

# 基于智能手机的地下车库北斗伪卫星信号分析

王新龙, 蔚保国, 张衡, 黄璐, 程建强, 毕京学

(中国电子科技集团公司 第54研究所, 石家庄 050081)

**摘要:** 随着全球卫星导航系统不断完善和经济社会快速发展, 人们对室内位置服务需求日趋强烈, 对于智能手机端的室内高精度定位技术研究蓬勃发展; 针对商用智能手机接收北斗伪卫星信号实现室内定位难题, 开展智能手机端的北斗室内伪卫星观测数据质量分析工作, 选取多款主流品牌智能手机, 分别从数据完整率、周跳比、载噪比、多普勒频移、载波相位等方面分析手机 GNSS 芯片性能, 为室内停车场环境下智能手机伪卫星定位提供数据支撑, 为北斗室内外一体化提供参考; 研究表明: 在地下停车场环境下, 静止状态时部分手机的载噪比, 星间载波相位差的数据连续性稳定性已经可以达到专用测量接收机水平; 步行状态下, 部分手机的星间数据差的数据质量甚至优于测量型接收机。

**关键词:** 数据质量分析; 伪卫星; 智能手机; 室内定位; 载波相位差

## Smartphone-based Analysis of BeiDou Pseudolites Signals in Underground Garages

WANG Xinlong, YU Baoguo, ZHANG Heng, HUANG Lu, CHENG Jianqiang, BI Jingxue

(The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050081, China)

**Abstract:** With the continuous improvement of global navigation satellite system (GNSS) and the rapid development of economy and society, people's demand for indoor location services is becoming stronger and stronger, and the research on indoor high-precision positioning technology for smartphones is booming. In order to solve the problem of indoor positioning for commercial smartphones receiving Beidou pseudolite signals, this paper analyzes the observation data of Beidou indoor pseudolites on smartphones, selects multiple mainstream smartphones and analyzes the performance of mobile phone GNSS chips in terms of data completeness, weekly hopping ratio, carrier-to-noise ratio, Doppler shift, carrier phase, etc., so as to provide data support for pseudolite positioning of smartphones in indoor car park environment and reference for the integration of Beidou indoor and outdoor systems. The results shows that in underground car park environment, the data continuity and stability of the carrier-to-noise ratio and the interstellar carrier phase difference of some mobile phones in stationary state can reach the level of dedicated measurement receivers, and the data quality of the interstellar data difference of some mobile phones in walking state is even better than that of measurement receivers.

**Keywords:** data quality analysis; pseudo-satellites; smartphones; indoor positioning; carrier phase difference

## 0 引言

随着中国经济的快速发展, 北斗系统提供的精准时间和空间数据的价值日益凸显, 北斗应用和产业化正处于前所未有的发展机遇期。该系统已经在多个行业 and 大众应用中创造了丰富的时空信息服务场景, 开发出多种

创新的服务模式, 显著提升了各行各业的数字化水平。为了进一步提高定位精度和服务质量, 国家正积极推进北斗系统的规模化应用和发展, 鼓励“北斗+”和其他相关技术的融合创新。

目前, 智能手机可以在人们日常生活中提供便捷的导航服务。文献 [1] 发现在使用多普勒平滑伪距和信

收稿日期: 2024-11-26; 修回日期: 2024-12-20。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB3900801); 河北省自然科学基金面上项目(D2024523007); 河北省科技厅一科技研发平台建设专项(23565901D)。

作者简介: 王新龙(2000-), 男, 硕士研究生。

通讯作者: 蔚保国(1966-), 男, 博士, 研究员。

引用格式: 王新龙, 蔚保国, 张衡, 等. 基于智能手机的地下车库北斗伪卫星信号分析[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(2): 203-211.

噪比随机模型的基础上, 安卓智能手机的定位精度可以达到米级。文献 [2] 选用几款华为手机, 使用伪距相位无几何组合法, 分析智能手机端原始观测数据质量, 结果显示北斗系统能为大众用户低成本设备提供更优质的定位服务。文献 [3] 首先调整载波相位观测值, 通过区域大气增强实现快速单频精密单点定位 (PPP, precise point positioning) 收敛。最后, 形成星间差分模糊度, 实现模糊度固定厘米级智能手机精密单点定位实时动态定位 (PPP-RTK, precise point positioning-real-time kinematic)。

室内环境是人们生活中重要的组成部分, 人们的位置服务也逐渐从室外延伸到室内, 这为室内定位技术提供了广阔的发展空间<sup>[4]</sup>。文献 [5] 分析了超宽带的下行时间差到达算法特性。文献 [6] 提出了一种基于惯性测量单元 (IMU, inertial measurement unit) 和无线保真数据的室内高精度实时定位系统。文献 [7] 提出了一种基于微型电子机械系统 (MEMS, micro electro-mechanical system) /视觉的智能手机室内精确三维定位算法。文献 [8] 采用星间差分位置变化约束平滑伪距采用滤波递推的方式达到减小伪距噪声的目的。文献 [9] 针对单一信源室内定位存在一定局限性的问题, 研究提出一种蓝牙与 Wi-Fi 信号融合定位的方法, 并采用注意力机制生成权重, 有效降低了定位误差。文献 [10] 提出的 Wi-Fi/行人航位推算 (PDR, pedestrian dead reckoning) 融合定位方法相比于现有融合方法, 定位稳定性得到显著改善。

由于室内复杂多变的环境, 全球卫星导航系统 (GNSS, global navigation satellite system) 信号存在严重遮挡和多路径效应, 研究基于智能手机端的室内定位技术逐渐成为热点。伪卫星由于可以发射与卫星导航信号兼容的信号, 无需使用专用的接收终端, 仅需利用市场上现有的智能手机终端即可实现室内外连续定位而日益受到关注。在美国政府发射全球定位系统 (GPS, global positioning system) 导航卫星之前, GPS 定位导航的所有原理论证都是通过地面部署的伪卫星来完成的<sup>[11]</sup>。美国斯坦福大学是第一个使用伪卫星进行室内导航和定位实验的单位<sup>[12]</sup>。澳大利亚新南威尔士大学和 Locata 公司共同设计了 Locata 定位系统<sup>[13]</sup>, 可以实时接收和处理导航信号。日本研制的伪卫星系统室内信息发送系统 (IMES, indoor messaging system) 不使用伪距和载波相位观测, 而是利用载波噪声比和伪卫星身份标识号码 (ID) 实现室内定位精度约 10 m<sup>[14]</sup>。文献 [15] 提出一种基于智能手机的 vision/MEMSIMU/GNSS 紧密耦合集成方法, 实现室内外无缝定位; 文献 [16] 首次提出一种基于蓝牙测向和 GNSS 信号组合的新型混合定位系统, 同时展示室内外环境中定位和跟踪

的无缝性。文献 [17] 提出了一种仅利用 GNSS 信息, 最大限度地判断智能手机室内外状态的方法。文献 [18-20] 分别使用多种单频智能手机从不同角度分析了 GNSS 信号质量。文献 [21] 提出了一种基于实际采集指纹、建模仿真指纹和人工神经网络的室内伪卫星混合指纹定位方法, 稀疏采集指纹区域的定位精度, 均方根定位误差约为 0.485 m; 在没有采集指纹的区域均方根定位误差约为 1.124 m。

现有的对智能手机端 GNSS 数据质量分析研究已经相对完善, 而对室内环境下智能手机端的卫星信号分析尚不完善, 本文将选用几款常见的商用智能手机从多普勒频移、载波相位载噪比、数据完整率、周跳比等方面分析伪卫星数据质量, 为室内定位在智能手机端的应用提供数据支持。

## 1 北斗伪卫星原始观测量获取

2016 年 5 月, 谷歌宣布了 Android 7 的 GNSS 原始测量的可用性。这是第一次, 开发者可以访问运营商和编码测量, 并解码来自大众市场设备的导航信息。在智能手机上使用 GNSS 原始测量有不少优点。它们的使用可以提高 GNSS 性能, 因为它为更先进的 GNSS 处理技术打开了大门。这些好处已经通过基于代码的定位、代码辅助定位、差分定位和精确点定位得到了证明。虽然在正常情况下, 从 GNSS 原始测量中计算出的位置可能不如典型芯片组输出最佳, 但在某些情况下, 当应用外部校正时, 使用 GNSS 原始数据可能会提高解决方案的精度。一些应用领域将从这种提高的准确性中获利, 如增强现实、基于位置的广告、移动医疗和资产管理。原始测量还允许优化多 GNSS 解决方案, 并根据其性能或差异化选择卫星。从技术创新的角度来看, 原始测量的可用性也很强。它可以进行更详细的测试和后处理, 这反过来又可以作为一个很好的工具。GNSS 原始测量还可以通过提供额外的信息来源和允许利用接收机自主完整性监测算法来支持内部智能手机的完整性。

在 Android 平台上获取位置的最常见方法是通过一个融合了多个来源 (GNSS、Wi-Fi 甚至移动网络) 的位置提供商, 以提高准确性、首次修复时间、可用性或功耗。这可以通过 android.gsm.location API (Application Programming Interface) 获得。新的 Android 7 版本, 以及后续版本, 引入了新的 Android 定位 API, 并对定位服务进行了重大创新, 使用 Android 系统的智能手机都可以向用户提供 GNSS 原始观测数据, 主要包含提供接收机时钟测量值, 钟差的全球卫星导航系统时钟 (GNSS Clock) 类以及提供原始观测数据全球卫星导航系统测量 (GNSS Measurement) 类, 通过这些原始观测数据可以计算出载噪比, 载波相位, 多普勒频移等观

测量。GNSSClock 类与 GNSS Measurement 类详细信息表 1 所示。

表 1 Android GNSSClock 类与 GnsMeasurement 类字段信息

所属类	字段名	描述
GNSSClock	TimeNanos	GNSS 接收机内部硬件时钟值
GNSSClock	BiasNanos	时钟亚纳秒偏差
GNSSClock	FullBiasNanos	1980 年 1 月 6 日以来, GPS 接收机内部硬件时钟值与 GPS 真实时间之间的差异
GNSSClock	DriftNanosPerSecond	时钟漂移
GNSSClock	LeapSecond	闰秒
GNSSMeasurement	Svid	卫星号
GNSSMeasurement	ReceivedSvTimeNanos	接收到卫星信号的时间
GNSSMeasurement	AccumulateDeltaRangeMeters	自上次通道重置以来的累计增量范围
GNSSMeasurement	Cn0DbHz	载噪比
GNSSMeasurement	TimeOffsetNanos	时间偏移
GNSSMeasurement	CarrierFrequencyHz	载波频率
GNSSMeasurement	PseudorangeRateMetersPerSecond	伪距变化率

智能手机接收到的伪卫星信号载波相位观测值、伪距观测值、多普勒观测值具体计算过程如下:

伪卫星信号发射时间  $t_{rx}$  表达式为:

$$t_{rx} = t_{TN} + t_{TON} - (t_{FBN} + t_{BN}) \quad (1)$$

式中,  $t_{TN}$  为 GNSS 接收机内部硬件时钟值;  $t_{TON}$  为时间偏移;  $t_{FBN}$  为 1980 年 1 月 6 日以来, GPS 接收机内部硬件时钟值与 GPS 真实时间之间的差异;  $t_{BN}$  为时钟亚纳秒偏差。

接收机接收卫星信号的时间  $t_{Tx}$  表达式为:

$$t_{Tx} = t_{RSTN} \quad (2)$$

式中,  $t_{RSTN}$  为接收到卫星信号的时间。

伪距是指接收机与卫星之间的距离加上接收机时钟误差和其他误差(如大气延迟)的修正量。它是通过测量从卫星发射的信号到达接收机所需的时间来计算的。伪距观测值  $l_p$  为:

$$l_p = (t_{rx} - t_{Tx}) \times 10^{-9} \times c \quad (3)$$

式中,  $c$  为光在真空中的传播速度。

多普勒频移是当移动台以恒定的速率沿某一方向移动时, 由于传播路程差的原因, 造成的相位和频率的变化。多普勒观测值  $D$  表达式为:

$$D = -r_{PRS} \times \frac{F}{c} \quad (4)$$

式中,  $c$  为光在真空中的传播速度,  $r_{PRS}$  为伪距变化率,  $F$  为载波频率。

载波相位观测量表示接收机本机震荡产生的相位与

接收到的卫星载波相位之差, 是实现高精度定位的重要参数。载波相位测量由 Acc-umulatedDeltaRangeMeters 提供, 以米为单位。它们是不明确的, 没有时间信息, 这意味着接收者只能计算历元之间发生的周期数。如果发生周期滑移, 则接收器失去此计数。载波相位差可以消除接收机时钟差的影响, 载波相位差比伪距差更稳定, 基本上是一个恒定值, 即伪卫星天线与接收天线的距离差。载波相位观测值  $P$  表达式为:

$$P = l_{ADRM} \quad (5)$$

式中,  $l_{ADRM}$  为自上次通道重置以来的累计增量范围。

载噪比是接收机接收到的卫星信号强度与环境噪声之间的比值, 它是评估卫星信号质量的重要参数之一, 反映了信号在传输过程中受到的噪声干扰程度。载噪比越高, 意味着信号在噪声中的占比越大, 信号质量越好, 接收机能够更准确地解码和处理信号, 载噪比  $r_{CNR}$  表达式为:

$$r_{CNR} = C_{n0} \quad (6)$$

式中,  $C_{n0}$  为载噪比。

数据完整率是指在特定观测时间内, 接收机接收到的观测数据的完整性。完整的观测数据是数据处理的基础, 确保数据的完整性对于后续的数据分析和应用至关重要。数据完整率是衡量数据质量的重要指标之一, 它反映了数据在采集过程中的可靠性和准确性。

在实际应用中, 数据完整率通常通过实际观测量与理论观测量的比值来计算。理论观测量是指在理想条件下, 接收机应当接收到的全部数据量, 而实际观测量则是接收机在特定时间段内实际接收到的数据量。高数据完整率意味着数据采集过程中的丢失或缺失较少, 数据质量较高。数据完整率  $R_{int}$  表达式为:

$$R_{int} = \frac{N_{actual}}{N_{theory}} \quad (7)$$

式中,  $N_{actual}$  为实际观测到的有效历元数,  $N_{theory}$  为理论上应该观测到的历元数。

在 GNSS 数据质量分析中, 周跳比是一个重要指标。它通过统计观测数据中的实际历元数和发生周跳的历元数, 计算出周跳比, 从而评估信号的稳定性和可靠性。周跳的发生通常是由于卫星信号受环境干扰或接收机失锁等原因引起的, 因此周跳比可以反映出信号在特定环境下的质量情况, 为便于统计观察数据, 本文采用周跳比的倒数反应信号质量, 即周跳比的倒数越小, 说明信号质量越好, 周跳比倒数  $R_{csr}$  表达式为:

$$R_{csr} = \frac{N_{slips}}{N_{observe}} \quad (8)$$

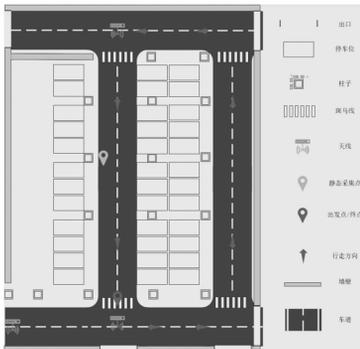
式中,  $N_{slips}$  为观测到的历元总数,  $N_{observe}$  为发生周跳的历元数。

## 2 实验环境

本文的实验环境为地下停车场如图 1 (a) 所示,

伪卫星天线布设在距离地面约 2.5 m 高度处, 共计部署 3 个伪卫星天线, 从左至右, 从下至上分别发射 B20, B11, B19 信号, 通过北斗微基站发射北斗伪卫星信号, 伪卫星采用二进制相移键控 (BPSK, binary phase shift keying) 调制信号, 复用方式为码分多址 (CDMA, code division multiple access), 工作频段为 B1; 主要实验设备如图 1 (b) 所示。

数据采集主要分为静态采集和动态采集两种模式, 旨在评估伪卫星信号在不同采集模式下的性能和稳定性。静态采集点在伪卫星天线直射的车道中间段, 将采集设备放置在椅子上, 静止收集 20 分钟的伪卫星数据; 动态采集如图 1 (a) 所示, 将手机放在笔记本电脑键盘上, 双手分别持接收机、抱电脑, 在车道上绕圈行走, 共计绕行 6 圈后回到起点, 步行范围约为 43.1 m × 15.4 m。



(a) 测试环境



(b) 测试设备

图 1 测试环境及测试设备

手机设计的重点是电池优化和用户体验, 这影响了硬件组件和软件算法的选择。手机采用低成本组件, 其中最关键的是内置天线和振荡器。振荡器位于单芯片外, 补偿温度变化, 从而提高频率稳定性。为了降低功耗, 只有在使用 GNSS 芯片时才开启。当 GNSS 关闭时, 另一种低功耗晶体振荡器以每周 6 s 的精度下降维持时间。一个已经关闭了几天的设备在启动时会会有一个粗略的先验时间估计。移动设备将获得: 对智能手机位置的近似估计 (其精度取决于网络基础设施); 辅助数据 (辅助 GNSS 协议); 通过校准手机中的本地振荡器来提高参考频率。

这些信息增加了接收器的灵敏度, 即使在恶劣的条件下 (城市或光线充足的室内环境), 也能在几秒钟内确定第一个位置, 因为所有信息在开始时都是可用的。手机还部署了占空比技术来降低功耗, 这会影响到振荡器并导致载波相位跟踪不连续, 例如在两次连续测量之间发生几个周期滑移时, 使得使用诸如实时运动学 (RTK) 或精确点定位 (PPP) 等先进相位技术非常困难。硬件设计的选择影响 GNSS 原始数据的质量, 特别是载波相位测量的质量, 从而直接影响定位的性能。由于增加的多径水平和更高的衰落概率, 这种影响在城市环境中会更糟, 因为大多数人都在使用手机。

本次实验使用的采集设备包括华为手机, 荣耀手机, 三星手机, 测量型接收机 ublox; 为方便实验数据处理, 在实验中将分别记作 A, B, C, D。所使用的智能手机是当前安卓市场上主流的商用手机, 具有较强的普适性。采集设备支持的伪卫星观测信息如表 2 所示。

表 2 智能手机与接收机支持输出伪卫星数据信息

设备	载波相位观测量	伪距观测量	多普勒观测量	支持频段
A	是	是	是	L1/B1
B	是	是	是	L1/B1
C	否	是	是	L1/B1
D	是	是	是	L1/B1

### 3 数据分析

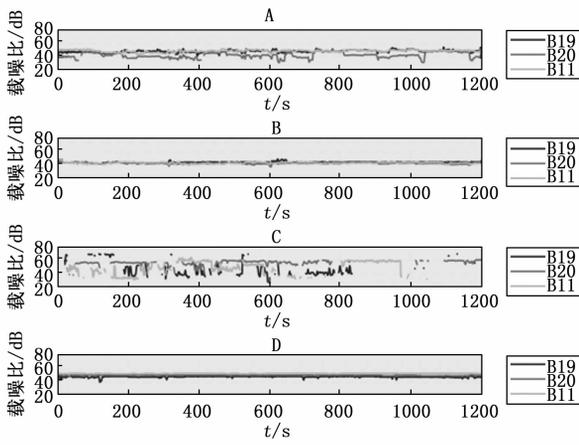
#### 3.1 载噪比

不同设备的载噪比数据分析如图 2 所示, 从图 2 (a) 中可以看出 D 设备的载噪比数据无明显间断且不同伪卫星数据无交叉现象, 明显稳定性和连续性都要优于其他三款设备。而 C 设备载噪比数据图像明显最为混乱, 间断点, 数据交叉处众多, 故数据质量最差; 从图 2 (b) 中可以看出 B, D 设备的载噪比数据完整率为 100%, 数据采集过程中未发生数据丢失, A 设备仅有 B20 载噪比数据完整率为 98%, 其他两颗卫星载噪比数据完整率均为 100%, C 设备的信号出现严重的丢失现象, B19, B20, B11 载噪比数据完整率分别为 27.83%、54.83%、46.33%;

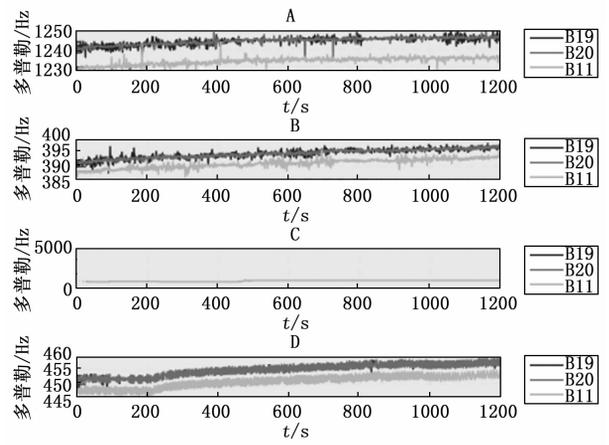
D 设备载噪比的标准差分别为 1.123 8、0.451、0.432 5 dB, 数据最稳定; B 设备载噪比的标准差分别为 1.064 6、1.206 4、1.136 4 dB 在智能手机中载噪比数据最稳定但比 D 略差, A 设备载噪比标准差的平均值为 2.865 7 dB, C 设备载噪比标准差的平均值高达 8.403 8 dB。可以发现, D 设备载噪比数据的连续性稳定性均最佳, B 设备在几款智能手机数据中的稳定性连续性最好。

#### 3.2 多普勒频移

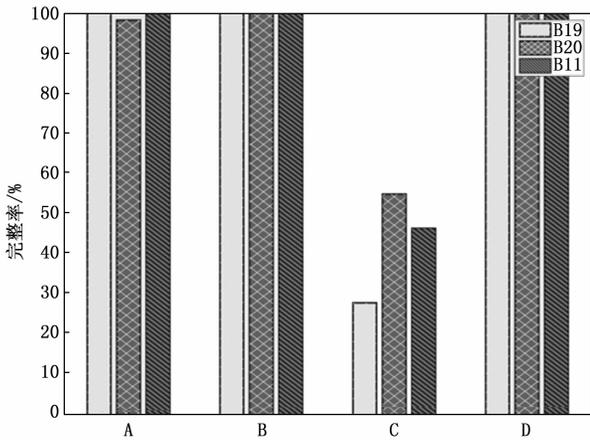
不同设备的多普勒频移数据分析如图 3 所示, 限幅



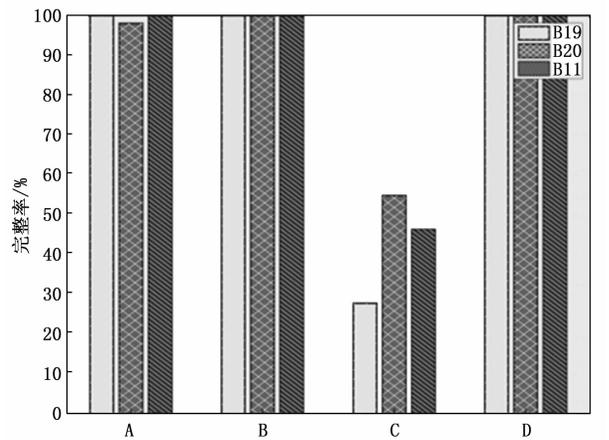
(a) 高斯滤波后载噪比变化



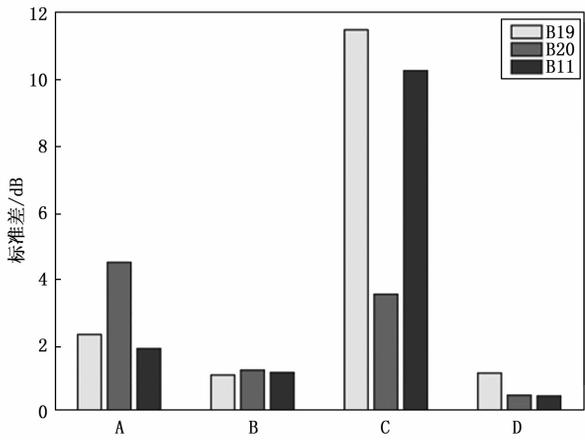
(a) 限幅滤波后多普勒频移图



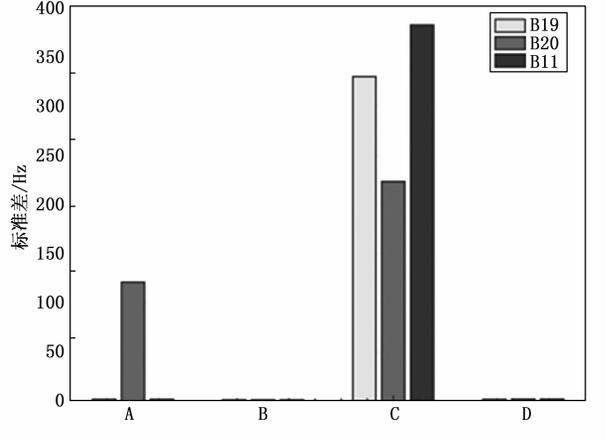
(b) 载噪比数据完整率



(b) 多普勒频移数据移完整率



(c) 载噪比标准差



(c) 多普勒频移数据移标准差

图 2 载噪比数据分析图

图 3 多普勒频移数据分析图

滤波后多普勒频移图显示 A, B, D 三款设备多普勒频移变化范围均在 20 Hz 以内而 C 设备接收到的 B19, B20 伪卫星信号不仅间断处较多且多普勒频移变化范围明显更大。

多普勒频移数据移完整率图显示 B, D 设备的多普勒频移数据移完整率均为 100%, A 设备的多普勒频移数据移完整率分别为 100%、98%、100%, C 设备仅有

B20 的多普勒频移数据移完整率为 54.83%, 超过 50%。

A, B, C, D 设备多普勒频移数据移标准差的均值分别为 44.662 6、1.581 1、311.340 9、2.213 9 Hz。

可以发现 B、D 设备在多普勒频移数据的连续性和稳定性方面表现优异, 适用于高精度定位和导航应用。而 C 设备由于多普勒频移数据变化范围大且数据质量

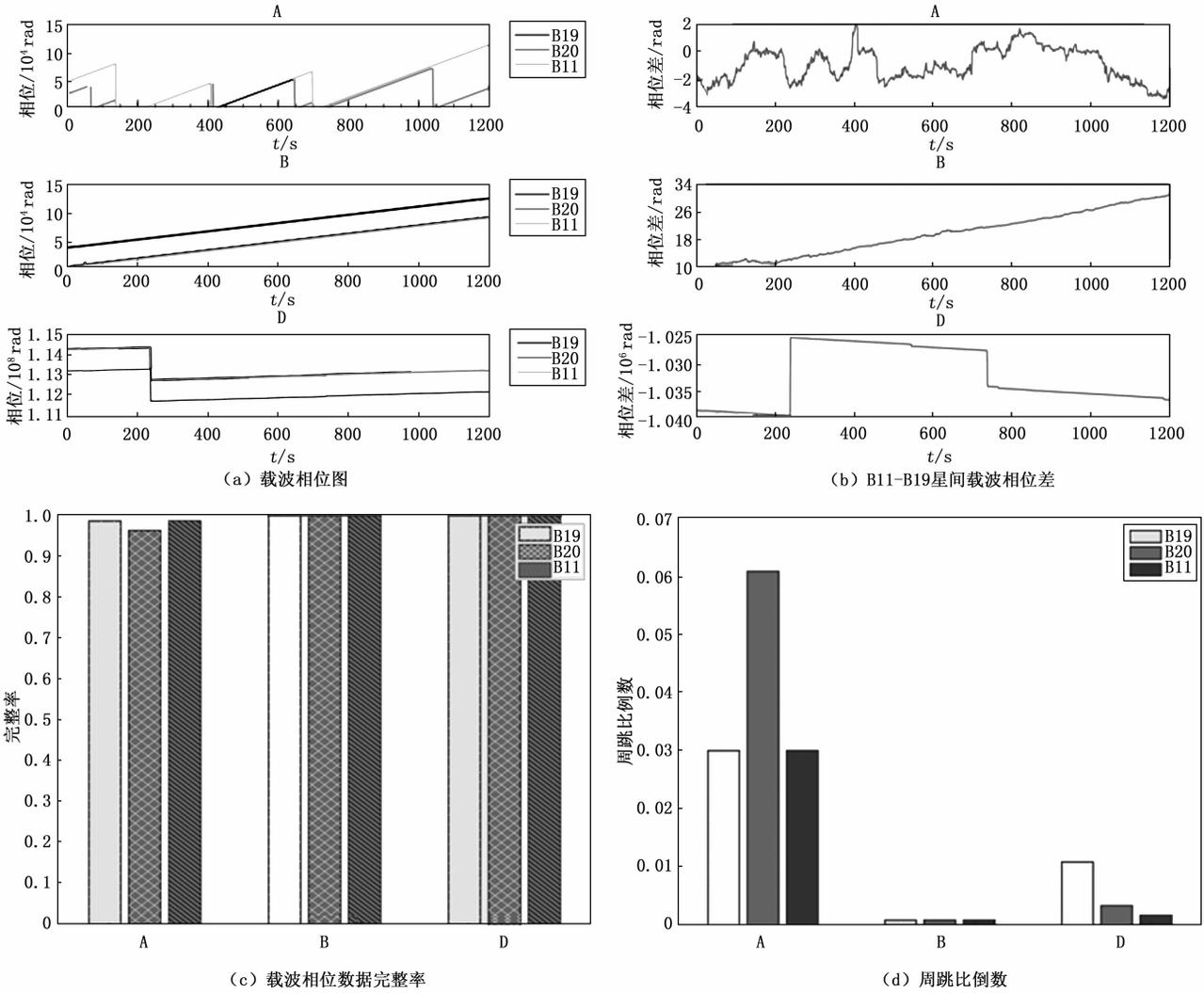


图 4 载波相位数据分析图

差, 不适合高精度应用。A 设备在限幅滤波后的数据质量有所提升, 但仍需注意 B20 伪卫星数据的稳定性问题。

### 3.3 载波相位

由于 C 设备在现有条件下无法解算出载波相位, 故后续数据分析 C 设备不再参与; 由于载波相位一旦发生跳变, 则数值变化巨大, 故采用周跳比的倒数来衡量载波相位的数据稳定性。

不同设备的载波相位数据分析如图 4 所示, 载波相位图显示 A 设备接收到的伪卫星载波相位数据在多处发生跳变, 图像转折起伏较大, B 设备载波相位数据图像最为平滑, D 设备载波相位数据仅发生一次较为明显数据跳变, 数据图像整体仍较为平滑; 载波相位数据完整率图显示, B、D 设备的载波相位数据完整率均为 100%, A 设备载波相位数据完整率分别为 98.67%、96.33%、98.67%, 出现了数据丢失现象; B 设备周跳比例数均小于 0.1%, 载波相位发生跳变的次数最少, 相对来说最稳定, A 设备接收的 3 颗卫星周跳比例数均大于 3%, 数据最不稳定。静止状态下, A 的星间载波

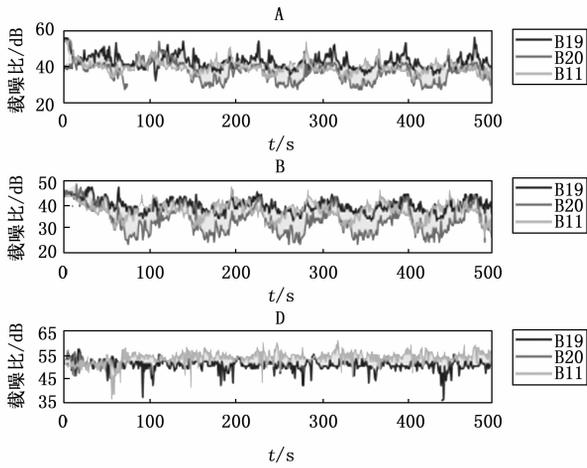
相位差变化在 5 rad 内, B 的星间载波相位差变化在 20 rad 之内, 变化幅度远远小于 D 设备在 15 000 rad 内的数据变化, 故 B 设备的载波相位数据的鲁棒性最好。

### 3.4 步行状态下伪卫星观测数据

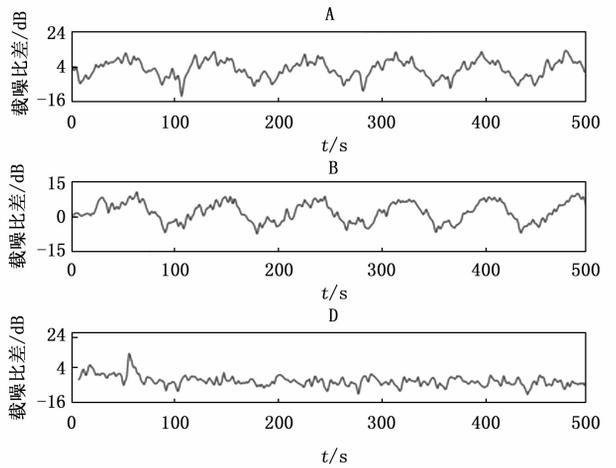
针对动态条件下伪卫星观测数据的分析, 尤其是步行场景下不同设备的表现, 可以从以下几个方面入手, 如图 5 所示。

步行时载噪比变化图显示 3 种设备载噪比变化均在 30 dB 以下, 且均无明显间断点, 数据均比较稳定; 步行时 B11~B19 星间载噪比差高斯滤波图显示 A 设备峰谷值之差在 24 dB 以内, B 设备峰谷值之差在 18 dB 以内, D 设备峰谷值之差在 33 dB 以内, 且只有 A、B 设备的星间载噪比差数据呈现明显周期性变化趋势。

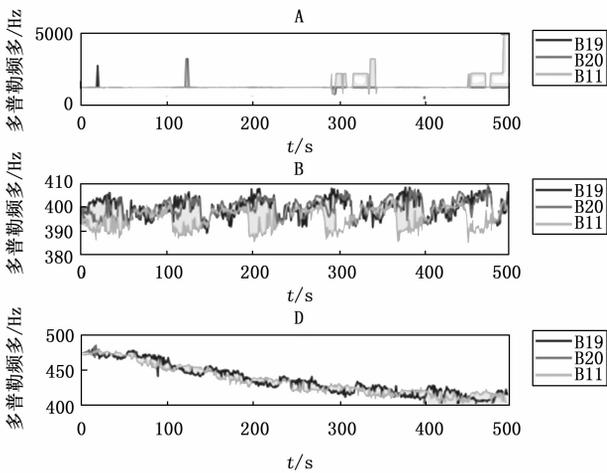
步行时多普勒频移变化图显示, A 设备多普勒频移变化范围为 5 000 Hz, 且 A 设备多普勒频移数据跳变点明显比 B、D 设备多。B 设备多普勒频移变化范围为 30 Hz, 数据整体稳定, 有周期性变化趋势。A 设备多普勒频移变化范围为 100 Hz, 但周期性变化趋势不明显。



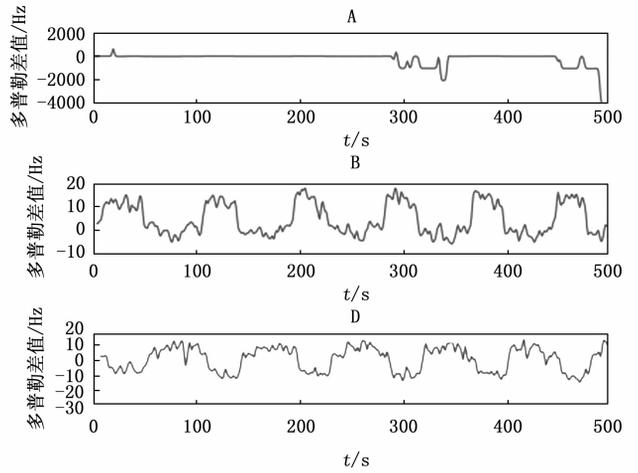
(a) 步行时载噪比变化图



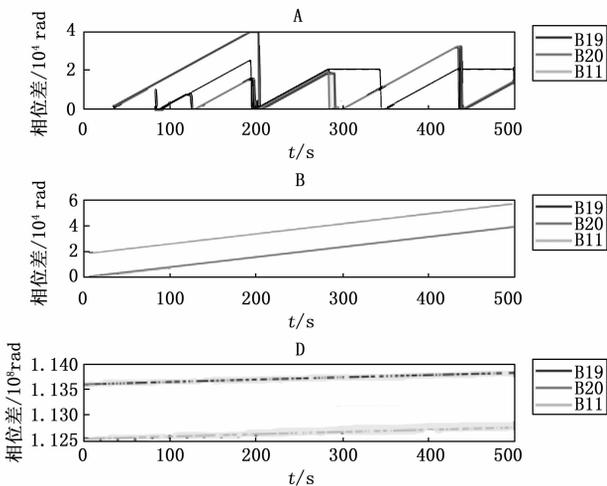
(b) 步行时B11-B19星间载噪比差高斯滤波图



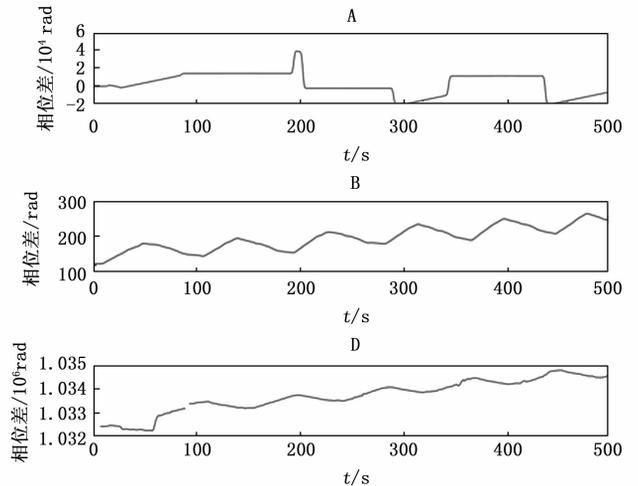
(c) 步行时多普勒频移变化图



(d) 步行时B11-B19星间多普勒频移差高斯滤波图



(e) 步行时载波相位变化图



(f) 步行时B11-B19星间载波相位差高斯滤波图

图 5 动态情况下伪卫星观测数据分析

步行时 B11~B19 星间多普勒频移差高斯滤波图显示, A 设备峰谷值之差在 4 400 Hz 以内, B 设备峰谷值之差在 23 Hz 以内, C 设备峰谷值之差在 30 Hz 以内, 且只有 B, D 设备的星间多普勒频移差数据呈现明显周期性变化趋势。

步行时载波相位变化图显示 A 设备接收到的伪卫星载波相位数据在多处发生跳变, 图像转折起伏较大, B 设备载波相位数据图像最为平滑, D 设备载波相位数据仅发生多次较为明显数据间断, 数据图像整体变化趋势明显。

步行时 B11~B19 星间载波相位差高斯滤波图显示 A 设备数据变化无明显规律, B, D 设备星间载波相位差数据均有明显周期性变化趋势, 但 D 设备载波相位差局部峰谷值之差明显高于 D。

综合而言, 在地下停车场绕圈行走时, A 设备仅星间载噪比差出现较为规律的近似正弦波变化趋势; D 设备仅星间载噪比差数据未出现明显变化趋势; B 设备星间载噪比差、多普勒频移差和星间载波相位差数据均出现明显近似正弦波变化, 且星间载波相位差变化范围  $1\ 400\ \text{rad}$ , 远小于 D 设备星间载波相位差变化范围  $3 \times 10^6\ \text{rad}$ , 表现出较高的稳定性和精度, 更符合实际情况。

#### 4 实验结果与分析

1) 在静态环境中, B 设备的多普勒频移和星间载波相位差两项关键指标表现出高度的稳定性和连续性, 其性能已达到专用接收机 (D) 的标准。在动态步行状态下, B 设备的星间载噪比差和星间载波相位差的鲁棒性表现尤为突出, 甚至超越了专用接收机的性能。这些优异的性能指标为实现室内高精度定位提供了有力的数据支持。

2) 同种参数星间数据做差可以消除接收机钟差等系统误差, 更好地反映出真实状况。通过对比可以发现, 星间载噪比差, 星间多普勒频移差虽然有着明显的循环变化规律, 但数据不断出现跳变现象; 而星间载波相位差相对于其他参数, 在高斯滤波后变化趋势更平滑, 准确度更高, 故根据载波相位差来设计定位算法可能是实现室内高精度定位算法的有效途径。

3) 同时不同手机之间接收到的伪卫星数据差异较大, 仅依靠伪卫星进行定位并不能适用所有手机, 故需要通过蓝牙, PDR 等定位方法进行融合来提高智能手机端室内定位算法的稳定性与普适性。充分发挥北斗伪卫星信号与 GNSS 信号兼容的优势, 利用智能手机现有硬件设备进行多源融合定位, 是实现地下停车场跨平台高精度室内定位以及室内外定位一体化的有效途径, 也可以为智慧城市的整体定位服务提供更完整的解决方案。

#### 5 结束语

本文从智能手机端接受到的伪卫星数据的重要参数载噪比, 多普勒频移, 载波相位, 进行数据质量统计分析, 发现测量型接收机的数据质量指标并不完全优于智能手机; 在锁星能力和卫星数据质量方面, 不同型号的智能手机存在明显差异。一些智能手机的伪卫星原始观测数据存在数据完整率低和周跳频繁等问题, 在不进行数据优化的情况下直接使用, 会很大程度上影响定位精度。因此, 在之后的位置解算过程中, 可以通过卡尔曼滤波和设置载噪比阈值等方法, 优化数据, 从而提升定位精度。

#### 参考文献:

- [1] 张 垠. Android 智能手机 GNSS 高精度定位方法研究 [D]. 北京: 中国科学院大学 (中国科学院国家授时中心), 2022.
- [2] 徐 黎, 袁运斌. 基于北斗观测值的智能手机 GNSS 定位研究 [J]. 数据与计算发展前沿, 2022, 4 (4): 88 - 102.
- [3] CHENG S S, WANG F, LI G C, et al. Single-frequency multi-GNSS PPP-RT-K for smart phone rapid centimeter-level positioning [J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23 (18): 21553 - 21561
- [4] 毕京学. 智能手机 Wi-Fi/PDR 室内混合定位优化问题研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- [5] SIDDIQA S, SAHOO S, SARASWATHI K. Design and implementation of indoor positioning using UWB positioning algorithm for indoor navigation [C] //2022 IEEE 3rd Global Conference for Advancement in Technology (GCAT), Bangalore, India: IEEE, 2022: 1 - 7.
- [6] LU J, SHAN C, JIN K, et al. ONavi: data-driven based multi-sensor fusion positioning system in indoor environments [C] //2022 IEEE 12th International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), Beijing, China: IEEE, 2022: 1 - 8.
- [7] SHU M, CHEN G, ZHANG Z, et al. Accurate Indoor 3D location based on MEMS/vision by using a smartphone [C] //2022 IEEE 12th International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), Beijing, IEEE, 2022: 1 - 8.
- [8] 王东明. 智能手机 GNSS 定位算法研究 [D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2023.
- [9] 程 通. 蓝牙与 Wi-Fi 信号融合分析的室内定位技术研究 [D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2024.
- [10] 王博远. 基于 WiFi 和惯性传感器的智能手机室内定位方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.
- [11] WEISS P. The global positioning system (GPS): creating satellite beacons in space, engineers transformed daily life on earth [J]. Engineering, 2021, 7 (3): 290 - 303.
- [12] 张 瀚. 室内环境下伪卫星信号传播效应分析 [D]. 南京: 东南大学, 2020.
- [13] 赵 越. 伪卫星室内定位结构化多径误差建模研究 [D]. 南京: 东南大学, 2021.
- [14] HUANG L, YU B, LI J, et al. A robust indoor high-precision positioning method based on arrayed pseudolites [C] //2022 IEEE 12th International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), Beijing, IEEE, 2022: 1 - 8.
- [15] CHENG P, LI Z K, ZHANG Q Z, et al. Smartphone-based vision/MEMS-I-MU/GNSS tightly coupled seamless positioning using factor graph optimization [J]. Measure-

- ment, 2024, 229: 114420.
- [16] GAMARRA M V, PAPA HARALABOS S, REZAEI F, et al. Seamless indoor and outdoor positioning with hybrid bluetooth AoA and GNSS signals [C] //2023 13th International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), Nuremberg, IEEE, 2023: 1-6.
- [17] ZHANG J W, XIAO F, YANG F X, et al. Research on indoor/outdoor state switching based on smart phone and GNSS satellite status information [C] //2019 IEE-E 2nd International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering (AUTEEE), Shenyang, IEEE, 2019: 524-529.
- [18] GUO J J, ZHANG H L, LIU X, et al. Oppo Reno5pro smartphone single-frequency GNSS positioning performance evaluation [C] //2022 IEEE International Conference on Unmanned Systems (ICUS), Guangzhou, IEEE, 2022: 1415-1419.
- [19] KUNA D, PERUMALLA N K. An analysis of multi-GNSS observations from android smartphones [C] //2023 IEEE 12th International Conference on Communication Systems and Network Technologies (CS-NT), Bhopal, IEEE, 2023: 961-965.
- [20] KAISER S, WEI Y Z, RENAUDIN V. Analysis of IMU and GNSS data provided by Xiaomi 8 smartphone [C] //2021 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPI-N), Lloret de Mar, IEEE, 2021: 1-8.
- [21] 李雅宁, 李宏生, 蔚保国. 一种室内伪卫星混合指纹定位方法 [J]. 西安电子科技大学学报, 2023, 50 (5): 21-31.
- [22] 何勇灵, 陈彦民, 周岷峰. 四旋翼飞行器在风场扰动下的建模与控制 [J]. 中国惯性技术学报, 2013, 21 (5): 624-630.
- [23] MUNOZ L E, SANTOS O, CASTILLO P. Robust nonlinear real-time control strategy to stabilize a PVTOL aircraft in crosswind [C] //2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2010: 1606-1611.
- [24] LI J, LI Y T. Dynamic Analysis and PID Control for a Quadrotor [C] //2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. IEEE, 2011: 7-10.
- [25] 杨跃能, 郑伟, 吴杰. 变化风场中无人机的动力学建模及飞行特性分析 [J]. 飞行力学, 2011, 29 (3): 8-11.
- [26] 马文博, 李璜筹, 魏帅. 基于ADRC的四旋翼抗复合风场干扰悬停性能研究 [J]. 理论与方法, 2020, 39 (2): 71-76.
- [27] 冯长辉, 齐晓慧, 苏立军, 等. 风干扰下的四旋翼无人机ADRC控制律设计 [J]. 测控技术, 2016, 35 (9): 47-51.
- [28] 吕家启. 四旋翼无人机抗风控制技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [29] 赵元魁, 王耀力. 风场环境下四旋翼飞行器抗干扰研究 [J]. 机械科学与技术, 2019, 38 (4): 530-537.
- [30] 王小艺, 刘迪一, 于家斌, 等. 复杂风场环境下的多旋翼无人机编队故障检测方法 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2023, 53 (3): 823-831.
- [31] 黄梦渊. 旋翼飞行器风环境仿真建模及抗风扰研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2022.
- [32] 高宏建, 薛九天, 苏小东. 无人机导航与飞行控制技术 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2023.
- [33] 杨永刚, 宋炜. 风场干扰下四旋翼无人机的飞行控制与仿真 [J]. 中国民航大学学报, 2021, 39 (3): 16-21.
- [34] 肖业伦, 金长江. 大气扰动中的飞行原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.
- [35] 王国平, 陶玲, 戎保, 等. 多场耦合系统动力学仿真方法研究进展 [J]. 力学进展, 2023, 53 (2): 468-495.