

2. 实验[2] 频率调制与解调

2.1 实验目的

熟练掌握频率调制的基本原理和数学表达。
通过实验加深对调频信号频域特性的认识和理解。
建立关于数字调制的初步认知。

2.2 实验主要器材和设备

电脑，LabVIEW 程序开发和应用环境。

2.3 实验原理

2.3.1 频率调制

频率调制是角度调制的一种类型，它的特点是已调信号的瞬时（角）频率随调制信号（基带信号）呈线性变化。

若将载波信号表达为

$$y(t) = A_c \cos 2\pi f_c t \quad (\text{式 2-1})$$

则已调信号可表达为

$$x_c(t) = A_c \cos(2\pi f_c t + k_f \int_0^t x(\tau) d\tau) \quad (\text{式 2-2})$$

其中 $x(t)$ 为调制信号， k_f 称为频偏常数。

在本实验中，请使用 LabVIEW 程序设计语言编程构建虚拟仿真实验系统。在调制端，该实验系统的原理框图如图 2-1。为了使实验结果及其呈现更接近现实，设计了加性高斯白噪声 $n(t)$ 。带噪声项的已调信号

$$z_c(t) = x_c(t) + n_c(t) \quad (\text{式 2-3})$$

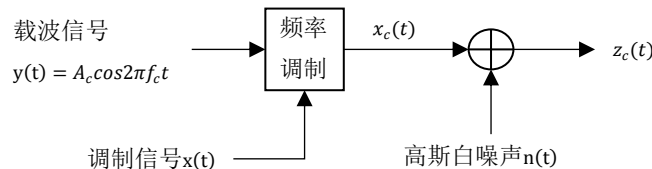


图 2-1 频率调制端原理框图

2.3.2 调频信号的解调

本实验中，请采用图 2 所示简易原理系统完成对调频信号的解调。

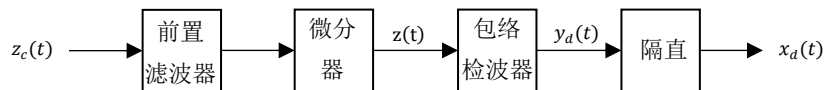


图 2-2 调频信号解调

前置滤波器负责阻拦大部分带外噪声进入接收机（解调器）。接收信号经微分器（求导）得到

$$z(t) \approx -A_c(2\pi f_c + k_f x(t)) \sin(2\pi f_c t + k_f \int_0^t x(\tau) d\tau) \quad (\text{式 2-4})$$

经包络检波，获得其包络信号

$$y_d(t) \approx A_c(2\pi f_c + k_f x(t)) \quad (\text{式 2-5})$$

去除直流成分后，复原得到基带信号

$$x_d(t) \approx A_c k_f x(t) \quad (\text{式 2-6})$$

以上公式中均采用约等号，是考虑到实际有噪声项的存在。

在物理电路中，包络检波常常使用形似图 2-3 的功能电路实现。在本次虚拟仿真实验中，建议使用以下数学运算来做简易模拟。

对式 2-4 做希尔伯特（Hilbert）变换，得到

$$H[z(t)] \approx -A_c(2\pi f_c + k_f x(t)) \cos(2\pi f_c t + k_f \int_0^t x(\tau) d\tau) \quad (\text{式 2-7})$$

不妨将式 2-4 和式 2-7 分别看作同一复数信号的虚部和实部，取该复数信号的幅值，即可得式 2-5。

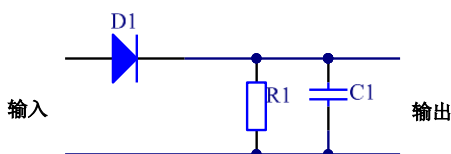


图 2-3 包络检波电路

2.3.3 时间连续信号的离散化表示

前文中，数学公式都表达为连续时间形式。如果要通过编程来构建虚拟仿真实验，须对连续信号做离散化处理。例如对式 2-2 信号，离散化表示为

$$x_c[i] = A_c \cos(2\pi f_c \frac{i}{f_s} + k_f \sum_{k=0}^i x(\frac{k}{f_s}) \frac{1}{f_s}) \quad (\text{式 2-8})$$

其中使用加和运算代换积分运算， f_s 为离散化采样频率。

为了取得良好的仿真效果， f_s 至少应为 f_c 的 5 倍以上。在本实验中，建议取 1000 倍，也就是说对于频率为 f_c 的正弦波的一个周期波形，使用 1000 个等间隔采样点来描述，仿真颗粒足够精细。但仿真颗粒度越高，运算量也越大。在实验系统设计中，需平衡折中考虑利与弊两个方面。

2.3.4 使用数字基带信号

理论教材的后续章节将有数字调制技术的内容。本次实验中设计安排了少许内容，使用数字基带信号作为频率调制系统的调制信号来做实验，有助于对数字调制技术做一定的提前认知。

此处使用的数字码元基本码形为 NRZ（非归零码），码元时间宽度为 T ，如图 2-4 和式 2-9 的表达。

$$g(t) = \begin{cases} 1V & \text{if } t \in [0, T) \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (\text{式 2-9})$$

如果基带二进制数字序列为“1-0 相间”码，在序列中符号“1”用 +1 表示，符号“0”用 -1 表示，即

$$a_j = +1, -1, +1, -1, +1, -1, \dots \quad \text{其中 } j = 0, 1, 2, 3, \dots$$

则数字基带信号波形如图 2-5，表达式为

$$x(t) = \sum_{j=0}^{+\infty} a_j g(t - jT) \quad (\text{式 2-10})$$

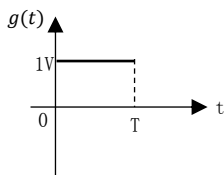


图 2-4 数字码元基本码形

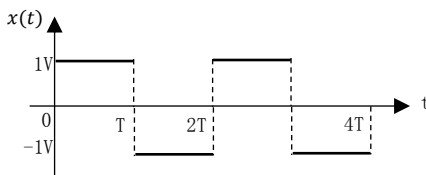


图 2-5 “1-0 相间”码序列信号波形

编程产生数字序列信号的技巧方法不止一种，这里介绍其中一种思路。对当前时刻 t ，先确定其位于序列中第几个码元区间内，记作 j ；再根据 j 确定 a_j 的值，就可以推算得到 $x(t)$ 的取值。以式 2-10 信号为例：

- (1) 计算 $j = \lfloor \frac{t}{T} \rfloor$ ，其中 $\lfloor \frac{t}{T} \rfloor$ 表示小于等于 $\frac{t}{T}$ 的最大整数；
- (2) 若 j 为偶数，则 $x(t) = 1V$ ；否则 $x(t) = -1V$ 。

2.4 实验内容与要求

请按图 2-1、图 2-2 展示的原理搭建虚拟仿真实验系统。

2.4.1 实验任务 2_1

载波信号工作参数取 $f_c = 150kHz$ 、 $A_c = 1V$ 。

频偏常数取 $k_f = 2\pi \times 5 \times 10^4 \text{ rad}/(s \cdot V) = 50kHz/V$ 。高斯白噪声标准差设为 $0.02V$ 。

调制信号取

$$x(t) = A_m \cos 2\pi f_m t \quad (\text{式 2-11})$$

其中 $f_m = 5kHz$ ， $A_m = 1V$ 。

合理设计仿真系统前面板（人机界面），完成以下观测并分析实验结果：

- (1) 信号时域波形观测

将调制信号和已调信号在同一坐标系波形图中展示。建议一屏展示调制信号的 3 个周期时长，以合理的节奏循环连续刷新。

- (2) 已调信号频域波形观测

建议频谱测量输出取线性形式；频域波形图横轴为频率，采用线性坐标；竖轴为幅度，采用对数坐标。

- (3) 实测已调信号带宽

编程自动测量已调信号带宽。保留边带幅度达到载波幅度 10% 以上的“有用”边带分量，测定已调信号实际带宽，并与理论值相比对。

- (4) 观测解调复原的基带信号

观测复原的基带信号的时域波形，并与原始调制信号波形相对照。图 2-2 中前置滤波可选用 10 阶巴特沃斯型低通滤波器，其截止频率的合理设置可参照 (2)、(3) 中对信号频谱和带宽的观测结果。

尝试不接该前置滤波器，观察解调结果有何不同。

- (5) 增大 k_f 取值并观察系统工作情况的变化

分别在 $k_f = 80kHz/V, 150kHz/V, 200kHz/V$ 时，观察并评论已调信号频谱情况和解调复原信号失真情况。

2.4.2 实验任务 2_2

载波信号工作参数取 $f_c = 150kHz$ 、 $A_c = 1V$ 。频偏常数取 $k_f = 50kHz/V$ 。高斯白噪声标准差设为 $0.1V$ 。

调制信号取

$$x(t) = \cos 2\pi f_{m1} t + \cos 2\pi f_{m2} t \quad (\text{式 2-12})$$

其中 $f_{m1} = 5kHz$ ， $f_{m2} = 3kHz$ 。

合理设计仿真系统前面板，完成以下观测并分析实验结果：

- (1) 信号时域波形观测

将调制信号和已调信号在同一坐标系波形图中展示。建议一屏展示调制信号 f_{m1} 成分的 5 个周期时长，以合理的节奏循环连续刷新。

- (2) 已调信号频域波形观测

竖轴（幅度）采用对数坐标。

（3）观测解调复原的基带信号

观测复原的基带信号的时域波形，并与原始调制信号波形相对照。

2.4.3 实验任务 2_3

试用形如图 2-5 的数字基带信号作为调制信号，取 $T = 200\mu\text{s}$ 。载波信号工作参数取 $f_c = 150\text{kHz}$ 、 $A_c = 1\text{V}$ 。频偏常数取 $k_f = 50\text{kHz/V}$ 。高斯白噪声标准差设为 0.1V 。

合理设计仿真系统前面板，完成以下观测并分析实验结果：

（1）信号时域波形观测

将调制信号和已调信号在同一坐标系波形图中展示。建议一屏展示调制信号 $4T$ 的时长，以合理的节奏循环连续刷新。

（2）已调信号频域波形观测

竖轴（幅度）采用对数坐标。

（3）观测解调复原的基带信号

观测复原的基带信号的时域波形，并与原始调制信号波形相对照。

2.4.4 实验任务 2_4

继续以数字基带信号作为调制信号。数字码元基本码形如图 2-4 和式 2-11 的表达，取 $T = 200\mu\text{s}$ 。载波信号工作参数取 $f_c = 150\text{kHz}$ 、 $A_c = 1\text{V}$ 。频偏常数取 $k_f = 50\text{kHz/V}$ 。高斯白噪声标准差设为 0.1V 。

基带二进制数字序列改为三阶 m 序列（伪随机序列的一种），其一个周期含 7 个二进制符号，符号数字序列为 1110010。若“1”用 +1 表示，符号“0”用 -1 表示，即

$$m_j = +1, +1, +1, -1, -1, +1, -1, +1, +1, +1, -1 \dots \quad \text{其中 } j = 0, 1, 2, 3, \dots$$

调制信号波形如图 2-6，表达式为

$$x(t) = \sum_{j=0}^{+\infty} m_j g(t - jT) \quad (\text{式 2-13})$$

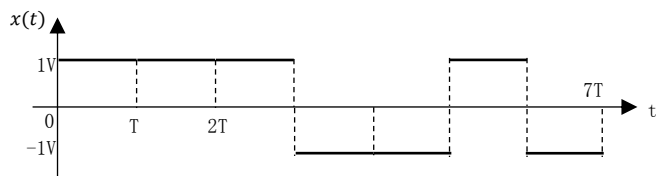


图 2-6 三阶 m 序列一个周期的信号波形

合理设计仿真系统前面板，完成以下观测并分析实验结果：

（1）信号时域波形观测

将调制信号和已调信号在同一坐标系波形图中展示。建议一屏展示调制信号 $7T$ 的时长，以合理的节奏循环连续刷新。

（2）已调信号频域波形观测

竖轴（幅度）采用对数坐标。

（3）观测解调复原的基带信号

观测复原的基带信号的时域波形，并与原始调制信号波形相对照。

2.4.5 整合所有实验内容

将上述实验任务涉及的实验内容，整合成一个实验系统，并合理设计仿真系统前面板（人机界面），向该虚拟仿真实验系统的使用者（假想用户）提供开展验证性实验的各项应用功能。图 2-7 展示了一种前面板布局方式，采用了选项卡风格，可作为一种参考。但该图的布局效果、装饰效果并非最佳，请勿将其视作标准方案、“满分”方案。

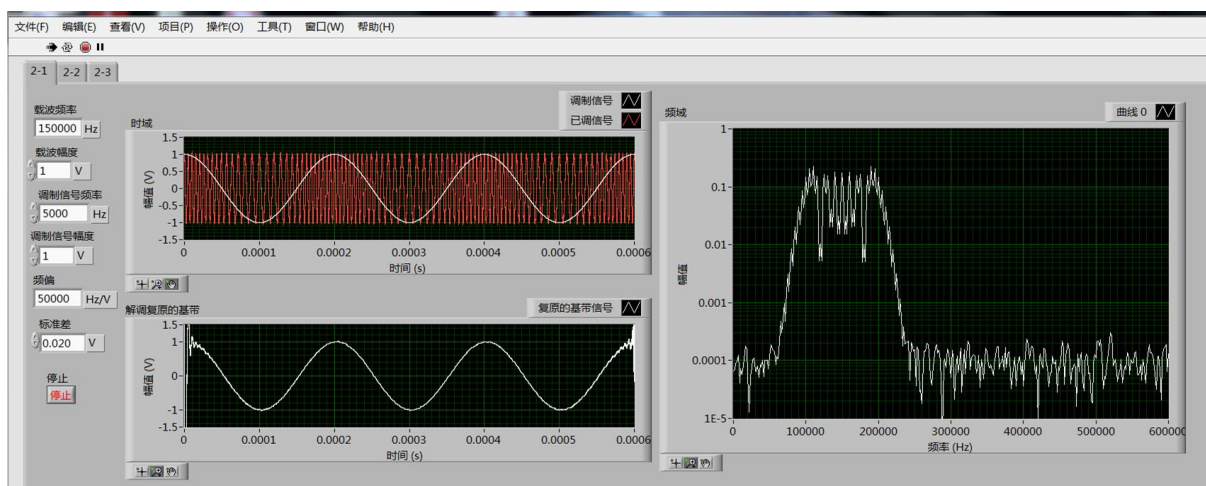


图 2-7 前面板布局和界面整合方案举例

2.5 拓展探究

学有余力的学习者可考虑自选或自拟问题，设计实验加以拓展探究，并将有关工作在实验报告中加以描述汇报。以下是建议的几个选题，供参考。

(1) 探究载波频率与基带信号频率取值之间的关系

在频率调制与解调应用系统中，通常取 $f_c \gg f_m$ 。请设计实验，观察当 f_c 大于但接近 f_m ，或 $f_m \geq f_c$ 时，系统的工作情况，尤其是能否正常解调？尝试从频域特性角度，定性加以解释。

(2) 如何解决系统连续运行中反复出现初始暂态现象的问题

图 2-7 中展示的实验结果带有一定缺陷。可见解调复原的基带信号图的最左侧有一段初始暂态波形，这在系统刚开机时是正常现象。但如果随着系统连续运行，这种情况持续存在，就说明仿真实验系统内在机制有缺陷，与现实系统不完全相符。（类似地，图 2-7 中复原基带波形图最右侧也存在不连续现象。）

请基于 LabVIEW 编程机制，寻找解决方案。

(3) 使用计算机声卡作为信号的输入输出端口

在本次实验的虚拟仿真系统中，能否使用计算机声卡输入作为调制信号源？或将解调复原的基带信号送往声卡输出？请尝试编程实现。

2.6 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。

2.7 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) 定量求解问题的方法逻辑，比如实验任务 2_1 第 3 项求解带宽的算法流程逻辑，应给出必要的简洁说明；
- (3) 人机界面设计的合理性、独到性；
- (4) 拓展探究工作。

考评时预留约 8% 的评分空间，用于奖励个性化强、别具匠心的设计。“不犯错”的常规完成可获得较好成绩，但不保证能得到高度评价及得分。