

航天器多路射频频谱自动监测系统设计

李宏亮, 魏邦友, 张亚非, 彭超然

(中国空间技术研究院 载人航天总体部, 北京 100094)

摘要: 为提高航天器测试时射频信号监测效率, 提出了一种航天器多路射频频谱自动监测系统; 该系统由频谱分析仪进行射频信号频谱测量, 由微波开关切换矩阵进行不同射频信号通路切换, 通过自主设计的多路射频频谱自动监测软件对系统进行实时控制和数据读取, 实现了多达 15 路、50 MHz~3 GHz 频率范围内射频信号的频谱自动监测; 测试用时从原来 3 min/信号通道减少至 10 s/信号通道, 人力从 2 人减少到 1 人, 有效地提高了航天器射频信号监测效率; 该系统已应用于空间站工程测试中。

关键词: 航天器; 多路射频; 频谱; 自动监测; 空间站

Design of Spacecraft Multi-RF Electrical Spectrum Automatic Monitoring and Measuring System

Li Hongliang, Wei Bangyou, Zhang Yafei, Peng Chaoran

(Dept. of Manned Space System Engineering, Chinese Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: A spacecraft multi-RF electrical spectrum automatic monitoring and measuring system has been designed in order to improve the efficiency of spacecraft RF signals monitoring and measuring. RF spectrum is measured by the spectrum analyzer, and the different RF signal channels are switched by the microwave switch matrix equipment. A multi-RF spectrum automatic monitoring and measuring software has been developed to control the whole system and perform read-write operation of data. Automatic monitoring and measuring of 15 RF signal spectrums with frequency range between 50 MHz and 3 GHz is implemented. The efficiency of spacecraft RF signal monitoring is improved significantly, with the time cost reducing from 3min/channel to 10 s/channel and manpower saving from 2 to 1. This system has been applied in testing of Chinese space station.

Keywords: spacecraft; multi-RF; electrical spectrum; automatic monitoring and measuring; space station

0 引言

射频信号的监测在无线通信、信号广播、航天器测控等领域具有重要的意义, 通过信号的实时监测可迅速掌握系统状态。移动无线通信系统中的射频信号监测主要关注信号的功率补偿及检测精度^[1-2]; 搭载测控设备的舰船、广播电视基站等需要进行长时间连续射频信号监测的较大规模系统着重探索监测过程、数据记录的自动化^[3-5]。不难发现, 利用计算机、通用化测试设备、软件技术等手段快速、准确地实现射频信号的自动监测, 是系统级射频测试的发展方向。

随着航天器技术的不断发展、系统复杂性的日益提高, 航天器与地面测控系统间的测控与通信链路数量也日益增多。在航天器系统级测试中, 测控与通信链路是航天器与地面测控系统进行信息交互的主要通道, 链路中传输的射频信号的质量, 直接影响着航天器测试的有效性、准确性。本文提出了一种航天器多路射频频谱自动监测系统, 可以通过系统中软件与硬件的配合自动完成多路射频信号频谱的切换、测量、存储, 提高航天器测试中射频信号监测效率。

1 系统总体结构及原理

航天器多路射频信号频谱自动监测系统由以下设备组成: 频谱分析仪、微波开关切换矩阵、控制计算机。射频信号通过

天线或射频电缆, 经微波开关切换矩阵的多个输入接口(输入 1~输入 N)输入至矩阵内, 矩阵内部微波开关受控切换至特定通道, 输出至系统中的频谱分析仪进行射频信号频谱测量; 控制计算机运行多路射频频谱自动监测软件, 与频谱分析仪、微波开关切换矩阵通过网络接口通信, 控制后两者响应相关指令并完成微波开关切换(射频通道切换)、测量参数调整等工作, 并进行数据读取、存储、记录测试日志等工作。系统组成如图 1 所示。

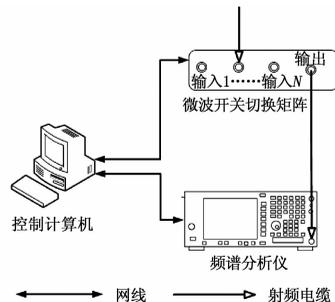


图 1 多路射频信号频谱自动监测系统组成

航天器多路射频信号频谱自动监测系统的工作流程可概括为:

- 1) 待测量的射频信号输入至微波开关切换矩阵;
- 2) 微波开关切换矩阵由控制计算机程控进行通道切换;
- 3) 射频信号输出至频谱分析仪;
- 4) 频谱分析仪由控制计算机程控进行参数测量;
- 5) 控制计算机记录测量结果、系统运行状态。

系统工作时, 按照流程 1)~5) 顺序循环往复, 对射频

收稿日期:2017-06-27; 修回日期:2017-07-26。

作者简介:李宏亮(1985-),男,山西大同人,硕士,工程师,主要从事载人航天器地面测试设备研制和综合测试工作方向的研究。

信号进行连续自动监视。

2 系统硬件设计

2.1 微波开关切换矩阵

微波开关切换矩阵机箱设计为宽度 19"、高度 3U 的标准结构, 对外全部射频接口均采用 Ni 型不锈钢接口, 内置具备程控功能的 2 个单刀六掷开关、1 个双刀双掷开关。在每个单刀六掷开关的其中一路输入端, 分别连接有 1 个 0° 二合路器和 0° 三合路器, 用于实现异频射频信号的合路输入, 合路器的输入、输出端均设置有隔离器, 以降低信号反射影响; 在 2 个单刀六掷开关的各路输入端口, 均设置有检波组件对射频信号进行功率连续采集。微波开关切换矩阵的原理如图 2 所示。

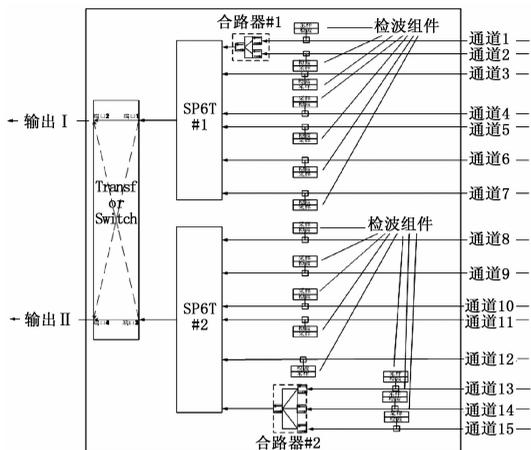


图 2 微波开关切换矩阵原理图

矩阵机箱内各微波组件间以及组件与机箱前、后面板的射频连接器间均采用两端为 SMAm 连接器的半刚性电缆连接。半刚性电缆可三维成形, 在 3 GHz 频段附近电缆损耗约 0.7 dB/m。机箱内共使用半刚性电缆 20 根, 单根电缆最大长度不超过 40 cm, 因此机箱内模块间射频信号在半刚性电缆内传输的功率损耗可忽略不计。微波组件安装在一块固定于机箱底板的镀锌钢板上, 按照机箱重心居中、可简单快速拆装单个组件或电缆的原则, 各组件安装时在空间上相互错开, 半刚性电缆走向尽量互不干涉; 微波组件底部为金属平面, 四角具有安装用通孔, 通过不锈钢紧固件与镀锌钢板连接。各个微波组件底面与镀锌钢板紧贴, 安装于机箱前后面板的射频连接器外壳经由半刚性射频电缆与微波组件的射频连接器壳体连通, 实现各个微波组件壳体、机箱面板上射频连接器之间共同接地。切换矩阵机箱的顶盖、底板、左侧板、右侧板均有散热孔, 保证机箱具备良好的散热能力。

矩阵内的单刀六掷开关选用 Agilent 87106A (SP6T, option 24), 双刀双掷开关选用 Agilent 87222C (Transfer Switch), 二者均属磁保持同轴开关, 切换时间 ≤ 15 ms, 可重复切换寿命 ≥ 500 万次, 在 3 GHz 隔离度 ≥ 100 dB, 插损 ≤ 0.35 dB。

矩阵内的 0° 二合路器和 0° 三合路器均采用 Wilkinson 原理、微带线结构实现, 将两路或三路输入信号合成一路输出信号。采用 Wilkinson 方式实现的合路器具有如下特点: 1) 各个输入端信号间具有隔离特性; 2) 若输入信号间的相位差较小, 信号经合路输出后的功率差也较小。

矩阵内的检波器件的检波功率准确度为 ± 0.5 dB, 检波功率分辨率 20 mV/dBm, 输入功率动态范围 $-40 \sim -5$ dBm。

微波开关切换矩阵通过由 W77E58 单片机、外围电路 (放大器 AD620、模数转换器 AD574、驱动接口电路等) 组成的控制模块实现对设备的控制。各个检波器输出的射频信号经过模拟选通通道后进入 AD620, 经过功率放大、调理, 进入 AD574; 单片机采集 AD 转换器转换后的数字信号, 通过网络接口送多路射频信号频谱自动监测软件进行处理。同时, 单片机还通过微波开关的驱动接口电路控制微波开关的切换, 并采集开关状态, 通过网络接口与多路射频信号频谱自动监测软件进行通信。控制模块原理如图 3 所示。

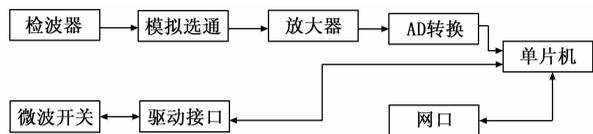


图 3 微波开关切换矩阵控制模块原理图

控制模块中的驱动接口电路以 TTL 电平控制微波开关的切换, 其核心为 74HC573 芯片和 74HC244 芯片。单片机通过 74HC573 芯片输出 TTL 高电平并将其加载于微波开关的相应管脚上实现开关选通, 通过 74HC244 读取开关的返回状态。以 87106A 为例, 管脚 1 为直流电源供电端, 管脚 15 为接地端, 管脚 3/5/7/9/11/13 对应 6 个选通路径, 管脚 4/6/8/10/12/14 为相应选通路径的电子位置指示器。需要选通开关的第一路时, 将 TTL 高电平加载至管脚 3, 并保持其它引脚的 TTL 电平均为低电平; 需要切换其它通路时, 先将所有引脚的电平置为低, 再将高电平置于需要切换路径对应的引脚上。

控制模块中选用的 AD620 是一款低成本高精度放大器, 放大倍数 $1 \sim 10\,000$ 。AD574 是高速 12 位逐次比较型 AD 转换器, 模拟电压输入范围 $0 \sim 10$ V, 非线性误差 ± 1 LSB, 电压采集精确度约为 10 mV, 与检波组件配合, 可实现射频信号功率分辨率达到 0.5 dBm。

微波开关切换矩阵的对外通信接口为符合 IEEE 802.3 100/1 000BASE-T 标准的 RJ45 连接器, 控制模块中的单片机对网卡芯片进行读写, 可对网卡 IP 地址进行设置。选用 W5100 网络接口芯片作为网卡芯片与单片机通信。对芯片进行 Socket 编程后, 可实现以太网数据通信功能。为保证网卡芯片与单片机的直流工作电压相匹配, 利用电平转换芯片对供电电压进行转换。

2.2 频谱分析仪与控制计算机

系统中的频谱分析仪采用 Agilent 公司 PSA 系列产品 E4447A, 具备 3 Hz \sim 42.98 GHz 的测量范围, 在 2 \sim 3 GHz 频段的平均噪声电平可达 -150 dBm; 用户界面友善, Agilent 公司提供了大量远程控制接口命令, 可方便地通过符合 IEEE 802.3 100/1000BASE-T 标准的网卡对仪器进行控制和操作。由于 Agilent 公司的系列化产品的控制接口完全一致, 系统中的频谱分析仪同样可由 PSA 系列中的其它型号或 ESA 系列、ESA-L 系列中的型号替换, 这提升了本频谱监测系统的通用性。

系统中的控制计算机采用 HP 公司 E8080 商用 PC 机, 配置 Core II 双核 CPU (主频 2.83 GHz), 4 GB 内存, 网卡符合 IEEE 802.3 100/1000BASE-T 标准。经测试, 多路射频信号频谱自动监测软件运行时对系统资源占用很少 (CPU 占用率

仅为 1%，内存占用约为 12 MB)。因此 CPU 主频 2 GHz 以上、内存 1 GB 以上、具备千兆以太网接口的计算机均可作为系统中的控制计算机使用。

3 系统软件设计

3.1 软件架构

本系统使用的多路射频信号频谱自动监测软件采用 Visual Studio 6.0 开发，程序开发语言是面向对象语言 C++。软件基本结构基于对话框搭建，针对不同的功能进行分类模块化设计，包括控制模块、显示模块、系统配置模块、数据记录模块等。软件工作流程如图 4 所示。

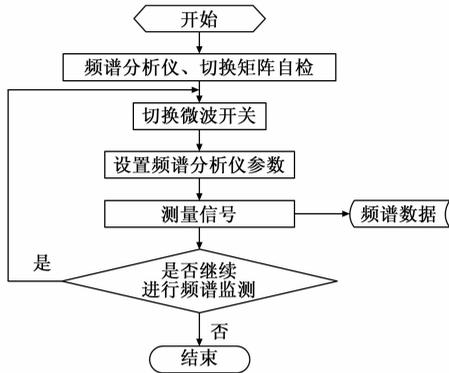


图 4 多路射频信号频谱自动监测软件工作流程图

3.2 软件主要模块设计

3.2.1 控制模块

多路射频信号频谱自动监测软件通过 Agilent 公司的标准控制命令库实现对监测系统频谱分析仪的控制。软件与指定 IP 地址的频谱分析仪以 TCP/IP 协议建立网络连接后，按照控制命令库定义的格式向设备发送控制命令。控制命令是频谱仪可识别的可编程仪器标准命令（standard commands for programmable instruments, SCPI）。通过查询控制命令库中的各类命令内容，SCPI 可方便地转换为程序语言，提供了用户与被控设备的控制接口。

以设置频谱分析仪的分辨带宽（RBW）参数为例，其控制命令为：

```
:SENS :BAND 1 kHz
```

相应的设置功能代码为：

```
CString str = :SENS :BAND 1 kHz;
int len_str = str.GetLength();
int ret = m_socket.Send(LPCTSTR(str), len_str);
```

每条控制命令均被封装为一个对应特定操作的功能函数，并通过 Visual C++ 开发工具中的控件管理工具与软件界面上 Manual 功能页面的相应按钮绑定。控制函数执行流程如下：

- 1) 定义控制命令名称、命令长度、待设置的参数值等变量，并进行初始化；
- 2) 调用 UpdateData () 函数，函数参数值为 TRUE，函数执行后界面数据可以被重置；
- 3) 判别待设置参数值是否超出设备要求的限定范围；
- 4) 构建控制命令内容，并调用 Windows AsyncSocket 类中的 Send () 函数向设备发出控制命令；
- 5) 检查 Send () 函数的返回值，判别命令是否发送成功；若发送失败，记录函数返回的错误代码；

6) 调用 UpdateData () 函数，函数参数值为 FALSE，函数执行后软件界面将重新初始化，待设置参数将显示在软件界面上。

多路射频信号频谱自动监测软件对微波开关切换矩阵的控制通过自定义的控制命令实现。命令格式见表 1。命令中信息体部分的“xxx”可置为 001~014，分别对应着两个单刀六掷开关及一个双刀双掷开关的单路选通状态。软件与指定 IP 地址的微波开关切换矩阵建立网络连接后，将控制命令以网络方式发送给矩阵，由矩阵的控制模块对接收到的控制命令进行解析并执行，微波开关的电子位置指示器将切换后的开关状态通过控制模块经网络反馈给监测软件。

表 1 微波开关切换矩阵自定义控制命令

信息头	信息体	信息尾
十六进制	ASCII 码	十六进制
499602D2	CMxxx	B669FD2E

3.2.2 显示模块

多路射频信号频谱自动监测软件实现了 Agilent E4447A 频谱仪工作时监测频谱的实时显示。软件显示频谱的原理为：软件向频谱仪发送“保存当前显示图像”的控制命令，频谱仪保存当前显示的频谱图像后，通过网络方式将图像文件发送至控制计算机，文件以 GIF 格式存储。软件找到位于设置路径的图像文件后，在计算机内存中以堆方式创建一个临时内存区域，通过 CFile 类对象采用只读权限打开图像文件并将图像数据内容读取到该临时内存区域中，之后软件创建一个指向该块内存区域的流对象指针。软件在 Windows 消息响应函数 OnPaint () 内调用 OleLoadPicture () 函数，该函数会创建新的图像对象并通过流对象指针指向的数据内容对图像对象进行初始化。设置定时器并利用 Windows 消息响应函数 OnTimer ()，在定时器作用域内依次调用 InvalidateRect ()（将 bErase 参数设置为 FALSE）和 UpdateWindow () 函数对显示频谱图像的矩形区域和软件窗口进行刷新，WM_Paint 消息将定时发出，OnPaint () 函数会随之定时响应 WM_Paint 消息，实现在软件界面的特定矩形区域对频谱图像进行显示。相关代码如下：

```

If (file.Open(path, CFile::modeRead) && file.GetStatus(path,
fstatus) && ((cb = fstatus.m_size) != -1))
{
    HGLOBAL hGlobal = GlobalAlloc(GMEM_MOVEABLE,
cb);
    LPVOID pvData = NULL;
    if (hGlobal != NULL)
    {
        If ((pvData = GlobalLock(hGlobal)) != NULL)
        {
            file.ReadHuge(pvData, cb);
            GlobalUnlock(hGlobal);
            CreateStreamOnHGlobal(hGlobal,
TRUE, &pStm);
        }
    }
    IPicture * pPic;
    if (SUCCEEDED(OleLoadPicture(pStm, fstatus.m_size,
  
```

```
TRUE, IID_IPicture, (LPVOID *) &pPic))
{
    OLE_XSIZE_HIMETRIC hmWidth;
    OLE_YSIZE_HIMETRIC hmHeight;
    pPic->get_Width(&hmWidth);
    pPic->get_Height(&hmHeight);
    if(FAILED(pPic->Render(dc, 230, 0, 640, 480, 0, hmHeight,
    hmWidth, -hmHeight, NULL)))
        AfxMessageBox("渲染图像失败!");
    pPic->Release();
    pStm->Release();
}
```

软件可实现最快间隔 1 s 的图像刷新速率, 可满足航天器型号测试中对射频信号频谱远程实时监视的需求。对某中心频率为 720 MHz 的宽带信号的频谱监视效果如图 5 所示。

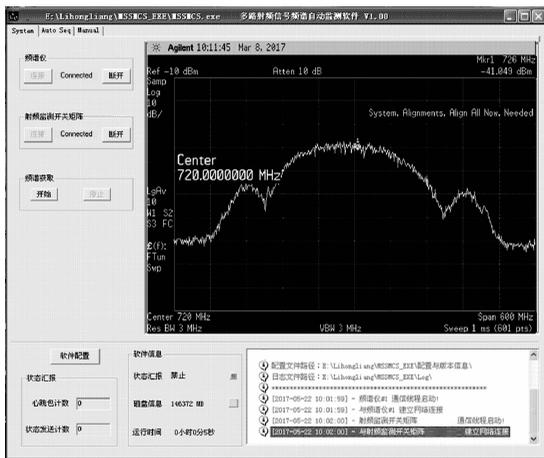


图 5 频谱自动监测软件获取频谱图像

3.2.3 系统配置模块

多路射频信号频谱的自动切换、监测、记录是软件的核心功能。通过系统配置模块, 本软件实现了多达 15 路射频信号的自动序列化测试功能。

本模块在设计时采用了多线程处理方法。对需要监测的各路射频信号, 分别创建一个独立线程用于执行对应该路信号测量的全部设备操作和数据读写。每个线程运行过程中都涉及微波开关切换、频谱图像保存和传输、频谱分析仪参数设置、测量数据存储、操作日志记录等数十个具体功能函数的执行。根据设备对各个函数执行的响应时间的差异, 软件编写时在每两个函数的运行代码间设置有 100~5 000 ms 不等的线程休眠时间。多线程设计方法保证了控制计算机可以在当前信号监测线程暂停执行期间, 释放系统资源去执行其它信号监测线程, 即用户可以在监测某一路射频信号的过程中, 同时启动其它路信号的监测, 既降低系统资源的占用又提升信号监测的效率。

对每一路监测信号, 用户可在软件界面的 Auto Seq 功能页面中对监测信号的测量频率范围、参考电平、显示带宽、分辨带宽等测量参数, 微波开关的选通状态等控制参数, 信号标识等数据记录参数进行自定义, 定义好的参数作为软件的配置文件, 在软件启动时自动读取。每切换一路信号, 软件可相应完成信号频谱图像、中心频率、峰值功率、监测带宽等数据的记录, 配合监视信号的信息标识和记录时间, 方便用户随时查询数据状态; 用户可以点击页面上某一路通道前的按钮对该路

信号进行单独监测, 也可将选中的多个通道按照自动化序列的方式轮巡监测, 序列中用户可自定义需监视的射频信号通道数量、类别、监测参数, 以及通道间切换的时间间隔。多路射频信号频谱自动监测软件的测试通道配置界面如图 6 所示。



图 6 频谱自动监测软件通道切换操作界面

3.2.4 数据记录模块

软件记录的测量数据、测试日志分别以 Excel 电子表格、文本形式存档, 按照日均测试 12 小时、完成 300 次测量估算, 测试数据与日志文件的数据量约 500 KB/d。相较于常见的采用二进制文件的数据存储形式, Excel 文件有以下优势: 一是可采用计算机通常会搭载的 Office 组件查看, 不需要安装专用的二进制文件分析软件, 便于用户操作和部署; 二是 Excel 软件具备一定的数据统计功能, 可方便地对测试数据进行统计、查询。

4 系统测试和应用效果

多路射频频谱自动监测系统已在载人航天空间站工程综合测试中使用。与测试人员在测试仪器前进行操作的传统方法相比, 本系统在工程应用中具有以下优势:

1) 自动化程度提高。监测系统中仪器的各个动作均通过软件控制自动完成, 测试人员不再需要在测试仪器前进行繁琐的仪器设置操作;

2) 测试效率提高。传统测试方法中, 进行射频通道功率调节、频谱分析仪参数设置、测试数据记录等工作, 每个射频信号通道耗时约需 3 min, 且需要在仪器端和测试计算机前配置 2 名人员; 频谱自动监测系统利用指令串可快速完成全部设置, 仅需 1 人操作监测软件即可;

3) 支持远程测试。该监测系统可将微波开关切换矩阵、频谱分析仪放置于被测试航天器附近或其它测试人员不易进入的区域, 仅需保障网络通信畅通, 测试人员在远端通过控制计算机即可进行远程测试。

多路射频频谱自动监测系统的效果分析如表 2 所示。

5 结论

航天器多路射频频谱自动监测系统, 可以通过系统中软件与硬件的配合自动完成 50 MHz~3GHz 频率范围内多达 15 路的射频信号频谱切换、测量、存储, 实现了自动发送指令、自

(下转第 33 页)

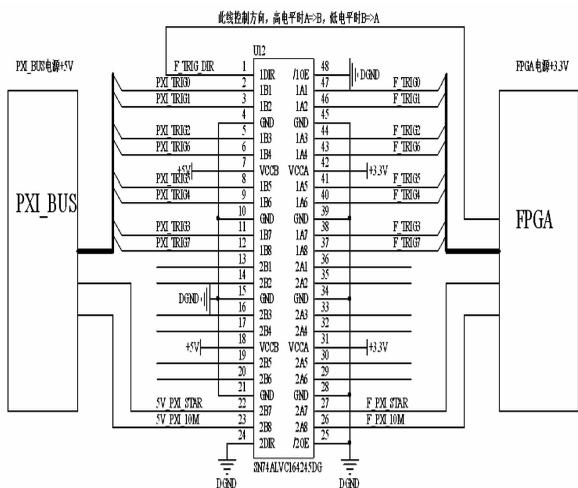


图 6 触发信号转换电路图

可以通过示波器捕获 PXI 总线上的触发信号和 1553B 总线的消息波形计算获得, 结果如图 7 所示, 从触发信号上升沿 80% 处至 1553B 第一个数据字波形下降沿的时间约为 7.2 μs , 远小于 A/D 最小采样周期 100 μs , 对测试精度的影响可以忽略不计。

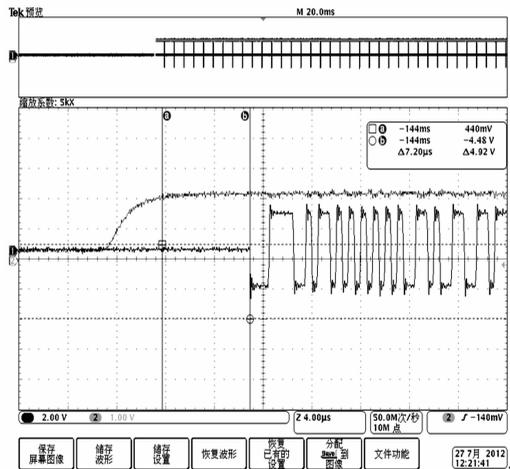


图 7 示波器捕获的触发信号和 1553B 接口卡输出波形

该伺服测控系统采用启动零点同步技术后, 仍然保留了原
(上接第 4 页)

表 2 系统应用效果

	传统监测方法	多路射频信号频谱自动监测方法
操作方式	设备面板操作	软件操作
数据记录	人工记录	软件记录
远程控制	不支持	支持
测试时间	3 min/信号通道	10 s/信号通道
人力资源	2 人	1 人

动记录数据、自动切换信号通道等功能, 用户可通过配置文件实现“一键式”频谱监测。从使用效果看, 该系统较传统的频谱测量方法节省了人力资源, 单通道的监测耗时由原先的 3 min 减少至 10 s 左右; 同时系统具备远程控制功能, 将其用于载人航天器综合测试过程, 可有效提高航天器上下行射频信号

来不使用同步技术的调用方式, 在只有 1553B 总线进行控制时使用启动零点同步技术, 保证了伺服测控系统使用的灵活性。

试验结果表明, PXI 硬件触发时序能够改变软件触发带来的伺服动态特性测试概率性误差为固定量级误差, 误差范围不影响动态特性计算精度, 提高了基于 1553B 总线的伺服系统动态特性测试的精度。

4 结论

本文通过对基于 1553B 总线的伺服系统测试仪动态测试精度进行分析, 找出了在无模拟指令反馈条件下影响动态特性测试精度的主要因素, 并设计了基于 PXI 平台的数模混合启动零点同步技术方案, 经理论分析和验证, 该方案能够在 1553B 数字总线和 A/D 采集联合测试条件下, 有效的保证伺服系统动态测试的精度, 为伺服产品性能分析提供了更加有效的数据支撑。对基于 1553B 总线的伺服测控系统的研制具备指导意义, 提高了测控系统的研发水平。

参考文献:

- [1] 张志成, 张合新. 基于 PXI 总线的导弹伺服机构测试系统 [J]. 计算机测量与控制, 2006, 14 (12): 1657-1659.
- [2] 岳超, 董国才, 喻戈, 等. 基于 RTX 的导弹半实物仿真系统设计 [J]. 弹箭与制导学报, 2016, 36 (1): 19-22.
- [3] 刘晔, 邬雄师, 陈然, 等. 装甲车车载设备绝缘电阻与开关导通状态测试仪的研发 [J]. 中国测试, 2013, 39 (4): 69-72.
- [4] 陈侃, 冯琳, 贾林, 等. 基于 RTDS 的光伏并网数字物理混合实时仿真平台设计 [J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42 (3): 42-48.
- [5] 朱艺颖. 电力系统数模混合仿真技术及发展应用 [J]. 中国电力科学研究院, 2015, 36 (12): 42-47.
- [6] 李光辉, 何国庆, 郝木凯, 等. 基于 NI-PXI 微电网多模式数模混合仿真平台的设计与实现 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43 (20): 107-113.
- [7] 贾金艳, 陈海峰, 丁炳源, 等. 弹内高速 1553B 总线 RT 端软件设计与应用 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (1): 162-167.
- [8] 朱习松, 王健军, 刘士全. 基于 FPGA 和 64843 的 1553B 总线应用 [J]. 电子质量, 2016 (03): 60-63.
- [9] 顾慧杰, 王彬, 赵旋宇, 等. 多级控制中心全局电网潮流计算及闭环控制仿真系统 [J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42 (17): 52-59.
- [10] 裴福俊, 张博, 张博. 数字闭环光纤陀螺的死区分析和抑制方案研究 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (4): 1254-1256.

的监测效率, 为载人航天器自动、远程测试提供了有效方法。该系统可通过修改配置文件, 适应不同型号航天器的多路频谱监测需求, 具备一定的可扩展性。

参考文献:

- [1] 王建平. 一种射频功率检测控制系统的设计方法 [J]. 电子测量技术, 2016, 39 (8): 191-195.
- [2] 李波, 曹敏, 胡万层, 等. AMI 通信网络中微功率无线通信的性能测试技术及系统研究 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (2): 385-388.
- [3] 冯蕾洁, 韩应征, 王娟. 基于动态频率选择技术的射频自动测试系统 [J]. 制造业自动化, 2014, 36 (1): 124-126.
- [4] 何谦, 宋海军, 陶敏, 等. 船载 USB/UCB 自动化测试系统的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (7): 137-140.
- [5] 郭畅. 卫星电视上行站信号自动监测系统探讨 [J]. 科技资讯, 2016, 14 (13): 19-20.