



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 106788458 B

(45)授权公告日 2020.05.12

(21)申请号 201611097459.3

(22)申请日 2016.12.02

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 106788458 A

(43)申请公布日 2017.05.31

(73)专利权人 天津大学

地址 300072 天津市南开区卫津路92号

(72)发明人 张林林 陈为刚 杨晋生 刘敬浩

(74)专利代理机构 天津市北洋有限责任专利代
理事务所 12201

代理人 李林娟

(51)Int.Cl.

H03M 13/11(2006.01)

(56)对比文件

CN 105703781 A,2016.06.22,

CN 105450236 A,2016.03.30,

CN 101217284 A,2008.07.09,

顾丽萍.纠正同步错误的级联码研究.《万方
学位论文》.2015,第12-35页.

审查员 叶峰

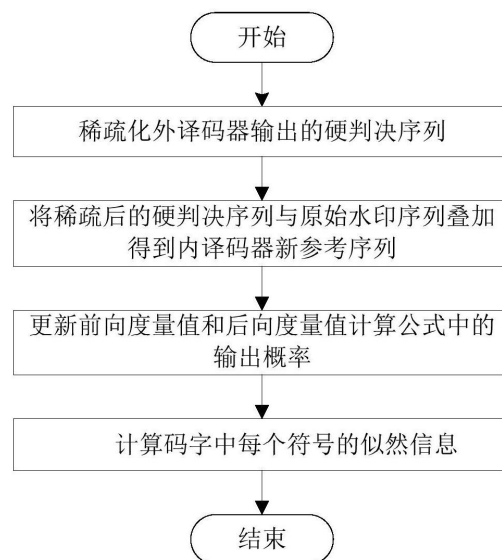
权利要求书4页 说明书8页 附图8页

(54)发明名称

面向插入删节与替代错误的硬判决导向前
后向估计方法

(57)摘要

本发明公开了一种面向插入删节与替代错误的硬判决导向前后向估计方法,属于数字通信差错控制编码领域,本发明针对级联水印与纠错码的方案,用于插入删节错误估计的前后向算法引入外译码器输出的硬判决结果,使得内译码器的参考序列为水印序列与稀疏化后的硬判决码字序列的叠加;引入硬判决导向的水印译码器,利用该参考序列和更新后的有效替代错误概率重新计算输出概率,进一步计算前向度量值和后向度量值,提高了前后向估计方法输出给外译码器的每个符号的似然信息的可靠度。本发明与传统处理方案相比,提高了前后向方法估计准确度,以较小的额外复杂度获得了较大的性能增益。



1. 一种面向插入删节与替代错误的硬判决导向前后向估计方法,其特征在于,所述方法包括以下步骤:

(1) 针对采用级联水印与纠错码的方案,利用外译码器输出的硬判决码字序列生成水印译码器新的参考序列;

(2) 更新描述接收序列的隐马尔可夫过程的状态输出概率 $Q_{x_j, x_{j+1}}^j$,即由j时刻的同步漂移状态 x_j 转移至j+1时刻的同步漂移状态 x_{j+1} 时产生序列 $\mathbf{r}_{j+x_j}^{j+x_{j+1}}$ 的概率,其中j时刻表示接收码字中第j-1个比特已传输、第j个比特待传输的时刻,漂移状态 x_j 是指从第0个传输比特到第j个传输比特由信道产生的全部插入比特数与全部删节比特数之差,

$$x_j, x_{j+1} \in \{-x_{\max}, \dots, 0, \dots, x_{\max}\},$$

其中 x_{\max} 是内译码器设定的最大漂移,且满足 $x_{j-1} \leq x_{j+1} \leq x_j + I$, I是最大连续插入比特数, $\mathbf{r}_{j+x_j}^{j+x_{j+1}}$ 为接收子序列 $(r_{j+x_j}, r_{j+x_j+1}, \dots, r_{j+x_{j+1}})$, $0 \leq j \leq N$, N是码字的比特长度;

(3) 递归计算硬判决导向的前向度量值和后向度量值,并利用更新后的前向和后向度量值计算码字中第i个符号 d_i 的似然信息 $P(d_i | r)$,其中 $d_i \in \{0, 1, \dots, 2^k - 1\}$ 为LDPC码字中第i个符号的取值, $0 \leq i < N/n$, k为稀疏前一个符号包含的比特数, n为稀疏后一个符号包含的比特数, N/n 为码字中符号总个数, r为接收序列,具体为,

(3.1) 递归计算j时刻漂移状态为y时的前向度量值 $F_j(y)$,其中 $0 \leq j \leq N$, $-x_{\max} \leq y \leq x_{\max}$,具体步骤为,

$$(3.1.1) \text{ 初始化0时刻的前向度量值 } F_0(y) = \begin{cases} 1 & y = 0 \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \text{ 和 } j = 1;$$

(3.1.2) 设当前时刻漂移状态 $y = -x_{\max}$;

(3.1.3) 令前一时刻的漂移状态 $a = y - I$;

(3.1.4) 判断a是否满足 $-x_{\max} \leq a \leq x_{\max}$,若不满足判断条件,令a加1,重复步骤(3.1.4)直至满足判断条件;若满足判断条件,令由前一时刻的漂移状态a转移至当前时刻漂移状态y的一次前向度量的概率 $F_j^a(y) = 0$,执行步骤(3.1.5);

(3.1.5) 利用求出的输出概率,按照公式 $F_j^a(y) = F_{j-1}(a) \cdot P_{ay} \cdot Q_{ay}^{j-1}$ 计算当前 $F_j^a(y)$ 值,其中, $F_{j-1}(a)$ 为j-1时刻漂移状态为a时的前向度量值, $P_{a,y}$ 为由前一时刻的漂移状态a转移至当前时刻漂移状态y的转移概率, Q_{ay}^{j-1} 为由前一时刻的漂移状态a转移至当前时刻漂移状态y的输出概率;

(3.1.6) 判断a是否满足 $a = y + 1$,若不满足判断条件,令a加1,重复步骤(3.1.4)至(3.1.6)直至满足条件;若满足判断条件,利用公式 $F_j(y) = \sum_{a=y-I}^{y+1} F_j^a(y)$,即得到j时刻漂移状态为y时的前向度量值;

(3.1.7) 判断y是否满足 $y = x_{\max}$,若不满足判断条件,令y加1,重复步骤(3.1.3)至(3.1.7)直至满足判断条件;若满足判断条件,执行步骤(3.1.8);

(3.1.8) 判断j是否满足 $j = N$,若不满足判断条件,令j加1,重复步骤(3.1.2)至(3.1.8)直至满足判断条件;若满足判断条件,输出时刻0到N所有漂移状态时的前向度量值;

(3.2) 递归计算j时刻漂移状态为y时的后向度量值 $B_j(y)$, 其中 $0 \leq j \leq N$, $-x_{\max} \leq y \leq x_{\max}$, 具体步骤为,

(3.2.1) 初始化 $j=N$, 并重新初始化当前块的后向度量值 $B_N(y) = \begin{cases} 1 & y = \hat{y}_N \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$, 其中

$\hat{y}_N = \arg \max_y F_N(y) B_N(y)$ 为块末端的最大可能偏移量;

(3.2.2) 设当前时刻漂移状态 $y = -x_{\max}$;

(3.2.3) 令后一时刻的漂移状态 $b = y + I$;

(3.2.4) 判断b是否满足 $-x_{\max} \leq b \leq x_{\max}$, 若不满足判断条件, 令b减1, 重复步骤(3.2.4)直至满足判断条件; 若满足判断条件, 令由当前时刻漂移状态y转移至后一时刻的漂移状态b的一次后向度量的概率 $B_j^b(y) = 0$, 执行步骤(3.2.5);

(3.2.5) 利用求出的输出概率, 按照公式 $B_j^b(y) = B_{j+1}(b) \cdot P_{yb} \cdot Q_{yb}^j$ 计算当前 $B_j^b(y)$ 值, 其中, $B_{j+1}(b)$ 为j+1时刻漂移状态为b时的前向度量值, P_{yb} 为由前一时刻的漂移状态y转移至当前时刻漂移状态b的转移概率, Q_{yb}^j 为由前一时刻的漂移状态y转移至当前时刻漂移状态b的输出概率;

(3.2.6) 判断b是否满足 $b = y - 1$, 若不满足判断条件, 令b减1, 重复步骤(3.2.4)至(3.2.6)直至满足条件; 若满足判断条件, 利用公式 $B_j(y) = \sum_{b=y-1}^{y+I} B_j^b(y)$, 即得到j时刻漂移状态为y时的后向度量值;

(3.2.7) 判断y是否满足 $y = x_{\max}$, 若不满足判断条件, 令y加1, 重复步骤(3.2.3)至(3.2.7)直至满足判断条件; 若满足判断条件, 执行步骤(3.2.8);

(3.2.8) 判断j是否满足 $j = 0$, 若不满足判断条件, 令j减1, 重复步骤(3.2.2)至(3.2.8)直至满足判断条件; 若满足判断条件, 输出每一时刻j下所有漂移状态时的后向度量值;

(3.3) 递归计算硬判决导向的前向度量值和后向度量值, 并利用更新后的前向和后向度量值码字中每个符号的似然信息 $P(d_i | \mathbf{r})$, 其中 \mathbf{r} 为接收序列, $d_i \in \{0, 1, \dots, 2^k - 1\}$ 为LDPC码字中第i个符号的可能取值, $0 \leq i < N/n$, k为稀疏前一个符号包含的比特数, n为稀疏后一个符号包含的比特数, 具体为,

(3.3.1) 初始化 $i = 0$;

(3.3.2) 令 $d_i = 0$;

(3.3.3) 初始化 $x_{n \times i} = -x_{\max}$;

(3.3.4) 初始化 $x_{n \times (i+1)} = -x_{\max}$;

(3.3.5) 计算中间度量值 $M = P(\mathbf{r}^0, x_{n \times (i+1)} | x_{n \times i}, d_i)$, 其中 \mathbf{r}^0 为 $(r_{n \times i + x_{n \times i}}, \dots, r_{n \times (i+1) + x_{n \times (i+1)} - 1})$;

(3.3.6) 令 $P(d_i | \mathbf{r})|_{x_{n \times (i+1)}}^{x_{n \times i}} = 0$;

(3.3.7) 按照公式 $P(d_i | \mathbf{r})|_{x_{n \times (i+1)}}^{x_{n \times i}} = F_{n \times i}(x_{n \times i}) \cdot P(\mathbf{r}^0, x_{n \times (i+1)} | x_{n \times i}, d_i) \cdot B_{n \times (i+1)}(x_{n \times (i+1)})$

计算当前 $P(d_i | \mathbf{r})|_{x_{n \times (i+1)}}^{x_{n \times i}}$ 的值;

(3.3.8) 判断 $x_{n \times (i+1)}$ 是否满足条件 $x_{n \times (i+1)} = x_{\max}$, 若不满足判断条件, 令 $x_{n \times (i+1)}$ 加1, 重

复步骤(3.3.5)至(3.3.8)直至满足判断条件;若满足判断条件,执行步骤(3.3.9);

(3.3.9) 判断 $x_{n \times i}$ 是否满足条件 $x_{n \times i} = x_{\max}$,若不满足判断条件,令 $x_{n \times i}$ 加1,重复步骤(3.3.4)至(3.3.9)直至满足判断条件;若满足判断条件,利用公式 $P(d_i | \mathbf{r}) = \sum_{x_{n \times i}, x_{n \times (i+1)}} P(d_i | \mathbf{r})^{x_{n \times i}}_{x_{n \times (i+1)}}$,即得到LDPC码字第i个符号取 d_i 时的比特级似然概率;

(3.3.10) 判断 d_i 是否满足 $d_i = 2^k - 1$,若不满足判断条件,令 d_i 加1,重复步骤(3.3.3)至(3.3.10)直至满足判断条件;若满足判断条件,执行步骤(3.3.11);

(3.3.11) 判断i是否满足条件 $i = N/n$,若不满足判断条件,令i加1,重复步骤(3.3.2)至(3.3.11)直至满足判断条件;若满足判断条件,输出第0个符号到第N/n个符号所有可能取值时的似然信息;

所述利用外译码器输出的硬判决码字序列生成水印译码器新的参考序列具体为:

(1.1) 将外译码器硬判决后码字的估计序列 $\hat{\mathbf{m}}$ 进行稀疏化得到稀疏序列 $\hat{\mathbf{s}}$,其中 $\hat{\mathbf{m}}$ 码长为 Nk/n 比特, $\hat{\mathbf{s}}$ 为N比特;

(1.2) 令 $\mathbf{w}' = \mathbf{w} \oplus \hat{\mathbf{s}}$,生成内译码器新的参考序列 \mathbf{w}' ,其中 \mathbf{w} 为N比特的原始水印序列。

2. 根据权利要求1所述的一种面向插入删节与替代错误的硬判决导向前后向估计方法,其特征在于,所述更新描述接收序列的隐马尔可夫过程的状态输出概率 $Q_{x_j, x_{j+1}}^j$,即由j时刻的同步漂移状态 x_j 转移至j+1时刻的同步漂移状态 x_{j+1} 时产生序列 $\mathbf{r}_{j+x_j}^{j+x_{j+1}}$ 的概率,其中j时刻表示接收码字中第j-1个比特已传输、第j个比特待传输的时刻,漂移状态 x_j 是指从第0个传输比特到第j个传输比特由信道产生的全部插入比特数与全部删节比特数之差具体为:

(2.1) 更新等效码字序列密度 $f=0$,并初始化等效替代错误概率 $P_f = P_s$,其中 P_s 为信道的替代错误概率, $0 \leq j < N$;

(2.2) 根据当前j时刻的同步漂移状态 x_j 与j+1时刻的同步漂移状态 x_{j+1} 之间的联系,计算转移概率 $P_{x_j, x_{j+1}} = P(x_{j+1} | x_j)$,具体为,

若 $x_{j+1} = x_j - 1$,则 $P_{x_j, x_{j+1}} = P_d$;

若 $x_{j+1} = x_j$,则 $P_{x_j, x_{j+1}} = \alpha_I P_i P_d + P_t$;

若 $x_j < x_{j+1} < x_j + I$,则 $P_{x_j, x_{j+1}} = \alpha_I [(P_i)^{b-a+1} P_d + (P_i)^{b-a} P_t]$;

若 $x_{j+1} = x_j + I$,则 $P_{x_j, x_{j+1}} = \alpha_I (P_i)^I P_t$;

否则 $P_{x_j, x_{j+1}} = 0$, $Q_{x_j, x_{j+1}}^j = 0$,其中 $\alpha_I = 1 / (1 - (P_i)^I)$ 为考虑最大插入长度I的归一化常数, P_d 为删节概率; P_i 为插入概率; P_t 为传输概率;

(2.3) 计算 $A = [\alpha_I (P_i)^{x_{j+1}-x_j+1} (\frac{1}{2})^{x_{j+1}-x_j+1}] \cdot P_d$, $B = [\alpha_I (P_i)^{x_{j+1}-x_j} (\frac{1}{2})^{x_{j+1}-x_j}] \cdot P_t$,其中,A为插入 $x_{j+1}-x_j+1$ 个比特并删节发送比特的概率;B为插入 $x_{j+1}-x_j$ 个比特并传输发送比特的概率;

(2.4) 判断接收比特串 $\mathbf{r}_{j+x_j}^{j+x_{j+1}}$ 中的最后一个比特 $r_{j+x_{j+1}}$ 是否满足判断条件 $r_{j+x_{j+1}} = w'_j$,其中 w'_j 为内译码器新的参考序列 \mathbf{w}' 在第j位的取值,若满足判断条件,输出概率

$$Q_{x_j, x_{j+1}}^j = \frac{A + B \cdot (1 - P_f)}{P_{x_j, x_{j+1}}} ; \text{若不满足判断条件, 输出概率 } Q_{x_j, x_{j+1}}^j = \frac{A + B \cdot P_f}{P_{x_j, x_{j+1}}} \text{。}$$

面向插入删节与替代错误的硬判决导向前后向估计方法

技术领域

[0001] 本发明涉及数字通信差错控制编码领域,尤其涉及一种面向插入删节与替代错误的硬判决导向前后向估计方法。

背景技术

[0002] 在信息传输或存储过程中,由于定时和同步的偏差等原因,造成符号的插入或删节,称为同步错误,包括插入或删节错误。插入或删节错误与传统替代错误(例如二进制对称信道或二进制删除信道中存在的错误)有较大差别。由于被插入与删节错误干扰的信道具有记忆性,单个未被纠正的同步错误会引发一系列突发性的替代错误,造成灾害性的错误传播,适用于无记忆信道和加性噪声的传统纠错编码技术很少能直接应用到插入与删节错误纠正问题中。因此,插入与删节错误纠错码方案的设计是一个非常有挑战性的问题。

[0003] 目前,针对插入删节与替代错误的基于级联码的编译码方案是目前认为最有潜力的方案。其主要思想是将一个可帮助接收端识别同步错误的内码与一个具有较好纠正替代错误能力的外码级联,达到纠正同步错误的目的。在Davey和Mackay提出的级联方案中,采用的内码为水印码,外码为非二进制低密度奇偶校验码(NB-LDPC)。发送端,NB-LDPC编码器的输出被映射为一个稀疏二进制序列,并与收发端均已知的水印序列模二加得到发送序列;接收端,内译码器采用基于隐马尔可夫模型的前向-后向算法,推断同步错误发生的位置,并输出外码的每一个符号取 q 个值对应的似然信息。外译码算法的输入为前后向算法输出的似然信息,采用NB-LDPC码的基于对数域的和积译码算法,纠正接收序列中的未纠正的插入/删节错误及替代错误,输出发送信息向量的估计值。

[0004] 发明人在实现本发明的过程中,发现现有技术中至少存在以下缺点和不足:

[0005] 采用水印码与一般纠错码的级联方案能够有效识别块边界,可以纠正插入删节语替代错误,但是其比特级译码算法的性能还存在较大的改善空间。本发明将外译码器的结果反馈给内译码器的前后向算法,从而辅助前后向算法的插入删节错误位置估计,改善了整体性能。

发明内容

[0006] 本发明提供了一种面向插入删节与替代错误的硬判决导向前后向估计方法,以较小的额外复杂度获得了较大的性能增益。

[0007] 本发明的特征在于,针对采用级联水印与纠错码的方案,用于插入删节错误错误估计的前后向算法引入外译码器输出的硬判决稀疏估计序列,使得内译码器的参考序列为水印序列与稀疏化后的硬判决码字序列的叠加;引入硬判决导向的水印译码器利用该参考序列和更新后的有效替代错误概率计算输出概率,进一步用于计算前向度量值和后向度量值,进而提高了前后向估计方法输出给外译码器的每个符号的似然信息的可靠度。

[0008] 一种面向插入删节与替代错误的硬判决导向前后向估计方法,所述方法包括以下步骤:

[0009] (1) 利用外译码器输出的硬判决码字序列生成水印译码器新的参考序列;

[0010] (2) 更新描述接收序列的隐马尔可夫过程的状态输出概率 $Q_{x_j, x_{j+1}}^j$, 即由 j 时刻的同步漂移状态 x_j 转移至 j+1 时刻的同步漂移状态 x_{j+1} 时产生序列 $\mathbf{r}_{j+x_j}^{j+x_{j+1}}$ 的概率, 其中 j 时刻表示接收码字中第 j-1 个比特已传输、第 j 个比特待传输的时刻, 漂移状态 x_j 是指从第 0 个传输比特到第 j 个传输比特由信道产生的全部插入比特数与全部删节比特数之差, $x_j, x_{j+1} \in \{-x_{\max}, \dots, 0, \dots, x_{\max}\}$, 其中 x_{\max} 是内译码器设定的最大漂移, 且满足 $x_{j-1} \leq x_{j+1} \leq x_j + I$, I 是最大连续插入比特数, $\mathbf{r}_{j+x_j}^{j+x_{j+1}}$ 为接收子序列 $(r_{j+x_j}, r_{j+x_j+1}, \dots, r_{j+x_{j+1}})$, $0 \leq j \leq N$, N 是码字的比特长度;

[0011] (3) 递归计算硬判决导向的前向度量值和后向度量值, 并利用更新后的前向和后向度量值计算码字中第 i 个符号 d_i 的似然信息 $P(d_i | \mathbf{r})$, 其中, $d_i \in \{0, 1, \dots, 2^k - 1\}$ 为 LDPC 码字中第 i 个符号的可能十进制取值, $0 \leq i < N/n$, k 为稀疏前一个符号包含的比特数, n 为稀疏后一个符号包含的比特数, N/n 为码字中符号总个数, \mathbf{r} 为接收序列;

[0012] 所述利用外译码器输出的硬判决码字序列生成水印译码器新的参考序列具体为,

[0013] (1.1) 将外译码器硬判决后码字的估计序列 $\hat{\mathbf{m}}$ 进行稀疏化得到稀疏序列 $\hat{\mathbf{s}}$, 其中 $\hat{\mathbf{m}}$ 码长为 Nk/n 比特, $\hat{\mathbf{s}}$ 为 N 比特;

[0014] (1.2) 令 $\mathbf{w}' = \mathbf{w} \oplus \hat{\mathbf{s}}$, 生成内译码器新的参考序列 \mathbf{w}' , 其中 \mathbf{w} 为 N 比特的原始水印序列。

[0015] 所述更新描述接收序列的隐马尔可夫过程的状态输出概率 $Q_{x_j, x_{j+1}}^j$, 即由 j 时刻的同步漂移状态 x_j 转移至 j+1 时刻的同步漂移状态 x_{j+1} 时产生序列 $\mathbf{r}_{j+x_j}^{j+x_{j+1}}$ 的概率, 其中 j 时刻表示接收码字中第 j-1 个比特已传输、第 j 个比特待传输的时刻, 漂移状态 x_j 是指从第 0 个传输比特到第 j 个传输比特由信道产生的全部插入比特数与全部删节比特数之差, $x_j, x_{j+1} \in \{-x_{\max}, \dots, 0, \dots, x_{\max}\}$, 其中 x_{\max} 是内译码器设定的最大漂移, 且满足 $x_{j-1} \leq x_{j+1} \leq x_j + I$, I 是最大连续插入比特数, $\mathbf{r}_{j+x_j}^{j+x_{j+1}}$ 为接收子序列 $(r_{j+x_j}, r_{j+x_j+1}, \dots, r_{j+x_{j+1}})$, $0 \leq j \leq N$, N 是码字的比特长度具体为,

[0016] (2.1) 更新等效码字序列密度 $f = 0$, 并初始化等效替代错误概率 $P_f = P_s$, 其中 P_s 为信道的替代错误概率, $0 \leq j < N$;

[0017] (2.2) 根据当前 j 时刻的同步漂移状态 x_j 与 j+1 时刻的同步漂移状态 x_{j+1} 之间的联系, 计算转移概率 $P_{x_j, x_{j+1}} = P(x_{j+1} | x_j)$, 具体为,

[0018] 若 $x_{j+1} = x_j - 1$, 则 $P_{x_j, x_{j+1}} = P_d$;

[0019] 若 $x_{j+1} = x_j$, 则 $P_{x_j, x_{j+1}} = \alpha_i P_i P_d + P_t$;

[0020] 若 $x_j < x_{j+1} < x_j + I$, 则 $P_{x_j, x_{j+1}} = \alpha_i [(P_i)^{b-a+1} P_d + (P_i)^{b-a} P_t]$;

[0021] 若 $x_{j+1} = x_j + I$, 则 $P_{x_j, x_{j+1}} = \alpha_i (P_i)^I P_t$;

[0022] 否则 $P_{x_j, x_{j+1}} = 0$, $Q_{x_j, x_{j+1}}^j = 0$, 其中 $\alpha_I = 1 / (1 - (P_i)^I)$ 为考虑最大插入长度 I 的归一化常数, P_d 为删节概率; P_i 为插入概率; P_t 为传输概率;

[0023] (2.3) 计算 $A = [\alpha_I (P_i)^{x_{j+1} - x_j + 1} (\frac{1}{2})^{x_{j+1} - x_j + 1}] \cdot P_d$, $B = [\alpha_I (P_i)^{x_{j+1} - x_j} (\frac{1}{2})^{x_{j+1} - x_j}] \cdot P_t$, 其中, A 为插入 $x_{j+1} - x_j + 1$ 个比特并删节发送比特的概率; B 为插入 $x_{j+1} - x_j$ 个比特并传输发送比特的概率;

[0024] (2.4) 判断接收比特串 $\mathbf{r}_{j+x_j}^{j+x_{j+1}}$ 中的最后一个比特 $r_{j+x_{j+1}}$ 是否满足判断条件 $r_{j+x_{j+1}} = w'_j$, 其中 w'_j 为内译码器新的参考序列 w' 在第 j 位的取值, 若满足判断条件, 输出概率

$$Q_{x_j, x_{j+1}}^j = \frac{A + B \cdot (1 - P_f)}{P_{x_j, x_{j+1}}}; \text{若不满足判断条件, 输出概率 } Q_{x_j, x_{j+1}}^j = \frac{A + B \cdot P_f}{P_{x_j, x_{j+1}}};$$

[0025] 本发明提供的技术方案的有益效果是: 用于插入与删节估计的前后向算法引入外译码器输出的硬判决码字序列, 设计了一种面向插入删节与替代错误的硬判决导向前后向估计方法, 提高了前后向方法估计准确度, 以较小的额外复杂度获得了较大的性能增益。

附图说明

[0026] 图1为本发明提供的一种面向插入删节与替代错误的硬判决导向前后向估计方法的流程图;

[0027] 图2是计算前后向度量中输出概率的流程图;

[0028] 图3是计算前向度量的流程图;

[0029] 图4是计算后向度量的流程图;

[0030] 图5是计算码字中每个符号的似然信息的流程图;

[0031] 图6是计算中间度量的流程图;

[0032] 图7是计算中间度量值的输出概率流程图;

[0033] 图8是采用本发明方法与传统方法的误块率性能比较图。

具体实施方式

[0034] 为进一步提高比特级译码算法的性能, 本发明提供了一种面向插入删节与替代错误的硬判决导向前后向估计方法, 参见图1至图8。下面将结合附图对本发明实施方式进行详细描述。

[0035] 本发明的特征在于, 用于插入与删节错误估计的前后向算法引入外译码器输出的硬判决结果, 使得内译码器的参考序列为水印序列与稀疏化后的硬判决码字序列的叠加; 引入硬判决导向的水印译码器利用该参考序列和更新后的有效替代错误概率计算输出概率, 进一步用于计算前向度量值和后向度量值, 进而提高了前后向估计方法输出给外译码器的每个符号的似然信息的可靠度。其基本流程如图1所示, 具体地:

[0036] (1) 所述利用外译码器输出的硬判决码字序列生成水印译码器新的参考序列具体为,

[0037] (1.1) 将外译码器硬判决后码字的估计序列 $\hat{\mathbf{m}}$ 进行稀疏化得到稀疏序列 $\hat{\mathbf{s}}$, 其中

$\hat{\mathbf{m}}$ 码长为 Nk/n 比特, $\hat{\mathbf{s}}$ 为 N 比特;

[0038] (1.2) 令 $\mathbf{w}' = \mathbf{w} \oplus \hat{\mathbf{s}}$, 生成内译码器新的参考序列 \mathbf{w}' , 其中 \mathbf{w} 为 N 比特的原始水印序列。

[0039] (2) 所述更新前向度量值和后向度量值中描述接收序列的隐马尔可夫过程的状态输出概率 $Q_{x_j, x_{j+1}}^j$, 即由 j 时刻的同步漂移状态 x_j 转移至 $j+1$ 时刻的同步漂移状态 x_{j+1} 时产生序列 $\mathbf{r}_{j+x_j}^{j+x_{j+1}}$ 的概率, 其中 j 时刻表示接收码字中第 $j-1$ 个比特已传输、第 j 个比特待传输的时刻, 漂移状态 x_j 是指从第 0 个传输比特到第 j 个传输比特由信道产生的全部插入比特数与全部删节比特数之差, $x_j, x_{j+1} \in \{-x_{\max}, \dots, 0, \dots, x_{\max}\}$, 其中 x_{\max} 是内译码器设定的最大漂移, 且满足 $x_{j-1} \leq x_{j+1} \leq x_j + I$, I 是最大连续插入比特数, $\mathbf{r}_{j+x_j}^{j+x_{j+1}}$ 为接收子序列 $(r_{j+x_j}, r_{j+x_j+1}, \dots, r_{j+x_{j+1}})$, $0 \leq j \leq N$, N 是码字的比特长度。

[0040] 其中, 该步骤的流程图如图 2 所示, 具体为:

[0041] (2.1) 更新等效码字序列密度 $f=0$, 并初始化等效替代错误概率 $P_f = P_s$, 其中 P_s 为信道的替代错误概率, $0 \leq j < N$;

[0042] (2.2) 根据当前 j 时刻的同步漂移状态 x_j 与 $j+1$ 时刻的同步漂移状态 x_{j+1} 之间的联系, 计算转移概率 $P_{x_j, x_{j+1}} = P(x_{j+1} | x_j)$, 具体为,

[0043] 若 $x_{j+1} = x_j - 1$, 则 $P_{x_j, x_{j+1}} = P_d$;

[0044] 若 $x_{j+1} = x_j$, 则 $P_{x_j, x_{j+1}} = \alpha_i P_i P_d + P_t$;

[0045] 若 $x_j < x_{j+1} < x_j + I$, 则 $P_{x_j, x_{j+1}} = \alpha_i [(P_i)^{b-a+1} P_d + (P_i)^{b-a} P_t]$;

[0046] 若 $x_{j+1} = x_j + I$, 则 $P_{x_j, x_{j+1}} = \alpha_i (P_i)^I P_t$;

[0047] 否则 $P_{x_j, x_{j+1}} = 0$, $Q_{x_j, x_{j+1}}^j = 0$, 其中 $\alpha_i = 1 / (1 - (P_i)^I)$ 为考虑最大插入长度 I 的归一化常数, P_d 为删节概率; P_i 为插入概率; P_t 为传输概率;

[0048] (2.3) 计算 $A = [\alpha_i (P_i)^{x_{j+1}-x_j+1} (\frac{1}{2})^{x_{j+1}-x_j+1}] \cdot P_d$, $B = [\alpha_i (P_i)^{x_{j+1}-x_j} (\frac{1}{2})^{x_{j+1}-x_j}] \cdot P_t$, 其中, A 为插入 $x_{j+1}-x_j+1$ 个比特并删节发送比特的概率; B 为插入 $x_{j+1}-x_j$ 个比特并传输发送比特的概率;

[0049] (2.4) 判断接收比特串 $\mathbf{r}_{j+x_j}^{j+x_{j+1}}$ 中的最后一个比特 $r_{j+x_{j+1}}$ 是否满足判断条件 $r_{j+x_{j+1}} = w'_j$, 其中 w'_j 为内译码器新的参考序列 \mathbf{w}' 在第 j 位的取值, 若满足判断条件, 输出概率

$$Q_{x_j, x_{j+1}}^j = \frac{A + B \cdot (1 - P_f)}{P_{x_j, x_{j+1}}}; \text{若不满足判断条件, 输出概率 } Q_{x_j, x_{j+1}}^j = \frac{A + B \cdot P_f}{P_{x_j, x_{j+1}}};$$

[0050] (3) 所述递归计算硬判决导向的前向度量值和后向度量值, 并利用更新后的前向和后向度量值计算码字中第 i 个符号 d_i 的似然信息 $P(d_i | \mathbf{r})$, 其中 $d_i \in \{0, 1, \dots, 2^k-1\}$ 为 LDPC

码字中第*i*个符号的可能十进制取值, $0 \leq i < N/n$, *k*为稀疏前一个符号包含的比特数, *n*为稀疏后一个符号包含的比特数, N/n 为码字中符号总个数, *r*为接收序列, 具体为,

[0051] (3.1) 递归计算*j*时刻漂移状态为*y*时的前向度量值 $F_j(y)$, 其中 $0 \leq j \leq N$, $-x_{\max} \leq y \leq x_{\max}$, 如图3所示, 具体步骤为,

[0052] (3.1.1) 初始化0时刻的前向度量值 $F_0(y) = \begin{cases} 1 & y=0 \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$ 和 $j=1$;

[0053] (3.1.2) 设当前时刻漂移状态 $y = -x_{\max}$;

[0054] (3.1.3) 令前一时刻的漂移状态 $a = y - I$;

[0055] (3.1.4) 判断*a*是否满足 $-x_{\max} \leq a \leq x_{\max}$, 若不满足判断条件, 令*a*加1, 重复步骤(3.1.4)直至满足判断条件; 若满足判断条件, 令由前一时刻的漂移状态*a*转移至当前时刻漂移状态*y*的一次前向度量的概率 $F_j^a(y) = 0$, 执行步骤(3.1.5);

[0056] (3.1.5) 利用求出的输出概率, 按照公式 $F_j^a(y) = F_{j-1}(a) \cdot P_{ay} \cdot Q_{ay}^{j-1}$ 计算当前 $F_j^a(y)$ 值, 其中, $F_{j-1}(a)$ 为*j*-1时刻漂移状态为*a*时的前向度量值, $P_{a,y}$ 为由前一时刻的漂移状态*a*转移至当前时刻漂移状态*y*的转移概率, Q_{ay}^{j-1} 为由前一时刻的漂移状态*a*转移至当前时刻漂移状态*y*的输出概率;

[0057] (3.1.6) 判断*a*是否满足 $a = y + 1$, 若不满足判断条件, 令*a*加1, 重复步骤(3.1.4)至(3.1.6)直至满足条件; 若满足判断条件, 利用公式 $F_j(y) = \sum_{a=y-I}^{y+1} F_j^a(y)$, 即得到*j*时刻漂移状态为*y*时的前向度量值;

[0058] (3.1.7) 判断*y*是否满足 $y = x_{\max}$, 若不满足判断条件, 令*y*加1, 重复步骤(3.1.3)至(3.1.7)直至满足判断条件; 若满足判断条件, 执行步骤(3.1.8);

[0059] (3.1.8) 判断*j*是否满足 $j = N$, 若不满足判断条件, 令*j*加1, 重复步骤(3.1.2)至(3.1.8)直至满足判断条件; 若满足判断条件, 输出时刻0到*N*所有漂移状态时的前向度量值。

[0060] (3.2) 递归计算*j*时刻漂移状态为*y*时的后向度量值 $B_j(y)$, 其中 $0 \leq j \leq N$, $-x_{\max} \leq y \leq x_{\max}$, 如图4所示, 具体步骤为,

[0061] (3.2.1) 初始化 $j = N$, 并重新初始化当前块的后向度量值 $B_N(y) = \begin{cases} 1 & y = \hat{y}_N \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$, 其

中 $\hat{y}_N = \arg \max_y F_N(y) B_N(y)$ 为块末端的最大可能偏移量;

[0062] (3.2.2) 设当前时刻漂移状态 $y = -x_{\max}$;

[0063] (3.2.3) 令后一时刻的漂移状态 $b = y + I$;

[0064] (3.2.4) 判断*b*是否满足 $-x_{\max} \leq b \leq x_{\max}$, 若不满足判断条件, 令*b*减1, 重复步骤(3.2.4)直至满足判断条件; 若满足判断条件, 令由当前时刻漂移状态*y*转移至后一时刻的漂移状态*b*的一次后向度量的概率 $B_j^b(y) = 0$, 执行步骤(3.2.5);

[0065] (3.2.5) 利用求出的输出概率, 按照公式 $B_j^b(y) = B_{j+1}(b) \cdot P_{yb} \cdot Q_{yb}^j$ 计算当前 $B_j^b(y)$

值,其中, $B_{j+1}(b)$ 为 $j+1$ 时刻漂移状态为 b 时的前向度量值, $P_{y,b}$ 为由前一时刻的漂移状态 y 转移至当前时刻漂移状态 b 的转移概率, Q_{ay}^j 为由前一时刻的漂移状态 y 转移至当前时刻漂移状态 b 的输出概率;

[0066] (3.2.6) 判断 b 是否满足 $b=y-1$,若不满足判断条件,令 b 减1,重复步骤(3.2.4)至(3.2.6)直至满足条件;若满足判断条件,利用公式 $B_j(y) = \sum_{b=y-1}^{y+1} B_j^b(y)$,即得到 j 时刻漂移状态为 y 时的后向度量值;

[0067] (3.2.7) 判断 y 是否满足 $y=x_{\max}$,若不满足判断条件,令 y 加1,重复步骤(3.2.3)至(3.2.7)直至满足判断条件;若满足判断条件,执行步骤(3.2.8);

[0068] (3.2.8) 判断 j 是否满足 $j=0$,若不满足判断条件,令 j 减1,重复步骤(3.2.2)至(3.2.8)直至满足判断条件;若满足判断条件,输出每一时刻 j 下所有漂移状态时的后向度量值。

[0069] (3.3) 递归计算硬判决导向的前向度量值和后向度量值,并利用更新后的前向和后向度量值码字中每个符号的似然信息 $P(d_i|r)$,其中 r 为接收序列, $d_i \in \{0,1,\dots,2^k-1\}$ 为LDPC码字中第 i 个符号的可能取值, $0 \leq i < N/n$, k 为稀疏前一个符号包含的比特数, n 为稀疏后一个符号包含的比特数,该步骤的流程图如图5所示,具体为,

[0070] (3.3.1) 初始化 $i=0$;

[0071] (3.3.2) 令 $d_i=0$;

[0072] (3.3.3) 初始化 $x_{n \times i} = -x_{\max}$;

[0073] (3.3.4) 初始化 $x_{n \times (i+1)} = -x_{\max}$;

[0074] (3.3.5) 计算中间度量值 $M = P(r^0, x_{n \times (i+1)} | x_{n \times i}, d_i)$,其中 r^0 为 $(r_{n \times i + x_{n \times i}}, \dots, r_{n \times (i+1) + x_{n \times (i+1)}} - 1)$;

[0075] (3.3.6) 令 $P(d_i|r)_{x_{n \times (i+1)}}^{x_{n \times i}} = 0$;

[0076] (3.3.7) 按照公式 $P(d_i|r)_{x_{n \times (i+1)}}^{x_{n \times i}} = F_{n \times i}(x_{n \times i}) \cdot P(r^0, x_{n \times (i+1)} | x_{n \times i}, d_i) \cdot B_{n \times (i+1)}(x_{n \times (i+1)})$ 计算当前 $P(d_i|r)_{x_{n \times (i+1)}}^{x_{n \times i}}$ 的值;

[0077] (3.3.8) 判断 $x_{n \times (i+1)}$ 是否满足条件 $x_{n \times (i+1)} = x_{\max}$,若不满足判断条件,令 $x_{n \times (i+1)}$ 加1,重复步骤(3.3.5)至(3.3.8)直至满足判断条件;若满足判断条件,执行步骤(3.3.9);

[0078] (3.3.9) 判断 $x_{n \times i}$ 是否满足条件 $x_{n \times i} = x_{\max}$,若不满足判断条件,令 $x_{n \times i}$ 加1,重复步骤(3.3.4)至(3.3.9)直至满足判断条件;若满足判断条件,利用公式 $P(d_i|r) = \sum_{x_{n \times i}, x_{n \times (i+1)}} P(d_i|r)_{x_{n \times (i+1)}}^{x_{n \times i}}$,即得到LDPC码字第 i 个符号取 d_i 时的比特级似然概率;

[0079] (3.3.10) 判断 d_i 是否满足 $d_i = 2^k - 1$,若不满足判断条件,令 d_i 加1,重复步骤(3.3.3)至(3.3.10)直至满足判断条件;若满足判断条件,执行步骤(3.3.11);

[0080] (3.3.11) 判断 i 是否满足条件 $i = N/n$,若不满足判断条件,令 i 加1,重复步骤(3.3.2)至(3.3.11)直至满足判断条件;若满足判断条件,输出第0个符号到第 N/n 个符号所有可能取值时的似然信息。

[0081] 如图6所示,在步骤(3.3.5)中,计算中间度量值 $P(r^0, x_{n \times (i+1)} | x_{n \times i}, d_i)$,其中 r^0 为

$(r_{n \times i + x_{n \times i}}, \dots, r_{n \times (i+1) + x_{n \times (i+1)} - 1})$ 的计算步骤具体为,

[0082] 1) 初始化 $m=1$, 并初始化 0 时刻各同步状态的初始概率值 $M_0(x) = \begin{cases} 1 & x = x_{n \times i} \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$, 其

中 m 表示第 i 个符号对应的稀疏向量表示形式中第 m 个比特, $1 \leq m \leq n$;

[0083] 2) 设当前 m 时刻的同步漂移状态 $y = -x_{\max}$;

[0084] 3) 令 $t_{n \times i + m - 1} = w_{n \times i + m - 1} \oplus s_{m-1}$, 即将水印比特与第 i 个符号对应位置处的稀疏比特相异或;

[0085] 4) 令 $a = y - I$;

[0086] 5) 判断 a 是否满足 $-x_{\max} \leq a \leq x_{\max}$, 若不满足判断条件, 令 a 加 1, 重复步骤 4) 直至满足判断条件; 若满足判断条件, 令由前一时刻的漂移状态 a 转移至当前 m 时刻漂移状态 y 的一次中间度量的概率 $M_m^a(y) = 0$, 执行步骤 6);

[0087] 6) 利用中间度量中输出概率的计算公式, 按照公式 $M_m^a(y) = M_{m-1}(a) \cdot P_{ay} \cdot Q_{ay}^{(m-1)}$ 计算当前 $M_m^a(y)$ 值;

[0088] 7) 判断 a 是否满足 $a = y + 1$, 若不满足判断条件, 令 a 加 1, 重复步骤 5) 至 7) 直至满足条件; 若满足判断条件, 利用公式 $M_m(y) = \sum_{a=y-I}^{y+1} M_m^a(y)$, 即得到 m 时刻同步漂移状态为 y 时的概率值;

[0089] 8) 判断 m 是否满足 $m = n$, 若满足判断条件执行步骤 11); 若不满足判断条件执行步骤 9);

[0090] 9) 判断 y 是否满足 $y = x_{\max}$, 若不满足判断条件, 令 y 加 1, 重复步骤 3) 至 9) 直至满足判断条件; 若满足判断条件, 执行步骤 10);

[0091] 10) 判断 m 是否满足 $m = n - 1$, 若不满足判断条件, 令 m 加 1, 重复步骤 2) 至 10) 直至满足判断条件; 若满足判断条件, 令 m 加 1, 令 $y = x_{n \times (i+1)}$, 重复执行步骤 3) 至 8);

[0092] 11) 输出中间度量值 $P(r^0, x_{n \times (i+1)} | x_{n \times i}, d_i) = M_n(x_{n \times (i+1)})$ 。

[0093] 如图 7 所示, 在步骤 6) 中, 中间度量值中输出概率的计算步骤具体为,

[0094] ①对于 $1 \leq m \leq 5$, 判断当前时刻 m 的偏移状态 y 与上一时刻 $m-1$ 的漂移状态 a 之间的联系, 计算转移概率 $P_{a,y} = P(x_y | x_a)$, 具体为,

[0095] 若 $y = a - 1$, 则 $P_{a,y} = P_d$;

[0096] 若 $y = a$, 则 $P_{a,y} = \alpha_I P_i P_d + P_t$;

[0097] 若 $a < y < a + I$, 则 $P_{a,y} = \alpha_I ((P_i)^{y-a+1} P_d + (P_i)^{y-a} P_t)$;

[0098] 若 $y = a + I$, 则 $P_{a,y} = \alpha_I (P_i)^I P_t$;

[0099] 若不满足上述四种情况, 则 $P_{a,y} = 0$, $Q_{ay}^{(m-1)} = 0$, 其中 $\alpha_I = 1 / (1 - (P_i)^I)$ 为考虑最大插入长度 I 的归一化常数, P_d 为删节概率; P_i 为插入概率; P_t 为传输概率;

[0100] ②计算 $A = [\alpha_I (P_i)^{y-a+1} (\frac{1}{2})^{y-a+1}] \cdot P_d$, $B = [\alpha_I (P_i)^{y-a} (\frac{1}{2})^{y-a}] \cdot P_t$;

[0101] ③判断比特串 $r_{n \times i + m - 1 + y}^{n \times i + m - 1 + y}$ 中的比特 $r_{n \times i + m - 1 + y}$ 是否满足判断条件 $r_{n \times i + m - 1 + y} = t_{n \times i + m - 1}$, 若

满足判断条件,输出概率 $Q_{ay}^{(m-1)} = \frac{A+B \cdot (1-P_s)}{P_{a,y}}$;若不满足判断条件,输出概率

$$Q_{ay}^{(m-1)} = \frac{A+B \cdot P_s}{P_{a,y}}。$$

[0102] 下面给出一个具体实施例,说明本发明提出的面向插入删节与替代错误的硬判决导向前后向估计方法的可行性。

[0103] 在该发明实施例中,采用水印码与传统纠错码的级联码,选择伪随机序列作为水印序列,外码为GF(16)上码长 $N_L=999$,码率为8/9的NB-LDPC码,其中将NB-LDPC码的每个符号 d_i ($0 \leq i < N_L$)映射为5比特低密度的二进制序列(s_0, s_1, s_2, s_3, s_4)完成稀疏化;稀疏后的

序列与水印序列相异或生成传输序列;DM级联码的整体码率 $R = \frac{4}{5} \times \frac{8}{9} = 0.71$;二进制输入、

二进制输出的插入/删节替代信道中的删节概率与插入概率相同;分别仿真替代错误概率为0和0.003时的译码性能;内译码器设定信道的最大连续插入比特的数量 $I=2$,最大漂移量 $x_{\max} = 5\sqrt{NP_d / (1-P_d)}$;内译码器输出的每一个符号的似然信息转换为对数似然比并传递给外译码器。

[0104] 外译码器采用基于对数域的和积译码算法,迭代次数为50次;硬判决导向的迭代译码的最大迭代次数为5次。

[0105] 图8为不同插入/删节概率下,采用硬判决导向的前后向估计方法的迭代译码与非迭代译码的误块率性能,其中 $P_{\text{in-del}}$ 表示同步错误概率, P_s 表示替代错误概率。仿真结果表明,在相同的插入/删节概率下,采用本发明提出的面向插入删节与替代错误的硬判决导向前后向估计方法的译码方案的性能优于非迭代情况。

[0106] 综上所述,本发明实施例具体说明了面向插入删节与替代错误的硬判决导向前后向估计方法。本发明通过用于插入删节错误估计的前后向算法中引入外译码器输出的硬判决码字序列,使得内译码器的参考序列为水印序列与稀疏化后的硬判决码字序列的叠加,设计了一种采用硬判决导向的前后向估计方法。本发明提出的方法提高了内译码算法的性能,以较小的复杂度获得译码增益。

[0107] 本领域技术人员可以理解附图只是一个优选实施例的示意图,上述本发明实施例序号仅仅为了描述,不代表实施例的优劣。

[0108] 以上所述仅为本发明的较佳实施例,并不用以限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内,所作的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

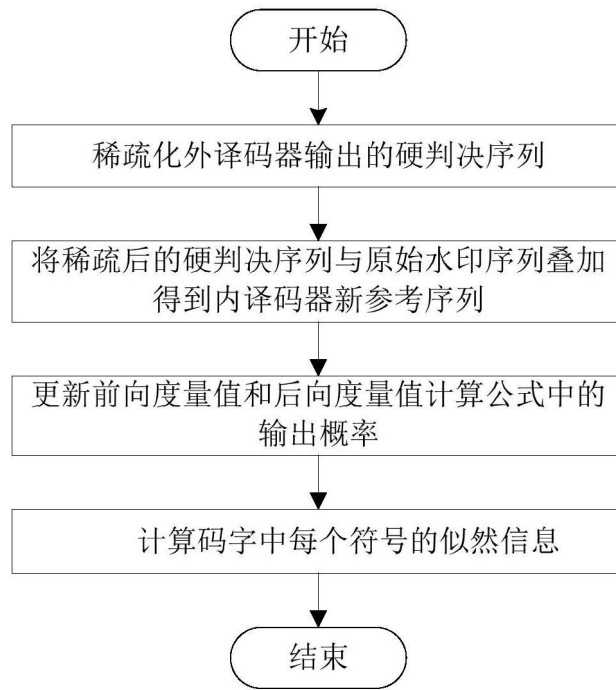


图1

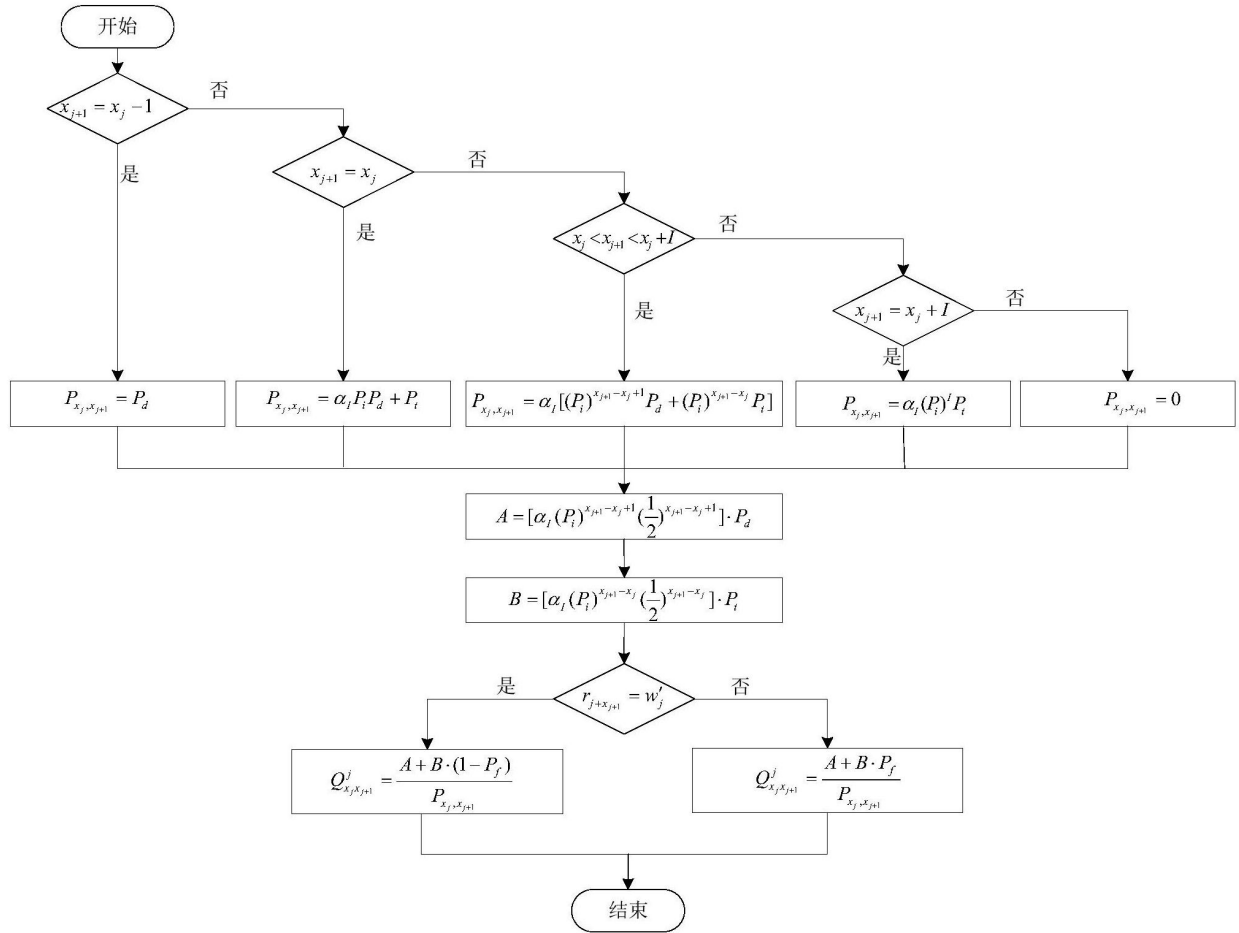


图2

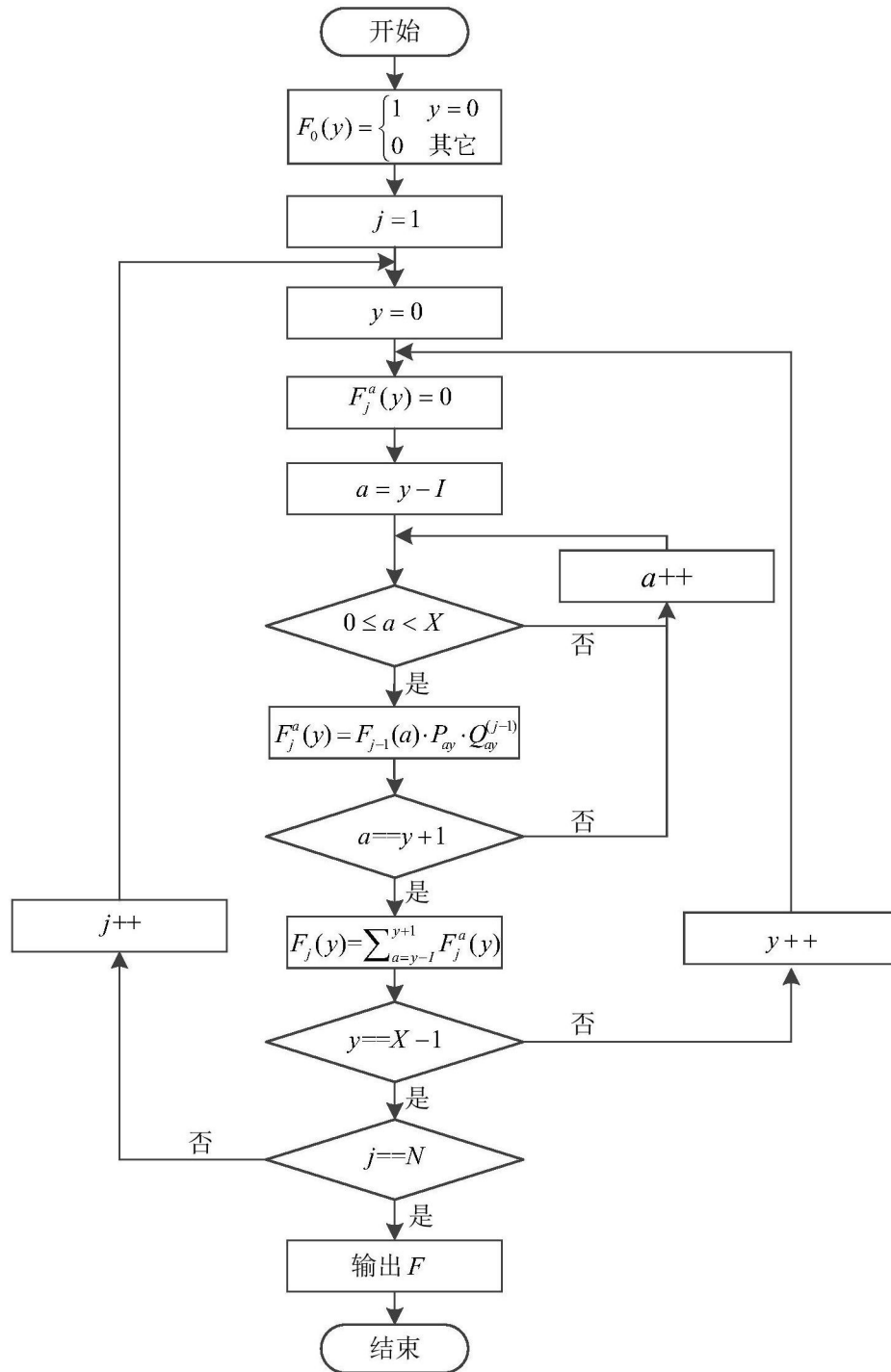


图3

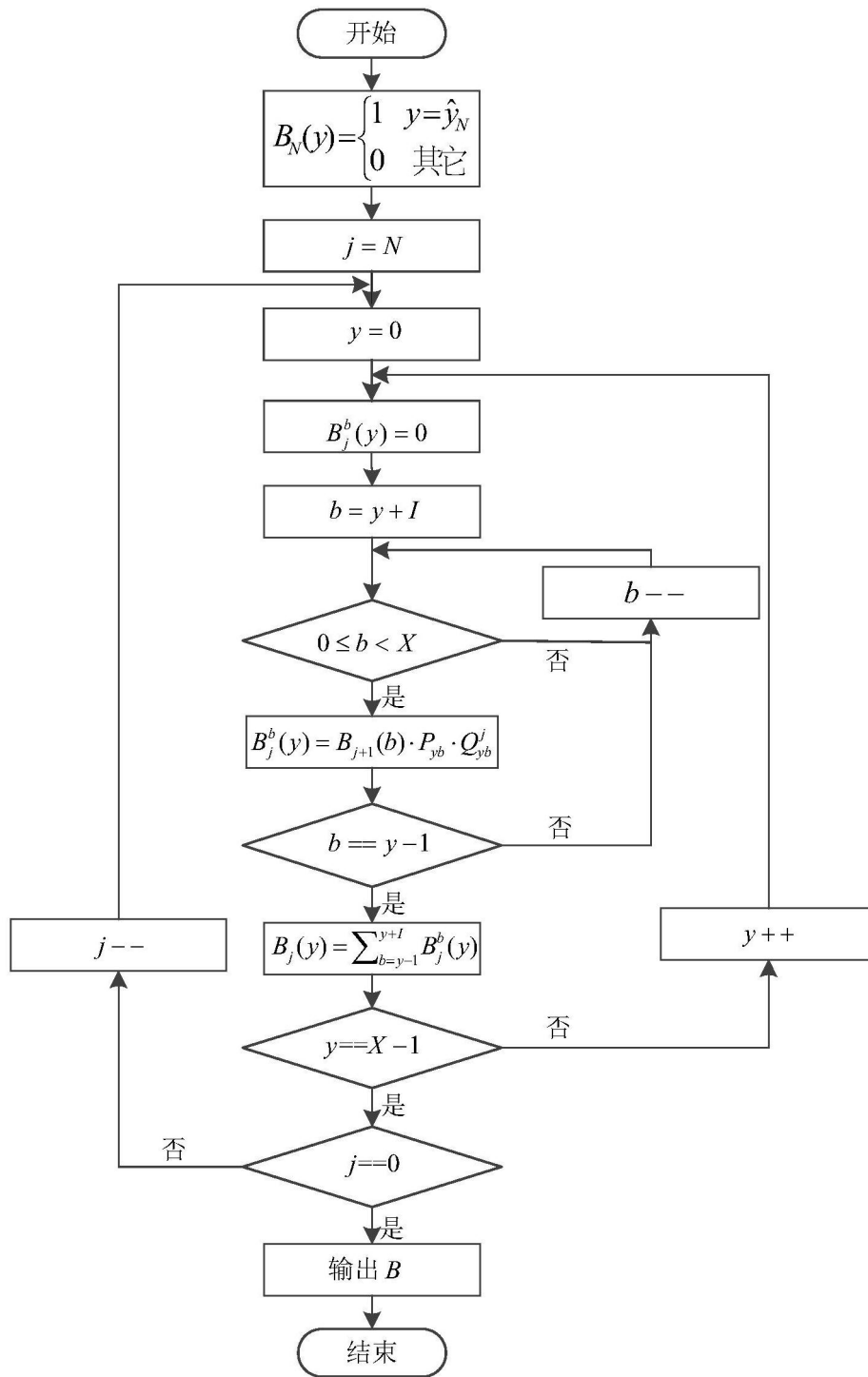


图4

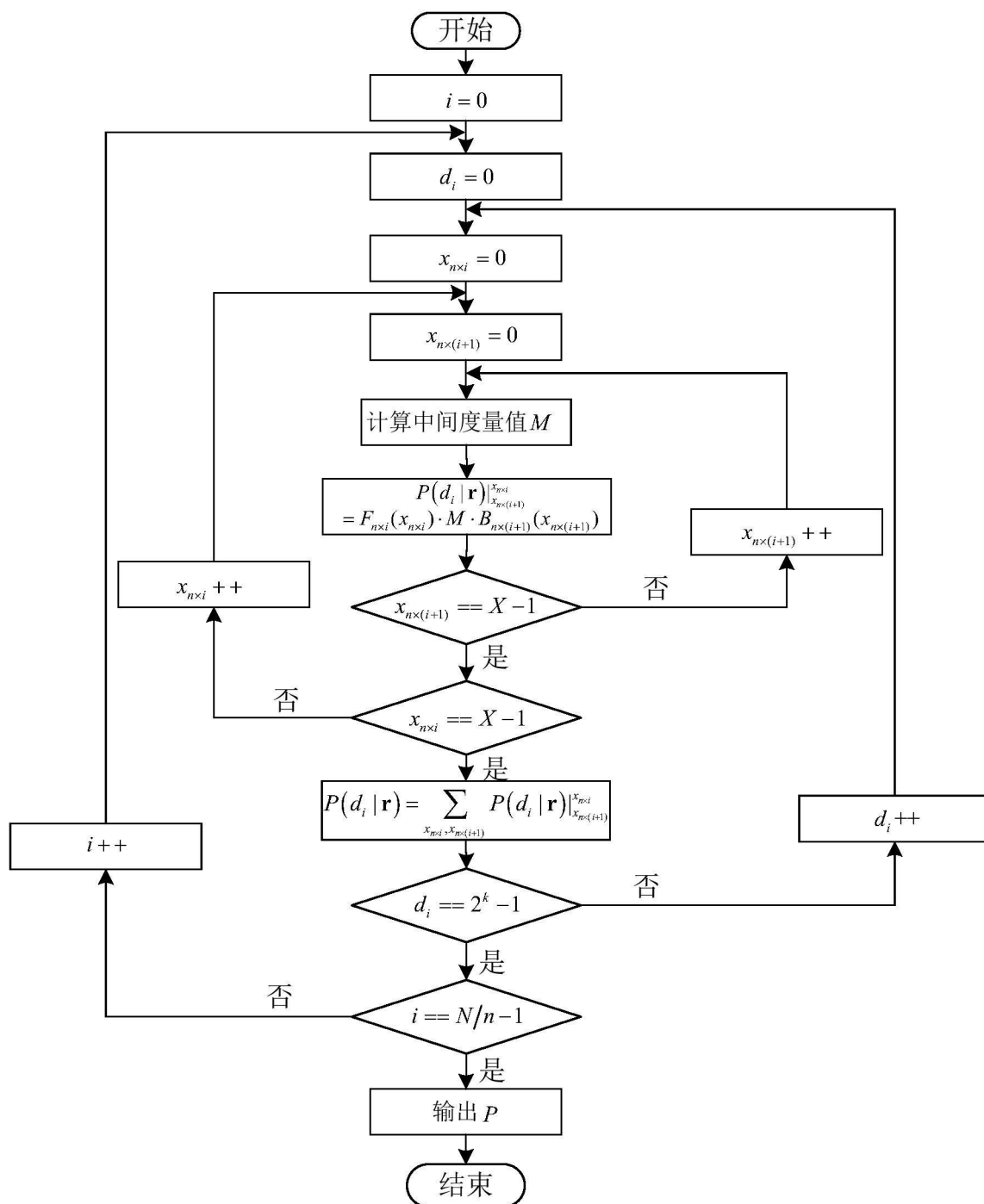


图5

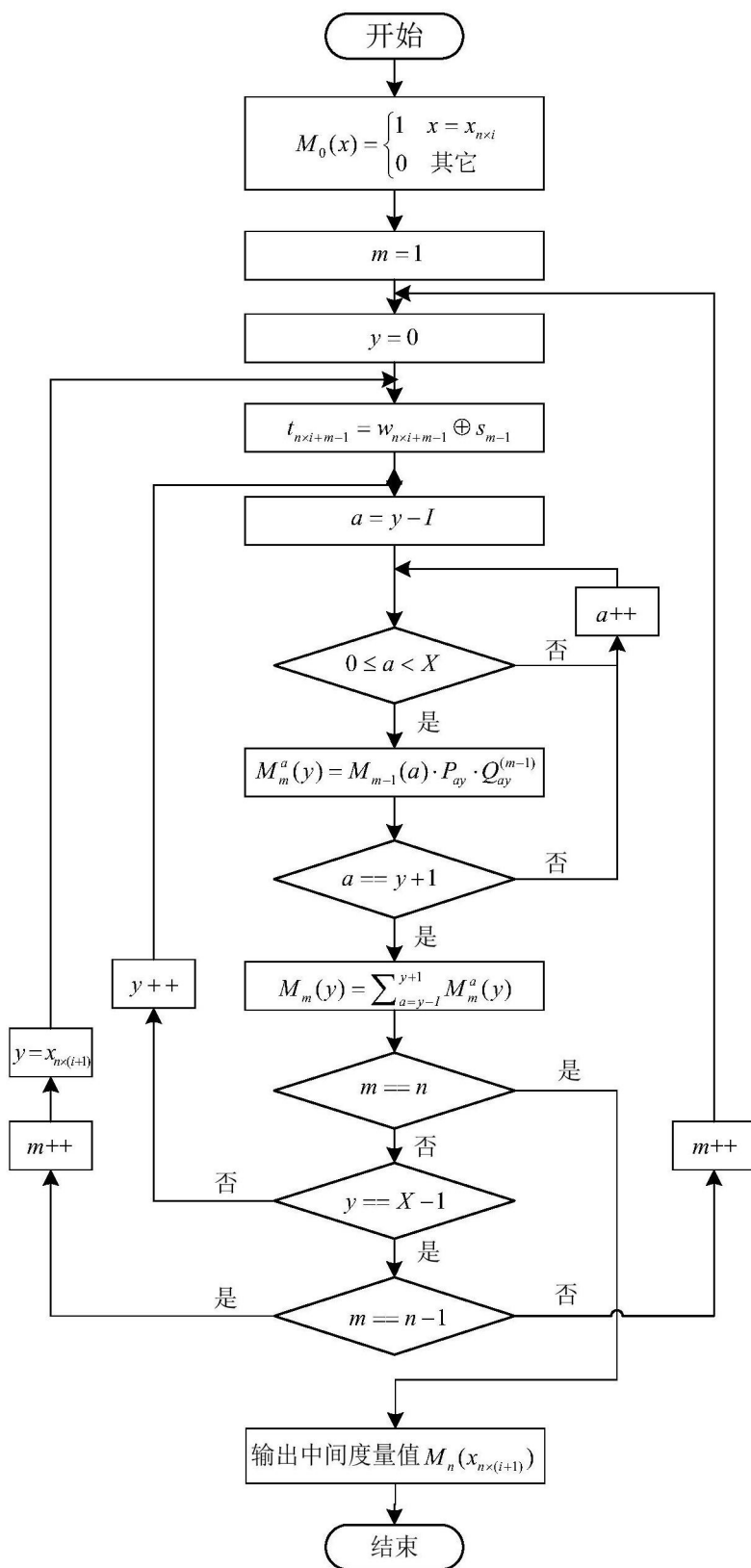


图6

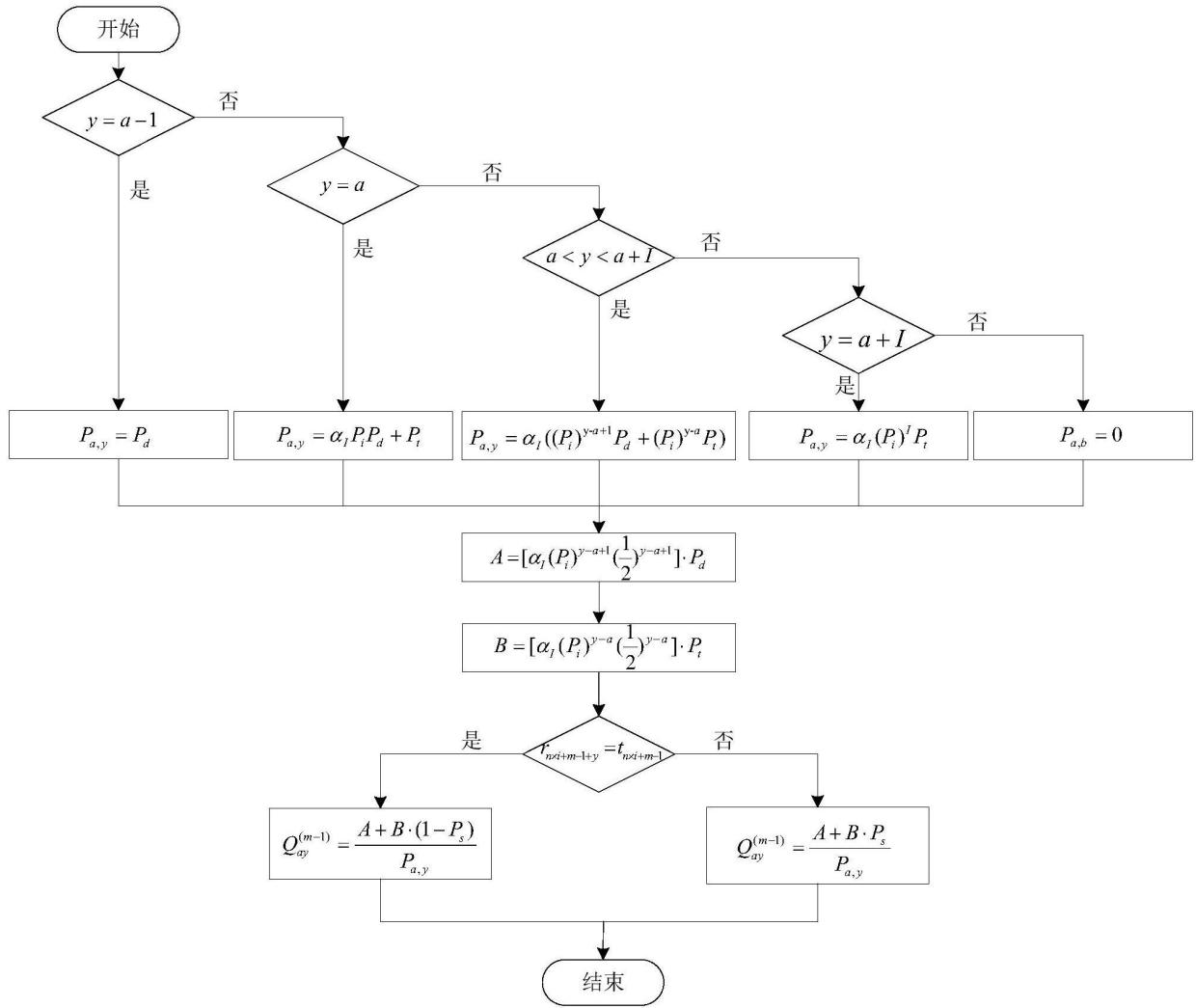


图7

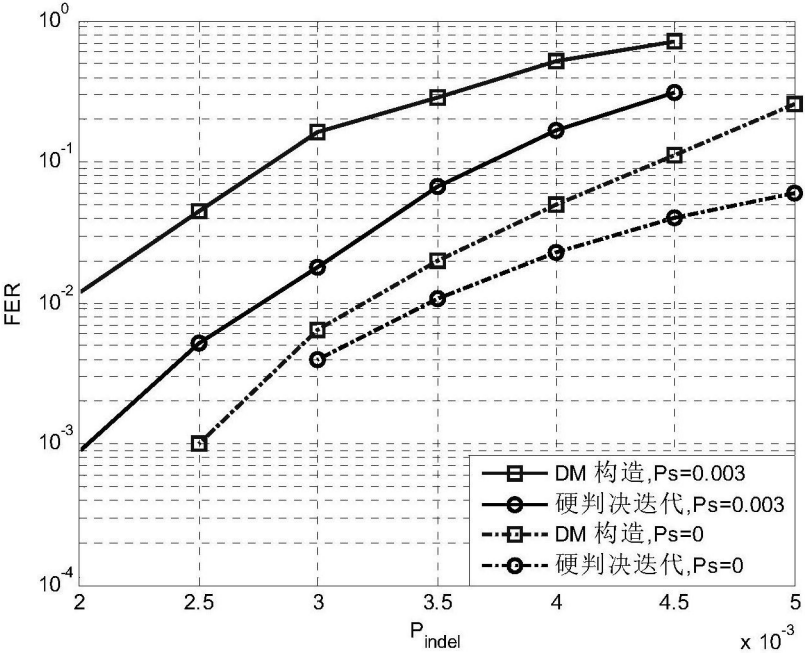


图8