

卫星测控站频谱监测系统设计方案及实现

昂正全, 赵京广, 李一超

(北京航天飞行控制中心, 北京 100094)

摘要: 为解决卫星测控站人工监测下行中频信号效率低、无自动化的频谱处理等问题, 设计并实现了一种基于开关矩阵和频谱仪的多路频谱监测系统; 首先介绍了该系统的硬件组成, 然后介绍了系统软件设计方案, 针对系统功能, 提出了若干个频谱监测相关的处理算法, 包括基于 SCPI 的频谱实时监测、基于临界线的异常信号检测、基于频谱轨迹的频谱录像与回放以及一种快速的遥控命令捕获等算法, 最后通过试验说明系统满足频谱监测的需求; 实际应用结果表明, 该系统运行稳定可靠, 各算法是实用有效的。

关键词: 频谱监测; 异常信号检测; 频谱录像

Design and Implement of a Spectrum Monitoring System Used in Satellite TT&C Station

Ang Zhengquan, Zhao Jingguang, Li Yichao

(Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094, China)

Abstract: In satellite TT&C station, manually monitoring spectrum of downlink IF signal is a low effective way and it has no automatically spectrum dealing way. To solve the problems, the paper designs and implements a multi-spectrums monitoring system based on a switch matrix and two spectrum analyzers. First, the paper introduces the hardware structure of the system. Then, the paper introduces the design framework of system software. Next, to implement the functions of the system, the paper designs some dealing algorithms about spectrum monitoring. The algorithms are monitoring spectrum in real time based on SCPI, detecting abnormal signal based on critical line, recording and replaying spectrum based on trace data, and a fast automatically capturing telecommand. At last, it is illustrated that the system satisfies the requirements of spectrum monitoring by experiments. According the actual application, the system can run stably and reliably, and the algorithms are practical and effective.

Keywords: spectrum monitoring; abnormal signal detecting; spectrum recording

0 引言

卫星测控站是航天测控网的重要组成部分, 主要完成对卫星的跟踪、遥测和遥控。各类卫星的发射、长期管理都需依赖于测控站的软硬件系统^[1]。卫星测控天线向地面主动发送信标信号, 测控站自动跟踪信标信号, 从而实现跟踪卫星。测控站跟踪卫星过程中, 测控站天线跟踪状态是否良好, 决定着是否能够正常收到遥测信号以及正确的发送遥控信号。在卫星发射阶段, 测控站天线系统需要保持对卫星的连续跟踪, 此时卫星还处于转移轨道上, 卫星姿态也未稳定, 跟踪的信号也不稳定。通过对下行链路中频信号的频谱监测^[2], 可以判断天线跟踪状态, 根据跟踪状态及时地更改地面站相应的配置, 以达到对卫星的连续跟踪; 同时也能检测出卫星信号中存在的干扰, 提前启动相应的应急措施, 最大程度地消除干扰带来的影响。传统人工监测频谱的方法是在需要的时候, 由操作员完成频谱仪的摆放、电缆的连接、频谱仪参数的配置以及频谱的监测等工作。人工方法缺乏实时性、效率低、不能进行频谱数据记录和分析、缺少频谱监测处理的自动化手段, 故本文设计了一种卫星测控站频谱监测系统, 实现了自动化的中频频谱监测。

1 频谱监测系统组成

在卫星发射阶段, 通常需要使用 2 台频谱分析仪同时监测卫星的左旋和右旋信号, 根据信号的大小确定天线的跟踪旋向。为节约成本, 该系统没有使用多台频谱分析仪监测每路信号, 而使用一个中频开关矩阵实现多路频谱信号的监测。监测的中频信号包括各天线的下变频器输出的中频信号以及一个测试中频信号, 该测试中频信号根据需求临时接入。我站测试中频信号主要是用来接入基带上行中频信号, 实现对遥控信号频谱的捕获。系统组成如图 1 所示。

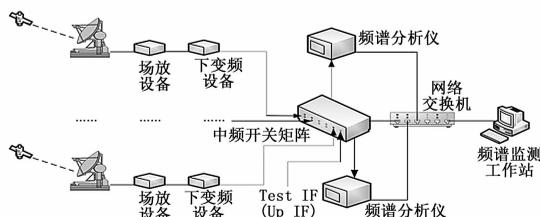


图 1 频谱监测系统组成

频谱监测系统主要由射频设备、中频设备、中频开关矩阵、频谱分析仪和频谱监测工作站等构成^[3]:

1) 场放设备: 放大天线接收的微弱信号, 具有很低的噪声系数。

收稿日期: 2014-04-09; 修回日期: 2014-06-06。

作者简介: 昂正全(1981-), 男, 安徽肥东人, 工程师, 工学硕士, 主要从事卫星测控通信系统、地面站链路测试技术等方向的研究。

2) 下变频设备: 将场放输出的射频信号变换到中频信号, 同时对信号进行一定程度的放大。下变频器的输出信号分路出另一路中频信号, 通过电缆连接到中频开关矩阵。

3) 中频开关矩阵: 完成多路输入信号的选择, 它的 2 个输出端口分别连接到频谱分析仪。

4) 频谱分析仪: 是频谱监测系统的关键设备, 对频谱分析仪的基本要求是频率覆盖中频范围, 因此本系统选择了一款性价比非常高的中频数字频谱仪 RIGOL-DSA800, 频率范围 9 kHz 至 1.5 GHz, 最小分辨率带宽和视频带宽为 100 Hz。2 台频谱分析仪可以同时监测 2 路中频信号, 通过切换开关矩阵, 具有多路信号监测的功能。

5) 频谱监测工作站: 工作站上运行频谱监测软件。工作站是一台 PC 机, Windows XP 操作系统, 安装 Agilent IO 驱动库, 通过网络或者 GPIB-USB 转接器与频谱仪连接。频谱监测系统搭建好后, 用户只需在工作站上打开频谱监测软件, 选择中频信号后, 开始进行频谱监测。

根据多年人工监测频谱的经验和实际应用需求, 频谱监测系统具有如下功能:

1) 频谱显示: 完成两台频谱仪频谱轨迹的采集, 并集中显示在同一个屏幕上, 具有单屏显示和双屏显示切换功能, 频谱采样率要达到每秒 5 帧。

2) 频谱仪控制: 完成对两台频谱仪参数的远程控制。

3) 中频信号切换: 完成下行链路中频信号和测试中频信号的选择, 改变频谱仪的输入, 实现多路信号的监测。

4) 异常信号检测: 完成频谱中异常信号的自动检测, 并给出提示和报警。

5) 频谱录像和回放: 完成对频谱的实时录像存储, 并可以回放录像文件, 单个录像时长达到 1 小时以上。

6) 遥控命令自动捕获: 完成最小持续时间 1 秒的遥控信号频谱的自动捕获, 为卫星发射提供技术支持。

7) 数据记录: 完成频谱中光标处频率和幅度的纪录并保存成文件, 供后续分析。

2 频谱监测系统软件设计

频谱监测系统软件流程图如图 2 所示, 频谱显示的数据源有两个, 分别是实时频谱和录像频谱。实时频谱监测的流程是打开相应的频谱仪配置文件, 连接频谱仪成功后, 实时读取频谱轨迹数据, 录像频谱回放流程则打开录像文件, 然后从文件中读取频谱轨迹数据, 二者都将对频谱轨迹进行遥控命令检测

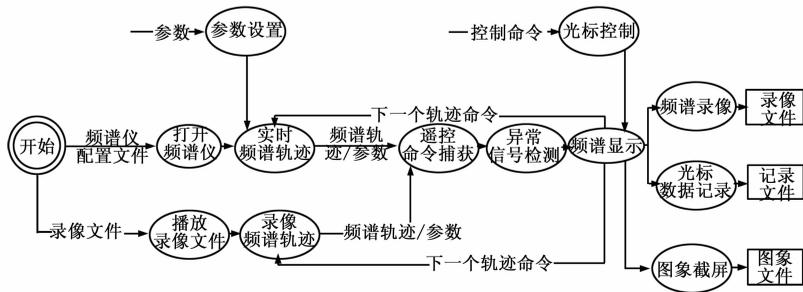


图 2 频谱监测系统软件流程图

和异常信号检测, 然后显示频谱, 频谱显示完成后, 触发实时读取或者从录像文件中读取下一个轨迹数据; 频谱显示时, 同时将频谱轨迹数据传递给录像、光标数据记录模块, 进行相应的处理。软件将在同一界面中显示 2 个频谱, 并实现播放、暂停、停止、切换中频开关矩阵、频谱参数设置、光标控制、图像截屏等功能。

软件体系结构如图 3 所示, 按照分层模块化思想设计^[4], 对硬件设备封装成相应的独立模块, 频谱显示模块为核心模块, 其他各子功能封装成相对独立的模块, 该体系结构优点是整个软件体系结构清晰, 接口相对明确, 便于维护和修改。

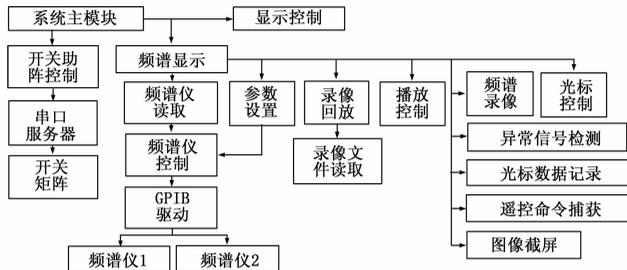


图 3 频谱监测系统软件体系结构

系统主模块是系统的入口模块, 负责产生系统的主界面, 调用频谱显示模块、开关矩阵控制和显示控制模块, 并响应用户的鼠标键盘响应, 实现系统与用户的人机交互; 频谱显示模块是系统中最主要的一个模块, 通过调用其它子模块, 实现了系统中的主要功能, 对应实际的两个频谱仪, 系统中有两个频谱显示模块。频谱显示模块是一个控件类 TSPViewer, 继承 TPanel, 包含图表 TChart、文本 TLabel, 线条 TFastLineSeries 等显示元素, 还包含频谱轨迹数据、光标位置数据等其他数据变量等, 通过提供接口函数或者事件响应等完成与主模块和用户的交互。其中最关键的接口是更新频谱轨迹 SetSpData (double * SpData, int n, int SenderId), 输入为新的频谱轨迹, 处理流程是先拷贝频谱轨迹到内部频谱轨迹数据变量, 然后更新光标显示数据, 调用异常信号检测和遥控命令检测模块, 之后触发频谱更新消息, 从而进行频谱的重新绘制, 绘制完成后, 将频谱轨迹传递给录像、光标数据记录模块等, 并发送读取频谱下一个轨迹消息。

软件中关键的功能模块是频谱轨迹数据实时读取、异常信号检测、频谱录像与回放以及遥控命令捕获, 为实现这些功能, 本文设计了相关的处理算法, 下面详细介绍。

3 频谱监测处理算法

3.1 频谱轨迹数据实时读取

1990 年 Agilent 等公司制定了用于可控仪器标准指令 SCPI^[5-7]。SCPI 是用 ASCII 定义的树状分层结构的命令集, 用于测量仪器的指令语言, 分为 IEEE-488.2 公用指令和 SCPI 仪器特定的指令。公用指令语法格式为: “*”+关键字, 控制仪器的基本功能; 特定指令有命令和查

询两种，使用“:”作为关键字的分隔符。命令格式通常为关键字+空格+参数，查询格式通常为关键词+“?”。

例如，RIGOL-DSA800 的 SCPI 指令有：

```
* RST 重设置和清除设备的身份；
:SENSe:FREQuency:CENTer(?) 写(读)CF；
:FORMat:TRACe:DATA REAL,32;:TRACe:DATA? TRACE1
读取频谱轨迹数据。
```

目前，Agilent 公司已用 SICL 库来作为开发仪器控制程序的函数库。SICL 库不仅支持 VXI 总线仪器，也支持 HP_IB, GPIO, RS-232, LAN 等总线仪器。通过使用编程语言 C 或 VB 等可以方便地开发仪器控制程序。常用的 I/O 函数是

```
INST iopen (addr); int iclose (id);
int ifread (id,buf,bufsize,reason,actualcnt);
int ifwrite (id,buf,datalen,end,actualcnt);
```

本文对频谱仪设计了标准格式的配置文件，在配置文件中详细定义了每种功能对应的命令，可自定义配置文件，用户使用频谱监测软件打开配置文件，连接指定的频谱仪，实现频谱仪的即插即用功能。当软件在进行频谱监测时，后台频谱仪读取线程不间断的向频谱仪发送配置文件指定的控制指令和查询指令，然后读取频谱仪的响应数据，将数据发送给主模块更新频谱显示，显示处理完成后又进行下一次的频谱轨迹数据读取。

3.2 异常信号检测

异常信号主要是干扰^[5]引起的。在卫星长管或者早期轨道任务中，会出现干扰信号，有的是自身信号突然的降低或者增大，或者出现相邻的干扰信号，或者低噪的功率变大等。

异常信号检测方法是通过对临界线的方法来实现，分为两类临界线，分别是上临界线，下临界线，上临界线是某处频谱的最大边界；下临界线是某处频谱的最小边界。在检测之前，由人工在频谱图上任意的绘制上下临界线，形成信号的包络，系统自动比较信号是否超过包络，若发现信号超出包络，则认为出现异常干扰信号，主动提示或报警。临界线包络由一组直线组成，描述直线的 4 个参数是 k, b, l_x, L_x 。对应上下临界线包络，共有两组直线方程，如下：

$$\begin{aligned} \text{Line1: } & y_1 = k_1 x + b_1, l_{x1} \leq x \leq L_{x1} \\ \text{Line2: } & y_2 = k_2 x + b_2, l_{x2} \leq x \leq L_{x2} \\ & \vdots \\ \text{Line}n: & y_n = k_n x + b_n, l_{xn} \leq x \leq L_{xn} \end{aligned} \quad (1)$$

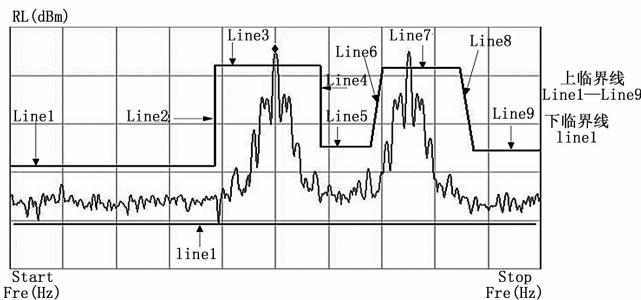


图 4 异常信号检测临界线

当在频谱图上绘制包络时，根据直线的两个端点位置计算出对应的频率、功率值，分别表示成 $(f_1, p_1), (f_2, p_2)$ ，根据这两个点即可计算出直线参数 k 和 b 值， $l_x = \min(f_1, f_2), L_x = \max(f_1, f_2)$ 。

频谱数据更新时，触发异常信号检测，流程如下：

- (1) 对所有的频谱数据进行依次检测；
- (2) 假设当前频谱数 D 据为频率 x ，幅度 y
- (3) 根据上临界线方程组，计算

$$U(x) = \min_{i=1}^{n1}(y_i), \text{ if } l_{xi} \leq x \leq L_{xi} \quad (2)$$

- (4) 根据下临界线方程组，计算

$$D(x) = \max_{i=1}^{n2}(y_i), \text{ if } l_{xi} \leq x \leq L_{xi} \quad (3)$$

- (5) 如果 $D(x) \leq y \leq U(x)$ 不满足，则信号异常。

3.3 频谱录像与回放

无论是频谱仪还是软件频谱监测系统，目前的频谱数据记录方式大体只有 3 种：图像保存、频谱轨迹以及第三方软件视频录像。图像保存的方法是将频谱保存成一张图像，该方法简单实用；频谱轨迹的方法是将频谱的轨迹数据和参数保存成原始的数据文件，供后续调用，该方法解决了图像方法不能进行数据分析的缺点，但是这两个方法都只能单幅频谱的保存，无法进行连续的大量的频谱记录；采用第三方软件视频录像的方法，对频谱显示界面进行录像，可以进行连续频谱记录，但缺点是需要占用的空间较大，另外视频录像也无法进行数据的分析。

综合上述三种方法的优缺点，设计了一种新的频谱录像的方法，可进行连续的频谱数据记录，支持后续的数据分析，而且需要的空间也是在合理范围内。该方法扩展了频谱轨迹的方法，按帧存储频谱轨迹数据；每秒存储若干个频谱帧，称为每秒帧数，也即采样频率。存储频谱的轨迹数目称为通道数，默认是 1 通道，可以是 2 通道。每个数据点用 2、4、8 个字节表示，每个点需要的位数称为量化位数。频谱轨迹数据值为功率值。频谱录像数据保存为一个文件，文件后缀为 .SWAV，符合 RIFF 规范。所有的 SWAV 都有一个文件头，描述了频谱流的编码参数。数据块的记录方式是 little-endian 字节顺序。文件格式如下：标志频谱参数格式参数轨迹数据块录像的过程是根据采样率，每秒自动存储 sample 个频谱轨迹数据帧，在录像结束后，添加相应的文件头部合并成最终的录像文件；录像停止的方式有人工停止、按时间自动停止和按文件大小自动停止。当操作员打开频谱录像文件时，软件首先对文件进行合法和格式上的验证，验证通过后，根据指定的参数和播放速度，对频谱轨迹数据进行连续的读取并更新频谱显示，从而实现频谱的录像回放功能。

3.4 遥控命令捕获

在卫星发射过程中，经常要求捕获遥控命令的频谱，然而有的遥控命令持续时间只有 1~3 s，人工捕获存在难度，以往的做法是视频录像，然后再截图。该模块通过检测频谱的变化实现遥控命令自动捕获。捕获算法要能够在尽量短时间内完成捕获。捕获时，将上行中频信号接入频谱监测系统中，从而可以监测来自基带的遥控信号。

考虑到一般在发送遥控信号前, 上行信号处于纯噪声或者单载波状态, 因此设计了如下的近似判别算法。TC SPAN 定义遥控信号带宽, 一般是 0.8 MHz, 在该带宽内, 当前频谱实际数据点数为 N , 底噪的噪声密度为单位频率内的噪声功率值, 其最大值定义为 NMD , 实际应用中, 不需要精确的 NMD 值, 只要给出一个近似的 NMD 值, 通过该 NMD 值能够区分出是噪声点还是信号点。近似判别算法是:

- 1) 初始 $n=0$, 针对 N 个 TC SPAN 范围内的频谱数据点, 依次进行如下比较;
- 2) 若当前点幅度值大于 NMD , 则 $n++$;
- 3) 统计完后, 若 $n/N \geq 2/3$, 则判别存在遥控命令, 否则不是遥控命令;
- 4) 若是遥控命令, 则进行相应频谱保存和处理。

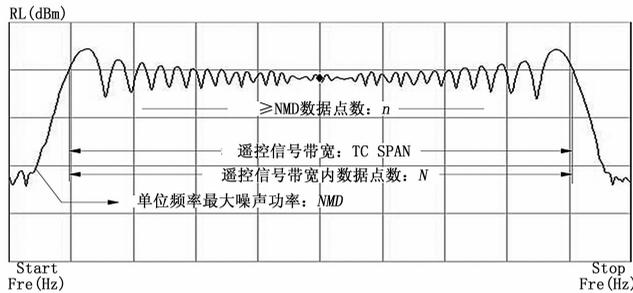


图 5 遥控命令捕获

虽然该算法不是精确的遥控命令判别, 但是在实际应用中, 频谱信号的状态只有纯噪声、单载波、遥控命令或者他们的中间不完全状态, 因此该算法是有效的。同时该算法只对 TC SPAN 范围内频谱点数进行比较运算, 算法需要的时间非常短, 在实际应用中得到了很好的验证。

4 试验结果与分析

频谱监测的基础是重复不断的刷新频谱轨迹数据的显示, 刷新时间定义为从开始当前频谱轨迹的更新显示到下一个频谱轨迹的更新显示这一时间间隔。刷新时间描述了频谱监测系统的频谱刷新速度, 刷新时间越短, 刷新速度越快, 频谱监测系统实时性越高。刷新时间主要包括两部分, 分别是读取频谱仪轨迹的响应时间和计算机处理频谱更新显示的时间。读取频谱仪轨迹的响应时间跟实际频谱仪的性能有关; 计算机处理频谱更新显示的时间受到计算机性能制约。

本文设计了如下的刷新时间测试试验。计算机平台是 Windows XP, CPU@3.3Gx2, 3G RAM, 分别使用 3 个类型的频谱仪进行试验, 包括 RIGOL-DSA800、Agilent8562EC 和 HP8566B。监测系统中各频谱处理功能定义如下: ①纯频谱实时监测; ②异常信号检测; ③频谱录像; ④遥控命令捕获。试验时分别打开各频谱处理功能, 测试各次的平均刷新时间。平均刷新时间是连续的 100 帧频谱轨迹的刷新时间的平均值。频谱仪的参数均设为 RBW: 10 kHz; VBW: 1 kHz; SPAN: 2 MHz。

表 1 平均刷新时间测试 (ms)

	①	①+②	①+③	①+④	ALL
RIGOL-DSA800	97.5	97.9	98.3	98.6	99.2
Agilent8562EC	106.1	106.4	106.9	107.1	107.8
HP8566B	195.9	196.9	197.2	197.8	197.8

表 1 测试结果说明:

1) 频谱监测系统的刷新时间最小是 97 ms, 最坏是 197 ms, 每秒采样 5~10 个频谱轨迹帧, 达到设计要求。不同类型的频谱仪的性能制约刷新时间。

2) ②③④频谱处理功能的使用, 对刷新时间的影响非常小, 可以或略, 证明异常信号检测功能能够检测到瞬间的异常信号, 同时说明遥控命令捕获功能也能够捕获到 1 秒时长的遥控命令。

3) 频谱监测系统能够支持多种类型的频谱仪, 只要该频谱仪具有 SCPI 标准指令集。

本文还设计了频谱录像试验, 平台与上面一样, 设置采样率 5 f/s, 频谱点数 601, 量化位数 16, 进行 10 天连续的录像, 每 12 个小时自动生成一个新文件。生成的录像文件大小约 250 MBytes, 总共占用硬盘空间 5 000 MBytes。该试验结果说明, 频谱录像模块稳定可靠, 需要的硬盘空间在可接受范围内, 满足长时间录像的需求。

5 结论

卫星测控站频谱监测系统实现了对射频链路中频信号的自动监测, 解决了人工监测模式效率低、实时性差、无频谱信号自动化处理等问题; 同时它实现了异常信号检测、频谱录像与回放以及遥控命令自动捕获等功能, 满足了测控站在卫星长管和卫星发射中的实际需求。该系统经过了三颗卫星发射支持任务和近一年的卫星长管的考验, 证明系统是稳定可靠的, 提出的新算法是实用有效的, 具有很大的扩展性和推广价值。

参考文献:

- [1] 昂正全, 任宇辉, 刘嘉栋. 一种可编程链路测试系统的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2011, (10): 2344-2346.
- [2] 汪宏武, 鄂志东. 计算机辅助频谱监测系统在卫星通信系统中的应用 [J]. 技术应用, 2006, (4): 50-51.
- [3] 李勇, 张艳娥, 孙谦. 一种卫星频谱监测系统设计方案及实现 [J]. 空间电子技术, 2008, (3): 77-80.
- [4] 张增, 刘玉军. 电磁环境频谱监测软件的设计与实现 [J]. 信息技术, 2011, (11): 30-31.
- [5] 顾大权, 王晓, 汪洋. 基于 VISA 和 SCPI 的多点数据测量系统 [J]. 仪表技术, 2011, (1): 1-6.
- [6] 方杰, 黄洪, 郑荐中, 等. 基于 SCPI 的闪变测量仪测试系统研究 [J]. 质量技术监督研究, 2011, (2): 49-50.
- [7] 杜秀伟, 王前程. SCPI 语言解析器的设计与实现 [J]. 电子质量, 2008, (8): 23-25.
- [8] 戴雪扬, 徐辉. 卫星干扰监测技术的研究 [J]. 计算机测量与控制, 2005, (12): 1305-1332.