

文章编号:1001-9081(2009)05-1452-04

高灵敏度 GPS 软件接收机开发平台

覃新贤^{1,2,3}, 韩承德¹, 谢应科¹

(1. 中国科学院 计算技术研究所, 北京 100190; 2. 广西大学 计算机与电子信息学院, 南宁 530001;

3. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

(xinxianqin@163.com)

摘要:介绍了 GPS 软件接收机开发平台的软、硬件结构,重点阐述了基于频域的捕获算法和基于时域的跟踪算法,对导航数据的解调、同步、卫星的星历获取、用户位置解算以及信号仿真模块等做了简单描述,并利用实测数据进行了验证。实验结果表明,开发平台的几何定位精度因子 PDOP = 2.3534,与传统的硬件接收机相当。开发平台还可以产生多颗卫星、不同中频频率、各种多普勒频移和不同 C/A 码相位的 GPS 仿真信号,用于对 GPS 软件接收机的捕获算法和跟踪算法进行研究和验证。目前采用的捕获算法可以捕获信噪比为 -37 dB 的微弱信号,相对于常规的 -19 dB 的信号门限,灵敏度提高了 18 dB。

关键词:全球定位系统;软件 GPS 接收机;捕获;跟踪环;多普勒频移

中图分类号: TP311.13 **文献标志码:**A

Research of high sensitive GPS software receiver developing platform

QIN Xin-xian^{1,2,3}, HAN Cheng-de¹, XIE Ying-ke¹

(1. Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China;

2. College of Computer Science and Electronic Information, Guangxi University, Nanning Guangxi 530001, China;

3. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: First, hardware and software architectures of the software GPS receiver developing platform were introduced, especially the frequency domain acquisition algorithm and time domain tracking algorithm were described in details. Furthermore, the demodulation and synchronization of navigation data, capture of the satellite ephemeris, position solution of the user and simulation of the GPS signal were presented. All of these modules had been validated through field test data. Test results show that the PDOP is 2.3534, which is as good as traditional hardware GPS receiver. The platform can also generate simulating signals of the GPS system including different satellite C/A code, different intermediate frequency, and different Doppler frequency shift, which can be used for validating acquisition algorithm and tracking algorithm of a software GPS receiver. All the satellite signals can be acquired when SNR is -37dB in this platform, which means that the sensitivity has been improved remarkably over traditional hardware GPS receiver.

Key words: Global Positioning System (GPS); software GPS receiver; acquisition; tracking loop; Doppler frequency shift

0 引言

以软件无线电为核心的 GPS 软件接收机技术是目前卫星导航技术的研究热点和发展方向^[1]。GPS 软件接收机与传统的硬件接收机相比,基带信号处理和运算都在可编程的微处理器中实现,具有高度的灵活性和适应性。随着美国 GPS 全球定位系统现代化的进程,GPS 信号将增加新的载波频率 L5、L2C、L3 等波段的信号,欧洲的 Galileo 系统也即将投入运行,我国的“北斗 2”卫星导航系统也在紧锣密鼓的部署之中,接收新信号和适应多系统的需求迫切要求接收机具有更高的适应性,而只有软件接收机才能应对这些挑战。

在软件 GPS 接收机中包含了一个 RF 前端模块,该模块由天线单元、低噪声放大器、带通滤波器、ADC 变换器和一些 RF 集成电路(RFIC)组成。除此之外,其余全部的基带信号处理功能均由软件完成^[2]。基带信号处理包括:卫星信号的捕获、跟踪解调、伪距计算和位置解算。捕获过程利用具有快

速算法的 FFT 在频域内完成。跟踪环模拟传统 GPS 接收机的跟踪环路,在时域内完成,包括载波跟踪环和 C/A 码延时锁相环(Delay Loop Lock, DLL)。C/A 码跟踪环路的瞬时相输出,就是解调后的导航数据。经过比特同步和帧同步,可以从导航数据中提取出卫星的星历,从而计算出伪距,最后通过最小二乘法计算出接收机用户的位置坐标。在我们的开发平台中,完整地实现了 GPS 软件接收机的全部功能。所有的基带处理软件全部由 Matlab 语言完成。Matlab 具有代码简洁、编程效率高等特点,同时具有丰富的图形输出,非常适合对算法的验证和新算法的调试,而且也很容易将验证后的算法转化为 C、C++ 等高级语言。本文对开发平台的各个模块尤其是频域捕获技术和时域跟踪技术进行简单介绍,同时,给出了实测数据的处理结果。

1 系统硬件和数据采集

整个 GPS 软件接收机开发平台的系统结构如图 1 所示。

收稿日期:2008-11-27;修回日期:2009-02-23。 基金项目:国家 973 计划项目(2004CB318202)。

作者简介:覃新贤(1963-),男,广西人,工程师,博士研究生,主要研究方向:卫星导航基带信号处理算法、无线通信系统、嵌入式技术;韩承德(1940-),男,上海人,研究员,博士生导师,主要研究方向:计算机系统设计、空间环境计算机系统结构、并行处理、嵌入式系统;谢应科(1971-),男,江西人,副研究员,主要研究方向:空间环境计算机系统结构、高速网络应用、嵌入式技术。

其硬件包括三个部分:RF射频前端、数字I/O采集卡和PC桌面系统。

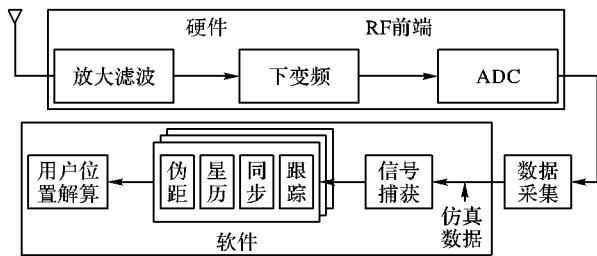


图1 软件接收机开发平台结构

RF射频前端:采用Zarlink公司生产的GPS接收机专用RF前端芯片GP2015。该器件单片集成了完整的接收机链路,包括LNA、混频器、VCO、N分频频率合成器以及2 bit ADC。GP2015输出经过2 bit量化后的数字中频信号。参数为:中频频率 $f_{IF} = 4.309\text{ MHz}$, GPS C/A码的信号带宽为 $B = 2.046\text{ MHz}$ 。输出的采样频率 $f_s = 5.714\text{ MHz}$ 。

数字I/O采集卡:由于RF前端输出的是数字中频信号,采用PCI-7300A数字I/O采集卡将前端接收到卫星信号采集到PC的存储器。采集卡的输入频率可达80 MBps,具有32个输入通道,支持DMA方式和双缓冲区结构,提供同步和异步输入。在这里,我们采用同步输入方式,利用RF前端输出的采样时钟 $f_s = 5.714\text{ MHz}$ 作为输入的同步时钟,保证输入的采样频率为5.714 MHz。

PC桌面系统:CPU Pentium IV 3.0 GHz,开发平台目前提供后处理方式,今后可逐步开发提供实时方式。在后处理方式中,为了能正确解算出位置,必须能够完整存储3个子帧的数据,因此选择内存为2 GHz。

2 软件结构

根据系统的设计需要,接收机工作在多个通道(进程)模式,每个通道接收相同的IF中频数据流,分别完成卫星信号捕获、跟踪、比特同步和帧同步,将各个通道收到的卫星导航信息分别解调出来,最后由导航解算模块综合处理各个通道的输出结果,计算出当前的位置坐标、速度、时间等导航信息。软件GPS接收机的总体软件结构如图2所示^[3]。

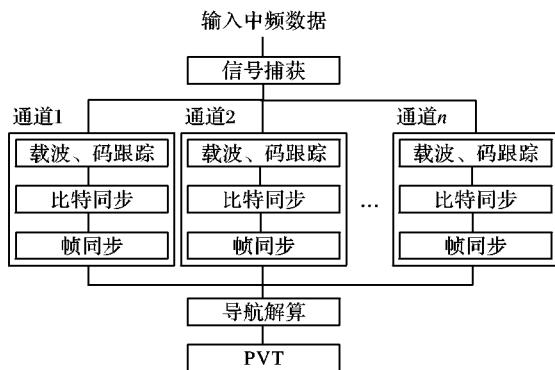


图2 软件GPS接收机的总体软件结构

3 GPS信号的频域并行捕获

信号捕获实际上需要进行三维的搜索。第一维是信号的载波频率,这里是已经数字化后的中频频率。由于卫星的绕轨飞行和GPS接收机载体的移动,会引起多普勒频移。尽管中频频率的标称值是确定的,由于多普勒频移以及收发时钟误差,都会产生中频频率的不确定性。根据多普勒频移公式

以及GPS卫星的飞行线速度(由GPS的轨道周期确定),可以计算出低速或静止的GPS接收机多普勒频移 Δf 范围为 $\pm 5\text{ kHz}$ 。高动态的GPS接收机(如超音速飞机),其多普勒频移 Δf 范围为 $\pm 10\text{ kHz}$ ^[4]。如果以步长为500 Hz来搜索,那么频率的搜索点数为41点。第二维是PRN伪码(C/A码)的起始相位。只有本地C/A码的起始相位和接收信号的相位完全对齐,才能彻底地将C/A码从信号中完全剥离。另外,该起始相位也是C/A码从卫星传输到接收机的传输延时,也是伪距测量的关键参数。由于C/A码的长度是1 023 chip,而C/A码的相关函数在偏离最大值的1/2 chip后,会迅速下降,通常,C/A码相位的捕获精度为1/2 chip。码的长度为1 023 chip,所以码相位必须搜索2 046个相位的位置。第三维是卫星的C/A码本身。GPS采用CDMA扩频调制技术,每颗卫星具有不同的C/A码。当接收机进行捕获时,如果没有任何的先验参数,如:粗略的时间、位置参数或者过去的卫星星历等,那么,接收机必须搜寻所有可能的32颗卫星的C/A码,以确定当前能收到的具体卫星信号。通常,该维搜索不是必须的,因为就算是过时的星历或者历书,也是很有价值的参数。因此,一般的捕获过程都通常只需要考虑二维的搜索。

捕获是基于C/A码的自相关特性来进行的,也就是说,接收机的捕获是以信号的相关运算为基础。常规GPS接收机的捕获算法,大多是采用串行的搜索方法,遍历所有的频率点,搜索2 046个可能的相关延迟位置,依次计算接收到的C/A码和本地C/A码的相关值,然后找出最大值,则最大值对应的延迟位置就是接收到的C/A码的相位。可以看出,这样的搜索算法很耗时。软件接收机采用并行搜索算法,也就是利用相关运算和循环卷积的关系,通过频域的方法来计算信号的相关函数。由于可以采用FFT运算,运算速度快,而且通过单次的运算就可以同时(并行)将所有的相关函数值计算出来。本文所采用的相关器就是基于FFT/IFFT的相关器^[5],其捕获原理如图3所示。

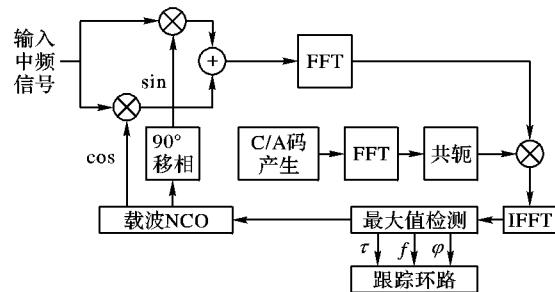


图3 频域捕获原理

捕获通过检测相关器输出信号的功率大小来决定信号是否存在。只有当输入信号的载波频率和码相位与本地产生的载波频率和码相位完全对齐时,相关运算输出最大的峰值。通过检测相关输出峰值是否超过预定的阈值就可以判断对应的卫星信号是否存在。

捕获算法在基带处理中占据很重要的位置,只有正确捕获到信号中存在的卫星信号,才能进行更进一步地处理。由于捕获对噪声比跟踪环更敏感^[6](15 dB以上),因此捕获的成功与否对系统灵敏度关系重大。

捕获算法的关键因素有:捕获空间、门限准则以及搜索策略^[3]。

图5为对实际接收的北京某地区GPS信号的漫天搜索(冷启动)捕获结果。

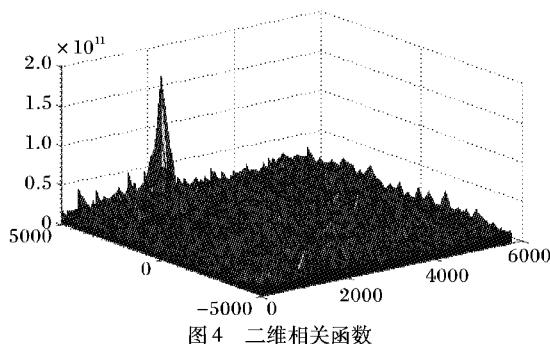


图 4 二维相关函数

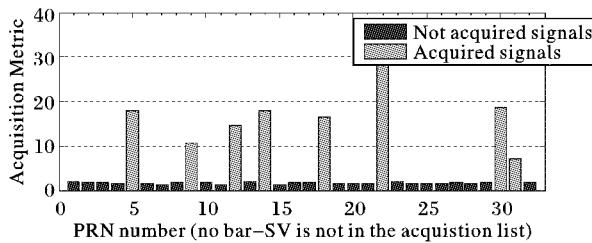


图 5 北京某地区 GPS 信号捕获结果

4 跟踪环路

经过捕获模块,得到了所有可视卫星信号的载波频率和码相位的粗略估值。但是,由于卫星的在轨运动和接收机载体的移动,载波的多普勒频移和码相位是时间的函数,必须通过跟踪环来实时地跟踪载波和码相位的变化。跟踪环的另一个重要的作用就是,跟踪的结果会解调出导航数据,而且跟踪得到的码相位还被用于计算伪距。

跟踪环包含两个环路:载波跟踪环和码相位跟踪环。

4.1 载波跟踪环

载波跟踪环用来精确跟踪输入信号的载波,并将载波从输入信号中剔除,完成载波剥离^[7],一般采用 PLL 环路。用于载波跟踪的方法有很多,常用的有平方环、科思塔斯(Costas)环等。由于经过捕获后的信号仍然包含有调制数据,而 Costas 环对同相和正交相的调制数据不敏感,因此,本文采用 Costas 环。

Costas 环结构如图 6 所示。输入的 BPSK 信号分别与本地 NCO 产生的两路参考信号(同相分量和相移 90° 后的正交分量)相乘,两个相乘器的输出经低通滤波器后,再形成鉴相器,其结果经环路滤波器后驱动载波 NCO,跟踪输入的载波变化,与此同时,同相支路的低通滤波器输出便是需要的数据信息。相比于平方环,Costas 环实现起来更加简单。而且 Costas 环最重要的性质在于 Costas 鉴别器与在接收机预检测积分区中相对于接收机的自然时钟相位而言,具有很强的相位调节能力。

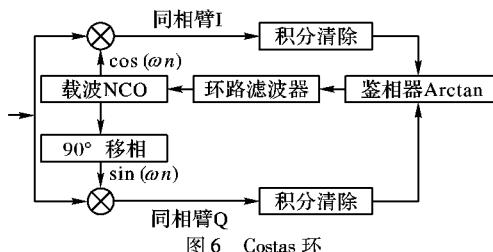


图 6 Costas 环

Costas 环的基本工作原理如下。

同相端(I 路)的解调运算:

$$D(n) \cos(\omega_{IF}n) \cos(\omega_{IF} + \varphi) = \frac{1}{2} D(n) \cos(\varphi) + \frac{1}{2} D(n) \cos(2\omega_{IF}n + \varphi)$$

正交端(Q 路)的解调运算:

$$D(n) \cos(\omega_{IF}n) \sin(\omega_{IF} + \varphi) = \frac{1}{2} D(n) \sin(\varphi) + \frac{1}{2} D(n) \sin(2\omega_{IF}n + \varphi)$$

同相端(I 路)输出:

$$I = \frac{1}{2} D(n) \cos(\varphi) \quad (1)$$

正交端(Q 路)输出:

$$Q = \frac{1}{2} D(n) \sin(\varphi) \quad (2)$$

最后,相位误差:

$$\frac{Q}{I} = \frac{\frac{1}{2} D(n) \sin(\varphi)}{\frac{1}{2} D(n) \cos(\varphi)} = \tan(\varphi) \quad (3)$$

$$\varphi = \tan^{-1}(Q/I) \quad (4)$$

可以看出,相位差与导航调制数据 $D(n)$ 无关。

4.2 C/A 码跟踪环路

当捕获过程捕获到 GPS 卫星信号后,收、发伪随机 C/A 码相位差在半个码元之内,从而转入跟踪状态。C/A 码跟踪环路通常采用超前、滞后结构形式的延迟锁相环(DLL)作为码跟踪环。这种跟踪环的鉴相器采用了三个独立的相关器:超前码(早码)相关器、滞后码(晚码)相关器和即时码相关器,然后对相关器的输出进行适当的运算实现鉴相函数^[8-9]。 DLL 延迟锁相环原理框图如图 7 所示(这里只画出同相支路)。

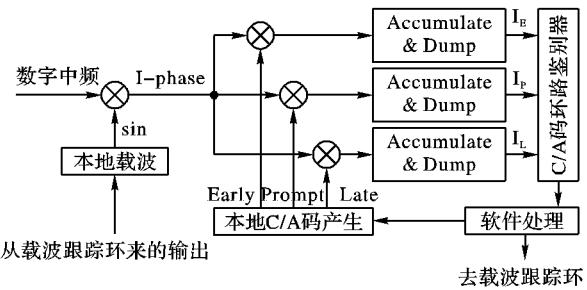


图 7 码跟踪环 DLL

输入信号分成三路:一路同超前本地参考码(早码)相关;一路同滞后本地参考码(晚码)相关;另一路与即时码相关。相关结果再经过积分(低通滤波)、加减运算完成鉴相,使得鉴别器的输出为 $I_E - I_L$, 鉴相为奇对称的曲线。如图 8 所示。

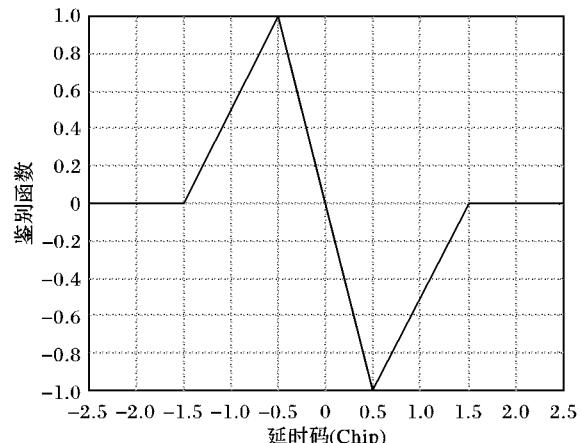


图 8 DLL 鉴相函数(S 曲线)

当环路处于跟踪锁定状态时,码跟踪环的同相瞬时输出,就是卫星的导航数据流输出,如图9所示。该数据流经过简单的判决处理就很容易得到二进制码流。

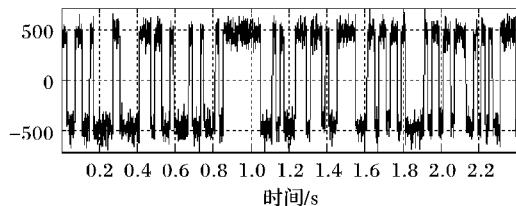


图9 北京某地区GPS信号(PRN#22)卫星跟踪结果

5 导航数据解调和帧处理

导航数据的解调,是将数据从接收信号中分离、提取出来的过程。这个过程包括:数据解调、位同步、帧同步、校验等。

当C/A码跟踪环路锁定后,从同相臂的瞬时支路就可以解调出包含完整数据的二进制码流。这个二进制码流就是最原始的卫星导航数据。根据帧同步头的特殊标志,加上子帧的长度校验和子帧的奇偶校验,就可以完成帧同步过程。

帧同步完成后,按照GPS文档的要求就可以从中提取出1、2、3子帧包含的卫星星历数据。

6 卫星位置计算和用户位置解算

根据卫星星历数据,可以得到各颗卫星的轨道根数和摄动参数,利用开普勒方程,就可以计算出卫星的坐标^[4,10]。

图10为北京某地区以观测点为中心,当时能检测到的GPS卫星星座分布图。

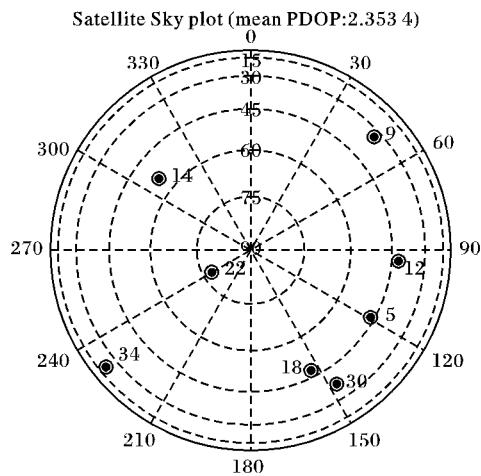


图10 北京某地区以观测点为中心的GPS卫星星座

一旦获得4颗以上卫星的坐标数据,就可以根据三角测量原理,利用最小二乘法或者线性迭代法解算出用户当前的位置坐标^[10]。

由GPS系统得到的坐标数据是以世界大地坐标系(WGS84)为参考,该坐标系是地心地固(Earth-Centered Earth-Fixed, ECEF)的直角坐标系,必须转换成本地坐标系以便于对定位精度等方面进行进一步的研究。图11为北京某地区根据实际接收的36秒GPS信号数据计算的坐标数据在UTM坐标系下的分布。

7 仿真信号产生

在软件接收机的开发和研究当中,仿真信号的产生非常重要。因为模拟的卫星信号可以具有真实信号所没有的优点,可以控制所有的信号参数,根据需要可选择卫星的PRN

号,产生相应的C/A码,选择C/A码的相位偏移,选择所需要的中频频率,选择多普勒频移等,更重要的是,可以控制GPS卫星模拟信号的信噪比,这对研究算法的捕获灵敏度非常重要。实测的GPS信号不可能精确地控制信号的信噪比。根据GPS系统C/A码的原理,其产生流程如图12所示,产生的仿真信号输出如图13所示。

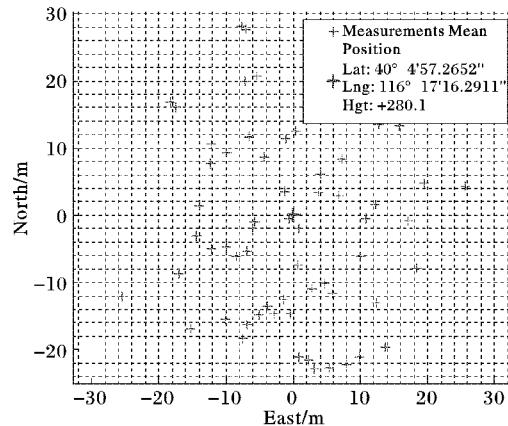


图11 北京某地区根据实际接收的36秒GPS信号数据计算经纬度

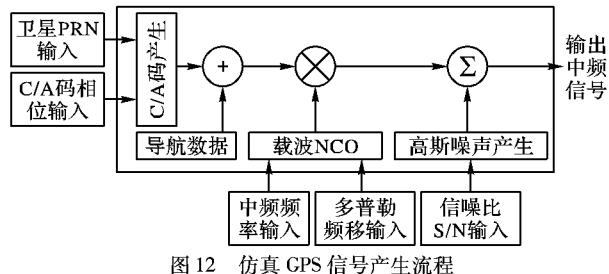


图12 仿真GPS信号产生流程

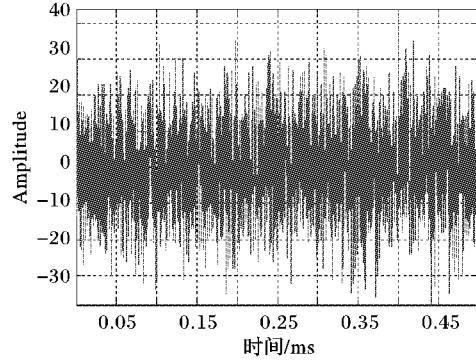


图13 仿真中频GPS信号时域波形

8 结语

本文所设计的开发平台现在可以接收实际的GPS信号,以后处理的方式完成软件接收机的全部功能,如图10、11所示,其定位的精度较高,几何精度因子 $PDOP = 2.3534$,与传统的硬件接收机相当。也可以产生仿真的GPS信号,对软件接收机的捕获算法和跟踪算法进行验证。通过改进捕获算法,可以提高系统的灵敏度。目前,我们采用的高灵敏度捕获算法可以捕获信噪比为-37 dB的微弱信号,相对于常规的-19 dB的信号门限,提高了灵敏度18 dB。

为了实现实时软件接收机的功能,可以在实时操作系统如Linux下,采用多线程(多进程)技术来实现多个并行跟踪通道,完成实时跟踪、解算功能。由于软件接收机中没有专门进行相关运算的硬件部件,即使利用FFT进行相关运算,其

(下转第1460页)

方式加以整合,同时采用 JBoss jBPM 工作流引擎实现知识获取过程的流程化管理,并使用 JESS 规则引擎实现 OWL 的规则推理。

在数据访问层,采用 Hibernate 框架对关系数据库进行访问,以隐藏不同数据库访问的差异性。

资源层采用数据库与文件系统相结合的方式存储知识以及其元数据,提高访问效率。

在应用层采用 Web Portal 技术实现统一的用户界面环境。用户可以根据自己的权限及需求配置自己的操作界面,从而满足个性化交互需求,增强用户体验,图 9 所示的是基于 Portal 开发的经验反馈知识获取的 Web 界面,用户可从“个人工作列表”获取当前的经验反馈工作流任务,启动任务后切换到“经验反馈建模”界面,通过拖拽的方式构建概念图模型,通过“经验知识查询”,可为其当前的工作提供经验支持。

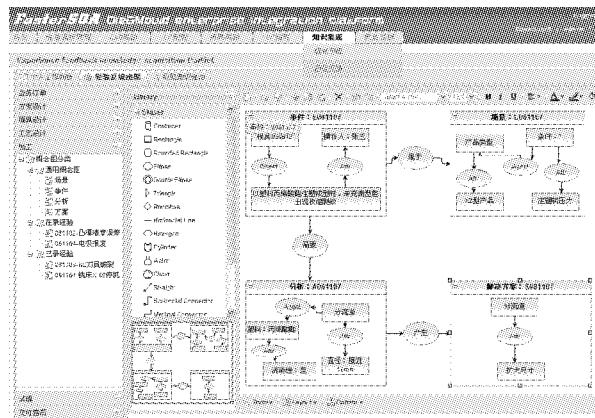


图 9 经验反馈用户操作界面

5 结语

本文提出了一种基于经验反馈模型的知识获取框架,结合本体技术和面向服务架构思想,以概念图的方式获取经验知识,并采用 OWL 语言进行统一的描述与表达,实现了符合实际业务流程的知识获取方案。该框架能帮助模具企业在较

(上接第 1455 页)

运算量也是相当可观的,因此快速、高效算法是软件接收机的核心。如何进一步减少 FFT 的运算次数从而减少运算量,同时利用 X86 系统的多媒体加速指令来实现接收机的并行加速引擎,是我们下一步工作的重点,也是目前 GPS 软件接收机信号处理的重点课题之一。

参考文献:

- [1] WON J-H, PANY T, GUNTER W H. GNSS software defined radio real receiver or just a tool for experts? [J]. Inside GNSS, 2006 (7/8): 48 - 56.
- [2] SHARAWI M S, KORNIYENKO O V. Software defined radios: A software GPS receiver example [C]// IEEE/ACS International Conference on Computer Systems and Applications: AICCSA '07. Washington, DC: IEEE Press, 2007: 562 - 565.
- [3] KENT K, PREMAL M, CHAD C. A complete if software GPS receiver: A tutorial about the details [C]// Proceedings of the 14th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation ION GPS 2001. Salt Lake City: Salt Palace Convention Center, 2001: 789 - 829.
- [4] TSUI J B Y. Fundamentals of global positioning system receivers: A software approach [M]. 2nd ed. New York: Wiley Series, 2004: 34

为薄弱的信息化基础和较少的人力和成本投入的情况下,快速构建知识管理系统,为设计、工艺、修改模等经验性强、知识密集等环节提供智力支持,并有效积累和保护企业知识资源。由于历史原因,较多的知识存在于非结构化的文档中(如 Word, PDF 等),从自然语言文本中提取知识,能极大提高知识获取的效率,因此经验反馈过程中自动化的非结构化文本文档本体构建技术有待于进一步研究。

志谢 感谢 JGraph 公司的 David Benson 为本项目提供了 mxGraph 的教育版许可。

参考文献:

- [1] 凌玲. 基于本体论的知识集成方法的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [2] 车君华. 机械产品设计过程知识获取与处理技术及其在叉车行业应用研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [3] HUANG NING, DIAO SHI-HAN. Ontology-based enterprise knowledge integration [J]. Robotics and Computer-integrated Manufacturing, 2008, 24(4): 562 - 571.
- [4] 倪益华, 顾新建, 吴昭同. 知识集成的本体理论和框架研究 [J]. 中国机械工程, 2004, 15(21): 1954 - 1957.
- [5] KINGSTON J K C. Designing knowledge based systems: the CommonKADS design model [J]. Knowledge-based Systems, 1998, 11 (5/6): 311 - 319.
- [6] FOUGUEM B K, COUTERT T, BELER C, et al. Knowledge formalization in experience feedback processes: An Ontology-based approach [J]. Computers in Industry, 2008, 59(7): 694 - 710.
- [7] PANETTO H, MOLINA A. Enterprise integration and interoperability in manufacturing systems: Trends and issues [J]. Computers in Industry, 2008, 59(7): 641 - 646.
- [8] GRUBER. A translation approach to portable Ontology specifications [J]. Knowledge Acquisition, 1993, 5(2): 199 - 220.
- [9] STUDER R, BENJAMINS V R, FENSEL D. Knowledge Engineering, Principles and Methods [J]. Data and Knowledge Engineering, 1998, 25(1/2): 161 - 197.
- [10] 宋炜, 张铭. 语义网简明教程 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.

-67.

- [5] AKOPIAN D. Fast FFT based GPS satellite acquisition methods [J]. IEEE Proceedings Radar Sonar Navigation, 2005, 152(4): 277 - 286.
- [6] LEDVINA B M, PSIAKI M L, POWELL S P, et al. Bit-wise parallel algorithms for efficient software correlation applied to a GPS software receiver [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2004, 3(5): 1469 - 1473.
- [7] AKOS D M, NORMARK P L, ENGE P, et al. Real-time GPS software radio receiver [C]// Proceedings of the Institute of Navigation National Technical Meeting, 2001: 809 - 816.
- [8] LEDVINA B M, PSIAKI M L, POWELL S P, et al. A 12-channel real-time GPS L1 software receiver [C]// Proceedings of the Institute of Navigation National Technical Meeting, 2003: 767 - 782.
- [9] LIN D M, TSUI J B Y. A software GPS receiver for weak signals [C]// 2001 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Washington, DC: IEEE Press, 2001, 3: 2139 - 2142.
- [10] BORRE K, AKOS D M, BERTELSEN N. A software-defined GPS and galileo receiver: A single-frequency approach [M]. Boston: Birkhäuser, 2006.