

信号与系统

实验指导书

山东理工大学
电气与电子工程学院

目 录

第一节	RZ8664 信号与系统模块组成介绍.....	2
第二节	各实验模块介绍.....	3
第三节	信号源介绍.....	6
实验 1	信号卷积实验	8
实验 2	信号的分解与合成	12
实验 3	有源无源滤波器	16
实验 4	抽样定理与信号恢复	21

第一节 RZ8664 信号与系统模块组成介绍

“RZ8664 信号与系统实验箱”是在多年开设信号与系统实验的基础上，经过不断改进研制成功的。是专门为《信号与系统》课程而设计的，提供了信号的频域、时域分析的实验手段。利用该实验箱可进行阶跃响应与冲激响应的时域分析；借助于 DSP 技术实现信号卷积、信号频谱的分析与研究、信号的分解与合成的分析与实验；抽样定理与信号恢复的分析与研究；连续时间系统的模拟；一阶、二阶电路的暂态响应；二阶网络状态轨迹显示、各种滤波器设计与实现等内容的学习与实验。

实验箱采用了 DSP 数字信号处理新技术，将模拟电路难以实现或实验结果不理想的“信号分解与合成”、“信号卷积”等实验得以准确地演示，并能生动地验证理论结果；系统地了解并比较无源、有源、数字滤波器的性能及特性，并可学会数字滤波器的设计与实现。

实验箱配有 DSP 标准的 JTAG 插口及 DSP 同主机 PC 机的通信接口，可方便学生在我们提供的软件的基础上进行二次开发（可用仿真器或不用仿真器），完成一些数字信号处理、DSP 应用方面的实验。如：各种数字滤波器设计、频谱分析、卷积、A/D 转换、D/A 转换等。该实验箱的系统分布图如图 1-1 所示。

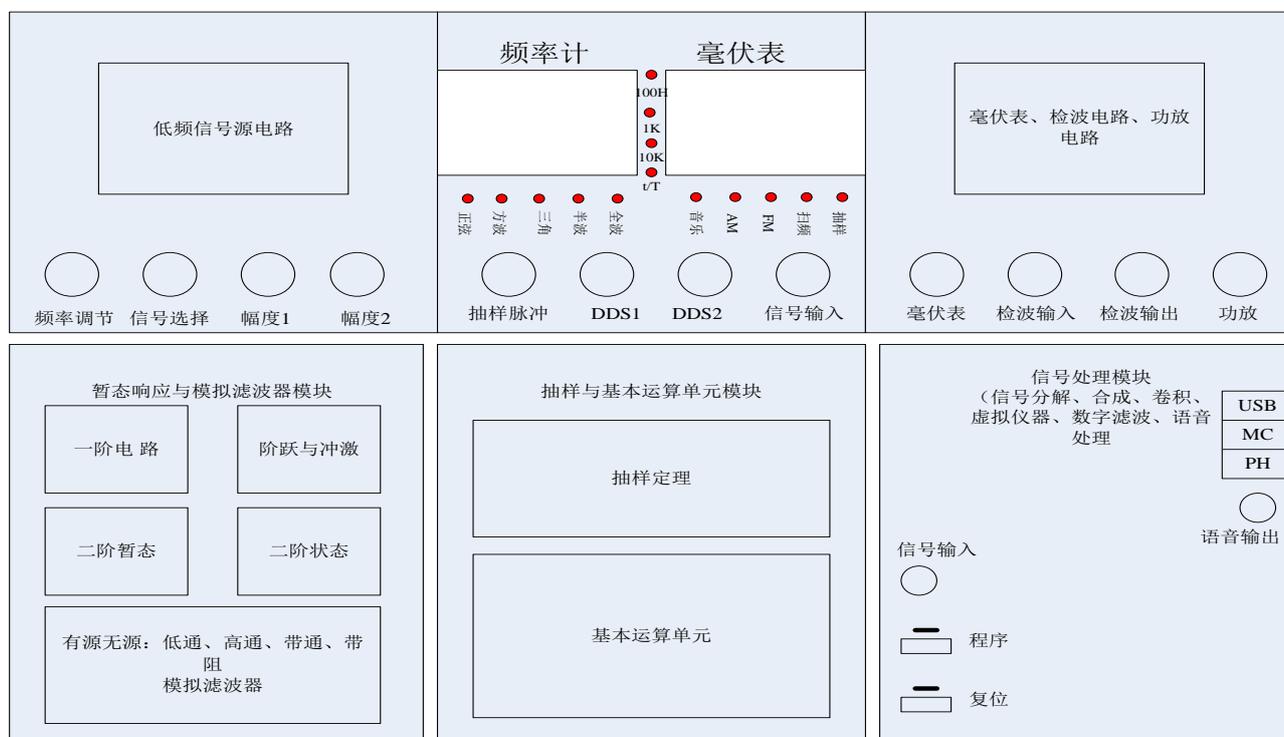


图 1-1 RZ8664 实验平台系统分布示意图

它由以下模块组成：

1. 信号源模块（DDS 低频信号源、毫伏表、频率计等）
2. 暂态响应与模拟滤波器模块（一阶、二阶暂态，有源无源：低通、高通、带通、带阻滤波器）
3. 抽样与基本运算单元模块（抽样电路、基本运算单元）
4. 信号处理模块（信号分解、合成、卷积、虚拟仪器、数字滤波、语音处理）

第二节 各实验模块介绍

在本节中，将分别介绍实验平台上的各个模块单元。在第一节的系统介绍中，已介绍了本实验系统由 16 个模块组成。

1. 总电源模块

此模块位于实验平台的右上角部分，分别提供 +12v、+5v、-12v、-5v 的电源输出。4 组电源对应 4 个发光二极管，电源输出正常时对应的发光二极管亮。

2. DDS 信号源

提供的波形种类有：正弦、脉冲、三角、半波、全波、音乐、AM、FM、扫频。

信号的频率范围：100Hz—100KHz（正弦波），可分别通过编码开关调节信号的频率、抽样频率、方波占空比等，通过电位器旋钮调节信号的幅度，频率计液晶显示信号的频率。

信号插孔：

1P01—输出抽样脉冲；

DDS1—选择输出：正弦波、方波、三角波、半波、全波、音乐、AM、FM、扫频信号；

DDS2—选择 AM、DSB 和 FM 模式时，输出调制后信号；

信号输入（省）。

毫伏表—输入被测正弦信号有效值；

检波输入—对幅频信号进行检波；

检波输出—输出幅频特性，用于示波器观测；

功放—本地喇叭输出。

说明：在整个实验内容中，以“TP+数字”表示的测量点，而以“P+数字”表示信号插孔。

3. 毫伏表模块

实验箱配置了简易的毫伏表，可以测量实验中正弦信号的幅度，通过液晶 2LCD2 显示出来，显示值为信号幅度的平均值（正弦信号有效值），指示范围为 0—10v。

信号插孔：

3P01—毫伏表测量输入点（后面会介绍到，该点同样是测量数字信号处理的输入点）。

4. DSP 模块

DSP 模块，即数字信号处理模块，在该模块中，包含 A/D 模块，DSP 模块和 D/A 模块。在实验中涉及的数字信号处理的内容均由该部分完成，例如数字滤波器，信号分解，信号卷积，虚拟仪器，语音采集处理等。

信号插孔：

8P09—数字信号输入插孔，在 DSP 实验中涉及的信号均由该插孔输入。

测量点：

8TP9—同 8P09；

8TP10—DSP 的 XF 引脚测量点，主要用于 DSP 应用开发测试；

8TP11—DSP 的 I/O 口，主要用于 DSP 应用开发测试。

按钮：

8SW2—实验中，可通过按下 8SW2 选择不同的实验内容；

8SW1—DSP 的复位按键。

LED 显示区：

D3D2D1D0—通过显示不同的数值，对应相应的程序号，通过按下 8SW2 可改变其数值，其值对应后面表中内容。

RUN—指示程序运行状态。

5. USB 接口

USB 接口，可通过 USB 线连接 PC 机进行通信；

6. 信号分解与合成模块

主要完成信号的分解、合成、信号卷积、语音处理、虚拟仪器等。信号的分解部分提供了 8 个波形输出测量点，8TP01、8TP02……8TP08；8TP01—8TP07 分别为信号的 1—7 次谐波输出波形，第 8 个测量点 8TP08 为 8 次以上谐波的合成输出波形；信号合成的部分中，把分解输出的各次谐波信号连接输入至合成部分，在合成的输出测量点上 8TP12 可观察到合成后的信号波形。

此模块上还有四个开关，8K1、8K3、8K5、8K7。这四个开关的作用是用于选择是否对分解出的 1 次、3 次、5 次、7 次谐波幅度进行放大（便于研究谐波幅度对信号合成的影响）：当开关位于 1、2 位置（左侧）时不放大，当开关位于 2、3 位置时可通过相应电位器调节谐波分量的幅度。如：对于输出的基波分量，当开关 8K1 位于 1、2 位置时，电位器 8W1 不起任何作用，直接把分解提取到的基波输出；当开关 8K1 位于 2、3 位置时，分解提取到的基波分量可通过电位器 8W1 来调节它的输出幅度的大小。

信号合成开关：跳线开关 8SK1—8SK8 分别控制 8 次谐波是否参加信号合成，跳线开关往上插表示该谐波不参加合成。8TP12 为合成输出信号测量点，8W8 调节合成信号幅度。

7. 信号卷积实验模块

此模块在信号分解模块内，结构非常简单，只有三个测量点，分别为两个激励信号的测量点（8TP02、8TP03），一个卷积后的信号输出波形测量点（8TP01）。

8. 一阶电路暂态响应模块

此模块可根据自己的需要搭接一阶电路，观测各点的信号波形。

有 3 个测量点：

3TP02、3TP03：一阶 RC 电路电容上的响应信号测量点；

3TP07：一阶 RL 电路电阻上的响应信号测量点。

信号插孔：

3P01、3P06：信号输入插孔；

3P02、3P03、3P04、3P05、3P07、3P08、3P09：电路连接插孔。

9. 二阶电路传输特性模块

此模块亦可根据需要搭接二阶电路，观测各测量点的信号波形。

有两个测量点：

4TP02：有源二阶电路传输特性输出测量点；

4P03、4P04：负阻抗电路传输特性输出测量点。

信号插孔：

4P02：信号输入插孔。

10. 二阶网络状态轨迹模块

此模块除完成二阶网络状态轨迹观察的实验，还可完成二阶电路暂态响应观察的实验。

有两个测量点：

7TP01、7TP02：输出信号波形观测点

信号插孔：

7P01: 信号输入插孔。

11. 阶跃响应与冲激响应模块

接入适当的输入信号，可观测输入信号的阶跃响应与冲激响应。

有两个测量点：

6TP02: 冲激信号观测点；

6P04 (6TP05): 冲激响应，阶跃响应信号输出观测点。

信号插孔：

6P01、6P03: 信号输入插孔；

6P02: 冲激信号输出插孔。

12. 抽样定理模块

通过本模块可观测到抽样过程中各个阶段的信号波形。

有三个测量点：

1TP01: 输入信号波形观测点；

1TP03: 抽样波形观测点；

1TP04: 抽样信号经滤波器恢复后的信号波形观测点。

信号插孔：

1P01: 模拟信号输入插孔；

1P02: 抽样脉冲信号输入插孔；

1P03: 抽样信号输出插孔；

其它: 元器件选择插孔。

13. 模拟滤波器模块

提供了多种有源无源滤波器，包括低通无源滤波器、低通有源滤波器、高通无源滤波器、高通有源滤波器、带通无源滤波器、带通有源滤波器、带阻无源滤波器和带阻有源滤波器。根据自己的需要进行实验。

有 8 个测量点：

5TP01: 信号经低通无源滤波器后的输出信号波形观测点；

5TP02: 信号经低通有源滤波器后的输出信号波形观测点；

5TP03: 信号经高通无源滤波器后的输出信号波形观测点；

5TP05: 信号经高通有源滤波器后的输出信号波形观测点；

5TP06: 信号经带通无源滤波器后的输出信号波形观测点；

有源带通由有源高通和有源低通级联构成；

5TP07: 信号经带阻无源滤波器后的输出信号波形观测点；

5TP08: 信号经带阻有源滤波器后的输出信号波形观测点。

信号插孔：

5P01、5P02、5P03、5P04、5P06、5P07、5P08: 信号输入插孔。

14. 基本运算单元与连续系统的模拟模块

本模块提供了很多开放的电阻电容，可根据需要搭接不同的电路，进行各种测试。如可实现加法器、比例放大器、积分器、有源滤波器、一阶系统的模拟等。

15. 麦克风和耳机接口

麦克风和耳机接口主要完成语音数据的采集与播放。

第三节 信号源介绍

本节简要介绍一下 DDS 信号源的使用，DDS 信号源能够产生较纯正的各种信号，这对信号系统实验非常重要。DDS 信号源能产生：正弦波、占空比可变的脉冲、三角波、半波、全波、音乐、AM、FM、扫频、调频、抽样脉冲信号等，相关输出插孔、测试点、调节电位器如图 3-1 所示。

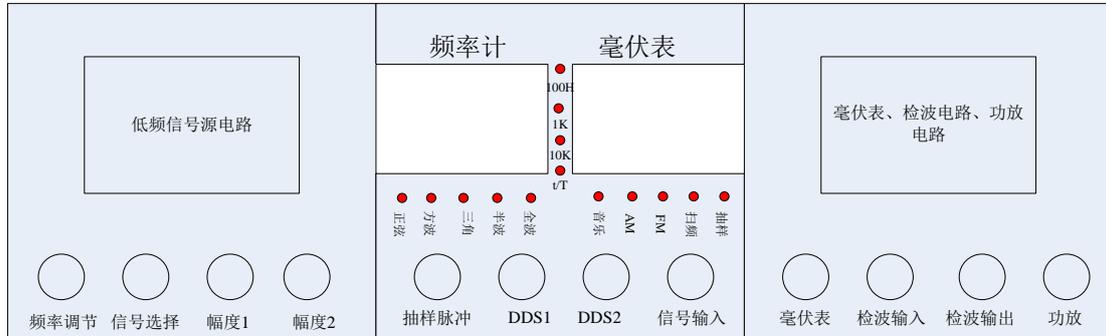


图 3-1 信号源操作区示意图

频率调节： 频率步长选择与频率调节按键旋钮开关。

按键：切换频率调节步长即步长，频率步长将在 100Hz、1KHz、10KHz 之间循环切换。

旋钮：频率“+ \ -”调节旋钮：调节波形输出的频率（音乐、调制波和扫频信号选择输出除外）。每旋转 1 步，输出信号进行一个当前频率步长的变换，顺时针旋转增加，反之，减少。在最大频率增大频率将切换到最小频率。在最小频率减小频率将切换到最大频率。

信号选择： 波形选择与方波占空比调节按键旋钮开关。

按键：选择“方波占空比调节”功能，选中时，t/T 亮，调节本按键旋钮可增减方波的占空比。

旋钮：波形选择旋钮（t/T 不亮）：

调节旋钮切换输出信号：正弦波、方波、三角波、半波、全波、音乐、调幅波、调频波、扫频、抽样脉冲。

幅度 1 (1W1)： 信号 DDS1 幅度调节旋钮。

幅度 2 (1W2)： 信号 DDS2 幅度调节旋钮。

DDS1： DDS 信号输出端口 1，由上述按钮控制。

DDS2： DDS 信号输出端口 2，由上位机通过网口控制。在调制波模式下，输出调制信号。

信号输入 (2P01)： 虚拟示波器信号输入端口。

LED 显示：

相应 DDS 信号输出时，相应的波形选择 LED 灯亮，抽样脉冲灯常亮，在需设置抽样脉冲频率时，抽样脉冲灯闪烁。100Hz、1KHz、10KHz，显示当前的频率调节步长，t/T 显示方波占空比调节状态选中与否，选中则亮。

频率表液晶：

显示当前 DDS 信号输出的频率，单位为 KHz，但在方波占空比调节状态选中时，显示方波占空比，单位为%。

信号源波形的观测实验步骤：

1. 实验系统加电，默认输出 4KHz 正弦信号，此时频率表应显示“4.0”；

2. 在 DDS1 上接示波器进行观察输出的 DDS 信号；
3. 调节 1W1 信号幅度调节旋钮，可在示波器上观察到信号幅度的变化；
4. 调节 1SS01 的旋钮，将观察到频率的变化，按下 1SS01 的按键，切换不同的频率步长，观察波形是否有相应的变化。
5. 调节 1SS02 的波形选择其它的信号类型，重复上面的步骤进行波形的观察。
6. 在抽样脉冲 LED 闪烁时，调节抽样脉冲频率，在 1P01 口观察波形。

注：

在选择调制波输出时，DDS1 和 DDS2 分别显示调制前和调制后信号。

在选择方波输出时，旋转旋钮 1SS01 调节频率，按 1SS02 按键选中占空比调节状态，此时 t/T 亮，旋转 1SS02 旋钮切换占空比，在 DDS1 上接示波器进行观察输出的方波，观察相应的频率和占空比变化。

实验 1 信号卷积实验

一、实验目的

1. 理解卷积的概念及物理意义；
2. 通过实验的方法加深对卷积运算的图解方法及结果的理解。

二、实验原理说明

卷积积分的物理意义是将信号分解为冲激信号之和，借助系统的冲激响应，求解系统对任意激励信号的零状态响应。设系统的激励信号为 $x(t)$ ，冲激响应为 $h(t)$ ，则系统的零状态响应为

$$y(t) = x(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h(t - \tau)d\tau。$$

对于任意两个信号 $f_1(t)$ 和 $f_2(t)$ ，两者做卷积运算定义为：

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(\tau)f_2(t - \tau)d\tau = f_1(t) * f_2(t) = f_2(t) * f_1(t)。$$

1. 两个矩形脉冲信号的卷积过程

两信号 $x(t)$ 与 $h(t)$ 都为矩形脉冲信号，如图 1-1 所示。下面由图解的方法（图 1-1）给出两个信号的卷积过程和结果，以便与实验结果进行比较。

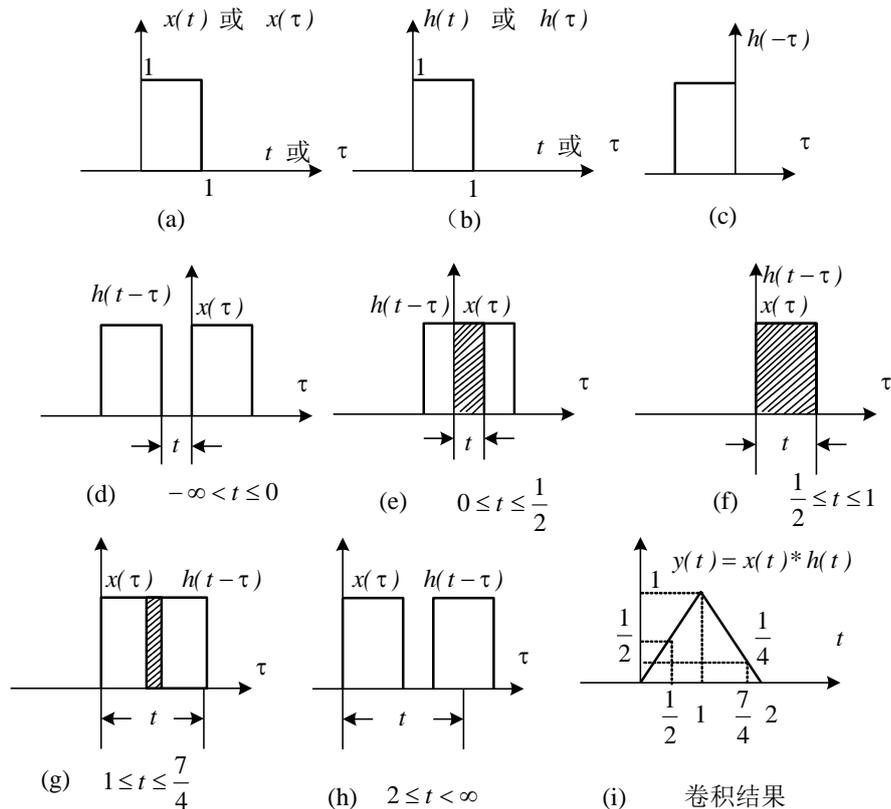


图 1-1 两矩形脉冲的卷积积分的运算过程与结果

2. 矩形脉冲信号与锯齿波信号的卷积

信号 $f_1(t)$ 为矩形脉冲信号， $f_2(t)$ 为锯齿波信号，如图 1-2 所示。根据卷积积分的运算方法得到 $f_1(t)$ 和 $f_2(t)$ 的卷积积分结果 $f(t)$ ，如图 1-2(c) 所示。

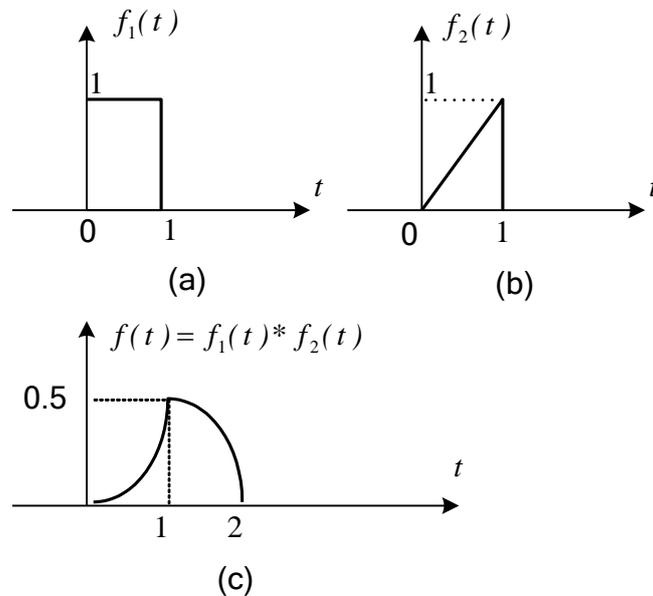


图 1-2 矩形脉冲信号与锯齿脉冲信号的卷积积分的结果

3. 本实验进行的卷积运算的实现方法

在本实验装置中采用了 DSP 数字信号处理芯片，因此在处理模拟信号的卷积积分运算时，是先通过 A/D 转换器把模拟信号转换为数字信号，利用所编写的相应程序控制 DSP 芯片实现数字信号的卷积运算，再把运算结果通过 D/A 转换为模拟信号输出。结果与模拟信号的直接运算结果是一致的。数字信号处理系统逐步和完全取代模拟信号处理系统是科学技术发展的必然趋势。图 1-3 为信号卷积的流程图。

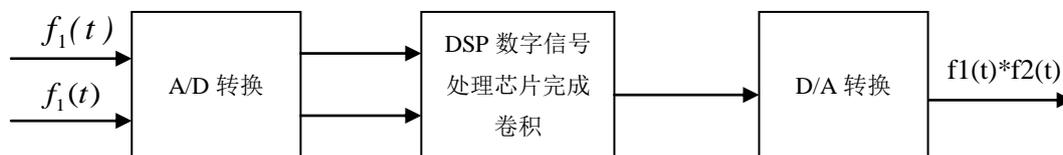


图 1-3 信号卷积的流程图

三、实验内容

1. 矩形脉冲信号的自卷积

实验中完成将输入的矩形脉冲信号完成自卷积运算，并将卷积后信号输出。

实验步骤：

- (1) 连接 DDS1 和 8P09；
- (2) 调节信号源，使 DDS1 输出 $f=1\text{kHz}$ ，占空比为 50% 的脉冲信号，调节 1W1 使信号幅度为 2V；
- (3) 按下 8SW2 按钮，使程序指示灯 D3D2D1D0=0011，指示灯对应**自卷积**；

(4) 将示波器的 CH1 接于 DDS1，CH2 接于 8TP01，分别观察输入信号的 $f_1(t)$ 波形与卷积后的输出信号 $f_1(t)*f_1'(t)$ 的波形；

(5) 按下 1SS02，使频率计右侧 t/T 指示灯亮，之后旋转 1SS02，调节 DDS1 输出信号的占空比，改变激励信号的脉宽，观测卷积后波形，记录到表 1-1 中；

- (6) 对比不同脉宽下，卷积后波形的差别，结合实际理解原因。

注意：为了便于观察，输入信号实际为无限长度的周期信号，但是这对自卷积来讲是不现实的，因此在实验中 $f_1'(t)$ 其实只取了脉冲的一个周期长度。

表 1-1 输入信号卷积后的输出信号

	输入信号	输入信号 $f_1(t)$ (CH1) 输出信号 $f_1(t)*f_1'(t)$ (CH2)
脉冲宽度 (us)	500	
脉冲宽度 (us)	250	
脉冲宽度 (us)	120	

2. 信号与系统卷积

实验中完成将输入的矩形脉冲信号与系统的锯齿波信号完成卷积运算，并将卷积后信号输出。

实验步骤：

- (1) 连接 DDS1 和 8P09；
- (2) 调节信号源，使 DDS1 输出 $f=1\text{KHz}$ ，占空比为 50% 的脉冲信号，调节 1W1 使信号幅度为 2V；
- (3) 按下 8SW2 按钮，使程序指示灯 D3D2D1D0=0100，指示灯对应**系统卷积**；
- (4) 将示波器的 CH1 接于 8TP01，CH2 接于 8TP02，分别观察系统冲击响应 $f_2(t)$ 波形与卷积后的输出信号 $f_1(t)*f_2(t)$ 的波形；
- (5) 按下 1SS02，使频率计右侧 t/T 指示灯亮，之后旋转 1SS02，调节 DDS1 输出信号的占空比，改变激励信号的脉宽，观测卷积后波形，记录到表 1-2 中；
- (6) 对比不同脉宽下，卷积后波形的差别，结合实际理解原因。

表 1-2 输入信号和卷积后的输出信号

	输入信号 $f_1(t)$	$f_2(t)$ 锯齿波 (CH1) 输出信号 $f_1(t)*f_2(t)$ (CH2)
脉冲宽度 (us)	500	
脉冲宽度 (us)	250	
脉冲宽度 (us)	120	

四、实验报告要求

1. 按要求记录各实验数据波形填写表 1-1。
2. 按要求记录各实验数据波形填写表 1-2。

五、实验设备

1. 信号与系统实验箱 1 台
2. 双踪示波器 1 台

实验2 信号的分解与合成

一、实验目的

1. 了解波形分解与合成原理，了解信号谐波分量的构成；
2. 观察信号通过多个数字滤波器后，分解出各谐波分量的情况。
3. 观察信号分解出的各谐波分量并通过叠加合成出原信号。

二、实验原理

1. 信号的频谱与测量

信号的时域特性和频域特性是对信号的两种不同的描述方式。对于一个时域的周期信号 $f(t)$ ，只要满足狄利克莱(Dirichlet)条件，就可以将其展开成三角形式或指数形式的傅里叶级数。

例如，对于一个周期为 T 的时域周期信号 $f(t)$ ，可以用三角形式的傅里叶级数求出它的各次分量，在区间 $(t_1, t_1 + T)$ 内表示为：

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\Omega t + b_n \sin n\Omega t)$$

即将信号分解成直流分量及许多余弦分量和正弦分量，研究其频谱分布情况。

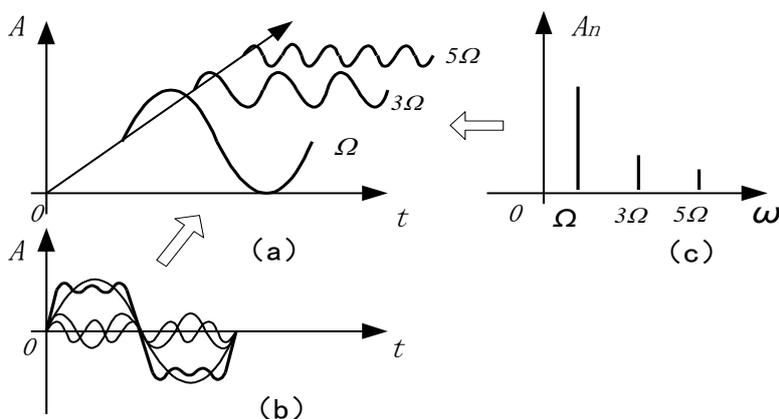


图 2-1 信号的时域特性和频域特性

信号的时域特性与频域特性之间有着密切的内在联系，这种联系可以用图 2-1 来形象地表示。其中图 2-1 (a) 是信号在幅度—时间—频率三维坐标系统中的图形；图 2-1 (b) 是信号在幅度—时间坐标系统中的图形即波形图；把周期信号分解得到的各次谐波分量按频率的高低排列，就可以得到频谱图。反映各频率分量幅度的频谱称为振幅频谱。图 2-1 (c) 是信号在幅度—频率坐标系统中的图形即振幅频谱图。反映各分量相位的频谱称为相位频谱。在本实验中只研究信号振幅频谱。周期信号的振幅频谱有三个性质：离散性、谐波性、收敛性。测量时利用了这些性质。从振幅频谱图上，可以直观地看出各频率分量所占的比重。测量方法有同时分析法和顺序分析法。

同时分析法的基本工作原理是利用多个滤波器，把它们中心频率分别调到被测信号的各个频率分量上。当被测信号同时加到所有滤波器上，中心频率与信号所包含的某次谐波分量频率一致的滤波器便有输出。在被测信号发生的实际时间内可以同时测得信号所包含的各频率分量。在本实验中采用同时分析法进行频谱分析，如图 2-2 所示。

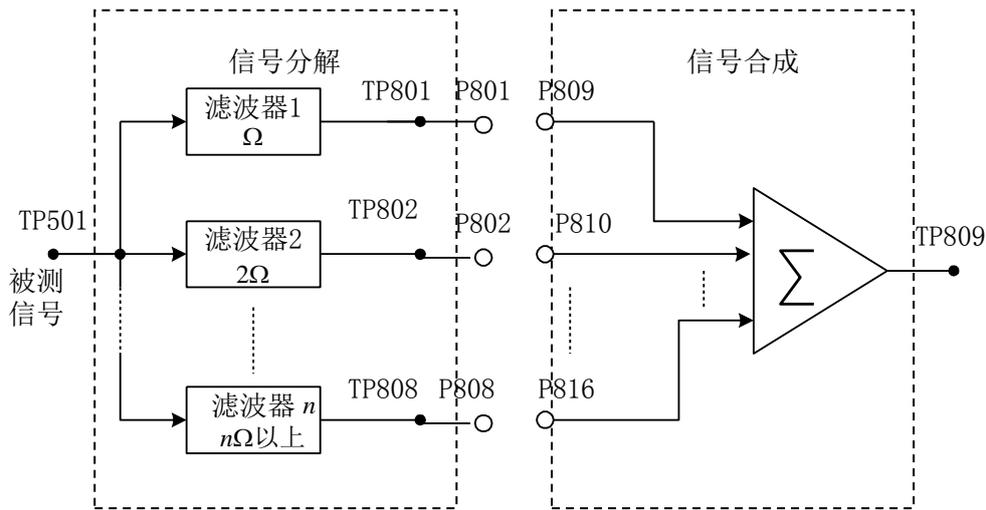


图 2-2 用同时分析法进行频谱分析

其中，P801 出来的是基频信号，即基波；P802 出来的是二次谐波；P803 的是三次谐波，依此类推。

2. 矩形脉冲信号的频谱

一个幅度为 E ，脉冲宽度为 τ ，重复周期为 T 的矩形脉冲信号，如图 2-3 所示。

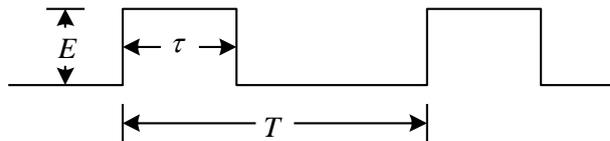


图 2-3 周期性矩形脉冲信号

其傅里叶级数为：

$$f(t) = \frac{E\tau}{T} + \frac{2E\tau}{T} \sum_{i=1}^n Sa\left(\frac{n\pi\tau}{T}\right) \cos n\omega t$$

该信号第 n 次谐波的振幅为：

$$a_n = \frac{2E\tau}{T} Sa\left(\frac{n\tau\pi}{T}\right) = \frac{2E\tau}{T} \frac{\sin(n\tau\pi/T)}{n\tau\pi/T}$$

由上式可见第 n 次谐波的振幅与 E 、 T 、 τ 有关。

3. 信号的分解提取

进行信号分解和提取是滤波系统的一项基本任务。当我们仅对信号的某些分量感兴趣时，可以利用选频滤波器，提取其中有用的部分，而将其它部分滤去。

目前 DSP 数字信号处理系统构成的数字滤波器已基本取代了传统的模拟滤波器，数字滤波器与模拟滤波器相比具有许多优点。用 DSP 构成的数字滤波器具有灵活性高、精度高和稳定性高、体积小、性能高、便于实现等优点。因此在这里我们选用了数字滤波器来实现信号的分解。

在数字滤波器模块上，选用了有 8 路输出的 D/A 转换器 TLV5608 (U502)，因此设计了 8 个滤波器（一个低通、六个带通、一个高通）将复杂信号分解提取某几次谐波。

分解输出的 8 路信号可以用示波器观察，测量点分别是 8TP01、8TP02、8TP03、8TP04、8TP05、8TP06、

8TP07、8TP08。

4. 信号的合成

信号通过 8 路滤波器输出的各次谐波分量可通过一个加法器，合成还原为原输入的矩形脉冲信号，合成后的波形可以用示波器在观测点 STP12 进行观测。如果滤波器设计正确，则分解前的原始信号（观测 8P09）和合成后的信号应该相同。信号波形的合成电路图如图 2-4 所示。

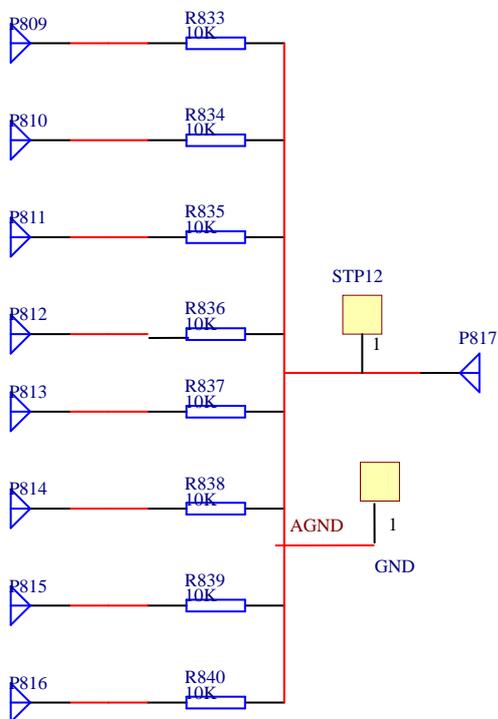


图 2-4 信号合成电路图

三、实验步骤

1. 矩形脉冲信号的分解

- (1) 连接 DDS1 和 8P09, 示波器 CH1 接 8TP09;
- (2) 调节信号源, 使 DDS1 输出 $f=4\text{KHz}$, 占空比为 50% 的脉冲信号, 调节 1W1 使信号幅度为 2V;
- (3) 按下 8SW2 按钮, 使程序指示灯 D3D2D1D0=0101, 指示灯对应**信号分解**程序;
- (4) 示波器 (CH2) 可分别在 8TP01、8TP02、8TP03、8TP04、8TP05、8TP06、8TP07、8TP08 上观测信号各次谐波的波形, 并读出各自波形的峰峰值。按表 2-1 的要求, 观察和记录分解波形及幅值。

表 2-1 信号的各次谐波分量

波形分解的要求	分解后的波形和幅值 (V_{p-p})
原始信号	
基波分量	
二次谐波分量	
三次谐波分量	

四次谐波分量	
五次谐波分量	
六次谐波分量	
七次谐波分量	
八次及以上谐波分量	

2. 矩形脉冲信号的合成

- (1) 连接 DDS1 和 8P09，将 4 个跳线器 8K1、8K3、8K5、8K7 放在左边位置；
- (2) 调节信号源，使 DDS1 输出 $f=4\text{kHz}$ ，占空比为 50% 的脉冲信号，调节 1W1 使信号幅度为 2V；
- (3) 按下 8SW2 按钮，使程序指示灯 D3D2D1D0=0101，指示灯对应**信号分解**；
- (4) 示波器可分别在 8TP01、8TP02、8TP03、8TP04、8TP05、8TP06、8TP07、8TP08 上观测信号各次谐波的波形（到此为前面分解实验的内容）；
- (5) 将 8 个跳线器 8SK1—8SK8，根据下表中给出的内容，分别尝试不同的连接方式（如基波和三次谐波合成，只需将 8SK1、8SK3 打到合成位置），然后用双踪示波器同时测量 8TP09 和 8TP12，并将 8TP12 的波形记录在下表中，**通过调节电位器 8W8 可以改变 8TP12 的输出幅度**。按表 2-2 的要求，观察和记录合成波形。

表 2-2 矩形脉冲信号各次谐波之间的合成

波形合成要求	合成后的波形
基波与三次谐波合成	
三次与五次谐波合成	
基波与五次谐波合成	
基波、三次与五次谐波合成	
基波、三次、五次和七次谐波合成	
基波、二、三、四、五、六、七、八次及以上谐波的合成	

3. 再调节信号源，使 DDS1 输出 4K 的三角波，调节 1W1 使信号幅度为 2V；按照表 2-1 和 2-2 的要求完成数据波形的测量。（选作）

四、实验报告要求

1. 按要求记录各实验数据波形，填写表 2-1。
2. 按要求记录各实验数据波形，填写表 2-2。

五、实验设备

1. 信号与系统实验箱 1 台
2. 双踪示波器 1 台

实验 3 有源无源滤波器

一、实验目的

1. 熟悉滤波器的构成及其特性；
2. 学会测量滤波器幅频特性的方法。

二、实验原理说明

滤波器是一种能使有用频率信号通过而同时抑制（或大为衰减）无用频率信号电子装置。工程上常用它作信号处理、数据传送和抑制干扰等。这里主要是讨论模拟滤波器。以往这种滤波电路主要采用无源元件 R、L 和 C 组成，60 年代以来，集成运放获得了迅速发展，由它和 R、C 组成的有源滤波电路，具有不用电感、体积小、重量轻等优点。此外，由于集成运放的开环电压增益和输入阻抗均很高，输出阻抗又低，构成有源滤波电路后还具有一定的电压放大和缓冲作用。但是，集成运放的带宽有限，所以目前有源滤波电路工作频率难以做得很高，这是它的不足之处。

基本概念及初步定义

1. 初步定义

滤波电路的一般结构如图 3-1 所示。图中的 $v_i(t)$ 表示输入信号， $v_o(t)$ 为输出信号。假设滤波器是一个线性时不变网络，则在复频域内有：

$$A(s) = V_o(s)/V_i(s)$$

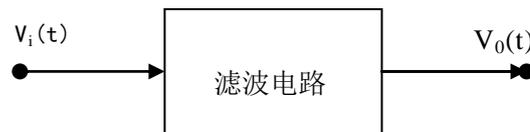


图 3-1 滤波电路的一般结构图

式中 $A(s)$ 是滤波电路的电压传递函数，一般为复数。对于实际频率来说 ($s=j\omega$) 则有：

$$A(j\omega) = |A(j\omega)| e^{j\phi(\omega)} \quad 3-1$$

这里 $|A(j\omega)|$ 为传递函数的模， $\phi(\omega)$ 为其相位角。

此外，在滤波电路中关心的另一个量是时延 $\tau(\omega)$ ，它定义为：

$$\tau(\omega) = -\frac{d\phi(\omega)}{d\omega} \quad 3-2$$

通常用幅频响应来表征一个滤波电路的特性，欲使信号通过滤波器的失真很小，则相位和时延响应亦需考虑。当相位响应 $\phi(\omega)$ 作线性变化，即时延响应 $\tau(\omega)$ 为常数时，输出信号才可能避免失真。

2. 滤波电路的分类

对于幅频响应，通常把能够通过的信号频率范围定义为通带，而把受阻或衰减的信号频率范围称为阻带，通带和阻带的界限频率称为截止频率。

理想滤波电路在通带内应具有零衰减的幅频响应和线性的相位响应，而在阻带内应具有无限大的幅度衰减 ($|A(j\omega)| = 0$)。通常通带和阻带的相互位置不同，滤波电路通常可分为以下几类：

低通滤波电路：其幅频响应如图 3-2 (a) 所示，图中 A_0 表示低频增益 $|A|$ 增益的幅值。由图可知，它的功能是通过从零到某一截止角频率 ω_H 的低频信号，而对大于 ω_H 的所有频率完全衰

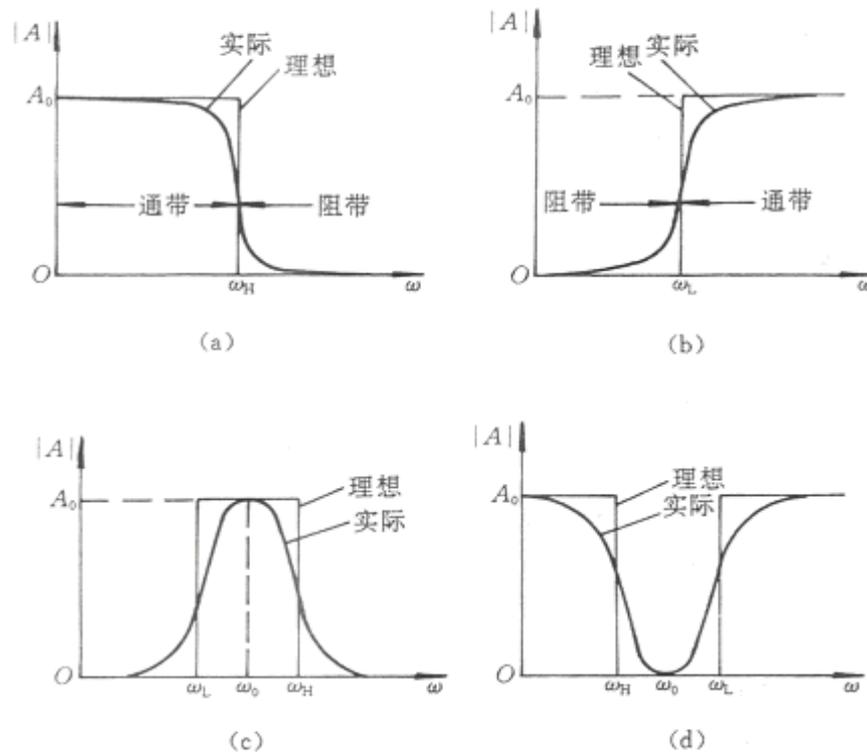
减，因此其带宽 $BW = \omega_H$ 。

高通滤波电路：其幅频响应如图 3-2 (b) 所示，由图可以看到，在 $0 < \omega < \omega_L$ 范围内的频率为阻带，高于 ω_L 的频率为通带。从理论上来说，它的带宽 $BW = \infty$ ，但实际上，由于受有源器件带宽的限制，高通滤波电路的带宽也是有限的。

带通滤波电路：其幅频响应如图 3-2 (c) 所示，图中 ω_L 为低边截止角频率， ω_H 为高边截止角频率， ω_0 为中心角频率。由图可知，它有两个阻带： $0 < \omega < \omega_L$ 和 $\omega > \omega_H$ ，因此带宽 $BW = \omega_H - \omega_L$ 。

带阻滤波电路：其幅频响应如图 3-2 (d) 所示，由图可知，它有两个通带：在 $0 < \omega < \omega_H$ 和 $\omega > \omega_L$ ，和一个阻带： $\omega_H < \omega < \omega_L$ 。因此它的功能是衰减 ω_L 到 ω_H 间的信号。同高通滤波电路相似，由于受有源器件带宽的限制，通带 $\omega > \omega_L$ 也是有限的。

带阻滤波电路抑制频带中点所在角频率 ω_0 也叫中心角频率。



(a) 低通滤波电路 (LPF) (b) 高通滤波电路 (HPF)
(c) 带通滤波电路 (BPF) (d) 带阻滤波电路 (BEF)

图 3-2 各种滤波电路的幅频响应

三、实验内容

1. 测量低通滤波器的频响特性

图 3-3 (a) 为无源低通滤波器；图 3-3 (b) 为有源低通滤波器。

- ① 连接 DDS1 与 5P01 (无源低通)；
- ② 调节信号源，使 DDS1 端输出 $f=100\text{Hz}$ 的正弦波，调节 1W1 使信号幅度为 1V；
- ③ 保持信号输入幅度不变，将调节频率档选到 100Hz，调节 1SS01 改变信号频率 (增加)；
- ④ 测量不同频率下，输出信号的幅度值，找出截止频率 f_c 并将数据填入表 3-1 (a) 中。
- ⑤ 连接 DDS1 与 5P02 (有源低通)；

⑥ 重复步骤②③

⑦ 测量不同频率下，输出信号的幅度值，找出截止频率 f_c 并将数据填入表 3-1 (b) 中。

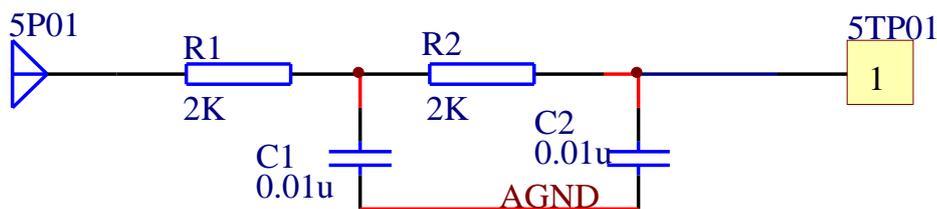


图 3-3 (a) 无源低通滤波器

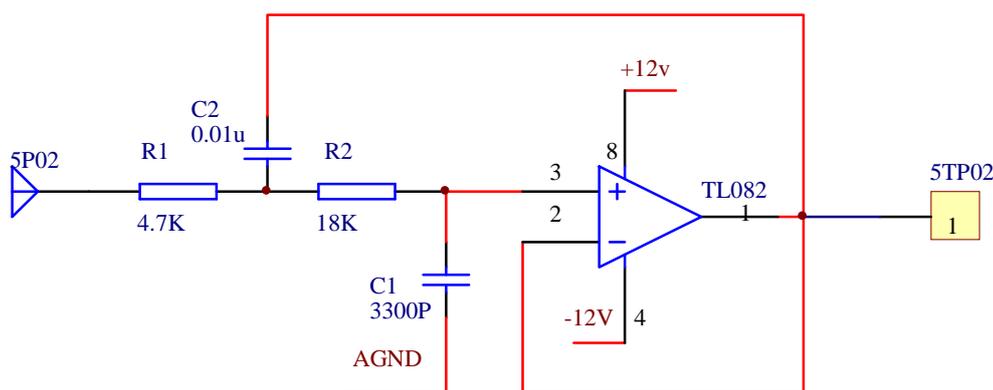


图 3-3 (b) 有源低通滤波器

表 3-1 (a) 无源低通滤波器逐点测量法

V_i (V)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
f (KHz)										
V_o (V)										

表 3-1 (b) 有源低通滤波器逐点测量法

V_i (V)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
f (KHz)										
V_o (V)										

2. 测量高通滤波器的频响特性

图 3-4 (a) 为无源高通滤波器；图 3-4 (b) 为有源高通滤波器。

- ① 连接 DDS1 与 5P03 (无源高通)；
- ② 调节信号源，使 DDS1 端输出 $f=100\text{Hz}$ 的正弦波，调节 1W1 使信号幅度为 1V；
- ③ 保持信号输入幅度不变，将调节频率档选到 100KHz，调节 1SS01 改变信号频率 (减少)；
- ④ 测量不同频率下，输出信号的幅度值，找出截止频率 f_c 并将数据填入表 3-2 (a) 中。
- ⑤ 连接 DDS1 与 5P04 (有源高通)；
- ⑥ 重复步骤②③
- ⑦ 测量不同频率下，输出信号的幅度值，找出截止频率 f_c 并将数据填入表 3-2 (b) 中。

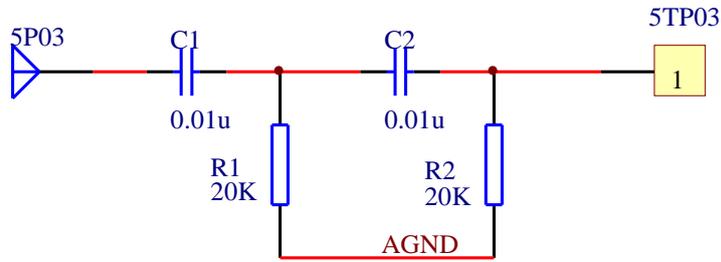


图 3-4 (a) 无源高通滤波器

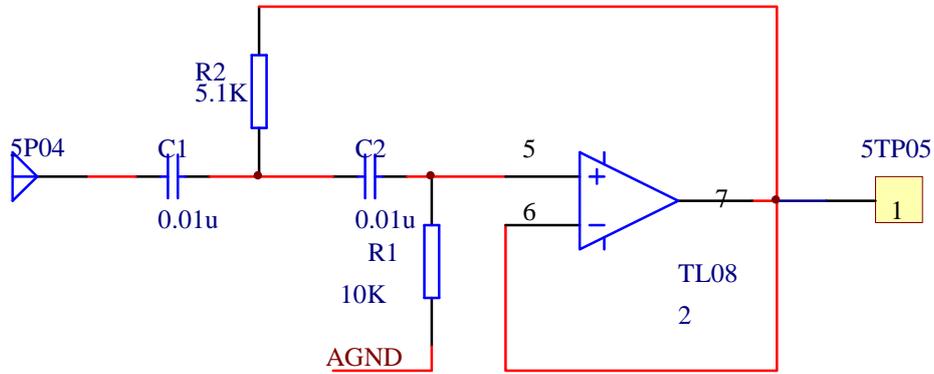


图 3-4 (b) 有源高通滤波器

表 3-2 (a) 高通无源滤波器逐点测量法

V_i (V)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
f (KHz)										
V_o (V)										

表 3-2 (b) 高通有源滤波器逐点测量法

V_i (V)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
f (KHz)										
V_o (V)										

3. 测量带阻滤波器的频响特性 (选作)

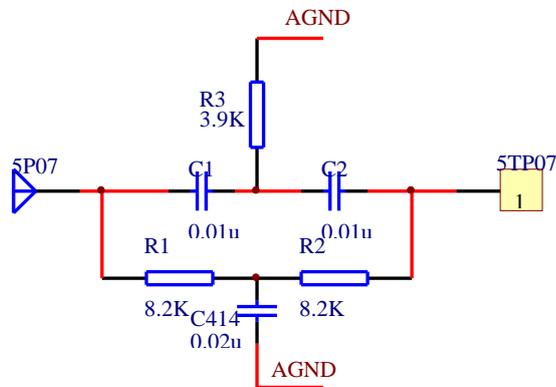


图 3-5 (a) 无源带阻滤波器

图 3-5 (a) 为无源带阻滤波器；图 3-6 (b) 为有源带阻滤波器。

- ① 连接 DDS1 与 5P07 (无源带阻)；
- ② 连接 DDS1 与 5P08 (有源带阻)；
- ② 其他步骤同实验 1、2 的步骤；
- ④ 测量不同频率下， 输出信号的幅度值， 并将数据填入表 3-3(a)、3-3 (b) 中。

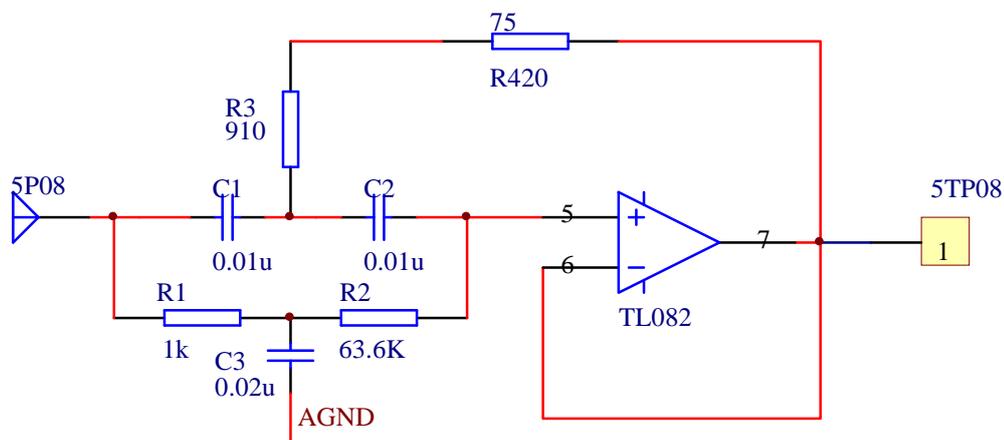


图 3-6 (b) 有源带阻滤波器

表 3-3 (a) 带阻无源滤波逐点测量法

Vi (V)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
F (Hz)												
Vo (V)												

表 3-3 (b) 带阻有源滤波逐点测量法

Vi (V)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
F (Hz)												
Vo (V)												

四、实验报告要求

整理实验数据， 并根据测试所得的数据用描点法绘制各个滤波器的幅频响应曲线。

五、实验设备

1. 双踪示波器 1 台
2. 信号与系统实验箱 1 台

实验 4 抽样定理与信号恢复

一、实验目的

1. 观察离散信号频谱，了解其频谱特点；
2. 验证抽样定理并恢复原信号。

二、实验原理说明

1. 离散信号不仅可从离散信号源获得，而且也可从连续信号抽样获得。抽样信号 $F_s(t) = F(t) \cdot S(t)$ ，其中 $F(t)$ 为连续信号（例如三角波）， $S(t)$ 是周期为 T_s 的矩形窄脉冲。 T_s 又称抽样间隔， $F_s = \frac{1}{T_s}$ 称抽样频率， $F_s(t)$ 为抽样信号波形。 $F(t)$ 、 $S(t)$ 、 $F_s(t)$ 波形如图 4-1。

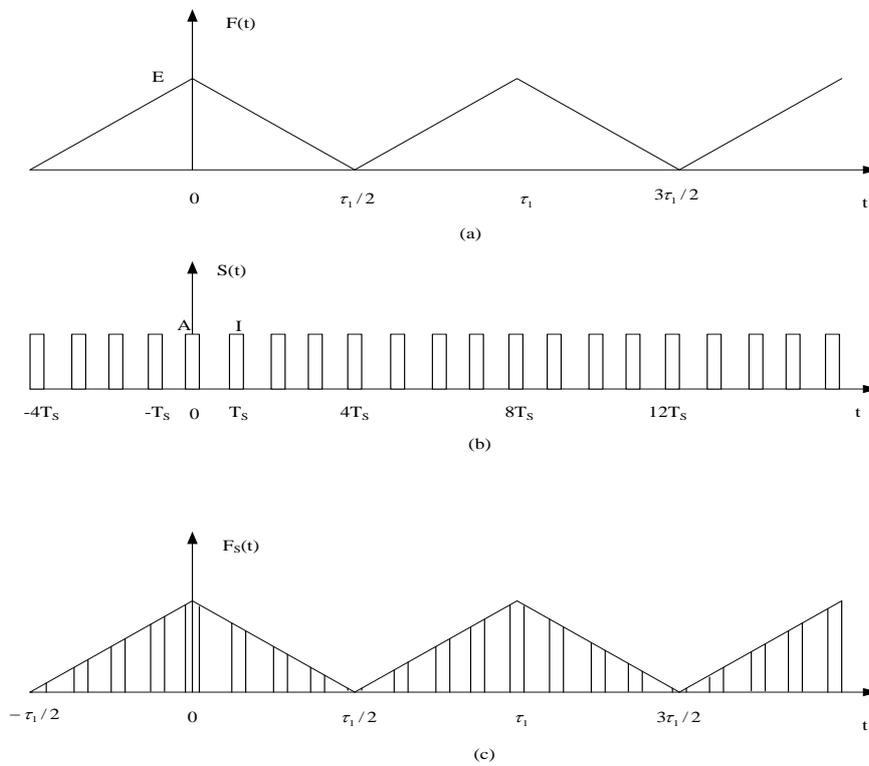


图 4-1 连续信号抽样过程

将连续信号用周期性矩形脉冲抽样而得到抽样信号，可通过抽样器来实现，实验原理电路如图 4-2 所示。

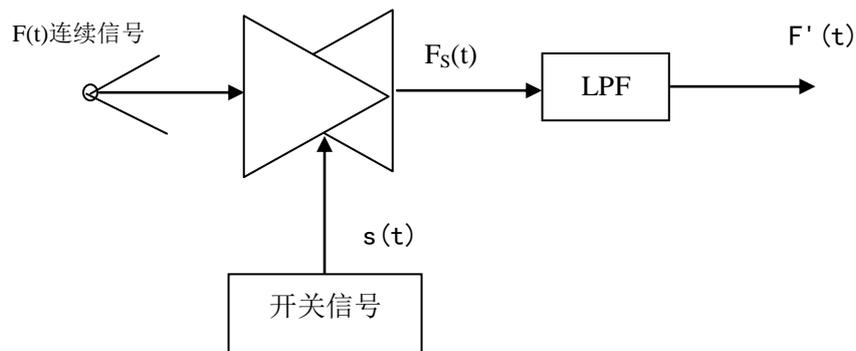


图 4-2 信号抽样实验原理图

2. 连续周期信号经周期矩形脉冲抽样后，抽样信号的频谱

$$F_s(j\omega) = \frac{A\tau}{T_s} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \text{Sa} \left(\frac{m\omega_s \tau}{2} \right) \cdot 2\pi \delta(\omega - m\omega_s)$$

它包含了原信号频谱以及重复周期为 f_s ($f_s = \frac{\omega_s}{2\pi}$ 、幅度按 $\frac{A\tau}{T_s} \text{Sa} \left(\frac{m\omega_s \tau}{2} \right)$ 规律变化的原信号频

谱，即抽样信号的频谱是原信号频谱的周期性延拓。因此，抽样信号占有的频带比原信号频带宽得多。

以三角波被矩形脉冲抽样为例。三角波的频谱：

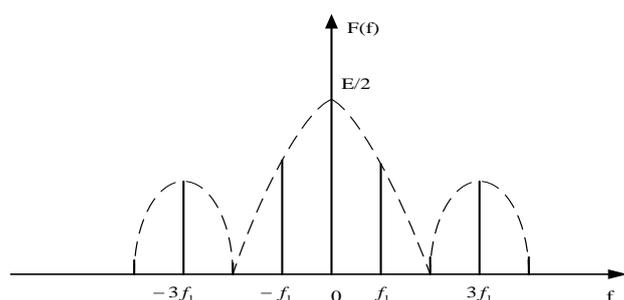
$$F(j\omega) = E\pi \sum_{k=-\infty}^{\infty} \text{sa}^2 \left(\frac{k\pi}{2} \right) \delta \left(\omega - k \frac{2\pi}{\tau_1} \right)$$

抽样信号的频谱：

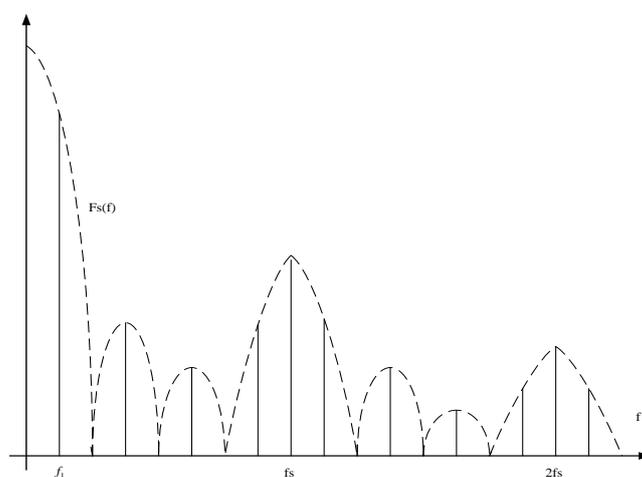
$$F_s(j\omega) = \frac{EA\tau\pi}{TS} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \text{Sa} \left(\frac{m\omega_s \tau}{2} \right) \cdot \text{sa}^2 \left(\frac{k\pi}{2} \right) \cdot \delta(\omega - k\omega_1 - m\omega_s)$$

式中 $\omega_1 = \frac{2\pi}{\tau_1}$ 或 $f_1 = \frac{1}{\tau_1}$

取三角波的有效带宽为 $3\omega_1$ $f_s = 8f_1$ 作图，其抽样信号频谱如图 4-3 所示。



(a) 三角波频谱



(b) 抽样信号频谱

图 4-3 抽样信号频谱图

如果离散信号是由周期连续信号抽样而得，则其频谱的测量与周期连续信号方法相同，但应注意频谱的周期性延拓。

3. 抽样信号在一定条件下可以恢复出原信号，其条件是 $f_s \geq 2B_f$ ，其中 f_s 为抽样频率， B_f 为原信号占有频带宽度。由于抽样信号频谱是原信号频谱的周期性延拓，因此，只要通过一截止频率为 f_c ($f_m \leq f_c \leq f_s - f_m$ ， f_m 是原信号频谱中的最高频率) 的低通滤波器就能恢复出原信号。

如果 $f_s < 2B_f$ ，则抽样信号的频谱将出现混迭，此时将无法通过低通滤波器获得原信号。

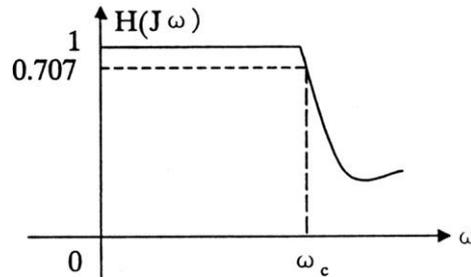


图 4-4 实际低通滤波器在截止频率附近频率特性曲线

在实际信号中，仅含有有限频率成分的信号是极少的，大多数信号的频率成分是无限制的，并且实际低通滤波器在截止频率附近频率特性曲线不够陡峭（如图 4-4 所示），若使 $f_s = 2B_f$ ， $f_c = f_m = B_f$ ，恢复出的信号难免有失真。为了减小失真，应将抽样频率 f_s 取高 ($f_s > 2B_f$)，低通滤波器满足 $f_m < f_c < f_s - f_m$ 。

为了防止原信号的频带过宽而造成抽样后频谱混迭，实验中常采用前置低通滤波器滤除高频分量，如图 4-5 所示。若实验中选用原信号频带较窄，则不必设置前置低通滤波器。

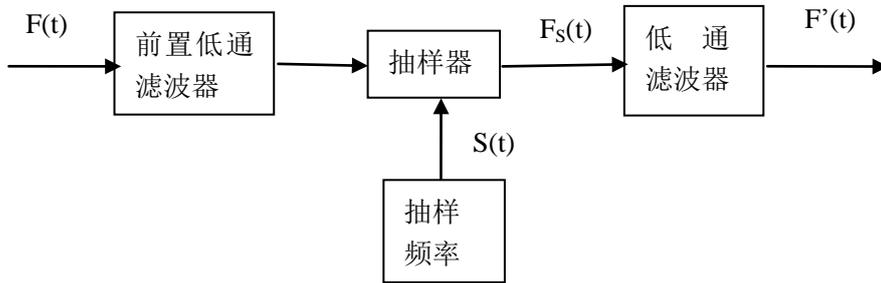


图 4-5 信号抽样流程图

本实验采用有源低通滤波器，如图 4-6 所示。若给定截止频率 f_c ，并取 $Q = \frac{1}{\sqrt{2}}$ （为避免幅频特性出现峰值）， $R_1 = R_2 = R$ ，则：

$$C_1 = \frac{Q}{\pi f_c R} \quad (4-1)$$

$$C_2 = \frac{1}{4\pi f_c QR} \quad (4-2)$$

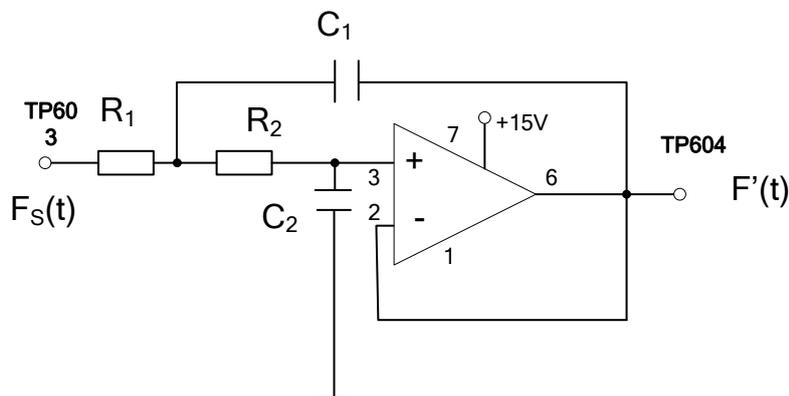


图 4-6 有源低通滤波器实验电路图

三、实验内容

1. 观察抽样信号波形。

① 调整信号源，使 DDS1 输出 1KHZ 的三角波，调节电位器 1W1，使输出信号幅度为 1V；

② 连接 DDS1 与 1P01，输入抽样原始信号；连接抽样脉冲与 1P02；

③ 改变抽样脉冲的频率，在抽样脉冲的 IED 灯闪烁的状态下来调整其频率。用示波器观察 1TP03 ($F_S(t)$) 的波形；

④ 使用不同的抽样脉冲频率，观察信号的变化。

2. 验证抽样定理与信号恢复

(1) 信号恢复实验方案方框图如图 4-7 所示。

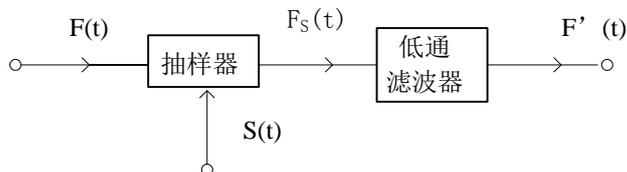
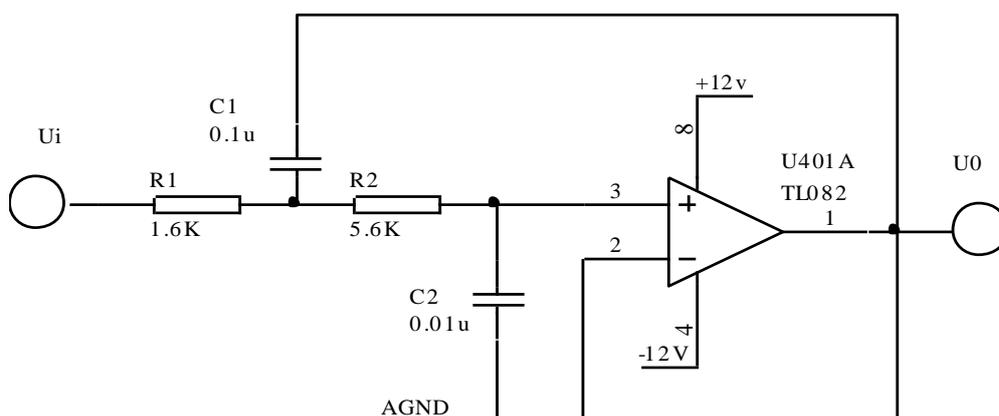


图 4-7 信号恢复实验方框图

(2) DDS1 输出 $f=1\text{KHz}$, $A=1\text{V}$ 有效值的三角波接于 1P01, 示波器 CH1 接于 1TP03 观察抽样信号 $F_S(t)$, CH2 接于 1TP04 观察恢复的信号波形。

(3) 拨动开关 1K1 拨到“2K”位置，选择截止频率 $f_{c1}=2\text{KHz}$ 的滤波器；拨动开关 1K1 拨到“4K”位置，选择截止频率 $f_{c2}=4\text{KHz}$ 的滤波器；此时在 1TP04 可观察恢复的信号波形。

(4) 同学们可按照图 4-8，在基本运算单元试搭截止频率 $f_{c1}=2\text{K}$ 的低通滤波器，抽样输出波形 1P03 送入 U_i 端，恢复波形在 U_o 端测量，图中电阻可用电位器代替，进行调节。



(5) 设 1KHz 的三角波信号的有效带宽为 3KHz, $F_s(t)$ 信号分别通过截止频率为 f_{c1} 和 f_{c2} 低通滤波器, 观察其原信号的恢复情况, 并完成下列观察任务。

1. 当抽样频率为 3KHz、截止频率为 2KHz 时:

$F_s(t)$ 的波形	
$F'(t)$ 波形	

2. 当抽样频率为 6KHz、截止频率为 2KHz 时:

$F_s(t)$ 的波形	
$F'(t)$ 波形	

3. 当抽样频率为 12KHz、截止频率为 2KHz 时:

$F_s(t)$ 的波形	
$F'(t)$ 波形	

4. 当抽样频率为 3KHz、截止频率为 4KHz 时:

$F_s(t)$ 的波形	
$F'(t)$ 波形	

5. 当抽样频率为 6KHz、截止频率为 4KHz 时：

$F_s(t)$ 的波形	
$F'(t)$ 波形	

6. 当抽样频率为 12KHz、截止频率为 4KHz 时：

$F_s(t)$ 的波形	
$F'(t)$ 波形	

(6) 将三角波换成正弦波再测试一遍（可以看出来观察一下，不做书面要求）。

四、实验报告要求

1. 整理数据，画出不同抽样频率不同截止频率下的六组波形；
2. 比较在不同抽样频率（三种频率）情况下， $F(t)$ 与 $F'(t)$ 波形，得出结论；

五、实验设备

1. 双踪示波器 1 台
2. 信号系统实验箱 1 台