

## 第一部分 SystemView 及其操作简介

美国 ELANIX 公司于 1995 年开始推出 *SystemView* 软件工具，最早的 1.8 版为 16bit 教学版，自 1.9 版开始升为 32bit 专业版，目前已推出了 3.0 版。*SystemView* 是在 Windows95/98 环境下运行的用于系统仿真分析的软件工具，它为用户提供了一个完整的动态系统设计、仿真与分析的可视化软件环境，能进行模拟、数字、数模混合系统、线性和非线性系统的分析设计，可对线性系统进行拉氏变换和 Z 变换分析。

### 1.1 SystemView 的基本特点

*SystemView* 基本属于一个系统级工具平台，可进行包括数字信号处理（DSP）系统、模拟与数字通信系统、信号处理系统和控制系统的仿真分析，并配置了大量图符块（Token）库，用户很容易构造出所需要的仿真系统，只要调出有关图符块并设置好参数，完成图符块间的连线后运行仿真操作，最终以时域波形、眼图、功率谱、星座图和各类曲线形式给出系统的仿真分析结果。*SystemView* 的库资源十分丰富，主要包括：含若干图符库的主库（Main Library）、通信库（Communications Library）、信号处理库（DSP Library）、逻辑库（Logic Library）、射频/模拟库（RF Analog Library）和用户代码库（User Code Library）。

### 1.2 SystemView 系统视窗

#### 1.2.1 主菜单功能

进入 *SystemView* 后，屏幕上首先出现该工具的系统视窗，如图 1-2-1 所示。

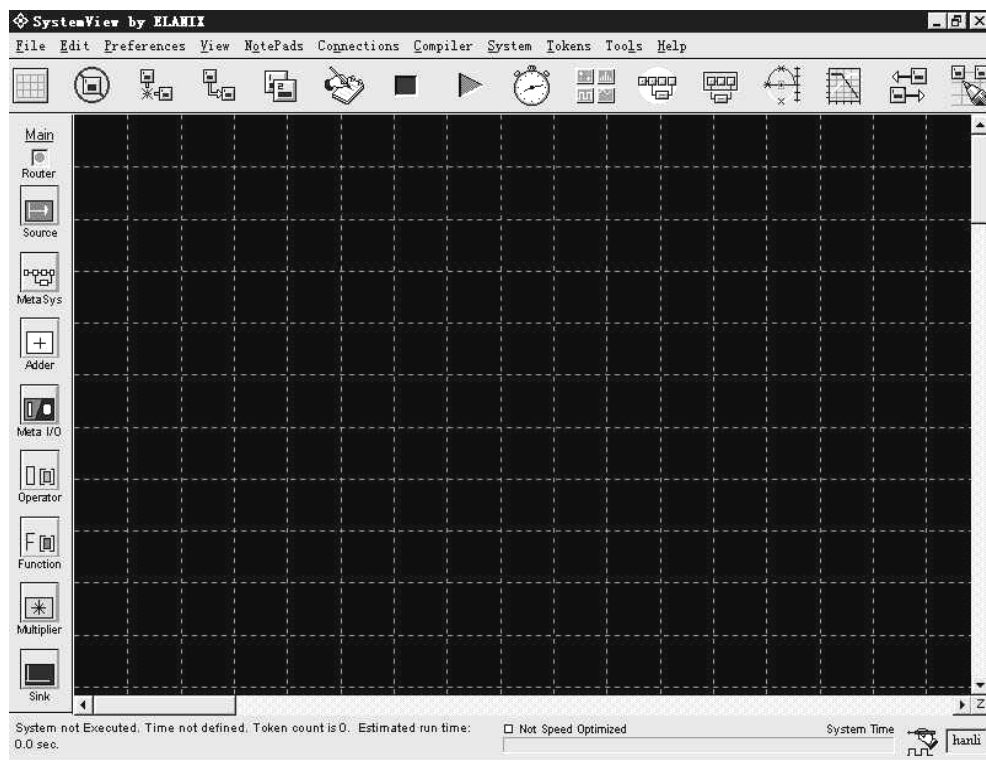


图 1-2-1 系统视窗

系统视窗最上边一行为主菜单栏，包括：文件（File）、编辑（Edit）、参数优选（Preferences）、视窗观察（View）、便笺（NotePads）、连接（Connetions）、编译器（Compiler）、系统（System）、图符块（Tokens）、工具（Tools）和帮助（Help）共 11 项功能菜单。与最初的 *SystemView*1.8 相比，*SystemView*3.0 的操作界面和对话框布局有所改变。

执行菜单命令操作较简单，例如，用户需要清除系统时，可单击“File”菜单，出现一个下拉菜单，单击其中的“Newsystem”工具条即可。为说明问题简单起见，将上述操作命令记作：**File>>Newsystem**，以下类同。各菜单下的工具条及其功能如下表所示：

表 1-2-1 *SystemView*3.0 各菜单下的工具条及其功能

菜单工具条命令	各工具条的功能简述
<b>File 菜单</b>	
File>>Newsystem	清除当前系统
File>>Open Recent System	打开最新的 <i>SystemView</i> 文件
File>>Open Existing System	打开已存在的 <i>SystemView</i> 文件
File>>Open System in Safe Mode	以安全模式打开系统
File>>Save System	用已存在的文件名存储当前系统内容
File>> Save System As	将当前系统内容另存为一个文件
File>> Save Selected Metasystem	存储选择的亚系统文件
File>>System File Information	系统文件信息
File>>Print System: Text Tokens	打印屏幕内容，图符块用文字代替
File>>Print System: Symbolic Tokens	如实打印屏幕内容，包括图符块
File>>Print System Summary	打印系统摘要，即图符块表
File>>Print Connection List	打印连接表
File>>Print Real Time Sink	打印实时接收器的波形
File>>Print SystemView Sink	打印 <i>System View</i> 信宿接收器的波形
File>>Printer/Page Setup	打印设置
File>>Printer Fonts	打印字体设置
File>>Exit	退出 <i>SystemView</i> 系统
<b>Edit 菜单</b>	
Edit>>Copy Note Pad	复制便笺
Edit>>Copy SystemView Sink	复制 <i>System View</i> 接收器
Edit>>Copy System to Clipboard	复制系统到剪贴板
Edit>>Copy System: Selected Area	选择局部复制系统
Edit>>Copy System: Text Tokens	复制系统中的文字图符块
Edit>>Copy Entire Screen	复制全屏幕
Edit>>Paste To Note Pad	粘贴到便笺
Edit>>Delete	删除图符块或便笺框
<b>Preference 菜单</b>	
Preference>>Customize...	定制
Preference>>Reset All Defaults	复位所有缺省设置
Preference>>Optimize for Run Time Speed	优化运行时速
<b>View 菜单</b>	
View>>Zoom	界面图形缩放
View>>MetaSystem	亚系统
View>>Hide Token Numbers	隐藏显示图符编号
View>>Analysis Windows	进入分析窗
View>> Calculator	计算器
View>>Units Converter	统一转换

<b>Note Pad 菜单</b>	
Node Pad>>Hide Note Pads	隐藏显示便笺
Node Pad>>New Note Pad	新插入便笺
Node Pad>>Copy Token Parameters to Note Pad	将图符块参数复制到便笺内
Node Pad>>Attributes for All Note Pads	所有便笺属性
Node Pad>>Attributes Selected Note Pad	选择的便笺属性
Node Pad>>Delete Note Pad	删除便笺
Node Pad>>Delete All Note Pads	删除所有便笺
<b>Connections 菜单</b>	
Connections>>Disconnect All Tokens	拆除所有图符块之间的连线
Connections>>Check Connections Now	立即检查连接
Connections>>Show Token Output	显示图符块输出
Connections>>Hide Token Output	隐藏图符块输出
<b>Compiler 菜单</b>	
Compiler>>Compile System Now	立即编译系统
Compiler>>Animate Exe Sequence	动画执行顺序
Compiler>>Compiler Wizard	编译导向器
Compiler>>Edit Execution Sequence	编辑执行顺序
Compiler>>Cancel Edit Operation	取消编辑操作
Compiler>>Cancel Last Edit	取消上一次编辑操作
Compiler>>Use Default Exe Sequence	使用缺省顺序
Compiler>>Use Custom Exe Sequence	使用用户执行顺序
<b>System 菜单</b>	
System>>Run System Simulation	运行系统仿真
System>>Single Step Execution	单步执行
System>>Debug (User Code)	调试用户代码
System>>Root Locus	根轨迹
System>>Bode Plot	波特图
<b>Token 菜单</b>	
Token>>Find Token	查找指定图符块
Token>>Find System Implicit Delays	查找系统固有延迟
Token>>Move Selected Tokens	移动选中的图符块
Token>>Move All Tokens	整体移动所有图符块
Token>>Duplicate Tokens	重复放置图符块
Token>>Create MetaSystem	创建亚系统
Token>>Re-name MetaSystem	重新命名亚系统
Token>>Explode MetaSystem	展开亚系统
Token>>Assign Custom Token Picture	为用户图符赋图形
Token>>Use Default Token Picture	使用缺省设置图符块
Token>>Select New Variable Token	选择新变量图符块
Token>>Edit Token Parameter Variations	编辑图符块参数变量
Token>>Disable All Parameter Variations	取消所有参数变量
Token>>Gloable Parameter Links	全局参数连接
<b>Tools 菜单</b>	
Tools>>Auto Program Generation(APG)	自动程序产生
Tools>>User Code	用户代码
Tools>>Xilinx FPGA	Xilinx 型 FPGA
Tools>>Matlab	Matlab 数学工具

### 1.2.2 快捷功能按钮

在主菜单栏下, *SystemView* 为用户提供了 16 个常用快捷功能按钮, 按钮功能如下:



### 1.2.3 图符库选择按钮

系统视窗左侧竖排为图符库选择区。图符块 (Token) 是构造系统的基本单元模块, 相当于系统组成框图中的一个子框图, 用户在屏幕上所能看到的仅仅是代表某一数学模型的图形标志 (图符块), 图符块的传递特性由该图符块所具有的仿真数学模型决定。创建一个仿真系统的基本操作是, 按照需要调出相应的图符块, 将图符块之间用带有传输方向的连线连接起来。这样一来, 用户进行的系统输入完全是图形操作, 不涉及语言编程问题, 使用十分方便。进入系统后, 在图符库选择区排列着 8 个图符选择按钮, 即:



在上述 8 个按钮中, 除双击“加法器”和“乘法器”图符按钮可直接使用外, 双击其它按钮后会出现相应的对话框, 应进一步设置图符块的操作参数。单击图符库选择区最上边的主库开关按钮 **main**, 将出现选择库开关按钮 **Option** 下的用户库 (User)、通信库 (Comm)、DSP 库 (DSP)、逻辑库 (Logic)、射频模拟库 (RF/Analog) 和数学库 (Matlab) 选择按钮, 可分别双击选择调用。

## 1.3 系统窗下的库选择操作

### 1.3.1 选择设置信源 (Source)

创建系统的首要工作就是按照系统设计方案从图符库中调用图符块, 作为仿真系统的基本单元模块。可用鼠标左键双击图符库选择区内的选择按钮。现以创建一个 PN 码信源为例, 该图符块的参数为 2 电平双极性、1V 幅度、100Hz 码时钟频率, 操作步骤如下:

(1) 双击“信源库”按钮, 并再次双击移出的“信源库图符块”, 出现源库 (Source Library) 选择设置对话框, 如图 1-3-1 所示。与 *SystemView*1.8 相比, *SystemView*3.0 的库对话框布局有所变化, 它将信源库内各个图符块进行分类, 通过“Sinusoid/Periodic (正弦/周期)”、“Noise/PN (噪声/PN 码)”和“Aperiodic/Ext (非周期/扩展)”3 个开关按钮进行分类选择和调用, 而不像 *SystemView*1.8 那样所有库内图符全部显示在一个窗口内, 其它库

选择对话框与之类似：

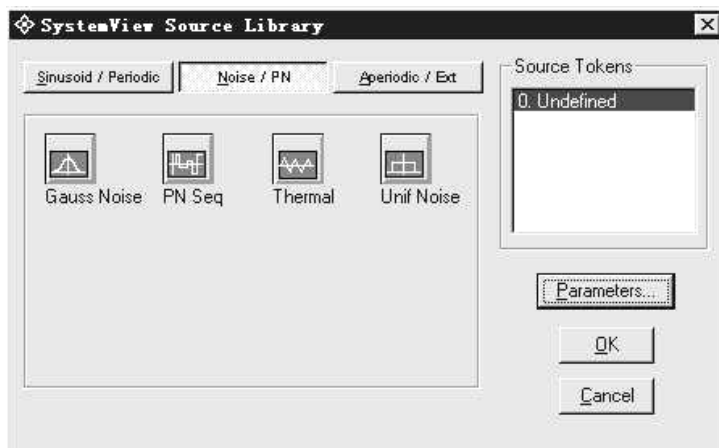


图 1-3-1 源库选择设置对话框

(2) 单击开关按钮下边框内的“PN Seq”图符块表示选中，再次单击对话框中的参数按钮 **Parameters**，在出现的参数设置对话框中分别设置：幅度 **Amplitude**=1、直流偏置 **Offset**=0、电平数 **Level**=2；

(3) 分别单击参数设置和源库对话框的按钮 **OK**，从而完成该图符块的设置。

### 1.3.2 选择设置信宿库 (Sink)

当需要对系统中各测试点或某一图符块输出进行观察时，通常应放置一个信宿 (Sink) 图符块，一般将其设置为“Analysis”属性。Analysis 块相当于示波器或频谱仪等仪器的作用，它是最常使用的分析型图符块之一。Analysis 块的创建操作如下：

(1) 双击系统窗左边图符库选择按钮区内的“信宿”图符按钮，并再次双击移出的“信宿”块，出现信宿定义 (Sink Definition) 对话框，如图 1-3-2 所示：

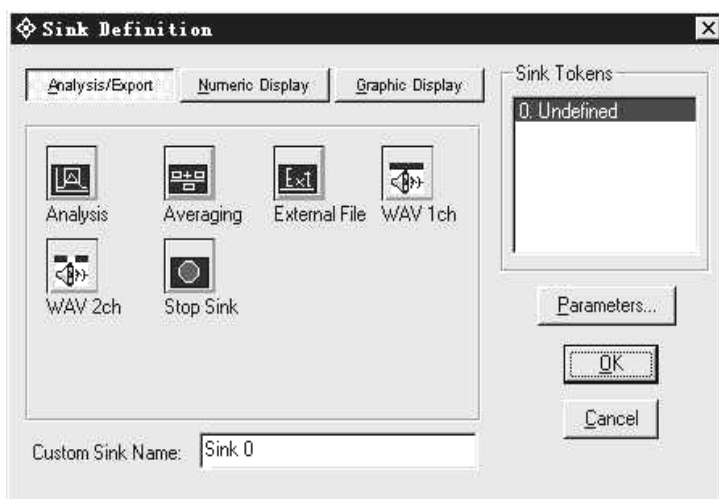


图 1-3-2 信宿定义对话框

(2) 单击“Analysis”图符块选中；

(3) 最后，单击信宿定义对话框内的 **OK** 按钮完成信宿选择。

### 1.3.3 选择设置操作库 (Operator Library)

双击图符库选择区内的“操作库”图符块按钮，并再次双击移出的“操作库”图符块，出现操作库 (Operator Library) 选择对话框，操作库中的各类图符块可通过 6 个分类选择开关选用，如图 1-3-3 所示，库内常用图符块主要包括：延迟 Delay 块、保持 Hold 块、采样 Sampler 块、放大 Gain 块、线性系统 LinearSys 块、采样延迟 SmpIDly 块、比较 Compare 块和给类门 (Xor、And、Nand、Or、Not) 块等。设置参数方法同上。

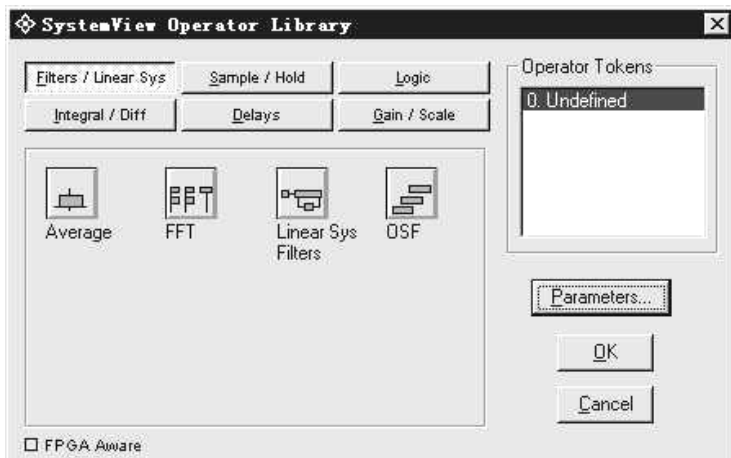


图 1-3-3 操作库选择对话框

### 1.3.4 选择设置函数库 (Function Library)

双击图符库选择区内的“函数库”图符块按钮，并再次双击移出的“函数库”图符块，出现函数库 (Function Library) 选择设置对话框，如图 1-3-4 所示，设置图符块参数的方法与前边类似。

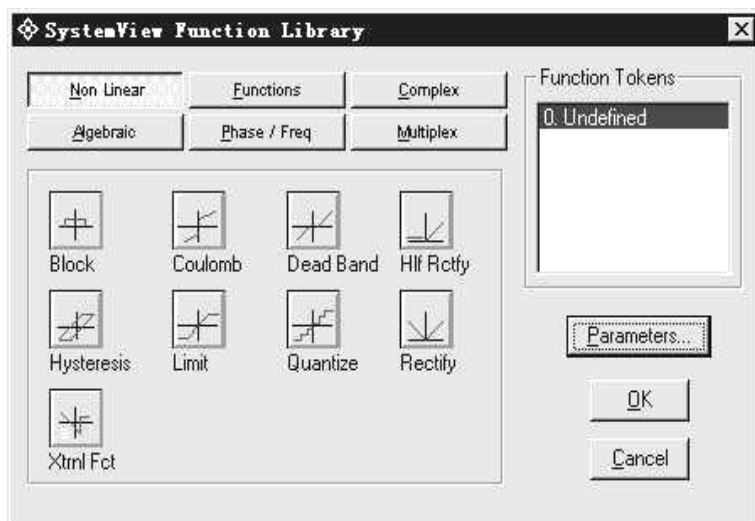


图 1-3-4 函数库选择设置对话框

对于上述各库的对话框，如果希望知道库内某图符块的功能，可用鼠标指在某个图符块上，立刻出现一个小文本框，框内以英文提示用户该图符块的功能参数和性质。

### 1.3.5 选择设置通信库（Communication Library）

在系统窗下，单击图符库选择区内上端的开关按钮 **Main**，图符库选择区内图符内容将改变，双击其中的图符按钮“Comm”，再次双击移出的“Comm”图符块，出现通信库（Communication Library）选择设置对话框，如图 1-3-5 所示。通信库中包括通信系统中经常会涉及的 BCH、RS、Golay、Vitebi 纠错码编码/译码器、不同种类的信道模型、调制解调器、分频器、锁相环、Costas 环、误比特率 BER 分析等可调用功能图符块。

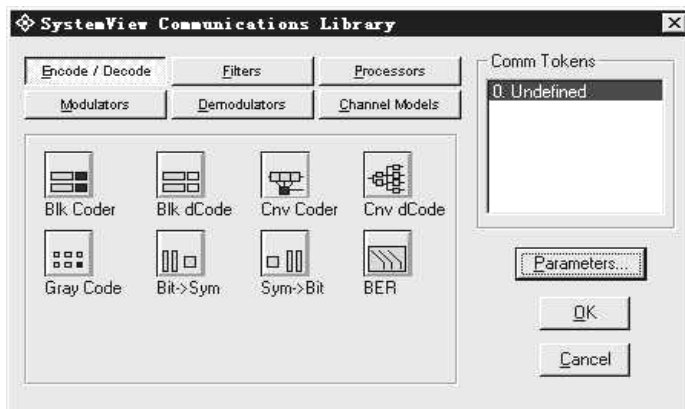


图 1-3-5 通信库选择设置对话框

### 1.3.6 选择设置逻辑库（Logic Library）

在系统窗下，双击图符库选择区内的“Logic”图符按钮，再次双击移出的“Logic”图符块，出现逻辑库（Logic Library）选择设置对话框，如图 1-3-6 所示。通过 6 个选择开关按钮可分门别类地选择库内各种逻辑门、触发器和其它逻辑部件。

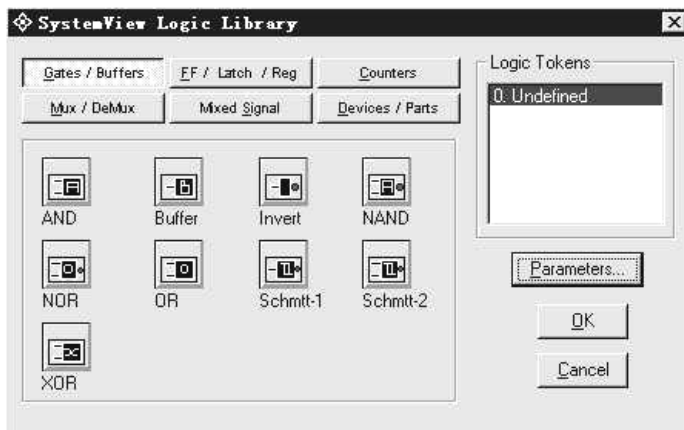



图 1-3-6 逻辑库选择设置对话框

除已经介绍的图符库外，*SystemView* 还提供了其它种类的丰富库资源，但作为一般通

信系统的仿真分析，基本可不涉及其它类型库的调用，由于篇幅的限制，恕不做进一步的详细介绍，对此有兴趣的读者可参阅有关资料。

## 1.4 系统定时（System Time）

在 *SystemView* 系统窗中完成系统创建输入操作（包括调出图符块、设置参数、连线等）后，首先应对输入系统的仿真运行参数进行设置，因为计算机只能采用数值计算方式，起始点和终止点究竟为何值？究竟需要计算多少个离散样值？这些信息必须告知计算机。假如被分析的信号是时间的函数，则从起始时间到终止时间的样值数目就与系统的采样率或者采样时间间隔有关。实际上，各类系统或电路仿真工具几乎都有这一关键的操作步骤，*SystemView* 也不例外。如果这类参数设置不合理，仿真运行后的结果往往不能令人满意，甚至根本得不到预期的结果。有时，在创建仿真系统前就需要设置系统定时参数。

当在系统窗下完成设计输入操作后，首先单击“系统定时”快捷功能按钮  此时将出现系统定时设置（System Time Specification）对话框，如图 1-4-1 所示。用户需要设置几个参数框内的参数，包括以下几条：

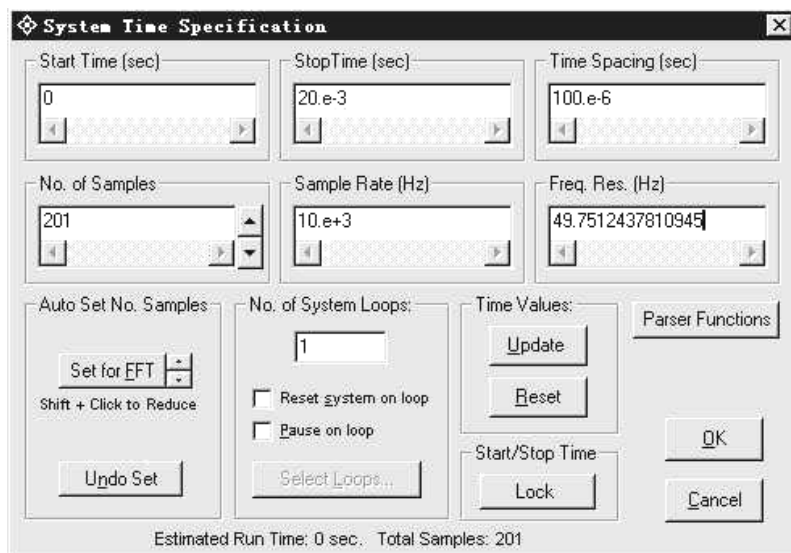


图 1-4-1 系统定时设置对话框

### 1.4.1 起始时间（Start Time）和终止时间（Stop Time）

*SystemView* 基本上对仿真运行时间没有限制，只是要求起始时间小于终止时间。一般起始时间设为 0，单位是秒（s）。终止时间设置应考虑到便于观察波形。

### 1.4.2 采样间隔（Time Spacing）和采样数目（No. of Samples）

采样间隔和采样数目是相关的参数，它们之间的关系为：

$$\text{采样数目} = (\text{终止时间} - \text{起始时间}) \times (\text{采样率}) + 1$$

*SystemView* 将根据这个关系式自动调整各参数的取值，当起始时间和终止时间给定后，一般采样数目和采样率这两个参数只需设置一个，改变采样数目和采样率中的任意一个参数，另一个将由系统自动调整，采样数目只能是自然数。



### 1.4.3 频率分辨率 (Freq.Res.)

当利用 *SystemView* 进行 FFT 分析时, 需根据时间序列得到频率分辨率, 系统将根据下列关系式计算频率分辨率:

$$\text{频率分辨率} = \text{采样率} / \text{采样数目}$$

### 1.4.4 更新数值 (Update Values)

当用户改变设置参数后, 需单击一次 “Time Values” 栏内的 **Update** 按钮, 系统将自动更新设置参数, 然后单击 **OK** 按钮。




### 1.4.5 自动标尺 (Auto Scale)

系统进行 FFT 运算时, 若用户给出的数据点数不是 2 的整次幂, 单击此按钮后系统将自动进行速度优化。

### 1.4.6 系统循环次数 (No. of System Loops)

在栏内输入循环次数, 对于 “Reset system on loop” 项前的复选框, 若不选中, 每次运行的参数都将被保存, 若选中, 每次运行时的参数不被保存, 经多次循环运算即可得到统计平均结果。应当注意的是, 无论是设置或修改参数, 结束操作前必须单击一次 **OK** 按钮, 确认后关闭系统定时对话框。

## 1.5 分析窗介绍

设置好系统定时参数后, 单击 “系统运行” 快捷功能按钮  计算机开始运算各个数学模型间的函数关系, 生成曲线待显示调用。此后, 单击 “分析窗口” 快捷功能按钮 , 进入  析视窗 (*SystemView Analysis*) 进行操作。分析视窗如图 1-5-1 所示。

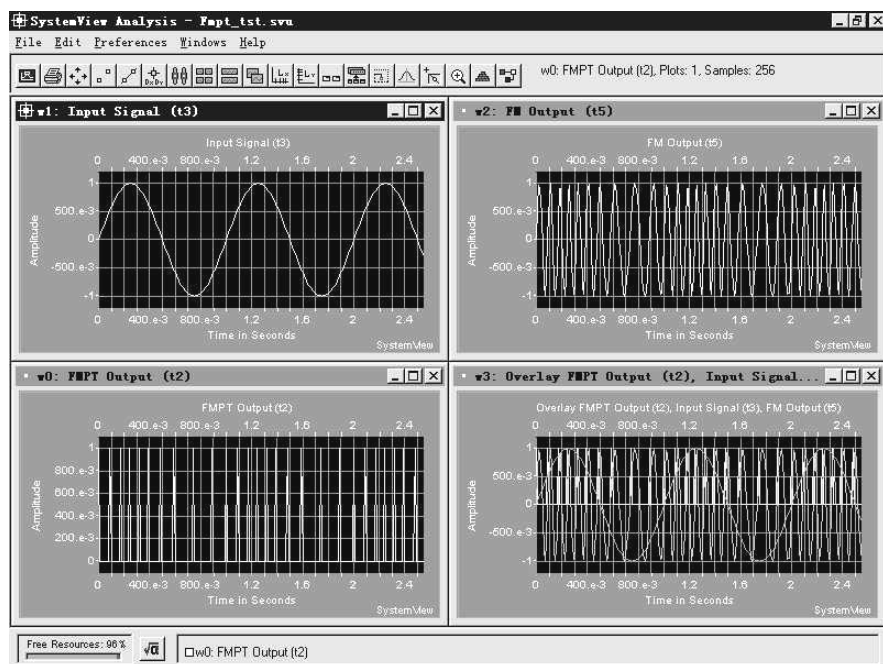



图 1-5-1 分析窗口界面

分析视窗的主要功能是显示系统窗中信宿（主要是 Analysis 块）处的给类分析波形、功率谱、眼图、信号星座图等信息，每个信宿对应一个活动波形窗口，各以多种排列方式同时或单独显示，也可将若干个波形合成在同一个窗口中显示，以便进行结果对比。

在分析窗口下，第一行为“主菜单栏”，包括：File、Edit、Preferences、Windows、Help 五个功能栏；第二行为“工具栏”，自左至右的图标按钮依次为：

按钮 1：绘制新图	按钮 2：打印图形	按钮 3：恢复	按钮 4：点绘
按钮 5：连点	按钮 6：显示坐标	按钮 7：X 轴标记	按钮 8：平铺显示
按钮 9：横排显示	按钮 10：叠层显示	按钮 11：X 轴对数化	按钮 12：Y 轴对数化
按钮 13：窗口最小化	按钮 14：打开所有窗口	按钮 15：动画模拟	按钮 16：统计
按钮 17：微型窗口	按钮 18：快速缩放	按钮 19：输入 APG	按钮 20：返系统窗

## 1.6 在分析窗下观察分析结果

通信系统的仿真分析结果主要以不同形式的时域或频域系统响应波形、特性曲线来表示，主要包括：时域波形、眼图、功率谱、信号星座图、误码特性曲线等形式，并以活动窗口给出。各类波形显示操作主要与“SystemView 信宿计算器”对话框的操作有关。当完成了系统创建输入、设置好系统定时参数并运行后，便可进入分析视窗。单击分析窗下端信宿计算器按钮 ，出现“SystemView 信宿计算器”对话框，如图 1-6-1 所示，该对话框左上部共有 11 个分类设置开关按钮，右上角的“Select one or more Windows:”窗口内顺序给出了分析系统中的“波形号：用户信宿名称（信宿块编号）”。

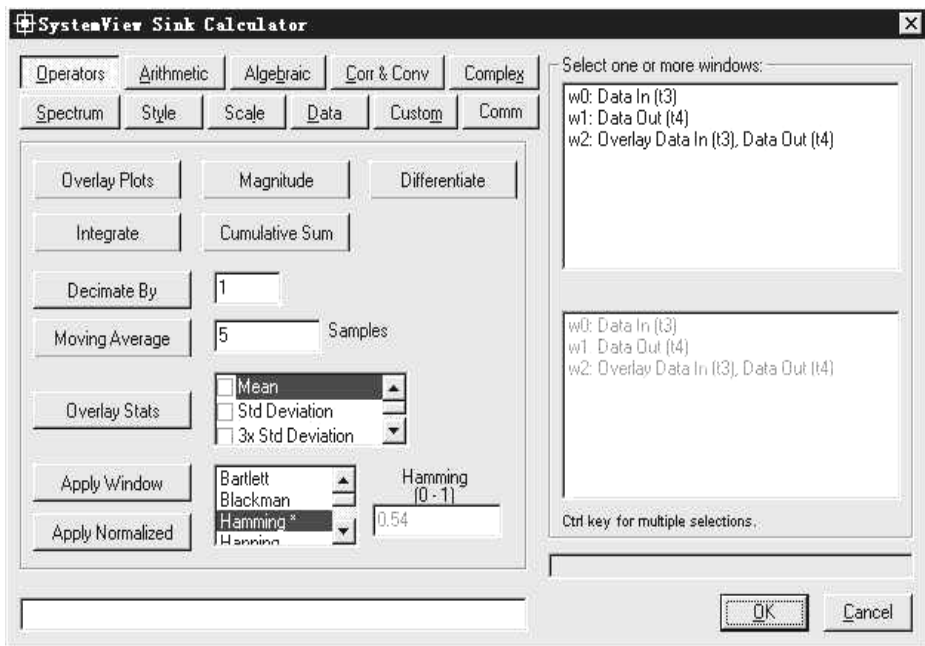


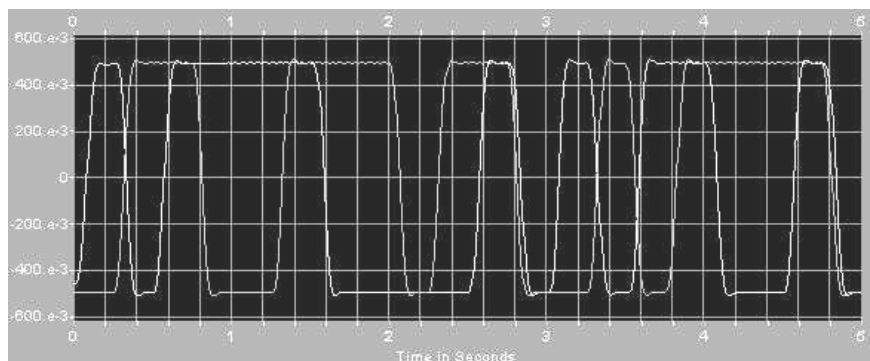
图 1-6-1 SystemView 信宿计算器设置对话框

### 1.6.1 观察时域波形

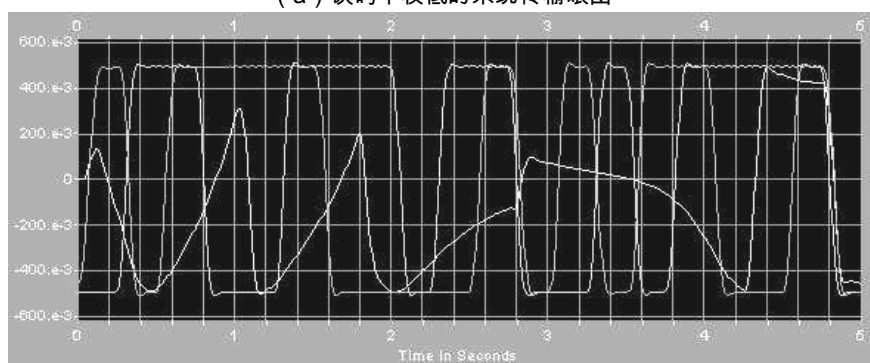
时域波形是最为常用的系统仿真分析结果表达形式。进入分析窗后，单击“工具栏”内的绘制新图按钮（按钮 1），可直接顺序显示出放置信宿图符块的时域波形，并可任意单击分析窗工具栏中的“窗口竖排列”（按钮 7）、“窗口横排列”（按钮 8）。

### 1.6.2 观察眼图

首先回顾一下“眼图”的概念。对于码间干扰和噪声同时存在的数字传输系统，给出系统传输性能的定量分析是非常繁杂的事，而利用“观察眼图”这种实验手段可以非常方便地估计系统传输性能。实际观察眼图的具体实验方法是：用示波器接在系统接收滤波器输出端，调整示波器水平扫描周期  $T_s$ ，使扫描周期与码元周期  $T_c$  同步（即  $T_s = nT_c$ ， $n$  为正整数），此时示波器显示的波形就是眼图。由于传输码序列的随机性和示波器荧光屏的余辉作用，使若干个码元波形相互重叠，波形酷似一个个“眼睛”，故称为“眼图”。“眼睛”挣得越大，表明判决的误码率越低，反之，误码率上升。*SystemView* 具有“眼图”这种重要的分析功能，图 1-6-2 给出了 *SystemView* 分析所得眼图波形。



(a) 误码率较低的系统传输眼图



(b) 误码率较高的系统传输眼图

图 1-6-2 不同眼图的对比

在分析窗下，当屏幕上已经出现波形显示活动窗后，单击信宿计算器按钮，出现“*SystemView* 信宿计算器”对话框，单击分类设置开关按钮 **Style**，出现如图 1-6-3 所示的参数设置对话框，再次单击“Style”栏内的按钮 **Time Slice**，在其“Start Time[sec]”

栏内输入观察波形的起始时刻，在“Length[sec]”栏内输入观察时间长度，单位均为秒。

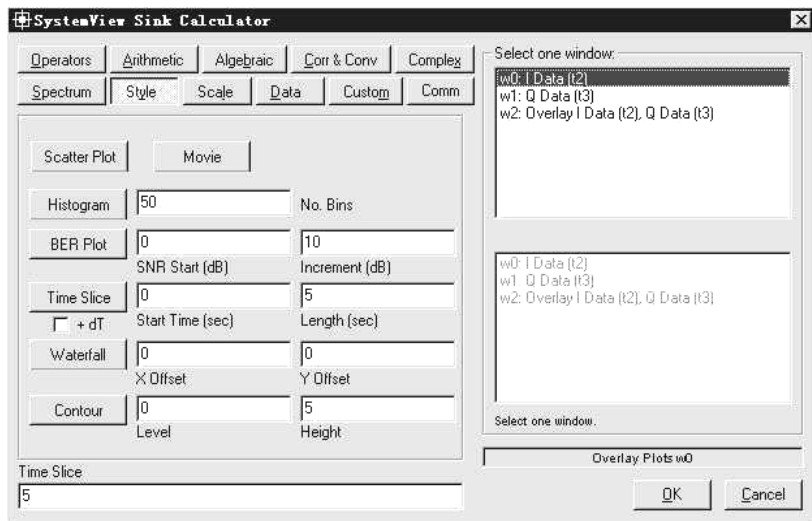


图 1-6-3 信宿信宿计算器下的“Style”对话框

应当注意的是，系统的输出波形自分析起始时刻开始常常有一段时间的过渡过程，故设置眼图观察的起始时刻应让过这段时间，图 1-6-2（a）设置是 Start Time[sec]=5、Length[sec]=5，而图 1-6-2（b）设置是 Start Time[sec]=0、Length[sec]=5，说明过渡状态期间的眼图较差。Length 设置的时间值越大，看到的“眼”越多，且应为  $T_c$  的整数倍。最后单击按钮 **OK** 返回分析窗，等待观察指定的眼图，究竟看哪一个信号的眼图，可用鼠标左键选中“Select one windows:”窗口内的块名称和编号（选中后变成反百条）。

### 1.6.3 观察功率谱

当需要观察信号功率谱时，可在分析窗下单击信宿计算器图标按钮，出现“SystemView 信宿计算器”对话框，单击分类设置开关按钮 **Spectrum**，出现如图 1-6-4 所示对话框。

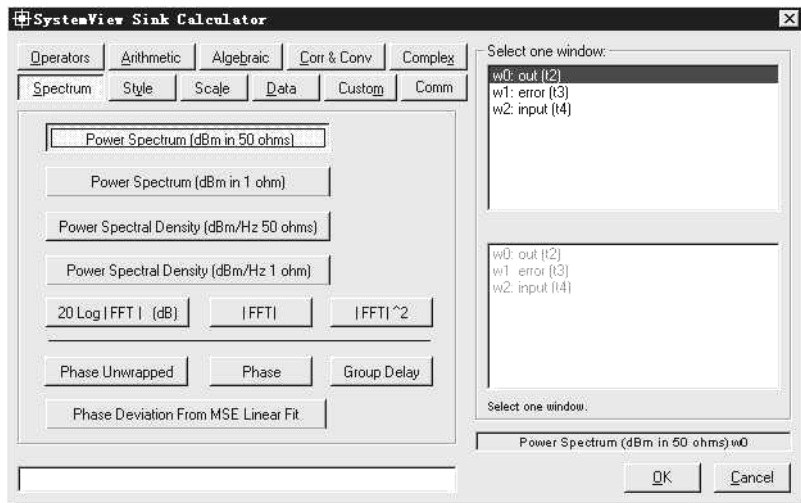


图 1-6-4 信宿计算器下的“Spectrum”对话框

接下来选择计算功率谱的条件，如选中“Power Spectrum[dBm in 50 ohms]”项，则表示计算功率谱的条件为 50 欧负载上的对数功率谱；在“Select One Window:”栏目内选择信号观测点；最后单击按钮 **OK** 返回分析窗，等待功率谱显示活动窗口的出现。在通信系统分析过程中，对信号进行功率谱分析是十分重要的内容。

#### 1.6.4 观察信号星座图或相位路径转移图

在对数字调制系统或数字调制信号进行分析时，常借助二维平面的信号星座图 (Signal Constellation) 来形象地说明某种数字调制信号的“幅度-相位”关系，从而可以定性地表明与抗干扰能力有关的“最小信号距离”。以 16QAM 系统为例，发送端理想的信号星座图如图 1-6-5 所示。

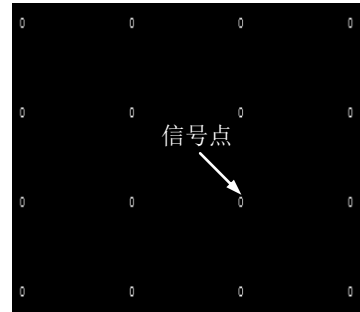
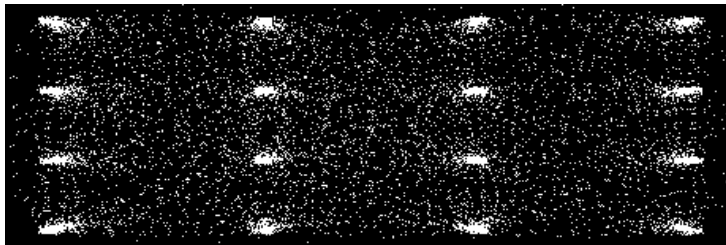
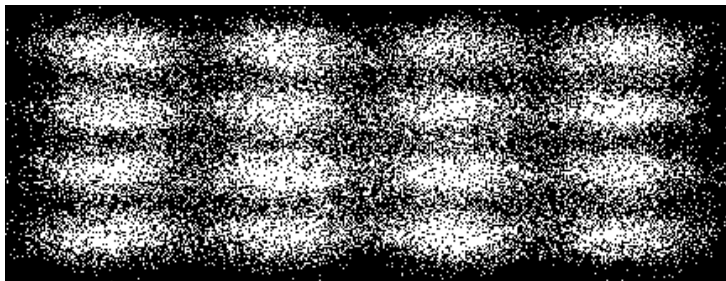


图 1-6-5 理想的 16QAM 信号星座图

在接收系统输出，由于信道特性不理想和干扰噪声的影响，信号点产生发散现象，信号点的发散程度与信道特性不理想程度和噪声强度有关。图 1-6-6 (a) 为接收滤波器输出在噪声极弱时的信号星座图，图 1-6-6 (b) 为接收滤波器输出在噪声较强时的信号星座图，这两张图是 *SystemView* 经过大量统计分析得到的，每组 4 电平基带码正交矢量合成为一个信号点。



(a) 噪声极弱时接收输出的 16QAM 信号星座图



(b) 噪声较强时接收输出的 16QAM 信号星座图

图 1-6-6 16QAM 信号星座图对比

除可以观察信号星座图外，利用 *SystemView* 还可观察信号的相位转换图。在出现信号星座图显示活动窗口后，单击分析窗中第二行“工具栏”的按钮 4 (点绘) 可观察星座图，单击按钮 5 (连点) 可观察信号的相位路径转换图，两种操作可相互切换。点的大小可利用“Preference>>Smaller Points in ...>>Normal/small/pixel”命令修改。理想的 16QAM 信

号相位路径转换图如图 1-6-7 所示，注意，图形被拉长显示。

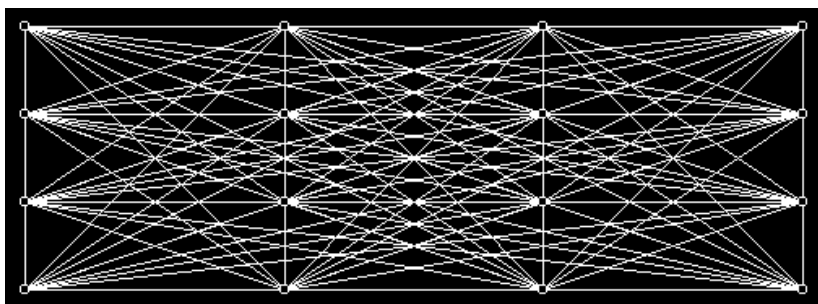


图 1-6-7 理想的 16QAM 信号相位路径转换图

利用 *SystemView* 观察信号眼图或相位转换图，仍然是利用信宿计算器的对话框。仍以观察 16QAM 发送信号为例，其信号星座图和相位转换图与同相支路码信号（I 信号）和正交支路码信号（Q 信号）有关。在分析窗下单击信宿计算器按钮，在出现的对话框中，首先单击 **Style** 按钮，在“Select one window from each list:”栏内选中系统输入的 I 信号（w0:）后，单击 **Scatter Plot** 按钮，再在“Versus”栏内选中系统输入的 Q 信号（w1:），如图 1-6-8 所示，最后单击按钮 **OK** 结束设置操作，出现信号星座图显示活动窗口。

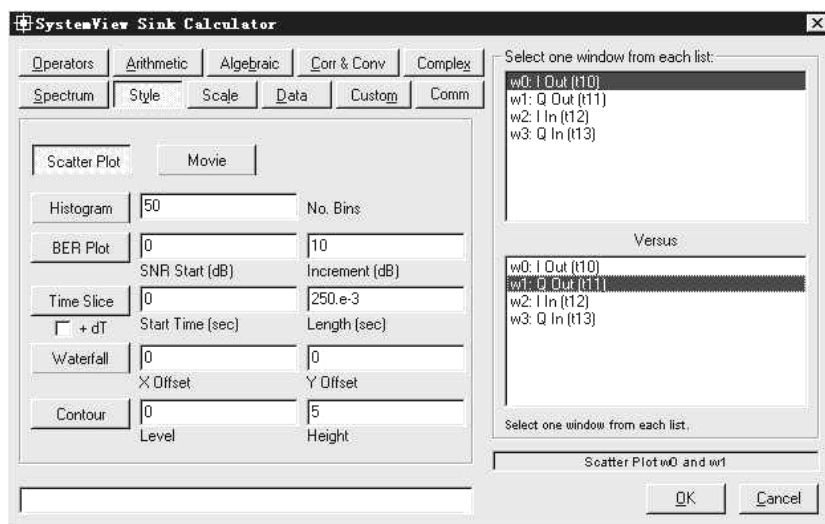


图 1-6-8 观察星座图或相位路径的对话框设置

另外，在出现信号星座图后，单击“工具栏”内的按钮 14（动画模拟），此时活动窗口内出现一个跳动光点，该光点的变化轨迹正是随所传数字序列改变信号点运动的轨迹。

## 1.7 总结

从这部分内容介绍可以看出，*SystemView* 具有很强的通信系统仿真分析功能，除介绍的上述分析功能外，还可以做系统的误码率分析，此内容在第二部分中另行介绍。还有许多其它分析功能限于本书篇幅未做介绍，有兴趣的读者可进一步探索 *SystemView* 更广泛的应用领域。

## 第二部分 数字通信系统仿真分析举例

这部分内容通过几个较为典型的分析举例，介绍利用 *SystemView* 进行数字通信系统仿真分析时主要涉及的概念和操作方法。

### 2.1 简单基带传输系统分析

**【分析内容】** 构造一个简单示意性基带传输系统。以双极性 PN 码发生器模拟一个数据信源，码速率为 100bit/s，低通型信道噪声为加性高斯噪声（标准差=0.3v）。要求：

1. 观测接收输入和滤波输出的时域波形；
2. 观测接收滤波器输出的眼图。

**【分析目的】** 掌握观察系统时域波形，特别是眼图的操作方法。

**【系统组成及原理】** 简单的基带传输系统原理框图如图 2-1-1 所示，该系统并不是无码间干扰设计的，为使基带信号能量更为集中，形成滤波器采用高斯滤波器。

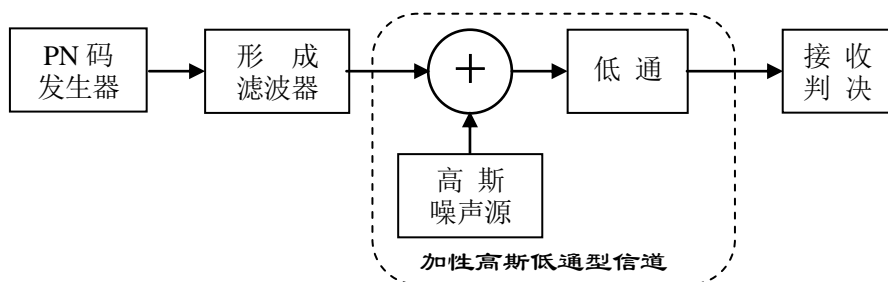


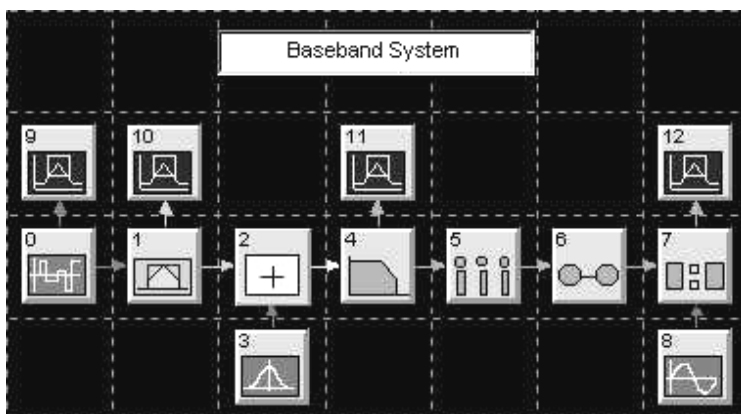
图 2-1-1 简单基带传输系统组成框图

#### 【创建分析】

**第 1 步：**进入 *SystemView* 系统视窗，设置“时间窗”参数如下：

- ① 运行时间：Start Time: 0 秒； Stop Time: 0.5 秒；
- ② 采样频率：Sample Rate: 10000Hz。

**第 2 步：**调用图符块创建如图 2-1-2 所示的仿真分析系统：



系统中各图符块的设置如表 2-1-1 所示:

表 2-1-1

编号	图符块属性 (Attribute)	类型 (Type)	参数设置 (Parameters)
0	Source	PN Seq	Amp=1v,Offset=0v,Rate=100Hz,Levels=2, Phase=0 deg
1	Comm	Pulse Shape	Gaussian,Time Offset=0 sec,Pulse Width=0.01 sec,Std Dev=0.3v.
2	Adder	--	--
3	Source	Gauss Noise	Std Dev=0.3v,Mean=0v.
4	Operator	Linear Sys	Butterworth Lowpass IIR,5 Poles,Fc=200Hz.
5	Operator	Sampler	Interpolating,Rate=100Hz,Aperture=0 sec, Aperture Jitter=0 sec,
6	Operator	Hold	Last Value ,Gain=2,Out Rate=10.e+3Hz
7	Operator	Compare	Comparison='>=',True Output=1V,False Output =0v,A input=t6 Output0,B input=t8 Output0
8	Source	Sinusoid	Amp=0v,Freq=0Hz,Phase=0 deg
9	Sink	Analysis	Input from t0 Output Port0
10	Sink	Analysis	Input from t1 Output Port0
11	Sink	Analysis	Input from t4 Output Port0
12	Sink	Analysis	Input from t7 Output Port0

其中,Token1 为高斯脉冲形成滤波器;Token3 为高斯噪声产生器,设标准偏差 Std Deviation=0.3v,均值 Mean=0v;Token4 为模拟低通滤波器,来自选操作库中的“LinearSys”图符按钮,在设置参数时,将出现一个设置对话框,在“Design”栏中单击 Analog...按钮,进一步单击“Filter PassBand”栏中 Lowpass 按钮,选择 Butterworth 型滤波器,设置滤波器极点数目:No.of Poles=5 (5 阶),设置滤波器截止频率:LoCutoff=200 Hz。

**第 3 步:** 单击运行按钮,运算结束后按“分析窗”按钮,进入分析窗后,单击“绘制新图”按钮,则 Sink9~Sink12 显示活动窗口分别显示出“PN 码输出”、“信道输入”、“信道输出”和“判决比较输出”时域波形,如图 2-1-2 所示:

**第 4 步:** 观察信源 PN 码和波形形成输出的功率谱。通过两个信号的功率谱可以看出,波形形成后的信号功率谱主要集中在低频端,能量相对集中,而 PN 码的功率谱主瓣外的分量较大。在分析窗下,单击信宿计算器按钮,在出现的“System Sink Calculator”对话框中单击 Spectrum 按钮,分别得到 Sink9 和 Sink10 的功率谱窗口(w4:和 w5:)后,可将这两个功率谱合成在同一个窗口中进行对比,具体操作为:在“System Sink Calculator”对话框中单击 Operators 按钮和 Overlay Plots 按钮,在右侧窗口内压住左键选中“w4: Power Spectrum of Sink9”和“w5: Power Spectrum of Sink10”信息条,使之变成反白显示,最后单击 OK 按钮即可显示出对比功率谱,如图 2-1-3 所示。



**第 5 步：**观察信道输入和输出信号眼图。眼图是衡量基带传输系统性能的重要实验手段。当屏幕上出现波形显示活动窗口（w1:Sink10 和 w2:Sink11）后，单击“System Sink Calculator”对话框中的 **Style** 和 **Time Slice** 按钮，设置好“Start Time[sec]”和“Length[sec]”栏内参数后单击该对话框内的 **OK** 按钮即可，两个眼图如图 2-1-4 所示。

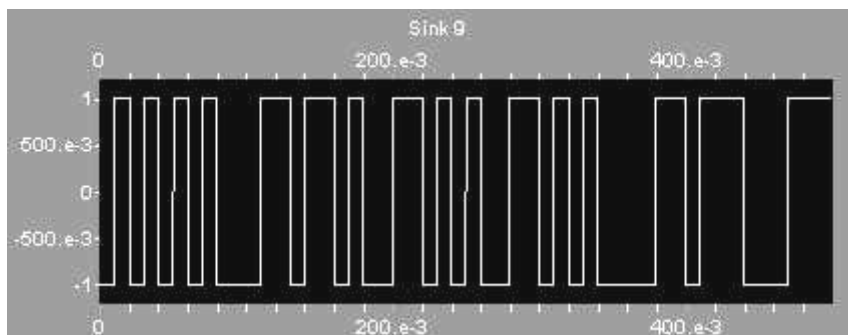


图 2-1-2 (a) 代表信源的 PN 码输出波形

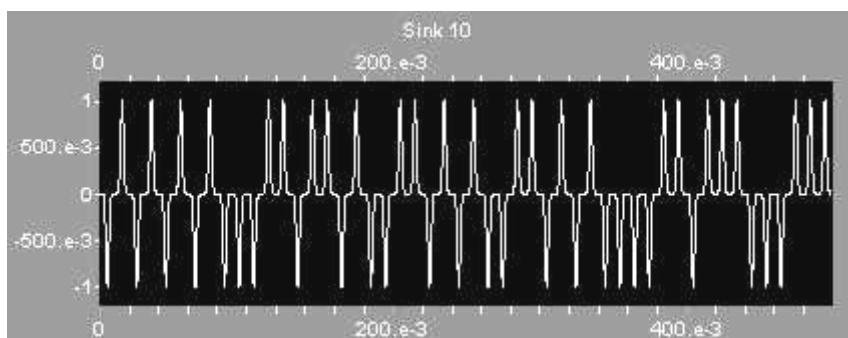


图 2-1-2 (b) 经高斯脉冲形成滤波器后的码序列波形

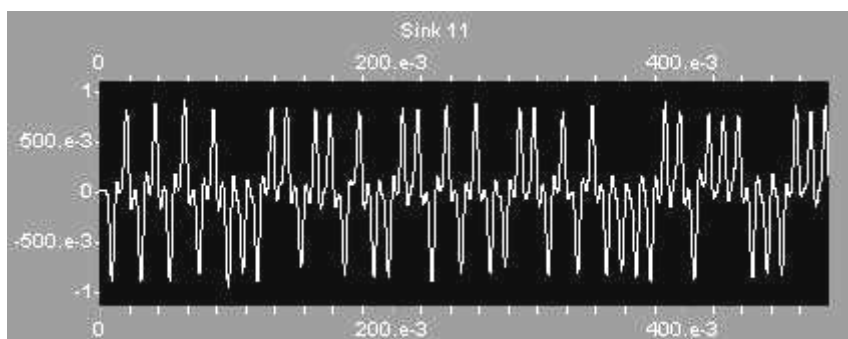
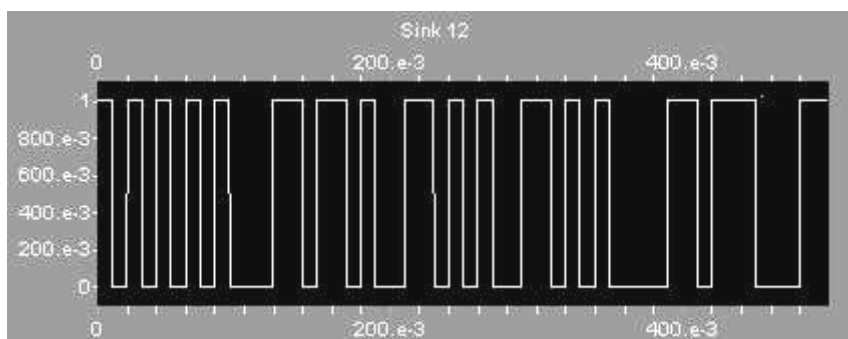


图 2-1-2 (c) 信道输出的接收波形



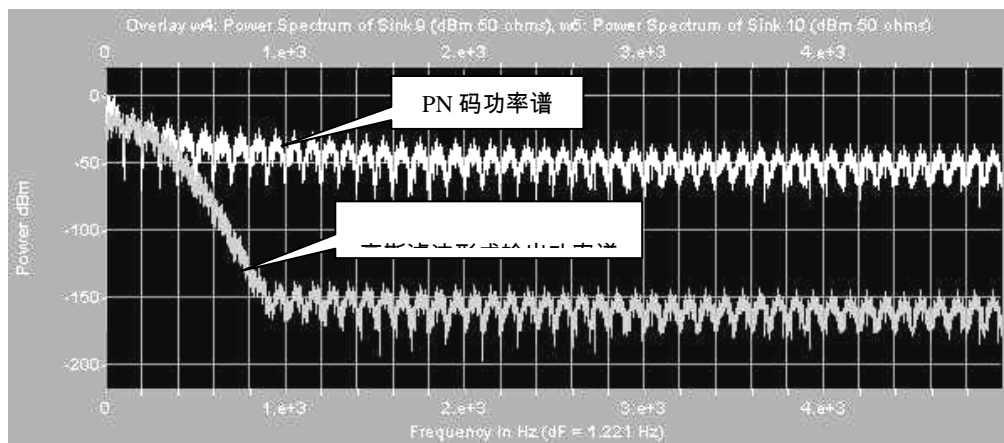


图 2-1-3 PN 码和波形形成器输出功率谱对比

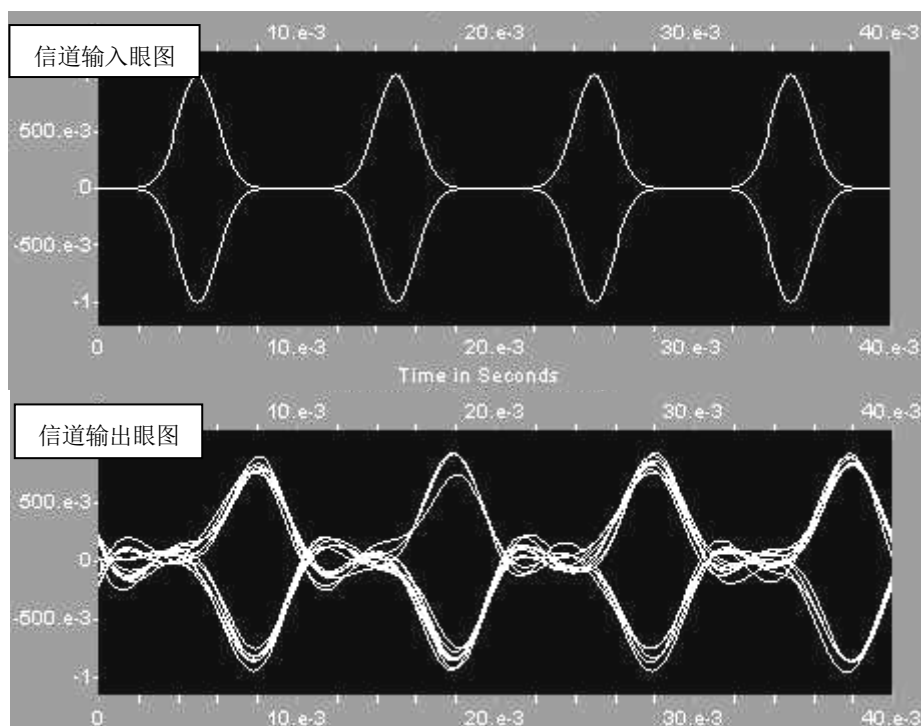


图 2-1-5 信道输入和输出信号眼图

从上述眼图可以看出，经高斯滤波器形成处理后的基带信号远比 PN 码信号平滑，信号能量主要集中于 10 倍码率以内，经低通型信道后信号能量损失相对小一些。由于信道的不理想和叠加噪声的影响，信道输出眼图将比输入的差些，改变信道特性和噪声强度，眼

图会发生明显变化，甚至产生明显的接收误码。

## 2.2 利用 Costas 环解调 2PSK 信号

**【分析内容】** 构造一个 2PSK 信号调制解调系统，利用 Costas 环对 2PSK 信号进行解调，以双极性 PN 码发生器模拟一个数据信源，码速率为 50bit/s，载波频率为 1000Hz。以 PN 码作为基准，观测环路同相支路输出和正交支路输出的时域波形，

**【分析目的】** 通过分析理解 Costas 环的解调功能。

**【系统组成及原理】** 2PSK 调制和 Costas 环解调系统组成如图 2-2-1 所示：

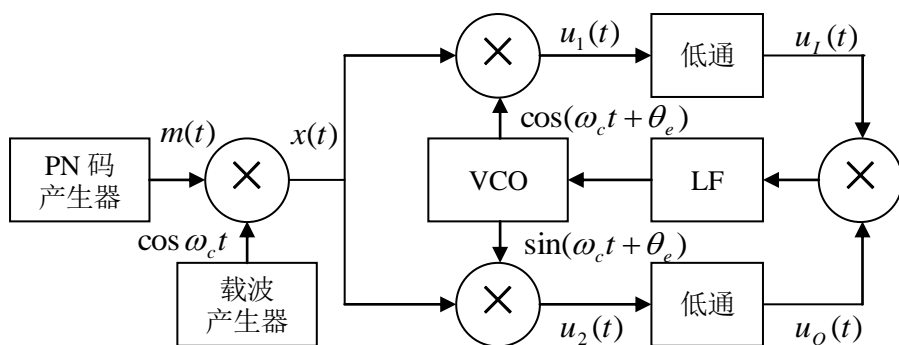


图 2-2-1 2PSK 调制和 Costas 环解调系统

其中：  $x(t) = m(t) \cos \omega_c t$

$$u_1(t) = m(t) \cos \omega_c t \cdot \cos(\omega_c t + \theta_e) = \frac{1}{2} m(t) [\cos \theta_e + \cos(2\omega_c t + \theta_e)]$$

$$u_2(t) = m(t) \cos \omega_c t \cdot \sin(\omega_c t + \theta_e) = \frac{1}{2} m(t) [\sin \theta_e + \sin(2\omega_c t + \theta_e)]$$

经过低通滤波器后，得到的同相分量和正交分量分别为：

$$u_I(t) = \frac{1}{2} m(t) \cos \theta_e$$

$$u_Q(t) = \frac{1}{2} m(t) \sin \theta_e$$

通常，环路锁定后  $\theta_e$  很小（在仿真分析时可设为 0）。显然，同相分量  $u_I(t) \approx 0.5m(t)$  正交分量近似为 0。实际上，Costas 环可以同时完成载波同步提取和 2PSK 信号解调，这与常用的平方环有所不同。

**【创建分析】**

**第 1 步：**进入 *SystemView* 系统视窗，设置“时间窗”参数如下：

- ① 运行时间：Start Time: 0 秒；Stop Time: 1 秒；
- ② 采样频率：Sample Rate=5000Hz。

**第 2 步：**调用图符块创建如图 2-2-2 所示的仿真分析系统。与前边创建的仿真系统比较，出现了几个“图符参数便笺”。生成“图符参数便笺”的操作方法如下：

在全部图符参数确定后，执行“**NotePads>>Copy Token Parameters to NotePad**”命令，再用附着了“**Select**”条框的鼠标单击某个图符块，立刻生成该图符块的“图符参数便笺”。单击便笺框使之被激活，拉动四边上的“操作点”可调节其几何尺寸；用鼠标压住便笺框，使之显示略微变暗，可移动其位置。

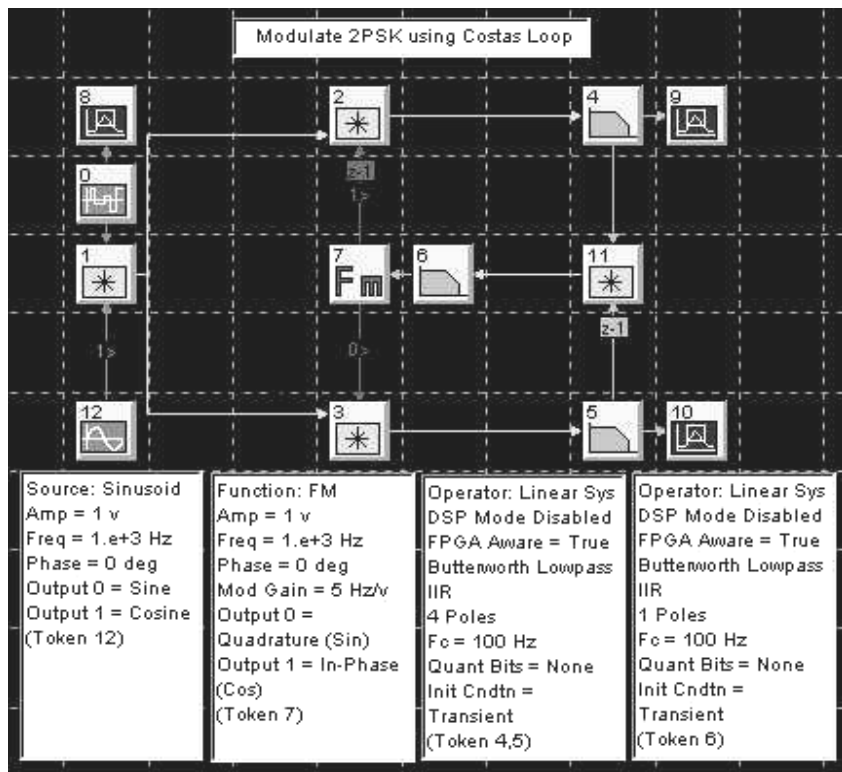
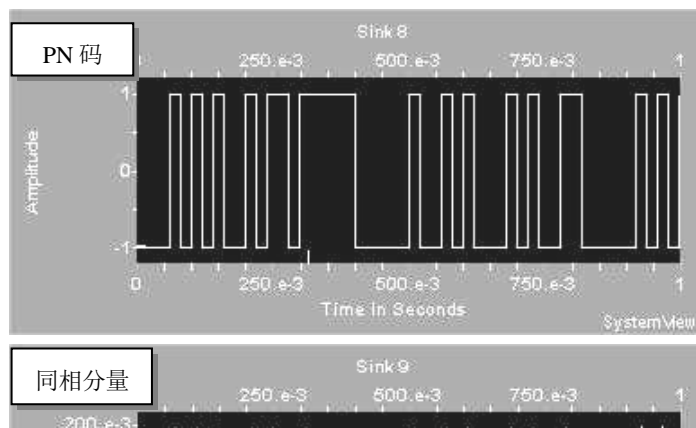


图 2-2-2 创建带有“图符参数便笺”的仿真分析系统

**第 3 步：**创建完仿真系统后，单击运行按钮，分别由 Sink8、Sink9 和 Sink10 显示 PN 码、同相分量和正交分量的时域波形，如图 2-2-3 所示。



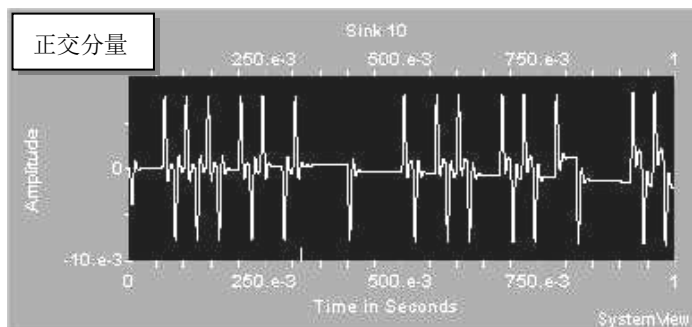


图 2-2-3 PN 码、同相分量和正交分量的时域波形

## 2.3 二进制差分编码 / 译码器

**【分析内容】** 创建一对二进制差分编码 / 译码器，以 PN 码作为二进制绝对码，码速率  $R_b=100\text{bit/s}$ 。分别观测绝对码序列、差分编码序列、差分译码序列，并观察差分编码是如何克服绝对码全部反相的，以便为分析 2DPSK 原理做铺垫。

**【分析目的】** 通过分析理解差分编码 / 译码的基本工作原理。

**【系统组成及原理】** 二进制差分编码器和译码器组成如图 2-3-1 所示，其中： $\{a_n\}$  为二进制绝对码序列， $\{d_n\}$  为差分编码序列，D 触发器用于将序列延迟一个码元间隔，在 SystemView 中此延迟环节一般可不使用 D 触发器，而是使用操作库中的“延迟图符块”。

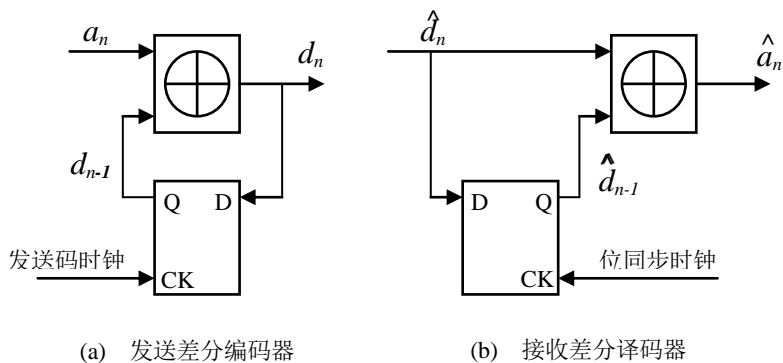


图 2-3-1

### 【创建分析】

**第 1 步：**进入 *SystemView* 系统视窗，设置“时间窗”参数如下：

② 运行时间：Start Time: 0 秒；Stop Time: 0.3 秒；

② 采样频率：Sample Rate=10000Hz。

**第 2 步：**首先创建如图 2-3-2 所示的仿真分析系统，主要图符块参数如便笺所示。其中，Token1 和 Token4 都是来自操作库的“数字采样延迟块”，由于系统的采样频率为 10000Hz，绝对码时钟频率为 100Hz，故延迟一个码元间隔需 100 个系统采样时钟。

**第 3 步：**观察编、译码结果。在分析窗下，差分编码器输入（绝对码）、差分编码输出及差分译码输出序列分别由 Sink7、8、9 给出，如图 2-3-3 所示。

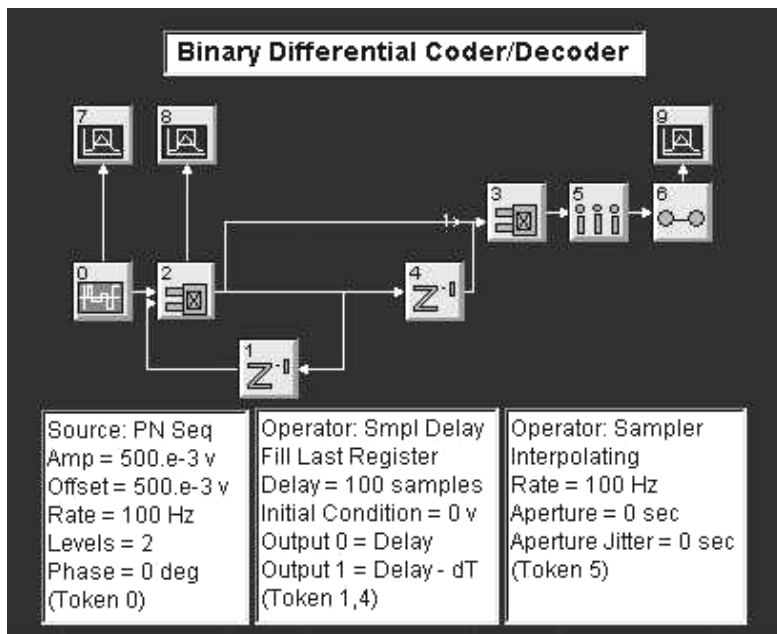
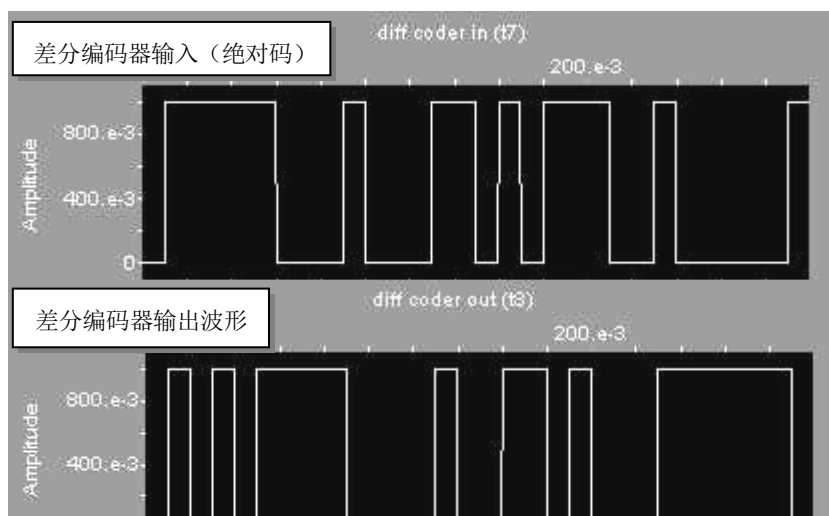


图 2-3-2 差分编码 / 译码器仿真分析系统



**第 4 步：**得到仿真结果后，将差分编码器与差分译码器之间插入一个非门（NOT），再看仿真结果。可以观察到，差分编码和译码方式可以克服编码输出序列的全反相，差分译码序列与不反相的相同。充分理解了这一原理，就能很快理解 2DPSK 是如何解决载波  $180^\circ$  相位模糊问题，同时将有助于读者自行创建包含差分编码与译码的 2DPSK 系统。

## 2.4 QPSK 调制原理分析

**【分析内容】**创建一个 QPSK 正交调制系统，被调载频为 2000Hz，以 PN 码作为二进制信源，码速率  $R_b=100\text{bit/s}$ 。分别观测 I 通道和 Q 通道的 2PSK 波形、两路合成的 QPSK 波形、QPSK 信号的功率谱。

**【分析目的】**通过分析理解 QPSK 正交调制系统的基本工作原理。

**【系统组成及原理】**QPSK 调制属于四进制移相键控信号，调制系统组成如图 2-4-1 所示：

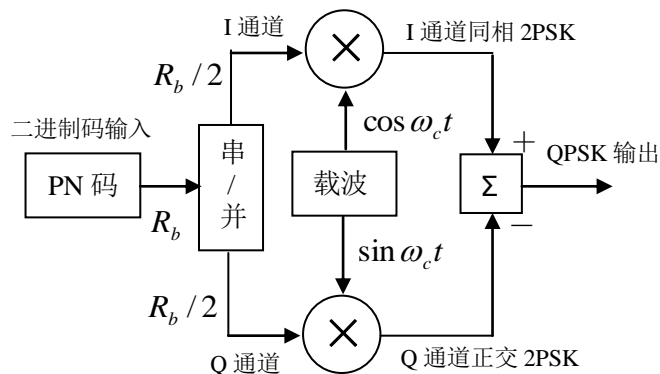


图 2-4-1 QPSK 正交调制系统

其中, PN 码序列为:  $m(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n g(t - nT_s)$

I 通道同相信号和 Q 通道正交信号分别为:

$$I(t) = \sum_{k=0}^{\infty} a_{2k+1} \cdot g[t - kT_s]; \quad Q(t) = \sum_{k=0}^{\infty} a_{2k} \cdot g[t - kT_s]$$

QPSK 输出信号为:  $S_{QPSK}(t) = I(t) \cos \omega_c t - Q(t) \sin \omega_c t$

应注意, 经串/并转换处理后, 二进制码序列  $\{a_n\}$  变成四进制码序列  $\{a_{2k}, a_{2k+1}\}$ , I 通道和 Q 通道信号的码速率比二进制码序列 (即 PN 码) 的速率降低了一倍, 即四进制码周期  $T_s$  是二进制码元周期  $T_b$  的 2 倍。“正交调制”方式体现在 I 通道使用同相载波进行 2PSK 调制, Q 通道使用正交载波进行 2PSK 调制。

### 【创建分析】

**第 1 步:** 进入 SystemView 系统视窗, 设置“时间窗”参数如下:

③ 运行时间: Start Time: 0 秒;

Stop Time: 0.02 秒;

② 采样频率: Sample Rate=30000Hz。

**第 2 步:** 调用图符块创建如图 2-4-2 所示的仿真分析系统。

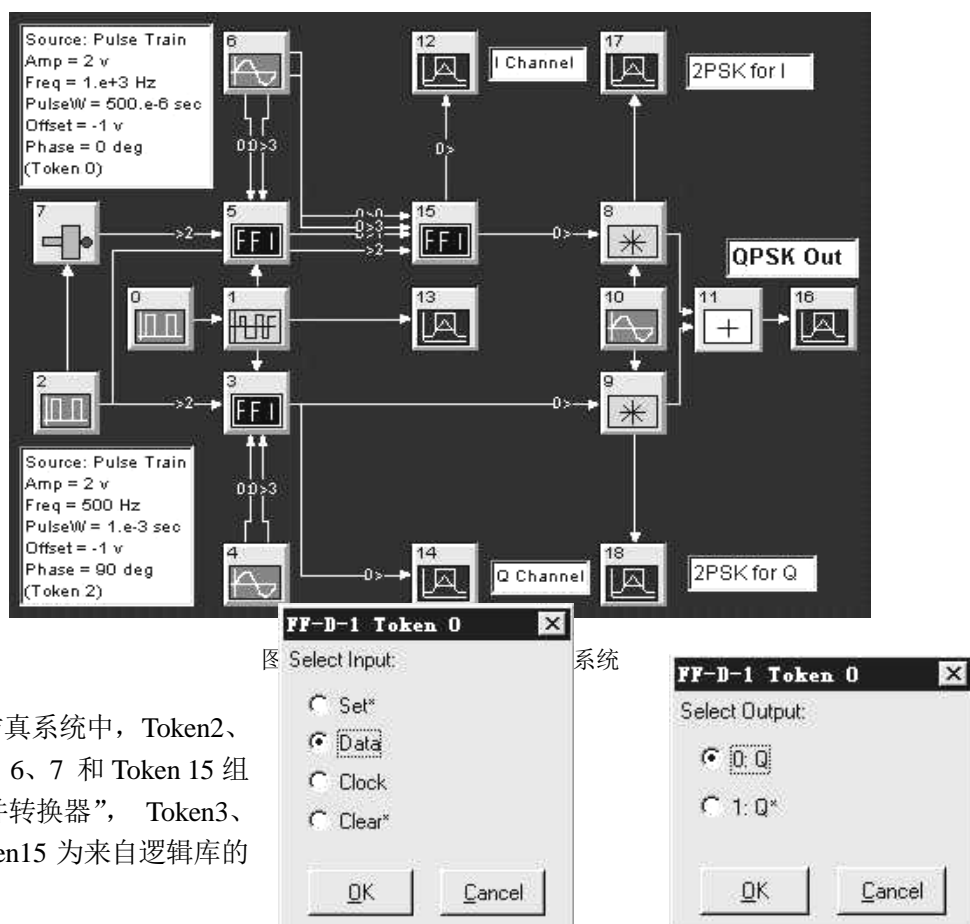


图 2-4-3 单 D 触发器 (FF-D-1) 输入/输出端子选择对话框



单 D 触发器，并有 4 个输入端子和 2 个输出端子，当对 D 触发器加输入或输出连线时，会自动出现输入/输出端子选择对话框，如图 2-4-3 所示，单击各端子前边的复选标记，并单击 **OK** 按钮，即可分别选择需要的输入或输出端子。带有\*号的端子表示负逻辑或低电平有效。另外，Token4、6 为设置成直流源（Amp=1v, Freq=0）的正弦源，作用是向 D 触发器的“Set\*”、“Clear\*”端子提供高电平；Token1 为来自通信库的二进制 PN 码产生器，并由时钟源图符块 Token0（1000Hz）驱动，Token 2 也是时钟源图符块（500Hz），它提供四进制双比特码时钟。仿真系统中的主要图符块设置参数如表 2-4-1 所示：

表 2-4-1

编号	图符块属性 (Attribute)	类型 (Type)	参数设置 (Parameters)
0	Source	PN Train	Amp=2v, Freq=1000Hz, PulseW=5.e-4sec, Offset=-1v, Phase=0 deg
1	Comm	Pulse Gen	Reg Len=10,Taps=[3-10],Seed=123, Threshold=0, True=1, False=-1
2	Source	PN Train	Amp=2v, Freq=500Hz, PulseW=1.e-3sec, Offset=-1v, Phase=90 deg
3	Logic	FF-D-1	Gate Delay=0sec, Threshold=0v, True Output =1v, False Output =-1v, Set*=t4 Output0, Data =t1 Output0, Clock=t2 Output0,Clear*=t4 Output0
4	Source	Sinusoid	Amp=1v, Freq=0Hz
5	Logic	FF-D-1	Gate Delay=0sec, Threshold=0v, True Output =1v, False Output =-1v, Set*=t6 Output0, Data=t1 Output0, Clock=t7 Output0, Clear*=t6 Output0
6	Source	Sinusoid	Amp=1v, Freq=0Hz
7	Operator	NOT	Threshold=0v, True=1, False=-1
10	Source	Sinusoid	Amp=1v,Freq=2000Hz,Phase=0 deg
15	Logic	FF-D-1	Gate Delay=0sec, Threshold=0v, True Output =1v, False Output =-1v, Set*=t6 Output0, Data =t5 Output0, Clock=t2 Output0,Clear*=t6 Output0

**第 3 步：**创建完仿真系统后，单击运行按钮，分别由 Sink13 、Sink12 和 Sink14 显示 PN 码、同相分量和正交分量的时域波形，如图 2-4-4 所示（1/0 字符非系统所给出）。

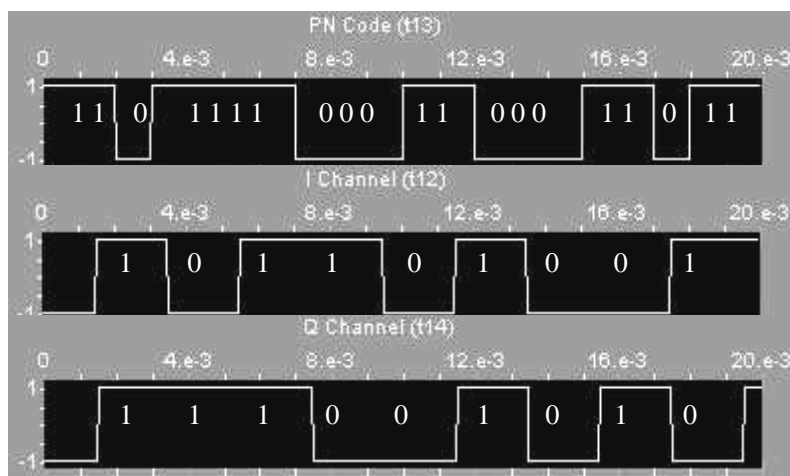


图 2-4-4 PN 码、同相分量和正交分量的时域波形

**第 4 步：**观察同相 2PSK 信号、正交 2PSK 信号和相加后的 QPSK 信号波形。为了观察波形更清楚，需调整“系统定时”，将停止时间调成 0.01 秒，最后可得到三个信号波形，如图 2-4-5 所示。

**第 5 步：**观察 QPSK 信号的功率谱。按照前边介绍的操作方法，可得如图 2-4-6 所示 QPSK 功率谱。

**第 6 步：**观察 Sink12 和 Sink14 组成的理想 QPSK 信号相位转移图。利用前边介绍的操作方法，可得到如图 2-4-7 所示相位转移图。图中，四个圆点为四相（ $45^\circ$ 、 $135^\circ$ 、 $225^\circ$  和  $315^\circ$ ）信号点，图中的连线表示四个相位点之间的相位转换路径，在码元转换时刻，QPSK 信号产生的相位跳变量最小为  $90^\circ$ ，最大为  $180^\circ$ ，而 MSK 信号在码元转换时刻的相位跳变量仅为  $90^\circ$ 。相位转换过程也可利用“动画模拟”功能形象观察。

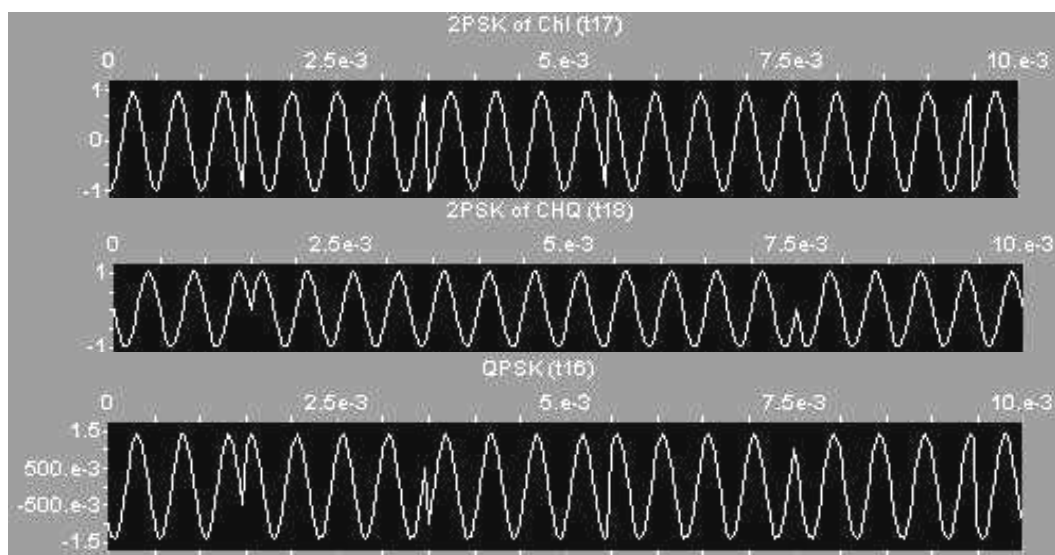


图 2-4-5 同相 2PSK 信号、正交 2PSK 信号和 QPSK 信号波形

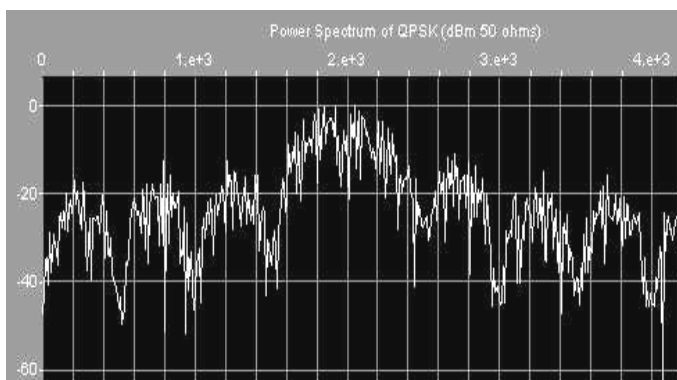


图 2-4-6 QPSK 功率谱

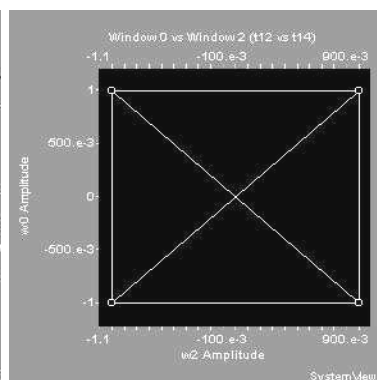


图 2-4-7 QPSK 相位转换图

## 2.5 MSK 调制原理分析

【分析内容】创建一个正交调制方式的 MSK 调制系统，被调载频为 1000Hz，以 PN 码作为二进制信源，码速率  $R_b=100\text{bit/s}$ 。分别观测其 I 通道和 Q 通道各个信号的波形、调制输出的 MSK 波形和功率谱。将得到的 MSK 功率谱与 GMSK 功率谱进行对照，将 QPSK、OQPSK、MSK 的相位转移图进行对比得出结论。

【分析目的】通过分析理解 MSK 正交调制的基本工作原理，明确 QPSK、OQPSK、MSK 的关系。

【系统组成】最小频移键控称为 MSK，它可视为一种特殊的相位连续 2FSK 信号，即保证两个频率键控信号正交的前提下，使用最小的频偏，此时必须满足：

$$\Delta f = f_1 - f_0 = \frac{1}{2T_b}$$

其中， $T_b$  为 MSK 调制器输入的二进制码序列的码元周期（间隔）。MSK 信号可表为正交信号形式，即：

$$I(t) = \sum_k a_n g[t - (2k-1)T_b] \cos\left(\frac{\pi t}{2T_b}\right)$$

$$Q(t) = \sum_k a_n g[t - 2kT_b] \sin\left(\frac{\pi t}{2T_b}\right)$$

其中， $\{a_n\}$  为二进制码序列， $g(t)$  为门函数。显然，MSK 也可视为一种特殊 2PSK 信号。

MSK 信号属于恒定包络调制信号，此处“恒定包络”的含义并非指产生的信号幅度包络恒定，而是指移相键控信号通过限带信道或非线性系统后，幅度包络几乎不产生 AM / PM 转换效应，这取决于移相键控信号在码元转换时刻的相位变化是否剧烈、相位路径是否连续平缓，因为相位特性直接影响信号的功率谱旁瓣是否快速收敛，信号能量是否集中等特性。事实上，现代数字通信要求以最小的信号功率付出和频带资源最高效率地利用进行数据传输，数字调制技术改进过程中的许多工作几乎就是围绕如何改进调制信号的相位路径特性进行的。MSK 信号是一种正交连续相位移频键控（CP-FSK）信号，在码元转换时刻无相位突变，且相位变化量仅为  $90^\circ$ 。MSK 调制系统组成如图 2-5-1 所示。

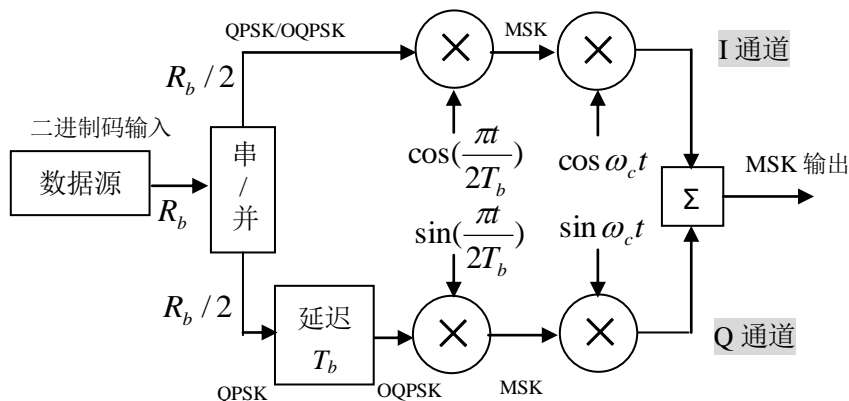


图 2-5-1 MSK 调制系统组成

OQPSK 称为“偏移四相移相键控”，它与 QPSK 的不同在于 Q 通道基带数字信号被延迟了一个二进制码元周期，即半个四进制码元周期，使相位变化量限制在  $90^\circ$ ，改进了相位特性，但仍然不如 MSK 的相位特性好，这一点可通过后边的相位转移图看出。

### 【创建分析】

**第 1 步：**进入 *SystemView* 系统视窗，设置“时间窗”参数如下：

- ① 运行时间：Start Time: 0 秒；  
Stop Time: 0.04 秒；
- ② 采样频率：Sample Rate=10000Hz。

**第 2 步：**调用图符块创建如图 2-5-2 所示的仿真分析系统，图中采用了与 QPSK 仿真系统（图 2-4-2）不同的构造方式，即：

(1) 利用不同参数的数字延迟器(Token2,3)、采样器(Token1,4,5)和保持器(Token6,7)构成“串/并转换器”。如果需要对数字方波信号进行延迟处理，必须保证“数字延迟器-采样器-保持器”级联使用，否则波形严重失真；数字延迟器的延迟量，按照它前边采样器适用的采样间隔的整数倍计算，故要对 Token7 输出 QPSK 的 Q 分量延迟半个四进制码元周期（形成 OQPSK 的 Q 分量）时，不能再用数字延迟器，而要使用模拟延迟器(Token8)，其延迟量可自由确定，单位为秒；

(2) Token17,18,19,20,21 这种图符块是第一次采用，它们来自 Sink 库，称为实时观测图符块(Real Time)，利用它只能观察时域波形，放置该图符块的同时还出现一个波形显示框，将鼠标置于框内，单击右键，弹出一个操作菜单，可编辑显示框的底色、波形颜色及是否需要坐标线；用鼠标压住框可移动位置并可改变大小。如果使用“Real Time”块而不是“Analysis”块来观察时域波形，不必进入分析视窗，随着运算的进行，可直接观察时域波形。仿真系统中的主要图符块设置参数如表 2-5-1 所示。

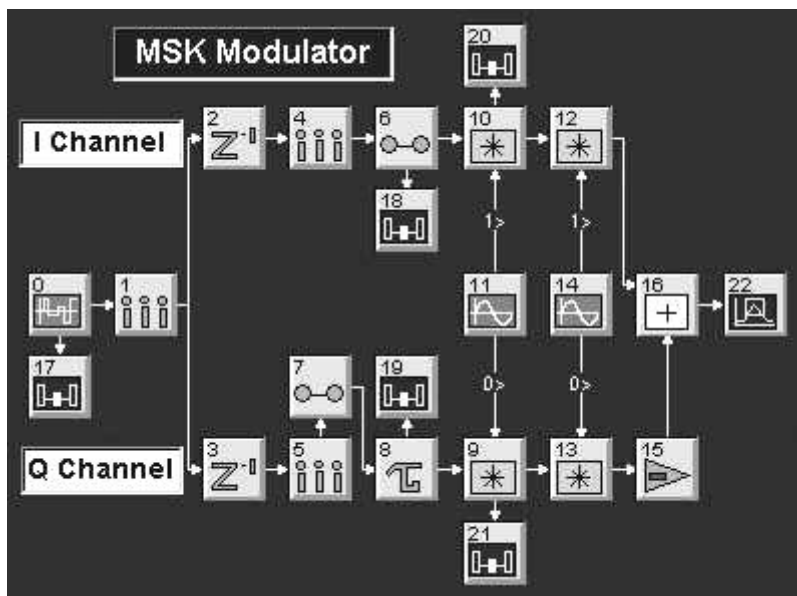


图 2-5-2 MSK 调制仿真分析系统

表 2-5-1

编号	图符块属性 (Attribute)	类型 (Type)	参数设置 (Parameters)
0	Source	PN Seq	Amp=1v, Offset=0v , Rate=100Hz, Level=2, Phase=0 deg
1	Operator	Sampler	Interpolating, Rate=100Hz
2	Operator	Smpl Delay	Fill Last Register, Delay=2 Samples
3	Operator	Smpl Delay	Fill Last Register, Delay=1 Samples
4,5	Operator	Sampler	Interpolating, Rate=50Hz
6,7	Operator	Hold	Last Value, Gain=1, Out Rate=10.e+3 Hz
8	Operator	Delay	Non-Interpolating, Delay=10.e-3 sec
11	Source	Sinusoid	Amp=1v,Freq=25Hz, Phase=90 deg
14	Source	Sinusoid	Amp=1v,Freq=1000Hz,Phase=0 deg
15	Operator	Gain	Gain Units=Linear, Gain= -1
17-21	Sink	Real Time	--
22	Sink	Analysis	--

**第 3 步：**创建完仿真系统后，单击运行按钮，各个“Real Time”图符块的显示框中二进制数据信号及 OQPSK、MSK 的 I、Q 分量波形如图 2-5-3 所示。

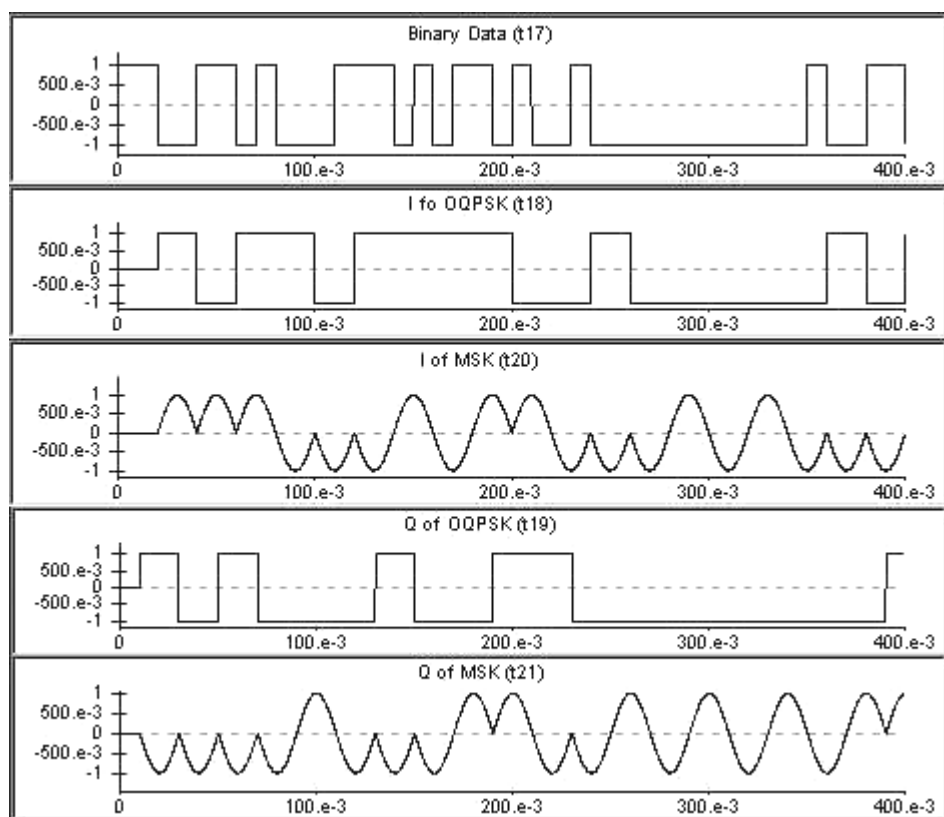
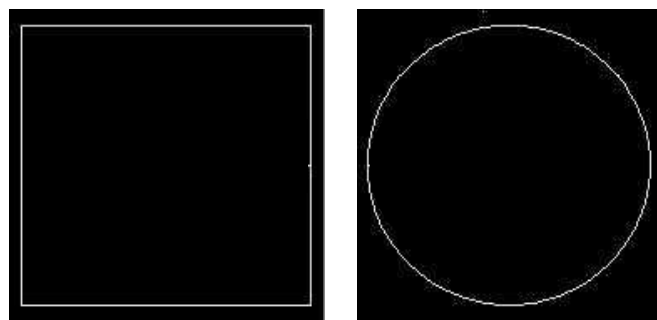


图 2-5-3 二进制数据信号及 OQPSK、MSK 的 I、Q 分量波形

**第 4 步：**观察 OQPSK 信号和 MSK 信号的相位转移图，并与 QPSK 信号的相位转移图进行对比，体会这些数字调制信号相位特性的改进过程。组合显示 Token6 和 Token8 输出波形为 OQPSK 相位转移图，组合显示 Token10 和 Token9 输出波形为 MSK 相位转移图，如图 2-5-4 所示。

将图 2-5-4 与图 2-4-7 对照可以看出，OQPSK 与 QPSK 相位转移图的区别进在于没有了  $180^\circ$  的相位转移路径，相位特性得到改善，而 MSK 的相位转移路径是一个圆周，没有前两者的路径拐点，相位特性进一步得到改善。读者可以利用分析窗下的“动画模拟”按钮，使信号点活动起来，每个码元转换时刻，代表相位的信号点动作一次，非常形象逼真。



(a) OQPSK 相位转移图

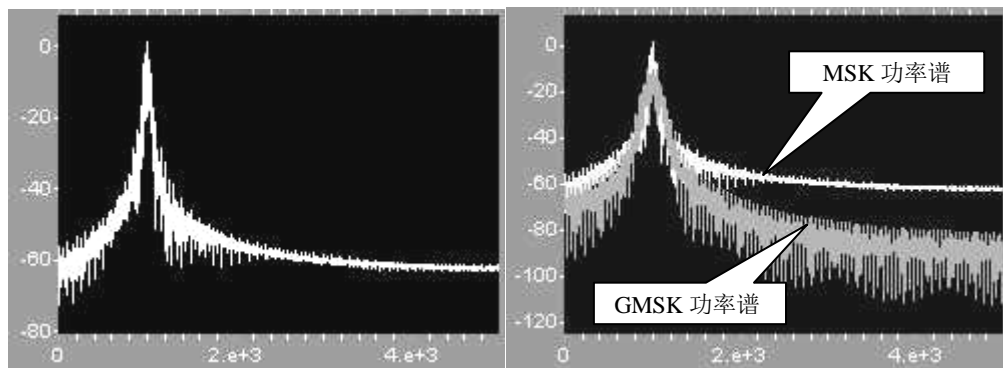
(b) MSK 相位转移图

图 2-5-4

**第 5 步：**观察 MSK 信号的功率谱，如图 2-6-5(a)所示。MSK 信号的直接改进就是 GMSK 信号，在 GMSK 调制器中，首先将 OQPSK 的 I、Q 基带信号滤波形成高斯形脉冲，然后进行 MSK 调制。由于形成后的高斯脉冲包络无陡峭的前后沿，也无拐点，因此相位特性进一步改善，其谱特性优于 MSK。GMSK 调制方式主要应用于移动通信中，并已确定为欧洲新一代移动通信的标准调制方式。

在创建的仿真分析系统的基础上，将通信库中的脉冲形成图符块设置为“Gausse”型形成器，再创建后边的正交调制部分，可得到 GMSK 的功率谱，并与得到的 MSK 功率谱合成显示在一个窗口内，如图 2-5-5(b)所示。明显可以看出，GMSK 功率谱较 MSK 功率谱旁瓣滚降迅速，信号能量更为集中。

此外，MSK 的时域波形是等幅的，在此就不特别给出了。



(a) MSK 功率谱

(b) GMSK 功率谱

图 2-5-5

## 2.6 低通与带通抽样定理验证

**【分析内容】**按照低通抽样定理与带通抽样定理，分别对构造的低通型信号和带通型信号、两种抽样后的信号及滤波重建信号进行时域和频域观察，形象地给出低通抽样定理与带通抽样定理。

**【分析目的】**通过分析验证低通抽样定理与带通抽样定理。

**【系统组成】**抽样定理实质上研究的是随时间连续变化的模拟信号经抽样变成离散序列后，能否由此离散序列值重建原始模拟信号的问题。对于低通型和带通型模拟信号，分别对应不同的抽样定理，抽样定理是模拟信号数字化的理论基础。

对上限频率为  $f_H$  的低通型信号，低通抽样定理要求抽样频率应满足：

$$f_s \geq 2f_H$$

对下限频率为  $f_L$ 、上限频率为  $f_H$  的带通型信号，带通抽样定理要求抽样频率满足：

$$f_s \geq 2B \cdot \left[1 + \frac{k}{n}\right]$$

其中， $B = f_H - f_L$  为信号带宽， $n$  为正整数， $0 \leq k < 1$ 。

应该注意的是，当  $f_H = nB$  时，无论带通型信号的  $f_L$  和  $f_H$  为何值，只需将抽样频率设定在  $2B$ ，理论上就不会发生抽样后的频谱重叠，而不像低通抽样定理要求的必须为上限频率的 2 倍以上。仿真分析系统将按照图 2-6-1 所示结构创建。

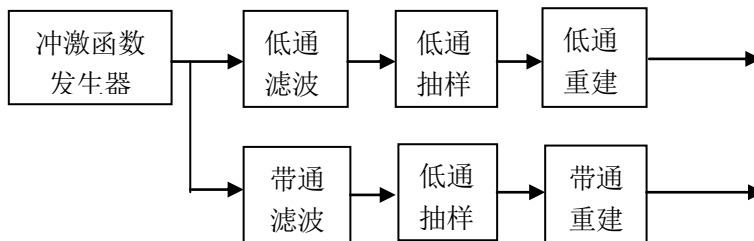


图 2-6-1 仿真分析系统结构

其中，对于恒定频谱的冲激函数，通过低通滤波产生低通型信号，再进行低通抽样；通过带通滤波产生带通型信号，再进行带通滤波产生带通抽样，最后分别滤波重建原始信号。仿真分析时，设低通滤波器的上限频率为 10Hz，带通滤波器下限频率为 100Hz、上限频率为 120Hz，低通抽样频率选为 30Hz；带通型信号上限频率  $f_H = 6 \times 20 = 120\text{Hz}$  ( $B=20\text{Hz}$ ， $n=6$ )，带通抽样频率至少应取 40Hz，现取 60 Hz 的带通抽样频率。

## 【创建分析】

**第 1 步：**进入 *SystemView* 系统视窗，设置“时间窗”参数如下：

- ① 运行时间：Start Time: 0 秒；Stop Time: 0.4 秒；
- ② 采样频率：Sample Rate= 10000Hz。

**第 2 步：**在 *SystemView* 系统窗下，创建的仿真分析系统如图 2-6-2 所示。仿真系统中各图符块的参数设置情况见表 2-6-1。

**第 3 步：**创建完仿真系统后，单击运行按钮，首先观察时域波形，四个“Real Time”图符块显示框中的波形如图 2-6-3 所示。两个重建信号（Token7,14）的时延是由重建滤波器时延造成的。

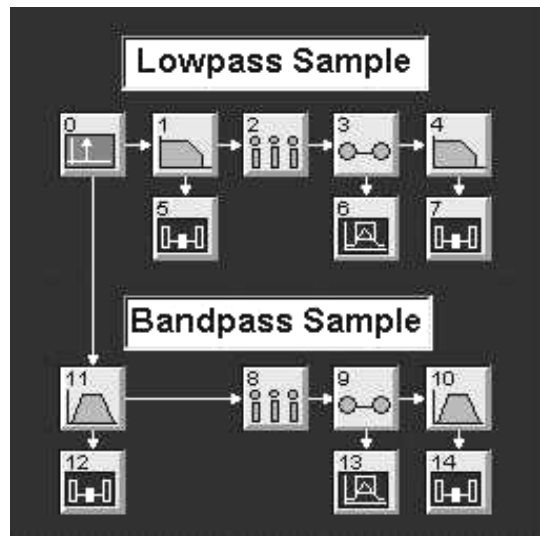
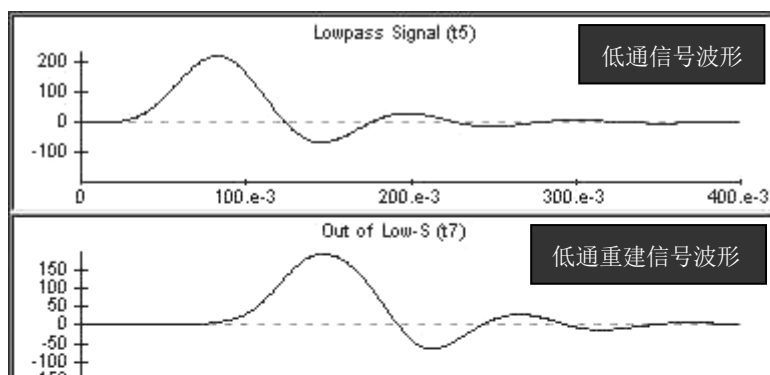


图 2-6-2 *SystemView* 仿真分析系统

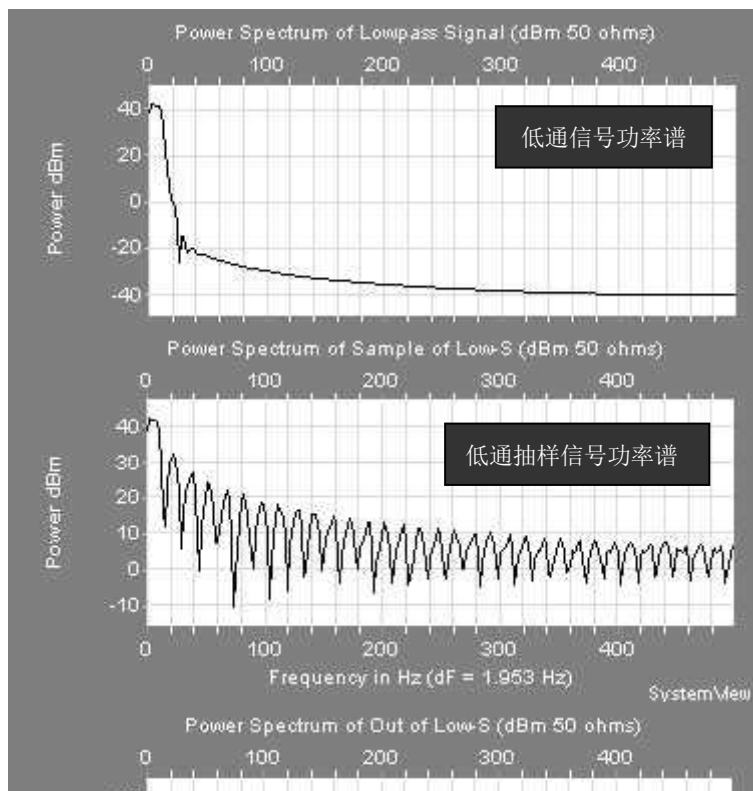
表 2-6-1

编号	图符块属性 (Attribute)	类型 (Type)	参数设置 (Parameters)
0	Source	Impulse	Gain=10, Start=0sec, Offset=0v
1	Operator	Linear Sys	Butterworth, Lowpass IIR, 7 Poles, Fc=10Hz
2	Operator	Sampler	Interpolating, Rate=30Hz
3	Operator	Hoid	Last Value, Gain=1, Out Rate=1.e+3Hz
4	Operator	Linear Sys	Butterworth, Lowpass IIR, 7 Poles, Fc=15Hz
5	Sink	Real Time	-- (用于系统窗下直接观察低通型信号波形)
6	Sink	Analysis	--
7	Sink	Real Time	-- (用于系统窗下直接观察低通型重建信号波形)
8	Operator	Sampler	Interpolating, Rate=60Hz
9	Operator	Hoid	Last Value, Gain=5, Out Rate=1.e+3Hz
10	Operator	Linear Sys	Chebshv bandpass IIR, 9 poles, Low Fc=190Hz, Hi Fc=230Hz
11	Operator	Linear Sys	Butterworth, Bandpass IIR, 5 Poles, Low Fc = 200 Hz, Hi Fc=220Hz
12	Sink	Real Time	-- (用于系统窗下直接观察带通型信号波形)
13	Sink	Analysis	--
14	Sink	Real Time	-- (用于系统窗下直接观察带通型重建信号波形)





**第 4 步：**观察低通信号抽样前后信号（Token5,6）和重建信号（Token7）的功率谱，如图 2-6-4 所示。观察带通信号抽样前后信号（Token12,13）和重建信号（Token14）的功率谱，如图 2-6-4 所示。



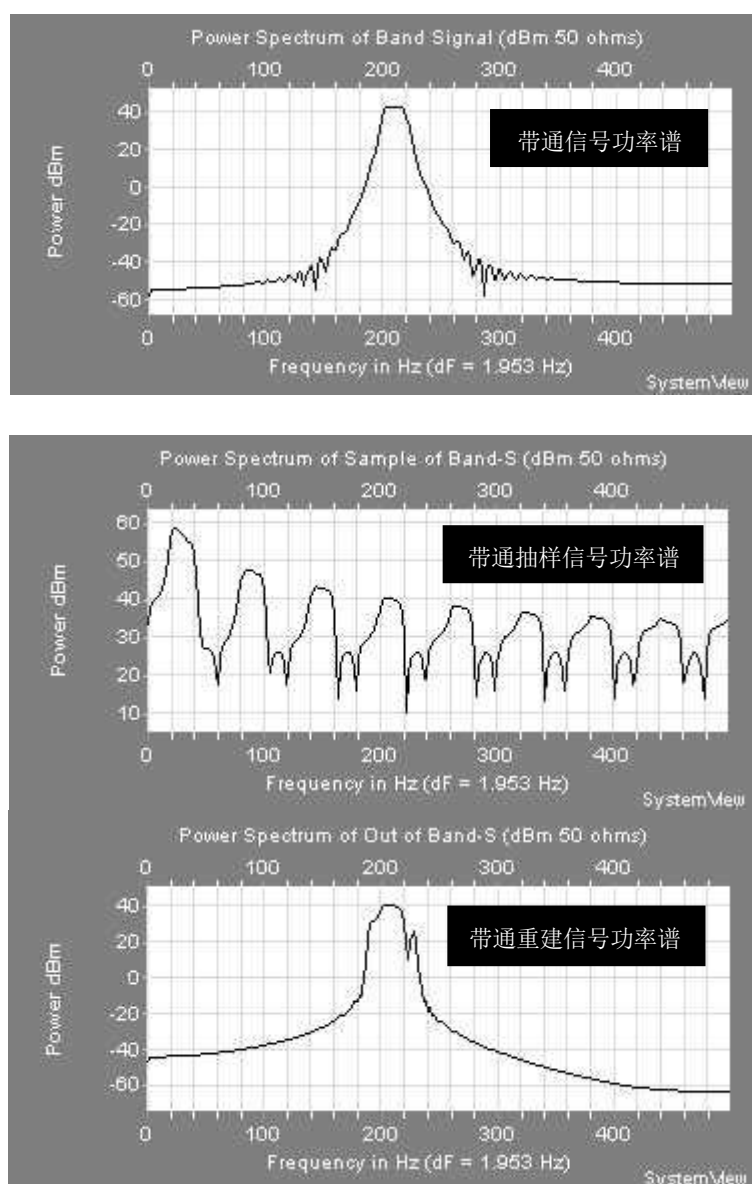


图 2-6-5 带通抽样前后、重建信号功率谱

## 2.7 误比特率 BER 分析

**【分析内容】**以 2PSK 调制传输系统为误比特率分析对象，被调载频为 1000Hz，以 PN 码作为二进制信源，码速率  $R_b=100\text{bit/s}$ ，信道为加性高斯白噪声信道，对该系统的误比特率 BER 进行分析。

**【分析目的】**通过仿真操作掌握 SystemView 系统误比特率分析的方法。

**【系统组成及原理】**误比特率 (BER: Bit Error Rate) 是指二进制传输系统出现码传输错误的概率，也就是二进制系统的误码率，它是衡量二进制数字调制系统性能的重要指标，误比特率越低说明抗干扰性能越强。对于多进制数字调制系统，一般用误符号率 (Symble Error Rate) 表示，误符号率和误比特率之间可以进行换算，例如采用格雷编码的 MPSK 系统，其误比特率和误符号率之间的换算关系近似为：

$$P_{b,MPSK} \approx \frac{P_{s,MPSK}}{\log_2 M}$$

其中，M 为进制数，且误比特率小于误符号率。

SystemView 的通信库 (Comm Lib) 中提供了 BER 分析的专用图符块，可直接调用。

### 【创建分析】

**第 1 步：**进入 SystemView 系统视窗，设置“时间窗”参数如下：

- ① 运行时间：Start Time: 0 秒；Stop Time: 2 秒；
- ② 循环运算次数：No of Loops=5；
- ③ 采样频率：Sample Rate=20000Hz。

**第 2 步：**在 SystemView 系统窗下，创建以 2PSK 传输系统为 BER 分析对象的仿真分析系统，如图 2-7-1 所示。在创建的系统中，必须使与 2PSK 信号叠加的高斯噪声强度自动可变，才能得到随 SNR 改变的 BER 分析曲线，可在高斯噪声源 (Token4) 与加法器 (Token3) 之间插入一个增益随每次循环改变的“Gain”图符块 (Token5)，首先将其增益参数设置为 Gain=-30dB，然后执行“Tokens>>Global parameter Links”命令，出现一个“Global Token parameter Links”对话框，在其中的“Select System Token”栏内单击选中“5 Operator(Gain)”项 (变成反白条)，在“Define Algebraic Relationship F(Gi,Vi)”栏内输入“Gain”图符块的循环增益变化式：-3\*cl-15，该式表示每次循环高斯噪声功率减小 3dB，5 次循环后“Gain”图符块的增益变成-30dB，最后，单击 OK 按钮关闭此对话框返回系统窗。仿真系统中主要图符块的参数设置情况见表 2-7-1。

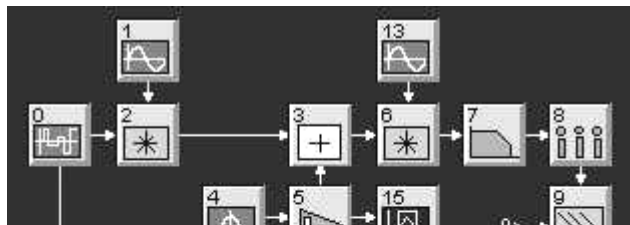


表 2-7-1

编号	图符块属性 (Attribute)	类型 (Type)	参数设置 (Parameters)
0	Source	PN Seq	Amp=1v, Offset=0v, Rate=50Hz, Level=2
1,13	Source	Sinusoid	Amp=1v, Freq=1000Hz, Phase= 0 deg
4	Source	Gauss Noise	Pwr Density=0.007W/Hz, Mean=0v, System=50 ohms
5	Operator	Gain	Gain Unit=dB Power, Gain=-30dB
7	Operator	Linear Sys	Butterworth, Lowpass IIR, 5 Poles, Fc=200Hz
8	Operator	Sampler	Interpolating, Rate=50Hz
9	Comm	BER Rate	No.Trials=3 bits, Threshold=0v, Offset=1 Sec
10	Operator	Smpl Delay	Fill Last register, Delay=1 samples
11	Operator	Sampler	Interpolating, Rate=50Hz
12	Sink	Final Value	-- (终值显示图符块)
14	Fuction	Cmlty Avg	Gain=1 (累积平均图符块)
15	Sink	Analysis	-- (观察叠加的高斯噪声每次循环的强度变化)

**第 3 步：**创建完仿真系统后，单击运行按钮，随着每次循环，终值显示框内出现每次的运算结果，其中最后一列带括弧的数据为误比特率。5 次循环结束后进入分析窗，此时 Token12 给出的误比特率是随仿真时间改变的规律，欲观察 BER 随解调信号 SNR 改变的曲线，需单击“信宿计算器”按钮，在出现的对话框中，选中 **Style** 按钮，单击 **BER Plot** 按钮，在其右侧的“SNR Start[dB]:”栏内输入-10、“Increment[dB]:”栏内输入 20，再选中右上角窗口内“w0:Bit Error Rate (t12)”项，最后单击对话框的 **OK** 按钮即可显示随 SNR 改变的 BER 曲线，如图 2-7-2 所示。每次循环时，输入的 2PSK 信号功率保持不变，而叠加的高斯噪声功率逐次衰减，即 SNR 不断增加。叠加高斯噪声强度的变化由 Token15 的显示窗口给出，如图 2-7-3 所示。



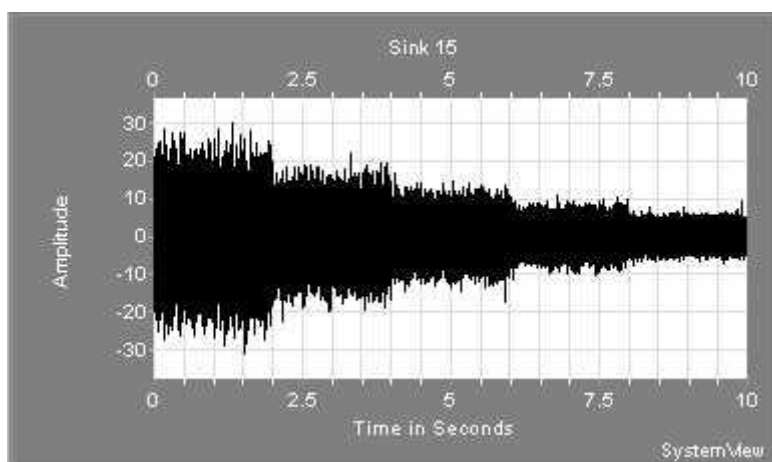


图 2-7-3 叠加高斯噪声强度随循环每次减小 3dB 变化

## 第三部分 通信系统仿真分析上机实验

### 实验一 二进制键控系统分析（1）

**【实验目的】** 由于本实验是利用 *SystemView* 进行仿真分析的第一个上机实验，故安排了较为简单的 2ASK 和 2FSK 系统分析内容，上机操作步骤介绍得也很详细。建议除按照实验的分析内容要求得到分析结果外，应进一步熟悉软件的主要操作步骤。

#### 一、相干接收 2ASK 系统分析

## 1. 相干接收 2ASK 系统工作原理

相干接收 2ASK 系统组成如图 3-1-1 所示：

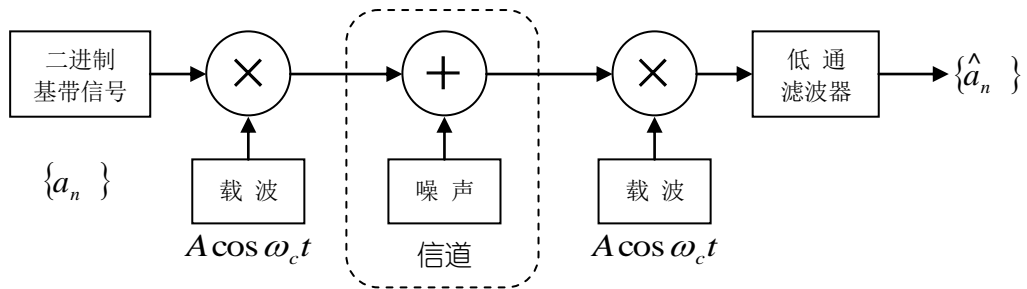


图 3-1-1 相干接收 2ASK 系统组成

## 2. 上机操作步骤

根据图 3-1-1 所示系统，在 SystemView 系统窗下创建仿真系统，首先设置时间窗，运行时间：0—0.3 秒，采样速率：10000Hz。

① 组成系统如图 3-1-2 所示：

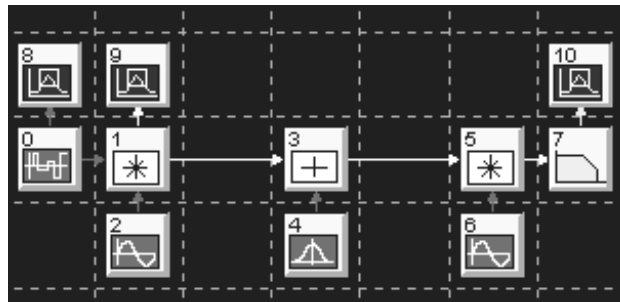


图 3-1-2 仿真系统组成系统

② 图符块参数参数设置：

Token0: 双极性二进制基带码源（PN 码），参数：Amp=1v；Offset=0v；Rate=100Hz；No.of Level=2；

Token1: 乘法器；

Token2: 正弦载波信号源，参数：Amp=1V；F=1000Hz；Phase=0；

Token3: 加法器；

Token4: 高斯噪声源，参数：Std Deviation=0.5V；Mean=0V；

Token5: 乘法器；

Token6: 正弦本地同步载波信号源，参数设置同 Token2；

Token7: 模拟低通滤波器，参数：Butterworth\_Lowpass IIR；No.of Poles=5；LoCuttoff=300Hz；

Token8, 9, 10: 信宿接收分析器（Sink8,Sink9,Sink10）。

## 3. 分析内容要求

① 在系统窗下创建仿真系统，观察指定分析点的波形或功率谱；

- ② 改变元件设置参数，观察仿真结果；
- ③ 进一步熟悉软件的主要操作步骤。

#### 4. 实验报告要求

上交实验报告的具体要求由实验指导教师现场规定。

## 二、2FSK 系统分析

### 1. 2FSK 系统组成

以话带调制解调器中 CCITT V.23 建议规定的 2FSK 标准为例，该标准为：码速率 1200bit/s； $f_0=1300\text{Hz}$  及  $f_1=2100\text{Hz}$ 。要求创建符合 CCITT V.23 建议的 2FSK 仿真系统，调制采用“载波调频法”产生 CP-2FSK 信号，解调采用“锁相鉴频法”。系统组成如图 3-1-3 所示。

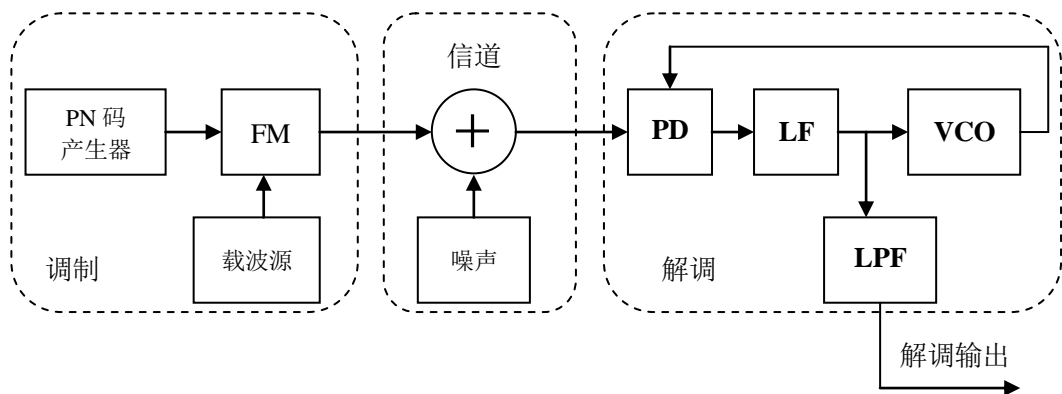


图 3-1-3 2FSK 仿真系统组成

### 2. 上机操作步骤

根据图 3-1-3 所示系统，在 *SystemView* 系统窗下建立仿真系统，首先设置时间窗，运行时间：0—0.3 秒，采样速率：10000Hz，组成系统如图 3-1-4 所示，其中：

Token0: PN 码源，参数：Amp=1v、Offset=0v、Rate=1200Hz、No.of levels=2；

Token1: 直接调频器，参数：Amp=1v、F=1700Hz、Phase=0、Mod Gain=400Hz/V；

Token2, 3, 4: 话带加性高斯噪声模拟信道，参数：Token4 为 Butterworth\_BPF、No.of Poles=5、Lo Cutoff=300Hz、Hi Cutoff=3400Hz；Token3 为高斯噪声源；

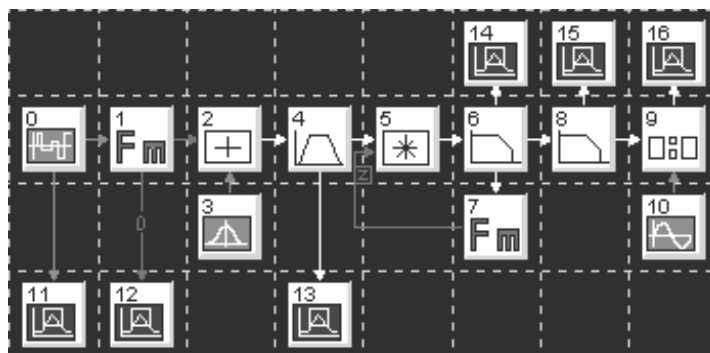


图 3-1-4 2FSK 仿真系统组成

Token5, 6, 7: 锁相环路, 其中 Token6 为 Butterworth\_LPF、No.of Poles=1、Lo Cutoff=1200Hz;

Token7: VCO, 参数: Amp=2v、F=1700Hz、Phase=0、Mod Gain=800Hz/v;

Token8: 低通滤波器, 参数: Butterworth\_BPF、No.of Poles=7、Lo Cutoff=2400Hz;

Token9: 过零比较器, 参数: 选 a>b 模式、a 输入为 Token8 输出、b 输入为门限电平、True Output=1v、false Output=-1v ;

Token10: 比较门限电平, 选正弦信号源, Amp=0V、F=0Hz, 即比较门限为 0 电平;

Token11, 12, 13, 14, 15, 16: 信宿接收分析器 Sink。

### 3. 分析内容要求

① 在系统窗下创建仿真系统, 观察各接收分析器 (Sink11, 12, 13, 14, 15, 16) 的时域波形, 体会各图符块在系统中的特殊作用; 观察接收分析器 Sink12 的功率谱, 分析该 2FSK 信号的主要信号能量是否可以通过话带 (300Hz—3400Hz);

② 改变元件设置参数, 再观察仿真结果。

### 4. 实验报告要求

上交实验报告的具体要求由实验指导教师现场规定。

## 实验二 二进制键控系统分析 (2)

**【实验目的】** 本实验安排了 2PSK 和 2DPSK 系统分析内容。在分析中, 除巩固二进制移相键控系统的工作原理外, 应特别注意 2DPSK 系统是如何解决同步载波  $180^\circ$  相位模糊问题的。

### 一、相干接收 2PSK 系统分析

#### 1. 相干接收 2PSK 系统工作原理

相干接收 2PSK 系统组成如图 3-2-1 所示:

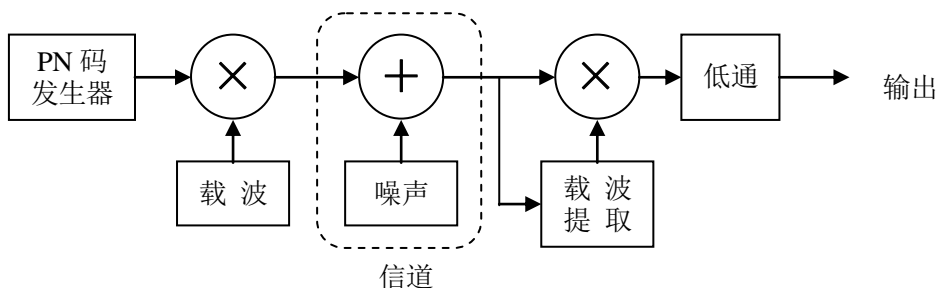


图 3-2-1 2PSK 系统组成



对 2PSK 信号相干接收的前提是首先进行载波提取，可采用平方环或科斯塔斯环来实现。为分析方便起见，在本实验中可直接在收端设置一个与发送端同步的本地载波源。另外，本实验中暂不考虑位同步提取问题。

## 2. 上机操作步骤

按照图 3-2-1 所示系统，创建仿真系统如图 3-2-2 所示。设置系统运行时间：0-0.3 秒；采样频率 10000Hz。PN 码速率为 100Hz，载波频率为 1000Hz；收、发正弦载波源的相位均为 0。

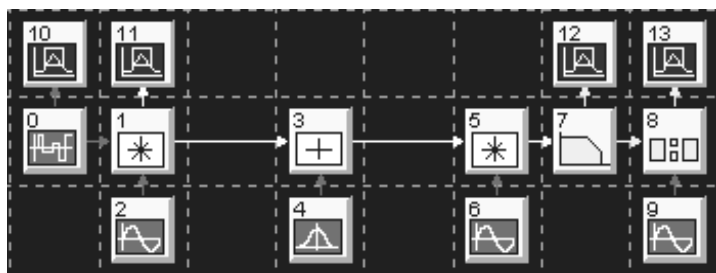


图 3-2-2 2PSK 仿真系统

其中，Token 0 为双极性 PN 码源；Token2 和 Token6 是彼此同步的载波源；Token8 为过零比较器（a>b 模式）；Token9 是幅度和频率均为 0 的正弦源，作为过零门限电平（比较器 b 输入）；Token7 为 3 阶 100Hz 截止频率的低通滤波器（比较器 a 输入）。

## 3. 分析内容要求

① 观察 Token10、11、12、13 处的时域波形，看解调是否正确？观察 Token11 处的功率谱；

② 在 2PSK 系统中，接收提取的载波存在  $180^\circ$  相位模糊度，这是载波提取电路存在的固有问题，一旦接收端提取的载波与发送端调制载波倒相，解调出的码序列将全部倒相。重新设置接收载波源的参数，将其中的相位设为  $180^\circ$ ，运行后再观察解调的结果。

## 4. 实验报告要求

上交实验报告的具体要求由实验指导教师现场规定。

## 二、相干接收 2DPSK 系统分析

### 1. 2DPSK 系统组成原理

2DPSK 系统组成原理如图 3-2-3 所示，系统中差分编、译码器是用来克服 2PSK 系统中接收提取载波的  $180^\circ$  相位模糊度。

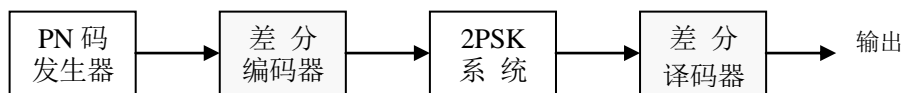


图 3-2-3 2DPSK 系统组成



## 实验三 16QAM 调制解调系统分析

【实验目的】 本实验安排了 16QAM 调制解调系统的仿真分析内容，目的是在全面理解 16QAM 调制解调原理的基础上，强化信号星座图、眼图所表明的信号性质，体会采样判决环节在解调系统中的重要作用。

### 1. 16QAM 系统组成原理

由于信道资源越来越紧张，许多数据传输场合二进制数字调制已无法满足需要。为了在有限信道带宽中高速率地传输数据，可以采用多进制（ $M$  进制， $M>2$ ）调制方式，MPSK 则是经常使用的调制方式，由于 MPSK 的信号点分布在圆周上，没有最充分地利用信号平面，随着  $M$  值的增大，信号最小距离急剧减小，影响了信号的抗干扰能力。MQAM 称为多进制正交幅度调制，它是一种信号幅度与相位结合的数字调制方式，信号点不是限制在圆周上，而是均匀地分布在信号平面上，是一种最小信号距离最大化原则的典型运用，从而使得在同样  $M$  值和信号功率条件下，具有比 MPSK 更高的抗干扰能力。16QAM 信号的调制解调系统如图 3-3-1 所示。16QAM 的每个信号点都可视为同相与正交两个分量的矢量合，与同相和正交载波相乘的信号为两个 4 电平基带信号，分别由输入的二进制序列转换而成。

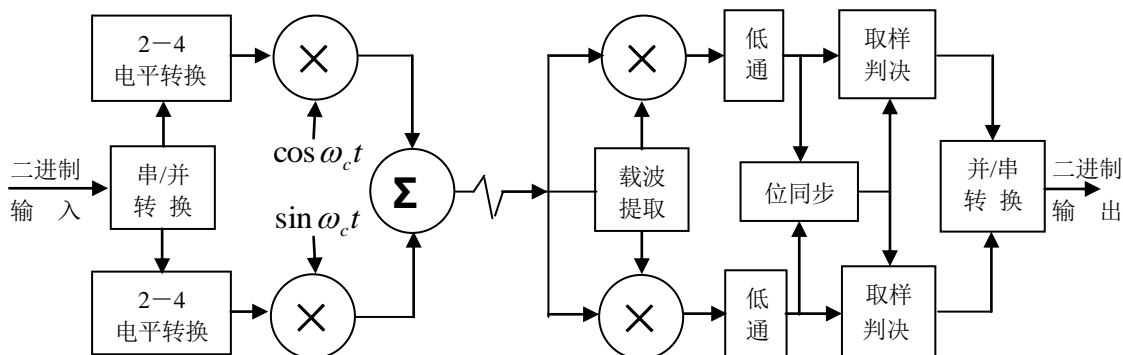


图 3-3-1 16QAM 调制解调系统组成

在 16QAM 信号的解调器中，“低通滤波器”后边接“取样判决器”可以大大提高解调输出的正确性，因为低通滤波器输出的是包含信道畸变和噪声影响的模拟量，信号取值具有很大模糊性，此时信号星座图中的信号点是发散的，这一点将在接下来的仿真分析结果中充分体现出来。取样判决器的作用就是最大限度地消除各种不利因素，使信号星座图更加趋于理想 16QAM 的信号星座图。事实上，几乎所有规范的数字解调系统都是采样这种处理方式。

### 2. 上机操作步骤

创建一个 16QAM 调制与解调系统。为了便于观察，假设被调载频为 500Hz，分别以 2 个 4 电平 PN 码作为同相和正交支路的 4 电平基带信号，码时钟频率为 50Hz（此处省略了“串/并转换”环节）；解调器中，以“采样器+保持器+量化器”结构代替“取样判决”

的作用，并忽略“并/串转换”环节。可仿照图 3-3-2，在 SystemView 系统窗下创建仿真分析系统。设置系统运行时间：0—2.5 秒、采样速率为 10000Hz。

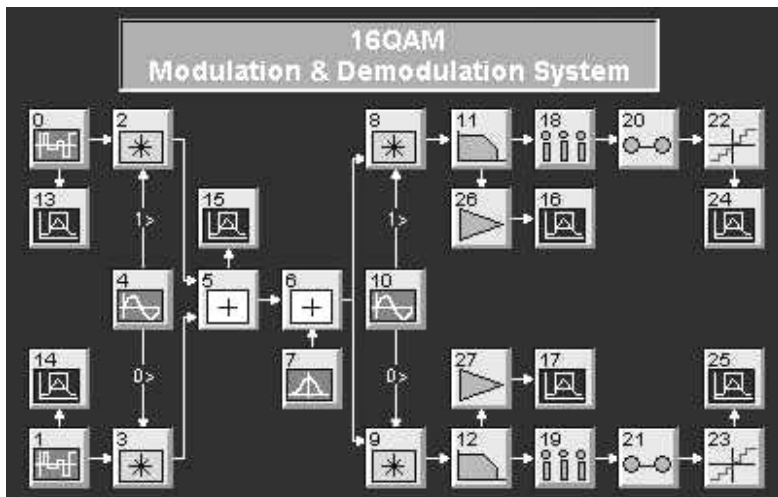


图 3-3-2 系统窗下创建的 16QAM 调制解调仿真分析系统

系统中主要图符块参数如下：

Token0、1: PN Seq, Amp=3v, Offset=0v, Rate=50Hz, Level=4, Phase=0;

Token7: Gauss Noise, Std Dev=0.5v, Mean=0v;

Token11、12: Butterworth Lowpass IIR, 3 Poles, Fc=100Hz;

Token18、19: Sampler, Rate=50Hz;

Token22、23: Quantizer (函数库), Bits=4, Max Input=4v, Signal Integer Output;

Token26、27: Gain, Gain Unit=Linear, Gain=2。

发送端理想 16QAM 信号星座图，以及取样判决前、后的 16QAM 解调信号星座图如图 3-3-3 所示。

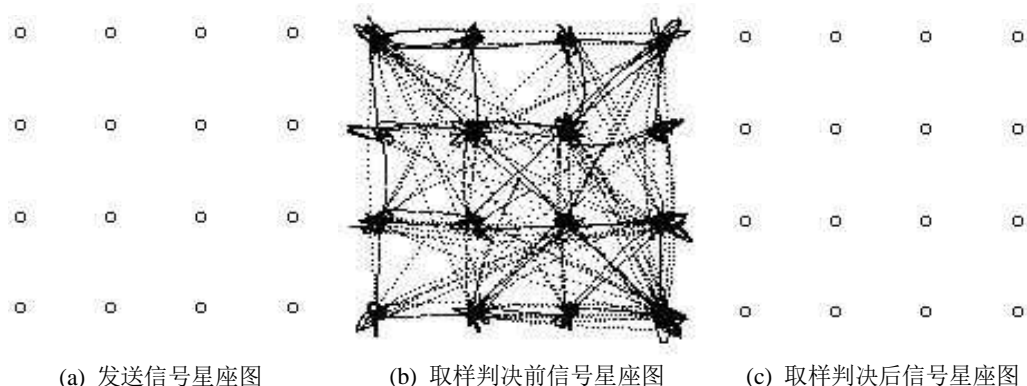


图 3-3-3

从这三个图可以看出，由于信道畸变和噪声的影响，使解调低通滤波器输出的信号星座图较发送的理想信号星座图明显发散，经取样判决处理后，信号星座图大为改观。观察信号星座图的操作方法请参照 1.6.4 小节内容。

I 通道解调低通滤波器输出信号的眼图为“4 电平 3 眼”形式，改变叠加高斯噪声的强

度,可改变“眼睛”的张闭程度,如将高斯噪声的标准偏差改为 1v,观察时间长度定为 0—0.06 秒,可得到分析图符块 Token16 的眼图,如图 3-3-4 所示。观察眼图的操作方法请参照 1.6.2 小节内容。

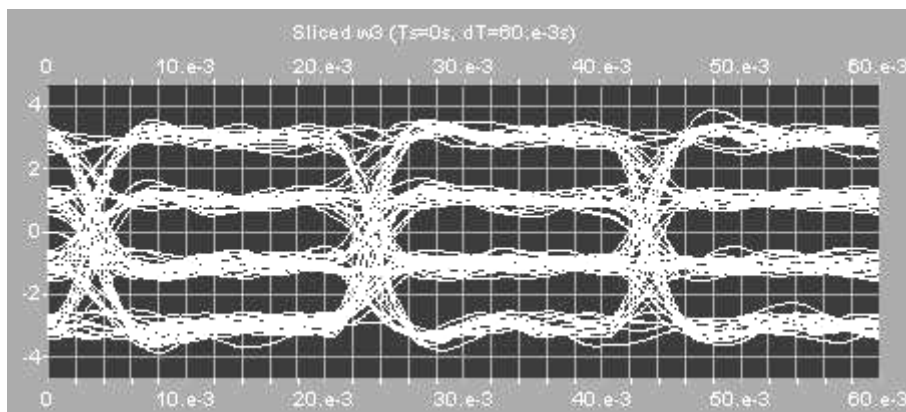


图 3-3-4 I 通道解调低通滤波器输出信号的眼图 (Length=0.06sec)

### 3. 分析内容要求

① 对于调制部分,分别观察 I 通道和 Q 通道 4 电平基带信号波形和 16QAM 理想信号星座图、合成的 16QAM 信号波形和功率谱;

② 对于解调部分,在伴有加性高斯噪声的条件下,分别观察解调出的 I 通道和 Q 通道低通滤波器输出波形和信号星座图、取样判决输出的 I 通道和 Q 通道 4 电平信号波形和信号星座图,观察 I 通道解调低通滤波器输出信号眼图;

③ 由小到大改变叠加噪声的强度 (Std Dev 值),再观察解调低通滤波器输出信号星座图和眼图,体会眼图张闭程度及星座图中信号点发散程度与干扰强度、信号传输质量的关系;

④ 体会系统中各个环节的特殊作用。

### 4. 实验报告要求

上交实验报告的具体要求由实验指导教师现场规定。

## 实验四 锁相环路仿真分析

**【实验目的】** 本实验安排了锁相环路的仿真分析内容,目的是更加形象地理解锁相环的工作原理,从而观察到硬件实验不易观察到的实验现象。体会 PLL 的带通频率提纯作用,以及输入噪声强度对入锁时间的影响;理解和体会环路带宽对捕捉带的影响。

### 1. PLL 系统组成原理

锁相环实质上是一个相位反馈控制调节系统,在通信系统中得到广泛应用。基本 PLL 由鉴相器 (PD)、环路滤波器 (LF) 和压控振荡器 (VCO) 三部分构成闭环回路。PD 用于检测环路输入和输出信号之间的相位差,并以误差信号给出; LF 用于提取误差信号中真正反映相位差变化的低频分量; VCO 受控调节振荡频率,随着时间的积累,输出信号相位就发生变化,并且向着减小与输入信号之间相位差的方向调节变化,故相位调节达到环路锁定是需要一定时间的。

PLL 对信号相位的传递具有低通特性,对信号电压的传递具有带通特性,通带可由 LF 参数控制,从而可对伴随限带噪声的单频信号起到带通频率提纯作用。LF 的 3dB 带宽虽然通常不直接等于环路闭环相位传输带宽,但 LF 的 3dB 带宽越宽,环路带宽也越宽,反之亦然,环路带宽直接影响到入锁时间和捕捉带的宽窄。

## 2. 上机操作步骤

在 *SystemView* 系统窗下创建的锁相环仿真系统如图 3-4-1 所示,在锁相环路之前为正弦信号加限带高斯噪声。为了在有限的显示窗口中更清楚地观察仿真结果,本实验中的环路工作频率取得较低。设置系统运行时间: 0—1.5 秒、采样速率为 1000Hz。主要图符块参数设置如下:

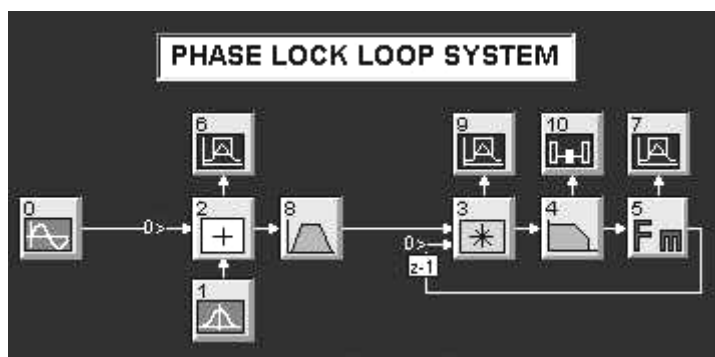


图 3-4-1 锁相环仿真系统

Token0: Sinusoid, Amp=1v, F=50Hz, Phase=0;

Token1: Gauss Noise, Std Dev=0.05v, Mean=0v;

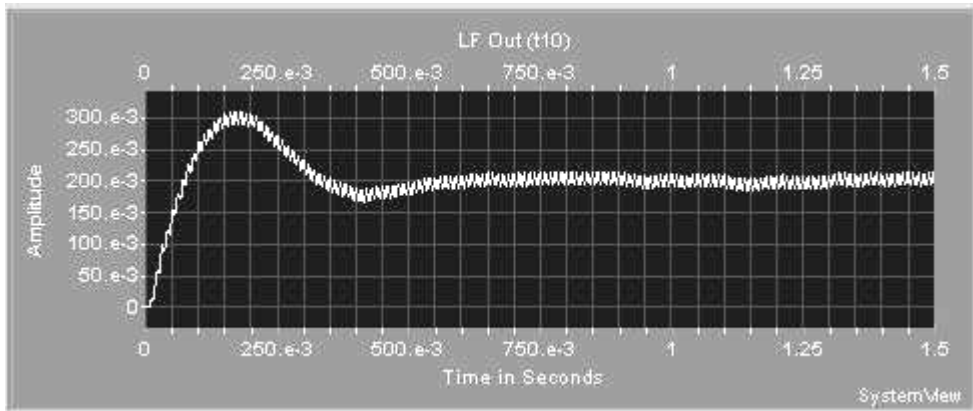
Token8: Linear Sys, Butterworth Bandpass IIR, 5 Poles, Low Fc=10Hz, Hi Fc=90Hz;

Token4: Linear Sys, Butterworth Lowpass IIR, 1 Poles, Fc=2Hz;

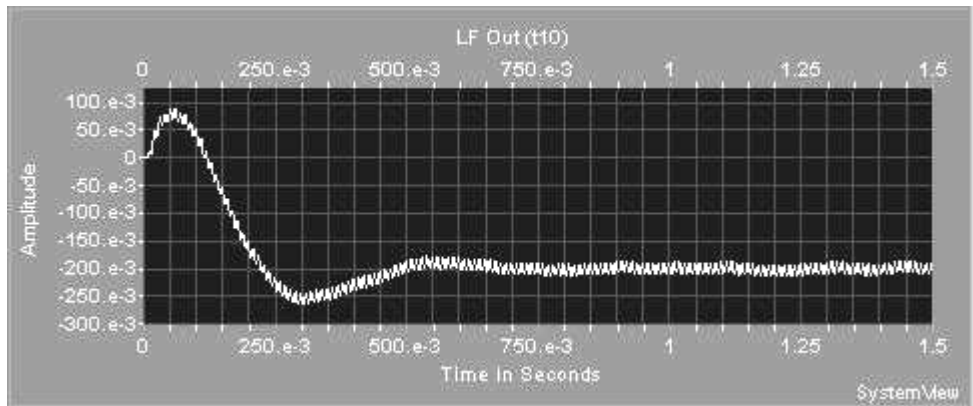
Token5: Ffunction-FM, Amp=1v, F=49Hz, Phase=0, Mod Gain=5H/v。

注意到, Token0 输出频率为 50Hz, VCO 图符块 (Token 5) 起始频率设为 49Hz, 即环路存在 1Hz 的起始频差, VCO 图符块的压控灵敏度为 5H/v, 则抵消掉这 1Hz 的起始频差, 环路滤波器输出电压需上调 0.2v, 如图 3-4-2(a)所示; 若 VCO 起始频率设为 51Hz, 则抵消掉这 1Hz 的起始频差, 环路滤波器输出电压需下调 0.2v, 如图 3-4-2(b)所示, 这种调节所需要的时间即为入锁时间, 两种情况下的入锁时间大致需要 0.8 秒。环路锁定后, 环路滤波器输出已变为直流电压。

锁相环对输入信号的频率提纯作用可由 Token6 和 Token7 组合信号的功率谱表示, 如图 3-4-3 所示, 显然, PLL 输出信号的频率纯度提高了。



(a)



(b)

图 3-4-2 两种情况下的环路滤波器输出瞬态响应

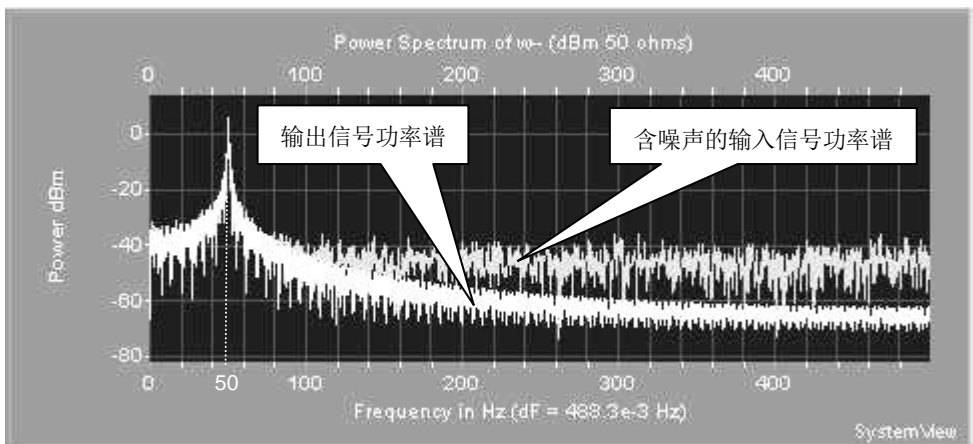


图 3-4-2 环路输入和输出信号的功率谱对比

### 3. 分析内容要求

① 观察环路输入、输出波形，从时域角度看噪声对输入正弦信号的随机调制，以及环路对噪声影响的抑制作用；

② 观察 PD 和 LF 输出波形，体会 LF 在环路中的滤波作用，并粗略估计入锁时间；观察输入和输出组合信号波形，看信号相位和频率的调节过程；

③ 观察输入和输出组合信号波形的功率谱，看环路的频率提纯作用；

④ 观察 PD 输出和 LF 输出组合信号的基带功率谱，其中是否有工作频率的二次谐波分量（100 Hz），为什么会有此频率分量出现；

⑤ 不断改变（包括向上、向下）VCO 的起始频率，建议从 47Hz 变到 53Hz（频率步进为 0.1Hz），如果 LF 输出为连续振荡波形（如正弦波或叶形波），则环路失锁，如经过调节最终可达到直流即为入锁，测出该环路的捕捉带（约 5Hz）；

⑥ 固定 LF 的上限截止频率，改变高斯噪声强度，看入锁时间的改变规律，明确输入信噪比与入锁时间的关系；

⑦ 固定叠加噪声的强度，改变 LF 的截止频率，再观察入锁时间的改变规律，明确 LF 带宽与入锁时间的关系。

#### 4. 实验报告要求

上交实验报告的具体要求由实验指导教师现场规定。

#### 参考文献

- [1] 曹志刚，钱亚生编著，现代通信原理，清华大学出版社，1992。
- [2] 罗伟雄，韩力，原东昌编著，通信原理与电路，北京理工大学出版社，1999。
- [3] 李哲英主编，*SystemView* 动态系统分析与设计软件学习版中文手册，内部资料，1997。
- [4] 陈星，刘斌编写，*SystemView* 通信原理实验指导，北京航空航天大学电子工程系内部讲义，1997。