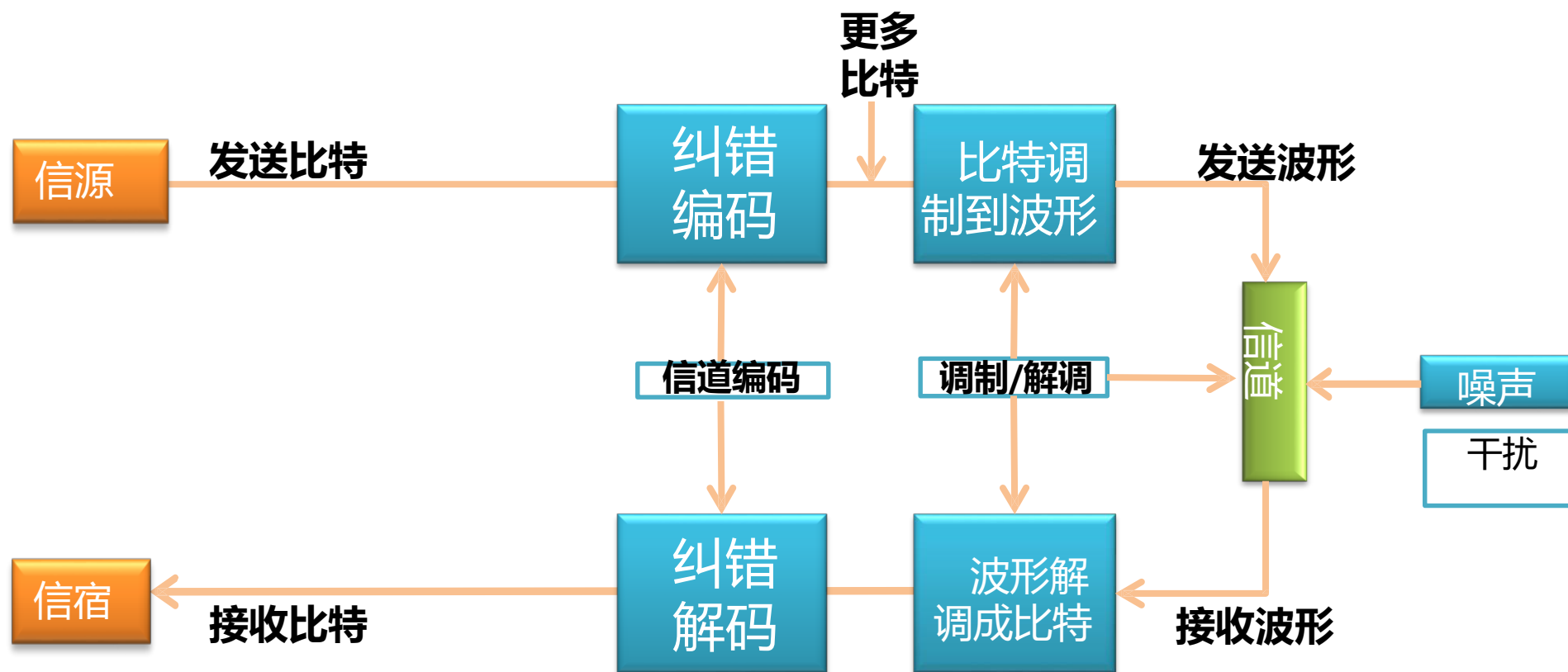


# 基础信息论

## 噪声

华中科技大学电信学院

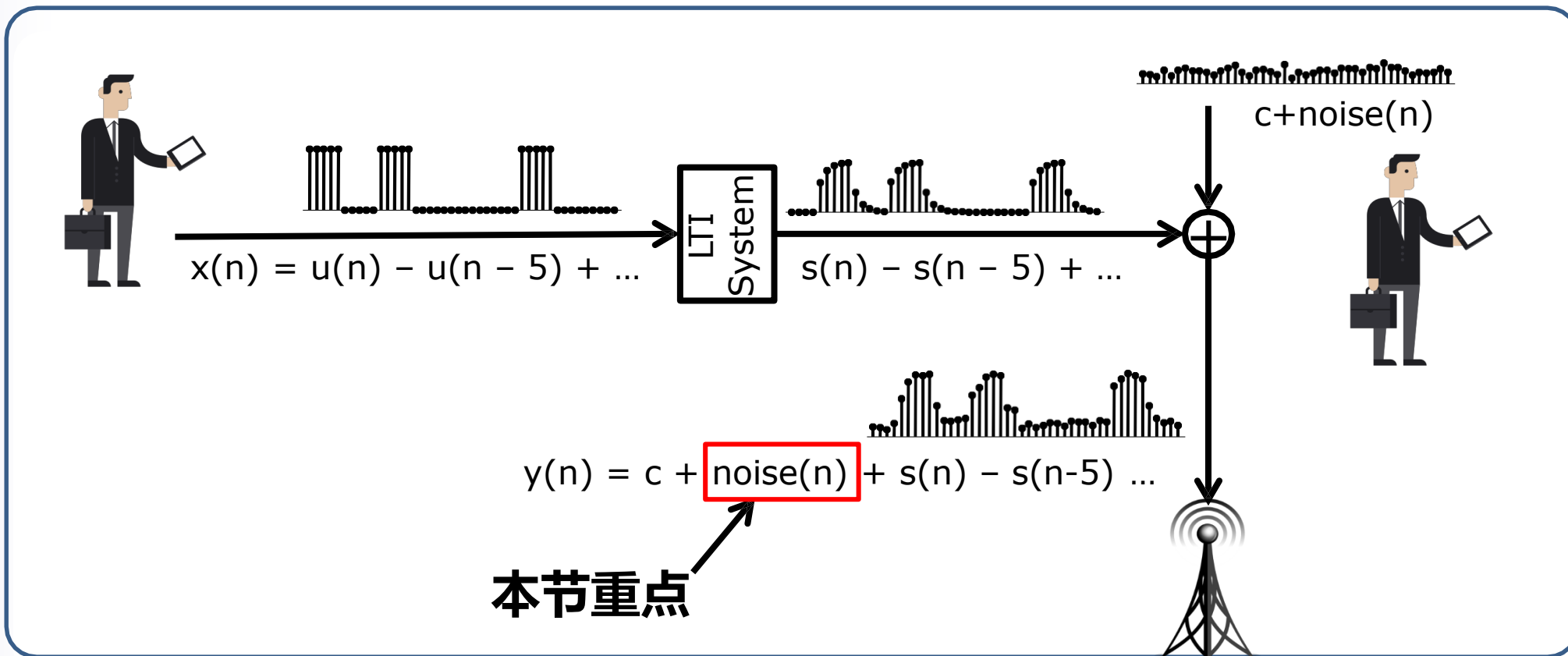
# 点到点通信



# 接收信号

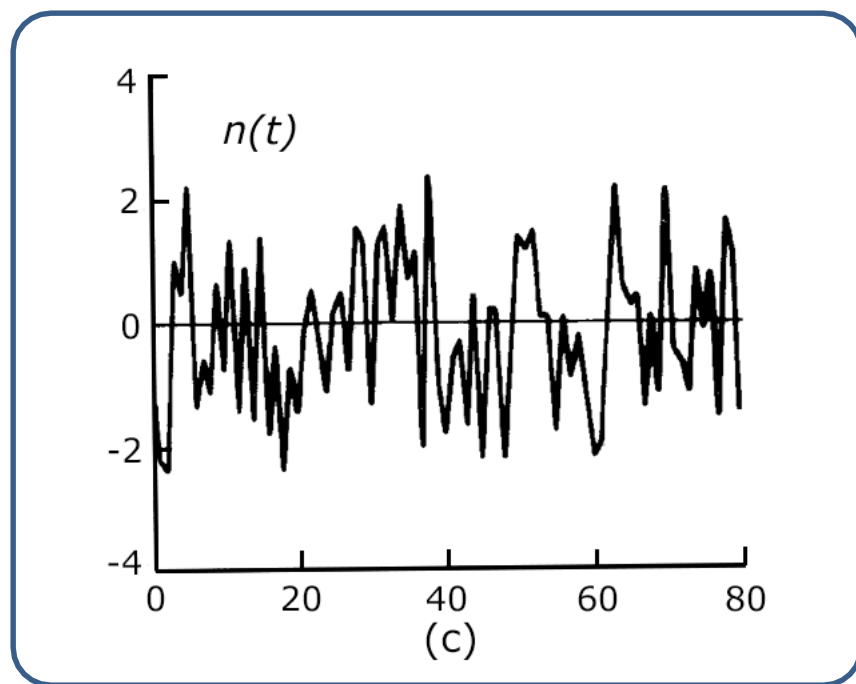
## 接收端的信号是两部分之和

- 输入信号的响应，这一部分由线性时不变系统的阶跃响应计算得到
- 信号，例如由环境（如其他用户，电子部件等）引入的偏置 $c$ 和噪声



# 噪声

- 噪声是通信系统中最重要和基本概念之一
- 没有噪声，通信课程就不必开设！
- 噪声无处不在，典型的噪声信号如下
- 基本上是一个 “ 随机信号 ”



# 噪声来自哪里？

讨论



微助教

# 噪声来自哪里？

- 噪声在自然中产生，最常见的类型是热噪声
- 电阻, 设备和环境
  - 来源于热噪声
- 热噪声是由环境热量导致的电子移动和振动，以及产生随机的电压和辐射而造成的
- 噪声可能出现在系统内部，也可能来自外部环境



# 主题: 噪声

## ■ 学习目标

- 预测二进制信道的误码率
- 体会概率模型在通信中的应用

## ■ 学习内容

- 噪声
- 加性噪声及其影响
- 二进制信道及误码率计算
- 实例

# 为什么噪声这么重要?

讨论



微助教



# 5G基站被关闭怎么回事？

- 5G 基站耗电量比 4G 基站高出 **2-3** 倍，1 万个 5G 基站每年所需的电费高达 2 亿元。
- 据中国铁塔的一份分析材料得知，目前几家主流厂商 5G 基站的系统功耗：华为的是 3500W，中兴的为 3255W，大唐的为 4940W。
- 4G 单系统功耗 1300W
- 5G 功耗是4G的**3-4**倍左右



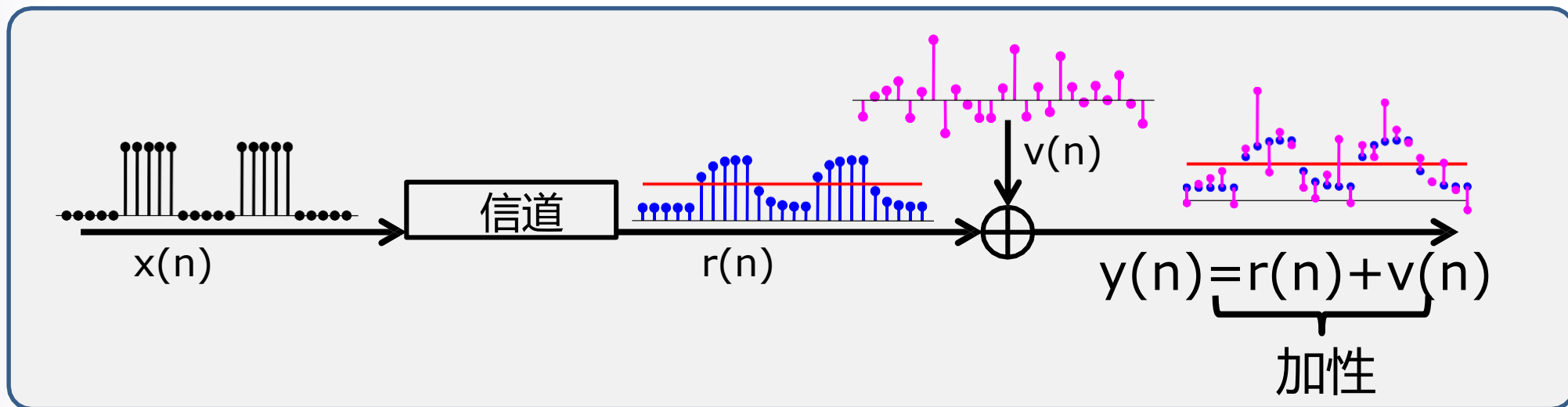
# 为什么噪声这么重要？

- 如果没有噪声，即使我们用很小很小的声音说，也仍然能被听到和理解
- 噪声的数目决定
  - 可以被理解的信号的最小值
- 噪声决定了最小信号能量
  - 可以被接收端译码
- 通信系统一般使用最小信号来节省能量
- 如果有用信号能量小于噪声的水平，那么误比特率就会显著增加



# 加性噪声及其影响

# 加性噪声



## ■ 定义:

- $x(n)$ : 信道输入
- $r(n)$ : 无噪声时信道输出
- $v(n)$ : 噪声
- $y(n)$ : 接收信号

## ■ 加性噪声将接收信号与信道无噪声时输出分隔开

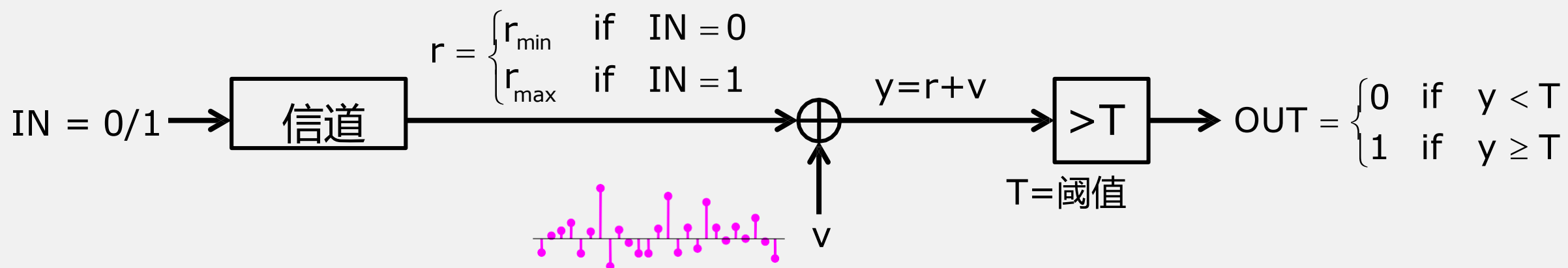
## ■ 如果噪声足够大并且与信号相位相反, 那么输出样本将会越过阈值!

# 为误码率分析的简化假设

- 完全同步
  - 确切地知道在哪里对输出采样来译码每个比特
- 单个样本译码
  - 通过比较输出样本和阈值来译码每个比特
- 无符号间干扰 (ISI)
  - 信道响应仅取决于当前比特传输，而不依赖于过去的比特传输
- 加性高斯“白”噪声 (AWGN, Additive White Gaussian Noise)
  - 白色：噪声变化地足够快以至于它在不同采样点的值彼此不相关
  - 高斯：以后再定义

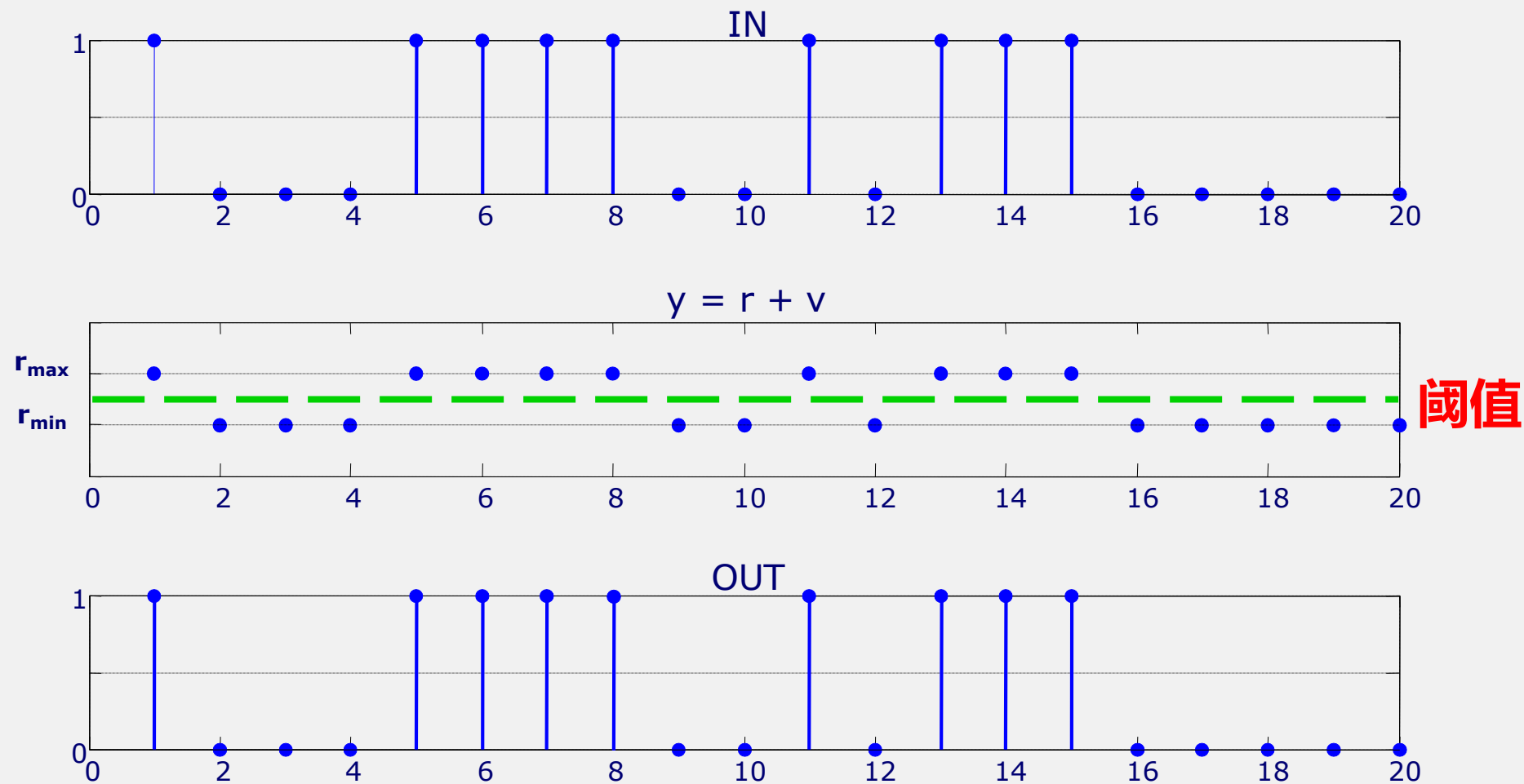
# 简化模型

- 在上述假设下，每个比特只需要考虑一个样本，并且可以独立地分析每个比特

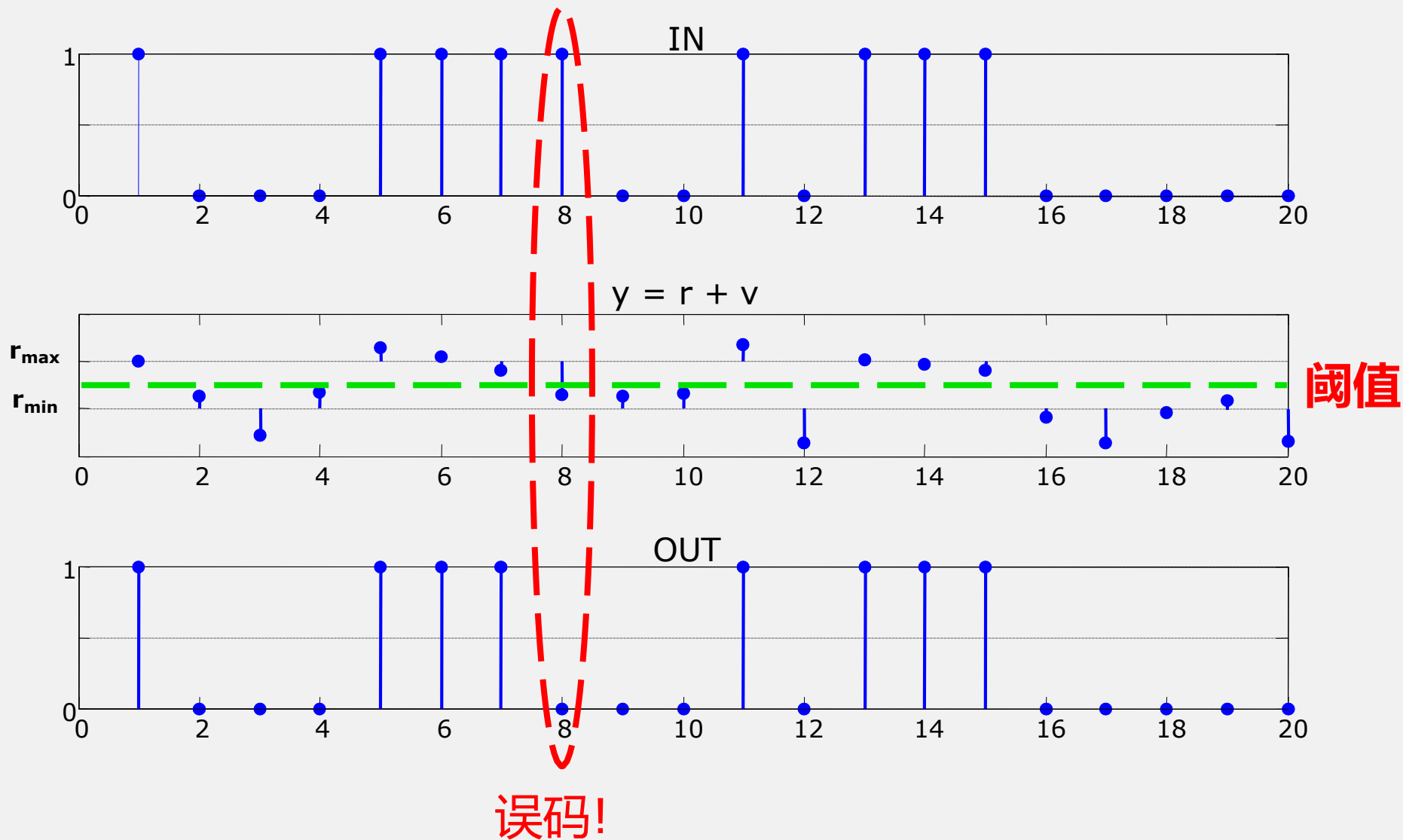


- 如何预测这个模型的误码率？

# 无噪声=无比特差错



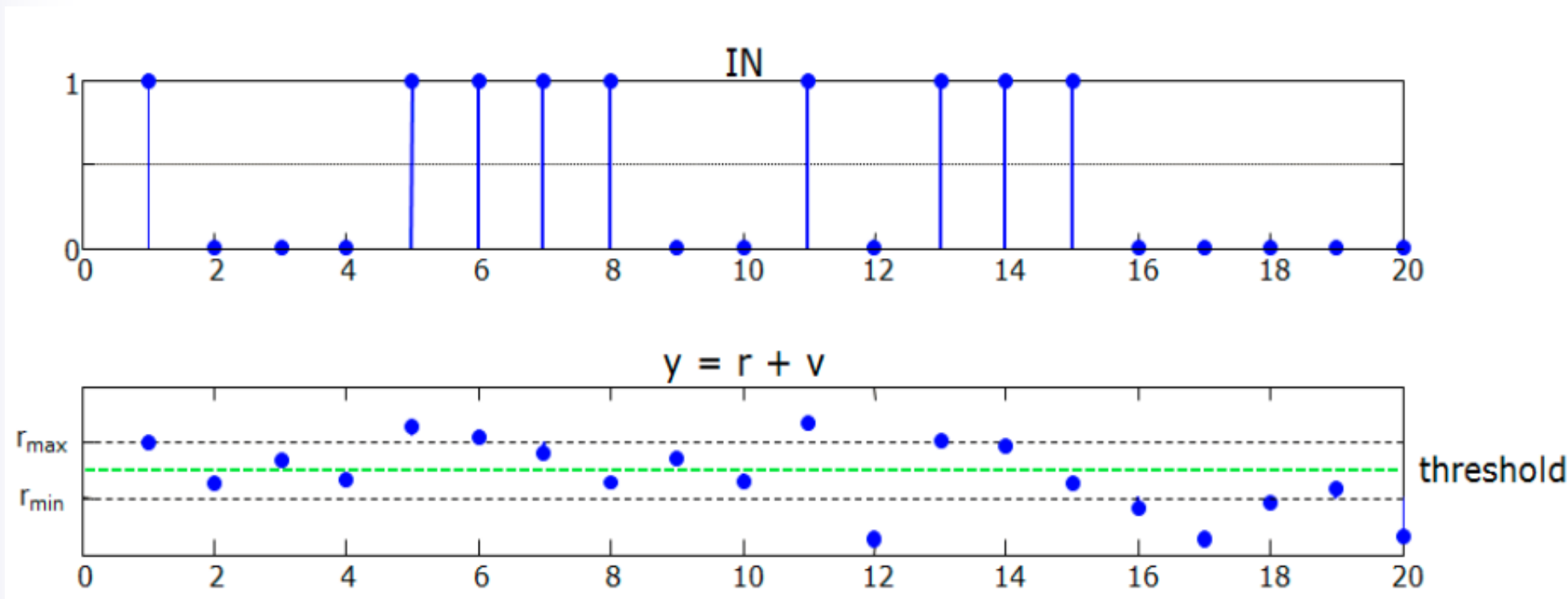
# 噪声导致比特传输错误







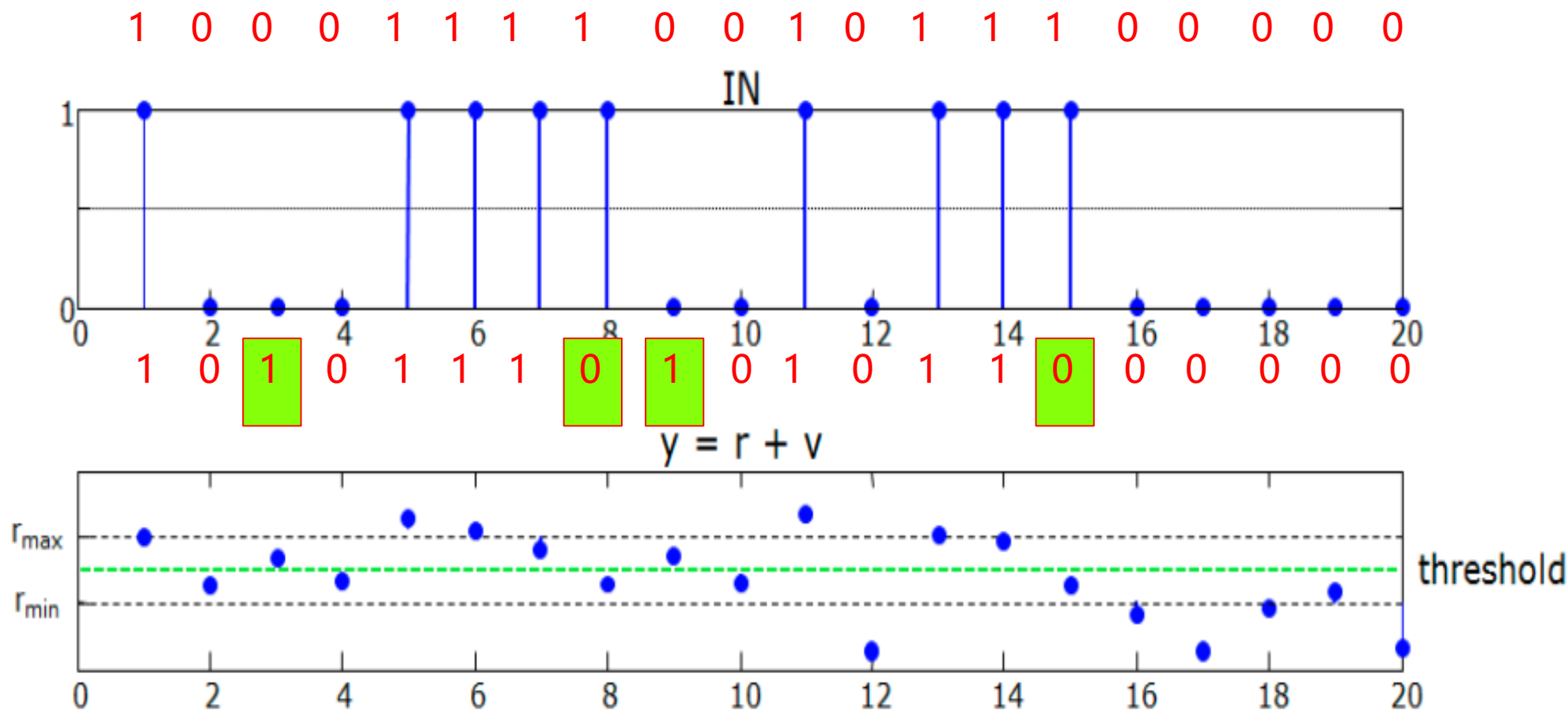
8.2 通过有加性噪声的通信系统发送的20比特，其相对应的发送和接收信号电平。



假设通过将接收信号电平与绿色虚线所示的阈值进行比较来决定比特。

产生多少比特错误？

# 答案

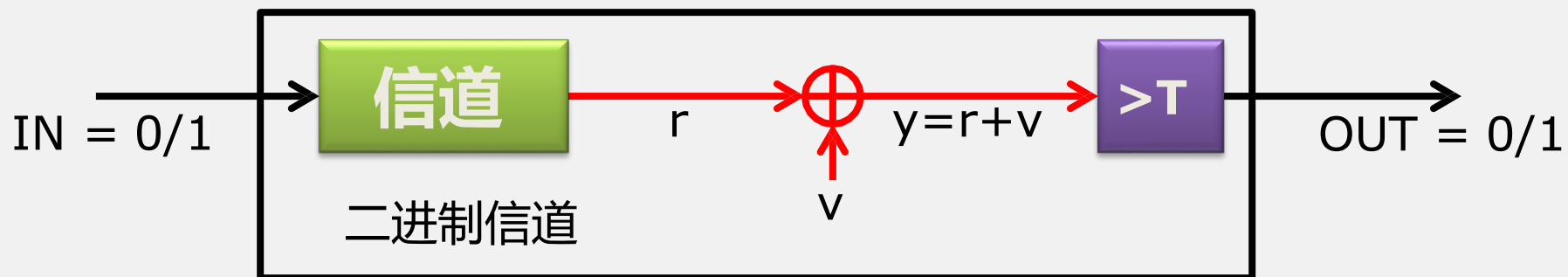


有4个比特错误。

# 二进制信道以及误码率计算

# 二进制信道模型

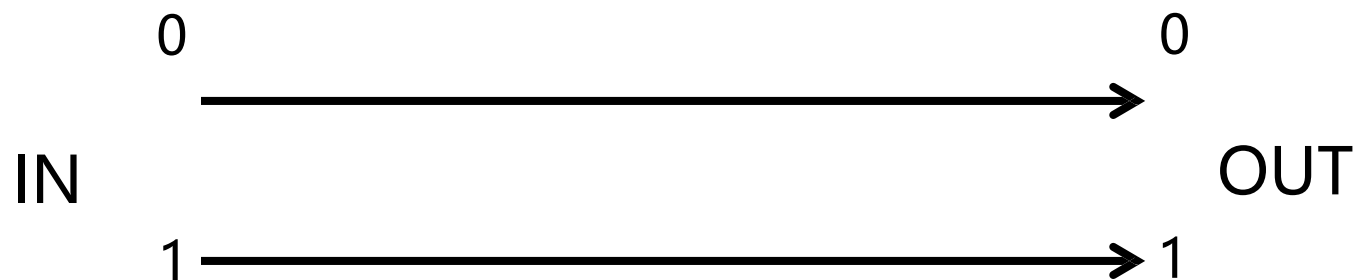
- 进一步简化上述模型
  - 忽略噪声和接收信号电平的具体值  $r_{\min}/r_{\max}$
  - 仅仅关注输入和输出比特
- 二进制信道: 输入和输出都只有两种可能值, 0 or 1



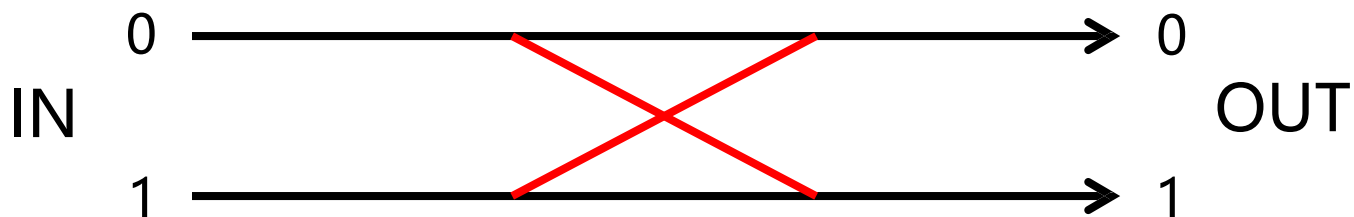
# 二进制信道特征



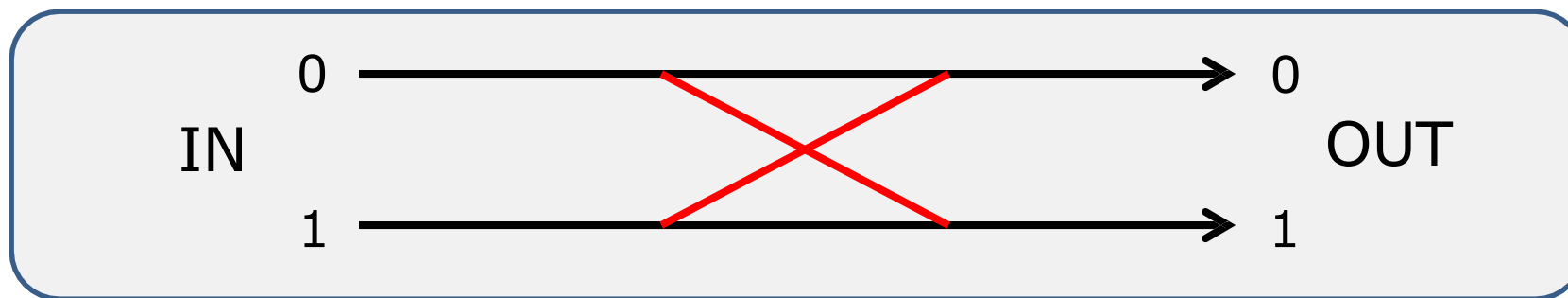
- 理想情况下,  $(IN=0, OUT=0)$  和  $(IN=1, OUT=1)$ 。在这种情况下,  $BER = 0$ .



- 有时由于噪声的影响, 导致  $(IN=0 \text{ but } OUT=1)$  或者  $(IN=1 \text{ but } OUT=0)$
- 这种情况下,  $BER > 0$

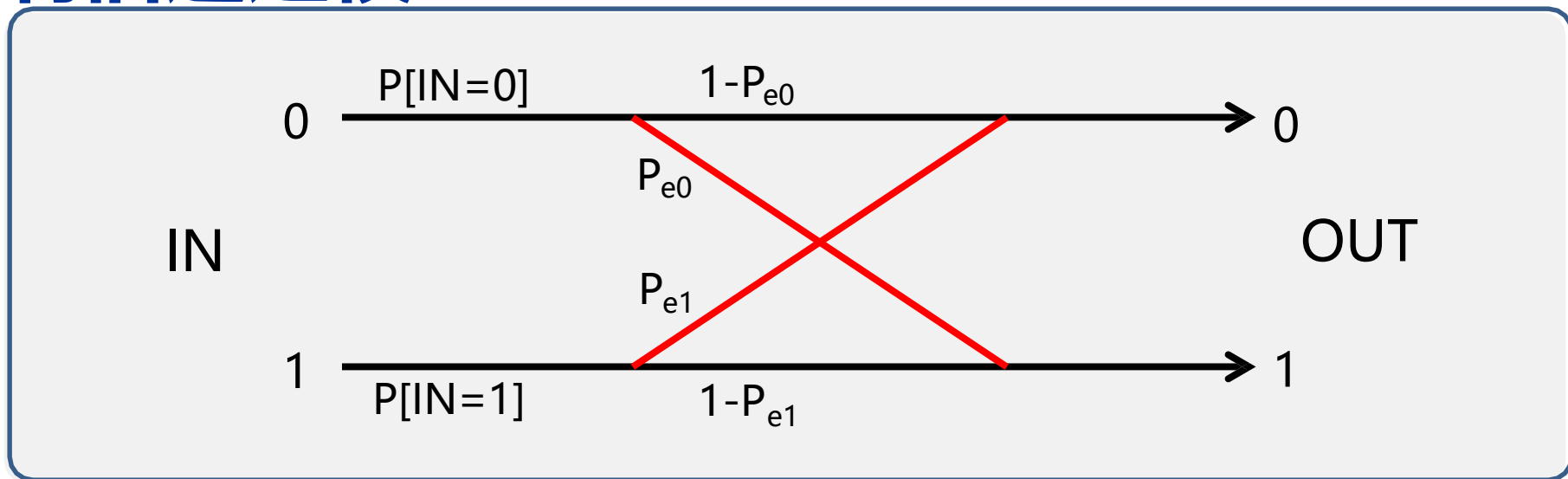


# 概率分析



- 误码率取决于
  - “多大可能性”  $IN = 0$ , but  $OUT = 1$
  - “多大可能性”  $IN = 1$ , but  $OUT = 0$
  - “多大可能性”  $IN = 0$ .
  - “多大可能性”  $IN = 1$ .
- 通过概率论来量化 “多大可能性” 的概念
- 直观上来说, 某件事情发生的概率 (即  $IN=0$ ) 是此事发生的时间百分比. 例如,
  - $P[IN=0]=0.5$  表明输入比特一半的时间为0
- 因为这里只有两种可能性,
  - $P[IN=0]+P[IN=1]=1 \rightarrow P[IN=1]=1-P[IN=0]=0.5$

## 二进制信道建模



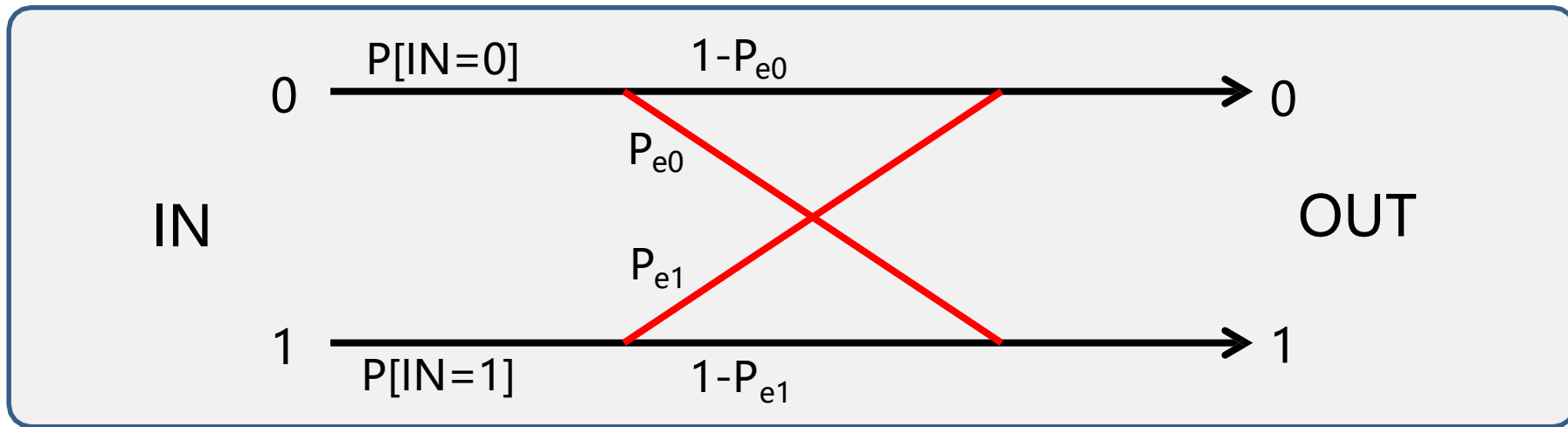
$P[IN=0]$ : 输入比特为0的概率 (时间的百分比)

$P[IN=1]$ : 输入比特为1的概率

$P_{e0}$  = 当  $IN=0$  时发生比特错误的概率  
=  $IN=0, OUT=1$  的概率

$P_{e1}$  = 当  $IN=1$  时发生比特错误的概率  
=  $IN=1, OUT=0$  的概率

# 计算BER



**BER** , 即错误的概率,  $P_e$

$$\text{BER} = P_e = P_{e0} \cdot P[\text{IN}=0] + P_{e1} \cdot P[\text{IN}=1]$$

OUT=1 , IN=0的概率      OUT=0 , IN=1的概率

两类错误!



# 实例

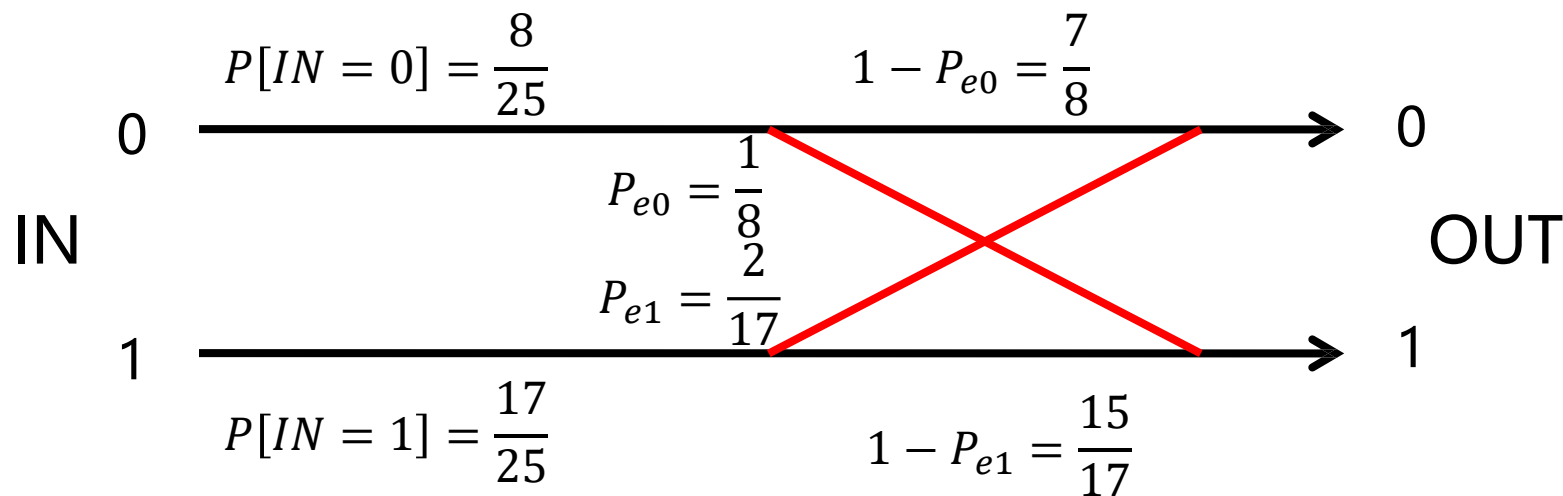
# 实例

## 输入/输出比特流

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
IN	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1
OUT	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1

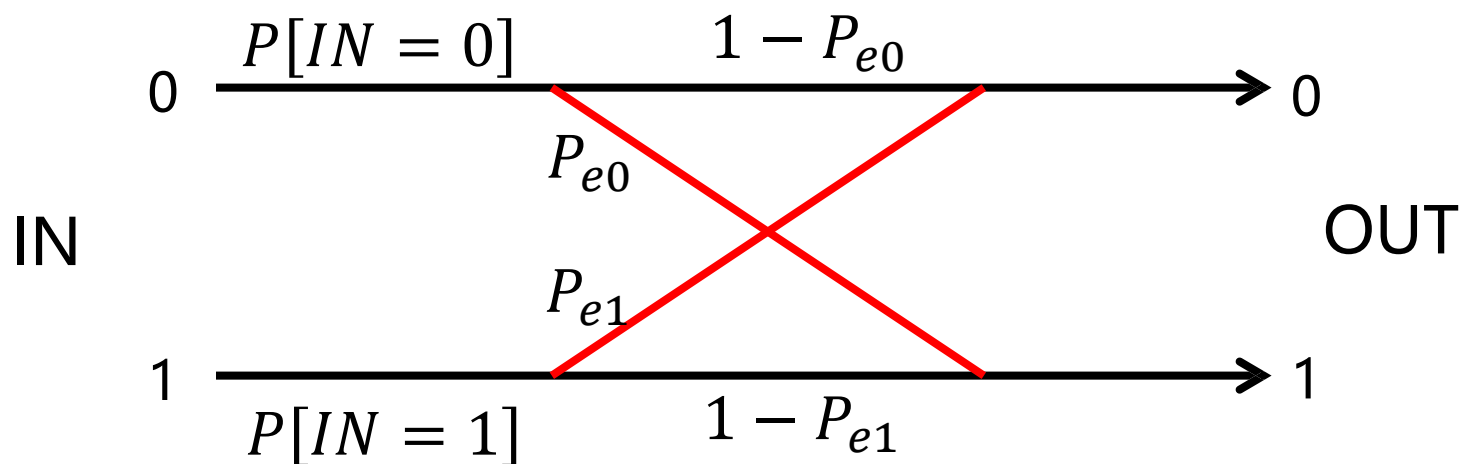
根据定义:

$$BER = \frac{\text{错误的比特数}}{\text{发送总比特数}} = \frac{3}{25} = 12\%$$



$$BER = P_{e0} \times P[IN = 0] + P_{e1} \times P[IN = 1] = \frac{1}{8} \times \frac{8}{25} + \frac{2}{17} \times \frac{17}{25} = \frac{3}{25}$$

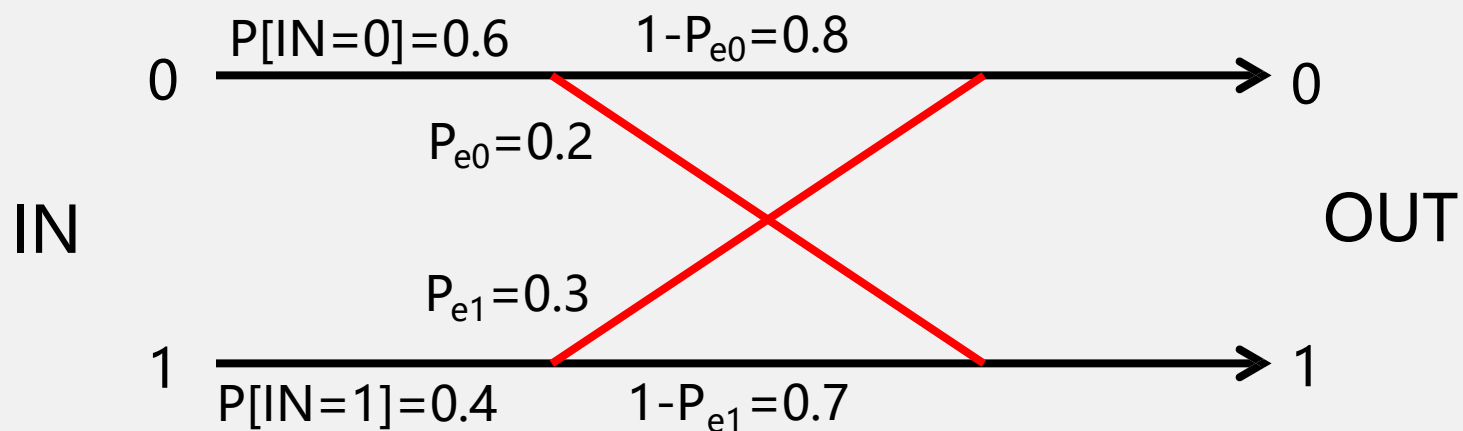
## 工程洞察



$$BER = P_{e0} \cdot P[IN = 0] + P_{e1} \cdot P[IN = 1]$$

- 因为 $P[IN = 0] + P[IN = 1] = 1$ ,  $BER$ 是 $P_{e0}$ 和 $P_{e1}$ 的加权平均
- $BER$ 在 $P_{e0}$ 和 $P_{e1}$ 之间
- 如果 $IN = 0$ 可能性更大,  $BER$ 接近 $P_{e0}$
- 如果 $IN = 1$ 可能性更大,  $BER$ 接近 $P_{e1}$
- 如果 $IN = 0$ 和 $1$ 等概,  $BER = \frac{1}{2}(P_{e0} + P_{e1})$
- 如果 $P_{e0} = P_{e1}$ ,  $BER = P_{e0} = P_{e1}$ .

## BER计算实例



问题: 上面二进制信道的 $BER$ 是多少?

解决方法:  $0.2 < BER < 0.3$

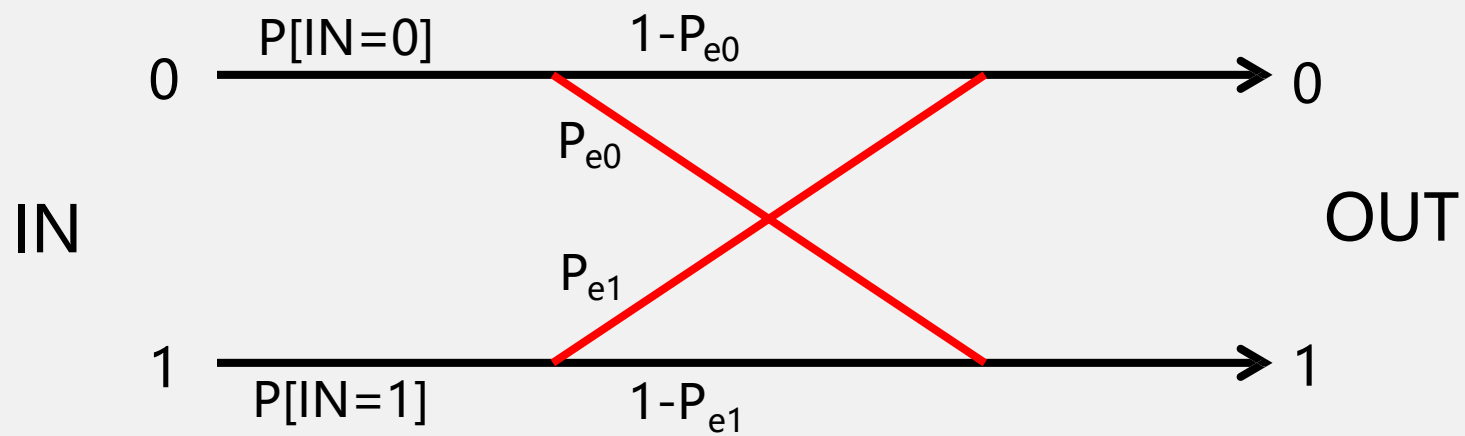
$$\begin{aligned} BER &= P_{e0} \cdot P[\text{IN}=0] + P_{e1} \cdot P[\text{IN}=1] \\ &= 0.2 \times 0.6 + 0.3 \times 0.4 \\ &= 0.12 + 0.12 \\ &= 0.24 \end{aligned}$$

讨论



微助教

# 预测 $BER$ 需要知道什么?



- 为了预测误码率  $BER$ , 需要知道
  - $P[IN=0]$  ( $P[IN=1] = 1 - P[IN=0]$ )
  - $P_{e0}$
  - $P_{e1}$
- 通常, 发送方决定  $P[IN=0]$ 
  - e.g.  $P[IN=0] = P[IN=1] = 0.5$
- $P_{e0}$ 和 $P_{e1}$ 取决于
  - 发送信号的电平 ( $r_{min}, r_{max}$ )
  - 噪声的大小



## 习题：计算二进制信道误码率

8.4 某二进制信道的输入和输出比特流如图所示，回答问题：

- 估计该信道的误码率(BER)
- 估计发送端发送0位 $P[IN = 0]$ 的概率
- 如果传输了比特"0"，则估计发生错误的概率 $P_{e0}$
- 如果传输比特"1"，估计错误的概率 $P_{e1}$

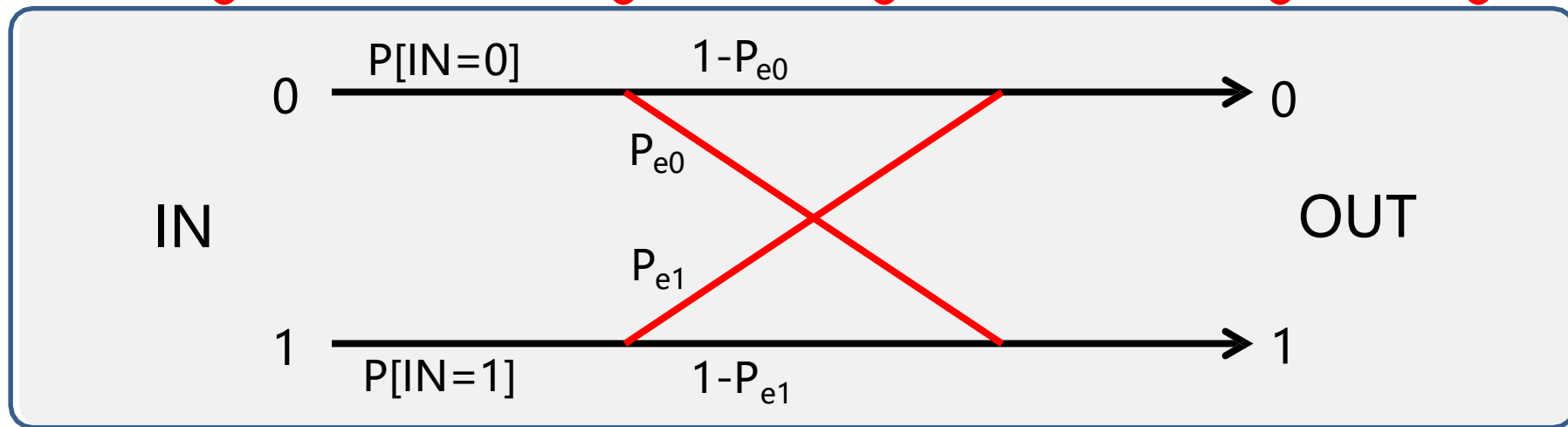
n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
IN	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1
OUT	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0

# 习题：计算二进制信道误码率

8.4.1 某二进制信道的输入和输出比特流如图所示，回答问题：

a) 估计该信道的误码率(BER)

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
IN	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1
OUT	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0



$$BER = \frac{\text{错误的比特数}}{\text{发送总比特数}} = \frac{5}{20} = 25\%$$

## 习题：计算二进制信道误码率

8.4.2 某二进制信道的输入和输出比特流如图所示，回答问题：

b) 估计发送端发送0位P [IN = 0]的概率

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
IN	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	1	1	<u>0</u>	<u>0</u>	1	1	<u>0</u>	<u>0</u>	1	1	<u>0</u>	1	<u>0</u>	1	1	1	1
OUT	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0

**P[IN=0]：输入比特为0的概率（时间的百分比）**

$$P[IN=0] = \frac{9}{20} = 0.45$$



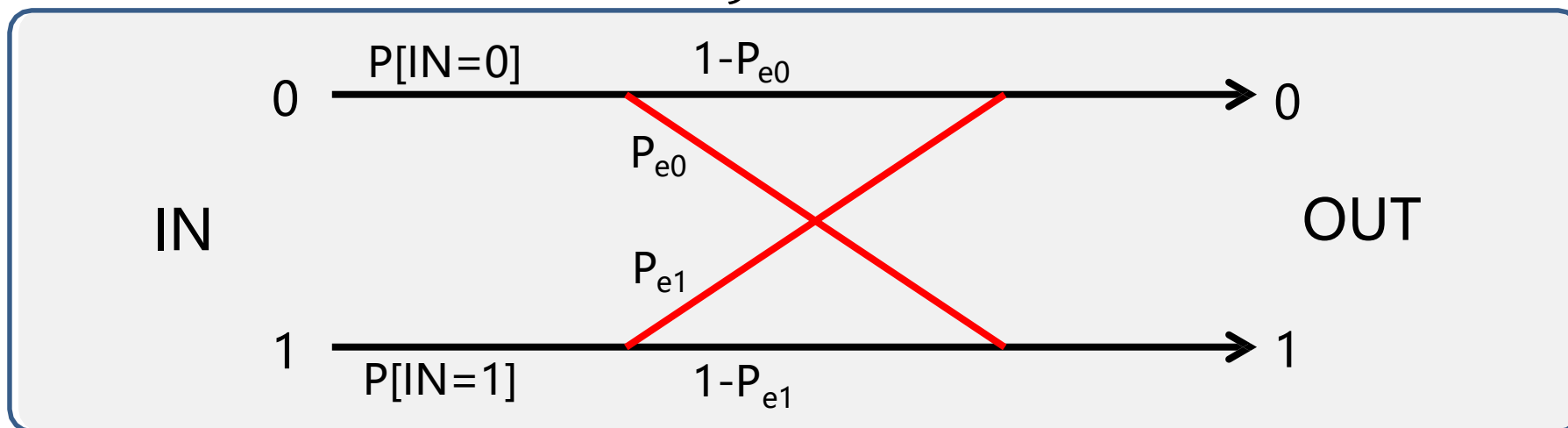
# 习题：计算二进制信道误码率

8.4.3 某二进制信道的输入和输出比特流如图所示，回答问题：

c) 如果传输了比特"0"，则估计发生错误的概率 $P_{e0}$

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
IN	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1
OUT	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0

$$P_{e0} = \frac{3}{9} = 0.33$$



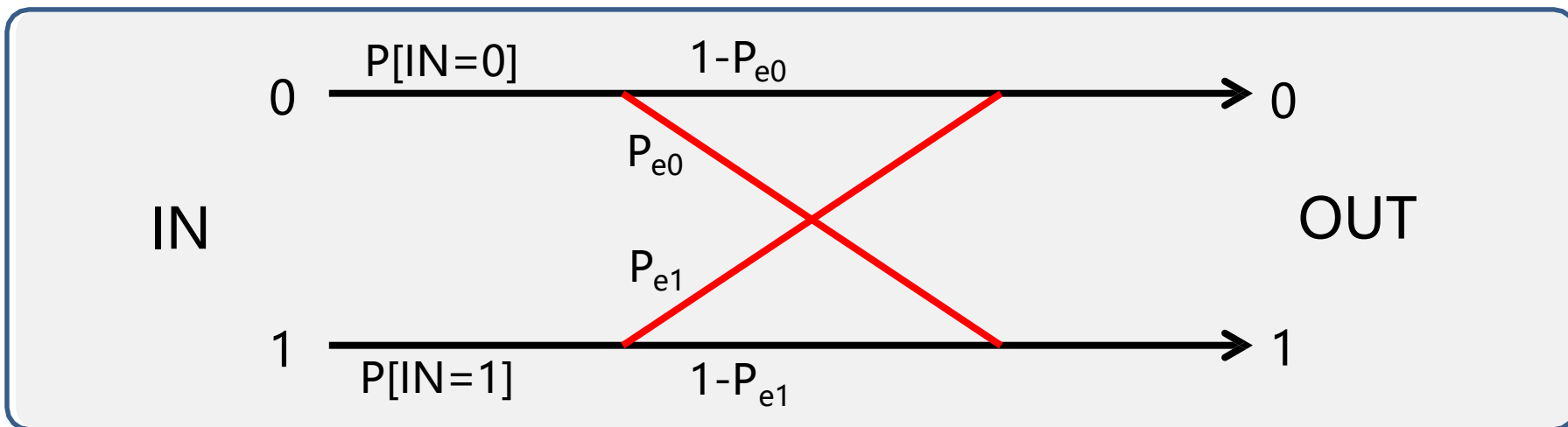
## 习题：计算二进制信道误码率

8.4.4 某二进制信道的输入和输出比特流如图所示，回答问题：

d) 如果传输比特"1"，估计错误的概率 $P_{e1}$

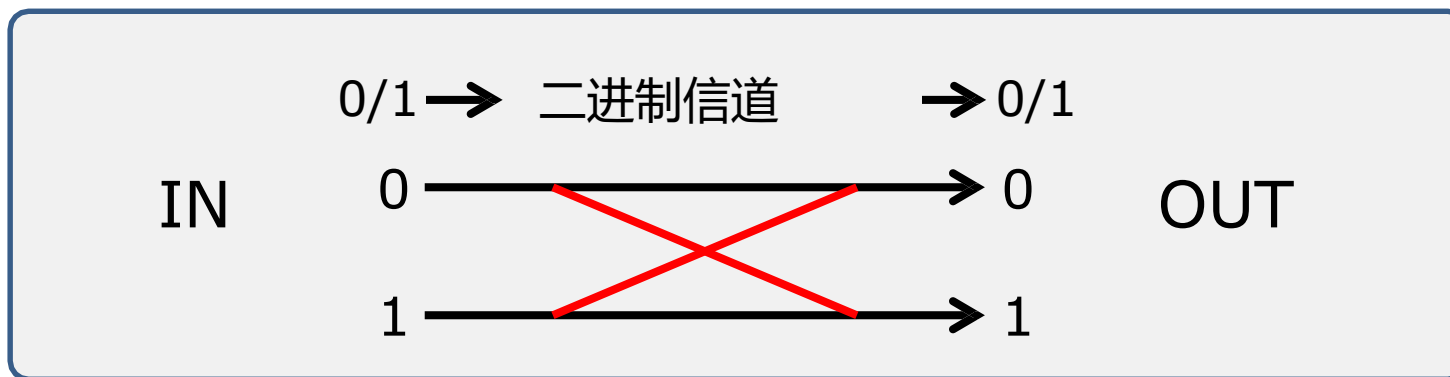
n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
IN	0	0	0	<u>1</u>	<u>1</u>	0	0	<u>1</u>	<u>1</u>	0	0	<u>1</u>	<u>1</u>	0	<u>1</u>	0	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>1</u>
OUT	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0

$$P_{e1} = \frac{2}{11} = 0.18$$



# 总结

- 噪声是通信中重要且基本的概念之一。如果没有噪声，通信中就没有困难!
- 通过假定一个简单的二进制信道模型，考虑其输入/输出比特分析系统性能。



- 用概率来计算BER

$$BER = P_{e0} \cdot P[IN = 0] + P_{e1} \cdot P[IN = 1]$$

- 通常，发送端控制 $P[IN = 0]$ 和 $P[IN = 1]$

e.g.  $P[IN = 0] = P[IN = 1] = 0.5$

# 作业：噪声自测习题

登录微助教

<http://portal.teachermate.com.cn/>

## 补充阅读

- Ref. Book: (F) Section 9-5 (P.321-324)
- Ref. Wiki: Noise  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Noise\\_\(electronics\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Noise_(electronics))
- (F) Frenzel, Louis E, "Principles of electronic communication systems." McGraw-Hill, 2008

# Thanks

## Q & A

## 参考资料

*A System View of Communications: From Signals to Packets (Part 1)*

*<https://www.edx.org/course/a-system-view-of-communications-from-signals-to-pa>*