

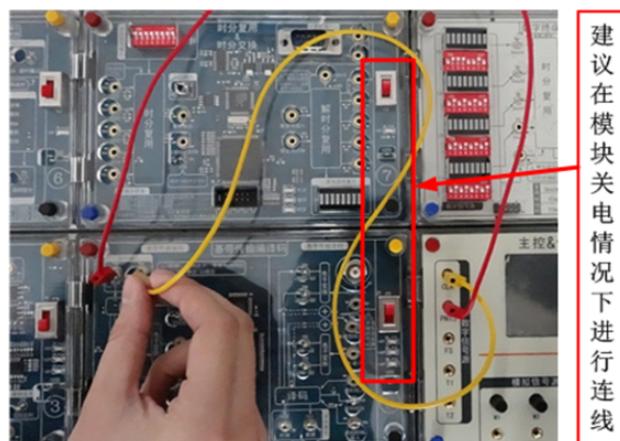
I、注意事项及基本操作说明

为了更快的了解本实验平台以及确保每次使用时平台处于正常的工作状态，实验前请认真阅读以下内容：

1、**平台的供电状态：**检查每个模块的 LED 电源指示灯（+5V、+12V、-12V）是否正常点亮，打开实验箱右侧总电源开关及各模块电源开关，各模块右边的 LED 灯应全亮；轻力按压模块时出现 LED 闪烁，请检查当前的模块是否固定好。若不亮，请将模块关电后拧紧模块四角的螺丝再检查一次。



2、**实验连线：**准备工作做完后，需要进行连线操作时，请先将单元模块断电，捏住插头的头部进行插拔，切勿直接拽线。



3、**实验平台的接地：**所有模块最右侧有 GND 标识的 U 型柱为测试仪表（如示波器）的接地端。

4、**实验数据中的幅度：**本指导书中所有交流信号的幅度指的是示波器中的峰峰值，直流信号指的是示波器中的最大值。

5、**实验项目的设定方法**：主控模块开机后，会先显示厂家的 LOGO 界面，然后自动进入到主菜单界面，旋转控制旋钮完成实验课程的选定，按压旋钮完成确认，确认后会自动进入一实验项目界面；再次旋转控制旋钮可选定所需的实验项目，按压旋钮即可完成确认（这两步，实现了对主控模块的信号源默认参数的设定、实验项目的设定、实验模块功能的设定）。



6、**示波器观测规范**：观测实验波形时，有三种操作方法。

(1) 对于测试勾，可直接用示波器探头夹夹住测试后并确定夹紧即可；

可用示波器探头夹直接勾住测试点



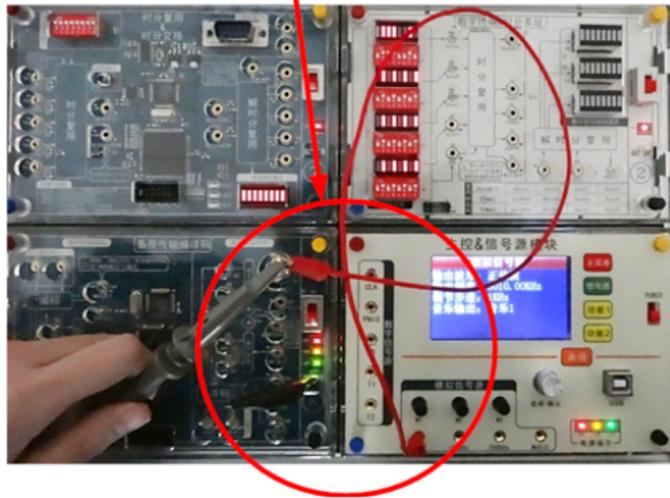
(2) 或将示波器探头夹取下来，直接用探头夹接触测试点，观察波形时需要注意固定好示波器探头；

可用示波器探头直接靠住测试点



(3) 对于台阶插座，可用实验导线连接台阶座与示波器的探勾。

可用示波器探头夹配合导线来观测所需输入输出端口



II、目录

I、注意事项及基本操作说明	1
II、目录	4
III、模块介绍	1
1、主控&信号源模块	2
2、2号模块 数字终端&时分多址模块	9
3、3号模块 信源编译码模块	11
4、M02号模块 信道编译码模块	14
5、7号模块 时分复用&时分交换模块	17
6、8号模块 基带传输编译码模块	20
7、9号模块 数字调制解调模块	22
8、13号模块 载波同步及位同步模块	25
9、21号模块 PCM 编译码及语音终端模块	28
10、28号模块 多功能软件无线电（SDR）模块（选配）	30
IV、实验操作指导	31
第一章 信源编码技术	31
实验一 抽样定理实验	31
实验二 PCM 编译码实验	38
实验三 Δm 及 CVSD 编译码实验	50
第二章 基带传输编译码技术	64
实验四 AMI 码型变换实验	64
实验五 HDB3 码型变换实验	69
实验六 CMI/BPH 码型变换实验	74
第三章 基本数字调制技术	78
实验七 眼图观测实验	78

实验八 ASK 调制及解调实验	84
实验九 FSK 调制及解调实验	87
实验十 BPSK 调制及解调实验	90
实验十一 DBPSK 调制及解调实验	93
实验十二 QPSK/OQPSK 数字调制实验	97
第四章 信道编译码技术	103
实验十三 汉明码编译码实验	103
实验十四 BCH 码编译码实验	110
实验十五 循环码编译码实验	116
实验十六 卷积码编译码实验	126
实验十七 交织及解交织实验	133
第五章 同步技术	139
实验十八 滤波法及数字锁相环法位同步提取实验	139
实验十九 模拟锁相环实验	147
实验二十 载波同步实验	149
实验二十一 帧同步提取实验	153
第六章 时分复用及解复用技术	160
实验二十二 时分复用与解复用实验	160
第七章 综合实验	167
实验二十三 HDB3 线路编码通信系统综合实验	167
实验二十四 ASK 通信系统综合实验	170
实验二十五 FSK 通信系统综合实验	173
实验二十六 BPSK 通信系统综合实验	176
第八章 模拟调制解调实验（选做）	179
实验二十七 AM 调制及检波实验（选做）	179
实验二十八 DSB 调制及解调实验（选做）	188

实验二十九 SSB 调制及解调实验（选做）	192
实验三十 FM 调制及解调实验（选做）	197
第九章 虚实结合实验（选做）	204
实验三十一 MSK 信号传输实验（选做）	204

III、模块介绍

本实验平台采用模块化设计，主要由标配模块和选配模块组成。

下面主要介绍通信原理实验平台中的九个标配模块，以便了解各模块的具体功能及作用。

标配模块包括有：

主控&信号源模块

2 号模块 数字终端&时分多址模块

3 号模块 信源编译码模块

M02 模块 信道编译码模块

7 号模块 时分复用&时分交换模块

8 号模块 基带传输编译码模块

9 号模块 数字调制解调模块

13 号模块 载波同步及位同步模块

21 号模块 PCM 编译码及语音终端模块

1、主控&信号源模块

一、按键及接口说明

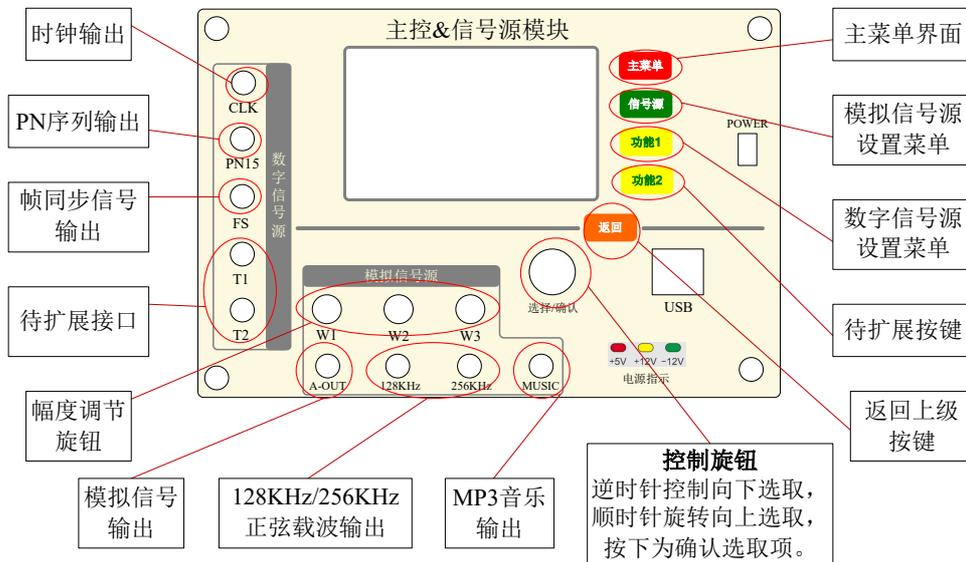


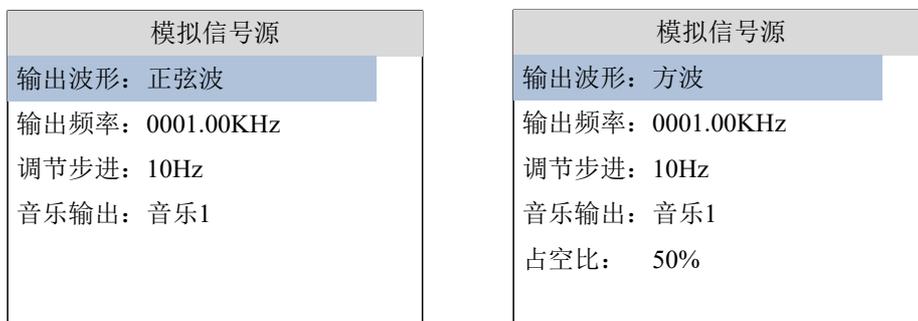
图 1 主控&信号源按键及接口说明

二、功能说明

该模块可以完成如下五种功能的设置，具体设置方法如下：

1、模拟信号源功能

模拟信号源菜单由“信号源”按键进入，该菜单下按“选择/确定”键可以依次设置：“输出波形”→“输出频率”→“调节步进”→“音乐输出”→“占空比”（只有在输出方波模式下才出现）。在设置状态下，选择“选择/确定”就可以设置参数了。菜单如下图所示：



(a) 输出正弦波时没有占空比选项

(b) 输出方波时有占空比选项

图 2 模拟信号源菜单示意图

注意：上述设置是有顺序的。例如，从“输出波形”设置切换到“音乐输出”需要按3次“选择/确定”键。

下面对每一种设置进行详细说明：

a. “输出波形”设置

一共有6种波形可以选择：

正弦波：输出频率 10Hz~2MHz

方波：输出频率 10Hz~200KHz

三角波：输出频率 10Hz~200KHz

DSBFC（全载波双边带调幅）：

由正弦波作为载波，音乐信号作为调制信号。输出全载波双边带调幅。

DSBSC（抑制载波双边带调幅）：

由正弦波作为载波，音乐信号作为调制信号。输出抑制载波双边带调幅。

FM：载波固定为20KHz，音乐信号作为调制信号。

b. “输出频率”设置

“选择/确定”顺时针旋转可以增大频率，逆时针旋转减小频率。频率增大或减小的步进值根据“调节步进”参数来。

在“输出波形”DSBFC和DSBSC时，设置的是调幅信号载波的频率；

在“输出波形”FM时，设置频率对输出信号无影响。

c. “调节步进”设置

“选择/确定”顺时针旋转可以增大步进，逆时针旋转减小步进。步进分为：“10Hz”、“100Hz”、“1KHz”、“10KHz”、“100KHz”五档。

d. “音乐输出”设置

设置“MUSIC”端口输出信号的类型。有三种信号输出“音乐1”、“音乐2”、“3K+1K正弦波”三种。

e. “占空比”设置

“选择/确定”顺时针旋转可以增大占空比，逆时针旋转减小占空比。占空比调节范围

10%~90%，以 10%为步进调节。

2、数字信号源功能

数字信号源菜单由“功能 1”按键进入，该菜单下按“选择/确定”键可以设置：“PN 输出频率”和“FS 输出”。菜单如下图所示：

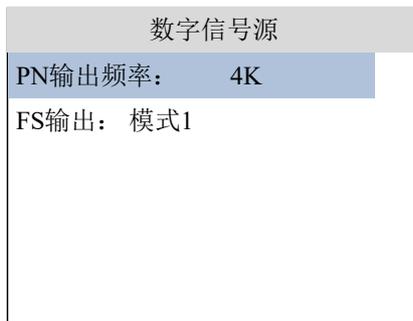


图 3 数字信号源菜单

a. “PN 输出频率”设置

设置“CLK”端口的频率及“PN”端口的码速率。频率范围：1KHz~2048KHz。

b. “FS 输出”设置

设置“FS”端口输出帧同步信号的模式：

模式 1： 帧同步信号保持 8KHz 的周期不变，帧同步的脉宽为 CLK 的一个时钟周期。

（要求“PN 输出频率”不小于 16KHz，主要用于 PCM 编译码帧同步及时分复用实验）

模式 2： 帧同步的周期为 8 个 CLK 时钟周期，帧同步的脉宽为 CLK 的一个时钟周期。

（主要用于汉明码编译码实验）

模式 3： 帧同步的周期为 15 个 CLK 时钟周期，帧同步的脉宽为 CLK 的一个时钟周

期。（主要用于 BCH 编译码实验）

3、通信原理实验菜单功能

按“主菜单”按键后的第一个选项“通信原理实验”，再确定进入各实验菜单。如下图所示：



(a) 主菜单

(b) 进入通信原理实验菜单

图 4 设置为“通信原理实验”

进入“通信原理实验”菜单后，逆时针旋转光标会向下走，顺时针旋转光标会向上走。按下“选择/确认”时，会设置光标所在实验的功能。有的实验有会跳转到下级菜单，有的则没有下级菜单，没有下级菜单的会在实验名称前标记“√”符号。

在选中某个实验时，主控模块会向实验所涉及到的模块发命令。因此，需要这些模块电源开启，否则，设置会失败。实验具体需要哪些模块，在实验步骤中均有说明，详见具体实验。

4、模块设置功能*（该功能只在自行设计实验时用到）

按“主菜单”按键后的第二个选项“模块设置”，再确定进入模块设置菜单。在“模块设置”菜单中可以对各个模块的参数分别进行设置。如下图所示：



图 5 “模块设置”菜单

a. 2号 数字终端&时分多址

设置该模块 BSOUT 的时钟频率。

b. 3号 信源编译码

可设置该模块 FPGA 工作于“PCM 编译码”、“LDM 编译码”、“CVSD 编译码”、“FIR 滤

波器”、“IIR 滤波器”、“反 SINC 滤波器”等功能（测试功能是生产中使用的）。由于模块的端口会在不同功能下有不同用途，下面对每一种功能进行说明：

i. PCM 编译码

FPGA 完成 PCM 编译码功能，同时完成 PCM 编码 A/μ 律或 μ/A 律转换的功能。其子菜单还能够设置 PCM 编译码 A/μ 律及 A/μ 律转换的方式。端口功能如下：

编码时钟：	输入编码时钟。
编码帧同步：	输入编码帧同步。
编码输入：	输入编码的音频信号。
编码输出：	输出编码信号。
译码时钟：	输入译码时钟。
译码帧同步：	输入译码帧同步。
译码输入：	输入译码的 PCM 信号。
译码输出：	输出译码的音频信号。
A/μ -In：	A/μ 律转换输入端口。
A/μ -Out：	A/μ 律转换输出端口。

ii. LDM 编译码

FPGA 完成简单增量调制编译码功能，端口除了“编码帧同步”和“译码帧同步”是没用到的（LDM 编译码不需要帧同步），其他端口功能与 PCM 编译码一样。

iii. CVSD 编译码

FPGA 完成 CVSD 编译码功能，端口除了“编码帧同步”和“译码帧同步”是没用到的（CVSD 编译码不需要帧同步），其他端口功能与 PCM 编译码一样。

iv. FIR 滤波器

FPGA 完成 FIR 数字低通滤波器功能（采用 100 阶汉明窗设计，截止频率为 3KHz）。该功能主要用于抽样信号的恢复。端口说明如下：

编码输入：	FIR 滤波器输入口。
译码输出：	FIR 滤波器输出口。

v. IIR 滤波器

FPGA 完成 IIR 数字低通滤波器功能（采用 8 阶椭圆滤波器设计，截止频率为 3KHz）。该功能主要用于抽样信号的恢复。端口与 FIR 滤波器相同。

vi. 反 SINC 滤波器

FPGA 完成反 SINC 数字低通滤波器。该功能主要用于消除抽样的孔径效应。端口与 FIR 滤波器相同。

c. 7 号 时分复用&时分交换

功能一是设置时分复用的速率 256Kbps/2048Kbps。功能二是当复用速率为 2048Kbps 时，调整 DIN4 时隙。

d. 8 号 基带编译码

设置该模块 FPGA 工作在“AMI”、“HDB3”、“CMI”、“BPH”编译码模式。

e. M02 号 信道编译码

可设置该模块 FPGA 工作于“测试功能”、“汉明 (7,4) 编译码”、“循环 (7,4) 编译码”、“BCH 编译码”、“卷积 (2,1,7) 编译码”、“汉明 (8,4) 编译码”、“循环 (8,4) 编译码”、“卷积 (2,1,3) 编译码”、“咬尾卷积 (3,1,3)”、“交织与解交织”等功能（测试功能是生产中使用的）。

基带信号速率：1KHZ~2048KHZ，适用于所有的编译码方式。

误码个数：当 FPGA 工作于汉明码或循环码编译码方式时，可选择插入误码个数为 0~3 个，当 FPGA 工作于 BCH 编译码时可选择插入的误码个数为 0~4 个。当 FPGA 工作于 (3,1,3) 卷积码时，可选择插入的误码个数为 0~4 个。

卷积插入误码类型：可选择无插错、随机错、突发错。适用于 (2, 1, 3)、(2, 1, 7) 卷积编码。

卷积是否加入交织：可选择无交织和有交织。适用于 (2, 1, 3)、(2, 1, 7) 卷积编码。

5、系统升级

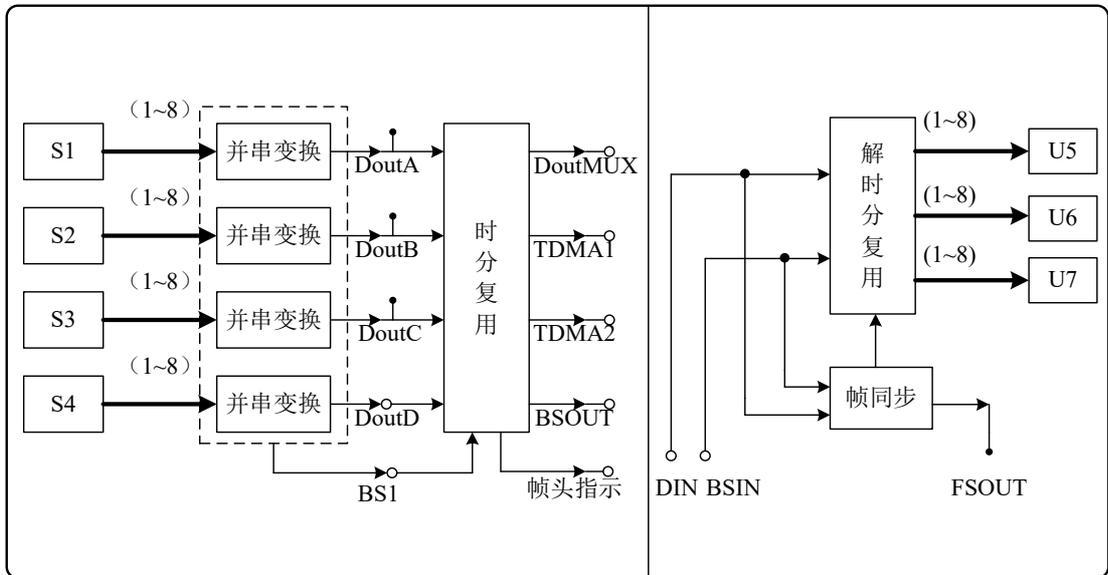
此选项用于模块内部程序升级时使用。

三、注意事项

- 1、实验开始时要将所需模块固定在实验箱上，并确定接触良好，否则菜单无法设置成功。
- 2、信号源设置中，模拟信号源输出步进可调节，便于不同频率变化调节。

2、2号模块 数字终端&时分多址模块

一、模板框图



二、模块简介

时分复用（TDMA）适用于数字信号的传输。由于信道的位传输率超过每一路信号的数据传输率,因此可将信道按时间分成若干片段轮换地给多个信号使用。每一时间片由复用的一个信号单独占用,在规定的时间内,多个数字信号都可按要求传输到达,从而也实现了一条物理信道上传输多个数字信号。

三、模块功能说明

1、时分复用。通过拨码开关设置 4 组数字信号源（S1、S2、S3、S4）的数据，任选一组设置为帧同步码“01110010”，其它三组设置易于观察的数据。四组数据分别经过并串变换后进入 CPLD 完成时分复用。

2、解时分复用。将时分复用后的信号输入到解时分复用模块，同时加载一个帧同步信号就得到解复用的信号，通过 3 组 LED 行阵显示除帧同步码的数字信号。

四、端口说明

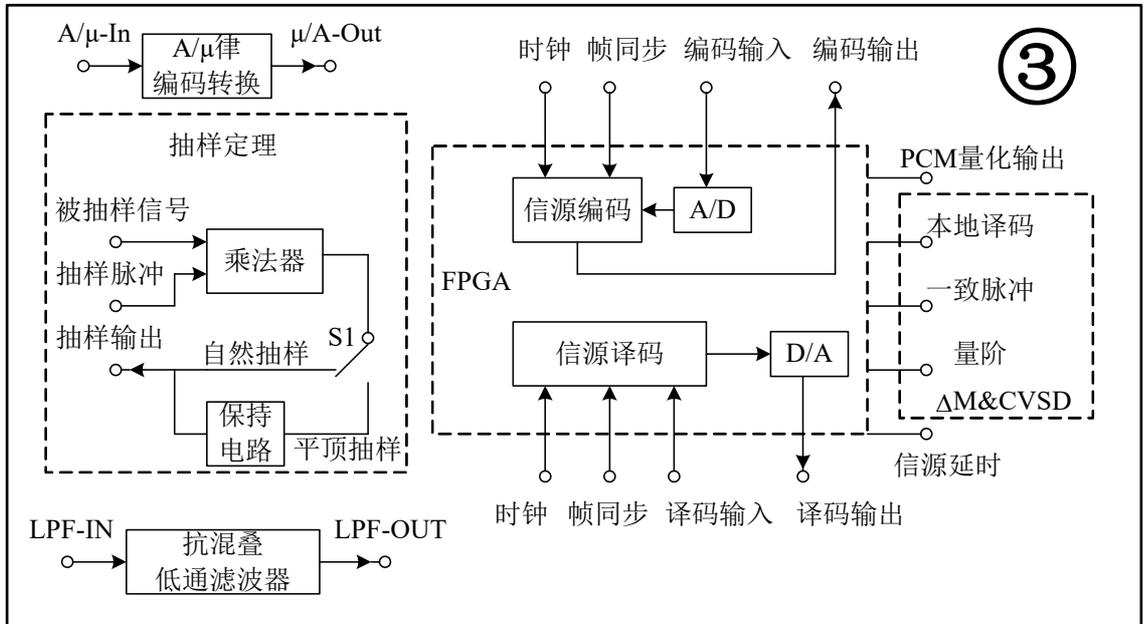
模块	端口名称	端口功能
时分复用	S1-S4	数字信号拨码输入
	U1-U4	显示对应的数字输入信号
	DoutA-DoutC	对应数字信号观测点
	DoutD	对应数字信号观测点/8位数字信号输出
	BS1	位同步时钟信号输入
	DoutMUX	时分复用输出（DoutA、DoutB、DoutC、DoutD）
	TDMA1	时分复用输出（01110010、00110011、DoutA、DoutB）
	TDMA2	时分复用输出（01110010、01010101、DoutC、DoutD）
	BSOUT	位同步信号输出
	帧头指示	帧头指示信号（仅用于信道编码时的辅助观测）
解复用	DIN	时分复用信号输入
	BSIN	位同步信号输入
	FSOUT	帧同步信号观测点
	U5-U7	显示解复用的信号

五、可调参数说明

拨码开关 S1-S4。每一组都有 8 位开关，1 号开关对应数字信号的最高位。拨码开关上拨表示数字信号“1”，下拨表示数字信号“0”。

3、3号模块 信源编译码模块

一、模块框图



二、模块简介

在信源→信源编码→信道编码→信道传输（调制/解调）→信道译码→信源译码→新宿的整个信号传播连路中，本模块功能属于信源编码与信源译码（A/D 与 D/A）环节，通过 ALTERA 公司的 FPGA（EP4CE6）完成包括抽样定理、抗混叠低通滤波、A/μ律转换、PCM 编译码、ΔM&CVSD 编译码的功能与应用。帮助实验者学习并理解信源编译码的概念和具体过程，并可用于二次开发。

三、模块功能说明

1、抽样定理

被抽样信号与抽样脉冲的相乘所得信号可以选择是否经过保持电路，以输出自然抽样或平顶抽样。

2、低通混叠滤波

该滤波器为 3.4KHz 的 8 阶巴特沃斯低通滤波器，可用于抽样信号的恢复及信源编码的前置抗混滤波。

3、A/μ 律转换

针对不同应用需求，本模块提供 A 律与 μ 律的转换。

4、PCM 编译码

编码输入信号默认采用本模块抽样输出信号，亦可以二次开发采用外部信号，同时提供时钟脉冲与帧同步信号，即可实现译码端的信号输出。

5、Δm&CVSD 编译码

增量调制编译码功能提供本地译码、一致脉冲以及量阶调整的信号引出观测，方便实验者了解并掌握增量调制的具体过程。

四、端口说明

端口名称	说明
S3	模块总开关。
被抽样信号	可输入信号源的正弦波信号。
抽样脉冲	输入信号源的方波信号。
S1	保持电路切换开关，实现自然抽样/平顶抽样。
抽样输出	输出抽样后信号。
LPF-IN	抗混叠低通滤波器输入。
LPF-OUT	抗混叠低通滤波器输出。
A/μ -In	A 律或 μ 律输入。
A/μ -Out	μ 律或 A 律输出。
时钟（编码）	待编码信号的时钟输入。
帧同步（编码）	待编码信号的帧同步信号输入。
编码输入	待编码信号输入。
编码输出	已编码信号输出。
时钟（译码）	待译码信号的时钟输入。
帧同步（译码）	待译码信号的帧同步信号输入。
译码输入	待译码信号输入。

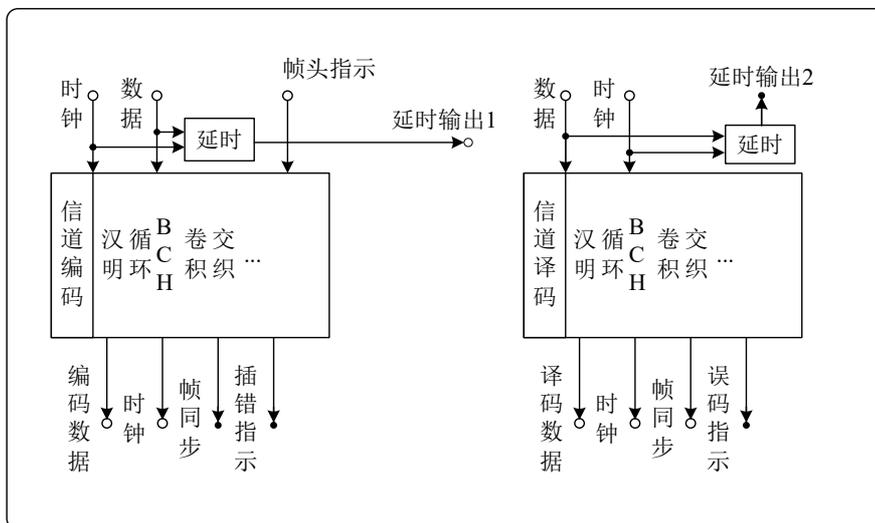
译码输出	已译码信号输出。
PCM 量化输出	PCM 编码输出之后，G.711 协议变换之前的信号输出。
本地译码	$\Delta M\&CVSD$ 编码当中的本地译码器输出。
一致脉冲	CVSD 编码当中量阶调整时的一致脉冲输出。
量阶	$\Delta M\&CVSD$ 编码当中量阶调整时的量阶输出。
信源延时	$\Delta M\&CVSD$ 编码之前的信源延时输出，供辅助观测。

五、可调参数说明

S1 开关可切换自然抽样/平顶抽样。

4、M02 号模块 信道编译码模块

一、模块框图



二、模块简介

数字信号在传输中往往由于各种原因，使得在传送的数据流中产生误码，从而使接收端产生图象跳跃、不连续、出现马赛克等现象。所以通过信道编码这一环节，对数码流进行相应的处理，使系统具有一定的纠错能力和抗干扰能力，可极大地避免码流传送中误码的发生，这就使得信道编译码过程显得尤为重要。

三、模块功能说明

1、汉明码。汉明码利用了奇偶校验位的概念，通过在数据位后面增加一些比特，不仅可以验证数据是否有效，还能在数据出错的情况下指明错误位置。本模块支持以下两种汉明编译码模式：

① (7,4) 汉明码：4bit 输入数据，7bit 输出数据。输出码速率为 7/4 倍输入码速率。

② (7,4) 汉明码 (2 倍速率)：4bit 输入数据，7bit 输出数据，每 8 组数据加一组帧头 (01110010)。输出码速率为 2 倍输入码速率。

2、循环码。具有某种循环特性的线性分组码。每位代码无固定权值，任何相邻的两个码组中，仅有一位代码不同。本模块支持以下两种循环编译码模式：

① (7,4) 循环码: 4bit 输入数据, 7bit 输出数据。输出码速率为 7/4 倍输入码速率。

② (7,4) 循环码 (2 倍速率): 4bit 输入数据, 7bit 输出数据, 每 8 组数据加一组帧头 (巴克码 01110010)。输出码速率为 2 倍输入码速率。

3、BCH 码。BCH 码解决了生成多项式与纠错能力的关系问题, 可以再给定纠错能力要求的条件下寻找到码的生成多项式。

4、卷积码。卷积码是一种非分组码, 通常适用于前向纠错。本模块支持以下三种卷积编译码方式。

① (3,1,3) 卷积编译码: 4bit 输入数据, 12bit 输出数据, 不适合系统传输。

② (2,1,3) 卷积编译码: 256bit 输入数据, 512bit 编码数据, 凿孔 8 比特 (每 64bit 去掉 1bit), 添加 8 比特巴克码做帧头, 故输出仍为 512bit。主要用于系统传输。

③ (2,1,7) 卷积编译码: 256bit 输入数据, 512bit 编码数据, 凿孔 8 比特 (每 64bit 去掉 1bit), 添加 8 比特巴克码做帧头, 故输出仍为 512bit。主要用于系统传输。

5、交织码。交织编码的目的是把一个较长的突发差错离散成随机差错, 改善移动通信的传输特性。本模块支持以下三种交织方式。

① 5*3 交织: 不适合系统传输。

② (2,1,3) 卷积编码及交织: (2,1,3) 卷积+28*18 交织器, 主要用于系统传输。

③ (2,1,7) 卷积编码及交织: (2,1,7) 卷积+28*18 交织器, 主要用于系统传输。

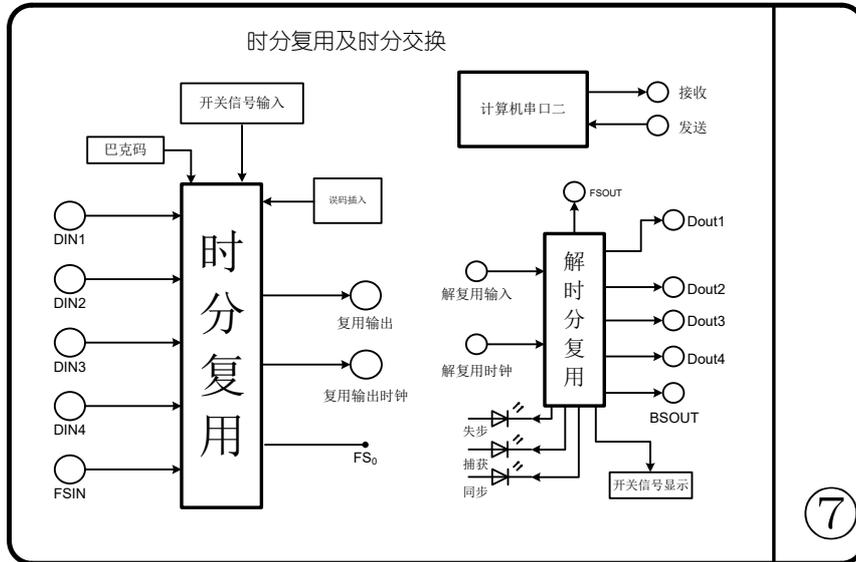
四、端口说明

模块	端口名称	端口说明
编码	时钟	编码时钟输入
	数据	数据输入
	编码数据	编码数据输出
	时钟	编码时钟输出
	帧头指示	帧头指示信号观测点
	延时输出 1	延时输出信号观测点
	帧同步	帧同步信号观测点

	插错指示	插错指示观测点
译码	数据	数据输入
	时钟	译码时钟输入
	译码数据	译码数据输出
	时钟	译码时钟输出
	帧同步	帧同步信号输出
	NRZD-IN	延时输入
	延时输出 2	延时输出信号观测点
	误码指示	误码指示观测点
系统	系统复位	系统复位按键
	码型选择	码型选择 4 位拨码开关
	插错控制	插错控制 4 位拨码开关

5、7号模块 时分复用&时分交换模块

一、模块框图



二、模块简介

复用是通信系统中较为重要的一环节，复用目的是为了实现在同一信道上传输以达到减少对资源的占用。应用于信道编码与基带传输编码中间，将一物理信道分为一个个的物理碎片，周期性的利用某一时隙，最后将其组合起来，形成以一完整的信号。时分交换是在时分复用中的一个过程，而时分复用与时分交换模块也可应用于程控交换通信系统中。

三、模块功能说明

1、时分复用

当复用输出的为模式 256K 时，只用来观测 3 路帧同步（即时隙 0、1、2，这三路信号就是对应的巴克码、DIN1 和 DIN2 的接收数据），开关信号在 3 时隙。由于 256K 模式复用只能提供 4 个时隙。因此，DIN3 和 DIN4 在 256K 复用模式下是无效的。

若模式为 2048K 时（速率为 2M 的 E1 传输），巴克码、DIN1、DIN2、DIN3、DIN4 分别在 0~4 时隙。开关信号默认在第 5 时隙，但其所在时隙可以由主控模块进行设置。

2、解时分复用

解时分复用与时分复用是相对应的一部分，用于基带传输编译码与信道译码模块之间，把配置在分立周期间隔上的时分复用信号解开，在解复用输入与解复用时钟输入处接入信



号，最后由 Dout1-Dout4 整理输出，与复用时的输入 DIN1-DIN4 始终相互对应的。

3、计算机串口二

与计算机连接的一接口，为 RS232 串口，当电平为 1 时，将输入+15v 的电压转换为 TTL 电平，电平为 0 时，将-15v 的电压转换为 0v)。

四、端口说明

模块	端口名称	端口说明
时分复用	开关信号输入	输入电平信号
	巴克码	内部自己给的，复用时放在 0 时隙 (01110010)
	误码插入	在做帧同步实验时进行误码的插入
	DIN1	复用时放于第一时隙
	DIN2	复用时放于第二时隙
	DIN3	复用时放于第三时隙
	DIN4	复用时放于第四时隙
	FSIN	固定信号源，FS 端口；与 PCM 编码数据对齐
	复用输出	输出复用后信号
	复用输出时钟	输出复用后时钟信号
解时分复用	FS ₀	第 0 时隙帧同步信号
	解复用输入	输入复用信号
	解复用时钟	输入复用时钟信号
	FSOUT	为解复用模块提取帧同步，主要用于 PCM 译码
	Dout1	解复用时调整输出第一时隙
	Dout2	解复用时调整输出第二时隙
	Dout3	解复用时调整输出第三时隙
	Dout4	解复用时调整输出第四时隙
	BSOUT	为解复用模块提取位同步
开关信号显示	将开关信号显示于光条上	

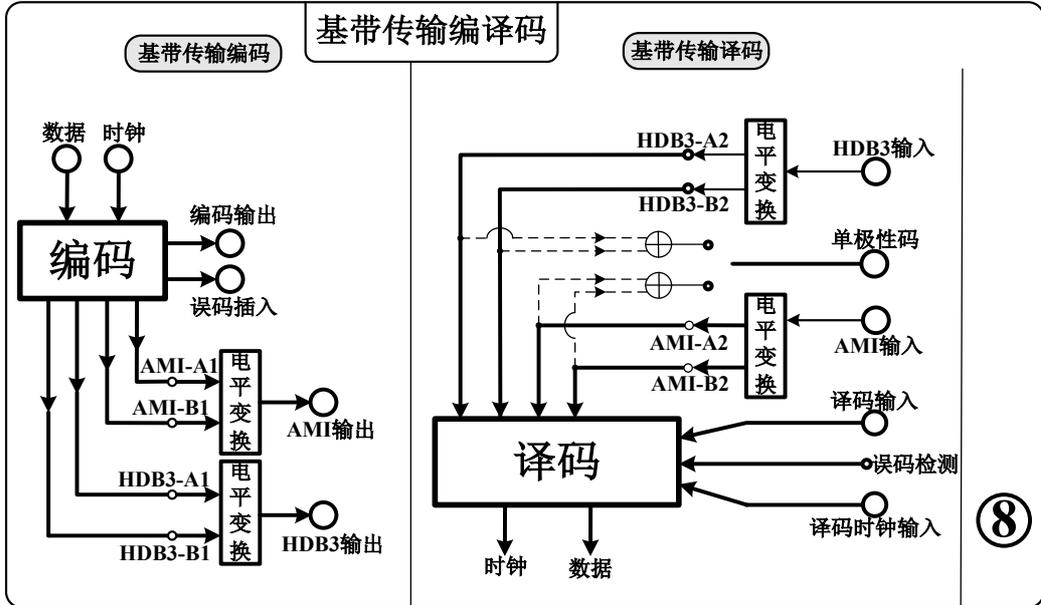
计算机串口二	接收	电压接入
	发送	电压输出

五、可调参数说明

- 1、开关信号输入是由一组八键二电平的拨码开关构成的，相应电平的选择即为相应模式。
- 2、开关信号显示是一组由八个发光二极管构成，其中灯亮为高电平 1，灯灭为低电平 0。
- 3、误码插入，在做帧同步实验时进行误码的插入，其中有两种出入方式，一是“短按”，即插入单次误码；二是“长按”，即插入多次误码。

6、8号模块 基带传输编译码模块

一、模块框图



二、模块简介

基带传输，一种不搬移基带信号频谱的传输方式，在线路中直接传送数字信号的电脉冲。未对载波调制的待传信号称为基带信号，它所占的频带称为基带，基带的高限频率与低限频率之比通常远大于1。一般用于工业生产中。模式为：服务器—终端服务器—电话线—基带—终端，ISO中属于物理层设备。这是一种最简单的传输方式，近距离通信的局域网都采用基带传输。

三、模块功能说明

1、基带传输编码

完成AMI、HDB3、CMI、BPH等基带传输码型的编码工作。其中，由于AMI和HDB3是3极性码。FPGA在完成AMI及HDB3编码后，需要进行电平变换。另外，还有误码插入功能，是为了验证基带传输编码是否具有误码告警的能力。

2、基带传输译码

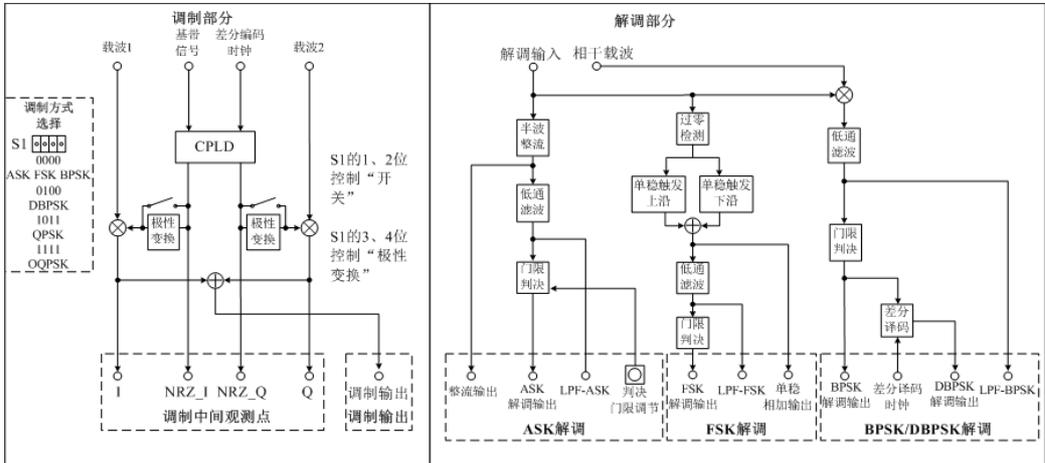
完成AMI、HDB3、CMI、BPH等基带码型的译码工作。其中，由于AMI及HDB3是3极性码。在FPGA译码前需要加入电平反变换功能。

四、端口说明

模块	端口名称	端口说明
基带传输编码	数据	数据信号输入
	时钟	时钟信号输入
	编码输出	编码信号输出
	误码插入	误码数据插入观测点，指示编码端错误
	AMI-A1	AMI-A1 信号编码后波形观测点
	AMI-B1	AMI-B1 信号编码后波形观测点
	AMI 输出	AMI 信号编码后输出
	HDB3-A1	HDB3-A1 信号编码后波形观测点
	HDB3-B1	HDB3-B1 信号编码后波形观测点
	HDB3 输出	HDB3 信号编码后输出
基带传输译码	HDB3 输入	HDB3 编码后的信号输入
	HDB3-A2	HDB3-A2 电平变换后波形观测点
	HDB3-B2	HDB3-B2 电平变换后波形观测点
	单极性码	单极性码输出
	AMI 输入	AMI 编码后的信号输入
	AMI-A2	AMI-A2 电平变换后波形观测点
	AMI-B2	AMI-B2 电平变换后波形观测点
	译码输入	译码信号输入
	译码时钟输入	译码时钟信号输入
	误码检测	检测插入的误码
	时钟	译码后时钟信号输出
	数据	译码后数据信号输出

7、9号模块 数字调制解调模块

一、模块框图



二、模块简介

在信源→信源编码→信道编码→信道传输（调制/解调）→信道译码→信源译码→信宿的整个信号传播连路中，本模块功能属于数字调制解调环节，通过 CPLD 完成 ASK、FSK、BPSK/DBPSK 的调制解调实验。帮助实验者学习并理解数字调制解调的概念和具体过程，并可分别单独用于二次开发。

三、模块功能说明

1、调制方式说明

本模块可以支持：ASK/FSK/BPSK/DBPSK/QPSK/OQPSK。其中调制方式与载波频率对应表如下：

	载波 1	载波 2
ASK	128KHz	无
FSK	256KHz	128KHz
其他	256KHz	256KHz

2、调制部分

所有调制方式的待调制的基带信号、时钟以及载波统一在此部分对应端口输入输出。

3、调制中间观测点部分

此部分可观测到调制过程产生的 NRZ_I, NRZ_Q 以及 I, Q 信号。

4、解调部分

所有待解调信号以及相干载波统一在此部分对应端口输入，并且：

- (1) ASK 解调输出部分，观测点包括整流输出和低通滤波输出，以及门限调节。
- (2) FSK 解调输出部分，观测点包括单稳相加输出和低通滤波输出。
- (3) BPSK/DBPSK 解调输出部分，观测点有低通滤波输出，并且输出 BPSK 解调信号（可观测）后还可以继续通过差分译码（需差分译码时钟输入）得到 DBPSK 相干解调输出。

四、端口说明

端口名称		说明
总开关	S2	模块总开关。
调制输入输出部分	基带信号	输入待调制的信号源。
	差分编码时钟	输入差分编码时钟。
	载波 1	输入 1 号载波。
	载波 2	输入 2 号载波。
	调制输出	调制信号输出端口。
调制中间观测点	NRZ_I	调制过程 NRZ_I 分量输出。
	NRZ_Q	调制过程 NRZ_Q 分量输出。
	I	NRZ_I 与载波 1 相乘所得 I 信号观测点。
	Q	NRZ_Q 与载波 2 相乘所得 Q 信号观测点。
解调输入部分	解调输入	输入调制信号
	相干载波	输入相干载波信号
ASK 解调	整流输出	半波整流后的输出观测点。
	LPF-ASK	低通滤波后的输出观测点。
	ASK 解调输出	ASK 解调输出端口。
	判决门限调节	调节门限判决的门限值。
FSK 解调	单稳相加输出	单稳触发上下沿相加所得输出。
	LPF-FSK	低通滤波后的输出观测点。



	FSK 解调输出	FSK 解调输出端口。
BPSK/DBPSK 解调	LPF-BPSK	低通滤波后的输出观测点。
	BPSK 解调输出	BPSK 解调输出端口。
	差分译码时钟	输入差分译码时钟信号。
	DBPSK 解调输出	DBPSK 解调输出端口。

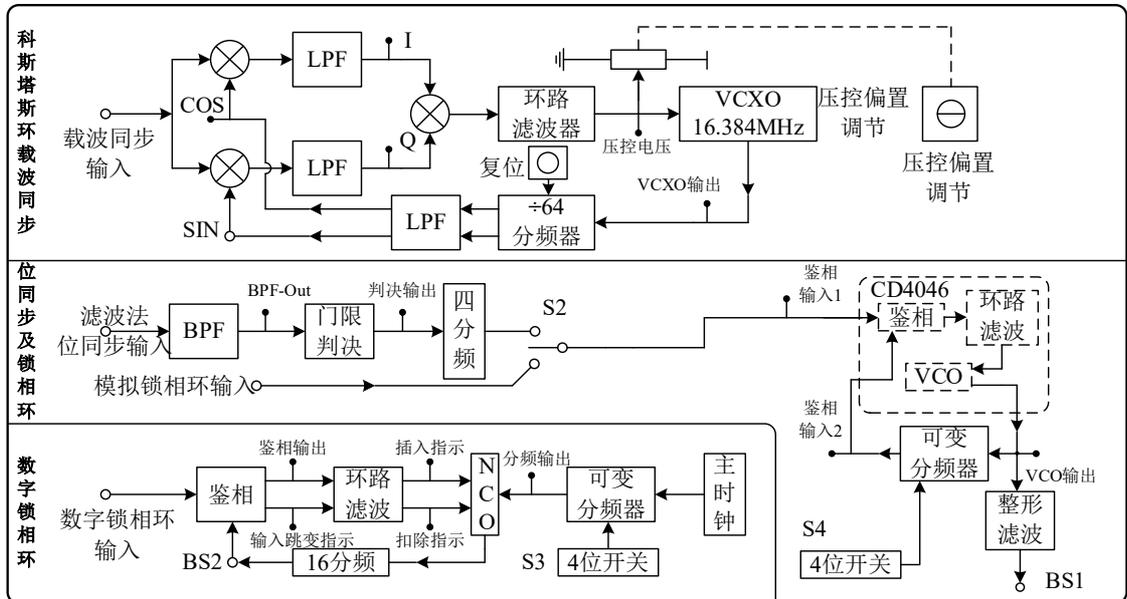
五、可调参数说明

1、S1：通过 S1 拨码开关选择：0000ASK/FSK/BPSK，0100DBPSK，1011QPSK，1111OQPSK。

2、W1：通过 W1 调节门限判决的门限值。

8、13号模块 载波同步及位同步模块

一、模块框图



二、模块简介

同步是通信系统中一个重要的实际问题。当采用同步解调或相干检测时，接收端需要提供一个与发射端调制载波同频同相的相干载波，这就需要载波同步。在最佳接收机结构中，需要对积分器或匹配滤波器的输出进行抽样判决。接收端必须产生一个用作抽样判决的定时脉冲序列，它和接收码元的终止时刻应对齐。这就需要位同步。

三、模块功能说明

1、科斯塔斯环载波同步

在科斯塔斯环载波同步模块中，压控振荡器输出信号供给一路相乘器，压控振荡器输出经 90° 移相后的信号则供给另一路。两者相乘以后可以消除调制信号的影响，经环路滤波器得到仅与压控振荡器输出和理想载波之间相位差有关的控制电压，从而准确地对压控振荡器进行调整，恢复出原始的载波信号。

2、位同步及锁相环

滤波法位同步提取，信号经一个窄带滤波器，滤出同步信号分量，通过门限判决和四分频后提取位同步信号。锁相法位同步提取，在接收端利用锁相环电路比较接收码元和本地产

生的位同步信号的相位，并调整位同步信号的相位，最终获得准确的位同步信号。

3、数字锁相环

压控振荡器的频率变化时，会引起相位的变化，在鉴相器中与参考相位比较，输出一个与相位误差信号成比例的误差电压，再经过低通滤波器，取出其中缓慢变动数值，将压控振荡器的输出频率拉回到稳定的值上来，从而实现了相位稳定。

四、端口说明

模块	端口名称	端口说明
科斯塔斯环载波同步	载波同步输入	载波同步信号输入
	COS	余弦信号观测点
	SIN	正弦信号输入
	I	信号和 $\pi/2$ 相载波相乘滤波后的波形观测点
	Q	信号和 0 相载波相乘滤波后的波形观测点
	压控电压	误差电压观测点
	VCXO	压控晶振输出
	复位	分频器重定开关
	压控偏置调节	压控偏置电压调节
位同步及锁相环	滤波法位同步输入	滤波法位同步基带信号输入
	模拟锁相环输入	模拟锁相环信号输入
	S2	位同步方法选择开关
	鉴相输入 1	接收位同步信号观测点
	鉴相输入 2	本地位元元同步信号观测点
	VCO 输出	压控振荡器输出信号观测点
	BS1	合成频率信号输出
	分频设置	设置分频频率
数字锁	数字锁相环输入	数字锁相环信号输入
	BS2	分频信号输出

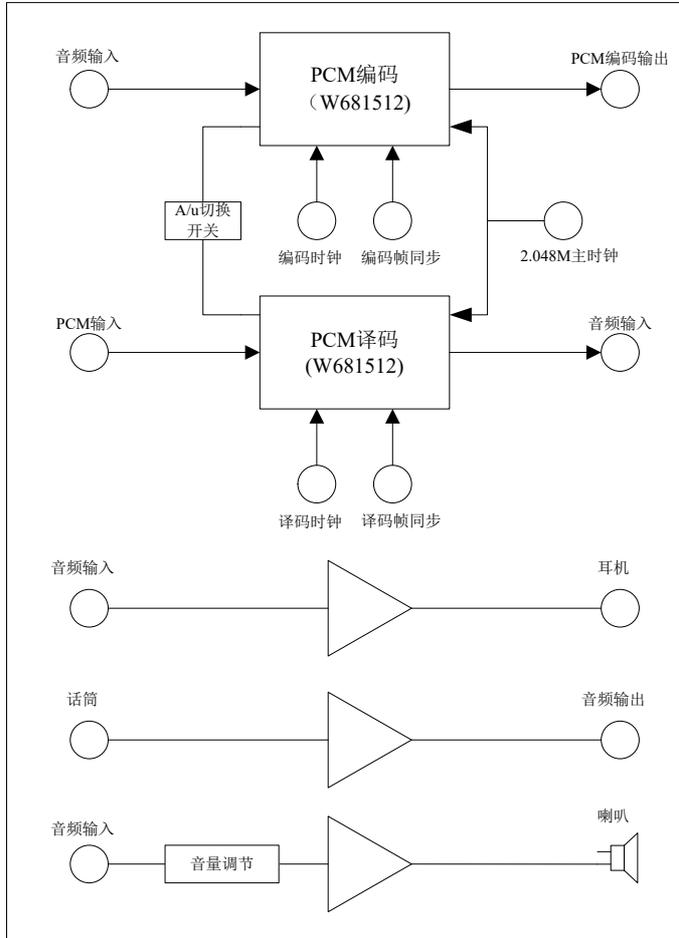
鉴相输出	输出鉴相信号观测点
输入跳变指示	信号跳变观测点
插入指示	插入信号观测点
扣除指示	扣除信号观测点
分频输出	时钟分频信号观测点
分频设置	设置分频频率

五、可调参数说明

- 1、S2，向上拨动，选择滤波法位同步电路；向下拨动，选择锁相环频率合成电路。
- 2、压控偏置调节，调节压控偏置电压。
- 3、分频设置，设置分频频率，“0000”输出 4096KHz 频率，“0011”输出 512KHz 频率，“0100”输出 256KHz 频率，“0111”输出 32KHz 频率。

9、21 号模块 PCM 编译码及语音终端模块

一、模块框图



二、模块简介

在通信原理实验中，语音信号的编译码过程十分重要。整个通话过程就是一个最基本的数字通信过程，在实际生活中具有广泛的应用。该模块采用 PCM 编译码专用集成芯片 W681512 完成信源编译码功能，并提供了耳机和话筒的接口，同时融入了扬声器。

三、模块功能说明

1、PCM 编译码单元（W681512 集成芯片）

包含有 PCM 编码及译码功能，可通过开关切换 A 律或 μ 律编译码方式。

2、话筒接口单元

可将耳麦的话筒端接入话筒接口，用于将语音信号送入实验传输系统中。

3、耳机接口单元

可将耳麦的耳机端接至耳机接口，用于反馈实验传输系统中的话音信号。

4、扬声器单元

将模拟语音信号经功放，送入扬声器播放。

四、端口说明

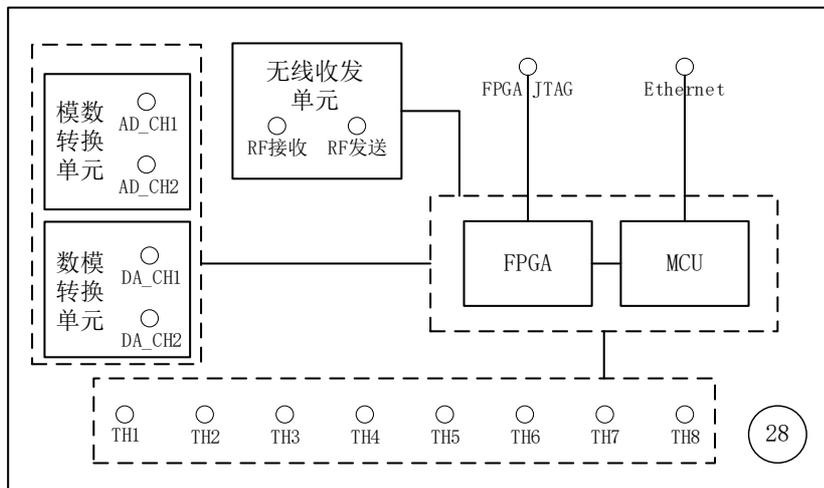
端口名称	端口功能
主时钟	W681512 芯片工作时钟输入
音频输入 (TH5)	语音信号终端输入
编码时钟	PCM 编码时钟脉冲输入
编码帧同步	PCM 编码帧同步信号输入
PCM 编码输出	PCM 编码信号输出
PCM 译码输入	PCM 译码信号输入
译码时钟	PCM 译码时钟脉冲输入
译码帧同步	PCM 译码帧同步信号输入
音频输出	语音信号终端输出
MIC1	话筒插座
话筒输出	话筒信号输出
耳机输入	耳机信号输入
PHONE1	耳机插座
音频输入 (TH12)	扬声器信号输入
音量	调节输出语音音量

五、可调参数说明

1、音量 W1：旋转音量旋钮调节功放的放大倍数，实现音频信号输出频率的大小调节。

10、28 号模块 多功能软件无线电（SDR）模块（选配）

一、模块框图



二、模块简介

模块基于 FPGA、MCU 和高速 AD、DA 转换，可以完成多种通信实验。FPGA 与 MCU 采用 16bit 并行数据传输通道，双向传输速率最大可达 64M。可满足实时语音与视频信号传输。既可以支持通过以太网接口，实现虚实结合、软硬件结合方式来组建通信系统，也可以通过模块集成的电子连线技术，远程在软件平台上，调出通信系统模块，采用虚拟连线和远程参数配置方式来搭建通信系统实验。

三、端口说明

模块	端口名称	端口说明
SDR 模块	AD_CH1、AD_CH2	2 通道 ADC 模拟输入端口
	DA_CH1、DA_CH2	2 通道 DAC 数字输入端口
	RF 接收、RF 发送	无线收发端口
	TH1~TH8	8 路数字 IO 接口
	FPGA JTAG	FPGA 下载调试接口
	Ethernet	100M 双工以太网口

IV、实验操作指导

第一章 信源编码技术

实验一 抽样定理实验

一、实验目的

- 1、了解抽样定理在通信系统中的重要性。
- 2、掌握自然抽样及平顶抽样的实现方法。
- 3、理解低通采样定理的原理。
- 4、理解实际的抽样系统。
- 5、理解低通滤波器的幅频特性对抽样信号恢复的影响。
- 6、理解低通滤波器的相频特性对抽样信号恢复的影响。
- 7、理解带通采样定理的原理。

二、实验器材

- | | |
|---------------|-----|
| 1、主控&信号源、3号模块 | 各一块 |
| 2、双踪示波器 | 一台 |
| 3、连接线 | 若干 |

三、实验原理

1、实验原理框图

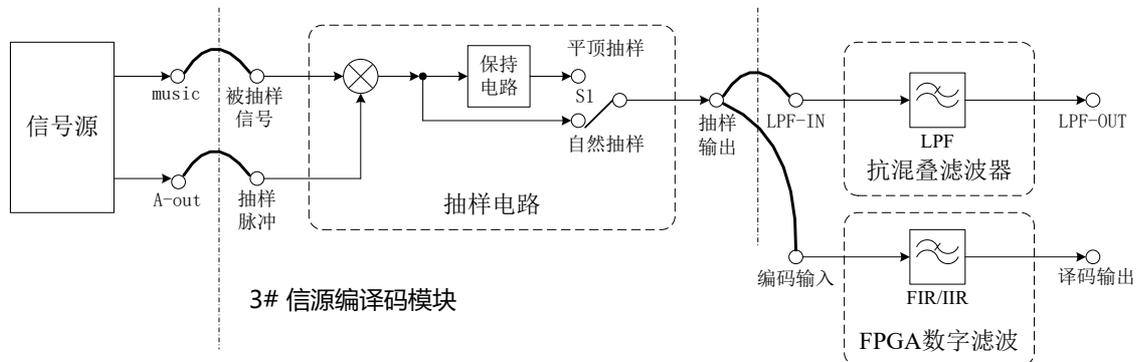


图1-1 抽样定理实验框图

2、实验框图说明

抽样信号由抽样电路产生。将输入的被抽样信号与抽样脉冲相乘就可以得到自然抽样信号，自然抽样的信号经过保持电路得到平顶抽样信号。平顶抽样和自然抽样信号是通过开关S1切换输出的。

抽样信号的恢复是将抽样信号经过低通滤波器，即可得到恢复的信号。这里滤波器可以选用抗混叠滤波器（8阶3.4kHz的巴特沃斯低通滤波器）或FPGA数字滤波器（有FIR、IIR两种）。反sinc滤波器不是用来恢复抽样信号的，而是用来应对孔径失真现象。

要注意，这里的数字滤波器是借用的信源编译码部分的端口。在做本实验时与信源编译码的内容没有联系。

四、实验步骤

任务一 抽样信号观测及抽样定理验证

概述：通过不同频率的抽样时钟，从时域和频域两方面观测自然抽样和平顶抽样的输出波形，以及信号恢复的混叠情况，从而了解不同抽样方式的输出差异和联系，验证抽样定理。

1、模块关电，按表格所示进行连线。

源端口	目标端口	连线说明
信号源：MUSIC	模块 3：TH1(被抽样信号)	将被抽样信号送入抽样单元
信号源：A-OUT	模块 3：TH2(抽样脉冲)	提供抽样时钟
模块 3：TH3(抽样输出)	模块 3：TH5(LPF-IN)	送入模拟低通滤波器

2、模块开电，设置主控菜单，选择【主菜单】→【通信原理】→【抽样定理】。调节主控模块的W1使A-out输出峰峰值为3V。

3、此时实验系统初始状态为：被抽样信号MUSIC为幅度4V、频率3K+1K正弦合成波。抽样脉冲A-OUT为幅度3V、频率9KHz、占空比20%的方波。

4、实验操作及波形观测。

(1) 观测并记录自然抽样前后的信号波形：设置开关S1^{3#}为“自然抽样”档位，用示波器分别观测MUSIC_{主控&信号源}和抽样输出_{3#}。

(2) 观测并记录平顶抽样前后的信号波形：设置开关S1^{3#}为“平顶抽样”档位，用示波器分别观测MUSIC_{主控&信号源}和抽样输出_{3#}。

(3) 观测并对比抽样恢复后信号与被抽样信号的波形：设置开关 S1^{3#}为“自然抽样”档位，用示波器观测 MUSIC_{主控&信号源}和 LPF-OUT^{3#}，以 100Hz 的步进减小 A-OUT_{主控&信号源}的频率，比较观测并思考在抽样脉冲频率多小的情况下恢复信号有失真。

(4) 用频谱的角度验证抽样定理（选做）：用示波器频谱功能观测并记录被抽样信号 MUSIC 和抽样输出频谱。以 100Hz 的步进减小抽样脉冲的频率，观测抽样输出以及恢复信号的频谱。（注意：示波器需要用 250kSa/s 采样率（即每秒采样点为 250K），FFT 缩放调节为×10）。

注：通过观测频谱可以看到当抽样脉冲小于 2 倍被抽样信号频率时，信号会产生混叠。

任务二 滤波器幅频特性对抽样信号恢复的影响

概述：该任务是通过改变不同抽样时钟频率，分别观测和绘制抗混叠低通滤波器和 fir 数字滤波的幅频特性曲线，并比较抽样信号经这两种滤波器后的恢复效果，从而了解和探讨不同滤波器幅频特性对抽样信号恢复的影响。

1、测试抗混叠低通滤波器的幅频特性曲线。

(1) 模块关电，按表格所示进行连线。

源端口	目标端口	连线说明
信号源：A-OUT	模块 3：TH5(LPF-IN)	将信号送入模拟滤波器

(2) 模块开电，设置主控模块，选择【信号源】→【输出波形】和【输出频率】，通过调节相应旋钮，使 A-OUT_{主控&信号源}输出频率 5KHz、峰峰值为 3V 的正弦波。

(3) 此时实验系统初始状态为：抗混叠低通滤波器的输入信号为频率 5KHz、幅度 3V 的正弦波。

(4) 实验操作及波形观测。

用示波器观测 LPF-OUT^{3#}。以 100Hz 步进减小 A-OUT_{主控&信号源}输出频率，观测并记录 LPF-OUT^{3#}的频谱。记入如下表格：

200HZ	
...	

3K	
...	
3.4K	
...	
5K	
...	

由上述表格数据，画出模拟低通滤波器幅频特性曲线。

思考：对于3.4KHz低通滤波器，为了更好的画出幅频特性曲线，我们可以如何调整信号源输入频率的步进值大小？

2、测试 fir 数字滤波器的幅频特性曲线。

(1) 模块关电，按表格所示进行连线。

源端口	目标端口	连线说明
信号源：A-OUT	模块 3：TH13(编码输入)	将信号送入数字滤波器

(2) 模块开电，设置主控菜单：选择【主菜单】→【通信原理】→【抽样定理】→【FIR 滤波器】。调节【信号源】，使 A-out 输出频率 5KHz、峰峰值为 3V 的正弦波。

(3) 此时实验系统初始状态为：fir 滤波器的输入信号为频率 5KHz、幅度 3V 的正弦波。

(4) 实验操作及波形观测。

用示波器观测译码输出 3#，以 100Hz 的步进减小 A-OUT 主控&信号源的频率。观测并记录译码输出 3#的频谱。记入如下表格：

A_out 的频率/Hz	基频幅度/V
200HZ	
...	
3K	
...	
3.4K	

...	
5K	
...	

由上述表格数据，画出 fir 低通滤波器幅频特性曲线。

思考：对于 3KHz 低通滤波器，为了更好的画出幅频特性曲线，我们可以如何调整信号源输入频率的步进值大小？

3、分别利用上述两个滤波器对被抽样信号进行恢复，比较被抽样信号恢复效果。

(1) 模块关电，按表格所示进行连线：

源端口	目标端口	连线说明
信号源：MUSIC	模块 3：TH1(被抽样信号)	提供被抽样信号
信号源：A-OUT	模块 3：TH2(抽样脉冲)	提供抽样时钟
模块 3：TH3(抽样输出)	模块 3：TH5(LPF-IN)	送入模拟低通滤波器
模块 3：TH3(抽样输出)	模块 3：TH13(编码输入)	送入 FIR 数字低通滤波器

(2) 模块开电，设置主控菜单，选择【主菜单】→【通信原理】→【抽样定理】→【FIR 滤波器】。调节 W1 主控&信号源使信号 A-OUT 输出峰峰值为 3V 左右。

(3) 此时实验系统初始状态为：待抽样信号 MUSIC 为 3K+1K 正弦合成波，抽样时钟信号 A-OUT 为频率 9KHz、占空比 20%的方波。

(4) 实验操作及波形观测。对比观测不同滤波器的信号恢复效果：用示波器分别观测 LPF-OUT^{3#}和译码输出^{3#}，以 100Hz 步进减小抽样时钟 A-OUT 的输出频率，对比观测模拟滤波器和 FIR 数字滤波器在不同抽样频率下信号恢复的效果。（频率步进可以根据实验需求自行设置。）思考：不同滤波器的幅频特性对抽样恢复有何影响？

任务三 滤波器相频特性对抽样信号恢复的影响。

概述 该任务是通过改变不同抽样时钟频率，从时域和频域两方面分别观测抽样信号经 fir 滤波和 iir 滤波后的恢复失真情况，从而了解和探讨不同滤波器相频特性对抽样信号恢复的影响。

1、观察抽样信号经过 fir 低通滤波器与 iir 低通滤波器后，所恢复信号的频谱。

(1) 模块关电，按表格所示进行连线。

源端口	目标端口	连线说明
信号源: MUSIC	模块 3: TH1(被抽样信号)	提供被抽样信号
信号源: A-OUT	模块 3: TH2(抽样脉冲)	提供抽样时钟
模块 3: TH3(抽样输出)	模块 3: TH13(编码输入)	将信号送入数字滤波器

(2) 模块开电，设置主控菜单，选择【主菜单】→【通信原理】→【抽样定理】。调节 W1 主控&信号源使信号 A-OUT 输出峰峰值为 3V 左右。

(3) 此时实验系统初始状态为：待抽样信号 MUSIC 为 3K+1K 正弦合成波，抽样时钟信号 A-OUT 为频率 9KHz、占空比 20%的方波。

(4) 实验操作及波形观测。

a、观测信号经 fir 滤波后波形恢复效果：设置主控模块菜单，选择【抽样定理】→【FIR 滤波器】；设置【信号源】使 A-OUT 输出的抽样时钟频率为 7.5KHz；用示波器观测恢复信号译码输出 3#的波形和频谱。

b、观测信号经 iir 滤波后波形恢复效果：设置主控模块菜单，选择【抽样定理】→【IIR 滤波器】；设置【信号源】使 A-OUT 输出的抽样时钟频率为 7.5KHz；用示波器观测恢复信号译码输出 3#的波形和频谱。

c、探讨被抽样信号经不同滤波器恢复的频谱和时域波形：

被抽样信号与经过滤波器后恢复的信号之间的频谱是否一致？如果一致，是否就是说原始信号能够不失真的恢复出来？用示波器分别观测 fir 滤波恢复和 iir 滤波恢复情况下，译码输出 3#的时域波形是否完全一致，如果波形不一致，是失真呢？还是有相位的平移呢？如果相位有平移，观测并计算相位移动时间。

注：实际系统中，失真的现象不一定是错误的，实际系统中有这样的应用。

2、观测相频特性

(1) 模块关电，按表格所示进行连线。

源端口	目标端口	连线说明
信号源: A-OUT	模块 3: TH13(编码输入)	使源信号进入数字滤波器

(2) 模块开电，设置主控菜单，选择【主菜单】→【通信原理】→【抽样定理】→【FIR 滤波器】。

(3) 此时系统初始实验状态为：A-OUT 为频率 9KHz、占空比 20%的方波。

(4) 实验操作及波形观测。

对比观测信号经 fir 滤波后的相频特性：设置【信号源】使 A-OUT 输出频率为 5KHz、峰值为 3V 的正弦波；以 100Hz 步进减小 A-OUT 输出频率，用示波器对比观测 A-OUT 主控&信号源和译码输出 3#的时域波形。相频特性测量就是改变信号的频率，测输出信号的延时（时域上观测）。记入如下表格：

A-OUT 的频率/Hz	被抽样信号与恢复信号的相位延时/ms
3.5K	
3.4K	
3.3K	
...	

五、实验报告

1、分析电路的工作原理，叙述其工作过程。

2、绘出所做实验的电路、仪表连接调测图。并列所测各点的波形、频率、电压等有关数据，对所测数据做简要分析说明。必要时借助于计算公式及推导。

3、分析以下问题：滤波器的幅频特性是如何影响抽样恢复信号的？简述平顶抽样和自然抽样的原理及实现方法。

4、思考一下，实验步骤中采用 3K+1K 正弦合成波作为被抽样信号，而不是单一频率的正弦波，在实验过程中波形变化的观测上有什么区别？对抽样定理理论和实际的研究有什么意义？

实验二 PCM 编译码实验

一、实验目的

- 1、 掌握脉冲编码调制与解调的原理。
- 2、 掌握脉冲编码调制与解调系统的动态范围和频率特性的定义及测量方法。
- 3、 了解脉冲编码调制信号的频谱特性。
- 4、 熟悉了解 W681512。

二、实验器材

- | | |
|------------------------|-----|
| 1、 主控&信号源模块、3 号、21 号模块 | 各一块 |
| 2、 双踪示波器 | 一台 |
| 3、 连接线 | 若干 |

三、实验原理

- 1、 实验原理框图

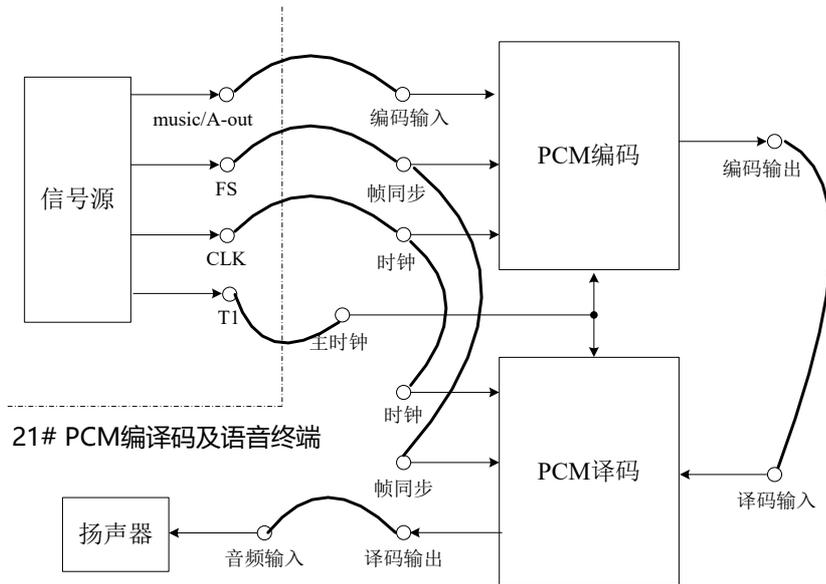


图2-1 21号模块W681512芯片的PCM编译码实验

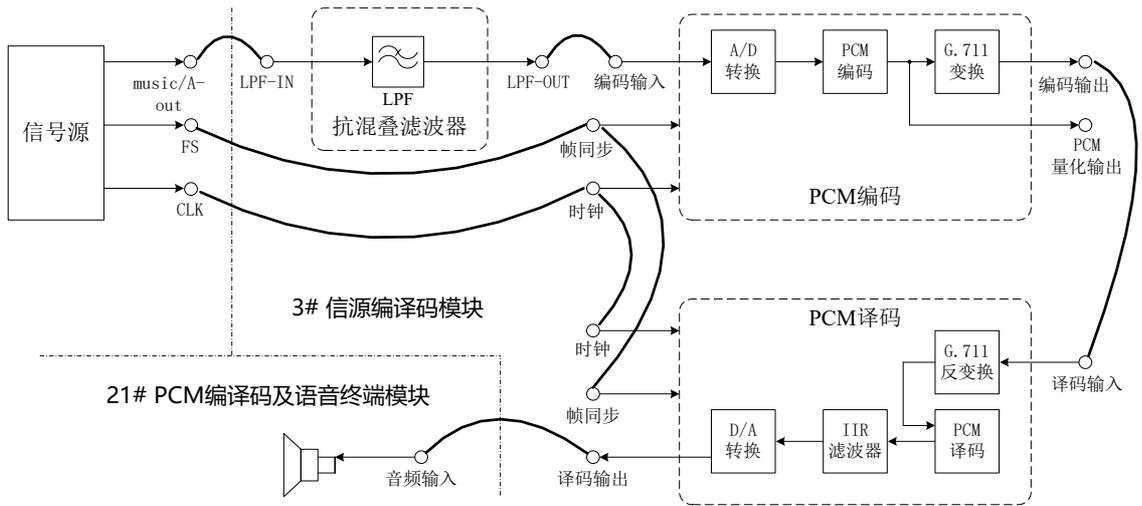


图2-2 3号模块的PCM编译码实验

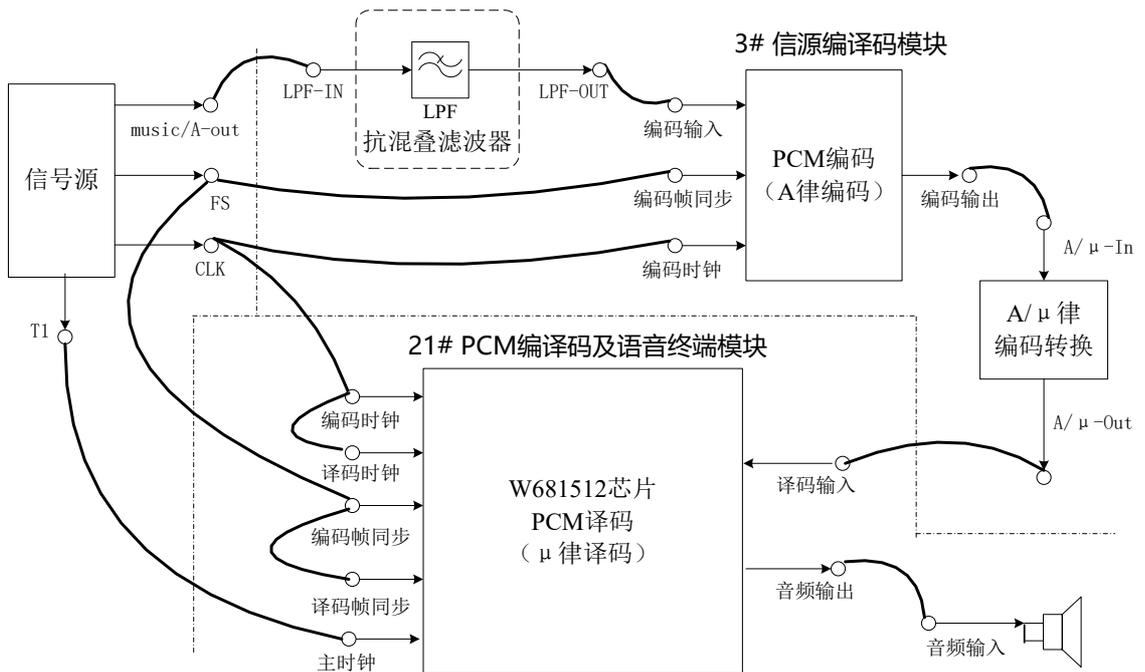


图2-3 A/μ律编码转换实验

2、实验框图说明

图2-1中描述的是信号源经过芯片W681512经行PCM编码和译码处理。W681512的芯片工作主时钟为2048KHz，根据芯片功能可选择不同编码时钟进行编译码。在本实验的任务一中以编码时钟取64K为基础进行芯片的幅频特性测试实验。

图2-2中描述的是采用软件方式实现PCM编译码，并展示中间变换的过程。PCM编码过程是将音乐信号或正弦波信号，经过抗混叠滤波（其作用是滤波3.4kHz以外的频率，防止A/D转换时出现混叠的现象）。抗混滤波后的信号经A/D转换，然后做PCM编码，之后由于G.711协议规定A律的奇数位取反， μ 律的所有位都取反。因此，PCM编码后的数据需要经G.711协议的变换输出。PCM译码过程是PCM编码逆向的过程，不再赘述。

A/ μ 律编码转换实验中，如实验框图 2-3 所示，当菜单选择为 A 律转 μ 律实验时，使用 3 号模块做 A 律编码，A 律编码经 A 转 μ 律转换之后，再送至 21 号模块进行 μ 律译码。同理，当菜单选择为 μ 律转 A 律实验时，则使用 3 号模块做 μ 律编码，经 μ 转 A 律变换后，再送入 21 号模块进行 A 律译码。

3、PCM 编码基本原理

模拟信号进行抽样后，其抽样值还是随信号幅度连续变化的，当这些连续变化的抽样值通过有噪声的信道传输时，接收端就不能对所发送的抽样准确地估值。如果发送端用预先规定的有限个电平来表示抽样值，且电平间隔比干扰噪声大，则接收端将有可能对所发送的抽样准确地估值，从而有可能消除随机噪声的影响。

脉冲编码调制（PCM）简称为脉码调制，它是一种将模拟语音信号变换成数字信号的编码方式。脉码调制的过程如图 2-4 所示。

PCM 主要包括抽样、量化与编码三个过程。抽样是把时间连续的模拟信号转换成时间离散、幅度连续的抽样信号；量化是把时间离散、幅度连续的抽样信号转换成时间离散、幅度离散的数字信号；编码是将量化后的信号编码形成一个二进制码组输出。国际化的 PCM 码组（电话语音）是用八位码组代表一个抽样值。编码后的 PCM 码组，经数字信道传输，在接收端，用二进制码组重建模拟信号，在解调过程中，一般采用抽样保持电路。预滤波是为了把原始语音信号的频带限制在 300Hz~3400Hz 左右，所以预滤波会引入一定的频带失真。

在整个 PCM 系统中，重建信号的失真主要来源于量化以及信道传输误码。通常，用信号与量化噪声的功率比，即信噪比 S/N 来表示。国际电报电话咨询委员会（ITU-T）详细规定了它的指标，还规定比特率为 64kbps，使用 A 律或 μ 律编码律。下面将详细介绍 PCM 编码的整个过程，由于抽样原理已在前面实验中详细讨论过，故在此只讲述量化及编码的原理。

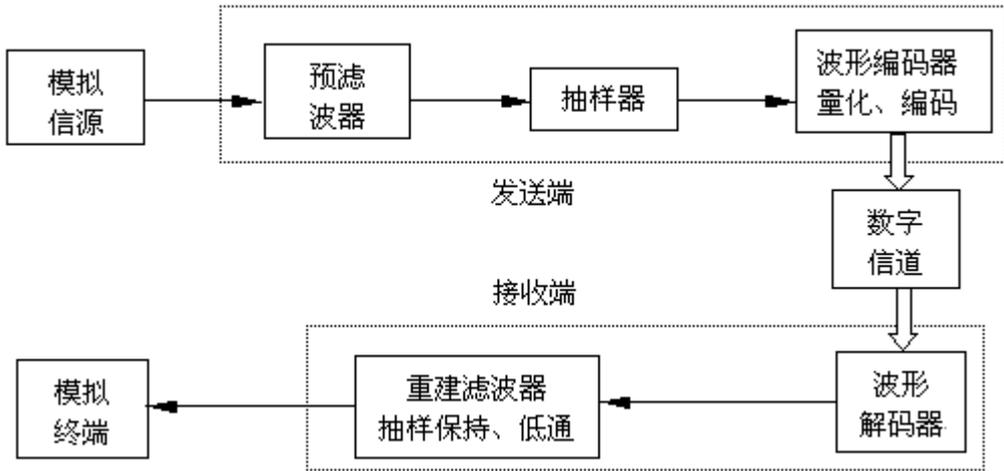


图 2-4 PCM 调制原理框图

(1) 量化

从数学上来看，量化就是把一个连续幅度值的无限数集合映射成一个离散幅度值的有限数集合。如图 2-5 所示，量化器 Q 输出 L 个量化值 y_k , $k=1, 2, 3, \dots, L$ 。 y_k 常称为重建电平或量化电平。当量化器输入信号幅度 x 落在 x_k 与 x_{k+1} 之间时，量化器输出电平为 y_k 。这个量化过程可以表达为：

$$y = Q(x) = Q\{x_k < x \leq x_{k+1}\} = y_k, \quad k = 1, 2, 3, \dots, L$$

这里 x_k 称为分层电平或判决阈值。通常 $\Delta_k = x_{k+1} - x_k$ 称为量化间隔。

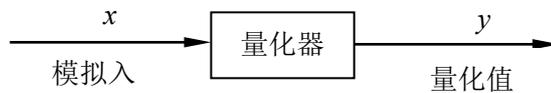


图 2-5 模拟信号的量化

模拟信号的量化分为均匀量化和非均匀量化，我们先讨论均匀量化。把输入模拟信号的取值域按等距离分割的量化称为均匀量化。在均匀量化中，每个量化区间的量化电平均取在各区间的中点，如图 2-6 所示。其量化间隔（量化台阶） Δv 取决于输入信号的变化范围和量化电平数。当输入信号的变化范围和量化电平数确定后，量化间隔也被确定。例如，输入信号的最小值和最大值分用 a 和 b 表示，量化电平数为 M ，那么，均匀量化的量化间隔为：

$$\Delta v = \frac{b-a}{M}$$

量化器输出 m_q 为:

$$m_q = q_i, \quad \text{当 } m_{i-1} < m \leq m_i$$

式中 m_i 为第 i 个量化区间的终点, 可写成

$$m_i = a + i\Delta v$$

q_i 为第 i 个量化区间的量化电平, 可表示为

$$q_i = \frac{m_i + m_{i-1}}{2}, \quad i = 1, 2, \dots, M$$

上述均匀量化的主要缺点是, 无论抽样值大小如何, 量化噪声的均方根值都固定不变。因此, 当信号 $m(t)$ 较小时, 则信号量化噪声功率比也就很小, 这样, 对于弱信号时的量化信噪比就难以达到给定的要求。通常, 把满足信噪比要求的输入信号取值范围定义为动态范围, 可见, 均匀量化时的信号动态范围将受到较大的限制。为了克服这个缺点, 实际中, 往往采用非均匀量化。

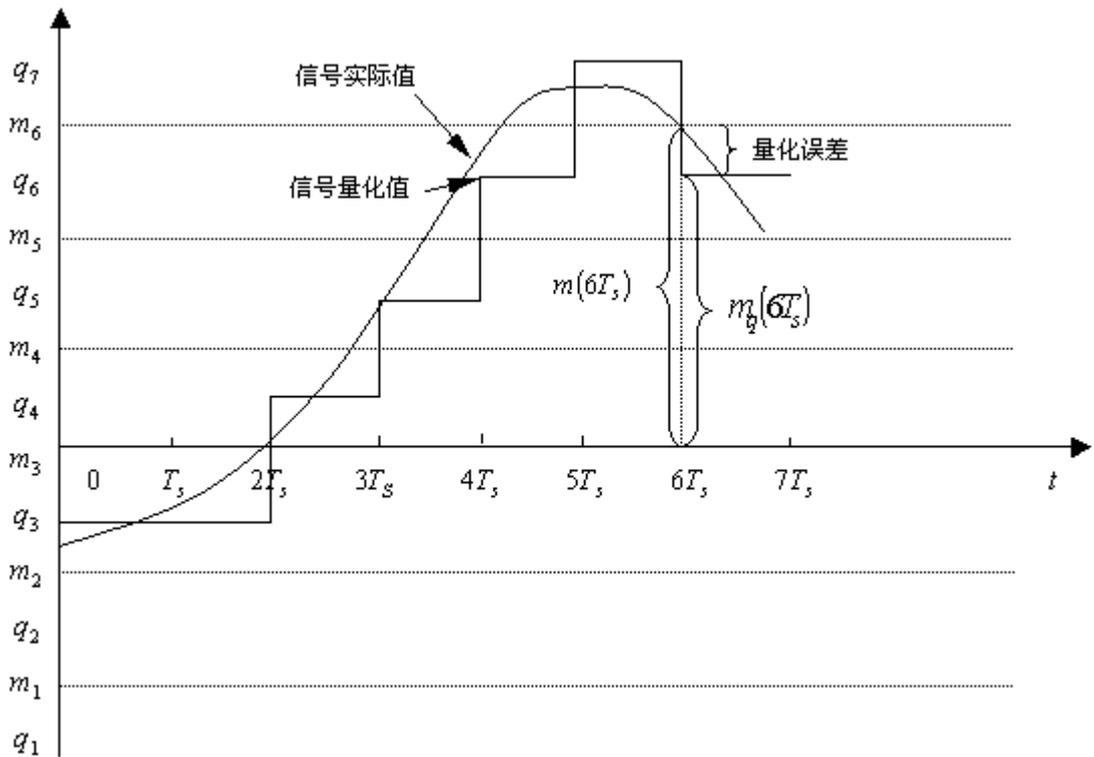


图 2-6 均匀量化过程示意图

非均匀量化是根据信号的不同区间来确定量化间隔的。对于信号取值小的区间，其量化间隔 Δv 也小；反之，量化间隔就大。它与均匀量化相比，有两个突出的优点。首先，当输入量化器的信号具有非均匀分布的概率密度（实际中常常是这样）时，非均匀量化器的输出端可以得到较高的平均信号量化噪声功率比；其次，非均匀量化时，量化噪声功率的均方根值基本上与信号抽样值成比例。因此量化噪声对大、小信号的影响大致相同，即改善了小信号时的量化信噪比。

实际中，非均匀量化的实际方法通常是将抽样值通过压缩再进行均匀量化。通常使用的压缩器中，大多采用对数式压缩。广泛采用的两种对数压缩律是 μ 压缩律和 A 压缩律。美国采用 μ 压缩律，我国和欧洲各国均采用 A 压缩律，因此，本实验模块采用的 PCM 编码方式也是 A 压缩律。

所谓 A 压缩律也就是压缩器具有如下特性的压缩律：

$$y = \frac{Ax}{1 + \ln A}, 0 < X < \frac{1}{A}$$

$$y = \frac{1 + \ln Ax}{1 + \ln A}, \frac{1}{A} \leq X < 1$$

A 律压扩特性是连续曲线，A 值不同压扩特性亦不同，在电路上实现这样的函数规律是相当复杂的。实际中，往往都采用近似于 A 律函数规律的 13 折线（A=87.6）的压扩特性。这样，它基本上保持了连续压扩特性曲线的优点，又便于用数字电路实现，本实验模块中所用到的 PCM 编码芯片 W681512 正是采用这种压扩特性来进行编码的。图 2-7 示出了这种压扩特性。

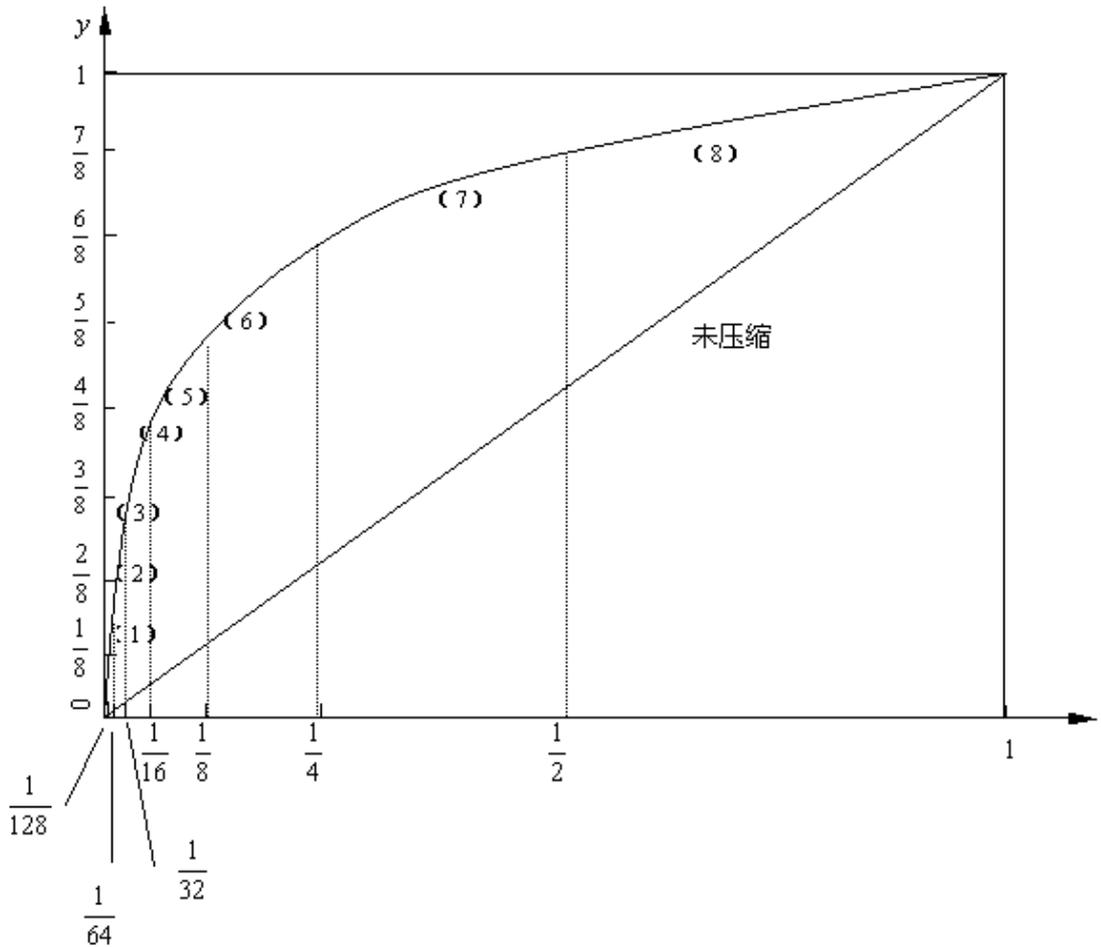


图 2-7 13 折线

表 2-1 列出了 13 折线时的 x 值与计算 x 值的比较。

表 2-1

y	0	$\frac{1}{8}$	$\frac{2}{8}$	$\frac{3}{8}$	$\frac{4}{8}$	$\frac{5}{8}$	$\frac{6}{8}$	$\frac{7}{8}$	1
x	0	$\frac{1}{128}$	$\frac{1}{60.6}$	$\frac{1}{30.6}$	$\frac{1}{15.4}$	$\frac{1}{7.79}$	$\frac{1}{3.93}$	$\frac{1}{1.98}$	1
按折线 分段时的 x	0	$\frac{1}{128}$	$\frac{1}{64}$	$\frac{1}{32}$	$\frac{1}{16}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$	1
段落	1	2	3	4	5	6	7	8	
斜率	16	16	8	4	2	1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$	

表中第二行的 x 值是根据 $A = 87.6$ 时计算得到的，第三行的 x 值是 13 折线分段时的值。可见，13 折线各段落的分界点与 $A = 87.6$ 曲线十分逼近，同时 x 按 2 的幂次分割有利于数字化。

(2) 编码

所谓编码就是把量化后的信号变换成二进制码，其相反的过程称为译码。当然，这里的编码和译码与差错控制编码和译码是完全不同的，前者是属于信源编码的范畴。

在现有的编码方法中，若按编码的速度来分，大致可分为两大类：低速编码和高速编码。通信中一般都采用第二类。

四、实验步骤

任务一 测试 W681512 的幅频特性

概述 该任务是通过改变输入信号频率，观测信号经 W681512 编译码后的输出幅频特性，了解芯片 W681512 的相关性能。

1、模块关电，按表格所示进行连线。

源端口	目的端口	连线说明
信号源：A-OUT	模块 21：TH5(音频接口)	提供音频信号
信号源：T1	模块 21：TH1(主时钟)	提供芯片工作主时钟
信号源：CLK	模块 21：TH11(编码时钟)	提供编码时钟信号

信号源: CLK	模块 21: TH18(译码时钟)	提供译码时钟信号
信号源: FS	模块 21: TH9(编码帧同步)	提供编码帧同步信号
信号源: FS	模块 21: TH10(译码帧同步)	提供译码帧同步信号
模块 21: TH8(PCM 编码输出)	模块 21: TH7(PCM 译码输入)	接入译码输入信号

2、模块开电，设置主控菜单，选择【主菜单】→【通信原理】→【PCM 编码】→【A 律编码观测实验】。调节 W1 主控&信号源使信号 A-OUT 输出峰峰值为 3V 左右。将模块 21 的开关 S1 拨至“A-Law”，即完成 A 律 PCM 编译码。

3、此时实验系统初始状态为：设置音频输入信号为峰峰值 3V，频率 1KHz 正弦波；PCM 编码及译码时钟 CLK 为 64KHz 方波；编码及译码帧同步信号 FS 为 8KHz。

4、实验操作及波形观测。

(1) 调节模拟信号源输出波形为正弦波，输出频率为 50Hz，用示波器观测 A-out，设置 A-out 峰峰值为 3V。

(2) 将信号源频率从 50Hz 增加到 4000Hz，用示波器接模块 21 的音频输出，观测信号的幅频特性。

注：频率改变时可根据实验需求自行改变频率步进，例如 50Hz~250Hz 间以 10Hz 的频率为步进，超过 250Hz 后以 100Hz 的频率为步进。

任务二 PCM 编码规则验证

概述：该任务是通过改变输入信号幅度或编码时钟，对比观测 A 律 PCM 编译码和 μ 律 PCM 编译码输入输出波形，从而了解 PCM 编码规则。

1、模块关电，按表格所示进行连线。

源端口	目的端口	连线说明
信号源: A-OUT	模块 3: TH5(LPF-IN)	信号送入前置滤波器
模块 3: TH6(LPF-OUT)	模块 3: TH13(编码-编码输入)	提供音频信号
信号源: CLK	模块 3: TH9(编码-时钟)	提供编码时钟信号
信号源: FS	模块 3: TH10(编码-帧同步)	提供编码帧同步信号
模块 3: TH14(编码-编码输出)	模块 3: TH19(译码-输入)	接入译码输入信号

信号源：CLK	模块 3：TH15(译码-时钟)	提供译码时钟信号
信号源：FS	模块 3：TH16(译码-帧同步)	提供译码帧同步信号

2、模块开电，设置主控菜单，选择【主菜单】→【通信原理】→【PCM 编码】→【A 律编码观测实验】。调节 W1 主控&信号源使信号 A-OUT 输出峰峰值为 3V 左右。

3、此时实验系统初始状态为：设置音频输入信号为峰峰值 3V，频率 1KHz 正弦波；PCM 编码及译码时钟 CLK 为 64KHz；编码及译码帧同步信号 FS 为 8KHz。

4、实验操作及波形观测。

(1) 以 FS 为触发，观测编码输入信号，记录波形。

注意，记录波形后不要调节示波器，因为正弦波的位置需要和编码输出的位置对应。

(2) 在保持示波器设置不变的情况下，以 FS 为触发观察 PCM 量化输出，记录波形。

(3) 再以 FS 为触发，观察并记录 PCM 编码的 A 律编码输出波形，填入下表中。整个过程中，保持示波器设置不变。

(4) 再通过主控中的模块设置，把 3 号模块设置为【PCM 编译码】→【μ 律编码观测实验】，重复步骤 (1) (2) (3)。将记录 μ 律编码相关波形，填入下表中。

	A 律波形	μ 律波形
帧同步信号		
编码输入信号		
PCM 量化输出信号		
PCM 编码输出信号		

(5) 对比观测编码输入信号和译码输出信号。

思考 1：改变基带信号幅度时，波形是否变化？改变时钟信号频率时，波形是否发生变化？

思考 2：当编码输入信号的频率大于 3400Hz 或小于 300Hz 时，分析脉冲编码调制和解调波形。

任务三 PCM 编码时序观测

概述：该任务是从时序角度观测 PCM 编码输出波形。

1、连线 and 主菜单设置同任务二。

2、用示波器观测 FS 信号与编码输出信号，并记录二者对应的波形。

思考：为什么实验时观察到的 PCM 编码信号码型总是变化的？

任务四 PCM 编码 A/μ 律转换实验

概述：该任务是对比观测 A 律 PCM 编码和 μ 律 PCM 编码的波形，从而了解二者区别与联系。

1、模块关电，按表格所示进行连线。

源端口	目的端口	连线说明
信号源：A-out	模块 3：TH5(LPF-IN)	信号送入前置滤波器
模块 3：TH6(LPF-OUT)	模块 3：TH13(编码-编码输入)	送入 PCM 编码
信号源：CLK	模块 3：编码-时钟	提供编码时钟信号
信号源：FS	模块 3：编码-帧同步	提供编码帧同步信号
模块 3：编码输出	模块 3：A/μ 律--in	接入编码输出信号
模块 3：A/μ --out	模块 21：PCM 译码输入	将转换后的信号送入译码单元
信号源：CLK	模块 21：译码时钟	提供译码时钟信号
信号源：FS	模块 21：译码帧同步	提供译码帧同步信号
信号源：CLK	模块 21：编码时钟	提供 W681512 芯片
信号源：FS	模块 21：编码帧同步	PCM 编译码功能
信号源：T1	模块 21：主时钟	所需的其他工作时钟

2、模块开电，设置主控菜单，选择【主菜单】→【通信原理】→【PCM 编码】→【A 转 μ 律转换实验】。调节 W1 主控&信号源使信号 A-OUT 输出峰峰值为 3V 左右。将 21 号模块的开关 S1 拨至 μ-LAW，即此时完成 μ 律译码。

3、此时实验系统初始状态为：设置音频输入信号为峰峰值 3V，频率 1KHz 正弦波；PCM 编码及译码时钟 CLK 为 64KHz；编码及译码帧同步信号 FS 为 8KHz。

4、用示波器对比观测编码输出信号与 A/μ 律转换之后的信号，观察两者的区别，加以总结。再对比观测原始信号和恢复信号。

5、设置主控菜单，选择【 μ 转 A 律转换实验】，并将 21 号模块对应设置成 A 律译码。
然后按上述步骤观测实验波形情况。

五、实验报告

- 1、分析实验电路的工作原理，叙述其工作过程。
- 2、根据实验测试记录，画出各测量点的波形图，并分析实验现象。（注意对应相位关系）
- 3、对实验思考题加以分析，做出回答。

实验三 Δm 及 CVSD 编译码实验

一、实验目的

- 1、掌握简单增量调制的工作原理。
- 2、理解量化噪声及过载量化噪声的定义，掌握其测试方法。
- 3、了解简单增量调制与 CVSD 工作原理不同之处及性能上的差别。

二、实验器材

- | | |
|---------------------|-----|
| 1、主控&信号源模块、21号、3号模块 | 各一块 |
| 2、双踪示波器 | 一台 |
| 3、连接线 | 若干 |

三、实验原理

1、 Δm 编译码

(1) 实验原理框图

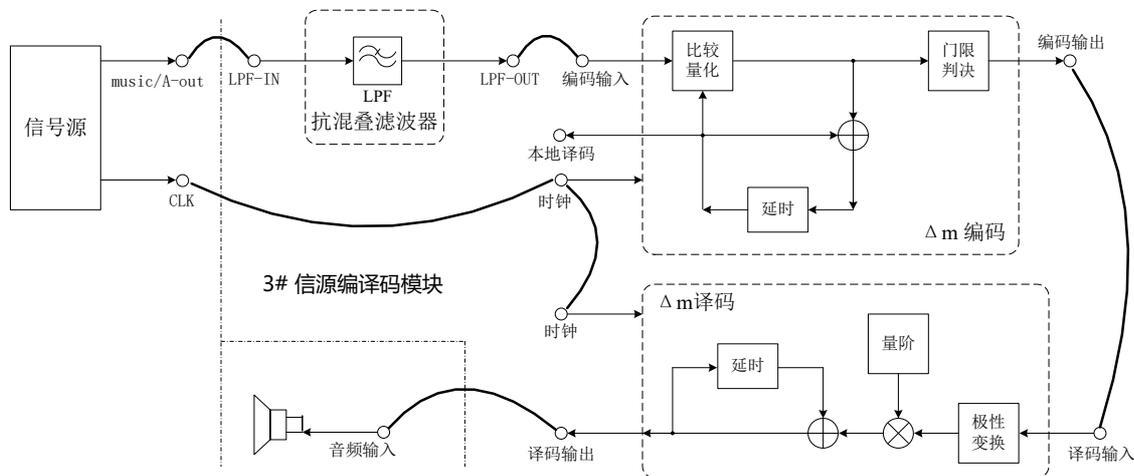


图3-1 Δm 编译码框图

(2) 实验框图说明

编码输入信号与本地译码的信号相比较，如果大于本地译码信号则输出正的量阶信号，如果小于本地译码则输出负的量阶。然后，量阶会对本地译码的信号进行调整，也就是编码部分“+”运算。编码输出是将正量阶变为1，负量阶变为0。

Δm 译码的过程实际上就是编码的本地译码的过程。

(3) 实验原理说明

增量调制简称为 ΔM ，它是继 PCM 后出现的又一种模拟信号数字化方法。近年来在高速超大规模集成电路中用作 A/D 转换器。增量调制获得应用的主要原因是：

- 1) 在比特率较低时，增量调制的量化信噪比高于 PCM；
- 2) 增量调制的抗误码性能好。能工作于误比特率为 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 的信道，而 PCM 则要求误比特率为 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ ；
- 3) 增量调制的编译码器比 PCM 简单。

我们知道，一位二进制码只能代表两种状态，当然就不可能去表示抽样值的大小。可是，用一位码却可以表示相邻抽样值的相对大小，而相邻抽样值的相对变化将能同样反馈模拟信号的变化规律。为了证明这一点，我们通过下面的例子来说明。设一个频带受限的模拟信号如图 4-1 中的 $m(t)$ 所示，此模拟信号用一个阶梯波形 $m'(t)$ 来逼近。在图中，若用二进制码的“1”代表 $m'(t)$ 在给定时刻上升一个台阶 σ ，用“0”表示 $m'(t)$ 下降一个台阶 σ ，则 $m'(t)$ 就被一个二进制的序列所表征。

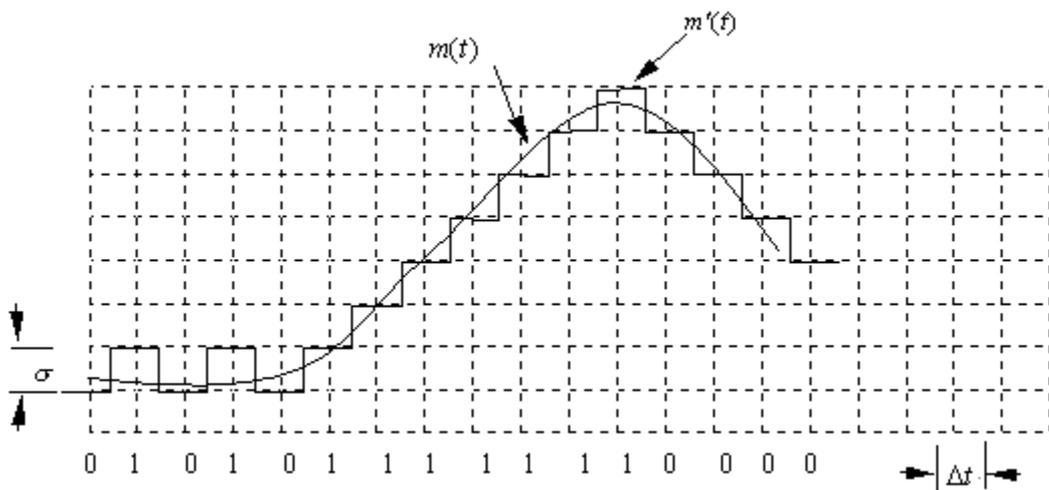


图 3-2 增量调制波形示意图

一个简单的 ΔM 系统组成如图 3-3 所示。它由相减器、判决器、本地译码器、积分器、抽样脉冲产生器及低通滤波器组成。本地译码器实际为一脉冲发生器和积分器，它与接收端

的译码器完全相同。

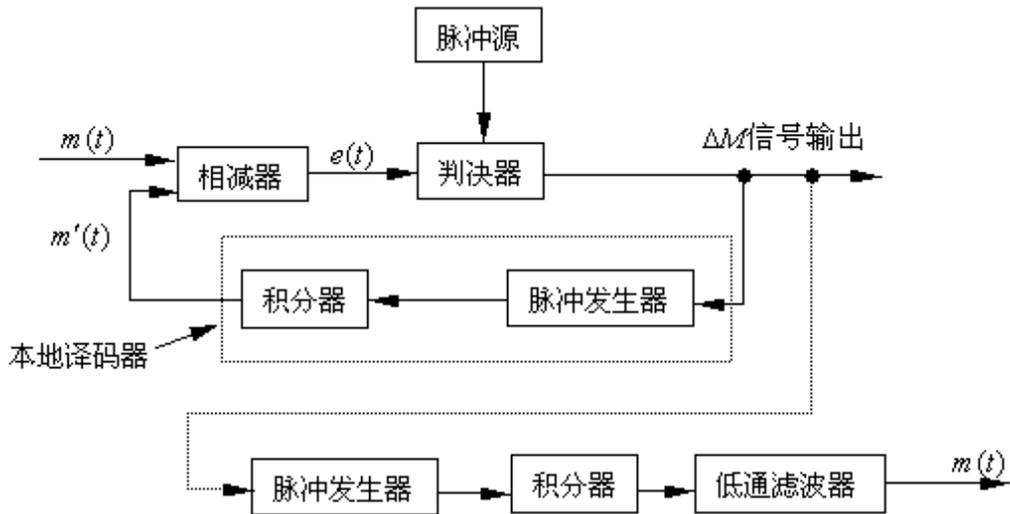


图 3-3 ΔM 系统组成框图

其工作过程如下: 消息信号 $m(t)$ 与来自积分器的信号 $m'(t)$ 相减后得到量化误差信号 $e(t)$ 。如果在抽样时刻 $e(t) > 0$, 判决器 (比较器) 输出则为 “1”; 反之 $e(t) < 0$ 时则为 “0”。判决器输出一方面作为编码信号经信道送往接收端, 另一方面又送往编码器内部的脉冲发生器: “1” 产生一个正脉冲, “0” 产生一个负脉冲, 积分后得到 $m'(t)$ 。由于 $m'(t)$ 与接收端译码器中积分输出信号是一致的, 因此 $m'(t)$ 常称为本地译码信号。接收端译码器与发送端编码器中本地译码部分完全相同, 只是积分器输出再经过一个低通滤波器, 以滤除高频分量。

下面, 进一步举例阐述简单增量调制的工作过程。

设 $m(t)$ 为单一的正弦波信号, 频率为 1000Hz 的模拟话音信号加入到发端编码器的输入端, 如图 3-4 所示。

由图 3-4 可知, 根据上述编码规则, 当 $t_0 \sim t_7$ 时刻, 输入信号的正斜率增大, 并且是连续上升的, 即 $e(t) > 0$ 时, 编码器连续输出 “1” 码; 当 $t_7 \sim t_{11}$ 时刻, 输入信号相对平稳, $e(t)$ 一会儿大于 0, 又一会儿小于 0, 则编码器输出码型也是一会儿输出 “1” 码, 一会儿输出 “0” 码。从 $t_{19} \sim t_{37}$ 时刻, 可根据编码规则, 输出其相应的二进制数字信号。

在接收端, 译码器的电路与工作过程同发送端编码器中的本地译码器完全相同。

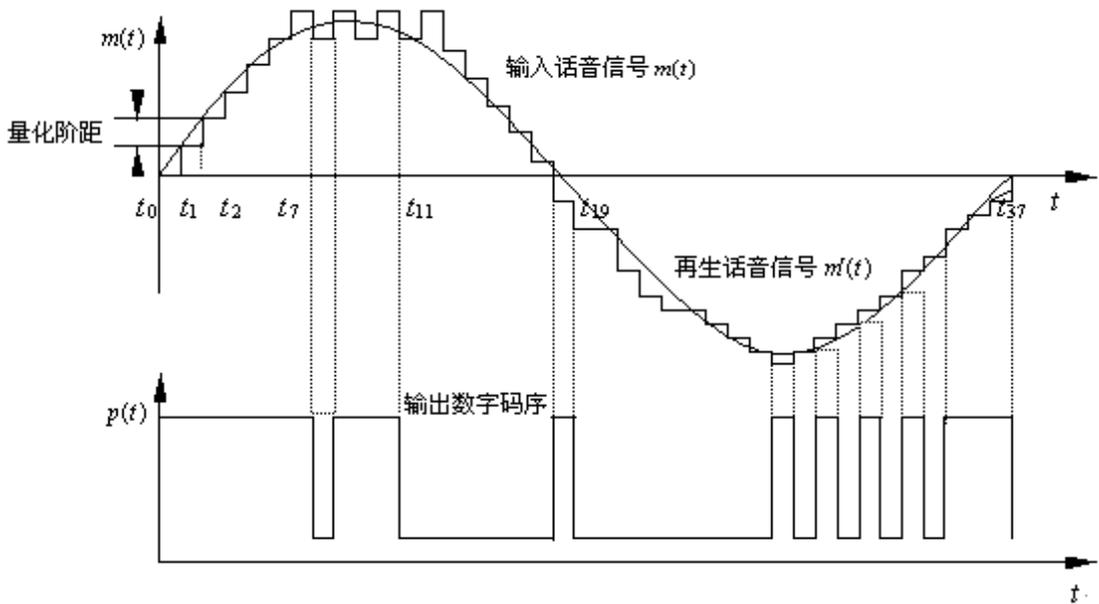


图 3-4 增量调制编码输出波形

从理论上，简单增量调制的最大信号量化噪声比 $(S/Nq)_{\max}$ 为：

$$(S/Nq)_{\max} = 20 \lg \left[0.2 \lg \left(0.2 \frac{f_s^{\frac{3}{2}}}{f_a^{\frac{1}{2}} \cdot f_c} \right) \right] \quad (dB) \quad (1)$$

在(1)式中， f_s 是频率，

f_a 是低通滤波器的截止频率，

f_c 是信号频率。

当 $f_s = 32\text{KHz}$ ， $f_a = 3.4\text{KHz}$ ， $f_c = 1\text{KHz}$ 时：

$$(S/Nq)_{\max} = 20 \lg \left[0.2 \lg \left(0.2 \frac{32_s^{\frac{3}{2}}}{3.4_s^{\frac{1}{2}} \cdot 1} \right) \right] = 25.8(dB)$$

由于语音信号幅度的变化范围较宽，为了获得满意的通话质量，语音信号的动态范围至少要达到 30 dB 才能满足通话的要求，然而，信号的幅度与信号量化噪声比的变化有关，所以，还必须分析在不同语音信号幅度时的信号量化噪声比。

当信号幅度的最大值为 A_{\max} ，信号的幅度为 A 时，求出对应的信噪比如下：

$$S/N_q = \frac{A/\sqrt{2}}{N_q} = \frac{A_{\max}/\sqrt{2}}{N_q} \cdot \frac{A}{A_{\max}} = (S/N_q)_{\max} \cdot \frac{A}{A_{\max}} \quad (2)$$

由 (2) 式可知，任意幅值信号的信噪比与最大信噪比减小的分贝数，等于信号幅度值较 A_{\max} 减小的分贝数。

如果， $(S/N_q)_{\max}=25.8dB$ 而信号在其所要求的动态范围内幅度下降 $20dB$ ，信号量化噪声比为 $25.8dB-20dB=5.8dB$ ，当信号量化噪声比为 $5.8dB$ 时，已不能满足保证话音质量的基本要求。

从上述讨论可以看出， ΔM 信号是按台阶 σ 来量化的，因而同样存在量化噪声问题。 ΔM 系统中的量化噪声有两种形式：一种称为过载量化噪声，另一种称为一般量化噪声，如图 3-5 所示。过载量化噪声发生在模拟信号斜率陡变时，由于阶梯电压波形跟不上信号的变化，形成了很大失真的阶梯电压波形，这样的失真称为过载现象，也称过载噪声；如果无过载噪声发生，则模拟信号与阶梯波形之间的误差就是一般的量化噪声。

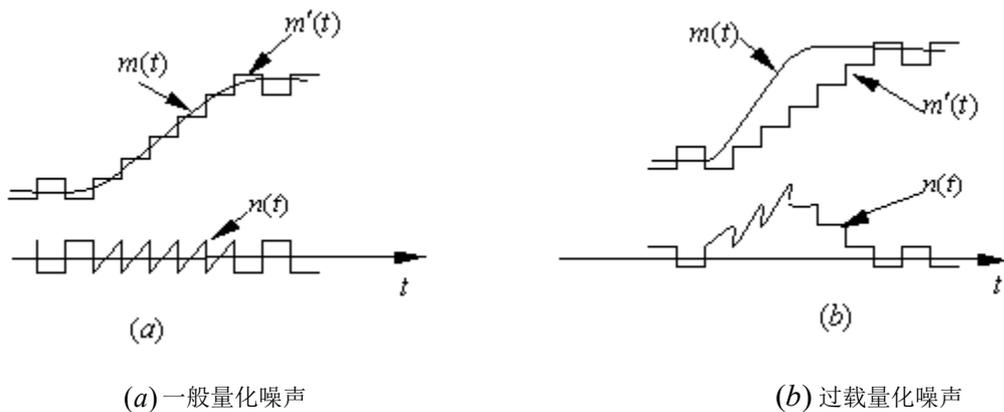


图 3-5 两种形式的量化噪声

综上所述，简单增量调制电路在实际通信中没有得到应用是因为它的信号量化噪声比小，主要是量化阶距（量阶） δ 固定不变，即为均匀量化。对均匀量化而言，如果量阶 δ 取值较大，则信号斜率变化较小的信号量化噪声（又称颗粒噪声）就大；如果量阶 δ 取值较小，则信号斜率较大的量化噪声（又称过载噪声）就大。均匀量化无法使两种噪声同时减小，这样，以致于信号的动态范围变窄，但是它为增量调制技术提供了理论基础。

在语音通信中应用较为广泛的是音节压扩自适应增量调制，它是在数字码流中提取脉冲控制电压，经过音节平滑，按音节速率（也就是语音音量的平均周期）去控制量化阶距 δ 的。在各种音节压扩自适应增量调制中，连续可变斜率增量调制（CVSD）系统用得较多。在试验箱中，也以连续可变斜率增量调制作为实验内容进行。

2、CVSD编译码

(1) 实验原理框图

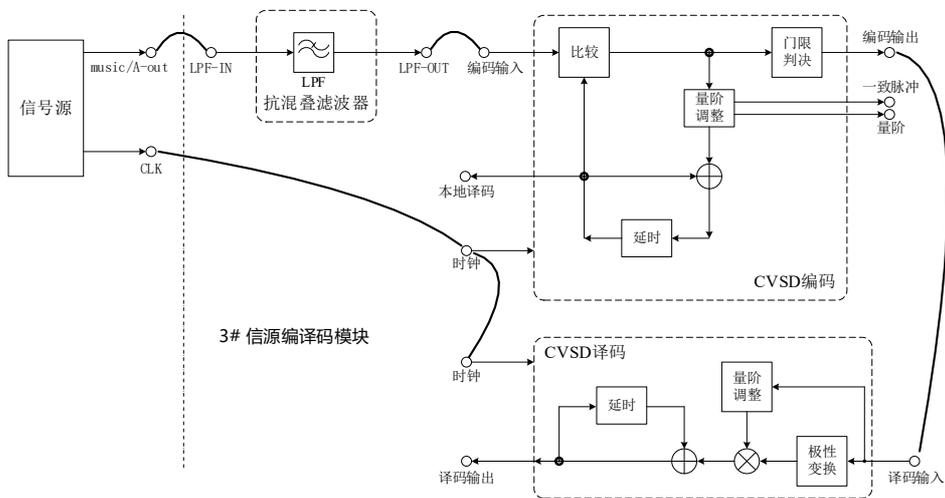


图3-6 CVSD编译码框图

(2) 实验框图说明

与 Δm 相比，CVSD多了量阶调整的过程。而量阶是根据一致脉冲进行调整的。一致性脉冲是指比较结果连续三个相同就会给出一个脉冲信号，这个脉冲信号就是一致脉冲。其他的编译码过程均与 Δm 一样。

(3) 实验原理说明

连续可变斜率增量调制（Continuously Variable Slope Delta Modulation），其英文缩写为CVSD。图 3-7 为 CVSD 编码器、解码器的方框图。

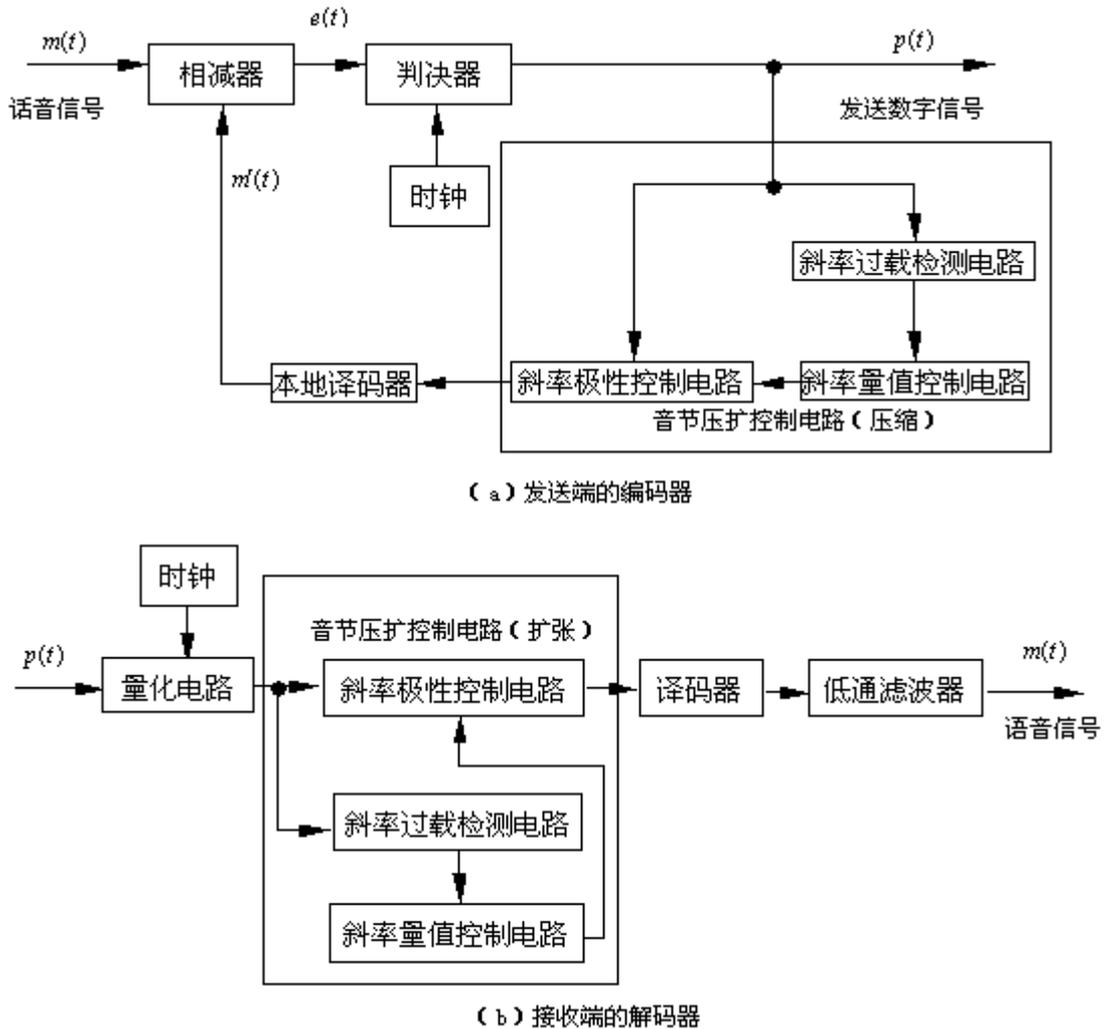


图 3-7 CVSD 编码器、解码器方框图

由图 3-7 可知，与简单增量调制相比，发端的编码器在反馈回路中增加了自适应控制电路，即音节压扩控制电路，它由三个部分组成：

- ① 斜率过载检测电路：用来检测过载状态，它是由一个 4 比特移位寄存器构成的输出四连“1”码或四连“0”码，其电路由 D 触发器作移位寄存器，电路辅有与门、或门。斜率过载检测电路也称为电平检测电路。
- ② 斜率量值控制电路：用来转换量化阶距 δ 的大小。其电路由 RC 音节平滑滤波器、电压电流转换器和非线性网络组成。
- ③ 斜率极性控制电路：用来转化量化阶距的极性，当 $e(t) \geq 0$ 时，输出为正极性，当 $e(t) < 0$ ，

输出为负极性，其电路由脉冲幅度调制器和积分网络组成。

其电路的工作过程是这样的：在输入端，语音信号 $m(t)$ 与语音信号 $m'(t)$ 进行比较，将其比较的结果 $e(t)$ 值进行判决，若 $e(t) \geq 0$ ，则 $p(t)$ 输出“1”码，若 $e(t) < 0$ ，则 $p(t)$ 输出为“0”码，这同简单增量调制器编码方式是相同的。当输入语音信号 $m(t)$ 中，连续出现上升沿或连续出现下降沿，或者说输入信号中正斜率增大或负斜率增大，在编码器的输出端 $p(t)$ 中将出现连续的“1”码或“0”码，这样，如果不增加自适应控制电路，则将会出现 $m'(t)$ 无法跟踪 $m(t)$ 信号，而出现过载现象，如图 3-8 所示。

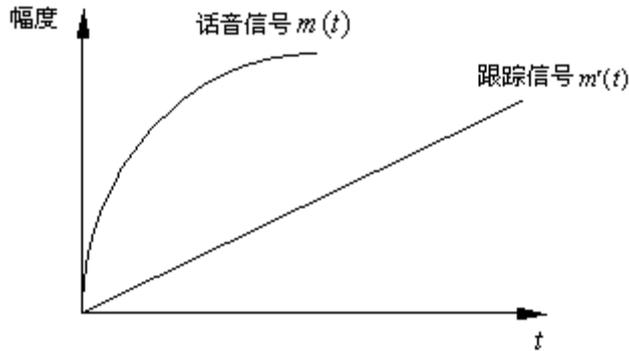


图 3-8 $m'(t)$ 无法跟踪 $m(t)$ 信号的变化而造成过载现象

若电路中增加自适应控制电路，则当 $p(t)$ 中出现连续“1”码或“0”码时，斜率过载检测电路则立即工作，当 $p(t)$ 出现连续的四个“1”码或四个“0”码时，斜率过载检测器从 $p(t)$ 的返回信号中即输出码流中按四连“1”和四连“0”检测，其输出是一些不同宽度的正脉冲，其宽度为 $T_a = (K - 2)T_s$ ， K 是连码的个数， T_s 是取样信号周期，它们输入到斜率量值控制电路，因斜率量值器是由 RC 音节滤波器、电压电流转换器和非线性网络组成，因而 RC 音节平滑滤波器把正脉冲序列进行平滑滤波，变成连续缓慢变化和直流控制电压，其变化的周期等于一个音节时间（约 10ms），当 $p(t)$ 出现“1”码增多时，斜率过载检测器输出的正脉冲数就相对增多，通过 R 对 C 的充电时间相对增长放电时间相对缩短，因此，直流控制电压升高，电压电流转换器把音节平滑滤波器输出的控制电压转换为控制电流，非线性网络使控制电流

的变化规律能更好地跟随输入信号斜率的变化，提高自适应能力，扩大其动态范围。另外，斜率过载检测电路内部的 $p(t)$ 输出信号还接至斜率极性控制电路内的脉幅调制器的输入端，与来自斜率量值控制电路的输出信号一起加到脉幅调制器的另一输入端，因斜率极性控制电路由脉幅调制器和积分网络组成，经过脉幅调制电路和积分网络后就形成了有正负极性的量阶；二是根据音节平滑滤波器输出的电压来改变量阶，使量阶的变化为自适应的变化，其量阶值由自适应逻辑控制。此时，当检测到三连“1”码或者是三连“0”码，则称为 3bit 规则，若为四连“1”码或者四个连“0”码，则称为 4bit 规则。也就是说，CVSD 的量阶变化，主要是由连码检测规则决定的，因发端的编码器是反馈方式工作，即量阶 δ 是从输出码流中检测的，因此，随输入信号正斜率增加，码流中连“1”码就增多；如果负斜率增加，则连“0”码增多，对 CVSD 而言，只要把包络音节时间内连“1”码或连“0”码的次数逐一检测出来，经过音节平滑，形成控制电压，就能得到不同输入信号斜率量阶值，以致于再生信号 $m(t)$ 能始终跟踪语音信号 $m(t)$ 的变化，也就是当语音信号斜率小时，它的量阶值则小，当语音信号的斜率大时，则它的量阶自适应的增大，也就是量阶值随输入信号 $m(t)$ 斜率变化而做自适应和调整。这正是连续可变斜率调制（CVSD）的工作原理，如图 3-9 所示。

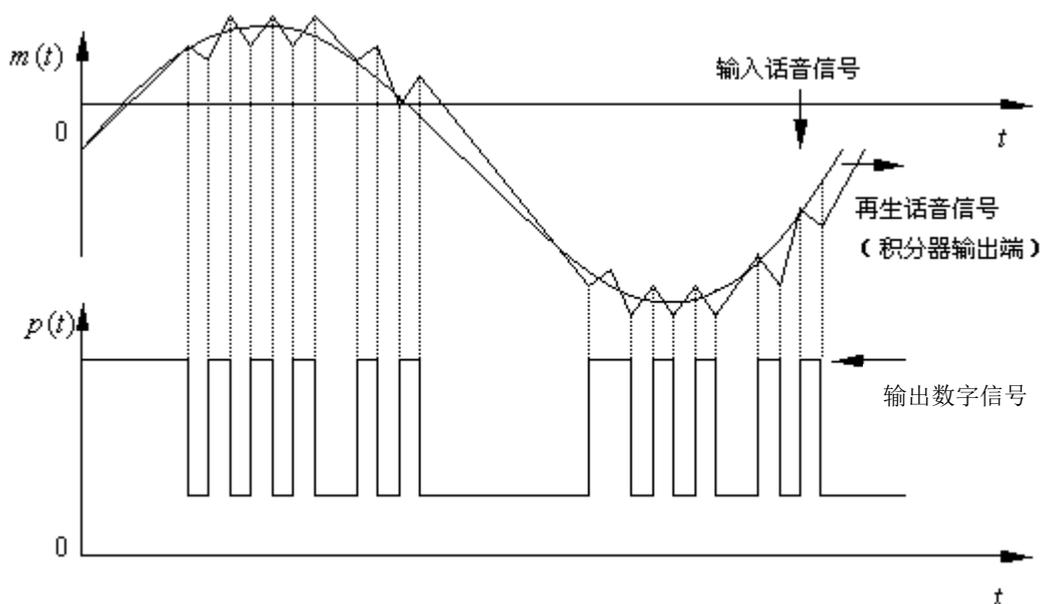


图 3-9 CVSD 编码器正常编码时的波形

在前面曾经提到过一个名词叫“音节”，其含义说明如下：我们在前面也讲到话音信号 $m(t)$ ，其实它是一种缓慢变化的信号，在话音信号中包含了多种频率成分，话音信号的幅度也是随机变化的。如果用话音频谱仪观察其话音信号，可以看到 300~3400Hz 的带宽内，除了各种频率分量的瞬间幅度变化外，还有一个随音量而变化的包络线。该包络线的频率约为 100Hz（即周期为 10ms），称为包络音节。包络音节远小于单字音节，所谓单字音节是语言中按元音来划分的音节。表 3-1 是几种语言单字音节统计值。从表中可清楚看出汉语的单字音节为 125ms，而汉语的包络音节约为 10ms 左右。

表 3-1

语种	音节速率	音节周期
汉语	8 个/秒	125ms
法语	6 个/秒	166ms
英语	3.7 个/秒	270ms
大洋洲语	0.8 个/秒	1250ms

需要进一步说明的是，话音信号大约需要 150~250ms 左右的时间才能被人耳感觉到。从表 3-1 来看，这大约是一个单字音节的数量级，从实际实验试听效果来看，按包络音节速率进行压扩，其效果是最好的，因为无论哪种语言，如果按包络音节调整信号幅度，按照人耳能够响应的速度来看，已经是相当自然的了。由此可见，音节压扩的量化阶距 δ 在单音频信号的一个周期甚至几个周期内的数值是不变的，只是随着信号在一个包络音节时间的斜率成比例地改变。

在接收端，在 CVSD 解码器的方框图中，也同样增加了自适应控制装置，其作用同发送端的编码器，它的反馈部分也完全同上述一样，正是这样，CVSD 编码器与解码器在电路结构上只有很小的差别，因此加上一些转换控制电路就可以使它们两者完全兼容，这正是如前所述，即可作编码器，又可做解码器。

四、实验步骤

任务一 ΔM 编码规则实验

概述 该任务是通过改变输入信号幅度，观测 ΔM 编译码输出波形，从而了解和验证 ΔM 增量调制编码规则。

1、模块关电，按表格所示进行连线。

源端口	目标端口	连线说明
信号源：CLK	模块 3：TH9(编码-时钟)	提供编码时钟
信号源：CLK	模块 3：TH15(译码-时钟)	提供译码时钟
信号源：A-OUT	模块 3：TH5(LPF-IN)	送入低通滤波器
模块 3：TH6(LPF-OUT)	模块 3：TH13(编码-编码输入)	提供编码信号
模块 3：TH14(编码-编码输出)	模块 3：TH19(译码-译码输入)	提供译码信号

2、模块开电，设置主控菜单，选择【主菜单】→【通信原理】→【 Δm 及 CVSD 编译码】→【 Δm 编码规则验证】。调节信号源 W1 使 A-OUT 的峰峰值为 1V。

3、此时系统初始状态为：模拟信号源为正弦波，幅度为 1V，频率为 400Hz；编码和译码时钟为 32KHz 方波。

4、实验操作及波形观测。

对比观测模块 3 的 TP4(信源延时)和 TH14(编码输出)，然后对比 TP4(信源延时)和 TP3(本地译码)。

任务二 量化噪声观测

概述 该任务是通过比较观测输入信号和 ΔM 编译码输出信号波形，记录量化噪声波形，从而了解 ΔM 编译码性能。

1、实验连线同任务一。

2、模块开电，设置主控菜单，选择【主菜单】→【 Δm 及 CVSD 编译码】→【 Δm 量化噪声观测(400Hz)】→【设置量阶 1000】。调节信号源 W1 使 A-OUT 的峰峰值为 1V。

3、此时系统初始状态为：模拟信号源为正弦波，幅度为 1V，频率为 400Hz；编码和译码时钟为 32KHz 方波。

4、实验操作及波形观测。

示波器的 CH1 测试“信源延时”，CH2 测试“本地译码”。利用示波器的“减法”功能，所观测到的波形即是量化噪声。记录量化噪声的波形。

任务三 不同量阶 ΔM 编译码的性能

概述：该任务是通过改变不同 ΔM 编码量阶，对比观测输入信号和 ΔM 编译码输出信号的波形，记录量化噪声，从而了解和分析不同量阶情况下 ΔM 编译码性能。

1、实验连线 and 菜单设置同任务二。

2、调节信号源 W1 使 A-OUT 的峰峰值为 3V。

3、此时系统初始状态为：模拟信号源为正弦波，幅度为 3V，频率为 400Hz；编码和译码时钟为 32KHz 方波。

4、实验操作及波形观测。

示波器的 CH1 测试“信源延时”，CH2 测试“本地译码”。利用示波器的“减法”功能，所观测到的波形即是量化噪声。记录量化噪声的波形。

(1) 选择“设置量阶 3000”，调节正弦波峰峰值为 1V，测量并记录量化噪声的波形。

(2) 保持“设置量阶 3000”，调节正弦波峰峰值为 3V，测量并记录量化噪声的波形。

(3) 选择“设置量阶 6000”，调节正弦波峰峰值为 1V，测量并记录量化噪声的波形。

(4) 保持“设置量阶 6000”，调节正弦波峰峰值为 3V，测量并记录量化噪声的波形。

思考：比较分析不同量阶，不同幅度情况下，量化噪声有什么不同。

任务四 ΔM 编译码语音传输系统

概述 该任务是通过改变不同 ΔM 编码量阶，直观感受音乐信号的输出效果，从而体会 ΔM 编译码语音传输系统的性能。

1、模块关电，按表格所示进行连线。

源端口	目标端口	连线说明
信号源：CLK	模块 3：TH9(编码-时钟)	提供编码时钟
信号源：CLK	模块 3：TH15(译码-时钟)	提供译码时钟
信号源：MUSIC	模块 3：TH5(LPF-IN)	送入低通滤波器

模块 3: TH6(LPF-OUT)	模块 3: TH13(编码-编码输入)	提供编码信号
模块 3: TH14(编码-编码输出)	模块 3: TH19(译码-译码输入)	提供译码信号
模块 3: TH20(译码-译码输出)	模块 21: TH12(音频输入)	送入扬声器

2、模块开电，设置主控菜单，选择【主菜单】→【通信原理】→【 Δ_m 及 CVSD 编译码】→【 Δ_M 语音信号传输】→【设置量阶 1000】。

3、此时系统初始状态为：编码输入信号为音乐信号。

4、实验操作及波形观测。

调节 21 号模块“音量”旋钮，使音乐输出效果最好。分别“设置量阶 3000”、“设置量阶 6000”，比较 3 种量阶情况下声音的效果。

任务五 CVSD 量阶观测

概述：该任务是通过改变输入信号的幅度，观测 CVSD 编码输出信号的量阶变化情况，了解 CVSD 量阶变化规则。

1、连线同**任务一**。

2、模块开电，设置主控菜单，选择【主菜单】→【通信原理】→【 Δ_m 及 CVSD 编译码】→【CVSD 量阶观测】。调节信号源 W1 使 A-OUT 的峰峰值为 1V。

3、此时系统初始状态为：模拟信号源为正弦波，幅度为 1V，频率为 400Hz。编码时钟频率为 32KHz。

4、实验操作及波形观测。

以“编码输入”为触发，观测“量阶”。调节“A-OUT”的幅度，观测量阶的变化。

任务六 CVSD 一致脉冲观测

概述 该任务是观测 CVSD 编码的一致性脉冲输出，了解 CVSD 一致性脉冲的形成机理。

1、连线参照**任务一**。

2、模块开电，设置主控菜单，选择【主菜单】→【通信原理】→【 Δ_m 及 CVSD 编译码】→【CVSD 一致脉冲观测】。调节信号源 W1 使 A-OUT 的峰峰值为 1V。

3、此时系统初始状态为：模拟信号源为正弦波，幅度为 1V，频率为 2KHz。编码时钟频率为 32KHz。

4、实验操作及波形观测。

以编码输出为触发，观测“一致脉冲”。

思考：在什么情况下会输出一致脉冲信号。

任务七 CVSD 量化噪声观测

概述：该任务是通过分别改变输入信号幅度和频率，观测并记录输入与输入之间的量化噪声，从而了解 CVSD 编译码的性能。

1、连线参照任务一。

2、模块开电，设置主控菜单，选择【主菜单】→【通信原理】→【 Δm 及 CVSD 编译码】→【CVSD 量化噪声观测(400Hz)】。调节信号源 W1 使 A-OUT 的峰峰值为 1V。

3、此时系统初始状态为：模拟信号源为正弦波，幅度为 1V，频率为 400Hz。编码时钟频率为 32KHz。

4、实验操作及波形观测。

(1) 调节正弦波峰峰值为 1V，测量并记录量化噪声的波形。

(2) 调节正弦波峰峰值为 3V，测量并记录量化噪声的波形。

(3) 在主控&信号源模块中设置 CVSD 量化噪声观测(2KHz)。

(4) 调节正弦波峰峰值为 1V，测量并记录量化噪声的波形。

(5) 调节正弦波峰峰值为 3V，测量并记录量化噪声的波形。

(6) 对比 Δm 在输入信号为 400Hz 及 2KHz 时的量化噪声，进行分析。

任务八 CVSD 语音传输系统

概述 该任务是通过调节输入音乐的音量大小，直观感受音乐信号经 CVSD 编译码后的输出效果，从而体会 CVSD 编译码语音传输系统的性能。

1、连线参照任务四。

2、模块开电，设置主控菜单，选择【主菜单】→【通信原理】→【 Δm 及 CVSD 编译码】→【CVSD 语音传输】。

3、此时系统初始状态为：模拟信号源为音乐。编码时钟频率为 32KHz。

4、实验操作及波形观测。



调节 21 号模块的“音量”，使音乐的效果最好。

对比 ΔM 语音传输的效果进行分析。

五、实验报告

- 1、思考，分析 ΔM 与 CVSD 编译码的区别。
- 2、根据实验测试记录，画出各测量点的波形图，并分析实验现象。

第二章 基带传输编译码技术

实验四 AMI 码型变换实验

一、实验目的

- 1、了解几种常用的数字基带信号的特征和作用。
- 2、掌握 AMI 码的编译规则。
- 3、了解滤波法位同步在的码变换过程中的作用。

二、实验器材

- | | |
|----------------------|-----|
| 1、主控&信号源、2号、8号、13号模块 | 各一块 |
| 2、双踪示波器 | 一台 |
| 3、连接线 | 若干 |

三、实验原理

1、AMI编译码实验原理框图

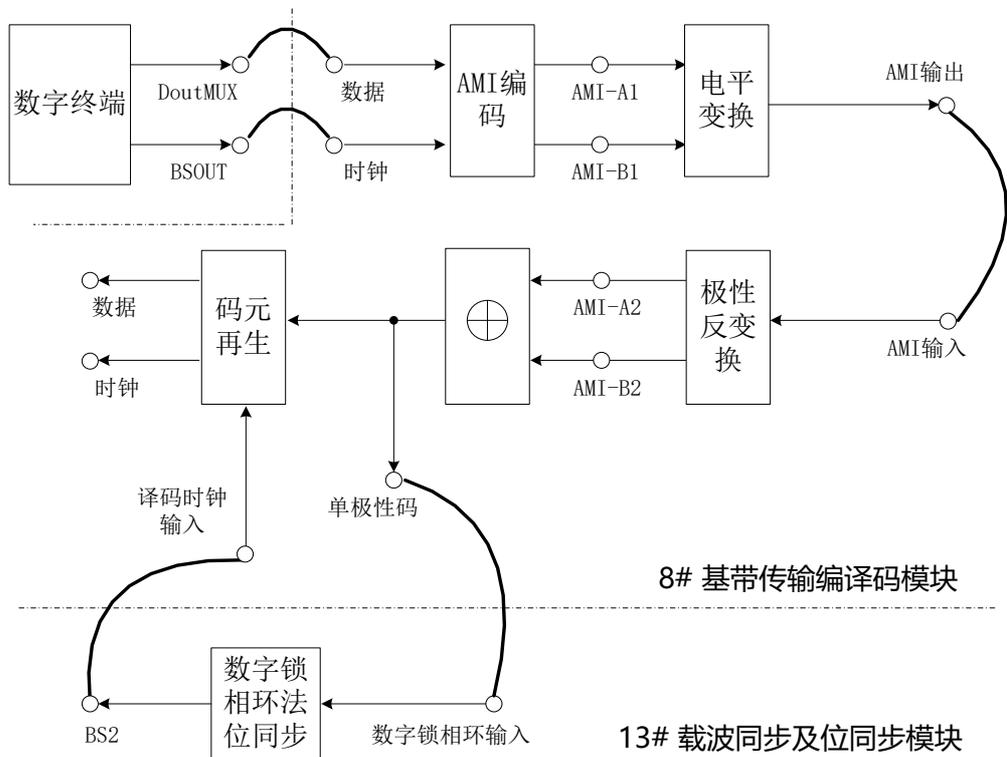


图 4-1 AMI 编译码实验原理框图

2、实验框图说明

AMI编码规则是遇到0输出0，遇到1则交替输出+1和-1。实验框图中编码过程是将信号源经程序处理后，得到AMI-A1和AMI-B1两路信号，再通过电平转换电路进行变换，从而得到AMI编码波形。

AMI译码只需将所有的±1变为1，0变为0即可。实验框图中译码过程是将AMI码信号送入到电平逆变换电路，再通过译码处理，得到原始码元。

3、AMI编码原理

AMI 码的编码规则是：将信息码的“1”（传号）交替地变换为“+1”和“-1”，而“0”（空号）保持不变。

消息码：	1	0	0	1	0
AMI	+1	0	0	-1	0
或	-1	0	0	+1	0

AMI 码可看成单极性波形的变形，即“0”仍对应零电平，而“1”交替对应正、负电平。

AMI码的优点：没有直流成分，且高、低频分量少，能量集中在频率为1/2码速处；编解码电路简单，且可利用传号极性交替这一规律观察误码情况。

AMI码的缺点：当原信码出现长连“0”串时，信号的电平长时间不跳变，造成提取定时信号的困难。解决连“0”问题的有效方法之一是采用HDB3码。

四、实验步骤

任务一 AMI 编译码（归零码实验）

概述：本任务通过选择不同的数字信源，分别观测编码输入及时钟，译码输出及时钟，观察编译码延时以及验证 AMI 编译码规则。

1、模块关电，按表格所示进行连线。

源端口	目的端口	连线说明
信号源：PN	模块 8：TH3(编码输入-数据)	基带信号输入
信号源：CLK	模块 8：TH4(编码输入-时钟)	提供编码位时钟
模块 8：TH11(AMI 编码输出)	模块 8：TH2(AMI 译码输入)	将数据送入译码模块

模块 8: TH5(单极性码)	模块 13: TH7(数字锁相环输入)	数字锁相环位同步提取
模块 13: TH5(BS2)	模块 8: TH9(译码时钟输入)	提供译码位时钟

2、模块开电，设置主控菜单，选择【主菜单】→【通信原理】→【AMI 编译码】→【归零码实验】。将模块 13 的开关 S3 分频设置拨为 0011，即提取 512K 同步时钟。

3、此时系统初始状态为：编码输入信号为 256K 的 PN 序列。

4、实验操作及波形观测。

(1) 用示波器分别观测编码输入的数据 TH3 和编码输出的数据 TH11(AMI 输出)，观察记录波形，有数字示波器的可以观测编码输出信号频谱，验证 AMI 编码规则。

注：观察时注意码元的对应位置。

(2) 保持示波器测量编码输入数据 TH3 的通道不变，另一通道测量中间测试点 TP5 (AMI-A1)，观察基带码元的奇数位的变换波形。

(3) 保持示波器测量编码输入数据 TH3 的通道不变，另一通道测量中间测试点 TP6 (AMI-B1)，观察基带码元的偶数位的变换波形。

(4) 用示波器分别观测模块 8 的 TP5 (AMI-A1)和 TP6(AMI-B1)，可从频域角度观察信号所含 256KHz 频谱分量情况；或用示波器减法功能观察 AMI-A1 与 AMI-B1 相减后的波形情况，并与 AMI 编码输出波形相比较。

(5) 用示波器对比观测编码输入的数据和译码输出的数据，观察记录 AMI 译码波形与输入信号波形。

思考：译码过后的信号波形与输入信号波形相比延时多少？

(6) 用示波器分别观测 TP9(AMI-A2)和 TP11(AMI-B2)，从时域或频域角度了解 AMI 码经电平变换后的波形情况。

(7) 用示波器分别观测模块 8 的 TH2(AMI 输入)和 TH5(单极性码)，从频域角度观测双极性码和单极性码的 256KHz 频谱分量情况。

(8) 用示波器分别观测编码输入的时钟和译码输出的时钟，观察比较恢复出的位时钟波形与原始位时钟信号的波形。

任务二 AMI 编译码（非归零码实验）

概述：本任务通过观测 AMI 非归零码编译码相关测试点，了解 AMI 编译码规则。

1、保持任务一的连线不变。

2、模块开电，设置主控菜单，选择【主菜单】→【通信原理】→【AMI 编译码】→【非归零码实验】。将模块 13 的开关 S3 分频设置拨为 0100，即提取 256K 同步时钟。

3、此时系统初始状态为：编码输入信号为 256KHz 的 PN 序列。

4、实验操作及波形观测。参照任务一的 256KHz 归零码任务的步骤，进行相关测试。

任务三 AMI 码对连 0 信号的编码、直流分量以及时钟信号提取观测

概述：本任务通过设置和改变输入信号的码型，观测 AMI 归零码编码输出信号中对长连 0 码信号的编码、含有的直流分量变化以及时钟信号提取情况，进一步了解 AMI 码的特性。

1、模块关电，按表格所示进行连线。

源端口	目的端口	连线说明
模块 2: DoutMUX	模块 8: TH3(编码输入-数据)	基带信号输入
模块 2: BSOUT	模块 8: TH4(编码输入-时钟)	提供编码位时钟
模块 8: TH11(AMI 编码输出)	模块 8: TH2(AMI 译码输入)	将数据送入译码模块
模块 8: TH5(单极性码)	模块 13: TH7(数字锁相环输入)	数字锁相环位同步提取
模块 13: TH5(BS2)	模块 8: TH9(译码时钟输入)	提供译码位时钟

2、模块开电，设置主控菜单，选择【主菜单】→【通信原理】→【AMI 编译码】→【归零码实验】。将模块 13 的开关 S3 分频设置拨为 0011，即提取 512K 同步时钟。将模块 2 的开关 S1、S2、S3、S4 全部置为 11110000，使 DoutMUX 输出码型中含有连 4 个 0 的码型状态。（或自行设置其他码值也可。）

3、此时系统初始状态为：编码输入信号为 256K 的 32 位拨码信号。

4、实验操作及波形观测。

(1) 观察含有长连 0 信号的 AMI 编码波形。用示波器观测模块 8 的 TH3(编码输入-数据)和 TH11(AMI 编码输出)，观察信号中出现长连 0 时的波形变化情况。

注：观察时注意码元的对应位置。

(2) 观察 AMI 编码信号中是否含有直流分量。将模块 2 的开关 S1、S2、S3、S4 拨为

00000000 00000000 00000000 00000011，用示波器分别观测编码输入数据和编码输出数据，编码输入时钟和译码输出时钟，调节示波器，将信号耦合状况置为交流，观察记录波形。保持连线，拨码开关由 0 到 1 逐位拨起，直到模块 2 的拨动开关置为 00111111 11111111 11111111 11111111，观察拨码过程中编码输入数据和编码输出数据波形的变化情况。

(3) 观察 AMI 编码信号所含时钟频谱分量。将模块 2 的开关 S1、S2、S3、S4 全部置 0，用示波器先分别观测编码输入数据和编码输出数据，再分别观测编码输入时钟和译码输出时钟，观察记录波形。再将模块 2 的开关 S1、S2、S3、S4 全部置 1，观察记录波形。

思考：数据和时钟是否能恢复？注：有数字示波器的可以观测编码输出信号 FFT 频谱。

五、实验报告

- 1、分析实验电路的工作原理，叙述其工作过程。
- 2、根据实验测试记录，画出各测量点的波形图，并分析实验现象。

实验五 HDB3 码型变换实验

一、实验目的

- 1、了解几种常用的数字基带信号的特征和作用。
- 2、掌握 HDB3 码的编译规则。
- 3、了解滤波法位同步在的码变换过程中的作用。

二、实验器材

- | | |
|-----------------------|-----|
| 1、 主控&信号源、2号、8号、13号模块 | 各一块 |
| 2、 双踪示波器 | 一台 |
| 3、 连接线 | 若干 |

三、实验原理

1、HDB3编译码实验原理框图

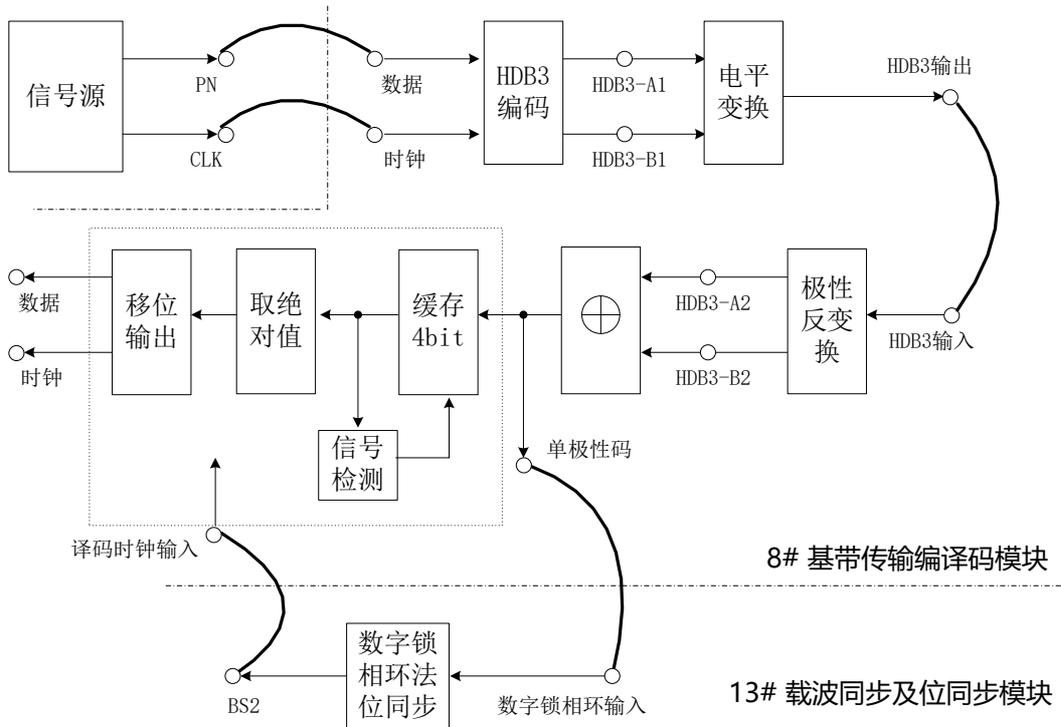


图 5-1 HDB3 编译码实验原理框图

2、实验框图说明

我们知道AMI编码规则是遇到0输出0，遇到1则交替输出+1和-1。而HDB3编码由于需要插

入破坏位B，因此，在编码时需要缓存3bit的数据。当没有连续4个连0时与AMI编码规则相同。当4个连0时最后一个0变为传号A，其极性与前一个A的极性相反。若该传号与前一个1的极性不同，则还要将这4个连0的第一个0变为B，B的极性与A相同。实验框图中编码过程是将信号源经程序处理后，得到HDB3-A1和HDB3-B1两路信号，再通过电平转换电路进行变换，从而得到HDB3编码波形。

同样AMI译码只需将所有的±1变为1，0变为0即可。而HDB3译码只需找到传号A，将传号和传号前3个数都清0即可。传号A的识别方法是：该符号的极性与前一极性相同，该符号即为传号。实验框图中译码过程是将HDB3码信号送入到电平逆变换电路，再通过译码处理，得到原始码元。

3、HDB3编码原理

HDB3码是AMI码的一种改进型，改进目的是为了保持AMI码的优点而克服其缺点，使连“0”个数不超过三个。其编码规则如下：将4个连“0”信息码用取代节“000V”或“B00V”代替，当两个相邻“V”码中间有奇数个信息“1”码时取代节为“000V”；有偶数个信息“1”码（包括0个）时取代节为“B00V”，其它的信息“0”码仍为“0”码，这样，信息码的“1”码变为带有符号的“1”码，即“+1”或“-1”。

HDB3 码编码规则表

前面“1”码的极性	上次取代后“1”码的个数	
	奇数个“1”	偶数个“1”（包括0个）
—	000V ₋	B ₊ 00V ₊
+	000V ₊	B ₋ 00V ₋

消息码： 1 0 0 0 0 1 0 0 0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1

HDB3： +1 0 0 0 +V -1 0 0 0 -V +1 -1 +B 0 0 +V -B 0 0 -V +1 -1

或： -1 0 0 0 -V +1 0 0 0 +V -1 +1 -B 0 0 -V +B 0 0 +V -1 +1

其中：±V脉冲和±B脉冲波形相同，用V或B符号表示的目的是为了示意改非“0”码是由原信码的“0”变换而来的。

HDB3码除了具有AMI码的优点外，同时还将连“0”码限制在3个以内，使得接收时能保证定时信息的提取。

四、实验步骤

任务一 HDB3 编译码 (256KHz 归零码实验)

概述: 本任务通过选择不同的数字信源, 分别观测编码输入及时钟, 译码输出及时钟, 观察编译码延时以及验证 HDB3 编译码规则。

1、模块关电, 按表格所示进行连线。

源端口	目的端口	连线说明
信号源: PN	模块 8: TH3(编码输入-数据)	基带信号输入
信号源: CLK	模块 8: TH4(编码输入-时钟)	提供编码位时钟
模块 8: TH1(HDB3 输出)	模块 8: TH7(HDB3 输入)	将数据送入译码模块
模块 8: TH5(单极性码)	模块 13: TH7(数字锁相环输入)	数字锁相环位同步提取
模块 13: TH5(BS2)	模块 8: TH9(译码时钟输入)	提供译码位时钟

2、模块开电, 设置主控菜单, 选择【主菜单】→【通信原理】→【HDB3 编译码】→【归零码实验】。将模块 13 的开关 S3 分频设置拨为 0011, 即提取 512K 同步时钟。

3、此时系统初始状态为: 编码输入信号为 256K 的 PN 序列。

4、实验操作及波形观测。

(1) 用示波器分别观测编码输入的数据 TH3 和编码输出的数据 TH1(HDB3 输出), 观察记录波形, 有数字示波器的可以观测编码输出信号频谱, 验证 HDB3 编码规则。

注: 观察时注意码元的对应位置。

(2) 保持示波器测量编码输入数据 TH3 的通道不变, 另一通道测量中间测试点 TP2 (HDB3-A1), 观察基带码元的奇数位的变换波形。

(3) 保持示波器测量编码输入数据 TH3 的通道不变, 另一通道测量中间测试点 TP3 (HDB3-B1), 观察基带码元的偶数位的变换波形。

(4) 用示波器分别观测模块 8 的 TP2(HDB3-A1)和 TP3(HDB3-B1), 可从频域角度观察信号所含 256KHz 频谱分量情况; 或用示波器减法功能观察 HDB3-A1 与 HDB3-B1 相减后的波形情况, 并与 HDB3 编码输出波形相比较。

(5) 用示波器对比观测编码输入的数据和译码输出的数据, 观察记录 HDB3 译码波形与

输入信号波形。

思考：译码过后的信号波形与输入信号波形相比延时多少？

(6) 用示波器分别观测 TP4(HDB3-A2)和 TP8(HDB3-B2)，从时域或频域角度了解 HDB3 码经电平变换后的波形情况。

(7) 用示波器分别观测模块 8 的 TH7(HDB3 输入)和 TH5(单极性码)，从频域角度观测双极性码和单极性码的 256KHz 频谱分量情况。

(8) 用示波器分别观测编码输入的时钟和译码输出的时钟，观察比较恢复出的位时钟波形与原始位时钟信号的波形。

任务二 HDB3 编译码（256KHz 非归零码实验）

概述：本任务通过观测 HDB3 非归零码编译码相关测试点，了解 HDB3 编译码规则。

1、保持任务一的连线不变。

2、模块开电，设置主控菜单，选择【主菜单】→【通信原理】→【HDB3 编译码】→【非归零码实验】。将模块 13 的开关 S3 分频设置拨为 0100，即提取 256K 同步时钟。

3、此时系统初始状态为：编码输入信号为 256K 的 PN 序列。

4、实验操作及波形观测。参照前面的 256KHz 归零码任务的步骤，进行相关测试。

任务三 HDB3 码对连 0 信号的编码、直流分量以及时钟信号提取观测

概述：本任务通过设置和改变输入信号的码型，观测 HDB3 归零码编码输出信号中对长连 0 码信号的编码、含有的直流分量变化以及时钟信号提取情况，进一步了解 HDB3 码特性。

1、模块关电，按表格所示进行连线。

源端口	目的端口	连线说明
模块 2: DoutMUX	模块 8: TH3(编码输入-数据)	基带信号输入
模块 2: BSOUT	模块 8: TH4(编码输入-时钟)	提供编码位时钟
模块 8: TH1(HDB3 输出)	模块 8: TH7(HDB3 输入)	将数据送入译码模块
模块 8: TH5(单极性码)	模块 13: TH7(数字锁相环输入)	数字锁相环位同步提取
模块 13: TH5(BS2)	模块 8: TH9(译码时钟输入)	提供译码位时钟

2、模块开电，设置主控菜单，选择【主菜单】→【通信原理】→【HDB3 编译码】→

【归零码实验】。将模块 13 的开关 S3 分频设置拨为 0011，即提取 512K 同步时钟。将模块 2 的开关 S1、S2、S3、S4 全部置为 11110000，使 DoutMUX 输出码型中含有连 4 个 0 的码型状态。（或自行设置其他码值也可。）

3、此时系统初始状态为：编码输入信号为 256KHz 的 32 位拨码信号。

4、实验操作及波形观测。

(1) 观察含有长连 0 信号的 HDB3 编码波形。用示波器观测模块 8 的 TH3(编码输入-数据)和 TH1(HDB3 输出)，观察信号中出现长连 0 时的波形变化情况。

注：观察时注意码元的对应位置。

思考：HDB3 编码与 AMI 编码波形有什么差别？

(2) 观察 HDB3 编码信号中是否含有直流分量。将模块 2 的开关 S1、S2、S3、S4 拨为 00000000 00000000 00000000 00000011，用示波器分别观测编码输入数据和编码输出数据，编码输入时钟和译码输出时钟，调节示波器，将信号耦合状况置为交流，观察记录波形。保持连线，拨码开关由 0 到 1 逐位拨起，直到模块 2 的拨动开关置为 00111111 11111111 11111111 11111111，观察拨码过程中编码输入数据和编码输出数据波形的变化情况。

思考：HDB3 码是否存在直流分量？

(3) 观察 HDB3 编码信号所含时钟频谱分量。将模块 2 的开关 S1、S2、S3、S4 全部置 0，用示波器先分别观测编码输入数据和编码输出数据，再分别观测编码输入时钟和译码输出时钟，观察记录波形。再将模块 2 的开关 S1、S2、S3、S4 全部置 1，观察记录波形。

思考：数据和时钟是否能恢复？注：有数字示波器的可以观测编码输出信号 FFT 频谱。在恢复时钟方面 HDB3 码与 AMI 码比较有哪一个更好？比较不同输入信号时两种码型的时钟恢复情况并联系其编码信号频谱分析原因。

五、实验报告

1、分析实验电路的工作原理，叙述其工作过程。

2、根据实验测试记录，画出各测量点的波形图，并分析实验现象。

实验六 CMI/BPH 码型变换实验

一、实验目的

- 1、了解 CMI 码、BPH 码的编码规则。
- 2、观察输入全 0 码或全 1 码时各编码输出码型，了解是否含有直流分量。
- 3、观察 CMI 码、BPH 码经过码型反变换后的译码输出波形及译码输出后的时间延迟。
- 4、测试 CMI 码和 BPH 码的检错功能。
- 5、BPH 码的译码同步观测。

二、实验器材

- | | |
|----------------------|-----|
| 1、主控&信号源、2号、8号、13号模块 | 各一块 |
| 2、双踪示波器 | 一台 |
| 3、连接线 | 若干 |

三、实验原理

1、实验原理框图

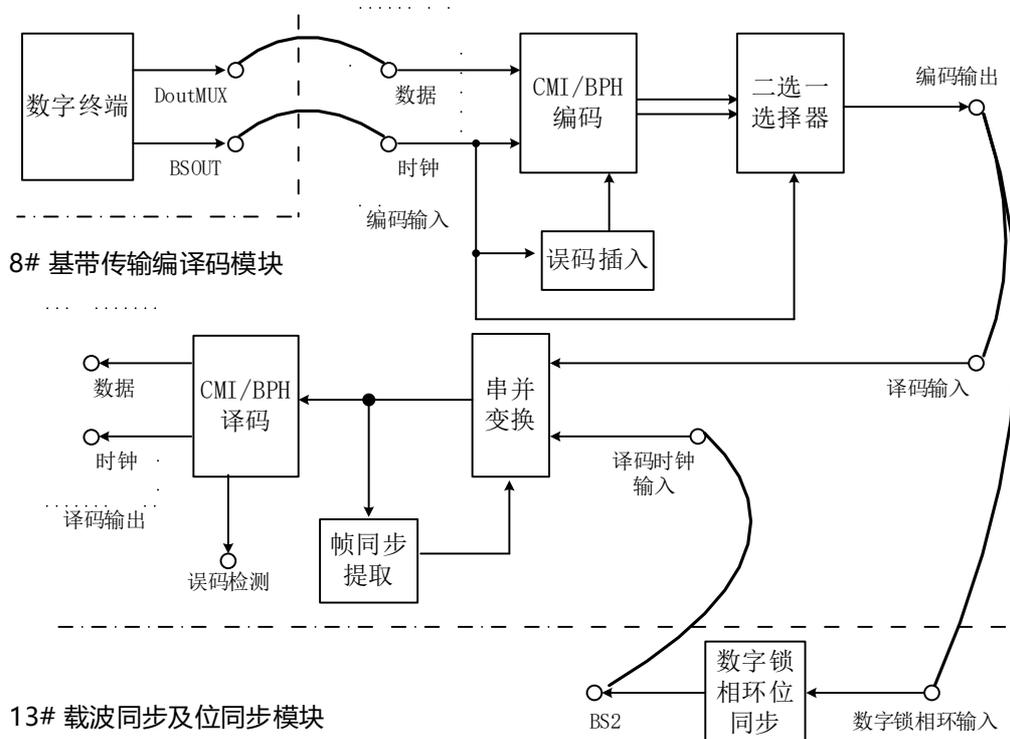


图 6-1 CMI/BPH 编译码实验原理框图

2、实验框图说明

CMI 和 BPH 编译码实验框图基本一致。CMI 编码规则是遇到 0 编码 01，遇到 1 则交替编码 11 和 00。由于 1bit 编码后变成 2bit，输出时用时钟的 1 输出高 bit，用时钟的 0 输出低 bit，也就是选择器的功能。BPH 编码编码规则不同，是 0 编码为 01，1 编码为 10，后面的选择器输出与 CMI 编码一致。CMI、BPH 译码首先也是需要找到分组的信号，才能正确译码。CMI 码只要出现下降沿了，就表示分组的开始，BPH 译码只要找到连 0 或连 1，就表示分组的开始。找到分组信号后，对信号分组译码就可以得到译码的数据了。

3、编码原理

CMI 码编码规则是：信息码中的“1”码交替用“11”和“00”表示，“0”码用“01”表示。

消息码：	1	1	0	1	0	0	1
CMI	11	00	01	11	01	01	00
或	00	11	01	00	01	01	11

CMI 码含有丰富的位定时信息，由于 10 为禁用码组，不会出现三个以上的连码，这个规律可用来宏观检错。

BPH 码是对每个二进制代码分别用两个具有两个不同相位的二进制新码去取代的码，或者可以理解为用一个周期的正负对称方波表示“1”码，用该方波的反相来表示“0”码。

消息码：	1	1	0	0	1	0	1
BPH：	10	10	01	01	10	01	10

BPH 码的特点是只使用两个电平，每个码元间隔的中心点都存在电平跳变，含有丰富的位定时信息，且没有直流分量。缺点是占用带宽加倍，使频带利用率降低。

四、实验步骤

任务一 CMI 码型变换实验

概述：本任务通过改变输入数字信号的码型，分别观测编码输入输出波形与译码输出波形，测量 CMI 编译码延时，验证 CMI 编译码原理并验证 CMI 码是否存在直流分量。

1、模块关电，按表格所示进行连线。

源端口	目的端口	连线说明
信号源: PN	模块 8: TH3(编码输入-数据)	基带传输信号输入
信号源: CLK	模块 8: TH4(编码输入-时钟)	提供编码位时钟
模块 8: TH6(编码输出)	模块 13: TH7(数字锁相环输入)	数字锁相环法位同步提取输入
模块 13: TH5(BS2)	模块 8: TH9(译码时钟输入)	提供译码位时钟
模块 8: TH6(编码输出)	模块 8: TH10(译码输入)	将数据送入译码模块

2、模块开电，设置主控菜单，选择【主菜单】→【通信原理】→【CMI 码】→【无误码】。13 号模块的开关 S3 置为 0011，即提取 512K 同步时钟。

3、此时系统初始状态为：PN 为 256K。

4、实验操作及波形观测。

(1) 观测编码输入的数据和编码输出的数据：用示波器分别观测和记录 TH3^{8#}和 TH6^{8#}的波形，验证 CMI 编码规则。

(2) 观测编码输入的数据和译码输出的数据：用示波器分别观测和记录 TH3^{8#}和 TH13^{8#}的波形，测量 CMI 码的时延。

(3) 断开电源，更改连线及设置。

源端口	目的端口	连线说明
模块 2: DoutMUX	模块 8: TH3(编码输入-数据)	码基带传输信号输入
模块 2: BSOUT	模块 8: TH4(编码输入-时钟)	提供编码位时钟
模块 8: TH6(编码输出)	模块 13: TH7(数字锁相环输入)	数字锁相环法位同步提取
模块 13: TH5(BS2)	模块 8: TH9(译码时钟输入)	提供译码位时钟
模块 8: TH6(编码输出)	模块 8: TH10(译码输入)	将数据送入译码模块

模块开电，设置主控菜单，选择【主菜单】→【通信原理】→【CMI 码】→【无误码】。将模块 13 的开关 S3 置为 0011 即提取 512K 同步时钟。

将模块 2 的开关置为 00000000 00000000 00000000 00000011，用示波器分别观测编码输入的数据和编码输出的数据，调节示波器，将信号耦合状况置为交流，观察记录波形。保持连线，拨码开关由 0 到 1 逐位拨起，直到模块 2 的拨动开关置为 00111111 11111111 11111111

11111111，观察比较波形 0 和 1 示波器波形的变化情况。

思考：CMI 码是否存在直流分量？

(4) 验证 CMI 的误码检测功能：设置主控&信号源模块，在 CMI 实验中插入误码，用示波器对比观测误码插入与误码检测。

思考：CMI 码是否可以纠错？

任务二 曼切斯特（BPH）码型变换实验

概述：本任务通过改变输入数字信号的码型，分别观测编码输入输出波形与译码输出波形，对比 CMI 编码，分析两种编码规则的异同，验证 BPH 编译码原理并验证 BPH 码是否存在直流分量。

- 1、模块关电，连线和开关 S3 的设置与任务一 CMI 码型变换实验相同。
- 2、模块开电，设置主控菜单，选择【主菜单】→【通信原理】→【BPH 码】→【无误码】。
- 3、此时系统初始状态为：PN 为 256K。
- 4、类似任务一 CMI 码型变换的操作步骤，进行 BPH 码编码规则观测和 BPH 码直流分量观测。

五、实验报告

- 1、分析实验电路的工作原理，叙述其工作过程。
- 2、根据实验测试记录，画出各测量点的波形图，并分析实验现象。
- 3、对实验中两种编码的直流分量观测结果如何？联系数字基带传输系统知识分析若含有编码中直流分量将会对通信系统造成什么影响？
- 4、比较两种编码的优劣。
- 5、写出完成本次实验后的心得体会以及对本次实验的改进建议。

第三章 基本数字调制技术

实验七 眼图观测实验

一、实验目的

- 1、了解和掌握眼图的形成过程和意义。
- 2、掌握通信系统中的眼图观测方法。
- 3、掌握用眼图来定性评价传输系统性能。

二、实验器材

- | | |
|----------------|-----|
| 1、 主控&信号源、9号模块 | 各一块 |
| 2、 双踪示波器 | 一台 |
| 3、 连接线 | 若干 |

三、实验原理

1、实验原理框图

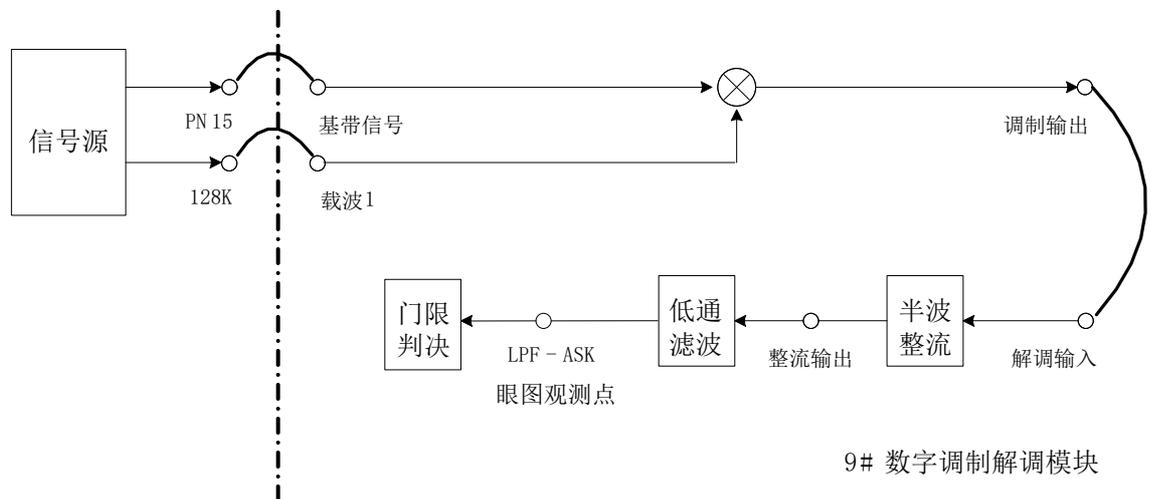


图7-1 眼图观测实验原理框图

2、实验框图说明

本实验是以数字信号调制解调传输系统为例，进行数字调制解调过程中的眼图观测实验。眼图观测实验原理框图所示，系统主要由信号源、模拟相乘器、半波整流器以及低通滤波器组成；信号源提供的数字信号和模拟载波信号直接相乘，已调信号经过半波整流器传输后，

再送入低通滤波器，通过示波器测试设备，以数字信号的同步位时钟为触发源，观测 LPF-ASK (TP5) 测试点的波形，即眼图。

3、眼图基本概念及实验观察方法

所谓眼图，是指通过示波器观察接收端的基带信号波形，从而估计和调整系统性能的一种方法。它是一系列数字信号在示波器上累积而显示的图形。眼图包含了丰富的信息，反映的是系统链路上传输的所有数字信号的整体特征。利用眼图可以观察出码间串扰和噪声的影响，分析眼图是衡量数字通信系统传输特性的简单且有效的方法。

● 被测系统的眼图观测方法

通常观测眼图的方法是，如下图所示，以数字序列的同步时钟为触发源，用示波器 YT 模式测量系统输出端，调节示波器水平扫描周期与接收码元的周期同步，则在屏幕中显示的即为眼图。

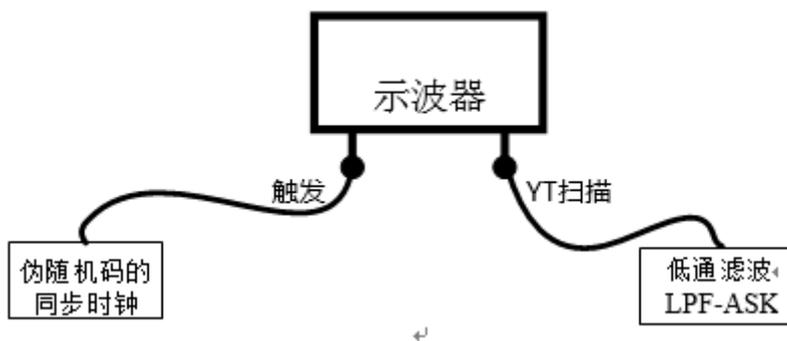
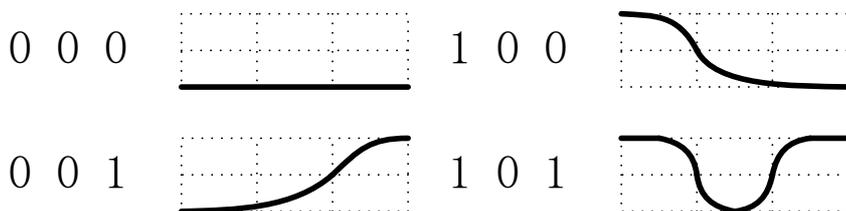


图 7-2 眼图测试方法框图

● 眼图的形成示意图

一个完整的眼图应该包含从“000”到“111”的所有状态组，且每个状态组发送的此时要尽量一致，否则有些信息将无法呈现在示波器屏幕上。

八种状态如下所示：



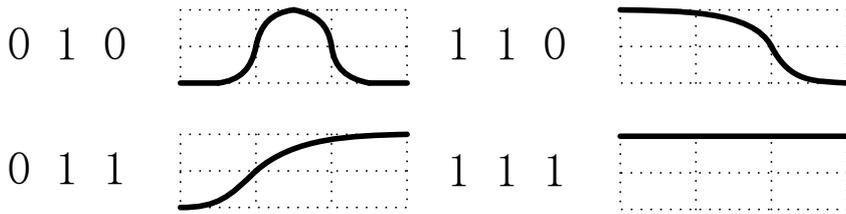


图 7-3 八种状态示意图

眼图合成示意图如下所示：

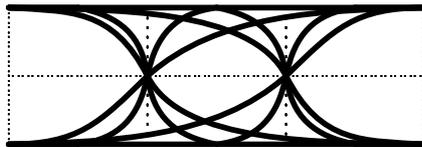


图 7-4 眼图合成示意图

一般在无串扰等影响情况下从示波器上观测到的眼图与理论分析得到的眼图大致接近。

● 眼图参数及系统性能

眼图的垂直张开度表示系统的抗噪声能力，水平张开度反映过门限失真量的大小。眼图的张开度受噪声和码间干扰的影响，当光收端机输出端信噪比很大时眼图的张开度主要受码间干扰的影响，因此观察眼图的张开度就可以估算出光收端机码间干扰的大小。

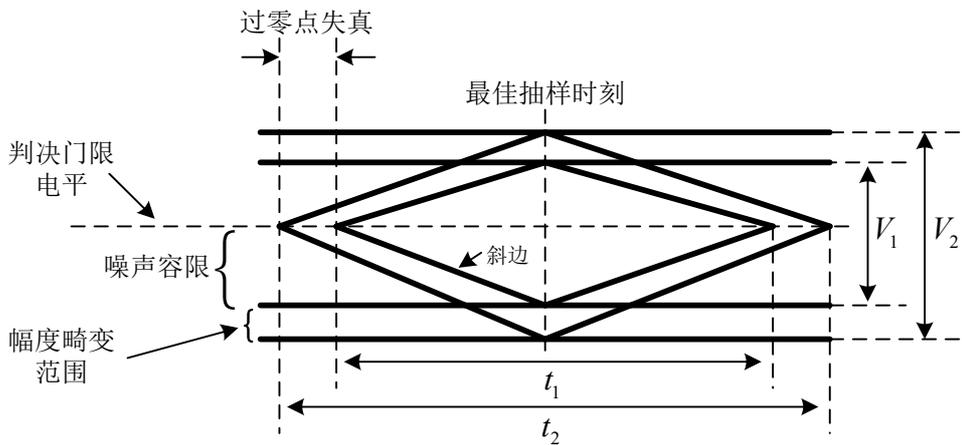


图 7-5 眼图模型

其中，垂直张开度 $E_0 = \frac{V_1}{V_2}$ ；水平张开度 $E_1 = \frac{t_1}{t_2}$ 。

从眼图中我们可以得到以下信息：

- (1) 最佳抽样时刻是“眼睛”张开最大的时刻。
- (2) 眼图斜边的斜率表示了定时误差灵敏度。斜率越大，对位定时误差越敏感。
- (3) 在抽样时刻上，眼图上下两分支阴影区的垂直高度，表示最大信号畸变。
- (4) 眼图中央的横轴位置应对应于判决门限电平。
- (5) 在抽样时刻上，眼图上下两阴影区的间隔距离的一半为噪声容限，若噪声瞬时值超过它就会出现错判。
- (6) 眼图倾斜分支与横轴相交的区域的大小，即过零点失真的变动范围；它对利用信号零交点的平均位置来提取定时信息的接收系统来说影响定时信息的提取。

四、实验步骤

任务一 眼图的波形观测

- 1、模块关电，按表格所示进行连线。

源端口	目的端口	连线说明
信号源: PN	模块 9: TH1(基带信号)	调制信号输入
信号源: 128KHz	模块 9: TH14(载波 1)	载波输入
模块 9: TH4(调制输出)	模块 9: TH7(解调输入)	解调信号输入

- 2、模块开电，设置主控菜单，选择【主菜单】→【通信原理】→【ASK 数字调制解调】。将 9 号模块的 S1 拨为 0000。

- 3、此时系统初始状态为：PN 序列输出频率 32KHz，调节 128KHz 载波信号峰峰值为 3V。

- 4、实验操作及波形观测。

(1) 分别观测调制输入和调制输出信号：以 9 号模块 TH1 为触发，用示波器同时观测 9 号模块 TH1 和 TH6，微调 ASK 解调端的判决门限调节旋钮 W1，使解调数据 TH6 恢复正常，建立起无误码环境的 ASK 传输系统。

(2) 眼图观测：CH1 通道观测主控模块（产生 PN 码）的同步时钟信号 CLK，CH2 通道观测 9 号模块的眼图输出点 LPF-ASK，为了观测到清晰完整的眼图信号，数字示波器建议做以下设置：触发源设置为 CH1，示波器的波形持续设置为开启（部分示波器可根据眼图效

果，自由设置持续时间为 2S、5S 或无限)，此时可以通过 CH2 通道观测眼图信号。

基于以上设置，如果还是无法观察到完整的眼图，可以选择主控模块【功能 1】按键，将 PN 码设置为 PN127，码速率为 32K。

任务二 眼图的定性分析

保持任务一的所有实验连线及设置不变。

1、结合眼图模型进行定性理解如下信息：

- (1) 最佳抽样时刻
- (2) 定时误差灵敏度
- (3) 最大信号畸变
- (4) 判决门限电平
- (5) 噪声容限
- (6) 过零点失真

任务三 眼图的形成

保持任务一的所有实验连线及设置不变。

1、观测基带数据的码型对眼图形成的影响：

(1) PN 码：选择主控模块【功能 1】按键，将 PN 码设置为 PN15 或者 PN127，结合实验原理部分眼图合成的的相关内容，对比这两种伪随机码型对眼图形成的影响。

(2) 自定义数据：

模块关电，按表格所示进行连线。

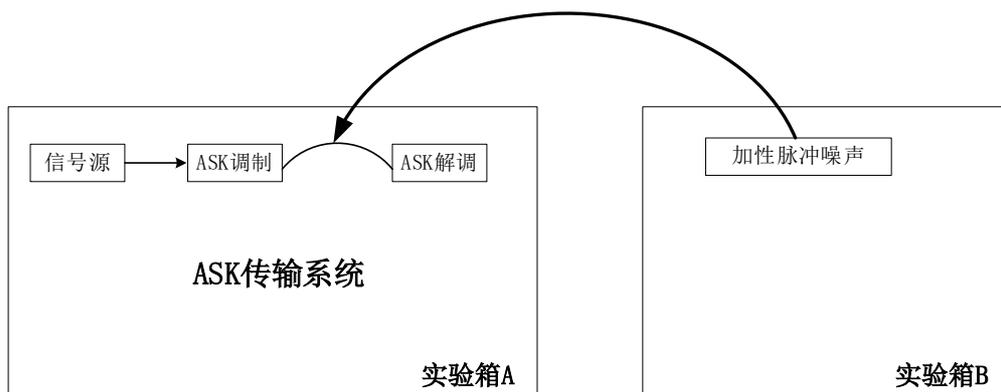
源端口	目的端口	连线说明
模块 2: TH1(DoutMUX)	模块 9: TH1(基带信号)	调制信号输入
信号源: 128KHz	模块 9: TH14(载波 1)	载波输入
模块 9: TH4(调制输出)	模块 9: TH7(解调输入)	解调信号输入

模块开电，设置主控菜单，选择【主菜单】→【模块设置】→【数字终端&时分多址】。将速率设置为 32K，即此时 2 号模块的数据速率为 32K，数据码型由本模块的 S1~S4 四个拨码开关决定（ON 位置为 1 码）。9 号模块的 S1 拨为 0000。

CH1 通道观测 2 号模块的时钟信号 TH9 (BSOUT), CH2 通道观测 9 号模块的眼图输出点 LPF-ASK, 结合实验原理部分眼图合成的的相关内容, 当设置 TH1(DoutMUX)输出不同码型时, 观测对眼图形成的影响。

任务四 眼图对信道噪声的定性评估

- 1、保持任务一的所有实验连线及设置不变。



2、箱 A 的状态 微调 ASK 解调端的判决门限调节旋钮 W1, 使解调数据 TH6 恢复正常, 建立起无误码环境的 ASK 传输系统。

3、箱 A 箱 B 的对接: 利用实验导线连接本实验箱 9 号模块的 TH4 (调制输出) 端口和另一台实验箱上主控模块的 A-OUT 端口, 以引入噪声源。利用导线连接两台实验箱上任意两个模块 (如连接箱 A 的 2 号模块的 GND 和箱 B 的 13 号模块的 GND) 的 GND 以实现两箱共地。

4、箱 B 模拟的噪声参数设置: 箱 B 模块开电, 设置主控菜单, 选择【信号源】→【方波】。将频率设置为 8K, 占空设置为 20%, 幅度设置为 1V, 模拟信道存在一个加性脉冲噪声。根据眼图的效果, 脉冲噪声的参数可自由调整。

5、噪声的定性评估: CH1 通道观测箱 A 的时钟信号 CLK, CH2 通道观测 9 号模块的眼图输出点 LPF-ASK, 根据眼图的质量, 定性分析噪声的大小。

五、实验报告

- 1、观测并记录眼图波形, 测量和计算眼图的特性参数, 评估系统性能。

实验八 ASK 调制及解调实验

一、实验目的

- 1、 掌握用键控法产生 ASK 信号的方法。
- 2、 掌握 ASK 非相干解调的原理。

二、实验器材

- | | |
|----------------|-----|
| 1、 主控&信号源、9号模块 | 各一块 |
| 2、 双踪示波器 | 一台 |
| 3、 连接线 | 若干 |

三、实验原理

1、实验原理框图

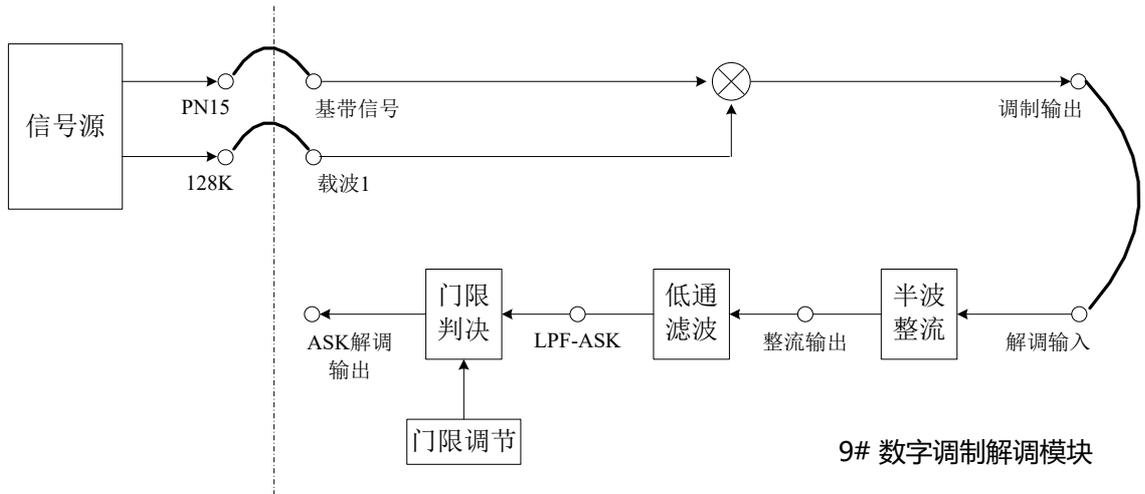


图8-1 ASK调制及解调实验原理框图

2、实验框图说明

ASK调制是将基带信号和载波直接相乘。已调信号经过半波整流、低通滤波后，通过门限判决电路解调出原始基带信号。

3、2ASK基本原理

振幅键控是利用载波的幅度变化来传递数字信息，而其频率和初始相位保持不变。

2ASK信号的一般表达式为：

$$e_{2ASK}(t) = s(t) \cos \omega_c t$$

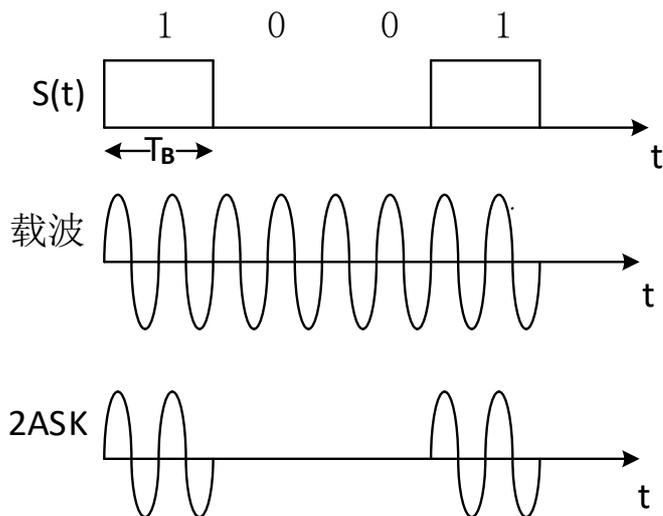


图8-2 2ASK信号的时域波形

四、实验步骤

任务一 ASK 调制

概述：ASK 调制实验中，ASK（振幅键控）载波幅度是随着基带信号的变化而变化。在本任务中，通过调节输入 PN 序列频率或者载波频率，对比观测基带信号波形与调制输出波形，观测每个码元对应的载波波形，验证 ASK 调制原理。

1、模块关电，按表格所示进行连线。

源端口	目的端口	连线说明
信号源：PN	模块 9：TH1(基带信号)	调制信号输入
信号源：128KHz	模块 9：TH14(载波 1)	载波输入
模块 9：TH4(调制输出)	模块 9：TH7(解调输入)	解调信号输入

2、模块开电，设置主控菜单，选择【主菜单】→【通信原理】→【ASK 数字调制解调】。将 9 号模块的 S1 拨为 0000。

3、此时系统初始状态为：PN 序列输出频率 32KHz，调节 128KHz 载波信号峰峰值为 3V。

4、实验操作及波形观测。

(1) 分别观测调制输入和调制输出信号：以 9 号模块 TH1 为触发，用示波器同时观测 9 号模块 TH1 和 TH4，验证 ASK 调制原理。

(2) 将 PN 序列输出频率改为 64KHz，观察载波个数是否发生变化。

任务二 ASK 解调

概述 实验中通过对比观测调制输入与解调输出，观察波形是否有延时现象，并验证 ASK 解调原理。观测解调输出的中间观测点，如：TP4（整流输出），TP5（LPF-ASK），深入理解 ASK 解调过程。

1、保持任务一中的连线及初始状态。

2、对比观测调制信号输入以及解调输出：以 9 号模块 TH1 为触发，用示波器同时观测 9 号模块 TH1 和 TH6，调节 W1 直至二者波形相同；再观测 TP4（整流输出）、TP5（LPF-ASK）两个中间过程测试点，验证 ASK 解调原理。

3、以信号源的 CLK 为触发，测 9 号模块 LPF-ASK，观测眼图。

五、实验报告

1、分析实验电路的工作原理，简述其工作过程；

2、分析 ASK 调制解调原理。

实验九 FSK 调制及解调实验

一、实验目的

- 1、 掌握用键控法产生 FSK 信号的方法。
- 2、 掌握 FSK 非相干解调的原理。

二、实验器材

- | | |
|----------------|-----|
| 1、 主控&信号源、9号模块 | 各一块 |
| 2、 双踪示波器 | 一台 |
| 3、 连接线 | 若干 |

三、实验原理

1、 实验原理框图

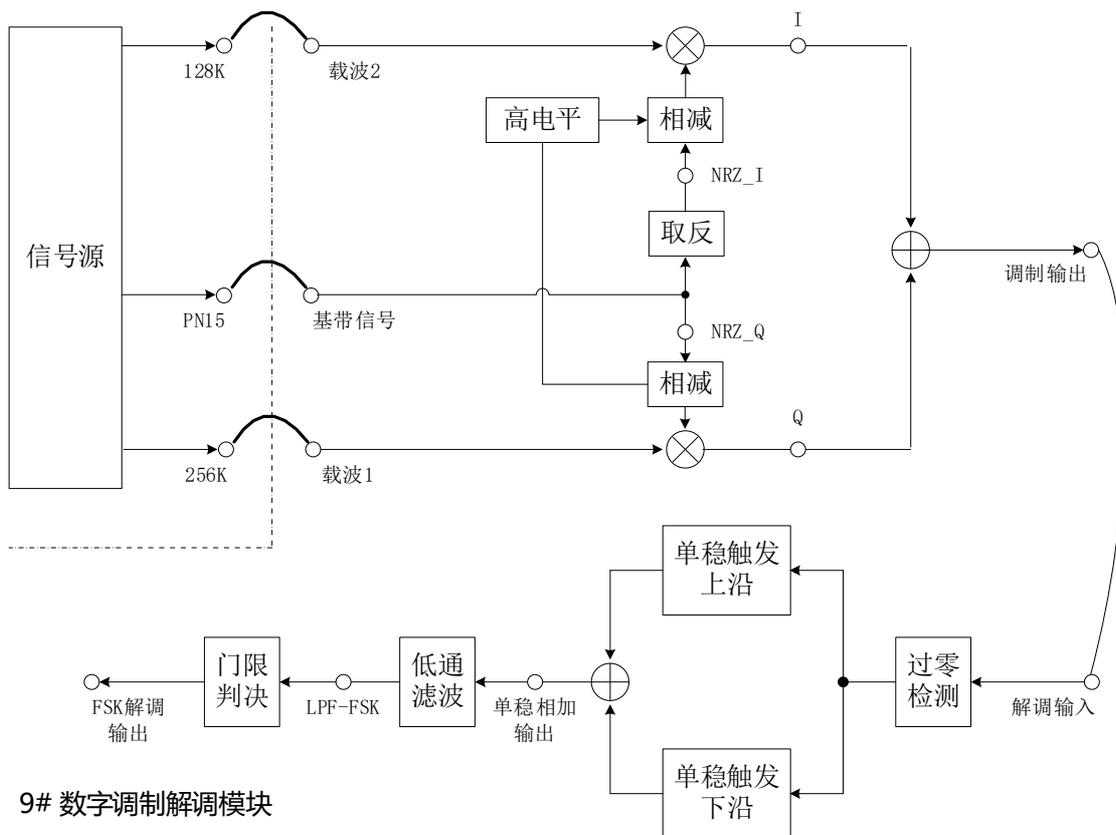


图 9-1 FSK 调制及解调实验原理框图

2、实验框图说明

基带信号与一路载波相乘得到1电平的ASK调制信号，基带信号取反后再与二路载波相乘得到0电平的ASK调制信号，由于电路要兼顾多种类型的调制实验需求，NRZ信号在与载波相乘前进行了和高电平信号的相减，原本的“1”变成了“0”，“0”变成了“-1”，然后再由乘法器输出I路和Q路信号。然后相加合成FSK调制输出；已调信号经过过零检测来识别信号中载波频率的变化情况，通过上、下沿单稳触发电路再相加输出，最后经过低通滤波和门限判决，得到原始基带信号。

3、2FSK基本原理

频移键控是利用载波的频率变化来传递数字信息。2FSK信号的表达式可简化为：

$$e_{2FSK}(t) = s_1(t) \cos \omega_1 t + s_2(t) \cos \omega_2 t$$

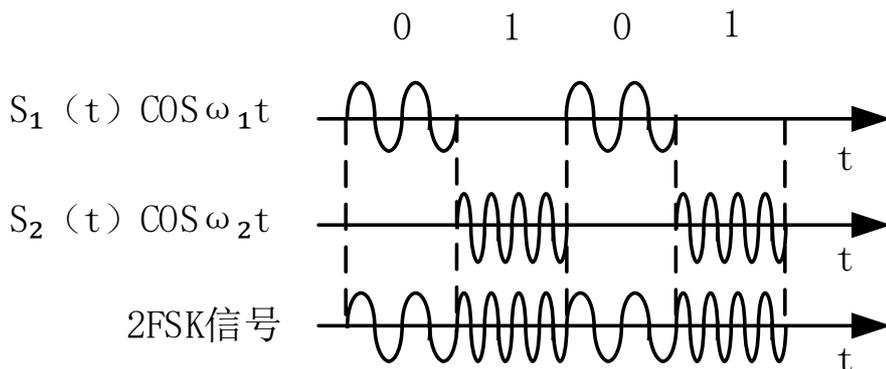


图9-2 2FSK信号的时域波形

四、实验步骤

任务一 FSK 调制

概述：FSK 调制实验中，信号是用载波频率的变化来表征被传信息的状态。本任务中，通过调节输入 PN 序列频率，对比观测基带信号波形与调制输出波形来验证 FSK 调制原理。

1、模块关电，按表格所示进行连线。

源端口	目的端口	连线说明
信号源：PN	模块 9：TH1(基带信号)	调制信号输入
信号源：256KHz(载波)	模块 9：TH14(载波 1)	载波 1 输入



信号源：128KHz(载波)	模块 9： TH3(载波 2)	载波 2 输入
模块 9： TH4(调制输出)	模块 9： TH7(解调输入)	解调信号输入

2、模块开电，设置主控菜单，选择【主菜单】→【通信原理】→【FSK 数字调制解调】。将 9 号模块的 S1 拨为 0000。调节信号源模块的 W2 使 128KHz 载波信号的峰峰值为 3V，调节 W3 使 256KHz 载波信号的峰峰值也为 3V。

3、此时系统初始状态为：PN 序列输出频率 32KHz。

4、实验操作及波形观测。

(1) 示波器 CH1 接 9 号模块 TH1 基带信号，CH2 接 9 号模块 TH4 调制输出，以 CH1 为触发对比观测 FSK 调制输入及输出，验证 FSK 调制原理。

(2) 将 PN 序列输出频率改为 64KHz，观察载波个数是否发生变化。

任务二 FSK 解调

概述：FSK 解调实验中，采用的是非相干解调法对 FSK 调制信号进行解调。实验中通过对比观测调制输入与解调输出，观察波形是否有延时现象，并验证 FSK 解调原理。观测解调输出的中间观测点，如 TP6（单稳相加输出），TP7（LPF-FSK），深入理解 FSK 解调过程。

1、保持任务一中的连线及初始状态。

2、对比观测调制信号输入以及解调输出：以 9 号模块 TH1 为触发，用示波器分别观测 9 号模块 TH1 和 TP6（单稳相加输出）、TP7（LPF-FSK）、TH8（FSK 解调输出），验证 FSK 解调原理。

3、以信号源的 CLK 为触发，测 9 号模块 LPF-FSK，观测眼图。

五、实验报告

1、分析实验电路的工作原理，简述其工作过程；

2、分析 FSK 调制解调原理。

实验十 BPSK 调制及解调实验

一、实验目的

- 1、掌握 BPSK 调制和解调的基本原理；
- 2、掌握 BPSK 数据传输过程，熟悉典型电路；
- 3、熟悉 BPSK 调制载波包络的变化；
- 4、掌握 BPSK 载波恢复特点与位定时恢复的基本方法；

二、实验器材

- | | |
|--------------------|-----|
| 1、 主控&信号源、9号、13号模块 | 各一块 |
| 2、 双踪示波器 | 一台 |
| 3、 连接线 | 若干 |

三、实验原理

1、BPSK调制解调（9号模块）实验原理框图

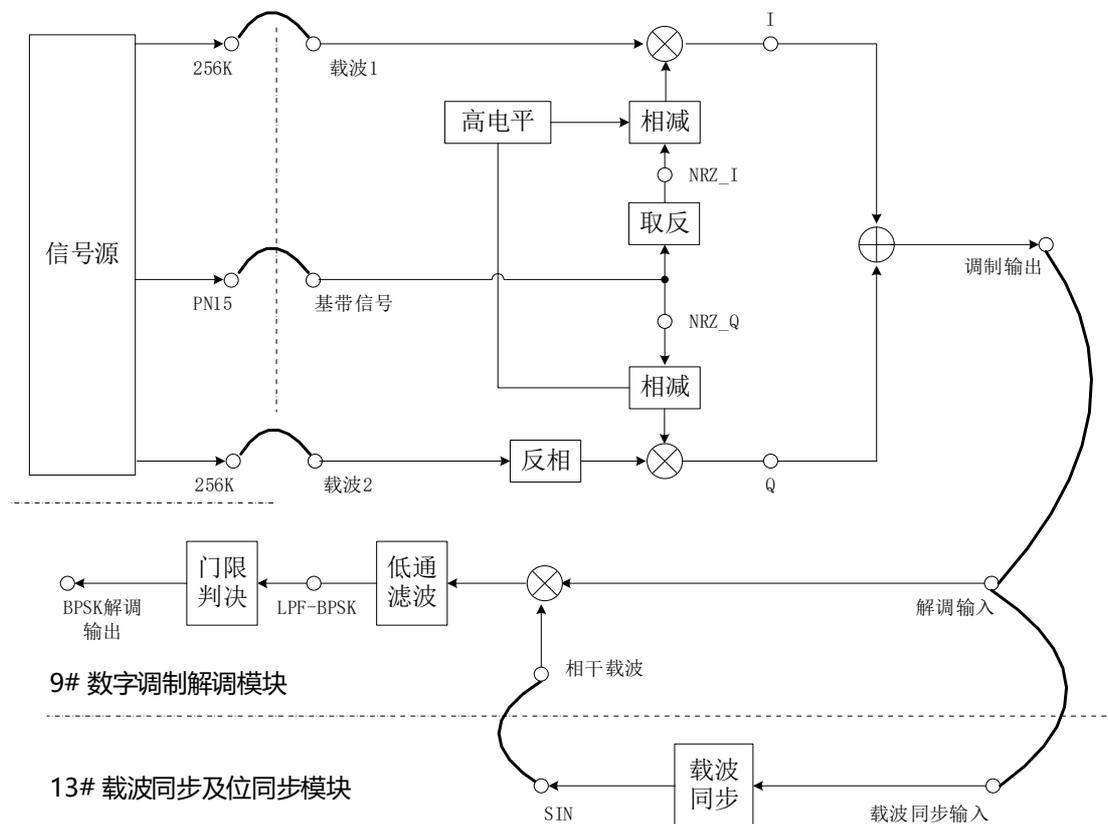


图10-1 PSK调制及解调实验原理框图

2、BPSK调制解调（9号模块）实验框图说明

基带信号的1电平和0电平信号分别与256KHz载波及256KHz反相载波相乘，由于电路要兼顾多种类型的调制实验需求，NRZ信号在与256K载波相乘前进行了和高电平信号的相减，原本的“1”变成了“0”，“0”变成了“-1”，然后再由乘法器输出I路和Q路信号。叠加后得到BPSK调制输出；已调信号送入到13模块载波提取单元得到同步载波；已调信号与相干载波相乘后，经过低通滤波和门限判决后，解调输出原始基带信号。

3、BPSK基本原理

相移键控是利用载波的相位变化来传递数字信息，而振幅和频率保持不变。

BPSK信号的时域表达式为：

$$e_{BPSK}(t) = A \cos(\omega_1 t + \varphi_n)$$

式中： φ_n 表示第n个符号的绝对相位，即

$$\varphi_n = \begin{cases} 0 & \text{发送“0”时} \\ \pi & \text{发送“1”时} \end{cases}$$

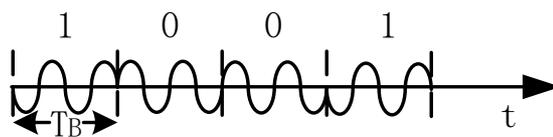


图10-2 BPSK信号的时域波形

四、实验步骤

任务一 BPSK 调制信号观测（9号模块）

概述：BPSK 调制实验中，信号是用相位相差 180° 的载波变换来表征被传递的信息。本任务通过对比观测基带信号波形与调制输出波形来验证 BPSK 调制原理。

1、模块关电，按表格所示进行连线。

源端口	目的端口	连线说明
-----	------	------

信号源: PN	模块 9: TH1(基带信号)	调制信号输入
信号源: 256KHz	模块 9: TH14(载波 1)	载波 1 输入
信号源: 256KHz	模块 9: TH3(载波 2)	载波 2 输入
模块 9: TH4(调制输出)	模块 13: TH2(载波同步输入)	载波同步模块信号输入
模块 13: TH1(SIN)	模块 9: TH10(相干载波输入)	用于解调的载波
模块 9: TH4(调制输出)	模块 9: TH7(解调输入)	解调信号输入

2、模块开电，设置主控菜单，选择【主菜单】→【通信原理】→【BPSK/DBPSK 数字调制解调】。将 9 号模块的 S1 拨为 0000，调节信号源模块 W3 使 256 KHz 载波信号峰峰值为 3V。

3、此时系统初始状态为：PN 序列输出频率 32KHz。

4、实验操作及波形观测。

(1) 以 9 号模块“NRZ-I”为触发，观测“Q”；

(2) 以 9 号模块“NRZ-Q”为触发，观测“I”。

(3) 以 9 号模块“基带信号”为触发，观测“调制输出”。

思考：分析以上观测的波形，分析与 ASK 有何关系？

任务二 BPSK 解调观测（9 号模块）

概述：本任务通过对比观测基带信号波形与解调输出波形，观察是否有延时现象，并且验证 BPSK 解调原理。观测解调中间观测点 TP8，深入理解 BPSK 解调原理。

1、保持任务一中的连线。将 9 号模块的 S1 拨为“0000”。

2、以 9 号模块的“基带信号”为触发，观测 13 号模块的“SIN”，调节 13 号模块的 W1 使“SIN”的波形稳定，即恢复出载波。

3、以 9 号模块的“基带信号”为触发观测“BPSK 解调输出”，多次单击 13 号模块的“复位”按键。观测“BPSK 解调输出”的变化。

4、以信号源的 CLK 为触发，测 9 号模块 LPF-BPSK，观测眼图。

思考：“BPSK 解调输出”是否存在相位模糊的情况？为什么会有相位模糊的情况？



五、实验报告

- 1、分析实验电路的工作原理，简述其工作过程；
- 2、分析 BPSK 调制解调原理。

实验十一 DBPSK 调制及解调实验

一、实验目的

- 1、 掌握 DBPSK 调制和解调的基本原理；
- 2、 掌握 DBPSK 数据传输过程，熟悉典型电路；
- 3、 熟悉 DBPSK 调制载波包络的变化；

二、实验器材

- | | |
|----------------------|-----|
| 1、 主控&信号源、9 号、13 号模块 | 各一块 |
| 2、 双踪示波器 | 一台 |
| 3、 连接线 | 若干 |

三、实验原理

- 1、 DBPSK 调制解调（9号模块）实验原理框图

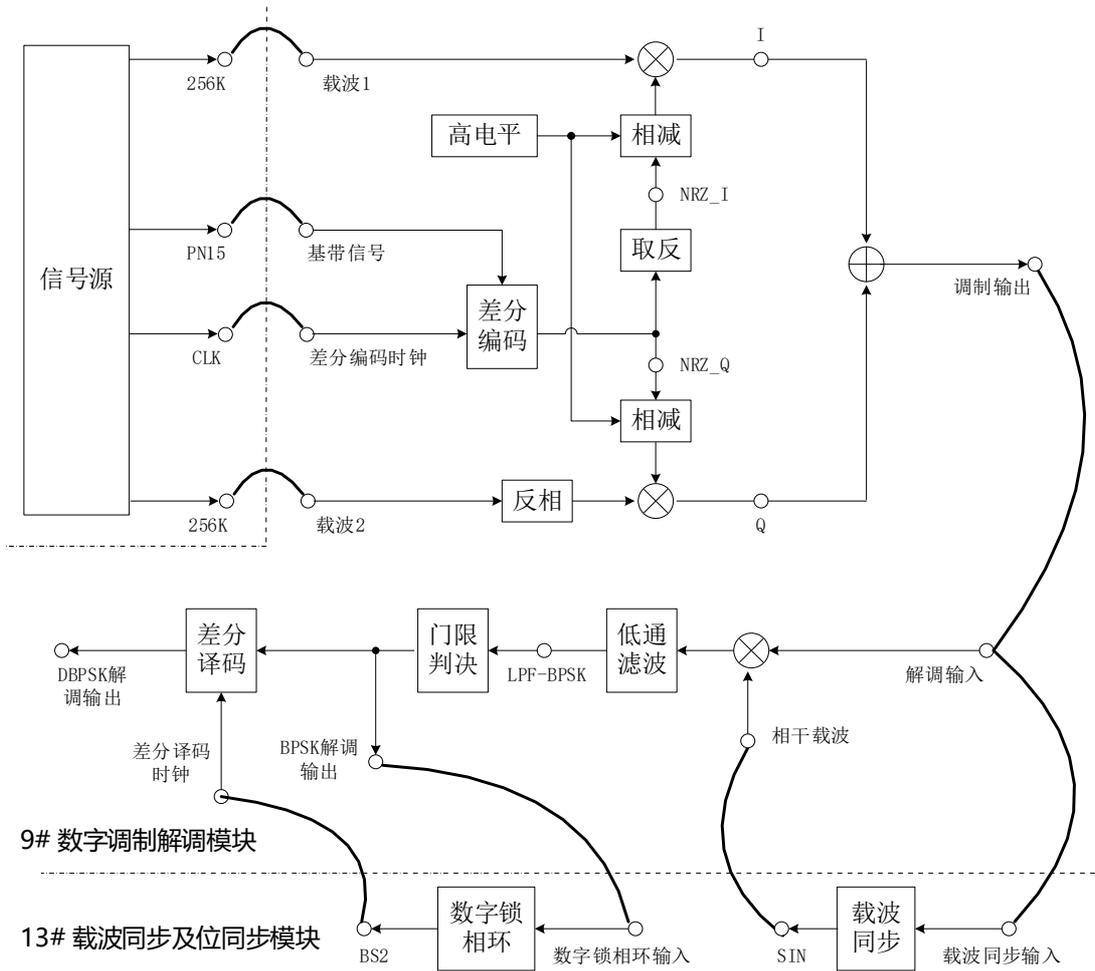


图 11-1 DBPSK 调制及解调实验原理框图

2、DBPSK调制解调（9号模块）实验框图说明

基带信号先经过差分编码得到相对码，再将相对码的1电平和0电平信号分别与256K载波及256K反相载波相乘，由于电路要兼顾多种类型的调制实验需求，NRZ信号在与256K载波相乘前进行了和高电平信号的相减，原本的“1”变成了“0”，“0”变成了“-1”，然后再由乘法器输出I路和Q路信号。叠加后得到DBPSK调制输出；已调信号送入到13模块载波提取单元得到同步载波；已调信号与相干载波相乘后，经过低通滤波和门限判决后，解调输出原始相对码，最后经过差分译码恢复输出原始基带信号。其中载波同步和位同步由13号模块完成。

3、DBPSK基本原理

在传输信号里，BPSK信号与2ASK及2FSK信号相比，具有较好的误码率性能，但是，在

使用相干解调的2PSK信号传输系统中存在相位不确定性，并将造成接收码元“0”和“1”的颠倒，产生误码。为了保证BPSK优点，也不会产生误码，把BPSK体制改进为二进制差分相移键控（DBPSK），即相对相移键控。

假设 $\Delta\varphi$ 为当前码元与前一码元的载波相位差，则数字信息与 $\Delta\varphi$ 之间的关系可定义为

$$\Delta\varphi = \begin{cases} 0 & \text{表示数字信息“1”} \\ \pi & \text{表示数字信息“0”} \end{cases}$$

也就是说，DBPSK信号的相位并不直接代表基带信号，而前后码元相对相位的差才唯一决定信息符号。

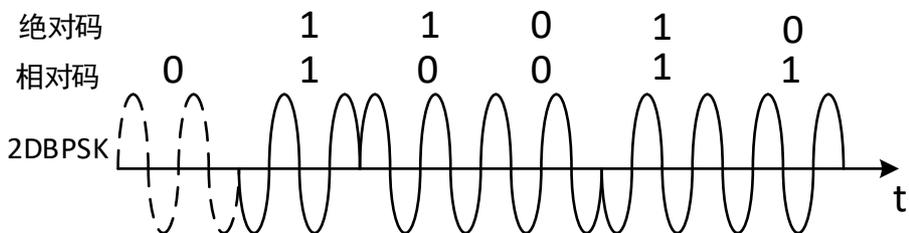


图11-2 DBPSK信号调制过程波形图

四、实验步骤

任务一 DBPSK 调制信号观测（9号模块）

概述：DBPSK 调制实验中，信号是用相位相差 180° 的载波变换来表征被传递的信息。

本任务通过对比观测基带信号波形与调制输出波形来验证 DBPSK 调制原理。

1、模块关电，按表格所示进行连线。

源端口	目的端口	连线说明
信号源：PN	模块 9：TH1(基带信号)	调制信号输入
信号源：256KHz	模块 9：TH14(载波 1)	载波 1 输入
信号源：256KHz	模块 9：TH3(载波 2)	载波 2 输入
信号源：CLK	模块 9：TH2(差分编码时钟)	调制时钟输入

模块 9: TH4(调制输出)	模块 13: TH2(载波同步输入)	载波同步模块信号输入
模块 13: TH1(SIN)	模块 9: TH10(相干载波输入)	用于解调的载波
模块 9: TH4(调制输出)	模块 9: TH7(解调输入)	解调信号输入
模块 9: TH12(BPSK 解调输出)	模块 13: TH7(数字锁相环输入)	数字锁相环信号输入
模块 13: TH5(BS2)	模块 9: TH11(差分译码时钟)	用作差分译码时钟

2、模块开电，设置主控菜单，选择【主菜单】→【通信原理】→【BPSK/DBPSK 数字调制解调】。将 9 号模块的 S1 拨为 0100，13 号模块的 S3 拨为 0111。

3、此时系统初始状态为：PN 序列输出频率 32KHz，调节信号源模块的 W3 使 256KHz 载波信号的峰峰值为 3V。

4、实验操作及波形观测。

- (1) 以 9 号模块“NRZ-I”为触发，观测“Q”；
- (2) 以 9 号模块“NRZ-Q”为触发，观测“I”。
- (3) 以 9 号模块“基带信号”为触发，观测“调制输出”。

思考：分析以上观测的波形，分析与 ASK 有何关系？

任务二 DBPSK 差分信号观测（9 号模块）

概述：本任务通过对比观测基带信号波形与 NRZ-I 输出波形，观察差分信号，验证差分变换原理。

- 1、保持任务一中的连线。
- 2、将 9 号模块的 S1 拨为“0100”。
- 3、以“基带信号”为触发，观测“NRZ-Q”。记录波形，并分析差分编码规则。

任务三 DBPSK 解调观测（9 号模块）

概述：本任务通过对比观测基带信号波形与 DBPSK 解调输出波形，验证 DBPSK 解调原理。

- 1、保持任务一中的连线。将 9 号模块的 S1 拨为“0100”。
- 2、以 9 号模块的“基带信号”为触发，观测 13 号模块的“SIN”，调节 13 号模块的 W1 使“SIN”的波形稳定，即恢复出载波。以 9 号模块的“基带信号”为触发观测“DBPSK 解

调输出”，多次单击 13 号模块的“复位”按键。观测“DBPSK 解调输出”的变化。

3、以信号源的 CLK 为触发，测 9 号模块 LPF-BPSK，观测眼图。

五、实验报告

- 1、分析实验电路的工作原理，简述其工作过程；
- 2、通过实验波形，分析 DBPSK 调制解调原理。

实验十二 QPSK/OQPSK 数字调制实验

一、实验目的

- 1、掌握 QPSK 调制原理。
- 2、了解 OQPSK 调制原理。

二、实验器材

- | | |
|---------------|-----|
| 1、主控&信号源、9号模块 | 各一块 |
| 2、双踪示波器 | 一台 |
| 3、连接线 | 若干 |

三、实验原理

1、实验原理框图

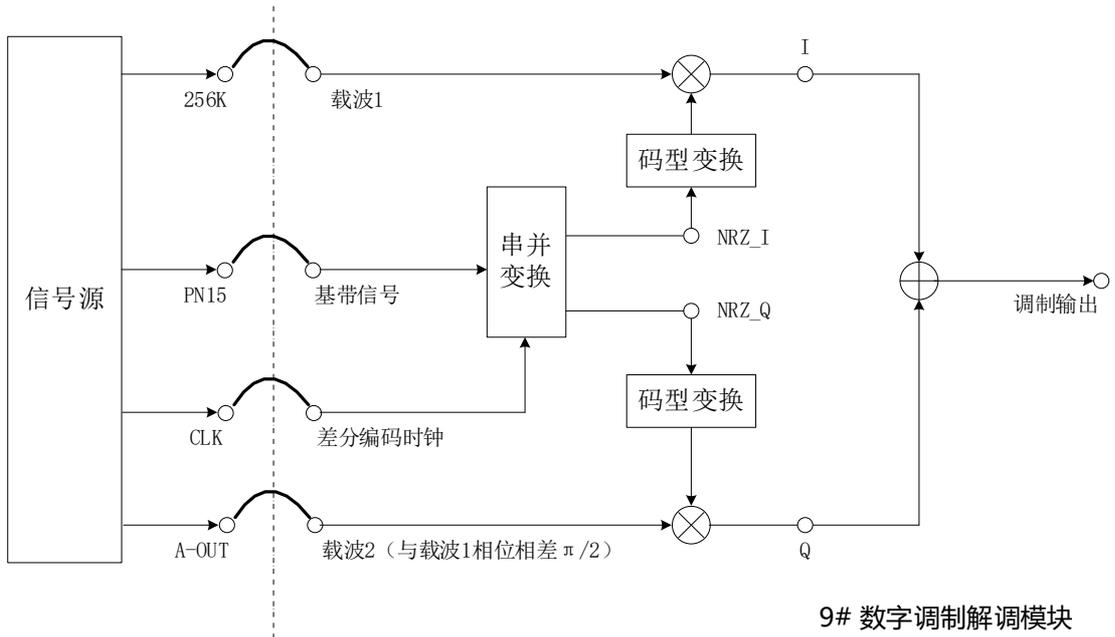


图 12-1 QPSK 调制实验框图

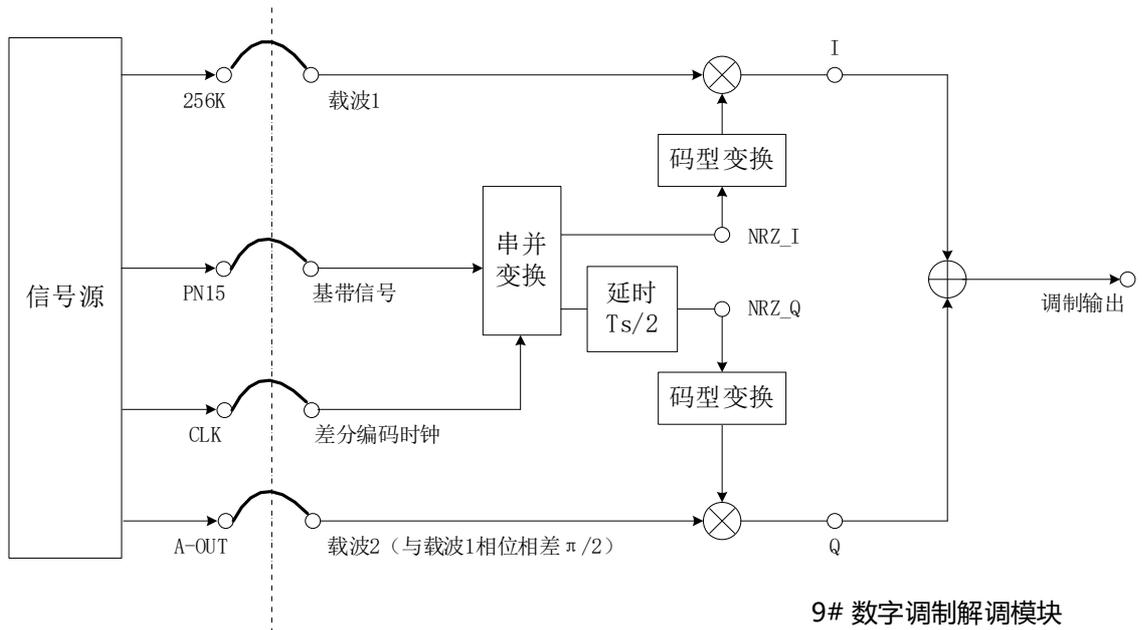


图 12-2 OQPSK 调制实验框图

2、实验框图说明

QPSK调制和OQPSK调制实验框图大体一致，基带信号先通过串并变换分为I路和Q路信号，I路和Q路信号再分别经过码型变换处理并与载波相乘（其中载波1和载波2相位相差 $\pi/2$ ），再叠加合成得到调制信号。不同点在于QPSK和OQPSK在串并变换时的输出数据不同。QPSK调制可以看作是两路BPSK信号的叠加。两路BPSK的基带信号分别是原基带信号的奇数位和偶数位，两路BPSK信号的载波频率相同，相位相差90度。OQPSK与QPSK相比，是两路BPSK调制基带信号的相位上的区别，QPSK两路基带信号是完全对齐的，OQPSK两路基带信号相差半个时钟周期。

3、QPSK调制基本原理

四相相移调制是利用载波的不同相位差来表征输入的数字信息，是四进制相移键控。QPSK是在M=4时的调相技术，它规定了四种载波相位，分别是A方式的 0° 、 90° 、 180° 、 270° 和B方式的 45° 、 135° 、 215° 、 315° ，下文中我们主要以B方式为例进行介绍。

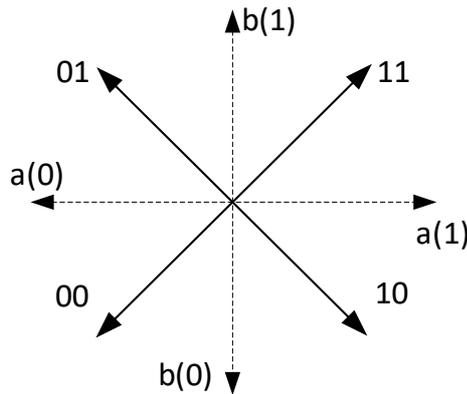
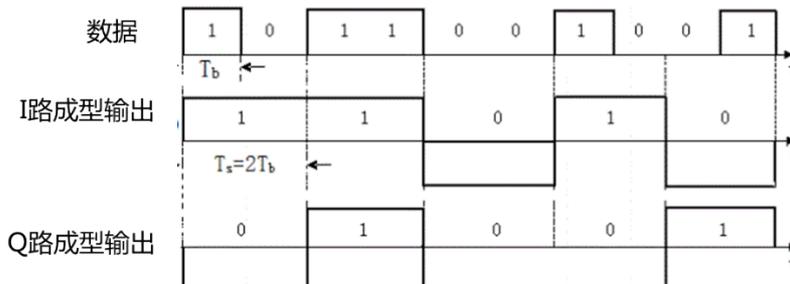


图12-3 QPSK信号的矢量图

调制器输入的数据是二进制数字序列，为了能和四进制的载波相位配合起来，则需要把二进制数据变换为四进制数据，这就是说需要把二进制数字序列中每两个比特分成一组，共有四种组合，即00,01,10,11，其中每一组称为双比特码元。每一个双比特码元是由二进制信息比特组成，它们分别代表四个符号中的一个符号。QPSK中每次调制可传输2个信息比特，这些信息比特是通过载波的四种相位来传递的，解调器根据星座图及接收到的载波信号的相位来判断发送的信息比特。



当输入的数字信息为“11”码元时，输出已调载波

$$A\cos(2\pi f_c t + \frac{\pi}{4}) \tag{1}$$

当输入的数字信息为“01”码元时，输出已调载波

$$A\cos(2\pi f_c t + \frac{3\pi}{4}) \tag{2}$$

当输入的数字信息为“00”码元时，输出已调载波

$$A \cos(2\pi f_c t + \frac{5\pi}{4}) \quad (3)$$

当输入的数字信息为“10”码元时，输出已调载波

$$A \cos(2\pi f_c t + \frac{7\pi}{4}) \quad (4)$$

接收机收到某一码元的QPSK信号可表示为：

$$y(t) = a \cos(2\pi f_c t + \varphi) \quad \text{其中 } \varphi = \frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{4}, \frac{5\pi}{4}, \frac{7\pi}{4} \quad (5)$$

由QPSK的解调框图得到：

$$\text{I路下变频信号: } I'(t) = a \cos(2\pi f_c t + \varphi) \cos(2\pi f_c t) = \frac{a}{2} \cos(4\pi f_c t + \varphi) + \frac{a}{2} \cos(\varphi) \quad (6)$$

$$\text{Q路下变频信号: } Q'(t) = a \cos(2\pi f_c t + \varphi) \cos(2\pi f_c t + \frac{\pi}{2}) = \frac{-a}{2} \sin(4\pi f_c t + \varphi) + \frac{a}{2} \sin(\varphi)$$

(7)

$$\text{I路滤波后信号: } I = \frac{a}{2} \cos(\varphi) \quad (8)$$

$$\text{Q路滤波后信号: } Q = \frac{a}{2} \sin(\varphi) \quad (9)$$

符号相位 φ	$\cos(\varphi)$ 的极性	$\sin(\varphi)$ 的极性	判决器输出	
			A	B
$\frac{\pi}{4}$	+	+	1	1
$\frac{3\pi}{4}$	-	+	0	1
$\frac{5\pi}{4}$	-	-	0	0
$\frac{7\pi}{4}$	+	-	1	0

4、OQPSK调制基本原理

OQPSK称为偏移四相相移键控（offset-QPSK），是QPSK的改进型。它与QPSK有同样的相位关系，也是把输入码流分成两路，然后进行正交调制。不同点在于它将同相和正交两支路的码流在时间上错开了半个码元周期。由于两支路码元半周期的偏移，每次只有一路可能发生极性翻转，不会发生两支路码元极性同时翻转的现象。因此，OQPSK信号相位只能跳变 0° 、 $\pm 90^\circ$ ，不会出现 180° 的相位跳变。

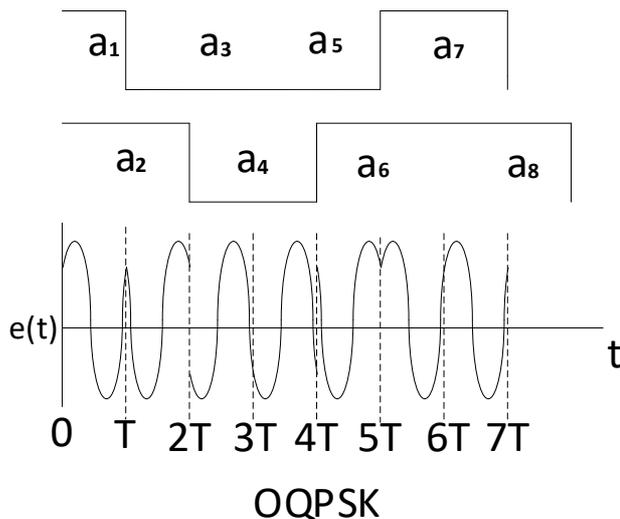


图12-4 OQPSK调制的时域波形

四、实验步骤

任务 QPSK/OQPSK 数字调制

概述：本任务通过选择不同的调制方式，对比观测两种调制方式的星座图，验证两种调制方式的原理并理解两种调制方式的区别。

1、模块关电，按表格所示进行连线。

源端口	目的端口	连线说明
信号源：PN	模块 9：TH1(基带信号)	调制信号输入
信号源：A-OUT	模块 9：TH3(载波 2)	载波 1 输入
信号源：256KHz	模块 9：TH14(载波 1)	载波 2 输入
信号源：CLK	模块 9：TH2(差分编码时钟)	调制时钟输入

2、模块开电，设置主控菜单，选择【主菜单】→【通信原理】→【QPSK/OQPSK 数字调制】。将 9 号模块的 S1 拨为 1011。调节信号源模块的 W1，使 A-OUT 输出信号的峰峰值为 3V。调节 W3，使“256KHz”载波输出的峰峰值为 3V。

3、此时系统初始状态为：PN 序列输出频率 32KHz，256K 载波信号的峰峰值为 3V。

4、实验操作及波形观测。

(1) 示波器 CH1 接 9 号模块 TH1 基带信号，CH2 接 9 号模块 TH4 调制输出，以 CH1

为触发对比观测调制输入及输出。

(2) 示波器 CH1 接 9 号模块 TP2 NRZ_I, CH2 接 9 号模块 TP9 NRZ_Q, 观察星座图。

(3) 设置 S1 为 1111, 即选择调制方式为 OQPSK, 重复上述步骤。从波形分析 QPSK 与 OQPSK 的区别。

五、实验报告

- 1、分析 OQPSK 以及 QPSK 的调制结果的不同, 进而分析其原理的区别。
- 2、结合实验波形分析实验电路的工作原理, 简述其工作过程。

第四章 信道编译码技术

实验十三 汉明码编译码实验

一、实验目的

- 1、了解信道编码在通信系统中的重要性。
- 2、掌握汉明码编译码的原理。
- 3、掌握汉明码检错纠错原理。
- 4、理解编码码距的意义。

二、实验器材

- | | |
|-----------------------|-----|
| 1、 主控&信号源、M02 号、2 号模块 | 各一块 |
| 2、 双踪示波器 | 一台 |
| 3、 连接线 | 若干 |

三、实验原理

1、实验原理框图

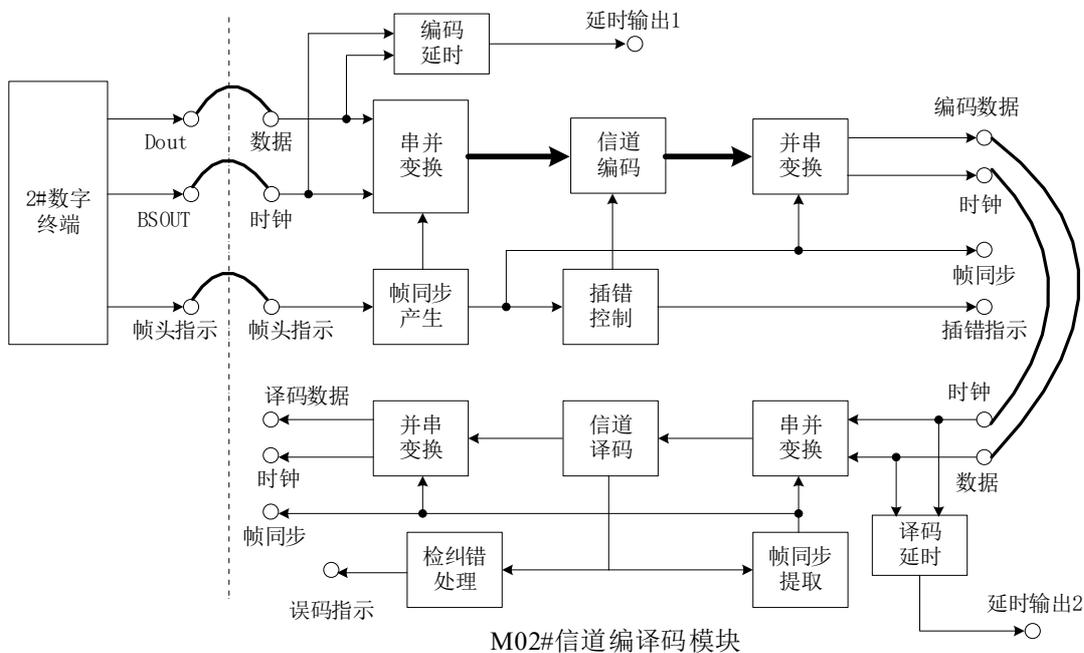


图13-1 汉明码编译码实验框图

2、实验原理说明

在随机信道中，错码的出现是随机的，且错码之间是统计独立的。例如，由高斯白噪声引起的错码就具有这种性质。因此，当信道中加性干扰主要是这种噪声时，就称这种信道为随机信道。由于信息码元序列是一种随机序列，接收端是无法预知的，也无法识别其中有无错码。为了解决这个问题，可以由发送端的信道编码器在信息码元序列中增加一些监督码元。这些监督码元和信码之间有一定的关系，使接收端可以利用这种关系由信道译码器来发现或纠正可能存在的错码。在信息码元序列中加入监督码元就称为差错控制编码，有时也称为纠错编码。不同的编码方法有不同的检错或纠错能力。有的编码就只能检错不能纠错。

那么，为了纠正一位错码，在分组码中最少要加入多少监督位才行呢？编码效率能否提高呢？从这种思想出发进行研究，便导致汉明码的诞生。汉明码是一种能够纠正一位错码且编码效率较高的线性分组码。下面我们介绍汉明码的构造原理。

一般说来，若码长为 n ，信息位数为 k ，则监督位数 $r=n-k$ 。如果希望用 r 个监督位构造出 r 个监督关系式来指示一位错码的 n 种可能位置，则要求

$$2^r - 1 \geq n \text{ 或 } 2^r \geq k + r + 1 \quad (1)$$

下面我们通过一个例子来说明如何具体构造这些监督关系式。

设分组码 (n, k) 中 $k=4$ ，为了纠正一位错码，由式 (1) 可知，要求监督位数 $r \geq 3$ 。若取 $r=3$ ，则 $n=k+r=7$ 。我们用 $a_6 a_5 \cdots a_0$ 表示这 7 个码元，用 $S_1、S_2、S_3$ 表示三个监督关系式中的校正子，则 $S_1 S_2 S_3$ 的值与错码位置的对应关系可以规定如下表所列。

表 13-1 校正子和错码位置的对应关系

S1 S2 S3	错码位置	S1 S2 S3	错码位置
001	a_0	101	a_4
010	a_1	110	a_5
100	a_2	111	a_6
011	a_3	000	无 错

由表中规定可见，仅当一错码位置在 $a_2、a_4、a_5$ 或 a_6 时，校正子 S_1 为 1；否则 S_1 为 0。这就意味着 $a_2、a_4、a_5$ 和 a_6 四个码元构成偶数监督关系

$$S_1 = a_6 \oplus a_5 \oplus a_4 \oplus a_2 \quad (2)$$

同理， a_1 、 a_3 、 a_5 和 a_6 构成偶数监督关系

$$S_2 = a_6 \oplus a_5 \oplus a_3 \oplus a_1 \quad (3)$$

以及 a_0 、 a_3 、 a_4 和 a_6 构成偶数监督关系

$$S_3 = a_6 \oplus a_4 \oplus a_3 \oplus a_0 \quad (4)$$

在发送端编码时，信息位 a_6 、 a_5 、 a_4 和 a_3 的值决定于输入信号，因此它们是随机的。监督位 a_2 、 a_1 和 a_0 应根据信息位的取值按监督关系来确定，即监督位应使上三式中 S_1 、 S_2 和 S_3 的值为零（表示变成的码组中应无错码）

$$\left. \begin{aligned} a_6 \oplus a_5 \oplus a_4 \oplus a_2 &= 0 \\ a_6 \oplus a_5 \oplus a_3 \oplus a_1 &= 0 \\ a_6 \oplus a_4 \oplus a_3 \oplus a_0 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

由上式经移项运算，解出监督位

$$\left. \begin{aligned} a_2 &= a_6 \oplus a_5 \oplus a_4 \\ a_1 &= a_6 \oplus a_5 \oplus a_3 \\ a_0 &= a_6 \oplus a_4 \oplus a_3 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

给定信息位后，可直接按上式算出监督位，其结果如下表所列。

表 13-2 信息位与监督位的对应关系

信息位	监督位	信息位	监督位
$a_6 a_5 a_4 a_3$	$a_2 a_1 a_0$	$a_6 a_5 a_4 a_3$	$a_2 a_1 a_0$
0000	000	1000	111
0001	011	1001	100
0010	101	1010	010
0011	110	1011	001
0100	110	1100	001
0101	101	1101	010
0110	011	1110	100
0111	000	1111	111

接收端收到每个码组后，先按式（2）～（4）计算出 S_1 、 S_2 和 S_3 ，再按表 2 判断错码情况。例如，若接收码组为 0000011，按式（2）～（4）计算可得 $S_1 = 0$ ， $S_2 = 1$ ， $S_3 = 1$ 。由于 $S_1 S_2 S_3$ 等于 011，故根据表 1 可知在 a_3 位有一错码。按上述方法构造的码称为汉明码。表 2 中所列的（7，4）汉明码的最小码距 $d_0 = 3$ ，因此，这种码能纠正一个错码或检测两个错码。

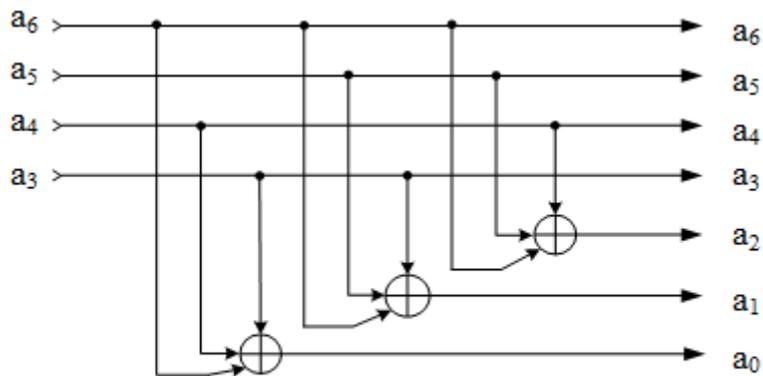
汉明码有以下特点：

码长	$n = 2^r - 1$	最小码距 $d = 3$
信息码位	$k = 2^r - m - 1$	纠错能力 $t = 1$
监督码位	$r = n - k = m$	

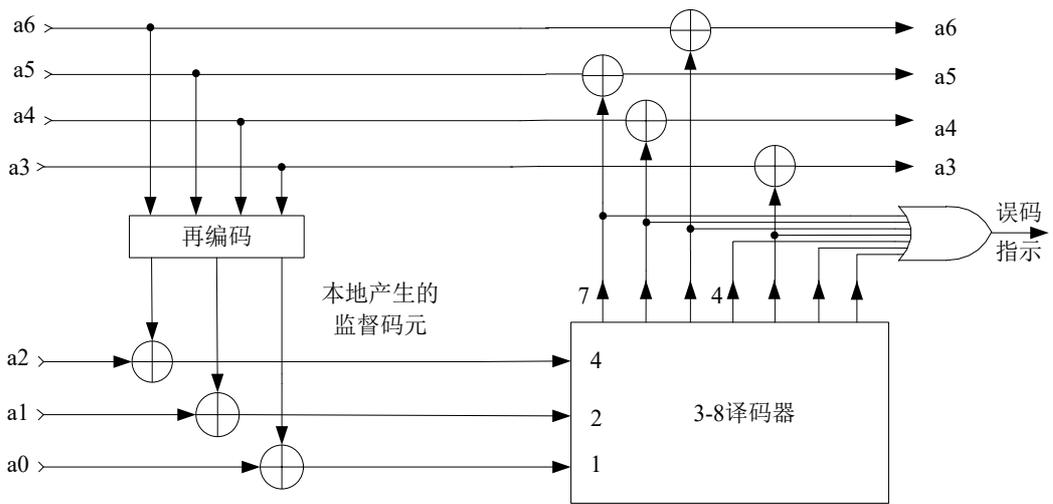
这里 m 为 ≥ 2 的正整数，给定 m 后，即可构造出具体的汉明码（ n ， k ）。

汉明码的编码效率等于 $k/n = (2^r - 1 - r) / (2^r - 1) = 1 - r / (2^r - 1) = 1 - r/n$ 。当 n 很大时，则编码效率接近 1，可见，汉明码是一种高效码

汉明码的编码器和译码器电路如下图所示



(a) 编码器



(b)译码器

图 13-2 (7, 4) 汉明码的编译码器

四、实验步骤

任务一 汉明码编码规则验证

概述：本任务通过改变输入数字信号的码型，观测延时输出，编码输出及译码输出，验证汉明码编译码规则。

1、模块关电，按表格所示进行连线。

源端口	目的端口	连线说明
模块 2: TH1(DoutMUX)	模块 M02: TH1(编码输入-数据)	编码信号输入
模块 2: TH9(BSOUT)	模块 M02: TH2(编码输入-时钟)	提供编码位时钟
模块 2: TH10(辅助观测帧头指示)	模块 M02: TH3(辅助观测-帧头指示)	编码帧头指示
模块 M02: TH5(编码输出-编码数据)	模块 M02: TH7(译码输入-数据)	将数据送入译码
模块 M02: TH6(编码输出-时钟)	模块 M02: TH8(译码输入-时钟)	提供译码时钟

2、模块开电，设置主控菜单，选择【主菜单】→【通信原理】→【汉明码】→【误码数

设置】→【无误码】。

(1) 将 2 号模块的拨码开关 S1^{2#} 拨为 10100000，拨码开关 S2^{2#}、S3^{2#}、S4^{2#} 均拨为 00000000；

3、此时系统初始状态为：2 号模块提供 32K 编码输入数据，M02 模块进行汉明编译码，编码速率为 32K，无差错插入模式。

4、实验操作及波形观测。

(1) 用示波器观测 M02 模块 TH5 处编码输出波形。

注：为方便观测，可以以 TP2 处延时输出作为输出编码波形的对比观测点。此时以帧同步的上升沿为触发。

(2) 设置 2 号模块拨码开关 S1 前四位，观测编码输出并填入下表中：

输入	编码输出	输入	编码输出
$\alpha_6 \alpha_5 \alpha_4 \alpha_3$	$\alpha_6 \alpha_5 \alpha_4 \alpha_3 \alpha_2 \alpha_1 \alpha_0$	$\alpha_6 \alpha_5 \alpha_4 \alpha_3$	$\alpha_6 \alpha_5 \alpha_4 \alpha_3 \alpha_2 \alpha_1 \alpha_0$
0000		1000	
0001		1001	
0010		1010	
0011		1011	
0100		1100	
0101		1101	
0110		1110	
0111		1111	

任务二 汉明码检纠错性能检验

概述：本任务通过插入不同个数的错误，观测译码结果与输入信号验证汉明码的检纠错能力。

- 1、保持任务一中的连线。
- 2、在主控菜单上选择【插入 1 个误码】。
- 3、对比观测译码结果与输入信号，验证汉明码的纠错能力。

4、对比观测插错指示与误码指示，验证汉明码的检错能力。

5、选择【误码数设置】，将 M02 模块逐一插入不同错误。重复步骤 2，验证汉明码的检纠错能力。

6、将示波器触发源通道接 TP2 帧同步信号，示波器另外一个通道接 TP1 插错指示，可以观测插错的位置。

7、有兴趣的同学可以改变 2 号模块输出的基带信号速率，相应的调整 M02 号模块的编码速率与基带信号速率一致，再进行上述实验。

五、实验报告

1、根据实验测试记录，完成实验表格；

2、分析实验电路的工作原理，简述其工作过程。

实验十四 BCH 码编译码实验

一、实验目的

- 1、了解信道编码在通信系统中的重要性；
- 2、掌握 BCH 码编译码的原理；
- 3、掌握 BCH 码检错纠错原理；

二、实验器材

- | | |
|------------------|-----|
| 1、 主控&信号源、M02 模块 | 各一块 |
| 2、 双踪示波器 | 一台 |
| 3、 连接线 | 若干 |

三、实验原理

1、实验原理框图

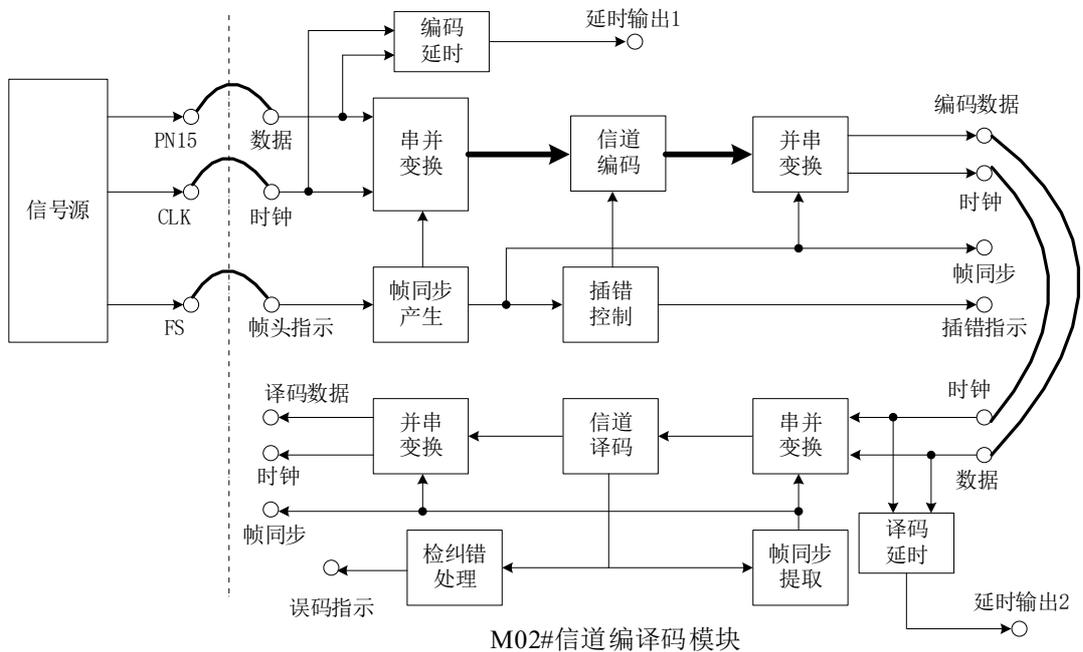


图14-1 BCH码编译码实验原理框图

2、BCH码构建

BCH码使用有限域上的域论与多项式。BCH码是循环码子类，对于任何正整数 m 和 t ($m \geq 3, t < 2m-1$)，存在着能纠正 t 个以内错误的BCH码，其参数为：码长： $n=2m-1$ 。最小码距： $d \geq$

$2t+1$ 。其生成多项式 $g(x)$ 为 $GF(2^m)$ 域上最小多项式 $m_1(x), m_2(x), \dots, m_{2t}(x)$ 的最小公倍式，即 $g(x)=LCM(m_1(x), m_2(x), \dots, m_{2t}(x))$ 。或者，考虑到 $m_2(x)$ 的根包括在 $m_1(x)$ 内，也就是一般来说，偶数小标项可一律取消，可进一步简化为 $g(x)=LCM(m_1(x), m_3(x), \dots, m_{2t-1}(x))$ 。

3、BCH码编码步骤

BCH码是循环码的一种，满足循环码的编码方法，令给定的编码方式为 (n,k) ，生成多项式为 $g(x)$ ，其中 n 为编码长度，即码长， k 为信息字的长度，信息码多项式为 $m(x)$ ，编码的步骤如下：

(1) $x^{(n-k)}$ 乘以 $m(x)$ 。这一运算实际上是在信息码后附加上 $(n-k)$ 个“0”。例如信息码为110，它相当于 $m(x)=x^2+x$ 。当 $n-k=7-3=4$ 时， $x^{(n-k)} m(x)=x^4(x^2+x)=x^6+x^5$ ，它相当于1100000。

(2) 用 $x^{(n-k)} m(x)$ 除以 $g(x)$ ，得到商 $Q(x)$ 和余式 $r(x)$ ，即 $\frac{x^{n-k} m(x)}{g(x)} = Q(x) + \frac{r(x)}{g(x)}$

例如，若选定 $g(x)=x^4+x^2+x+1$ ，则 $\frac{x^{n-k} m(x)}{g(x)} = \frac{x^6 + x^5}{x^4 + x^2 + x + 1} = (x^2 + x + 1) + \frac{x^2 + 1}{x^4 + x^2 + x + 1}$ ，

相当于 $\frac{1100000}{10111} = 111 + \frac{101}{10111}$ 。

(3) 编出的码组为： $A(x)=x^{(n-k)} m(x)+ r(x)$

下面我们以 $[15,5]$ 的编码方式作简单的介绍。例如信息位为 $[0\ 1\ 0\ 1\ 1]$ ----- $m(x)=x^3+x+1$ ，

当 $n=15,k=5$ 时，生成多项式 $g(x)$ 的系数为 $(2467)_8$ ，也就是 $(10100110111)_2$ ，

$$g(x)=x^{10}+x^8+x^5+x^4+x^2+x+1$$

注：关于多项式 $g(x)$ 一般不需要我们自己计算，前人已经将寻找到的 $g(x)$ 列成表，故可以查找相关表格找到所需的生成多项式。下面的表1列出了常见的 $n=3, 7, 15$ 情况下的BCH码生成多项式系数。

根据编码步骤：

1) $x^{(n-k)}$ 乘以 $m(x)$ ，即

$$x^{10}m(x)=x^{13}+x^{11}+x^{10}-----[0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0],$$

$$g(x)=x^{10}+x^8+x^5+x^4+x^2+x+1,$$

2) 用 $g(x)$ 除 $x^{(n-k)} m(x)$, 得到商 $Q(x)$ 和余式 $r(x)$

$$\frac{x^{10} m(x)}{g(x)} = \frac{x^{14} + x^{13} + x^{12} + x^{11}}{x^{10} + x^8 + x^5 + x^4 + x^2 + x + 1} = \frac{010110000000000}{10100110111} = 01011 + \frac{10001111}{10100110111}$$

3) 编出的码组为 $A(x) = x^{(n-k)} m(x) + r(x) = 010110010001111$ 。

本实验采用的就是 (15,5) 的编码方式。

n=3		
k	t	g(x)
1	1	7
n=7		
k	t	g(x)
4	1	13
1	3	77
n=15		
11	1	23
7	2	721
5	3	2467
1	7	77777

表1

4、BCH码解码步骤

彼得森译码算法适用于设计纠错能力 t 比较大的 BCH 码, 设一个 (n, k) BCH码是以 $\alpha, \alpha^2, \alpha^3, \dots, \alpha^{2t}$ 为根, 它的设计距离 $d=2t+1$, 发送码多项式、接收多项式和错误多项式图样分别为 $v(x)$ 、 $r(x)$ 、 $e(x)$, 若信道传输过程中产生 $e(e \leq t)$ 个错误, y_i 为错误值, 错误图样 $e x = y_1 x^{11} + y_2 x^{12} + \dots + y_e x^{1e}$, 随后计算出伴随式 S^T 。彼得森译码基本过程为:

1. 用的各因式作为除式, 对接收到的码多项式求余, 得到 t 个余式, 称为“部分校验式”。
2. 用 t 个部分校验式构造一个特定的译码多项式, 它以错误位置数为根。
3. 求译码多项式的根, 得到错误位置。

4.纠正错误。

具体的彼得森译码算法可以分为以下几个步骤：

- (1) 由 $r(x)$ 计算伴随式 $S_j = R(\alpha^j)$, $j = 1, 2, \dots, 2t$;

(2) 解方程组
$$\begin{bmatrix} S_{i+1} \\ S_{i+2} \\ \dots \\ S_{i+t} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S_i & \dots & S_1 \\ S_{i+1} & \dots & S_2 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{2t-1} & \dots & S_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \dots \\ \sigma_t \end{bmatrix} = 0 = 0$$
, 求出 $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_t$, $e \leq t$, 得到错位多

项式 $\sigma(x) = 1 + \sigma_1 x + \sigma_2 x^2 + \dots + \sigma_e x^e$;

- (3) 用试根法求 $\sigma(x)$ 的根, 确定错位位置 x_1, x_2, \dots, x_e ;
 (4) 将 x_i 的值代入方程组, 解线性方程组, 得到错位值 y_1, y_2, \dots, y_e ;
 (5) 求解错位图样 $e(x)$, 由 $v(x) = r(x) - e(x)$ 求出正确码多项式, 完成译码;
 (6) 下面是彼得森译码算法程序框图。

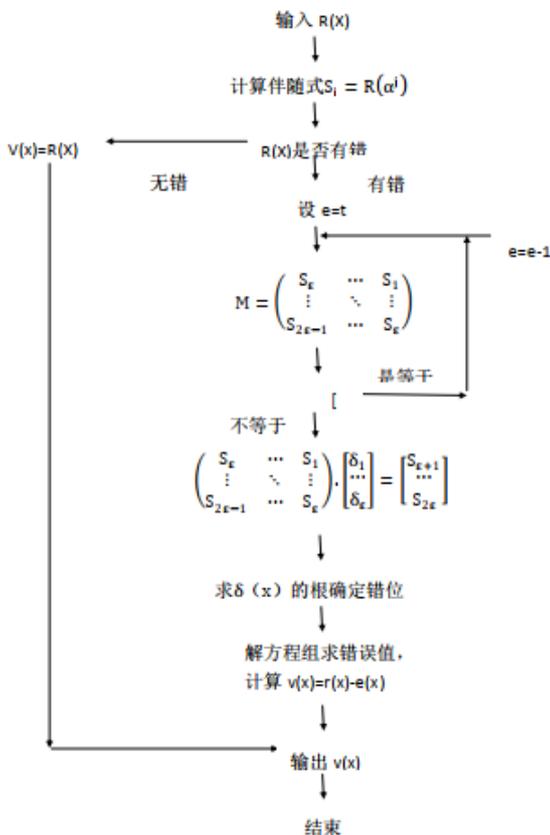


图14-2 彼得森译码算法程序

四、实验步骤

任务一 BCH 编码规则验证

概述：本任务通过观察并记录编码输入与输出波形，验证 BCH 码编码规则。

1、模块关电，按表格所示进行连线。

源端口	目的端口	连线说明
信号源：CLK	模块 M02：TH2(编码输入-时钟)	编码位时钟
信号源：PN	模块 M02：TH1(编码输入-数据)	编码信号输入
信号源：FS	模块 M02：TH3(辅助观测-帧头指示)	辅助观测
模块 M02：TH5(编码输出-编码数据)	模块 M02：TH7(译码输入-数据)	数据送入译码
模块 M02：TH6(编码输出-时钟)	模块 M02：TH8(译码输入-时钟)	提供译码时钟

2、模块开电，设置主控菜单，选择【主菜单】→【通信原理】→【BCH 码】→【误码设置】→【无误码】。

3、此时系统初始状态为：编码输入数据和时钟为 32K，FS 为模式 3。编码方式为 BCH，编码速率为 32K，无差错插入。

4、实验操作及波形观测。

(1) 用示波器分别接帧同步信号 TH3^{6#}及编码输入信号 TH1^{6#}，以 TH3 为触发，观察 TH1，以某 TH3 脉冲上升沿对应的 PN 序列为起始点，读出并记录 15 位 PN 序列码型。

注：记录时，可每 5 位之间以“_”分隔。

(2) 以编码帧同步 TP2 为触发，另一通道观测 BCH 编码输出信号 TH5。以某 TP2 脉冲上升沿对应的编码输出为起始点，记录 BCH 编码，每 15 位之间以“_”分隔。

(3) 对比记录的 PN 序列及编码输出，结合原理，分析验证编码规则。

任务二 BCH 码检纠错性能检验

概述：本任务通过插入不同个数不同位置的误码，观察译码结果与输入信号验证 BCH 码的检纠错能力，并与汉明码、循环码的检纠错能力相对比。

- 1、保持以上连线不变。
- 2、在主控菜单上选择【插入一个误码】。
- 3、对比观测译码结果与输入信号，验证 BCH 码的纠错能力。
- 4、对比观测插错指示和误码指示，验证 BCH 码的检错能力。
- 5、在主控菜单上逐一插入不同错误。重复步骤 3~4，验证 BCH 码的检纠错能力。
- 6、将示波器触发源通道接 TP2 帧同步信号，示波器另外一个通道接 TP1 插错指示，可以观测插错的位置。

五、实验报告

- 1、分析实验电路的工作原理，简述其工作过程；
- 2、分析 BCH 码实现检错及纠错的原理。

实验十五 循环码编译码实验

一、实验目的

- 1、了解信道编码在通信系统中的重要性；
- 2、掌握循环码编译码的原理；
- 3、掌握循环码检错纠错原理；

二、实验器材

- | | |
|-----------------------|-----|
| 1、 主控&信号源、M02 号、2 号模块 | 各一块 |
| 2、 双踪示波器 | 一台 |
| 3、 连接线 | 若干 |

三、实验原理

1、实验原理框图

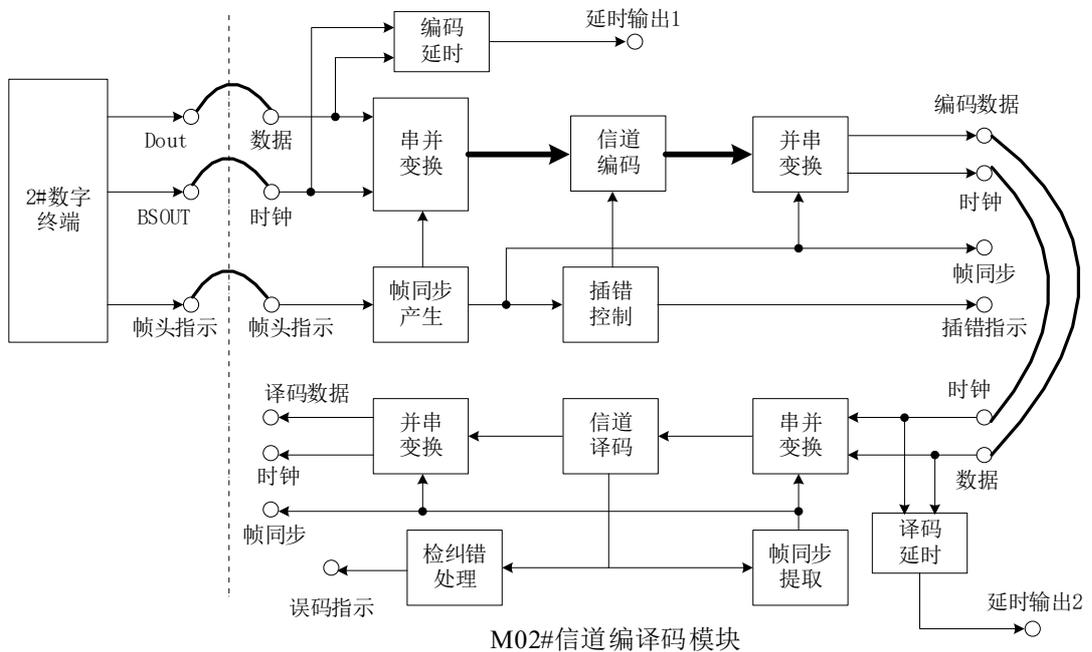


图15-1 循环码编译码实验框图

2、循环码实验原理

(1) 循环码概念

循环码是线性分组码中一个重要的分支。它的检、纠错能力较强，编码和译码设备并不

复杂，而且性能较好，不仅能纠随机错误，也能纠突发错误。

循环码是目前研究得最成熟的一类码，并且有严密的代数理论基础，故有许多特殊的代数性质，这些性质有助于按所要求的纠错能力系统地构造这类码，且易于实现，所以循环码受到人们的高度重视，在FEC系统中得到了广泛应用。

定义：一个线性分组码，若具有下列特性，则称为循环码。设码字

$$A = (a_{n-1}a_{n-2}\dots a_1a_0) \quad (1)$$

若将码元左移一位，得

$$A^{(1)} = (a_{n-2}a_{n-1}\dots a_1a_0a_{n-1}) \quad (2)$$

$A^{(1)}$ 也是一个码字。

注意：循环码并非由一个码字的全部循环移位构成。

下表列出了一种（7，4）循环码的全部码组。

码组		信息位				监督位			码组		信息位				监督位		
编号	a6	a5	a4	a3	a2	a1	a0	编号	a6	a5	a4	a3	a2	a1	a0		
1	0	0	0	0	0	0	0	9	1	0	0	0	1	1	0		
2	0	0	0	1	1	0	1	10	1	0	0	1	0	1	1		
3	0	0	1	0	1	1	1	11	1	0	1	0	0	0	1		
4	0	0	1	1	1	0	1	12	1	0	1	1	1	0	0		
5	0	1	0	0	0	1	1	13	1	1	0	0	1	0	1		
6	0	1	0	1	1	1	0	14	1	1	0	1	0	0	0		
7	0	1	1	0	1	0	0	15	1	1	1	0	0	1	0		
8	0	1	1	1	0	0	1	16	1	1	1	1	1	1	1		

表 15-1 (7,4) 循环码码表

循环码有两个数学特征：

1. 线性分组码的封闭型：即如果 c_1, c_2 ，是与消息 m_1, m_2 对应的码字，则 c_1+c_2 必定是与 m_1+m_2 对应的码字。

2. 循环性，即任一许用码组经过循环移位后所得到的码组仍为该许用码组集合中的一个码组。

即若 $(a_{n-1} a_{n-2} \dots a_1 a_0)$ 为一循环码组，则 $(a_{n-2} a_{n-3} \dots a_n a_{n-1})$ 、 $(a_{n-3} a_{n-2} \dots a_{n-1} a_{n-2})$ 、……还是许用码组。也就是说，不论是左移还是右移，也不论移多少位，仍然是许用的循环码组。

以 3 号码组 (0010111) 为例，左移循环一位变成 6 号码组 (0101110)，依次左移一位构成的状态图如图所示。

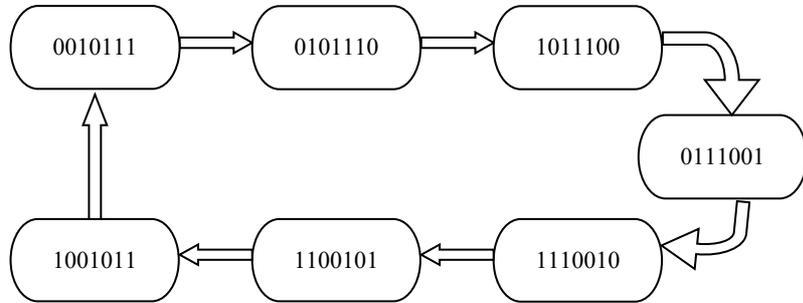


图 15-2 (7, 4) 循环码中的循环圈

可见除全零码组外，不论循环右移或左移，移多少位，其结果均在该循环码组的集合中（全零码组自己构成独立的循环圈）。

(2) 码多项式

为了用代数理论研究循环码，可将码组用多项式表示，循环码组中各码元分别为多项式的系数。长度为 n 的码组 $A = (a_{n-1}a_{n-2}...a_1a_0)$ 用码多项式表示则为

$$A(x) = a_{n-1}x^{n-1} + a_{n-2}x^{n-2} + \dots + a_1x + a_0 \tag{3}$$

式中，x 的幂次是码元位置的标记。若把一个码组左移 i 位后的码组记为，

$$A^{(i)} = (a_{n-1-i}a_{n-2-i}...a_{n-i+1}a_{n-i}) \tag{4}$$

其码多项式为

$$A^{(i)}(x) = a_{n-1-i}x^{n-1} + a_{n-2-i}x^{n-2} + \dots + a_{n-i+1}x + a_{n-i} \tag{5}$$

$A^{(i)}(x)$ 可以根据 $x^i A(x)$ 按模 x^n+1 运算得到，即

$$A^{(i)}(x) \equiv x^i A(x) \pmod{x^n + 1} \tag{6}$$

或

$$x^i A(x) = Q(x)(x^n + 1) + A^{(i)}(x) \tag{7}$$

式中， $Q(x)$ 为 $x^i A(x)$ 除以 x^n+1 的商式，而 $x^i A(x)$ 等于 $A^{(i)}(x)$ 被 x^n+1 除得之余式。

以码组 0100111 为例，若将此码左移两位，则由式 (3-7) 可得 $x^2(x^5+x^2+x+1) = Q(x)(x^7+1) + A^{(2)}(x)$ 易有其余式为 $A^{(2)}(x) = x^4+x^3+x^2+x$ ，对应的码组为 0011101，

它与直接对码组进行循环左移的结果相同。

(3) 生成多项式

(n, k) 循环码码组集合中 (全“0”码除外) 幂次最低的多项式 (n-k) 阶称为生成多项式 $g(x)$ 。它是能整除 x^{n+1} 且常数项为 1 的多项式, 具有唯一性。

集合中其他码多项式, 都是按模 (x^{n+1}) 运算下 $g(x)$ 的倍数, 即可以由多项式 $g(x)$ 产生循环码的全部码组。

假设信息码多项式为 $m(x)$, 则对应的循环码多项式为

$$A(x) = m(x)g(x) \quad (8)$$

式中, $m(x)$ 为次数不大于 $k-1$ 的多项式, 共有 2^k 个 (n, k) 循环码组。

考查表 1, 其中 $n-k=4$ 阶的多项式只有编号为 2 的码组 (0011101), 所以表中所示 (7, 4) 循环码组的生成多项式 $g(x) = x^4 + x^3 + x^2 + 1$, 并且该码组集合中的任何码多项式 $A(x)$ 都可由信息位乘以生成多项式得到

$$A(x) = (m_{k-1}m_{k-2} + \dots + m_1m_0)g(x) \bmod (x^{n+1}) \quad (9)$$

式中, $(m_{k-1}m_{k-2} \dots m_1m_0)$ 为信息码元。

对于 (7, k) 循环码, x^7+1 的因式分解为

$$x^7+1 = (x+1)(x^3+x+1)(x^3+x^2+1) \quad (10)$$

由该式可以构成表 15-2 所示几种 (7, k) 循环码。

(7, k)	$g(x)$
(7, 1)	$(x^3+x+1)(x^3+x^2+1)$
(7, 3)	$(x+1)(x^3+x+1)$ 或 $(x+1)(x^3+x^2+1)$
(7, 4)	x^3+x+1 或 x^3+x^2+1
(7, 6)	$x+1$

表 15-2 (7, k) 循环码的生成多项式

从表 15-2 中可以看出, 即使 n, k 均已确定, 也可能由多种生成多项式供选择, 选用的多项式不同, 产生出的循环码组也不同。

(4) 循环码的编码及实现

利用生成多项式 $g(x)$ 实现编码:

如上所述, 一旦循环码的生成多项式 $g(x)$ 确定时, 码就完全确定了。现在讨论生成多项

式 $g(x)$ 给定以后，如何实现循环码的编码问题。

若已知

$$g(x) = g_{n-k}x^{n-k} + g_{n-k-1}x^{n-k-1} + \dots + g_1x + g_0 \quad (11)$$

并设信息元多项式

$$m(x) = m_{k-1}x^{k-1} + m_{k-2}x^{k-2} + \dots + m_1x + m_0 \quad (12)$$

要编码成系统循环码形式，即码字的最左边 k 位是信息元，其余 $n-k$ 位是校验元，则要用 x^{n-k} 乘以 $m(x)$ ，再加上校验元多项式 $r(x)$ ，这样得到的码字多项式 $c(x)$ 为

$$c(x) = x^{n-k}m(x) + r(x) \quad (13)$$

其中 $r(x) = r_{n-k-1}x^{n-k-1} + \dots + r_1x + r_0$

由于循环码属于线性分组码 $C(x)$ 一定是 $g(x)$ 的倍式，即有

$$c(x) = x^{n-k}m(x) + r(x) = q(x)g(x) \quad (14)$$

$$c(x) = (x^{n-k}m(x) + r(x)) \bmod g(x) = 0 \quad (15)$$

注意到 $g(x)$ 为 $n-k$ 次多项式，而 $r(x)$ 最多为 $n-k-1$ 次多项式，必有

$$r(x) = x^{n-k}m(x) \bmod g(x) \quad (16)$$

即 $r(x)$ 必是 $x^{n-k}m(x)$ 除以 $g(x)$ 的余式。

上述过程指出了系统循环码的编码方法：首先将信息元多项式 $m(x)$ 乘以 x^{n-k} 成为 $x^{n-k}m(x)$ ，然后将 $x^{n-k}m(x)$ 除以生成多项式 $g(x)$ 得到余式 $r(x)$ ，该余式就是校验元多项式，从而得到式 (13) 所示的码字多项式

综上所述，系统循环码的编码问题，可以归结为两个多项式的除法运算，即将 $x^{n-k}m(x)$ 除以生成多项式 $g(x)$ 得到余式 $r(x)$ 的运算。

首先根据给定的 (n, k) 值来选定生成多项式 $g(x)$ 。即从 (x^{n+1}) 的因子中选定一个 $(n-k)$ 次多项式作为 $g(x)$ 。所有多项式 $T(x)$ 都能被 $g(x)$ 整除。根据这条原则可以对给定的信息位进行编码。设 $m(x)$ 为信息码多项式，其次数小于 k 。用 x^{n-k} 乘 $m(x)$ ，得到的 $x^{n-k}m(x)$ 次数必定小于 n 。用 $g(x)$ 除 $x^{n-k}m(x)$ ，得到余式 $r(x)$ ， $r(x)$ 的次数必定小于 $g(x)$ 的次数，即小于 $(n-k)$ 。将此余式 $r(x)$ 加在信息位后作为监督元，即将 $r(x)$ 和 $x^{n-k}m(x)$ 相加，得到的多项式必定是一个码多项式。

下面以 (7, 4) 码为例演示编码过程

1) 确定 $g(x)$ 。

由 $x^7+1=(x+1)(x^3+x^2+1)(x^3+x+1)$ 所以 $g(x)=x^3+x^2+1$ 或 $g(x)=x^3+x+1$ ；这里选择 $g(x)=x^3+x^2+1$

2) 用 x^{n-k} 乘 $m(x)$ ，该运算实际上是在信息码后附加 $(n-k)$ 个“0”，例如，信息码为 1100，它写成多项式为 $m(x)=x^3+x^2$ 。当 $n-k=7-4=3$ 时， $x^{n-k}m(x)=x^6+x^5$

它表示码组 1100000。

3) 用 $g(x)$ 除 $x^{n-k}m(x)$ ，得到商 $Q(x)$ 和余式 $r(x)$ 即 $[x^{n-k}m(x)]/[g(x)] = Q(x) + r(x)/g(x)$

例如： $[x^{n-k}m(x)]/[g(x)] = (x^6+x^5)/(x^3+x^2+1) = (x^3+1) + (x^2+1)/(x^3+x^2+1)$

上式是用码多项式表示的运算。它和下式等效：

$$1100000/1101=1001+101/1101$$

4) 编出码组为 $T(x) = x^{n-k}m(x) + r(x)$ 即 $T(x) = 1100000+101=1100101$

由以上方法可以算出 (7, 4) 码表，如表1所示。

(5) 循环码的译码及实现

设发送的码字为 $C(x)$ ，接收到的码字为 $R(x)$ ，如果 $C(x) = R(x)$ ，则说明收到的码字正确如果 $C(x) \neq R(x)$ ，则说明收到的码字出现错误，则有：

$$R(x) = C(x) + E(x) \tag{17}$$

公式 (25) 中的 $E(x)$ 称为错误图样。当 $E(x)=0$ 时说明没有错误，用 $g(x)$ 去除 $R(x)$ ，得

$$\frac{R(x)}{g(x)} = \frac{C(x) + E(x)}{g(x)} = \frac{C(x)}{g(x)} + \frac{E(x)}{g(x)} \tag{18}$$

因为 $C(x)$ 是由 $g(x)$ 生成的，故 $C(x)$ 必能为 $g(x)$ 除尽，显然 $R(x)$ 与 $E(x)$ 同余式 ($R(x) \equiv E(x) \pmod{g(x)}$)，以 $g(x)$ 除 $E(x)$ 所得余式称为伴随式 $S(x)$ 。

由公式可知， $R(x)H^T = (C(x)+E(x))H(x) = E(x)H(x)$ 。若 $E(x)=0$ ，则 $E(x)H(x)=0$ ；若 $E(x) \neq 0$ ，则 $E(x)H(x) \neq 0$ 。这说明， $R(x)H^T$ 仅与错误图样有关，而与发送的码字无关，由此可以确定错误图样表。

由于 $g(x)$ 的次数为 $n-k$ 次， $g(x)$ 除 $E(x)$ 后得到余式（即伴随式 $S(x)$ ）的次数为 $n-k-1$ 次，

错误图样	错误图样 码字	伴随式 $S(x)$	伴随式
$E_6(x) = x^6$	1000000	x^2	100
$E_5(x) = x^5$	0100000	$x^2 + x$	110
$E_4(x) = x^4$	0010000	$x^2 + x + 1$	111
$E_3(x) = x^3$	0001000	$x + 1$	011
$E_2(x) = x^2$	0000100	$x^2 + 1$	101
$E_1(x) = x^1$	0000010	x	010
$E_0(x) = x^0$	0000001	1	001
$E(x) = 0$	0000000	0	000

表 15-3 伴随式与错误图像关系表

故 $S(x)$ 共有 2^{n-k} 个表达式，每个可能的表达式对应一个错误格式，可以知道 (7, 4) 循环码的 $S(x)$ 共有 $2^{7-4}=8$ 个表达式，可以根据错误图样表来纠正 (7, 4) 循环码的一位错误。其伴随式如表 15-3 所示。

综上所述循环码的译码可按以下三个步骤进行：

1. 接收到的 $y(x)$ 计算伴随式 $s(x)$ ；
2. 根据伴随式 $s(x)$ 找到对应的估值错误图样 $\hat{e}(x)$ ；

3. 计算 $\hat{c} = y(x) + \hat{e}(x)$, 得到估值码字 $\hat{c}(x)$ 。若 $\hat{c}(x) = c(x)$, 则译码正确, 否则, 若 $\hat{c}(x) \neq c(x)$, 则译码错误。

由上述方法可计算出 (7, 4) 码译码码表:

序号	输入序列	输出序列
1	0000000 及其 1 位出错码组	0000
2	0001101 及其 1 位出错码组	0001
3	0010111 及其 1 位出错码组	0010
4	0011010 及其 1 位出错码组	0011
5	0100011 及其 1 位出错码组	0100
6	0101110 及其 1 位出错码组	0101
7	0110100 及其 1 位出错码组	0110
8	0111001 及其 1 位出错码组	0111
9	1000110 及其 1 位出错码组	1000
10	1001011 及其 1 位出错码组	1001
11	1010001 及其 1 位出错码组	1010
12	1011100 及其 1 位出错码组	1011
13	1100101 及其 1 位出错码组	1100
14	1101000 及其 1 位出错码组	1101
15	1110010 及其 1 位出错码组	1110
16	1111111 及其 1 位出错码组	1111

表 15-4 (7, 4) 码译码码表

四、实验步骤

任务一 循环码编码规则验证

概述：本任务通过改变输入数字信号的码型，观测延时输出，编码输出以及译码输出，验证循环码编译码规则，并对比汉明码编码规则有何异同。

1、模块关电，按表格所示进行连线。

源端口	目的端口	连线说明
模块 2: TH1(DoutMUX)	模块 M02: TH1(编码输入-数据)	编码信号输入
模块 2: TH9(BSOUT)	模块 M02: TH2(编码输入-时钟)	编码位时钟
模块 2: TH10(帧头指示)	模块 M02: TH3(辅助观测-帧头指示)	提供编码帧头
模块 M02: TH5(编码输出-编码数据)	模块 M02: TH7(译码输入-数据)	送入译码
模块 M02: TH6(编码输出-时钟)	模块 M02: TH8(译码输入-时钟)	提供译码时钟

2、模块开电，设置主控菜单，选择【主菜单】→【通信原理】→【循环码】→【误码数设置】→【无误码】。

将 2 号模块的拨码开关 S1^{2#} 拨为 10100000，拨码开关 S2^{2#}、S3^{2#}、S4^{2#} 均拨为 00000000。

3、此时系统初始状态为：2 号模块提供 32K 编码输入数据，M02 模块进行循环编译码，编码速率 32K，无差错插入模式。

4、实验操作及波形观测。

(1) 用示波器观测 TH5 处编码输出波形。

注：为方便观测，可以以 TP2 处帧同步作为输出编码波形的对比观测点。此时以帧同步的上升沿为触发。

(2) 拨动拨码开关 S1 前四位观测编码输出并填入下表中：

输入	编码输出	输入	编码输出
$a_6 a_5 a_4 a_3$	$a_6 a_5 a_4 a_3 a_2 a_1 a_0$	$a_6 a_5 a_4 a_3$	$a_6 a_5 a_4 a_3 a_2 a_1 a_0$

0000		1000	
0001		1001	
0010		1010	
0011		1011	
0100		1100	
0101		1101	
0110		1110	
0111		1111	

任务二 循环码检纠错性能检验

概述：本任务通过插入不同个数的误码，观测译码结果与输入信号验证循环码的检纠错能力，并与汉明码检纠错能力对比。

- 1、保持以上连线不变。
- 2、选择主控菜单【插入 1 个误码】。
- 3、对比观测译码结果与输入信号，验证循环码的纠错能力；
- 4、对比观测插错指示与误码指示，验证循环码的检错能力。
- 5、在主控菜单上将 M02 模块逐一插入不同错误。重复步骤 3~4，验证循环码的检纠错能力。
- 6、将示波器触发源通道接 TP2 帧同步信号，示波器另一个通道接 TP1 插错指示，可以观测插错位置。

五、实验报告

- 1、根据实验测试记录，完成实验表格；
- 2、结合实验波形分析实验电路的工作原理，简述其工作过程；
- 3、分析循环码实现检错及纠错的原理。

实验十六 卷积码编译码实验

一、实验目的

- 1、了解信道编码在通信系统中的重要性；
- 2、掌握卷积码编译码的原理；
- 3、掌握卷积码检错纠错原理；

二、实验器材

- | | |
|-------------|----|
| 1、 主控&信号源模块 | 一块 |
| 2、 M02 模块 | 一块 |
| 3、 双踪示波器 | 一台 |
| 4、 连接线 | 若干 |

三、实验原理

1、实验原理框图

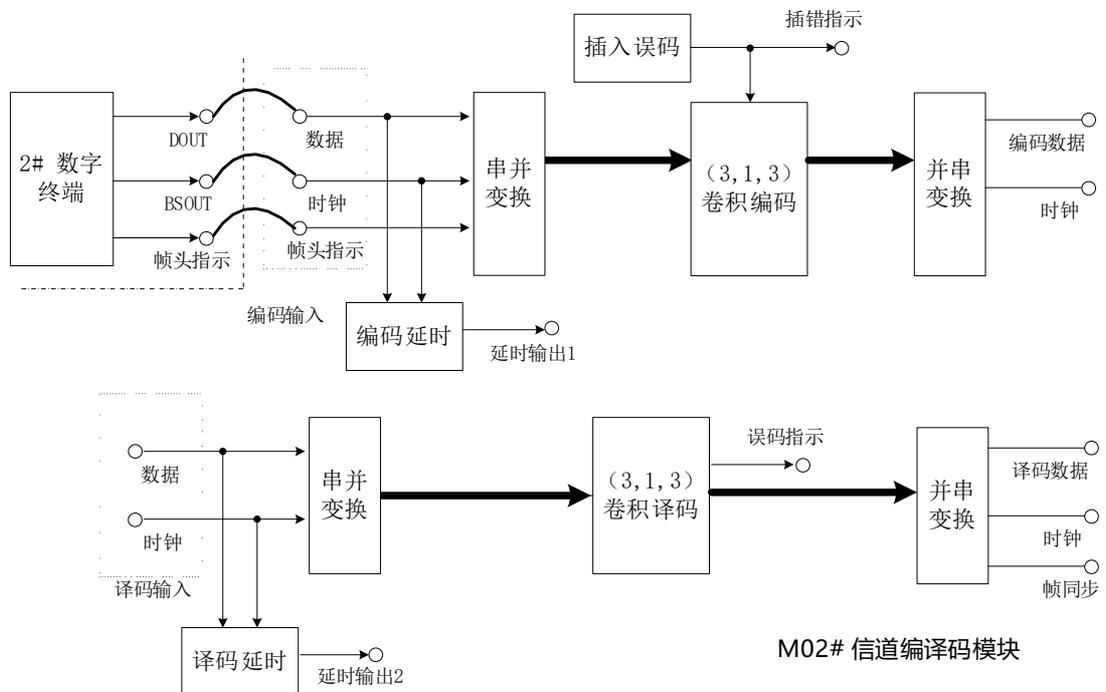


图 16-1 卷积码编译码实验框图

2、实验框图说明

1) 卷积码的概念

分组码：每个码组中的校验位仅与本码组中的 k 个信息码有约束关系。

卷积码：校验码不仅和当前的 k 比特信息段有关，还与前面 $m=(N-1)$ 个信息段也有约束关系，即一个码组中的校验码校验着 N 个信息段。

卷积码的表示： (n,k,m) 或 (n,k,N) ；

N : 编码约束度，表示编码过程中互相约束的码段个数； m : 记忆长度，记忆单元级数；

nN : 编码约束长度，表示编码过程中互相约束的码元个数，同 N 反映了卷积编码器的复杂度

n : 输出码字； k : 每次输入到卷积编码器的 bit 数。

下图为 (n,k,N) 卷积码编码器的结构图

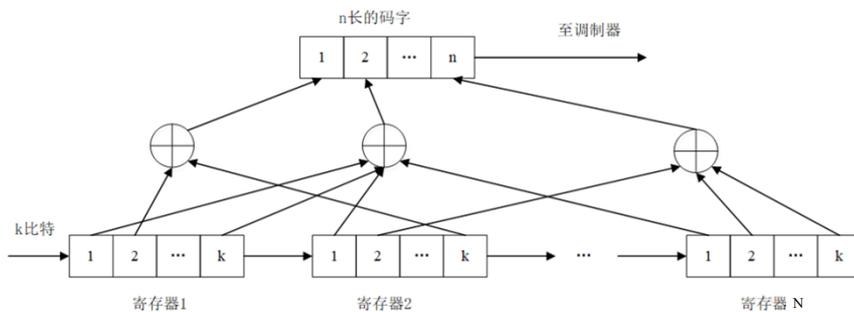


图 16-2 (n,k,N) 卷积码编码器

图中表示有 N 级信息比特，每次输入 k 比特信息，共有 kN 个比特，每次输出 n 个比特信息，可以明显地看出该 n 个比特信息不仅与当前输入的 k 个比特信息有关，与之前 $L-1$ 组信息比特也有关，所以卷积码是有记忆的编码，记忆深度为 N ， N 可由寄存器的个数确定。

2) 卷积码的原理

本实验采用的是 $(3,1,3)$ 卷积码的编码器，其 $k=1$ ，移位寄存器共有 3 级。每个时隙中，只有 1b 输入信息进入移存器，并且移存器各级暂存的内容向右移 1 位，开关旋转一周输出 3 比特。所以，1b 输入信息的码率为 $1/3$ 。

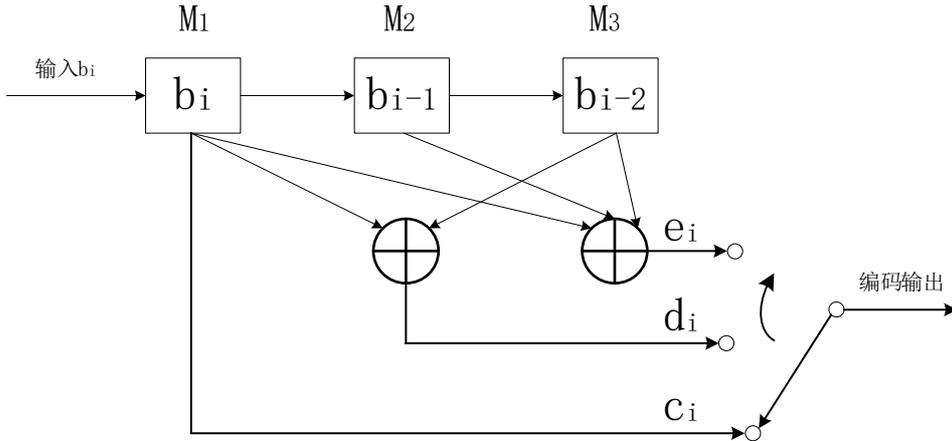


图 16-3 (3,1,3) 卷积码编码器

设输入信息比特序列是... $b_{i-2}b_{i-1}b_i b_{i+1}$..., 则当输入 b_i 时, 此编码器输出 $3b_i, C_i d_i e_i$, 输入和输出的关系如下:

$$\begin{cases} c_i = b_i \\ d_i = b_i \oplus b_{i-2} \\ e_i = b_i \oplus b_{i-1} \oplus b_{i-2} \end{cases} \quad (1)$$

式中: b_i 为当前输入信息位; $b_{i-2}b_{i-1}$ 为移寄存器的前两信息位。

3) 码树图

下图为 (3,1,3) 卷积码的码树图。将图 16-3 中移寄存器 M1, M2 和 M3 的初始状态 000 作为码树的起点。现在规定: 输入信息位为“0”, 则状态向上支路移动; 输入信息位为“1”, 则状态向下支路移动。于是, 就可以得出图 16-4 中所示的码树图。设现在的输入码元序列为 1101, 则当第 1 个信息位 $b_1=1$ 输入后, 各移寄存器存储的信息分别为 $M_1=1, M_2=M_3=0$; 由式 (1) 可知, 此时的输出为 $C_1 d_1 e_1 = 111$, 码树的状态将从起点 a 向下到达状态 b; 此后, 第 2 个输入信息位 $b_2=1$, 故码树状态将从状态 b 向下到达状态 d。此时 $M_2=1, M_3=0$, 由式 (1) 可知, $C_2 d_2 e_2 = 110$ 。第 3 位和后继各位输入时, 编码器将按照图中粗线所示的路径前进, 得到输出序列 111 110 010 100...。由此码树图还可以看出, 从第 4 级支路开始, 码树的上半部和下半部相同。这意味着, 从第 4 个输入信息位开始, 输出码元已经与第一位输入信息位无关, 即此编码器的约束度 $N=3$ 。

若观察在新码元输入时编码器的过去状态, 即观察 $M_2 M_3$ 的状态和输入信息位的关系,

则可以看出图中的 a、b、c 和 d 四种状态。这些状态和 M2M3 的图 16-4 中给出了。

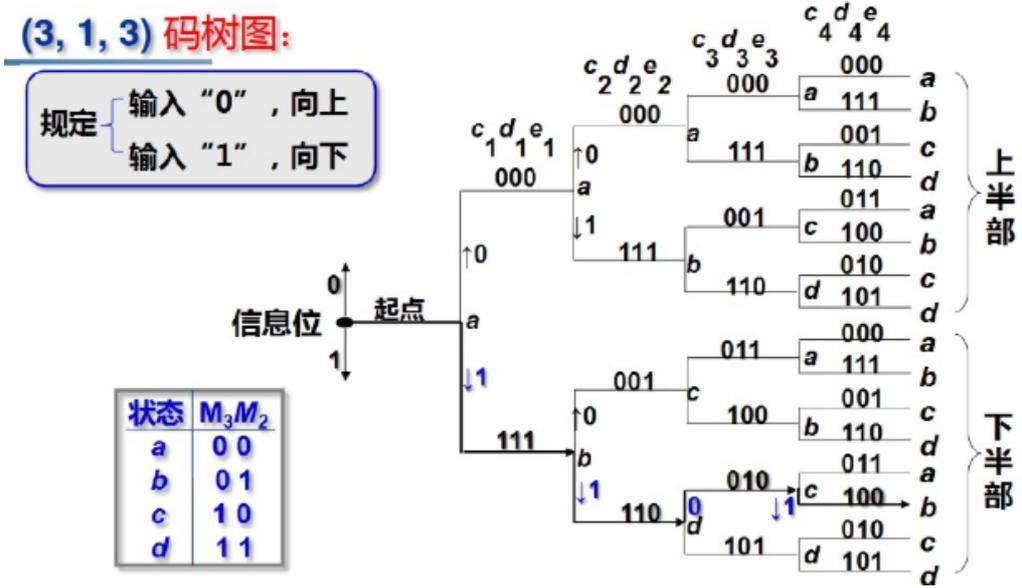


图 16-4 (3,1,3) 卷积码的码树图

4) 状态图

上面的码树可以改进为下述的状态图。由上例的编码器结构可知，输出码元 $C_i d_i e_i$ 决定于当前输入信息位 b_i 和前两位信息位 b_{i-1} 和 b_{i-2} (移存器 M2 和 M3 的状态)、图 16-4 已经为 M2 和 M3 的四种状态规定了代表符号 a, b, c 和 d。所以，可以将当前输入信息位、移存器前一状态、移存器下一状态和输出码元之间的关系归纳于下表中。

移存器状态和输入输出码元的关系			
移存器前一状态 M ₃ M ₂	当前输入信息位 b_i	输出码元 $C_i d_i e_i$	移存器下一状态 M ₃ M ₂
a(00)	0	000	a(00)
	1	111	b(01)
b(01)	0	001	c(10)
	1	110	d(11)
c(10)	0	011	a(00)
	1	100	b(01)
d(11)	0	010	c(10)
	1	101	d(11)

由上表可以看出，前一状态 a 只能转到下一状态 a 或 b，前一状态 b 只能转到下一状态 c 或 d，等等。按照表中的规律可以画出状态图如图 16-5 所示。在图 16-5 中，虚线表示输入信

息位为“1”时状态转变的路线，实线表示输入信息位为“0”时状态转变的路线。线条旁边的3位数字是编码输出比特。利用这种状态图可以方便地从输入序列得到输出序列。

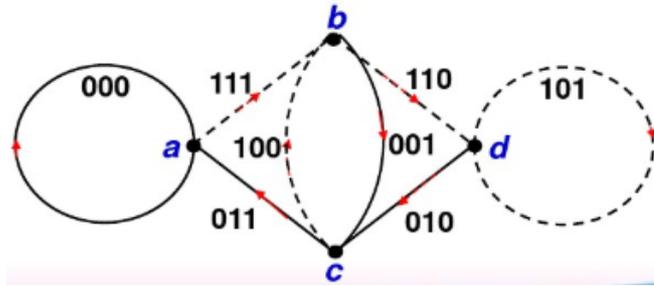


图 16-5 (3,1,3) 卷积码状态图

5) 网格图

将状态图在时间上展开，可以得到网格图，同状态图一样，虚线表示输入信息位为“1”时状态转变的路线，实线表示输入信息位为“0”时状态转变的路线。如图 16-6 所示。

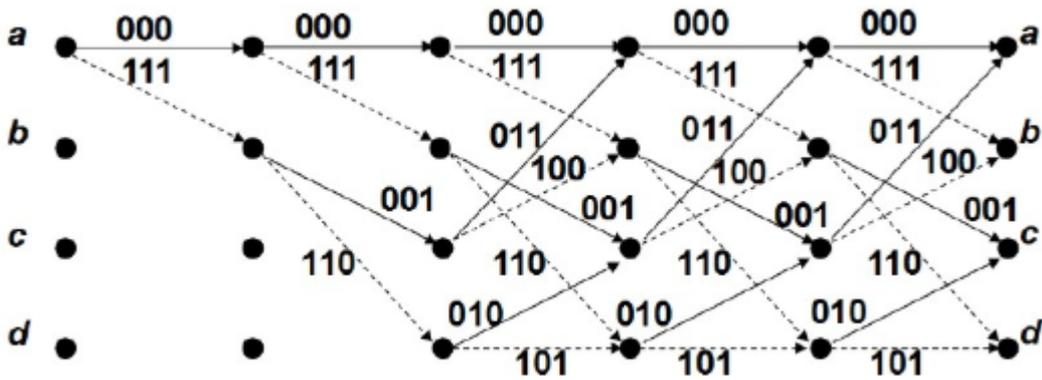


图 16-6 (3,1,3) 卷积码网格图

四、实验步骤

任务一 卷积码编码规则验证

概述：本任务通过观察并记录编码输入与输出波形，验证卷积码编码规则。

1、模块关电，按表格所示进行连线。

源端口	目的端口	连线说明
模块 2: BSOUT	模块 M02: TH2(编码输入-时钟)	提供编码位时钟
模块 2: Dout	模块 M02: TH1(编码输入-数据)	编码信号输入
模块 2: TH10(帧头指示)	模块 M02: TH3(辅助观测-帧头指示)	提供编码帧头

2、模块开电，设置主控菜单，选择【主菜单】→【通信原理】→【(3, 1, 3) 卷积编译码】→【误码设置】→【无误码】。

(1) 将 2 号模块的拨码开关 S1^{2#} 拨为 10100100，拨码开关 S2^{2#}、S3^{2#}、S4^{2#} 均拨为 00000000。

3、此时系统初始状态为：2 号模块提供 32K 编码输入数据和 32bit 为周期的帧信号，送入 M02 号模块进行卷积编码，编码速率为 32K，插错模式为无插错模式。

4、实验操作及波形观测。

(1) 用示波器分别接 M02 号模块的输入数据 TH1 和卷积编码输出数据 TH5，以 TH1 作为触发源，观察卷积编码输出。

注：可以以帧同步 TP2 为触发源观测编码输出码型，此时以帧同步上升沿为触发。

(2) 改变 2 号模块的拨码开关，观测不同码型下的卷积编码输出波形。

任务二 卷积码检纠错性能检验

概述：本任务通过插入不同个数不同位置的误码，观察译码结果与输入信号验证卷积码的检纠错能力。

1、模块关电，保持任务一连线不变，继续按表格所示进行连线。

源端口	目的端口	连线说明
模块 M02: TH5(编码输出-编码数据)	模块 M02: TH7(译码输入-数据)	送入译码
模块 M02: TH6(编码输出-时钟)	模块 M02: TH8(译码输入-时钟)	译码时钟

2、模块开电，设置主控菜单，选择【主菜单】→【通信原理】→【(3, 1, 3) 卷积编译码】→【误码设置】→【无误码】。

3、此时系统初始状态为：输入数据为 32K，通过 M02 号模块做卷积编译码，编码速率为 32K，无插错模式。

4、实验操作及波形观测。

(1) 对比观测模块 M02 的编码输入数据 TH1 与译码输出 TH10，验证卷积编译码功能。

(2) 选择【插入 1 个误码】。对比观测译码结果与输入信号，验证卷积码的纠错能力。

(3) 分别对比观测插错指示与误码指示，验证卷积码的检错能力。

注：以插错指示为触发，观测编码输出波形，可以观测插错位置；以误码指示为触发，观测延时输出 2 波形，可以观测检错位置。

(4) 在主控菜单上选择插入不同错码。重复步骤 (2) (3)，验证卷积码的检纠错能力。

(5) 将示波器触发源通道接 TP2 帧同步信号，示波器另外一个通道接 TP1 插错指示，可以观测插错的位置。

五、实验报告

- 1、结合实验波形分析实验电路的工作原理，简述其工作过程；
- 2、分析卷积码实现检错及纠错的原理。

实验十七 交织及解交织实验

一、实验目的

- 1、 掌握交织的特性；
- 2、 交织产生的原理及方法；
- 3、 掌握交织对译码性能的影响；

二、实验器材

- | | |
|-------------|----|
| 1、 主控&信号源模块 | 一块 |
| 2、 M02 模块 | 一块 |
| 3、 双踪示波器 | 一台 |
| 4、 连接线 | 若干 |

三、实验原理

1、 实验原理框图

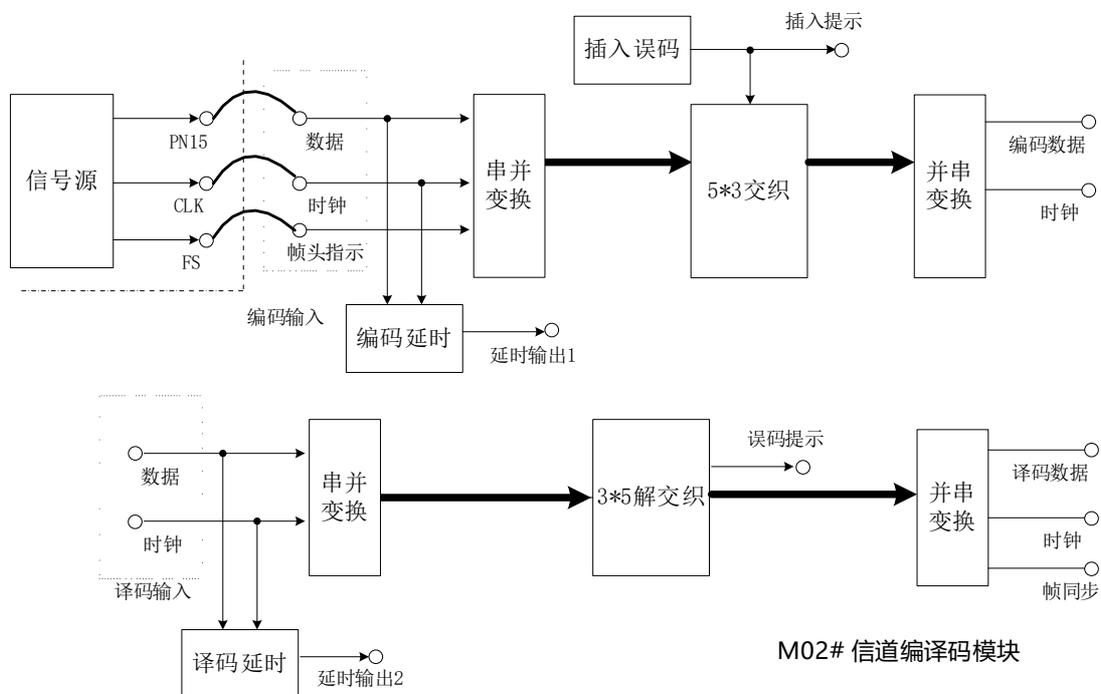


图 17-1 卷积交织及解交织实验框图

2、 实验原理说明

当移动通信信道出现深衰落时，数字信号的传输可能出现成串的突发差错。一般的差错编码（如卷积码）只能纠正有限个错误，对于大量的突发误码无能为力。通信系统采用交织编码和卷积码结合的方式来纠正突发差错。交织的目的是把一个较长的突发差错离散成随机差错，使得纠错编码技术更容易纠正。

常用的交织技术主要有两类：块交织和卷积交织。块交织通常在数据分块分帧的情况下使用，卷积交织对连续的数据流来说比较使用。在码分多址系统中，基于数据分帧的情况采用了块交织的形式，所以这里我们仅介绍块交织的有关内容。

描述交织器性能的几个参数如下：

- ① 突发长度：突发错误的长度，用 B 表示。
- ② 最小间隔：突发连续错误分布的最小距离，用 S 表示。
- ③ 交织时延：由于交织和解交织引起的编码时延，用 D 表示。
- ④ 存储要求：交织或解交织过程需要的存储单元的大小，用 M 表示

交织器的性能通常用 S/D 以及 S/M 来描述，最小间隔 S 越大越好，交织时延 D 和存储要求 M 越小越好

交织器的实现框图如图 17-2 所示

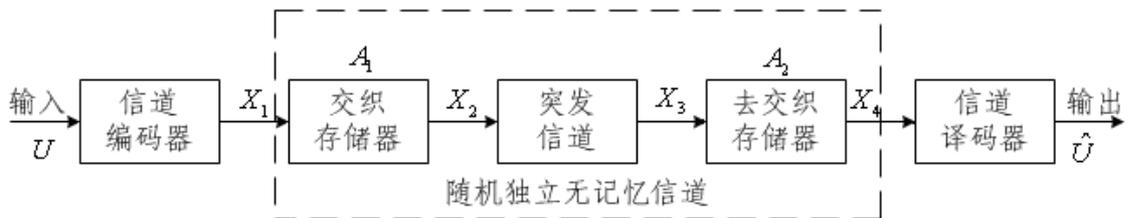


图17-2 分组（块）交织器实现框图

由图17-2可见，交织、解交织由如下几步构成：

- (1)若发送数据（块） U 经信道编码后为： $X_1 = (0\ 1\ 2\ \dots\ 14)$ ；
- (2)发送端交织存储器为一个行列交织矩阵存储器 A_1 ，它按行写入，按行读出，即

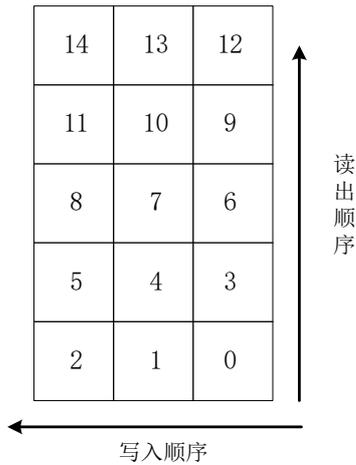


图17-3 交织器

(3)交织器输出后并送入突发信道的信号为

$$X_2 = (0\ 3\ \dots\ 11\ 14) \quad (1)$$

(4)假设在突发信道中受到两个突发干扰：第一个突发干扰影响5位，即产生于0至12；第二个突发干扰影响4位，即产生于13至8。则突发信道的输出端信号 可以表示为

$$X_3 = (0' \ 3' \ 6' \ 9' \ 12' \ 14\ \dots\ 13' \ 2' \ 5' \ 8' \ 11\ 14) \quad (2)$$

(5)在接收端，将受突发干扰的信号送入解交织器，解交织器也是一个行列交织矩阵的存储器A2，它是按列写入，按行读出（正好与交织矩阵规律相反），即

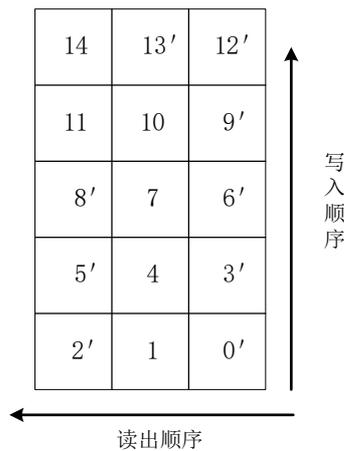


图17-4 解交织器

(6)经解交织存储器解交织以后的输出信号X4，则X4为

$$X_4 = (0' \ 12' \ 3' \ 4\ 5' \ 6' \ 7\ 8' \ 9' \ 10\ 11\ 12' \ 13' \ 14) \quad (3)$$

可见，由上述分析，经过交织矩阵和解交织矩阵变换后，原来信道中的突发性连错，即两个突发一个连错5位、另一个连错4位却变成了X4输出中的随机独立差错。

从交织器实现原理来看，一个实际上的突发信道，经过发送端交织器和接收端解交织器的信息处理后，就完全等效成一个随机独立差错信道，正如图中虚线方框所示。所以从原理上看，信道交织编码实际上就是一类信道改造技术，它将一个突发信道改造成一个随机独立差错信道。它本身并不具备信道编码检、纠错功能，仅起到信号预处理的作用。

我们可以将上述一个简单的 5×3 矩阵存储交织器的例子推广到一般情况。若分组（块）长度为： $I=I*J$ ，即由 I行J列的矩阵构成。其中交织矩阵存储器是按行写入、列读出，而解交织矩阵存储器是按相反的顺序按列写入、行读出，正是利用这种行、列顺序的倒换，可以将实际的突发信道变换成等效的随机独立差错信道。

矩阵中行的数目称为交织深度。交织深度越大，符号的离散性就越大，抗突发差错的能力也越强。但是，交织深度越大，交织编码的处理时间即交织时延也越长，所以说，交织编码的抗突发能力是以时间为代价的。

两个突发错误之间的最小间隔满足下式：

$$S = \begin{cases} J & B \leq I \\ 1 & B > I \end{cases} \quad (4)$$

交织器的最小间隔可以通过改变读出行的顺序来改变，但交织时延和存储要求不随读出的顺序改变而改变，但交织时延和存储要求不随读出的顺序的改变而改变。

因为交织和解交织均有时延，所以交织器的交织时延为： $D=2IJ/Rc$ ，其中Rc为符号速率。交织器的存储要求为： $M=2IJ$ 。

交织编码的主要缺点是：在交织和解交织过程中，会产生 $2IJ$ 个符号的附加处理时延，这对实时业务，特别是语音业务将带来很不利的影响。所以对于语音等实时业务应用交织编码时，交织器的容量即尺寸不能取得太大。

交织器的改进主要是处理附加时延大及由于采用某种固定形式的交织方式就有可能产生很特殊的相反效果，即存在能将一些独立随机差错交织为突发差错的可能性。为了克服以上两个主要缺点，人们研究了不少有效措施，如采用卷积交织器和伪随机交织器等。

四、实验步骤

任务一 交织规则验证

概述：本任务通过观察并记录编码输入与交织输出波形，验证交织编码规则。

1、模块关电，按表格所示进行连线。

源端口	目的端口	连线说明
信号源：CLK	模块 M02：TH2(编码输入-时钟)	提供编码位时钟
信号源：PN	模块 M02：TH1(编码输入-数据)	编码信号输入
信号源：FS	模块 M02：TH3(辅助观测-帧头指示)	提供编码帧头
模块 M02：TH5(编码输出-编码数据)	模块 M02：TH7(译码输入-数据)	送入译码
模块 M02：TH6(编码输出-时钟)	模块 M02：TH8(译码输入-时钟)	提供时钟

2、模块开电，设置主控菜单，选择【主菜单】→【通信原理】→【交织及解交织】。

3、此时系统初始状态为：编码输入信号为 32Kbps，帧信号为 FS3，送入 M02 号模块进行交织，这里采用的是 5*3 交织器。

4、实验操作及波形观测。

(1) 用示波器观测编码输入数据 TH1^{M02#}，读出并记录 15 位 PN 序列码型。

注：可以以 TH3 处帧头指示为触发，观测 PN 序列的码型，以帧头指示上升沿为触发。

(2) 用示波器分别接输入数据 TH1^{M02#}和交织输出数据 TH5^{M02#}，以 TH1 作为触发源，观察交织输出。

注：可以以 TP2 处帧同步为触发，观测编码输出码型，以帧同步上升沿为触发进行观测。

(3) 对比观测模块 M02 的编码输入数据 TH1 与译码输出 TH10，验证交织和解交织功能。

五、实验报告

1、分析实验电路的工作原理，简述其工作过程；

2、分析交织原理；

3、分析交织对译码性能的影响。

第五章 同步技术

实验十八 滤波法及数字锁相环法位同步提取实验

一、实验目的

- 1、掌握滤波法提取位同步信号的原理及其对信息码的要求。
- 2、掌握用数字锁相环提取位同步信号的原理及其对信息代码的要求。
- 3、掌握位同步器的同步建立时间、同步保持时间、位同步信号同步抖动等概念。

二、实验器材

- | | |
|------------------|-----|
| 1、主控&信号源、13、8号模块 | 各一块 |
| 2、双踪示波器 | 一台 |
| 3、连接线 | 若干 |

三、实验原理

1、滤波法位同步提取实验原理框图

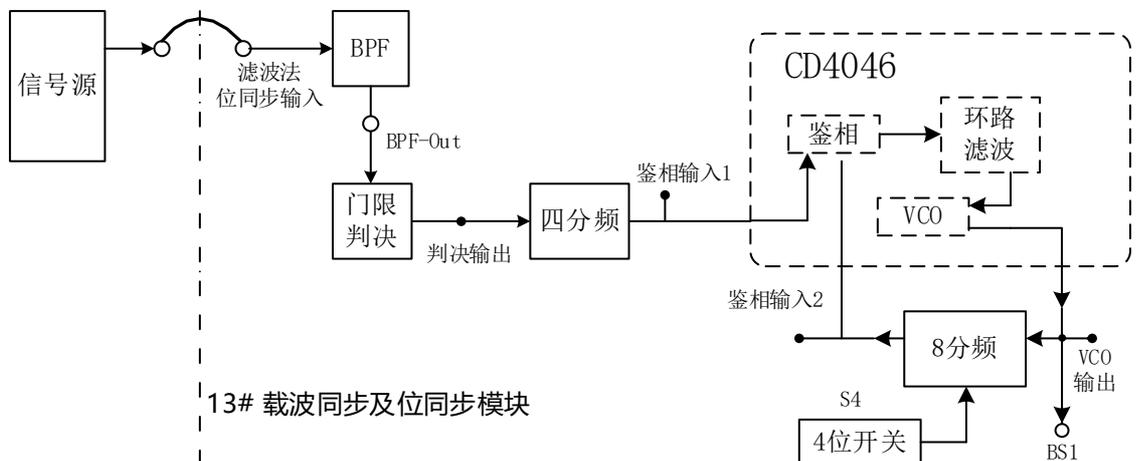


图18-1 滤波法位同步提取实验框图

2、滤波法位同步提取实验框图说明

将单刀双掷开关S2上拨，选择滤波法位同步提取电路，输入HDB3单极性码信号经一个256K窄带滤波器，滤出同步信号分量，通过门限判决后提取位同步信号。但由于有其他频率成分的干扰，导致时钟有些部分的占空比不为50%，因此需要通过模拟锁相环进行平滑处理；数字的256K时钟经过4分频之后，已经得到一定的平滑效果，送入CD4046鉴相输入A脚的是

64KHz的时钟信号，当CD4046处于同步状态时，鉴相器A脚的时钟频率及相位应该与鉴相器B脚的相同。由于鉴相器B脚的时钟是VCO经8分频得到的。因此，VCO输出的频率为512K。

3、数字锁相环法位同步提取实验原理框图（框图中NCO同下文DCO，均为数控振荡器）

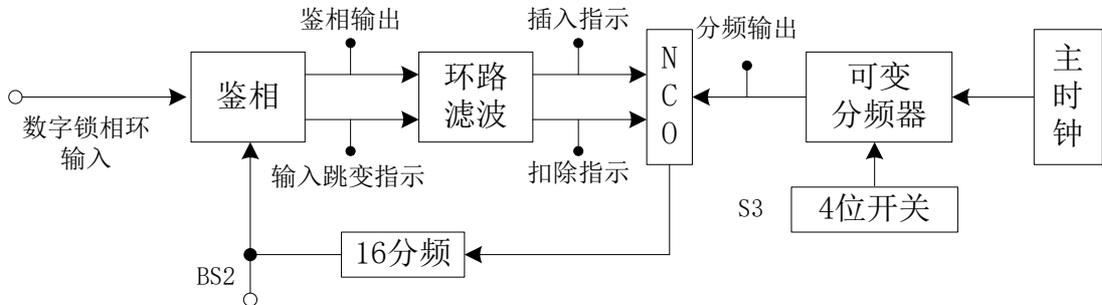


图18-2 数字锁相环位同步提取实验原理框图

4、数字锁相环法位同步提取实验框图说明

锁相法位同步提取是在接收端利用锁相环电路比较接收码元和本地产生的位同步信号的相位，并调整位同步信号的相位，最终获得准确的位同步信号。4位拨码开关S3设置BCD码控制分频比，从而控制提取的位同步时钟频率，例如设置分频频率“0000”输出4096KHz频率，“0011”输出512KHz频率，“0100”输出256KHz频率，“0111”输出32KHz频率。。

数字锁相环(DPLL)是一种相位反馈控制系统。它根据输入信号与本地估算时钟之间的相位误差对本地估算时钟的相位进行连续不断的反馈调节，从而达到使本地估算时钟相位跟踪输入信号相位的目的。DPLL 通常有三个组成模块：数字鉴相器(DPD)、数字环路滤波器(DLF)、数控振荡器(DCO)。根据各个模块组态的不同， DPLL 可以被划分出许多不同的类型。根据设计的要求，本实验系统采用超前滞后型数字锁相环(LL-DPLL)作为解决方案。在LL-DPLL中，DLF 用双向计数逻辑和比较逻辑实现，DCO 采用“加”、“扣”脉冲式数控振荡器。这样设计出来的DPLL具有结构简洁明快，参数调节方便，工作稳定可靠的优点。DPLL实现框图如下：

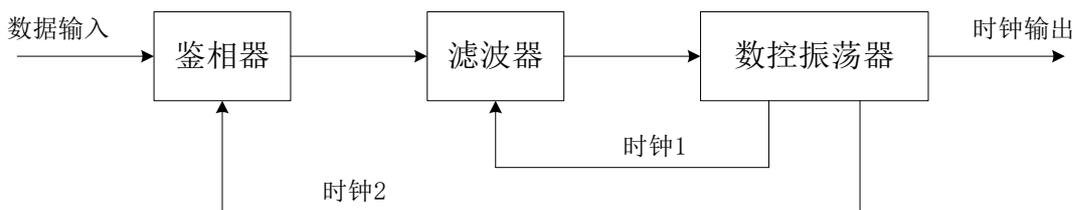


图18-3 数字锁相环框图

下面就对数字锁相环的各个组成模块的详细功能、内部结构以及对外接口信号进行说明

①超前—滞后型数字鉴相器

与一般DPLL 的DPD的设计不同，位同步DPLL 的DPD需要排除位流数据输入连续几位码值保持不变的不利影响。LL-DPD为二元鉴相器，在有效的相位比较结果中仅给出相位超前或相位滞后两种相位误差极性，而相位误差的绝对大小固定不变。LL-DPD通常有两种实现方式：微分型LL-DPD和积分型LL-DPD。积分型LL-DPD具有优良的抗干扰性能，而它的结构和硬件实现都比较复杂。微分型LL-DPD 虽然抗干扰能力不如积分型LL-DPD，但是结构简单，硬件实现比较容易。本实验采用微分型LL-DPD，将环路抗噪声干扰的任务交给DLF模块负责。

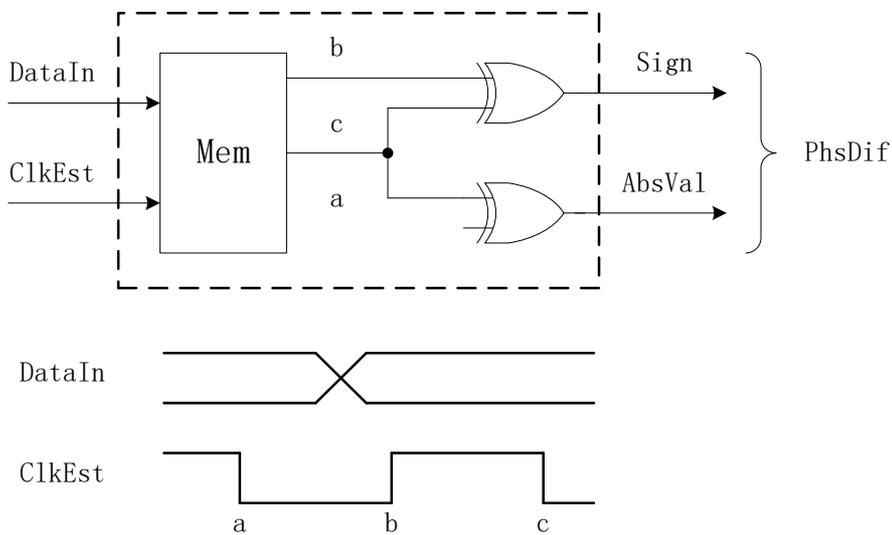


图18-4 LL-DPD模块内部结构与对外接口信号

如图所示，LL-DPD在ClkEst跳变沿(含上升沿和下降沿)处采样DataIn上的码值，寄存在Mem中。在ClkEst下降沿处再将它们对应送到两路异或逻辑中，判断出相位误差信息并输出。Sign 给出相位误差极性，即ClkEst相对于DataIn是相位超前(Sign=1)还是滞后(Sign=0)。AbsVal 给出相位误差绝对值：若前一位数据有跳变，则判断有效，以AbsVal输出1表示；否则，输出0表示判断无效。下图显示了LL-DPD模块的仿真波形图。

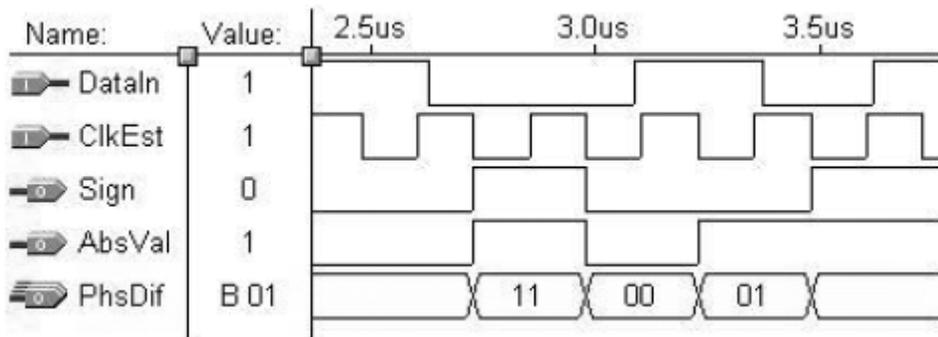


图18-5 LL-DPD模块输入输出关系仿真波形图

②数字环路滤波器(DLF)

DLF用于滤除因随机噪声引起的相位抖动，并生成控制DCO 动作的控制指令。本实验实现的DLF内部结构及其对外接口信号如下图所示。

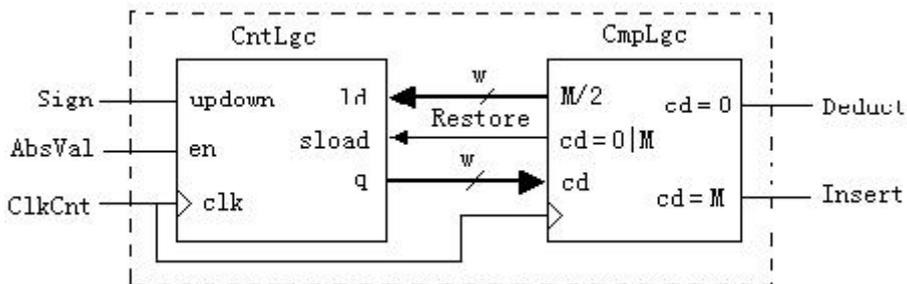


图18-6 DLF模块内部结构与对外接口信号

滤波功能用加减计数逻辑CntLgc实现，控制指令由比较逻辑CmpLgc生成。在初始时刻，CntLgc被置初值M/2。前级LL-DPD模块送来的相位误差PhsDif在CntLgc中作代数累加。在计数值达到边界值0或M后，比较逻辑CmpLgc将计数逻辑CntLgc同步置回M/2，同时相应地在Deduct或Insert引脚上输出一高脉冲作为控制指令。随机噪声引起的LL-DPD相位误差输出由于长时间保持同一极性的概率极小，在CntLgc中会被相互抵消，而不会传到后级模块中去，达到了去噪滤波的目的。计数器逻辑CntLgc的模值M 对DPLL的性能指标有着显著地影响。加大模值M，有利于提高DPLL的抗噪能力，但是会导致较大的捕捉时间和较窄的捕捉带宽。减小模值M 可以缩短捕捉时间，扩展捕捉带宽，但是降低了DPLL的抗噪能力。根据理论分析和调试实践，确定M为1024，图中计数器数据线宽度w可以根据M确定为10。

③数控振荡器(DCO)

DCO 的主要功能是根据前级DLF 模块输出的控制信号Deduct 和Insert 生成本地估算时钟 ClkEst，这一时钟信号即为DPLL恢复出来的位时钟。同时，DCO还产生协调DPLL内各模块工作的时钟，使它们能够协同动作。要完成上述功能，DCO 应有三个基本的组成部分：高速振荡器(HsOsc)、相位调节器(PhsAdj)、分频器(FnqDvd)，如下图所示。

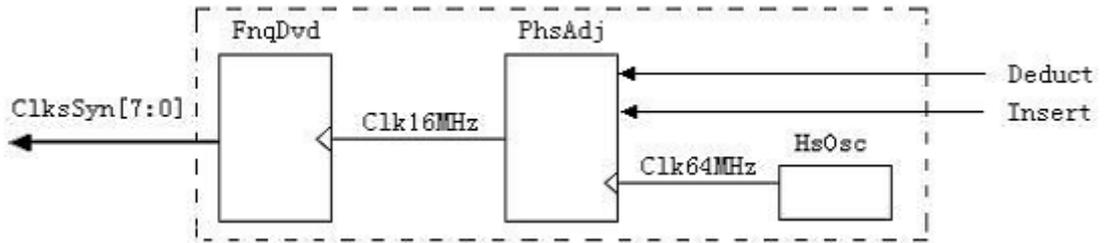


图18-7 DCO模块内部结构与对外接口信号

高速振荡器(HsOsc)提供高速稳定的时钟信号Clk，该时钟信号有固定的时钟周期，周期大小即为DPLL 在锁定状态下相位跟踪的精度，同时，它还影响DPLL 的捕捉时间和捕捉带宽。考虑到DPLL 工作背景的要求，以及尽量提高相位跟踪的精度以降低数据接收的误码率，取HsOsc输出信号Clk频率为所需提取位时钟信号的16倍。若取HsOsc输出信号Clk64MHz的周期为15.625ns，即高速振荡器HsOsc的振荡频率为64MHz。

PhsAdj在控制信号Deduct和Insert上均无高脉冲出现时，仅对Osc输出的时钟信号作4分频处理，从而产生的Clk16MHz时钟信号将是严格16MHz 的。当信号Deduct 上有高脉冲时，在脉冲上升沿后，PhsAdj会在时钟信号Clk16MHz的某一周期中扣除一个Clk64MHz时钟周期，从而导致Clk16MHz时钟信号相位前移。当在信号Insert 上有高脉冲时，相对应的处理会导致Clk16MHz时钟信号相位后移。下图为相位调节器单元经功能编译仿真后的波形图。

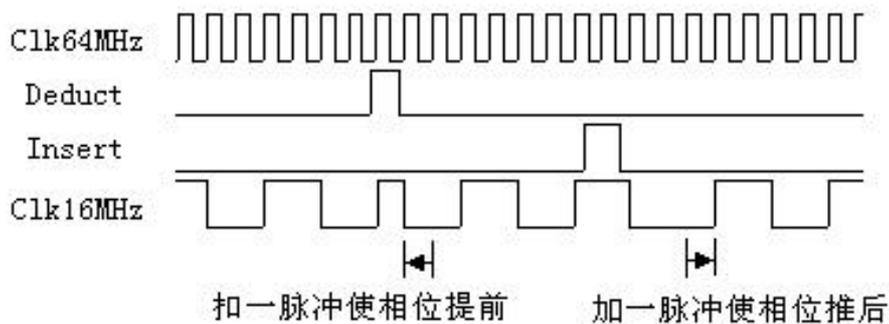


图18-8 DCO模块相位调节器PhsAdj单元输入输出关系

引入分频器FnqDvd的目的主要是为DPLL中DLF模块提供时钟控制，协调DLF与其它模块的动作。分频器FnqDvd用计数器实现，可以提供多路与输入位流数据有良好相位同步关系的时钟信号。在系统中，分频器FnqDvd提供8路输出ClksSyn[7..0]。其中，ClksSyn1即为本地估算时钟ClkEst，也即恢复出的位时钟；ClksSyn0即为DLF模块的计数时钟ClkCnt，其速率是ClkEst的两倍，可以加速计数，缩短DPLL 的捕捉时间，并可扩展其捕捉带宽。

四、实验步骤

任务一 滤波法位同步电路带通滤波器幅频特性测量

概述：该任务是通过改变输入信号的频率，观测信号经滤波后对应输出幅度，从而了解并绘制滤波器的幅频特性。

- 1、模块关电，按表格所示进行连线。

源端口	目的端口	连线说明
信号源：A-OUT	模块 13：TH3(滤波法位同步输入)	基带传输信号输入

- 2、模块开电，设置主控，选择【信号源】→【输出波形】。设置输出波形为正弦波，调节相应旋钮，使其输出频率为 200KHz，峰峰值 3V。

- 3、此时系统初始状态为：输入信号为频率 200KHz、幅度 3V 的正弦波。

- 4、实验操作及波形观测。

分别观测 13 号模块的“滤波法位同步输入”和“BPF-Out”，改变信号源的频率，测量“BPF-Out”的幅度填入下表，并绘制幅频特性曲线。

频率 (KHz)	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300
幅度(V)											

任务二 滤波法位同步恢复观测

概述：该任务是通过比较和观测滤波法位同步电路中各点幅度及相位，探讨滤波法位同步的提取原理以及影响因素。

- 1、模块关电，按表格所示进行连线。

源端口	目的端口	连线说明
信号源: PN	模块 8: TH3(编码输入-数据)	基带传输信号输入
信号源: CLK	模块 8: TH4(编码输入-时钟)	提供编码位时钟
模块 8: TH5(单极性码)	模块 13: TH3(滤波法位同步输入)	滤波法位同步时钟提取
模块 13: TH4(BS1)	模块 8: TH9(译码时钟输入)	提供译码位时钟
模块 8: TH1(HDB3 输出)	模块 8: TH7(HDB3 输入)	将编码信号送入译码

2、模块开电，设置主控菜单，选择【信号源】→【通信原理】→【滤波法及数字锁相环位同步法提取】。将 13 号模块 S2 拨上。将 S4 拨为 1000。

3、此时系统初始状态为：输入 PN 为 256K。

4、实验操作及波形观测。

(1) 以“BPF-Out”为触发，观测“门限判决输出”，记录波形。

思考：分析在什么情况下门限判决输出的时钟会不均匀，为什么？

(2) 以“BPF-Out”为触发，观测“鉴相输入 1”，记录波形。

(3) 对比“门限判决输出”和“鉴相输入 1”的波形。

思考：分析时钟不均匀的情况是否有所改善。

(4) 对比观测“鉴相输入 1”和“鉴相输入 2”，记录波形。比较两路波形的幅度和相位。

(5) 对比观测“滤波法位同步输入”和“BS1”，观测恢复的位同步信号。

任务三 数字锁相环法位同步观测

概述：该任务是通过比较和观测数字锁相环位同步电路中各点相位超前、延时以及抖动情况，探讨数字锁相环法位同步的提取原理。

1、模块关电，按表格所示进行连线。

源端口	目的端口	连线说明
信号源: PN	模块 13: 数字锁相环输入	基带传输信号输入

2、模块开电，设置主控菜单，选择【信号源】→【通信原理】→【滤波法及数字锁相环位同步法提取】。将 13 号模块的 S3 拨为 0100。

3、此时系统初始状态为：PN 码速率 256K。

4、实验操作及波形观测。

(1) 观测 13 模块的“数字锁相环输入”和“输入跳变指示”。观测当“数字锁相环输入”没有跳变和有跳变时“输入跳变指示”的波形。

(2) 观测 13 模块的“数字锁相环输入”和“鉴相输出”。观测相位超前滞后的情况。

(3) 观测 13 模块的“插入指示”和“扣除指示”。

思考：分析波形有何特点，为什么出现这种情况。

(4) 以信号源模块的“CLK”为触发，观测 13 号模块的“BS2”。

思考：BS2 恢复的时钟是否有抖动的情况，为什么？试分析 BS2 抖动的区间有多大？如何减小这个抖动的区间？

五、实验报告

1、对实验思考题加以分析，按照要求做出回答，并尝试画出本实验的电路原理图。

2、结合实验波形分析数字锁相环原理。

实验十九 模拟锁相环实验

一、实验目的

- 1、了解模拟锁相环的工作原理。
- 2、掌握模拟锁相环的参数意义及测试方法。
- 3、掌握锁相频率合成的原理及设计方法。

二、实验器材

- | | |
|-----------------|-----|
| 1、 主控&信号源、13号模块 | 各一块 |
| 2、 双踪示波器 | 一台 |
| 3、 连接线 | 若干 |

三、实验原理

采用CD4046完成模拟锁相环功能。

四、实验步骤

任务一 VCO 自由振荡观测

概述：该任务是通过对比观测锁相环输入信号和 VCO 输出信号，了解 VCO 自由振荡输出频率。

- 1、模块关电，将主控&信号源模块 CLK 输出连接到 13 号模块模拟锁相环输入。
- 2、实验初始状态设置：将 13 号模块 S4 拨为“0001”，S2 拨下至频率合成。
- 3、实验初始状态说明：模拟锁相环输入信号 256K 时钟
- 4、实验现象的观测：示波器 CH1 通道接 13 号模块 TH8，CH2 通道接 TH4 输出，对比

观测输入及输出波形。

任务二 同步带测量

概述：该任务是通过改变输入信号的频率，测量锁相环的同步带，了解模拟锁相环的同步带工作原理。

- 1、将主控&信号源模块 A-OUT 输出连接到 13 号模块模拟锁相环输入。
- 2、将 13 号模块 S4 拨为“0001”。调节【信号源】，使【输出波形】为正弦波，【输出频率】为 1KHz，调节 A-OUT 幅度旋钮 W1，使 A-OUT 输出 3V。

3、用示波器 CH1 通道接 13 号模块 TH8 模拟锁相环输入，CH2 通道接 TH4 输出 BS1，观察 TH4 输出处于锁定状态。选择适当步进，将正弦波频率调小直到输出波形失锁，记下此时频率大小为 f_1 ；将频率调大，直到 TH4 输出处于失锁状态，记下此时频率 f_2 。

任务三 捕捉带测量

概述：该任务是通过改变输入信号的频率，测量锁相环的捕捉带，了解模拟锁相环的捕捉带工作原理。

1、保持任务二的连线不变。

2、将 13 号模块 S4 拨为“0001”。调节【信号源】，使【输出波形】为正弦波，【输出频率】为 10Hz，【调节步进】为 10Hz。

3、将示波器 CH1 通道接 13 号模块 TH8，CH2 通道接 TH4 输出，观察 TH4 输出处于失锁状态。将频率调大直到输出波形锁定，记下此时频率大小为 f_3 ；将 S4 拨为 1000，调节信号源输出频率为 200KHz，步进为 1KHz，慢慢减小输入频率，直到 TH4 输出处于锁定状态，记下此时频率 f_4 。

任务四 锁相频率合成

概述：该任务是通过设置分频器的分频比，测量锁相环的锁相输出频率，了解锁相频率合成的工作原理。

1、保持任务二的连线不变。

2、将 13 号模块 S4 拨为“0001”。调节【信号源】，使【输出波形】为方波，【输出频率】为 1KHz。

3、用示波器 CH1 通道接 13 号模块 TH8，CH2 通道接 TH4 输出，观察 TH4 输出频率。拨动 S4 开关，观测 TH4 输出与 TH8 输入之间的关系。

五、实验报告

1、分析实验电路的工作原理，简述其工作过程；

2、结合实验波形分析模拟锁相环原理。

实验二十 载波同步实验

一、实验目的

- 1、 掌握用科斯塔斯环提取载波的实现方法。
- 2、 了解相干载波相位模糊现象的产生原因。

二、实验器材

- | | |
|--------------------|-----|
| 1、 主控&信号源、9号、13号模块 | 各一块 |
| 2、 双踪示波器 | 一台 |
| 3、 连接线 | 若干 |

三、实验原理

1、 实验原理框图

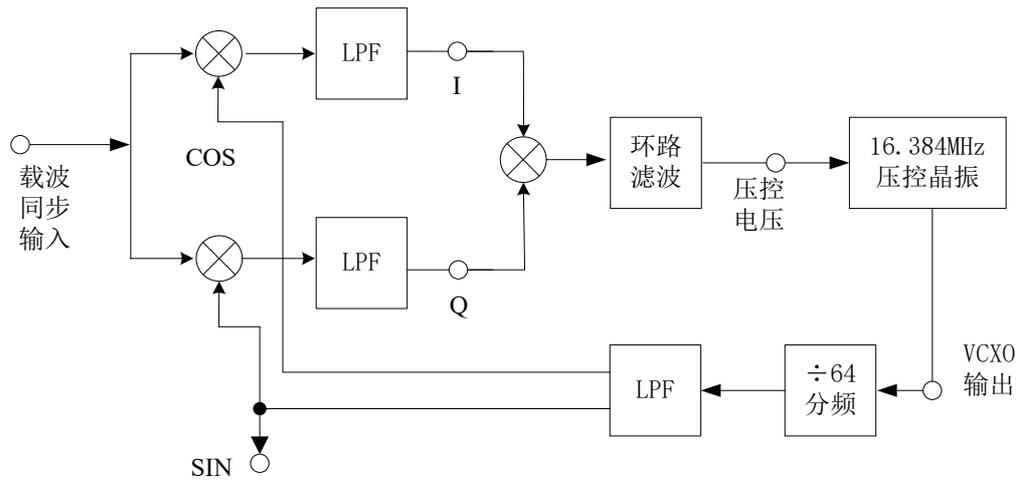


图20-1 载波同步实验框图

2、 实验框图说明

科斯塔斯环又称同相正交环，其原理框图如下图：

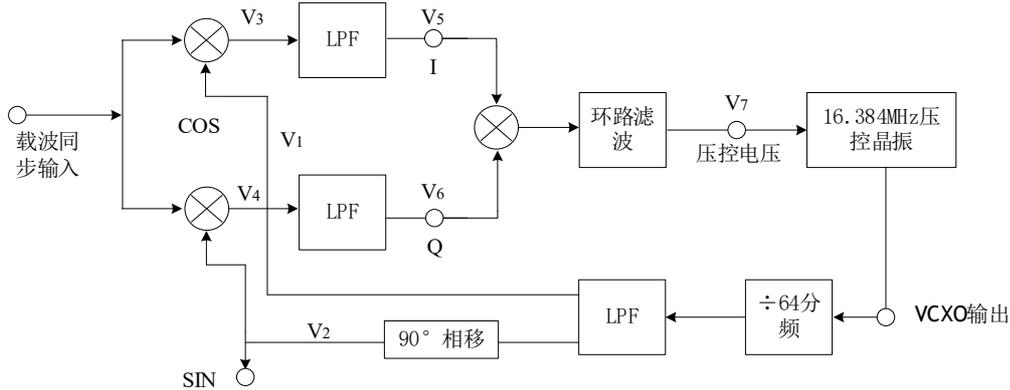


图 20-2 科斯塔斯环原理框图

在科斯塔斯环环路中，误差信号（压控电压 V_7 ）是由低通滤波器及两路相乘提供的。压控振荡器输出信号直接供给一路相乘器，供给另一路的则是压控振荡器输出经 90° 移相后的信号。两路相乘器的输出均包含有调制信号，两者相乘以后可以消除调制信号的影响，经环路滤波器得到仅与压控振荡器输出和理想载波之间相位差有关的控制电压，从而准确地对压控振荡器进行调整，恢复出原始的载波信号。

现在从理论上对科斯塔斯环的工作过程加以说明。设输入调制信号为 $m(t)\cos\omega_c t$ ，则

$$v_3 = m(t)\cos\omega_c t \cos(\omega_c t + \theta) = \frac{1}{2}m(t)[\cos\theta + \cos(2\omega_c t + \theta)] \quad (1)$$

$$v_4 = m(t)\cos\omega_c t \sin(\omega_c t + \theta) = \frac{1}{2}m(t)[\sin\theta + \sin(2\omega_c t + \theta)] \quad (2)$$

经低通滤波器后的输出分别为：

$$v_5 = \frac{1}{2}m(t)\cos\theta \quad (3)$$

$$v_6 = \frac{1}{2}m(t)\sin\theta \quad (4)$$

将 v_5 和 v_6 在相乘器中相乘，得，

$$v_7 = v_5 v_6 = \frac{1}{8}m^2(t)\sin 2\theta \quad (5)$$

式（5）中 θ 是压控振荡器输出信号与输入信号载波之间的相位误差，当 θ 较小时，

$$v_7 \approx \frac{1}{4} m^2(t) \theta \quad (6)$$

式（6）中的 v_7 大小与相位误差 θ 成正比，它就相当于一个鉴相器的输出。用 v_7 去调整压控振荡器输出信号的相位，最后使稳定相位误差减小到很小的数值。这样压控振荡器的输出就是所需提取的载波。

载波同步系统的主要性能指标是高效率和高精度。所谓高效率就是为了获得载波信号而尽量少消耗发送功率。用直接法提取载波时，发端不专门发送导频，因而效率高；而用插入导频法时，由于插入导频要消耗一部分功率，因而系统的效率降低。所谓高精度，就是提取出的载波应是相位尽量准确的相干载波，也就是相位误差应该尽量小。相位误差通常由稳态相差和随机相差组成。稳态相差主要是指载波信号通过同步信号提取电路一后，在稳态下所引起的相差；随机相差是由于随机噪声的影响而引起同步信号的相位误差。相位误差对双边带信号解调性能的影响只是引起信噪比下降，对残留边带信号和单边带信号来说，相位误差不仅引起信噪比下降，而且还引起信号畸变。

载波同步系统的性能除了高效率、高精度外，还要求同步建立时间快、保持时间长等。

四、实验步骤

任务一 载波同步

概述：本任务是利用科斯塔斯环法提取BPSK调制信号的同步载波，通过调节压控晶振的压控偏置电压，观测载波同步情况并分析。

1、模块关机，按表格所示进行连线。

源端口	目的端口	连线说明
信号源：PN	模块 9：TH1(基带信号)	调制信号输入
信号源：256KHz	模块 9：TH14(载波 1)	载波 1 输入
信号源：256KHz	模块 9：TH3(载波 2)	载波 2 输入
模块 9：TH4(调制输出)	模块 13：TH2(载波同步输入)	信号输入同步模块

2、模块开机，设置主控菜单，选择【主菜单】→【通信原理】→【BPSK/DBPSK 数字

调制解调】。将 9 号模块的 S1 拨为 0000，调节信号源模块的 W3 使 256K 载波信号的峰峰值为 3V。

3、此时系统初始状态为：PN 序列输出频率 32KHz。

4、实验操作及波形观测。

对比观测信号源“256K”和 13 号模块的“SIN”，调节 13 号模块的压控偏置调节电位器，观测载波同步情况。

五、实验报告

- 1、对实验思考题加以分析，按照要求做出回答，并尝试画出本实验的电路原理图。
- 2、结合实验波形熟悉科斯塔斯环原理。

实验二十一 帧同步提取实验

一、实验目的

- 1、掌握巴克码识别原理。
- 2、掌握同步保护原理。
- 3、掌握假同步、漏同步、捕捉态、维持态的概念。

二、实验器材

- | | |
|----------------|-----|
| 1、 主控&信号源、7号模块 | 各一块 |
| 2、 双踪示波器 | 一台 |
| 3、 连接线 | 若干 |

三、实验原理

1、实验原理框图

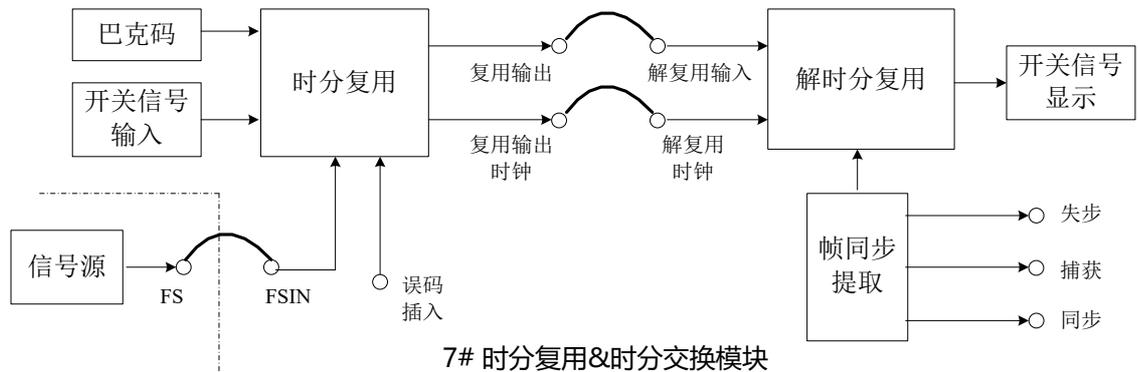


图 21-1 帧同步提取实验框图

2、实验原理说明

数字通信时，一般总是以一定数目的码元组成一个个的“字”或“句”，即组成一个个的“群”进行传输，因此群同步信号的频率很容易由于位同步信号经分频而得出，但是每群的开头和末尾时刻却无法由分频器的输出决定。群同步的任务就是要给出这个“开头”和“末尾”的时刻。群同步有时也称为帧同步。为了实现群同步，通常有两类方法：一类是在数字信息流中插入一些特殊码组作为每群的头尾标记，接收端根据这些特殊码组的位置就可以实现群同步；另一类方法不需要外加的特殊码组，它类似于载波同步和位同步中的直接法，利

用数据码组本身之间彼此不同的特性来实现同步。我们将主要讨论用插入特殊码组实现群同步的方法。

插入特殊码组实现群同步的方法有两种，即连贯式插入法和间隔式插入法。

(1) 连贯式插入法

连贯式插入法就是在每帧数据开头集中插入特定码型的帧同步码组，这种帧同步法只适用于同步通信系统，需要位同步信号才能实现。适合做帧同步码的特殊码组很多，对帧同步码组的要求是它们的自相关函数尽可能尖锐，便于从随机数字信息序列中识别出这些帧同步码组，从而准确定位一帧数据的起始时刻。由于这些特殊码组 $\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ 是一个非周期序列或有限序列，在求它的自相关函数时，除了在时延 $j=0$ 的情况下，序列中的全部元素都参加相关运算外，在 $j \neq 0$ 的情况下，序列中只有部分元素参加相关运算，其表示式为

$$R(j) = \sum_{i=1}^{n-j} x_i x_{i+j} \tag{1}$$

通常把这种非周期序列的自相关函数称为局部自相关函数。对同步码组的另一个要求是识别器应该尽量简单。目前，一种常用的帧同步码组是巴克码。

巴克码是一种非周期序列。一个 n 位的巴克码组为 $\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ ，其中 x_i 取值为 $+1$ 或 -1 ，它的局部自相关函数为

$$R(j) = \sum_{i=1}^{n-j} x_i x_{i+j} = \begin{cases} n & j = 0 \\ 0 \text{ 或 } \pm 1 & 0 < j < n \\ 0 & j \geq n \end{cases} \tag{2}$$

目前已找到的所有巴克码组如表 21-1 所列。

表 21-1 巴克码组

n	巴克码组
2	++
3	++-
4	+++ -; +-+-
5	++++ -
7	+++++-

11	+++--+-
13	+++----+--+-
	+++++---++-+-+

以七位巴克码组{+++--+-}为例，求出它的自相关函数如下：

当 $j=0$ 时
$$R(j) = \sum_{i=1}^7 x_i^2 = 1+1+1+1+1+1+1=7$$

当 $j=1$ 时
$$R(j) = \sum_{i=1}^7 x_i x_{i+1} = 1+1-1+1-1-1=0$$

按式 (1) 可求出 $j=2, 3, 4, 5, 6, 7$ 时的 $R(j)$ 值分别为 $-1, 0, -1, 0, -1, 0$ ；另外，再求出 j 为负值时的自相关函数值，两者一起画在图 2 中。由图可见，其自相关函数在 $j=0$ 时出现尖锐的单峰。

巴克码识别器是比较容易实现的，这里也以七位巴克码为例，用 7 级移位寄存器、相加器和判决器就可以组成一识别器，如图 3 所示。当输入数据的“1”存入移位寄存器时，“1”端的输出电平为+1，而“0”端的输出电平为-1；反之，存入数据“0”时，“0”端的输出电平为+1，“1”端的输出电平为-1。各移位寄存器输出端的接法和巴克码的规律一致，这样识别器实际上就是对输入的巴克码进行相关运算。当七位巴克码在图 4 (a) 中的 t_1 时刻正好已全部进入了 7 级移位寄存器时，7 级移位寄存器输出端都输出+1，相加后得最大输出+7；若判别器的判决门限电平定为+6，那么就在七位巴克码的最后一位“0”进入识别器时，识别器输出一群同步脉冲表示一群的开头，如图 4 (b) 所示。

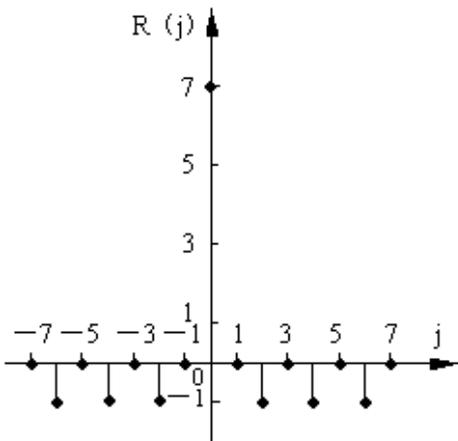


图 21-2 七位巴克码的自相关函数

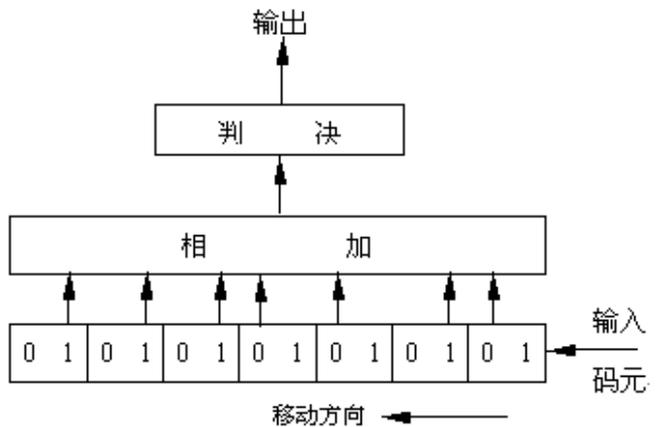


图 21-3 七位巴克码识别器

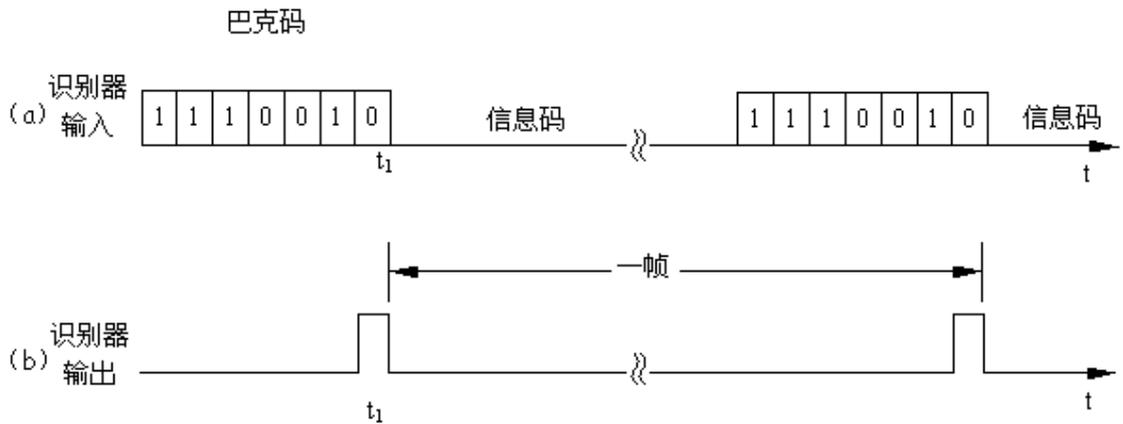


图 21-4 识别器的输出波形

帧同步系统要求建立时间很短，并且在帧同步建立后应有较强的抗干扰能力。通常用漏同步概率 P_1 、假同步概率 P_2 来衡量这些性能。这里，主要是分析集中插入法的性能。

①漏同步概率 P_1

由于干扰的影响会引起同步码组中的一些码元发生错误，从而使识别器漏识别已发出的同步码组。出现这种情况的概率就称为漏同步概率 P_1 。例如图 3 识别器的判决门限电平为 +6，若由于干扰，七位巴克码有一位错误，这时相加输出为 +5，小于判决门限，识别器漏识别了帧同步码组；若在这种情况下，将判决门限电平降为 +4，识别器就不会漏识别，这时判决器容许七位同步码组中有一个错误码元。现在就来计算漏同步概率：

设 p 为码元错误概率， n 为同步码组的码元数， m 为判决器容许码组中的错误码元最大数，则同步码组码元 n 中所有不超过 m 个错误码元的码组都能被识别器识别，因而，未漏概率为

$$\sum_{r=0}^m C_n^r p^r (1-p)^{n-r}$$

故得漏同步概率为

$$P_1 = 1 - \sum_{r=0}^m C_n^r p^r (1-p)^{n-r} \quad (3)$$

②假同步概率 P_2

在消息码元中，也可能出现与所要识别的同步码组相同的码组，这时会被识别器误认为

是同步码组而实现假同步，出现这种情况的可能性就称为假同步概率 P_2 。

因此，计算假同步概率 P_2 就是计算信息码元中能被判为同步码组的组合数与所有可能的码组数之比。设二进制信息码元出现“0”和“1”的概率相等，都为 $1/2$ ，则由该二进制码元组成 n 位码组的所有可能码组数为 2^n 个，而其中能被判为同步码组的组合数显然也与 m 有关。若 $m=0$ ，只有一个 (C_n^0) 码组能被识别；若 $m=1$ ，即与原同步码组差一位的码组都能被识别，共有 C_n^1 个码组。依此类推，就可求出信息码元中可被判为同步码组的组合数 $\sum_{r=0}^m C_n^r$ ，因

而可得假同步概率为

$$P_2 = 2^{-n} \sum_{r=0}^m C_n^r \quad (4)$$

比较式 (3) 和式 (4) 可见， m 增大，即判决门限电平降低时， P_1 减小，但 P_2 增大，所以这两项指标是有矛盾的，判决门限的选取要兼顾两者。

在分析判决门限电平对 P_1 和 P_2 的影响时，讲到两者是有矛盾的。我们希望在同步建立时要可靠，也就是假同步概率 P_2 要小；而在同步建立以后，就要具有一定的抗干扰性能，也就是漏同步概率 P_1 要小。为了满足以上要求以及改善同步系统性能，帧同步电路应加有保护措施。最常用的保护措施是将帧同步的工作划分为两种状态——捕捉态和维持态。

终端接收机由非同步工作状态转入同步工作的过程，称为“捕捉态”，终端机进入同步工作后则称为“维持态”。可把捕捉过程分成两步进行，先在信码中找到与该时刻本地帧同步码型相同的信码码位。当找到和帧同步码型一致的信码码位后，再进行第二步，即逐帧比较下去，也就是在该时隙上按本地同步码的周期进行比较。在比较过程中，一旦发现在收端本地同步码的相位与信码码型不同时，则重新移一个码元相位，重新从第一步开始找帧同步码位，以上两步交替进行，即可建立真正的同步。

1、 间隔式插入法

在某些情况下，群同步码组不是集中插入在信息码流中，而是将它分散地插入，即每隔一定数量的信息码元，插入一个群同步码元。群同步码型选择的主要原则是：一方面要便于收端识别，即要求群同步码具有特定的规律性，这种码型可以是全“1”码、“1”“0”交替码

等, 另一方面, 要使群同步码的码型尽量和信息码相区别。例如在某些 PCM 多路数字电话系统中, 用全“0”码代表“振铃”, 用全“1”码代表“不振铃”, 这时, 为了使群同步码组与振铃相区别, 群同步码就不能使用全“1”或全“0”。收端要确定群同步码的位置, 就必须对收码进行搜索检测。一种常用的检测方法为逐码移位法, 它是一种串行的检测方法; 另一种方法是 RAM 帧码检测法, 它是利用 RAM 构成帧码提取电路的一种并行检测方法。

在本实验中, 帧同步码是采用集中插入法集中插入到 NRZ 码的 2~8 位的。帧同步码识别电路所能识别的帧同步码的码型设置为 1110010。

四、实验步骤

任务一 帧同步提取实验

概述: 该任务是通过改变输入信号的误码插入情况, 观测失步、捕获以及同步等指示灯变化情况, 从而了解帧同步提取的原理。

1、模块关电, 按表格所示进行连线。

源端口	目标端口	连线说明
信号源: FS	模块 7: TH11(FSIN)	提供复用帧同步信号
模块 7: TH10(复用输出)	模块 7: TH18(解复用输入)	复用与解复用连接
模块 7: TH12(复用输出时钟)	模块 7: TH17(解复用时钟)	提供解复用时钟信号

2、模块开电, 设置主控菜单, 选择【主菜单】→【通信原理】→【帧同步】。

3、此时系统初始状态为: 帧同步信号为 8K。

4、实验操作及波形观测。

(1) 先打开其他模块电源, 7 号模块最后上电。观测在没有误码的情况下“失步”, “捕获”, “同步”三个灯的变化情况。

(2) 关闭 7 号模块电源。按住“误码插入”按键不放, 打开 7 号模块电源。再观测“失步”, “捕获”, “同步”三个灯的变化情况。(注: 误码插入功能是在巴克码中插入一个差错, 若单击则插入一次单个码元差错, 若长按则连续插入单个码元差错。)

(3) 观察同步保护现象: 当“同步”指示灯点亮时, 设置拨码开关 S1 为 01110010, 即与复用的巴克码一致, 此时应观察到解复用端的开关信号显示光条的亮灭情况与 S1 一致 (0

为灭，1 为亮)，表明系统此时对已同步的帧同步信号有一定保护。

(4) 在“同步”状态下长时间按住“误码插入”按键不放，观测帧同步码元出现误码时三个 LED 灯的变化情况。

(5) 观察假同步现象：将拨码开关 S1 拨为 01110010，即与复用的巴克码一致。将 7 号模块关电再开电，观察开关信号显示光条的状态，注意是否出现了假同步状态。（注：当出现假同步时，即此时时分复用单元将拨码开关 S1 的码值作为帧头码，其他码元和原巴克码被当做数据码元，从而原本应该解复用显示拨码开关的光条没有正常显示。）

五、实验报告

- 1、分析实验电路的工作原理，简述其工作过程。
- 2、分析实验点的波形图，并分析实验现象。

第六章 时分复用及解复用技术

实验二十二 时分复用与解复用实验

一、实验目的

- 1、掌握时分复用的概念及工作原理。
- 2、了解时分复用在整个通信系统中的作用。

二、实验器材

- | | |
|---------------------------|-----|
| 1、 主控&信号源、21号、2号、7号、13号模块 | 各一块 |
| 2、 双踪示波器 | 一台 |
| 3、 连接线 | 若干 |

三、实验原理

1、实验原理框图

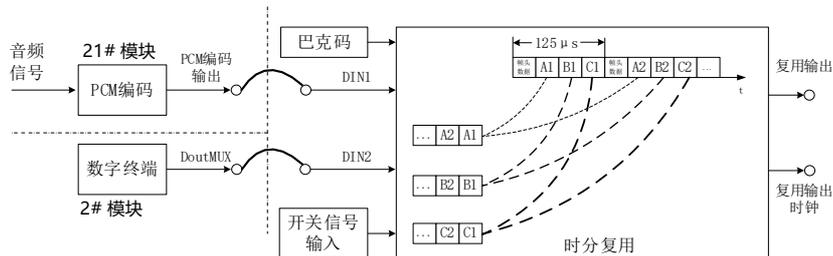


图 22-1 时分复用实验框图

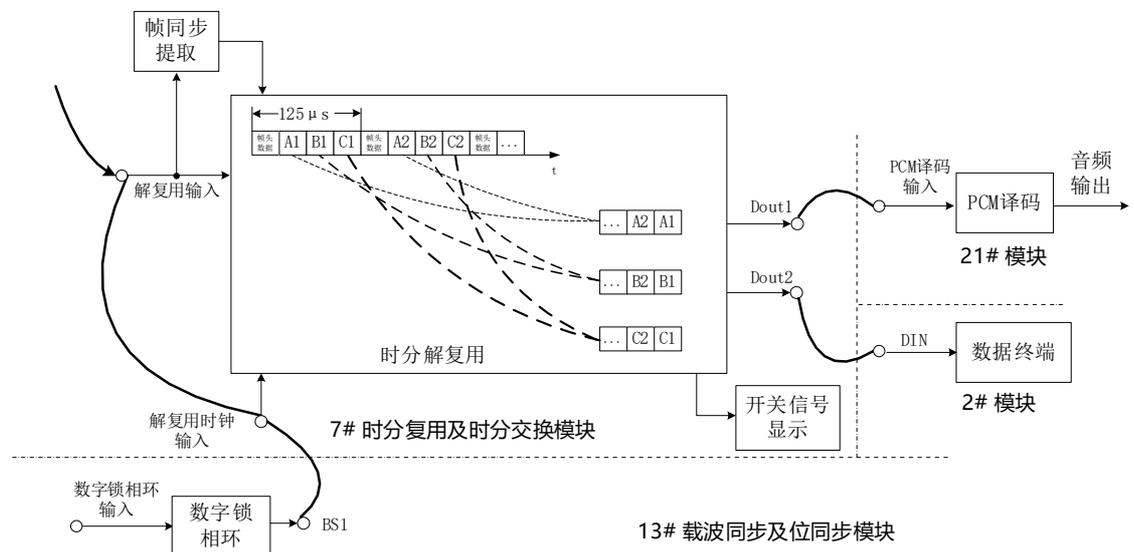


图 22-2 解时分复用实验框图

注：框图中 21#和 2#模块的相关连线有所简略，具体参考实验步骤中所述。

2、实验框图说明

21 号模块的 PCM 数据和 2 号模块的数字终端数据，经过 7 号模块进行 256K 时分复用和解复用后，再送入到相应的 PCM 译码单元和 2 号终端模块。时分复用是将整个信道传输信息的时间划分为若干时隙，并将这些时隙分配给每个端口的信号源进行使用。解复用的过程是先提取帧同步，然后将一帧数据缓存下来。接着按时隙将帧数据解开，最后，每个端口获取自己时隙的数据进行输出。

在 256K 时分复用及解复用模式下，复用数据共 4 个时隙，复用帧结构为：第 0 时隙是巴克码帧头、第 1~3 时隙是数据时隙，其中第 1 时隙输入的数字信号源，第 2 时隙输入的 PCM 数据，第 3 时隙由 7 号模块自带的拨码开关 S1 的码值作为数据。此时时分复用输出信号的速率是输入信号速率的 4 倍，时分复用输出信号每一帧由 32 位数据组成。其帧结构如下图所示。



图 22-3 256K 时分复用帧结构

在 2048K 时分复用及解复用模式下，复用数据共 32 个时隙，复用帧结构为：第 0 时隙数据为巴克码、第 1、2、3、4 时隙数据分别为 DIN1、DIN2、DIN3、DIN4 端口的数据，开关 S1 拨码信号初始分配在第 5 时隙，通过主控可以设置 7 号模块拨码开关 S1 数据的所在时隙位置。此时时分复用输出信号的速率是输入信号速率的 32 倍，时分复用输出信号每一帧由 256 位数据组成。其帧结构如下图所示。



图 22-4 2048K 时分复用帧结构

四、实验步骤

任务一 256K 时分复用帧信号观测

概述：该任务是通过观测 256K 帧同步信号及复用输出波形，了解复用的基本原理。

1、模块关电，按表格所示进行连线。

源端口	目的端口	连线说明
信号源：FS	模块 7：TH11(FSIN)	帧同步输入

2、模块开电，设置主控菜单，选择【主菜单】→【通信原理】→【时分复用】→【复用速率 256KHz】。

3、此时系统初始状态为：在复用时隙的速率 256K 模式，7 号模块的复用信号只有四个时隙，其中第 0、1、2、3 输出数据分别为巴克码、DIN1、DIN2、开关 S1 拨码信号。

4、实验操作及波形观测。

(1) 帧同步码观测：用示波器探头接 7 号模块的 TH10 复用输出，观测帧头的巴克码。

注：为方便记录巴克码波形，可先将 7 号模块上的拨码开关 S1 全置为 0，使整个复用中只有帧同步信号。

记录	波形
巴克码	

(2) 帧内 PN 序列信号观测

模块关电继续连线，将信号源的 PN 连接到 7 号模块的 DIN1，即将 PN15 送至第 1 时隙。通电，用示波器探头接 7 号模块的 TH10 复用输出，需要用数字示波器的存储功能观测 3 个周期中的第 1 时隙的信号。

记录	波形
复用 PN 序列	

思考: PN15 序列的数据是如何分配到复用信号中的?

任务二 256K 时分复用及解复用

概述: 该任务是将模拟信号通过 PCM 编码后, 送到复用单元, 再经过解复用输出, 最后译码输出。

1、模块关电, 按表格所示进行连线。

源端口	目的端口	连线说明
信号源: T1	模块 21: TH1(主时钟)	提供芯片工作主时钟
信号源: FS	模块 7: TH11(FSIN)	帧同步输入
信号源: FS	模块 21: TH9(编码帧同步)	
信号源: CLK	模块 21: TH11(编码时钟)	位同步输入
信号源: A-OUT	模块 21: TH5(音频输入)	模拟信号输入
模块 21: TH8(PCM 编码输出)	模块 7: TH14(DIN2)	PCM 编码输入
模块 7: TH10(复用输出)	模块 7: TH18(解复用输入)	时分复用输入
模块 7: TH10(复用输出)	模块 13: TH7 (数字锁相环输入)	锁相环提取位同步
模块 13: TH5(BS2)	模块 7: TH17(解复用时钟)	
模块 7: TH7(FSOUT)	模块 21: TH10 (译码帧同步)	提供译码帧同步
模块 7: TH3(BSOUT)	模块 21: TH18(译码时钟)	提供译码位同步
模块 7: TH4(DOUT2)	模块 21: TH7(PCM 译码输入)	解复用输入

2、模块开电, 设置主控菜单, 选择【主菜单】→【通信原理】→【时分复用】→【复用速率 256KHz】。将模块 13 的 S3 拨位“0100”。将 21 号模块的开关 S1 拨至 A-LAW (或 U-LAW)。

3、此时系统初始状态为：在复用时隙的速率 256K 模式，7 号模块的复用信号只有四个时隙，其中第 0、1、2、3 输出数据分别为巴克码、DIN1、DIN2、开关 S1 拨码信号。其中，信号源 A-OUT 输出 1KHz 的正弦波，幅度由 W1 可调（频率和幅度参数可根据主控模块操作说明进行调节）；7 号模块的 DIN2 端口送入 PCM 数据。正常情况下，7 号模块的“同步”指示灯亮。

注：若发现“失步”或“捕获”指示灯亮，先检查连线或拨码是否正确，再逐级观测数据或时钟是否正常。

4、实验操作及波形观测。

（1）帧内 PCM 编码信号观测

将 PCM 信号输入 DIN2，观测 PCM 数据。以帧同步为触发分别观测 PCM 编码数据和复用输出的数据。

注：PCM 复用后会有两帧的延时。

记录	波形
复用 PCM 数据	

思考：PCM 数据是如何分配到复用信号中去的？

（2）解复用帧同步信号观测

PCM 对正弦波进行编译码。观测复用输出与 FSOUT，观测帧同步上跳沿与帧同步信号的时序关系。

（3）解复用 PCM 信号观测

对比观测复用前与解复用后的 PCM 序列。对比观测 PCM 编译码前后的正弦波信号。

记录	波形
复用前的 PCM 序列	
解复用后的 PCM 序列	

PCM 编码前的波形	
PCM 译码后的波形（模块 21：音频接口）	

（4）有兴趣的同学可以将信号源换成耳麦的音频输出，然后进行实验，感受语音效果。操作方法是：将信号源 AOUT 与 21 号模块音频输入端口的连线，改换成 21 号模块的话筒输出连接 21 号模块的音频输入，再将 21 号模块的音频输出接着 21 号模块的耳机输入，最后插上耳机，即可感受语音传输效果。

任务三 2M 时分复用及解复用

概述：该任务是设置菜单为复用速率为 2048KHz，实验观测的过程同 256K 的时分复用。

1、实验连线与 256K 时分复用及解复用的任务相同。

2、模块开电，设置主控菜单，选择【主菜单】→【通信原理】→【时分复用】→【复用速率 2048KHz】。将模块 13 的 S3 拨位“0001”。将 21 号模块的开关 S1 拨至 A-LAW（或 U-LAW）。

3、此时系统初始状态为：在复用时隙的速率 2048K 模式，7 号模块的复用信号共有 32 个时隙，第 0 时隙数据为巴克码、第 1、2、3、4 时隙数据分别为 DIN1、DIN2、DIN3、DIN4 端口的数据，开关 S1 拨码信号初始分配在第 5 时隙，通过主控可以设置 7 号模块拨码开关 S1 数据的所在时隙位置。另外，此时信号源 A-OUT 输出 1KHz 的正弦波，幅度由 W1 可调（频率和幅度参数可根据主控模块操作说明进行调节）；PCM 数据送至 7 号模块的 DIN2 端口。

4、实验操作及波形观测。

（1）以帧同步信号作为触发，用示波器观测 2048M 复用输出信号。改变 7 号模块的拨码开关 S1，观测复用输出中信号变化情况。

（2）在主控菜单中选择“第 5 时隙加”和“第 5 时隙减”，观测拨码开关 S1 对应数据在复用输出信号中的所在帧位置变化情况。

（3）用示波器对比观测信号源 A-OUT 和 21 号模块的音频输出，观测信号的恢复情况。

（4）将信号源 A-OUT 改变成 MUSIC 信号或者 21 号模块的话筒输出，将 PCM 译码的音频输出端接至扬声器或耳机输出端，体会传输效果。

任务四 计算机数据时分复用及解复用（选做）

概述: 该任务是计算机数据由串口输出，经过串口电平转换电路后进入时分复用，再经过解复用输出，最后译码输出。

1、模块关电，按表格所示进行连线

源端口	目的端口	连线说明
信号源: FS	模块 7: TH11(FSIN)	帧同步输入[8K]
信号源:PN 15	模块 7: TH13(DIN1)	数字信号输入[64K]
模块 7: TH8(发送)	模块 7: TH14(DIN2)	串口数据输入
模块 7: TH10(复用数据输出)	模块 7: TH18(解复用输入)	时分复用输入
模块 7: TH12 (复用输出时钟)	模块 7: TH17 (解复用时钟输入)	提供解复用时钟
模块 7: TH4(Dout2)	模块 7: TH9(接收)	串口数据输出

2、实验操作及波形观测

(1) 打开系统和各实验模块电源开关。

(2) 用串口线将 7 号模块的 J2 与计算机连接起来，然后在计算机上打开串口调试软件；根据计算机所连串口，选择对应的串口号，例如串口号 COM1；设置波特率，例如波特率为 9600。

(3) 观察和比较串口调试软件的数据接收窗和数据发送窗的内容是否一致。

五、实验报告

1、画出各测试点波形，并分析实验现象。

2、分析电路的工作原理，叙述其工作过程。

第七章 综合实验

实验二十三 HDB3 线路编码通信系统综合实验

一、实验目的

- 1、熟悉 HDB3 编译码器在通信系统中位置及发挥的作用；
- 2、熟悉 HDB3 通信系统的系统框架。

二、实验器材

- | | |
|-----------------------------------|-----|
| 1、 主控&信号源、21 号、2 号、7 号、8 号、13 号模块 | 各一块 |
| 2、 双踪示波器 | 一台 |
| 3、 连接线 | 若干 |

三、实验原理

1、实验原理框图

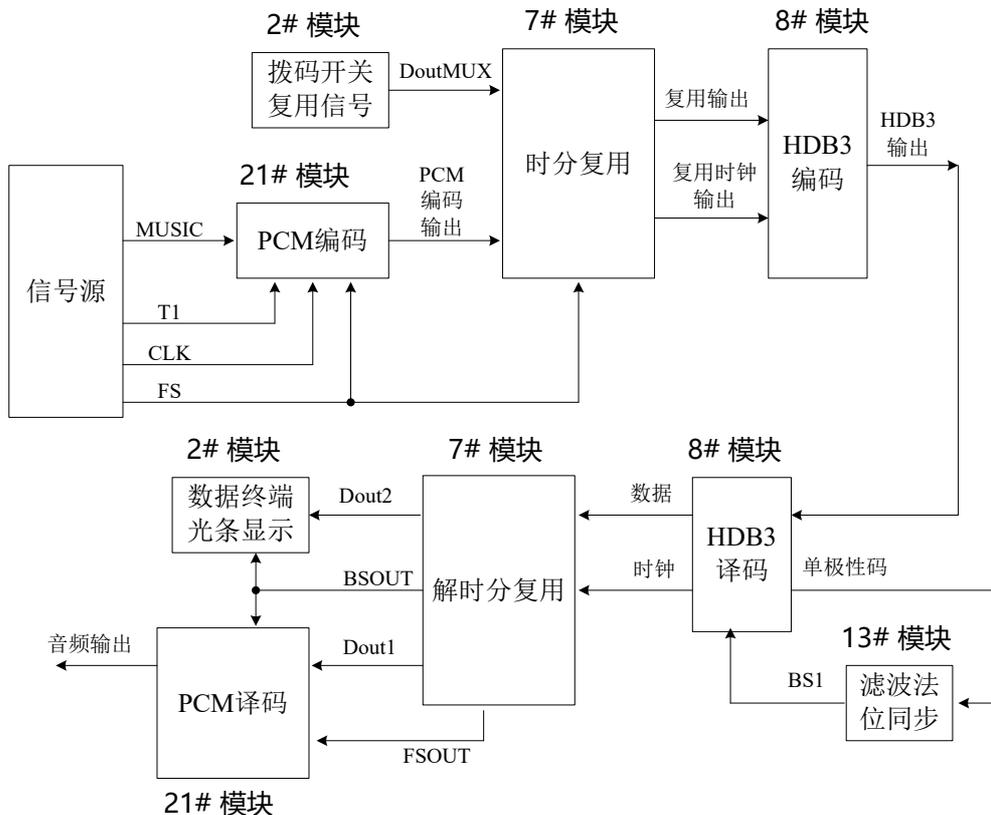


图23-1 HDB3线路编码通信系统实验框图

2、实验框图说明

信号源输出音乐信号经过21号模块进行PCM编码，与2号模块的拨码信号一起送入7号模块，进行时分复用，然后通过8号模块进行HDB3编码；编码输出信号再送回8号模块进行HDB3译码，其中译码时钟用13号模块滤波法位同步提取，输出信号再送入7号模块进行解复接，恢复的两路数据分别送到21号模块的PCM译码单元和2号模块的光条显示单元，从而可以从扬声器中听到原始信号源音乐信号，并可以从光条中看到原始拨码信号。

注：图中所示连线有所省略，具体连线操作按实验步骤说明进行。

四、实验步骤

任务一 HDB3 线路编码通信系统综合实验

概述：本实验主要是让学生理解 HDB3 线路编译码以及时分复用等知识点，同时加深对以上两个知识点的认识和掌握，同时能对实际信号的传输系统建立起简单的框架。

1、模块关电，按表格所示进行连线。

源端口	目的端口	连线说明
信号源：T1	模块 21：TH1(主时钟)	提供芯片工作主时钟
信号源：MUSIC	模块 21：TH5(音频输入)	提供编码信号
信号源：FS	模块 21：TH9(编码帧同步)	提供编码帧同步信号
信号源：CLK	模块 21：TH11(编码时钟)	提供编码时钟
模块 21：TH8(PCM 编码输出)	模块 7：TH13(DIN2)	复用一路输入
模块 2：TH1(DoutMUX)	模块 7：TH14(DIN1)	复用二路输入
信号源：FS	模块 7：TH11(FSIN)	提供复用帧同步信号
模块 7：TH10(复用输出)	模块 8：TH3(编码输入)	进行 HDB3 编码
模块 7：TH12(复用时钟输出)	模块 8：TH4(时钟)	提供 HDB3 编码时钟
模块 8：TH1(HDB3 输出)	模块 8：TH7(HDB3 输入)	进行 HDB3 译码
模块 8：TH5(单极性码)	模块 13：TH3(滤波法位同步输入)	滤波法位同步提取
模块 13：TH4(BS1)	模块 8：TH9(译码时钟输入)	提取位时钟进行译码
模块 8：TH12(时钟)	模块 7：TH17(解复用时钟)	解复用时钟输入



模块 8: TH13(数据)	模块 7: TH18(解复用输入)	解复用数据输入
模块 7: TH7(FSOUT)	模块 21: TH10(译码帧同步)	提供 PCM 译码帧同步
模块 7: TH19(Dout2)	模块 21: TH7(PCM 译码输入)	提供 PCM 译码数据
模块 7: TH4(Dout1)	模块 2: TH13(DIN)	信号输入至数字终端
模块 7: TH3(BSOUT)	模块 2: TH12(BSIN)	数字终端时钟输入
模块 7: TH3(BSOUT)	模块 21: TH18(译码时钟)	提供 PCM 译码时钟
模块 21: TH6(音频输出)	模块 21: TH12(音频输入)	信号输入至音频播放

2、模块开电，设置主控菜单，选择【主菜单】→【通信原理】→【HDB3 线路编码通信系统综合实验】。可以在【信号源】菜单中更改输出音乐信号（音乐信号可选音乐 1 和音乐 2）。将模块 13 的拨码开关 S4 设置为 1000，开关 S2 拨为滤波器法位同步。将 21 号模块的开关 S1 拨至 A-LAW（或 U-LAW）。

3、主控&信号源模块设置成功后，可以观察到 7 号模块的同步指示灯亮。FS 为模式 1。

4、将 2 号模块拨码开关 S1 为 01110010，可以从数字信号接收显示的三个光条中观察到输入的数字信号，拨动拨码开关 S2、S3 和 S4 验证输入数字信号与输出数字信号。

5、以上连线选择的是 HDB3 的编译码传输方式，学生可以根据自己的理解程度，使用其他的编码方式，对比两种传输有何不同。

6、本实验采用的是 PCM 编译码对语音信号进行抽样量化，根据自己的理解程度，设计实验，使用其他的信源编译码方式进行信源编码。

7、学生可以自行将音乐信号改换成话筒输出信号，通过耳机感受语音传输效果。

五、实验报告

1、叙述 HDB3 码在通信系统中的作用及对通信系统影响。

2、整理信号在传输过程中的各点波形。

实验二十四 ASK 通信系统综合实验

一、实验目的

- 1、 熟悉汉明编码在通信系统中的地位及发挥的作用；
- 2、 掌握 ASK 调制解调方式。

二、实验器材

- | | |
|----------------------|-----|
| 1、 主控&信号源、3、M02、9号模块 | 各一块 |
| 2、 双踪示波器 | 一台 |
| 3、 连接线 | 若干 |

三、实验原理

1、实验原理框图

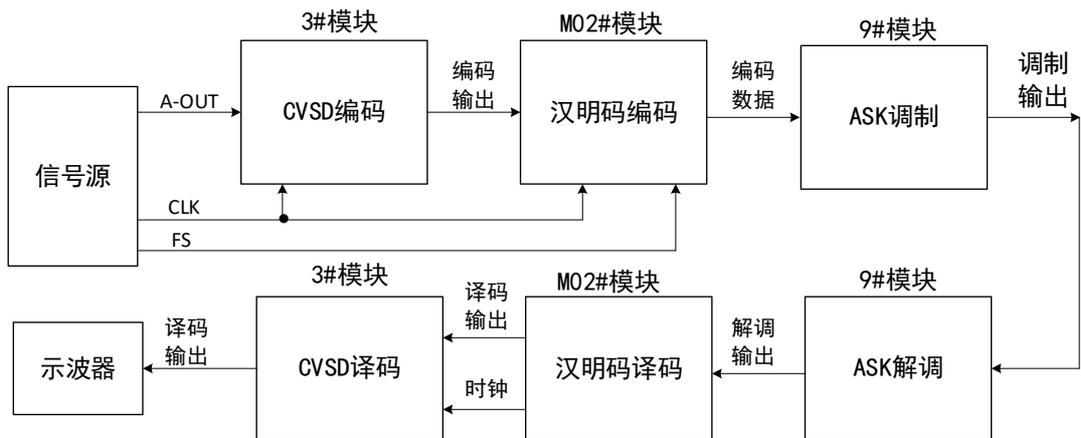


图24-1 ASK通信系统实验框图

2、实验原理框图

模拟信号先经过3号模块的CVSD编码，然后经过M02号模块进行（7,4）汉明码编码，再通过9号模块进行ASK调制解调，解调信号返回给M02号模块进行（7,4）汉明码译码，最后用3号模块进行CVSD译码，并用示波器观察译码输出波形。

四、实验步骤

任务一 ASK 通信系统综合实验

- 1、 关电，按表格所示进行连线。

源端口	目的端口	连线说明
信号源: A-OUT	模块 3: TH5(LPF-IN)	编码信号送入低通滤波
模块 3: TH6 (LPF-OUT)	模块 3: TH13 (编码输入)	送入编码数据
信号源: CLK	模块 3: TH9(时钟)	时钟信号输入
模块 3: TH14(编码输出)	模块 M02: TH1(编码输入-数据)	编码数据进行信道编码
信号源: CLK	模块 M02: TH2(编码输入-时钟)	提供信道编码时钟
信号源: FS	模块 M02: TH3(辅助观测帧头指示)	提供信道编码帧同步
模块 M02: TH5(编码输出-编码数据)	模块 9: TH1 (基带信号)	信道编码数据进行调制
信号源: 128K	模块 9: TH14(载波 1)	提供调制载波
模块 9: TH4(ASK 调制输出)	模块 9: TH7(解调输入)	调制载波输入
模块 9: TH6(ASK 解调输出)	模块 M02: TH7(译码输入-数据)	解调输出进行信道译码
模块 M02: TH6(编码输出时钟)	模块 M02: TH8(译码输入-时钟)	解调时钟输入译码模块
模块 M02: TH10(译码输出-译码数据)	模块 3: TH19(译码-译码输入)	数据输入信源译码
模块 M02: TH11(译码输出-时钟)	模块 3: TH15(译码-时钟)	时钟输入信源译码

2、开电，设置主控菜单，选择【主菜单】→【通信原理】→【ASK 通信系统综合实验】。调节信号源模块的 W1 改变 A-OUT 的幅度，使其为 1.5V 左右，将 9 号板的 S1 拨为 0000，即选择调制方式为 ASK。

3、此时实验系统初始状态为：信源编码为 CVSD 编码，信道编码方式为 (7,4) 汉明码，编码速率为 32K，FS 为模式 2。

4、调节 9 号模块的判决门限 W1，观察 3 号模块的编码输入与译码输出波形是否一致。

有兴趣的同学可以用 MUSIC 代替 A-OUT，并用 21 号的扬声器感受一下译码输出语音的效果。

五、实验报告

- 1、叙述信道编译码在通信系统中的作用及对通信系统影响。

实验二十五 FSK 通信系统综合实验

一、实验目的

- 1、 熟悉汉明编码在通信系统中的地位及发挥的作用；
- 2、 掌握 FSK 调制解调方式。

二、实验器材

- | | |
|----------------------|-----|
| 1、 主控&信号源、3、M02、9号模块 | 各一块 |
| 2、 双踪示波器 | 一台 |
| 3、 连接线 | 若干 |

三、实验原理

1、实验原理框图

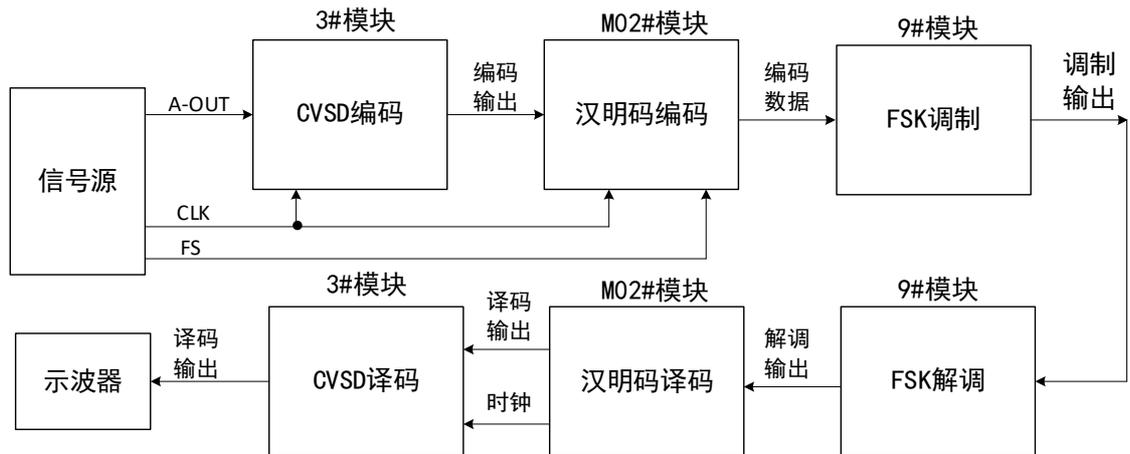


图25-1 FSK通信系统实验框图

2、实验原理框图

模拟信号先经过3号模块的CVSD编码，然后经过M02号模块进行(7,4)汉明码编码，再通过9号模块进行FSK调制解调，解调信号返回给M02号模块进行(7,4)汉明码译码，最后用3号模块进行CVSD译码，并用示波器观察译码输出波形。

四、实验步骤

任务一 FSK 通信系统综合实验

- 1、 关电，按表格所示进行连线。

源端口	目的端口	连线说明
信号源: A-OUT	模块 3: TH5(LPF-IN)	编码信号送入低通滤波
模块 3: TH6 (LPF-OUT)	模块 3: TH13 (编码输入)	送入编码数据
信号源: CLK	模块 3: TH9(时钟)	时钟信号输入
模块 3: TH14(编码输出)	模块 M02: TH1(编码输入-数据)	编码数据进行信道编码
信号源: CLK	模块 M02: TH2(编码输入-时钟)	提供信道编码时钟
信号源: FS	模块 M02: TH3(辅助观测帧头指示)	提供信道编码帧同步
模块 M02: TH5(编码输出-编码数据)	模块 9: TH1 (基带信号)	信道编码数据进行调制
信号源: 256K	模块 9: TH14(载波 1)	一路调制载波输入
信号源: 128K	模块 9: TH3(载波 2)	二路调制载波输入
模块 9: TH4(FSK 调制输出)	模块 9: TH7(解调输入)	调制信号送入解调
模块 9: TH8(FSK 解调输出)	模块 M02: TH7(译码输入-数据)	解调输出进行信道译码
模块 M02: TH6(编码输出时钟)	模块 M02: TH8(译码输入-时钟)	解调时钟输入译码模块
模块 M02: TH10(译码输出-译码数据)	模块 3: TH19(译码-译码输入)	数据输入信源译码
模块 M02: TH11(译码输出-时钟)	模块 3: TH15(译码-时钟)	时钟输入信源译码

2、开电，设置主控菜单，选择【主菜单】→【通信原理】→【FSK 通信系统综合实验】。调节信号源模块的 W1 改变 A-OUT 的幅度，使其为 1.5V 左右。将 9 号板的 S1 拨为 0000，即选择调制方式为 FSK。

3、此时实验系统初始状态为：信源编码为 CVSD 编码，信道编码方式为 (7,4) 汉明码，编码速率为 32K，FS 为模式 2。

4、观察 3 号模块的编码输入与译码输出波形是否一致。

有兴趣的同学可以用 MUSIC 代替 A-OUT，并用 21 号的扬声器感受一下译码输出语音的



效果。

5、有兴趣的同学可以在【模块设置】中选择其它类型的信道编译码，再来进行上述步骤。

五、实验报告

1、叙述信道编译码在通信系统中的作用及对通信系统影响。

实验二十六 BPSK 通信系统综合实验

一、实验目的

- 1、 熟悉汉明编码在通信系统中的地位及发挥的作用；
- 2、 掌握 BPSK 调制解调方式。

二、实验器材

- | | |
|--------------------------|-----|
| 1、 主控&信号源、3、M02、9、13 号模块 | 各一块 |
| 2、 双踪示波器 | 一台 |
| 3、 连接线 | 若干 |

三、实验原理

1、实验原理框图

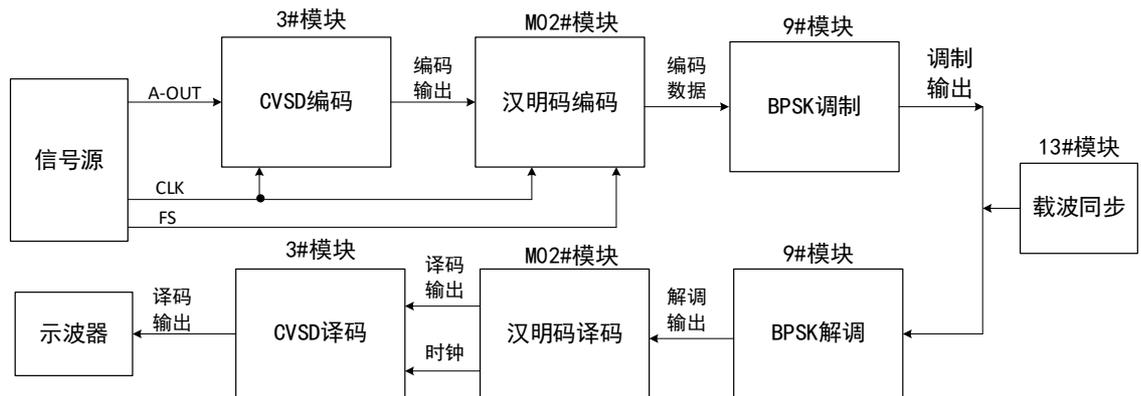


图26-1 BPSK通信系统实验框图

2、实验原理框图

模拟信号先经过3号模块的CVSD编码，然后经过M02号模块进行（7,4）汉明码编码，再通过9号模块进行BPSK调制解调，解调信号返回给M02号模块进行（7,4）汉明码译码，最后用3号模块进行CVSD译码，并用示波器观察译码输出波形。

四、实验步骤

任务一 BPSK 通信系统综合实验

- 1、 关电，按表格所示进行连线。

源端口	目的端口	连线说明
信号源: A-OUT	模块 3: TH5(LPF-IN)	编码信号送入低通滤波
模块 3: TH6 (LPF-OUT)	模块 3: TH13 (编码输入)	送入编码数据
信号源: CLK	模块 3: TH9(时钟)	时钟信号输入
模块 3: TH14(编码输出)	模块 M02: TH1(编码输入-数据)	编码数据进行信道编码
信号源: CLK	模块 M02: TH2(编码输入-时钟)	提供信道编码时钟
信号源: FS	模块 M02: TH3(辅助观测帧头指示)	提供信道编码帧同步
模块 M02: TH5(编码输出-编码数据)	模块 9: TH1 (基带信号)	信道编码数据进行调制
信号源: 256K	模块 9: TH14(载波 1)	一路调制载波输入
信号源: 256K	模块 9: TH3(载波 2)	二路调制载波输入
模块 9: TH4(BPSK 调制输出)	模块 9: TH7(解调输入)	调制信号送入解调
模块 9: TH4(BPSK 调制输出)	模块 13: TH2 (载波同步输入)	载波同步模块信号输入
模块 13: TH1 (SIN)	模块 9: TH10 (相关载波输入)	用于解调的载波
模块 9: TH12(BPSK 解调输出)	模块 M02: TH7(译码输入-数据)	解调输出进行信道译码
模块 M02: TH6(编码输出时钟)	模块 M02: TH8(译码输入-时钟)	解调时钟输入译码模块
模块 M02: TH10(译码输出-译码数据)	模块 3: TH19(译码-译码输入)	数据输入信源译码
模块 M02: TH11(译码输出-时钟)	模块 3: TH15(译码-时钟)	时钟输入信源译码

2、开电，设置主控菜单，选择【主菜单】→【通信原理】→【BPSK 通信系统综合实验】。调节信号源模块的 W1 改变 A-OUT 的幅度，使其为 1.5V 左右。将 9 号板的 S1 拨为 0000，即选择调制方式为 BPSK。

3、此时实验系统初始状态为：信源编码为 CVSD 编码，信道编码方式为汉明码，编码速率为 32K，FS 为模式 2。

4、调节 13 号模块的压控偏置调节 W1，观察 3 号模块的编码输入与译码输出波形是否一

致。

有兴趣的同学可以用 MUSIC 代替 A-OUT，并用 21 号的扬声器感受一下译码输出语音的效果。

五、实验报告

- 1、叙述信道编译码在通信系统中的作用及对通信系统影响。

第八章 模拟调制解调实验（选做）

实验二十七 AM 调制及检波实验（选做）

一、实验目的

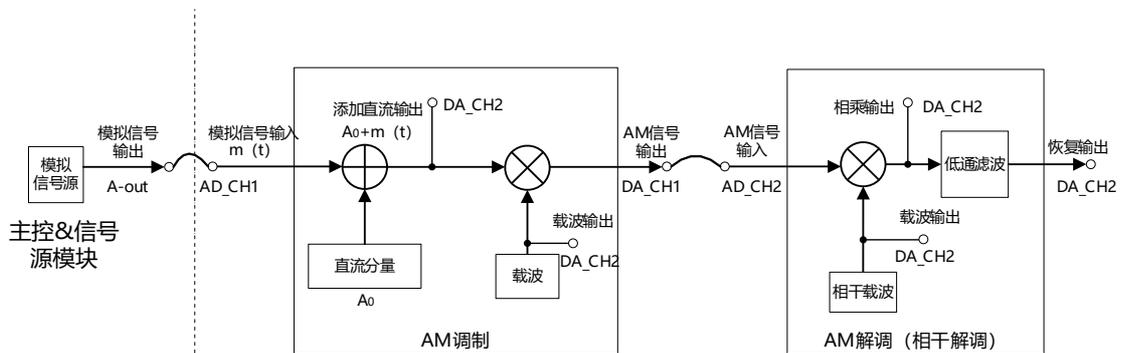
- 1、了解使用 FPGA 可编程的方式实现模拟调制与检波的工作原理。
- 2、研究已调波与调制信号以及载波信号的关系。
- 3、掌握调幅系数的测量与计算方法
- 4、对比不同检波方式的效果，了解使用 FPGA 实现检波的方法。
- 5、查找资料，对比使用 MC1496 与 FPGA 实现 AM 调制与检波的异同。

二、实验器材

- | | |
|-------------------|-----|
| 1、 主控&信号源 、 28 模块 | 各一块 |
| 2、 双踪示波器 | 一台 |
| 3、 连接线 | 若干 |

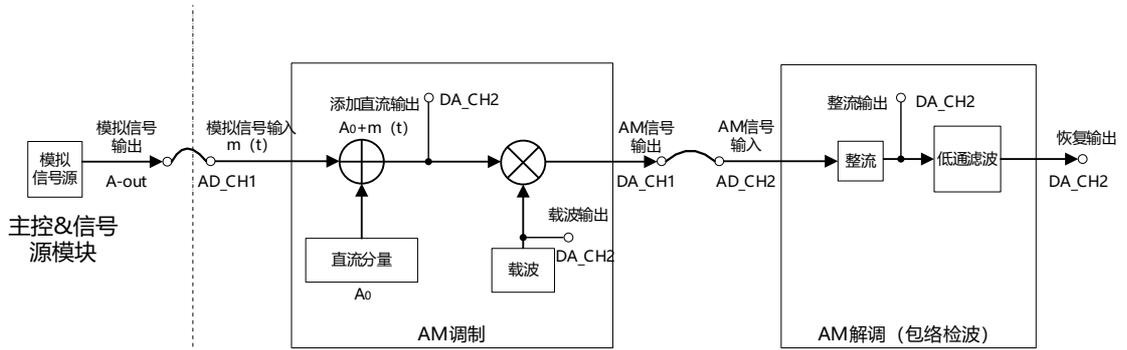
三、实验原理

1、实验原理框图



28# 软件无线电模块

图27-1 AM调制及相干解调



28# 软件无线电模块

图27-2 AM调制及非相干解调

1、实验原理说明

幅度调制就是载波的振幅(包络)随调制信号的参数变化而变化。常规方法使用的是 1496 集成芯片来完成模拟调制解调，本模块使用的是 FPGA 可编程方式，实验中载波是由 28 号模块内部产生的 64KHz-1M 的载波信号，调制信号为信号源模块产生的模拟信号（如正弦波、音乐信号等）。AM 调制输出波形如下：

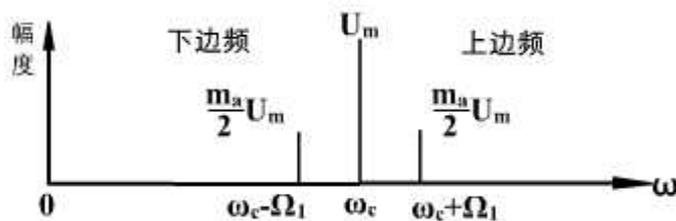
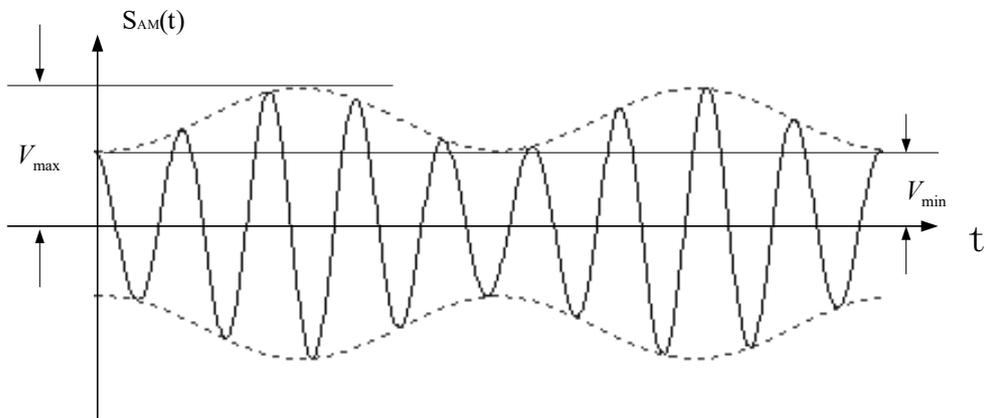


图 27-3 AM 调幅波波形

$$\text{调制度: } m = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_{\max} + V_{\min}}$$

检波过程是一个解调过程，它与调制过程正好相反。检波器的作用是从振幅受调制的高频信号中还原检波过程是一个解调过程，它与调制过程正好相反。检波器的作用是从振幅受调制的高频信号中还原出原调制的信号。还原所得的信号，与高频调幅信号的包络变化规律一致，故又称为包络检波器。

假如输入信号是高频等幅信号，则输出就是直流电压。这是检波器的一种特殊情况，在测量仪器中应用比较多。例如某些高频伏特计的探头，就是采用这种检波原理。

若输入信号是调幅波，则输出就是原调制信号。这种情况应用最广泛，如各种连续波工作的调幅接收机的检波器即属此类。

从频谱来看，检波就是将调幅信号频谱由高频搬移到低频，如图 27-4 所示（此图为单音频 Ω 调制的情况）。检波过程也是应用非线性器件进行频率变换，首先产生许多新频率，然后通过滤波器，滤除无用频率分量，取出所需要的原调制信号。

常用的检波方法有包络检波和同步检波两种。全载波振幅调制信号的包络直接反映了调制信号的变化规律，可以用二极管包络检波或整流滤波的方法进行解调。而抑制载波的双边带或单边带振幅调制信号的包络不能直接反映调制信号的变化规律，无法用包络检波进行解调，所以采用同步解调（相干解调）方法。

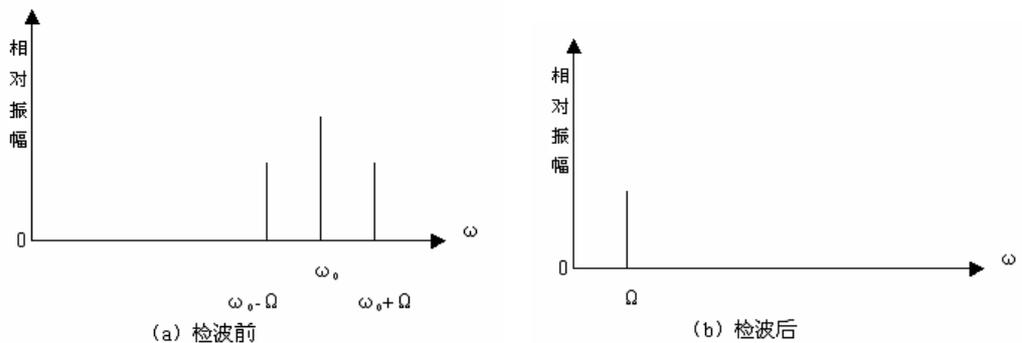


图 27-4 检波器检波前后的频谱出原调制的信号。

同步检波器用于对载波被抑制的双边带或单边带信号进行解调。它的特点是必须外加一个频率和相位都与被抑制的载波相同的同步信号。同步检波器的名称由此而来。

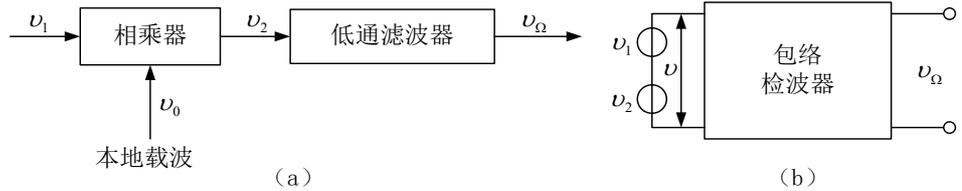


图 27-5 同步检波器方框图

外加载波信号电压加入同步检波器可以有两种方式：

一种是将它与接收信号在检波器中相乘，经低通滤波器后检出原调制信号，如图 27-5(a)所示；另一种是将它与接收信号相加，经包络检波器后取出原调制信号，如图 27-5(b)所示。

本实验中解调端所使用到的低通滤波器均为 8KHZ 的 Fir 滤波器。

3、端口说明

本实验可用到的实验端口号为 AD_CH1、AD_CH2、DA_CH1、DA_CH2。

AD_CH1 和 AD_CH2：模拟输入信号的端口。

DA_CH1 和 DA_CH2：模拟输出信号的端口。

端口默认状态：AD_CH1 输入调制信号，DA_CH1 输出 AM 已调制信号，AD_CH2 输入 AM 解调信号，DA_CH2 输出恢复信号。其中 DA_CH2 端口可自定义输出调制端添加直流输出信号 ($A_0+m(t)$)、载波输出信号以及解调端载波输出信号、相乘输出信号和恢复信号。

四、实验任务

任务一 AM 调制的信号观测及调制度测算（相干解调）

1、实验准备

1) 实验连线：

模块关电，按表格所示进行信号连线。 源端口	目的端口	连线说明
信号源：A-OUT	模块 28：AD_CH1 (模拟信号输入)	提供调制信号
模块 28：DA_CH1 (AM 调制信号输出)	模块 28：AD_CH2(模拟信号输入)	提供解调信号

2) 菜单设置：

开电，设置主控菜单，选择【主菜单】→【模块设置】→【28 软件无线电】→【AM 调制解调实验（相干解调）】。

用示波器观测主控模块的 A-OUT 端口，调节 W1 旋钮使 A-OUT 输出幅度设置为 2V，频率为 2KHZ 的正弦波（通过示波器实测，自行设置输出 2V 左右即可）。

2、实验操作及波形观测与分析

用示波器观测 28 号模块的调制输出端口，记下 AM 已调波对应 V_{max} 和 V_{min} ，并计算调幅度 m 。适当改变信号源 A-OUT 的输出幅度，观察调制输出波形的变化情况，再记录 AM 波对应的 V_{max} 和 V_{min} ，并计算调制度 m 。

调制信号频率：_____ KHz，载波信号频率：_____ KHz，载波信号幅度：_____。				
V_{Aout}	V_{max}	V_{min}	调制度 m	调制信号与 AM 已调信号波形
			1	
	过调制			

表 27-1 调制度测试数据表

思考：AM 已调信号的包络有什么特征？

任务二 AM 调制的调制度对已调信号的影响（相干解调）

基于任务一的参数设置，选择【调制度】，选择其它类型的调制度，改变信号源 A-OUT 的输出幅度，观察调制输出波形的变化情况，并计算调制度。

调制信号频率：_____ KHz，调制信号幅度：_____，载波信号频率：_____ KHz，载
--

基于任务一的参数设置，改变发送和接收载波信号的幅度或频率，观测载波对解调输出的影响。

思考：收发载波信号的幅度和频率变化分别对解调有什么影响？

任务六 AM 调制度对解调的影响：

基于任务一的参数设置，增大模拟信号源的幅度，观测调制度对解调波形的影响。调制信号频率：_____ KHz，载波信号频率：_____ KHz，载波信号幅度：_____。				
V_{Aout}	V_{max}	V_{min}	调制度 m	调制信号与解调输出波形
			1	
	过调制			

表 27-3 调制度对解调波形的影响

思考：过调制对解调信号有什么影响？

任务七 半波整流解调（包络检波）

1、实验准备

1) 保持任务一连线不变。

2) 在主界面选择设置主控菜单，选择【主菜单】→【模块设置】→【28 软件无线电】→【AM 调制解调实验（包络检波）】。

3) 用示波器观测主控模块的 A-OUT 端口，设置 A-OUT 的输出信号类型为正弦波、频率为 2000Hz，幅度设置为 2V（通过示波器实测，自行设置输出 2V 左右即可）。

表 27-5 全波整流解调

思考：通过实验，简单总结全波整流解调的效果。

五、实验报告

- 1、分析实验电路的工作原理，简述其工作过程。
- 2、观测并分析实验过程中的实验现象，并记录实验波形。

实验二十八 DSB 调制及解调实验（选做）

一、实验目的

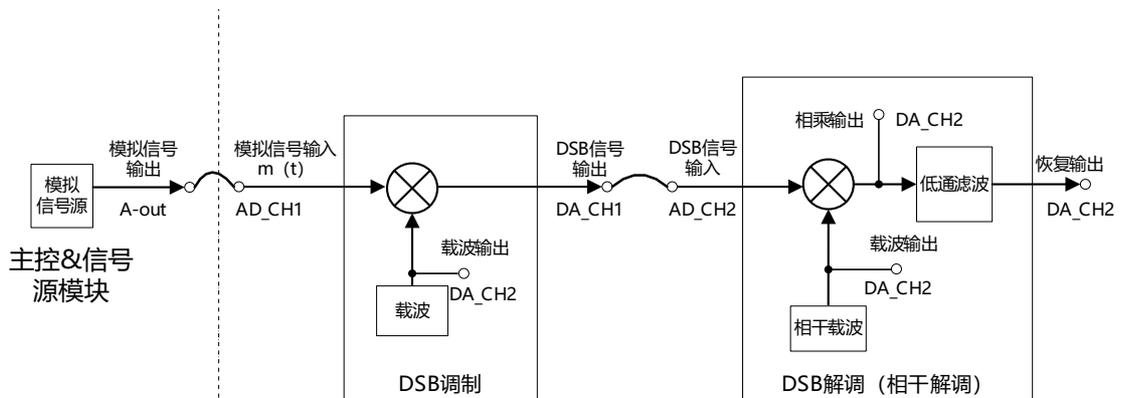
- 1、 研究已调波与调制信号以及载波信号的关系。
- 2、 与 AM 调制做对比。
- 3、 了解使用 FPGA 实现 DSB 调制及解调的方法。

二、实验器材

- | | |
|--------------------|-----|
| 1、 主控&信号源 、 28 号模块 | 各一块 |
| 2、 双踪示波器 | 一台 |
| 3、 连接线 | 若干 |

三、实验原理

1、 实验原理框图



28# 软件无线电模块

图28-1 DSB调制及解调原理框图

2、 实验原理说明

在 AM 信号中，载波分量并不携带信息，信息完全由边带传送。如果在 AM 调制模型中将直流分量去掉，即可得到一种高调制效率的的调制方式——抑制载波双边带信号（DSB-SC），简称双边带信号（DSB）。其时域表达式为

$$S_{DSB}(t) = m(t) \cos \omega_c t$$

式中，假设 $m(t)$ 的平均值为 0。DSB 的频谱与 AM 的谱相近，只是没有了在 $\pm \omega_c$ 处的 δ

函数，即

$$S_{\text{DSB}}(\omega) = 1/2[M(\omega + \omega_c) + M(\omega - \omega_c)]$$

DSB 调制输出波形如下

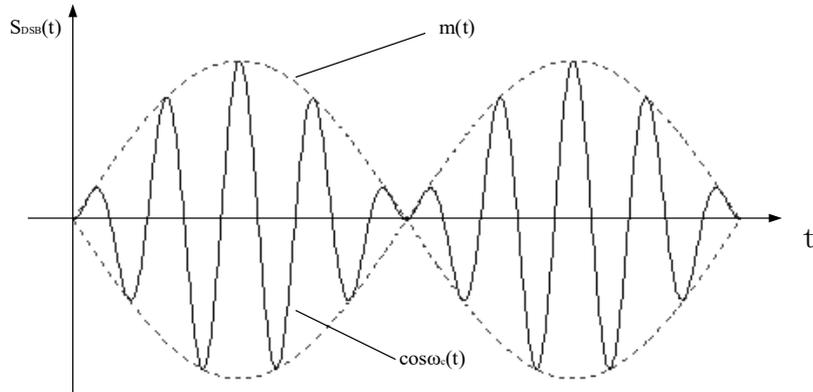


图 28-2 DSB 调制输出波形

与 AM 信号比较，因为不存在载波分量，DSB 信号的调制效率是 100%，即全部功率都用于信息传输。但是 DSB 信号的包络不再与调制信号的变化规律一致，因而不能采用简单的包络检波来恢复调制信号。DSB 信号解调时需采用相干解调，也称同步检测。

本实验使用相干解调法。设输入的已调波为载波分量被抑止的双边带信号 v_1 ，

$$v_1 = V_1 \cos \Omega t \cos \omega_1 t$$

$$\text{本地载波电压 } v_0 = V_0 \cos(\omega_0 t + \varphi)$$

本地载波的角频率 ω_0 准确的等于输入信号载波的角频率 ω_1 ，即 $\omega_1 = \omega_0$ ，但二者的相位可能不同；这里 φ 表示它们的相位差。

这时相乘输出（假定相乘器传输系数为 1）

$$\begin{aligned} v_2 &= V_1 V_0 (\cos \Omega t \cos \omega_1 t) \cos(\omega_2 t + \varphi) \\ &= \frac{1}{2} V_1 V_0 \cos \varphi \cos \Omega t + \frac{1}{4} V_1 V_0 \cos[(2\omega_1 + \Omega)t + \varphi] \\ &\quad + \frac{1}{4} V_1 V_0 \cos[(2\omega_1 - \Omega)t + \varphi] \end{aligned}$$

低通滤波器滤除 $2\omega_1$ 附近的频率分量后，就得到频率为 Ω 的低频信号

$$v_{\Omega} = \frac{1}{2} V_1 V_0 \cos \varphi \cos \Omega t$$

由上式可见，低频信号的输出幅度与 φ 成正比。当 $\varphi=0$ 时，低频信号电压最大，随着相位差 φ 加大，输出电压减弱。因此，在理想情况下，除本地载波与输入信号载波的角频率必须相等外，希望二者的相位也相同。此时，乘积检波称为“同步检波”。

本实验中解调端所使用到的低通滤波器为 8KHZ 的 Fir 滤波器。

3、端口说明

本实验可用到的实验端口号为 AD_CH1、AD_CH2、DA_CH1、DA_CH2。

AD_CH1 和 AD_CH2：模拟输入信号的端口。

DA_CH1 和 DA_CH2：模拟输出信号的端口。

端口默认状态：AD_CH1 输入调制信号，DA_CH1 输出 DSB 已调制信号，AD_CH2 输入 DSB 解调信号，DA_CH2 输出恢复信号。其中 DA_CH2 端口可自定义输出调制端载波输出信号以及解调端载波输出信号、相乘输出信号和恢复信号。

四、实验任务

任务一 DSB 调制的信号观测

1、实验准备

1) 实验连线：

模块关电，按表格所示进行信号连线。

源端口	目的端口	连线说明
信号源：A-OUT	模块 28：AD_CH1 (模拟信号输入)	提供调制信号
模块 28：DA_CH1 (DSB 已调制信号输出)	模块 28：AD_CH2(模拟信号输入)	提供解调信号

2) 菜单设置：

开电，设置主控菜单，选择【主菜单】→【模块设置】→【28 软件无线电】→【DSB 调制解调】。

用示波器观测主控模块的 A-OUT 端口，设置 A-OUT 的输出信号类型为正弦波、频率

为 2000Hz，幅度设置为 2V（通过示波器实测，自行设置输出 2V 左右即可）。

2、实验操作及波形观测与分析

用示波器观测 28 号模块的调制输出端口时域及频域波形。适当改变信号源 A-OUT 输出幅度和输出频率，观察调制输出波形的变化情况，并记录波形。

注：观察输入调制信号波形与输出的双边带调幅波信号的包络，对比 DSB 调制输出与 AM 调制输出波形时域和频域上的波形，分析二者有何区别。

任务二 载波信号对 DSB 调制的影响

基于任务一的参数设置，改变载波信号的频率和幅度，用示波器观测 28 号模块的调制输出端口波形，并记录波形。

任务三 DSB 解调信号的观测及载波对解调信号的影响

基于任务一的参数设置，用示波器观测信号源的调制信号 A-OUT 和 28 号模块的解调输出信号波形，观测解调输出结果。改变发送和接收载波信号的幅度或频率，观测载波对调制输出和解调输出的影响，并记录波形。

任务四 DSB 的幅频响应

基于任务一的参数设置，改变模拟信号源的幅度，观测调制信号幅度对解调波形的影响，并记录波形。

五、实验报告

- 1、分析实验电路的工作原理，简述其工作过程。
- 2、观测并分析实验过程中的实验现象，记录实验波形并与 AM 信号做对比。

实验二十九 SSB 调制及解调实验（选做）

一、实验目的

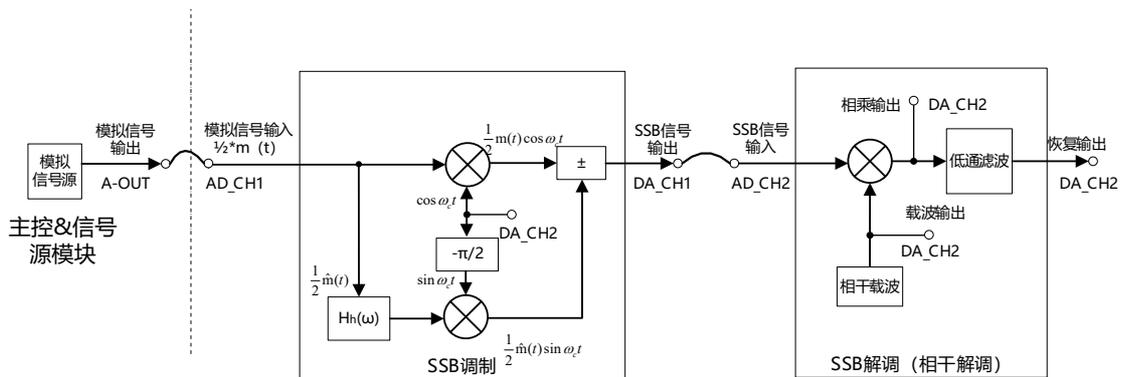
- 1、理解 SSB 信号调制与解调基本原理。
- 2、掌握 SSB 信号的波形及频谱特点并与 AM 和 DSB 调制信号做对比。
- 3、了解使用 FPGA 实现 SSB 调制及解调的方法。

二、实验器材

- | | |
|----------------|-----|
| 1、主控&信号源、28号模块 | 各一块 |
| 2、双踪示波器 | 一台 |
| 3、连接线 | 若干 |

三、实验原理

1、实验原理框图



28# 软件无线电模块

图29-1 SSB调制解调原理框图

2、实验原理说明

单边带调制（SSB）信号通常是将双边带信号的一个边带滤掉而形成的。这里采用的是相移法产生SSB信号。

SSB信号的频域表示直观、简明，但其时域表达式的推导比较困难，需借助希尔伯特（Hilbert）变换来表述。为简单起见，我们以单频调制为例，然后推广到一般情况。

设单频调制信号为

$$m(t) = A_m \cos \omega_m t \quad (1)$$

载波为

$$c(t) = \cos \omega_c t$$

则DSB信号的时域表达式为

$$s_{DSB}(t) = A_m \cos \omega_m t \cos \omega_c t = \frac{1}{2} A_m \cos(\omega_c + \omega_m)t + \frac{1}{2} A_m \cos(\omega_c - \omega_m)t$$

保留上边带，则有

$$s_{DSB} = \frac{1}{2} A_m \cos(\omega_c + \omega_m)t = \frac{1}{2} A_m \cos \omega_m t \cos \omega_c t - \frac{1}{2} A_m \sin \omega_m t \sin \omega_c t \quad (2)$$

保留下边带，则有

$$s_{LSB} = \frac{1}{2} A_m \cos(\omega_c - \omega_m)t = \frac{1}{2} A_m \cos \omega_m t \cos \omega_c t + \frac{1}{2} A_m \sin \omega_m t \sin \omega_c t \quad (3)$$

把上下边带公式合并起来写，可以写成

$$s_{SSB}(t) = \frac{1}{2} A_m \cos(\omega_c + \omega_m)t = \frac{1}{2} A_m \cos \omega_m t \cos \omega_c t \mp \frac{1}{2} A_m \sin \omega_m t \sin \omega_c t \quad (4)$$

式中：“-”代表上边带信号，“+”代表下边带信号。

在式（4）中， $A_m \sin \omega_m t$ 可以看成 $A_m \cos \omega_m t$ 相乘 $\frac{\pi}{2}$ 的结果，而幅度大小保持不变。我

们把这一过程称为希尔伯特变换，记为“ $\hat{\Lambda}$ ”，则有

$$\hat{A_m \cos \omega_m t} = A_m \sin \omega_m t$$

故式（4）可以改写为

$$s_{SSB}(t) = \frac{1}{2} A_m \cos \omega_m t \cos \omega_c t \mp \frac{1}{2} \hat{A_m \cos \omega_m t} \sin \omega_c t \quad (5)$$

上述关系虽然是在单频调制下得到的，但是它不失一般性，因为任意一个基带波形总是可以表示成许多正弦信号之和。所以，把式（5）推广到一般情况，即可得到调制信号为任意信号时SSB信号的时域表达式，即

$$s_{SSB}(t) = \frac{1}{2} m(t) \cos \omega_c t \mp \frac{1}{2} \hat{m}(t) \sin \omega_c t \quad (6)$$

式中： $\hat{m}(t)$ 为 $m(t)$ 的希尔伯特变换。

若 $M(\omega)$ 为 $m(t)$ 的傅里叶变换，则 $\hat{m}(t)$ 的傅里叶变换为

$$\hat{M}(\omega) = M(\omega) * [-j \operatorname{sgn} \omega] \quad (7)$$

式中符号函数

$$\operatorname{sgn} \omega = \begin{cases} 1 & \omega > 0 \\ -1 & \omega < 0 \end{cases} \quad (8)$$

式 (8) 中有明显的物理意义： $m(t)$ 通过传递函数为 $-j \operatorname{sgn} \omega$ 的滤波器即可得到 $\hat{m}(t)$ 。由此可知， $-j \operatorname{sgn} \omega$ 即是希尔伯特滤波器的传递函数，记为

$$H_h(\omega) = \frac{\hat{M}(\omega)}{M(\omega)} = -j \operatorname{sgn} \omega \quad (9)$$

式 (9) 中表明希尔伯特滤波器 $H_h(\omega)$ 实质上是一个宽带相移网络，对 $m(t)$ 中任意频率分量均相移 $\frac{\pi}{2}$ ，即可得到 $\hat{m}(t)$ 。

相移法是利用相移网络、对载波和调制信号进行适当的相移以便在合成过程中将其中的一个边带抵消而获得SSB信号。相移法不需要滤波器具有陡峭的截止特性，不论载频有多高，均可一次实现SSB调制。

SSB信号的实现比AM、DSB要复杂，但SSB调制方式在传输信息时，不仅可以节省发射功率，而且它所占用的频带宽度为 $D_{\text{SSB}} = f_H$ ，比AM、DSB减少了 $\frac{1}{2}$ 。它目前已成为短波通信中一种重要的调制方式。

SSB信号的解调和DSB一样，不能采用简单的包络检波，因为SSB信号也是抑制载波的已调信号，它的包络不能直接反映调制信号的变化，所以仍需采用相干解调。

本实验中解调端所使用到的低通滤波器为 8KHZ 的 Fir 滤波器。

3、端口说明

本实验可用到的实验端口号为 AD_CH1、AD_CH2、DA_CH1、DA_CH2。

AD_CH1 和 AD_CH2：模拟输入信号的端口。

DA_CH1 和 DA_CH2: 模拟输出信号的端口。

端口默认状态: AD_CH1 输入调制信号, DA_CH1 输出 SSB 已调制信号, AD_CH2 输入 SSB 解调信号, DA_CH2 输出恢复信号。其中 DA_CH2 端口可自定义输出调制端载波输出信号以及解调端载波输出信号、相乘输出信号和恢复信号。

四、实验任务

任务一 SSB 调制的信号观测及信号源幅度对调制信号的影响

1、实验准备

1) 实验连线:

模块关电, 按表格所示进行信号连线。

源端口	目的端口	连线说明
信号源: A-OUT	模块 28: AD_CH1 (模拟信号输入)	提供调制信号
模块 28: DA_CH1 (SSB 调制信号输出)	模块 28: AD_CH2(模拟信号输入)	提供解调信号

1) 菜单设置:

开电, 设置主控菜单, 选择【主菜单】→【模块设置】→【28 软件无线电】→【SSB 调制解调实验】。

用示波器观测主控模块的 A-OUT 端口, 设置 A-OUT 的输出信号类型为正弦波、频率为 3000Hz, 幅度设置为 2V (通过示波器实测, 自行设置输出 2V 左右即可)。

2、实验操作及波形观测与分析

用示波器观测 28 号模块的调制输出端口时域及频域波形。适当改变信号源 A-OUT 输出幅度, 观察调制输出波形的变化情况。

思考: 对比 DSB 与 SSB 调制输出信号时域和频域上的波形, 并分析两者的区别。

任务二 载波对调制信号的影响

基于任务一的参数设置, 改变载波信号的频率或幅度, 并用示波器观测 28 号模块的调制输出端口波形, 观测载波对调制输出的影响。

任务三 载波对解调信号的影响

基于任务一的参数设置，用示波器观测信号源的调制信号 A-OUT 和 28 号模块的解调输出信号波形，观测解调输出结果。改变发送和接收载波信号的幅度或频率，观测载波对解调输出的影响。

任务四 调制信号幅度对解调信号的影响

基于任务一的参数设置，增大模拟信号源的幅度，观测模拟信号源幅度对解调波形的影响。

五、实验报告

- 1、分析实验电路的工作原理，简述其工作过程。
- 2、观测并分析实验过程中的实验现象，记录实验波形并与 AM 和 DSB 信号做对比。

实验三十 FM 调制及解调实验（选做）

一、实验目的

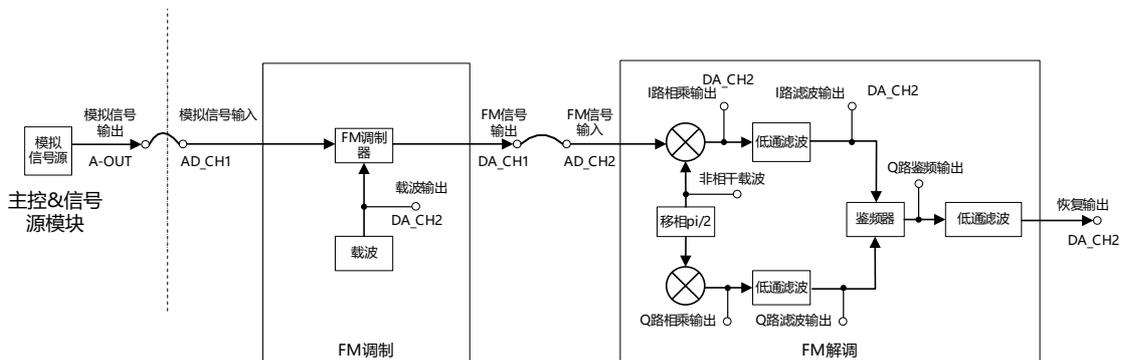
- 1、理解 FM 信号调制与解调基本原理。

二、实验器材

- | | |
|----------------|-----|
| 1、主控&信号源、28号模块 | 各一块 |
| 2、双踪示波器 | 一台 |
| 3、连接线 | 若干 |

三、实验原理

1、实验原理框图



28# 软件无线电模块

图30-1 FM调制及解调实验原理框图

2、相关知识介绍

正弦载波有三个参量：幅度、频率和相位。我们不仅可以把调制信号的信息载荷于载波的幅度变化中，还可以载荷于载波的频率或相位变化中。在调制时，若载波的频率随调制信号变化，称为频率调制或调频（FM）。频率调制与幅度调制不同的是，已调信号频谱不再是原调制信号频谱的线性搬移，而是频谱的非线性变换，会产生与频谱搬移不同的新的频率成分，故又称为非线性调制。目前FM已广泛应用于高保真音乐广播、电视伴音信号的传输、卫星通信和蜂窝电话系统等。

频偏，一般说的是最大频偏，是调频波里的特有现象，是指固定的调频波频率向两侧的偏移。首先要说明的是，调频波是电磁波的一种形式，是传输图像、声音和其它有用信号的

一种工具。利用调频波可以传送声音，比如调频广播；也可以传送图像，比如电视等等。利用声音信号（专业术语为音频信号）对调频波进行调制，可以使固定的调频波频率向两边偏移，当然利用图像信号（专业术语称为视频信号）也可以使固定的调频波频率向两边偏移，这就使调频波的频率产生了频偏。

FM调制模块本质上也是一个DDS，区别就在于前者是一个频率可以按照一定规律变化的DDS，在本实验中，信源用模拟信号代替，载波是正弦波，在FPGA内部通过DDS产生正弦信号来模拟AD采样数据。用DDS产生10位的调制信号和载波信号，然后合成已调信号，最后将已调信号通过数模转换器变为模拟信号，在示波器上进行观察。

3、实验原理介绍

调频就是对载波的频率项 f_c （或角频率 ω_c ）进行调制，使载波的瞬时频率随着音频调制信号的大小而变化，在最终的结果上，实际上是总相角 $\omega_c t$ 随调制信号变化，而载波的幅度保持不变。用数学表达式可表述为：

$$u_c(t) = u_c * \cos(\omega_c t + m_f * \sin \Omega t)$$

其中， $m_f = K_f U_\Omega / \Omega$ ，称为调频指数，可为任意正值。从物理意义上说，调频指数代表着在调频过程中相角偏移的幅度。习惯上把最大频移称为频偏。

本实验中采用的是正交解调的方案，对接收数据进行FM解调，运算过程如下：

FM信号标准表达式为： $S_1(t) = S_{FM}(t) = A_0 \cos(\omega_c t + K_f \int_{-\infty}^t m(\tau) d\tau)$ ，经过ADC采样后，数据会变成如下的离散序列：

$$S(n) = A_0 \cos[\omega_c n + k \sum m(n) + \Phi_0]$$

将该信号由中频搬到基带，然后正交分解后得：

$$\text{同相分量： } X_I(n) = A_0 \cos(k \sum m(n) + \Phi_0)$$

$$\text{正交分量： } X_Q(n) = A_0 \sin(k \sum m(n) + \Phi_0)$$

对于FM信号而言，解出 $k \sum m(n) + \Phi_0$ ，并进一步得到当前频率值 $m(n)$ ，就是基带芯片

工作的核心目的，因为将 $m(n)$ 送入DAC就能解调出音乐信号。因此，FM解调芯片的基带算法要完成以下工作：

- 1) 求出正交和同相分量之比值。
- 2) 进行反正切运算 $M_{sum}(n) = \arctan(X_Q / X_I)$
- 3) 对 $M_{sum}(n)$ 序列进行差分运算，得到 $m(n) = M_{sum}(n) - M_{sum}(n-1)$

此时 $m(n)$ 序列就是FM解调后的最终结果，而求 $m(n)$ 序列的过程则被称为鉴频。

在芯片实现时，如果直接采用上面的FM解调方法，需要完成两个比较复杂的运算：①正交与同相的除法运算；②求除法计算结果的反正切。这两种运算在芯片设计中通常需要进行优化处理。对于除法运算，需要避免无限小和无限大两种情况。当除法接近无限小时，需要利用近似公式 $\theta = \arctan \theta$ 直接进行运算；而当除法接近无限大时，则需要将除数与被除数进行颠倒，再通过非常小的计算公式。而反正切运算则需要使用CORDIC算法，并且还需要适应整个的完整 $[-\pi, \pi]$ 区间。

除了上述问题，FM鉴频还存在一个“门限效应”问题。正常情况下，基于I/Q的解调在进行鉴频时，输入信噪比与输出信噪比具有良好的比例关系。而当鉴频的输入信噪比降低到一个特定的数值后，检波器的输出信噪比会出现急剧恶化，这是非线性解调特有的问题，称为门限效应。

门限效应的根源是由 $\arctan(X_Q / X_I)$ 运算带来的非线性。令 $X_I = \bar{X}_I + n_i(t)$ ， $X_Q = \bar{X}_Q + n_q(t)$ ，其中 \bar{X}_I 与 \bar{X}_Q 是FM的有效I/Q信号， $n_i(t)$ 与 $n_q(t)$ 是噪声。正常情况下 \bar{X}_I 与 \bar{X}_Q 大于 $n_i(t)$ 与 $n_q(t)$ ，因此 $\arctan(X_Q / X_I)$ 的结果取决于 \bar{X}_I 与 \bar{X}_Q 。但在小信噪比情况下， $\arctan(X_Q / X_I)$ 的结果不再取决于 \bar{X}_I 与 \bar{X}_Q ，因此输出的反正切运算结果的信噪比不是按比例地随着输入信噪比的变化下降，而是急剧恶化。开始出现门限效应的输入信噪比称为门限值。

既然有门限效应，为什么不按照最优方式解调呢？这是因为鉴频方式简单、稳定、可靠，且经过多年的考验，成本很低。而最优方式由于最优解调需要处理频偏、跟踪相位、加入PLL

等，复杂度太高，适应性很差，这也就是商业芯片通常采用鉴频的原因。

为规避门限效应和CORDIC等复杂运算，FM解调芯片提出如下几点改进措施。

(1) 将差分（微分）与反正切运算结合

利用数字方式对FM信号解调，原理上就是计算瞬时频率，瞬时频率是相位的倒数，因此可以在数字域，用一阶差分替代求导运算，新的FM解调思路如下：

$$m(t) = \frac{d(M_{sum}(t))}{dt}, \quad M_{sum}(n) = \arctan\left(\frac{Q(t)}{I(t)}\right)$$

将上述两个表达式合并，可得：

$$m(t) = \frac{I(t)Q'(t) - I'(t)Q(t)}{I^2(t) + Q^2(t)}$$

可以看出，计算m(t)的过程中没有三角运算了。对m(t)按照数字采样离散化处理后可得：

$$m(n) = \frac{I(n)[Q(n) - Q(n-1)] - [I(n) - I(n-1)]Q(n)}{I^2(t) + Q^2(t)}$$

$$m(n) = \frac{I(n-1)Q(n) - I(n)Q(n-1)}{I^2(t) + Q^2(t)}$$

(2) 除法保护和恒包络特性

上面给出的m(n)计算方法就是 用于消除门限效应的FM解调方程，但该公式仍然有一定的优化空间，这是因为在芯片设计中通常会对除法操作做各种保护和优化。对于FM这种恒包络信号，在没有噪声的情况下，理论幅度 $\sqrt{I^2 + Q^2}$ 应该完全相同，但在噪声干扰下会有大量的异常情况（例如值非常大或者非常小）。

对于异常情况，芯片通常的做法是：将 $I^2 + Q^2$ 进行限幅，对所有计算出来的 $I^2 + Q^2$ 值进行平滑滤波。如果当前值偏离标准值2倍以上，则直接取限幅值。另外，如果根据FM恒包络特性，不做 $I^2 + Q^2$ 的除法，直接取 $m(n) = I(n-1)Q(n) - I(n)Q(n-1)$ ，FM解调性能相对最优算法性能大约会损失2dB左右。

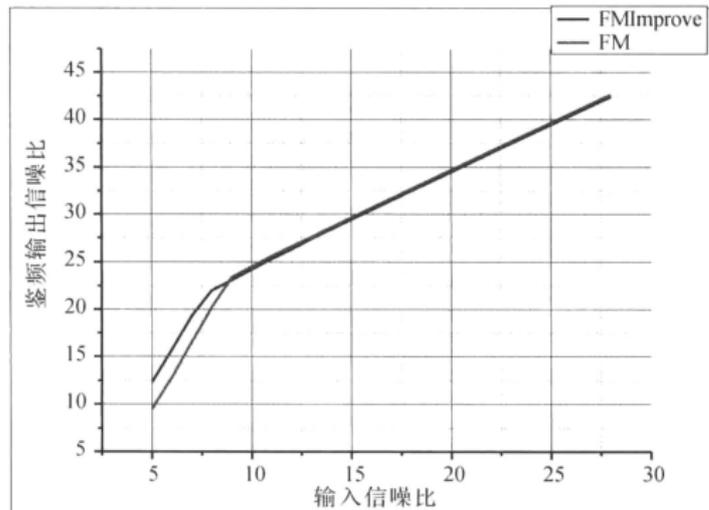
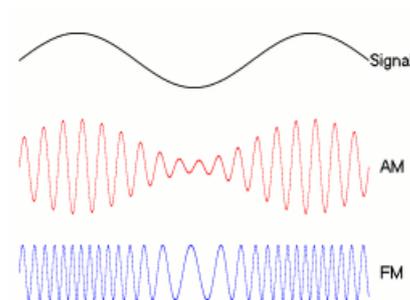


图30-2 FM新旧算法性能对比图

本实验中FM的解调端IQ支路2个低通滤波器均为FIR类型，带宽为496K。鉴频后滤波器带宽8K，滤波器类型为FIR低通滤波器。

调频信号的理论带宽 $BW \approx 2 * (f + \Delta f_m)$,其中f为被调制信号的频率， Δf_m 为最大频偏。

注：这里的最大频偏值由被调制信号源的幅度和频偏方差共同决定的，这里的频偏方差可以理解为被调制信号源的幅度系数，测量时可以固定一方，改变另一方的大小来进行最大频偏值的测量。如当模拟信号源固定幅度为2V，频率为1KHZ的正弦波，频偏方差选择为“频偏1”时测得的FM已调信号带宽为30KHZ，带入上述公式得最大频偏值 Δf_m 约为14KHZ。



3、端口说明

本实验可用到的实验端口号为 AD_CH1、AD_CH2、DA_CH1、DA_CH2。

AD_CH1 和 AD_CH2：模拟输入信号的端口。

DA_CH1 和 DA_CH2: 模拟输出信号的端口, 可灵活设置为模拟输出信号的端口。

端口默认状态 AD_CH1 输入调制信号, DA_CH1 输出 FM 已调制信号, AD_CH2 输入 FM 解调信号, DA_CH2 输出恢复信号。其中 DA_CH2 端口可自定义输出调制端载波输出信号以及解调端 I 路相乘输出、非相干载波、I 路滤波输出、鉴频输出以及恢复信号。

四、实验任务

任务一 FM 调制信号观测及频偏的近似测量

1、实验准备

1) 实验连线:

模块关电, 按表格所示进行信号连线。

源端口	目的端口	连线说明
信号源: A-OUT	模块 28: AD_CH1 (模拟信号输入)	提供调制信号
模块 28: DA_CH1 (FM 调制信号输出)	模块 28: AD_CH2(模拟信号输入)	提供解调信号

2) 菜单设置:

开电, 设置主控菜单, 选择【主菜单】→【模块设置】→【28 软件无线电】→【FM 调制及解调】。

用示波器观测主控模块的 A-OUT 端口, 调节 W1 旋钮使 A-OUT 输出幅度设置为 1V, 频率为 2KHZ 的正弦波 (通过示波器实测, 自行设置输出 1V 左右即可)。设置频偏方差为“小”

2、实验操作及波形观测与分析

用示波器观测 28 号模块的调制输出端口时域及频域波形, 利用示波器的 FFT 功能近似测量出此时的最大频偏值 Δf_m 。然后分别选择“中”和“大”, 近似测量出最大频偏值。

任务二 调制信号幅度对频偏的影响

固定频偏方差, 改变模拟信号源的幅度, 近似测量出最大频偏值。

任务三 FM 解调信号观测及信号源对解调信号的影响

用示波器观测信号源的调制信号 A-OUT 和 28 号模块的解调输出信号波形, 观测解调



输出结果。改变模拟信号源的幅度或频率，观测模拟信号源对调制输出和解调输出的影响。

任务四 载波对 FM 解调的影响：

改变载波信号的频率或幅度，观测载波信号对解调波形的影响。

五、实验报告

- 1、分析实验电路的工作原理，简述其工作过程。
- 2、观测并分析实验过程中的实验现象，记录实验波形及结果。

第九章 虚实结合实验（选做）

实验三十一 MSK 信号传输实验（选做）

一、实验目的

- 1、通过软硬件联合仿真完成 MSK 调制解调信号传输过程。

二、实验器材

- | | |
|----------|----|
| 1、 实验箱 | 两台 |
| 2、 PC 机 | 两台 |
| 3、 双踪示波器 | 一台 |
| 4、 射频线 | 一根 |
| 5、 连接线 | 若干 |
| 6、 天线 | 两根 |
| 7、 网线 | 两根 |

三、实验原理

1、实验原理框图

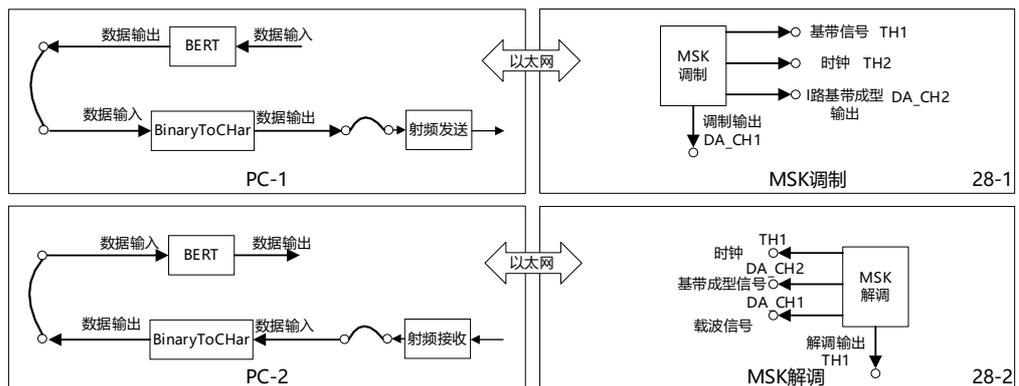


图 31-1 MSK 信号传输实验

2、实验框图说明

本实验中数字信号（文本信号、图像信号）由 PC-1 上的 e-LabRadio 软件的误码仪模块（或文本数据源模块、图像接收模块）产生，通过以太网将信号送至一台实验箱上的 28 号模

块进行 MSK 调制，调制后的信号送入另一台实验箱上的 28 号模块进行 MSK 解调，解调后的信号通过以太网送回另一台电脑 PC-2 上，PC-2 上的 e-LabRadio 通过对比原始发送的数据信号与接收到的数据信号并进行误码检测计数，最后显示出误码个数和误码率（或通过文本接收显示模块显示发送的文本数据、通过图像显示模块显示发送的图像）。

四、实验任务

任务一 MSK 数字信号传输实验

概述：本实验主要是通过软件提供数字信号，由硬件进行调制解调之后再送回软件进行系统传输性能评估，了解通过软硬件联合实现 MSK 数字信号传输的过程。

注：实验箱 1 的 28 号模块完成 MSK 调制功能，这里简称 28-1；实验箱 2 的 28 号模块完成 MSK 解调功能，这里简称 28-2,实验过程中注意区分。

1、关电，使用射频线连接模块 28-1 的 DA_CH1 端口至模块 28-2 的 AD_CH1 端口，将调制信号送入到解调端。

2、用网线连接 PC-1 与模块 28-1，将软件产生的数字信号传输到硬件；用网线连接 PC-2 与模块 28-2，将硬件解调的数字信号送回软件。可通过 PC 机上的 cmd.exe 工具查看是否连接成功。方式如下：实验箱及模块开电，在 cmd 界面上输入“ping X.X.X.X”，其中“X.X.X.X”为该 28 模块的 IP 地址（出厂默认 IP 地址为 192.168.1.170），如：192.168.1.173。成功连接时，cmd 界面显示如下：

```
C:\Users\WMQ>ping 192.168.1.173
正在 Ping 192.168.1.173 具有 32 字节的数据:
来自 192.168.1.173 的回复: 字节=32 时间<1ms TTL=255

192.168.1.173 的 Ping 统计信息:
    数据包: 已发送 = 4, 已接收 = 4, 丢失 = 0 (0% 丢失),
    往返行程的估计时间<以毫秒为单位>:
        最短 = 0ms, 最长 = 0ms, 平均 = 0ms
```

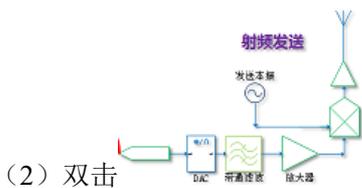
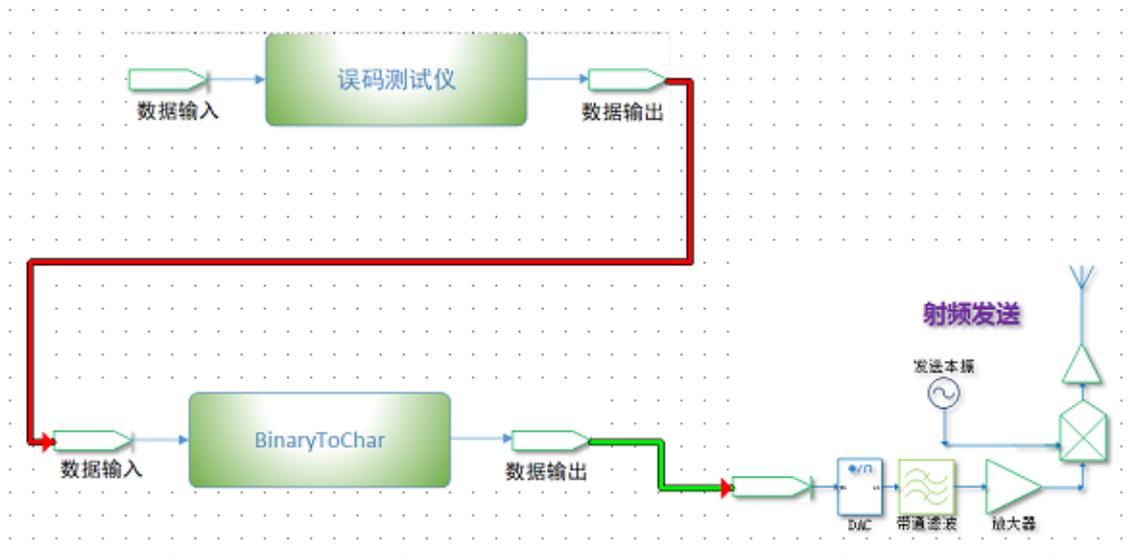
3、调制解调系统搭建。

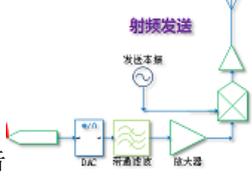
在两台实验箱上分别将实验模块开电，在显示屏主界面，开电，设置主控菜单，选择【主菜单】→【模块设置】→【28 软件无线电】→【虚实结合】。在实验箱 1 上选择【MSK

调制】；在实验箱 2 上选择【MSK 解调】→【AD_CH1 通道解调（有线）】。此时 28-1 模块执行 MSK 调制功能，28-2 模块执行 MSK 解调功能。

4、数字信号发射系统搭建。

(1) 登录 e-LabRadio 软件，点击【文件】→【新建】，新建一个空白的工作区，展开左侧系统库中“硬件接口模块”组，双击 eNodeX-10A 发射器，然后将鼠标移动到工作区内左键单击，即可调用该模块。用同样的方式调用“仪器仪表模块”组的“误码测试仪”和“类型转换模块”组的“Bits 转换 Byte”，按照下图所示进行连线。



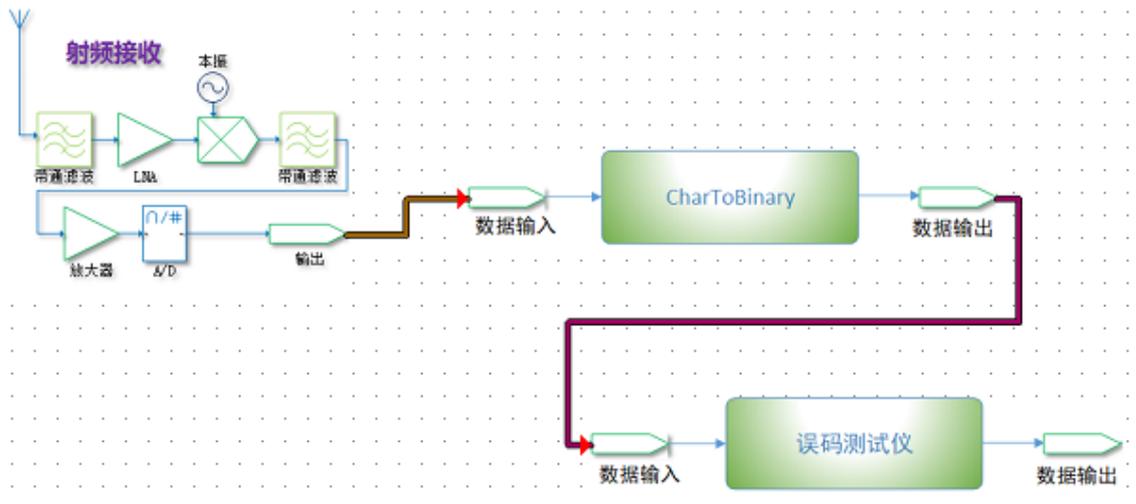
(2) 双击 ，将发送地址改为 28-1 模块的 IP 地址（出厂 IP 地址为 192.168.1.170），端口号为 8089，点击【设置】，设置完成之后点击【确定】。

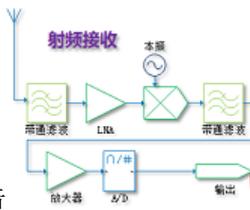


注: eNodeX-CX 发射器的可设置参数中, 发射频率、采样速率以及发送VGA增益均与实验无关, 实验过程中只要参数默认值处于可调范围内均不用设置。

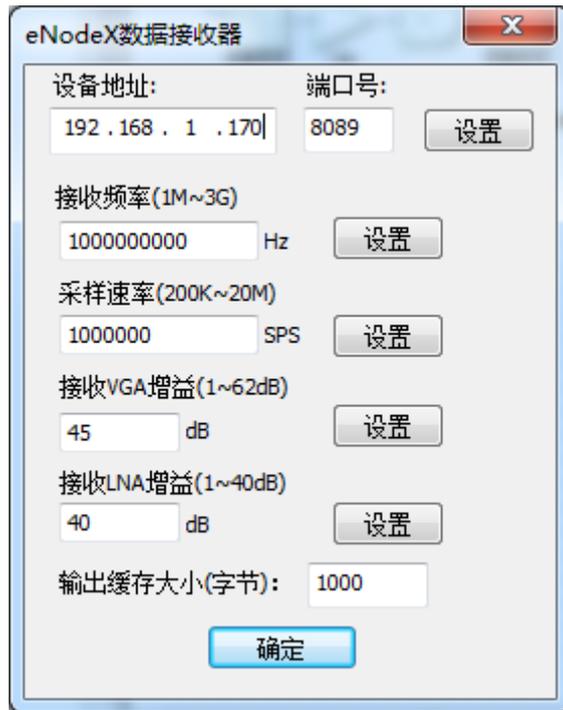
5、数字信号接收系统搭建。

(1) 登录 e-LabRadio 软件 (PC-2), 点击【文件】→【新建】, 新建一个空白的工作区, 展开左侧系统库中“硬件接口模块”组, 双击 eNodeX-10A 接收器, 然后将鼠标移动到工作区内左键单击, 即可调用该模块。用同样的方式调用“类型转换模块”组里的“Byte 转换 Bits”以及“仪器仪表模块”组的“误码测试仪”, 按照下图所示进行连线。





(2) 双击 ，将接收地址改为 28-2 模块的 IP 地址（出厂 IP 地址为 192.168.1.170），端口号为 8089，点击【设置】，设置完成之后点击【确定】。



注：除设备地址参数外，其它参数均与本实验无关，无需设置。

6、系统联调。

(1) 在 PC-1 上双击 ，发送端设置数据码型为 PN15，码速率 512000Hz。点击 ，运行 e-Labradio 软件。

(2) 在 PC-2 上双击 ，接收端设置数据码型为 PN15，码速率 512000Hz。点击 ，运行 e-LabRadio 软件。查看接收端的同步状态。

7、实验操作及波形观测。

用示波器观测传输过程中的中间观测点信号。

8、有兴趣的同学可以改变误码仪的数据类型再进行数据观测，方法如下：分别点击软件的 ，关闭 PC-1 和 PC-2 的仿真，在 PC-1 和 PC-2 上分别双击



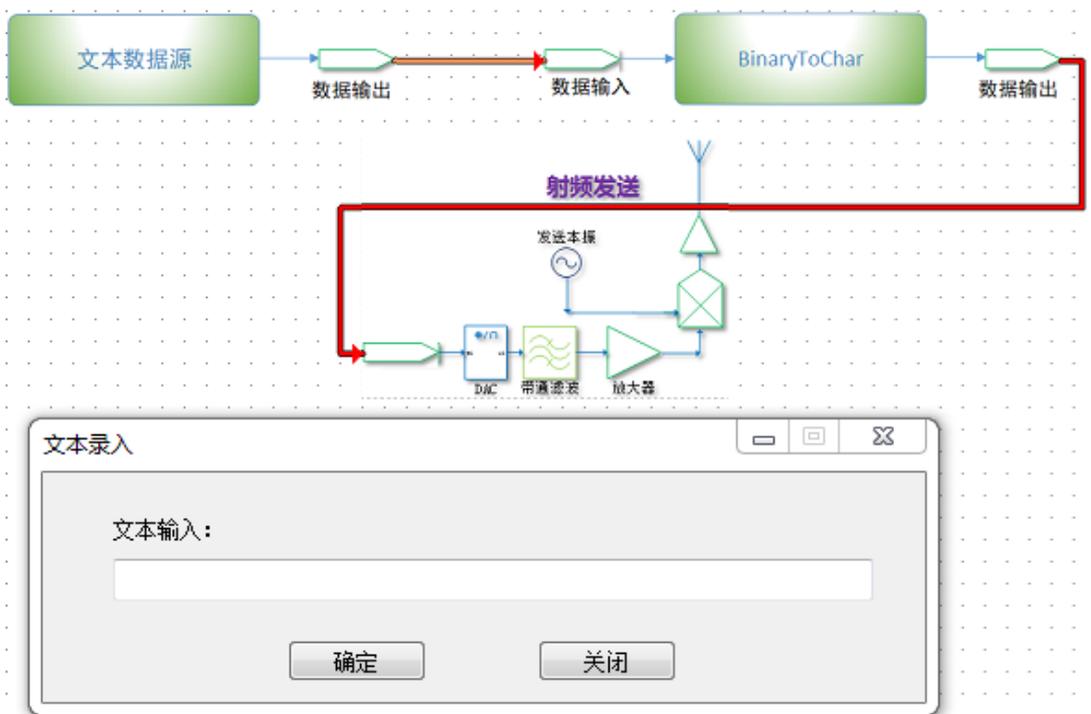
，选择相同的数据类型，再分别点击 ，运行仿真。

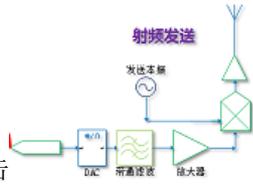
任务二 MSK 文本信号传输实验

概述：本实验主要是通过软件提供文本信号，由硬件进行调制解调之后再送回软件进行文本展示，了解通过软硬件联合实现 MSK 文本信号传输的过程。

- 1、重复任务一步骤 1、2、3。
- 2、文本信号发射系统搭建。

(1) 登录 e-LabRadio 软件，点击【文件】→【新建】，新建一个空白的工作区，依次从软件左侧的系统库中调用“信号源模块”组的“文本数据源”、“类型转换模块”组的“Bits 转换 Byte”、“硬件接口模块”组的“eNodeX-10A 发射器”模块，按照下图所示进行连线。



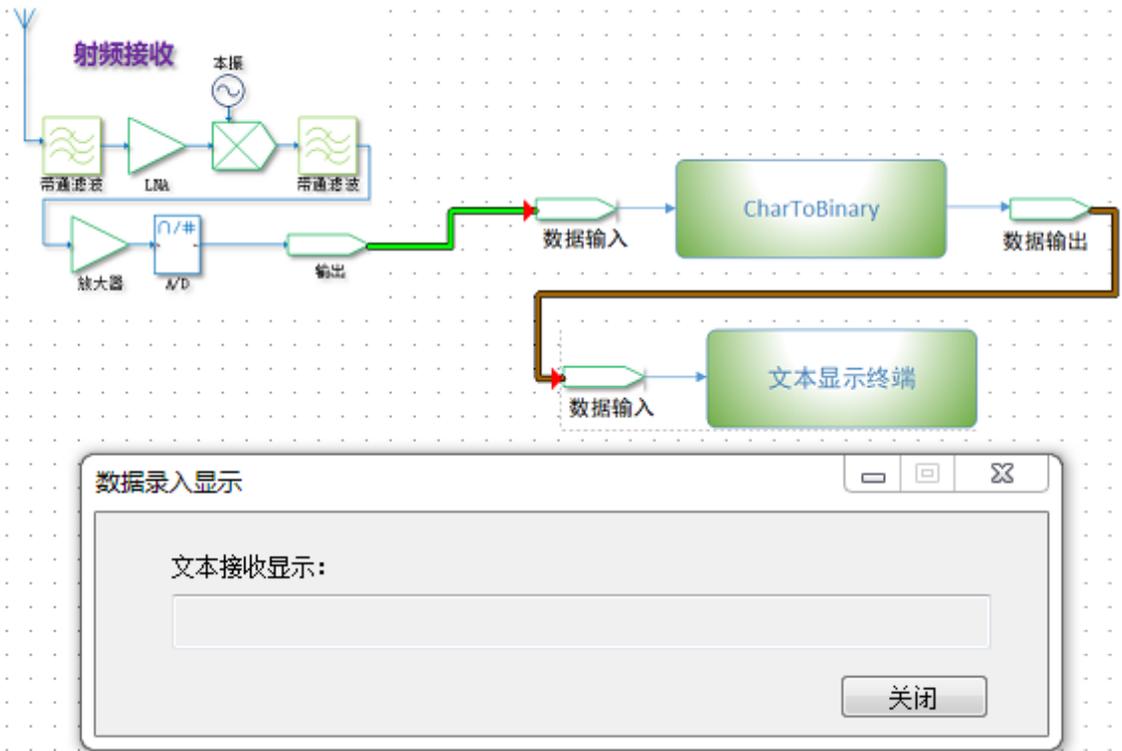


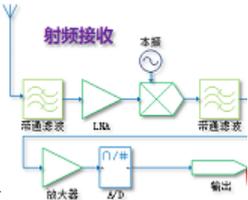
(2) 双击  ，将发送地址改为 28-1 模块的 IP 地址（出厂 IP 地址为 192.168.1.170），端口号为 8089，点击【设置】，设置完成之后点击【确定】。

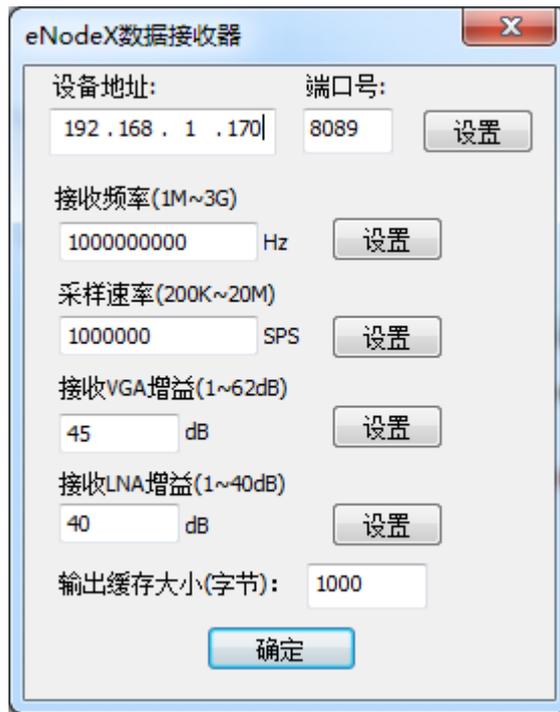


3、文本信号接收系统搭建。

(1) 登录 e-LabRadio 软件 (PC-2)，点击【文件】→【新建】，新建一个空白的画布，依次从软件左侧的系统库中调用“硬件接口模块”组的“eNodeX-10A 接收器”、“类型转换模块”组的“Byte 转换 Bits”、“终端信宿模块”组的“文本接收显示”，按照下图所示进行连线。



(2) 双击 ，将接收地址改为 28-2 模块的 IP 地址（出厂 IP 地址为 192.168.1.170），端口号为 8089，点击【设置】，设置完成之后点击【确定】。

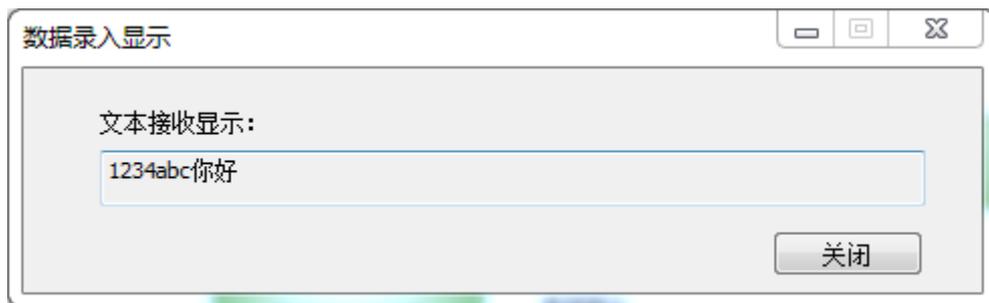


4、系统联调。

(1) 在 PC-1 上点击 ，运行 e-Labradio 软件在文本输入栏输入要发送的文本内容，如下图所示。



(2) 在 PC-2 上点击 ，运行 e-LabRadio 软件。查看接收端的文本状态显示，如下图所示。

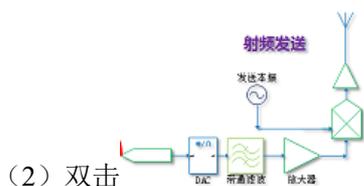
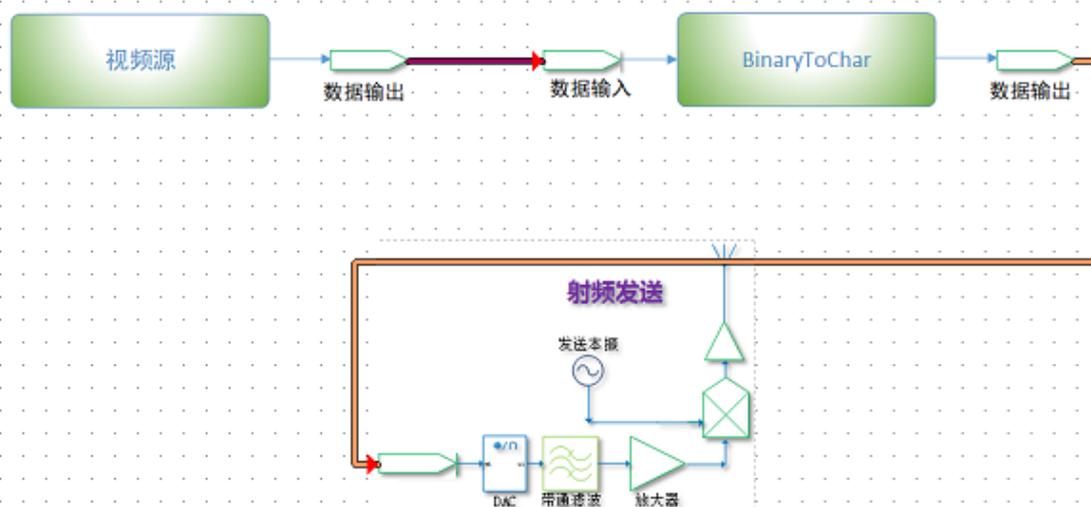


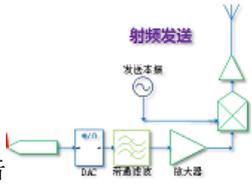
任务三 MSK 图像信号有线传输实验

概述：本实验主要是通过软件提供视频信号，由硬件进行调制解调之后再送回软件进行图像显示，了解通过软硬件联合实现 MSK 图像信号传输的过程。

- 1、重复任务一步骤 1、2、3。
- 2、图像信号发射系统搭建。

(1) 登录 e-LabRadio 软件，点击【文件】→【新建】，新建一个空白的工作区，依次从软件左侧的系统库中调用“视频源”、“Bits 转换 Byte”、“eNodeX-10A 发射器”模块，按照下图所示进行连线。

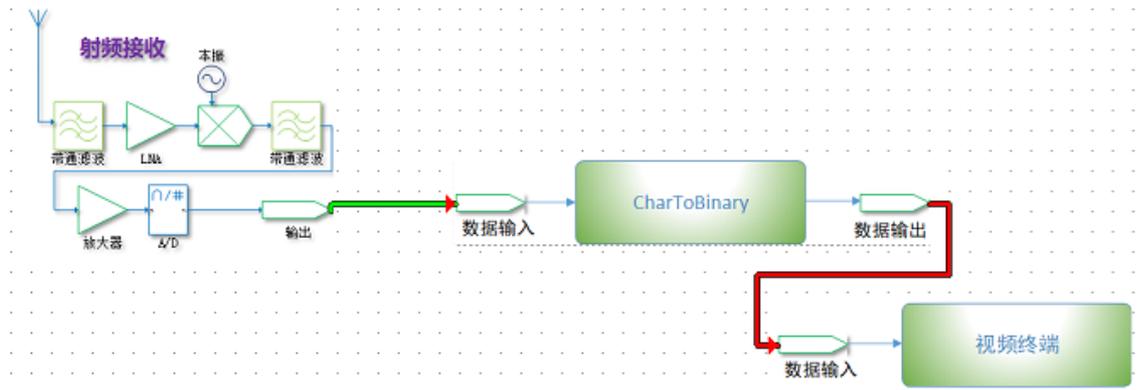


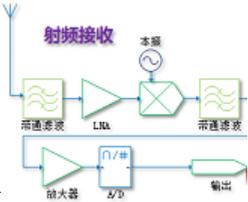
(2) 双击 ，将发送地址改为 28-1 模块的 IP 地址（出厂 IP 为 192.168.1.170），端口号为 8089，点击【设置】，设置完成之后点击【确定】。

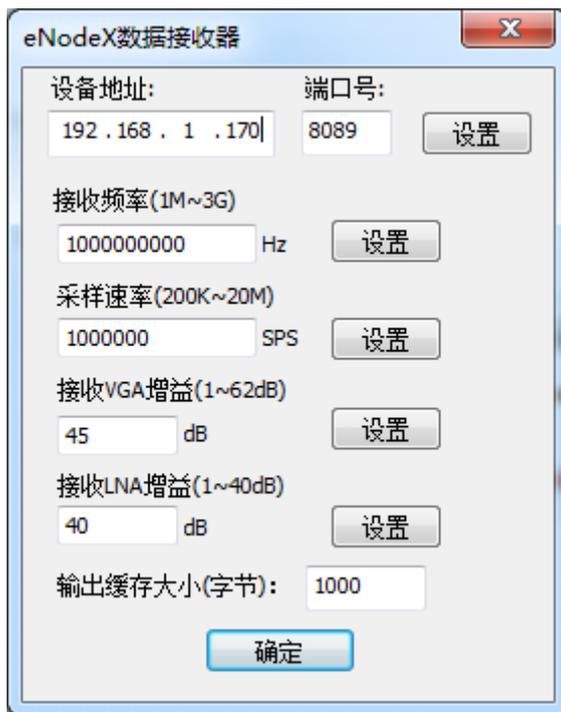


3、文本信号接收系统搭建。

(1) 登录 e-LabRadio 软件 (PC-2)，点击【文件】→【新建】，新建一个空白的工作区，依次从软件左侧的系统库中调用“eNodeX-10A 接收器”、“Byte 转换 Bits”、“视频终端”，按照下图所示进行连线。



(2) 双击 ，将接收地址改为 28-2 模块的 IP 地址（出厂 IP 地址为 192.168.1.170），端口号为 8089，点击【设置】，设置完成之后点击【确定】。



4、系统联调。

- (1) 在 PC-1 上点击 ，运行 e-Labradio 软件。双击视频源模块，开启摄像头。
- (2) 在 PC-2 上点击 ，运行 e-LabRadio 软件。双击视频终端模块



，可显示 PC-1 传输的图像信号。

任务四 MSK 图像信号无线传输实验（选）

1、在任务三的基础上关闭两个实验箱的模块电源，拆除两个实验箱之间的射频连接线。在实验箱 1 的 28 号模块 RF 发射端口和实验箱 2 的 28 号模块 RF 接收端口分别接上天线。在实验箱 2 的主控&信号源模块上选择【AD_RF 通道解调（无线）】，重复任务三的操作，观察视频信号的传输效果。

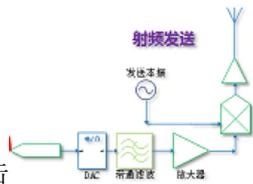
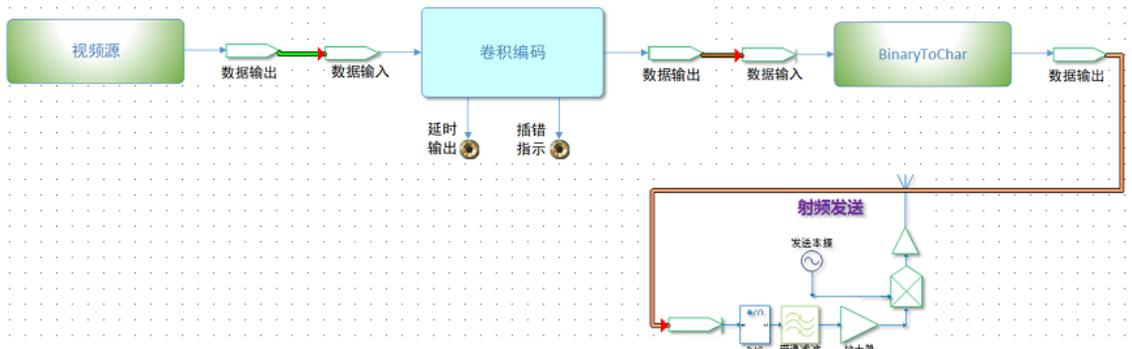
MSK 图像信号无线传输系统改进

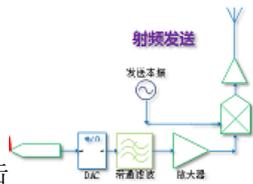
在实验过程中我们发现，当采用无线的方式传输视频信号时，信号的传输效果并不是很理想，那么我们如何进行系统的改进呢？下面将引入前面所学习到的抗干扰编译码技术即信道编译码技术。

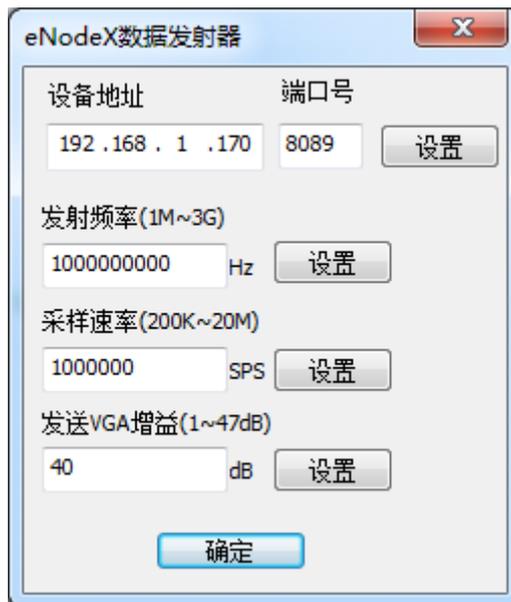
2、保持硬件连线和设置不变。

3、视频信号发射系统搭建。

(1) 登录 e-LabRadio 软件，点击【文件】→【新建】，新建一个空白的工作区，依次从软件左侧的系统库中调用“视频源”、“卷积编码”、“Bits 转换 Byte”、“eNodeX-CX 发射器”模块，按照下图所示进行连线。

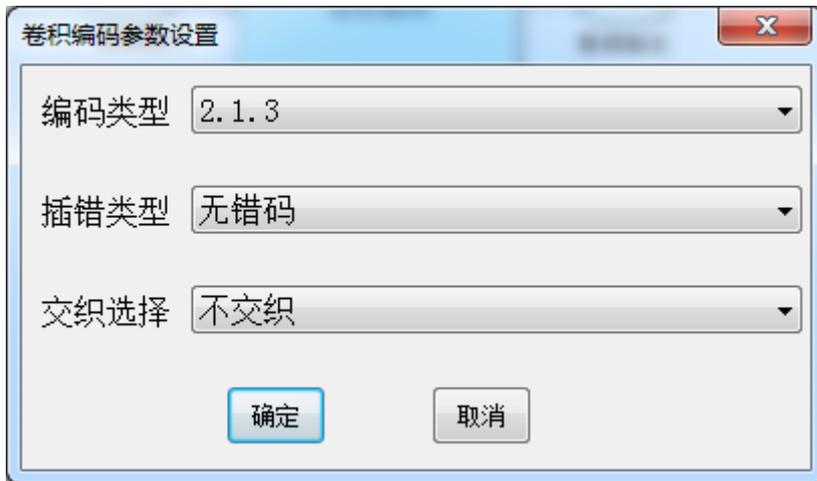


(2) 双击 ，将发送地址改为 28-1 模块的 IP 地址（出厂 IP 为 192.168.1.170），端口号为 8089，点击【设置】，设置完成之后点击【确定】。



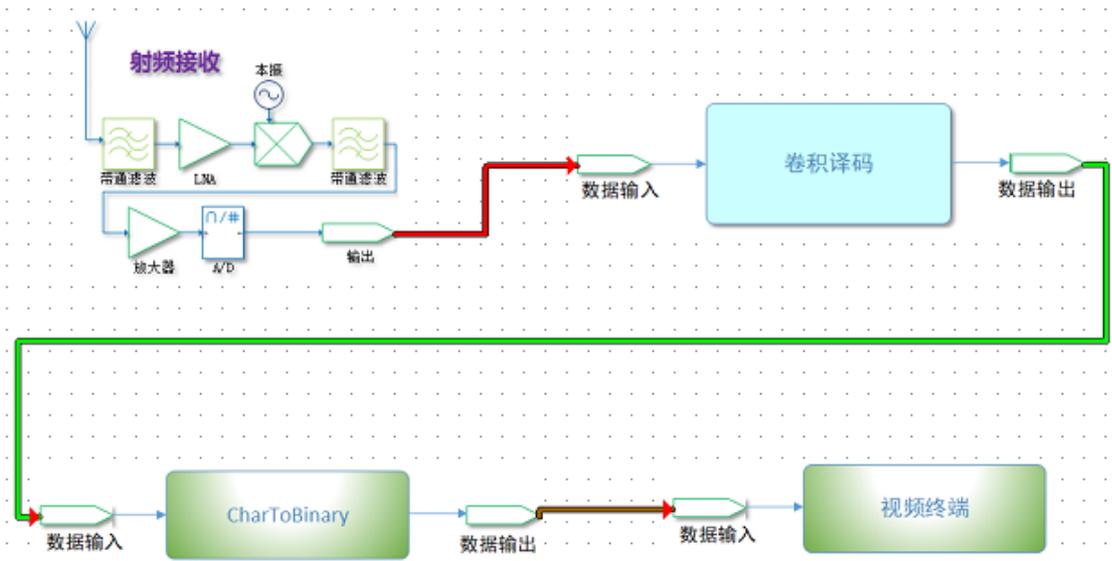


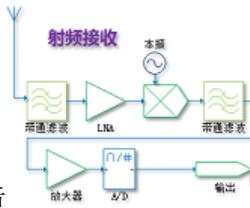
(3) 双击  ，设置参数如下：

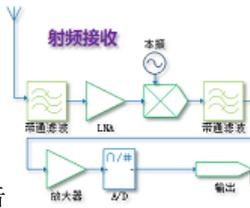


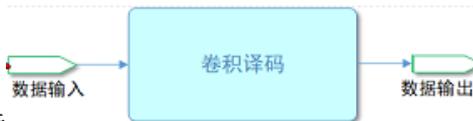
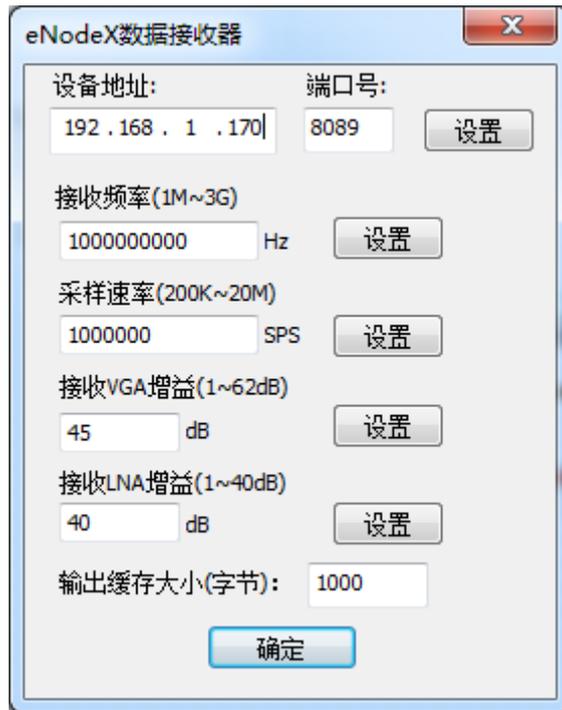
4、视频信号接收系统搭建。

(1) 登录 e-LabRadio 软件 (PC-2)，点击【文件】→【新建】，新建一个空白的工作区，依次从软件左侧的系统库中调用“eNodeX-10A 接收器”、“卷积译码”、“Byte 转换 Bits”、“视频终端”，按照下图所示进行连线。





(2) 双击 ，将接收地址改为 28-2 模块的 IP 地址（出厂 IP 地址为 192.168.1.170），端口号为 8089，点击【设置】，设置完成之后点击【确定】。



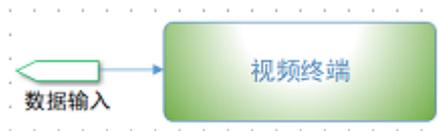
(3) 双击 ，设置参数如下：



5、系统联调。

(1) 在 PC-1 上点击 ，运行 e-Labradio 软件。双击视频源模块，开启摄像头。

(2) 在 PC-2 上点击 ，运行 e-LabRadio 软件。双击视频终端模块



，可显示 PC-1 传输的图像信号，对比加入信道编码

前的无线传输效果。

五、实验报告

1、整理信号在传输过程中的各点波形。

2、说一说你在本实验中的收获。