

3. 实验[3] 均匀量化与非均匀量化

3.1 实验目的

熟练掌握模拟信号数字化中量化与编码过程的基本原理和数学表达。

通过实验加深对量化与编码过程及性能特点的认识和理解。

通过实验探究非均匀量化技术的特点和应用场景。

3.2 实验主要器材和设备

电脑, LabVIEW 程序开发和应用环境。

本实验中建议（但非强制）使用的部分函数 VI 及调用路径：

数学-初等与特殊函数-指数函数-底数为 10 的对数

编程-比较-选择

3.3 实验原理

3.3.1 量化与编码

在对信源模拟信号做数字化处理的步骤中, 量化与编码都是关键环节, 在工程上总是相伴执行。

量化, 或称幅度量化, 是对取样得到的信号幅度瞬时值(连续值)用有限个预置电平(离散值)近似表示的过程。通常, 是从这些预置电平中选取一个最接近的, 来表示取样值。这种近似表示, 必然产生误差, 称为量化误差。它会像噪声一样对信号产生影响, 所以也被叫作量化噪声。

预置的这些量化电平, 彼此相邻的电平之差, 如果被设计成相等, 称为均匀量化; 如果设计成按某种规律变化, 称为非均匀量化。具体采用哪种量化方式, 通常与工程应用场合有关。

此处的编码, 属于信源编码概念, 是用数字信号表示量化电平的过程。由于常规使用二进制数字信号, 所以预置的量化电平数量(量化级)通常会取成 2^L , 即用一个 L 位的二进制代码恰好唯一对应表示一个量化电平, 反之亦然。

3.3.2 均匀量化举例

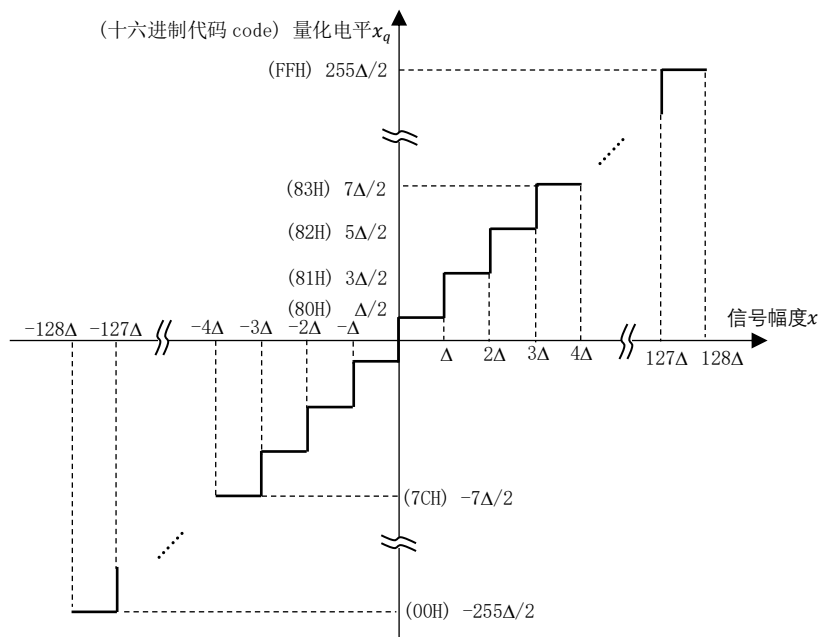


图 3-1 一种 256 级均匀量化及对应的 8 位二进制编码方案

图 3-1 展示的例子，有 256 个量化级，量化间隔或说量化阶恒等于 Δ ，是一种均匀量化。量化电平区间正负对称，由于没有零值量化电平，根据量化关系曲线在原点附近的形状，可被称为“中升”形态。图中纵轴同时标注了用十六进制（8 位二进制）编码表示各个量化电平的情况。

对应的数学表达可以写作

$$code = \begin{cases} \left[\frac{x+128\Delta}{\Delta} \right] & \text{if } -128\Delta \leq x < 128\Delta \\ FFH & \text{if } x \geq 128\Delta \\ 00H & \text{if } x < -128\Delta \end{cases} \quad (\text{式 3-1})$$

式中， $[*]$ 表示取不大于*的最大整数，且用十六进制表示。而信号幅度 x 的正常动态变化范围在 $[-128\Delta, +128\Delta)$ 。

3.3.3 ADC 及其前置信号调理

从前文例子中可见，量化阶 Δ 的取值大小应与模拟信号幅度的动态变化范围相适应。然而在工程实际中，“取样-量化-编码”一般由 ADC（模数转换）芯片或内置于嵌入式微处理器芯片内部的 ADC 单元完成。其量化阶 Δ 由片内或片外的所谓基准参考电压 V_{ref} 设定，不能随意改变。

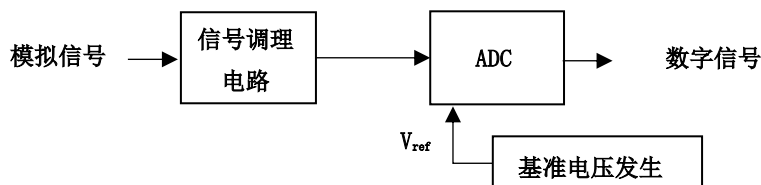


图 3-2 ADC 及前置的信号调理电路

因此，前置的信号调理电路被用来对信号幅度做线性变换，有时只做尺度变换，有时还要包含直流偏置电平的调整。如图 3-2，通过信号调理，将模拟信号调整到与量化编码特性相适应的状态。

尽管式 3-1 在数学形式上给出了模拟信号超过 ADC 正常转换范围时的编码规则，但实际上，输入 ADC 的模拟电压如果出界过多，很可能对芯片造成损害，应尽量避免。

3.3.4 非均匀量化

非均匀量化是指量化阶可变的量化。一般而言，让大幅度信号对应较大的量化阶，小幅度信号对应较小的量化阶，可以提高小幅度信号的量化信噪比，也使得量化信噪比的总体统计平均值有所提高。

此处，以 A87.6/13 折线压缩律和折叠二进码的组合方案，作为非均匀量化编码的举例。这是通信话音信号数字化中一种被广泛应用的量化编码方案。每个样本的量化值用 8 位二进制码表示。8 位码字由极性码、段落码、段内码三部分组成，如表 3-1 所示。

表 3-1 8 位码字结构

代号	P	C	S
名称	极性码	段落码	段内码
比特位	b_7	$b_6b_5b_4$	$b_3b_2b_1b_0$
取值范围 (十进制表示)	0, 1	0, 1, 2, ..., 7	0, 1, 2, ..., 15

公式 3-2 是关于此方案的数学表示，

$$V = \begin{cases} (-1)^{P+1} \frac{2^{C+1}}{128} \cdot \frac{0.5+S}{32} \cdot V_{ref} & \text{if } C = 0 \\ (-1)^{P+1} \frac{2^C}{128} \cdot \frac{16.5+S}{32} \cdot V_{ref} & \text{if } C \neq 0 \end{cases} \quad (\text{式 3-2})$$

上式对应的模拟信号正常动态变化范围为 $[-V_{ref}, +V_{ref}]$ 。严格来讲，式 3-2 给出的是方案对应的数模转换（DAC）特性，但只要稍加变通，就可以按其设计出量化编码（ADC）的算法步骤。

3.4 实验内容与要求

本实验设计四项任务，前后任务之间存在递进关系，或构成对比实验。实验任务 3_1 对单个取样值开展均匀量化编解码；在其基础上，任务 3_2 对连续信号离散化形成的取样值序列（近似看作模拟量），做均匀量化编解码及其特性研究。实验任务 3_3 和 3_4 要求对相同信号做非均匀量化编解码，与前两项实验的结果作对比分析。

3.4.1 实验任务 3_1

请根据式 3-1 和图 3-1 所描述的均匀量化方案特性，设计相应的模数转换、数模转换虚拟仿真实验系统，逻辑框图如图 3-3 所示。合理设计系统前面板。

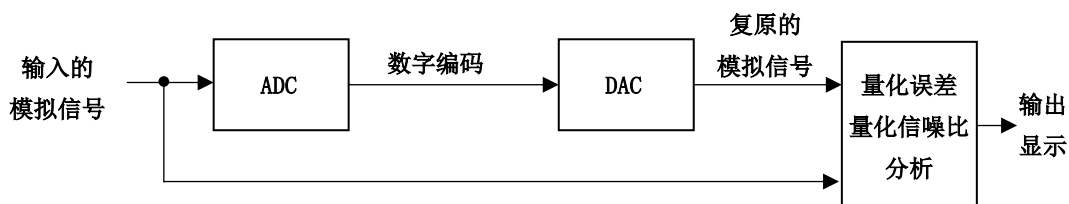


图 3-3 模数转换-数模转换实验系统

量化阶 Δ 取 0.02V。输入模拟信号（取样值）至少应包括表 3-2 所列的几种情况，完成以下工作：

- (1) 模拟信号经 ADC 获得对应的数字编码；
- (2) 再经 DAC 复原输出模拟信号；
- (3) 计算（单取样值）对应的量化误差；
- (4) 填写表 3-2 对应部分，分析实验结果，将有关内容编写入实验报告。

表 3-2 实验记录表

输入的模拟信号取样值 (V)	均匀量化实验			非均匀量化实验		
	数字编码	复原的模拟信号 (V)	量化误差 (V)	数字编码	复原的模拟信号 (V)	量化误差 (V)
0.075						
0.130						
0.131						
1.239						
2.510						
-2.540						
-2.700						

3.4.2 实验任务 3_2

任务 3_1 中，实验系统输入为单个取样值。请适当改造，使之可以输入连续的模拟信号。量化阶 Δ 取 0.02V。

输入模拟信号

$$x(t) = A \cos 2\pi f t \quad (\text{式 3-3})$$

取 $f = 100\text{Hz}$ 。仿真过采样率建议取 1000，即 $f_s = 1000f$ 。 f_s 兼做 ADC、DAC 系统的采样率。完成以下工作：

- (1) 取 $A = 2.5\text{V}$ ，在前面板以合适的方式对比展示一个周期的输入模拟信号波形、复原的模拟信号波形、量化噪声波形；统计计算量化信噪比，并与理论值（若理论教材中给出的

话) 相对照。

- (2) 取 $A = 0.64V$ ，重复 (1) 的工作。
- (3) 取 $A = 0.1V$ ，重复 (1) 的工作。
- (4) 取 $A = 3.0V$ ，重复 (1) 的工作，如果波形失真则无需讨论量化信噪比。

3.4.3 实验任务 3_3

将实验任务 3_1 的实验系统中，模数转换、数模转换的特性改为式 3-2 所描述的非均匀量化方案。

取 $V_{ref} = 2.56V$ ，仿照任务 3_1 的做法，填写表 3-2 对应部分。

3.4.4 实验任务 3_4

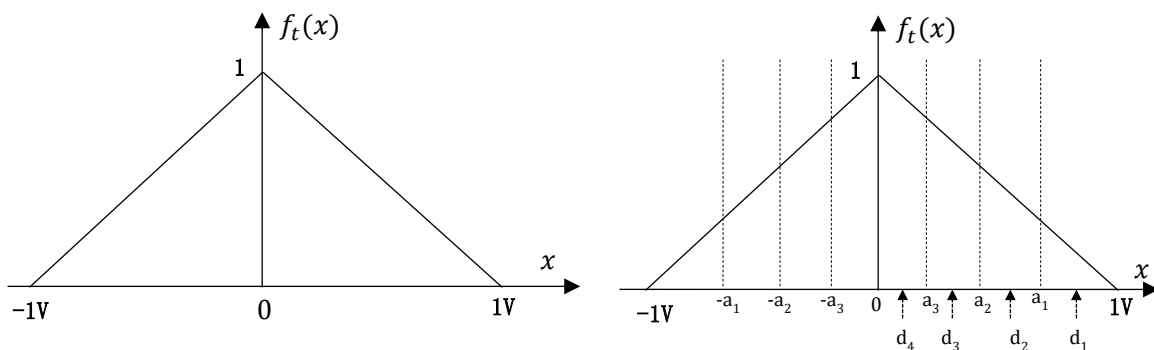
如实验任务 3_2 相对于任务 3_1，改造任务 3_3 的系统，使之可以输入连续的模拟信号。取 $V_{ref} = 2.56V$ 。

仿照任务 3_2，输入频率 100Hz 的模拟正弦信号，用实验系统完成与任务 3_2 类似的各项任务。建议将任务 3_2 和 3_4 的系统和前面板加以整合，使两项任务的实验数据可视化（波形显示）结果形成更直观的对照效果。

3.5 拓展探究

请学有余力的学习者考虑。图 3-4 (1) 展示的某个模拟信号的概率密度分布特性。若要对该信号进行量化，并使用 3 位二进制编码，请尝试设计非均匀量化方案，使量化信噪比尽量高。

关于方案的示意图 3-4 (2)。3 位编码对应 8 个量化区间及电平。由于问题的对称性，可用 1 位作为正负符号位，信号正侧和负侧量化方案对称。因此只要研究一侧（比如正侧）的 4 个区间如何划分，即确定图中 a_1 、 a_2 、 a_3 的具体位置，以及量化电平 d_1 、 d_2 、 d_3 、 d_4 的选取方法。



(1) 某模拟信号幅度的概率密度分布

(2) 3 位量化编码方案示意

图 3-4 非均匀量化问题探究

3.5.1 关于量化电平的补充约束条件

量化电平在量化区间内的位置，可以有两种考虑方式：

- (1) 取量化区间中点电平；
- 或 (2) 取其他合适的位点电平（比如参照 Lloyd-Max 定理）。

为保证工作质量和完成度，每位学习者限选上述一种，展开探究。

3.5.2 公式解析解和近似数值解

尽量争取获得问题的解析解，在此基础上得到数值答案。若难以做到，则也可直接求取近似数值解。

答案数值请统一以 $\{d_4, a_3, d_3, a_2, d_2, a_1, d_1\}$ 的顺序数列形式最终示出，方便评阅和批改。

3.5.3 高阶推广

可以进一步探讨，你的方法是否能较为方便地推广应用到更高阶的情况。比如本题中采用 8 位二进制编码(量化区间达到 256 级)。答案数值呈现顺序 $\{d_8, a_7, d_7, a_6, d_6, a_5, d_5, a_4, d_4, a_3, d_3, a_2, d_2, a_1, d_1\}$ 。

3.5.4 求解工具

对探究实验所使用方法及其辅助工具不做限定。可以人工计算推导，使用 LabVIEW 或其他工具软件，或灵活组合使用各种方法手段。

3.6 实验报告要求

根据自己的实验结果记录，编写实验报告。课程提供实验报告模板作为参考。其中标题等组织结构，学习者根据实际情况灵活调整。英文教学班报告写作的语种要求，由理论课教师规定。

3.7 考评重点

本实验的考评重点如下：

- (1) 实验各项结果，含波形图示、量化结果、分析结论等；
- (2) 定量求解问题所使用方法的数学表达和编程要点，比如按式 3-2 设计的量化编码(ADC)算法的具体步骤；
- (3) 比较本实验中均匀量化和非均匀量化的性能特点，定性分析后者的主要应用场合；
- (4) 人机界面设计的合理性、独到性；
- (5) 拓展探究工作的完成度。

考评时预留约 8% 的评分空间(包括但不限于对拓展探究的评价)，用于奖励个性化强、别具匠心的设计。

(袁焱 杨晓 李安琪编写 2023 年 10 月 16 日)