

DOI: 10.12265/j.gnss.2021010801

非组合模型下 Galileo 双频与三频短基线解算精度分析

徐亚楠¹, 刘舜²

(1. 广州番禺职业技术学院, 广州 511483;

2. 陕西铁路工程职业技术学院, 陕西 渭南 714099)

摘要: Galileo 系统是当前常用的定位系统之一, 本文作者利用自编软件进行了一种非组合模型下 Galileo 系统双频与三频短基线解算试验. 经研究发现: 对于 9 km 短基线, 非组合模型下 Galileo 双频短基线解算水平精度优于 5 cm, 高程精度优于 10 cm, 三频组合解算精度较双频有明显提升, 水平精度优于 3 cm, 高程精度优于 4 cm.

关键词: Galileo; 非组合模型; 短基线; 双频; 三频

中图分类号: P228.4

文献标志码: A

文章编号: 1008-9268(2021)03-0099-05

0 引言

全球导航卫星系统 (GNSS) 以北斗卫星导航系统 (BDS)、GPS、Galileo 和 GLONASS 四大系统为主, 当前每个系统都能单独提供全球定位服务, 且部分卫星能播发三频甚至三频以上的信号, 为 GNSS 精密数据处理提供了新思路^[1-3]. Galileo 系统是欧盟建设和研发的卫星导航定位系统, 于 2016 年 12 月 15 日正式声明公开服务, 其建设计划最早可追溯到 20 世纪 90 年代, 该系统计划由 30 颗卫星组成, 且能播发 E1、E5a、E5b 等多频信号^[4-7]. 虽然 Galileo 系统正式开通服务时间较短, 但国内很多学者对其定位性能进行了研究. 文献 [8] 基于多个 MGEX (Multi-GNSS Experiment) 跟踪站数据分析校正天线参数对 Galileo 系统双频精密单点定位 (PPP) 的影响, 研究结果表明, 与消电离层定位结果相比, 水平定位精度相当, 高程方向定位精度提升较大. 文献 [9] 推导了适用于多频非组合 (UC) 观测值的 GNSS 卫星精密定轨模型, 并且基于多测站 Galileo 双频和三频数据进行定轨, 发现双频 UC 模型与 IF 模型定轨精度相当, 三频 UC 模型和 IF 模型浮点解精度较 E1/E5b 双频组合结果有一定的提升. 文献 [10] 对比分析了 Galileo 系统双频无电离层组合、双频非差非组合和三频非差非组合 PPP 精度以及收敛时间, 发现 Galileo 三频 PPP

精度较优, 且相比双频 PPP 精度有明显提升, 但收敛时间的提升并不明显. 文献 [11] 利用非组合模型解算了 Galileo 系统三频组合 PPP 精度, 发现三频 PPP 精度与收敛时间优于传统双频 PPP, 尤其是在观测数据异常时效果更为明显. 文献 [12] 分析了 GPS/Galileo 组合 PPP 精度, 发现双系统组合 PPP 具有较好的定位结果, 且定位精度与收敛时间较单系统具有一定的改善. 综合当前各学者对 Galileo 系统研究的内容与方法, 本文基于自测试 9 km 短基线, 提出利用一种 UC 定位模型解算 Galileo 双频与三频短基线数据, 并且进一步分析了不同频率组合下定位精度.

1 数学模型

在短基线定位中, 双差函数模型是常用的解算模型. 该模型能有效消除接收机钟差、卫星钟差, 可以最大程度地削弱电离层延迟、对流层延迟和卫星轨道误差的影响, 有利于模糊度的固定^[13]. 双差载波相位与伪距观测方程^[14]一般表示如下:

$$\begin{cases} \nabla \Delta P_{kl}^{ij} = \nabla \Delta \rho_{kl}^{ij} - \nabla \Delta I_{kl}^{ij} + \nabla \Delta T_{kl}^{ij} + \epsilon_{kl}^{ij} \\ \nabla \Delta \Phi_{kl}^{ij} = \nabla \Delta \rho_{kl}^{ij} + \lambda N_{kl}^{ij} - \nabla \Delta I_{kl}^{ij} + \nabla \Delta T_{kl}^{ij} + \epsilon_{kl}^{ij} \end{cases} \quad (1)$$

式中: i 、 j 为卫星编号; k 、 l 为测站编号; $\nabla \Delta$ 为双差算子; $\nabla \Delta P_{kl}^{ij}$ 以 m 单位为双差伪距观测值; $\nabla \Delta \rho_{kl}^{ij}$ 为测

收稿日期: 2021-01-08

资助项目: 陕西省教育厅 2020 年度一般专项科学研究计划 (20JK0578)

通信作者: 徐亚楠 E-mail: 492233260@qq.com

站至卫星间的几何距离; $\nabla\Delta I_{kl}^{ij}$ 为双差电离层延迟误差; $\nabla\Delta T_{kl}^{ij}$ 为双差对流层延迟误差; e_{kl}^{ij} 为双差伪距观测噪声; $\nabla\Delta\Phi_{kl}^{ij}$ 为双差载波相位观测值; λ 为波长; N_{kl}^{ij} 为整周模糊度, 单位为周; ε_{kl}^{ij} 为双差载波相位观测噪声.

在利用 UC 模型定位时, 电离层误差无法消除, 因此将电离层误差当作未知参数进行估计, 在式 (1) 的基础上可以进一步得到三频非组合短基线定位模型^[11, 15-16], 表示如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla\Delta P_{kl,E1}^{ij} = \nabla\Delta\rho_{kl}^{ij} - \nabla\Delta I_{kl,E1}^{ij} + \nabla\Delta T_{kl}^{ij} + e_{kl,E1}^{ij} \\ \nabla\Delta\Phi_{kl,E1}^{ij} = \nabla\Delta\rho_{kl}^{ij} + \lambda_{E1} N_{kl}^{ij} - \nabla\Delta I_{kl,E1}^{ij} + \nabla\Delta T_{kl}^{ij} + \varepsilon_{kl,E1}^{ij} \\ \nabla\Delta P_{kl,E5a}^{ij} = \nabla\Delta\rho_{kl}^{ij} - \gamma_{5a} \cdot \nabla\Delta I_{kl,E1}^{ij} + \nabla\Delta T_{kl}^{ij} + e_{kl,E5a}^{ij} \\ \nabla\Delta\Phi_{kl,E5a}^{ij} = \nabla\Delta\rho_{kl}^{ij} + \lambda_{E5a} N_{kl}^{ij} - \gamma_{5a} \cdot \nabla\Delta I_{kl,E1}^{ij} + \\ \quad \nabla\Delta T_{kl}^{ij} + \varepsilon_{kl,E5a}^{ij} \\ \nabla\Delta P_{kl,E5b}^{ij} = \nabla\Delta\rho_{kl}^{ij} - \gamma_{5b} \cdot \nabla\Delta I_{kl,E1}^{ij} + \text{IFB} + \\ \quad \nabla\Delta T_{kl}^{ij} + e_{kl,E5b}^{ij} \\ \nabla\Delta\Phi_{kl,E5b}^{ij} = \nabla\Delta\rho_{kl}^{ij} + \lambda_{E5b} N_{kl}^{ij} - \gamma_{5b} \cdot \nabla\Delta I_{kl,E1}^{ij} + \\ \quad \nabla\Delta T_{kl}^{ij} + \varepsilon_{kl,E5b}^{ij} \end{array} \right. \quad (2)$$

式中: IFB 为频间偏差; γ 为不同频率间的电离层因子; 其余符号表示含义与之前相同.

在式 (1)、(2) 的基础上进一步利用卡尔曼滤波进行参数估计, 利用 LAMBDA 算法进行模糊度固定, 最终解算得到接收机坐标.

2 数据解算分析

为详细评估非组合模型下 Galileo 系统双频与三频短基线解算性能, 试验设计了一条约 9 km 长的短基线, 数据采集时高度截止角设置为 12° , 采集时间为 2020 年 3 月 12 日全天, 采集间隔为 30 s, 接收机类型为 TRIMBLE ALLOY, 天线类型为 TRM59800.00.

数据解算软件为根据 RTKLIB 编译的开源程序, 以 GAMIT 软件解算得到的静态坐标作为参考坐标, 对流层改正模型采用 Saastamoinen 模型, 其他误差通过对应模型进行改正. 在进行数据解算时, 首先解算得到 Galileo 系统 E1/E5a、E1/E5b 以及 E5a/E5b 双频组合短基线定位结果, 然后解算得到 E1/E5a/E5b 三频组合短基线定位结果, 最后根据解算得到的定位结果与参考坐标计算得到定位偏差与定位精度.

如图 1 所示, 给出了 Galileo 系统的卫星可用数与位置精度因子 (PDOP) 值随时间变化情况. 由图 1

可知, 在整个观测期内, Galileo 系统的卫星可用数为 4~9 颗, 平均卫星可用数为 6 颗. Galileo 系统的 PDOP 值除个别历元外, PDOP 值在 4 cm 以内, 平均 PDOP 值为 2.13 cm. 如图 2 所示, 给出了 Galileo 系统双频与三频解算历元率, 由图 2 可知, Galileo 系统双频与三频短基线历元解算率都在 95% 以上, 三种双频历元解算率相当, 而三频历元解算率较双频有一定提升.

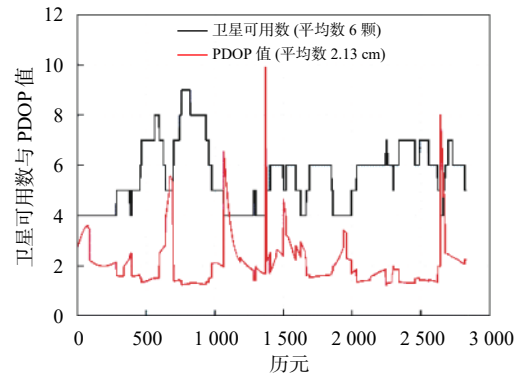


图 1 卫星可用数与 PDOP 值

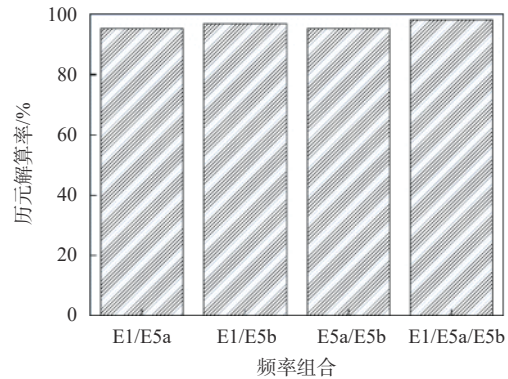


图 2 历元解算率

根据解算得到坐标与参考坐标, 计算得到水平方向与高程方向的定位误差, Galileo 系统双频与三频水平与高程向定位误差, 如图 3~图 6 所示.

由图 3~图 5 可知, E1/E5a 和 E5a/E5b 组合短基线定位 E 方向定位误差小于 0.4 m, N 方向定位误差小于 0.3 m, U 方向定位误差小于 0.6 m, E1/E5b 组合短基线定位 E 方向定位误差小于 0.3 m, N 方向定位误差小于 0.3 m, U 方向定位误差小于 0.6 m. 由图 6 可知, Galileo 三频短基线定位误差较双频有所减小, E 方向定位误差小于 0.3 m, N 方向定位误差小于 0.3 m, U 方向定位误差小于 0.4 m.

为进一步直观地表示 Galileo 双频、三频定位精度以及三频较双频短基线定位精度的提升, 统计了不同频率组合东 (E)、北 (N)、天 (U) 三个方向的定位精

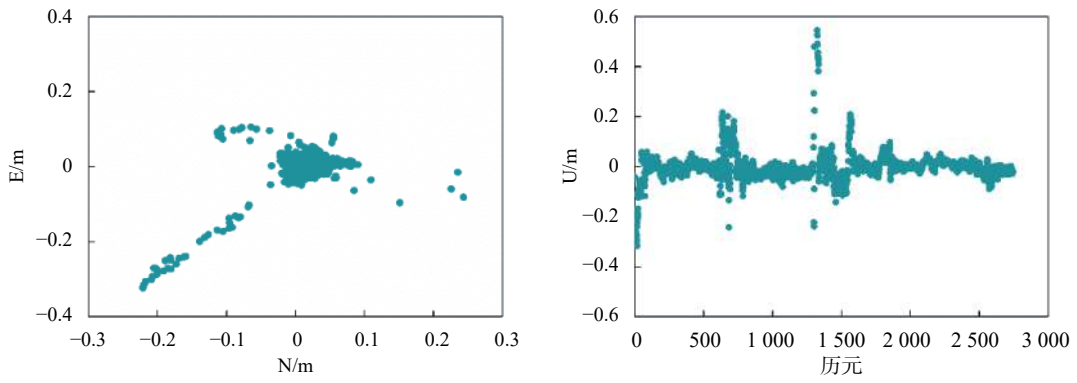


图 3 E1/E5a 组合短基线水平与高程向定位误差

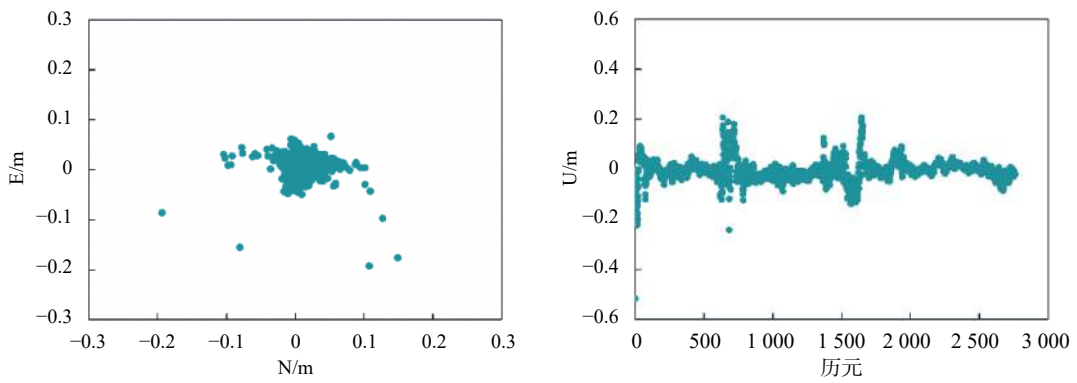


图 4 E1/E5b 组合短基线水平与高程向定位误差

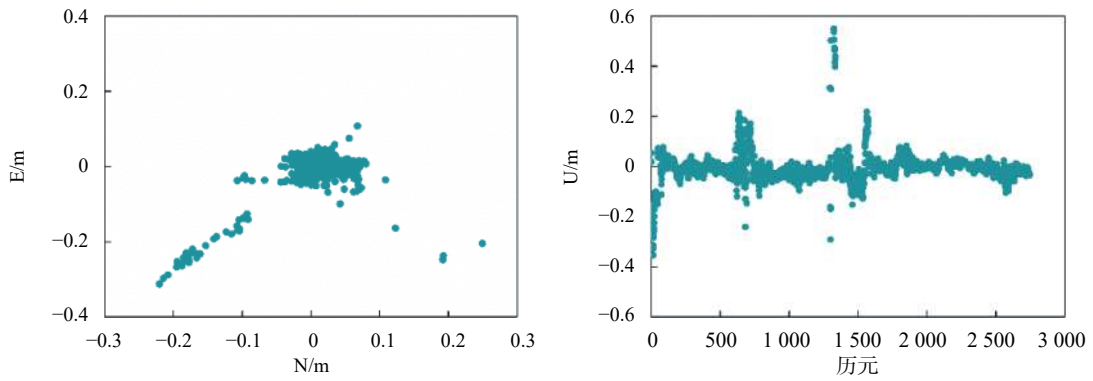


图 5 E5a/E5b 组合短基线水平与高程向定位误差

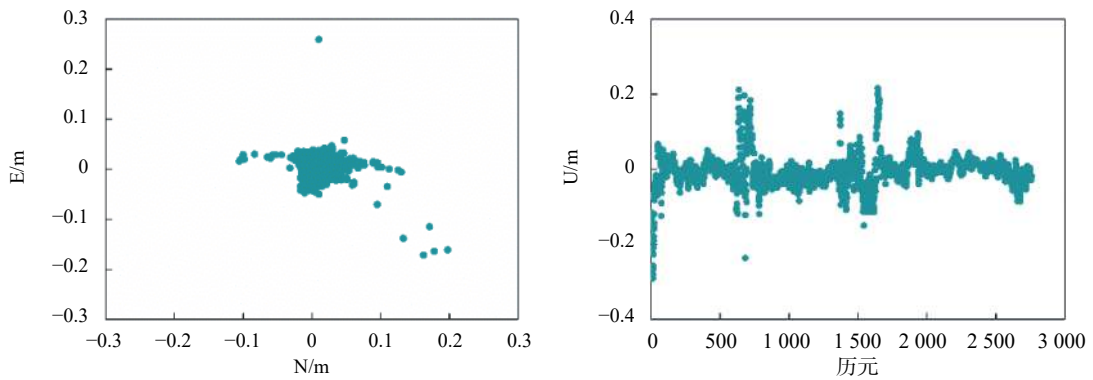


图 6 E1/E5a/E5b 组合短基线水平与高程向定位误差

度以及三频较双频短基线定位精度的提升量,如表1所示。

表1 Galileo 双频与三频短基线基线解算精度均方根(RMS)及三频较双频定位精度提升统计

频率组合	定位精度RMS/cm			三频较双频精度提升/%		
	E	N	U	E	N	U
E1/E5a	3.06	4.79	8.91	65.03	51.15	64.76
E1/E5b	1.58	4.12	4.93	32.28	43.20	36.31
E5a/E5b	3.05	3.54	8.42	64.92	33.90	62.71
E1/E5a/E5b	1.07	2.34	3.14			

由表1可知, E1/E5a 和 E5a/E5b 短基线 E 方向和 U 方向定位精度相当, E 方向定位精度优于 3.5 cm, U 方向定位精度优于 9 cm, E1/E5a 组合 N 方向定位精度优于 5 cm, E5a/E5b 组合 N 方向定位精度优于 4 cm, E1/E5b 组合定位精度优于 E1/E5a 和 E5a/E5b, E 方向定位精度优于 2 cm, N 方向定位精度优于 4.5 cm, U 方向定位精度优于 5 cm. E1/E5a/E5b 三频组合短基线定位精度优于任一双频组合, E 方向定位精度优于 1.5 cm, N 方向定位精度优于 2.5 cm, U 方向定位精度优于 3.5 cm. 同时发现, 三频组合短基线定位精度较双频定位精度有明显提升, 提升量在 30%~60%。

3 结束语

本文基于 9 km 短基线实测数据, 分析了非组合模型下 Galileo 双频与三频短基线解算精度, 结果表明, Galileo 卫星可用数和 PDOP 值较优, 双频历元解算率相当, 三频历元解算率较双频有明显提升. 双频短基线定位中, E1/E5b 组合定位精度要优于另外两种双频组合定位精度, 但是定位精度都在 cm 级, 水平定位精度优于 5 cm, 高程精度优于 10 cm. 三频组合短基线定位精度较双频组合有明显提升, E 方向定位精度优于 1.5 cm, N 方向定位精度优于 2.5 cm, U 方向定位精度优于 3.5 cm.

参考文献

- [1] 许海林, 周恩泽, 童梦想, 等. GPS/BDS/Galileo 单点定位精度分析[J/OL]. (2020-12-28) [2021-01-02]. 测绘地理信息. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&d>

fname=CAPJLAST&filename=CHXG2020122501A&v=44qgDeFOLpIIWYwaiZR6X%25mmd2BgaJ4vX1BogdqArlNaY EKRUXjUKlvxaPysvSL9NgEn6

- [2] 彭劲松. BDS-3新频率与Galileo单频组合伪距单点定位精度分析[J]. 全球定位系统, 2021, 46(1): 57-61.
- [3] 高永刚, 吴观焯, 郭金运, 等. GPS/GLONASS/BDS/Galileo数据质量的对比分析[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2020, 48(6): 706-713.
- [4] 汤门生, 袁伟, 徐儒林. GPS/Galileo/QZSS中长基线解算精度分析[J]. 经纬天地, 2020(5): 29-32, 40.
- [5] 武曙光, 聂桂根, 彭凤友, 等. 高精度GPS超短基线场数据处理与分析[J]. 全球定位系统, 2020, 45(2): 7-12.
- [6] 刘天骏. GPS/Galileo非差非组合实时精密单点定位快速收敛与模糊度固定[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- [7] 刘站科, 张庆涛, 李毓照, 等. 一种BDS超短基线解算实验分析[J]. 测绘科学, 2018, 43(9): 135-139, 152.
- [8] 尹潇, 柴洪洲, 齐文龙, 等. Galileo校正卫星天线参数特性及对PPP定位的影响[J/OL]. (2020-12-08)[2021-01-01]. 武汉大学学报(信息科学版). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=WHCH20201204003&v=F8VFDZDxdDVdsZGOTG5LxFWNveu%25mmd2B4FFvyBRhJNWkfhTlvIbBzbX4gs5nl84EQlDV>
- [9] 李星星, 黄健德, 袁勇强, 等. Galileo三频非组合精密定轨模型及精度评估[J]. 测绘学报, 2020, 49(9): 1120-1130.
- [10] 林家乐, 乔书波, 李林阳. Galileo双频/三频精密单点定位性能分析[J]. 测绘科学技术学报, 2019, 36(6): 576-581.
- [11] 陈嘉锋, 张应裕. 一种非组合Galileo三频精密单点定位方法及精度分析[J]. 北京测绘, 2019, 33(6): 724-728.
- [12] 赵兴旺, 葛玉龙. GPS/Galileo实时精密单点定位精度分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2019, 39(8): 816-820.
- [13] 高猛, 徐爱功, 祝会忠, 等. 北斗系统短基线解算数据处理方法[J]. 测绘科学, 2015, 40(4): 28-33.
- [14] 金俭俭, 高成发, 张瑞成, 等. GPS与BDS2、BDS3融合数据短基线解算精度分析[J]. 测绘通报, 2020(3): 83-86, 95.
- [15] 严超, 徐梅, 徐炜, 等. BDS三频与双频模糊度解算性能分析[J]. 全球定位系统, 2017, 42(4): 60-65.
- [16] 张小红, 吴明魁, 刘万科. BeiDou B2/Galileo E5b短基线紧组合相对定位模型及性能评估[J]. 测绘学报, 2016, 45(增刊2): 1-11.

作者简介

徐亚楠 (1988—), 女, 硕士, 讲师, 主要从事精密测量和建筑施工的教学与科研工作。

Accuracy analysis of Galileo dual-frequency and triple-frequency short baseline solution under the condition of non-combined model

XU Yanan¹, LIU Shun²

(1. *Guangzhou Panyu Polytechnic, Guangzhou 511483, China;*
2. *Shaanxi Railway Institute, Weinan 714099, China*)

Abstract: Galileo system is one of the commonly used positioning systems at present. This paper uses self-edited software to carry out a dual-frequency and triple-frequency short baseline solution experiment of Galileo system under the condition of non-combined model. Research has found that for a 9 km short baseline, the Galileo dual-frequency short baseline solution under the non-combined model has a horizontal accuracy better than 5 cm, and an elevation accuracy better than 10 cm. The triple-frequency combined solution accuracy is significantly improved compared with that of dual-frequency. The horizontal accuracy is better than 3 cm. The elevation accuracy is better than 4 cm.

Keywords: Galileo; non-combined model; short baseline; dual frequency; triple frequency

(上接第 77 页)

Design and implementation of closed tracking loop of navigation receiver based on SoC

XUE Zhiqin¹, LIU Kun¹, LI Liguang²

(1. *Space Star Technology Co. Ltd., Beijing 100086, China;*
2. *The 7th Air Force Military Representative Office in Beijing, Beijing 100086, China*)

Abstract: The traditional satellite navigation receiver is based on FPGA+DSP architecture. Under this architecture, the tracking module is in an open-loop processing mode. It has the problems of poor real-time performance and poor reliability. At the same time, a large amount of data communication between FPGA and DSP has led to an increase in IO resources and power consumption. Based on the SoC architecture, a closed-loop tracking loop scheme for satellite navigation receiver is proposed in this paper. The entire tracking process is processed in a closed loop within the FPGA. This effectively solves the problems of open-loop tracking, and greatly reduces the amount of data communication between FPGA and CPU. In addition, all tracking channels share a tracking loop processing module through time division multiplexing, which effectively saves hardware resources and reduces costs. This paper lays a foundation for the design and development of miniaturized, low-power navigation chips.

Keywords: closed loop tracking; SoC architecture; satellite navigation receiver; tracking loop; time division multiplexing