

# NFC 通信距离扩展技术

## 卷积码仿真加噪方法修正

版本日期：2025-4-1

# 目录

1 调制方式增益仿真修正 .....	1
1.1 误码率理论值 .....	1
1.2 修正仿真结果 .....	1
1.3 修正原因 .....	1
2 卷积码仿真修正 .....	2
2.1 卷积码增益理论分析 .....	2
2.2 卷积码增益仿真结果 .....	2
2.2.1 增益受码率、约束长度的影响（不包含降速增益） .....	2
2.3 加噪方式说明与相关疑问 .....	3
2.4 编码、扩频、调制增益结果汇总 .....	4

## 1 调制方式增益仿真修正

### 1.1 误码率理论值

在  $\text{SNR}=0\text{dB}$  时, BPSK 调制误码率理论值为 0.078, ASK 调制误码率理论值为, 二者误码率曲线应相当于横向平移 6dB

### 1.2 修正仿真结果

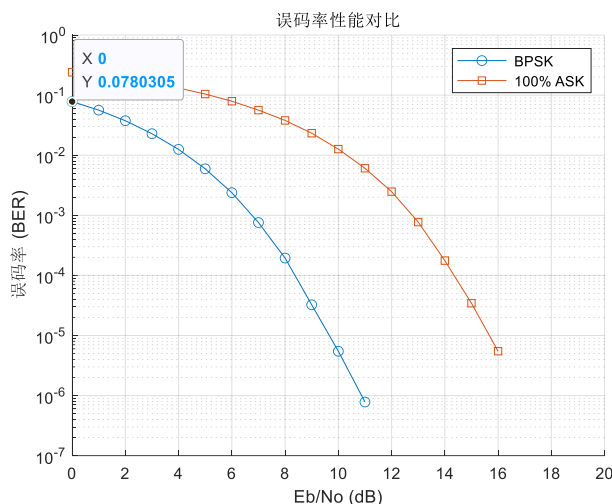


图 1 更正后的 BPSK 调制与 100%ASK 调制误码率曲线

上图可读出 BPSK 调制相对于 100%ASK 调制增益约 6dB, 与理论值吻合。

### 1.3 修正原因

在原仿真代码中, 直接使用 MATLAB 内置函数 “awgn” 加噪。该函数输入变量为待加噪信号和相应 SNR, 信号功率在函数内进行测量。由于 ASK 与 BPSK 调制后符号平均能量存在二倍差距, 而未进行能量的归一化、awgn 函数中对 BPSK 调制对应的噪声功率计算中未考虑实部噪声仅具有噪声总功率一半。两个错误叠加, 导致此前仿真中 ASK、BPSK 误码率曲线的横坐标对应关系出错, 增益与理论值出现 3dB 差值。

在此前代码中, 虽变量命名为 “EbN0\_dB”, 但实际用法上是当作 SNR 使用。

## 2 卷积码仿真修正

### 2.1 卷积码增益理论分析<sup>1</sup>

误码率与  $E_b/N_0$  关系为：

$$P_b(E) \approx \frac{w_{d_f}}{k} 2^{d_f/2} e^{-\frac{d_f E_s}{2N_0}} \approx \frac{w_{d_f}}{k} 2^{d_f/2} e^{-\frac{E_b R d_f}{N_0}} \quad (1)$$

未编码时，误码率为：

$$P_{b1}(E) \approx \frac{1}{2} e^{-\frac{E_b}{N_0}} \quad (2)$$

二者作比，得到编码增益：

$$\gamma = 10 \log \frac{R d_f}{2} \quad (3)$$

上式中， $R = k/n$ ， $d_f$  为自由距离，下表为各参数卷积码的自由距离与理论增益（不包含降速增益）。

表 1 部分最大自由距离卷积码及其理论增益计算

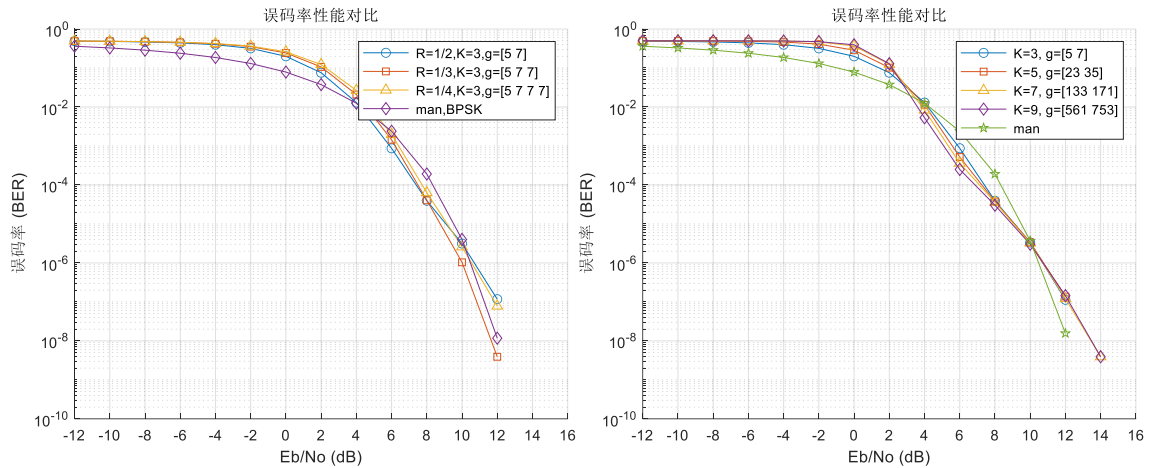
$R$	$m$	$g$	$d_f$	$\gamma$ /dB	$R$	$v$	$g$	$d_f$	$\gamma$ /dB	$R$	$v$	$g$	$d_f$	$\gamma$ /dB
$\frac{1}{2}$	3	5,7	5	1	$\frac{1}{3}$	3	5,7,7	8	1.2	$\frac{1}{4}$	3	5,7,7,7	10	1
	5	23,35	7	2.4		5	25,33,37	12	3		5	25,27,33,37	16	3
	7	133,171	10	4		7	133,145,175	15	4		7	135,135,147,163	20	4
	9	561,753	12	4.8		9	557,663,711	17	4.5		9	463,535,733,745	24	4.8

### 2.2 卷积码增益仿真结果

#### 2.2.1 增益受码率、约束长度的影响（不包含降速增益）

考虑卷积码降速影响后，修正加噪方式，以  $E_b/N_0$  为横轴重新仿真，在码长 256 条件下探究卷积码增益受约束长度、码率影响，仿真结果如图 2 所示。

<sup>1</sup> 本节卷积码增益理论分析公式来自邓家先等.信息论与编码.第 3 版[M].西安电子科技大学出版社,2016.



(1)  $K=3, R=1/2, 1/3, 1/4$  (2)  $R=1/2, K=3, 5, 7, 9$

图 2 卷积码误码率性能受约束长度、码率的影响

图 2 所示曲线的低误码率数据点所具有的误码数量如下表所示。总仿真次数均为  $1 \times 10^6$  次。

表 2 图 2(1)曲线部分低误码率数据点对应的误码数量

$E_b/N_0$	$K=3$	$K=5$	$K=7$	$K=9$	man
8	10082	10334	16301	48837	8
10	804	265	661	1024	10
12	30	1	20	3	12
14	0	0	0	0	14

表 3 图 2(2)曲线部分低误码率数据点对应的误码数量

$E_b/N_0$	$K=3$	$K=5$	$K=7$	$K=9$	man
8	10051	9630	9263	7720	48774
10	856	864	828	772	943
12	29	35	31	37	4
14	0	0	1	1	0

### 2.3 加噪方式说明与相关疑问

以  $E_b/N_0$  为横轴和以 SNR 为横轴的情形相比,在加噪方式上具有区别:将  $E_b/N_0$  换算为 SNR 后用该比例计算噪声功率,实现加噪。相应代码描述如下。

$E_b/N_0$ 为横轴	SNR 为横轴
sigPower = 1; %BPSK 调制后符号为 1, -1 两种	sigPower = 1;
ebn0 = $10^{(EbN0\_dB / 10)}$ ;	SNR = $10^{(SNR\_dB / 10)}$ ;
noisePower = sigPower / (2 * codeRate * ebn0);	noisePower = sigPower / (2 * SNR);
noise = sqrt(noisePower) * randn(size(sig));	noise = sqrt(noisePower) * randn(size(sig));
y = sig + noise;	y = sig + noise;

加噪方式的更改依据：

$$SNR = \frac{E_s \cdot R_s}{N_0 \cdot W} = \frac{E_s}{N_0} = \frac{R \cdot E_b}{N_0} \quad (1)$$

从而有：

$$P_{noise} = \frac{P_{signal}}{SNR} = \frac{P_{signal}}{R \cdot \frac{E_b}{N_0}} \quad (2)$$

**仿真疑问：**

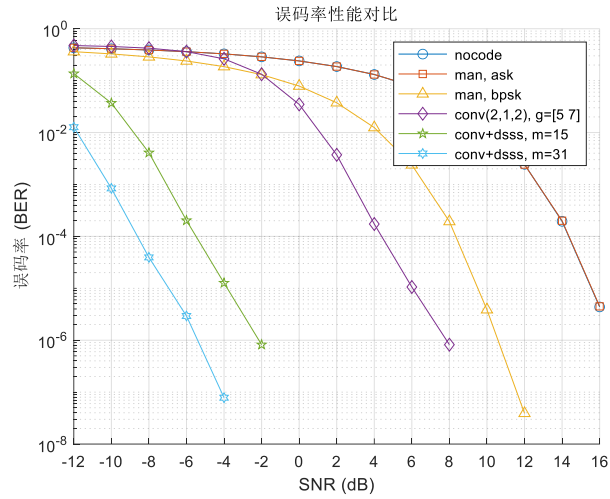
根据 2.2 节误码率曲线，似乎卷积码纠错能力带来的增益很小。

在前节所述加噪方式中，计算噪声功率时用到的码率  $R$  项仅包含卷积码的码率。作为对比的仅曼彻斯特编码的曲线，计算噪声时  $R$  取 1。因而存在以下疑问：

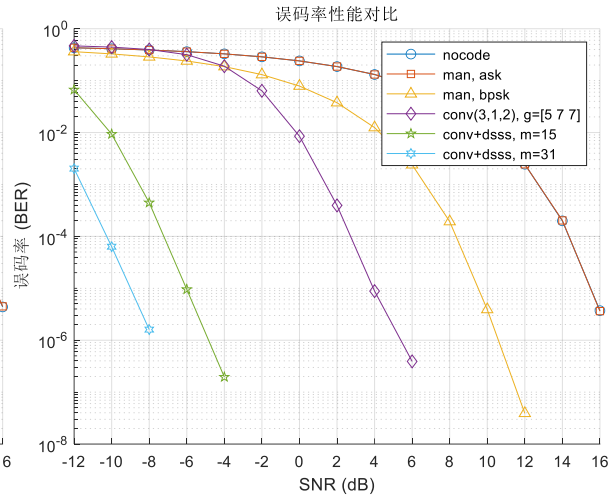
1. 前节所述关于  $SNR$ 、 $E_b/N_0$ 、 $E_s/N_0$  的关系推导是否正确？对应到加噪代码是否正确？
2. 关于降速增益，曼彻斯特编码是否可以理解为码率  $R=1/2$  的编码，是否也具有 3dB 的降速增益？（当前仿真中取  $R=1$ ，即认为  $E_b/N_0=SNR$ ）
3. 直接序列扩频是否可理解为码率为  $m$  序列长度（如  $R=1/31$ ）的编码？在以  $E_b/N_0$  为横轴时扩频增益是否要做处理？

## 2.4 编码、扩频、调制增益结果汇总

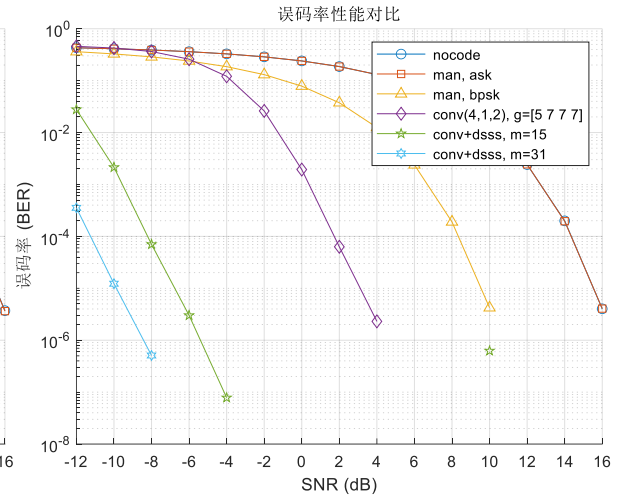
分别以  $SNR$ 、 $E_b/N_0$  为横轴，绘制无编码、曼彻斯特编码、仅卷积码编码、编辑码与扩频级联方案的误码率曲线图及相关方案增益对比表格已汇总于后续页。



(1)  $R=1/2, g=[5 \ 7]$

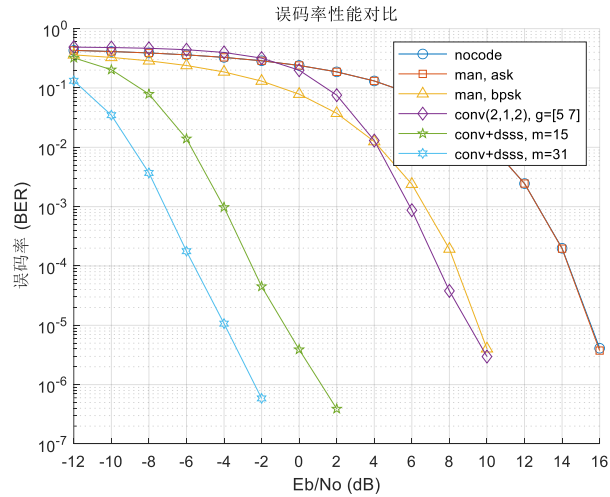


(2)  $R=1/2, g=[5 \ 7 \ 7]$

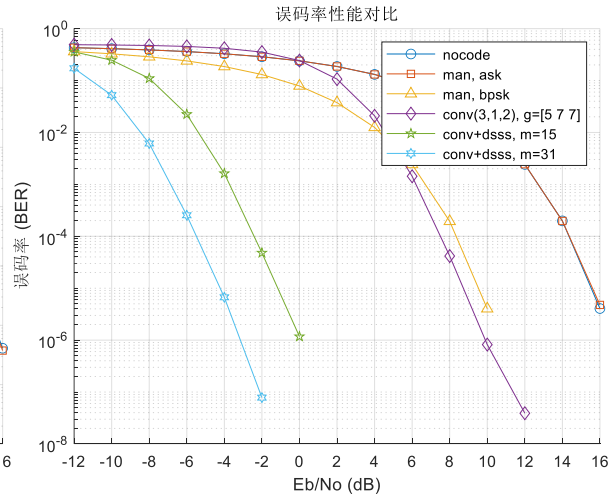


(3)  $R=1/2, g=[5 \ 7 \ 7 \ 7]$

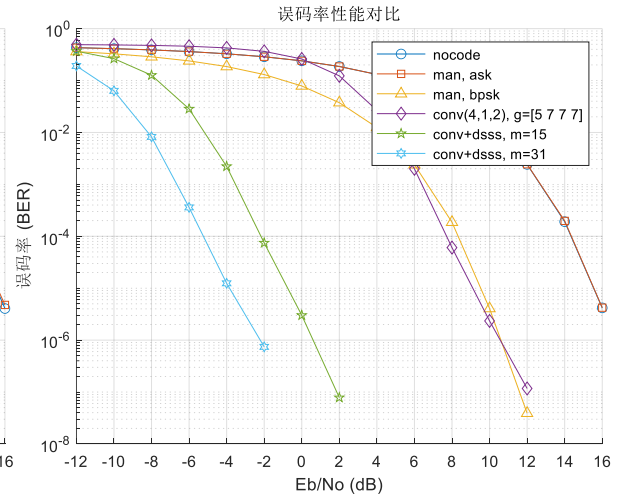
图 3 SNR 为横轴的误码率曲线



(1)  $R=1/2, g=[5 \ 7]$



(2)  $R=1/2, g=[5 \ 7 \ 7]$



(3)  $R=1/2, g=[5 \ 7 \ 7 \ 7]$

图 4  $E_b/N_0$  为横轴的误码率曲线

表 4 部分方案汇总对比

序号	调制方式 与增益/dB	卷积码参数	编码增益/dB (相对仅 Man)	扩频增益/dB (相对于仅 Conv)	速率影响	译码开销 (倍数比较, $\delta = 5v$ )	
						计算	存储
0	ASK	曼彻斯特	/	/	1/2	/	/
1	BPSK 6dB	$(n, k, v) = (2, 1, 2)$ $R = 1/2, K = 3, g = [5 \ 7]$	3.5dB (3dB+0.5dB)	$L_m = 15$ 时, 10dB $L_m = 31$ 时, 13dB	1/2 * 1/15 1/2 * 1/31	“1”	“1”
2	BPSK 6dB	$(n, k, v) = (2, 1, 4)$ $R = 1/2, K = 5, g = [23 \ 35]$	3.5dB		1/2 * 1/15 1/2 * 1/31	$\oplus$ : 4 +: 4	5.4
3	BPSK 6dB	$(n, k, v) = (3, 1, 2)$ $R = 1/3, K = 3, g = [5 \ 7 \ 7]$	5.5dB (4.7dB+0.8dB)		1/3 * 1/15 1/3 * 1/31	$\oplus$ : 1.5 +: 1	1.1
4	BPSK 6dB	$(n, k, v) = (3, 1, 4)$ $R = 1/3, K = 5, g = [25 \ 33 \ 37]$	5.5dB		1/3 * 1/15 1/3 * 1/31	$\oplus$ : 6 +: 4	5.7
5	BPSK 6dB	$(n, k, v) = (4, 1, 2)$ $R = 1/4, K = 3, g = [5 \ 7 \ 7 \ 7]$	6.5dB (6dB+0.5dB)		1/4 * 1/15 1/4 * 1/31	$\oplus$ : 2 +: 1	1.1
6	BPSK 6dB	$(n, k, v) = (4, 1, 4)$ $R = 1/4, K = 5, g = [25 \ 27 \ 33 \ 37]$	6.5dB		1/4 * 1/15 1/4 * 1/31	$\oplus$ : 8 +: 4	5.7



