

基于 ARM 的北斗高精度定位终端设计

姚焕钰, 苏新彦, 姚金杰, 邢昱翔

(中北大学 信息探测与处理山西省重点实验室, 太原 030051)

摘要: 在关键基础设施和安全领域, 包括应急救援、工业农业、人员管理及军事安全等, 对技术设备的性能要求极为严格, 迫切需要高精度定位技术来确保操作的精确性和有效性, 并且特别强调设备的便携性、小型化和低功耗, 为有效解决这一问题, 设计了一款高精度定位终端设备; 该设备由 STM32F401RCT6 微处理器、TAU1202、WH-GM5、电源模块组成; 定位芯片具有双频多模定位功能, 具有良好的多径抑制能力; STM32 通过解析导航电文数据, 并且通过 WH-GM5 通信模块发送至符合网络通信接口的任意系统平台, 静态模式下平均定位精度实现亚米级; 软件设计在 Keil 平台上实现; 在实际应用中定位效果优异, 对工程应用具有实际意义。

关键词: 小型化; 网络通信; 定位终端; 双频多模定位; Keil

Design of Beidou High Precision Positioning Terminal Based on ARM

YAO Huanyu, SU Xinyan, YAO Jinjie, XING Yuxiang

(Key Laboratory of Information Detection and Processing, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Critical infrastructure and security fields, including emergency rescue, industrial agriculture, personnel management and military security, the performance requirements of technical equipment are extremely strict, there is an urgent need for high-precision positioning technology to ensure the accuracy and effectiveness of operations, and special emphasis on the portability, miniaturization and low power consumption of equipment, in order to effectively solve this problem, A high precision positioning terminal device is designed. The device is composed of STM32F401RCT6 microprocessor, TAU1202, WH-GM5 and power module. The positioning chip has the function of dual-frequency multi-mode positioning and has good multi-path anti-suppression ability. By analyzing the navigation message data and sending it to any system platform conforming to the network communication interface through WH-GM5 communication module, STM32 achieves sub-meter average positioning accuracy in static mode. The software design is implemented on Keil platform. It has excellent positioning effect in practical application and has practical significance for engineering application.

Keywords: miniaturization; network communication; positioning terminal; dual-frequency multi-mode positioning; Keil

0 引言

卫星定位技术已经深入到我们的日常生活中, 成为社会工作生活中不可或缺的部分, 无论是在都市或者乡村, 卫星导航定位系统都为我们带来精确的位置与定位服务^[1]。伴随着卫星导航定位技术的持续发展, 各类卫星导航定位终端产品技术也在逐步提高, 用于应对社会各个领域对于定位服务的广泛需求, 近些年来, 卫星导航定位终端产品在精确农业, 灾害监控, 工程质量等高精度定位领域应用越来越广泛^[2]。导航与位置服务在安

全、社会经济和民生中发挥着越来越重要的作用^[3]。当今, 人们对于位置服务的要求越来越高, 正逐步向着更为复杂和多维度的应用场景演进^[4]。这些年在全球范围内研究者将定位技术与现代移动通信技术紧密融合起来, 被广泛应用于诸多领域, 例如车载定位、手持定位系统等^[5]。高精度定位的实现与应用, 至少需要涵盖三个条件: 定位基站, 定位终端软件实现平台, 高精度定位终端^[6]。定位终端作为卫星定位系统用户段最重要的组成部分, 占据了市场规模的主体地位, 在产业化进程中扮演着至关重要的角色^[7]。国外研究机构在基于

收稿日期: 2024-11-11; 修回日期: 2024-12-12。

基金项目: 山西省重点研发计划项目(202102010101002)。

作者简介: 姚焕钰(1998-), 男, 硕士研究生。

苏新彦(1966-), 女, 副教授。

姚金杰(1982-), 男, 博士, 副教授。

引用格式: 姚焕钰, 苏新彦, 姚金杰, 等. 基于 ARM 的北斗高精度定位终端设计[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(1): 139-146.

ARM 的基础上已经设计出若干产品, 例如: Zalink 的 GPS 基带处理器, Leica 公司的 GS15^[8], 美国天宝公司的 GPS332, 麦哲伦推出的手持 GPS 接收机, 日本中维, 拓普康公司的 GNSS 定位终端, 借助对嵌入式控制器以及外围设备控制等, 实现了卓越的位置定位精度和优异的信号接收能力。国内导航定位终端设备及其相关技术正快速进步, 已深入到社会生活的各个层面, 例如工厂的人员定位管理^[9]、煤矿井下的人员定位跟踪^[10]、车辆跟踪^[11]、海上人员搜救^[12]、智能电子围栏^[13]、物流运输等^[14]。国内定位终端产品具备高精度定位的同时, 相对应的会增加设备体积以及功耗。开发一款具有小型化, 低功耗, 高精度定位终端, 具有实际工程意义和实现价值。

1 系统分析与定位原理

1.1 定位终端系统分析

定位终端设计采用双频定位模块接收原始卫星导航数据, STM32 主控器对导航数据进行解码解析, 并且采集当前定位终端设备电量, 将当前定位终端定位数据、设备电量、设备编号等信息通过 4G 网络通信传输至云端服务器平台, 平台用户可通过实收数据实现物流运输、人员监控, 电子围栏, 应急救援等实际应用。

在实际测试中, 设计的定位终端设备在静态实验下无遮挡与森林遮挡情况下, 定位精度都能够实现亚米级定位精度, 在楼宇遮挡情况下可实现米级定位精度。动态实验下手持与车载距离误差小于 10 米。测试结果表明, 该定位终端设备在定位精度以及稳定性方面都达到了较高的水平, 具有很好的市场应用场景。

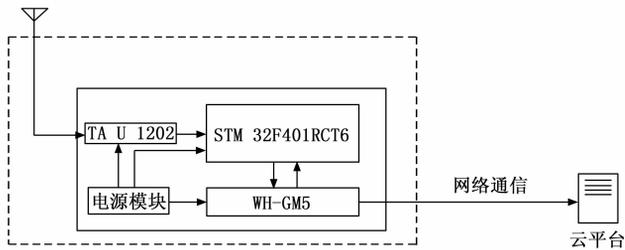


图 1 定位终端工作示意图

1.2 卫星定位原理

全球卫星导航系统由空间段、地面段、用户段 3 个部分构成, 其中空间段由多颗卫星组成, 地面段主要由主控站, 监测站等组成, 用户段包括移动终端设备, 应用系统等。卫星导航系统伪距定位原理是依据接收机到各个卫星的距离变化量来反推用户的运动位移矢量, 由此判断出目前接收机所在位置, 在此基础上完成相应的定位服务等相关应用。

导航定位原理的根本在于, 地面的用户任意时刻都可以获得至少 3 颗卫星, 从而测定出自身到每颗可见星

之间的距离, 采用伪距定位技术, 便可确定用户接收机位置信息^[15]。

$$r^{(n)} = \sqrt{(X^{(n)} - X)^2 + (Y^{(n)} - Y)^2 + (Z^{(n)} - Z)^2} \quad (1)$$

式中, r^n 为卫星到地面接收机之间的几何距离。

伪距是指地面接收机通过测距码测得卫星到地面接收机的位置, 卫星信号在传播过程中, 由于受到电离层等多种因素影响, 以及卫星钟差作用, 导致卫星到地面接收机之间距离存在误差, 故称为伪距。伪距 ρ^n 表达式如下所示:

$$\rho^{(n)} = r^{(n)} + \delta t_u - \delta t_s^{(n)} + I^{(n)} + T^{(n)} + \epsilon_\rho^{(n)} \quad (2)$$

式中, δt_u 为地面接收机钟差, $\delta t_s^{(n)}$ 为卫星钟差, I 为电离层参数, T 为对流层延时, ϵ_ρ 为伪距测量噪声, 伪距表达式中, $\delta t_s^{(n)}$ 、 I 、 T 均可视为已知量, 经过校验后的伪距测量值 ρ_c^n 为:

$$\rho_c^n = \rho^n + \delta t_s^n - I - T \quad (3)$$

修正后的伪距观测方程式为:

$$r^{(n)} + \delta t_u = \rho_c^{(n)} - \epsilon_\rho^{(n)} \quad (4)$$

其中: $r^{(n)}$ 是接收机到卫星 n 的几何距离, 即式 (1)。

定位解算的本质实际上就是一个四元非线性方程组的求解, 将未知的伪距测量误差量从式 (4) 中省去, 卫星定位算法实质上就是求解一个四元非线性方程组, 方程组如下所示:

$$\begin{cases} \sqrt{(X^{(1)} - X)^2 + (Y^{(1)} - Y)^2 + (Z^{(1)} - Z)^2} + \delta t_u = \rho_c^{(1)} \\ \sqrt{(X^{(2)} - X)^2 + (Y^{(2)} - Y)^2 + (Z^{(2)} - Z)^2} + \delta t_u = \rho_c^{(2)} \\ \sqrt{(X^{(3)} - X)^2 + (Y^{(3)} - Y)^2 + (Z^{(3)} - Z)^2} + \delta t_u = \rho_c^{(3)} \\ \sqrt{(X^{(4)} - X)^2 + (Y^{(4)} - Y)^2 + (Z^{(4)} - Z)^2} + \delta t_u = \rho_c^{(4)} \\ \dots \\ \sqrt{(X^{(N)} - X)^2 + (Y^{(N)} - Y)^2 + (Z^{(N)} - Z)^2} + \delta t_u = \rho_c^{(N)} \end{cases} \quad (5)$$

其中每一个方程式对应一颗可见卫星的伪距测量值。如果接收机有 4 颗或者 4 颗以上可见卫星的伪距测量值, 式 (5) 就至少由 4 个方程式组成, 接收机就可以求解方程组中的这 4 个未知量。

在解析上述 (4) 非线性方程中需要进行线性化, 以方程组第 n 个方程式为例, 方程等号左边第一项正是式 (1) 所表达的非线性函数 $r^{(n)}$, 求函数 $r^{(n)}$ 对 x 的偏导, 得:

$$\frac{\partial r^{(n)}}{\partial x} = \frac{-(x^{(n)} - x)}{\sqrt{(x^{(n)} - x)^2 + (y^{(n)} - y)^2 + (z^{(n)} - z)^2}} = \frac{-(x^{(n)} - x)}{r^{(n)}} \quad (6)$$

$r^{(n)}$ 为卫星 n 在用户接收机处的观测矢量长度, $(x^{(n)})$

— x) 为此观测矢量的 X 分量, $\frac{(x^{(n)} - x)}{r^{(n)}}$ 就等于单位观测矢量的 X 分量 $L_x^{(n)}$ 。

$$\frac{\partial r^{(n)}}{\partial x} = \frac{-(x^{(n)} - x)}{r^{(n)}} = \frac{-(x^{(n)} - x)}{\|x^{(n)} - x\|} = -L_x^{(n)} \quad (7)$$

类似可求出 $r^{(n)}$ 对 y 和 z 的偏导。

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial r^{(n)}}{\partial x} \\ \frac{\partial r^{(n)}}{\partial y} \\ \frac{\partial r^{(n)}}{\partial z} \end{bmatrix} = \frac{-1}{r^{(n)}} \begin{bmatrix} x^{(n)} - x \\ y^{(n)} - y \\ z^{(n)} - z \end{bmatrix} = \frac{-(x^{(n)} - x)}{\|x^{(n)} - x\|} = -L^{(n)} = \begin{bmatrix} -L_x^{(n)} \\ -L_y^{(n)} \\ -L_z^{(n)} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式 (5) 在 $[x_{k-1}, \delta t_{u,k-1}]^T$ 处线性化后矩阵方程式为:

$$\mathbf{G} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta \delta t_u \end{bmatrix} = \mathbf{b} \quad (9)$$

其中:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} -L_x^{(1)}(x_{k-1}) & -L_y^{(1)}(x_{k-1}) & -L_z^{(1)}(x_{k-1}) & 1 \\ -L_x^{(2)}(x_{k-1}) & -L_y^{(2)}(x_{k-1}) & -L_z^{(2)}(x_{k-1}) & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -L_x^{(N)}(x_{k-1}) & -L_y^{(N)}(x_{k-1}) & -L_z^{(N)}(x_{k-1}) & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -[L^{(1)}(x_{k-1})]^T & 1 \\ -[L^{(2)}(x_{k-1})]^T & 1 \\ \dots & \dots \\ -[L^{(N)}(x_{k-1})]^T & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} \rho_c^{(1)} - r^{(1)}(x_{k-1}) - \delta t_{u,k-1} \\ \rho_c^{(2)} - r^{(2)}(x_{k-1}) - \delta t_{u,k-1} \\ \dots \\ \rho_c^{(N)} - r^{(N)}(x_{k-1}) - \delta t_{u,k-1} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$-L_x^{(n)}(x_{k-1})$ 代表 $r^{(n)}$ 对 x 的偏导在 x_{k-1} 处的值, 为:

$$\begin{aligned} -L_x^{(n)}(x_{k-1}) &= \frac{-(x^{(n)} - x_{k-1})}{r^{(n)}(x_{k-1})} = \\ &= \frac{-(x^{(n)} - x_{k-1})}{\|x^{(n)} - x_{k-1}\|} = \frac{\partial r^{(n)}}{\partial x} \Big|_{x=x_{k-1}} \end{aligned} \quad (12)$$

由式 (10) 可知, 雅可比矩阵 \mathbf{G} 只与各颗卫星相对于用户接收机的几何位置有关, \mathbf{G} 被称为几何矩阵。

利用最小二乘求解伪距定位线性矩阵方程式, 套用最小二乘法的求解公式, 最终得到解为:

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta \delta t_u \end{bmatrix} = (\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{b} \quad (13)$$

不断进行牛顿迭代计算, 当迭代差值收敛至预设门限时, 停止迭代并输出最终定位结果, 文章中所提出的定位终端设备是基于伪距定位原理开展定位服务。

2 定位终端硬件设计

在设计过程中, 秉承低功耗小型化, 高性能的设计理念, 采用自顶向下模块化的设计思路, 定义定位终端系统架构, 注重硬件与软件之间的紧密协作与高效集成, 设计方案通过合理规划系统架构、优化硬件布局以及模块化设计思维, 实现了各个功能模块的独立测试与灵活互通, 确保定位终端设备在复杂应用场景下具有较高的稳定性和可靠性, 追求实现小型化, 低功耗, 高性能的设计目标, 低功耗可使定位终端实现长时间工作运行状态, 小型化实现便于携带的功能, 高性能主要包括高精度定位性能, 能够及时响应数据处理, 实现快速响应, 从系统宏观角度入手, 明确硬件软件功能需求, 细分模块化功能, 采用逐步测试开发路径, 根据不同测试结果调整, 最终集成一体。

定位终端硬件组成主要由 STM32F401RCT6 微处理器为核心、TAU1202 双频 GNSS 定位模块、WH-GM5 通信模块、电源模块以及 4G 网络通信模块组成。终端 PCB 设计图形为圆形, 半径约为 27.5 mm。软件实现在 Keil 平台上实现。

选用 STM32F401RCT6 微处理器是基于高性能以及低功耗的特点, 通过微处理器支持多种外设接口, 能够支持与定位芯片以及通信模块快速数据响应, 内置的 ARM Cortex-M4 处理器具备 DPS 指令集, 能够及时响应数据处理以及定位解算。

TAU1202 双频定位模块, 可支持 L1、L5 双频接收, 有助于提高定位精度以及抗干扰能力, 能够有效减少电离层误差带来的影响, 适合用于高精度定位服务应用需求。

定位终端设备要满足实现小型化, 低功耗特点, 需要具备良好的携带性以及易安装性, PCB 设计优化为圆形, 半径约为 27.5 mm, 这种设计思路可确保定位终端设备能够应用在不同的设备以及环境中, PCB 设计中充分考虑各模块之间的信号完整性以及抗干扰问题, 通过多层板设计以及合理性布线, 各个模块之间实现了有效隔离和优化, 避免电磁间干扰以及信号衰弱的问题。

定位终端设备在设计过程中对硬件结构以及软件设计进行了深度优化, 以满足小型化, 低功耗, 高性能的设计指标, 通过模块化设计思路, 不仅提高了开发效率以及设备性能, 也为后续系统优化提供了可使用空间。

2.1 STM32F2 微处理器模块电路设计

MCU 是整个终端的中枢角色, 用于处理整体的数

据通信,用于执行解码编码任务等的关键部件^[16]。设计采用的是 STM32F401RCT6 基于高性能 ARM-Cortex®-M4+32 位 RISC 核心,在动态功耗(运行模式)和处理性能之间提供了最优的平衡,工作频率高达 84 MHz。配备浮点单元(FPU)和数字信号处理器(DSP)指令集,能够快速处理复杂的计算任务,内置 256 kB 的 Flash 存储和 64 kB 的 SRAM,为应用程序提供了充足的存储空间。STM32 集成了丰富的内核和外设资源,形成了易操作的设计,同时兼具节能与经济实惠的优势^[17]。其支持多种通讯接口,拥有 3 个 I2C、4 个 SPI、3 个 USART 等多个高级通信接口,将附加功能集成至 3 mm×3 mm 的小封装中,充分符合定位终端设计需求。

在 84 MHz 频率下,从 Flash 存储器执行时,STM32F401 能够提供 105DMIPS/285 CoreMark 性能,采用 90 nm 工艺和自适应实时加速器,实现了 Flash 零等待状态执行,在工作模式及 Flash 存储器执行时,可实现低至 128 μ A/MHz 的电流消耗。待机模式下低至 2.4 μ A。STM32F401RCT6 提供了多种低功耗模式,包括 Stop 和 Standby 模式,可以根据应用需求调整功耗。

在对于定位终端的设计中主控制器完成了以下几个方面的工作:使能定位模块接收数据、对接收到的数据进行解码解析、通过 WH-GM5 通信模块将数据发送至服务器平台、保存数据,并通过串行接口将定位数据以及网络信息返回至用户。

2.2 TAU1202 定位模块电路设计

该通信模组使用了华大北斗公司的 TAU1202 型定位模块,使用 CYNOSURE III GNSS SoC 芯片,该模块为高性能的双频 GNSS 定位模块,支持新一代北斗三号信号体制,同时支持全球所有民用导航卫星系统。可同时接收 L1、L5 双频多模信号,具有亚米级定位精度及多径抑制能力,内置智能干扰检测及滤波技术,40 条 GNSS 追踪通道,且 TAU1202 功耗低、体积小,仅有 10.1 mm×9.7 mm×2.5 mm,易于做小体积的封装处理,本定位终端设计理念为小型化高性能,完全可以满足本终端系统设计的要求。

此外,终端工作性能还要依赖于整体硬件电路设计,要最大限度避免 MCU 与定位模块之间的信号损失,以及防止其他电信号和热噪声的干扰,由此,在进行 PCB 设计时,要对定位模块连接天线引脚处进行着重处理,需要进行精确的阻抗控制,射频引脚要与地充分接触,射频引脚与天线座子间距应该尽可能小,避免走直线,同时在信号线和参考地周围增加地孔数量,增加射频性能。

2.3 WH-GM5 通信模块硬件设计

当定位模块接收到卫星信号,根据导航电文格式对

卫星信号进行解算,获取当前位置的经度、纬度、高度等信息,之后需要通过 4G 通信模块周期性地将导航数据传递至运营商基站,通过 4G 网络进一步发送至服务器平台,对当前导航数据进行处理。通过调用解析后的数据实现各种功能。

本终端设计采用有人物理网公司的 WH-GM5 这款 Cat.1 联网通信模组,可实现串口与网络的双向数据透明传输,并且提供 4G 功能以及支持 4 路 Socket 连接,更加快速地将用户数据传输至网络。并且该模组软件功能完善,能够满足大部分的数据传输应用场景。并且支持自定义,心跳包功能,且 WH-GM5 的体积小,其封装兼容 2G、NB 的模块设计,支持小型化设计。

虽然 5G 技术相对普及,但是考虑到定位终端实际应用场景下,选用 4G 通信模块有以下几个优点,从功耗上来说,4G 通信模块相对 5G 通信模块功耗低,可延长定位终端使用时间,并且在定位终端长时间运行状态下可延长定位终端电池寿命,其次,4G 模块的开发成品和购买成品相对较低,大大降低了定位终端整体的开发难度和预算情况。最后,在定位终端实际应用场景中,4G 能够满足传输数据的带宽和时延,并且 4G 网络覆盖范围大,保证了数据上传的可靠性,因此选用 4G 通信完全满足定位终端设计。

3 定位终端软件设计

3.1 导航电文数据协议格式

在定位终端设计中,采用 NMEA0183 协议对导航数据进行解析,NMEA0183 协议是美国国家海洋电子协会开发维护并且发布的一套通信标准^[18]。该标准明确规定地面接收装置与卫星之间每秒进行一次通信,该通信数据以 ASCII 文本形式的语句表达,并且定义了众多互相区别的语句^[19]。例如:由帧起始命令符、定位系统、命令符、数据、校验前缀、校验和组成,一般格式为:aacc, dd, dd, dd, ..., dd * hh。NMEA0183 数据协议能够兼容如北斗卫星导航系统、美国全球定位系统、俄罗斯的格洛纳斯、欧洲的伽利略卫星导航系统、星基增强系统等 GNSS 兼容的接收机导航定位数据输出格式与协议^[20]。具体协议格式如表 1 所示。

本终端设计中通过接收北斗导航系统与其他民用导航系统卫星信号,以 GNGGA 多星联合定位数据格式解析导航数据,并通过串口按照协议格式回传数据并且发送至云平台。其数据格式共 12 字段:GNGGA, <1>, <2>, <3>, <4>, <5>, <6>, <7>, <8>, <9>, M, <10>, M, <11>, <12> * hh,以,号为分隔符表示每一字段,每一字段表示含义如表 2 所示。

3.2 导航定位结果解析

定位结果解析与上传通过内部软件实现,代码功能

表 1 NMEA0183 数据协议

| 数据类型 | 名称 | 说明 |
|------|--------|--|
| \$ | 帧起始命令符 | — |
| aa | 定位系统 | GP:GPS BD:北斗 GN:多星联合定位 GL:GLONASS |
| ccc | 命令符 | GGA:定位信息 GSA:当前卫星信息 GSV:可见卫星信息 RMC:推荐定位信息 NTG |
| dd | 数据 | \ |
| * | 校验前缀 | \ |
| hh | 校验和 | \$ 到 * 之间所有数据, 各字节 ASCII 码交的异或校验 |

表 2 GNGGA 数据格式

| 字段类型 | 含义 |
|-------|----------------|
| 字段 1 | UTC 时间 |
| 字段 2 | 纬度(度分格式) |
| 字段 3 | N(北纬)、S(南纬) |
| 字段 4 | 经度(度分格式) |
| 字段 5 | E(东经)、W(西经) |
| 字段 6 | 卫星定位状态 |
| 字段 7 | 参与的定位卫星数量 |
| 字段 8 | HDOP 水平精度因子 |
| 字段 9 | 海拔高度 |
| 字段 10 | 地球椭球面相对大地水准面高度 |
| 字段 11 | 差分时间 |
| 字段 12 | 差分站 ID |
| 字段 13 | 校验值 |

实现部分包括获取定位结果, 解析定位结果, 通过 4G 模块上传云端显示, 并且上传当前设备电量与 IMEI 编号, 支持串口回显数据功能与显示网络信息等功能, 当串口 2 中断标志位为 1, 输入指令, 通过将设备的 PA2 的 RX, TX 引脚以及 GND 使用杜邦线与 CH340 连接, 通过串口助手观察当前设备定位情况。

通过解析处理 NMEA0183 电文, 可以方便地与其他设备进行数据交互和集成, 通过标准的电文格式, 不同设备之间可进行数据共享与通信, 从而实现复杂的导航功能, 如船舶自动导航, 飞行飞机管理系统等。

NMEA-0183 导航电文 GGA 数据接收与解算流程如下: 通过定位模块实现导航卫星信号接收, 当系统接收数据量满足解算条件下, 依据 NMEA-0183 导航电文格式对接收到的导航数据进行实时解算, 得出接收机实时经纬度、海拔高度、定位精度、参与定位卫星数等信息。流程如图 2 所示。

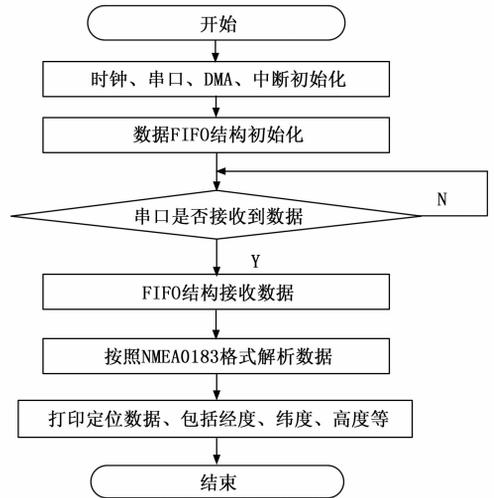


图 2 北斗定位信号接收解算

4 实验数据分析

4.1 静态对比实验

在无遮挡条件下使用和芯星通公司的 UB4B0 导航板卡和文章中所提出的定位终端分别采样 2 360 组数据, 求解导航定位精度, 将 UB4B0 所采集数据的纬度, 经度平均值作为导航定位终端定位基准值做差求得纬度误差与经度误差, 利用两项误差求得东西向与南北向的距离误差, 并且利用距离误差可求得平面上的位置误差。通过位置误差进行从小到大排序, 最终排序位置处于 50% 的位置误差值则为当前导航定位终端的定位精度。

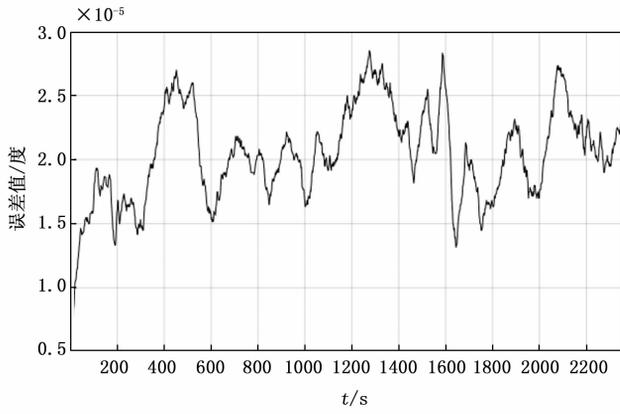
以 1 Hz 采样率采样数据, 采样 2 360 组数据, 实验结果如图 3 所示。

图 4 表示静态对比情况下定位终端定位精度。图中直线部分表示经度位置误差, 虚线表示纬度位置误差, 点状线表示平面位置误差。图中不同颜色图形标注为定位终端定位精度值。经过实验数据分析, 静态对比情况下定位终端可达到 2. 268 323 774 m 定位精度。

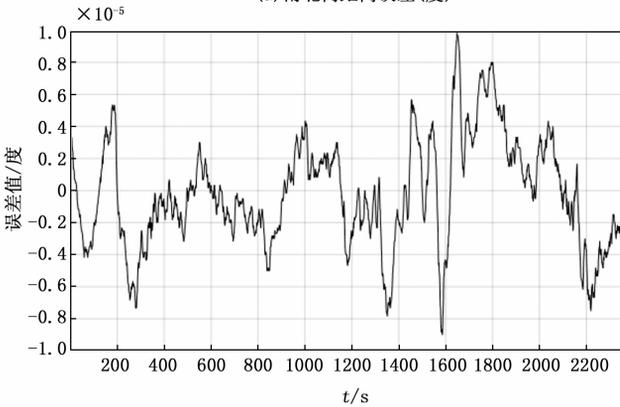
经过详细的市场调研, 现有市场上较为主流的导航定位终端定位精度以及尺寸参数如表 3 所示, 经过对比, 文章中所提出的基于 ARM 的北斗定位终端具有定位精度高, 小型化的优势。

表 3 市场主流定位终端参数

| 设备型号 | 定位精度 | 尺寸 |
|--------------|------|------------------------|
| HG-JC-TSG311 | 厘米级 | 222 mm×156 mm×75 mm |
| CK607 | 亚米级 | 100 mm×75 mm×38 mm |
| JF01A-0 | 厘米级 | 102 mm×53 mm×25.6 mm |
| UB4B0M | 厘米级 | 46 mm×71 mm×10 mm |
| Q2001 | 亚米级 | 104 mm×59 mm×28 mm |
| CR202 | 厘米级 | 47.6 mm×52 mm×19.82 mm |
| HX-TR210 | 厘米级 | 92 mm×64 mm×42.8 mm |
| CK608 | 厘米级 | 120 mm×112 mm×38 mm |
| 定位终端 | 亚米级 | R:27.5 mm H:39 mm |

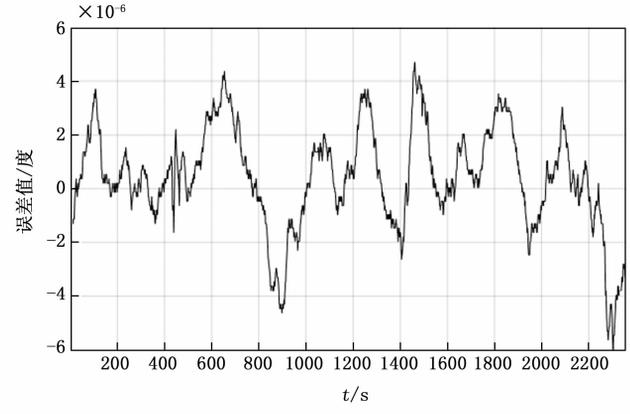


(a) 南北向距离误差(度)

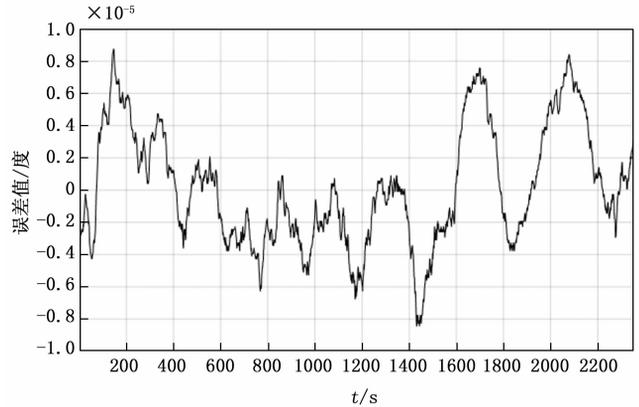


(b) 东西向距离误差(度)

图 3 静态对比情况下经纬度误差分析



(a) 南北向距离误差



(b) 东西向距离误差

图 5 定位终端测试实验

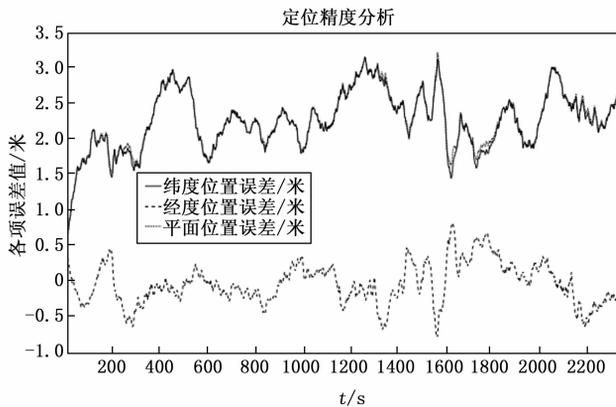


图 4 静态对比情况下定位精度分析

精度。经过实验数据分析,无遮挡情况下定位终端可达到 0.337 667 789 m 定位精度。

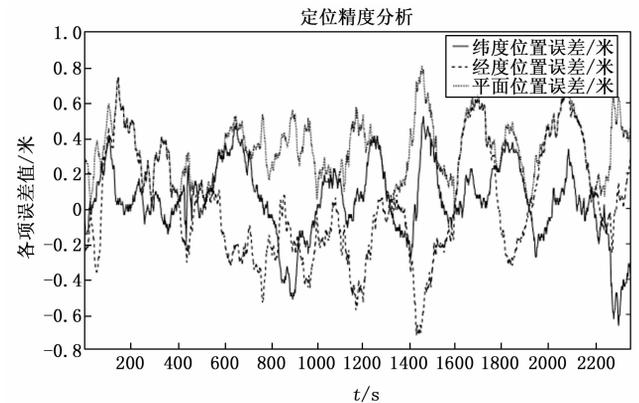


图 6 无遮挡情况下定位精度分析

4.2 静态实验

定位终端测试实验如图 5 所示,通过 CH340 与 PC 电脑相连接,设备保持开机状态,等待红灯快速闪烁,表示定位终端已经成功定位,可开展下一步工作。

以 1 Hz 采样率采样数据,分别在无遮挡条件、楼宇遮挡条件、树木遮挡条件下各分别采集 2 360 组数据,利用终端本身纬度,经度平均值作为导航定位终端定位基准值。

4.2.1 无遮挡条件下的导航定位性能测试

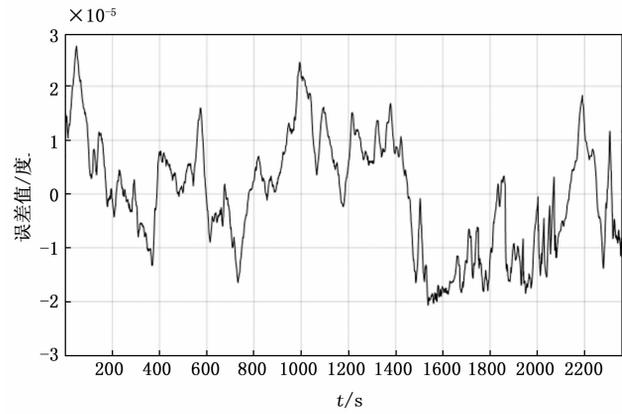
图 6 表示在无树木、楼宇遮挡情况下定位终端定位

4.2.2 楼宇遮挡条件下的导航定位性能测试

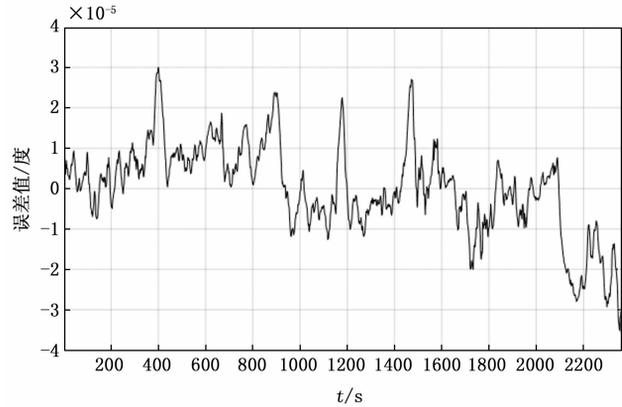
图 8 表示在楼宇遮挡情况下定位终端定位精度。经过实验数据分析,在楼宇遮挡情况下定位终端可达到 1.405 457 564 m 定位精度。

4.2.3 树木遮挡条件下的导航定位性能测试

图 10 表示在树木遮挡情况下定位终端定位精度。经过实验数据分析,在树木遮挡情况下定位终端可达到 0.973 086 573 m 定位精度。

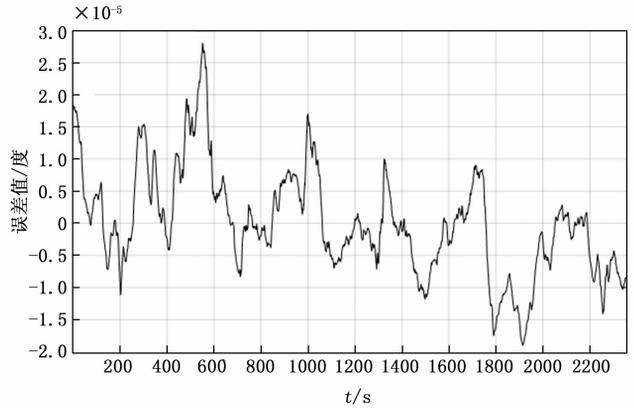


(a) 南北向距离误差

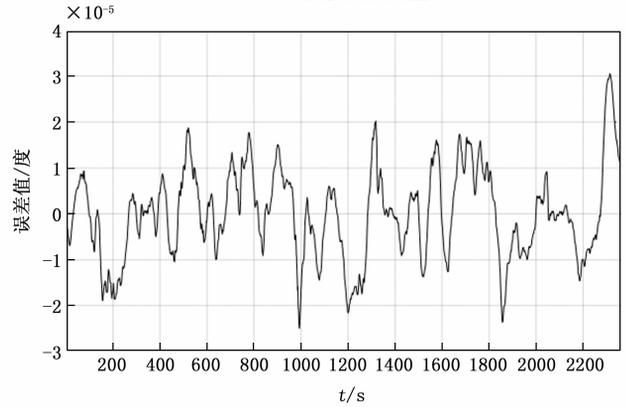


(b) 东西向距离误差

图 7 楼宇遮挡情况下经纬度误差分析



(a) 南北向距离误差



(b) 东西向距离误差

图 9 树木遮挡情况下经纬度误差分析

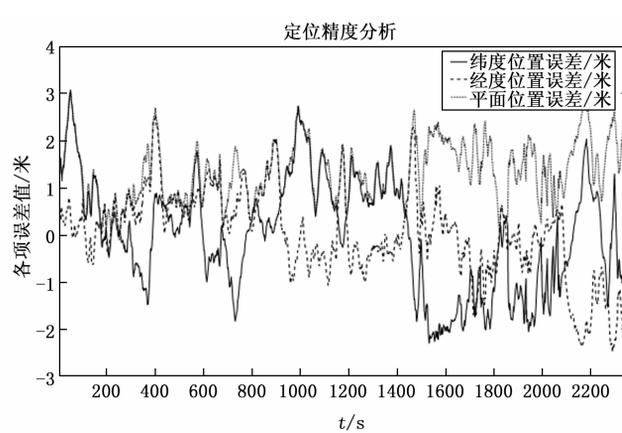


图 8 楼宇遮挡情况下定位精度分析

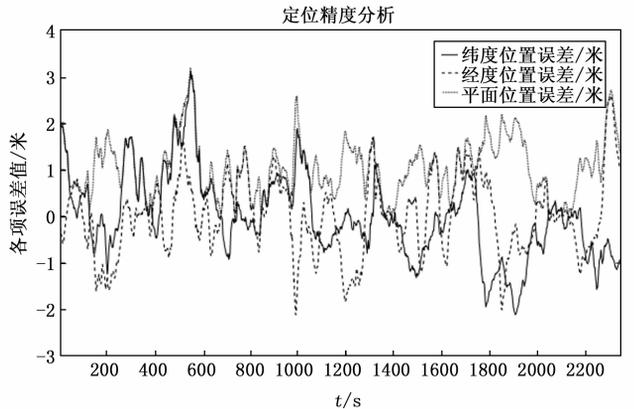


图 10 树木遮挡情况下定位精度分析

表 4 不同环境下定位终端定位精度分析

| 测试场景 | 数据数量 | 定位精度/m |
|------|-------|---------------|
| 无遮挡 | 2 360 | 0.337 667 789 |
| 楼宇遮挡 | 2 360 | 1.405 457 564 |
| 树木遮挡 | 2 360 | 0.973 086 573 |

在楼宇和树木遮挡情况下, 由于导航信号受到遮挡, 参与定位解算卫星数变少, 导致定位精度下降, 3 种测试场景下平均定位精度为 0.905 403 97 m。

4.3 动态实验

4.3.1 手持定位终端定位性能试验

图 11 中直线轨迹为手持定位终端步行轨迹, 虚线部分为手持定位终端跑步轨迹。两者轨迹误差小于 10 m。

4.3.2 车载定位终端定位性能试验

车载定位终端性能实验场景为在行车状态下, 测试在不同车速下, 观察定位终端定位性能。通过观察定位终端定位轨迹, 分析在不同车速情况下定位终端定位误差结果。

图 12 为车速 20 km/h 与 30 km/h 定位终端轨迹对

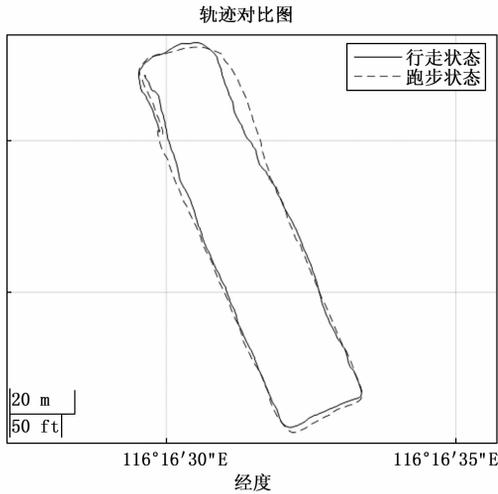


图 11 手持轨迹对比图

比图，直线部分表示车速在 20 km/h 下定位终端轨迹，虚线部分表示车速在 30 km/h 下定位终端轨迹。

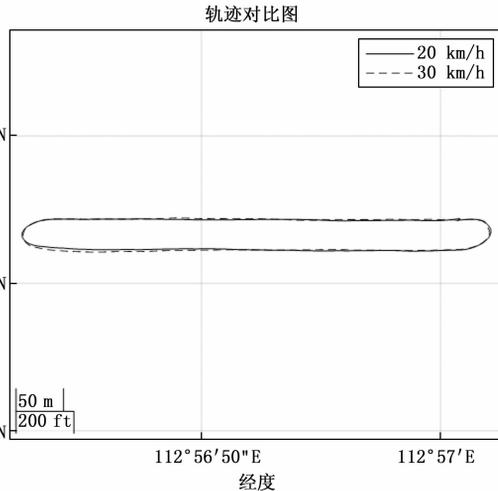


图 12 车载轨迹对比图

在车载定位终端实验情况下。轨迹距离误差优于 5 m。

5 结束语

基于 ARM 的北斗高精度定位终端设备在与 UB4B0 的静态对比实验下，定位精度达 2.268 323 774 m。在静态测试中，3 种实验场景下平均定位精度达到 0.905 403 97 m，实现亚米级定位精度，动态测试下，手持载轨迹误差优于 10 m，车载轨迹误差优于 5 m。其小型化、低功耗、多星联合定位能力，有望在运输物流，应急救援，定位监测等多个社会领域大放异彩。

参考文献：

[1] 邢昱翔. 弱信号场景下多模融合导航定位终端设计 [D]. 太原: 中北大学, 2024.

[2] 柴文兵. 基于 ARM-Linux 的北斗高精度定位终端的研究与实现 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2016.

[3] 刘 振. 基于伪卫星技术的室内外一体化定位系统设计 [J]. 长江信息通信, 2022, 35 (9): 221-224.

[4] 张一达. 基于 5G 和 GNSS 的室内外一体化定位方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023.

[5] 张 张. 基于北斗的人员定位追踪系统的设计与实现 [D]. 天津: 河北工业大学, 2016.

[6] 蔡 嘉, 向 南, 田湘滢, 等. 基于高精度定位平台的定位终端测试研究 [J]. 长江信息通信, 2021, 34 (2): 47-49.

[7] 李俊文. 基于 ARM+DSP 的 4G 北斗定位终端的设计 [D]. 黑龙江: 哈尔滨工程大学, 2016.

[8] SPECHT M, SZOT T. Accuracy analysis of GPS sport receivers in dynamic measurements [J]. Annual of Navigation, 2012, 19 (1): 165-176.

[9] 李诚煜. 面向危化工厂的人员定位管理系统研究与实现 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2024.

[10] 原彩彩. 煤矿井下人员定位跟踪系统软硬件开发与实践分析 [J]. 自动化应用, 2024, 65 (9): 240-242.

[11] MA C, PANG X, WANG S, et al. The design of vehicle tracking and positioning system [C] // IEEE2018 10th international conference on intelligent human-machine systems and cybernetics (IHMSC), 2018: 339-342.

[12] 张锦荣, 王康谊, 张云逸, 等. 基于北斗/GPS 的水中应急定位系统设计 [J]. 国外电子测量技术, 2021, 40 (6): 87-93.

[13] 欧阳籽勃, 陈云峰, 宋志丹. 基于高精度北斗组合定位电子围栏技术研究及应用 [J]. 卫星应用, 2019, (1): 32-33.

[14] CHEN X, YU D, WANG H. Design and implementation of logistics information terminal positioning technology [C] // IEEE2008 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2008: 1-4.

[15] 刘 旻, 吴嗣亮. 实时高动态 GNSS 信号模拟器高精度伪距生成方法 [J]. 北京理工大学学报, 2011, 31 (9): 1053-1057.

[16] 李志华, 刘 亚, 王静宜, 等. 基于 RDSS+4G 双网传输的 GNSS 车载定位终端设计 [J]. 智能矿山, 2023, 4 (7): 61-66.

[17] 赵乾致, 张 伟. 基于 STM32 单片机的换电重卡车载定位系统设计 [J]. 工业控制计算机, 2022, 35 (9): 109-110.

[18] 钱德俊, 张 哲, 胡 晨. NMEA0183 协议解析 [J]. 电子器件, 2007 (2): 698-701.

[19] 石 凯, 徐 明, 徐 建, 等. 基于 NMEA 0183 的 GPS 设备轨迹恢复方法 [J]. 计算机应用与软件, 2017, 34 (12): 13-20.

[20] 方书山, 章传银, 秘金钟. NMEA 0183 格式数据流解析的一种实用方法 [J]. 测绘通报, 2013, (11): 114-116.