

高等学校精品课程教材系列



通信原理实验教程

主 编 李时东

副主编 艾 青 李 敏 高 嵩



科学出版社

高等学校精品课程教材系列

通信原理实验教程

主 编 李时东

副主编 艾 青 李 敏 高 嵩

科 学 出 版 社

北 京

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303

内 容 简 介

本书针对通信原理实验教学中的实际需求,采用软、硬件实验相结合的方式加深学生对通信原理基本概念的理解,帮助学生掌握通信系统的基本技术,建立通信系统模型。本书软件仿真与模块化实验相互关联各具很强独立性,自始至终强调系统的思想,通过软件仿真强化学生的直观感受以及对于系统建模和系统分析的理解和掌握,模块化实验则通过单一技术(编码、调制、同步等)的实现,到系统搭建,帮助学生进一步理解通信系统的工作流程,从而加深对通信原理的理解和吸收。本书可作为各高等院校通信专业、电子信息科学与技术专业等开设的“通信原理”课程的配套实验教材或参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

通信原理实验教程/李时东主编. —北京:科学出版社,2015.11

高等学校精品课程教材系列

ISBN 978-7-03-046163-6

I. ①通… II. ①李… III. ①通信原理—实验—高等学校—教材
IV. ①TN911-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 256514 号

责任编辑:张颖兵 闫 陶/责任校对:董艳辉

责任印制:高 嵘/封面设计:苏 波

科 学 出 版 社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

武汉市首壹印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

开本:787×1092 1/16

2015年11月第一版 印张:8 1/2

2015年11月第一次印刷 字数:193 000

定价:25.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

现代社会的显著特征通过其自身的信息化标签得以彰显,通信技术及通信产业的持续高速发展使得人们之间的信息交流方式发生了巨大变化。

通信原理作为介绍现代通信技术基本理论的课程,在通信工程及电子信息科学相关专业中占有重要地位。作为通信原理课程的必要组成部分,通信原理实验对于学生加深基本理论的理解,提高动手能力等方面具有重要作用。传统的实验方法是通过构建实验系统,利用电子测量的方法获取实验数据,但这种方法一方面搭建实验系统的成本比较高,易损性强;另一方面,要求学生具有非常扎实的电子技术方面的知识基础以及电子工艺训练基础。毫无疑问,这种方法对于学生动手能力的培养是最有效的,但随着高校教学计划的调整,学时被压缩,实验效率问题越发突出。在这种背景下,越来越多的教育仪器公司推出了各种各样模块化设计的实验箱,模块化实验箱的好处在于连接简单、调试方便、观测直观,从而使实验效率得以大幅度提高。但由于采用模块化设计,学生通过输入/输出来感知和认识通信系统,原理及其实现被透明化,不利于学生对于实验原理的理解。

本书为配合通信原理教学而编写,通过实验不仅能够加深学生对基本通信理论和方法的理解,而且又能直观地观测实验结果,有效提高学生的动手能力。实验设计采用软件仿真和模块化电路系统实验相结合的方法,其中软件仿真基于 MATLAB 平台,强调对基本理论的理解及其算法实现;模块化系统实验基于 RZ8641 实验箱及其配套实验模块,强调对观测实验结果的分析。

MATLAB 功能强大、绘图方便,同时提供专业的符号计算、文字处理、可视化建模和实时控制等功能,因而被广泛用于科学研究和工程计算领域。MATLAB 在通信系统分析中应用十分方便,尤其是在 Simulink 中,模型建立和系统参数调整简单直观,系统观念体现突出,从而被越来越多地用于通信系统仿真。

本书的特色在于从通信系统的角度来组织实验,将软件和硬件实验相结合。全书分两部分,第一部分为通信系统的 MATLAB 仿真,重点介绍 Simulink 中的通信系统仿真,并结合通信原理的理论基础设计一系列实验,其涵盖了模拟调制解调、A/D 转换、数字基带传输和频带传输、信道编码等内容,最后以一个综合性的设计实验作为总结;第二部分为通信原理实验系统,该部分结合 RZ8641 实验箱设计系列实验,包括信号发生器及接收滤波、信源编译码、数字调制解调、复用、均衡和同步,最后通过双工通信系统实验综合各种技术的应用。无论软件仿真还是硬件平台实验,全书始终强调建立“系统”的思想,希望借此帮助学生从系统的角度分析问题,将零星的知识点融入系统实现中,从而达到融会贯通的目的。因此,在通信原理实验系统中,不纠缠于具体电路的构建,而是侧重于信息在系统中的流程以及形态变化,通过不同观

测点的信号测试判断是否正确,分析原因,调试得到预期结果,这一过程将有助于学生对基本原理的理解和动手能力的培养。

本书由湖北民族学院李时东主编,艾青、刘嵩、李敏、余娅参编,编写过程中,华南理工大学研究生李来伟担任了部分文字录入、绘图和公式编辑工作,在此一并致谢。

由于编写时间仓促,书中疏漏之处难免,恳请广大读者指正。

编者

2015年1月

目 录

1 信源	1
1.1 信号源	1
1.2 信源编译码	8
1.3 信号调制	13
1.4 噪声源	19
2 信道	23
2.1 加性高斯白噪声信道	23
2.2 二值对称信道	24
2.3 多径瑞利退化信道	25
2.4 赖斯退化信道	26
2.5 信道编码	27
3 信宿	39
3.1 接收信号观测	39
3.2 信号解调	44
3.3 均衡器	50
3.4 同步	58
3.5 滤波器	67
4 通信原理 MATLAB 综合实验	76
4.1 模拟调制解调	76
4.2 模拟信号的数字传输	80
4.3 数字信号的基带传输	87
4.4 数字信号的频带传输	92
4.5 信道编译码	100
4.6 直接序列扩频通信系统仿真	105
5 通信原理实验系统	110
5.1 信号发生器及滤波放大接收	110
5.2 模拟信号数字化	113
5.3 数字调制与解调	118
5.4 复用、均衡与同步技术	121
5.5 双工通信综合实验	127

1 信 源

信源作为信息的载体,属于通信系统的起点,其主要功能是产生数据并对数据进行调制,以便适合信道的传输。由信源产生的信号分为模拟信号和数字信号两种,其中数字信号是现代通信的主要信号形式。MATLAB 中都是以数字方式来描述信号的,主要的信源包括随机信号产生器、序列产生器、噪声源。采用 Simulink 自带信号发生器产生这些信源简洁而方便。

1.1 信号发生器

1.1.1 随机信号发生器

1.1.1.1 Bernoulli 二进制信号发生器

Bernoulli 二进制信号发生器产生一个随机的二进制序列,在产生的序列中,0 和 1 的分布满足 Bernoulli 分布。信号中产生 0 的概率为 p ,产生 1 的概率为 $1-p$,即

$$P(x) = \begin{cases} px=0 \\ 1-px=1 \end{cases}$$

Bernoulli 序列的均值为 $1-p$,方差为 $p(1-p)$,Bernoulli 序列的信号输出有多种选择,可以是基于帧的矩阵、基于采样的行或列的向量或基于采样的一维序列。序列的性质可以由 Bernoulli 序列发生器中相应的选项进行控制,如图 1-1 所示。

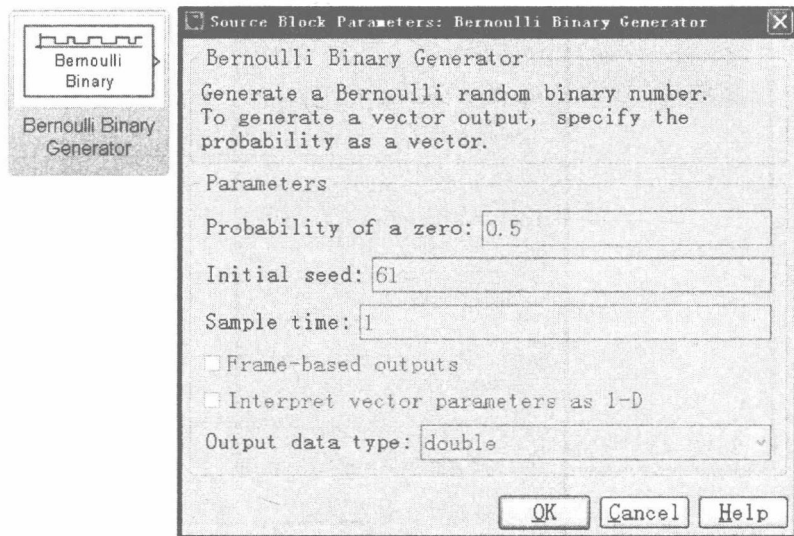


图 1-1 Bernoulli 二进制信号发生器参数设置界面

参数说明

Probability of a zero: Bernoulli 序列中 0 出现的概率, 取 0~1 的实数。

Initial seed: Bernoulli 二进制信号发生器的随机种子数, 不同的随机种子数产生不同的序列, 相同的随机种子数产生相同的二进制序列。

Sample time: 输出序列中每个二进制符号的持续时间。

Frame-based outputs: 指定信号发生器以帧格式产生 Bernoulli 序列, 与“Interpret vector parameters as 1-D”复选框不可同时选定。

Interpret vector parameters as 1-D: 指定信号发生器产生一维序列, 否则输出二维序列, 与“Frame-based outputs”复选框不可同时选定。

Output data type: 输出数据类型, 默认值为 double, 也可以是 int, uint, single, boolean 等其他类型。

1.1.1.2 Poisson 分布整数发生器

Poisson 分布整数发生器产生服从 Poisson 分布的随机整数。假定 x 是服从 Poisson 分布的随机变量, 则 $x=k$ 的概率为

$$P(k) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!}, \quad k=0, 1, 2, \dots$$

式中, k 为非负整数; λ 为正数, 称为 Poisson 参数, Poisson 过程的均值和方差均为 λ 。

Poisson 序列的信号输出有多种选择, 可以是基于帧的矩阵、基于采样的行或列的向量, 也可以是或基于采样的一维序列。Poisson 分布整数发生器可用于在双传输通道中产生噪声, λ 值通常远小于 1。序列的性质可以由 Poisson 序列发生器中相应的选项进行控制, 如图 1-2 所示。

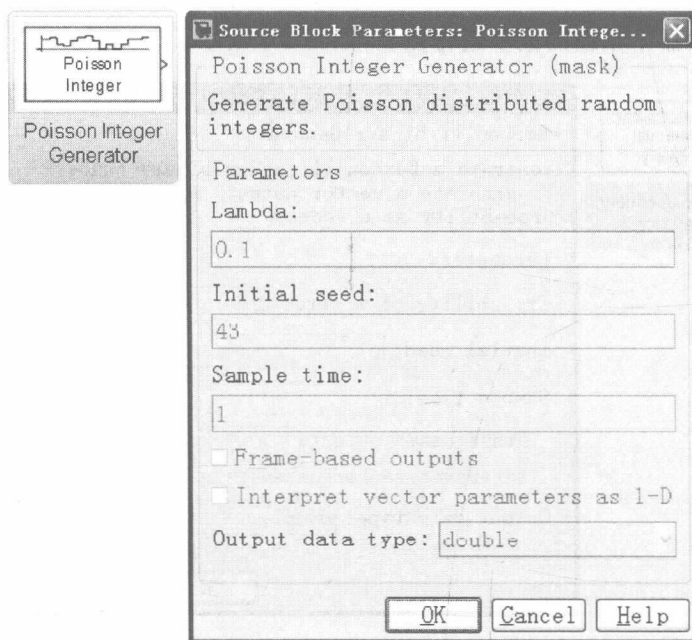


图 1-2 Poisson 分布整数发生器参数设置界面

参数说明

Lambda: Poisson 参数, 当输入标量时, 输出矢量的每一个元素共享 λ 值。

Initial seed: Poisson 整数发生器的随机种子数, 不同的随机种子数产生不同的序列, 相同的随机种子数产生相同的二进制序列。

Sample time: 输出序列中每个整数的持续时间。

Frame-based outputs: 指定信号发生器以帧格式产生输出序列, 在“Interpret vector parameters as 1-D”复选框未被选定时有效。

Interpret vector parameters as 1-D: 指定信号发生器产生一维序列, 否则输出二维序列, 与“Frame-based outputs”复选框不可同时选定。

Output data type: 输出数据类型, 默认值为 double, 也可以是 int, uint, single, boolean 等其他类型。

1.1.1.3 随机整数发生器

产生 $[0, M-1]$ 区间的均匀分布的随机整数, M 的大小可自行设定, 如果 M 设为标量, 则输出均匀分布且互不相关的随机变量; 如果 M 设为矢量, 其长度必须和“Initial seed”的长度一致, 每一个输出将对应于一个独立的输出范围。

随机整数序列输出可以是基于帧的矩阵、基于采样的行或列的向量或基于采样的一维序列。输出序列的控制选项如图 1-3 所示。

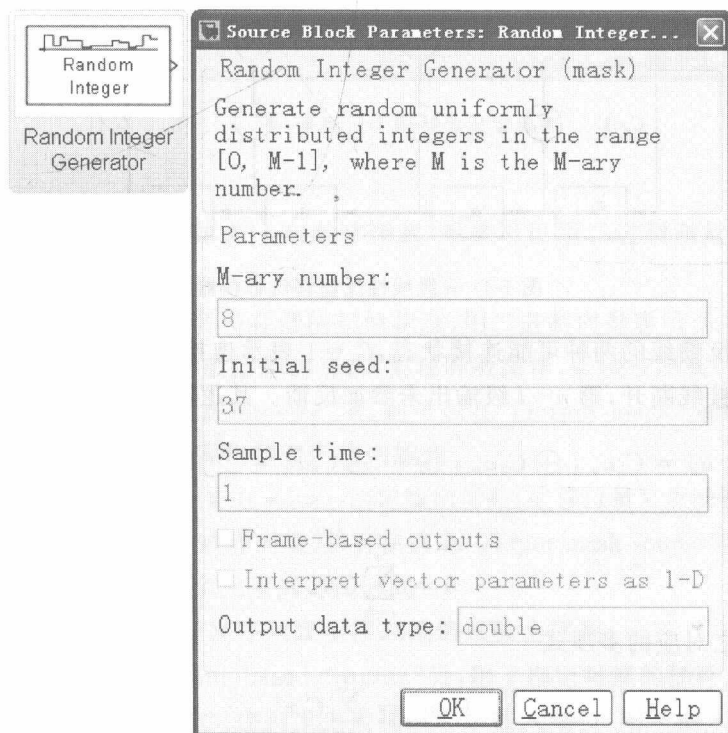


图 1-3 随机整数发生器参数设置界面

参数说明

M-ary number: 输入正整数或者正整数矢量, 设置随机整数的取值范围。如果设定参数

为 M , 则随机整数取值位于 $[0, M-1]$ 。

Initial seed: 随机整数发生器的随机种子数, 不同的随机种子数产生不同的序列, 相同的随机种子数产生相同的二进制序列。

Sample time: 输出序列中每个整数持续的时间。

Frame-based outputs: 指定信号发生器以帧格式产生随机整数, 与“Interpret vector parameters as 1-D”复选框不可同时选定。

Interpret vector parameters as 1-D: 指定信号发生器产生一维序列, 否则输出二维序列, 与“Frame-based outputs”复选框不可同时选定。

Output data type: 输出数据类型, 默认值为 double, 也可以是 int, uint, single, boolean 等其他类型。如果要求输出为 boolean, 则 M-ary number 必设为 2。

1.1.2 序列发生器

MATLAB 提供了若干种序列发生器, 用于产生具有某种特性的二进制序列, 如产生具有独特的自相关属性或互相关属性序列。

1.1.2.1 PN 序列发生器

PN 序列发生器产生一个伪随机序列, 被广泛用于 CDMA2000 中。PN 序列通过线性反馈移位寄存器实现, 原理如图 1-4 所示。

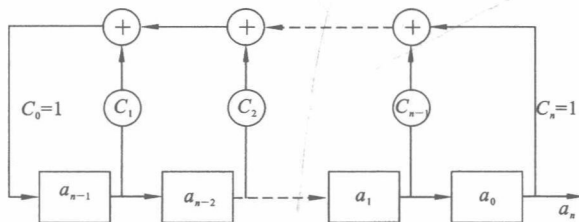


图 1-4 n 级线性反馈移位寄存器

图中 C_i 表示反馈线的两种可能连接状态, $C_i=1$ 表示连接线通, 第 $n-i$ 级输出加入反馈中; $C_i=0$ 表示连接线断开, 第 $n-i$ 级输出未参加反馈。其逻辑表达式为

$$a_n = C_1 a_{n-1} \oplus C_2 a_{n-2} \oplus \cdots \oplus C_n a_0 = \sum_{i=1}^n C_i a_{n-i} \pmod{2} \quad (1-3)$$

变形为

$$0 = \sum_{i=0}^n C_i a_{n-i} \quad (1-4)$$

定义一个与之对应的多项式

$$F(x) = \sum_{i=0}^n C_i x^i \quad (1-5)$$

式(1-5)称为线性反馈移位寄存器的特征多项式, 其中 x 表示元素所在的位置。

PN 序列发生器产生的多项式存在两种表达方式: 采用二进制向量形式或者把生成多项式中 C_i 不为 0 的下标组成一个向量。例如, 多项式 $p(k)=k^5+k+1$ 既可以表示为 $[1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1]$ 的形式, 也可以表示为 $[5\ 1\ 0]$ 的形式。

PN 序列发生器参数设置界面如图 1-5 所示。

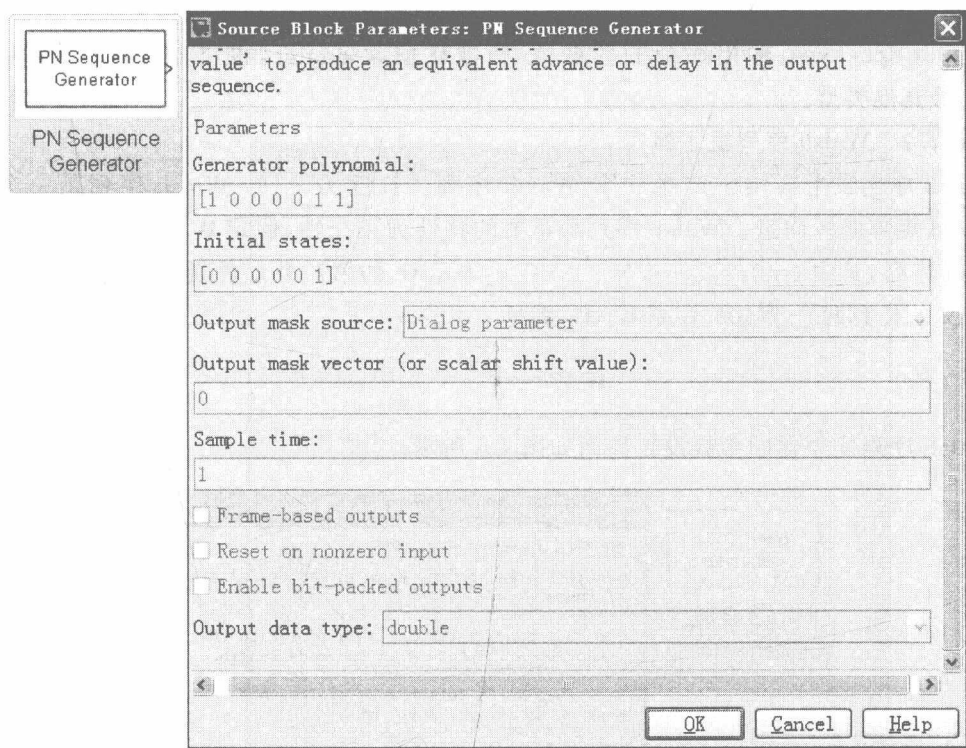


图 1-5 PN 序列发生器参数设置界面

参数说明

Generator polynomial: 产生如式(1-5)的多项式,系数可以用二进制向量或者下标构成的整数向量表示。

Initial states: 序列产生器中各寄存器的初始状态,用二进制向量表示。

Output mask source: 输出屏蔽信息的方式,实现屏蔽操作,必须按照式(1-5)构造多项式。在此下拉列表框中,选定“Dialog parameter”项,则可以在“Output mask vector”项中输入;如果选择“Input port”项,则需要在弹出的对话框中输入。

Output mask vector (or scalar shift value): 给定输出屏蔽(或移位量),反映输出 PN 序列相对于初始时刻的延迟,可以输入整数或者向量,只有在选定“Output mask source”项时有效。

Sample time: 输出序列中每个元素的持续时间。

Frame-based outputs: 指定 PN 序列发生器以帧格式输出序列。

Sample per frame: 选定“Frame-based outputs”后,用于指定每帧的抽样点数目。

Reset on nonzero input: 为 PN 序列发生器提供一个输入端口,用于输入复位信号。如果输入不为 0,PN 序列发生器将各寄存器恢复到初始状态。

Enable bit-packed outputs: 用于激活“Number of packed bits”和“Interpret bit-packed values as signed”。

Number of packed bits: 设定输入位数为 1~32。

Interpret bit-packed values as signed:有/无符号整数判断项,该项被选中的情况下,最高位为1表示为负。

Output data type:输出序列的数据类型,默认值为 double,也可以是 int, uint, single, boolean 等其他类型。

1.1.2.2 Walsh 序列发生器

Walsh 序列发生器用于产生一个 Walsh 序列。长度为 N 的 Walsh 序列是一个 N 阶 Hadamard 矩阵的行向量。Walsh 序列最重要的特性为正交性,假定 W_i 表示第 i 个长度为 N 的 Walsh 序列,其中 $i=0,1,2,\dots,N-1$, $W_i[k]$ 表示 W_i 的第 k 个元素,对于任意 i , $W_i[0]=0$, 长度为 N 的任意两个 Walsh 序列 W_i, W_j 满足

$$W_i W_j^T = \begin{cases} N, & i=j \\ 0, & i \neq j \end{cases} \quad (1-6)$$

Walsh 序列发生器的参数设置界面如图 1-6 所示。

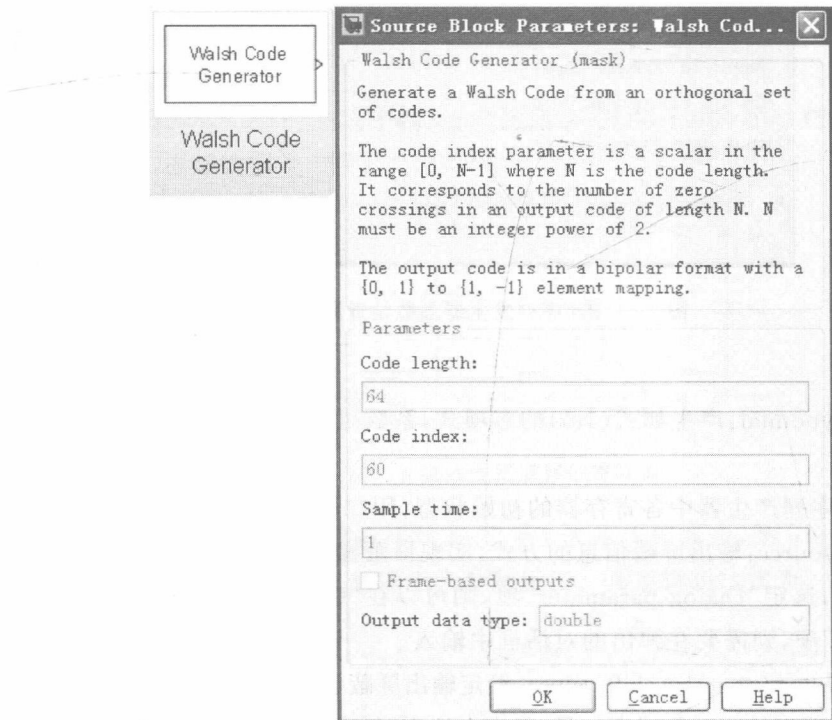


图 1-6 Walsh 序列发生器参数设置界面

参数说明

Code length:设定输出序列的长度为 N , N 为 2 的整数幂,即 $N=2^m, m=0,1,2,\dots$ 。

Code index: Walsh 序列的序号,表示序列中过零点的数目,取 $[0, N-1]$ 内的整数。

Sample time:输出序列中元素的持续时间。

Frame-based outputs:指定 Walsh 序列发生器以帧格式输出序列。

Output data type:输出序列的数据类型,默认值为 double。

1.1.2.3 Gold 序列发生器

Gold 序列发生器根据两个等长度的序列(称为优选对)产生 Gold 序列,是对两个 PN 序列发生器产生的优选对序列进行异或运算所得的结果。该序列发生器的参数设置界面如图 1-7 所示。

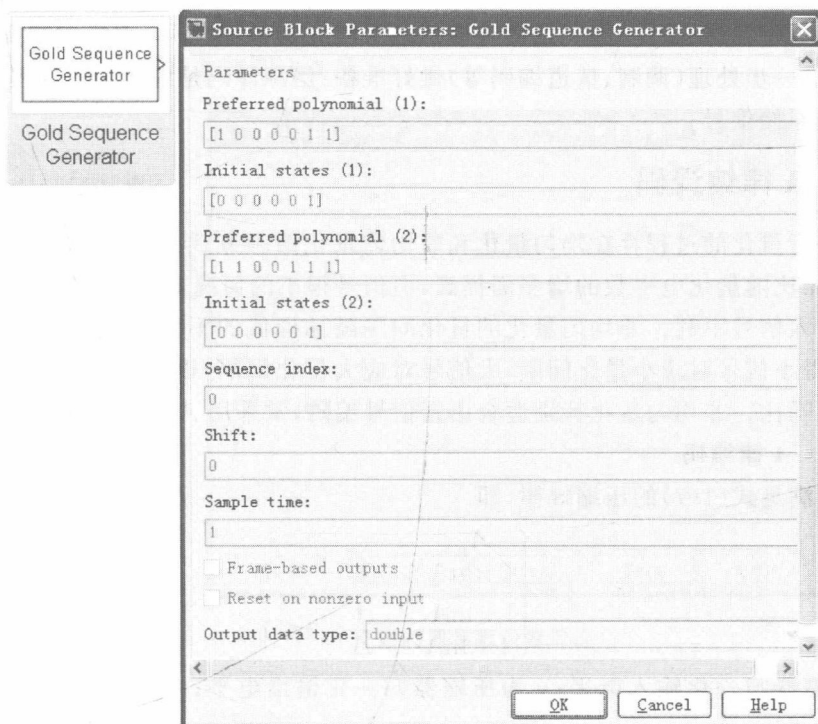


图 1-7 Gold 序列发生器的参数设置界面

参数说明

Preferred polynomial(1): 优选对中第一个序列的生成多项式。

Initial states(1): 优选对中第一个序列的初始状态,是一个二进制向量,表示对应于第一个序列的 PN 序列发生器的寄存器初始状态。

Preferred polynomial(2): 优选对中第二个序列的生成多项式。

Initial states(2): 优选对中第二个序列的初始状态。

Sequence index: 用于限定 Gold 序列的输出范围为 $[-2, -1, 0, 1, 2, \dots, 2^n - 2]$ 。

Shift: 指定 Gold 序列发生器输出的时延,取整数。

Sample time: 输出序列中元素的持续时间。

Frame-based outputs: 指定 Gold 序列产生器以帧格式输出序列。

Reset on nonzero input: 为 PN 序列发生器提供一个输入端口,用于输入复位信号。如果输入不为 0,则 Gold 序列发生器将各寄存器恢复到初始状态。

Output data type: 输出序列的数据类型,默认值为 double,可以是 boolean, int, unsigned, smallest 等类型。

除上述三种序列发生器外, MATLAB 中的序列发生器还有 Barker 序列发生器、

Hadamard 序列发生器、Kasami 序列发生器和 OVFSF 序列发生器,具体性质和参数设置可参阅 MATLAB 文档。

1.2 信源编译码

信源编码通过抽样、量化、编码过程将模拟信号转化为数字信号,它能够减少数据的冗余度,为数据的进一步处理(调制、信道编码等)做好准备;信源译码是编码的逆过程,它从信源编码信号中恢复原始信号。

1.2.1 A 律编译码

对信号进行量化的过程存在均匀量化和非均匀量化两种方式,均匀量化采用相同的量化间隔,量化信噪比随量化电平数的增多而提高,但信号很小的情况下,信号的量化信噪比很低,因此对于小输入信号不利。非均匀量化的量化间隔随抽样值的不同而改变,采用对抽样值压缩的方式,使得小信号对应小量化间隔,大信号对应大量化间隔,以保证小信号时同样获得足够大的量化信噪比。非均匀量化特别适合语音信号编码,常采用 A 律和 μ 律压缩编码。

1.2.1.1 A 律编码

A 律压缩满足式(1-7)的压缩规律,即

$$y = \begin{cases} \frac{A_x}{1 + \ln A}, & 0 < x \leq \frac{1}{A} \\ \frac{1 + \ln A_x}{1 + \ln A}, & \frac{1}{A} \leq x \leq 1 \end{cases} \quad (1-7)$$

式中, x 为压缩器归一化输入电平; y 为压缩器归一化输出电平; A 为压缩常数,决定压缩程度,实际中 $A=87.6$ 。

A 律压缩编码器参数设置界面如图 1-8 所示。

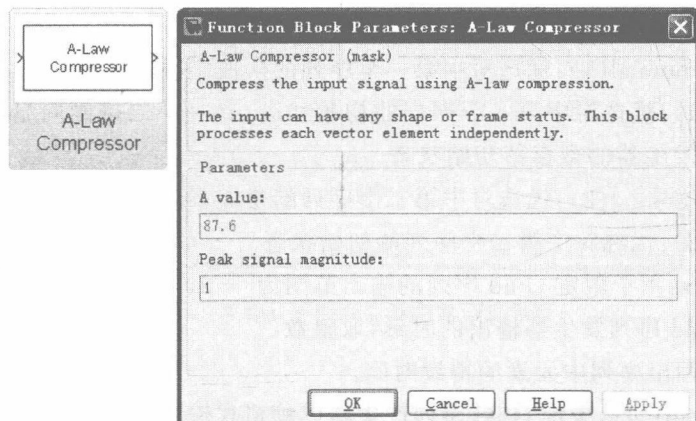


图 1-8 A 律压缩编码器参数设置界面

参数说明

A value: 指定压缩参数,实际中取 87.6。

Peak signal magnitude: 设定输入信号的幅度。

1.2.1.2 A 律译码

A 律译码用来恢复被 A 律压缩的信号,解压规律为

$$x = \begin{cases} \frac{1 + \ln A}{A} y, & 0 < y \leq \frac{1}{1 + \ln A} \\ \frac{1}{A} \exp((1 + \ln A)y - 1), & \frac{1}{1 + \ln A} \leq y \leq 1 \end{cases} \quad (1-8)$$

A 律译码器参数设置界面如图 1-9 所示。

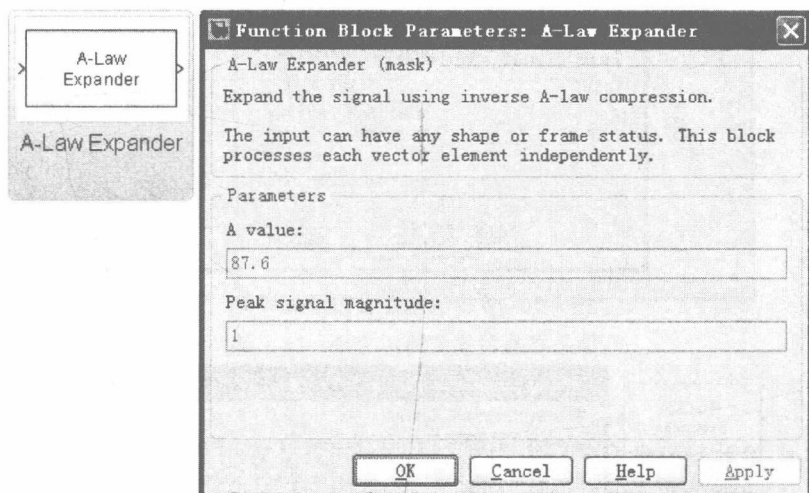


图 1-9 A 律译码器参数设置界面

参数说明

A value: 指定压缩参数,实际中取 87.6。

Peak signal magnitude: 设定输入信号的幅度。

1.2.2 μ 律编译码

1.2.2.1 μ 律压缩编码

μ 律压缩规律满足式(1-9)

$$y = \frac{\ln(1 + \mu x)}{\ln(1 + \mu)} \quad (1-9)$$

式中, μ 为压缩参数,实际中 $\mu = 255$; x 为输入信号的归一化值。

μ 律压缩器参数设置界面如图 1-10 所示。

参数说明

mu value: 指定压缩参数,实际中取 255。

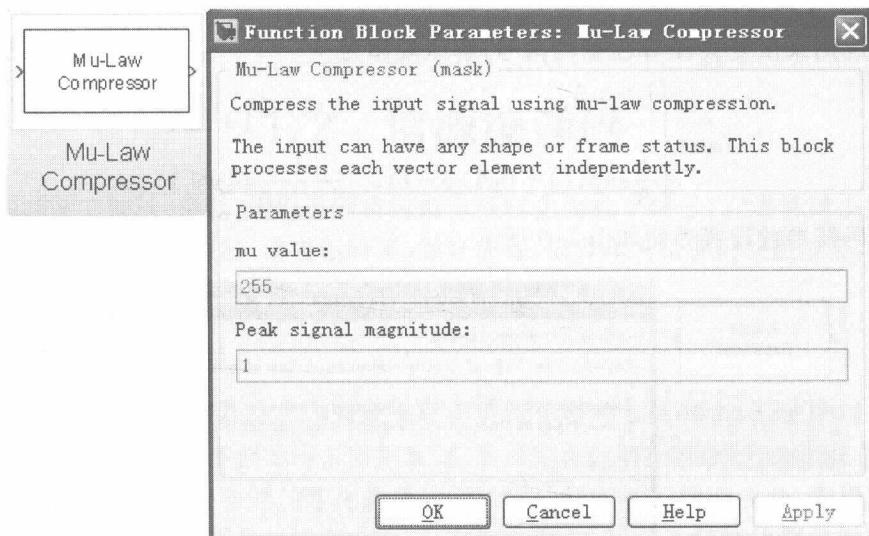
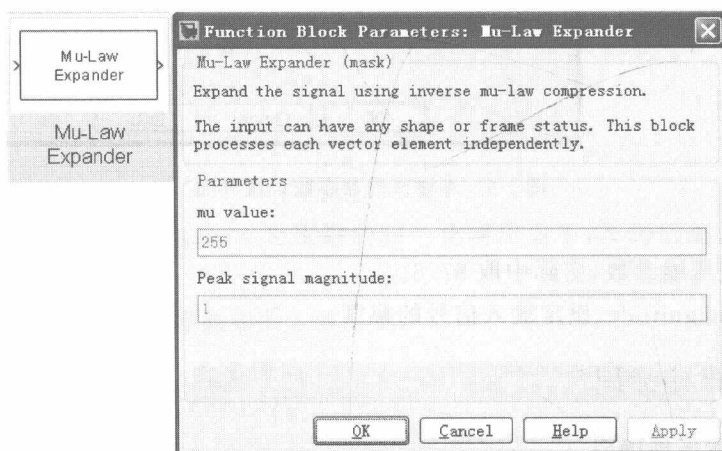
Peak signal magnitude: 设定输入信号的幅度。

1.2.2.2 μ 律压缩译码

μ 律压缩译码用于恢复被 μ 律压缩器编码的信号,其解压规律为

$$x = \frac{1}{\mu} (\exp(y \cdot \ln(1 + \mu)) - 1)$$

μ 律译码器参数设置界面如图 1-11 所示。

图 1-10 μ 律压缩器参数设置界面图 1-11 μ 律译码器参数设置界面

参数说明

mu value: 指定压缩参数, 实际中取 255。

Peak signal magnitude: 设定输入信号的幅度。

1.2.3 量化编译码

1.2.3.1 量化编码器

量化编码器采用标量量化方法对输入信号进行量化, 它根据量化间隔和量化码本对信号进行数字化处理, 信号输入可以是标量或者矩阵, 其输出包括量化指标、编码信息、量化电平和量化均方误差。

量化编码器参数设置界面如图 1-12 所示。

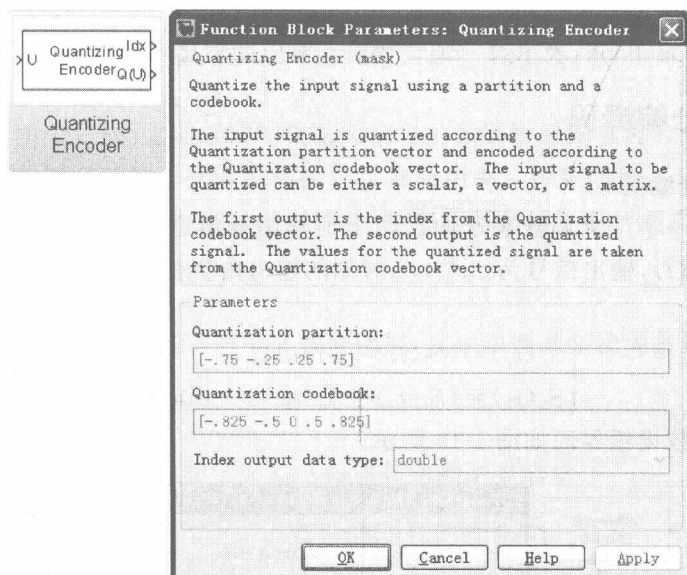


图 1-12 量化编码器参数设置界面

参数说明

Quantization partition: 指定量化区间, 是一个严格按照升序排列的长度为 n 的向量。

Quantization codebook: 表示量化区间的量化值, 为长度为 $n+1$ 的向量。

1.2.3.2 量化译码器

量化译码器通过输入信号的量化区间号恢复原始信息, 其输入/输出的信号长度相同, 如果用向量输入, 则向量的所有分量将被单独处理。量化译码器参数设置界面如图 1-13 所示。

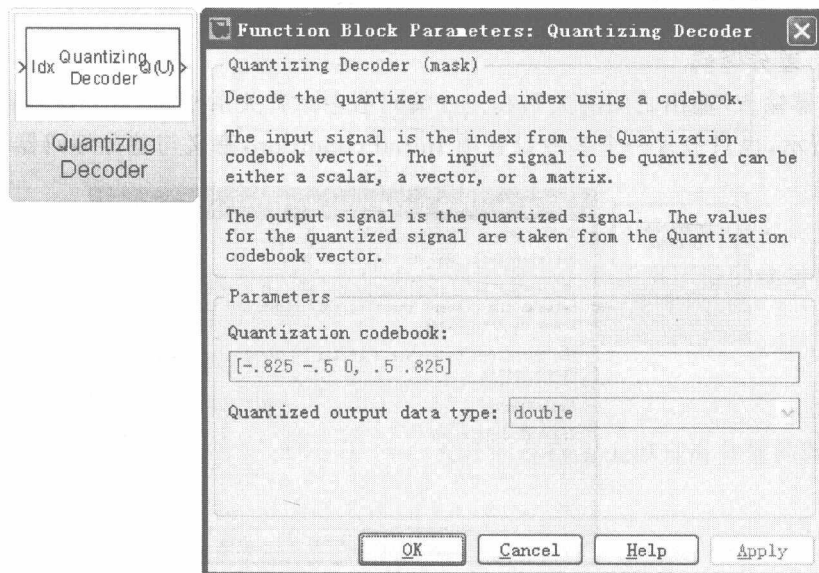


图 1-13 量化译码器参数设置界面