

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2023.04.012

# 基于原始观测值的 UWB 增强 GNSS 精密单点定位方法研究

龙宸君, 吴宗洲, 申志恒

(武汉大学测绘学院, 武汉 430072)

**摘要:**全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)可提供全球范围内全天候高精度导航、定位和授时服务。以精密单点定位(precise point positioning, PPP)为代表的绝对定位技术凭借定位精度高且全球一致、作业范围灵活等优势受到广泛关注,但是较长的收敛时间,限制了其在实时、快速精密定位应用中的使用。为解决上述问题,提出了超宽带(ultra-wideband, UWB)增强 PPP 方法,在多星座 PPP 中紧密集成 UWB 测距信息,以提高 GNSS PPP 性能。实验结果表明,在动态场景下,融合 UWB 量测使 GPS/GAL 双系统 PPP 在东、北、天 3 个方向的位置均方根(root mean square, RMS)值分别减少了 76.99%、21.46%、64.53%, GPS/GAL/BDS 三系统 PPP 减少了 69.69%、37.21%、61.32%,并且收敛时间分别加快 62.78%和 57.75%。关于锚点数(几何构型)的评估表明,仅利用 4 个锚点就能将双系统和三系统 3D 误差 RMS 值减少 67.98%、59.35%,收敛时间加快 76.14%、62.68%,达到成本和性能综合最优的增强效果。

**关键词:**精密单点定位;超宽带;收敛时间;传感器融合;锚点数目

中图分类号:TN96;P228.4;V474 文献标志码:A 文章编号:2095-8110(2023)04-0123-09

## UWB enhanced GNSS precise point positioning based on raw measurements

LONG Chenjun, WU Zongzhou, SHEN Zhiheng

(School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Global satellite navigation system(GNSS) can provide all-round and high-precision navigation, positioning and timing services around the world. Absolute positioning technology represented by precise point positioning(PPP) has attracted widespread attention due to its advantages of high accuracy, global consistency and flexible operating range. But the long convergence time limits its use in real-time and fast precision positioning applications. In order to solve the problems, an ultra-wideband(UWB) enhanced PPP method is proposed, which tightly integrates UWB and PPP to improve the positioning accuracy. The experimental results show that in the dynamic scenario, the proposed method reduces the root mean square(RMS) values of the PPP result of the GPS/GAL system by 76.99%, 21.46%, 64.53%, and the GPS/GAL/BDS systems by 69.69%, 37.21% and 61.32%, in east, north and up directions, with their convergence time being shortened by 62.78% and 57.75%, respectively. The evaluation of anchor points number, which also represents geo-

收稿日期:2023-02-14;修订日期:2023-04-06

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41974027)

作者简介:龙宸君(2002-),男,本科生,主要从事导航工程方面的研究。

通信作者:吴宗洲(1999-),男,硕士研究生,主要从事多传感器组合导航方面的研究。

metric configuration, shows that the RMS values of the 3D error of the GPS/GAL and GPS/GAL/BDS systems can be reduced by 67.98% and 59.35%, and the convergence time can be shortened by 76.14% and 62.68% with only 4 anchors, so as to achieve the enhancement effect of the best comprehensive cost and performance.

**Key words:** Precise point positioning; Ultra-wideband; Convergence time; Sensor fusion; Anchor number

## 0 引言

随着数字地球和智慧城市的迅速发展,人们对位置服务的需求越来越迫切<sup>[1]</sup>,基于全球导航定位系统(global navigation satellite system,GNSS)的卫星定位技术得到了充分研究<sup>[2-4]</sup>。相比于差分形式的卫星定位技术,精密单点定位(precise point positioning, PPP)技术利用单台 GNSS 接收机伪距、载波相位观测值、高精度卫星轨道和钟差产品即可实现全球范围内的高精度定位<sup>[5]</sup>,具有作业范围灵活、作业条件简单等优势。然而,由于计算能力的限制,PPP 在实际应用中存在局限性,一方面,PPP 需要数十分钟的收敛时间<sup>[6]</sup>来获得厘米级的定位精度,另一方面,复杂的卫星观测条件和不同精度的精密产品<sup>[7]</sup>也会导致 PPP 结果的重收敛。同时,在一些观测环境较复杂的地区,GNSS 还存在信号强度低、容易失锁、观测不足、多路径效应严重<sup>[8]</sup>等问题。

针对 PPP 的上述挑战,采用 UWB 增强 GNSS 的方案,通过架设 UWB 基站提高 PPP 解的精度、缩短收敛时间。超宽带(ultra-wideband, UWB)定位技术是一种利用窄脉冲、在理论上达到厘米级精度的非载波通信技术<sup>[9]</sup>,具有时间分辨率高、抗多径干扰能力强、安全性能优越等优点,广泛地用于测距、室内定位、多机器人协同等方面<sup>[10]</sup>。基于到达时间(time of arrival, TOA)的 UWB 定位原理与 GNSS 相似,都利用了测距信息,通过空间后方交会得到移动站的位置。而且 UWB 不存在相位模糊度<sup>[11]</sup>,测距精度一般优于伪距。因此 UWB 具备潜在的 GNSS 增强性能。

目前利用 UWB 增强 GNSS 定位的研究中,CHIU<sup>[12]</sup>等提出在复杂的城市环境下进行 UWB/GNSS 紧组合定位并使用 UWB 距离测量值来增强 GPS-RTK,但其在运动状态下只能达到米级的定位精度。周振南<sup>[13]</sup>等对北斗卫星导航系统和 UWB 松组合定位方法展开研究,利用扩展卡尔曼滤波器对定位误差状态进行最优估计,提高了系统从室外到室内定位的连续性与定位结果的可用性。Mac-

Gougen<sup>[14]</sup>等研究了用于精密定位的 GPS/UWB 紧组合模型,证实了浮点解可以达到亚米级精度、缩短了固定解的收敛时间。然而,探讨 UWB 增强 PPP 的研究资料非常稀缺,并且对于 GNSS 和 UWB 接收机的测量参考点的不一致性,大部分研究是通过相位中心高差、卫星的高度角和方位角<sup>[15]</sup>或者相关性函数<sup>[16]</sup>进行改正,而这会给获取 GNSS 框架下绝对坐标带来误差,因此本文聚焦于 UWB 增强 PPP 方法,同时顾及到系统成本等因素,进一步评估了 UWB 锚点数对系统定位性能的影响。

本文提出一种基于原始观测值层面 UWB 增强 PPP 的定位方法,首先阐述精密单点定位和 UWB 定位原理,通过姿态变换统一传感器参考点,实现观测值层面上的传感器紧密集成。根据实际采集的低成本传感器数据,通过解算比较验证了提出方法的可行性和有效性,并对不同锚点数的效果,综合成本因素选取最佳锚点数,为本方法的工程实施应用提供了思路。

## 1 方法

### 1.1 精密单点定位原理

GNSS 伪距和载波相位原始观测方程为

$$P = \rho_r^s - ct^s + ct_r + I + T + e \quad (1)$$

$$L = \rho_r^s - ct^s + ct_r - I + T + N\lambda + \epsilon \quad (2)$$

式中, $P$ 和 $L$ 分别表示伪距和相位原始观测值, $\rho_r^s$ 为站星间真实几何距离, $I$ 和 $T$ 分别为电离层延迟和对流层延迟, $N$ 为载波相位模糊度, $t^s$ 和 $t_r$ 分别为卫星钟差和接收机钟差, $c$ 为光速, $\lambda$ 为信号波长, $e$ 和 $\epsilon$ 分别表示伪距和相位的观测误差。

采用无电离层(ionosphere-free, IF)组合消除伪距和相位观测值的电离层延迟一阶项,对流层延迟误差中的湿延迟误差通过引入未知参数进行估计,干延迟误差通过 Saastamoinen 模型改正<sup>[17]</sup>,其观测方程如下

$$P_{IF} = \tilde{\rho}_r^s - ct^s + ct_r + M \cdot zpd + e_{IF} \quad (3)$$

$$L_{IF} = \tilde{\rho}_r^s - ct^s + ct_r + M \cdot zpd + N_{IF} + \epsilon_{IF} \quad (4)$$

式中,  $\mathbf{P}_{IF}$  为无电离层组合伪距观测值,  $\mathbf{L}_{IF}$  为无电离层组合载波相位观测值,  $\tilde{\rho}_r^s$  为接收机位置到卫星位置的真实几何距离,  $t_r$  和  $t^s$  分别为接收机钟差和卫星钟差,  $\mathbf{N}_{IF}$  为无电离层组合模糊度,  $M$  为投影函数,  $zpd$  为天顶方向对流层湿延迟,  $\mathbf{e}_{IF}$  和  $\boldsymbol{\varepsilon}_{IF}$  分别为两种组合观测值的观测噪声。

卫星位置和卫星钟差通过精密卫星轨道和钟差产品获取,接收机位置、接收机钟差、无电离层组合模糊度、天顶方向对流层延迟参数和不同的卫星系统间存在的系统间偏差等未知参数的处理方法如表1所示。

表1 PPP参数处理策略

Tab. 1 PPP parameter processing strategy

未知参数	动态定位
接收机位置	白噪声
接收机钟差	白噪声
模糊度	无周跳,随机常数发生周跳,重置模糊度
天顶方向对流层湿延迟	随机游走模型
系统间偏差	随机常数

将表1的参数写成列矢量的形式如下

$$\mathbf{x} = [\delta\mathbf{r} \quad \delta t_r \quad ISB \quad zpd \quad \mathbf{N}]^T \quad (5)$$

式中,  $\delta\mathbf{r}$  表示接收机位置误差,  $\delta t_r$  表示接收机钟差,  $ISB$  表示系统间偏差<sup>[18]</sup>,  $zpd$  表示天顶方向对流层湿延迟,  $\mathbf{N}$  表示模糊度。

考虑不同卫星星座观测值的差异,因此一般对不同星座采用不同的权比,具体数值由经验值确定。对于同一卫星系统内的卫星,由于观测噪声与卫星高度角有明显的相关性,一般采用与高度角相关噪声模型<sup>[19]</sup>。本文采用的高度角定权模型如下

$$\sigma^2 = a^2 + b^2 \cos^2\theta \quad (6)$$

式中,  $\theta$  为卫星高度角,  $a$  和  $b$  为常数,一般通过拟合或者经验值给定,对于观测值线性组合,可通过误差传播理论确定其方差。在式(6)以高度角为定权的基础上,再将载波相位和伪距的权比设为100:1。

## 1.2 UWBTOA 定位原理

UWB通过测量信号从定位标签(tag)发出到邻近锚点(anchor)的时间,即可获得标签到锚点天线的距离观测值,根据几何定位原理求得标签的位置。其观测方程如下

$R_{i,T} =$

$$\sqrt{(X_i - X_T)^2 + (Y_i - Y_T)^2 + (Z_i - Z_T)^2} + \nu \quad (7)$$

式中,  $R_{i,T}$  表示标签到第  $i$  号锚点的距离观测值,  $(X_i, Y_i, Z_i)$  表示第  $i$  号锚点的坐标值,  $(X_T, Y_T, Z_T)$  表示标签的坐标值,  $\nu$  表示距离观测值误差。将上式线性化后,得到式(8)

$$\delta R_{i,T} = \frac{X_T - X_i}{\rho_{i,T}} \delta X_T + \frac{Y_T - Y_i}{\rho_{i,T}} \delta Y_T + \frac{Z_T - Z_i}{\rho_{i,T}} \delta Z_T + \nu \quad (8)$$

式中,  $\delta R_{i,T}$  表示距离的观测值减去距离的计算值,  $\delta X_T, \delta Y_T, \delta Z_T$  表示标签三维坐标误差,  $\rho_{i,T}$  表示标签到锚点的距离的计算值。将所有UWB锚点的观测方程集成为一个观测方程

$$\delta\mathbf{R} = \mathbf{V}\delta\mathbf{r} + \mathbf{v} \quad (9)$$

式中,  $\delta\mathbf{R}$  表示所有UWB锚点距离的观测值减去距离的计算值,  $\mathbf{V}$  表示其对应的方向余弦矩阵集合,  $\delta\mathbf{r}$  表示坐标误差,  $\mathbf{v}$  表示每个锚点的距离观测值误差集合矢量。

UWB观测值采用接收信号强度(RSSI)进行定权,模型如下

$$\sigma_d = \sigma_0 \cdot \sqrt{10^{-\frac{RSSI}{10}}} \quad (10)$$

式中,  $RSSI$  为当前UWB观测值的信号强度,  $\sigma_0$  为经验测距误差。

## 1.3 PPP/UWB 紧组合系统

由于实际安装时,UWB和GNSS天线相位中心无法保持完全一致(图1),需要将UWB和GNSS测量的参考点统一后进行解算。

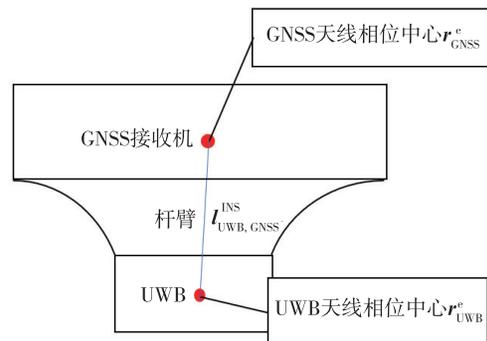


图1 天线相位中心及杆臂示意图

Fig. 1 Sketch map of antenna phase center and arm lever

我们利用航姿参考系统(attitude and heading reference system, AHRS)提供载体的姿态信息,将RTK/INS的姿态解作为载体的姿态,通过测量的GNSS和UWB空间杆臂,将二者参考中心进行了统一<sup>[20]</sup>,公式如下

$$\mathbf{r}_{\text{GNSS}}^e = \mathbf{r}_{\text{UWB}}^e + \mathbf{C}_{\text{INS}}^e \mathbf{l}_{\text{UWB,GNSS}}^{\text{INS}} \quad (11)$$

式中,  $e$  代表地心地固坐标系 (Earth-centred Earth fixed, ECEF), INS 表示载体坐标系,  $\mathbf{C}_{\text{INS}}^e$  表示将载体坐标系转到地心地固坐标系的旋转矩阵,  $\mathbf{r}_{\text{GNSS}}^e$  表示 GNSS 天线相位中心坐标,  $\mathbf{r}_{\text{UWB}}^e$  表示 UWB 天线相位中心坐标,  $\mathbf{l}_{\text{UWB,GNSS}}^{\text{INS}}$  表示 GNSS 天线相位中心到 UWB 天线相位中心的杆臂。

将式(11)作误差扰动分析, 可得

$$\delta \mathbf{r}_{\text{GNSS}}^e = \delta \mathbf{r}_{\text{UWB}}^e + \dot{\mathbf{C}}_{\text{INS}}^e \mathbf{l}_{\text{UWB,GNSS}}^{\text{INS}} + \mathbf{C}_{\text{INS}}^e \delta \mathbf{l}_{\text{UWB,GNSS}}^{\text{INS}} \quad (12)$$

姿态是通过 RTK/INS 的解获取, 上式中  $\dot{\mathbf{C}}_{\text{INS}}^e$  约等于 0, 而杆臂先验测量精度足够,  $\delta \mathbf{l}_{\text{UWB,GNSS}}^{\text{INS}}$  误差也可以忽略不计, 因此两个天线相位中心的误差是等价的。将 UWB 天线相位中心位置按式(11)传递到 GNSS 天线相位中心位置, UWB 每个锚点的  $\delta R$  的计算转化为式(13)

$$\delta R = R_{\text{UWB}} - |\mathbf{r}_{\text{Anchor}} - (\mathbf{r}_{\text{GNSS}}^e - \mathbf{C}_{\text{INS}}^e \mathbf{l}_{\text{UWB,GNSS}}^{\text{INS}})| \quad (13)$$

式中,  $R_{\text{UWB}}$  表示 UWB 距离的测量值,  $\mathbf{r}_{\text{Anchor}}$  表示锚点的位置。合并 GNSS 和 UWB 的观测信息形成紧组合系统, 组合后的观测方程如下

$$\begin{bmatrix} \mathbf{P}_{\text{IF}} - \boldsymbol{\rho}_r^s \\ \mathbf{L}_{\text{IF}} - \boldsymbol{\rho}_r^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{U} & 1 & \mathbf{n} & M & 0 \\ \mathbf{U} & 1 & \mathbf{n} & M & 1 \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} \mathbf{e}_{\text{IF}} \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{IF}} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\delta \mathbf{R} = [\mathbf{V} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \mathbf{x} + \mathbf{v} \quad (15)$$

式中,  $\mathbf{P}_{\text{IF}}$  表示 GNSS 天线相位中心到卫星的 IF 伪距观测值,  $\mathbf{L}_{\text{IF}}$  表示 GNSS 天线相位中心到卫星的 IF 相位观测值,  $\boldsymbol{\rho}_r^s$  表示距离估计值,  $\mathbf{x}$  为式(5)列矢量,  $\mathbf{U}$  表示 GNSS 天线相位中心到卫星的方向余弦,  $\mathbf{n}$  表示系统间偏差系数, 若卫星系统为 GPS, 则  $n=0$ , 否则  $n=1$ ,  $M$  为投影函数,  $\mathbf{e}_{\text{IF}}$ 、 $\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{IF}}$  为伪距和相位的观测噪声。  $\delta \mathbf{R}$  表示所有 UWB 锚点按式(13)计算得到的矢量。  $\mathbf{V}$  表示 GNSS 天线相位中心到 UWB 锚点的方向余弦,  $\mathbf{v}$  表示距离观测值误差。

基于扩展的卡尔曼滤波 (extended Kalman filter, EKF), 随机模型采用 1.1 和 1.2 节所述定权方法, 合并式(13)和式(14)联合估计, 即可实现基于原始 GNSS 和 UWB 观测值的紧组合。

## 2 实验验证

为验证 UWB 增强精密单点定位方法, 对小推车在校园广场上采集的一组动态数据分别进行多系统 PPP 和 UWB 增强 PPP, 分析得到的定位结果。采集环境如图 2 所示, 由于环境开阔, 地面真值通过厘米级的 RTK/INS 解获取。使用的 8 个 UWB 锚点的分布及小车运行轨迹如图 3 所示。该算法的实现基于

武汉大学测绘学院开发的 GREAT (GNSS + Research, application and teaching) 软件。



图 2 采集环境

Fig. 2 The environment of collection

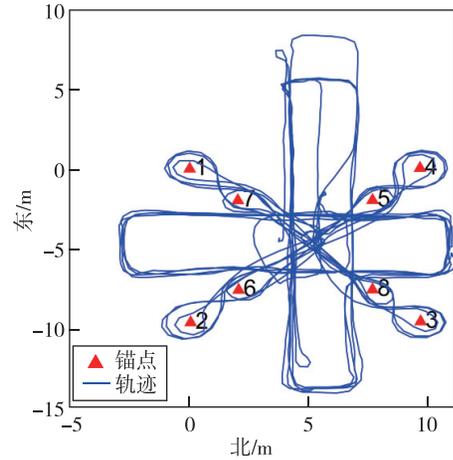


图 3 锚点分布与实验轨迹

Fig. 3 Anchor distribution and experimental trajectories

采集 UWB 的设备型号为 Nooploop LinkTrack P-B, 使用了如图 3 所示的 8 个锚点, 测距残差如图 4, 从图中可以看出, 大部分静态定位在  $\pm 0.2$  m, 动态定位在  $\pm 0.5$  m。GNSS 接收机型号为 u-blox ZED-F9P, 多 GNSS 天线型号为 HT-3701B。为模拟验证实时应用中的性能, 本文采用法国国家空间研究中心 (Centre National D'Etudes Spatiales/National Centre for Space Studies, CNES) 发布的实时存档 GNSS 精

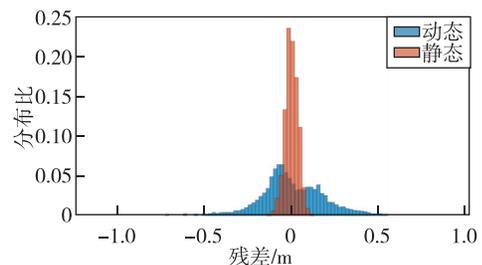


图 4 UWB 定位残差

Fig. 4 UWB positioning residuals

密产品<sup>[21]</sup>。移动小车的姿态信息使用 RTK/INS 解。

### 3 实验结果分析

#### 3.1 数据质量分析

图 5 给出了采集数据的每个历元的可用双频观测值卫星数。由图 5 计算和分析可知,本次实验 GPS、GAL(Galileo)、BDS 平均可用卫星数分别为 5.6,7.9,5.0 颗。除了 400~800 s 和 1 200~1 400 s 这两段时间内 3 个系统卫星数均出现明显减少,其余时间段卫星数量上下波动幅度较小,较稳定。

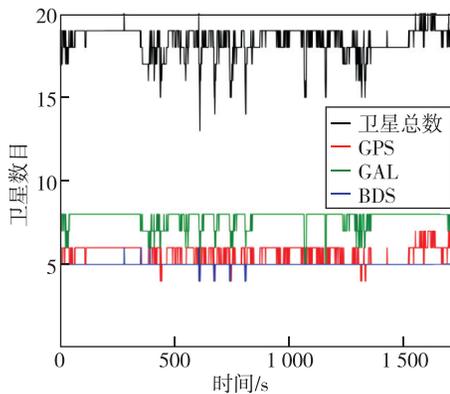


图 5 可用卫星数量

Fig. 5 Number of available satellites

将采集的不同卫星的观测值作周跳探测,结果如图 6 所示,红线即为发生周跳的历元。由图 6 可知,周跳发生的时段集中在 400~800 s 和 1 100~1 300 s,并且在这两个时段,G4、G9、G11、G25、E11、E25 卫星明显存在双频观测值缺失。

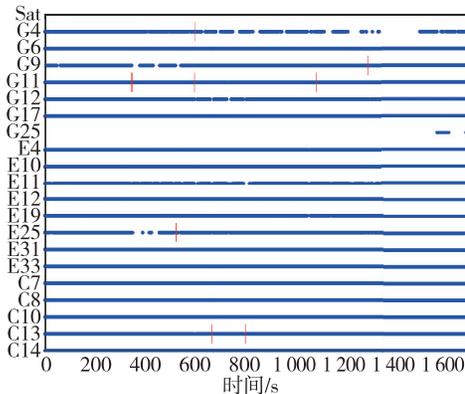


图 6 卫星周跳探测

Fig. 6 Satellite cycleslip sdetction

综上所述,本次实验采集的数据整体质量较好,观测值较完善。卫星数从多到少依次为 Galileo、GPS、BDS 系统。在 400~800 s 时段和 1 100~

1 400 s 时段的数据质量较差,卫星数减少,观测值出现周跳。

#### 3.2 UWB 增强精密单点定位结果

双系统定位结果如图 7 所示,PPP 和 UWB 增强 PPP 的结果在 3 个方向上均发生收敛,且数据未出现残缺。三系统定位结果如图 8,也发生了收敛,定位结果更加稳定。相较于双系统,三系统的垂(U)向更加准确,在 1 000 s 后更加接近于 0,收敛效果更好。从图中可以看出,两组结果的 UWB 增强 PPP 在初始阶段时能够快速地达到较高的精度水平,各个方向均完成了收敛,相较于 PPP 更加稳定,波动幅度更小。

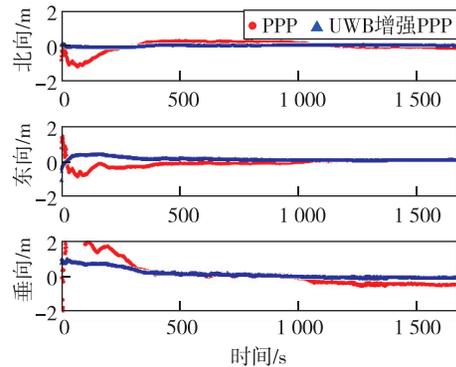


图 7 双系统三方向误差(GPS/GAL)

Fig. 7 Error in three directions ofthe GPS/GAL system

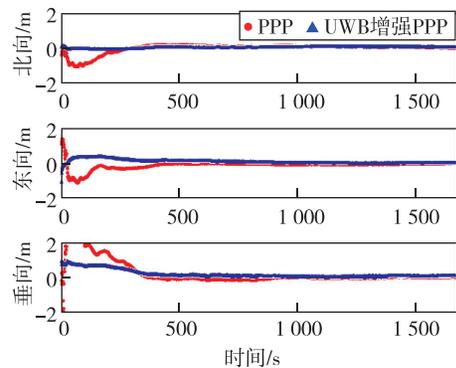


图 8 三系统三方向误差(GPS/GAL/BDS)

Fig. 8 Error in three directions of the GPS/GAL/BDS system

单 GPS 系统东向、北向、垂向误差如图 9 所示。由图可知,PPP 和 UWB 增强 PPP 在 600 s 左右均出现重收敛现象,并且 PPP 结果的垂(U)向存在未收敛的情况,位置误差较大,东(E)和北(N)方向的定位精度在米级到分米级。

由 3.1 可知,GPS 平均可用卫星数 5.6 颗,且在 600~800 s 时段,G4、G11 卫星观测值出现周跳,

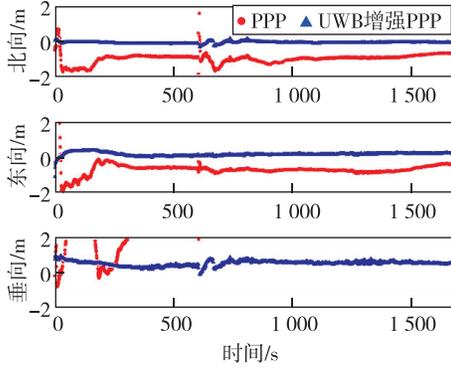


图9 单系统三方向误差(GPS)

Fig. 9 Error in three directions of GPS

G4、G12、G25 双频观测值出现缺失,卫星数在 4~5 颗。观测数据质量较差导致定位结果出现重收敛。尽管是观测数据质量较差的单系统,UWB 增强 PPP 的解算结果相较于 PPP 也更加稳定,波动幅度也相对较小。

计算 3 个方向上误差值的均方根(RMS)作为评定精度的指标,并计算误差值的收敛时间。对于收敛时间的定义为 3D 定位误差从首历元开始,当某一历元的误差在 0.3 m 以内,并且此后连续 5 min 的平均误差也均在 0.3 m 以内,则认为从首历元到该历元的时间为收敛时间。RMS 的计算公式如式(16)所示

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}} \quad (16)$$

计算单系统、双系统、三系统 PPP 和 UWB 增强 PPP 的 RMS 和收敛时间,得到结果如表 2 所示。

表 2 三方向 RMS 值及收敛时间

Tab. 2 The RMS values and convergence time in three directions

系统数	使用方法	E 方向 RMS 值/m	N 方向 RMS 值/m	U 方向 RMS 值/m	收敛 时间/s
1	PPP	1.009	0.804	4.455	—
	UWB+PPP	0.063	0.220	0.580	1 097
2	PPP	0.326	0.233	0.919	1 037
	UWB+PPP	0.075	0.183	0.326	386
3	PPP	0.287	0.258	0.848	748
	UWB+PPP	0.087	0.162	0.328	316

单系统 PPP 的 RMS 值偏大,GPS 可用卫星数不足,定位误差偏大,但通过 UWB 增强后,E、N、U 3 个方向 RMS 值分别减少 0.946、0.584、3.875 m。定位结果较好的双系统和三系统 E、N、U 方向 RMS 值通

过 UWB 增强后,双系统从 0.326、0.233、0.919 m 分别下降到 0.075、0.183、0.326 m,误差分别减少了 0.251、0.050、0.593 m,分别改善了 76.99%、21.46%、64.53%,三系统从 0.287、0.258、0.848 m 分别下降到 0.087、0.162、0.328 m,误差分别减少了 0.200、0.096、0.520 m,分别改善了 69.69%、37.21%、61.32%。并且,单系统 PPP 存在不收敛的情况,经过 UWB 增强后开始收敛。双系统收敛时间从 1037 s 缩短到 386 s,提升了 62.78%,三系统收敛时间从 748 s 缩短到 316 s,提升了 57.75%。以上结果说明,UWB 增强能有效提高 PPP 定位精度,缩短收敛时间。

### 3.3 锚点数量对结果影响

为降低系统成本并顾及 UWB 增强的性能,本节我们探究了锚点数(即几何构型)对 PPP 增强效果的影响。分别使用 UWB 增强双系统、三系统 PPP 定位,通过改变锚点数量(1/2/3/4/8),并按照表 3 选取锚点,得到 3D 位置误差分布函数(cumulative distribution function, CDF)如图 10、图 11。不同锚点数的 3D 定位误差的 RMS 和收敛时间如表 4、表 5 所示。

通过表 4 可知,双系统结果遵循锚点数越多,RMS 值越小,收敛时间越短的规律。8 锚点相较于单锚点,3D 误差的 RMS 值减少了 0.811 m,改善 67.98%,收敛时间加快了 15.9 min,提升 76.14%。

表 3 锚点选取  
Tab. 3 Anchor selection

锚点数	所选锚点
1	4
2	4、6
3	1、4、6
4	1、2、3、4
8	所有锚点

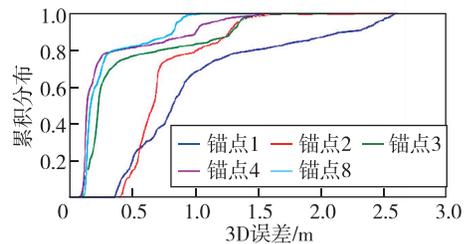


图 10 双系统不同锚点数对定位结果的影响  
Fig. 10 The influence of different anchor points on the positioning results of the GPS/GAL system

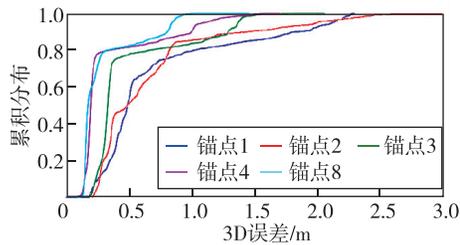


图 11 三系统不同锚点数对定位结果的影响

Fig. 11 The influence of different anchor points on the positioning results of the GPS/GAL/BDS system

表 4 不同锚点数增强双系统 PPP 的位置 RMS 与收敛时间

Tab. 4 The position RMS values and convergence time of different anchor points enhanced GPS/GAL system

锚点数	RMS/m	收敛时间/min
1	1.193	20.88
2	0.804	15.50
3	0.600	6.43
4	0.467	5.20
8	0.382	4.98

表 5 不同锚点数增强三系统 PPP 的位置 RMS 与收敛时间

Tab. 5 The position RMS values and convergence time of different anchor points enhanced GPS/GAL/BDS system

锚点数	RMS/m	收敛时间/min
1	0.925	12.95
2	0.854	10.22
3	0.627	6.10
4	0.470	5.18
8	0.376	4.83

且观察图 10 发现,当锚点数为 3、4、8 时,误差小于 0.5 m 的定位结果占比 75% 至 80%,而当锚点数为 1 和 2 时占比只有 10% 至 30%,说明当锚点数增加到 3 时,定位精度有明显提升。

由图 11 和表 5 可知,三系统结果也遵循锚点数越多,RMS 值越小,收敛时间越短的规律。8 锚点相较于单锚点,3D 误差的 RMS 值减少了 0.549 m,改善 59.35%,收敛时间缩短了 8.12 min,提升 62.68%。当锚点数为 3、4、8 时,误差小于 0.5 m 的定位结果占比 75% 至 80%,当锚点数为 1 和 2 时占比 50%,综合双系统定位结果可知,当锚点数为 1 和 2 时,没有较强的几何构形,UWB 增强 PPP 方法的精度和收敛时间主要取决于 PPP,只有锚点数至少为 3,有较强的几何构型时,才能使结果明显增强。

根据双系统和三系统的定位结果分析可知,随着

锚点数增多,RMS 值变小,收敛时间变短,说明锚点数增多能提高定位精度,并且 3 锚点增强效果明显提升。对双系统而言,从 3 锚点到 4 锚点,RMS 值下降 0.133 m,改善 22.17%,收敛时间加快了 1.18 min,提升 19.17%。8 锚点相较于 4 锚点,锚点数增加到 2 倍,RMS 值只减小了 18.20%,收敛时间只加快了 4.17%,所以考虑到系统成本,双系统推荐采用 4 锚点 UWB 增强;同理,对三系统而言,从 3 锚点到 4 锚点,RMS 值减小了 0.157 m,改善 25.04%,收敛时间加快了 0.92 min,提升 15.03%,从 4 锚点到 8 锚点,RMS 值减小了 0.094 m,改善 20%,收敛时间加快了 0.35 min,提升 6.75%,锚点数增加 1 倍,提升同样不明显。综上,对于低成本接收机而言,仅采用 4 个锚点即可实现明显的增强效果。

## 4 结论

提出了主要应用于小范围场景的 UWB 增强 PPP 高精度定位的方法,通过实际采集的数据,比较了精密单点定位和 UWB 增强的精密单点定位的结果,验证了提出的方法能够有效提高 PPP 的收敛效率和定位精度。考虑到搭建 UWB 基站等额外基础设施需要一定的成本,也对锚点数对定位结果的影响展开了探讨,得出的结果如下:

1) UWB 增强的精密单点定位技术定位精度更高。RMS 的值相比于 PPP 更小,单系统、双系统和三系统每个方向 RMS 值平均减少了 1.802、0.298、0.272 m;收敛时间比 PPP 更短、收敛效果更好。由于可用卫星数过少导致 PPP 不收敛的单系统,经增强后在 1 096 s 发生收敛,双系统收敛时间加快了 651 s,三系统收敛加快了 432 s。

2) 更多的锚点数量会增强锚点的几何构型,从而提高 UWB 增强精密单点定位精度,缩短收敛时间。锚点数从 1 到 8,双系统和三系统的 3D 误差的 RMS 分别减少了 0.811 和 0.549 m,收敛时间加快了 15.9 min 和 8.12 min。充分考虑系统成本、锚点数增加对于定位精度和收敛时间的提升,认为对于支持多个系统的低成本 GNSS 接收机来说,采用 4 个几何构形较好的 UWB 锚点进行 UWB 增强 PPP 方法就有明显的效果。

## 参考文献

- [1] 黄欣荣,潘欧文.“数字中国”的由来、发展与未来[J].北京航空航天大学学报(社会科学版),2021,34(4):99-106.

- HUANG Xinrong, PAN Owen. Origin development and future of digital China[J]. Journal of Beihang University of Aeronautics and Astronautics (Social Science Edition), 2021, 34(4): 99-106(in Chinese).
- [2] LI X, LI Y, XIONG Y, et al. An efficient strategy for multi-GNSS real-time clock estimation based on the undifferenced method[J]. GPS Solutions, 2022, 27(1): 23.
- [3] 李星星, 张伟, 袁勇强, 等. GNSS 卫星精密定轨综述: 现状、挑战与机遇[J]. 测绘学报, 2022, 51(7): 1271-1293.
- LI Xingxing, ZHANG Wei, YUAN Yongqiang, et al. Review of GNSS precise orbit determination: status, challenges, and opportunities[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(7): 1271-1293(in Chinese).
- [4] 黄善琪, 刘傲男, 王继龙. 水环境下 GNSS 多路径消除方法适用性研究[J]. 海洋测绘, 2022, 42(5): 58-63.
- HUANG Shanqi, LIU Aonan, WANG Jilong. A study on the applicability of GNSS multi-path elimination methods in water environment[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2022, 42(5): 58-63(in Chinese).
- [5] MUELLERSCHOEN R J, BAR-SEVER Y E, BERTIGER W I, et al. Decimeter accuracy: NASA's global DGPS for high-precision users[J]. GPS World, 2001, 12(1).
- [6] 王利华, 周定杰, 刘鸿飞, 等. GPS/GLONASS/BDS/Galileo 动态精密单点定位精度及收敛时间分析[J]. 测绘地理信息, 2020, 45(4): 64-69.
- WANG Lihua, ZHOU Dingjie, LIU Hongfei, et al. Analysis on accuracy and convergence time of multi-GNSS kinematic precise point positioning: GPS/GLONASS/BDS/Galileo[J]. Journal of Geomatics, 2020, 45(4): 64-69(in Chinese).
- [7] REN X, CHEN J, LI X, et al. Performance evaluation of real-time global ionospheric maps provided by different IGS analysis centers[J/OL]. GPS Solutions, 2019, 23(4): 113.
- [8] 邵晨, 曾庆化, 邱文旗, 等. GNSS 多径抑制基带处理算法综述[J]. 导航定位与授时, 2022, 9(5): 1-14.
- SHAO Chen, ZENG Qinghua, QIU Wenqi, et al. Overview of GNSS multipath mitigation baseband processing algorithm [J]. Navigation Positioning and Timing, 2022, 9(5): 1-14(in Chinese).
- [9] MAO K, ZHU Q, YE X, et al. UWB channel modeling and simulation with continuous frequency response[J]. China Communications, 2022, 19(11): 88-98.
- [10] 阳士宇. NLOS 环境下基于 UWB 的室内定位算法研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2022.
- YANG Shiyu. Research on UWB-based indoor positioning algorithm in NLOS environment [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2022(in Chinese).
- [11] 曹琢健, 姜维, 蔡伯根, 等. UWB 增强的 GNSS 受限环境下组合导航方法研究[C]// 第十二届中国卫星导航年会论文集——S09 用户终端技术, 2021: 57-64.
- CAO Zhuojian, JIANG Wei, CAI Baigen, et al. Research on UWB-enhanced integrated navigation method under GNSS challenge environments [C]// Proceedings of the 12th China Satellite Navigation Annual Conference——S09 User Terminal Technology, 2021: 57-64(in Chinese).
- [12] CHIU D S, MACGOUGAN G, O'KEEFE K. UWB assisted GPS RTK in hostile environments[C]// Proceedings of the 2008 National Technical Meeting of the Institute of Navigation, 2008: 532-542.
- [13] 周振南, 邹进贵, 赵胤植, 等. 基于 GNSS/UWB 的室内外连续定位方法[J]. 全球定位系统, 2022, 47(5): 28-34.
- ZHOU Zhennan, ZOU Jingui, ZHAO Yinzhi, et al. GNSS/UWB based indoor and outdoor continuous positioning method[J]. GNSS World of China, 2022, 47(5): 28-34(in Chinese).
- [14] MACGOUGAN G, O'KEEFE K, KLUKAS R. Tightly-coupled GPS/UWB integration[J]. Journal of Navigation, 2010, 63(1): 1-22.
- [15] 郝雨时, 徐爱功, 隋心. GNSS/UWB 高精度室内外组合定位方法[J]. 导航定位学报, 2016, 4(4): 17-23.
- HAO Yushi, XU Aigong, SUI Xin. Method of outdoor and indoor integrated precise positioning based on GNSS/UWB[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2016, 4(4): 17-23(in Chinese).
- [16] 张军, 杨子晨. 多传感器数据采集系统中的数据融合研究[J]. 传感器与微系统, 2014, 33(3): 52-54+57.
- ZHANG Jun, YANG Zichen. Study on data fusion of multi-sensor data acquisition system [J]. Transducers and Microsystem Technologies, 2014, 33(3): 52-54+57(in Chinese).
- [17] SAASTAMOINEN J. Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging satellites [M]. The Use of Artificial Satellites for Geodesy. American Geophysical Union (AGU), 1972: 247-251.
- [18] 王进, 杨元喜, 张勤, 等. 多模 GNSS 融合 PPP 系统间偏差特性分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版),

2019, 44(4): 475-481.

WANG Jin, YANG Yuanxi, ZHANG Qin, et al. Analysis of inter-system bias in multi-GNSS precise point positioning[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(4): 475-481(in Chinese).

[19] WANG J, STEWART M P, TSAKIRI M. Stochastic modeling for static GPS baseline data processing [J]. Journal of Surveying Engineering, 1998, 124(4): 171-181.

[20] LI Z, ZHENG N, WANG J, et al. Performance comparison among different precise satellite ephemeris and clock products for PPP/INS/UWB tightly coupled positioning[J]. The Journal of Navigation, 2018, 71, 585-606.

[21] 欧阳晨皓, 史俊波, 黄永帅, 等. CNES 实时和存档卫星轨道/钟差产品对北斗 PPP 的影响分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2021, 41(3): 279-284.

OUYANG Chenhao, SHI Junbo, HUANG Yongshuai, et al. Impact analysis of CNES real-time and archival satellite orbit/clock offset products on BDS PPP[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2021, 41(3): 279-284(in Chinese).

参数解释表

参数	含义
$P$	伪距观测值
$L$	相位观测值
$\rho, R$	距离
$c$	光速
$t_r, t^s$	接收机钟差、卫星钟差
$\sigma$	中误差
$N$	模糊度
$e, \epsilon, v$	量测误差
RMS	均方根
$r$	位置矢量
$l$	杆臂
$C$	姿态旋转矩阵
$n$	历元个数
$a_x, a_y, a_z$	$x, y, z$ 三方向的方向余弦
$\delta$	误差
$M$	投影函数
$zpd$	天顶方向对流层湿延迟
ISB	系统间偏差
$D$	UWB 距离测量值

(编辑:黄利华)