

附件 2:



天津中德应用技术大学
Tianjin Sino-German University of Applied Sciences

信号与系统

实验教学指导书

软件与通信学院编制

2020 年 08 月

目 录

第一部分 实验综述	3
一、实验信息	3
二、实验定位	3
三、相关专业知识简介	3
四、相关仪器设备、工具材料简介	3
五、实验项目简介	3
六、考核评价要求	3
七、安全教育	4
第二部分 实验项目	6
实验项目一 连续系统的模拟和冲激响应与阶跃响应实验	6
(一) 实验项目概述	6
(二) 实验项目的准备	6
(三) 实验项目的实施	10
(四) 实验项目的结果分析	13
实验项目二 信号卷积和信号频谱搬移与频分复用实验	14
(一) 实验项目概述	14
(二) 实验项目的准备	14
(三) 实验项目的实施	18
(四) 实验项目的结果分析	21
实验项目三 信号的合成以及谐波幅度、相位对波形合成的影响	21
(一) 实验项目概述	21
(二) 实验项目的准备	22
(三) 实验项目的实施	24
(四) 实验项目的结果分析	28
实验项目四 抽样定理与信号恢复	29
(一) 实验项目概述	29
(二) 实验项目的准备	29
(三) 实验项目的实施	33
(四) 实验项目的结果分析	35

第一部分 实验综述

一、实验信息

- 1.实验名称：信号与系统实验
- 2.学时学分：16 学时，
- 3.开课时间：第 3 学期
- 4.适用专业：通信工程专业
- 5.开课单位：软件与通信学院

二、实验定位

该实验为《信号与系统》的实践环节，培养学生的动手能力及理论联系实际能力，在通信工程专业人才培养体系中具有一定的地位，对支撑人才培养目标起到一定的支撑作用，对理论知识的学习有一定的促进作用。（详见人才培养方案）

三、相关专业知识简介

先修课程为电路分析、高等数学等，开课前需要学生掌握电路的分析和搭建技巧，掌握了微积分的基本概念、微分方程的求解方法，掌握了实验箱、示波器、万用表等基本仪器的使用。

四、相关仪器设备、工具材料简介

信号与系统实验箱、示波器、万用表、导线等

五、实验项目简介

序号	实验项目	学时	实验要求	备注
1	连续系统的模拟和冲激响应与阶跃响应实验	4	二人一组，合作完成	
2	信号卷积和信号频谱搬移与频分复用实验	4	二人一组，合作完成	
3	信号的合成以及谐波幅度、相位对波形合成的影响	4	二人一组，合作完成	
4	抽样定理与信号恢复实验	4	二人一组，合作完成	

六、考核评价要求

- 1.考核方式：考查
- 2.成绩评定办法

（1）成绩评定构成：

最终成绩=考勤×20% + 课堂表现×30% + 实训报告×50%

（2）成绩评定细则：

考勤：16 次课，每次点名迟到扣 3 分，缺勤扣 10 分，共 100 分，扣完为止。

课堂表现：每人基础分数 60 分，按照课堂提问、实验操作规范度及实验结果进行打分。
课堂表现优秀+5 分，课堂表现差-3 分。最高 100 分。

实训报告：共提交 4 次实训报告，每次实训报告满分 10 分，最高 40 分。通过卷面、内容、完成情况来综合打分。

最终成绩 = 考勤*20% + 课堂表现*30% + 实训报告*50%。

七、安全教育

教学环节	教学内容	教学方法	时间
知识讲解	<p>一、 实验室安全使用要求</p> <p>1、要牢固树立“安全第一”的思想。认真贯彻落实国家的安全生产的方针，严格执行各项安全管理制度。</p> <p>2、注意采用教师要求的工作方法、器具、工作姿势、身体位置进行实验实训。实验实训室要配备必要的安全防护设施和用品，加强监督检查。</p> <p>3、根据实验实训时不同内容，按照规定穿好不同要求的工作服、戴好工作帽和防护用品。</p> <p>4、在实验实训时精神要高度集中，注意思想不要放松。学生应相互监督实习安全，发现问题应随时停止实验实训并报告教师，纠正后经任课教师同意继续实验实训。在长时间连续学习的过程中，应该适当休息，勿过分疲劳。</p> <p>5、对繁杂或具危险性的工作，应在教师严格监督和指导下进行。要掌握事故规律。一般实验实训初期和实验实训末期容易发生事故。在实验实训初期，由于好奇心强，什么都要看，什么都要动，就容易违反操作规程，发生事故。实验实训末期，思想放松，麻痹大意，也容易发生事故。</p> <p>6、学生应爱护机器设备并保持工作环境的整洁。对在实训中，发生设施、设备、工量具有故障，应及时停止使用报告教师，以防安全事故发生。</p> <p>7、严禁任何人利用互联网观看、传播、拷贝、制作淫秽、反动、迷信等不健康内容。</p> <p>8、严禁在机房玩游戏、使用社交软件进行与学习无关的活动，严禁制作、复制、查阅和传播有害反动信息。如有违反规定者，一经发现，将严肃处理。</p>	讲授	5 分钟

教学环节	教学内容	教学方法	时间
	<p>9、严禁易燃易爆和强磁物品及其它与机房工作无关的物品进入机房。</p> <p>10、未经许可，不得在实验实训室的计算机上使用U盘或其它移动存储设备，一经发现将临时没收。</p> <p>11、未经允许，不得随意进入实验场所，不得将与上课无关的人员带入机房。</p> <p>12、进入机房后需在实验室使用记录上登记使用的机器号，不得私自与他人调换座位，有问题举手提问，不得随意走动。</p> <p>13、不准私自拆开机箱，更不准插拔电脑各部件及私拆电源。发现鼠标、键盘不好用报告教师处理不得私自调换。</p> <p>14、若发现异常现象如机器故障、网线故障、病毒等，应立即报告教师，不得自行处理。</p> <p>15、上课期间应认真遵守课堂纪律，不得高声喧哗，不得聊天嬉戏；应自觉保持机房卫生爱护学校财产，不得将食品或其他无关物品带入机房。</p> <p>16、学生实验实训结束，应按规定步骤关闭设备后切断电源；有责任、有义务清洁设备和环境卫生，服从教师安排搞好环境卫生。</p> <p>二、 消防设施设备的位置</p> <p>1、消火栓和灭火器位于实验实训室外，走廊墙壁上。</p> <p>2、消火栓与灭火器分开放置，消火栓位于上部箱体中，灭火器位于下部箱体中。</p> <p>3、由于实验室中有大量用电设备，如欲突发火情要先切断电源，再选择灭火器进行初期扑救。</p> <p>4、简要介绍灭火器使用方法。</p>	现场教学 (在距离实验室最近的消火栓处)	5 分钟
操作环节	组织学生在“附件一 实验实训课堂安全承诺书”上签字确认。	讲授	7 分钟
总结	教师总结教学内容，再次强调安全操作的重要性，提高学生安全意识	讲授	3 分钟

第二部分 实验项目

实验项目一 连续系统的模拟和冲激响应与阶跃响应实验

（一）实验项目概述

1.实验项目名称：连续系统的模拟和冲激响应与阶跃响应实验

2.实验项目学时：4 学时

3.实验项目的目的：

- （1）了解基本运算器——加法器、标量乘法器和积分器的电路结构和运算功能。
- （2）掌握用基本运算单元模拟连续时间系统的方法；
- （3）观察和测量 RLC 串联电路的阶跃响应与冲激响应的波形和有关参数，并研究其电路元件参数变化对响应状态的影响；
- （4）掌握有关信号时域的测量方法；
- （5）培养学生团结协作、自主学习、善于发现问题解决问题、勇于创新的道德品质

4.实验项目的要求：二到三人一组，合作完成。

（二）实验项目的准备

1.实验项目的基本原理

1）线性系统的模拟

系统的模拟就是用由基本运算单元组成的模拟装置来模拟实际的系统。这些实际系统可以是电的或非电的物理量系统，也可以是社会、经济和军事等非物理量系统。模拟装置可以与实际系统的内容完全不同，但是两者的微分方程完全相同，输入、输出关系即传输函数也完全相同。模拟装置的激励和响应是电物理量，而实际系统的激励和响应不一定是电物理量，但它们之间的关系是一一对应的。所以，可以通过对模拟装置的研究来分析实际系统，最终达到一定条件下确定最佳参数目的。

（1）比例放大器，如图1-1。

$$u_0 = -\frac{R_2}{R_1} \cdot u_1$$

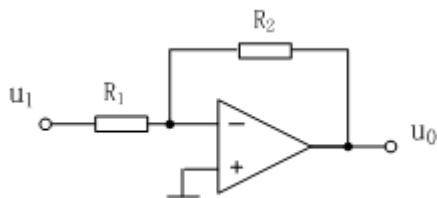


图1-2 比例放大器电路连接示意图

(2) 加法器，如图1-2。

$$u_o = -\frac{R_2}{R_1} (u_1 + u_2) = -(u_1 + u_2) \quad (R_1 = R_2)$$

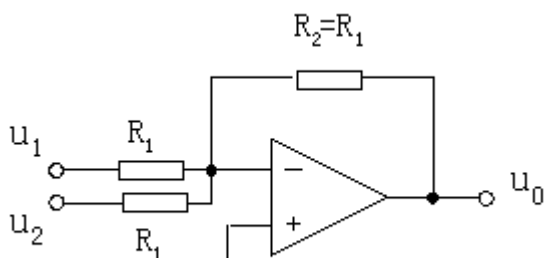


图1-2 加法器电路连接示意图

(3) 积分器，如图1-3。

$$u_o = -\frac{1}{RC} \int u_1 dt$$

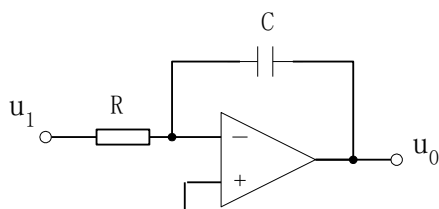


图1-3 积分器电路连接示意图

3) 一阶系统的模拟

图1-4(a)是最简单RC电路，设流过R·C的电流为*i(t)*：

则我们有 $x(t) - y(t) = Ri(t)$

根据电容C上电压与电流关系 $i(t) = C \frac{dy(t)}{dt}$

因此 $x(t) - y(t) = RC \frac{dy(t)}{dt}$

上式亦可写成 $\frac{dy(t)}{dt} + \frac{1}{RC} y(t) - \frac{1}{RC} x(t) = 0$ 这是最典型的一阶微分方程。

由于图1-4(a)的RC电路输入与输出信号之间关系可用一阶微方程来描述，

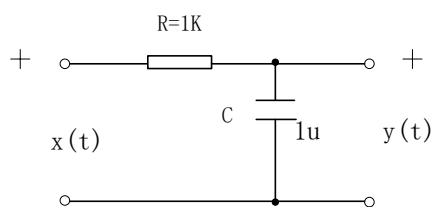
故常称为一阶RC电路。

上述典型的微分方程我们可以改变形式，写成如下表示式：

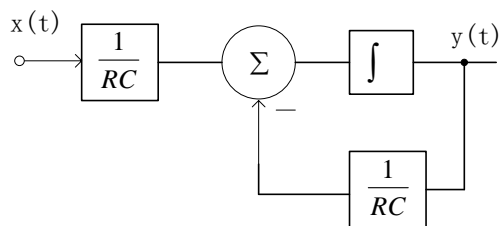
$$\frac{1}{RC}x(t) - \frac{1}{RC}y(t) = \frac{dy(t)}{dt} \quad \dots\dots\dots (1) \text{ 式}$$

$$y(t) - x(t) = -RC \frac{dy(t)}{dt} \quad \dots\dots\dots (2) \text{ 式}$$

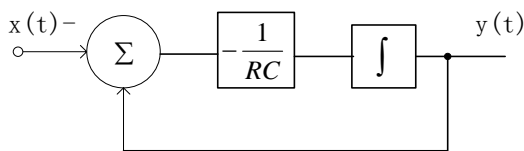
这两个数学关系正好用图 1-4 的(b)、(c)表示，图(b)和图(c)在数学关系上是等效的。应用比例放大，加法器和积分器电路(2)式可用图 1-4(d)所示的电路表示：它是最简单的一阶模拟电路。



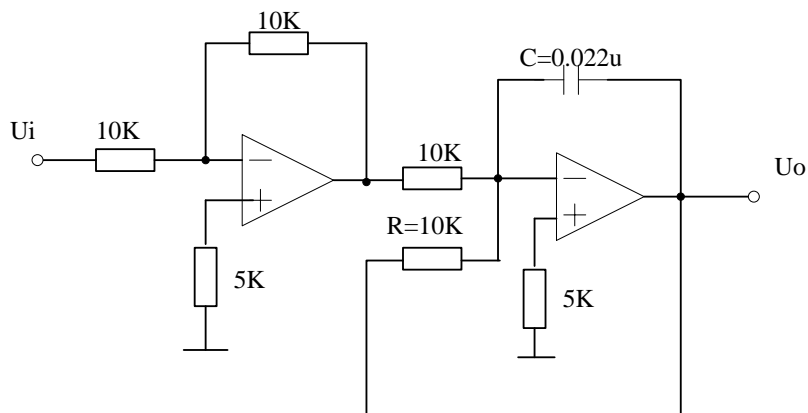
(a)



(b)



(c)



(d)

图1-4一阶系统的模拟

2) 实验如图 1-5 所示为 RLC 串联电路的阶跃响应与冲激响应的电路连接图，图 1-5 (a) 为阶跃响应电路连接示意图；图 1-5 (b) 为冲激响应电路连接示意图。

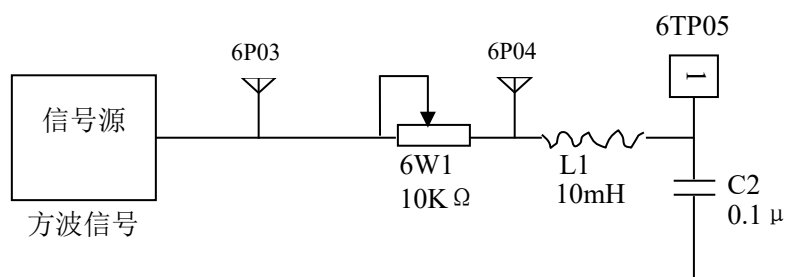


图1-5 (a) 阶跃响应电路连接示意图

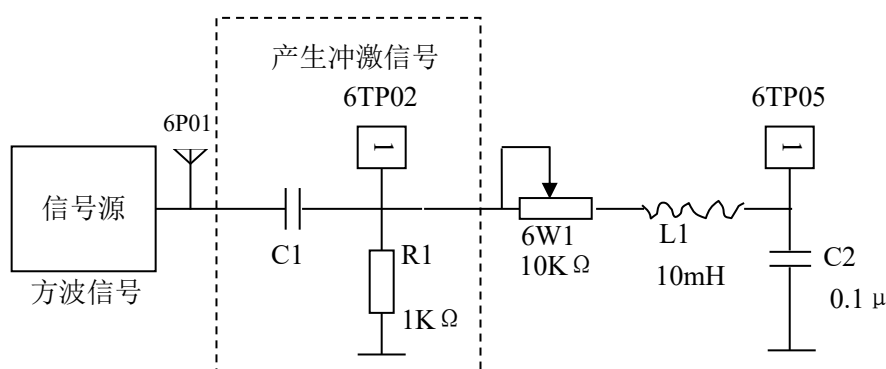


图1-5 (b) 冲激响应电路连接示意图

其响应有以下三种状态：

- (1) 当电阻 $R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 时，称过阻尼状态；
- (2) 当电阻 $R = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 时，称临界状态；
- (3) 当电阻 $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 时，称欠阻尼状态。

现将阶跃响应的动态指标定义如下：

上升时间 t_r ： $y(t)$ 从 0 到第一次达到稳态值 $y(\infty)$ 所需的时间。

峰值时间 t_p ： $y(t)$ 从 0 上升到 y_{\max} 所需的时间。

调节时间 t_s ： $y(t)$ 的振荡包络线进入到稳态值的 $\pm 5\%$ 误差范围所需的时间。

$$\text{最大超调量 } \delta_p = \frac{y_{\max} - y(\infty)}{y(\infty)} \times 100\%$$

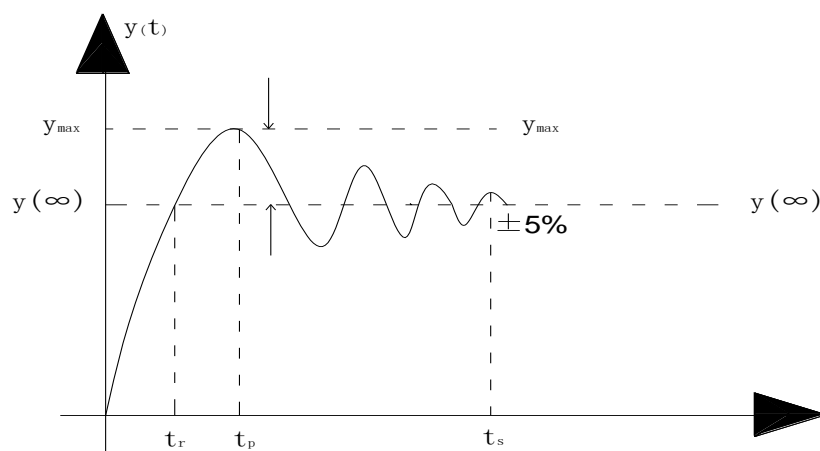


图1-5 (c) 冲激响应动态指标示意图

冲激信号是阶跃信号的导数，所以对线性时不变电路冲激响应也是阶跃响应的导数。为了便于用示波器观察响应波形，实验中用周期方波代替阶跃信号。而用周期方波通过微分电路后得到的尖顶脉冲代替冲激信号。

2.实验项目的仪器设备、工具材料

双踪或高性能示波器	1 台
信号系统实验箱	1 台
铆孔连接线	若干

3.实验项目的注意事项

测量点：

6TP02：冲激激励信号观测点；

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：冲激激励信号输出插孔。

考虑到DDS1信号源的短路保护，其输出加了隔离，因此驱动能力有限，实验时如DDS1接入负载后信号源波形失真，那么可以在DDS1和负载间加一个射随器，射随器可以用“连续时间系统模拟”模块的集成运放1或集成运放2。

(三) 实验项目的实施

1.连续时间系统的模拟

在实验基本运算单元与连续系统的模拟模块中，有两个运算放大器。分别通过三个插孔与其输入输出端相连。进行实验时，可根据需要选择不同阻值的电阻。实验模块上有4个电阻、6个精密电位器可供选择。电位器的阻值根据需要进行调节。

1) 基本运算器——加法器的观测

(1) 同学们自己动手连接如图1-6所示实验电路；

(2) 连接DDS1和6P03；

(3) 调节信号源，使DDS1输出 $f=1\text{KHz}$ 的正弦波，调节“综合仪表模块”幅度电位器使信号输出幅度为 1V_{pp} ；

(4) 将6P04和DDS1分别与 u_1 和 u_2 端相连，调节电位器6W1可改变6P04输出信号的幅度；

(5) 用示波器观测 u_0 端信号幅度，调节6W1观察信号幅度的变化，计算输出信号幅度是否为两输入信号幅度之和。

2) 基本运算器——比例放大器的观测

(1) 同学们自己动手连接如图1-7所示实验电路；

(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“综合仪表模块”幅度电位器使信号幅度为 1V_{pp} ；

(3) 将信号源产生的脉冲信号送入连接的电路输入端 u_1 ，示波器同时观察输入、输出波形并比较。

3) 基本运算器——积分器的观测

(1) 同学们自己动手连接如图1-8所示实验电路；

(2) 连接DDS1与连接电路的输入端 U_i ；

(3) 调节信号源使DDS1产生 $f=1\text{KHz}$ ，占空比为50%的脉冲信号，调节“综合仪表模块”幅度电位器使信号幅度为 1V_{pp} 。

(4) 用示波器同时观察输入端 U_i 、输出端 U_o 的波形并比较。

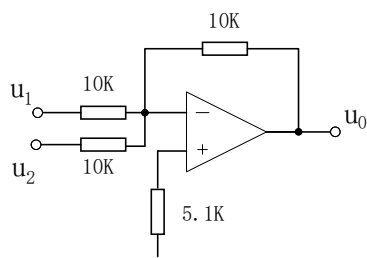


图1-6 加法器实验电路图

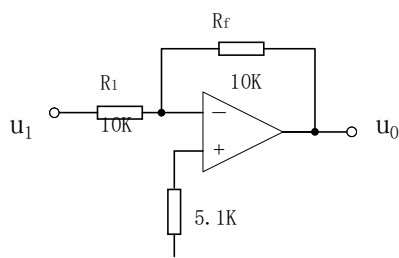


图1-7 比例放大器实验电路图

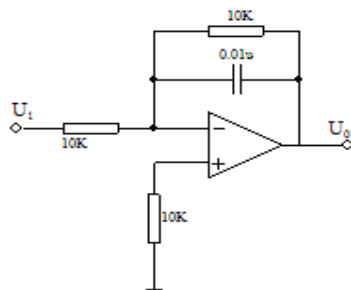


图1-8 积分器实验电路

4) 一阶RC电路的模拟

如图1-4(a)为已知的一阶RC电路。图1-4(d)是它的一阶模拟电路。

(1) 同学们自己动手连接如图1-10 (d) 所示实验电路；

(2) 连接DDS1与连接电路的输入端 U_i ；

(3) 调节信号源，使DDS1端输出 $f=1\text{KHz}$ ，占空比为50%的脉冲信号，调节“综合仪表模块”幅度电位器使信号幅度为 1V_{pp} 。

(4) 用示波器观测输出端 U_o 波形，验证其模拟情况。

2. 阶跃响应与冲激响应

1) 阶跃响应波形观察与参数测量

设激励信号为方波，其幅度为 1.5V_{pp} ，频率为 500Hz 。

实验电路连接图如图2-1 (a) 所示。

① 连接DDS1与6P03。

②

调节信号源，使DDS1输出 $f=500\text{Hz}$ ，占空比为50%的脉冲信号，幅度调节为 1.5V_{pp} ；

(注意：实验中，在调整信号源的输出信号的参数时，需连接上负载后调节)。

③

示波器CH1接于6TP05，调整6W1，使电路分别工作于欠阻尼、临界和过阻尼三种状态，并将实验数据填入表格1-1中。

表1-1

状 态 参数测量	欠 阻 尼 状 态	临 界 状 态	过 阻 尼 状 态
参数测量	$R <$ $tr =$ $ts =$ $\delta =$	$R =$ $tr =$	$R >$

波形观察			
------	--	--	--

注：描绘波形要使三种状态的X轴坐标（扫描时间）一致。

2). 冲激响应的波形观察

冲激信号是由阶跃信号经过微分电路而得到。激励信号为方波，其幅度为1.5Vpp，频率为2K。

实验电路如图1-1（b）所示。

- ①连接DDS1与6P01；
- ②将示波器的CH1接于6TP02，观察经微分后响应波形（等效为冲激激励信号）；
- ③连接6P02与6P03；
- ④

将示波器的CH2接于6TP05，调整6W1,使电路分别工作于欠阻尼、临界和过阻尼三种状态；

- ⑤观察6TP05端三种状态波形，并填于表1-2中。

表1-2

	欠阻尼状态	临界状态	过阻尼状态
激励波形			
响应波形			

表中的激励波形为在测量点6TP02观测到的波形（冲激激励信号）。

（四）实验项目的结果分析

- 1. 准确绘制各基本运算器输入输出波形，标出峰-峰电压及周期；
- 2. 绘制一阶模拟电路阶跃响应，标出峰-峰电压及周期。

3.描绘同样时间轴阶跃响应与冲激响应的输入、输出电压波形时，要标明信号幅度A、周期T、方波脉宽T1以及微分电路的 τ 值。

4.分析实验结果，说明电路参数变化对阶跃和冲激响应状态的影响。

5.问题回答：

1) 如果激励只有正冲激，分析系统的响应结果？在实验平台上验证结果？

2) 改变方波的幅度与占空比，分析幅度和占空比对实验结果是否有影响？

实验项目二 信号卷积和信号频谱搬移与频分复用实验

(一) 实验项目概述

1.实验项目名称：信号卷积和信号频谱搬移与频分复用实验

2.实验项目学时：4 学时

3.实验项目的目的：

- (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。
- (3) 掌握傅里叶变换频移性质。
- (4) 理解幅度调制原理。
- (5) 理解频分复用原理。

4.实验项目的要求：二到三人一组，合作完成。

(二) 实验项目的准备

1.实验项目的基本原理

1) 信号卷积

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

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：

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

(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2-1所示。

下面由图解的方法（图2-1）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。

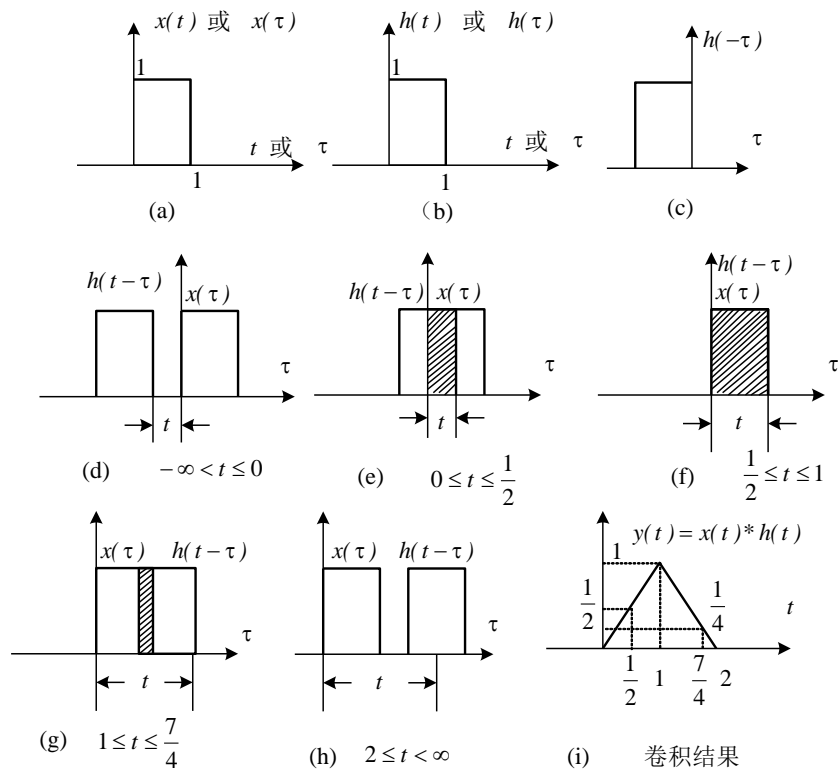


图2-1 两矩形脉冲的卷积积分的运算过程与结果

(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2-2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2-2(c)所示。

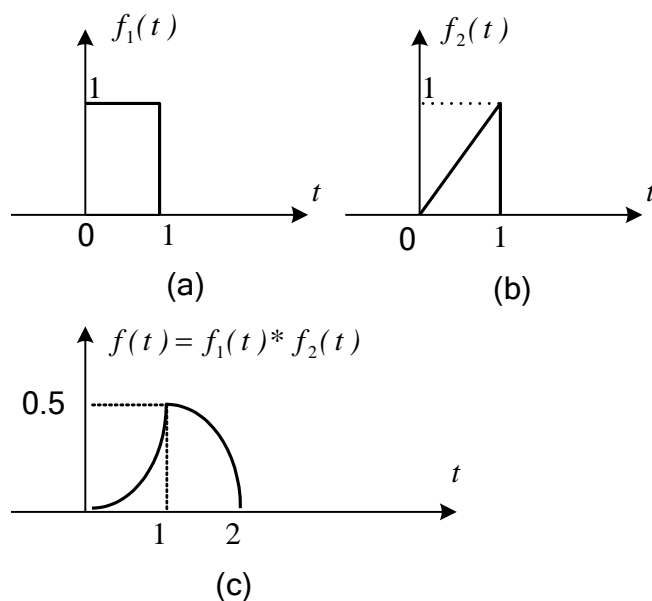


图2-2 矩形脉冲信号与锯齿脉冲信号的卷积积分的结果

2) 信号频谱搬移与频分复用

(1) 频谱搬移

在通信系统中，信号传输前，往往要对它进行调制，然后才能发射出去；在接收端，还要进行解调，才能恢复原始信号。这里我们分析模拟幅度调制，正弦波幅度调制就是利用高频正弦波的幅度携带调制信号 $x(t)$ ，时域上也就是使高频信号的幅度随调制信号的幅度变化而变化；频域上就是将调制信号的频谱搬移到载频两边，也就是频率搬移；

调制的原理框图如下图 2-3：图中需要传输的信号称调制信号，频率为 ω_c 。正弦波称为载波，称为 ω_c 载频，调制输出的信号称已调信号。正弦波调幅的基本原理就是将调制信号和高频载波信号相乘，从而将调制信号的频谱搬移动高频段上，便于信号传输。

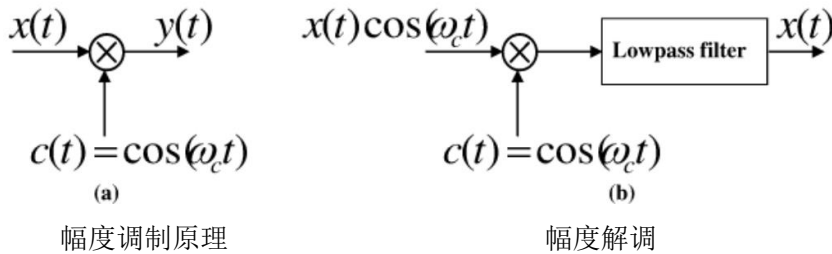


图 2-3 幅度调制解调原理

从时域上已调信号的数学表达式： $y(t) = x(t) \cos(\omega_c t)$ ，调制信号 $x(t)$ 、载波 $\cos(\omega_c t)$ 、已调信号 $y(t)$ 波形如图 2-4。

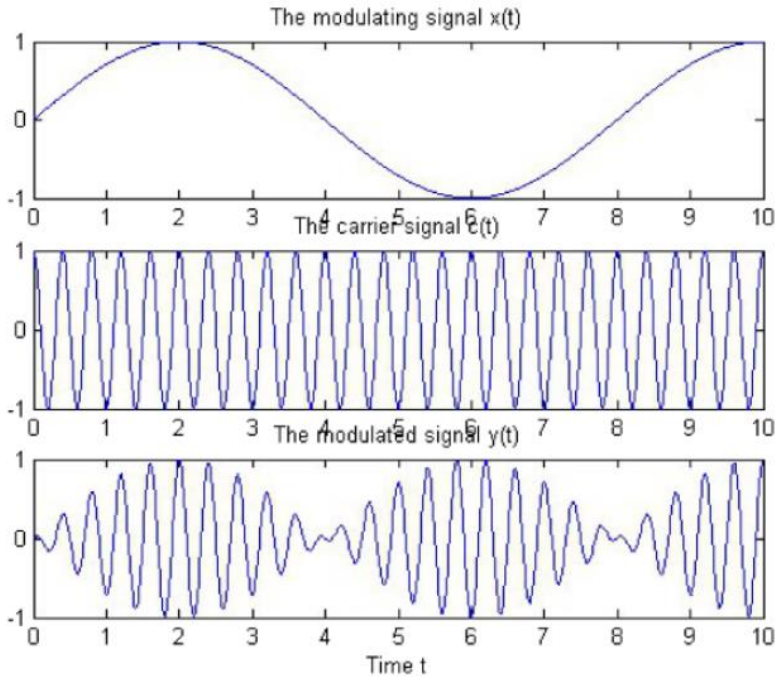


图 2-4 正弦波幅度调制信号的波形

从频域上看，如果调制信号是一个带限信号，其频谱用 $X(j\omega)$ 表示，而载波正弦波 $\cos(\omega_c t)$ 的频谱 $C(j\omega)$ 由两个冲激构成，即

$$C(j\omega) = \pi[\delta(\omega + \omega_c) + \delta(\omega - \omega_c)]$$

根据傅里叶变换的频域卷积定理可知，已调信号的频谱为

$$Y(j\omega) = \frac{1}{2\pi} [X(j\omega) * C(j\omega)]$$

即

$$Y(j\omega) = \frac{1}{2} [X(j(\omega + \omega_c)) + X(j(\omega - \omega_c))]$$

上式说明，已调信号的频谱由两个位移的 $X(j\omega)$ 构成，位移量为 $\pm \omega_c$ 。图 2-5 示出了调制过程中各信号的频谱图。

从已调信号的频谱上看，我们发现，调制信号为低通信号（Lowpass signal），其带宽（Bandwidth）为 ω_M ，而已调信号则变成了一个带宽为 $2\omega_M$ 的带通信号（Bandpass signal）。这表明，通过调制，信号在传输过程中，与不调制而直接传输相比，需要占据更宽的信道（Channel）带宽。

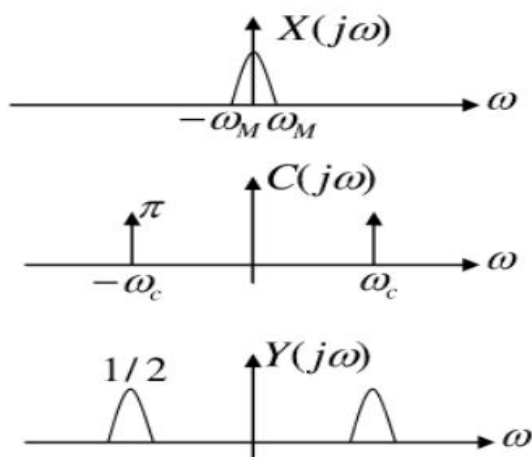
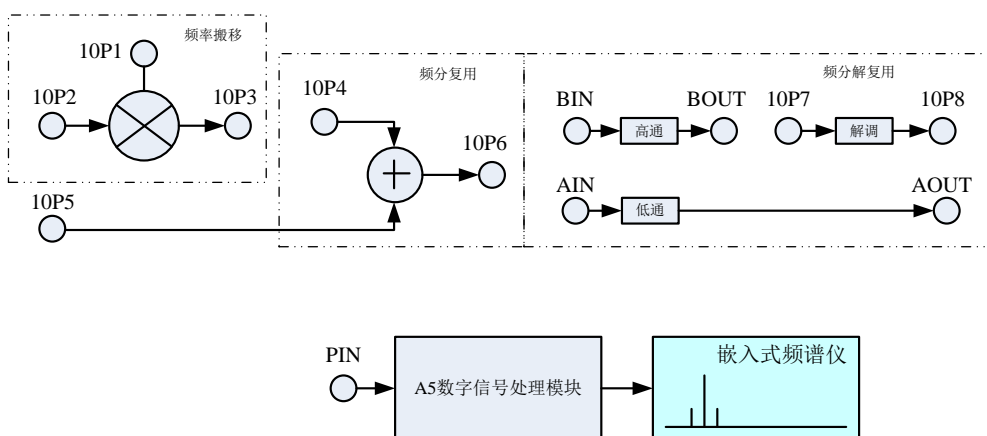


图 2-5 频率搬移

2) 频分复用

频分复用是利用带限信号频谱特性，将多个不同频的信号叠加在一个信道上传输（复用），接收端再利用滤波器取出所需信号（频分解复用）。实际通信中，一个信道上可以复用几十甚至几百个信号，为使复用信号不产生频谱混叠，通常复用端首先将不同信源信号频率搬移到不同的载频上（频率上搬移），这个过程就是频分复用，利用的就是付氏变换频移性质；接收端再经选频电路（滤波器）和解调（频率下搬移）恢复原始信号；

3) 实验电路框图



2.实验项目的仪器设备、工具材料

双踪或高性能示波器	1 台
信号系统实验箱	1 台
铆孔连接线	若干

3.实验项目的注意事项

测量点：

PIN：卷积信号输入点；

5P1：卷积后的信号输出波形测量点。

系统卷积函数输入，在系统卷积界面下拉列表中选择系统功能函数。

(三) 实验项目的实施

1. 信号卷积

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) 在实验列表中双击选择“矩形脉冲信号的自卷积”

(2) DDS1和PIN；

(3) 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“综合仪表模块”幅度电位器使信号幅度为 1Vpp 。

(4) 将示波器的 CH1 接于 DDS1，CH2 接于 5P1，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) 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3-1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2-1 输入信号卷积后的输出信号

	输入信号 $f_1(t)$	输出信号 $f_1(t) * f_1'(t)$
脉冲宽度 (us)	500	
脉冲宽度 (us)	250	
脉冲宽度 (us)	125	

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) 在实验列表中双击选择“信号与系统卷积”
- (2) 连接 DDS1 和 PIN；
- (3) 调节信号源，使 DDS1 输出 $f=1\text{KHz}$ ，占空比为 50% 的脉冲信号，调节综合仪表模块幅度电位器使信号幅度为 1V_{pp} （鼠标点“卷积信号”框即可设置）；
- (4) 将示波器的 CH1 接于 DDS1，CH2 接于 5P1(系统卷积信号测量点为 5P3)，分别观察系统冲击响应 $f_2(t)$ 波形与激励信号卷积后的输出信号 $f_1(t) * f_2(t)$ 的波形；系统函数信号可用鼠标在下图下拉表中选择；

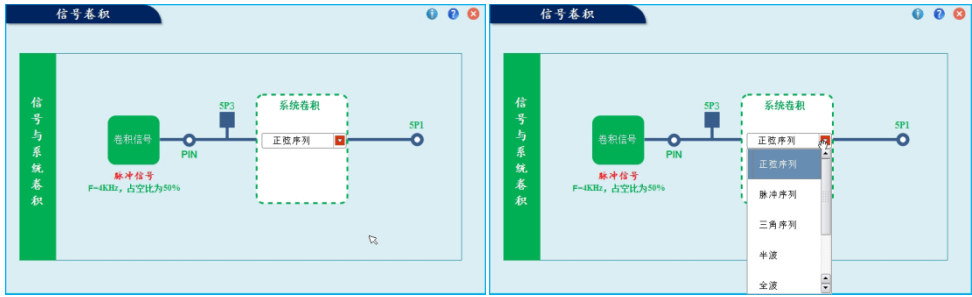


图 2-3 信号与系统卷积系统函数设置界面

- (5) 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 10-2 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2-2 输入信号和卷积后的输出信号

激励信号	输入信号 $f_1(t)$	$f_2(t)$ 锯齿波	输出信号 $f_1(t) * f_2(t)$
脉冲宽度 (us)	500		
脉冲宽度 (us)	250		
脉冲宽度 (us)	125		

2. 信号频谱搬移与频分复用

1) 频率搬移

10P1 接载频 (100KHZ), 10P2. 接音频 (10KHZ)

10P3 调制输出

10K1 置 “on” (左侧) 输出为 AM 调幅波, 用示波器测试 10TP3 波形, 调整 10W1 可改变调制度。

用连接导线将载波信号 (10P1)、信频信号 (10P2.)、已调信号 (10P3) 分别接 A5 模块 PIN, 实验平台嵌入式仪表置频谱仪功能, 用频谱仪观测上述各点频谱。

调节 10W1 电位器, 改变幅度调制的调制度, 频谱仪观察已调信号频谱。

2) 频分复用

复用信号一 (10P3)

10P1 接载频 (500KHZ)

10P2. 接音频 (3KHZ)

10P3 调制输出

10K1 置 “on” (左侧) 输出为 AM 调幅波, 用示波器测试 10TP3 波形, 调整 10W1 可改变调制度。

复用信号二 (10P5)

3KHZ 正弦波 (同 10P2. 调制信号)

频分复用

3KHZ 正弦波 (同 10P2. 调制信号) 与 10P3 作为输入连入自行搭建的加法器的 u_1 和 u_2 端 (详见图 1-6)。

u_0 复用输出, 用示波器测试 u_0 信号, 并观测其频谱。

3. 频分解复用

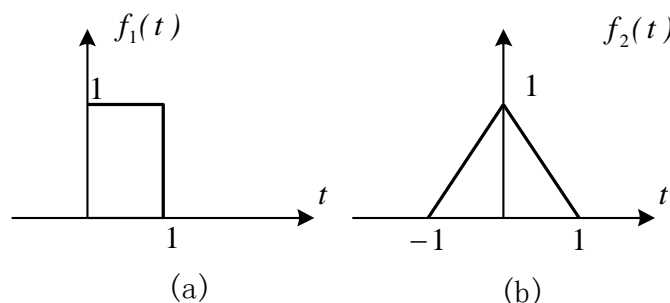
将 10P6 的迭加信号送入 AIN 和 BIN (即 10P6 与 AIN 和 BIN 相连) 则 AOUT 输出为 3KHZ 的正弦波, BOUT 输出为 500KHZ 的 AM 信号。

4. 幅度解调

将 BOUT 信号连 10P7，则 10P8 输出幅度解调信号。

(四) 实验项目的结果分析

1. 叙述信号与系统卷积的原理和过程；
2. 要求记录各实验数据填写表 2-1。
3. 按要求记录各实验数据填写表 2-2。验证并画出系统函数是脉冲信号，激励信号也是脉冲信号且占空比分别为：1/2、1/4 时卷积输出波形。
4. 叙述信号频率搬移的原理及实验测试结果，并画出相应频谱图。
5. 用嵌入式频谱仪观察 10P3 频谱随 10W1 变化的规律，叙述 10P3 时域频域间的对应关系。
6. 设计一个频分复用解复用电路（复用 DDS1 和 DDS2. 信号，DDS1 产生 2.0K 方波，DDS2. 产生 10KHZ 正弦波），用“基本运算单元”模块连线实现，画出电路图，并验证设计电路性能。
7. 思考题
 - 1) 矩形脉冲信号的脉冲宽度为什么会对卷积结果有影响，影响是什么？
 - 2.) 用图解的方法给出下图中的两个信号的卷积过程。



实验项目三 信号的合成以及谐波幅度、相位对波形合成的影响

(一) 实验项目概述

1. 实验项目名称：信号的合成以及谐波幅度、相位对波形合成的影响
2. 实验项目学时：4 学时
3. 实验项目的目的：
 - (1) 理解各次谐波在合成信号中的作用。
 - (2) 进一步掌握用傅里叶级数进行谐波分析的方法。
 - (3) 观察矩形脉冲信号分解出的各谐波分量可以通过叠加合成出原矩形脉冲信号。
 - (4) 理解谐波幅度对波形合成的作用。
 - (5) 掌握各次谐波间的相位关系。
 - (6) 培养学生团结协作、自主学习、善于发现问题解决问题、勇于创新的道德品质

4.实验项目的要求：二人一组，合作完成。

(二) 实验项目的准备

1.实验项目的基本原理：

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。

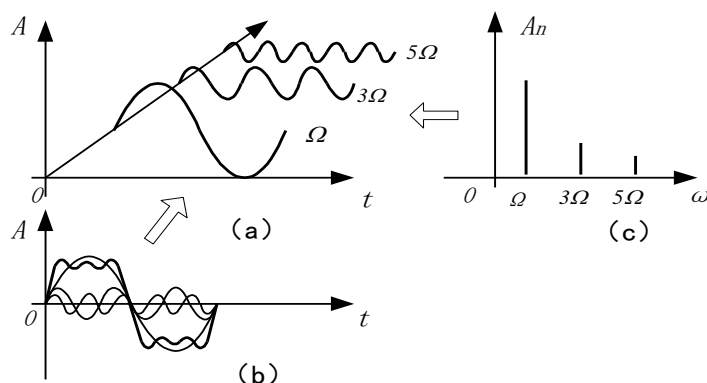


图 3-1 信号的时域特性和频域特性

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 3-1 来形象地表示。其中图 3-1(a)是信号在幅度——时间——频率三维坐标系统中的图形；图 3-1(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 3-1(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同时取出复杂信号中的各次谐波，滤波器的中心频率分别设置在各次谐波上。实验平台基于数字信号处理技术，在 FPGA 中同时设计了 8 个滤波器，如图 3-2 所示。

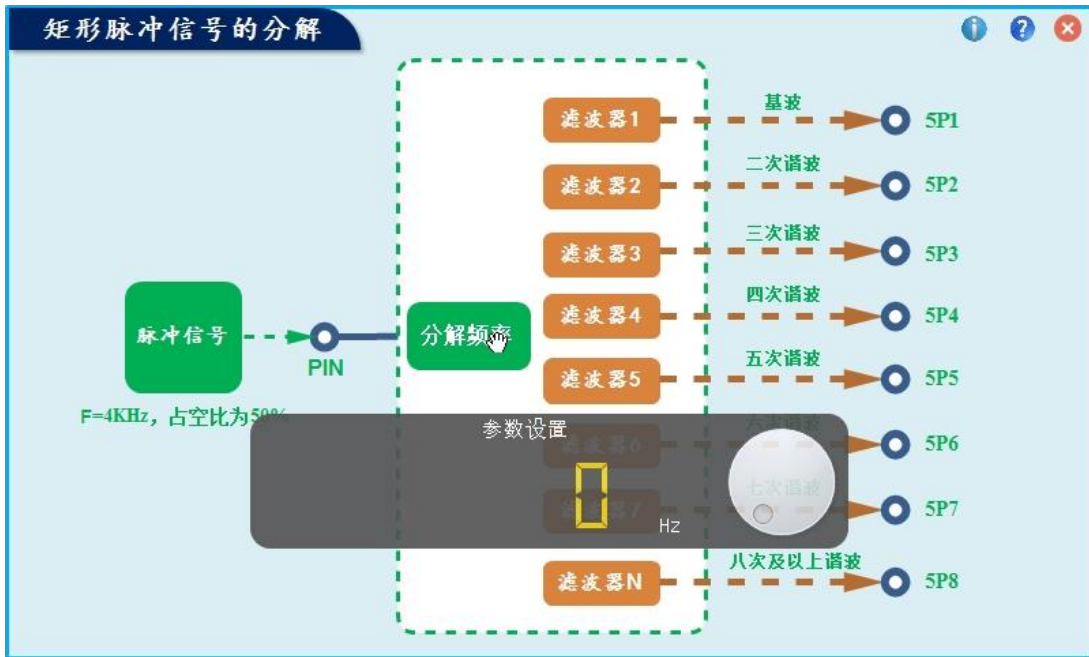


图 3-2 用同时分析法解析信号频谱

其中，5P1 出来的是基频信号，即基波；5P2 出来的是二次谐波；5P3 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 3-3 所示。

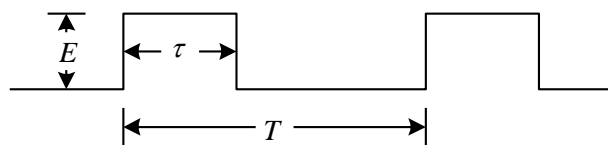


图 3-3 周期性矩形脉冲信号

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。

矩形脉冲信号通过 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 2TP1 进行观测。如果滤波器设计正确，则分解前的原始信号（观测 PIN）和合成后的信号应该相同。信号波形的合成电路图如图 3-4 所示。

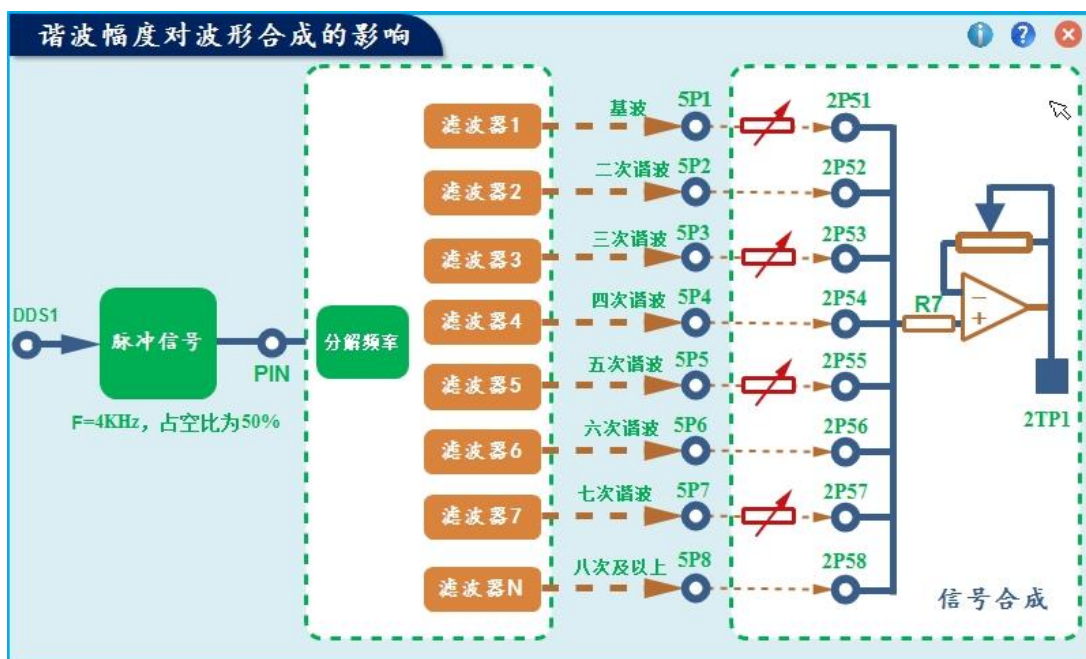


图 3-4 信号合成电路图

2.实验项目的仪器设备、工具材料

双踪或高性能示波器 1 台

信号系统实验箱 1 台

铆孔连接线 若干

3.实验项目的注意事项

测量点：

2TP1：合成后的信号波形；

信号插孔：

2P51~2P58：信号分解时各次谐波的输入插孔；

(三) 实验项目的实施

1.矩形脉冲信号的合成

(1) 在实验列表中选择实验“矩形脉冲信号的合成”。

(2) 连接 DDS1 和 PIN；

(3) 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“综合仪表模块”幅度电位器使信号幅度为 $4V_{pp}$ 。

(4) 示波器可分别在 5P1、5P2、5P3、5P4、5P5、5P6、5P7、5P8 上观测信号各次谐波的波形；

(5) 准备 8 个导线，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，只需连接 5P1—2P51，5P3—2P53），然后用示波器测量 2TP1，并将 2TP1 的波形记录在下表中。

(6) 按表 3-1 的要求，在输出端观察和记录合成结果。

表 3-1 矩形脉冲信号的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、二、三、四、五、六、七及八次以上高次谐波的合成	
没有二次谐波的其他谐波合成	
没有五次谐波的其他谐波合成	
没有八次以上高次谐波的其他谐波合成	

2. 谐波幅度对于波形合成的影响

(1) 在实验列表中选择“谐波幅度对于波形合成的影响”。

(2) 连接 DDS1 和 PIN；

(3) 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“综合仪表模块”幅度电位器，使信号幅度为 4Vpp ；

(4) 示波器可分别在 5P1、5P2、5P3、5P4、5P5、5P6、5P7 和 5P8 上观测信号各次谐波的波形；

(5) 选择一、三、五、七次谐波中的一路，接入可调电位器电路，利用分压原理改变输出谐波的信号幅度。用导线将各次谐波信号连接到信号合成端，进行波形的合成，在 2TP1 观察合成的波形是否为方波信号。分别按表 3-2、表 3-3、表 3-4、表 3-5、表 3-6、表 3-7、表 3-8，调整各谐波幅值，观察并记录合成后的波形。

表 3-2 各谐波振幅频谱表

谐波	振幅	合成后的波形
1	二分之一	
2	0	
3	三分之一	
4	0	
5	五分之一	
6	0	

7	七分之一	
8 次以上	直接输出	

表 3-3 各谐波振幅频谱表

谐波	振幅	合成后的波形
1	1	
2	0	
3	三分之一	
4	0	
5	五分之一	
6	0	
7	七分之一	
8 次以上	直接输出	

表 3-4 各谐波振幅频谱表

谐波	振幅	合成后的波形
1	1	
2	0	
3	二分之一	
4	0	
5	五分之一	
6	0	
7	七分之一	
8 次以上	直接输出	

表 3-5 各谐波振幅频谱表

谐波	振幅	合成后的波形
1	1	
2	0	
3	三分之一	
4	0	
5	四分之一	
6	0	
7	七分之一	
8 次以上	直接输出	

表 3-6 各谐波振幅频谱表

谐波	振幅	合成后的波形
1	1	
2	0	
3	三分之一	
4	0	
5	三分之一	
6	0	
7	七分之一	
8 次以上	直接输出	

表 3-7 各谐波振幅频谱表

谐波	振幅	合成后的波形
1	1	
2	0	
3	三分之一	
4	0	
5	五分之一	
6	0	
7	五分之一	
8 次以上	直接输出	

表 3-8 各谐波振幅频谱表

谐波	振幅	合成后的波形
1	1	
2	0	
3	三分之一	
4	0	
5	五分之一	
6	0	
7	四分之一	
8 次以上	直接输出	

注：表中标的几分之几是对基波而言的，如三分之一是指这次谐波幅度是基波的三分之一；

3.相位对波形合成的影响

在本实验中，我们可以人为改变三次谐波相位，从而可观察谐波相位对对波形合成的影响。如图 3-5 所示。

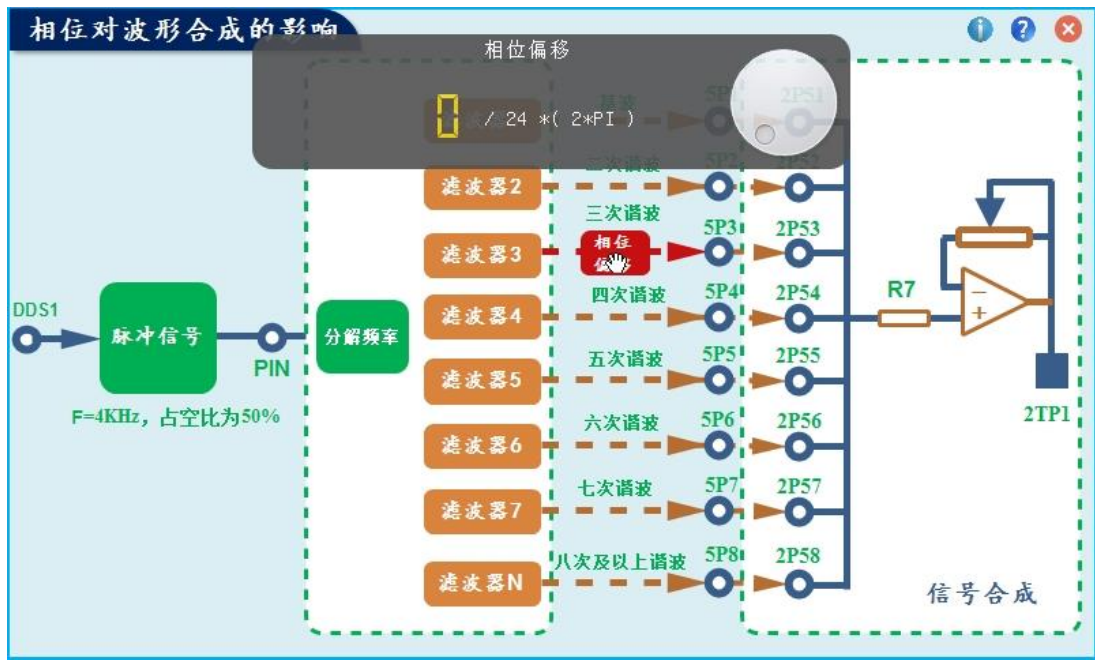


图 3-5 谐波相位调节

- (1) 在实验列表中选择“相位对波形合成的影响”。
- (2) 连接 DDS1 和 PIN；
- (3) 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“综合仪表模块”幅度电位器使信号幅度为 4V_{pp} ；
- (4) 示波器可分别在 5P1、5P2、5P3、5P4、5P5、5P6、5P7 和 5P8 上观测信号各次谐波的波形；
- (5) 改变 5P3 输出三次谐波的相位，用示波器观察 5P1 和 5P3 的相位关系，和信号分解时相位关系对比；
- (6) 将基波和三次谐波加入到信号合成部分，观察合成之后的波形；
- (7) 分别将各次谐波加入合成电路，观测各次谐波对合成信号的影响。

(四) 实验项目的结果分析

1. 据示波器上的显示结果，画图填写各表。
2. 矩形脉冲信号为例，总结周期信号的分解与合成原理。
3. 总结占空比为 1/4 时各次谐与基波的相位关系。
4. 思考题：
 - 1) 方波信号在哪些谐波分量上幅度为零？请画出信号频率为 2KHz 的方波信号的频谱图（取最高频率点为 10 次谐波）。
 - 2) 要完整的恢复出原始矩形脉冲信号，各次谐波幅度要成什么样的比例关系？

实验项目四 抽样定理与信号恢复

（一）实验项目概述

- 1.实验项目名称：抽样定理与信号恢复
- 2.实验项目学时：4 学时
- 3.实验项目的目的：
 - （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。
- 4.实验项目的要求：二人一组，合作完成。

（二）实验项目的准备

1.实验项目的基本原理

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 $f_s(t) = f(t)s(t)$ ，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。

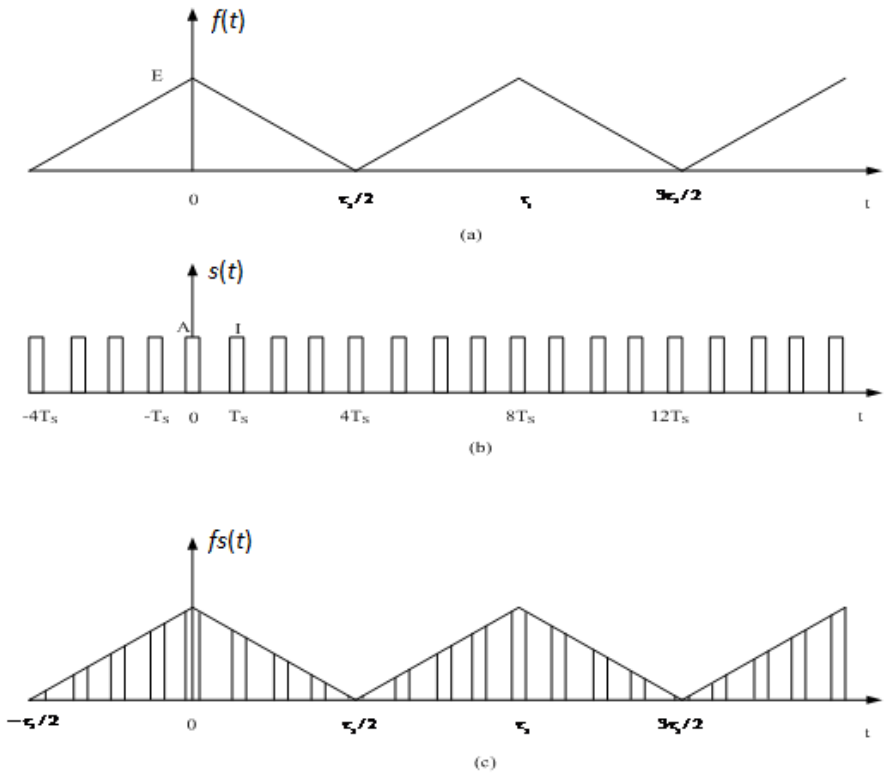


图 4-1 连续信号抽样过程

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。

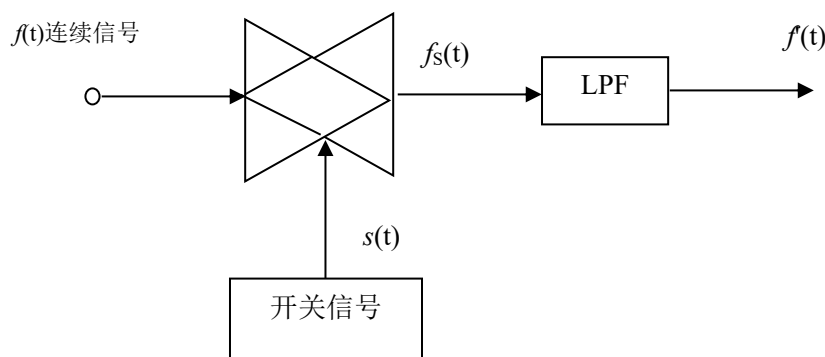


图4-2 信号抽样实验原理图

2) 连续周期信号经周期矩形脉冲抽样后，抽样信号的频谱

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

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 $\frac{A\tau}{T_s} \text{Sa}(\frac{m\omega_s\tau}{2})$) 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：

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

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

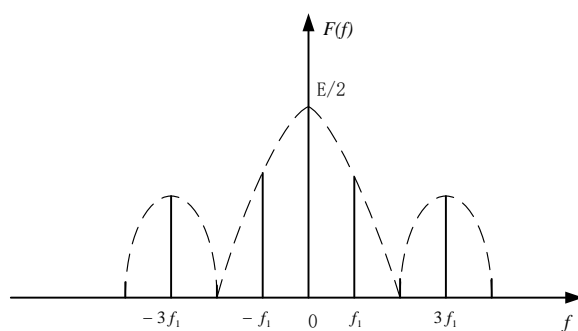
抽样信号的频谱：

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

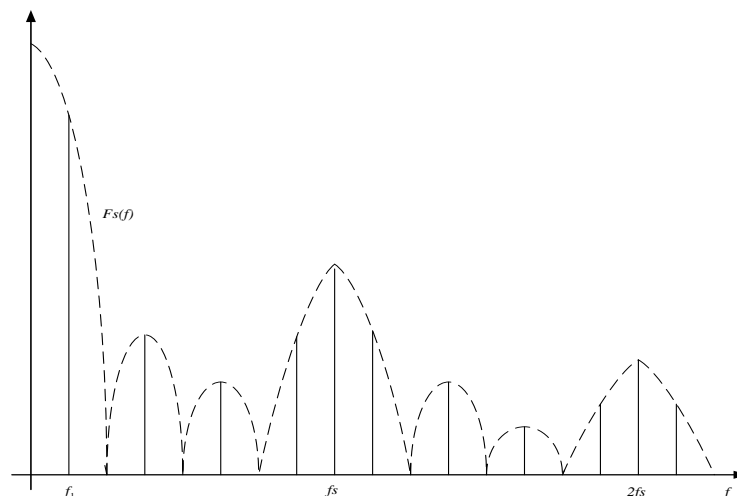
$$\omega_1 = \frac{2\pi}{\tau_1} \text{ 或 } f_1 = \frac{1}{\tau_1}$$

式中

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。

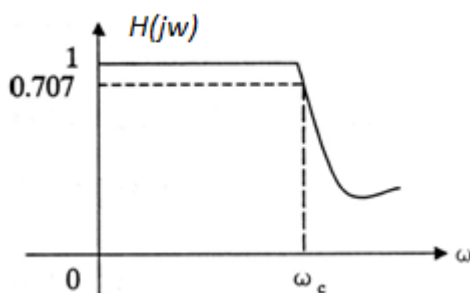


图 4-4 实际低通滤波器在截止频率附近频率特性曲线

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有限的，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 7-4 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。

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：

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

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

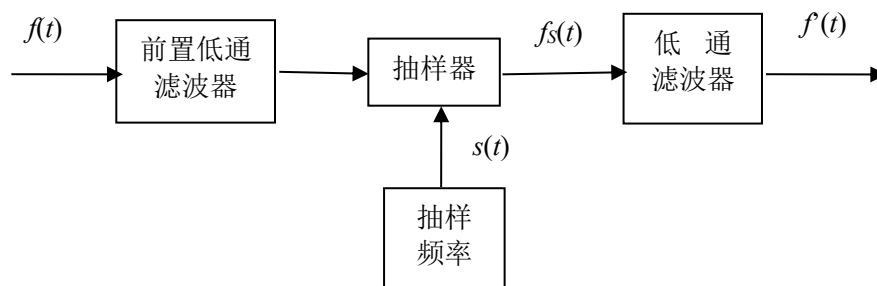


图 4-5 信号抽样流程图

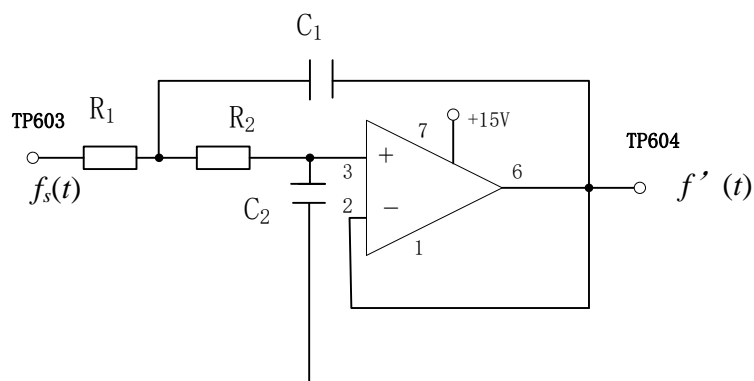


图 4-6 有源低通滤波器实验电路图

2. 实验项目的仪器设备、工具材料

双踪示波器	1 台
信号系统实验箱	1 台
铆孔连接线	若干

3. 实验项目的注意事项

测量点：

5TP601：输入信号波形观测点；

5TP603：抽样波形观测点；

5TP604：抽样信号经滤波器恢复后的信号波形观测点。

信号插孔：

5P601：信号输入插孔；

5P602：抽样脉冲信号输入插孔；

5P603：抽样信号输出插孔。

（三）实验项目的实施

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“综合仪表模块”幅度电位器使信号幅度为 1Vpp。

（2）连接 DDS1 与 5P601，输入三角波信号；连接 1P01 与 5P602，输入抽样脉冲信号；

（3）改变抽样脉冲的频率，用示波器观察 5TP603（ $f_s(t)$ ）的波形，此时需把拨动开关 1K1 拨到“空”位置进行观察；

（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。

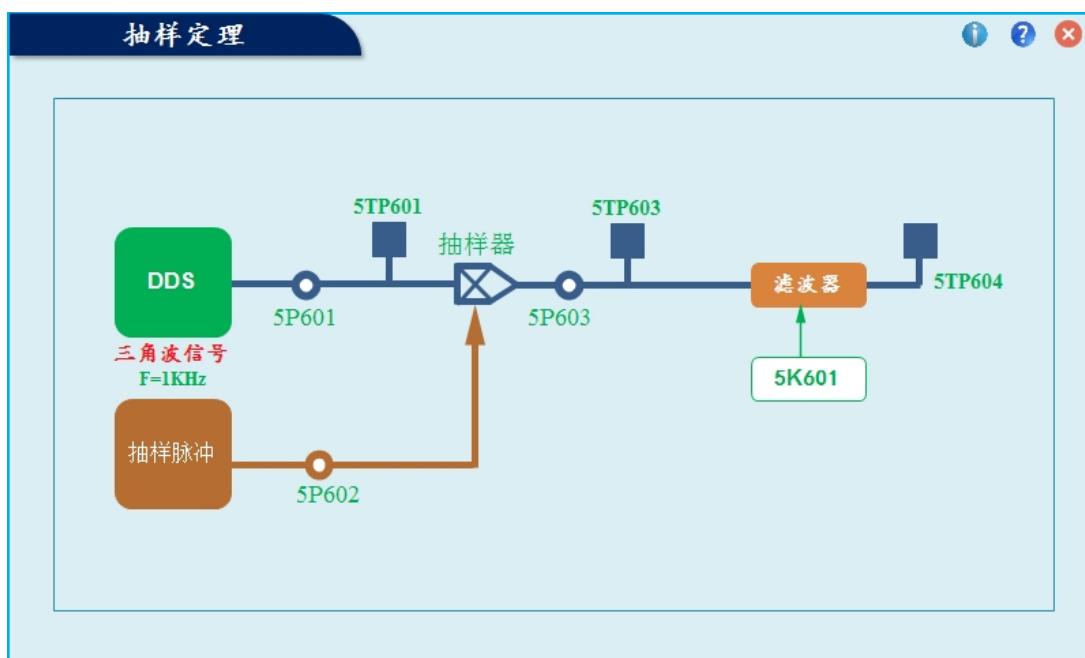
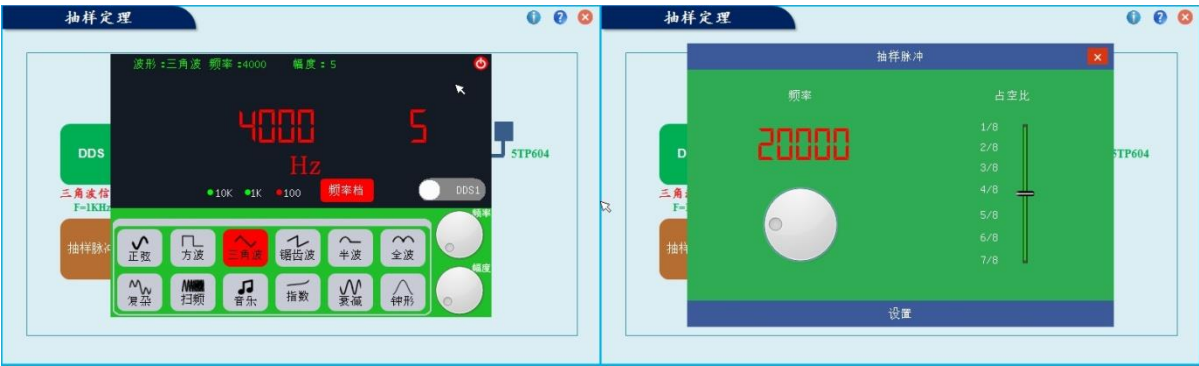


图 4-7 信号恢复实验方框图

（2）点击 DDS 信号源，设置信号发生器输出 $f=1\text{KHz}$ ， $A=1\text{Vpp}$ 的三角波接于 5P601，示波器 CH1 接于 5TP603 观察抽样信号 $f_s(t)$ ，CH2 接于 5TP604 观察恢复的信号波形。

（3）点击抽样脉冲，设置抽样脉冲频率 8KHZ，占空比 50%，用连接导线接于 5P602。

（4）拨动开关 1K1 拨到“2K”位置，选择截止频率 $f_{c2}=2\text{KHz}$ 的滤波器；拨动开关 5K601 拨到“4K”位置，选择截止频率 $f_{c2}=4\text{KHz}$ 的滤波器；此时在 5TP604 可观察恢复的信号波形。



抽样信号和抽样脉冲设置

(5) 拨动开关 5K601 拨到“空”位置，未接滤波器。同学们可按照图 4-8，在基本运算单元搭试截止频率 $f_{c1}=2\text{K}$ 的低通滤波器，抽样输出波形 5P603 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。

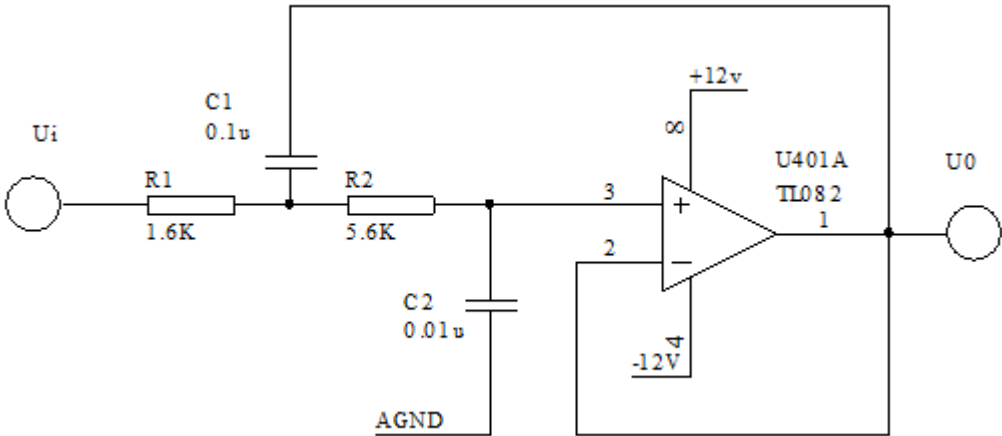


图 4-8 截止频率为 2K 的低通滤波器原理图

(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

(四) 实验项目的结果分析

1. 整理数据，正确填写表格，总结离散信号频谱的特点；

2. 整理在不同抽样频率（三种频率）情况下， $f(t)$ 与 $f(t)$ 波形，比较后得出结论；

3. 比较 $f(t)$ 分别为正弦波和三角形，其 $f_s(t)$ 的频谱特点。

4. 思考题

1) 对 1KHz 三角波进行抽样实验时，抽样频率为什么不能低于 6KHz？恢复滤波器截止频率为什么不能是 2KHz？

2) 1KHz 的正弦波用 2KHz 脉冲去抽样，经 2KHz 恢复滤波器会输出一个 2KHz 的正弦波，为什么？

第三部分 实验报告

见附件

附件

天津中德应用技术大学实验报告

系部		班级		姓名		学号	
日期		实训地点		指导教师		成绩	
课程名称							
实验实训项目名称							
实验实训目的							
实验实训内容							
实验实训步骤							
实验实训使用的主要设备或仪器							
实验实训结果							

天津中德应用技术大学

教务处制
(注：请各教学系部统一存档)

