基于数据文件读取的 GPS 信号模拟技术

单庆晓 陈建云 钟小鹏 杨 俊

(国防科技大学机电工程与自动化学院仪器科学与技术系, 长沙 410073)

摘 要: 介绍了一种基于数据文件读取的 GPS 信号模拟技术。采用专门的软件系统产生包含 GPS 电文和观测数据的数据文件, 再作为文件存储在 SD 卡上。仿真时读取导航电文和相应的伪距, 同时产生多星的伪码, 实现导航电文的调制。伪距的延迟通过数字延迟滤波器实现。最后通过正交调制的方法得到 GPS 射频信号。当数据文件改变时, GPS 模拟信号也随之改变。信号处理的主要功能由一片 FPGA 实现。所有的信号模拟功能均集成在一块电路板上。该信号模拟器可以满足部分 GPS 接收机的测试需求。

关键词: GPS 信号模拟; 数据文件; FPGA

中图分类号: P127.1 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 510.99

GPS simulation based on reading data file

Shan Qingxiao Chen Jianyun Zhong Xiaopeng Yang Jun

(School of Mechatronics and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: This paper proposes GPS simulation based on reading data file. The data file including GPS NAV data and pseudo-range data is generated by special software. After the data file is generated, it is stored in SD card. While the simulation is carried out, varied SV pseudo number are generated, GPS NAV data and pseudo-range data are read, so NAV data is modulated. The pseudo-range delay is realized by cascaded digital delay filter. At last, the simulated signal is modulated to 1575MHz. The simulated GPS signal is determined by data file. All simulation function is integrated on a single FPGA board. The prototype can meet the test requirement of some GPS receivers.

Keywords: GPS RF signal simulate; FPGA; data file

1 引 言

GPS 信号模拟源在 GPS 接收机研发生产和测试中具有重要的作用。见诸文献的最早的卫星导航信号仿真系统是 1977 年报道的 Texas Instruments 公司开发的 GPS 模拟器[1]。从那时开始, 伴随着 GPS 卫星星座的建立、GPS 体制的更新、GLONASS 系统的出现, 卫星导航信号精密模拟源也从单通道发展到多通道, 模拟合成发展到数字合成, 从中频数字合成发展到基带数字合成, 由单一系统仿真发展到多系统混合仿真, 由专用向通用方向发展, 由系统仿真向片上(onchip)仿真发展[2]。

第一代卫星导航信号模拟器以模拟技术为主, 采用射频合成的技术方案, 即把每颗星的信号独立调制到射频然后进行合成[3]。随着数字技术的发展, 以及对模拟器信号精度和通道一致性要求的提高, 导航信号模拟器开始应用数字技术, 并在中频进行模拟信号合成。目前国外市场上最新的 GPS 仿真系统均不同程度地采用了大规模 DSP/FPGA 技术, 在数字域进行直接信号合成, 把多颗卫星的数字合成信号用一个射频通道输出, 以提高其信号精度和通道间的一致性。英国、美国、瑞典、挪威、德国等, 都已经有比较成熟的产品[4-5]。其中, Spirent 公司、Aeroflex 公司等公司生产的 GPS 模拟器最具代表性。

GPS 信号模拟器目前主要用于 GPS 接收机的生

本文于 2008 年 9 月收到。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

产厂家和研究单位。对于大多数需求单位而言, 对于信号模拟的要求并不高, 需要一种能产生固定的 GPS 射频信号的设备, 在这个固定的模拟信号里, 星座已知, 用户轨迹已知, 不需要长时间连续运行。然而市场上的 GPS 信号模拟器功能全面, 可设置卫星的星座、电离层参数、用户轨迹可设置。需要采用上位机+下位机结构, 结构复杂, 导致 GPS 信号模拟源价格昂贵, 不能为厂家接受。

文献[6]提出了一种嵌入式的 GPS 模拟信号源的结构, 采用 ARM 作为控制单元, 原始电文保存在 ARM 存储器中, 采用 FPGA 用于伪码产生和扩频处理, 采用 AD9854 作为 DDS 芯片。文献[7]提出了一种十二通道 GPS 信号模拟器方案, 采用了 PC 机+PCI 板卡技术, 采用双口 RAM 作为 PC 机和 DSP 的数据缓冲区, DSP 实现参数读入, 产生 C/A 码并扩频调制。码延迟、数字载波调制及数字增益控制由 FPGA 控制。这些方法都采用了上位机+下位机的实现方式。

提出了一种简易的 GPS 信号模拟方法, 将 GPS 导航电文和观测数据按一定的格式存储为文件, 通过读取文件产生 GPS 信号。在单片 FPGA 上实现了 GPS 信号基带处理的所有过程, 采用正交射频调制方法直接产生 L1 频点信号。采用不同的文件实现不同的测试场景, 利用该方法构建的 GPS 信号模拟源成本低、体积小, 可满足大部分 GPS 接收机的测试需求。

2 GPS 信号模拟源的系统设计指标

根据厂家的需求, 确定 GPS 信号模拟源的技术指标如下:

仿真卫星总星数: 12 颗

连续输出模拟信号时间: 2 h

伪距控制精度: 0.027 m

伪距变化率精度: 优于 0.05 m/s

用户动态范围: 速度: 0~5 000 m/s; 速度分辨率: 10 mm/s

通道间一致性: <1 m(码) <0.005 m(载波)

载波与伪码相干性: <1 度(包含随机抖动和不确定性)

I、Q 相位正交性: <1°

3 GPS 信号模拟源的总体方案

由于只需产生固定场景的 GPS 信号, 因此 GPS 导航电文是固定的, 采用离线产生即可。此外还需要观测数据文件, 观测数据主要描述了伪距的变化情况, 模拟器根据观测数据文件对导航电文进行处理。为了描述伪距的连续变化, 观测数据中还包含了伪距的一阶、二阶变化率, 这样通过插值就可获得高密度的伪距变化值。

真实的 GPS 卫星射频信号产生流程如下: 伪码发生器产生 1.023 MHz 的 C/A 伪随机码, GPS 的导航电文速率为 50 bps, 导航电文首先与该 C/A 码叠加, 产生了基带信号; 在 GPS 卫星上, 基带信号被调制到 L1 载频, 然后通过天线释放。接收机接收到的射频信号与卫星发送的射频信号对比, 其接收到的信号是经过传输延迟的信号; 此外由于卫星的运动, 卫星与接收机之间具有相对运动, 由于多普勒效应, 接收机接收到的射频信号频率产生了变化。

射频信号模拟过程中关键的环节就是模拟信号的传输延迟和多普勒效应。其传输延迟用伪距来表示, 考虑到伪距的连续性, 观测数据中包含伪距的速度、加速度, 利用差补的方法可获得高精度的连续的伪距变化。获得采用延迟滤波器的方法实现基带信号的延迟, 采用多阶数字滤波器的方法, 利用高性能数字信号处理芯片实现, 可获得精度为 ns 级的延迟精度; 同样采用数字信号处理的方法对基带信号实现多普勒处理, 可获得 1 Hz 的频率分辨率。

单颗 GPS 卫星信号仿真流程如图 3 所示, 数学仿真产生的观测数据包括伪距和一阶、二阶量。数学仿真产生的导航电文以 50 bps 的速率被 I 路伪码调制。调制后的信号则为数字基带信号, 该信号经过多阶延迟滤波器进行延迟处理, 模拟 GPS 信号在空间的传递时间; 经过基带处理的信号通过正交调制变为 L1 载频的信号。

真实的多颗 GPS 卫星信号在空间合成, 而模拟的 GPS 卫星信号在数字域实现叠加合成。采用地址发生器产生 12 颗卫星的特征码, 分别与对应的导航电文进行叠加, 合成的基带信号通过正交射频调制, 调制为 L1 频点 1.575 GHz 的射频信号。

而 GPS 卫星信号模拟源采用图 2 所示方案。采用 SD 卡存储导航电文和观测数据文件。在系统工作时, FPGA 读取 SD 卡的数据, 按图 1 所示的流程产生

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

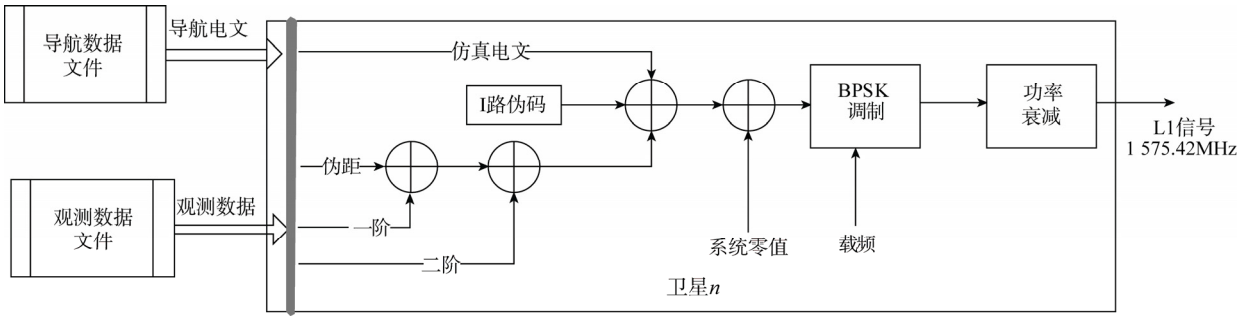

图 1　单颗 GPS 卫星的信号模拟流程
Fig. 1　Simulation procedure of single SV signal

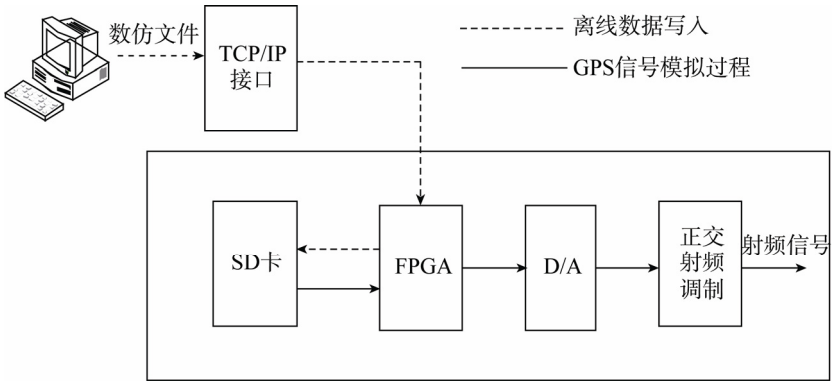

图 2　GPS 卫星信号模拟源系统方案
Fig. 2　Scheme of GPS signal simulation

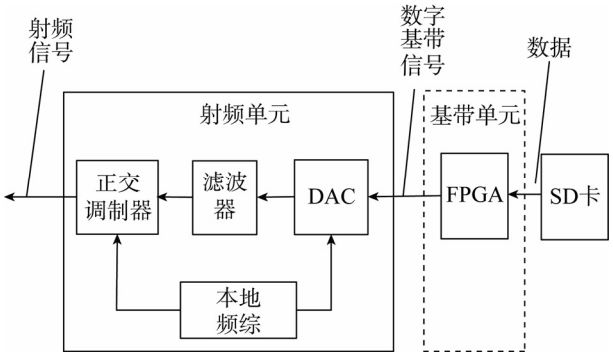

图 3　GPS 信号仿真模块电路原理框图
Fig. 3　Block diagram of GPS simulation hardware

卫星的基带信号, 多颗星的基带信号经数字合成后, 送至 DA 变为模拟信号, 再进行正交射频调制获得 L1 频点的射频信号。

当系统需要更新数仿文件时, 则通过 TCP/IP 接口对 SD 卡进行读写操作, 实现 SD 卡中的文件更新。

4　数据文件格式

GPS 信号模拟的目的是使 GPS 接收机通过接收模拟的信号正常工作, 实现定位解算。而 GPS 信号是由多颗不断运行的 GPS 卫星实时发射产生的。为了实现 GPS 信号模拟, 首先需要设定用户轨迹、建立 GPS 卫星轨道模型和信号传输模型, 运算量较大。因此采用离线运算的方法, 先在高性能计算机上进行仿真计算, 再将计算得到文件保存下来。GPS 模拟器通过读取该文件, 实现 GPS 信号的仿真。这种方法的好处在于为模拟器节省了大量的资源, 有利于降低成本和体积。

为了让接收机实现定位, 必须要提供 4 颗以上的 GPS 卫星信号; 仿真了 12 颗 GPS 卫星的数据, 仿真数据主要包括导航电文和观测数据。导航电文格式为 300 bit, 占 40 字节, 剩余 20 bit 空; 观测数据则根据设定的位置和卫星星历产生, 模拟固定位置接收机产生的伪距变换, 20 ms 更新一次, 为了实现伪距的连续变化, 观测数据中还包含伪距速度和加速度, 便于信号产生过程中的插值。

GPS 导航电文速率为 50 bps, 300 bit 为一子帧, 一子帧为 6 s。一帧包含 5 子帧, 共 1 500 bit, 历时 30 s。一超帧则包含 25 帧, 37.5 k, 历时 12.5 min。由于

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

GPS 电文每两小时更新一次, 则 2 h 需存储的导航电文约为 375 k; 12 颗星的导航电文为 4.5 M。

观测数据则为 20 ms 更新一次, 单颗星的观测数据为 40 个字节, 一个观测数据包有 12 颗星, 共 4 288 bit; 则 2 h 的数据量为 4 288×50×7 200=1 543 680 000 bit, 约 1.5 G。因此, 采用 2 G 的 SD 卡可完成上述数据容量的要求。

5 硬件设计

GPS 信号模拟源的设计采用高速基带数字合成技术和正交中频、射频调制技术。多颗卫星信号以数字形式在高性能软件无线电处理平台上计算并合成, 有效提高系统通道间的一致性, 消除了卫星通道间的误差, 也消除了内部时间误差, 确保了高精度。该方案与射频合成方案相比增加了软件无线电数字部分设计的难度, 使得伪距控制精度、多普勒变化和幅度等均在数字部分计算, 简化了射频设计,避免了由射频群时延不一致产生的通道间误差和卫星间的钟差, 且数值计算、钟差可控, 有效保证了系统的设计指标。信号模拟源方案原理如图 4 所示。GPS 信号模拟源采用基带加射频的单元模块化结构设计。

表 1 GPS 导航电文数据格式
Table 1 GPS NAV data format

内容	字节数	格式	备注
基准时间	8	无符号整数	UTC 时间, 以 ms 为单位
卫星编号	8	无符号整数	对应数据位为 1: 导航星可见; 为 0: 导航星不可见; 最低位代表 0 号星
卫星 1 I	40	无符号整数	300 bit 位置顺序与导航电文一致, 低位对齐, 高 20 bit 空, 格式为电文广播格式
卫星 2 I	40	无符号整数	…
⋮	⋮	⋮	⋮
卫星 12	40	无符号整数	…

表 2 观测数据格式
Table 2 Observation data format

内容		字节数	格式	备注
基准时间		8	无符号整数	UTC 时间, 以 ms 为单位
卫星 1	星号	4	无符号整数	星号从 1 开始排, 0 表示该星不可见
	L1 频点	40		见表 3 单频点观测数据包格式
		○○○○○○○		
卫星 12	星号	4	无符号整数	星号从 1 开始排, 0 表示该星不可见
	L1 频点	40		见表 3 单频点观测数据包格式

表 3 单颗星观测数据包格式
Table 3 Observation data format of single SV

内容	字节数	格式
伪距 $\tilde{\kappa}_0$ /ps	8	双精度无符号整数
伪距速度 $\tilde{\kappa}_1$ /ps·s^{-1}	4	无符号整数
伪距加速度 $\tilde{\kappa}_2$ /ps·s^{-2}	4	无符号整数
信号功率 P/dBm×10^{-1}	4	有符号整数

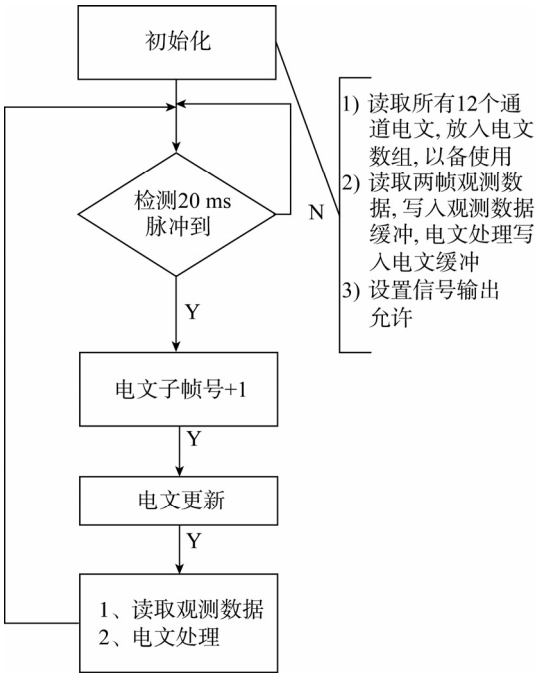

图 4 GPS 信号仿真模块软件流程
Fig. 4 Software flow of GPS signal simulation

GPS 信号模拟算法对数据处理率有较高的要求, 然而通过分析延时算法, 这样庞大的计算量实际上只是简单的乘累加(MAC) 的流水操作, 其算法结构中并无复杂的数学运算(如正余弦、指数、对数等) , 可以说其运算结构是相对比较简单的, 所以考虑采用 FPGA 芯片。而目前 FPGA 的功能也日益增强, 内嵌于 FPGA 的硬核与基本逻辑构建的软核也不断增强了 FPGA 作为通用信号处理芯片的能力。通过综合考虑, 最终选择了用 XILINX 公司的 XC4VSX35 作为主处理芯片。该芯片是 XILINX 公司 2005 推出

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的一款专门为数字信号处理而设计的高端FPGA, 其可编程数字信号处理模块 XtremeDSP48 在–12 的速度等级上最高性能为 500 MHz。

基带单元设计采用 1 片 Xilinx 高性能 FPGA XC4VSX35 来完成。XC4VSX35 主要完成以下任务: 1) 从 SD 卡读入导航电文和观测数据; 2) 多星数据的分配; 3) 多星信号的精密延迟和动态特性控制; 4) 多星信号的数字合成。设计上可完成 12 颗星 I 路的导航信号产生。

6　软件设计

系统上电后首先读取所有 12 通道的电文数据, 由于GPS电文为2小时更新一次。一个超帧25帧, 每帧 300 bit, 合计 7 500 bit。12 颗星的导航电文总数据量为 90 k。系统读取电文数据后, 放入电文数组, 写入缓冲; 读取两帧观测数据, 写入缓冲; 由于观测数据更新频率为 20 ms 一次, 因此每 20 ms 读 1 帧观测数据, 输出信号。信号处理流程如图 4 所示。

7　实验与分析

采用 Trimble 公司生产的 Resolution-T 型 GPS 接收机对设计的 GPS 信号模拟源进行测试。将 Resolution-T 型 GPS 接收机串口输出与电脑相连, 通过 DSPMon_V1-46 软件, 观察 P-T 星卡解调出的射频模拟信号时间及位置是否正确, 误差大小是否符合性能要求等, 模拟输出的卫星数是否能达到四颗可以上, 结果如图 5 所示, 可见达到了设计要求。

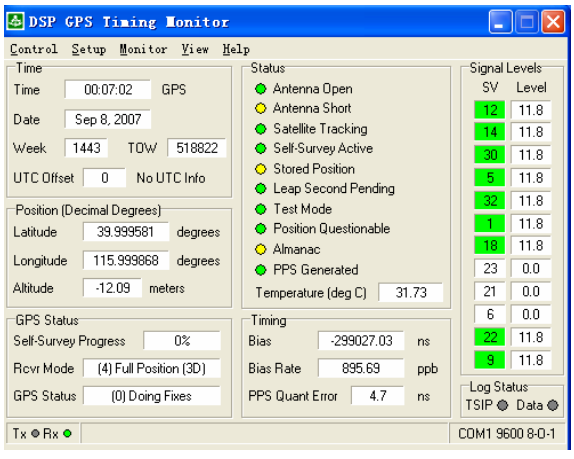

图 5　Resolution-T 型 GPS 接收机的测试结果

Fig. 5　Test result of Resolution-T receiver

8　结　论

本文介绍了一种基于数据文件读取的 GPS 信号模拟器, 采用离线计算获取数据文件, 避免了实时计算需要的大量硬件资源, 从而降低了 GPS 信号模拟源的成本。通过更换文件可以改变信号模拟的场景设置, 具有一定的灵活性。这种方法能满足部分 GPS 接收机生产厂家的测试需求。

参考文献:

[1] CANDY D W. NAVSTAR/GPS SIMULATOR.[J]. IEEE Proceedings of the National Aerospace and Electronics Conference, 1977: 323-329.

[2] 雷建安. GPS 模拟器[J]. 测控信息, 2002, (2): 12-13.
LEI J AN. GPS simulator[J]. Information of Test and Control, 2002, (2): 12-13.

[3] 赵军祥, 张其善, 常青, 等. 高动态 GPS 卫星信号模拟器关键技术分析及应用[J]. 电讯技术, 2003, 43(4): 49-54.
ZHAO J X, ZHANG Q SH, CHANG Q. et al. The key technique analysis and applications of high dynamic GPS signal simulator[J]. Telecom. Technology, 2003, 43(4): 49-54.

[4] DONG L. IF GPS signal simulator development and verification[R], 2003.

[5] BROWN A, GEREIN N N C. Advanced GPS hybrid simulatorarchitecture[J]. Proceedings of ION 57th Annual Meeting, Albuquerque, NM, 2001.

[6] 孙健, 邵定蓉, 李署坚, 等. 基于嵌入式的 GPS 模拟信号源的设计与实现.计算机测量与控制, 2007. 15(5), 670-673.
SUN J, SHAO D R, LI SH J, et al. Design and implementation of simulative GPS signal source based on embedded technique[J]. Computer Measurement & Control. 2007, 15(5), 670-673.

[7] 陆娟, 常青, 张其善, 等. 十二通道 GPS 信号发生器的硬件设计[J]. 遥测遥控, 2003, 24(3): 15-18.
LU J, CHANG Q, ZHANG Q SH, et al. Hardware design of 12 channel GPS signal simulator[J]. Remote mearsurement and control. 2003, 24(3): 15-18.

作者简介:

单庆晓

单庆晓: 1994 年于国防科技大学获得学士学位, 1997 年于国防科技大学获得硕士学位, 2003 年于国防科技大学获得博士学位。现为国防科技大学副教授。主要研究方向为卫星授时和时间传递, 卫星导航信号模拟等。
E-mail: qxshan@vip.sina.com

Shan Qingxiao: received B.S., M.S. and Ph.D. all from National University of Defense Technology in 1994, 1997 and 2003, respectively. Now he is associate professor of National University of Defense Technology. His research interest is satellite timing and synchronization, satellite navigation and signal simulation.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

陈建云

陈建云： 1997 年于国防科技大学获得学士学位，2000 年于国防科技大学获得硕士学位，2004 年于国防科技大学获得博士学位。现为国防科技大学讲师，主要研究方向为卫星导航信号模拟、星间精密测距等。

E-mail: kdcjy@sina.com

Chen Jianyun received B.S., M.S. and Ph.D. all from National University of Defense Technology in 1997, 2000 and 2004, respectively. Now he is lecturer of National University of Defense Technology. His research interest is satellite navigation, signal simulation, and precision measurement.

NI 利用 LabVIEW 和工业领域最丰富的驱动资源有效简化仪器控制

美国国家仪器有限公司(National Instruments, 简称 NI)通过行业内最大的仪器驱动资源——NI 仪器驱动程序网络(IDNet), 和包括 NI LabVIEW, LabWindows™/CVI 以及针对 Microsoft Visual Studio 的 Measurement Studio 在内的优化仪器控制的简单易用的软件产品, 有效简化了仪器控制。此款综合的软件套件专为仪器控制所设计, 不仅可以帮助工程师和科学家在仪器控制上更好地完成项目, 也可帮助缩短工程时间, 更快地进行测试工作。

IDNet 提供了超过 7500 种仪器驱动, 涵盖了包括泰克公司(Tektronix)、安捷伦公司(Agilent Technologies)以及罗德与施瓦茨公司(Rohde & Schwarz)等超过 275 家独立台式仪器供应商, 大大简化了仪器的连接与控制。通过 IDNet, 工程师和科学家可以下载经 NI 认证的 LabVIEW 即插即用程序、LabWindows/CVI 即插即用程序以及 IVI (Interchangeable Virtual Instrument)仪器驱动程序, 从而在 NI 软件中控制成千上万的包括最新款 GPIB、PXI、USB、以太网和 LXI 等仪器。同时, NI 在传统仪器的基础上也拓展了硬件驱动支持, 新增了对如环境监测传感器和无线传感器网络驱动的支持。

除了 IDNet 之外, LabVIEW 通过提供简单易用的高级图形化编程接口有效简化了仪器控制应用, 并通过经认证的仪器驱动及其他省时的配置和故障检修工具, 对仪器连接与控制提供了广泛的支持。通过集成的向导如仪器驱动程序查找器(Instrument Driver Finder), LabVIEW 有效帮助工程师和科学家在 IDNet 上快速定位仪器驱动和代码, 并将它们安装到 LabVIEW 调色板中以便立即使用, 从而大大缩短了开发时间。LabVIEW 和仪器驱动程序查找器(IDFinder)帮助用户在无需离开 LabVIEW 开发环境的状态下创建并运行程序, 极大缩短了从开始到取得第一个测量数据所花费的时间。

所有 NI 仪器驱动都是在 VISA(虚拟仪器软件架构)层的基础上创建而成, VISA 是一个工业领域标准的 I/O 编程接口, 它通过让不同的仪器总线使用统一的编程方式予以实现, 大大简化了底层总线间通讯的复杂度。作为 NI 对工业 VISA I/O 标准的实现, NI-VISA 通过提供诸如 NI Spy 等资源, 进一步简化并加快了仪器控制。NI Spy 是一款交互实用工具, 可以通过显示详尽的函数及数据调用和, 以及软件与仪器件间的时序来帮助工程师和科学家更快地查找应用程序中的故障。

LabVIEW 和 NI-VISA 还包含了 NI Measurement & Automation Explorer (MAX) 配置软件, 从而可以从系统中心位置管理所有的硬件。MAX 提供可选功能, 可以对特定的仪器指定别名, 这有效简化了在自动化测试系统中增加或替换仪器的工作。此外, 新版的 NI-VISA 提供自动发现 LXI 仪器的功能增强了对 LXI 标准的支持。通过该性能, 在配置中添加任何 LXI 仪器都可以在软件中被自动检测到, 并在测试中立即进行使用。

如果一款必需的驱动无法找到, NI 软件开发环境内置针对包括 VISA、GPIB、串口以及以太网接口在内的直接 I/O 访问的功能。NI 的三种开发环境都包含交互式的仪器 I/O 助手, 帮助工程师和科学家快速实现与现有仪器的通信, 完成简单的仪器 I/O 任务或生成供仪器驱动使用的代码。

欲了解更多关于 NI 仪器控制软件信息, 请访问 ni.com/instrumentcontrol/zhs; 如需下载 LabVIEW 最新评估版软件, 请登陆 ni.com/labview/try/zhs/daq, 了解更多关于 NI IDNet 的相关资料。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net