

# 多源 GNSS 广域增强系统性能白皮书

## 概述

GNSS 广域增强系统是 GNSS 卫星导航系统的一个重要组成部分，用于提供 GNSS 卫星导航系统增强定位精度和完好性的服务。本文对目前国内已开展广域增强项目研究的三家单位的产品进行了简要介绍，概述了利用这些增强产品进行精密单点定位（PPP）的数据处理方法。最后，采用实测数据对三个增强源的产品性能进行了测试评估。

## 广域增强数据源

采用的广域增强产品来自三个数据源，分别是北斗星基增强系统（以下简称北斗星基）、北斗地基增强系统（以下简称北斗地基）以及千寻位置广域增强系统（以下简称千寻）。

北斗星基提供的改正参数包括卫星钟差参数、卫星轨道参数、分区综合改正参数以及电离层格网参数，增强参数通过北斗 GEO 卫星 D2 导航电文下发给用户。目前仅支持 BDS 单系统服务。

北斗地基以标准 RTCM 数据流提供 SSR 参数，包含了卫星轨道改正参数以及卫星钟差改正参数。目前增强参数通过网络播发，支持 GPS 和 BDS 双

系统服务。

由千寻开发的广域增强系统以标准 RTCM 数据流提供 SSR 参数，包含了卫星轨道改正参数、卫星钟差改正参数以及码偏差参数。目前增强参数通过网络播发，支持 GPS、GLONASS 和 BDS 三系统，本文对 GPS 和 BDS 双系统性能进行评估。

## 广域增强定位

用户端利用伪距和相位观测数据，使用广播星历结合获取的广域增强数据产品进行实时动态 PPP 解算，基本原理如图 1 所示。

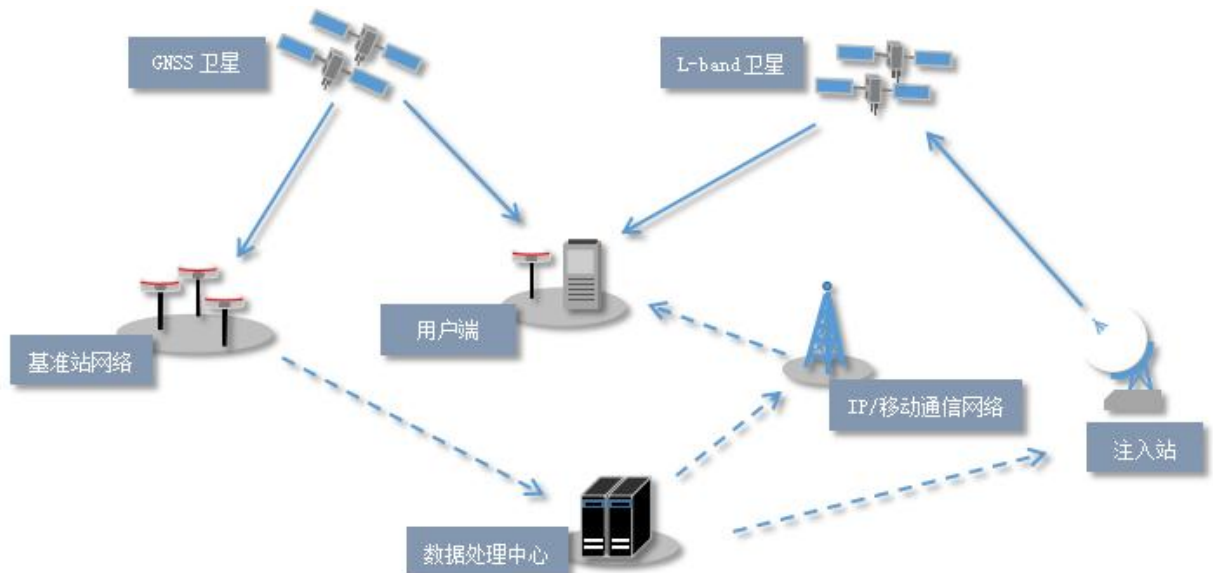


图 1 GNSS 广域增强系统工作原理

基准站网络实时跟踪接收 GNSS 卫星，获取导航电文和原始观测数据，并将这些数据传输至数据处理中心。数据处理中心解算并生成广域差分改正信息，或者通过网络提供给用户使用，或者传输给注入站上注至 L 波段卫星，然后再广播给授权用户使用。用户通过不同途径获取广域增强信息，并汇同导航电文以及原始观测数据进行实时 PPP 解算。

## PPP 数据处理策略

PPP 采用单点定位的方法获取测站坐标，因此必须对其中涉及的误差项逐一进行考虑，误差项及其处理策略见表 1

误差项	处理策略
卫星轨道	广域增强参数
卫星钟差	广域增强参数
群延迟	广播星历参数
相对论效应	模型修正
电离层延迟	Iono-free 组合消除一阶项
对流层延迟	模型修正+参数估计
固体潮	模型修正
接收机钟差	参数估计
相位偏差	参数估计
观测噪声	滤波

表 1 PPP 误差项及处理策略

PPP 解算采用双频无电离层组合观测方程,考虑相对论效应、对流层延迟、固体潮等误差,采用扩展 Kalman 滤波 (EKF) 进行参数估计,相位整周模糊度按浮点解处理。

卫星段误差主要包括卫星轨道、卫星钟差、群延迟效应、相对论效应等。其中,群延迟通过广播星历群延迟参数进行修正,不同导航系统的群延迟参数应用方法不同,具体参考相应系统的接口控制文件 (ICD)。相对论效应应用相关的模型进行修正。卫星轨道和卫星钟差误差则需要通过各个广域增强源提供的改正参数进行修正。

大气误差主要包含了电离层延迟和对流层延迟。当采用双频无电离层组合观测值时,电离层延迟的一阶项会被消去,此时在观测方程中可不再额外考虑电离层延迟残余量。对流层延迟稳定的干分量部分通过 Saastamonien 模型进行修正,对于变化较快的湿分量部分,则将其作为未知参数进行估计。

测站位移误差主要来自固体潮,这部分使用模型进行修正。接收机钟差作为未知参数进行估计。

参数估计采用扩展的 Kalman 滤波模型 (EKF),滤波的状态向量包含了测站坐标、接收机钟差、对流层参数、相位模糊度参数,观测噪声经过滤波将被削弱。

## 性能评估

用户性能评估主要考察定位精度和收敛时间两个方面。测试采用静态观测点,接收机安置于开放空域,观测条件良好。针对三个增强数据源分别进行 24h 实时动态 PPP 解算,观测数据采样率均为 1Hz。

### 定位精度

定位精度衡量实测用户位置与真实用户位置的接近程度,是刻画定位结果优劣最直接的指标。本文采用均方根误差 (RMS) 和 95% 误差进行统计分析,为体现收敛后的完全定位精度,统计均去除定位开始后 2h 内的结果。图 2a-2c 分别给出了基于三种增强源的北斗双频定位评测结果。

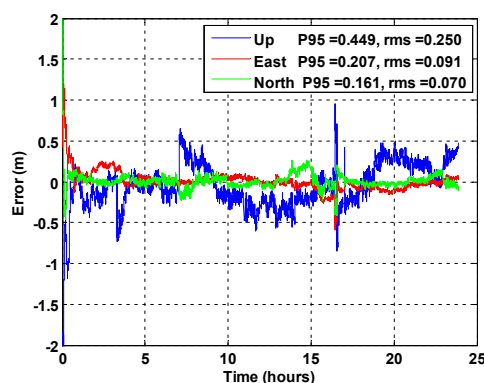


图 2-a 基于北斗星基增强系统的北斗双频定位结果

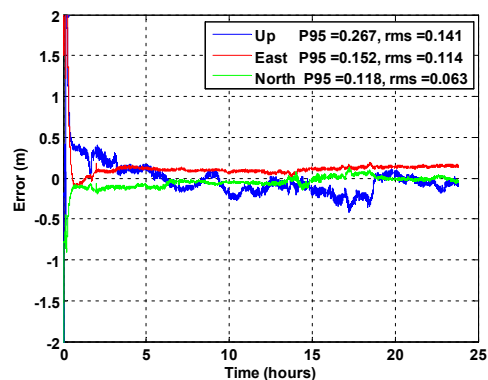


图 2-b 基于北斗地基增强系统的北斗双频定位结果

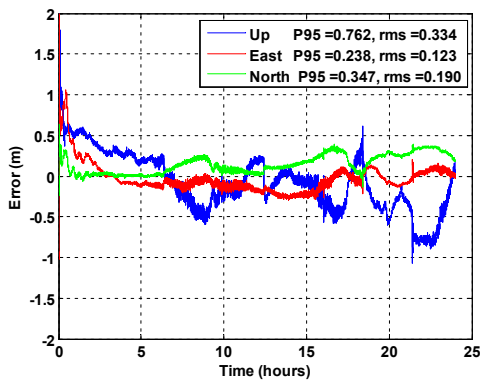


图 2-c 基于千寻位置广域增强系统的北斗双频定位结果

当采用 BDS 单系统时，在平面精度上，北斗地基和北斗地基表现较好，收敛后在 0.1m 左右，千寻的表现相对较差，起伏波动较明显。在垂向精度上，北斗地基精度最高，优于 0.2m，北斗地基其次，约 0.25m，最后是千寻。

图 3a-3b 分别给出了基于北斗地基和千寻两种增强源的 GPS 双频定位评测结果。

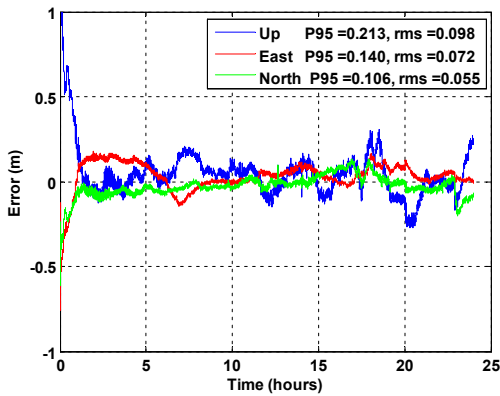


图 3-a 基于北斗地基增强系统的 GPS 双频定位结果

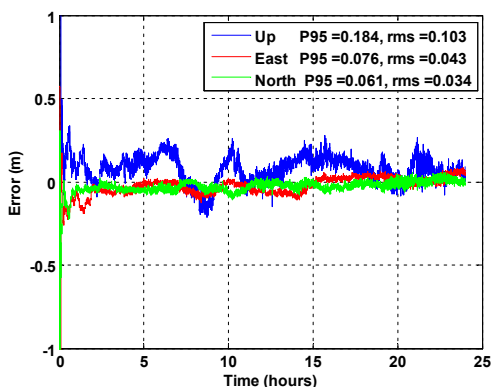


图 3-b 基于千寻位置广域增强系统的 GPS 双频定位结果

当采用 GPS 单系统时，在平面精度上，两者都优于 0.1m，千寻的略好，且结果更为平稳；在垂向精度上，千寻和北斗地基的表现相当，均在 0.1m 左右。

图 4a-4b 分别给出了基于北斗地基和千寻两种增强源的 GPS/BDS 组合双频定位评测结果。

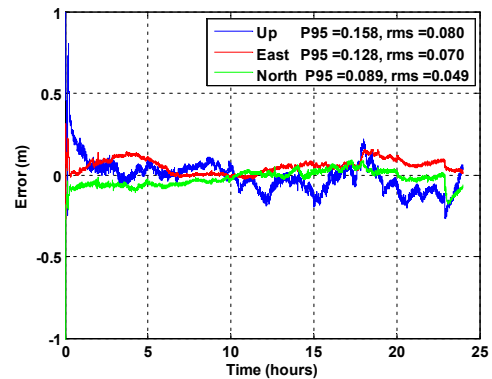


图 4-a 基于北斗地基增强系统的 GPS/BDS 组合双频定位结果

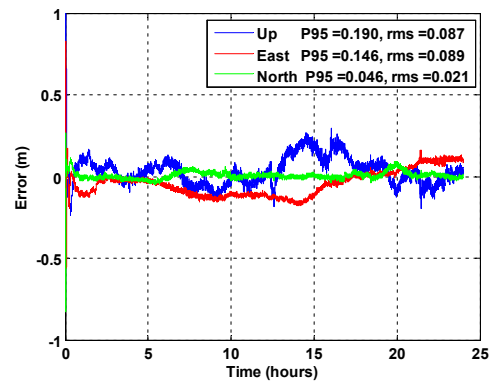


图 4-b 基于千寻位置广域增强系统的 GPS/BDS 组合双频定位结果

当 GPS 和 BDS 组合定位时，在平面精度和垂向精度上，北斗地基和千寻均优于 0.1m，可以认为两者的定位精度表现是相当的，不存在显著差别。

### 收敛时间

为了衡量定位收敛速度表现，对基于不同增强源的不同定位模式下定位收敛时间进行了统计，见图 5a-5c。

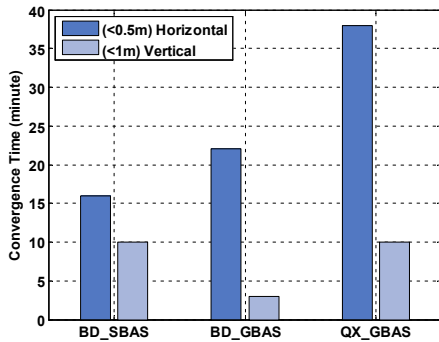


图 5-a 基于三种增强源的 BDS 双频定位收敛时间

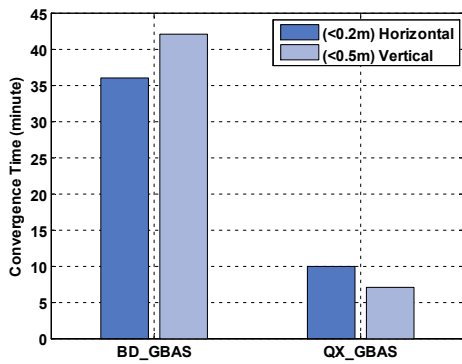


图 5-b 基于两种增强源的 GPS 双频定位收敛时间

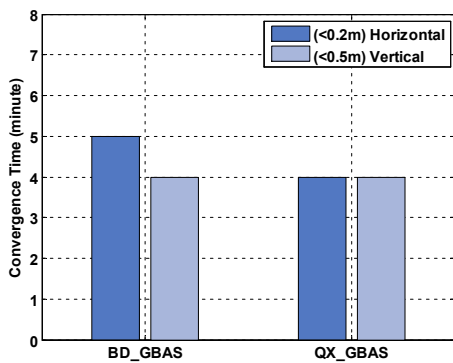


图 5-c 基于两种增强源的 GPS/BDS 组合双频定位收敛时间

从图 5a 中可以看出,在进行 BDS 单系统定位时,平面精度收敛至 0.5m 以内,北斗星基的收敛时间表现最好,少于 20min,北斗地基其次,少于 25min,千寻表现最差,在 35-40min 之间。垂向精度收敛至 1m 以内时,北斗地基表现最优,收敛时间少于 5min,北斗星基和千寻相当,约为

10min。

进行 GPS 单系统定位时,平面精度收敛至 0.2m 以内,垂向精度收敛至 0.5m 以内,千寻的表现均明显优于北斗地基,千寻平面收敛时间约为 10min,垂向则优于 10min;北斗地基平面收敛时间在 35-40min 之间,垂向收敛时间在 40-45min 之间。

进行 GPS 和 BDS 组合定位时,在垂向收敛时间上,北斗地基和千寻的表现是相当的,都约为 4min;垂向收敛时间千寻略好于北斗地基,前者约为 4min,后者约为 5min。

总体上,当采用 BDS 单系统时,北斗星基和地基表现相当,定位精度和收敛时间互有高下,相差不大,千寻的表现相对差一些。涉及到 GPS 系统时,北斗星基不参与比较。当采用 GPS 单系统时,千寻在精度上略好于北斗地基,在收敛速度上则明显优于北斗地基;当采用 GPS 和 BDS 组合定位时,北斗地基和千寻两者在定位精度和收敛时间上均相当,不存在明显差距。

## 总结

广域增强系统为高精度导航定位带来了新的可能。从本文评测的三种增强源结果看，北斗单系统的用户定位表现稍差，无论从收敛时间还是收敛后的精度，但仍然能够提供分米级的定位精度，收敛时间也大多优于 30min，能够满足很多应用需求。GPS 单系统普遍可以达到平面优于 0.1m，垂向 0.1m 左右的精度，但在收敛时间上，不同数据源的表现存在较大差别，千寻位置的可以做到 10min 即可收敛。双系统对定位精度的贡献相对于 GPS 单系统是有限的，或者不能判定为

有所改善。双系统表现出的优势主要是对收敛速度的提升，参与评测的两个数据源双系统定位收敛时间均能达到 5min 左右。

影响定位精度和收敛时间的因素很多，包括增强数据产品的质量、可用卫星数、卫星构型等等，一部分可以通过优化算法来实现更好的表现，也存在一些问题无法很好地规避。

目前来看，基于多源 GNSS 广域增强系统的用户端系统可以通过卫星或移动通信网络方便地接收广域增强信息，从而实现高精度的单站定位服务，因此在多个领域存在应用前景。