

引文格式:张小红,李星星,李盼.GNSS 精密单点定位技术及应用进展[J].测绘学报,2017,46(10):1399-1407. DOI:10.11947/j.AGCS.2017.20170327.

ZHANG Xiaohong, LI Xingxing, LI Pan. Review of GNSS PPP and Its Application[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1399-1407. DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20170327.

GNSS 精密单点定位技术及应用进展

张小红^{1,2,3}, 李星星^{1,2,3}, 李 盼¹

1. 武汉大学测绘学院, 湖北 武汉 430079; 2. 地球空间信息技术协同创新中心, 湖北 武汉 430079; 3. 地球空间环境与大地测量教育部重点实验室, 湖北 武汉 430079

Review of GNSS PPP and Its Application

ZHANG Xiaohong^{1,2,3}, LI Xingxing^{1,2,3}, LI Pan¹

1. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2. Collaborative Innovation Centre for Geospatial Technology, Wuhan 430079, China; 3. Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, Wuhan 430079, China

Abstract: In this paper, we summarized the development of precise point positioning (PPP) technologies and its applications. Key technologies and methodologies for PPP float solution, ambiguity-fixing PPP, real-time PPP and multi-GNSS PPP were intensively analyzed and discussed. Typical PPP applications were summarized and demonstrated. Finally, we illustrated the prospect of PPP and pointed out problems to be solved for PPP development and applications in the coming years.

Key words: GNSS; precise point positioning; PPP-RTK; multi-GNSS; prospects

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (No. 41474025); The Natural Science Foundation for Distinguished Young Scholar of Hubei Province (No. 2015CFA039)

摘 要: 综合分析讨论了 GNSS 精密单点定位 (PPP) 技术及应用的最新进展。重点对 GNSS 精密单点定位实数解、固定解、实时精密单点定位、PPP-RTK 和多频多系统精密单点定位等 5 个方面的核心关键技术和实现方法进行了总结和讨论。结合 PPP 技术的特点和优势, 论述了 PPP 在低轨卫星定轨、地震、对流层和电离层等方面的典型应用。针对多频多系统 GNSS 的最新发展动态, 展望了 PPP 技术今后的发展趋势, 并指出了精密单点定位技术和推广应用还有待进一步研究的问题。

关键词: 全球卫星导航系统; 精密单点定位技术; 实时精密单点定位; 多频多系统 GNSS; 进展

中图分类号: P227

文献标识码: A

文章编号: 1001-1595(2017)10-1399-09

基金项目: 国家自然科学基金(41474025); 湖北省自然科学基金重点项目(2015CFA039)

精密单点定位 (precise point positioning, PPP) 指的是用户利用一台 GNSS 接收机的载波相位和测码伪距观测值, 采用高精度的卫星轨道和钟差产品, 并通过模型改正或参数估计的方法精细考虑与卫星端、信号传播路径及接收机端有关误差对定位的影响, 实现高精度定位的一种方法^[1-3]。

PPP 技术集成了 GNSS 标准单点定位和 GNSS 相对定位的技术优点, 克服了各自的缺点, 已发展成为一种新的 GNSS 定位方法。PPP 技术无需用户自己设置地面基准站、单机作业、定位

不受作用距离的限制、作业机动灵活、成本低, 可直接确定测站在国际地球参考框架 (ITRF) 下的高精度位置坐标^[4]。PPP 是 GNSS 定位技术中继 RTK/网络 RTK 技术后出现的又一次技术革命, 它的出现改变了以往只能使用差分定位模式才能实现高精度定位的局面, 为全球高精度 GNSS 定位提供了一种有效的新方法。

PPP 一般采用非差观测模型, 能同时精确估计测站在 ITRF 框架下的绝对坐标、接收机钟差以及绝对天顶对流层延迟及其水平梯度、信号传播路径上的电离层延迟等参数, 与相对定位的双

差模型相比,PPP在广域精密定位、地震监测、水汽反演和电离层监测等方面应用具有突出优势。因此,PPP在大范围移动测量、低轨卫星定轨、精密授时、大气科学、地球动力学等诸多方面具有独特的应用价值。鉴于PPP技术自身的优势和特点,近年来,PPP技术逐渐发展成为卫星导航定位技术领域的热点研究方向之一,正蓬勃发展,并显现出了广阔的应用前景。国内外先后有多所高校和研究机构的众多学者对PPP技术开展了广泛、深入、细致的研究,并先后在PPP定位模型、关键技术、算法软件、定位试验及应用等方面取得了丰富的研究成果^[5-15]。

1 PPP技术进展

自从20世纪90年代末,美国JPL学者Zumberge提出PPP技术以来^[1],先后经历了从GPS单系统到GNSS多系统,从双频到单频再到多频,从模糊度浮点解到模糊度固定解,从后处理到实时的发展过程。近十来年,导航学界主要围绕PPP定位模型、数据预处理、误差精细建模、模糊度固定和快速初始化5大主题展开研究,主要解决PPP的精度、时效和可靠性3大问题,其核心是PPP模糊度固定和快速初始化。

在PPP的发展过程中贯穿了3条发展主线:①浮点解到固定解的发展主线;②后处理到实时的发展主线;③单系统到双系统乃至多系统集成的发展主线。这3条发展主线并非平行独立发展,而是相互交叉并融合。浮点解到固定解的发展过程主要围绕如何固定非差模糊度为核心^[16-22,62];后处理到实时的发展主线主要围绕高精度实时卫星轨道和高频卫星钟差产品处理为重点^[23-24];单系统到多系统集成的发展主线主要围绕系统间偏差、频间偏差和频内偏差的估计与建模为关键^[9,13-15,25-27]。

1.1 实数解PPP进展

从1997年PPP提出到2007年的10年时间里,国内外学者对PPP的研究重点主要聚焦于实数解PPP的定位模型、误差模型精化、参数估计方法、数据处理算法以及科学与工程应用等方面。针对电离层和接收机钟差处理方法的不同,先后提出了不同的PPP定位模型。最早采用的是非差消电离层组合模型,利用双频伪距和相位观测值,分别组成消电离层的伪距观测方程和载波相位观测方程^[1-3];后来,卡尔加里大学的高扬教授

针对伪距消电离层组合噪声较大的问题,提出了UofC模型,该模型采用双频消电离层组合的相位观测方程和两个频率上的伪距载波半和观测方程,该模型与双频消电离层模型相比,伪距观测值的噪声可被减半,但需要额外估计L1和L2上的载波相位模糊度参数^[5]。为了消除接收机钟参数,有学者在消电离层组合模型的基础上进行星间单差(即星间单差模型),该模型无需估计接收机钟差参数,计算效率更高,但也放大了观测噪声,同时增加了观测值之间的相关性^[16,28]。上述模型都是采用线性组合消除电离层一阶项对定位的影响。后来,又有学者提出直接采用非差非组合PPP定位模型,该模型直接采用原始伪距和相位观测方程,同时求解测站坐标、接收机钟差、天顶对流层延迟、非差相位模糊度及其倾斜路径上的电离层延迟误差^[6,11-15]。非差非组合PPP模型与传统的非差消电离层组合PPP模型相比,具有以下几个特点:①观测噪声不会被放大;②模型更具普适和通用性,可适用于单频、双频和多频PPP定位;③保留了观测值中的所有信息,利用该模型不仅可以直接估计得到高精度的斜路径上的电离层延迟量,由于保留了需要估计的电离层参数,这也为引入外部电离层信息加快PPP的收敛速度提供了可能。研究结果表明,在不增加任何外部信息的情况下,采用上述这些模型进行PPP定位解算、定位精度和收敛时间并无显著差异^[13,15,27]。

当然,除了PPP定位模型研究,在此期间,在非差数据预处理、参数估计方法、缩短收敛时间、对流层参数化方法等方面也开展了不少研究,取得了一系列成果,在此不再赘述。总体上讲,双频GPS实数解PPP的理论、模型和算法已经基本成熟,关键技术已经基本解决,目前已进入实用化阶段,国内外已有不少软件具有实数解PPP的处理能力,包括GIPSY、Bernese、PANDA、IE、TriP等科研和商用软件,有些机构还发布了PPP在线处理软件,主要有:CSRS、GAPS、APPS、Magic-PPP等。

1.2 PPP固定解进展

随着浮点解PPP技术的发展和成熟,最近10年,国际上对PPP的研究重点也从非差模糊度的实数解转向固定解。高精度定位必须采用载波相位观测值,接收机测量卫星到地面站之间的距离时,包括两部分,一部分是接收机能直接测量出的不

足一周的部分,另一部分是未知的整周波长数(也称为整数模糊度)。但是,整数模糊度与硬件延迟偏差高度线性相关,很难直接分离。因此,这个硬件偏差就破坏了模糊度的整数特性。如何恢复非差模糊度的整数特性,并将其固定成整数,这是 PPP 固定解的首要难题。其核心关键是要分离接收机端和 GNSS 卫星端的初始相位和硬件延迟偏差,进而恢复非差模糊度的整数特性。为此,先后提出了 UPD 方法、整数钟方法和钟差去耦 3 种实现 PPP 固定解的方法^[16-22]。

文献[16]尝试使用星间单差模型固定星间单差模糊度的整数值。但限于当时 IGS 轨道和钟差产品精度较差原因,并没有给出实测数据的定位结果。文献[19]采用星间单差模型,使用全球大约 180 个 GPS 跟踪站的观测数据逐站取平均计算卫星端星间单差的未检校的相位延迟(uncalibrated phase delay, UPD),实现了固定星间单差模糊度的 PPP 定位。PPP 用户使用这套 UPD 产品即可通过后处理实现星间单差模糊度的整数固定解。其试验结果表明,能可靠固定 80% 以上的独立模糊度,模糊度固定后的 PPP 单天静态解东方向的定位精度较实数解 PPP 提高了大约 30%。文献[29]在文献[19]的基础上使用 LAMBDA 方法搜索非差窄巷模糊度,利用 1 h 的观测数据进行静态 PPP 整数固定解试验,三维坐标精度可以改善 68.3%。在文献[19]的基础上,文献[20]从 GNSS 观测的基本数学模型出发,提出了基于单站 PPP 浮点解确定非差宽巷和窄巷模糊度估值,然后联合整网的宽巷和窄巷 UPD 观测方程,通过引入接收机或卫星端 UPD 基准,利用迭代最小二乘进行整网的统一平差处理,估计确定卫星和接收端的 UPD。与星间单差方法逐站平均计算 UPD 的方法相比,宽巷和窄巷 UPD 都是联合所有参考站的非差浮点模糊度整体求解,且选择某一接收机端的 UPD 为基准,以消除方程组的秩亏,该方法的抗差能力更强,UPD 的估计精度更高^[14,20,38]。采用该方法,武汉大学测绘学院已向全球用户免费发布与 IGS 精密轨道和钟差兼容的 GPS 卫星的 UPD 产品,按自定义格式将宽巷和窄巷 UPD 存放于服务器上(<ftp://gnss.sgg.whu.edu.cn/>)。

与文献[19]的思路不同,文献[18]从钟差估计的角度出发,提出了估计能够恢复 PPP 模糊度整数特性的卫星钟差的方法,也即整数钟

(integer-recovery clocks, IRCs)法。该方法首先估计非差宽巷 UPD 改正数,然后在钟差估计过程中,利用卫星钟差参数吸收非差窄巷 UPDs。使用 IRC 卫星钟差改正数,PPP 求解的模糊度参数具有整数特性,进而可以采用传统的模糊度固定方法进行确定。法国 CNES 已经公开发布宽巷 UPD 和整数钟产品^[21]。

此外,加拿大 NRCAN 的 Collins 等提出了钟差去耦模型(decoupled clock model)。在钟差去耦模型中,伪距对应的 GPS 卫星钟差由伪距确定,而载波相位对应的 GPS 卫星钟差由载波相位确定,载波相位模糊度不再受伪距硬件延迟的影响,通过对伪距和载波相位使用不同的卫星钟改正数恢复非差模糊度的整数特性,也成功固定了非差整数模糊度。其试验结果表明经过大约 30 min 左右的初始化后,可以成功解算非差整数模糊度^[17]。

研究表明,上述 3 种非差模糊度固定解方法在理论上是等价的,只是实现方式不同。为了保持与 IGS 现有精密轨道和钟差产品的一致性,笔者更倾向于采用 UPD 方法实现 PPP 的固定解。PPP 固定解显著改善了 PPP 的定位精度特别是东西分量的精度。但是,由于受大气延迟等各种残余误差的影响,PPP 固定解需要较长的初始化时间。在没有任何外部信息约束的条件下,单独利用 GPS 单系统观测,要实现厘米甚至毫米级的定位精度通常需要 30 min 甚至更长的首次初始化时间,且信号失锁后的重新初始化时间与首次初始化时间几乎一样长,这与网络 RTK 的模糊度初始化时间还有相当距离^[30]。这也是 PPP 固定解迫切需要解决的核心难题。

1.3 实时 PPP 进展

就定位模型和方法来讲,实时 PPP 和后处理 PPP 没有本质区别,但在实际的实现方式上还是有显著不同的,实时 PPP 必须要有实时的高精度卫星轨道和钟差产品的支持,且用户要能实时通过互联网或卫星通信链路获取。实时 PPP 的概念最早是由 JPL 的 Muellerschoen 等人提出的,他们利用实时计算的高精度轨道和钟差改正信息,进行实时 PPP 定位服务。试验结果表明,在全球范围内可望实现水平方向定位精度为 10~20 cm 的实时动态定位^[23]。NavCom 的 Hatch 也提出了利用 JPL 实时定轨软件 RTG 实现全球 RTK 计划,通过因特网和地球静止通信卫星向全

球用户发送精密星历和精密卫星钟差修正数据,利用这些修正数据,实现 2~4 dm 的实时动态定位,收敛速度需要 30 min^[31]。随后 Veripos、OminiStar 和 Trimble 等商业公司,采用相类似的方法,基于自己建立全球跟踪站网的实时数据流,研发实时精密定轨和估钟软件,利用卫星通信链路播发加密的轨道和钟差改正等信息,为海洋、精密农业等用户提供商业实时 PPP 服务。

2007 年,国际 GNSS 服务组织(IGS)启动了实时计划项目(IGS-RTPP)。在 IGS-RTPP 的协调下,目前全球范围已有超过 100 个跟踪站正在提供实时数据流。利用这些 IGS 连续运行跟踪站的实时观测数据流,基于互联网可以实时估计并播发精密卫星钟差改正数及超快精密轨道产品。目前国际上 GFZ、CNES 等机构正在研发实时精密单点定位系统,并在系统开发方面取得了一些初步成果,实时 PPP 在平面方向的定位精度为 5 cm,高程方向为 10 cm 左右。实时精密单点定位系统能够在有网络通信覆盖的全球区域内实现实时、高精度和全天候的动态定位,且运营成本相对低廉,可在海上作业、地震监测、军事指挥、交通运输、灾害预警、精细农业等众多潜在领域推广应用。

从当前全球已实现的商业化的实时 PPP 系统来看,限制实时 PPP 应用的技术瓶颈依然存在,主要表现在已有的实时 PPP 商用产品的定位初始化时间较长,首次初始化时间及卫星失锁后的重新初始化时间一般需要 20 min 甚至更长。这严重制约着实时 PPP 技术的发展和應用。

1.4 PPP-RTK 进展

随着实时 PPP 技术的发展以及非差模糊度固定方法的提出并逐步成熟,为了进一步改善实时 PPP 定位的精度、可靠性和时效性,文献[32]首次提出了 PPP-RTK 的概念,其基本思想是融合 PPP 和 RTK 两种技术的优势,利用局域网观测数据,精化求解相位偏差、大气延迟等参数,重新生成的各类改正信息,并单独播发给流动站使用。经过这些措施,实现了基于 PPP 模式的实时动态定位技术(PPP-RTK)。正如前文所述,PPP 模糊度可以固定为整数,但问题是初始化时间较长。为了缩短 PPP 初始化时间,文献[33]借鉴网络 RTK 误差处理的思想,提出利用较密集 CORS 网增强 PPP 的概念和方法,解决了非差模糊度的快速固定难题,实现了 PPP 模式的网络 RTK

定位原型系统。基于 S-system 理论,Teunissen 从理论上对比分析了 6 组 PPP-RTK 模型的可估参数及改正数属性,建立了不同模型之间的相互转化关系^[34]。

针对信号短时中断所引起的 PPP 重新初始化的问题,文献[35]利用波长为 5.4 cm 的无几何距离组合观测值来实时修复非差周跳,进而达到连接失锁前后模糊度参数的目的。文献[36—37]提出了利用模糊度已固定历元的大气延迟信息连接中断观测值的算法。这些算法在信号短时中断时比较有效,但在数据中断超过几分钟或者发生电离层闪烁时会失效。但是,为了保持 PPP 定位不依赖于密集参考网的支持这一独特优势,不采用 CORS 网来增强,在双频条件下,要实现 PPP 非差模糊度的快速(3~5 min)初始化还具有相当的难度,这也是目前公认的制约厘米级实时 PPP 应用的技术瓶颈,亟需寻求新的方法突破这一难题。文献[38]提出了利用全球电离层模型约束信息缩短 PPP 初始化时间的方法,初始化时间得到了明显改善,但通常仍然需要 15 min 左右。

IGS 现在已能提供成熟的实时轨道和钟差产品(<http://www.rtigs.org>)。目前实时轨道和钟差的精度可满足 PPP 实时模糊度固定的需要。文献[12]提出了一种基于原始观测值的顾及大气约束的 PPP 模型与方法。该方法不仅可以将 PPP 和网络 RTK 集成为无缝的定位服务,而且将这两个技术融合为一个统一的模型和算法。该方法可以缩短全球 PPP 的初始化时间,也可以补偿由站间距离大而引起的残余系统误差对增强 PPP 的影响,但这要取决于先验大气延迟的精度。

1.5 多频多系统 PPP 进展

随着 BeiDou、Galileo 等卫星系统的建设和发展,多频多系统融合 GNSS 精密定位已成为 GNSS 精密定位的发展趋势。为了促进多系统 GNSS 间的兼容和互操作能力,IGS 于 2003 年成立多系统 GNSS 工作组(multi-GNSS working group, MGWG),并于 2012 年开始建立多系统 GNSS 试验跟踪网(MGEX)。该跟踪网的建立为多系统组合 PPP 的研究和试验创造了条件。文献[9,28]先后研究了 GPS/GLONASS 组合精密单点定位,结果表明组合 GLONASS 后,PPP 的收敛速度有显著改善。文献[14]提出了利用 GLONASS 观测信息辅助 GPS/BDS 单/双系统模

糊度固定的思路,进一步改善了 PPP 固定解性能。结果表明:加入 GLONASS 观测值为 PPP 提供了更多的冗余信息,系统抗粗差能力更强,可将 PPP 固定解的首次固定所需时间减少约 10~30%,显著缩短了 PPP 首次固定时间,提高了历元固定率^[14]。文献[15, 39—40]对 GPS+GLONASS+BeiDou+Galileo 四系统组合精密单点定位模型进行了研究,并分析了四系统联合精密单点定位的性能。

在多频 PPP 方面,文献[41, 42]研究了多种三频 GPS 线性组合 PPP 模型,相对双频 PPP 将收敛时间缩短了 10%左右。文献[25]提出了一种考虑 GPS inter-frequency clock bias(IFCB)建模及改正的三频 PPP 模型,将水平和高程分量的定位精度改善了 20%左右。文献[27]从函数和随机模型两方面对比了两类常用的无电离层组合和一组原始观测值 PPP 模型,其结果表明在动态观测条件较弱的情况下,加入第三频观测值可有效改善定位性能^[27]。

当前,多频多系统 PPP 研究主要围绕实数解 PPP 开展。在三频 PPP 模糊度解算方面,文献[43]的仿真结果表明,三频 PPP 模糊度的初始化时间可缩短至数十个历元。文献[44]利用实测的中国区域的 BDS 数据,基于三频原始观测值模型,结果表明固定超宽巷和宽巷模糊度可显著改善定位性能。文献[45]已经建立多系统 PPP-RTK 的模型。

2 PPP 技术应用进展

精密单点定位采用非差模型,只利用一台接收机的观测数据就可以同时解算得到 ITRF 框架下的位置坐标、接收机钟差、电离层延迟、对流层延迟等参数,因此与差分定位技术相比,精密单点定位在精密时间传递、地震监测、电离层建模、水汽监测等方面又具有独特的应用优势。PPP 技术已被逐步应用于海陆空不同载体的高精度动态和静态定位、精密授时、低轨卫星的精密定轨、GPS 气象、地球动力学等诸多地学研究及工程应用领域^[8, 46-58, 63],具有重要的应用前景。

在精密静态/动态定位和授时方面,文献[46]利用精密单点定位技术对 GPS 浮标进行动态定位,实现了分米级的局部海平面变化监测精度。文献[8]将精密单点定位技术成功应用于南极 Amery 冰架动态监测,获得了冰架前端的流速和

流向,并恢复出了南极海域的潮汐信包括海潮半周日和周日变化参数。文献[47]将精密单点定位应用于 GPS 辅助空中三角测量,取得和差分相当的结果。

在低轨卫星定轨方面,文献[48]利用精密单点定位技术对 CHAMP、GRACE 卫星进行定轨,取得了事后 dm 级的定轨精度。文献[49]采用纯几何法对 GRACE 卫星定轨,取得了单天 3~5 cm 的轨道精度。文献[50]利用少量 IGS 跟踪站的观测数据,通过计算未检校的相位小数偏差改正信息,并播发送给用户使用,实现了基于 PPP 固定解的快速精密定轨系统。目前,PPP 已成为低轨卫星定轨的主要技术手段之一。

在 GNSS 水汽遥感方面,文献[51]采用精密单点定位技术对德国境内 170 个站网为期 2 a 的观测数据进行分析,获得了 1~2 mm 的近实时综合水汽含量。文献[52]将精密单点定位技术应用于海洋水汽监测,利用其得到的天顶对流层湿延迟反演大气可降水量(PWV),其数值与无线电探空仪和船载水汽辐射计的测量结果吻合较好,差异仅为 2~3 mm。笔者等采用快速精密星历和快速精密钟差,近实时地反演了美国 SumitNet 网中 8 个测站的可降水量,获得了优于 1 mm 的 PWV 值^[53]。文献[54]通过与 ECMWF 数值天气模型进行对比,结果表明多 GNSS 组合 PPP 可反演出精度更高、可靠性更强、几何分布更均匀的实时对流层产品。文献[55]利用 GNSS/VLBI 并址站数据的研究结果表明 GPS 和 GLONASS 单系统实时 PPP 估计 PWV 的精度相当,双系统解精度相对单系统更高。

在地震监测方面,PPP 技术具有独特优势,近 10 年来,先后有一大批学者开展了相关方面的工作。大地震引起的地面运动可以波及到几千千米之外,此时采用相对定位的方法,通常无法直接获得震区内 GPS 测站的同震位移系列,而 PPP 技术不在依赖参考站,可以单站获得同震位移系列。文献[56]基于高频 GPS 数据(1 Hz)成功恢复出 Denali 地震瞬时地表形变位移,其结果与地震仪观测的结果能很好地吻合,为高采样 GPS 观测数据获取地震波信号的研究提供了可行性。文献[57]利用 PPP 技术获得 Tohoku 地震期间近场区 GPS 测站的瞬时位移,并根据地震发生后 90~100 s 内的位移量反演出近似断层滑动模型,进而推估地震震级为 Mw 8.8,而根据地震仪在地

震发生后 120 s 确定的震级只有 $M_w 8.1^{[57]}$ 。

在电离层建模方面,文献[11]采用非组合精密单点定位方法求解电离层 TEC 的方法。由于相位观测值的观测噪声和受多路径影响较小,基于非差非组合 PPP 模型,利用相位观测值提取电离层 TEC,将大大提高电离层 TEC 的提取精度,进而大幅提高电离层建模精度。随着 PPP 模糊度固定技术的发展和成熟,文献[64]基于 PPP 固定解技术提取电离层 TEC,其结果表明精度更高。文献[58]采用 PPP 固定模糊度的网解方式提取电离层 TEC 方法,电离层 TEC 的提取精度达 0.1 TECU,这为今后建立更高精度的电离层模型提供了可能^[58]。

3 PPP 技术展望

精密单点定位技术从提出到现在已有近 20 年的时间,PPP 理论、方法、技术和应用都取得了长足的发展,并逐步走向成熟。但是,PPP 技术还存在几大问题需要解决:① PPP 的初始化时间;② PPP 技术的成熟度仍然不及网络 RTK 技术。地基区域 CORS 增强虽然可以缩短 PPP 的初始化时间,但需要和网络 RTK 基本一样密度的地面参考站网的支持,PPP 技术的优越性无法真正体现。随着多频多模 GNSS 系统的出现,给 PPP 技术的研究带来了新的机遇和挑战。

一方面多系统组合并引入多频观测,有可能解决 PPP 的模糊度快速固定问题,并进一步提高 PPP 技术的可靠性和可用性。目前,BeiDou 所有工作卫星都能发射三频信号。此外,还有多颗 GPS Block II-F 卫星和 Galileo 卫星可以播发三频信号。这些三频信号为开展三频 PPP 固定解方法的研究创造了实际条件^[59]。在双差相对定位模糊度解算中已经证明三频信号能显著改善模糊度的搜索空间,提高模糊度解算的效率和可靠性,加快模糊度的解算速度^[60,61]。TCAR/MCAR 等多频模糊度解算方法已经在短基线相对定位中得到了成功应用。这为实现 PPP 非差模糊度的快速确定,进而解决 PPP 初始化时间长的问题提供了可供借鉴的解决思路。

但另一方面,多系统组合定位需要处理包括系统间偏差、频间偏差、频内偏差等带来的一系列新的偏差参数,这给精密单点定位的数据处理带来新的问题。PPP 一般采用 IGS 的卫星钟差和轨道,IGS 精密卫星钟差是以双频无电离层组合

伪距为基准估计的。因此 PPP 定位模型中,如果利用非组合观测值,或采用与 IGS 双频组合不同的其他组合观测值建立观测方程时,需考虑不同频率、不同观测值类型上的卫星端和接收机端的硬件延迟(hardware delays)的影响,包括同频率上的码偏差(intra-frequency biases)和频间偏差(inter-frequency biases)。目前 IGS 只发布了 GPS 卫星端同一频率上的 P1-C1 的差分码偏差(DCB),只能满足 GPS 单频和双频 PPP 定位要求。

此外,BeiDou、Galileo 等新卫星的天线相位中心,卫星端硬件延迟偏差、GNSS 系统间偏差等各种误差模型的精化还有不少提升空间。随着 Multi-GNSS 的发展,模型算法和软件的改进,GNSS 卫星轨道和卫星钟差的精度也还有改善空间,特别是实时精密轨道和钟差产品,以及电离层甚至对流层产品的时空分辨率的改善,这些都将为进一步提升实时 PPP 的实用性提供了可能性。特别是近年来提出的基于低轨星座的卫星导航或者低轨星座增强的 GNSS,由于其几何变化非常快,可能能够从根本上解决 PPP 快速初始化的问题。

参考文献:

- [1] ZUMBERGE J F, HEFLIN M B, JEFFERSON D C, et al. Precise Point Positioning for the Efficient and Robust Analysis of GPS Data from Large Networks[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(B3): 5005-5017.
- [2] KOUBA J, HÉROUX P. Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products[J]. *GPS Solutions*, 2001, 5 (2): 12-28. DOI: 10.1007/PL00012883.
- [3] 叶世榕. GPS 非差相位精密单点定位理论与实现[D]. 武汉: 武汉大学, 2002.
YE Shirong. Theory and Its Realization of GPS Precise Point Positioning Using Un-differenced Phase Observation [D]. Wuhan: Wuhan University, 2002.
- [4] 郭斐. GPS 精密单点定位质量控制与分析的相关理论和方法研究[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2016.
GUO Fei. Theory and Methodology of Quality Control and Quality Analysis for GPS Precise Point Positioning[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2016.
- [5] GAO Y, SHEN X. Improving Ambiguity Convergence in Carrier Phase-based Precise Point Positioning [C] // Proceedings of the 14th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 2001). Salt Lake City, UT: Salt Palace Convention Center, 2001: 1532-1539.
- [6] LE A Q, TIBERIUS C. Single-frequency Precise Point

- Positioning with Optimal Filtering[J]. GPS Solutions, 2007, 11(1): 61-69. DOI: 10.1007/s10291-006-0033-9.
- [7] DACH R, HUGENTOBLE U, FRIDEZ P. Bernese GPS Software Version 5.0[M]. Bern: Astronomical Institute, University of Bern, 2007: 114.
- [8] ZHANG Xiaohong, ANDERSEN O B. Surface Ice Flow Velocity and Tide Retrieval of the Amery ice Shelf Using Precise Point Positioning[J]. Journal of Geodesy, 2006, 80(4): 171-176.
- [9] CAI Changsheng, GAO Yang. Modeling and Assessment of Combined GPS/GLONASS Precise Point Positioning[J]. GPS Solutions, 2013, 17(2): 223-236.
- [10] 张小红, 刘经南, FORSBERG R. 基于精密单点定位技术的航空测量应用实践[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2006, 31(1): 19-22, 46.
- ZHANG Xiaohong, LIU Jingnan, FORSBERG R. Application of Precise Point Positioning in Airborne Survey[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2006, 31(1): 19-22, 46.
- [11] 张宝成. GNSS 非差非组合精密单点定位的理论方法与应用研究[D]. 武汉: 中国科学院测量与地球物理研究所, 2012.
- ZHANG Baocheng. Study on the Theoretical Methodology and Applications of Precise Point Positioning Using Undifferenced and Uncombined GNSS Data[D]. Wuhan: Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2012.
- [12] 李星星. GNSS 精密单点定位及非差模糊度快速确定方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2013.
- LI Xingxing. Rapid Ambiguity Resolution in GNSS Precise Point Positioning[D]. Wuhan: Wuhan University, 2013.
- [13] 辜声峰. 多频 GNSS 非差非组合精密数据处理理论及其应用[D]. 武汉: 武汉大学, 2013.
- GU Shengfeng. Research on the Zero-difference Un-combined Data Processing Model for Multi-frequency GNSS and Its Applications[D]. Wuhan: Wuhan University, 2013.
- [14] 李盼. GNSS 精密单点定位模糊度快速固定技术和方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2016.
- LI Pan. Research on Methodology of Rapid Ambiguity Resolution for GNSS Precise Point Positioning[D]. Wuhan: Wuhan University, 2016.
- [15] 刘腾. 多模 GNSS 非组合精密单点定位算法及其电离层应用研究[D]. 武汉: 中国科学院测量与地球物理研究所, 2017.
- LIU Teng. Study on the Algorithms and Ionospheric Applications of Multi-GNSS Uncombined Precise Point Positioning[D]. Wuhan: Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [16] GABOR M J, NEREM R S. GPS Carrier Phase Ambiguity Resolution Using Satellite-satellite Single Differences[C]// Proceedings of the 12th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS 1999). Nashville, TN: Institute of Navigation, 1999: 14-17.
- [17] COLLINS P, BISNATH S, LAHAYE F, et al. Undifferenced GPS Ambiguity Resolution Using the Decoupled Clock Model and Ambiguity Datum Fixing[J]. Navigation, 2010, 57(2): 123-135.
- [18] LAURICHESSE D, MERCIER F, BERTHIAS J P, et al. Integer Ambiguity Resolution on Undifferenced GPS Phase Measurements and Its Application to PPP and Satellite Precise Orbit Determination[J]. Navigation, 2009, 56(2): 135-149.
- [19] GE M, 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.
- [20] LI Xingxing, ZHANG Xiaohong. Improving the Estimation of Uncalibrated Fractional Phase Offsets for PPP Ambiguity Resolution[J]. The Journal of Navigation, 2012, 65(3): 513-529.
- [21] LOYER S, PEROSANZ F, MERCIER F, et al. Zero-difference GPS Ambiguity Resolution at CNES-CLS IGS Analysis Center[J]. Journal of Geodesy, 2012, 86(11): 991-1003. DOI: 10.1007/s00190-012-0559-2.
- [22] GENG Jianghui, MENG Xiaolin, DODSON A H, et al. Integer Ambiguity Resolution in Precise Point Positioning: Method Comparison[J]. Journal of Geodesy, 2010, 84(9): 569-581.
- [23] MUELLERSCHOEN R J, BAR-SEVER Y E, BERTIGER W I, et al. NASA's Global DGPS for High-Precision Users[J]. GPS World, 2001, 12(1): 14-20.
- [24] ZHANG Xiaohong, LI Xingxing, GUO Fei. Satellite Clock Estimation at 1 Hz for Realtime Kinematic PPP Applications[J]. GPS Solutions, 2011, 15(4): 315-324.
- [25] PAN Lin, ZHANG Xiaohong, LI Xingxing, et al. Characteristics of Inter-frequency Clock Bias for Block IIF Satellites and Its Effect on Triple-frequency GPS Precise Point Positioning[J]. GPS Solutions, 2017, 21(2): 811-822.
- [26] GUO Fei, ZHANG Xiaohong, WANG Jinling. Timing Group Delay and Differential Code Bias Corrections for BeiDou Positioning[J]. Journal of Geodesy, 2015, 89(5): 427-445.
- [27] GUO Fei, ZHANG Xiaohong, WANG Jinling, et al. Modeling and Assessment of Triple-frequency BDS Precise Point Positioning[J]. Journal of Geodesy, 2016, 90(11): 1223-1235.
- [28] LI Pan, ZHANG Xiaohong. Integrating GPS and GLONASS to Accelerate Convergence and Initialization Times of Precise Point Positioning[J]. GPS Solutions, 2014, 18(3): 461-471.
- [29] GENG Jianghui, TEFERLE F N, SHI C, et al. Ambiguity Resolution in Precise Point Positioning with Hourly Data[J]. GPS Solutions, 2009, 13(4): 263-270.
- [30] GENG J, TEFERLE F N, MENG X, et al. Towards PPP-

- RTK: Ambiguity Resolution in Real-time Precise Point Positioning[J]. *Advances in Space Research*, 2011, 47(10): 1664-1673.
- [31] HATCH R. Satellite Navigation Accuracy: Past, Present and Future[C]//Proceeding of the 8th GNSS Workshop. Korea, [s.n.], 2001: 7-9.
- [32] WÜBBENA G, SCHMITZ M, BAGGE A. PPP-RTK: Precise Point Positioning Using State-space Representation in RTK Networks[C]//Proceedings of the 18th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2005). Long Beach, CA: Long Beach Convention Center, 2005: 13-16.
- [33] LI Xingxing, ZHANG Xiaohong, GE Maorong. Regional Reference Network Augmented Precise Point Positioning for Instantaneous Ambiguity Resolution[J]. *Journal of Geodesy*, 2011, 85(3): 151-158.
- [34] TEUNISSEN P J G, KHODABANDEH A. Review and Principles of PPP-RTK Methods[J]. *Journal of Geodesy*, 2015, 89(3): 217-240.
- [35] BANVILLE S, LANGLEY R B. Improving Real-time Kinematic PPP with Instantaneous Cycle-slip Correction [C]//Proceedings of the 22nd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2009). Savannah, GA: Savannah International Convention Center, 2009: 2470-2478.
- [36] GENG Jianghui, MENG Xiaolin, DODSON A H, et al. Rapid Re-convergences to Ambiguity-Fixed Solutions in Precise Point Positioning[J]. *Journal of Geodesy*, 2010, 84(12): 705-714.
- [37] ZHANG Xiaohong, LI Xingxing. Instantaneous Re-initialization in Real-time Kinematic PPP with Cycle Slip Fixing[J]. *GPS Solutions*, 2012, 16(3): 315-327. DOI: 10.1007/s10291-011-0233-9.
- [38] LI Xingxing, GE Maorong, ZHANG Hongping, et al. A Method for Improving Uncalibrated Phase Delay Estimation and Ambiguity-fixing in Real-time Precise Point Positioning [J]. *Journal of Geodesy*, 2013, 87(5): 405-416. DOI: 10.1007/s00190-013-0611-x.
- [39] LI Xingxing, GE Maorong, DAI Xiaolei, et al. Accuracy and Reliability of Multi-GNSS Real-time Precise Positioning: GPS, GLONASS, BeiDou, and Galileo [J]. *Journal of Geodesy*, 2015, 89(6): 607-635.
- [40] LOU Yidong, ZHENG Fu, GU Shengfeng, et al. Multi-GNSS Precise Point Positioning with raw Single-frequency and Dual-frequency Measurement Models [J]. *GPS Solutions*, 2016, 20(4): 849-862.
- [41] ELSOBEIEY M. Precise Point Positioning Using Triple-frequency GPS Measurements[J]. *The Journal of Navigation*, 2015, 68(3): 480-492.
- [42] DEO M, EL-MOWAFY A. Triple-frequency GNSS Models for PPP with Float Ambiguity Estimation: Performance Comparison Using GPS[J]. *Survey Review*, 2016. DOI: 10.1080/00396265.2016.1263179. (in Press)
- [43] GENG Jianghui, BOCK Y. Triple-frequency GPS Precise Point Positioning with Rapid Ambiguity Resolution[J]. *Journal of Geodesy*, 2013, 87(5): 449-460.
- [44] GU Shengfeng, LOU Yidong, SHI Chuang, et al. BeiDou Phase Bias Estimation and its Application in Precise Point Positioning With Triple-frequency Observable[J]. *Journal of Geodesy*, 2015, 89(10): 979-992.
- [45] KHODABANDEH A, TEUNISSEN P J G. PPP-RTK and Inter-system Biases: the ISB Look-up Table as a Means to Support Multi-system PPP-RTK[J]. *Journal of Geodesy*, 2016, 90(9): 837-851.
- [46] CHEN K. Real-time Precise Point Positioning and Its Potential Applications[C]//Proceedings of the 17th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2004). Long Beach, CA: Long Beach Convention Center, 2004: 1844-1854.
- [47] 袁修孝, 付建红, 楼益栋. 基于精密单点定位技术的 GPS 辅助空中三角测量[J]. *测绘学报*, 2007, 36(3): 251-255. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1595.2007.03.002.
- YUAN Xiuxiao, FU Jianhong, LOU Yidong. GPS-supported Aerotriangulation Based on GPS Precise Point Positioning [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2007, 36(3): 251-255. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1595.2007.03.002.
- [48] BISNATH S B, LANGLEY R B. Precise Orbit Determination of Low Earth Orbiters with GPS Point Positioning[C]//Proceedings of the 2001 National Technical Meeting of the Institute of Navigation. Long Beach, CA: ION, 2001: 725-733.
- [49] 李建成, 张守建, 邹贤才, 等. GRACE 卫星非差运动学厘米级定轨[J]. *科学通报*, 2009, 54(16): 2355-2362.
- LI Jiancheng, ZHANG Shoujian, ZOU Xiancai, et al. Precise Orbit Determination for GRACE with Zero-difference Kinematic Method[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(16): 2355-2362.
- [50] 李星星, 张小红, 李盼. 固定非差整数模糊度的 PPP 快速精密定位定轨[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(3): 833-840.
- LI Xingxing, ZHANG Xiaohong, LI Pan. PPP for Rapid Precise Positioning and Orbit Determination with Zero-difference Integer Ambiguity Fixing[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(3): 833-840.
- [51] GENDT G, DICK G, REIGBER C H, et al. Demonstration of NRT GPS Water Vapor Monitoring for Numerical Weather Prediction in Germany[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2003, 82(1B): 360-370.
- [52] ROCKEN C, JOHNSON J, VAN HOVE T, et al. Atmospheric Water Vapor and Geoid Measurements in the Open Ocean with GPS[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(12): L12813. DOI: 10.1029/2005GL022573.
- [53] 张小红, 何锡扬, 郭博峰, 等. 基于 GPS 非差观测值估计大气可降水量[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2010, 35

- (7): 806-810.
- ZHANG Xiaohong, HE Xiyang, GUO Bofeng, et al. Near Real Time PW Inversion Based on Zero-differenced GPS Observation[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2010, 35(7): 806-810.
- [54] LI Xingxing, ZUS F, LU Cuixian, et al. Retrieving of Atmospheric Parameters from Multi-GNSS in real time: Validation with Water Vapor Radiometer and Numerical Weather Model [J]. Journal of Geophysical Research, 2015, 120(14): 7189-7204.
- [55] LU Cuixian, LI Xingxing, GE Maorong, et al. Estimation and Evaluation of Real-time Precipitable Water Vapor from GLONASS and GPS[J]. GPS Solutions, 2016, 20(4): 703-713.
- [56] LARSON K M, BODIN P, GOMBERG J. Using 1-Hz GPS data to Measure Deformations Caused by the Denali Fault Earthquake [J]. Science, 2003, 300(5624): 1421-1424.
- [57] WRIGHT T J, HOULIÉ N, HILDYARD M, et al. Real-time, Reliable Magnitudes for Large Earthquakes from 1 Hz GPS Precise Point Positioning: The 2011 Tohoku-Oki (Japan) Earthquake[J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39(12): L12302.
- [58] REN Xiaodong, ZHANG Xiaohong, XIE Weiliang, et al. Global Ionospheric Modelling Using Multi-GNSS: BeiDou, Galileo, GLONASS and GPS [J]. Scientific Reports, 2016, 6: 33499.
- [59] HENKEL P, GÜNTHER C. Reliable Integer Ambiguity Resolution: Multi-frequency Code Carrier Linear Combinations and Statistical a Priori Knowledge of Attitude[J]. Navigation, 2012, 59(1): 61-75.
- [60] FENG Yanming. GNSS Three Carrier Ambiguity Resolution Using Ionosphere-reduced Virtual Signals[J]. Journal of Geodesy, 2008, 82(12): 847-862.
- [61] LI Bofeng, FENG Yanming, SHEN Yunzhong. Three Carrier Ambiguity Resolution: Distance-independent Performance Demonstrated Using Semi-generated Triple Frequency GPS Signals[J]. GPS Solutions, 2010, 14(2): 177-184.
- [62] 潘宗鹏, 柴洪洲, 刘军, 等. 基于部分整周模糊度固定的非差 GPS 精密单点定位方法[J]. 测绘学报, 2015, 44(11): 1210-1218. DOI: 10.11947/j.AGCS.2015.20150056.
- PAN Zongpeng, CHAI Hongzhou, LIU Jun, et al. GPS Partial Ambiguity Resolution Method for Zero-difference Precise Point Positioning[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(11): 1210-1218. DOI: 10.11947/j.AGCS.2015.20150056.
- [63] HU Hong, Gao Jingxiang, YAO Yifei. Land Deformation Monitoring in Mining Area with PPP-AR[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2014, 24(2): 207-212.
- [64] BANVILLE S, LANGLEY R B. Defining the Basis of an Integer-levelling Procedure for Estimating Slant Total Electron Content[C]//Proceedings of the 24th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2011). Portland, OR: Oregon Convention Center, 2011: 2542-2551.

(责任编辑:陈品馨)

收稿日期: 2017-06-20

修回日期: 2017-09-11

第一作者简介: 张小红(1975—),男,教授,研究方向为 GNSS 精密定位及其应用。

First author: ZHANG Xiaohong(1975—), male, professor, majors in GNSS precise positioning and its applications.

E-mail: xhzhang@sgg.whu.edu.cn