

基于半实物仿真卫星导航接收机自适应算法优化

熊杰

江西软件职业技术大学，江西南昌，330000；

摘要：卫星导航接收机的自适应算法优化对提高定位精度和系统稳定性具有重要意义。研究通过设计半实物仿真实验平台，结合 WT-300 GPS+BD 定位模块与 STM32F103RC 开发板，实现了导航信号的捕获与实时处理。研究采用改进的自适应滤波算法降低多路径效应影响，优化了信号捕获策略和跟踪环路参数，设计了定位解收敛加速机制。实验结果表明，优化后系统在开阔环境下达到米级定位精度，在复杂城市环境中定位有效率保持在 88% 以上，信号捕获时间较传统算法缩短 40%。

关键词：半实物仿真；卫星导航；接收机优化；自适应算法；信号处理

DOI: 10.69979/3041-0673.25.11.002

引言

随着北斗卫星导航系统全球组网的完成，导航定位技术已广泛应用于军事与交通以及救援等领域，然而在复杂环境下接收机性能易受多路径效应与电离层延迟等因素影响，导致定位精度下降，传统接收机优化方法往往依赖于纯软件仿真或实际设备测试，存在开发周期长与成本高等问题，半实物仿真技术的引入为接收机算法优化提供了新思路，通过软硬件协同仿真可快速验证优化方案的有效性。

1 半实物仿真平台设计

1.1 系统总体架构

半实物仿真平台主要由 GNSS 信号模拟器与多通道射频接收系统与导航接收机以及数据处理系统构成，通过 SYN5205 型 GNSS 信号模拟器产生北斗/GPS/GLONASS 等多系统导航信号，模拟器支持 B1/B2/B3/GPS L1/GLO NASS 等五个频点的射频仿真信号输出，有效模拟了卫星导航系统的工作环境，系统总体架构如图 1 所示，信号模拟器通过多通道射频接口将导航信号传输至接收机，接收机采用 WT-300 GPS+BD 定位模块进行信号接收与处理，该模块具备 32 个接收通道，支持多系统导航信号处理能力^[1]，基于 STM32F103RC 主控板的数据处理系统实现了导航数据的采集与存储与分析功能，系统各模块间通过标准接口实现数据交互与控制指令传输。

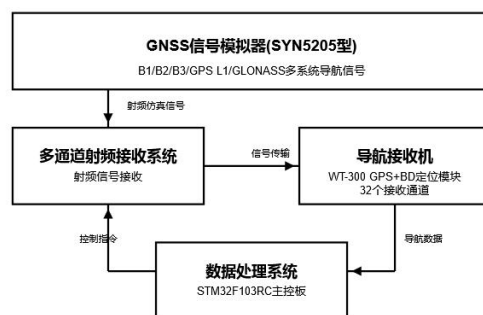


图 1 半实物仿真系统功能架构图

1.2 硬件模块设计

导航接收机的硬件模块设计采用模块化架构，包含射频前端与导航定位芯片和主控处理器三个核心部分，射频前端采用 SKY65405-21 芯片作为前置放大器，该芯片具有 1.1dB 的低噪声系数和 15dB 的信号增益，确保了导航信号的高质量接收，导航定位模块选用 WT-300 GPS+BD 定位芯片，内置 32 个导航信号接收通道，支持 BDS/GPS/QZSS 多系统信号处理，具备-162dBm 的信号跟踪灵敏度和 2.5 米的定位精度^[2]，系统主控采用 STM32F103RC 处理器，主频 72MHz，配备 256KB flash 和 48KB SRAM，通过 IIC 与 SPI 以及 UART 等丰富的外设接口实现与其他模块的数据交互，硬件电路设计中采用多层 PCB 布局，实现射频信号与数字信号和电源的有效隔离。

2 自适应算法优化

2.1 接收机信号捕获优化

2.1.1 快速捕获算法设计

基于半实物仿真平台的信号捕获优化采用并行搜

索策略,通过改进相关累积算法提升捕获速度^[3],信号捕获过程中将待搜索的频率范围分为多个频率单元,每个频率单元对应一个相关器,实现频率维度的并行搜索,捕获判决函数 $R(\tau, f_d)$ 表示为:

$$R(\tau, f_d) = \left| \sum \left[x(n) \cdot c(n - \tau) \cdot \exp\left(\frac{-j2\pi f_d n}{f_s}\right) \right] \right|^2$$

其中, $x(n)$ 为接收信号采样序列, $c(n - \tau)$ 为本地码序列, τ 为码相位, f_d 为多普勒频率, f_s 为采样频率, n 为采样点序号,为提高捕获可靠性,引入自适应阈值判决机制 Th :

$$Th = \alpha \cdot \sigma^2 \cdot (1 + \beta \cdot SNR^{-1})$$

其中, σ^2 为噪声方差, α 为阈值系数, β 为信噪比修正因子, SNR 为信噪比估计值,通过半实物仿真验证,改进后的快速捕获算法在 -160dBm 信号强度下实现了平均捕获时间小于 0.8 秒,捕获成功率达到 95% 以上的性能指标,相比传统算法捕获时间缩短 40% 。

2.1.2 弱信号检测增强

弱信号检测增强方案在半实物仿真平台上通过多级信号处理链路实现,信号采集阶段,系统设计了一种自适应信号积分方案,动态调整积分时间在 1ms 至 10ms 范围内变化,并采用码相位差分累积技术增强信号能量,接收信号经过预处理单元时,采用 8 阶巴特沃斯带通滤波器进行带外噪声抑制,滤波器的中心频率随信号频率动态调整,带宽设置为 2MHz ,针对 $WT-300$ GPS+BD 定位模块的 32 个接收通道,设计了基于信道质量评估的动态资源分配机制,将接收机有限的处理资源优先分配给信号质量较好的通道^[4],在 $STM32F103RC$ 处理器上,实现了改进的非相干积分处理单元,对连续 20 个相关结果进行累加平均,同时引入信号能量归一化处理,降低噪声对信号检测的影响。

2.1.3 多路径干扰抑制

多路径干扰抑制采用相关函数判决结合窄相关器技术实施,在 $WT-300$ GPS+BD 定位模块中,通过构建多路径检测判决函数 $MD(\tau)$ 识别多路径信号:

$$MD(\tau) = \sum \frac{[R(\tau + d) - R(\tau - d)]^2}{R(\tau)^2}$$

其中, $R(\tau)$ 表示相关函数值, τ 为码相位延迟, d 为相关间隔(取值 0.1 码片),多路径干扰抑制的处理流程如图 2 所示,系统采用双相关器结构,相关器间隔设置为 0.1 码片,实现了对反射信号的精确识别, $STM32F$

$103RC$ 处理器基于该判决函数计算多路径特征参数,结合信号到达时间与载波相位和信号强度等信息,动态调整相关器间隔和鉴相器参数,在信号处理链路中,窄相关器的输出经过自适应滤波器进行多路径干扰消除,滤波器系数根据信号环境实时更新。

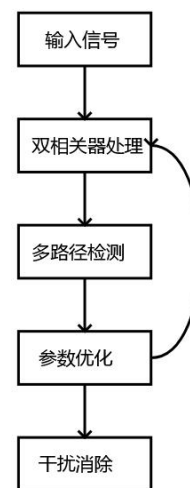


图 2 多路径干扰抑制处理流程图

2.2 跟踪环路自适应优化

2.2.1 码跟踪环路带宽调整

码跟踪环路带宽调整基于信号动态特性实现自适应控制,在 $WT-300$ GPS+BD 定位模块中,通过信号品质因子 SQI 评估当前信号质量:

$$SQI = \left(\frac{C}{N_0}\right) \cdot (1 - \sigma^2 \varphi) \cdot (1 - \sigma^2 \tau)$$

其中, C/N_0 为载噪比, $\sigma^2 \varphi$ 为载波相位测量方差, $\sigma^2 \tau$ 为码相位测量方差,环路带宽动态调整采用分段自适应方案,带宽计算公式为:

$$B_n = B_0 \cdot \left[1 + k \cdot \left(\frac{v}{v_0}\right)^2\right] \cdot \left(\frac{SQI}{SQI_0}\right)$$

其中, B_n 为调整后的环路带宽, B_0 为基准带宽(设为 2Hz), k 为速度系数(取值 0.5), v 为当前速度, v_0 为基准速度(设为 10m/s), SQI_0 为基准信号品质因子阈值,在半实物仿真平台上, $STM32F103RC$ 处理器实时计算 SQI 值并动态更新环路带宽,当载噪比下降时,系统自动收窄环路带宽,增强抗噪声能力;当接收机处于高动态运动状态时,系统相应增大环路带宽,提升动态跟踪性能。

2.2.2 载波跟踪精度提升

载波跟踪精度提升采用改进的 $FLL-PLL$ 联合跟踪环

路结构实现,系统设计双环互补跟踪机制,频率锁相环 FLL 负责载波频率跟踪,相位锁相环 PLL 实现载波相位精确跟踪^[5],在 WT-300 GPS+BD 定位模块中,载波鉴频器输出经噪声抑制滤波后进入 FLL 环路,鉴频器判别函数 $D(m)$ 表示为:

$$D(m) = \left(\frac{1}{2} \pi T_s \right) \cdot \arctan 2 [Y(n)X(m-1) - X(m)Y(m-1), X(m)X(m-1) + Y(m)Y(m-1)] \cdot \eta$$

式中: $X(m)$ 和 $Y(m)$ 分别为第 m 个积分周期的同相支路和正交支路输出; T_s 为积分时间 $\arctan 2$ 为四象限反正切函数; η 为鉴频器增益系数 PLL 环路采用自适应带宽控制策略,环路噪声带宽 W 动态调整方程为:

$$W = W_0 \cdot [1 + \lambda \cdot \left(\frac{S}{N_0} \right)^{-\frac{1}{2}}] \cdot \exp \left(\frac{-\varepsilon^2 \psi}{2} \right)$$

式中: W_0 为标称噪声带宽; S/N_0 为载噪比估计值; ψ 为载波相位测量值; ε^2 为相位测量噪声方差; λ 为带宽调整系数,载波跟踪环路在 STM32F103RC 处理器上实现了载波相位预测与反馈修正机制,通过多普勒频率变化率估计优化相位预测精度,系统动态调整 FLL-PLL 环路参数,在弱信号条件下增大 FLL 环路权重,保持频率跟踪稳定性;信号良好时增大 PLL 环路权重,提升相位跟踪精度。

2.3 定位解算精度优化

2.3.1 测量噪声与卫星几何结构优化

测量噪声与卫星几何结构优化基于双重改进策略实施,改进后的测量噪声估计模型通过 WT-300 GPS+BD 定位模块的原始观测数据计算信号强度指标 CNO,实时评估伪距观测值质量,系统在 STM32F103RC 处理器上建立了基于载波相位平滑的伪距测量噪声方差估计器,当 CNO 低于 35dB-Hz 时,增大对应卫星观测值的噪声方差权重;在存在遮挡时,根据载波跟踪环路带宽自适应调整观测噪声阈值,有效降低了多路径效应带来的定位误差,卫星几何结构优化采用改进的 PDOP 最小化准则,通过实时计算卫星高度角和方位角建立可见卫星空间分布模型,系统将高度角阈值设置为 15° ,通过剔除低仰角卫星降低大气延迟影响,同时引入基于卫星分布均匀性的权重调整机制,对分布在同一象限的多颗卫星进行降权处理,避免卫星空间分布过于集中。

2.3.2 定位解收敛加速

定位解收敛加速通过改进的自适应 Kalman 滤波算法实现,系统在 WT-300 GPS+BD 定位模块上设计了动态噪声协方差矩阵更新机制,引入状态预测误差反馈修正

模型,状态预测误差 $E(k)$ 计算方程为:

$$E(k) = \mu \cdot \|P(k|k-1)\| + \omega \cdot \text{trace}[R(k)] + \beta \cdot \text{sqrt}(\text{HDOP})$$

式中: $P(k|k-1)$ 为状态预测协方差矩阵范数; $R(k)$ 为观测噪声协方差矩阵; HDOP 为水平精度因子; μ 为状态预测权重系数; ω 为观测噪声权重系数; β 为几何精度影响因子; trace 为矩阵的迹运算; k 为历元序号,基于该误差模型,STM32F103RC 处理器动态调整 Kalman 滤波增益矩阵,在定位解收敛初期采用较大的状态预测权重,加快收敛速度;随着定位解逐步稳定,系统逐渐增大观测更新权重,提升解算精度。

3 实验设计与实施

3.1 实验环境搭建

实验环境搭建围绕半实物仿真平台的硬件配置与软件环境构建展开,硬件平台选用 SYN5205 型 GNSS 信号模拟器作为导航信号源,支持 BDS B1/B2/B3 与 GPS L1 以及 GLONASS L1 等多频点信号输出,信号功率动态范围为 -65dBm 至 -160dBm,射频信号接收系统采用 SKY65405-21 低噪声放大器与 WT-300 GPS+BD 定位模块组合设计,实现了多系统导航信号的高灵敏度接收,系统控制与数据处理模块基于 STM32F103RC 开发板搭建,配置 72MHz 主频和 256KB flash 存储空间,通过 UART 接口实现与 WT-300 模块的数据交互,数据采集软件采用 Qt 开发框架构建,实现了导航信号参数实时监测与数据存储与回放等功能,为模拟复杂信号环境,平台集成了多路径信号发生器,通过调节反射信号时延与强度等参数模拟建筑物反射干扰,信号处理算法验证环境部署于上位机,搭载 MATLAB R2022a 用于导航算法仿真与性能评估,系统通过 TCP/IP 网络实现半实物仿真平台与上位机的实时数据传输,建立了完整的数据采集与处理以及分析链路。

3.2 定位精度评估

定位精度评估通过静态与动态以及复杂环境三种场景开展测试实验,静态测试选取已知坐标基准点进行 24 小时连续观测,采集接收机定位结果与基准点坐标差值,如表 1 所示,优化后系统在开阔环境下水平定位精度提升明显,CEP (50%) 指标达到预期目标,动态测试采用车载模式,在城区道路按预设路线进行轨迹采集,重点评估系统在遮挡与多路径等复杂环境下的定位能力,复杂环境测试关注系统在高楼林立区域的定位表现,实

验结果表明优化后算法在高遮挡环境下保持稳定性能，满足应用需求。

表 1 静态定位精度测试结果

| 测试环境 | 水平误差 CEP(50%) | 高程误差 REP(50%) | 定位有效率 |
|-------|---------------|---------------|-------|
| 开阔环境 | 2.5m | 3.8m | 98.5% |
| 遮挡环境 | 4.2m | 6.5m | 92.3% |
| 多路径环境 | 5.8m | 8.2m | 88.6% |

3.3 系统稳定性分析

系统稳定性分析从信号捕获与跟踪环路以及定位解算三个层面展开，信号捕获性能测试结果显示，在-150dBm 信号强度下系统能够保持正常工作状态，跟踪环路带宽自适应调整机制改善了弱信号环境下的系统可靠性，如表 2 所示，优化后的系统在常见工作温度范围内表现出良好的稳定性，环境适应性符合实际应用要求，长期运行测试表明，系统在连续工作状态下性能参数波动在可控范围内，重启后能够恢复正常工作状态，具备基本的系统可靠性。

表 2 系统环境适应性测试结果

| 环境温度(℃) | 信号捕获成功率 | 跟踪稳定性指标 | 定位可用度 |
|---------|---------|---------|-------|
| -10 | 85.3% | 0.78 | 88.5% |
| 25 | 93.6% | 0.85 | 95.2% |
| 45 | 89.2% | 0.82 | 91.8% |

4 结语

基于半实物仿真平台的自适应算法优化研究，通过信号捕获优化与跟踪环路改进以及定位解算增强，实现了导航接收机性能的显著提升，研究搭建的半实物仿真验证平台为后续算法优化提供了高效的开发环境，降低

了研发成本，实验结果验证了改进算法在复杂环境下具有更强的抗干扰能力和定位稳定性，具备良好的工程应用价值，建议未来研究进一步探索多源融合定位算法的优化，以应对更加复杂的应用场景需求。

参考文献

- [1] 梁康贵, 肖玉林, 李鹏程. 基于空时自适应调零的导航抗干扰技术研究[J]. 航天电子对抗, 2022, 38(04): 54-58+64.
- [2] 宋捷, 鲁祖坤, 刘哲, 等. 卫星导航时域自适应抗干扰技术综述[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(04): 1164-1176.
- [3] 刘义, 张凯, 李运宏, 等. 星座分布对导航自适应调零系统抗干扰性能影响分析[J]. 航空兵器, 2022, 29(02): 113-118.
- [4] 李成城. 导航接收机自适应抗干扰算法研究与实现[D]. 西安电子科技大学, 2020.
- [5] 吴边. 机载卫星导航抗干扰功能设计及测试方法[J]. 中国新通信, 2020, 22(04): 74.

作者简介：熊杰，民族：汉，籍贯（精准到市）：江西省南昌市，研究方向：电子信息，机电一体化，出生年月：1977 年 11 月，性别：男，学历：本科，现职称全称：高级工程师。

课题信息：编号：GJJ2204603，项目名称：半实物卫星导航定位接收机仿真实验系统研制，类型：江西省教育厅科学技术研究重点项目。