

频谱分析仪的模拟解调功能软件设计

丁 鹏¹
DING Peng

摘 要

模拟调制参数的测量主要用于信号发生器的模拟调制计量检验、FM 或 AM 发射机的性能测试。传统的使用模拟解调器或者频谱分析仪进行调制信号测量的方式已经不能满足高精度的计量检验要求。提出一种基于频谱分析仪的全数字的模拟信号解调分析方法,将 FPGA 采集到的中频 IQ 数据直接发送给上层主机软件,由上层主机软件负责整个信号的解调,并显示解调结果。所提出的方法使用了全数字的解调模式,大大降低了 FPGA 的存储量及工作量,且可同时显示射频图谱、音频图谱、音频波形,直观显示模拟信号的解调结果。

关键词

频谱分析仪;模拟信号;解调分析;IQ 数据;软件设计

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.06.023

0 引言

模拟解调是模拟调制的反过程,对调制参数的精确测量可以为模拟调制发射机和信号发生器提供有效可靠的检验手段。模拟解调不仅在 FM 或 AM 发射机的测试中是必须的,即使在现代的数字世界中,对来自数字调制发射机的无意模拟调制,模拟调制测量的应用也有助于故障排除。早期用于模拟调制测量的仪器,可以测量信号发生的 AM 和 FM、寄生和剩余 AM、FM 及相位调制和载波噪声等。但接收机内部的带宽、解调器等模块都是由模拟电路实现的,模拟处理电路存在模拟器件老化、温漂等现象,会给测量带来带宽切换不确定度、刻度保真度和增益不确定度等误差,无法保证测量的稳定性和一致性。

使用频谱分析仪也可以进行模拟调制信号的测量和分析^[1]。对 AM 信号的测量,可以在时域或频域中进行。时域的测量需要将频谱仪作为固定调谐的接收机使用,即在零频宽模式下恢复载波信号上的幅度调制信号。频域的测量需要在频谱中读出载波和边带的幅度、频率值。但对于 FM 信号,频谱仪就无法直接测得调制指数,并且由于仪器前端射频硬件接收通路中 YTF (YIG 调谐带通滤波器) 等模拟电路的性能限制,会给测量结果引入误差。同时在测量信号频率和幅度值时精度不高,在小分辨率带宽下的测量非常耗时。这些问题都会影响模拟调制测量的精度。另外,频谱仪不具备专门的调制参数显示界面,需要手动进行测量设置,非常不方便。

1 基本原理

为了克服现有技术中存在的缺陷,基于频谱分析仪平台,本文提供一种利用上层主机软件来解调模拟信号并直观显示解调结果的方法,原理如图 1 所示。

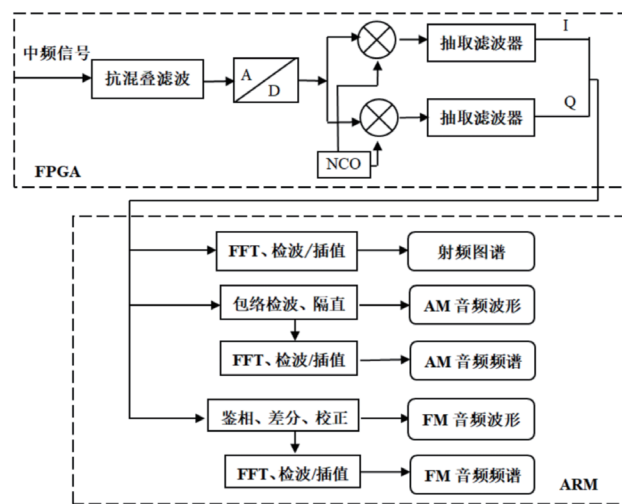


图 1 基本原理框图

具体步骤如下。

步骤一：中频信号首先进入抗混叠滤波器，滤除产生混叠的频率信号，然后经 AD 采样转化为数字信号。

步骤二：经过 AD 量化的数据利用数字下变频器将信号分解为 I 和 Q 分量，IQ 分量经多级滤波器抽取，然后由 FPGA 送入 ARM 中由上层主机软件处理，最后滤波器的带宽及抽取比根据设定的解调带宽来确定。这里的解调带宽并不是指信号的 3 dB 带宽，而是在保证相位和幅度没有失真的情况下的有用带宽。对于 AM 信号，解调带宽需要包含载波

1. 中电科思仪科技股份有限公司 山东青岛 266555

及两个边带信号，载波和边带的频率间隔就是调制速率，因此 AM 的解调带宽需要满足 2 倍的调制速率。对于 FM 信号，最大频偏和解调带宽是不同的，它的频谱可以说是无限宽的。根据卡尔森法则^[2]，调频带宽近似为调制速率与最大频率偏移之和的 2 倍，因此存在以下关系。

- (1) AM: 解调带宽 $\geq 2 \times$ 调制速率
- (2) FM: 解调带宽 $\geq 2 \times$ (频率偏移 + 调制速率)

步骤三：主机软件对 IQ 数据分三路进行同时解调处理，分别生成射频频谱、音频波形、音频频谱。

步骤四：主机软件采用多线程编程，分为数据采集和处理线程、画图线程。数据采集和处理线程负责采集 FPGA 发送的 IQ 数据并做解调。画图线程负责同时显示射频图谱、音频波形、音频图谱及调制参数的解调结果。

2 实现

要实现整个模拟解调软件，需要几个模块配合来完成从数据采集到解调再到界面显示的过程。首先是数据采集模块。数据采集模块需要持续地从 FPGA 中读取 IQ 数据，因此需要开辟一个独立的线程来实现此模块，此线程启动后一直等待 FPGA 的中断信号，当接收到 FPGA 中断信号后，表示有新的 IQ 数据到达，便读取 IQ 数据，将 IQ 数据存储到一个数组中，然后继续等待中断信号。第二个模块是参数配置模块。参数配置模块负责接收用户的参数配置信息，提供参数配置菜单供用户使用，因为后续对于 IQ 数据的解析都要基于用户的参数配置来执行，所以参数配置模块是一个非常重要的模块。第三个模块是解调模块。该模块基于用户配置参数对 IQ 数据进行解调，主要运用一系列解调算法，如 FFT、检波、插值等算法将 IQ 数据解调为射频数据、音频数据、波形数据及各个解调参数的结果。第四个模块是显示模块。该模块持续读取解调结果并显示到界面中，此模块需要开辟一个绘图线程，用于持续绘制解调结果，将解调结果以不同维度直观地显示给用户。

首先介绍参数配置模块的实现。频谱分析仪实现模拟信号的解调，正确的参数设置是一个重要因素，模拟解调功能参数设置菜单包含中心频率、解调带宽、射频图谱扫宽、音频波形显示时间、音频图谱扫宽几个参数。中心频率用来设置解调的信号频率，解调带宽决定了 FPGA 端滤波器带宽，射频图谱扫宽决定了分析信号（含载波）的频谱图的宽度，音频波形显示时间决定了解调出来的信号的时域数据长度，音频图谱扫宽决定了解调出来的信号的频域波形的宽度。

基于上述各个配置参数，设计软件菜单结构，主要包含射频图谱菜单、音频图谱菜单、音频波形菜单、基本参数菜单。

主要菜单结构如图 2 所示。



图 2 菜单结构图

基本参数菜单设置频谱分析仪的基本参数，其中中心频率菜单项设置频谱分析仪的中心频率，此中心频率应设为要解调的信号频率。中频带宽菜单项用于设置要用于解调信号的带宽，即解调带宽。参考菜单项用于设置显示射频图谱时的参考位置，此菜单用于调节频谱图的纵轴显示位置，使频谱图更好地显示在图谱界面中。衰减菜单项用于设置频谱分析仪的衰减器，当要解调的信号强度较大或较小时，可通过衰减来控制信号，提高信号的解调准确度。显示方式菜单项用于设置解调结果的显示方式，可以独立显示射频图谱、音频图谱、音频波形中的某个界面，也可以同时显示三个图谱。

射频图谱菜单包含扫宽和分辨率带宽两个菜单项。其中扫宽菜单项用于设置射频图谱要显示的频谱宽度，方便用户更好地观测要解调的信号频谱图。分辨率带宽菜单项设置射频图谱的分辨率，通过调节此参数，可以分辨不同粒度的信号，当信号频率接近时，可通过减小分辨率带宽来区分不同频率信号。

音频波形菜单包含扫描时间和刻度 / 格菜单项，扫描时间菜单项设置解调出来的音频波形要显示的时间跨度。刻度 / 格菜单项用于设置音频波形纵轴的刻度，方便用户更好地显示波形形状。

音频图谱菜单包含扫宽和分辨率带宽菜单项，扫宽菜单项设置解调出来的音频图谱的显示宽度，分辨率带宽菜单项设置解调出来的音频图谱的分辨率。通过调节此参数，可以分辨不同粒度的信号，当信号频率接近时，可通过减小分辨率带宽来区分不同频率信号。

在参数正确配置后，进入软件的解调模块。该模块对 IQ 数据直接做 FFT 变换，并检波或插值后生成 AM/FM 射频图谱数据。FFT 变换的点数和系数根据用户设置的解调带宽及射频图谱的分辨率带宽来调整。数据采集模块采集到的 IQ 数据数量是庞大的，而经 FFT 变化后的频谱数

据量依然庞大，要将这些数据全部显示到射频图谱中，势必会造成绘图速度变慢。另外，将射频图谱数据全部显示也是不必要的，例如要将 10 000 个点的频谱数据显示到只有 1000 像素的图谱中，完全是没有必要的，因为每个像素点有 10 个数据重合显示了，所以此处要将频谱数据检波后再显示，检波算法采用峰值检波，即在 10 个重合数据中取一个最大值来显示。

对 IQ 数据做包络检波，即求 I 与 Q 的平方根。因包络检波后的信号含有直流分量，得到 IQ 数据的瞬时幅度后，滤掉直流分量，调幅信号被正交解调出来，最终可生成 AM 音频波形。对经过包络检波和隔直的信号做 FFT 变换、检波或插值，生成 AM 音频图谱。此处 FFT 变换的点数和系数由用户通过菜单配置的音频图谱分辨率带宽决定，检波算法采用峰值检波。由音频波形可通过过零检测法^[3]求得信号的调制率和调制深度。音频波形的显示时间跨度由用户设置的音频波形扫描时间决定。

根据 FM 解调的基本原理，首先对 IQ 分量之比值做反正切运算^[4]，得到瞬时相位值，对瞬时相位值求导数，即根据 I、Q 两路前后采样数据求得前后两个采样点的相位差，即差分，再除以采样点时间间隔即可得到原始调制信号，再画出 FM 音频波形。对求得的原始调制信号做 FFT 变换^[5-6]、检波或插值，生成 FM 音频图谱。此处 FFT 变换的点数和系数由用户通过菜单配置的音频图谱分辨率带宽决定，检波算法采用峰值检波。由音频波形和音频图谱可很容易地求得 FM 信号的调制率和调制频偏。

要想实现准确的 FM 信号解调，差分鉴频还必须满足以下要求。

(1) 相邻的 2 个相位值之差应限制在 2π 内，否则会出现相位跳变。

(2) 当相位差大于 2π 时，应进行模 2π 处理。

在完成对 IQ 数据的解调后进入显示模块，该模块负责将解调结果及时显示出来。为了使解调算法求得的解调结果及时显示给用户，软件采用多线程设计^[7]，绘图线程与解调线程同时执行，在数据采集、数据解调的同时进行解调结果的绘制，保证了解调结果快速及时地显示到界面。解调结果的界面显示设计为多种显示方式，包括射频图谱、音频图谱、音频波形分别独立显示和同时显示两种方式。考虑到在显示各个图谱的同时要显示解调参数的解调结果，设计界面在显示单个图谱时，图谱在上方显示，解调结果在下方显示。在同时显示三个图谱的时候，将显示区域一分为四，解调参数在第四象限显示。两种显示方式如图 3 和图 4 所示。

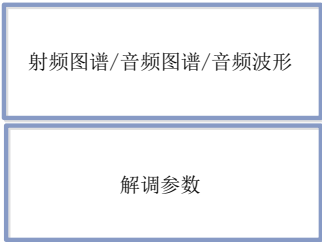


图 3 单一图谱显示界面



图 4 三大图谱同时显示界面

单一图谱显示界面只显示某个图谱的解析结果，每个图谱绘制区域较大，用户可更细致观察某个图谱的频谱图或波形图。三大图谱同时显示界面可同时显示三个图谱，每个图谱显示区域变小，但用户可同时查看载波信号的频谱图、调制信号的频谱图、音频波形、参数解调结果。两种显示界面可满足用户不同的观看解析结果的场景需求。

在三大图谱同时显示界面中，用户有分别查看每个图谱的需求，此时界面需要有标识当前用户查看的图谱的功能，因此在用户通过触摸屏单击选择某个图谱时，将该图谱外框高亮显示，且此时显示的光标数据信息便是该选中图谱上的信息。用户在双击某一图谱时切换到单一图谱显示界面，同样在单一图谱显示界面双击，可切换到三大图谱同时显示界面，此设计可使用户方便地切换不同显示界面，提高用户体验度。

界面显示的主要解调参数如下。

- (1) 载波功率：整个载波信号的功率。
- (2) 调制率：加到载波上的调制信号的频率。
- (3) 正峰值：调制深度 (AM) 或是调制频偏 (FM) 的最大值。
- (4) 负峰值：调制深度 (AM) 或是调制频偏 (FM) 的最小值。
- (5) 峰峰值 /2：调制深度 (AM) 或是调制频偏 (FM) 的平均值。
- (6) 均方根值：调制深度 (AM) 或是调制频偏 (FM) 的均方根值。

3 测试

测试环境需要配置一台信号源用于产生模拟信号，将

信号源的输出连接到频谱分析仪的射频输入口, 设置信号源频率 1 GHz, 功率 -20 dBm, AM 调制率 3 kHz, 调制深度 30%, FM 调制率 1 kHz, 调制频偏 10 kHz, 设置频谱分析仪的解调带宽为 30 kHz, AM 解调结果如图 5 所示, FM 解调结果如图 6 所示。此处需要注意的是解调带宽的设置需满足本文第 2 节对解调带宽设置的要求, 否则解调结果的准确度会受影响。

从图 5 可以看出, 软件测量出了 AM 信号的载波功率, 分析出调制信号的调制率为 3 kHz, 调制深度为 30% 左右, 调制率和调制深度的解调准确度达到 95% 以上。从三个图谱中可直观看出解调出的 AM 信号的时域波形图、频谱图以及载波信号加调制信号的频谱图。

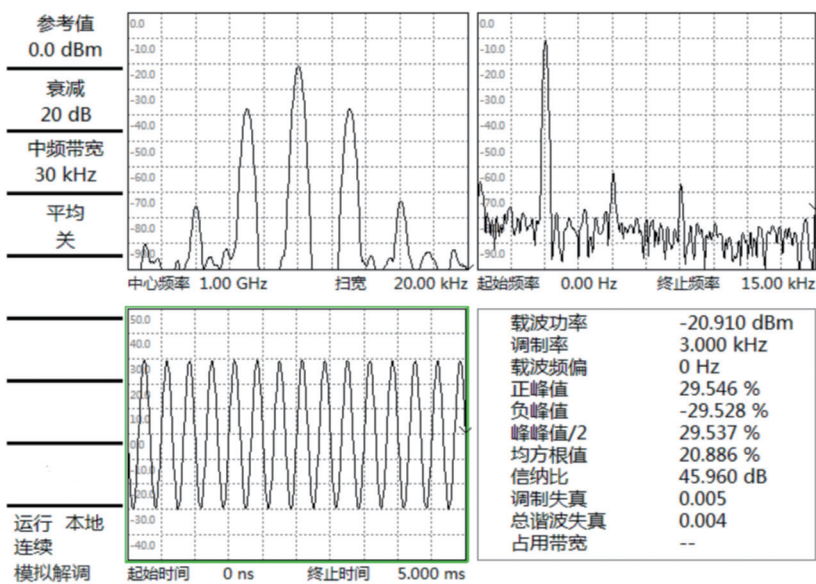


图 5 AM 解调结果图

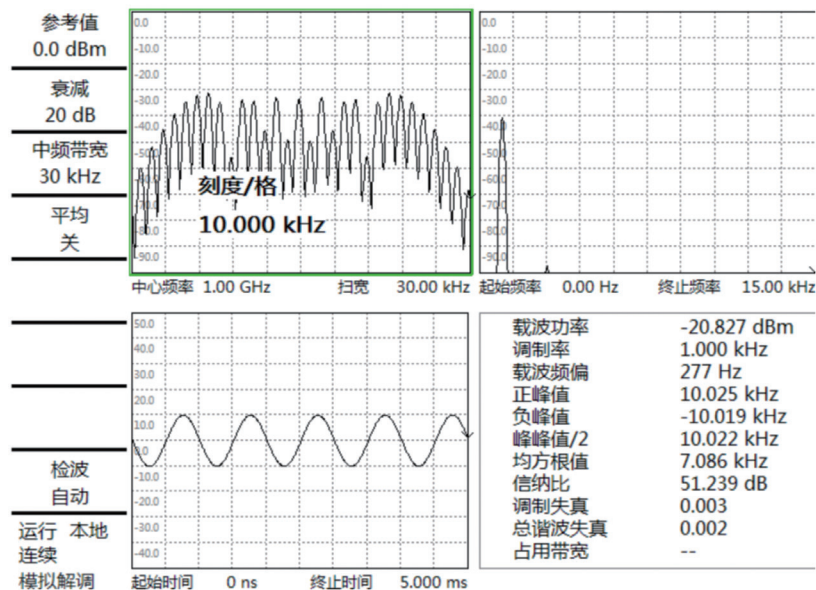


图 6 FM 解调结果图

从图 6 可以看出, 软件准确地测量出了 FM 信号的调制率为 1 kHz, 调制频偏 10 kHz, 调制率和调制频偏的解调准确度达到 95% 以上。从三个图谱中可直观地看出解调出的 FM 信号的时域波形图、频谱图以及载波信号加调制信号的频谱图。

5 结论

基于手持式频谱分析仪平台, 实现模拟解调功能软件, 该软件配合频谱分析仪硬件平台可实现对模拟信号的解调分析。模拟信号的解调和参数计算由上层模拟解调功能软件负责, FPGA 只需提供一组 IQ 数据, 大大节省了 FPGA 的存储空间, 解决了 FPGA 存储空间紧张的问题。依据用户设置的配置参数, 模拟解调功能软件运用解调算法将 IQ 数据依次

解调, 并将解调后的时域波形、频域波形及解调参数结果直观地显示在界面上。上层软件解调信号有更多的灵活性, 运用多线程编程实时显示调制信号的射频图谱、音频波形、音频频谱及各个调制参数的测量结果, 使用户可从多个维度直观地观察解调结果, 同时解调结果的准确度也达到了令人满意的效果。

参考文献:

- [1] 顾晓明. 频谱分析仪测量调幅、调频 [J]. 长岭技术, 2005(4):33-37.
- [2] 钟苏. 通信测试仪器 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2009.
- [3] JAMES T. 宽带数字接收机 [M]. 杨小牛, 陆安南, 金飏, 译. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- [4] 张超, 许建华, 战云. FM 调频偏移高精度测量方法 [J]. 电子测试, 2016,(19):41-44+79.
- [5] 王仁明. 信号与系统 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1994.
- [6] 邹理和. 数字信号处理 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1985.
- [7] SUMMERFIELD M. Qt 高级编程 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2018.

【作者简介】

丁鹏 (1987—), 男, 山东青岛人, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 嵌入式软件开发、频谱分析仪软件开发。

(收稿日期: 2024-05-06)