

引用格式: 马雨薇, 武建锋, 赵爱萍, 等. 一种北斗+5G 试验场景构建及联合定位结果分析[J]. 时间频率学报, 2024, 47(3): 202-209.

一种北斗+5G 试验场景构建及联合定位结果分析

马雨薇^{1,2}, 武建锋^{1,3}, 赵爱萍¹, 赵当丽¹

- 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;
- 中国科学院大学 集成电路学院, 北京 101408;
- 中国科学院大学 电子电气与通信工程学院, 北京 101408

摘要: 通导融合是综合定位、导航和授时 (positioning, navigation, timing, PNT) 体系发展的重要组成部分和关键方向。以 PNT 体系需求以及用户典型应用为牵引, 研究了联合定位的融合算法; 采用北斗和第五代移动通信技术 (5th generation mobile communication technology, 5G) 这 2 种 PNT 手段, 设计并构建了 2 类典型试验场景: 室内 5G 信号定位场景、室外北斗+5G 联合定位场景。围绕定位精度这一关键指标开展了试验验证。最后结合未来工业互联网 2.0 应用以及未来 6G 的定位预期, 阐述了北斗与 5G 通导融合、一体化的未来发展趋势。

关键词: 北斗; 5G; 场景; 联合定位

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2024-03-0202-08

A kind of Beidou+5G test scenario construction and joint positioning result analysis

MA Yu-wei^{1,2}, WU Jian-feng^{1,3}, ZHAO Ai-ping¹, ZHAO Dang-li¹

- National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600;
- School of Integrated Circuits, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408;
- School of Electronic, Electrical and Communication Engineering,
University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408

Abstract: The fusion of communication and guidance is an important component and key direction in the development of integrated positioning, navigation and timing(PNT) system. The fusion algorithm of joint positioning is studied based on the demand of PNT system and typical applications of users; two typical test scenarios are designed and constructed by using two PNT means, namely, indoor 5G signal positioning scenario and outdoor Beidou+5G joint positioning scenario. The experimental verification was carried out around the key index of positioning accuracy. Finally, the future development trend of the fusion and integration of Beidou and 5G is explained in the context of future industrial Internet 2.0 applications and future 6G positioning expectations.

Key words: Beidou; 5th generation mobile communication technology(5G); scenes; joint positioning

北斗卫星导航系统 (BeiDou navigation satellite system, BDS) 是由我国自主建设、独立运行的成熟的全球卫星导航系统 (global navigation satellite system, GNSS)。2020 年 7 月, 我国正式宣布北斗三号系统建成开通, 可全天候为全球用户提供定位导航授时服务、全球短报文服务等 7 种服务。随着全球组网的成功, BDS 成为了我国时空信息体系建设的基础和核心, 进入了一个全新的应用推广阶段, 未来在国际上的应用空间将会更广。在室外定位的场景下, 北斗系统能够满足基本的定位需求, 可提供连续、可靠、高精度的导航定位服务; 但在山区、地下、室内等障碍物较多的复杂环境下^[1], 因为遮蔽物的阻挡所以存在信号覆盖盲区, 这种情况下仅依赖北斗/全球导航卫星系统进行定位难以满足泛在的高精度时空信息需求^[2]。

国际移动通信标准制定组织第三代合作伙伴计划 (3rd generation partnership project, 3GPP) 于 2016 年公布了 5G (5th generation mobile communication technology) 网络标准, 规范中提出了 5G 网络可实现高精度定位, 2020 年发布的 Rel-16 规范中确定了 5G 定位系统架构和技术的演进, Rel-17 标准已在 2022 年被冻结, 规范中提出了期望在 90% 情况下为工业互联网场景提供 0.2 m 的高精度定位服务^[3-4]。移动通信网定位精度在 5G 时代迎来了巨大提升, 移动通信网是解决目前定位领域室内场景下定位需求的有效方法之一, 是高精度时空信息服务的有效支撑^[5]。

以北斗/GNSS 为核心, 辅以 5G、WiFi、蓝牙等其他类型的定位技术, 可以为各种类型的场景提供广覆盖、高精度、更稳健的空间位置服务, 已成为当前国际 PNT (positioning, navigating, timing) 领域的发展共识。通信与导航融合是当下的热点方法之一^[6], 这种融合利用了 5G 移动通信网的广域覆盖性、日益增强的信息传输能力、潜在的定位能力以及智能端设备和云端等设备的强大的运算处理能力, 实现在地面上对北斗系统的补充、备份和增强, 目前的研究和试验已展现出了显著的融合优势。根据未来多种应用场景的发展需求, 我国提出了计划在未来的 15 年内建成更加智能的综合 PNT 体系的发展目标^[7]。北斗+5G

通导融合技术是综合 PNT 体系的重要组成部分, 也是领域内的热点研究方向。正在建设的 5G 通信网络应与北斗紧密的融合, 构建一套室内外无缝切换的定位体系, 来满足多场景下日益增长的泛在定位需求, 从而为我国未来智能社会提供全场景、高精度时空感知基础支撑。

本文基于北斗与 5G 联合的最小二乘定位算法, 设计构建了室内 5G 信号定位场景、室外北斗+5G 联合定位场景这 2 种典型应用场景, 对于定位精度这一关键指标进行了试验与分析。结合未来工业互联网 2.0 应用以及未来 6G 的定位预期, 阐述了北斗与 5G 通导融合、一体化的未来发展趋势^[8]。

1 北斗与 5G 定位联合算法

1.1 基于 5G 的 TDOA 定位算法

TDOA (time difference of arrival, TDOA) 即信号到达时间差, 属于测距类方法, 基于 5G 的 TDOA 定位算法利用两路信号在终端和基站之间传输的时间差再作差后的数值作为基本观测量, 将时间差值转换为传播距离差, 代入双曲线方程, 使得用户待测点位于多条双曲线的交点处。TDOA 算法的优势在于不需要各基站之间与待测节点间时钟同步, 在实际应用中更易于实现。

1.2 基于最小二乘的北斗+5G 的融合定位算法

对于两个系统的定位数据融合, 一般多采用最小二乘进行解算。首先建立基于北斗卫星的信号到达时间 (time of arrival, TOA) 估计和基于 5G 信号 TDOA 估计的联合定位模型, 采用最小二乘法进行联合定位计算, 如公式 (1) 所示。

式 (1) 中: ρ_i 为卫星到接收机的伪距; (x, y, z) 为待求用户接收机的空间坐标; δ 为接收机钟差与光速的乘积; $(x_{s1}, y_{s1}, z_{s1}), \dots, (x_{sM}, y_{sM}, z_{sM})$ 分别为 M 个北斗卫星的坐标; $(x_{b0}, y_{b0}, z_{b0}), \dots, (x_{bN}, y_{bN}, z_{bN})$ 分别为 $N+1$ 个 5G 基站的坐标。

北斗卫星导航系统是基于 TOA 估计建立观测模型, 5G 是基于 TDOA 估计建立观测模型, d_i 为第 i 个基站距离观测量与第 0 个参考基站的距离观测量的差值。

$$\begin{cases} \rho_1 = \sqrt{(x_{s1} - x)^2 + (y_{s1} - y)^2 + (z_{s1} - z)^2} + \delta \\ \vdots \\ \rho_M = \sqrt{(x_{sM} - x)^2 + (y_{sM} - y)^2 + (z_{sM} - z)^2} + \delta \\ d_1 = \sqrt{(x_{b1} - x)^2 + (y_{b1} - y)^2 + (z_{b1} - z)^2} - \sqrt{(x_{b0} - x)^2 + (y_{b0} - y)^2 + (z_{b0} - z)^2} \\ \vdots \\ d_N = \sqrt{(x_{bN} - x)^2 + (y_{bN} - y)^2 + (z_{bN} - z)^2} - \sqrt{(x_{b0} - x)^2 + (y_{b0} - y)^2 + (z_{b0} - z)^2} \end{cases} \quad (1)$$

2 北斗与 5G 通导融合场景设计与构建

以 PNT 体系需求以及用户典型应用为牵引, 采用北斗和 5G 这两种 PNT 手段, 设计并构建了 2 类典型试验场景: 室内 5G 信号定位场景、室外北斗+5G 联合定位场景。

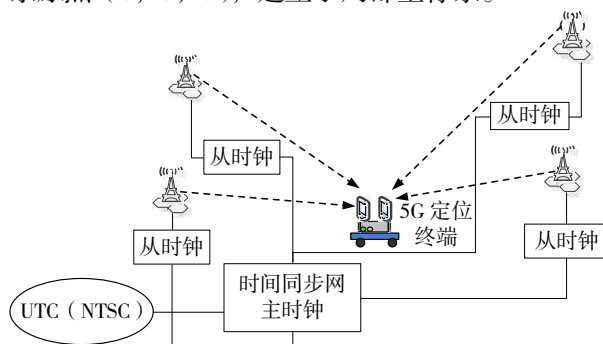
2.1 室内 5G 信号定位场景设计

在 5G NR 标准中定义了多种类型的 5G 信号, 包括下行定位参考信号 PRS (positioning reference signal)、信道状态信息参考信号以及同步信号^[9], 其中下行 PRS 信号是专门为 5G 带内无线定位功能设计的信号, 在 Rel-16 版本中对下行 PRS 信号作出了标准化的定义, 下行专用 PRS 可以使终端同时接收来自多个基站发出的信号, 即可利用三角定位原理解算终端的位置, 是目前 5G 带内定位的最佳选择, 具有很好的应用前景。Rel-16 标准的发布标志了带内定位技术第一次成为移动通信系统定位标准中的主要定位手段。

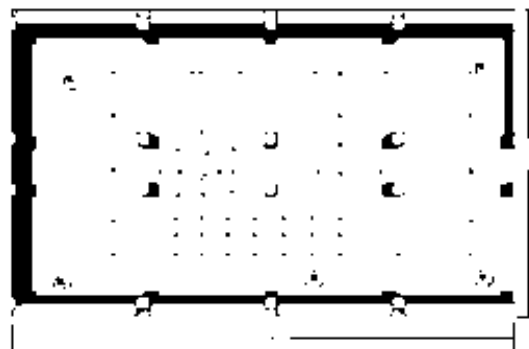
在国家相关部委的支持下, 开展了基于下行 PRS 的 5G 增强定位型基站的设计与实现的研究工作, 设计了一套室内定位实验系统, 其系统结构如图 1 (a) 所示。该实验系统的发射频率为 3.5 GHz, 具备 PRS 带内参考信号的下行播发功能。在地下室构建了约 510 m² 的长方形室内定位场景, 场景长约 30 m, 宽约 17 m, 中间为 6 根钢筋水泥混合立柱, 在场景四周部署了 5 个 5G 基站, 场景示意如图 1 (b) 所示。

关于时空基准, 室内定位系统的时间以中国科学院国家授时中心保持的协调世界时 (Universal Time Coordinated (National Time Service Center), UTC (NTSC)) 为时频参考, 采用 White Rabbit 技术实现 5 个基站之间的时间同步^[10], 传

输介质采用光纤, 采用主从星型连接模式, 如图 1 (a) 所示, 各基站之间同步精度优于 1 ns。对于空间基准, 在地下室选取了基准点作为坐标系原点 (0, 0, 0), 建立了局部坐标系。



(a) 室内定位试验系统



(b) 室内定位试验区平面图

图 1 室内定位试验场景示意图

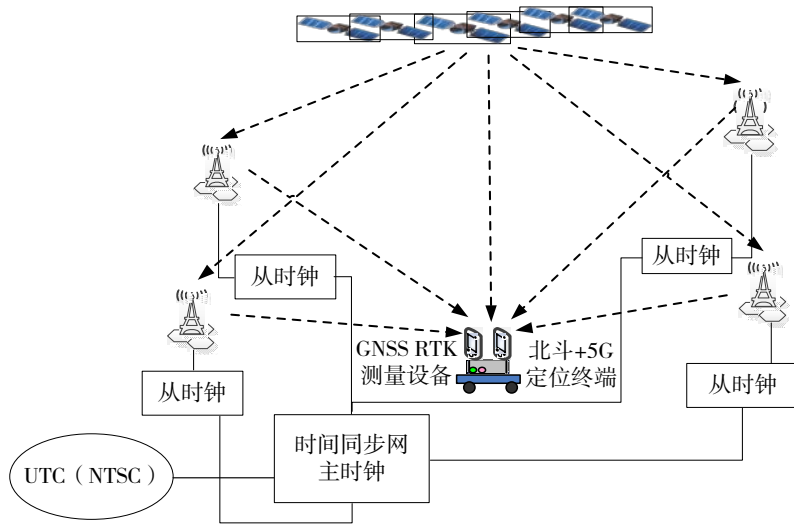
2.2 室外北斗+5G 联合定位场景

5G 可为北斗系统带来双重覆盖区域的精度增强, 改变现有卫星导航系统服务遮挡环境、城市峡谷的应用瓶颈, 解决室外定位复杂环境下定位可用性问题。

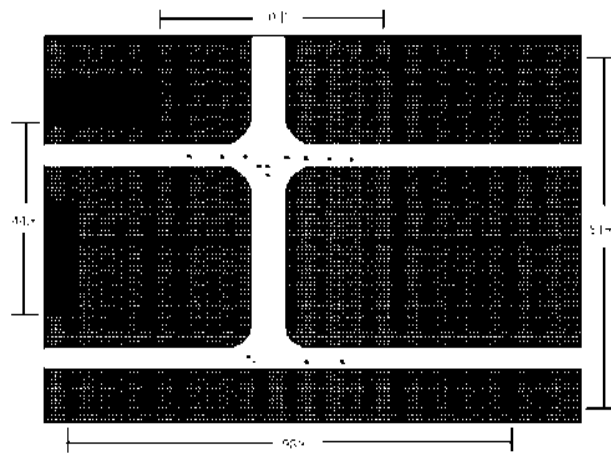
本系统中北斗定位接收系统采用了 UB4B0M 板卡。在实验中, 使用 BDS B3 信号作为观测信号, 并在定位解算中对于电离层的影响进行扣除。为了验证北斗+5G 联合定位的能力, 尤其是在室

外遮挡环境或城市峡谷 GNSS 卫星不足 4 颗的环境下，以 2~3 个 5G 基站为伪卫星与北斗观测量进行联合解算，解决定位可用性问题，构建基于北斗+5G 的室外场景，其系统结构如图 2 (a) 所示。室外定位场景面积大约为 2 000 m²，测试区域为不规则四边形，试验区平面示意如图 2 (b) 所

示。采用 White Rabbit 技术实现 4 个基站之间的时间同步，时间同步精度优于 1 ns。北斗+5G 联合定位试验终端通过接收北斗信号、5G 信号实现联合定位，采用 TD0A+TOA 结合的算法实现定位解算，定位结果与 GNSS RTK 互差后评估定位精度^[11]。



(a) 室外联合定位试验系统



(b) 室外联合定位试验区平面图

图 2 北斗+5G 室外定位试验示意图

3 北斗与 5G 通导融合试验与分析

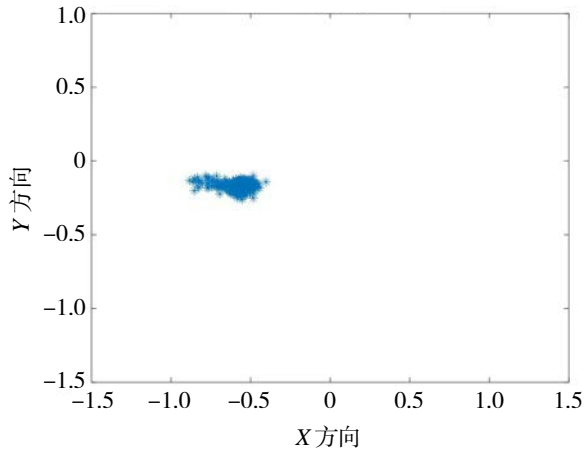
3.1 室内 5G 信号定位结果分析

在地下室测试场景，选定 10 个静态测试点，计算 10 个测试点的平均定位误差，最终得到静态测试结果统计，作为室内信号静态定位的精度。

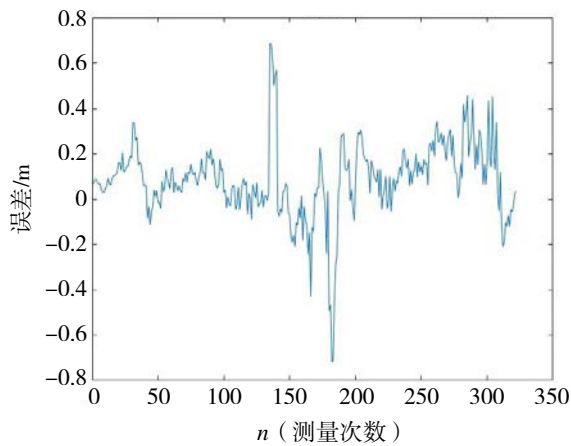
经统计分析，室内环境中 5G 静态平均定位精

度为 0.923 m，最小为 0.421 m，最大为 1.908 m，测试结果误差分布不均匀，这是由于测试场地部分待测点与基站之间存在立柱遮挡，多径效应对定位精度的影响较大，其次不同位置的测试点水平位置精度因子 (horizontal dilution of precision, HDOP) 不同，也会对定位结果造成影响。图 3 给出了 56 号点的定位结果曲线，从曲线可见，定位

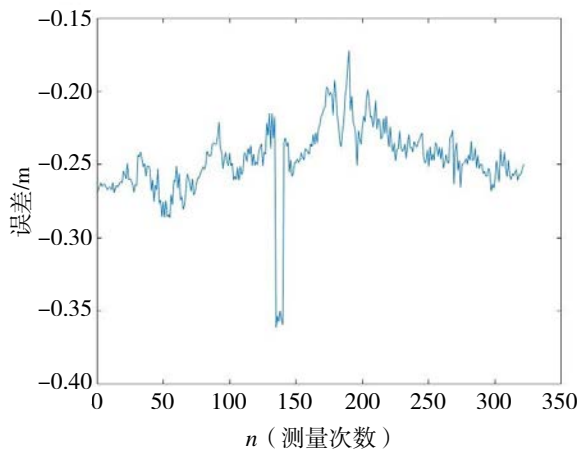
结果存在一定的系统偏差, 以及明显的多径。静态测试结果表明, 基于 5G PRS 信号的定位能力可以满足 3GPP Rel-16 中 5G 定位服务 1~4 等级的需求, 可以作为一种室内定位的常规手段。



(a) 56 号点二维静态定位结果



(b) 56 号点静态定位 X 方向误差分布

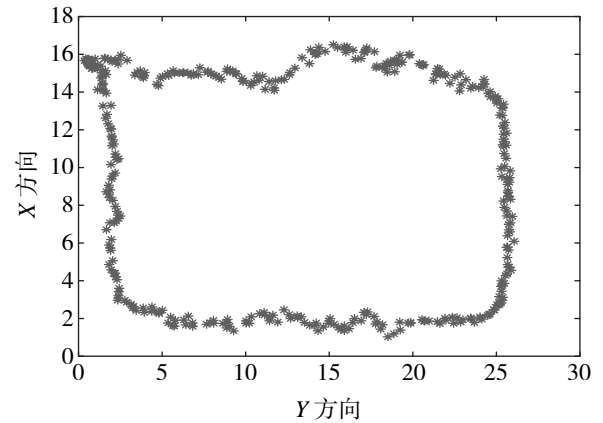


(c) 56 号点静态定位 Y 方向误差分布

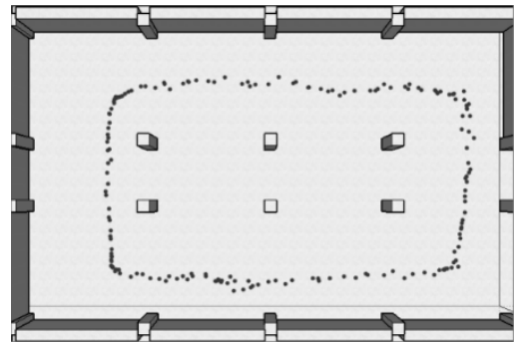
图 3 5G 室内 56 号点静态定位曲线

对于室内的动态测试, 分别按已标定区域的

4 条边采用行人推车的形式开展测试, 速度大约 0.5 m/s, 定位曲线如图 4 所示。因为室内动态定位没有合适的定位参考, 只给出了定位的曲线轨迹, 与现场运行轨迹基本一致; 曲线中变化比较明显的地方主要是因为信号受到遮挡, 多径比较强烈。



(a) 5G 室内动态定位轨迹二维坐标图



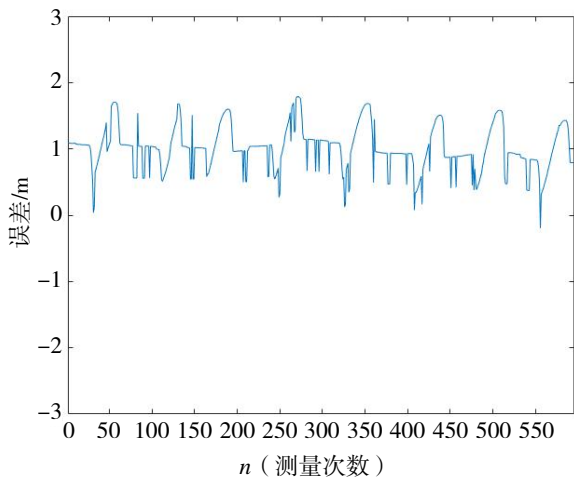
(b) 5G 室内动态定位轨迹平面示意图

图 4 5G 室内动态定位曲线

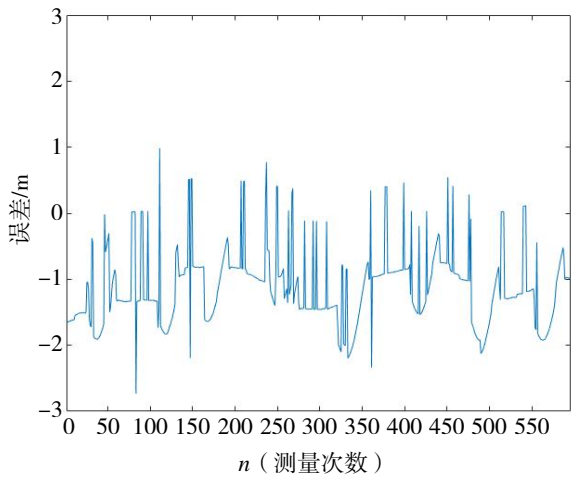
3.2 室外北斗+5G 联合定位结果分析

在进行联合定位试验之前, 首先对于北斗信号与 5G 信号的定位性能进行了评估, 以伪距精度作为评价指标, 对两种信号的伪距量进行最小二乘拟合后减去每个点拟合的函数值, 对这些差值求标准差作为抖动值来评估伪距精度。在对 5 个点进行 10 min 测量后, 分别计算北斗与 5G 的平均伪距抖动值为 0.734 m 和 0.251 m, 抖动值同数量级, 本文认为两个信号在参与融合定位时可作等权融合。本系统中, 5G 信号的采样频率为 1 次/s, 北斗信号采样频率为 4 次/s, 通过数据间的时标对齐, 融合系统总采样频率为 1 次/s。

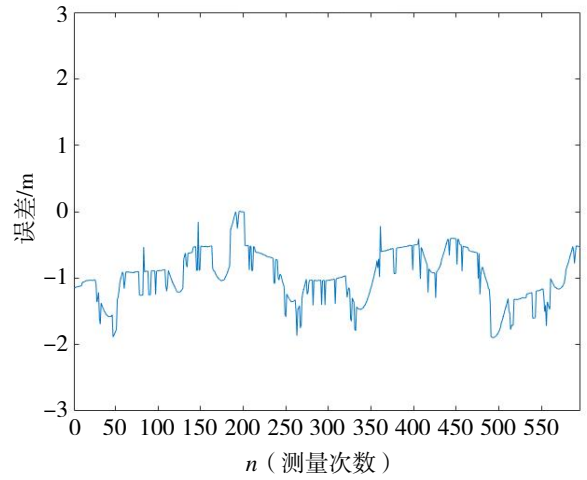
在室外北斗+5G 联合定位场景下，试验分别开展了 3 颗卫星+2 个基站、2 颗卫星+3 个基站组合的定位试验。由于试验中 5G 基站位置固定，为了使得位置精度因子值较优，提升定位结果，在卫星的选取上考虑了与 5G 基站方位角互补的卫星，使得定位待测区域在基站与卫星的中心区域。试验中每个定点静态测试 10 min，图 5 分别为两种组合的静态定位结果展示，3 颗卫星+2 个基站静态定位精度优于 2.203 m，2 颗卫星+3 个基站静态定位精度优于 2.016 m，结果均为均方根 (root mean square, RMS)。从图 5 中曲线可见，存在一定的系统偏差，这是由北斗与 5G 的系统偏差导致的，消除这些系统偏差之后，定位精度还可进一步提升，预期精度应该可达到 1 m 左右。



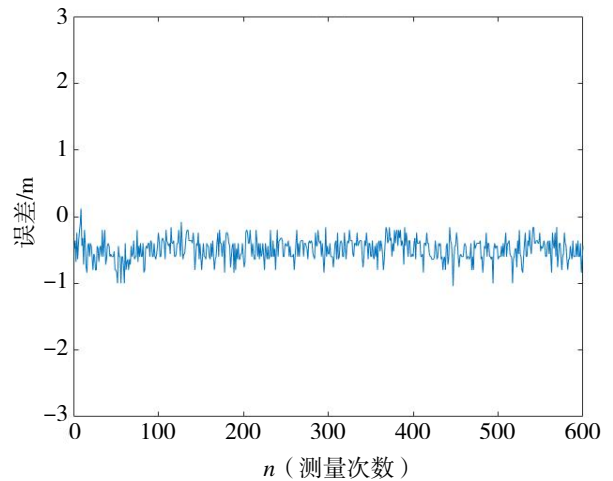
(a) 3 星+2 站静态定位 X 方向误差分布



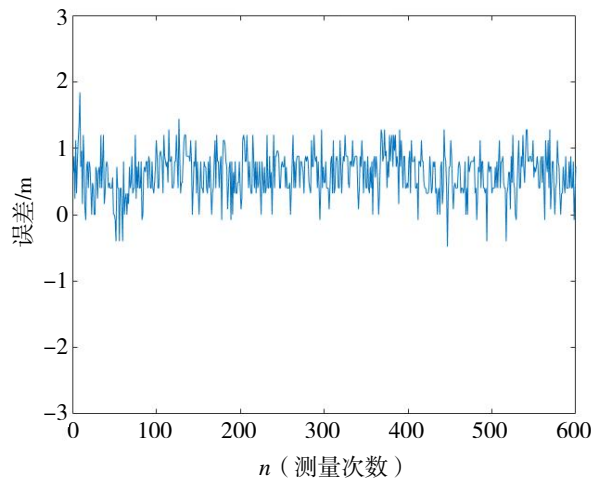
(b) 3 星+2 站静态定位 Y 方向误差分布



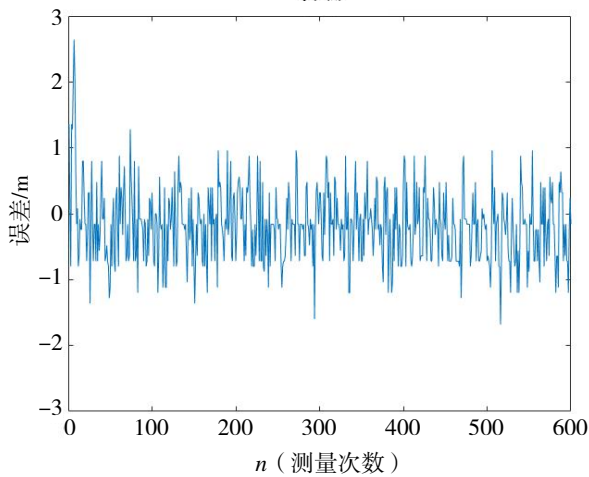
(c) 3 星+2 站静态定位 Z 方向误差分布



(d) 2 星+3 站静态定位 X 方向误差分布

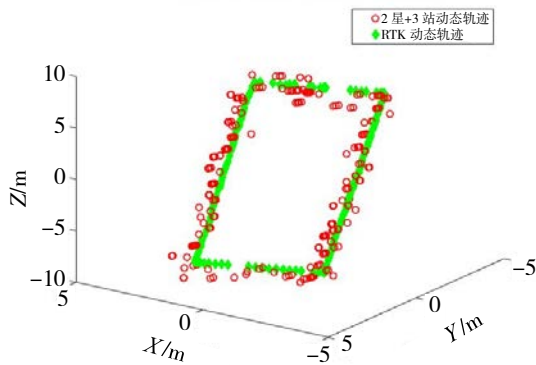


(e) 2 星+3 站静态定位 Y 方向误差分布

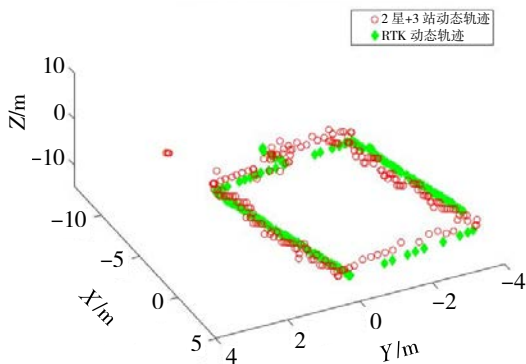


(f) 2 星+3 站静态定位 Z 方向误差分布
图 5 3 星+2 站、2 星+3 站的静态定位结果

图 6 为 2 星+3 站、3 星+2 站的动态定位结果，行人推车的行进速度约为 0.5 m/s，图中菱形线为实时载波相位差分技术 (real-time kinematic, RTK) 测量结果，圆圈线为北斗+5G 联合定位结果，运行轨迹基本一致。与 GNSS RTK 设备定位结果相比，3 颗卫星+2 个基站定位精度优于 3.344 m，2 颗卫星+3 个基站定位精度优于 2.781 m。与静态定位结果相比，精度略有下降。



(a) 2 星+3 站动态定位轨迹



(b) 3 星+2 站动态定位轨迹

图 6 2 星+3 站、3 星+2 站的动态定位结果

从试验结果来看，北斗+5G 组合定位在城市峡谷或遮挡环境下利用基站观测量与北斗联合完成定位，可以解决定位可用性问题，图 6 中所选组合和场景的静态定位精度约为 2.203 m，动态约为 2.781 m。在实际场景中，所选卫星、基站组合不同，三维 (空间) 位置精度因子 (positional dilution of precision, PDOP) 不尽相同，定位结果会存在一定的差异。在选择基站或卫星时需要采用一定的优化算法，保证可以获得较小的 PDOP，同时先验知识的辅助下尽量选择无遮挡可以直视的 5G 基站，减小非视距 (non line of sight, NLOS) 信号的影响。对于 5G 用户，北斗系统的引入可解决高程问题，另外也可解决基站不足 3 个的定位问题。

4 结语

通信导航融合定位技术作为当下导航领域的研究热点之一，5G 和 BDS 的融合可增加产业体量，使现有的定位导航的产业化逐步实现面向公众提供可用位置信息服务。本文基于北斗+5G 导通融合开展了从室内到室外的多种类型的试验设计和测试分析。从试验结果来看，在室外环境下，不同的卫星信号与 5G 信号组合方式下，北斗+5G 联合定位误差在静态情况下优于 3 m，动态情况下优于 4 m，联合定位可弥补单北斗无法实现定位的情况；室内环境下，5G 定位系统在静态和动态情况下定位误差均可满足业界室内定位优于 3 m 的标准，可弥补北斗室内定位的空白。

根据未来工业互联网 2.0 的应用场景的需求，目前北斗+5G 融合的定位精度仍有不足，比如室内资产追踪、自动导引运输车 (automated guided vehicle, AGV) 追踪等，Rel-17 规范进一步考虑了增强功能，把定位精准度提升到 20~30 cm 左右。6G 以实现天地一体、万物互联为目标，大量的场景需要成本低、精度高、可靠性高的新一代室内外定位服务，在全球发布的 6G 白皮书中室内定位精度要求达到 10 cm、室外达到 1 m，相比 5G 的能力提高了 10 倍。未来 6G 必然会促进位置与通信的不断融合，将对导航通信融合提出了更高的要求。

目前 5G 网络的定位潜力还未完全发掘, 进一步优化传输过程中信号抗多径和抗噪声的能力^[12], 减少各基站间的同步误差, 以及准确鉴别 NLOS 等方法都能够进一步的提升 5G 网络定位精度。本试验中 5G 基站架设高度较高, 试验场地选在了较为空旷的地带, 为可视场景, 未来可在试验中加入非视距的试验分析, 研究非视距条件对定位的影响; 研究环境存在不同干扰时, 测量精度受到的影响; 研究环境内基站部署对定位精度的影响; 研究不同时间同步方式对定位精度的影响。面向 5G Rel-17 标准持续推进, 进一步研究 5G 载波相位测量、定位信号载波聚合、双差消除基站和终端硬件延迟方法等 5G 定位增强定位技术^[12-14]。开展北斗+5G 定位服务质量评估关键技术研究。开展北斗与 5G 行业应用标准规范制定, 面向典型行业应用开展演示验证, 促进北斗+5G 技术迭代与落地。

参考文献:

- [1] 邓中亮, 王翰华, 刘京融. 通信导航融合定位技术发展综述[J]. 导航定位与授时, 2022, 9(2): 15-25.
- [2] 刘海蛟, 刘硕, 刘文学, 等. 北斗+5G 融合定位技术研究[J]. 信息通信技术与政策, 2021, 47(9): 41-46.
- [3] 3rd Generation Partnership Project. Study on positioning use cases: 3GPP22.872[S]. Sophia Antipolis: 3GPP, 2017.
- [4] 邓中亮, 王翰华. 北斗+5G 融合发展机遇[J]. 卫星应用, 2021(11): 20-24.
- [5] 王耀武, 刘景成. 基于 5G 网络的高精度定位研究[J]. 信息通信, 2019(11): 258-260.
- [6] 蔚保国, 鲍亚川, 杨梦焕, 等. 通导一体化概念框架与关键技术研究进展[J]. 导航定位与授时, 2022, 9(2): 1-14.
- [7] 杨元喜. 综合 PNT 体系及其关键技术[J]. 测绘学报, 2016, 45(5): 505-510.
- [8] 尹露, 马玉峥, 李国伟, 等. 通信导航一体化技术研究进展[J]. 导航定位与授时, 2020, 7(4): 64-76.
- [9] 洪学敏, 许雪婷, 彭敖, 等. 基于 5G 移动通信系统融合定位的关键技术与系统架构演进[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2021, 60(3): 571-585.
- [10] 李自由, 武建锋, 王康. 面向 5G 网络应用的精确时间同步协议测试与分析[J]. 全球定位系统, 2020, 45(5): 90-96.
- [11] 薛嘉琛, 武建锋, 焦喜康, 等. 一种基于北斗+5G 的联合定位系统[J]. 无线电工程, 2022, 52(6): 1004-1012.
- [12] 张平, 陈昊. 面向 5G 的定位技术研究综述[J]. 北京邮电大学学报, 2018, 41(5): 1-12.
- [13] 邓中亮, 余彦培, 袁协, 等. 室内定位现状与发展趋势研究(英文)[J]. 中国通信, 2013, 10(3): 42-55.
- [14] 薛艳荣, 肖波, 李雨薇, 等. 基于时差频差的双星无源定位地基差分技术研究[J]. 时间频率学报, 2022, 45(4): 294-300.