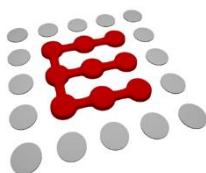




北京理工大学  
Beijing Institute of Technology

# 实验报告

课程名称：	通信与网络基础理论及应用II
任课教师：	██████████
学生姓名：	██████████
学 号：	██████████
班 级：	██████████
学 院：	信息与电子学院
成 绩：	



信息与电子学院

SCHOOL OF INFORMATION AND ELECTRONICS

# 实验一 基带码型变换仿真实验

## 一、实验背景与任务要求

### 1. 实验背景

数字基带传输是现代通信系统的核心基础环节，未经调制的数字基带信号需要通过特定的码型变换才能满足实际传输需求。在数字基带系统的传输过程中，信号码型需具备无直流分量、低频分量少、含有丰富的定时信息、频带利用率高、适应于信息源的变化以及编译码简单等条件，这些条件直接影响信道传输效率和通信质量，是保障信号稳定传输的关键前提。

AMI 码是一种简单的基带码型，凭借无直流分量、编译码电路简单等优点在早期通信场景中得到应用。但是当原始信源中出现连续多个零符号时，信号码元电平会长时间保持不变，导致接收端难以提取定时信息。HDB3 码作为 AMI 码的改进码型，在继承了 AMI 码核心优势的前提下，通过相应的编码规则添加破坏脉冲将连续零符号的个数限制在三个以内，从而保证接收端定时信息的提取，成为实际通信系统中广泛采用的优质基带码型。

为深入理解数字基带码型变换的内在原理，直观验证 AMI 码与 HDB3 码的传输特性，熟练掌握功率谱分析方法以及 MATLAB 在通信系统仿真中的实践应用，本次实验通过 MATLAB 构建仿真环境，完成二进制随机序列生成、两种码型的编码变换、波形绘制及功率谱密度的分析等核心操作，搭建理论知识与工程实践之间的桥梁，进一步夯实数字通信领域的专业基础，提升通信系统仿真与分析能力。

### 2. 实验任务要求

- (1) 产生一个长为 1000 的二进制随机序列，“0”出现的概率为 0.7，“1”出现的概率为 0.3。
- (2) 对上述生成的二进制随机序列进行归零 AMI 编码，脉冲宽度为符号宽度的 50%，波形采样率为符号率的 8 倍。绘制前 20 个符号对应的波形，并同时给出前 20 位信源序列。
- (3) 改用 HDB3 码对上述生成的二进制随机序列进行归零编码，绘制前 20 个符号对应的波形并于 AMI 码进行对比。
- (4) 分别对上述 1000 个符号的原始序列波形、AMI 编码波形和 HDB3 编码波形进行

功率谱估计，画出功率谱密度函数曲线图。

- (5) 改变信源“0”出现的概率，观察 AMI 码 HDB3 码的功率谱密度变化规律，分析不同码元概率分布对其造成的影响。
- (6) 对比观察 HDB3 码与 AMI 码的功率谱密度，分析 HDB3 码的性能优势。

## 二、实验过程与原理

### 1. 实验原理

#### (1) 数字基带信号

- 数字基带信号——未经调制的数字信号，它所占据的频谱是从零频或很低频率开始的。
- 数字基带传输系统——不经载波调制而直接传输数字基带信号的系统，常用于传输距离不太远的情况下。

#### (2) 功率谱特性

随机过程的功率谱密度可看成所有样本的统计平均

$$P_\xi(f) = E[P_f(f)] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E|F_T(f)|^2$$

其中  $F_T(f)$  为截短函数  $f_T(t)$  的傅里叶变换。

由于数字通信波形携带的信息码元往往是随机的，因此数字波形往往是随机波形，需要用功率谱对其进行描述。

数字通信波形的功率谱通常包含两部分：连续谱和离散谱。

- 连续谱：在某特定频点功率为零。
- 离散谱：所在频点功率非零（如果存在离散谱的话）。

设  $s(t)$  的功率谱密度为  $P_s(f)$ ，由于  $s(t) = u(t) + v(t)$ ，即可得到随机序列  $s(t)$  的功率谱密度，即

$$\begin{aligned} P_s(f) &= P_u(f) + P_v(f) \\ &= f_s P(1 - P) |G_1(f) - G_2(f)|^2 \\ &\quad + \sum_{m=-\infty}^{\infty} |f[PG_1(mf_s) - (1 - P)G_2(mf_s)]|^2 \delta(f - mf_s) \end{aligned}$$

式中， $f_s = 1/T_s$  为码元速率， $T_s$  为码元宽度（持续时间）， $G_1(f)$  和  $G_2(f)$  分别是  $g_1(t)$  和  $g_2(t)$  的傅里叶变换。

数字基带信号的功率谱特性:

- 功率谱  $P_s(f)$  包含连续谱（第一项）和离散谱（第二项）。
- 连续谱总是存在的，这是因为代表数据信息的  $g_1(t)$  和  $g_2(t)$  波形不能完全相同，故有  $\mathbf{G}_1(f) \neq \mathbf{G}_2(f)$ 。谱的形状取决于  $g_1(t)$  和  $g_2(t)$  的频谱以及出现的概率  $P$ 。
- 离散谱是否存在，取决于  $g_1(t)$  和  $g_2(t)$  的波形及其出现的概率  $P$ 。对于双极性信号  $g_1(t) = -g_2(t) = g(t)$ ，且概率  $P = 1/2$ （等概）时，则没有离散分量  $\delta(f - mf_s)$ 。

### (3) 基带传输常用码型

码型选择原则:

- 不含直流，且低频分量尽量少；
- 含有丰富的定时信息，以便于提取定时信号；
- 功率谱主瓣宽度窄，以节省传输频带；
- 不受信息源统计特性的影响，能适应信息源变化；
- 具有内在的检错能力，即码型应具有一定规律性；
- 编译码简单，以降低通信延时和成本。

#### AMI 码：传号交替反转码

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

$$\begin{array}{ccccccccccccccc} \{b_n\}: & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \cdots \\ \text{AMI 码: } & +1 & -1 & +1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & +1 & 0 & \cdots \end{array}$$

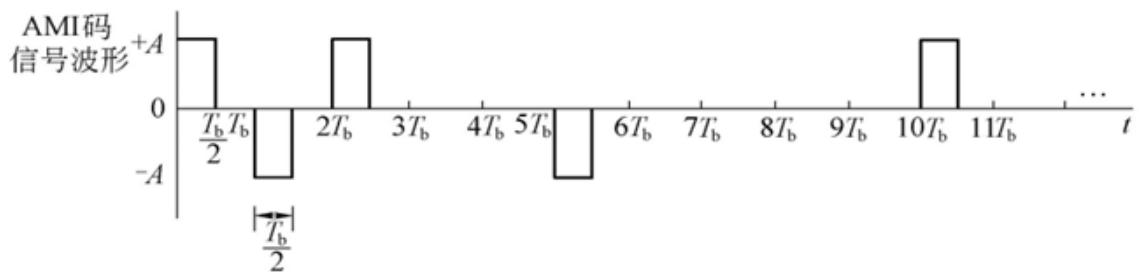


图 1: AMI 码

AMI 码对应的波形是具有正、负、零三种电平的脉冲序列

#### AMI 码的优点:

- 无直流成分，且高、低频分量少；
- 编译码电路简单，且可利用传号极性交替规律观察误码情况；
- 如果它是 AMI-RZ 波形，接收后只要全波整流，就可变为单极性 RZ 波形，从中可以提取位定时分量。

#### 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。

#### HDB3 码：3 阶高密度双极性码

- 它是 AMI 码的一种改进型，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 3 个

编码规则：

- (1) 连“0”数目小于等于 3 时，HDB3 码与 AMI 码一样
- (2) 连“0”数目超过 3 时，将每 4 个连“0”化作一小节，定义为 000V，称为破坏节，其中 V 取“1”或“-1”，V 与前一个相邻的非“0”脉冲的极性相同
- (3) 相邻的 V 码之间极性必须交替。当 V 能满足 (2) 但不能满足此要求时，000V 替换为 B00V，B 的取值与后面的 V 一致
- (4) V 码后面的传号码极性也要交替。

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

AMI 码： -1 0 0 0 0 +1 0 0 0 0 -1 +1 0 0 0 0 0 0 0 0 -1 +1

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

**连0超过3个**

**V极性交替**

**B与后面的V极性一致**

**V极性交替**

图 2: HDB3 码

## 2. 实验过程

本实验基于 MATLAB2025b 编写代码进行基带码型变换仿真分析，实验将基于以下步骤进行：

- (1) 产生一个长为 1000 的二进制随机序列，“0”的概率为 0.7，“1”的概率为 0.3，并根据产生的序列生成对应的原始单极性非归零波形，波形采样率为符号率

的 8 倍。随机序列可使用 MATLAB 的 rand 函数产生，设置比较阈值为 0.7，当生成的随机数大于阈值产生码元“1”，当生成的随机数小于阈值产生码元“0”，即可产生相应码元概率的随机序列。

- (2) 根据实验原理中 AMI 码的编码规则，对上述数据进行归零 AMI 编码，并设置脉冲宽度为符号宽度的 50%，波形采样率为符号率的 8 倍，给出前 20 位信源序列并画出前 20 个符号对应的波形。
- (3) 根据实验原理中 HDB3 码的编码规则，对上述数据进行归零 HDB3 编码，码元波形占空比保持不变，画出前 20 个符号对应的波形。
- (4) 分别对上述 1000 个符号的波形进行功率谱估计，画出功率谱。功率谱密度的计算可以利用 MATLAB 中的 pwelch 函数，用汉宁窗对原始波形进行加窗处理，以降低频谱泄漏。设置 FFT 长度为 1024、重叠长度为 512，采样率为 fs，并设置估计值的频率范围为'centered'，即可得到各信号的功率谱与对应频率序列。
- (5) 改变信源“0”的概率，观察 AMI 码和 HDB3 码的功率谱变化情况。
- (6) 对比观察 HDB3 码与 AMI 码的功率谱，得出实验结论。

### 三、实验结果与分析

#### 1. 任务一：给定码元概率的二进制随机序列的生成

##### (1) 实验结果

实验中利用 MATALB 函数成功生成了码元“0”概率为 0.7 的一个长为 1000 的二进制随机序列，并生成对应的原始单极性非归零波形，如下图所示：

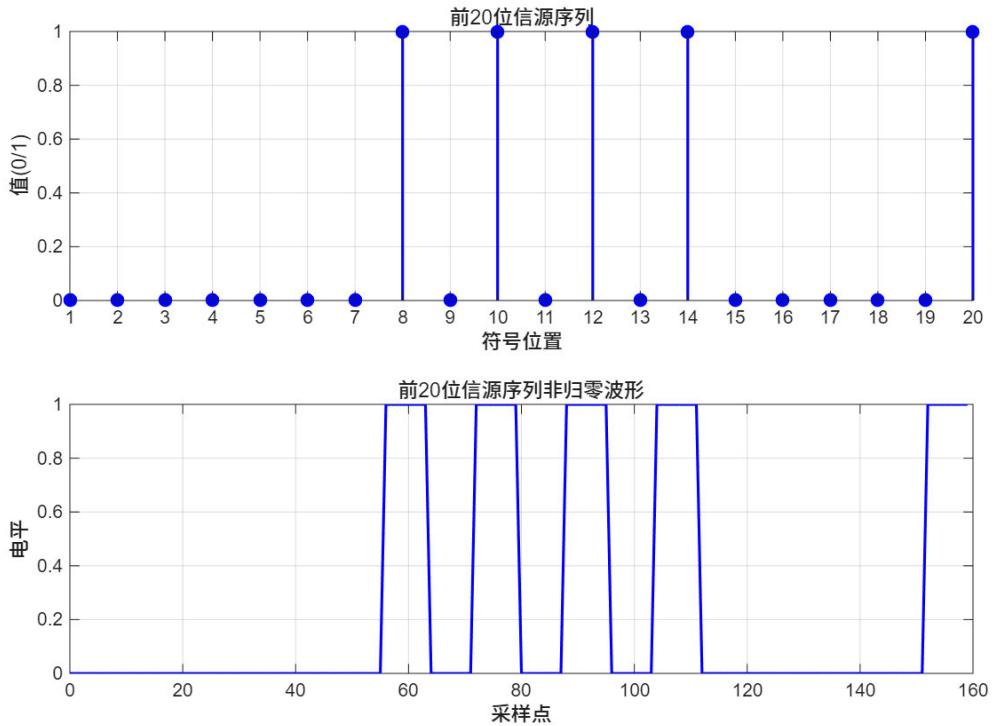


图 3：前 20 位信源序列及其非归零波形

观察上图可以发现，信号波形呈现出典型的非归零特征，即信号波形占空比为 1。并且码元“0”的个数明显多于码元“1”的个数，信号低电平的持续时间更长。

## (2) 思考

生成满足一定概率分布的二进制码元序列是数字通信系统仿真的基础，可以模拟实际通信中不同码元在信道中的传输过程，本实验中的二进制序列生成算法可以生成不同概率分布的码元序列。当“0”的概率较高时，对码元序列进行单极性非归零编码，信号码元波形会出现长时间的零电平，不利于接收端定时分量的提取。

## 2. 任务二：AMI 编码实现

### (1) 实验结果

对生成的信源序列进行归零 AMI 编码，并使脉冲宽度为符号宽度的 50%，前 20 位信源序列的 AMI 编码及其波形如下图所示：

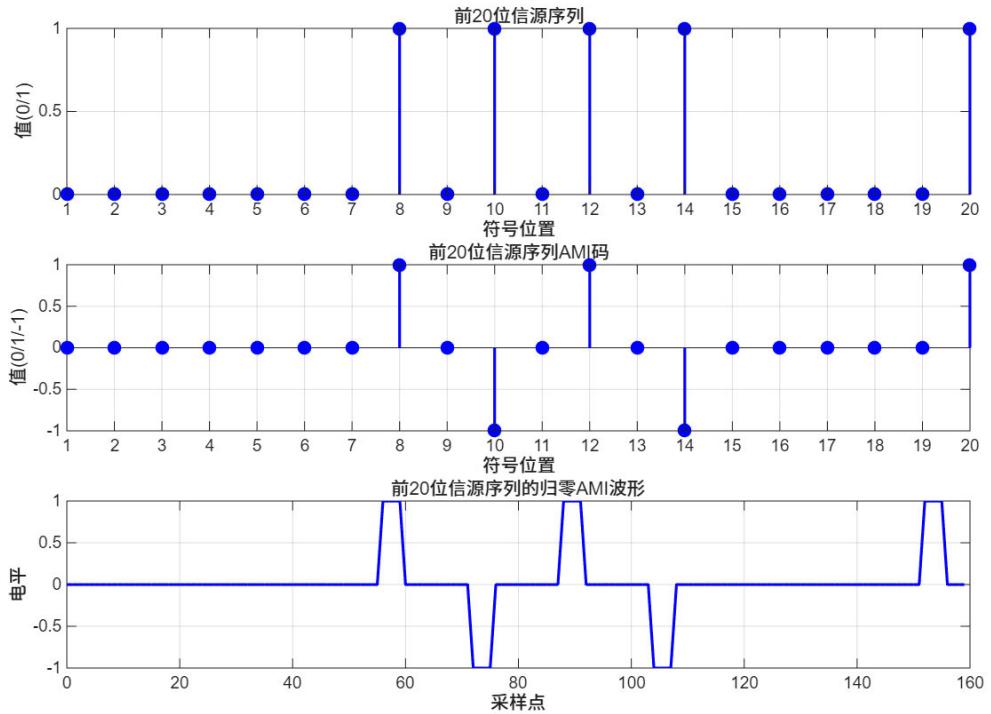


图 4: AMI 编码及其信号波形

观察上图可以发现，归零 AMI 编码信号波形具有+1、0 和-1 三种电平，码元“0”对应 0 电平，码元“1”对应的脉冲正负交替出现。每个码元的脉冲宽度仅占符号宽度的一半，占空比为 50%，因此所编码型完全符合题目要求。

## (2) 思考

与单极性非归零编码相比，归零 AMI 编码通过码元“1”正负电平交替出现的方式有效消除了信号的直流分量，通过归零操作使接收端更容易提取定时信息。但仔细观察会发现，当码元序列中“0”出现的概率较大时，信号码元很可能出现长连“0”串，导致接收端提取定时信息的困难，从而不利于传输码元序列的恢复。解决这一问题的有效方法就是适用 HDB3 编码。

## 3. 任务三：HDB3 编码实现

### (1) 实验结果：

对生成的信源序列进行归零 HDB3 编码，并使脉冲宽度为符号宽度的 50%，前 20 位信源序列的 HDB3 编码及其波形如下图所示：

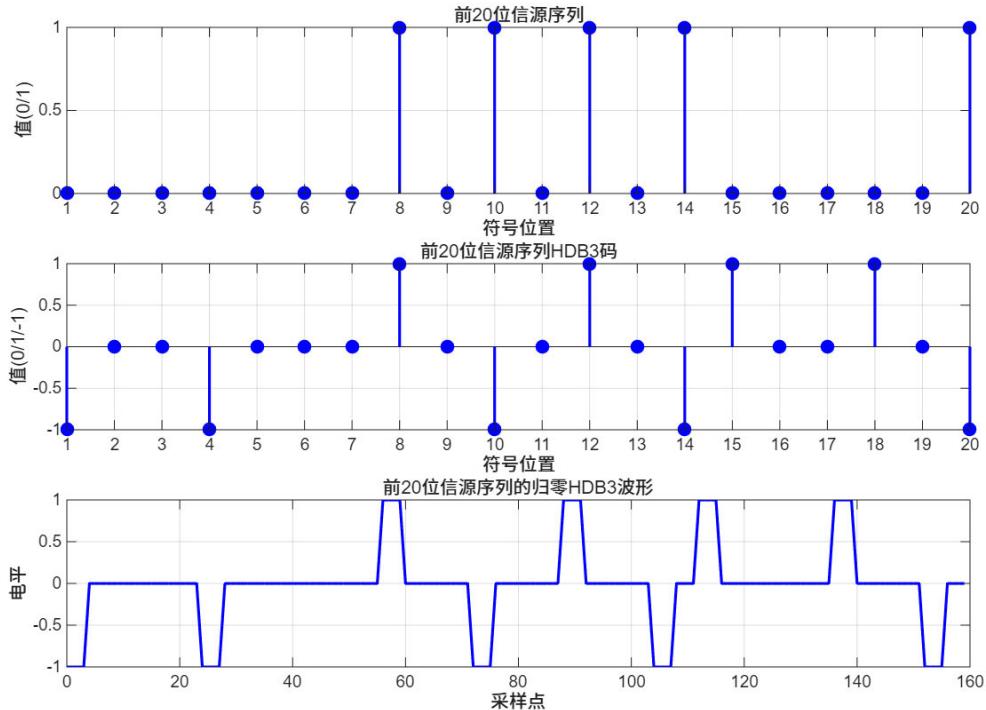


图 5: HDB3 编码及其信号波形

观察上图可以发现，归零 HDB3 码的编码规则与实验原理部分相符，每个码元的脉冲宽度同样仅占符号宽度的一半。HDB3 码仍具有与 AMI 码类似的正负电平交替的特征，但最大不同之处在于，HDB3 码不会出现 3 个以上的连“0”码元。

## (2) 思考

HDB3 码在继承了 AMI 码没有直流分量的优点外，通过特殊的编码方式将连“0”码元序列的长度限制在 3 个以内，从而保证定时分量的提取。HDB3 码虽然比 AMI 码的编码方式复杂，但其在实际通信系统中带来的优势是无可替代的，并且 HDB3 码仍具有较简单的译码规则。HDB3 码的每一个破坏脉冲 V 总是与前一非“0”脉冲同极性，从收到的符号序列中可以容易地找到破坏点 V，因此可以判断 V 符号及其前面的 3 个符号必是连“0”符号，从而恢复 4 个连“0”码，再将所有-1 变成+1 即可恢复原信源序列。

## 4. 任务四：信源序列的功率谱分析

### (1) 实验结果

绘制 1000 个符号信源序列的原始单极性非归零波形、归零 AMI 编码波形以及归零 HDB3 编码波形的功率谱密度图像，如下图所示：

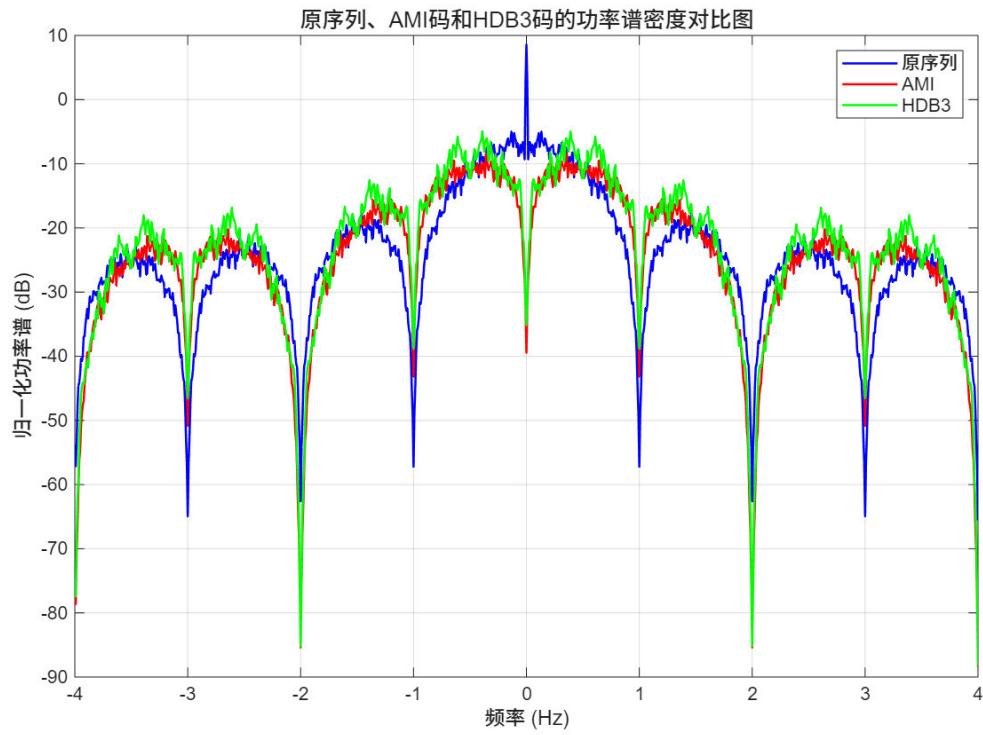


图 6：原序列、AMI 码和 HDB3 码的功率谱密度对比图

观察上图可以发现：

- 原始单极性非归零波形的功率谱密度在零频处具有很高的峰值，具有丰富的低频分量成分，信号带宽较大，不含定时分量。
- 归零 AMI 码和归零 HDB3 码的功率谱密度总体比较相似，在零频处具有很深的谷值。表明其几乎不含直流分量，并且低频分量的成分很少，信号带宽进一步降低，并且这两种码型均含有一定的定时分量。

## (2) 思考

原始单极性非归零波形由于具有直流分量和很多的低频分量成分，这导致原始单极性非归零码在传输过程中对信道的频带利用较低，不利于在信道中传输。与此同时原始单极性非归零波形不具有定时分量，难以从接受波形中提取定时信息。而归零 AMI 码和归零 HDB3 码无直流分量，低频分量成分很少，因此更节省信道带宽，有利于在信道中传输。

## 5. 任务五：改变信源“0”的概率，观察 AMI 和 HDB3 码的功率谱变化情况。

### (1) 实验结果

分别调整信源“0”的概率为 0.1、0.3、0.5、0.7 和 0.9，绘制不同“0”概率下原始单

极性非归零波形、归零 AMI 码以及归零 HDB3 码的功率谱密度，如下图所示：

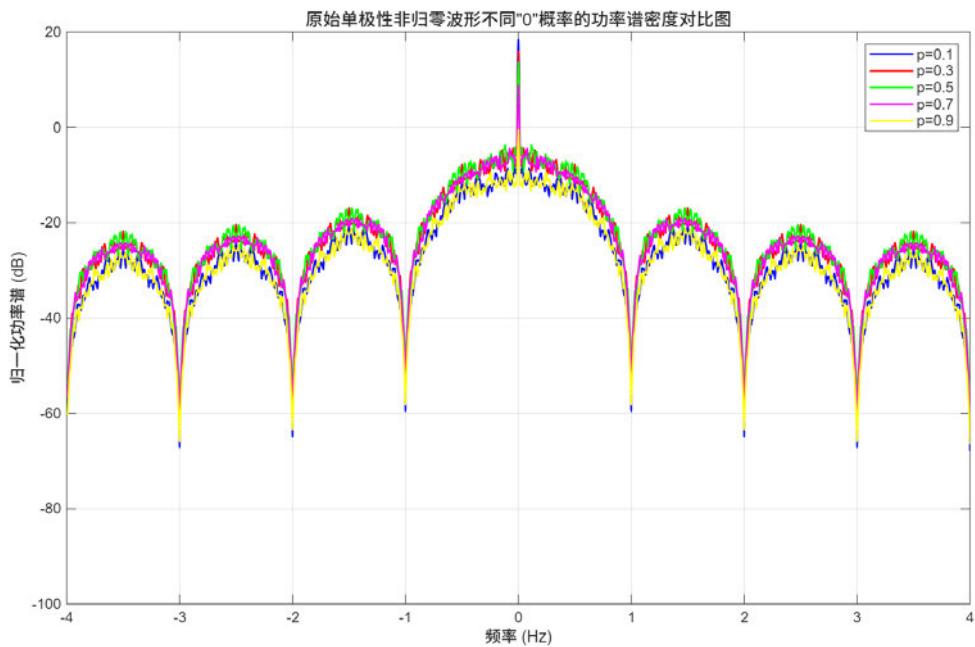


图 7：原始单极性非归零波形不同“0”概率的功率谱密度对比图

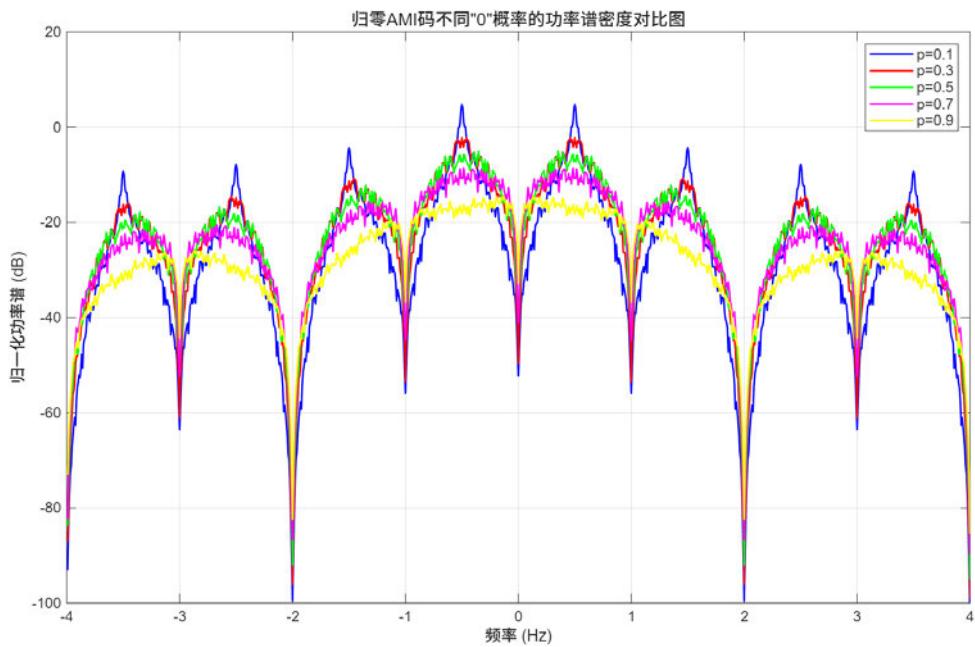


图 8：归零 AMI 码不同“0”概率的功率谱密度对比图

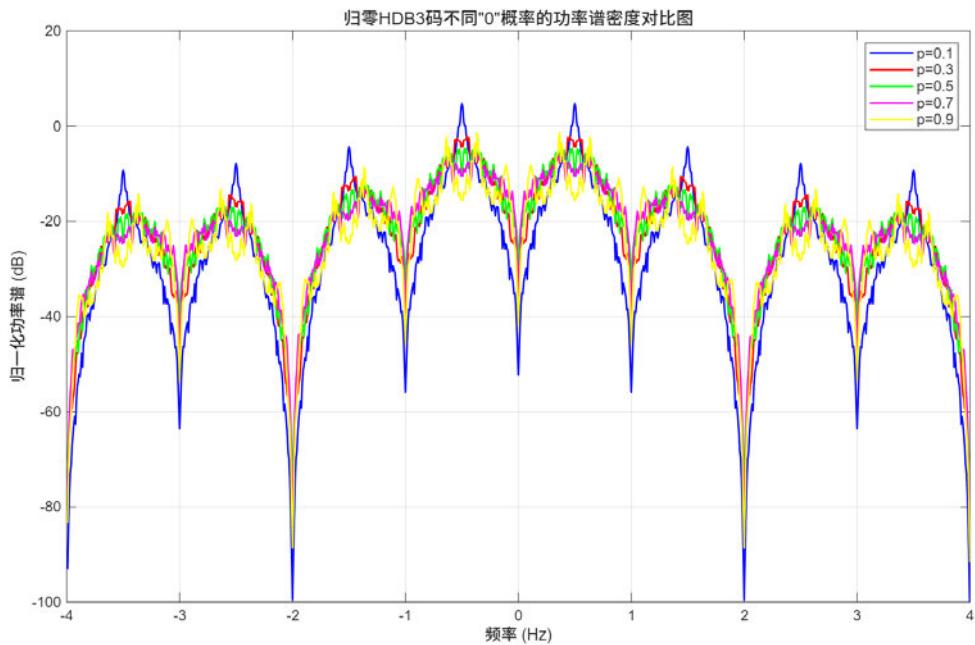


图 9：归零 HDB3 码不同“0”概率的功率谱密度对比图

观察上图可以发现：

- 原始单极性非归零波形在零频处的直流分量随着码元“0”概率的增大依次降低。
- 归零 AMI 码的定时分量随着码元“0”概率的增大依次降低，功率谱密度的总体幅度也依次下降。
- 归零 HDB3 码的定时分量虽然随着码元“0”概率的增大依次降低，但降低幅度不明显，即使在码元“0”为 0.9 时仍有明显的定时分量。

## (2) 思考

原始单极性非归零波形的直流分量与码元“1”的概率呈正相关，因此上述规律是显而易见的。对于归零 AMI 码而言，随着码元“0”数量的增加，信号码元连“0”的情况也会增加，非零脉冲的数量也会减少，从而导致定时分量的降低，这说明 AMI 码的定时分量对于信源分布是非常敏感的。而对于 HDB3 码来说，由于破坏脉冲的引入，限制了信号码元连“0”串的长度，同时增加了信号码元非零脉冲的个数。这些措施保证了即使码元“0”的概率非常高，信号码元仍含有一定的定时分量，从而有利于定时信息的提取。

## 6. 任务六：HDB3 码性能优势的分析

### (1) 实验结果:

现将任务四的结果再次展示如下：

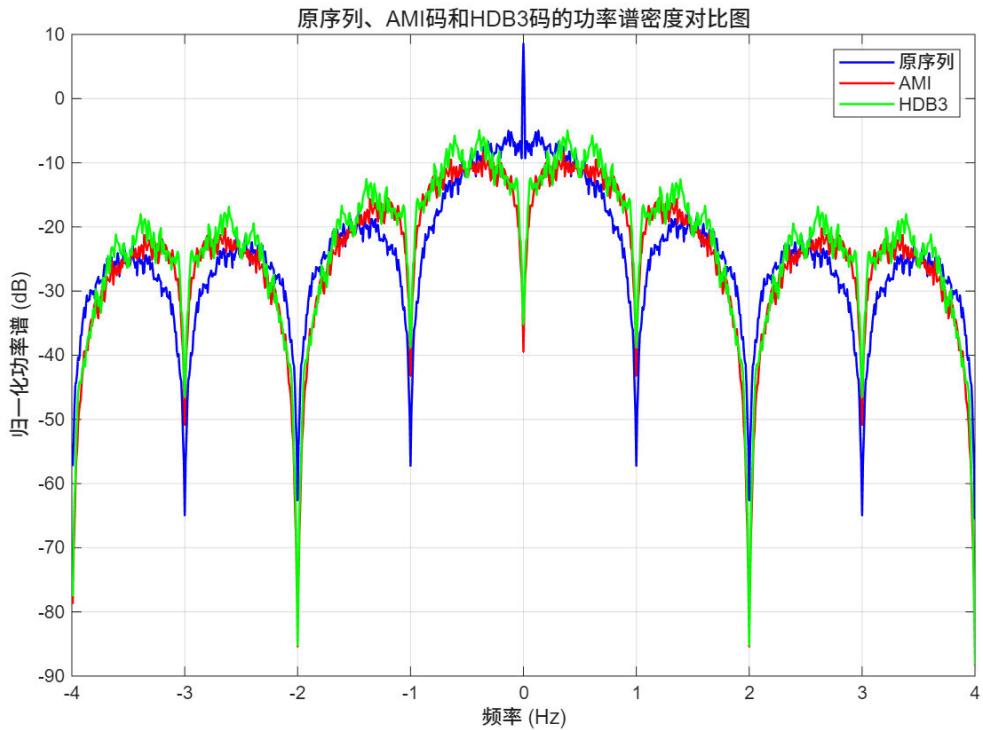


图 10：原序列、AMI 码和 HDB3 码的功率谱密度对比图

对比观察 AMI 码和 HDB3 码的功率谱密度的不同之处，可以发现在所有的定时分量处，HDB3 码功率谱密度的幅值均明显大于 AMI 码，这表明 HDB3 码含有更多的定时分量。

### (2) 思考

与 AMI 码相比，HDB3 码通过引入破坏脉冲的独特编码机制，限制了码元序列中连“0”串的长度在 3 个以内，增加了非零脉冲的个数，从而有效增加了信号码元的定时分量，从而保证定时信息的提取。与此同时，HDB3 码的编码规则具有一定的检错能力，有利于提高码元传输的准确性。正因为 HDB3 码具有这些独特的性能优势，使其在当今通信系统中得到了广泛的应用。

## 四、实验结论

### 1. 编码波形的直流分量和定时分量特点：

原始单极性非归零波形存在直流分量并且不存在定时分量，不利于在信道中传

输和接收端定时信息的提取。归零 AMI 码与 HDB3 码均实现了无直流分量、低频分量少的传输要求，并设置占空比为 50% 可进一步增加信号的定时分量。但 AMI 码在信源“0”概率较高时，会出现长连“0”串导致电平长时间不跳变，造成定时信息提取的困难。而 HDB3 码通过特定的编码规则引入破坏脉冲，成功将连“0”个数限制在 3 个以内，解决了 AMI 码的核心缺陷。

## 2. 不同码型功率谱特点：

原始单极性非归零波形的功率谱密度在零频处的直流分量出现较高的峰值，并且低频分量的成分也较大，信号带宽大且不含有定时分量。归零 AMI 码与 HDB3 码在零频处均消除了直流分量、压缩了信号带宽，且包含定时分量，更有利于在实际信道中传输。

## 3. 信源统计特性对码型性能的影响：

- 原始单极性非归零码的直流分量随码元“0”概率增大呈下降趋势。
- AMI 码对信源统计特性敏感，其定时分量和功率谱总体幅度随“0”概率增大显著衰减，出现长连“0”串会导致定时信息提取困难；
- HDB3 码对信源统计特性适应性更强，即使“0”概率高达 0.9，其定时分量仅轻微下降，仍能保证接收端有效提取定时信息。

## 4. HDB3 码的核心性能优势：

HDB3 码在继承 AMI 码无直流分量、编译码相对简单等优点的基础上，通过破坏脉冲编码机制实现了一下三大提升：

- 有效解决信源序列中出现长连“0”串的问题。
- 具有更加丰富的定时分量。
- 具备一定内在检错能力，整体传输稳定性和可靠性优于 AMI 码。

## 5. 实际通信系统的应用情况：

HDB3 码具有无直流分量、频带利用率高、定时信息丰富、适应信源变化等显著优势，相较于 AMI 码和原始单极性非归零码，更能满足实际通信系统对信号传输质量和稳定性的需求，是更优质的基带传输码型。

## 五、 感想

通过本次基带码型变换仿真实验，我收获了扎实的专业知识与宝贵的实践经验，

对数字基带传输系统的核心原理有了更为透彻的理解。实验过程中，我不仅深入掌握了 AMI 码与 HDB3 码的编码规则、性能差异，还熟练运用 MATLAB 完成了二进制随机序列生成、码型变换、波形绘制及功率谱密度分析等关键操作，系统梳理了基带传输从信源到频域分析的完整流程。

其中，HDB3 码的编码实现是我在实验中遇到的最大困难。通过认真复习 HDB3 码的编码规则，并进行耐心的编码调试，我成功实现了 HDB3 编码破坏节替换、相邻 V 码的极性交替以及 V 码与后续传号码的极性配合等要求。这个过程不仅提升了我的编程能力，更锻炼了我严谨的逻辑思维和问题排查能力。

本次实验让我深刻体会到理论与实践结合的重要意义和价值。在课堂上学习的随机序列功率谱密度公式以及直流分量和定时分量的概念，通过 MATLAB 仿真直观地体现出来。原始单极性非归零码无直流分量和定时分量的缺陷以及 AMI 码和 HDB3 码各自的特点和优势，也通过波形对比和功率谱密度曲线的绘制得到了实验验证，从而让我进一步加深了对基带码型变换的认识和理解。

最后，我要衷心感谢 [REDACTED] 的悉心指导。[REDACTED] 对 AMI 码和 HDB3 码编码原理的细致讲解、对 MATLAB 仿真技巧的耐心点拨，帮助我快速理清实验思路。同时感谢助教在实验过程中及时解答我的疑问，帮助我解决 HDB3 编码逻辑实现等遇到的各种问题。通过本次实验，我不仅夯实了通信原理的基础理论知识，更培养了科学严谨的实验态度和自主探究的科研思维，这些收获将为我后续深入学习数字通信等相关课程、开展进一步的科研实践奠定坚实基础，对未来的专业发展产生积极而深远的影响。

## 参考文献

- [1] 樊昌信, 曹丽娜. 通信原理[M]. 第 7 版. 北京: 国防工业出版社, 2012: 156-178.
- [2] 曹志刚, 钱亚生. 现代通信原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015: 134-167.