

# 矢量网络分析仪中频采集处理设计与实现

李敬 顾军 李晓慧

(中国电子科技集团公司第四十一研究所 青岛 266555)

**摘要:**设计了一种双端口矢量网络分析仪中频采集处理方案。利用单片 A/D 转换器代替多个或多路 A/D 转换器对双端口矢量网络分析仪 3 路中频信号进行分时数据采集,同时利用参考中频信号频率、相位稳定的特性,通过 FPGA 倍频、计数分频等方式,分别得到分时采集控制信号、采样时钟信号、NCO 参考时钟信号,利用中频锁相、分时采集控制等技术实现对可变中频的采集处理。试验结果表明,使用单片 A/D 转换器,可完成对 3 路中频的采集工作,同时印制板体积、功耗减少 2/3,动态范围达 100 dB,可实现对可变中频的数据处理。

**关键词:**双端口矢量网络分析;中频分时采集;可变中频处理

**中图分类号:** TM935 TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1010

## Design and implementation of IF acquisition and processing for vector network analyzer

Li Jing Gu Jun Li Xiaohui

(The 41st Research Institute of CETC, Qingdao 266555, China)

**Abstract:** A IF acquisition and processing program is designed for vector network analyzer with double ports in this paper. The monolithic A/D converter is adapting to instead of multiple or multi-channel A/D converters to acquire and process the three channel IF signals by time-sharing data acquisition technology in vector network analyzer with double ports. The time-sharing acquisition control signal, sampling clock signal and NCO reference clock signal are achieved by frequency multiplication and counting frequency division methods in FPGA according to the frequency and phase stabilization characters of reference IF signal. Then, the acquisition and processing for variable IF is realized by IF phase-locked and time-sharing acquisition control technologies. The experimental results show that with the monolithic A/D converter to acquire and process the three channel IF signals, the volume and power consumption of the PCB is reduced by 2/3, and the dynamic range is up to 100 dB. The program is suitable for variable IF processing.

**Keywords:** vector network analyzer with double ports; time-sharing IF acquisition; variable IF processing

### 1 引言

传统的双端口矢量网络分析仪,对 3 路中频信号的处理,目前常用的方法是每路单独处理,独立进行模数转换,需要至少 3 个 A/D 转换器,电路设计复杂,并且中频的频率是固定不变的<sup>[1]</sup>。目前,国内外各型号手持式、台式双端口矢量网络分析仪均采用多片 A/D 转换器实现对多路中频的采集处理。针对以上缺点,本文设计了一种基于单片 A/D 转换器的分时采集方法,使用相同的采样频率对 3 路中频信号进行分时采集,解决了电路板体积有限、多管脚连接器数据传输、可变中频频率信号采集处理等技术难题,减少了电路的体积、功耗,符合小型化、低功耗的

发展趋势,达到国内先进水平。

### 2 总体设计

传统的双端口矢量网络分析仪,对 3 路中频的采集需要多个或多路 A/D 转换器,电路设计复杂,功能控制、数据处理过程不易实现,且受采样时钟限制,中频固定不变。

本设计采用基于单片 A/D 转换器的数据采集方法,完成对 3 路中频的采集、处理,主要包含中频锁相、分时采集控制、采样、数据处理以及显示输出等模块。总体设计如图 1 所示。

参考中频信号 R 在 3 路中频信号中,信号的频率、相位最为稳定,最适合作为参考信号。因此,中频锁相模块

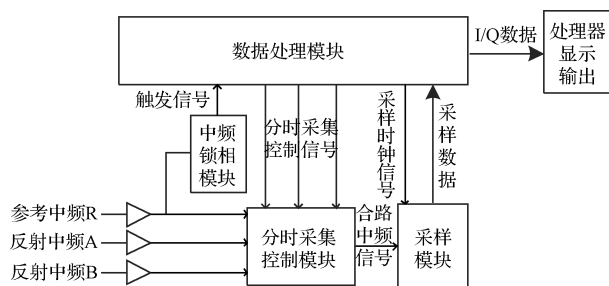


图1 总体设计

将其作为中频锁相环电路的参考信号,与锁相环输出信号进行频率和相位比较,输出控制电压驱动压控振荡器,得到触发信号。触发信号通过数据处理模块三分频处理得到分时采集控制信号,用于对三路中频信号采集进行开关控制,得到合路的中频信号,后续用于采样模块进行信号采样、传输等。A/D转换器采样时钟信号通过数据处理模块对触发信号进行计数分频方式处理得到,用于A/D转换器对合路的中频信号进行数据采集。由于触发信号、分时采集控制信号、采样时钟信号均是由参考中频信号R通过倍频、分频的方式获得,所以其频率均可随参考中频信号频率的改变而改变,从而实现对可变中频信号的采集处理。数据处理模块通过对采集后数字中频信号进行数字下变频,滤波后得到I/Q数据,传输至处理器完成S参数等显示输出等功能。

### 3 关键技术

#### 3.1 中频参考锁相设计

中频参考锁相模块主要功能是通过锁相环技术得到可随参考中频信号变化而变化的触发信号,进而得到采样时钟信号。传统的矢量网络分析仪中频频率是固定不变的,因此其采样率、数字下变频NCO频率也是固定不变的,若中频频率发生改变,可能会出现混叠或是需重新设计振荡频率等问题,从而无法实现对可变中频信号的采集处理工作<sup>[2-3]</sup>。针对以上缺点,本文设计了中频参考锁相模块,其特点在于使用参考中频R作为鉴相器的参考信号,分时采集控制信号、采样时钟信号以及NCO频率均可随参考中频信号频率改变而改变,实现对可变中频的数据处理。中频参考锁相模块设计如图2所示。

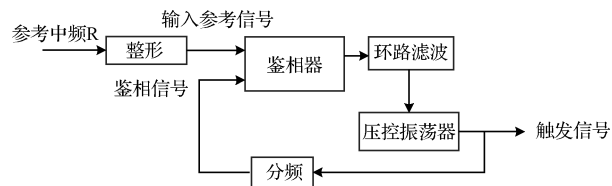


图2 中频参考锁相设计

中频锁相环的输入参考信号由参考中频信号R提供,经电压比较器进行整形处理后,输入鉴相器,作为鉴相的输入参考信号。反馈路由FPGA及缓冲器组成,将压控

振荡器输出的触发信号输入FPGA,经N分频处理得到鉴相信号,然后送回至鉴相器,与输入参考信号完成鉴相处理,得到控制电压。环路滤波电路由快速FET运算放大器构成,控制电压经环路滤波电路滤除高频分量和噪声后<sup>[4]</sup>,接入压控振荡器,控制压控振荡器输出触发信号,实现触发信号跟随中频信号的改变而改变。

#### 3.2 分时采集控制设计

分时控制模块主要实现3路中频信号合路功能。为实现单片A/D转换器对3路中频信号的数据采集,应保证合路后的中频信号在A/D转换器一个周期内包含3路中频信号。电路设计如图3所示。

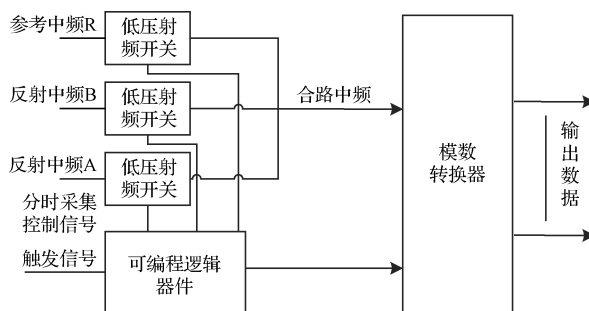


图3 分时采集控制设计

实现3路中频信号的合路功能,关键在于分时采集控制信号的处理。如图3所示,3路中频的通断,由3个低压射频SPST开关(低电平有效)控制。分时采集控制信号<sup>[5]</sup>通过控制3个SPST开关来实现3路中频信号的分时采集工作。在对某一路中频信号进行选通采集时,其相应的控制信号应为低,其他两路控制信号电平要同时置高,才能满足三选一的功能。因此,3路控制信号应分别延迟1/3周期,占空比2/3。本设计中,中频锁相环输出的触发信号经FPGA N分频处理得到3路中频分时采集控制信号,频率可随中频参考信号的变化而改变。

分时采集控制模块在对某一路中频进行选通采集时,设计中频分时采集控制信号频率为中频信号频率的 $4n$  ( $n=1,2,3\cdots$ )倍,所以,在A路中频信号一个周期内,可以截取 $4n$  ( $n=1,2,3\cdots$ )段A路中频信号用于合路。同理对B路、R路中频信号做相同处理。由于3路分时采集控制信号各有1/3个周期的时延,所以对采集后的3路中频信号进行合路后,可以得到一个完整周期的合路中频信号。该合路中频信号特点在于,在一个周期信号内,包含了 $4n$  ( $n=1,2,3\cdots$ )段顺序依次为A、B、R的中频信号,可用于后续的A/D转换器数据采集工作。

#### 3.3 A/D转换器采样时钟设计

根据分时采集控制信号特点可知,在同一时刻,3路控制信号只有一路处于低电平,即矢量网络分析仪3路中频中只有一路是处于选通状态的。为了得到某一路中频完整的相位、幅度等信息,必须保证A/D转换器的采样时钟与所选通的某一路中频信号在同一时刻是一一对应的。

同时要考虑到对可变中频信号处理的需求,A/D转换器的采样时钟也应该由参考中频R或者其衍生信号经过倍频、分频等方式处理得到。本设计中通过FPGA对由参考中频R信号鉴相得到的触发信号进行计数分频方式处理,得到采样时钟信号。

### 3.4 矢量网络分析仪中频处理设计

矢量网络分析仪中频处理的任务是实现3路数字中频的数字下变频,然后使用CIC抽取滤波和FIR滤波器进行滤波处理,最后将IQ数据传输给处理器<sup>[6-7]</sup>,完成S参数的计算以及后续的显示等处理。原理如图4所示。

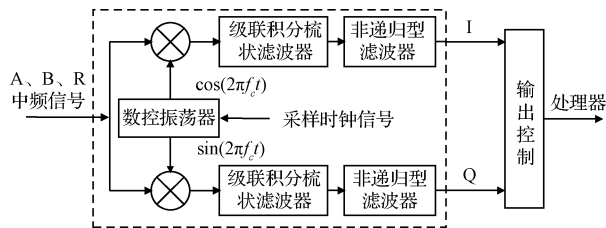


图4 中频处理原理

3路中频信号使用同一片A/D转换器进行数据采集,使用相同的采样频率分时进行数据采集,可有效的减少器件数量及连接器的管脚数目。本设计在FPGA中使用3倍采样频率的速度进行数据处理,分时使用一组数字下变频(振荡频率可随采样频率而变)、抽取滤波器硬件,保证在每个采样周期都能得到每一路中频信号的数据。为实现对可变中频信号的采集处理工作,在设计数字下变频时,将A/D转换器采样时钟信号作为NCO时钟信号使用,即当中频信号频率改变时,A/D采样时钟信号、NCO时钟信号均随之改变,由于采用相同的频率控制字,NCO的输出频率亦随中频信号改变而改变。在设计滤波器时保持不变,优先采用可以减少乘法器资源使用的并行结构FIR滤波器<sup>[8-9]</sup>,不同分辨率带宽下的滤波器设计为相同的阶数,在改变带宽时,只改变滤波器的系数,而不改变滤波器的结构,节约硬件资源<sup>[10]</sup>。

## 4 设计实现

以Xilinx公司的XC3S2000-5FGG456C FPGA、CD74HC4046锁相环芯片(含压控振荡器)以及LTC2202 A/D转换器搭建硬件平台,通过函数发生器33250提供3路频率中频信号A、B、R。以参考中频信号R作为参考频率,通过中频参考锁相模块得到触发信号vna\_trig\_in,经FPGA 3分频处理,得到分时采集控制信号vna\_trig4\_1、vna\_trig4\_2、vna\_trig4\_3。

本设计中的A/D转换器采用Linear公司的LTC2202,其特点在于在采样时钟的下降沿采集数据,采样时钟每产生一个下降沿,LTC2202就对输入的合路中频信号采集一次,经过7个脉冲后的第一个上升沿读取数据。在一个周期的合路中频信号内,要对单段的A、B、R

信号分别采集,保留最后一次下降沿时采集数据,经过7个脉冲后,第一个上升沿读取、并行输出16位数据。由于在一个周期信号内,每7个脉冲信号就要读取一次数据,而一个周期信号由 $4n(n=1,2,3\cdots)$ 段3路中频信号合路而成,因此,一个周期内要有 $36n(n=1,2,3\cdots)$ 个采样时钟。为了配合A/D转换器,保证有足够多的计数时钟来得到采集时钟信号,本设计采用频率大于 $36n(n=1,2,3\cdots)$ 倍中频频率的外参考信号作为计数时钟,将触发信号vna\_trig\_in经FPGA计数分频方式处理得到A/D转换器采样时钟。采样时钟信号ifadc\_clk与中频分时采集控制信号时序如图5所示,在每一个分时采集控制信号低电平期间,A/D转换器都进行3次采集,只保留最后一个下降沿采集数据,在经过7个脉冲后的第一个上升沿读取并输出采集数据,也就可以确保在A/D转换器输出数据为A、B、R 3路中频各自的采集数据,实现单片A/D转换器对3路中频信号的采集。同时,采样时钟信号频率为中频频率固定倍数,保证了对可变中频频率信号的处理。

在每一路分时采集控制信号低电平有效期间均包含3个周期的A/D转换器采样时钟信号,满足A/D转换器进行3次采集,采样时钟信号与分时采集控制信号对比如图5所示。

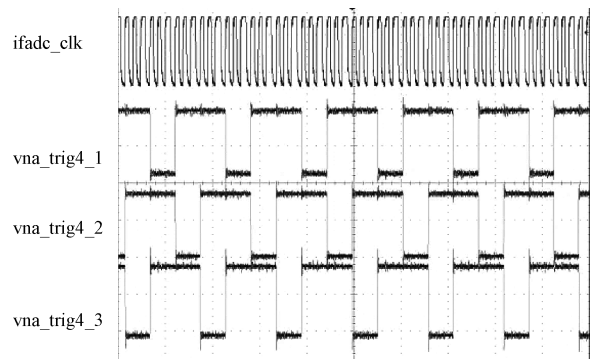


图5 采样时钟信号与分时采集控制信号对比

## 5 结果验证

通过函数发生器给试验平台提供3路频率分别为150 kHz、200 kHz、240 kHz的中频信号A、B、R,通过分时采集控制信号对低压射频SPST开关进行控制,完成对3路中频信号进行分时采集,以200 kHz为例,采集前端波形如图6所示。

从图6中可以看出,合路中频信号在一个信号周期内,完整的包含了R、A、B 3路中频的信息。对比图5和图6,可以发现,在每一个分时采集控制信号低电平期间,A/D转换器都分别对R、A、B 3路中频进行3次采集,保留最后一个下降沿采集数据,可以不失真的记录中频信息,用于后期的数据处理得到完整的幅度、相位等信息。

数字处理模块实现3路中频数据的数字下变频,然后使用CIC抽取滤波和FIR滤波器实现带宽滤波,最后将

IQ数据传输给处理器,完成S参数的计算以及后续的显示等处理,测试结果如图7所示。

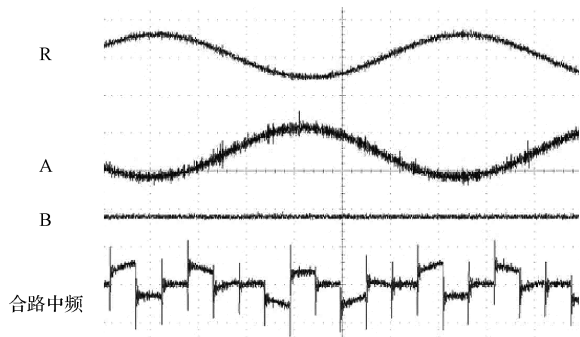


图6 3路中频信号与合路中频信号对比

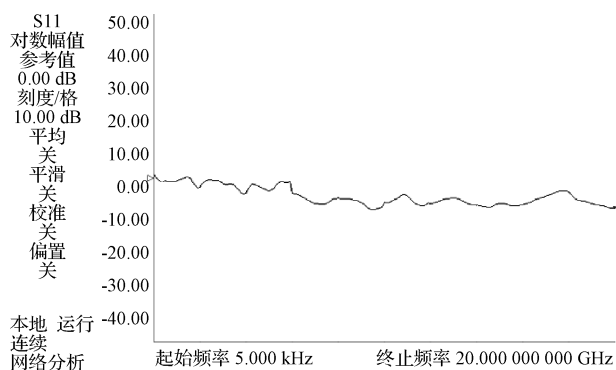


图7 单端口全反射 S11 曲线

从图7中可以看出,单端口全反射 S11 曲线在  $-10 \sim +10$  dB 范围内,本设计的中频分时采集方法,采用单片 A/D 转换器采集数字中频信息,经后段数字信号处理后,可用于矢量网络分析仪经行 S 参数等测量、显示等,满足矢量网络分析仪测试需求,其采样率可达 10 Msps,动态范围 100 dB,信噪比可达 81.6 dB,可满足 A/D 转换器工作在最佳线性区域,保证最佳变化精度。

## 6 结论

本设计中用到的分时采集控制信号、采样时钟信号均由参考中频信号获得,可满足对可变中频信号的处理,解决了传统矢量网络分析仪中频固定、不可变的问题。由于本设计中采用单片 A/D 转换器,在保证性能指标的同时,

解决了电路板体积有限、多管脚连接器布局困难的技术问题,有效的减少了器件数量及连接器的管脚数目,缩小了产品体积,减少了功耗,降低了成本,有利于测试仪器朝着小型化、低功耗方向发展<sup>[11]</sup>。

## 参考文献

- [1] 是德科技. 是德科技推出最新单 PXI 插槽全双端口 26.5 GHz 矢量网络分析仪[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(10): 1046.
- [2] 黄志芳, 罗宏伟. 基于频谱仪和矢网的混频器变频损耗测量技术[J]. 电子测量技术, 2015, 38(11): 85-87, 105.
- [3] 徐知. 中频数字化与矢量网络分析仪在脉冲状态下的测量[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(12): 15-20.
- [4] 王新艳. 射频一体化矢量网络分析仪系统锁相技术[J]. 电源技术, 2015, 39(6): 1312-1314.
- [5] 李文军, 姜信诚, 邓建钦, 等. THz 矢量网络分析仪扩频系统设计[J]. 微波学报, 2015, 31(增刊 1): 73-75.
- [6] BAIER T C, 曾学明. 自制全频段的矢量网络分析仪[J]. 电子制作, 2012, 21(3): 14-21.
- [7] 杨宏伟, 叶夏青. 多路模拟信号分时采集方法研究[C]. 中国航空学会第四届中国航空学会青年科技论坛文集, 2010: 5-8.
- [8] 徐知, 郭海帆. 用于提高微波矢量网络分析仪测量性能的电路框架[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(8): 10-14.
- [9] 亓国庆. 高精度矢量网络分析仪混频接收机设计技术[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007: 75-76.
- [10] 徐丽. 二端口网络分析仪测量多端口器件的方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(增刊 1): 318-322.
- [11] 宋翔, 年夫顺. 基于矢量网络分析仪的混频器测试技术[J]. 电子测量技术, 2011, 34(11): 113-117.

## 作者简介

李敬, 1987 年出生, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为仪器与测试技术、矢量网络分析、无线电通信综合测试方向等。

E-mail: lijxb@126.com