

NFC 通信距离扩展技术 卷积码、扩频相关方案评估

版本日期：2025-3-18

修订记录

| 日期 | 版本 | 作者 | 备注 |
|------------|------|-----|--------------------------|
| 2025-03-17 | V1.0 | 王江浩 | 初始版本 |
| 2025-03-18 | V1.1 | 王江浩 | 会议后小修 |
| 待进行 | V1.2 | 王江浩 | 加次数重新仿真；检查加噪与调制解调代码，更新仿真 |

一些会议后的补充说明：

在 3.1 节仿真曲线图中增加了无任何编码(nocode)的曲线，发现其与仅曼彻斯特编码的曲线重合（基带信号码长一致，曼彻斯特编码后码长翻倍）。可能说明在当前仿真方法下，未能体现“降速”带来的增益

在此文档的现有分析中，关于“降速”均是由于编码、扩频导致的“码率”变化，即保持基带码长 L 不变时，经编码调制后，码长显著增加。而非编码前码元速率降低，或说调制时码元宽度 T_B 延长。

另外，现有加噪方式可能处理得不严谨，或关于信号功率的基本假设存在问题，导致未能正确仿真 BPSK 带来的增益、降速带来的增益。需补充学习通信相关基础后检查仿真逻辑，重新解释仿真数据或重新仿真。

目录

| | |
|---------------------------------|----|
| 1 卷积码误码率性能分析 | 1 |
| 1.1 卷积码参数说明 | 1 |
| 1.2 码长影响 | 1 |
| 1.2.1 性能影响 | 1 |
| 1.2.2 协议内容摘录 | 1 |
| 1.3 约束长度与码率影响 | 3 |
| 1.3.1 约束长度影响 | 3 |
| 1.3.2 码率影响 | 3 |
| 1.3.3 最小回溯深度 | 4 |
| 1.5 译码算法影响（待评估，占位） | 4 |
| 2 卷积码编译码计算、存储开销评估 | 5 |
| 2.1 编码开销评估 | 5 |
| 2.1.1 编码计算开销 | 5 |
| 2.1.2 编码存储开销 | 5 |
| 2.2 译码开销评估 | 5 |
| 2.2.1 译码计算开销 | 5 |
| 2.2.2 译码存储开销 | 7 |
| 2.3 考虑速率的编译码计算开销评估 | 7 |
| 2.3.1 协议限制 | 8 |
| 2.3.2 数据吞吐率考量 | 8 |
| 3 扩频方法评估 | 9 |
| 3.1 DSSS 扩频 | 9 |
| 3.2 其余扩频方式（待评估，占位） | 9 |
| 4 调制方法评估 | 10 |
| 4.1 当前仿真方法与相应增益 | 10 |
| 4.1.1 BPSK 调制增益（粗糙估计） | 10 |
| 4.1.2 仿真方法现存问题 | 10 |
| 4.2 待确定：调制后码元宽度 T_B | 11 |
| 5 汇总方案评估 | 12 |
| 5.1 方案对比 | 12 |
| 附录 1 最小回溯长度仿真结果汇总 | 14 |
| 附录 2 方案对比仿真结果汇总（需加循环次数重仿） | 15 |

1 卷积码误码率性能分析

1.1 卷积码参数说明

对于 (n, k, v) 的卷积码, k 为每组输入码元数, n 为每组输出码元数, v 为移位寄存器深度。生成矩阵 g 用二进制表示, 如 $g = [111\ 101]$ 。并有: 约束长度 $K = v + 1$, 码率 $R = k/n$ 。

另记: 基带信号码长为 L , 回溯深度为 δ , 译码所需路径度量 (Path Metric) 为 PM, 分支度量 (Branch Metric) 为 BM。

在后续分析中, 暂仅考虑 $k = 1$ 的情形。对于 $k > 1$ 的情形, 部分结论可能需做修正。

1.2 码长影响

1.2.1 性能影响

在 $(n, k, v) = (2, 1, 2)$, $g = [7, 5]$, 译码回溯深度 $\delta = 5v$, BPSK 调制条件下, 对码长 $L=8$, $L=32$, $L=256$, $L=1024$ 的卷积码进行误码率仿真, 结果如图 1 所示。

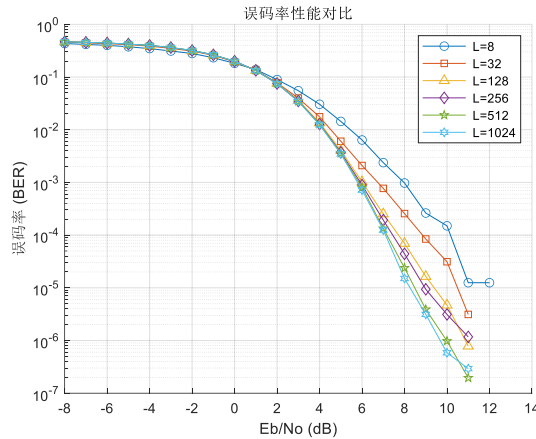


图 1 码长对卷积码误码率性能的影响

由图 1 可知, 在码长较短时, 卷积码的误码率性能会有所下降。当码长达到 $L=256$ 时, 卷积码误码率性能已达较优水平, 随码长的继续增长, 误码率性能提升不再显著。

1.2.2 协议内容摘录

ISO/IEC 14443 协议中存在一些对帧长度的限制。部分有关帧长度的规定如下:

(1) 短帧

Request and wake-up frames are used to initiate communication and consist of, in the following order:

- Start of communication
- 7 data bits transmitted LSB first. (The data content is '26' for a standard REQA and '52' for a WAKE-UP Request).
- End of communication

No parity bit is added.

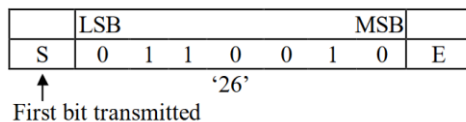


图 2 ISO/IEC 14443 协议对短帧的定义

(2) 标准帧

6.1.8 Standard frame

Standard frames are used for data exchange and consist of

- Start of communication
- $n * (8 \text{ data bits} + \text{odd parity bit})$, with $n \geq 1$. The LSB of each data byte is transmitted first. Each data byte is followed by an odd parity bit.
- End of communication

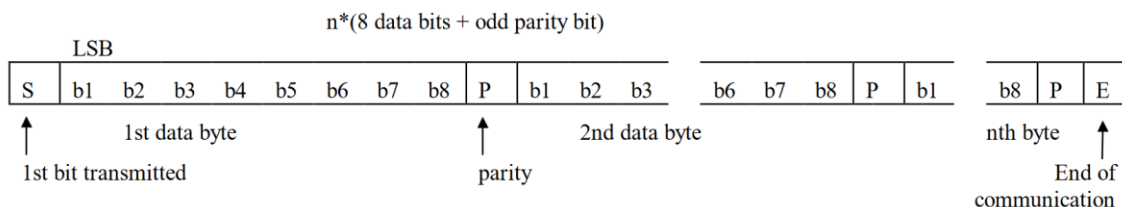


图 3 ISO/IEC 14443 协议对标准帧的定义

在图 3 所示标准帧定义中，其帧长度上限似乎并不明确。而 Type-B 的 ATQB 命令中协议信息部分包含对最大帧长度的描述，给出最大帧长度 256。

Max_Frame_Size (4 bits): see table 7.4

Table 7.4 – Maximum frame sizes

Maximum frame size that can be received by the PICC is coded as follows:

| Maximum Frame Size Code in ATQB | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9-F |
|---------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|----------|
| Maximum Frame Size (Bytes) | 16 | 24 | 32 | 40 | 48 | 64 | 96 | 128 | 256 | RFU >256 |

图 4 ISO/IEC 14443 协议对 ATQB 命令帧长度段的定义

此外，还有有关防碰撞帧的定义。本节仅关注其帧长度规定为 56。

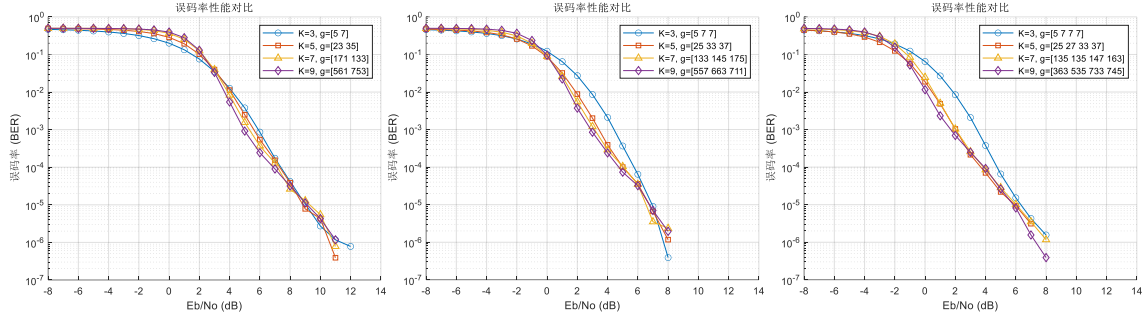
由上述协议细节可知，存在长度仅为 7bit 的短帧，Type-B 的标准帧长度也小于 256。因此，关注码长对卷积码误码率性能的影响是有必要的。

另外，需要注意的是，随着帧长度的变短，将可能影响到译码回溯长度的选择。较小的约束长度将进一步导致误码率升高。例如，当码长为 8 时，在约束长度仅为 3 的情况下，根据经验公式，最小回溯深度为 10，仍超过了码长 8，于是将不得已减小回溯深度至 8 以下。

1.3 约束长度与码率影响

本节分析卷积码误码率性能受约束长度、码率的影响，并通过仿真找到各参数组合下几乎不影响译码性能的最小回溯深度 δ_{min} 。

1.3.1 约束长度影响



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

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

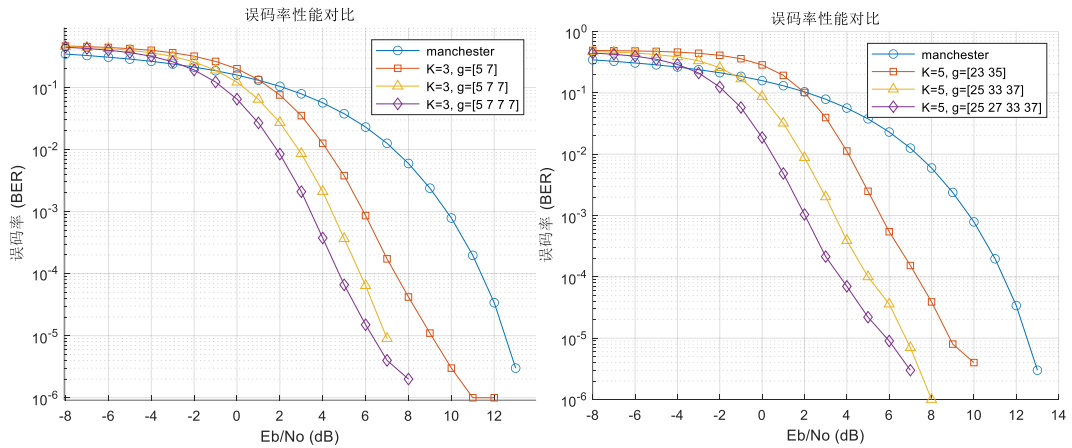
(3) $R=1/4$, $K=3,5,7,9$

图 5 一定码率下约束长度对卷积码误码率性能的影响

由图 5 可知，在相同码率下，约束长度对误码率性能的影响较小。

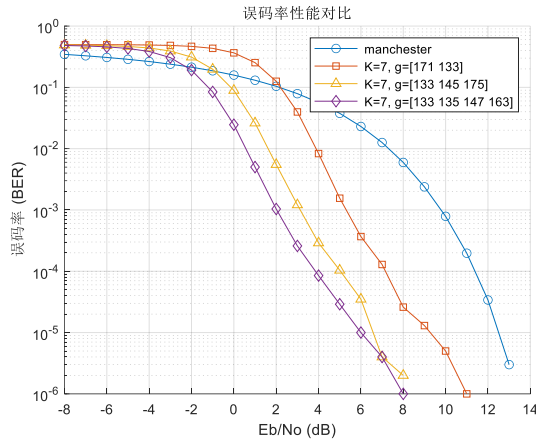
1.3.2 码率影响

一定约束长度下，码率对误码率性能的影响如图 6 所示。在每组对比中均加入仅曼彻斯特编码的误码率情况，

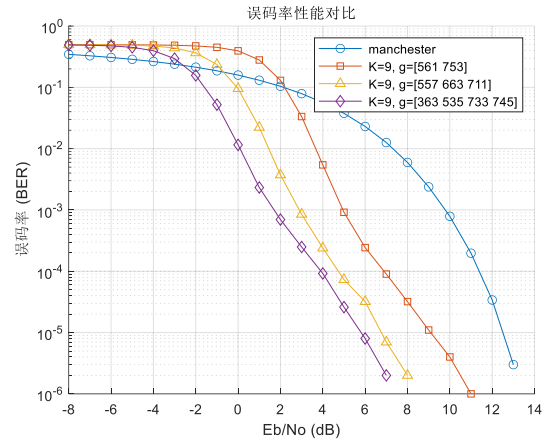


(1) $K=3$, $R=1/2, 1/3, 1/4$

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



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



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

图 6 相同约束长度下码率对卷积码误码率性能的影响

1.3.3 最小回溯深度

前述误码率性能分析中，译码回溯深度均采用经验公式 $\delta = 5v$ 。本节将寻找实际几乎不影响译码性能的最小回溯深度。

表 1 各参数卷积码的最小回溯深度

| K | R | G | δ_{min} | R | g | δ_{min} | R | g | δ_{min} |
|---|-----|---------|----------------|-----|------------|----------------|-----|---------------|----------------|
| 3 | 1/2 | [5 7] | 8 | 1/3 | [5 7 7] | 8 | 1/4 | [5 7 7 7] | 10 |
| 5 | 1/2 | [23 35] | 15 | 1/3 | [25 33 37] | 16 | 1/4 | [25 27 33 37] | 12 |

对各参数卷积码的最小回溯深度仿真结果见附录 1。值得注意的是，从附录 1 图像可看出，不同回溯深度下误码率性能较接近，且当误码率较低时，随机误差会对最小回溯深度的选取造成显著影响。因而上表所取最小回溯深度为较保守的选择，且其合理性仍有待商榷。

1.5 译码算法影响（待评估，占位）

2 卷积码编译码计算、存储开销评估

2.1 编码开销评估

2.1.1 编码计算开销

编码过程的计算只包括数次异或运算，异或运算次数取决于编码器抽头数量。以 $(n, k, v) = (2, 1, 2)$ ，生成矩阵 $g = [111\ 101]$ 的卷积码为例，其编码器如图 7 所示。

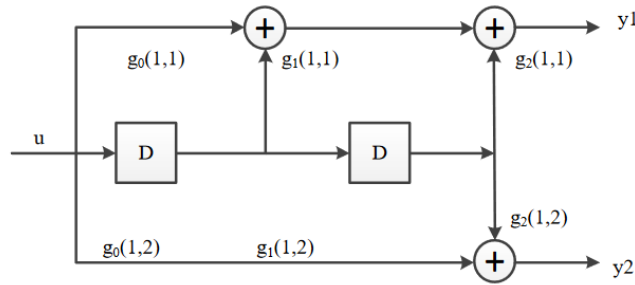


图 7 生成矩阵 $g = [111\ 101]$ 的卷积码编码器

若码长 $L = 256$ ，则其计算开销为：每 bit 输入进行 3 次异或运算，输入 $L + 3 = 259$ bit，共进行 $259 \times 3 = 777$ 次异或运算。

推广至一般情况：对于码长为 L ， (n, k, v) 的卷积码，记编码器抽头数量为 G ，则进行 $G \cdot (L + v + 1)$ 次异或运算。

其中， G 的计算为二进制表示的生成矩阵中“1”的数量，额外增加的 $(v + 1)$ bit 输入来自于将移位寄存器恢复为全 0 所需的补 0 输入。

2.1.2 编码存储开销

编码器存储开销仅为移位寄存器深度，抽头在硬件实现中由连线实现，无需占用额外存储空间。

直接考虑一般情况：存储开销为 v 。

2.2 译码开销评估

2.2.1 译码计算开销

考虑维特比译码算法，其译码过程可简述为“加比选”过程。图 8 为 $(n, k, v) = (2, 1, 2)$ ，生成矩阵 $g = [111\ 101]$ ，基带信号码长 $L=4$ 的译码网格图。

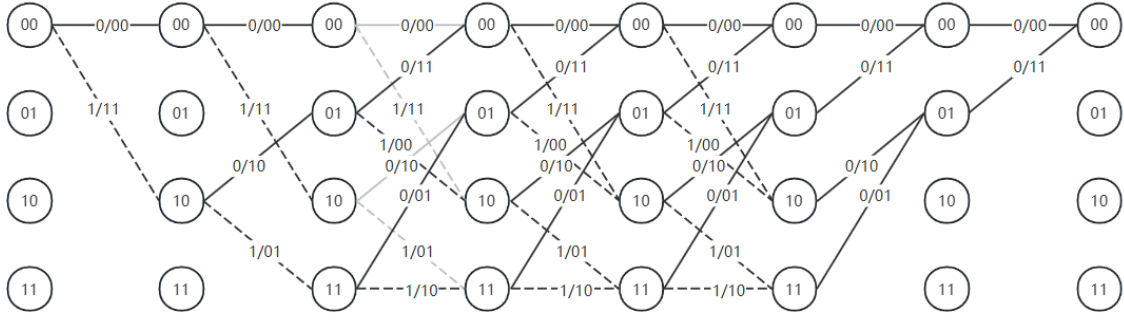


图 8 译码网格图示例

由图 8 易知，自第 3 时隙起，后续时隙为重复第 3 时隙的状态转移图形，此时各状态均有两条路径可到达，各状态也将引出两条路径指向不同状态。各时隙将进行“加比选”过程，具体为：将每条路径的累加汉明距离作为路径度量 PM ，比较到达每个状态的两条路径 PM ，保留 PM 较小的一条路径。若两路径 PM 相等，则任意保留一条。

具体地， PM 计算方法为：前一状态的累计 PM 与当前时隙新增的分值度量 BM 相加，可公式表示为：

$$PM_i = PM_{i-1} + BM_i \quad (2.1)$$

以前述 $(n, k, v) = (2, 1, 2)$ 的卷积码为例，在硬判决译码中， BM 采用汉明距离，计算过程由 2 次异或运算与 2 个单 bit 加法运算构成。满足 $0 \leq BM \leq 2$ 。

综上，自第 3 时隙起，每推进译码 1bit，需进行的计算为：

表 2 每时隙译码运算的构成

| 运算类型 | 计算构成 | 累计计算 |
|-----------------------|------------------------------|------------------------------|
| 8 个 BM | 2 次异或，1 次 $2*1\text{bit}$ 加法 | 8 次异或，4 次 $2*1\text{bit}$ 加法 |
| 8 次 $PM_{i-1} + BM_i$ | 1 次多 bit 加法运算 | 1 次多 bit 加法 |
| 4 次二选一比较 | | 4 次二选一比较 |

现考虑图 8 中在前 2 时隙、后 2 时隙状态转移路径不完整的情形。这是由于移位寄存器初始状态为全 0，结束状态也回归全 0。路径度量 PM 累加的过程自第 1 时隙即开始进行，而“比选”过程从第 3 时隙出现完整状态转移路径后才开始进行。

分析译码计算、存储开销时，若码长较长，译码过程首尾出现的状态转移路径不完整的情形可近似忽略；而码长较短时可能带来一定影响，因而本节先进行尽量严谨的分析推导。

将前述分析推广至一般情况：

表 3 译码计算开销分析-一般情况

| 运算类型（每时隙） | 计算构成 | 累计计算 | 近似值 |
|-------------------------------|-----------------------------------|---|--|
| 2^{v+1} 个 BM | n 次异或，1 次 $n \cdot 1$ bit 加法 | $(L - v + 3) \cdot n \cdot 2^{v+1}$ 次异或 $(L - v + 3) \cdot 2^{v+1}$ 次 $n \cdot 1$ bit 加法 | $L \cdot n \cdot 2^{v+1}$ $L \cdot 2^{v+1}$ |
| 2^{v+1} 次 $PM_{i-1} + BM_i$ | 1 次多位加法 | $(L - v + 3) \cdot 2^{v+1}$ 次多位加法运算 | $L \cdot 2^{v+1}$ |
| 2^v 次二选一比较 | | $(L - v + 3) \cdot 2^v$ 次二选一比较 | $L \cdot 2^v$ |

说明：表 3 中 $n \cdot 1$ bit 加法表示 n 个 1bit 数相加；完整加比选次数为 $(L - v + 1)$ ， $(L - v + 3)$ 为考虑首尾非完整加比选过程后，近似的完整加比选次数。 v 为移位寄存器长度，约束长度 $K = v + 1$ 。

2.2.2 译码存储开销

译码所需存储内容：路径度量 PM，幸存路径 SP。

（1）路径度量 PM

$$PM_i = PM_{i-1} + BM_i \quad (2.1)$$

加比选时，状态数为 2^v ，总时隙 $L + v + 1$ 。从而有：

$$(PM)_{max} = \sum_{1}^{L+v+1} (BM)_{max} \leq (L + v + 1) \cdot n \quad (2.2)$$

各时隙状态数为 2^v ，需存储 2^{v+1} 个 PM 用于比选，从而有路径度量 PM 存储开销为：

$$M_{PM} = [\log_2[(L + v + 1) \cdot n]] \cdot 2^{v+1} \quad (2.3)$$

（2）幸存路径 SP：

记回溯深度为 δ ，所需存储路径数与各时隙状态数相等，为 2^v 。各时隙状态转移路径类型数为 2^{v+1} 。若直接二进制存储各时隙路径，需 $(v + 1)$ bit 存储。若采用移位寄存器法存储，则各时隙路径仅需 1bit 存储。从而有幸存路径 SP 存储开销为：

$$M_{SP} = 2^v \cdot (v + 1) \cdot \delta \text{ 或 } M_{SP} = 2^v \cdot \delta \quad (2.4)$$

综上，卷积码维特比硬判决译码的存储开销可近似为：

$$M = [\log_2[L \cdot n]] \cdot 2^{v+1} + \delta \cdot 2^v \quad (2.5)$$

2.3 考虑速率的编译码计算开销评估

此前于 2.1.1、2.2.1 节已推导卷积码编译码的计算次数开销。为表征计算速度需

求，即单位时间内计算次数，需确定编译码延时要求或吞吐率要求。

2.3.1 协议限制

在原有协议中，存在 106kbps、212kbps 等经典值为帧传输过程中的数据速率。

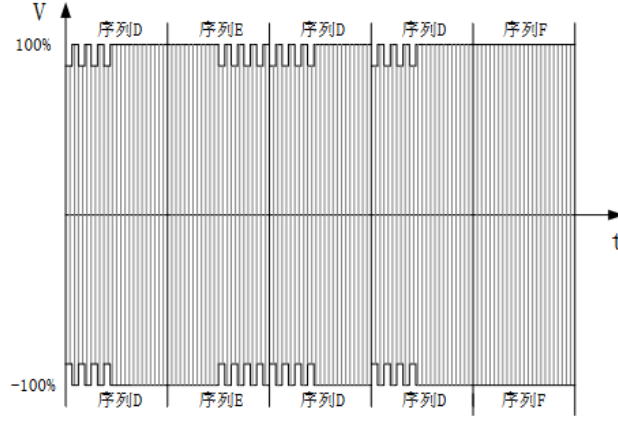


图 9 副载波调制的曼彻斯特编码示意图

如图 9 所示， $T_B = 128 \cdot T_{13.56M}$ ，从而有数据速率为 $13.56M/128 \approx 106\text{kbps}$ 。

在协议中，**暂未见**对编译码延时的限制规定。

2.3.2 数据吞吐率考量

考虑 20kbps 数据速率的连续帧传输，则译码速率应不小于数据速率。对码长为 256， $(n, k, v) = (2, 1, 2)$ 的卷积码，其译码延时至多为： $256/20k = 12.8\text{ms}$ 。将多个单比特加法与多位加法计算次数合并为 $L \cdot 2^{v+2} = 4096$ 次加法计算，相应计算速率为 $O_{add} = 4096/12.8\text{ms} = 320\text{kOPS}$ ，单位 OPS 指每秒加法运算次数。从而有计算速率要求的一般形式为：

$$O_{add} = L \cdot 2^{v+2} / (L/R_b) = 2^{v+2} \cdot R_b \quad (2.6)$$

上式 (2.6) 中， R_b 指数据速率，如经典值 106kbps。

3 扩频方法评估

3.1 DSSS 扩频

考虑以下两种扩频参数：

(1) m 序列长度 $L_m = 15$ ，抽头位置[4 1]，寄存器初值[1 0 0 0]；

(2) m 序列长度 $L_m = 31$ ，抽头位置[5 3 2]，寄存器初值[1 0 0 0 0]；

对仅曼彻斯特编码、仅卷积码编码、卷积码与扩频叠加方案进行对比，并测试不同参数卷积码，其中一种卷积码参数下对比结果如图 10 所示，其余结果见附录 2。

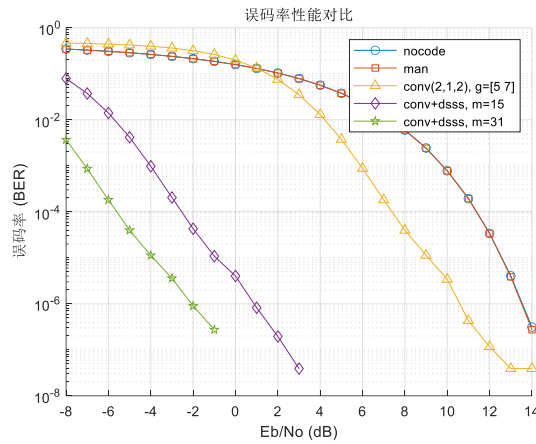


图 10 扩频增益

由图 10 与附录 2 中图像可见，m 序列长度 $L_m = 15$ 时扩频增益约为 10dB；m 序列长度 $L_m = 31$ 时扩频增益约为 13dB。

此外，观察到曼彻斯特编码与无编码的两条曲线高度重合，可能说明当前仿真方法无法表现降速带来的增益，而主要体现编码方法带来的增益。（不确定的推断）

3.2 其余扩频方式（待评估，占位）

4 调制方法评估

4.1 当前仿真方法与相应增益

4.1.1 BPSK 调制增益（粗糙估计）

对 $(n, k, v) = (2, 1, 2)$ ，码长为 256，生成矩阵 $g=[5 \ 7]$ 的卷积码进行调制方式对比仿真，所对比调制方式为 30% ASK 调制、100% ASK 调制、BPSK 调制。结果如图 11 所示。

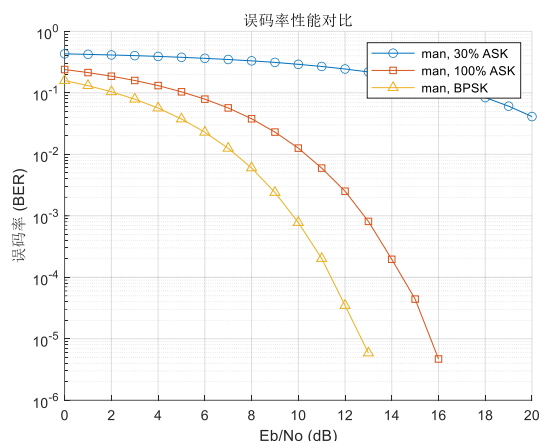


图 11 调制方式增益

由图 11 可知，相较于 100% ASK 调制，BPSK 调制可带来约 3dB 增益。

4.1.2 仿真方法现存问题

当前仿真中，调制前后码元均为离散的单点数据，而非向 13.56MHz 载波直接调制。因而所体现的受噪声的影响、引入的误码可能较粗糙。

```
switch lower(modulation_cell{1})
case {'ask'}
ask_depth = modulation_cell{2};
ASK_amplitude_0 = 1 - ask_depth;
ASK_amplitude_1 = 1;
for i_x = 1 : length(x)
if x(i_x) == 1
x_modulated(i_x) = ASK_amplitude_1; % 幅度为1
else % 二进制0或双极性-1均可
x_modulated(i_x) = ASK_amplitude_0; % 幅度为0
end
end
case {'bpsk'}
x_modulated = 1 - 2 * x;
end

switch lower(modulation_cell{1})
case {'ask'}
ask_depth = modulation_cell{2};
hard_threshold_ask = 1 - ask_depth / 2;
y_demodulated = (y_noisy > hard_threshold_ask);
case {'bpsk'}
y_demodulated = (y_noisy <= 0);
end
```

图 12 当前仿真中调制解调实现方法

可能的细化方案：

- (1) 在 MATLAB 中实现数字解调。FIR 数字滤波器：涉及采样率、窗函数设计

等较多参数，暂未深入学习；

(2) MATLAB Simulink 构建新仿真框架？（暂未调研）；

(3) 会议笔记：需学习信号功率、SNR 等内容，检查代码，搞清应如何表征增益；增加仿真次数，在低误码率部分至少 100 个误码才基本可信，现有曲线不可靠。

4.2 待确定：调制后码元宽度 T_B

码元宽度 T_B 即码元持续时间。此处码元指经卷积码编码、扩频操作后，调制前信号序列的码元。

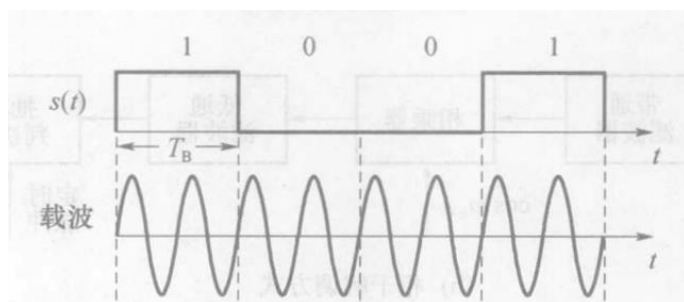


图 13 码元宽度 T_B 示意图

码元宽度 T_B 将直接用于后续章节方案评估中数据速率的计算：

$$R_b = \frac{1}{R_{conv} \cdot R_{dsss} \cdot T_B} \quad (4.1)$$

为方便计算数据速率，可用 k_B 表示码元对应的载波周期数，即

$$k_B = T_B / T_{13.56M} \quad (4.2)$$

从而有：

$$R_b = \frac{13.56 \times 10^3}{R_{conv} \cdot R_{dsss} \cdot k_B} \text{ kbps} \quad (4.3)$$

5 汇总方案评估

5.1 方案对比

表格见下页，相应仿真结果汇总于附录 2。

表格说明：

- （1）由于现有仿真在 ASK 到 BPSK 的增益分析存在问题，参考基准“序号 0”暂统一用 BPSK 调制；
- （2）编码的计算和存储开销均较小，暂仅考虑译码开销；
- （3）将多个单 bit 加法与多位加法计算次数合并为 2^{v+2} 次，表示为“+”，异或运算表示为“ \oplus ”。

表 4 部分方案汇总对比

| 序号 | 调制方式 | 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) | | |
|----|------|--|----------------------|--|------------------------------|-------------------------|---------------|----------------|
| | | | | | | 计算 | 存储 | |
| | | | | | | | $\delta = 5v$ | δ_{min} |
| 0 | BPSK | 曼彻斯特 | / | / | 1/2 | / | / | / |
| 1 | BPSK | $(n,k,v) = (2,1,2)$ $R=1/2, K=3, g=[5\ 7], \delta_{min} = 8$ | 3.3dB | $L_m = 15$ 时, 10dB $L_m = 31$ 时, 13dB | $1/2 * 1/15$ $1/2 * 1/31$ | “1” | “1” | “1” |
| 2 | BPSK | $(n,k,v) = (2,1,4)$ $R=1/2, K=5, g=[23\ 35], \delta_{min} = 15$ | 3.5dB | | $1/2 * 1/15$ $1/2 * 1/31$ | $\oplus: 4$ $+: 4$ | 5.4 | 5.1 |
| 3 | BPSK | $(n,k,v) = (3,1,2)$ $R=1/3, K=3, g=[5\ 7\ 7], \delta_{min} = 8$ | 5.5dB | | $1/3 * 1/15$ $1/3 * 1/31$ | $\oplus: 1.5$ $+: 1$ | 1.1 | 1.1 |
| 4 | BPSK | $(n,k,v) = (3,1,4)$ $R=1/3, K=5, g=[25\ 33\ 37], \delta_{min} = 16$ | 5.5dB | | $1/3 * 1/15$ $1/3 * 1/31$ | $\oplus: 6$ $+: 4$ | 5.7 | 5.5 |
| 5 | BPSK | $(n,k,v) = (4,1,2)$ $R=1/4, K=3, g=[5\ 7\ 7\ 7], \delta_{min} = 10$ | 6.5dB | | $1/4 * 1/15$ $1/4 * 1/31$ | $\oplus: 2$ $+: 1$ | 1.1 | 1.2 |
| 6 | BPSK | $(n,k,v) = (4,1,4)$ $R=1/4, K=5, g=[25\ 27\ 33\ 37], \delta_{min} = 12$ | 6.5dB | | $1/4 * 1/15$ $1/4 * 1/31$ | $\oplus: 8$ $+: 4$ | 5.7 | 4.9 |

附录 1 最小回溯长度仿真结果汇总

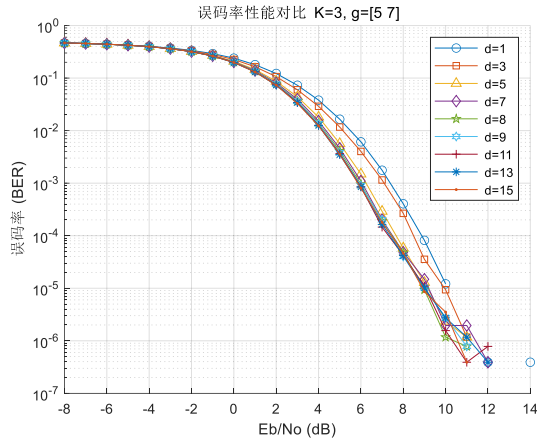
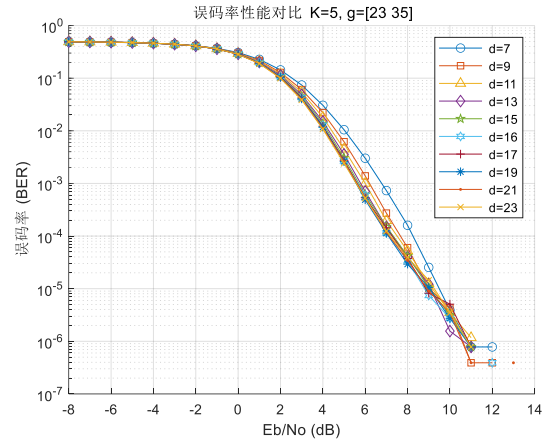
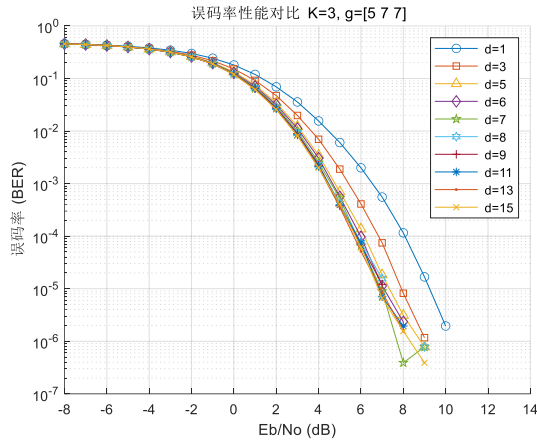
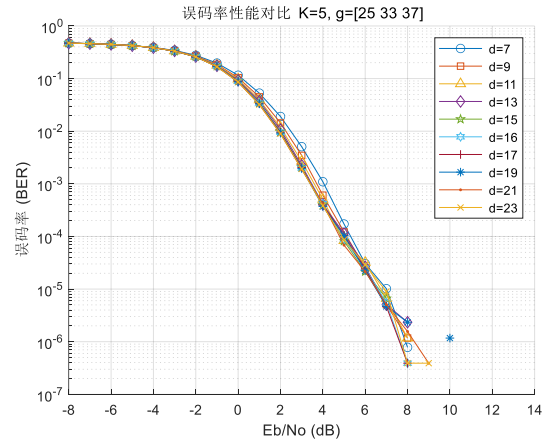
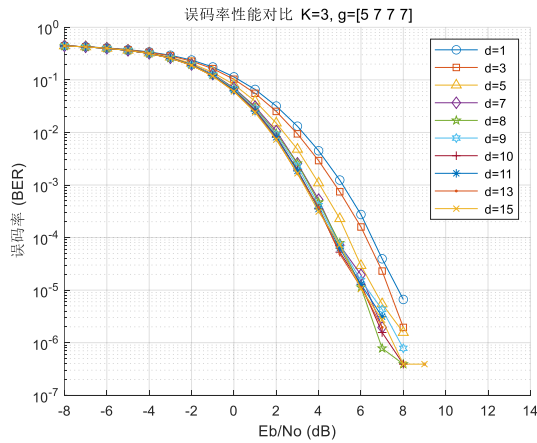
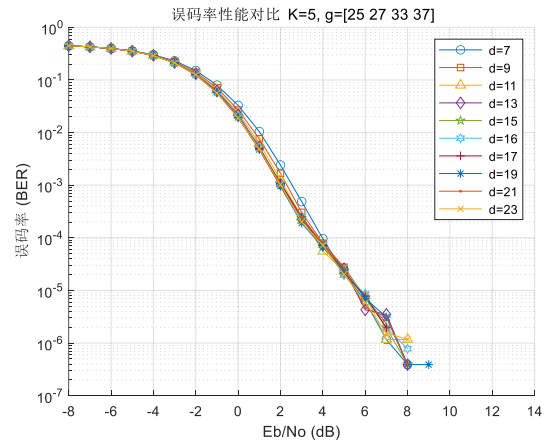
(1) $R=1/2, K=3, g=[5\ 7]$ (2) $R=1/2, K=5, g=[23\ 35]$ (3) $R=1/3, K=3, g=[5\ 7\ 7]$ (4) $R=1/3, K=5, g=[25\ 33\ 37]$ (5) $R=1/4, K=3, g=[5\ 7\ 7\ 7]$ (6) $R=1/4, K=5, g=[25\ 27\ 33\ 37]$

图 14 各参数卷积码最小回溯深度仿真结果

附录 2 方案对比仿真结果汇总 (需加循环次数重仿)

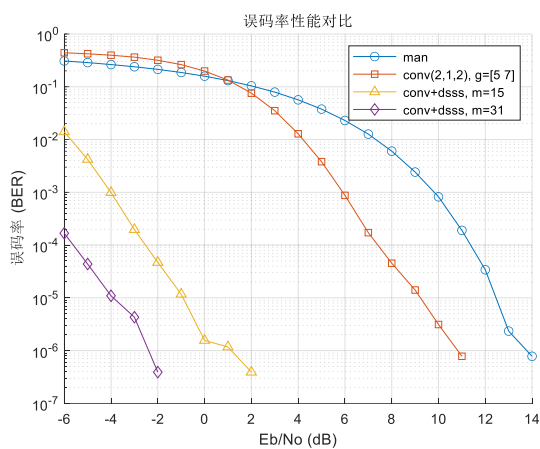
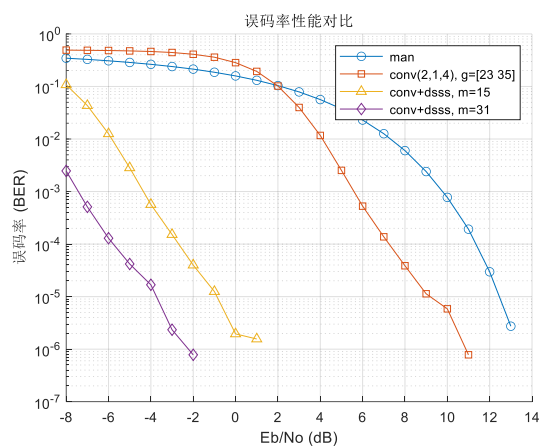
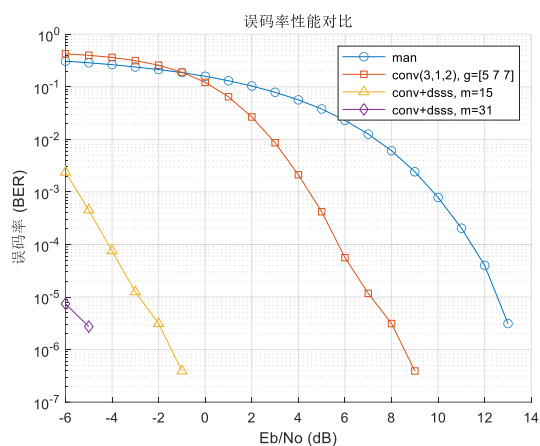
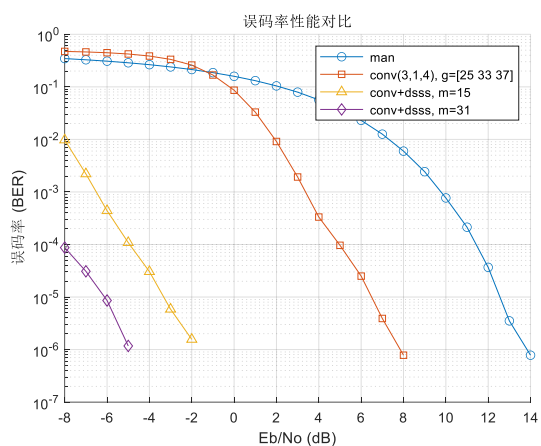
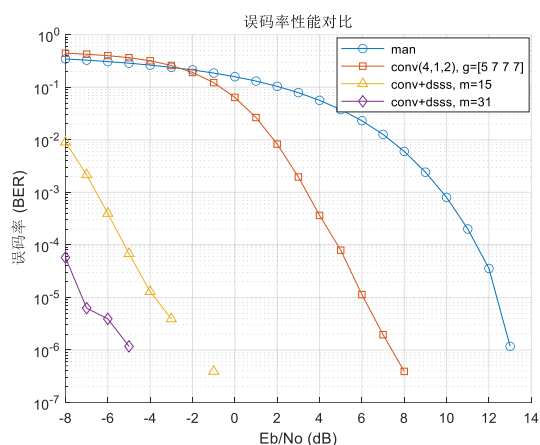
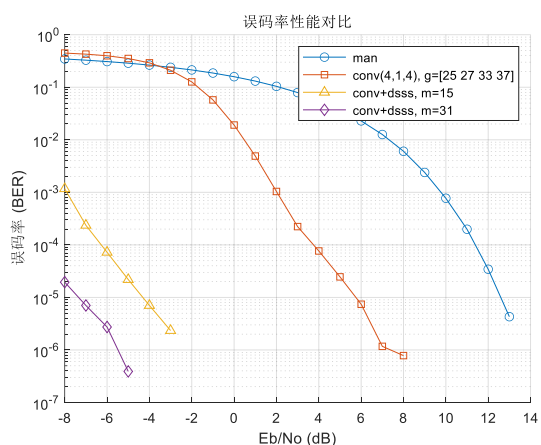
(1) $R=1/2$, $K=3$, $g=[5\ 7]$ (2) $R=1/2$, $K=5$, $g=[23\ 35]$ (3) $R=1/3$, $K=3$, $g=[5\ 7\ 7]$ (4) $R=1/3$, $K=5$, $g=[25\ 33\ 37]$ (5) $R=1/4$, $K=3$, $g=[5\ 7\ 7\ 7]$ (6) $R=1/4$, $K=5$, $g=[25\ 27\ 33\ 37]$

图 15 各方案增益效果仿真结果