### 1.4 网络RTK

随着基线长度的增加,参考站和流动站之间的相关性减弱,通过差分无法减少或消除误差对定位的影响,常规RTK不再满足高精度定位的需求。为此,网络RTK(Network Real-Time Kinematic, NRTK)定位技术应运而生<sup>[43]</sup>。网络RTK技术采用双差模式,首先在服务器端固定参考站间的整周模糊度,接着生成双差大气延迟改正数,然后将参考站的精确坐标、观测值和大气延迟改正数或虚拟参考站的观测值播发给流动站用户,用户端的流动站采用双差观测模型进行定位

解算,无需精密轨道和钟差产品<sup>[44,45]</sup>。根据误差改正数的生成以及用户端定位方式的不同,网络RTK技术主要分为:虚拟参考站技术<sup>[46,47]</sup>(Virtual Reference Station, VRS)、主辅参考站技术(Master-Auxiliary Concept, MAC)、区域改正数技术(Flächen Korrektur Parameter, FKP)和综合误差内插技术<sup>[48]</sup>(Combined Bias Interpolation, CBI)。

虚拟参考站技术通过计算站间模糊度提取大气参数,并在用户站附近生成虚拟的参考站,与流动站进行超短基线RTK定位;综合误差内插技术与虚拟参考站技术的不同之处在于其不对误差进行区分,将误差整合后进行内插;主辅参考站技术通常选择一个主站和多个辅站,实时解算主辅站之间的基线和单差误差,并将其发送给用户,用户通过自己的概略位置进行误差改正,从而实现高精度定位;区域改正数技术通过对特定区域内的大气误差进行拟合,并将所得的拟合参数发送给用户,用户利用自身的概略位置计算误差改正数,以实现模糊度的快速固定<sup>[46]</sup>。

上述四种技术的关键都是如何更快更准确地实现模糊度的固定,从而达到实时高精度定位的目标,因此针对网络RTK模糊度固定的研究一直是众多学者的研究热点。高星伟等<sup>[49]</sup>提出一种网络RTK的基准站(一般相距几十或上百公里)单历元双差模糊度搜索方法,只需1个历元便可确定双差整周模糊度。祝会忠等<sup>[50]</sup>等提出一种长距离(100~200 km)网络RTK基准站间的整周模糊度单历元确定方法,利用载波相位模糊度间的线性约束关系对双差宽巷模糊度进行搜索,不受周跳影响,只需一个历元的观测数据即可确定长距离基准站间的双差整周模糊度;周乐韬等<sup>[51]</sup>使用CA码与相位的无电离层组合解算宽巷模糊度,利用多路径效应的周期性削弱CA码多路径效应;

唐卫明等<sup>[52]</sup>提出了一种新的由宽巷模糊度、窄巷模糊度到原始载波模糊度逐步固定的三步法来确定基准站间的双差模糊度,该方法不需线性化,不需解求方程组,双差观测值之间相互独立,且与基线长度无关;鄢子平等<sup>[53]</sup>在模糊度区域内对原始的模糊度通过整数变换,形成宽巷与 L2 模糊度及其对应的方差协方差阵,然后采用 LAMBDA 方法对转换后的模糊度分块序贯固定;祝会忠等<sup>[54]</sup>利用不受误差影响的三频载波相位整周模糊度间整数线性关系,对整周模糊度备选值进行约束和确定来实现 BDS 参考站三频载波相位整周模糊度单历元的确定。网络 RTK 本身基线解算模式的数学模型和解算过程都比较复杂,导致计算量大大增加,且该技术对于基站数量及坐标精度要求较高,在地理条件恶劣地区无法搭建基站,导致实际基线长度可能达到数百上千公里,无法实现整周模糊度的固定,定位精度大打折扣。另一方面,随着全球卫星导航系统的建设与发展,IGS 观测站以及国家级/区域级监测站数目不断增加,这些监测点每隔一定时间就要采用网解的方式重新解算一次,而整体网解和子网解的方式始终存在数据处理时间过长的缺点,同时子网解只是整体解的一个近似值<sup>[55]</sup>,这些都成为网络 RTK 发展所面临的制约和瓶颈。

### 1.5 部分模糊度固定策略

随着高精度定位技术的发展,观测方程数量的增加,观测模型的强度也进一步提升,模糊度参数全部固定较为困难,且高维的模糊度解算极易造成模糊度错误固定从而导致较大的定位偏差。为了进一步解决模糊度固定问题,诸多学者开始研究部分模糊度固定算法,即从模糊度全集中挑选出部分子集进行固定。近年来,众多学者对模糊度子集的选取策略主要依据卫星层面、频率层

面、模糊度层面以及模型驱动和数据驱动等几个方面。

在卫星层面, Takasu 等<sup>[26]</sup>根据卫星高度角进行排序,剔除低高度角的卫星,仅对高度角正常卫星的模糊度进行固定。与卫星高度角排序类似, Parkins 等<sup>[56]</sup>根据卫星的信噪比进行排序,剔除信噪比较低的卫星,仅对信噪比正常的卫星模糊度进行固定。以上两种方式在本质上是相同的,因为低高度角的卫星往往信噪比也很低。在随机模型中应用高度角或者信噪比定权,其权重已经很低,按照此种方式排除的卫星不会对模糊度固定有太大影响。

在频率层面, Dair 和 Feng 等<sup>[57,58]</sup>通过构建宽巷、超宽巷等组合值进行模糊度固定,组合观测值相较于原始观测值具有波长更长,噪声更低的优点,更利于模糊度的固定。然而若无法同时固定窄巷模糊度,很难获得厘米级的高精度定位结果。

在模糊度层面,为方便模糊度的筛选和剔除, Teunissen 等<sup>[59]</sup>将模糊度参数按照其条件方差的大小进行排序; Parkins 等<sup>[56]</sup>通过模糊度精度因子 ADOP 值对模糊度参数进行排序,但是随着模糊度参数个数的增加,ADOP 的计算量逐渐增大,无法满足实时应用的需求; Brack 等<sup>[60]</sup>在确定模糊度参数的顺序后,还需要确定模糊度参数的维数,通过设定指标对模糊度参数进行剔除,当满足设定指标时即接受该部分固定解,否则继续剔除模糊度参数。根据设定指标的不同,部分模糊度固定策略可以分为模型驱动和数据驱动两类。模型驱动部分, Teunissen 等<sup>[61]</sup>设定模糊度固定成功率 (Success Rate Criterion, SRC) 指标,通过模糊度参数的条件方差计算模糊度固定成功率,达到剔除模糊度参数的目的; Takasu 等<sup>[26]</sup>通过高度角剔除模糊度参数也属于模型驱动的范畴。数据驱动

部分, Dai 和 Vollath 等<sup>[62,63]</sup>提出使用模糊度参数的双频一致性作为检验指标; Teunissen 等<sup>[64]</sup>提出固定故障比率测试(Fixed Failure Rate Ratio Test, FFRT)的方法,将固定解的次优解和最优解的残差二次型之比作为检验统计量, Ratio 值越大,得到的固定解的精度越高。模型驱动仅考虑到观测值的理论精度,缺少对于真实数据的考虑,数据驱动对最优解和次优解做了可区分性检验,但无法对观测模型的强度进行整体评估,两种指标选择各有优劣。针对这一现状, Yanqing 等<sup>[65]</sup>提出一种模型和数据融合的双重驱动的模糊度固定策略,结合 SRC 和 FFRT 两个指标进行模糊度检验,相较于单模型驱动,不论是模糊度固定率还是基线解的精度,均有较大改善。Lu 等<sup>[66]</sup>使用固定成功率、有界 FFRT 和新定义的基线精度增益来选择模糊度子集。

多频多系统在提高可视卫星数目、改善卫星几何分布的同时,也引入了大量数据质量较差的卫星,影响了整周模糊度的固定。部分模糊度固定策略作为有效甄别异常观测值的手段,仍需进一步发展和完善。

## 2 RTK 定位技术的发展机遇

### 2.1 多源信息融合的 RTK 定位技术

如今,智能机器人、无人机、无人车等技术逐渐成熟并广泛应用于民用领域,而要在室外复杂环境下完成既定自主导航的任务,准确、可靠的位置服务是其决策控制、路径规划的基础。传感器技术的发展,对导航定位系统的成本、准确性、稳定性提出了更高的要求<sup>[67]</sup>。惯性传感器不需要外界辅助就可提供短时高精度的定位信息,弥补了卫星导航系统在复杂环境下由于非视距和多路径效应显著造成的定位精度较差问题。GNSS/INS

组合导航的方式主要有松组合(Loosely-Coupled)、紧组合(Tightly-Coupled)和深组合(Ultra-Tightly Coupled)三种<sup>[68,69]</sup>,可有效提升定位精度和模糊度固定率。近年来,同步定位与制图(Simultaneous Localization and Mapping, SLAM)、激光雷达(Light Detection And Ranging, LiDAR)、视觉、IMU、里程计、高度计等传感器逐渐应用到 GNSS 定位中,以改善复杂环境下的定位效果。多源信息融合定位技术面临以下问题:第一,时空基准的统一,这是获得高精度定位结果的基础;第二,新的传感器会在数据特征识别、系统误差建模、函数模型构建、参数滤波估计等方面带来一系列新问题<sup>[70]</sup>;第三,算法和模型的优化,多源信息融合将处理大量来自各个传感器的定位信息,算法十分复杂,计算量大,对于实际应用是一项巨大的挑战。

### 2.2 低轨卫星增强的 RTK 定位技术

轨道高度在 300 ~ 1500 km 的低轨卫星凭借信号强度高、几何分布变化快和与中高轨卫星互补的优势,已成为当前卫星导航领域的关注热点<sup>[71,72]</sup>。随着“鸿雁”星座的持续布局,国内各大科研机构和企业纷纷开启了对低轨卫星相关的实验验证。Li 等<sup>[73]</sup>通过模拟实验验证了低轨卫星的加入可有效缩短模糊度的收敛时间,特别是长基线,效果更佳。Ge、Li 等<sup>[74,75]</sup>先后验证了低轨卫星同样可缩短 PPP 的收敛时间,可减少到几分钟甚至更少。此外,低轨卫星地面接收信号强度高,穿透能力强,有利于改善信号受遮蔽环境下的定位性能。因此,对于低轨卫星增强的 RTK 定位技术的研究必将是未来研究热点之一。

### 2.3 北斗短报文辅助的 RTK 定位技术

北斗短报文因其服务费用低廉、通信抗干扰能力强、可靠性高、范围广的特点成为实现海洋精密相对导航与定位的另一种选择。姬生月等<sup>[76]</sup>利

用北斗短报文设备传输导航观测数据,结合实时服务数据产品,以实现海洋的低成本厘米级精密相对定位,该方法的三维定位精度优于5cm,并且优于以广播星历为基础的空间相对定位与时间基线相结合的方法,但其无法实现模糊度固定,且收敛时间较长。Zhang等<sup>[77]</sup>通过北斗短报文服务实现长基线GNSS高精度定位,定位精度从亚分米到厘米,收敛时间为几分钟。通过北斗短报文传输数据存在两个不足之处。首先,短报文单次通信容量有限,每条短报文只能传输78.5字节的内容;其次,短报文通信频率受限,发送两次短报文需要一定的时间间隔,当前民用短报文的通信间隔为1min<sup>[76]</sup>。如何克服这些缺点,使其更好地应用于海洋精密相对导航与定位已经成为一大研究热点。

#### 2.4 RTK定位技术的完好性研究

当前,GNSS定位应用场景愈加广泛,自动驾驶汽车、民用航空、无人机、智能设备等新兴设备应用大幅增长。这些新兴的智能化应用场景不仅对定位的精度提出了亚米级甚至厘米级的需求,对定位的完好性也提出了相当高的需求<sup>[78]</sup>。完好性是指导航系统发生故障或者误差超限,无法满足导航和定位要求时,及时向用户发出告警的能力。在高精度定位领域,尤其是当前最前沿的PPP-RTK技术,研究主要集中在精度的提升和收敛时间的缩短上,与完好性相关的研究还不完善。无论是在体系建设、算法研究,还是标准规范、用户应用模式等方面,都还未形成完整的理论和方法体系,尚无法满足应用需求。此外,随着卫星导航系统多星座、多频点的发展趋势,传统的RAIM技术已不能适应多星座情况下更多源的故障情形(如同时多故障情形),亦无法适用对导航性能需求越来越高的领域<sup>[79]</sup>。因此,对高精度定位领域

的完好性理论方法研究十分迫切。

### 3 结论

RTK凭借其瞬时高精度的优势,已经成为当前主流的高精度定位技术,但有限的服务范围使其服务性能大打折扣,众多学者纷纷针对长基线算法、多频多系统组合、单频算法、部分模糊度固定策略和网络RTK展开研究以改善RTK定位效果,扩大RTK的服务范围,相关研究取得了显著的进展。目前短基线RTK可实现瞬时厘米级甚至毫米级定位服务,中长基线RTK可实现厘米级定位服务,被广泛应用于自动驾驶汽车和无人物流等新兴行业。单频RTK在开阔环境下可以达到与双频RTK相当的定位效果,但复杂环境下效果较差、服务范围较小。此外RTK在某些情况下仍然面临严峻挑战,例如活跃电离层情景、城市复杂环境和恶劣天气等,因此,如何在复杂城市环境下减轻信号遮挡和多径对RTK的影响?如何开发适应复杂环境的大气改正模型?如何完善高精度定位领域完好性机制?这些都将是未来RTK研究的重点。随着卫星导航系统的不断建设与完善,RTK定位技术在多元信息融合、低轨卫星增强、完好性和北斗短报文相结合等领域面临着新的挑战 and 机遇,也许,新技术的出现将为我们提供更多答案。

#### 参考文献

- [1] 杨元喜,王建荣. 泛在感知与航天测绘[J]. 测绘学报,2023,52(1):1-9.
- [2] DONG D, FANG P, BOCK Y, et al. Anatomy of Apparent Seasonal Variations from GPS Derived Site Position Time Series [J]. Journal of Geophysical Research, 2002, 107(B4):9-16.
- [3] YANG Y, LIU L, LI LINLONG, et al. Featured

- Services and Performance of BDS-3 [J]. Science Bulletin, 2021, 66(20):2135-2143.
- [4] 周锋. 多系统 GNSS 非差非组合精密单点定位相关理论和方法研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2015.
- [5] REMONDI B W. Performing Centimeter-level Surveys in Seconds with GPS Carrier Phase: Initial Results [J]. Navigation, 1985, 32(4):386-400.
- [6] EDWARDS S J, CROSS P A, BARNES J B, et al. A Methodology for Benchmarking Real Time Kinematic GPS [J]. Survey Review, 1999, 35(273):163-174.
- [7] PIRTI A, GUMU K, ERKAYA H, et al. Evaluating Repeatability of RTK GPS/GLONASS Near/Under Forest Environment [J]. Croatian Journal of Forest Engineering, 2010, 31(1):23-33.
- [8] HE H, LI J, YANG Y, et al. Performance Assessment of Single-and Dual-Frequency BeiDou/GPS Single-Epoch Kinematic Positioning [J]. GPS Solutions, 2014, 18(3):393-403.
- [9] 汪亮, 李子申, 袁洪, 等. BDS/GPS/GLONASS 组合的双频单历元相对定位性能对比分析 [J]. 科学通报, 2015(9):857-868.
- [10] ZHANG Y, KUBO N, CHEN J, et al. Contribution of QZSS with Four Satellites to Multi-GNSS Long Baseline RTK [J]. Journal of Spatial Science, 2020, 65(1):41-60.
- [11] ODOLINSKI R, TEUNISSEN P J G, ODIJK D. Combined GPS+ BDS for Short to Long Baseline RTK Positioning [J]. Measurement Science and Technology, 2015, 26(4):2326-2340.
- [12] ODOLINSKI R, TEUNISSEN P J G, ODIJK D. Combined GPS+ BDS+ Galileo+ QZSS for Long Baseline RTK Positioning, 2014 [C]. Proceedings of the 27th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Florida, 2014:2326-2340.
- [13] TANG W, SHEN M, DENG C, et al. Network-Based Triple-frequency Carrier Phase Ambiguity Resolution between Reference Stations Using BDS Data for Long Baselines [J]. GPS Solutions, 2018, 22(3):1-10
- [14] 王江林, 文述生. GNSS 多系统静态基线数据的统一处理方法 [J]. 导航定位学报, 2013, 1(1): 52-55.
- [15] WU M, LIU W, WANG W, et al. Differential Inter-system Biases Estimation and Initial Assessment of Instantaneous Tightly Combined RTK with BDS-3, GPS, and Galileo [J]. Remote Sensing, 2019, 11(12):1430.
- [16] LI W, ZHU S, MING Z. Estimation of Inter-system Biases between BDS-3/GPS/Galileo and Its Application in RTK Positioning [J]. Remote Sensing, 2021, 13(17):3507.
- [17] 郑磊, 刘成. BDS-2/BDS-3/QZSS 组合短基线相对定位精度分析 [J]. 全球定位系统, 2020, 45(5):57-61.
- [18] 糜晓龙, 袁运斌, 张宝成. BDS-3 和 Galileo 组合的 RTK 定位性能分析 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(1):113-118.
- [19] SHI Chuang, HU Yong, ZHENG Fu, et al. Accounting for BDS-2/BDS-3 Inter-system Biases in PPP and RTK Models [J]. Advances in Space Research, 2022, 70(4):890-906.
- [20] 曹士龙. GNSS 长基线精密实时相对定位关键技术研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2021.
- [21] KUBO Y, TANAKA H, OHASHI M, et al. Long Baseline GNSS Relative Positioning with Estimating Ionospheric and Tropospheric Delays and Their Gradients [J]. International Journal of Innovative Computing Information & Control Ijicic, 2012, 8(3B):2375-2388.
- [22] 张钰玺, 张小红, 刘全海, 等. 航空测量场景下的中长基线动态定位方法 [J]. 测绘学报, 2019, 48(7):871-878.
- [23] SHU B, LIU H, XU L, et al. Performance Analysis

- of BDS Medium-Long Baseline RTK Positioning Using an Empirical Troposphere Model [J]. *Sensors*, 2018, 18(4):1199.
- [24] HOU P, ZHANG B, LIU T. Integer-Estimable GLONASS FDMA Model as Applied to Kalman-Filter-Based Short-to Long-Baseline RTK Positioning [J]. *GPS Solutions*, 2020, 24:1-14.
- [25] CHOI B K, ROH K M, LEE S J. Long Baseline GPS RTK with Estimating Tropospheric Delays [J]. *Journal of Positioning, Navigation, and Timing*, 2014, 3(3):123-129.
- [26] TAKASU T, YASUDA A. Kalman-Filter-Based Integer Ambiguity Resolution Strategy for Long-Baseline RTK with Ionosphere and Troposphere Estimation [C]. *Proceedings of the 23rd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. ION*, 2010: 161-171.
- [27] LIU L, PAN S, GAO W, et al. Assessment of Quad-Frequency Long-baseline Positioning with BeiDou-3 and Galileo Observations [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(8):1551.
- [28] XU Y, WU C, LI L, et al. GPS/BDS Medium/Long-range RTK Constrained with Tropospheric Delay Parameters from NWP Model [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(7):1113.
- [29] 周厚香. 基于单频低成本接收机的定位算法研究 [D]. 北京:中国地质大学, 2020.
- [30] TAKASU T, YASUDA A. Evaluation of RTK-GPS Performance with Low-cost Single-frequency GPS Receivers [C]. *Proceedings of International Symposium on GPS/GNSS*. 2008:852-861.
- [31] He H, LI J, YANG Y, et al. Wang, Performance Assessment of Single- and Dual-frequency BeiDou/GPS Single-epoch Kinematic Positioning [J], *GPS Solutions*, 18(2014):393-403.
- [32] ODOLINSKI R, TEUNISSEN P J G, ODIJK D. Combined BDS, GALILEO, QZSS and GPS Single-Frequency RTK [J]. *GPS Solutions*, 2015, 19: 151-163.
- [33] LIU T, LI B. Single-frequency BDS/GPS RTK with Low-Cost U-Blox Receivers [C]. *Forum on Cooperative Positioning and Service (CPGPS)*. *IEEE*, 2017:232-238.
- [34] ODOLINSKI R, TEUNISSEN P J G. Low-cost, High-precision, Single-frequency GPS-BDS RTK Positioning [J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(3): 1315-1330.
- [35] ZHANG Y, YU W, HAN Y, et al. Static and Kinematic Positioning Performance of a Low-Cost Real-Time Kinematic Navigation System Module [J]. *Advances in Space Research*, 2019, 63(9):3029-3042.
- [36] LI B, LIU T, NIE L, et al. Single-frequency GNSS Cycle Slip Estimation with Positional Polynomial Constraint [J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93:1781-1803.
- [37] LIN S G, YU F C. Cycle Slips Detection Algorithm for Low Cost Single Frequency GPS RTK Positioning [J]. *Survey Review*, 2013, 45(330): 206-214.
- [38] 黄劲松. 高精度 GNSS 数据处理基本数学模型及算法统一理论研究 [D]. 武汉:武汉大学, 2015.
- [39] 邹璇, 李宗楠, 陈亮. 一种历元间差分单站单频周跳探测与修复方法 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2017, 10:1406-1410.
- [40] ODOLINSKI R, TEUNISSEN P J G. An Assessment of Smartphone and Low-cost Multi-GNSS Single-frequency RTK Positioning for Low, Medium and High Ionospheric Disturbance Periods [J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(5):701-722.
- [41] ROBUSTELLI U, BAIOCCHI V, PUGLIANO G. Assessment of Dual Frequency GNSS Observations from a Xiaomi Mi 8 Android Smartphone and Positioning Performance Analysis [J].

- Electronics, 2019, 8(1):91.
- [42] 李灯. 智能手机GNSS单频RTK定位性能研究 [D]. 重庆:重庆大学, 2021.
- [43] 黄子源. 网络RTK服务性能改善关键技术研究 [D]. 武汉:武汉大学, 2019.
- [44] GAO Y, LI Z, MCLELLAN J F. Carrier Phase Based Regional Area Differential GPS for Decimeter-level Positioning and Navigation, 1997 [C]. Proceedings of the 10th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS 1997). 1997: 1305-1313.
- [45] 刘金海. 多频多模GNSS高精度差分定位模型研究 [D]. 北京:中国科学院大学, 2020.
- [46] 鲁洋为. 多模GNSS网络RTK关键技术研究 [D]. 青岛:中国石油大学(华东), 2019.
- [47] ANSSE V. A Comparison of the VRS and MAC Principles for Network RTK [C]. In Proceedings of IGSS 2009 Symposium. Surfers Paradise, Australia, 2009: 1-13.
- [48] GAO X, LIU J. Novel Algorithms for GPS Network RTK [J]. Wuhan University Journal of Natural Science, 2003, 8: 596-602.
- [49] 高星伟, 刘经南, 葛茂荣. 网络RTK基准站间基线单历元模糊度搜索方法 [J]. 测绘学报, 2002(4): 305-309.
- [50] 祝会忠, 刘经南, 唐卫明, 等. 长距离网络RTK基准站间整周模糊度单历元确定方法 [J]. 测绘学报, 2012, 41(3): 359-365.
- [51] 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(1): 37-42.
- [52] 唐卫明, 刘经南, 施闯, 等. 三步法确定网络RTK基准站双差模糊度 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2007(4): 305-308.
- [53] 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.
- [54] 祝会忠, 雷啸挺, 李军, 等. BDS参考站三频整周模糊度单历元确定方法 [J]. 测绘学报, 2020, 49(11): 1388-1398.
- [55] 彭文杰. 基于稀疏网的PPP-RTK理论与应用 [D]. 武汉:武汉大学, 2017.
- [56] PARKINS A. Increasing GNSS RTK Availability with a New Single-epoch Batch Partial Ambiguity Resolution Algorithm [J]. GPS Solutions 2011, 15(4): 391-402.
- [57] DAI L, ESLINGER D, SHARPE T. Innovative Algorithms to Improve Long Range RTK Reliability and Availability [C]. Proceedings of ION NTM. ION, 2007: 860-872.
- [58] FENG Y. GNSS Three Carrier Ambiguity Resolution Using Ionosphere-reduced Virtual Signals [J]. Journal of Geodesy, 2008, 82(12): 847-862.
- [59] TEUNISSEN P J G, ODIJK D, JOOSTEN P. A Probabilistic Evaluation of Correct GPS Ambiguity Resolution [C]. Proceedings of the 11th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. ION, 1998: 1315-1323.
- [60] BRACK A. Reliable GPS + BDS RTK Positioning with Partial Ambiguity Resolution [J]. GPS Solution 2017, 21, 1083-1092.
- [61] TEUNISSEN P J G, JOOSTEN P, Tiberius C. Geometry-free Ambiguity Success Rates in Case of Partial Fixing [C]. Proceedings of the National Technical Meeting of the Institute of Navigation, 1999b: 201-207.
- [62] DAI L, ESLINGER DJ, Sharpe RT. Partial Search Carrier Phase Integer Ambiguity Resolution: US, US7961143B2 [P]. 2021-06-14. <https://www.zhangqiaokeyan.com/patent-detail/06130425669254.html>.
- [63] VOLLATH U, DOUCET K D GNSS Signal Processing with Partial Fixing of Ambiguities: US,

- US20070983925 [P]. 2009-05-26. <https://www.zhangqiaokeyan.com/patent-detail/06130430497736.html>.
- [64] TEUNISSEN P J G, VERHAGEN S. The GNSS Ambiguity Ratio-Test Revisited; a Better Way of Using it [J]. *Survey Review*, 2009, 41 (312): 138-151.
- [65] YANQING H, VERHAGEN S. Model and Data Driven Partial Ambiguity Resolution for Multi-Constellation GNSS [C]. *China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2014 Proceedings: Volume II*. Springer Berlin Heidelberg, 2014: 285-302.
- [66] LU L, MA L, LI, W, et al. A Triple Checked Partial Ambiguity Resolution for GPS/BDS RTK Positioning [J]. *Sensors* 2019, 19 (22), 5034.
- [67] 李安然. 基于GNSS/IMU/LIDAR多源信息融合的定位方法研究[D]. 重庆:重庆大学, 2021.
- [68] 秦永元, 张洪钺, 王叔华. 卡尔曼滤波与组合导航原理[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2012.
- [69] 智奇楠, 李泉楠, 刘鹏飞, 等. GNSS/INS 组合导航系统综述[J]. *数字通信世界*, 2019, 48 (8): 21-22.
- [70] 朱锋. GNSS/SINS/视觉多传感器融合的精确定位定姿方法与关键技术[D]. 武汉:武汉大学, 2019.
- [71] 张小红, 马福建. 低轨导航增强 GNSS 发展综述 [J]. *测绘学报*, 2019, 48 (9): 1073-1087.
- [72] LI X, HUANG J, LI X, et al. Review of PPP - RTK: Achievements, Challenges, and Opportunities [J]. *Satellite Navigation*, 2022, 3 (1): 28.
- [73] LI X, LV H, MA F, et al. GNSS RTK Positioning Augmented with Large LEO Constellation [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11 (3): 228.
- [74] GE H, LI B, GE M, et al. Initial Assessment of Precise Point Positioning with LEO Enhanced Global Navigation Satellite Systems (LeGNSS) [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10 (7): 984.
- [75] LI X, MA F, LI X, et al. LEO Constellation-Augmented Multi-GNSS for Rapid PPP Convergence [J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93: 749-764.
- [76] 姬生月, 杨浩, 董薇, 等. 结合实时数据产品与北斗短报文的厘米级海洋精密相对定位[J]. *国防科技大学学报*, 2022, 44 (6): 134-143.
- [77] ZHANG Z, LI B, GAO Y, et al. Asynchronous and Time-differenced RTK for Ocean Applications Using the BeiDou Short Message Service [J]. *Journal of Geodesy*, 2023, 97 (1): 7.
- [78] LI L, LI Z, YUAN H, et al. Integrity Monitoring-Based Ratio Test for GNSS Integer Ambiguity Validation [J]. *GPS solutions*, 2016, 20: 573-585.
- [79] 任焯. 多场景下的GNSS完好性监测方法研究 [D]. 北京:中国科学院研究生院, 2016.

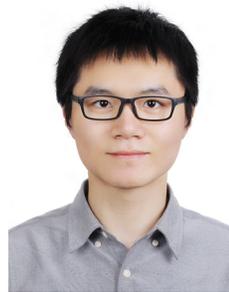
### 作者贡献说明

宋 伟: 搜集文献, 撰写论文初稿;

毛 威: 搜集和整理文献;

张益泽: 设计文章框架, 指导论文写作。

### 作者简介



张益泽: 博士, 副研究员; 中国卫星导航定位协会青年工作委员会委员; 获得 2018 年测绘科技进步奖一等奖 (“北斗高精度星基广域差分关键技术及应用”, 排名第八)、2018 年中国卫星导航年会青年优秀论文二等奖; 主要研究方向: GNSS 精密定位 (PPP/RTK/PPP-RTK), GNSS 偏差分析, 城市环境下精密定位 (GNSS+INS), 北斗广域增强。