

中频处理器的功能与指标

邵晖

上海聚星仪器有限公司

摘要: 在射频收发系统中, 往往可以注意到中频处理器的存在。然而在测试测量中经常遇到非常类似的仪器或模块, 如示波器、数字化仪。它们都是高速数据采集设备, 但是由于其功用不同, 它们的品质指标也不一样。本文讲述各种模块的应用功能和品质指标, 及中频处理器和示波器、数字化仪的关系。

1 3种高速采集设备

在模块化仪器当中, 经常遇到示波器、数字化仪和中频处理器。很多时候将它们混为一谈, 但是由于在使用功能的区分, 它们各有不同的侧重指标。

示波器是实验室最常见的仪器之一。传统示波器被用来观察模拟信号波形, 主要是波形形态、幅度和时间关系。例如使用示波器先看看信号是方波还是正弦波, 有没有显著畸变, 有没有尖峰毛刺; 然后看看信号幅度多大, 噪声多大; 对于时序波形或者两个相关的信号, 时常会看时间关系, 比如脉宽、周期, 不同信号时间超前落后多少。除了波形、幅度、时间以外, 示波器最大的特点是触发。示波器是捕获异常信号的工具, 所以它对于幅度分辨率要求不高, 一般都是8位, 但是它具备触发模式丰富、触发时延精确稳定的特点。值得一提的是, 示波器采集时钟和外触发同步, 不会出现整数采样点的舍入抖动, 也

就是说触发抖动比采样间隔小得多。例如泰克(Tektronix)MSO5000示波器触发抖动在增强触发模式下可以达到均方根优于100 fs。按照采样率10 GS/s计算, 抖动是采样间隔的1/1 000。所以数字化仪是高精度的示波器演变而来。泰克也是最早的先驱。估计是传统示波器8位分辨率不能满足广播级视频信号记录分析的动态范围要求, 20世纪90年代泰克推出的数字化仪主要针对广播级视频信号采集。其后由于半导体技术迅猛发展, 在传感器动态范围迅速提高的需求驱动和AD芯片性能迅速提升的帮助下, 很多高速高分辨率的数字化仪应运而生。

由于NI公司以计算机和PXI板卡形式大力推进数字化仪, 使得数字化仪可以较多利用计算机总线速度快、存储空间大的特点。从而很多用户采用模块化数字化仪采集记录高性能传感器的信号做长时间流盘记录。在这些应用中, 动态范围、数据吞吐率成

了最重要指标。典型的NI-5122数字化仪/示波卡采集速率100 MS/s量化位数14位, 在高速信号分析方面能够更好反应信号特征, 对于复杂测量数据准确度大有裨益。

然而, 这样的数字化仪, 仍然和示波器比较类似, 商家为了扩大销售, 还经常自己把2种名称混起来使用。中频处理器是高端的带实时数字信号处理的数字化仪。它在性能指标、处理能力和数据流吞吐率方面显著不同于示波器。

中频处理器的主要用途是对射频频下变频器输出的中频进行采集分析。所以用户特别关心频谱质量, 调制分析精度, 和长时间监测记录能力。而频谱质量就受到动态范围、交调失真影响, 而调整分析精度还受到相位噪声的影响。

如表1所示列出了各种数字化仪器侧重的指标, 当然对于科学仪器来说, 各种指标都反映设备性能, 这个表格仅仅针对3种仪器的主要应用, 列出

了针对应用最重要的指标。

	示波器	数字化仪	中频处理器
波形	重要		
幅度	重要	重要	重要
时间	重要	重要	
触发稳定度	重要		
动态范围		重要	重要
本底噪声		重要	重要
交调失真			重要
相位噪声			重要

2 中频处理器的架构

中频处理器是软件无线电架构中的模数接口部分。如图1所示描述了一套典型的射频下变频器和中频处理器的原理。射频信号经过3次变频，转移到中频，然后中频处理卡将中频信号通过交流或直流耦合、放大衰减调理、模数转换、数字信号处理变成数字基带波形。数字基带波形通过数据逻辑处理，存放在板载内存。同时数据逻辑根据计算机软件设置，将板载内存里面的数据通过总线接口发送到总线和计算机。

通常射频下变频的中频输出在几十到几百兆赫兹频率。最传统的仪器在70 MHz，但是近年来随宽带中频的

流行，逐渐有200~400 MHz中频的体系架构。这样高中频的频率规划，目的是使得中频范围下限的2倍超过中频范围上限。避免中频带宽内信号的2次谐波“污染”中频带内较高频率的部分。中频的标称满量程输出幅度大多数在0~10 dBm左右，这样可以较均衡地输出较大动态范围的信号。

中频处理器的输入大多数是交流耦合，除非是零中频结构，直接采集基带IQ波形。交流耦合大多采用无源的电感电容耦合，比较容易保持信号线性度，并且不产生噪声。但是如果应用需要直流耦合，就很容易带来噪声和交调问题。中频处理器和射频变频器配合，往往比较固定。所以，针对中频电平和ADC量化量程不同，需要一个电平调理。比如射频变频输出电平量程在10 dBm，而ADC量程在5 dBm，那么就需要一个5 dB的衰减。当然这个衰减包括了耦合电路和调理电路的总和。由于大多数中频输出的无失真动态范围在70~90 dB，所以在中频量化大多选用14~16 bit量化

的ADC。ADC的采样率和输入频响范围，要覆盖中频频率范围。ADC采样率大多在100~250 MHz，而频率响应大多在100 MHz以下，所以针对宽带高中频应用，聚星等公司设计了频率响应达到300 MHz以上的中频处理器。

为什么ADC频率响应可以超过采样率？因为这样的ADC具备模拟采样电路。ADC采样的时隙足够小，就越来越接近理想的数字采样，所以，配合上1/2采样率带宽的带通滤波器，可以将每个1/2采样率当作中频范围。比如250 MS/s采样、频率响应达到400 MHz的ADC，可能在0~125 MHz，125~250 MHz，250~375 MHz实现中频采集分析。

ADC采集来的只是中频时域波形，要经过数字基带处理才能够得到和带宽匹配的基带IQ数据。所以，大多数中频处理器有一个较强的FPGA用作实时数字信号处理。也有称之为板载信号处理(OSP, onboard signal processing)的。最普遍的处理就是将每一路中频输入经过数字混频到数字基带，然后对数字基带进行降采样。数字混频加降采样也称为数字下变频(DDC, digital down conversion)。较复杂的中频处理器可以根据应用需要设计多个不同带宽的数字下变频器。比如聚星广播异态处理器，实现了1宽4窄5个数字下变频器。其中宽带下变频器覆盖较宽广播频段，进行态势和总体监测。在宽带监测不中断的情况下，通过各个窄带通道可以对4个电台

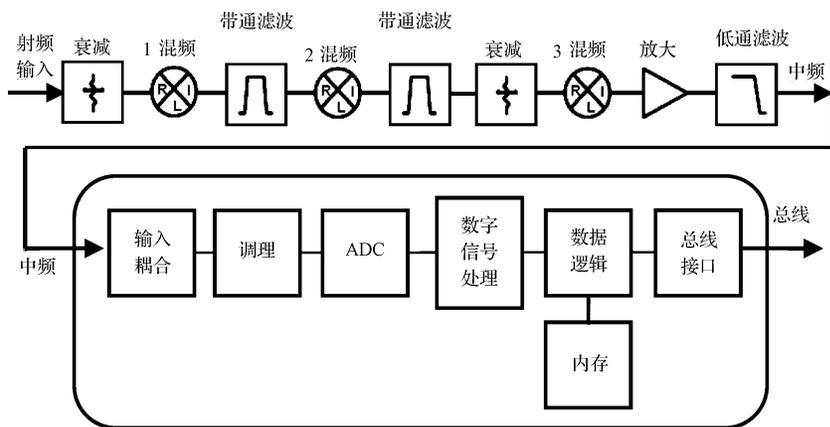


图1 典型中频处理器原理

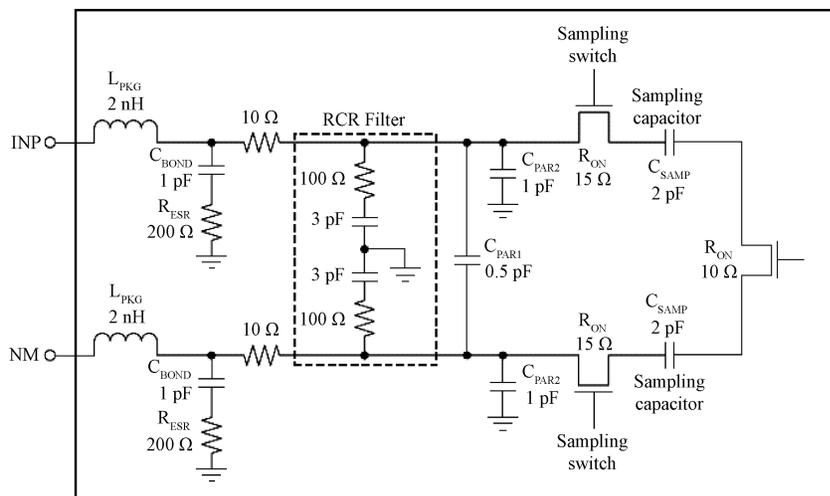


图2 典型ADC输入采样等效电路原理

同时监听。

数字信号处理的结果必须通过数字总线发送给计算机。中频处理器的总线接口和驱动实现就至关重要。优秀的总线接口可以达到很大的数据吞吐量，使得计算机可以实时显示更多数据，顺利无漏地存储关心的数据。

3 中频处理器的特性指标

中频处理器的指标很多，本文仅对其特点指标，和关系到应用的重点指标进行解读。根据上文讲解的中频处理架构，可以将中频处理器指标分为模拟信号、数字信号两部分。而每一部分又都有一些特别重要的指标。

3.1 模拟信号指标

3.1.1 动态范围

量程除以噪声就是动态范围，在不同仪器或模块会用不同指标描述。示波器和高速数字化仪往往用等效有效位数(ENOB, effective number of bits)表示，而基于频谱的表述往往

是信纳比(SINAD, signal-to-noise and distortion)。它们的定义和关系是：

$$SINAD = 10\text{Log} \left(\frac{P_S}{P_N + P_D} \right) \quad (1)$$

$$ENOB = \frac{SINAD - 1.76}{6.02} \quad (2)$$

式中： P_S 是输入信号功率， P_N 是噪声功率， P_D 是失真成分功率。为了体现采集设备能力，信号往往是满量程的。简单推算 $ENOB=9.5$ bit，相当于 $SINAD=58.95$ dB。

由于SINAD测量一般用单频信号，中频处理器的中频带宽内往往没有2阶和3阶分量所以SINAD就成了SNR(信噪比)。假设噪声比较均匀，系统中频带宽BW，就可以推算本底噪声密度。

$$NF(\text{dBm/Hz}) = Pref - SNR - 10\text{log}(BW) \quad (3)$$

式中： $Pref$ 是输入量程。

3.1.2 交调失真

当整个通带有多个频率成分或者信号成分，那么用户会关心频谱的准确性，或者由于交调产生的虚假信

号。虚假信号主要来自2阶和3阶交调。

不考虑直流偏置，理想的输出信号 V_o 应该是输入信号 V_i 乘以增益，但是实际情况是系统存在2、3阶的非线性：

$$V_o = g_1 V_i + g_2 V_i^2 + g_3 V_i^3 + \dots \quad (4)$$

式中： g_1 、 g_2 、 g_3 分别是系统线性、二次和三次增益。假设 V_o 只有1个频率分量，那么 V_o 在对数表达方式下，每增加1 dB，它的2阶非线性分量就增加2 dB，而3阶就增加3 dB。如果 V_o 有2个频率分量 ω_1 和 ω_2 ，其中 $\omega_2 > \omega_1$ ，它的二阶分量在 $\omega_2 - \omega_1$ 和 $\omega_2 + \omega_1$ ，并且在dB数上按照 V_o 增长的2倍增长。 V_o 的3阶分量在 $2\omega_1 - \omega_2$ 和 $2\omega_2 + \omega_1$ ，并且在dB数上按照 V_o 增长的3倍增长。

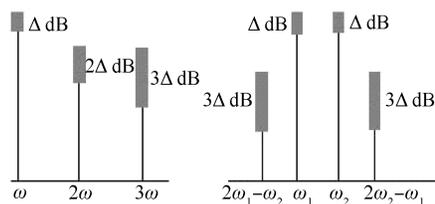


图3 2、3阶交调分量和基频幅度增长关系

既然有了交调幅度的规律，就产生了2阶和3阶截点，时常用IP2和IP3表示，也有用英语缩写SHI(second harmonic interception point)和TDI(third harmonic interception point)表示的。总之虚拟计算了输出交调达到和基频信号相同幅度时的基频输入。通常，这个计算是设置输入信号比满量程小3~6 dB左右的输入基频功率和输出基频、交调产物功率计算得到的。

假设输入两个信号功率相等，等于 P_1 ，输出基频信号和2阶交调信号差 ΔP_2 ，那么，

$$IP_2 = P_1 + \Delta P_2 \quad (5)$$

假设输入两个信号功率相等，等于 P_1 ，输出基频信号和3阶交调信号差 ΔP_3 ，那么，

$$IP_3 = P_1 + \Delta P_3 \quad (6)$$

为什么 IP_2 和 IP_3 不一起测呢？由于2、3阶交调频率距离较远，通常两种交调不一起出现在一个中频带宽内。测2阶频率可加可减，比如用101 MHz和171 MHz两个频率的基频合路馈入接收端，测量70 MHz的2阶截点。而3阶截点一般用中频带内中心的2个接近频率。比如70 MHz中心频率，20 MHz带宽的中频处理器，可以用69 MHz和71 MHz作基频输入，在67 MHz和73 MHz观察3阶交调输出。

有一点要注意，要避免信号源自身谐波输出和功率合成器产生的交调影响测试结果。

3.1.3 相位噪声

对于理想的单频率信号，ADC采样出来的正弦波相位多少有一些抖动。这种抖动来自采集时钟的不稳定或者说相位噪声。这种在相位上的噪声，会使得载波信号弥散开来，遮掩临近小信号，或者降低数字调制的相位准确度。

相位噪声的测量需要输入一个高纯度的单频信号，用中频处理器采集变到基带IQ，在基带信号上，设置幅

度为1，保留相位对时间关系。对这个信号做功率谱分析，就可以得到不同频偏的噪声密度，表述方式是dBc/Hz（在某频偏下）。

3.2 数字信号指标

3.2.1 中频处理结构

中频处理器的灵魂是实时处理软件。相同的处理器，装载了不同的处理软件可以完成完全不同的功能。所以选择中频处理器必须了解其数字信号处理的功能和能力，通常是查看其信号处理原理。

3.2.2 总线接口性能

信号处理完毕，必须送到计算机，那么处理器的总线吞吐能力和数据传输模式就成为重要指标。传统的PCI、PXI总线采用中断模式实现DMA传输，而PCIe和PXIe总线采用消息机制实现DMA传输。不论何种方式，都需要关注DMA传输模式和各种模式下的数据吞吐量。

例如单通道采集，单通道DDC的处理模式，就看连续上行数据速率。而双通道采集或多通道信号处理，就要在DMA通道当中做数据打包和分拆。较成熟的处理器可以在多通道，多速率模式下接近单通道数据吞吐量。

4 聚星PCIe中频处理卡实例

下面以聚星PCIe-77720中频处理器为例讲解其指标。这是一个专业处理中频和无线电信号的处理器。其原理框如图5所示。这是一个两路输入、14位250 MS/s采样的高性价比板

卡。主要指标如表2所示。这块中频处理器和射频变频器配合，可以实现1路宽带4路窄带的中频处理，通过2路上行DMA，将各路IQ基带数据传递给CPU。其中宽带通道连续数据速率达到25 MS/s(100 MB/s)，4路窄带通道交织合并连续数据速率达到1.6 MS/s(6.4 MB/s)。



图4 聚星PCIe-77720中频处理卡

聚星可根据应用要求，改编板载FPGA的软件，使之实现不同的处理功能。聚星还有基于PXIe的更高性能中频处理器。

表2 聚星77720中频处理器模拟

通道关键指标	
信噪比 (SNR)	-1 dBFS输入/100 MSps
	66 dBFS
$f_{IN}=26$ MHz	67 dBFS
$f_{IN}=42$ MHz	68 dBFS
$f_{IN}=69$ MHz	68 dBFS
$f_{IN}=96$ MHz	68 dBFS
总谐波失真(THD)	-1 dBFS输入/100 MSps
	-75 dBc
$f_{IN}=26$ MHz	-75 dBc
$f_{IN}=42$ MHz	-76 dBc
$f_{IN}=69$ MHz	-76 dBc
$f_{IN}=96$ MHz	-75 dBc
毛刺 (SPUR)	-105 dBm
平均噪声密度	-142 dBm/Hz
IP2	79 dBm (典型值)
IP3	32 dBm (典型值)
相位噪声	-125 dBm/Hz(10 kHz频谱)

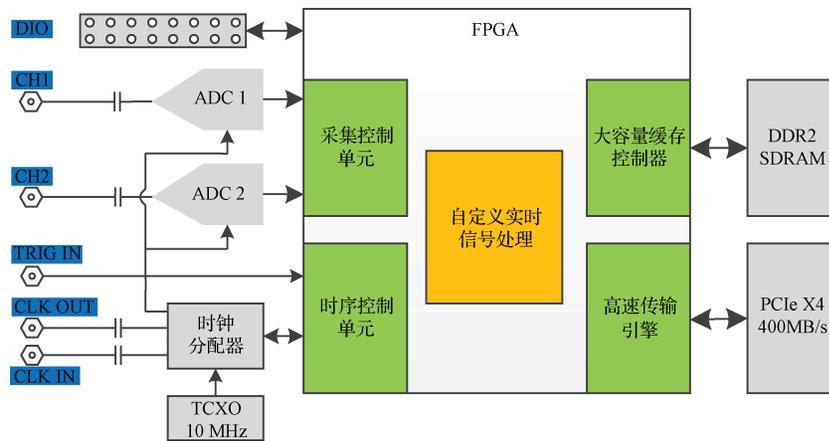


图5 聚星PCIe中频处理器原理

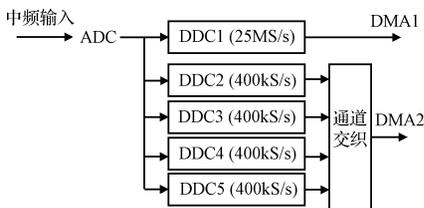


图6 聚星Pcle-77720在多通道监测应用中的信号处理原理

5 总结

本文以聚星PCIe-77720中频处理器为例，讲解了中频处理器的关键技术指标，及其与示波器、高速数字化仪的区别。中频处理器应用偏重于频谱分析、调制分析，所以更注重动态范围、交调失真和相位噪声。而在中频处理功能方面，需要关注信号处理原理和各个工作通道的总线吞吐量。