

基于北斗的星地一体化增强系统关键技术探讨

李小龙 黄志凯 曹强
上海华测导航科技股份有限公司, 中国·上海 201702

摘要: VRS 地基增强在建站密度、通信覆盖、并发服务等方面遭遇瓶颈。本文围绕星地一体化增强系统展开研讨, 着重对星地无缝切换断点续测、星基北斗/INS 紧组合导航、L-Band 转 VRS 差分算法三项关键技术予以分析。通过统一协议融合框架与智能择优策略, 整合星基广域覆盖与地基快速定位优势。实验表明, 系统星基模式水平精度优于 5cm, 地基模式优于 2cm, 星地切换无明显跳变, 为北斗高精度定位大众化提供可行路径。
关键词: 北斗卫星导航系统; 星基增强; 地基增强; 星地一体化

Discussion on Key Technologies of Space-Ground Integrated Augmentation System Based on BDS

Li Xiaolong, Huang Zhikai, Cao Qiang
Shanghai Huace Navigation Technology Ltd., China Shanghai 201702

Abstract: To solve the problems of VRS ground-based augmentation in station density, communication coverage and concurrent services, this paper investigates a space-ground integrated augmentation system based on BDS. Three key techniques are introduced: seamless switching with uninterrupted measurements, space-based BDS/INS tightly integrated navigation, and L-Band to VRS differential information algorithm. Experiments show the system achieves horizontal accuracy better than 5 cm in space-based mode and 2 cm in ground-based mode, with no significant changes during space-ground transition.
Keywords: BDS; Space-based augmentation; Ground-based augmentation; Space-ground integration

0 引言

全球卫星导航系统 (GNSS) 在现代社会中占据重要地位, 其定位精度与服务可靠性直接影响国民经济各领域的运行效率^[1]。北斗三号全球系统建成后, 我国卫星导航实现了从跟跑到并跑的跨越。然而, 将北斗高精度定位能力推广至大众应用仍面临诸多技术挑战。目前高精度定位主要依靠以 VRS 技术为代表的地基增强系统 (CORS), 该技术路线在专业测绘领域已趋成熟, 但在推广中暴露出一些结构性问题。

地基增强系统对基准站密度要求高, 一般数十公里内需设一座参考站, 偏远山区、海洋等区域难以有效覆盖^[2-3]。CORS 系统依赖移动通信网络传输差分数据, 用户处于通信盲区时高精度服务即中断。各地 CORS 网络由不同单位单独部署, 坐标框架和数据格式缺乏统一标准, 跨区域漫游时频繁断连, 海量用户并发时服务器压力剧增, 这些因素叠加形成了北斗高精度应用大众化的现实阻碍。

星基增强技术为突破上述困境提供了新思路。与地基增强不同, 星基增强借助地球静止轨道卫星广播差分改正

信息, 用户仅需接收卫星信号即可获得高精度定位, 无需依赖地面通信链路, 具有服务范围广、用户容量无上限、架构简单等优势。星基增强与地基增强在服务特性上具有互补性, 将两者纳入统一服务框架并按用户需求智能切换, 可同时实现广域覆盖与快速定位。基于此, 本文以北斗三号系统为基础, 探究星地一体化增强系统的关键技术。

1 国内外研究现状

服务名称 (服务时间)	服务商	服务系统	基准站数量	卫星链路	接收机支持	精度
StarFire (2003)	NAVCOM	GPS, GLO, GAL, BDS	>60	3GEO (L-band), IP (NTRIP)	NavCom	< 5 cm
Seastar (2014)	Fugro	GPS, GLO, GAL, BDS (S4)	~80	6GEO (L-band), IP (NTRIP)	Fugro	10 cm H 15 cm V (95%)
Apex/Ultra (2007) TerraStar (2011)	VERIPPOS	GPS, GLO, GAL, BDS, QZS	~80	7GEO (L-band)	VERIPPOS, NovAtel Septentrio, TOPCON, Hemisphere	< 5 cm H < 12 cm V (95%)
CenterPoint RTX (2012)	Trimble	GPS, GLO, GAL, BDS, QZS	~100	6GEO (L-band), IP (NTRIP)	Trimble	< 2 cm H < 5 cm V (RMSS)
magicGNSS (-)	gtn	GPS, GLO, GAL, BDS, QZS	~80	IP (NTRIP)	RTCMSSR	< 5 cm V (RMSS)
PointX (2024)	CHCN-IV	GPS, GLO, GAL, BDS	~100	2GEO (L-band), IP (NTRIP)	CHCN-NAV	< 2.5 cm H < 7 cm V (95%)
XStar (2021)	上海华测	GPS, GLO, GAL, BDS	~100	1GEO (L-band), IP (NTRIP)	Qiumun	< 2.5 cm H < 10 cm V (RMSS)

图1 国内外星基增强系统对比

国际上星基增强技术研究起步较早, 已形成多个商用系统 (见图 1)。Trimble 公司的 RTX 差分服务是全球最早商业运营的星基增强系统之一, 重点区域水平精度优于 2cm。NavCom 公司的 StarFire 系统依托全球 40 余座基准站, 可提供优于 5cm 的全球实时定位服务。Fugro 旗下的

Starfix 服务聚焦海上作业,采用 PPP 技术计算修正参数,通过 7 颗传输卫星播发改正信息,精度涵盖厘米级至米级。

国内星基增强系统建设起步较晚。2015 年合众思壮投入运行的“中国精度”系统是首个商用北斗星基增强服务,利用 L 波段同步轨道卫星播发差分数据,从精准农业逐步延伸至海洋测量、国土测绘等领域。千寻位置依托国家北斗地基增强系统“全国一张网”,其 FindCM 服务可提供厘米级实时定位,在自动驾驶、智慧城市等领域有较多应用。华测导航在星地融合方面进行了积极探索,自主建立的星基增强系统已具备全球服务能力。

1.1 现有系统存在的主要问题

分析国内外现有星基增强系统,可发现若干共性问题:一是现有系统多独立运行,星基与地基增强间缺乏协同机制,切换时常出现定位中断或精度跳变;二是已部署的 RTK 设备一般不支持星基增强信号,用户需更换终端才能享受星基服务;三是在信号遮挡或干扰环境下,单纯依赖卫星导航的可用性难以保障,需引入惯性导航等辅助手段增强鲁棒性。这些问题使星地一体化增强系统的研究兼具学术价值与工程迫切性。

2 星地一体化增强系统总体架构

2.1 系统架构设计

星地一体化增强系统旨在融合星基增强广域覆盖优势与地基增强快速收敛特性,建立统一定位平台。系统架构自下而上分为数据采集层、数据处理层、服务播发层、终端应用层。数据采集层由全球分布的 GNSS 参考站网络组成,同时为星基和地基增强提供服务。数据处理层是核心,包含星基增强处理中心(基于 PPP 技术精密建模轨道、钟差、电离层延迟等误差源)和地基增强处理中心(基于 VRS 技术生成虚拟参考站差分数据)。服务播发层负责差分数据分发:星基数据经上行链路注入 GEO 卫星后通过 L 波段全球广播,地基数据经互联网或移动网络推送。终端应用层负责接收解码差分数据并定位解算,同时依据信号环境智能切换星基与地基模式。

2.2 数据协议融合

数据协议统一对于星地一体化具备一定的挑战,星基增强一般采用 RTCM SC-104 标准的 SSR 消息格式,地基增强主要运用 OSR 消息格式,两者在参数定义、更新频率上差异明显。本文设计了协议融合框架,在数据处理层增加格式转换中间件,将星基 SSR 消息与地基 OSR 消息统一映射为内部标准格式,上层服务逻辑无需关注底层协议差异。该框架还支持 L-Band 信号到 VRS 差分信息的协议转换,使传统 RTK 设备无需更换硬件即可接收星基增

强服务。

2.3 智能择优服务策略

在星地一体化服务框架中,用户终端可能同时处于星基与地基增强覆盖范围内,智能择优服务策略是提升定位体验的关键。该策略综合考虑地基增强可用性与信号质量、星基增强收敛状态、用户精度偏好、通信链路稳定性等因素。当用户处于地基覆盖区且通信正常时,优先提供地基增强服务获取快速高精度定位;当用户移出地基覆盖或通信中断时,自动切换至星基增强模式,并利用断点续测算法保持定位连续性。这种基于场景感知的动态服务选择机制,使用户在不同环境下均可获得持续稳定的高精度定位体验。

3 关键技术探讨

3.1 星基与地基间无缝切换断点续测算法

星基与地基增强间无缝切换是星地一体化系统的首要技术难题。传统切换方案断开当前服务后重新初始化目标服务,常导致数秒至数十秒的定位中断。本文提出的断点续测算法可消除切换过程中的定位中断与精度跳变,其核心思想是:切换发生前,利用当前服务的定位状态信息(浮点模糊度、位置方差-协方差矩阵等)作为目标服务的先验约束,使目标服务无需从零开始收敛,而是基于继承已有信息迅速进入高精度状态。具体而言,系统检测到切换触发条件时,终端在维持当前服务的同时预获取目标服务差分数据进行后台预收敛,待预收敛达到预设阈值后执行实际切换,实现“零中断”过渡。

算法实现需重点解决两个问题:一是星基与地基差分数据间的坐标框架一致性,需借助框架转换参数实时校正;二是模糊度状态的继承与更新,因两种服务观测值类型和差分策略不同,模糊度参数无法直接传递,需通过方差-协方差矩阵的映射与缩放实现近似继承。实验结果显示,采用断点续测算法后,星地切换过程中定位精度跳变控制在 1cm 以内,切换耗时少于 2 秒,较传统方案有显著改善。

3.2 基于星基增强的北斗/INS 紧组合导航技术

在智慧物流、自动驾驶等场景中,用户终端常面临卫星信号遮挡或多径干扰,单纯依赖卫星导航难以持续提供可靠定位。惯性导航系统(INS)具有自主性强、短期精度高的特性,可作为有效补充。传统松组合方案仅在 GNSS 信号中断时利用 INS 推算位置,无法及时响应观测质量下降。本文采用紧组合方案,将 GNSS 原始观测值(伪距和载波相位)与 INS 比力、角速度测量值在观测层面融合,其优势在于:可用卫星少于 6 颗时仍可通过

残余观测值更新 INS 状态、延缓惯性漂移，INS 的速度与姿态信息可辅助 GNSS 接收机缩小搜索空间、加快模糊度固定。

在星基增强模式下紧组合的意义更为显著。星基增强收敛时间一般为数分钟，收敛完成前 GNSS 定位精度较低，此时 INS 的高短期精度可提供过渡阶段的可靠定位输出，收敛完成后系统自动切换至高精度 GNSS/INS 组合模式，这种“INS 先行、GNSS 接力”的工作方式有效弥补了星基增强收敛慢的不足。基于卡尔曼滤波的状态估计器融合两类传感器信息，状态向量涵盖位置、速度、姿态、加速度计零偏和陀螺仪零偏共 15 个状态量。实测数据表明（见表 1），GNSS 信号中断 30 秒时，紧组合方案定位误差增长控制在 0.5m 以内，较松组合方案降低约 60%。

表1 紧组合与松组合方案性能对比

性能指标	松组合方案	紧组合方案
最小可用卫星数	4颗	1颗
GNSS中断30s定位误差	~1.2m	<0.5m
模糊度固定速度	标准	提升约30%
城市峡谷可用性	较低	显著提升

3.3 星基增强 L-Band 转 VRS 差分信息算法

本文提出 L-Band 转 VRS 差分信息算法，在服务端将星基增强差分数据转换为 VRS 格式，使现有 RTK 设备无需硬件改动即可接收星基增强服务。算法本质是在服务端建立虚拟参考站，用户终端上报概略位置后，服务端利用星基增强提供的精密轨道、钟差、大气延迟改正参数，模拟生成该位置的 VRS 差分数据，其格式与地基增强系统播发数据完全一致，用户终端体验无差异。

算法实现的关键技术环节包括：虚拟观测值生成模型需精准模拟各类误差源影响，保证生成数据与真实 VRS 数据统计特性一致；大气延迟内插与外推模型在参考站覆盖范围外需维持较高精度，这是星基向地基格式转换的难点。L-Band 转 VRS 路由器负责接收 L 波段卫星信号、完成协议转换后经互联网推送 VRS 数据，支持多用户并发接入。

4 系统实现与验证

基于上述关键技术，研发出星地一体化增强服务系统、通用型组合导航定位模块、L-Band 转 VRS 差分信息路由器三类产品（见表 2），并进行了性能测试与验证。星地一体化增强服务系统部署于云端服务器集群，集成星基与地基增强数据处理模块，设计容量支持百万级用户并发，服务可用性优于 99.9%。通用型组合导航定位模块采用北斗 /GNSS 多频芯片与 MEMS 惯性器件集成设计，星基模式水平精度优于 5cm，地基模式优于 2cm。L-Band 转

VRS 路由器配备 L 波段接收天线与 4G/5G 通信模块，覆盖半径约 5km，单台设备可同时为 20 台终端提供服务。

表2 主要产品技术指标

产品	核心指标	定位精度	备注
星地一体化增强服务系统	百万级并发，可用性>99.9%	星基<5cm/地基<2cm	云端部署
通用型组合导航模块	35×25×8mm，<1.5W	星基<5cm/地基<2cm	支持紧组合
L-Band转VRS路由器	覆盖5km，20终端并发	水平<4cm/垂直<6cm	收敛约8min

5 示范应用

为验证星地一体化增强系统的实际适用性，为此选取智慧物流作为示范应用领域，与某通速递合作开展基于星基增强的无人配送车导航定位试验。试验场景涵盖园区内部道路、城市开放道路、郊区公路等多种路况。在园区内部道路场景中，因建筑物遮挡导致可见卫星减少，纯 GNSS 定位频繁中断，而北斗 /INS 紧组合方案有效保证了定位连续性，楼宇间定位精度维持在 10cm 以内。在郊区公路场景下，地基增强覆盖不足，系统自动切换至星基增强模式，无人车横向偏差不超过 15cm。星地切换测试中，车辆从地基覆盖区驶入星基覆盖区过渡平滑，无定位跳变或轨迹异常。试运行期间，搭载本文系统的无人配送车累计行驶超 5000 公里，定位可用率高于 98%。

6 结语

星地一体化增强系统融合了星基广域服务能力与地基快速定位优势，星地切换定位精度跳变控制在 1cm 以内，紧组合导航在 GNSS 信号中断 30 秒条件下定位误差增长低于 0.5m，L-Band 转 VRS 技术使现有 RTK 设备无需更换硬件即可获取星基增强服务。后续工作将聚焦低轨增强星座融合、多源传感器深度耦合、面向海量用户的云边协同服务架构等方面。

参考文献：

[1] 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.

[2] 黄永帅, 史俊波, 欧阳晨皓等. 千寻北斗地基增强网络下的实时观测数据解码及定位性能分析[J]. 测绘通报, 2017(09): 11-14. DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2017.0277.

[3] 王雷, 倪少杰, 王飞雪. 地基增强系统发展及应用[J]. 全球定位系统, 2014, 39(04): 26-30. DOI: 10.13442/j.gnss.1008-9268.2014.04.007.

作者简介：李小龙（1986-），汉族，江苏徐州，本科，中级工程师，研究方向：CORS、PPP 等卫星导航定位相关技术。