

信号分析仪中矢量信号分析设计

周钦山

(中国电子科技集团公司第41研究所电子测试技术重点实验室 青岛 266555)

摘要: 针对通信信号的矢量分析测试需求,借鉴国外先进仪表的解决方案,在高性能信号分析仪中开发了矢量信号分析功能。首先对输入信号进行超外差变频接收和 A/D 采样,然后在 FPGA 中完成高速数字下变频和数据整数倍抽取滤波,最后在上层应用软件中完成高精度数据重采样、宽带时域修正滤波、瞬态分析和前馈数字解调等多域矢量分析,并通过多级方式实现多域测试结果的配置和同步显示。实测结果表明采用本方案设计的矢量信号分析指标优异、配置灵活、测试结果丰富多样。

关键词: 信号分析仪;矢量信号分析;误差矢量幅度

中图分类号: TN911.6 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4030

Design of vector signal analysis in signal analyzer

Zhou Qinshan

(Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, The 41st Institute of CETC, Qingdao 266555, China)

Abstract: According to the demand of vector analysis of communication signals, and the solution of advanced foreign instruments, the vector signal analysis function is developed in the high performance signal analyzer. First the input signal is received by super heterodyne conversion and AD sampling, and then high speed digital down conversion and integer ratio decimation are completed in FPGA, finally, the application software performs high-precision resampling, time-domain filter correction, transient analysis and feed-forward digital demodulation, and realizes multi-domain test and synchronous display by way of multistage configurations. The experimental results show that the vector signal analysis based on this scheme is superior in function, flexible in configuration and rich in test results.

Keywords: signal analyzer; vector signal analysis; EVM

1 引言

随着瞬变和调制等复杂信号在通信中的广泛应用,需要分析信号的幅度、频率和相位瞬变特性,并对调制信号的调制参数和调制质量进行测试。国外领先的仪表厂商——是德科技和罗德施瓦茨公司分别在其 X 系列和 FSW 系列高性能信号分析仪平台上开发了矢量信号分析功能来解决上述测试问题,均具备多域同步分析和显示功能,且给出的 20 MHz 码元速率 QPSK 信号的 EVM 指标分别高达 0.7%^[1]和 2.0%^[2]。国内目前只有中国电子科技集团公司第 41 研究所研制的 AV5264 型通信矢量信号分析仪具备矢量分析能力,但其主要面向标准通信制式测

试,对通用调制信号进行宽带高精度、多域同步矢量分析在国内还是空白。本文在 41 所新推出的某型高性能信号分析仪上开发矢量分析功能,实现瞬变信号及通用数字调制信号的高精度灵活分析。

2 信号分析仪矢量分析原理

信号分析仪采用超外差式接收体制将输入信号与内置的本振混频到一个固定的中频,中频信号经过抗混叠滤波后进入 ADC 完成信号数字化,数字化后的信号进行数字下变频和抽取滤波为 I/Q 两路复数信号^[3],捕获到数据存储存储器中,然后利用矢量信号分析功能对信号特性进行全方位分析,如图 1 所示。

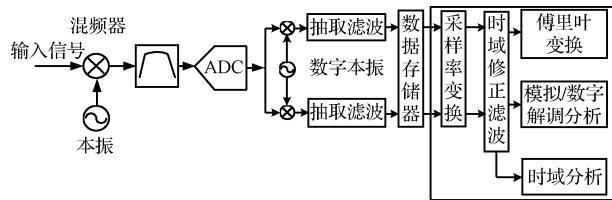


图1 信号分析仪原理

信号在分析仪中频部分被数字下变频为 I/Q 两路复数,幅度和相位信息被完整的保存了下来,为后续输出幅度和相位矢量信息提供了必要条件。矢量信号分析首先进行采样率变换以满足观察带宽及后续解调处理的需要,然后通过时域修正滤波消除因分析仪接收通道不理想导致信号产生的畸变失真,最后对修正后的数据进行时域分析、傅里叶变换以及解调处理等得到信号分析结果。其中,傅里叶变换得到信号频谱;解调处理包括模拟和数字调制分析,模拟解调可提供 AM、FM 和 PM 等模拟调制信号的解调结果,得到幅度、频率和相位随时间变化的曲线图,数字解调算法可对通用数字调制信号进行测量,获得解调解码结果、信道响应以及调制质量等多种测量结果。

3 矢量信号分析设计

随着数字信号处理和 ADC 速度的提高,以通用、标准、模块化的硬件平台为依托,通过软件编程来实现信号分析的各种功能,将测试仪器从基于硬件、面向用途的设计方法中解放出来,称为软件无线电架构^[4]。本设计借鉴软件无线电的开放式设计思想,基于标准化、模块化的统一硬件平台,通过 FPGA 程序实现数字下变频及抽取滤波等快速初步信号处理,利用软件良好的扩展升级特性对标准格式数据进行多功能信号分析,通过加载矢量信号分析功能组件进行多信号域的全方位详细分析,如图 2 所示。

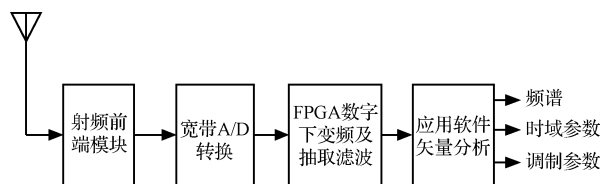


图2 矢量信号分析架构设计

矢量信号分析是为信号的多域多参数综合性测试而设计的,关键是要保证参数测试的全面性、信号分析的高精度以及灵活性,对处理分析的实时性没有太高要求^[5]。根据以上设计原则,下面论述矢量信号分析中几个关键模块的详细设计。

3.1 高速数字信号处理

高速数字处理完成离散采样数据的数字下变频和抽取滤波。ADC 后的宽带中频信号与正交的两路数字本振信号混频,把中频信号变频为零中频信号,得到两路正交

的 I、Q 信号。I/Q 信号经过抽取滤波改变信号带宽以适应用户频宽观察的需求,降低数据速率的同时也减少了相同时间的数据采样点,减小了后续信号处理的难度。本设计采用 100 MHz 采样时钟,中频 75 MHz,最高实现 40 MHz 的信号瞬时分析带宽。由于中频和采样率满足关系, NCO 数据只包含 0 和 ±1,周期为 4,可以采用高效的 2 倍数字下变频结构,有效降低数字下变频的复杂度。

在实现抽取滤波时,考虑到在 FPGA 设计中实现任意比率抽取速率的复杂度,综合考虑后端软件对采样数据处理的灵活性,本设计在 FPGA 中完成 I/Q 数据的整数倍抽取,小数倍抽取放在后端应用软件中进行。这样既降低了 FPGA 抽取的复杂度,又可以保证在完成一次数据捕获采集后,可以在不超出采集带宽的一定的范围内实现可变分析带宽,增强对信号分析带宽和数字解调处理的适应能力。整数倍抽取滤波采用已经比较成熟的多级 CIC 滤波器和半带滤波器、FIR 滤波器级联的方式实现。由于 CIC 滤波器具有不需要乘法器和系数存储器的优点^[6],运算效率较高,所以将其放在抽取级联的前端,实现高采样率数据的抽取。半带滤波器频率特性优于 CIC 滤波器,用在 CIC 滤波器的后端,如图 3 所示。

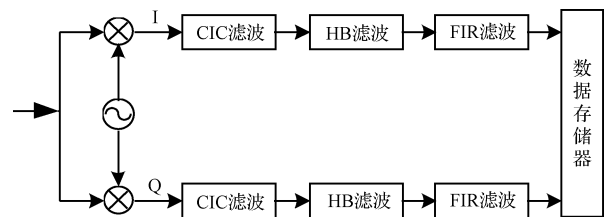


图3 数据率整数倍抽取

3.2 数据重采样

要获得任意扫宽,采样率必须是任意可调的,这由抽取滤波器之后的重采样插值滤波器来完成,内插滤波器的处理过程是利用已有的采样数据计算恢复出任意采样时刻的一个输出值。根据奈奎斯特采样定理,只要采样率满足要求,用采样得到的离散值 $x(nT_s)$ 就能重建出原信号 $x(t)$ 。

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nT_s)h_s(t-nT_s) \quad (1)$$

式中: $h_s(t)$ 为理想低通滤波器的冲激响应^[7],具体表示为:

$$h_s(t) = \text{sinc}(f_s t) = \frac{\sin(\pi f_s t)}{\pi f_s t} \quad (2)$$

由于 $h_s(t)$ 是 sinc 函数,从 $-\infty$ 到 ∞ 都有值,是非因果、物理不可实现的,需要对其进行截短并最大限度的逼近理想滤波器。在具体实现过程中,对截短的冲激响应进行加窗处理,以改善过渡带形状,提高带外抑制能力。本设计采用了 Kaiser 窗对 sinc 函数进行加窗,对 5 个过零点的 sinc 函数的带外抑制提高了 60 dB,带内纹波也明显变小,如图 4 所示。

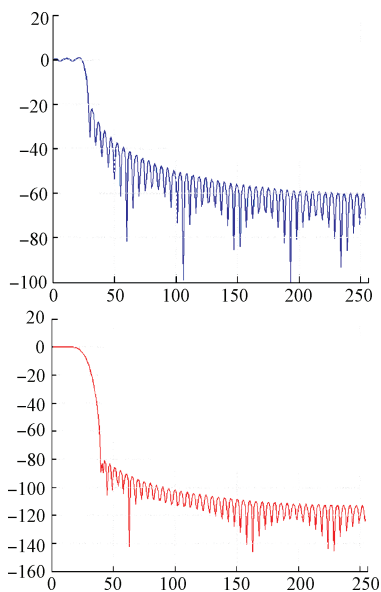


图4 sinc函数加窗频率响应对比

以 sinc 函数为系数的滤波器在每次重采样时需要重新计算滤波器的系数或者相当大的存储空间来预先存储系数,在硬件中很难实现。但本设计将重采样放到了信号分析仪应用软件中,且目前信号分析仪中的 CPU 模块和内存等硬件配置普遍比较高,其强大的处理能力可以轻松胜任数据的高精度重采样。

3.3 时域修正滤波

为了实现输入信号的变频和信号调理,信号分析仪通路前端设计了多级变频器、滤波器和放大器,这些器件的频率特性都不是平坦的,信号在传输过程中受到这些器件的影响,相位频率和幅度频率特性产生畸变,反映在数字调制信号解调的星座图上,就是原本在理想星座点上的信号,星座点的位置产生发散^[8],仪器剩余 EVM 指标因为接收通路的不理想特性而变差,导致信号分析仪测到的解调结果不能真实的反映输入信号的特性。因此必须补偿频率特性的失真,才能对信号的时频域及调制特性进行正确测量。

具体的实现方案是在校准得到整个通道带宽的频率响应数据后,截取用户观察带宽内的频响数据,在此部分数据基础上做样条插值,得到足够频率分辨率的频率响应数据,对此频率响应取反得到补偿频率响应数据,最后对补偿数据做反傅里叶变换,得到时域均衡滤波器的抽头系数^[9]。利用此滤波器与抽取后得到的采样数据做卷积修正通道的不理想特性,得到修正后的信号数据,输入后续分析模块进行处理。

本文采用 100 阶时域修正滤波器对信号分析仪 40 MHz 测量带宽之内的通路幅相特性进行了仿真修正,修正前后的频率响应曲线如图 5、6 所示。可以看出在修正前接收通路的幅度波动约为 3.0 dB 左右,修正后幅度波动明显变小仅为 0.4 dB,通路的相位线性度也得到了明显改善,仿真曲线如图 5、6 所示。

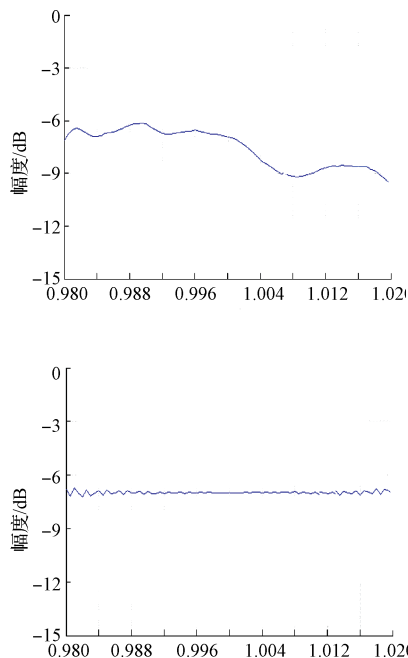


图5 通路幅频响应修正前后对比

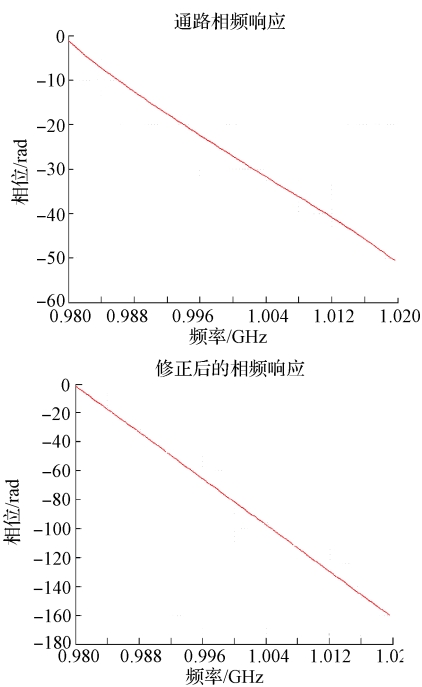


图6 通路相频响应修正前后对比

采用 RRC 滤波器,Alpha 系数为 0.35,25 MHz 码元速率的 QPSK 调制信号作为输入信号测试时域滤波修正的效果。设置信号分析仪分析带宽为 40 MHz 进行解调分析,如图 7 所示在未修正幅相特性之前星座点发散非常严重,此时 EVM 测试结果高达 20%,在完成上述的幅频和相频响应修正之后星座点明显收敛,EVM 改善为 1.2%。

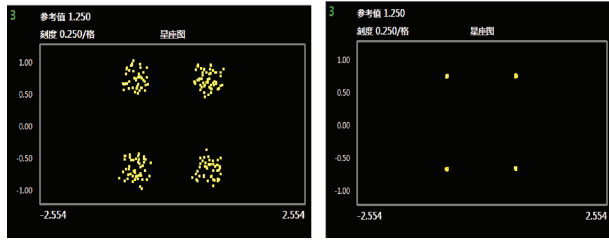


图7 修正前后矢量图对比

3.4 数字调制解调算法

信号分析仪的数字解调注重解调的高灵活性与快速性,支持各类解调参数的自由配置,在较少的数据量时也需要实现解调。由于传统接收机使用的闭环跟踪方式同步速度慢,甚至出现错锁的问题,闭环跟踪的解调方法不适合在信号分析仪中使用。为此采用前馈式数字解调方案,在精确估计定时误差、载波频偏、初始相位等参数的基础上通过前向修正上述接收误差,完成数字调制信号的高精度解调,解调模型如图8所示。

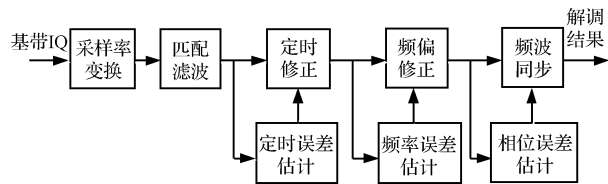


图8 前馈式数字解调模型

在前馈式数字解调结构中,除最前端要进行匹配滤波,消除码间串扰外,后续定时同步、载波同步等模块均包含误差估计单元和修正单元^[10],每种调制方式有不同的误差估计算法,但大致采用相同的误差校正单元。从解调模型中可以看出前馈式解调没有反馈式解调的自适应调整环路,而是采用独立的开环估计和修正模块,模块能更快的完成解调同步,非常适合在信号分析仪中应用。从实现效果来看,200个符号点即可实现QPSK信号解调。

3.5 数据处理和结果显示

矢量信号分析的数据处理部分流程复杂,测试结果非常多,因此分析结果及显示部分的设计采用数据、结果和显示3级配置的方式来实现测试结果及显示方式的灵活选择,其中数据配置包括:原始捕获数据、射频频谱、选时数据、音频频谱、模拟解调结果、数字解调频谱、数字解调结果、调制误差频谱、调制误差、参考信号频谱、参考信号;结果配置包括:实部、虚部、对数幅度、线性幅度、折叠相位、去折叠相位、群时延。显示方式可选择轨迹图、矢量图、星座图、眼图、格图及瀑布图显示。多级配置的方式既保证了分析结果呈现的全面性,又使得结果分类明确、条理清晰。

4 实现效果

矢量分析的精度尤其是数字解调EVM指标对信号

分析仪接收通道及数据处理算法有着极高的要求,反映在星座图上就是星座点越收敛信号分析仪矢量分析精度越高,如表1所示为采用本方案设计的矢量分析功能在1GHz中心频率处对QPSK调制信号的测试结果,实测结果达到R&S公司FSW的指标水平,稍逊于德科技N9030A给出的世界领先的EVM指标。如图9所示为矢量分析功能的射频频谱和解调同步测试界面,实现了预期的多域同步分析及显示的设计目标。

表1 测试结果

码元速率 /MHz	本方案测试结果/rms	是德N9030A指标/rms	R&S FSW指标/rms
1	0.5%	0.5%	0.5%
10	0.85%	0.5%	1.0%
20	1.0%	0.7%	2.0%

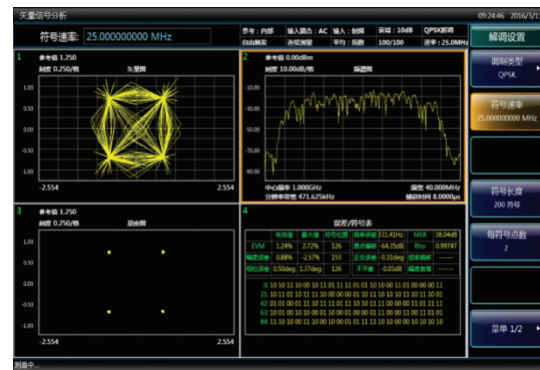


图9 矢量信号分析实现效果

5 结论

本文从矢量分析的测试需求和原理入手,在信号分析仪中实现了矢量信号分析设计,并重点对抽取滤波、重采样、时域滤波修正及解调方案等一些关键点的实现方案进行了论述,最后给出了矢量分析的实现效果。结果表明采用本方案设计的矢量信号分析性能指标优异,并可提供灵活多样的时域、频域和调制域的多域测试结果。

参考文献

- [1] 是德科技公司. PXA specification guide [M]. 2015.
- [2] R&S公司. Vector signal analysis specifications[M]. 2015.
- [3] 周钦山,张超. 微波信号分析仪多域关联分析技术[C]. 全国微波毫米波会议论文集,2015:1452-1455.
- [4] 杨小牛. 软件无线电原理与应用 [M]. 北京:电子工业出版社,2001.
- [5] 陈向民. 矢量信号分析中数字解调设计 [J]. 电子测量与仪器学报,2006, 20(5):98-102.
- [6] 刘美娟,许建华,张超. 实现任意采样率转换时变CIC滤波器的技术研究 [J]. 电子测量与仪器学报,2007, 21(增刊):131-135.

- [7] SMITH J O, GOSSETT P. A flexible sampling-rate conversion method [C]. Acoustics, Speech, and Signal Processing, IEEE International Conference on ICASSP, 1984: 112-115.
- [8] 陈向民. 幅相特性对矢量信号分析性能影响 [J]. 电子测量技术, 2005, 28(3): 1-3.
- [9] 胡广书. 数字信号处理—理论、算法与实现 [M]. 第二版. 北京: 清华大学出版社, 2003.

- [10] 张公礼. 全数字接收机理论与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.

作者简介

周钦山, 1982年8月出生, 工学硕士, 主要研究方向为信号分析仪、信号分析算法等。
E-mail: qszhou_001@163.com

美国国家广播公司奥运频道选择泰克作为音视频测试设备提供商, 制作 2016 年里约奥运会节目

泰克确保美国国家广播公司奥运部能够在转播 2016 年里约奥运会时提供优质信号

2016年5月19日,美国国家广播公司体育部下属的NBC奥运频道已经选择泰克提供音频、视频测试和质量监测设备,制作8月5日到8月21日在巴西里约热内卢举办的第31届奥运会节目。这一消息日前由美国国家广播公司奥运频道IBC工程副总裁 Terry Adams 及泰克科技公司视频产品线总经理 Charlie Dunn 共同发布。

奥运会节目制作非常复杂,要求测试和监测解决方案拥有最高的性能和可靠性,以保证为观众提供优质内容。为此,美国国家广播公司奥运频道将采用泰克 WFM7200、WVR7200、WFM5200 和 WVR5200 波形监测仪、SPG8000A 主同步发生器和主时钟基准发生器以及 Sentry 视频质量监测仪,为其传送里约奥运会节目提供支持。美国国家广播公司奥运频道将使用这些设备,监测和测试 NBC 奥运会设施制作、后期制作、传输和转播工作流程中使用的视频和内容的质量。对 UHD 应用,NBC 将使用 WFM8300 波形监测仪,其支持各种 UHD 格式和 ITU-R BT. 2020 宽色域(WCG)。

“NBC 选择泰克作为 2016 年奥运赛事节目的首席测试和质量监测解决方案提供商,我们感到非常激动。”Dunn 说,“奥运会这样的赛事每一秒都要求最优秀的测试测量设备,以优化和保持内容质量和业务的连续性。通过使用泰克提供的先进的视频监测和测量解决方案,美国国家广播公司奥运频道可以完全放心,确保其为观众提供最优质的体验。”

“在过去 8 届奥运会节目传送中,NBC 一直采用泰克产品。”Adams 说,“尽管同步发生和波形监测一直是重点,但在很大程度上看,过去几届奥运会中对传送流监测的需求一直在呈指数级增长。我们将采用分布在全国各地的 12 台 Sentry 仪器,监测里约生成的数百条实况制作和传送流。根据我们在伦敦奥运会和里约奥运会节目传送期间提出的要求,

泰克已经增加了许多新功能。在泰克科技的帮助下,我们期待着美国国家广播公司奥运频道再一次成功地转播本届奥运会盛况。”

美国国家广播公司奥运频道将采用泰克波形监测仪,监测所有视频和音频格式。NBC 选择的型号提供了全面的显示通用性和易用性,并拥有全功能音频监测功能,包括音频响度监测以及高性能眼图和抖动物理层测量。这些仪器将用于内容分发和广播传输期间的质量监测和一致性校验,用于内容制作和后期制作中的质量控制。这些仪器还将在奥运会设施安装和维护期间用于设备检验和调试。

美国国家广播公司奥运频道将使用泰克 SPG8000A 主同步发生器和主时钟基准发生器,保证为奥运会的移动通信、工作室、后期制作和广播业务提供稳定可靠的定时和同步源。该仪器将为视频设备检验、设施链路测试和显示校准提供多个视频和音频基准信号与 3G/HD-SDI 测试码型。SPG8000A 仪器还将配备 IEEE 1588 精密时间协议(PTP)支持,为通过 IP 传送的系统定时提供解决方案,逐渐迁移到基于 SDI 和基于 IP 的综合基础设施。

美国国家广播公司奥运频道将采用 Sentry 视频质量监测仪,实时监测其传送的体育赛事的体验质量,确保把优质视频传回美国。

作为美国国家广播公司体育部的下属机构,美国国家广播公司奥运频道负责制作、安排和推广 NBC 全球的奥运会节目。它因无可比拟的奥运传统、屡获大奖的制作及美国电视史上汇聚数量最大的观众而闻名。

若想了解美国国家广播公司奥运频道与 2016 年里约奥运会的赛事新闻有关的进一步信息,敬请访问:<http://nbcs-portsgroupspressbox.com/>