

GNSS 软件接收机的框架结构及原型系统开发

张 婷¹, 陈秀万¹, 朱庄生², 张丽娜³

(1. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100083;
3. 北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100083)

摘 要:介绍全球导航卫星系统软件接收机的基本结构和优点, 系统地实现了 GPS 软件接收机。该结构的硬件部分实现中频信号采样模块, 软件部分实现可设置 12 通道的中频信号处理模块、信号捕获和跟踪、导航电文存储及转换, 并针对伪距定位算法部分实现了单点静态定位, 考虑的误差源主要包括卫星钟误差、对流层误差、电离层误差和地球自转引起的偏差。定位数据水平精度基本达到 15 m(95%), 几何精度因子(GDOP)值较好的数据可达 10 m。

关键词:软件接收机; 循环相关; 伪距; 导航电文

Structure of GNSS Software Receiver and Its Realization

ZHANG Ting¹, CHEN Xiu-wan¹, ZHU Zhuang-sheng², ZHANG Li-na³

(1. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 1000871;
2. School of Instrument Science and Opto-electronic Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083;
3. School of Electronic and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

【Abstract】 This paper introduces the basic structure of Global Navigation Satellite System(GNSS) software receiver, summarizes its advantages and realizes the whole system regarding GPS software receiver. Except it implements the intermediate frequent signal sampling module for the hardware part, the system is all carried out in software way, including intermediate frequency signal processing module, the signal acquiring and tracking module, ephemeris storage and conversion module, and single-point static positioning module aiming at pseudorange. The errors concerned in the system mainly contain satellite clock error, troposphere error, ionosphere error and the error caused by earth rotation. The result precision can reach 15 meters (95%), even 10 meters with good Geometric Dilution of Precision(GDoP) values. The entire system possesses friendly interface with fine flexibility and extensibility.

【Key words】 software receiver; cyclic correlation; pseudorange; ephemeris

目前全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)接收机产品普遍采用射频芯片加基带芯片的芯片集成方式, 芯片的专用性使产品兼容性差、维护升级困难(常涉及硬件变动)。另外, 因为涉及敏感技术, 所以国外对接收机核心技术都严格限制甚至保密, 公开发表的相关技术文献很少, 这极大制约了 GNSS 卫星应用领域的发展, 不利于我国 GNSS 设备的研制及应用。软件无线电是近年来提出的一种新的实现无线通信的体系结构, 它以其强大的可配置能力和可编程能力成为未来通信系统的首选, 它的出现是从硬件无线通信到软件无线通信的革命。软件无线电就是将模块化、标准化的硬件单元以总线方式连接构成基本平台, 通过软件加载实现各种无线通信功能的一种开放式体系结构。其主要思想是利用现有技术, 尽量将 A/D(模拟/数字)和 D/A(数字/模拟)模块向射频端靠近, 在通用的开放式无线电智能通信硬件平台上, 安装不同的软件完成各种通信功能, 通过软件实现系统升级。本文根据软件无线电思想, 设计了 GNSS 软件接收机的框架结构, 针对每个模块介绍了具体的实现方法, 开发了 GNSS 软件接收机原型系统, 实验结果表明其接收效果良好。

1 GNSS 软件接收机的框架结构

如图 1 所示, GNSS 软件接收机框架结构可分成 4 个模块: 信号采集与产生, 中频信号处理, 导航解算和用户界面。

(1)信号采集与产生模块。实现 GNSS 高频信号实时接收、信号下变频处理及信号数字化处理, 包含天线模块、射频处理模块和数

字化模块。

(2)中频信号处理模块。实现 GNSS 中频采样数据处理, 通过对 GNSS 信号的捕获跟踪, 解调出导航电文和观测量数据。包含相关通道、捕获处理、跟踪处理、数据解调、观测量提取、用户 API(Application Programming Interface)程序等模块。

(3)导航解算模块。采用 GNSS 伪距定位算法, 实时解算接收机的位置信息。

(4)用户界面。根据软件接收机的特点, 设计了友好的用户界面, 用图、表、文字等方式显示结果。用户通过界面显示结果实时分析、诊断各模块的工作性能。

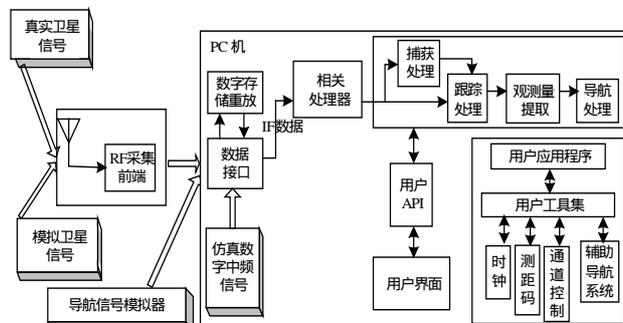


图 1 GNSS 软件接收机总体框图

基金项目: 国家“863”计划基金资助项目(2004AA133020)

作者简介:张 婷(1980-), 女, 硕士研究生, 主研方向: 卫星导航; 陈秀万, 教授、博士生导师; 朱庄生, 博士; 张丽娜, 硕士研究生

收稿日期: 2007-06-10 **E-mail:** share1126@163.com

2 GNSS 软件接收机各模块的具体实现方法

2.1 信号采集与产生模块

信号采集与生产模块分为以下 4 个子模块：

(1)天线模块。负责实时接收 GNSS 卫星 L1 频段(1 575.42 MHz、CA 码)的高频信号。经调研，本系统选用目前市场上较成熟的、工作在 L1 单一频率的微带天线产品。此类天线耐用性强、可靠性高。

(2)射频处理模块。实现信号下变频处理，系统采用 GP2010 做射频处理，中心频率分别为 175.42 MHz、35.42 MHz 和 4.309 MHz。GP2010 可实现高频信号的下变频、量化、采样处理，性能稳定。

(3)FPGA(Field Programmable Gate Array)控制模块。实现信号数字化处理，系统选用 Altera 公司的 Cyclone 系列芯片 EP1C12Q240C8。

(4)PCI(Programmable Communication Interface)传输模块。采用 PCI 驱动芯片 PCI9054，局部总线接口模式为 C 模式。

2.2 GNSS 软件接收机中频信号处理模块

2.2.1 相关处理器

GNSS 软件接收机通过基于 PC 机的中频信号处理程序实现中频采样数据的处理，包括信号捕获、跟踪、解调，最终得到卫星的导航电文和观测数据。本文采用 12 通道并行处理，如图 2 所示^[1]。

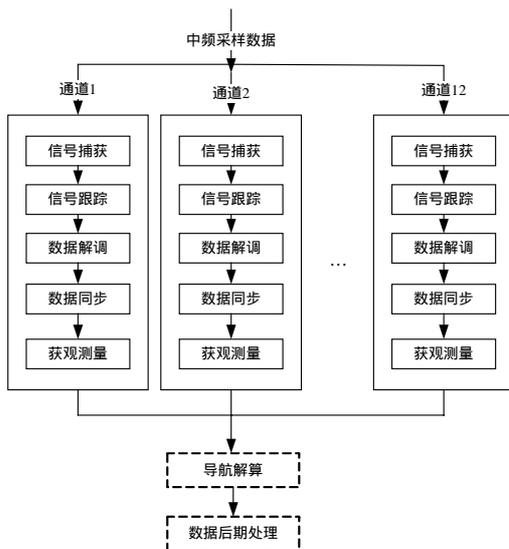


图 2 通道并行处理

每个通道的结构基本相同，包括相关器模块、捕获模块、跟踪模块、解调模块和同步模块。其中，相关器模块主要完成 GNSS 中频信号的载波剥离、码相关和积分累加处理；捕获模块实现本地码与接收信号的粗同步；跟踪模块与相关通道模块构成跟踪环路实现对信号码相位和载波多普勒的跟踪处理；数据解调模块进一步消除载波相位误差，解调出导航电文；同步模块实现位同步和子帧同步。

2.2.2 软件接收机捕获方法

软件接收机的计算量全部在 PC 机内进行，其运算速度远不如硬件接收机，从总体设计优化方面，本系统选用 DFT (Discrete Fourier Transform) 和 FFT (Fast Fourier Transform) 算法^[2]来捕获信号，信号相关处理在频域内进行。这样极大减少了计算量，提高了运算速度。

该算法将本地信号表示为

$$l_i = C_{boc} \exp(j2 f_i t) \quad (1)$$

其中，下标 $i=1,2,\dots,n$ ； C_{boc} 是卫星对应的 GNSS 信号； f_i 表示对应的多普勒频移搜索段。

在离散时间域内，输入信号 $x(n)$ 与本地生成信号 $l_i(n)$ 之间的互相关，可记为

$$r(n) = \sum_{m=0}^{N-1} x(m)l_i(n+m) \quad (2)$$

如果 $x(n)$ 是实数，则 $x(n)^* = x(n)$ 。取 $r(n)$ 的 DFT，其结果为

$$R(k) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} x(m)l_i(n+m)e^{-j2\pi kn}/N = L_i(k)X^*(k) \quad (3)$$

上式又可化为

$$R(k) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{N-1} x(m)l_i(n+m)e^{-j2\pi kn}/N = L_i^*(k)X(k) \quad (4)$$

$R(k)$ 的幅值，可记为

$$|R(k)| = |L_i^*(k)X(k)| = |L_i(k)X^*(k)| \quad (5)$$

上述关系用于确定输入信号和本地生成信号的相关。

本地生成信号与输入信号进行相关，若本地信号包含正确的 GNSS 信号和频率分量，达到正确的码相位时，输出形成峰值，实现捕获。

2.2.3 软件接收机的跟踪模型^[3-5]

信号捕获得到信号码相位和载波多普勒频差的粗略估计值，为得到更精确的值以解调出导航电文，需要对信号的码相位和载波相位进行跟踪。载波跟踪环或者码跟踪环基本上都是由鉴别器、环路滤波器和 DCO (Digitally Controlled Oscillator) 或 NCO (Numerical Controlled Oscillator) 组成。

(1) 码跟踪环路中码鉴别器的设计

其表达式为

$$V_{NORM}^{GPS}(\varepsilon_\tau) = V_{EMLP}^{GPS} / NORM = \frac{[(IE_{GPS}^2 + QE_{GPS}^2) - (IL_{GPS}^2 + QL_{GPS}^2)]}{[(IE_{GPS} + IL_{GPS})^2 + (IE_{GPS} + IL_{GPS})^2]} R^2[\varepsilon(k) - \delta] - R^2[\varepsilon(k) + \delta]$$

其中， $V_{NORM}^{GPS}(\varepsilon_\tau)$ 是码鉴别器输出控制量， ε_τ 为码跟踪误差； IE_{GPS} 是超前同相路； QE_{GPS} 是超前正交路； IL_{GPS} 是滞后同相路； QL_{GPS} 是滞后正交路； $R[\bullet]$ 是卫星接收信号理想的自相关函数，本文超前-滞后码片设定为 $\delta = 0.5 \text{ chip}$ 。

(2) 载波跟踪环路鉴频器的设计

在 FLL 跟踪环中，鉴频器算法采用归一化叉积自动频率跟踪算法。其鉴频器输出为

$$\Delta f_k = \frac{1}{2\pi T} a \tan \left[\frac{I(k-1)Q(k) - I(k)Q(k-1)}{I(k-1)I(k) + Q(k)Q(k-1)} \right]$$

其中， T 为预检积分时间。

2.3 导航处理模块

2.3.1 误差模型

在该系统中影响定位精度的主要因素有电离层、对流层误差，卫星钟误差和地球自转影响。电离层误差模型采用 Klobuchar 模型^[6]，对流层误差模型选择霍普菲尔德改正模型，因为霍普菲尔德模型温度参数不便提取，所以本文采用较简单的替代经验模型，可直接得到对流层改正^[6]：

$$\Delta = \frac{2.47}{\sin \xi + 0.0121}$$

其中， ξ 是卫星与接收机位置间的仰角。

卫星钟钟差^[7]用导航电文中的校正参数改正，其二阶多

项式为

$$\delta t = a_{f0} + a_{f1}(t - t_{oc}) + a_{f2}(t - t_{oc})^2 + \Delta t_r$$

其中, a_{f0} , a_{f1} , a_{f2} 分别为时钟偏移、时钟漂移和频率漂移; t_{oc} 为时钟数据基准时间; t 是当前时间历元; Δt 为由相对论效应引起的校正值。

2.3.2 位置解算

本文系统采用的定位算法是基于最小二乘的伪距定位算法^[7], 步骤如下:

(1) 设初值 $(x_0, y_0, z_0, t_0) = (0, 0, 0, 0)$ 。

(2) 由GPS信号得真实距离 P 和单一伪距 P_j 。

(3) 计算 Δp_j 及各方向余弦 a_{xj} , a_{yj} , a_{zj} 。

$$(4) \Delta x_{n-1} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \Delta p_j \quad (\mathbf{H}_{n \times 4} = \begin{pmatrix} a_{x1} & a_{y1} & a_{z1} & 1 \\ a_{x2} & a_{y2} & a_{z2} & 1 \\ a_{x3} & a_{y3} & a_{z3} & 1 \end{pmatrix})$$

$$(5) \begin{cases} x_n = x_{n-1} + \Delta x_{n-1} \\ y_n = y_{n-1} + \Delta y_{n-1} \\ z_n = z_{n-1} + \Delta z_{n-1} \\ t_n = t_{n-1} + \Delta t_{n-1} \end{cases}$$

判断 Δx_n 是否小于阈值, 如果小于, 则执行下一步, 否则, 返回步骤(2)。

(6) 得到定位结果 $(x_u, y_u, z_u, t_u) = (x_n, y_n, z_n, t_n)$ 。

整体导航解算模块流程如图 3 所示。

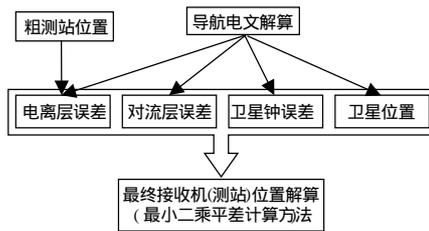


图 3 导航位置解算流程

3 GNSS 软件接收机原型系统

3.1 系统分析

系统主界面的主要功能是显示捕获跟踪状态及最终定位结果。

主界面上方显示捕获跟踪状态。用户通过基于 Windows 的图形用户接口直观看到软件接收机捕获跟踪各通道卫星的状态。通道参数表显示各通道卫星的通道号、卫星号、通道状态、捕获码相位、捕获多普勒频率、码相位跟踪值、载波多普勒频率跟踪。

主界面下方显示定位结果。卫星位置表显示接收到的卫星数目及位置, 导航卫星图为各卫星的分布, 用户可直观感受当前可见卫星的分布及卫星状态。导航信息表显示当前解算出的各个参数, 包括时间、位置、速度、精度等, 还能方便地开始、暂停和停止接收卫星数据, 灵活性大。

3.2 系统主要功能

(1) 信息显示功能。在主界面及各子界面中, 捕获、跟踪的相关通道信息、导航信息等都有所显示, 包括程序的中间值、信息的图形, 实时卫星分布和定位结果地图。

(2) 算法演示功能。包括信号捕获和跟踪各算法演示及与 GALILEO 对应的 BOC 信号演示, 同时通过基带设置、门限设置、运行时间设置和通道设置控制系统运行。

(3) 数据选择与存储功能。可处理实时数据及输入处理非

实时数据, 存储的数据包括星历文件存储, 卫星相关信息及定位结果的存储等。

(4) 算法选择功能。运行前可进行算法选择, 包括信号捕获算法, 码跟踪环路和载波跟踪环路和 PVT 位置解算算法选择, 并预留相关接口供进一步算法研究。

3.3 算法及定位结果精度实测分析

大量实测系统数据表明: 该系统的主要算法(包括 GPS 捕获、跟踪算法, 导航电文产生算法, 定位算法等)符合要求, 最终在 PDOP 值小于 4 的情况下, 定位精度约 15 m(95%), 基本满足实验需要, 如表 1 所示。其数据分布如图 4 所示。

表 1 定位结果精度实测分析

数据文件	时间段	标准值(水平)	数据总数	达到 95%的精度
PKUG0731 (北京大学)	2006/3/14 5:40:00~ 6:02:38	-2 168 585.767 4 386 560.678	1 354	10.0

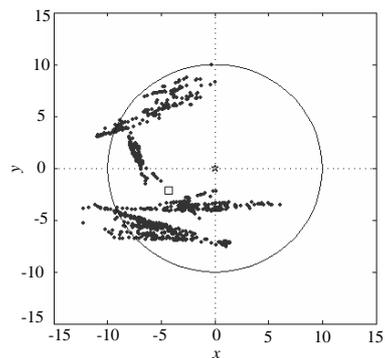


图 4 数据分布

4 结束语

实际测试表明, 采用软件接收机的方法进行算法研究和实验是方便可行的, 在开发中应注意各部分测试范围是否符合要求。分模块的开发原则方便了系统的开发, 且容易发现错误所在, 但本系统的定位精度有待提高。兼容软件接收机是接收机的发展方向, 各种导航系统(美国的 GPS、俄罗斯的 GLONASS、欧盟的 GALILEO 及区域导航系统)逐渐投入使用, 可以有效提高定位精度, 获得更好的服务, 本系统已初步考虑了兼容接收机, 并已实现 GALILEO 系统 BOC 信号处理, 为进一步研究兼容软件接收机奠定了基础。

参考文献

- [1] James B Y, Stockmaster M H, Akos D M. Block Adjustment of Synchronizing Signal(BASS) for Global Positioning System(GPS) Receiver Signal Processing[C]//Proc. of ION GPS Conference. Kansas City, MO, USA: [s. n.] 1997: 637-643.
- [2] Van D J, Coenen A J. New Fast GPS Acquisition Technique Using FFT[J]. Electronic Letters, 1991, 27(2): 158-160.
- [3] Jin S H, Lee J W, Jee G I, et al. GPS Signal Processing Algorithm for Software GPS Receiver[C]//Proceedings of ION GPS Conference. Salt Lake City, USA: [s. n.], 2000: 2338-2345.
- [4] Kent K D, Madhani R, Cloman C. A Complete IF Software GPS Receiver: A Tutorial About the Details[C]//Proc. of ION GPS Conference. Salt Lake City, USA: [s. n.], 2001: 4.
- [5] Ko S J, Won J H, Lee J S. FFT and PLL Based GPS Signal Processing for Software GPS Receiver[J]. 武汉大学学报: 英文版, 2003, 36(2): 719.
- [6] James B Y. Fundamentals of Global Positioning System receivers: a Software Approach[M]. New York, USA: Wiley, 2000.
- [7] Elliott D K. GPS 原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 1996.