

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107046

一种用于 BDS-3 接收机的高精度授时方法

安云飞

(中国电子科技集团公司第五十四研究所 石家庄 050081)

摘要: 针对日益广泛的高精度授时系统应用需求,提出了一种用于北斗三号卫星导航系统(BDS-3)接收机的高精度授时方法。该授时方法运行于本单位自研某 BDS-3 导航型芯片,采用一种类似于数字载波环闭环回路授时方法,其中位置速度时间(PVT)解算模块等效于鉴相鉴频器,秒脉冲(PPS)输出控制模块等效于数控振荡器(NCO),环路滤波器采用二阶锁频辅助三阶锁相结构。对模拟源测试 1 h 和 1 天内授时精度分别为 2.64 和 3.83 ns,结果表明该方法不增加硬件资源的前提下提升了导航接收机的授时精度。

关键词: 北斗三号卫星导航系统;授时;数字载波环;秒脉冲

中图分类号: TN967.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 420.10

A high-precision time synchronization method for BDS-3 receiver

An Yunfei

(The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: In response to the increasingly wide-ranging requirements for high-precision time synchronization systems, a high-precision time synchronization method for BeiDou-3 navigation satellite system (BDS-3) receivers is proposed. This time synchronization method runs on a BDS-3 navigation chip developed by our company. A closed loop time synchronization method similar to the digital carrier loop is used, in which PVT is equivalent to a phase discriminator and a frequency discriminator, a pulse per second(PPS) output control module is equivalent to a numerically controlled oscillator(NCO) and third-order phase-locked loop assisted by second-order frequency-locked loop is applied. By the experience in this paper, the time synchronization accuracies of one hour and one day are 2.64 and 3.83 ns. The experimental results show that the time synchronization accuracy of the method is improved without increasing hardware resources.

Keywords: BeiDou-3 navigation satellite system; time synchronization; digital carrier loop; pulse per second

0 引言

北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)分为北斗一号、北斗二号和北斗三号 3 个建设发展阶段,其中北斗三号卫星导航系统(BeiDou-3 navigation satellite system, BDS-3)已于 2018 年底开始提供全球服务。BDS-3 除频点增多外在多个方面较北斗二号卫星导航系统(BeiDou-2 navigation satellite system, BDS-2)有较大提升^[1-3],比如搭载了 Ka 波段星间链路载荷,实现了卫星与卫星之间的高精度测距与通信,提高了卫星轨道精度^[4-5]。加入星间链路后,北斗三号组网星轨道激光检核 RMS 为 8.4 cm,明显优于北斗二号^[6]。此外, BDS-3 广播星历精度较 BDS-2 更高,优于 0.5 m,而 BDS-2 卫星在 0.8~1.2 m^[7]。BDS-3 电离层 BDGIM 模型在全球

范围内性能相对于 BDS-2 采用的 8 参数 Klobuchar 模型均有所提升,尤其在高纬地区提升范围在 20%^[8]。实验表明 BDS-3 相较 BDS-2 在东北天方向定位精度分别提高了 58%、1%、24%^[9]。位置速度时间(positioning, velocity and time, PVT)解算模块中位置和时间的关系是相辅相成的,定位精度的提升也将有利于提升授时精度^[10]。

BDS-3 提供全球服务之前已有大量学者基于 BDS-2 或者全球定位系统(global positioning system, GPS)研究高精度授时方法。其中文献[11]对已知位置授时和自主定位授时进行了分析与改进,实际采用的是常规授时方法,未考虑本地时钟频漂的影响;文献[12]采用了一种直接数字频率合成技术(direct digital synthesizer, DDS)控制本地时钟频率的方式,通过调频减小了本地时与 GPS 系统时的时间差,但是该文采用的二阶低通滤波器无法消除频率偏差随

时间变化的影响;文献[13]提出了一种基于锁相环的全球卫星导航系统(global navigation satellite system,GNSS)授时接收机钟差校准算法,并分析了环路误差组成,但是该方法未采用 PVT 解算模块得到的精度更高的频漂信息。

随着 BDS-3 定位精度的提升和 BDS-3 芯片的广泛应用,原有的一些高精度授时算法和授时精度测试结果已经不足以适用于新体制卫星导航系统。本文依托 BDS-3 广泛应用的背景,提出一种类似于数字载波环闭合回路授时方法,分析了该方法的优点,并在本单位自研某 BDS-3 导航型芯片中验证了该方法的有效性。

1 BDS 时间系统

北斗系统的时间基准为北斗时(BeiDou navigation satellite system time,BDT)。BDT 采用国际单位制(SI)秒为基本单位连续累计,不闰秒,起始历元为 2006 年 1 月 1 日协调世界时(coordinated universal time,UTC)00 时 00 分 00 秒。BDT 通过 UTC(national time service center,NTSC)与国际 UTC 建立联系,BDT 与国际 UTC 的偏差保持在 50 ns 以内(模 1 s)。BDT 与 UTC 之间的闰秒信息在导航电文中播报。文献[14]详细阐述了 BDT-UTC 时间同步参数的物理意义,以及由用户估计的 BDT 计算 UTC 时间的详细运算公式。对比文献[15],BDS-3 系统 BDT-UTC 时间同步参数相较于 BDS-2 系统增加了 3 个参数,分别是 BDT 时标相对于 UTC 时标的偏移率系数、参考时刻对应的周内秒、参考时刻周计数。本文所提方法输出的秒脉冲(pulse per second,PPS)最后都会由 BDT 转换到 UTC(NTSC)时间。

2 北斗授时基本原理

由文献[16]可得伪距观测方程为:

$$\rho^n = r^n + \delta_{t_u}^n - \delta_{t_n}^n + I^n + T^n + \epsilon_\rho^n \quad (1)$$

假设接收机共对 N 颗卫星有伪距观测值,其中, $n = 1, 2, \dots, N$ 为卫星观测值编号, ρ 为伪距观测值, r 为卫星到用户机的几何距离, δ_{t_u} 为接收机本地时相对于 BDT 的钟差, δ_{t_n} 为 n 号卫星的钟差, I 为电离层延时, T 为对流层延时, ϵ_ρ^n 为伪距测量噪声。变换式(1)的表现形式并联立方程组省去伪距测量误差 ϵ_ρ^n 后得到:

$$\begin{cases} \sqrt{(x^1-x)^2+(y^1-y)^2+(z^1-z)^2}+\delta_{t_u}=\rho_c^1 \\ \sqrt{(x^2-x)^2+(y^2-y)^2+(z^2-z)^2}+\delta_{t_u}=\rho_c^2 \\ \dots \\ \sqrt{(x^N-x)^2+(y^N-y)^2+(z^N-z)^2}+\delta_{t_u}=\rho_c^N \end{cases} \quad (2)$$

式中: $[x, y, z]$ 为未知的接收机位置坐标; δ_{t_u} 为未知的接收机钟差; $[x^n, y^n, z^n]$ 为已知的 n 号卫星的位置坐标; $\rho_c^n = \rho^n + \delta_{t_n}^n - I^n - T^n$ 为可计算的,视为已知量。对于包含 4 个未知量的方程组,至少需要 4 个卫星的观测量就可

以采用最小二乘方法求解。方程求解后得到接收机钟差 δ_{t_u} ,再考虑 BDT 到 UTC(NTSC)的偏差,就可以补偿接收机本地时到 UTC 时间,输出精准的 PPS。

对式(1)求导后整理可得多普勒观测方程为:

$$-\mathbf{v} \cdot \mathbf{I}^n + \delta_{f_u} = -\lambda f_d^n - \mathbf{v}^n \cdot \mathbf{I}^n + \delta_{f_n} - \epsilon_\rho^n \quad (3)$$

式中: \mathbf{v} 为未知的接收机速度向量; δ_{f_u} 为未知的接收机频漂; \mathbf{I} 为卫星在接收机处的单位观测矢量; λ 为载波波长; f_d^n 为多普勒观测量; \mathbf{v}^n 为卫星速度向量; δ_{f_n} 为卫星频漂; ϵ_ρ^n 为测量噪声。与式(2)同理,可以联立方程解得接收机时钟频漂 δ_{f_u} 。接收机的时钟频漂解算精度比接收机钟差精度高 1 个量级以上,但是不含绝对钟差信息,综合利用解算得到的钟差与频漂信息,可以有利于授时精度的提高。

3 基于载波环的授时方法

常规授时方法一般采用 PVT 模块输出的钟差信息直接调整 PPS 输出模块,该方法一方面没有对钟差信息进行滤波,导致钟差的毛刺直接传导到 PPS 输出;另一方面未考虑 PPS 输出模块调整的延时特性,即 PVT 模块输出的钟差为当前时刻的钟差,将该钟差调整到 PPS 输出,实际是下一秒脉冲生效,结果导致接收机时钟频漂被错误的转换为设备零值的一部分。本质上常规方法是一种一阶锁相环结构,可以跟踪频率阶跃信号,但是存在固有误差。本文采用一种似载波环的闭合回路授时方法,环路滤波器采用二阶锁相环辅助三阶锁相环结构,实验表明该方法有效解决了以上问题。

3.1 基于载波环的授时方法原理

本文采用的基于载波环的授时方法原理如图 1 所示。其中 PVT 模块类似于载波环中的鉴频鉴相器,输入为包含 BDT 的观测量、观测量锁存时刻(接收机本地时)、发射时刻、多普勒、星历和其他误差修正参数,输出为本地时钟钟差和频漂;环路滤波器等效为载波环中的环路滤波器,本文采用二阶锁相环辅助三阶锁相环结构;PPS 输出控制器类似于载波环中的 NCO, f_c 为其工作时钟,输入为经过 PPS_Adj 修正的 PPS 溢出门限,输出一方面为精确的接收机本地时,另一方面为经过 BDT-UTC 参数修正后与 UTC(NTSC)时间对其的 PPS。

3.2 环路滤波器设计

锁相环和锁频环各自具有不同的特性,将两者结合起来可以有效地发挥双方的优势。因为锁频环滤波器输出的频率差异要经过积分后才能成为锁相环滤波器所输出的相位差异,所以一阶锁相环通常用来辅助二阶锁相环,而二阶锁相环通常用来辅助三阶锁相环^[8]。

1) 环路滤波器原理

根据锁相环相关理论, N 阶锁相环能够准确无误地跟踪相位按时间的 $N-1$ 次方或者更低次方变换的信号,而且还能跟踪相位按时间的 N 次方变化的信号,只不过此时会产生一个恒定的相位跟踪误差,但是它不能跟踪相位变

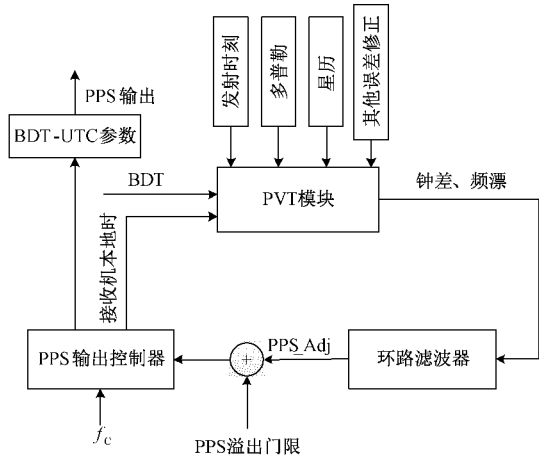


图 1 基于载波环的授时方法原理

化按时间的 $N + 1$ 次方变化的信号。为了稳定跟踪频率斜升激励,本文采用二阶锁频环辅助三阶锁相环结构,其原理如图 2 所示。图中 T_s 为环路更新周期, ω_{nf} 和 ω_{np} 分别为二阶锁频环和三阶锁相环的特征频率, a_2 和 a_3, b_3 为相应的环路参数。

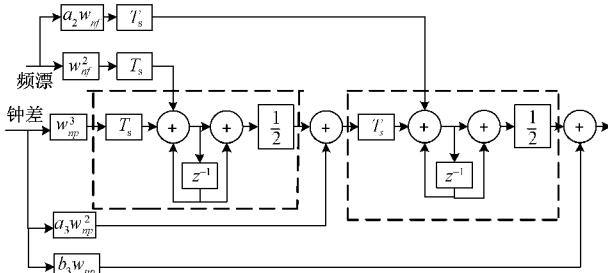


图 2 二阶锁频环辅助下的三阶锁相环

2) 环路滤波器参数设计

环路滤波器参数最优取值方案如表 1 所示。在环路设计中,一般首先根据环路性能以及动态要求确定噪声带宽 B_L , 然后再根据表 1 确定各个滤波参数。根据奈奎斯特采样定理,环路带宽的选取至少要满足:

$$B_L \leq \frac{1}{2T_s} \tag{4}$$

本文中 T_s 取值为 1 s,故 $B_L \leq 0.5$ 。噪声带宽 B_L 的选取对跟踪环路至关重要,过高的噪声带宽会导致进入环路噪声增多,影响跟踪性能,过低的噪声带宽会导致环路动态适应力差,容易失锁。本文采用一种变带宽的跟踪策略,当刚完成定位解算,授时环路尚未稳定跟踪时,采用偏大的噪声带宽,取 $B_L = 0.3$; 当环路稳定跟踪一段时间后,切换为窄带宽跟踪参数,取 $B_L = 0.1$ 。

3) 量化误差分析

PPS 输出控制器以频率 f_c 累计,则其能分辨的最小时间为 $1/f_c$ 。BDS-2 时代导航接收机大都采用 FPGA + DSP 的架构,集成化程度不高,基带工作时钟也比较低,一般采用

表 1 环路滤波器参数最优取值方案

环路类型	环路滤波器参数
二阶锁频环	$a_2 = 1.414$
	$B_L = \frac{1 + a_2^2}{4a_2} \omega_{nf} = 0.53\omega_{nf}$
	$a_3 = 1.1$
三阶锁相环	$b_3 = 2.4$
	$B_L = \frac{a_3 b_3^2 + a_3^2 - b_3}{4(a_3 b_3 - 1)} \omega_{np} = 0.7845\omega_{np}$

62 M 时钟,此时 PPS 输出控制器的最小分辨率为 16.13 ns,量化误差最大可到 8.06 ns。BDS-2 时代一般要求授时型接收机授时精度为 30~50 ns,62 M 时钟尚能满足需求。而到了 BDS-3 时期,集成化、低功耗和授时精度的需求越来越高,芯片技术得到广泛应用,本文采用本单位自研某 BDS-3 导航型芯片,其基带工作时钟 f_c 可达 200 M,此时 PPS 输出控制器的最小分辨率可达 5 ns,量化误差最大仅为 2.5 ns。

4 实验验证与分析

本文基于 BDS-3 接收机验证了类似载波环的高精度授时方法,授时精度测试设备连接图如图 3 所示。计算机通过网线连接北斗三号模拟器,设置模拟器输出 B1C 频点信号,载噪比为 -133 dBmW; BDS-3 接收机经过低噪声放大器连接模拟器射频输出端;模拟器和接收机的 PPS 输出分别连接时间间隔计数器 SR620 的 A 端和 B 端;计算机通过 RS232 串口连接 SR620,并 1 s 一次发送“XAVG?”采集模拟器 PPS 上升沿与接收机 PPS 上升沿时差信息。

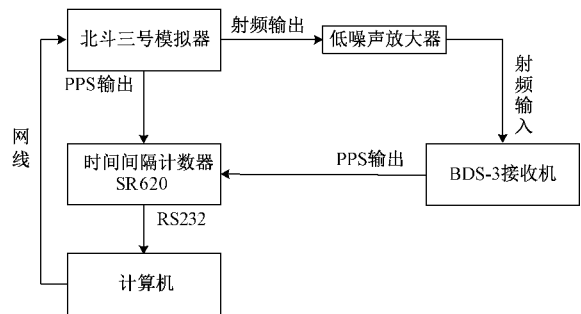


图 3 授时精度测试设备连接图

接收机定位后采集的原始时差信息记作 x_i, i 表示次数。采集 600 个时差信息,常规方法得到如图 4 所示的授时误差曲线,环路滤波器采用二阶锁相环得到如图 5 所示授时误差曲线,本文方法得到如图 6 所示授时误差曲线。由图 4~6 可以看出短时间的时差采样点的抖动情况无明显差别,这是因为一阶、二阶、三阶锁相环均可以跟踪频率阶跃信号。而图 4 与图 5、6 在时差采样点绝对值上有较大差别,这是因为图 4 所示的常规方法虽然可以跟踪频率阶跃信号,但是存在固有误差。此外,由图 5 和 6 可以看出,

二阶锁相环方法和本文方法的精度曲线在定位后均存在一定的震荡,大概 50 s 后实现稳定授时。

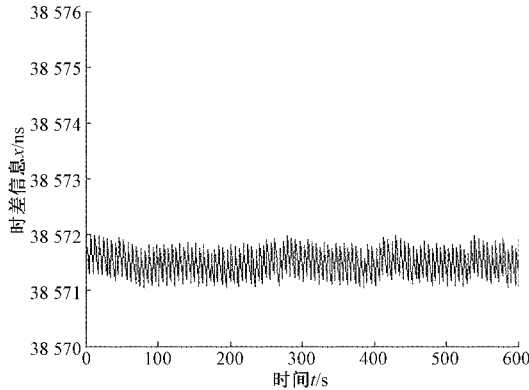


图 4 常规方法授时误差曲线

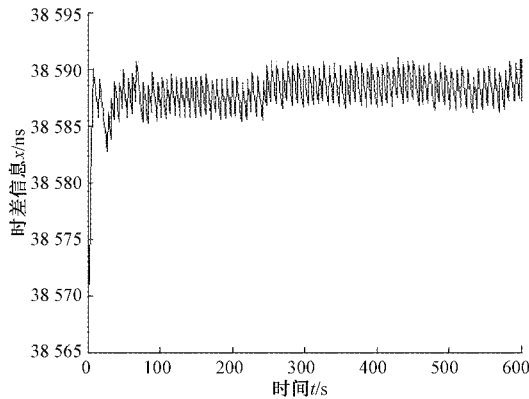


图 5 二阶锁相环方法授时误差曲线

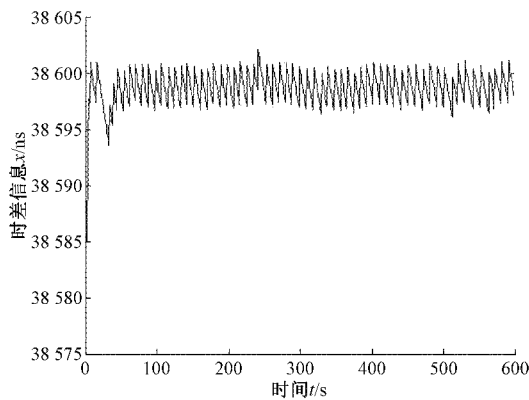


图 6 本文方法授时误差曲线

下面定量地分析 3 种授时方法的精度,定义授时精度计算公式为:

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m x_i^2}{m}} \quad (5)$$

式中: x_i 表示第 i 次测量值扣除测试线缆等设备零值后得到的测量样本值, m 为采样总数, δ 为授时误差。设备零值取 x_i 的均值, m 取 3 600 得到如表 2 所示的测量结果。

由表 2 可以看出短时间的授时精度 3 种方法区别不大,但是常规授时方法设备零值与另两种方法相差约 32 ns。这是因为常规方法实际等效于一阶锁相环方法,对于频率阶跃信号虽然可以稳定跟踪,但是存在固有误差,而二阶或者三阶锁相环可以稳定跟踪频率阶跃信号,并且不存在固有误差。表 2 所示的授时精度实际仅反映 PPS 短期的抖动程度,而固有误差被错误的计算到设备零值中,从而造成授时精度与另两种方法相当的假象。

表 2 1 h 授时精度测试结果 ns

授时方法	授时精度 δ	设备零值 δ
常规授时方法	2.96	3 857 5.25
二阶锁相环方法	2.79	3 860 7.14
本文方法	2.64	3 860 7.35

采样总数 m 取 86 400 可得到如表 3 所示的测量结果。由表 3 可以看出长时间授时精度本文方法明显优于另外两种,这是由于长时间观测下接收机时钟频漂变化,需要三阶或以上阶数的锁相环才可以稳定无误地跟踪。接收机时钟频漂变化也导致另两种方法测量得到的零值出现较大偏差。而本文采用二阶锁相环辅助三阶锁相环结构,可以稳定跟踪频率斜升激励并且没有固定误差,从表 2 和 3 可以看出其长期和短期测量结果差距不大,可以抵御接收机时钟频漂变化的影响。

表 3 1 天授时精度测试结果 ns

授时方法	授时精度 δ	设备零值 δ
常规授时方法	10.64	3 858 9.76
二阶锁相环方法	9.89	3 861 9.65
本文方法	3.83	3 860 5.24

5 结 论

本文针对 BDS-3 接收机高精度授时的迫切需求,首先简要介绍了 BDT 时间系统与北斗授时基本原理,然后提出一种类似载波环闭合回路的授时方法。该方法将 PVT 模块等效为鉴频鉴相器,将 PPS 输出控制器等效为载波 NCO,环路滤波器采用二阶锁相环辅助三阶锁相环结构。三阶锁相环可以准确无误地跟踪频率斜升信号而不存在固定误差。针对 FPGA+DSP 架构接收机工作时钟偏低,量化误差偏大的问题,采用本单位自研某 BDS-3 导航型芯片,其工作时钟可以到 200 M,有效降低了量化误差对授时精度的影响。文末通过对比试验,验证了本文方法可以不受接收机时钟频率误差变化的影响,具有较高的授时精度。

参 考 文 献

[1] YANG Y X, XU Y Y, LI J L, et al. Process and performance evaluation of BeiDou global navigation

- satellite system: Data analysis based on BDS-3 demonstration system [J]. Science China Earth Sciences, 2018, 61(5): 614-624.
- [2] CHEN J P, HU X G, TANG C P, et al. Orbit determination and time synchronization for new-generation BeiDou satellite: Preliminary results [J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2016, 46(11): 119502.
- [3] WU Z Q, ZHOU S S, HU X G, et al. Performance of the BDS3 experimental satellite passive hydrogen maser [J]. GPS Solutions, 2018, 22(2): 1-13.
- [4] 宋小勇, 毛悦, 冯来平, 等. BD 卫星星间链路定轨结果及分析 [J]. 测绘学报, 2017, 46(5): 547-553.
- [5] XU H L, WANG J L, ZHAN X Q. Autonomous broadcast ephemeris improvement for GNSS using inter-satellite ranging measurements [J]. Advances in Space Research, 2012, 49(6): 1034-1044.
- [6] 杨宇飞, 杨元喜, 胡小工, 等. 北斗三号卫星两种定轨模式精度比较分析 [J]. 测绘学报, 2019, 48(4): 831-839.
- [7] 王海春, 贾小林, 李鼎, 等. 北斗三号卫星广播星历精度评估分析 [J]. 导航定位学报, 2019, 7(4): 60-63.
- [8] 袁运斌, 李敏, 霍星亮, 等. 北斗三号全球导航卫星系统全球广播电离层延时修正模型 (BDGIM) 应用性能评估 [J]. 测绘学报, 2021, 50(4): 436-447.
- [9] 方欣颖, 范磊. BDS-2/BDS-3 伪距单点定位精度分析 [J]. 全球定位系统, 2020, 45(1): 19-25.
- [10] 陈婧亚, 许龙霞, 李孝辉. 接收机位置误差对 GNSS 定时的影响分析 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(6): 1458-1464.
- [11] 韩帅, 周云, 牡丹. 高精度北斗授时接收机授时方法分析与改进措施 [J]. 无线电工程, 2019, 49(6): 494-498.
- [12] 王礼亮, 孟诏, 宋鹏飞, 等. GPS 接收机精确授时技术研究 [J]. 航天控制, 2011, 29(5): 40-42.
- [13] 向为, 徐博, 牟卫华, 等. 基于锁相环的 GNSS 授时接收机钟差校准算法 [J]. 国防科技大学学报, 2013, 35(2): 115-119.
- [14] 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件 BDS-SIS-ICD-B1C-1.0 2017-12 [S]. 北京: 中国卫星导航系统管理办公室, 2017: 3-52.
- [15] 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件 BDS-SIS-ICD-B1I-3.0 2019-02 [S]. 北京: 中国卫星导航系统管理办公室, 2019: 38-40.
- [16] 谢钢. GPS 原理与接收机设计 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2014: 69-91.

作者简介

安云飞, 硕士, 工程师, 主要研究方向为卫星导航定位授时算法、嵌入式软件等。

E-mail: 1397026550@qq.com