

保密等级： 公开

文档编号：

发放范围：

GSDC 经验总结

文档版权声明

本文档由 Winchell 编写，并享有版权。

任何人或组织不得违反「版权法」，在未经同意的情况下，以任何形式（包括但不限于电子版、印刷版、微缩版、复印、录制等）复制本文件、将其储存于可读取的系统或发送出去。

本文件中出现的产品或公司名称是其各自拥有者的商标或注册商标。

目录

1. 摘要	4
2. 手机观测数据	5
3. 手机特性汇总	6
3.1 载波相位的有效性	7
3.2 伪距率是否来自多普勒	7
3.3 伪距和多普勒是否相关	8
3.4 伪距和载波相位是否相关	8
3.5 TDCP 中是否存在系统误差	9
4. 观测噪声模型	10
4.1 RTKLIB 配置	10
4.2 自适应观测噪声	10
5. TDCP	11
5.1 TDCP 的定义及缺点	11
5.2 TDCP 工程应用	11
6. RTKLIB	13
6.1 RTKLIB 代码 (PPK)	13
6.2 RTKLIB 配置参数	13
7. 算法框架或策略	14
7.1 状态域滤波	14
7.2 图优化	15
7.3 优化伪距观测值	15
7.4 M 估计	16
参考资料	17

1. 摘要

通常我们想了解某一项技术时，那么该技术的相关赛事是获取技术灵感的不错途径，这些年比较有名的比赛是谷歌分米挑战赛（Google Smartphone Decimeter Challenge, GSDC），由谷歌公司、美国导航协会（Institute of Navigation, ION）和 Kaggle 平台联合举办，该比赛已经举办了三届。

在该赛事中，谷歌提供了一套手机采集的数据，GNSSer 可以下载并优化算法，然后将结果上传到指定网站上，使用统一的规则进行打分评判。同时 Kaggle 还有相应的讨论区，供大家进行技术交流。

后文我将围绕我感兴趣的几个方面介绍我从该比赛中习得的经验。

2. 手机观测数据

GNSS 观测量通常包括伪距、载波相位、多普勒和载噪比。在 GSDC 中则包含了一些专业且细致的名词，如伪距率、ADR（Accumulated Delta Range，载波相位累积变化量）等等。以下以安卓平台定义的 GNSS 数据接口名称进行介绍：

1. PseudorangeRateMetersPerSecond（伪距率，m/s）

通常伪距率是由多普勒观测数据计算得到的（二者可相互转换）：

$$v_r = -\frac{f_d \cdot c}{f_0}$$

- v_r ：伪距率 (m/s)；
- f_d ：多普勒频移 (Hz，通常从 RINEX 文件中的 `D` 观测类型获取)；
- c ：光速，约为 299,792,458 m/s；
- f_0 ：载波频率 (Hz，取决于信号频段，例如 GPS L1 为 1575.42 MHz)。

不过也有一些芯片内部不输出多普勒观测，因此它的伪距率信息是从载波相位进行历元间差分得到的。

2. AccumulatedDeltaRangeMeters（载波相位累积量，m）

在 RINEX 语境下，ADR 和载波相位表示的是同一数据，不过 RINEX 中的载波相位是以周 (cycle) 为单位的，这里的 ADR 的单位是米 (m)。

3. Cn0DbHz（载噪比 C/N0，dB-Hz）

C/N0 是 GNSS 领域中最标准的信号质量指标。但是由于叫法上的习惯，大家也会使用 SNR（信噪比）和 CNR（载噪比）。

3. 手机特性汇总

参考 GSDC 2023-2024 第二名 Suzuki 的分析[1]，对不同型号手机进行差异化处理，可以减少由 GNSS 观测数据差异性所导致的误差（如图 1 所示）。他提供了以下分析方向：

No.	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Manufacturer	Google	Google	Google	Google	Google	Xiaomi
Name	pixel4	pixel4xl	pixel5	pixel6pro	pixel7pro	Mi8
Photo						
GNSS chip vender	Qualcomm	Qualcomm	Qualcomm	Broadcom	Broadcom	Broadcom
IMU chip	LSM6DSR	LSM6DSR	LSM6DSR	LSM6DSR	LSM6DSV	ICM20690
BeiDou observations	✓		✓ (Only 1 trip)			✓
L5 observations	✓	✓	✓	✓	✓	✓
BeiDou B2a observations						
Invalid GLONASS carrier phase						
Invalid carrier phase						
Doppler is NOT source of pseudorange rate						✓
Pseudorange and Doppler are NOT linked						
Pseudorange and carrier phase are NOT linked						
Bias error in TDCP						

No.	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
Manufacturer	Samsung	Samsung	Samsung	Samsung	Samsung	Samsung
Name	sm-s908b	sm-988b	sm-a325f	sm-a326u	sm-a205u	sm-a505u
Photo						
GNSS chip vender	Samsung	Samsung	MediaTek	MediaTek	Samsung	Samsung
IMU chip	LSM6DSO	LSM6DSO	LSM6DSL	LSM6DSL	LSM6DSL	ICM42605M
BeiDou observations	✓	✓	✓			
L5 observations	✓	✓				
BeiDou B2a observations	✓					
Invalid GLONASS carrier phase	✓				✓	✓
Invalid carrier phase			✓			
Doppler is NOT source of pseudorange rate						
Pseudorange and Doppler are NOT linked					✓	✓
Pseudorange and carrier phase are NOT linked				✓	✓	✓
Bias error in TDCP					✓	✓

图 2-1 GSDC 2023-2024 测试数据集中包含的智能手机在 GNSS 观测方面存在不同特点
这里我提取了几个感兴趣的问题：

1. 载波相位是否有效？
2. 伪距率是否来自多普勒？
3. 伪距和伪距率是否相关？
4. 伪距和载波相位是否相关？
5. TDCP 中是否存在偏差误差？

3.1 载波相位的有效性

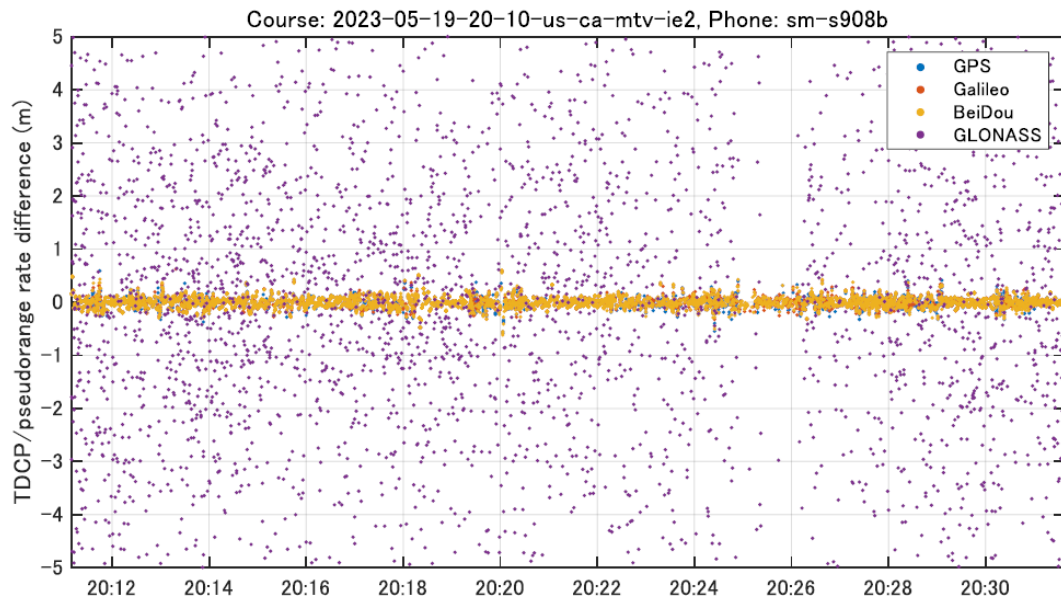


图 2-2 每个卫星系统的 TDCP 与伪距率差值

图 2.2 显示了三星智能手机的 TDCP 与伪距率之间的差异。通常，**TDCP** 与通过多普勒计算的伪距率之间的差异应为零。然而，GLONASS TDCP 观测中观察到大量噪声。对于这些智能手机，我们认为 GLONASS 载波相位观测为无效，并从 TDCP 计算中排除。

3.2 伪距率是否来自多普勒

对于小米 Mi8 智能手机，其日志中不包含钟漂的估计。此外，输出的伪距率值与 TDCP 相等。这些结果表明，Mi8 智能手机的接收机内部不输出多普勒观测数据，其伪距率是由 TDCP 得到的，而非多普勒观测。

因此，Mi8 智能手机实时输出的伪距率是载波相位历元差分时的伪距率，这意味着对于 1Hz 数据，观测时间比实际时间滞后 0.5 秒。因此有的算法不使用小米 Mi8 观测的伪距率进行速度估计。

总之，有的设备中没有提供多普勒观测数据，即便有也可能是由载波相位进行历元间差分获得的。

3.3 伪距和多普勒是否相关

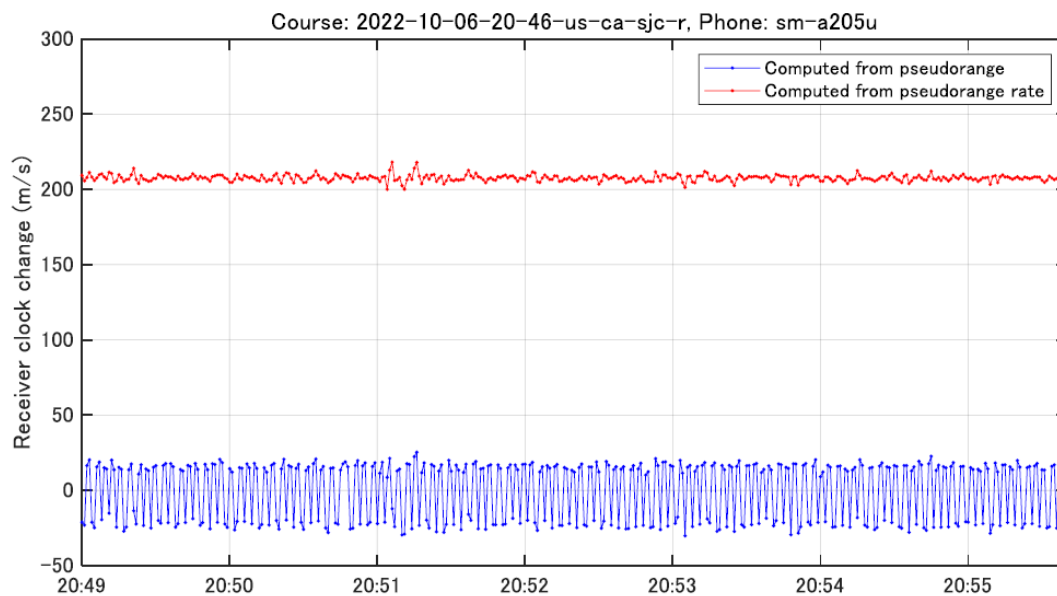


图 2-3 基于伪距计算的接收机钟差与基于伪距变化率计算的接收机钟漂

对于某些智能手机，从伪距计算的接收机时钟差和从伪距率计算的接收机时钟漂移不匹配，如图 3 所示。通常伪距计算的接收机钟差和从伪距率计算的接收机时钟漂移应该一致。然而，如图所示，某些智能手机的这两个参数不匹配。对于这些智能手机，所提出的方法不使用时钟因子（该因子限制接收时钟误差随接收时钟漂移的变化），以应对这些智能手机的情况。

如果在状态估计的过程中需要用钟漂估钟差，那么需要确保芯片中接收机钟差和钟漂是相关的（也即伪距和伪距率相关），对于不相关的数据，算法则需要做一些异常处理。

3.4 伪距和载波相位是否相关

对于某些智能手机，不仅伪距和伪距率不匹配（如 2.2.3 节中所述），TDCP 中包含的接收机钟差变化（历元间载波相位观测相减得到的钟差差值）也与从伪距计算的接收机钟差变化（历元间伪距观测相减得到的钟差差值）不一致。

由于这些智能手机中从伪距率计算的时钟漂移与载波相位中包含的时钟误差变化是一致的，因此使用从伪距率（而非伪距）估计的时钟变化作为 TDCP 中时钟变化的估计模型（TDCP 需要的钟误差由伪距率提供）。

3.5 TDCP 中是否存在系统误差

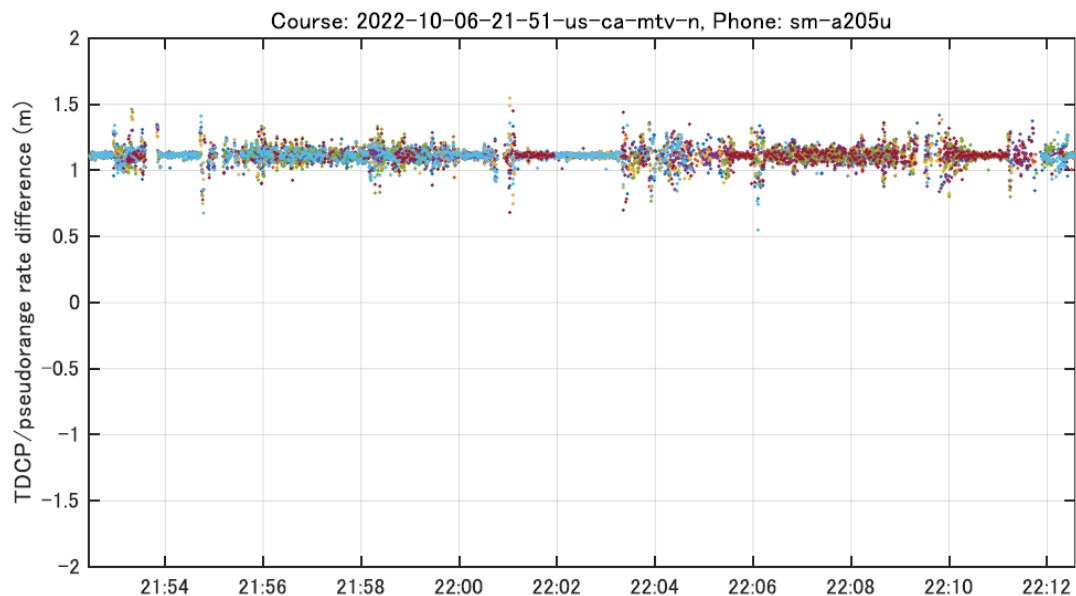


图 2-4 TDCP 与伪距变化率之间的差异

在多款智能手机的 TDCP 测量中观察到固定偏差误差。图 2-4 显示了 TDCP 与伪距率之间的差异。通常，如图 3 所示，这种差异应为零。然而，如图 5 所示，某些智能手机的 TDCP 中包含大约 1.1 米的固定偏差误差。对于这些智能手机，预先校正了偏差误差，并将其用作 TDCP 因子。

```
188 noise_rubust = noise_robust(prm.L_kernel, noise);
189 if ismember(phone, ["sm-a205u", "sm-a217m", "sm-a505g",
"sm-a600t", "sm-a505u"])
% TDCP offset for some smartphones
prm.L_offset = 1.117; % m
graph.add(gtsam_gnss.TDCPFactor_XXDD(keyX1, keyX2,
keyD1, keyD2, losvec, tdcpr+prm.L_offset dtgps,
orgx1, orgx2, noise_rubust));
191 elseif ismember(phone, "samsunga325g")
```

图 2-5 TDCP 系统误差补偿

Suzuki 直接将固定偏差补偿到 TDCP 中了[11], 并认为多普勒数据是正确的。

4. 观测噪声模型

4.1 RTKLIB 配置

基于卫星仰角的 GNSS 观测模型更适用于专用接收机。然而，对于智能手机，基于信号强度（载噪比，C/N0）的模型比依赖仰角的模型更能有效地处理观测权重[4,5,8]。因为智能手机观测误差往往由信号质量问题主导，而非大气误差，而使用仰角加权观测的动机正是为了解决大气误差。

RTKLIB-demo5 分支支持固定权重、基于仰角的权重、基于 C/N0 的权重和基于接收机不确定性的权重的任意组合。在比赛中，Everett 采用了固定权重和基于 C/N0 的权重的均衡组合[9]。

4.2 自适应观测噪声

即使在开阔天空环境下，不同智能手机型号和卫星系统的最大 C/N0 差异也很大。目前已经存在几种基于 C/N0 的 GNSS 观测噪声模型[6, 7]，为了简化 GNSS 观测噪声的确定过程，本研究为每次行程自适应地确定 GNSS 观测噪声。设 $S_{sig}=\{s_1,s_2,...,s_n\}$ 为每次行程中每种信号的 C/N0 观测集合。GNSS 观测噪声通过以下公式为每款智能手机、每次行程和每种 GNSS 信号确定：

$$\sigma_{sig,i} = c_{sig} \cdot 10^{-(s_i - prctile(S,95))/20}$$

其中， c_{sig} 是调整每种信号权重大小的系数， $prctile(S,95)$ 是一个返回所有数据第 95 百分位值的函数。因此，每种信号观测的噪声根据实际行驶数据的信号强度分布自适应地确定。

5. TDCP

5.1 TDCP 的定义及缺点

在 RINEX 原始观测数据的语境下，ADR 代表的就是载波相位。GSDC 的高分选手几乎都用到了 ADR，并用其进行速度估计。

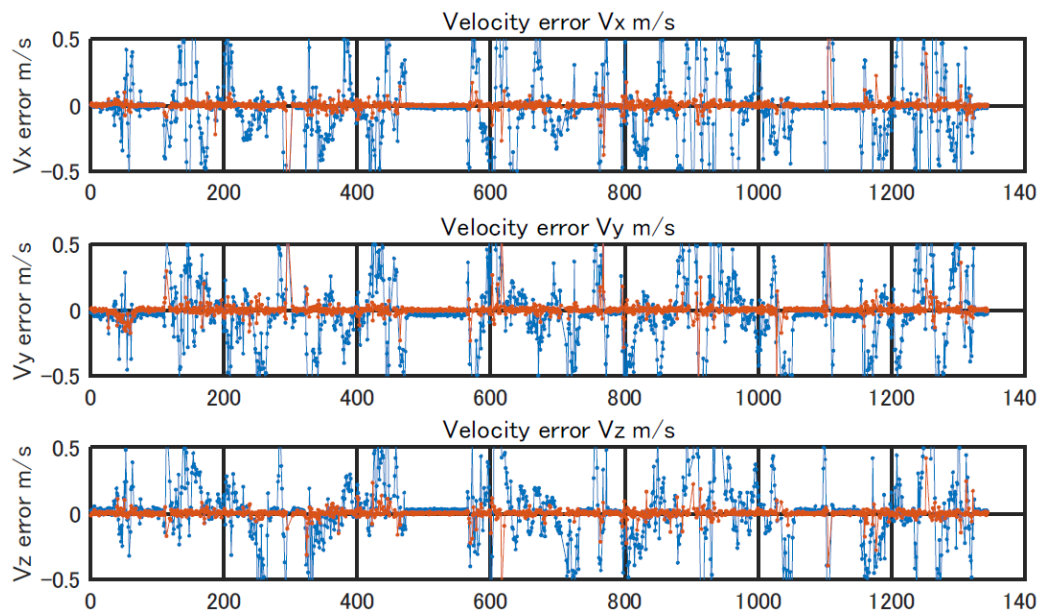


图 2-5 多普勒与 ADR 速度估计之间的误差比较。ADR 能比多普勒更准确地估计速度，但由于周跳现象，其可用性较低。

多普勒和 ADR 都可以用来估计速度，而基于 ADR 计算的速度（伪距率）比基于多普勒计算的速度更加精确（如图 5 所示）。基于 ADR 的伪距率计算如下：

$$\dot{\rho}_i^k = \frac{ADR_{i+1}^k - ADR_i^k}{\Delta t}$$

TDCP 的优点是可以实现相对开阔地段的亚米级定位。但是 TDCP 的准确性低于多普勒（因为需要考虑周跳和半周模糊度问题）。特别的，ADR 的缺失通常发生在突然加速和减速中，此时的速度状态也会出现缺失[3]。

5.2 TDCP 工程应用

1. 因子约束。速度估计阶段以多普勒为基础，但是当 ADR 有效的时候，则

使用 TDCP 在位置估计阶段添加高精度相对位置约束[2];

2. **位置平滑**。直接使用加权最小二乘从 ADR 估算速度，然后通过调整速度估计参数（降低仰角阈值、忽略 ADR 状态）减少了 ADR 缺失，提高了速度估计的连续性和准确性。猜测这可能间接通过位置平滑提升了定位性能（使用 ADR 平滑 RTKLIB 的输出[3]），但未通过实验证实这一贡献。速度估计与位置估计的分离允许独立优化，可能避免了误差传播，进一步提升了性能。

6. RTKLIB

6.1 RTKLIB 代码 (PPK)

1. 伪距异常值阈值：改为可配置参数，增加灵活性。
2. 测量差分：使用最接近基站观测值而非前一观测值，提升时间一致性。
3. 相位方差调整：按频率和星座优化，提高测量权重分配合理性。
4. 初始观测阈值：收紧异常值检测，避免早期误差累积。

6.2 RTKLIB 配置参数

1. 加权方式：从高度角改为信噪比 (SNR)，更准确反映信号质量。
2. 频率权重：提升 L5 权重 (更精确)，降低 L1 权重。
3. 测量权重：增加伪距权重，减少相位权重，可能因伪距更稳健。
4. 滤波阈值：放宽以纳入更多测量值，增加数据利用率。
5. 过程噪声：减少加速度噪声，优化卡尔曼滤波动态性 (过多减少反而不利)。
6. 时钟调整与插值：禁用不必要的调整和插值，简化模型。

以上优化都是围绕粗差剔除以及观测值噪声设置等方向，算法工作的核心就是给予每个观测量合理的方差信息。此解决方案与原始版本相比，改进了大约一米的精度。这是代码、配置和输入文件多项小改进的积累结果，而非单一重大突破。

7. 算法框架或策略

7.1 状态域滤波

1. GSDC 2022 第三名[3]（有源码，方便复现）

关键点：

- 使用 RTKLIB 根据 GNSS 数据进行位置估计。
- 使用 WLS 根据 GNSS 数据中的 ADR 估计速度。
- 使用卡尔曼平滑和代价最小化进行位置平滑。

2. GSCD2023-2024 第三名

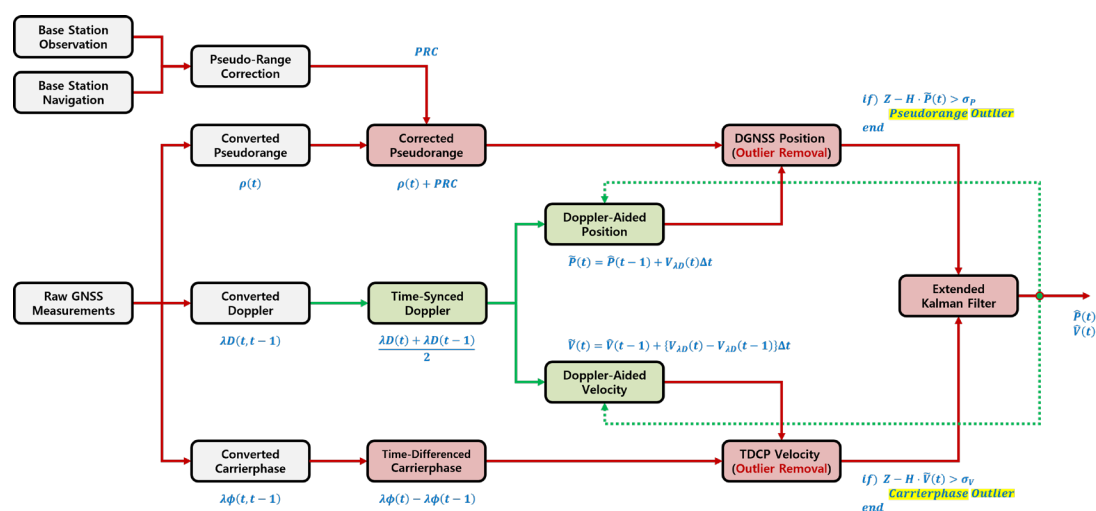


图 7-1 世宗大学方案，基于改进噪声/多径误差处理、Doppler 滤波和 SDOM 技术

关键点：

- 通过残差比较移除异常值；
- 新增更精确的 TDCP 速度估计；
- 用时间同步的多普勒预测位置和速度，适用于更多卫星，但噪声较高。

7.2 图优化

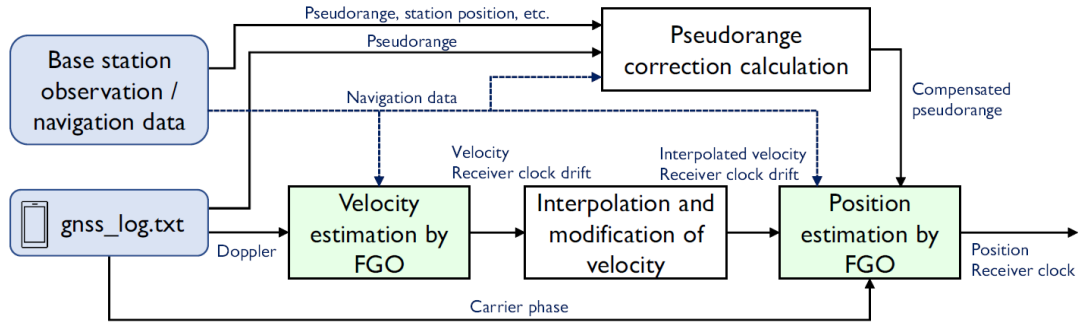


图 7-2 图优化流程：通过因子图优化（FGO）进行速度估计和位置估计

整体流程如图 7 所示，其中两个绿色框中的，即两次图优化的流程。图优化则是将所有的状态以及观测量统一进行平差处理，就是一个维数比较大的最小二乘。

- 第一次图优化为了计算得到每个位置的速度。其输入为 **doppler** 和星历数据。
- 第二次图优化则会利用已计算得到的速度计算相邻位置状态的约束，联合双差伪距，统一进行优化。其输入为双差伪距、第一步的速度信息，以及历元载波变化量。

7.3 优化伪距观测值

1. 载波平滑伪距

$$\bar{P}_k = \frac{1}{M} P_k + \frac{M-1}{M} (\bar{P}_{k-1} + L_k - L_{k-1} + 2\Delta I_{k,k-1})$$

式中， P_k 为 k 历元的伪距观测值， L_k 为 k 历元的载波观测值， $\Delta I_{k,k-1}$ 为前后两个历元的电离层之差。

2. 质量控制

$$\bar{P}_i = \begin{cases} P_i & , |V_i| \leq k_0 \\ \frac{k_0 P_i}{|V_i|} \left(\frac{k_1 - |V_i|}{k_1 - k_0} \right), & k_0 \leq |V_i| \leq k_1 \\ 0 & , |V_i| > k_1 \end{cases}$$

式中， P_i 为权重， k_0 取 1， k_1 取 2.5。

7.4 M 估计

- **M估计器:**

- 使用带有Huber函数的M估计器进行鲁棒估计, 应用于伪距和TDCP因子:

- **伪距:** 包含多径误差。
- **TDCP:** 包含周跳 (Cycle Slip) 。

- **Huber函数:**

$$\rho(e) = \begin{cases} \frac{1}{2}e^2 & \text{if } |e| \leq k \\ k|e| - \frac{1}{2}k^2 & \text{if } |e| > k \end{cases}$$

- **超参数:**

- Huber函数的阈值 k 通过试错法 (Trial and Error) 确定。
- 例如, 伪距可能设置 $k = 5$ 米 (基于伪距噪声水平), TDCP可能设置 $k = 0.1$ 米 (基于载波相位精度) 。

Suzuki 在三次比赛中均使用了 M 估计[1]。2022 年的框架中, 速度估计阶段, M 估计被用于剔除多普勒测量的多径误差[4]。位置估计阶段, 使用带有 Huber 函数的 M 估计进行鲁棒估计, 应用于伪距和 TDCP 以消除伪距的多径误差和 TDCP 中的周跳, M 估计被用于剔除异常值。Huber 函数超参数由试错法确定。

参考资料

- [01] [An Open-Source Factor Graph Optimization Package for GNSS and IMU Integration in Smartphones](#)
- [02] [Two-Step Optimization of Velocity and Position using Smartphone's Carrier Phase Observations](#)
- [03] [GSDC 2022 3rd Place Solution](#)
- [04] T. Suzuki, "Gnss odometry: Precise trajectory estimation based on carrier phase cycle slip estimation," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 7, no. 3, pp. 7319 – 7326, 2022.
- [05] M. Håkansson, "Characterization of gnss observations from a nexus 9 android tablet," *GPS solutions*, vol. 23, no. 1, p. 21, 2019.
- [06] H. Hartinger and F. K. Brunner, "Variances of gps phase observations: the sigma- ϵ model," *GPS solutions*, vol. 2, pp. 35 – 43, 1999.
- [07] B. Bahadur and S. Schön, "Improving the stochastic model for code pseudorange observations from android smartphones," *GPS Solutions*, vol. 28, no. 3, p. 148, 2024.
- [08] European Global Navigation Satellite Systems Agency. (2019). PPP-RTK Market and Technology Report. Available online:
https://www.euspa.europa.eu/sites/default/files/calls_for_proposals/rd.03_-_ppp-rtk_market_and_technology_report.pdf (accessed on 18 Aug 2022).
- [09] [An RTKLIB open-source based solution](#)
- [10] [GSDC 2023-2024 3rd Place Solution](#)
- [11] Source code to reproduce the results of the GSDC 2023 on Kaggle:
<https://github.com/taroz/gsd2023>