

基于校验方程符合度下的 Turbo 码编码器盲识别

张立民^① 吴昭军*^② 钟兆根^②

^①(海军航空工程学院信息融合所 烟台 264001)

^②(海军航空工程学院电子信息工程系 烟台 264001)

摘 要: 针对目前 Turbo 码分量编码器参数识别算法容错性不好、计算量大的缺点, 该文提出一种基于校验方程符合度的新算法。首先, 根据码元约束长度较小的特点, 构建出编码器生成多项式数据库, 然后通过遍历多项式数据库, 计算出每种多项式所对应的平均校验方程符合度值, 其最大值所对应的索引号即为多项式库中的正确多项式索引号, 从而完成编码多项式的识别。该算法仅仅遍历有限的多项式数据库, 其计算量较小, 只与截获的数据量有关; 算法采用的数据为软判决信息, 故其容错性能较好。仿真结果表明: 在信噪比为 0 dB 条件下, 仅需要截获 10 码块, 交织长度为 100 的码元数据量, 参数的识别率就能达到 90% 以上。

关键词: Turbo 码; 编码器; 校验方程符合度; 多项式数据库

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)09-2155-07

DOI: 10.11999/JEIT161391

Blind Recognition of Turbo Code Encoder Based on Conformity of Parity-check Equation

ZHANG Limin^① WU Zhaojun^② ZHONG Zhaogen^②

^①(Institute of Information Fusion, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

^②(Department of Electronic and Information Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: In order to solve the defects of poor error tolerance and large calculation amount in current Turbo-code encoder recognition algorithms, a new algorithm based on conformity of parity-check equation is proposed. Firstly, according to small code constraint length, the coding polynomial database is built, then each polynomial of average conformity of parity-check equation is calculated by traversing the database, as a result, the Turbo-code encoder can be realized, because the correct polynomial can make the conformity maximum. The algorithm has small amount of calculation because of finite traversal, which is only related to amount of intercepted data, besides, this algorithm has good error tolerance by soft decisions. The simulation results show that the correct ratio of recognition can reach 90% at SNR of 0 dB by the 10 intercepted code blocks, and the length of each block is 100.

Key words: Turbo-code; Encoder; Conformity of parity-check equation; Polynomial database

1 引言

为提高抗噪声性能, 信道编码被广泛应用于现代数字通信中。由于 Turbo^[1]码在交织长度足够长且交织关系为随机时, 其性能能够逼近香侬限, 所以被广泛运用于卫星通信、深空探测等领域。在 Turbo 码中, 递归系统卷积码 (Recursive System Convolutional codes, RSC) 是其主要的分量编码器,

所以正确识别出 RSC 码的编码多项式, 对于整个 Turbo 码的识别具有重要意义^[2,3]。

Barbier^[4]对 Turbo 码识别的研究比较早, 他提出了基于有限域中解线性方程组的分量编码器参数识别, 但该方法的容错性能较差; 文献[5]提出了一种改进的欧几里得算法, 该算法能够实现卷积码快速盲识别, 但算法的容错性能不好; 刘健等人^[6]提出了基于 Walsh-Hadamard 变化方式能够实现卷积码编码器参数识别, 其容错性能有大幅度的提高, 但其计算量随着移位寄存器个数而呈指数增加; 于沛东等人^[7]提出了基于软判决的识别算法能够高性能地识别 RSC 码, 但其计算的复杂度很高; Debessu 等人^[8]首次提出了基于 EM 算法的 Turbo 码编码器

收稿日期: 2016-12-23; 改回日期: 2017-03-20; 网络出版: 2017-05-20

*通信作者: 吴昭军 wuzhaojun1992@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金(91538201), 泰山学者工程专项经费(ts201511020)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (91538201), Taishan Scholar Special Foundation (ts201511020)

(RSC 码)参数的盲识别方法,该方法容错性较好,但计算量太大,且算法不稳定极易陷入局部极小值;文献[9]定义了校验方程符合度概念,并将其作为 RSC 编码器系数的代价函数,基于最小二乘法算法的思想,实现了编码器的低信噪比的识别,但与文献[8]一样,该算法不稳定,需要调整初值,否则将陷入局部极值。

针对上述 RSC 码生成多项式参数识别中存在的问题,本文采用校验方程符合度方法,针对 RSC 的码元约束长度较小,其编码生成多项式有限的特点,构建出 RSC 编码多项式数据库,利用截获的软判决信息,计算出不同生成多项式下的平均校验方程符合度值,其最大的符合度值所对应的多项式即为识别的多项式。该算法的计算复杂度较低,仿真结果表明其容错性较好。

2 RSC 识别模型的建立

RSC 码以其优良的特性而被作为 Turbo 码的分量码,常见的 RSC 码码率为 1/2,图 1 就是该码率下的一种带归零的通用 RSC 编码结构^[10-12]。其中, s^0 为反馈节点信息, $s^i(i \geq 1)$ 为寄存器的状态取 0 或 1。

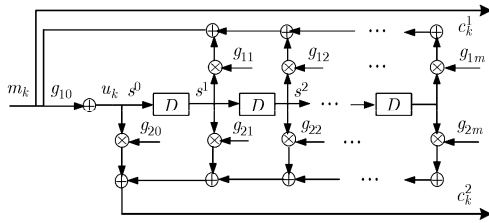


图1 RSC 编码器结构

RSC 编码器的生成多项式参数识别就是仅仅利用截获的原始码元完成多项式参数 $(g_{10}, g_{11}, \dots, g_{1m})$ 与 $(g_{20}, g_{21}, \dots, g_{2m})$ 。文中,假设 Turbo 码的码率、码长已经完成了识别,能够实现 Turbo 码各路码元的分离。文献[13]针对该参数的识别,给出了较为可靠的识别方法。设 RSC 码率为 1/n,则分量编码器的输出码元可表示为

$$C(D) = M(D) \cdot \left[1, \frac{G_2(D)}{G_1(D)}, \frac{G_3(D)}{G_1(D)}, \dots, \frac{G_n(D)}{G_1(D)} \right] \quad (1)$$

其中,

$$C(D) = [C_1(D), C_2(D), \dots, C_n(D)] \quad (2)$$

$$C_i(D) = C_{i,0} + C_{i,1} \cdot D + \dots + C_{i,L-1} \cdot D^{L-1} \quad (3)$$

$$M(D) = M_0 + M_1 \cdot D + \dots + M_{L-1} \cdot D^{L-1} \quad (4)$$

式中, L 表示一帧码元的长度,下表 i 代表第 i 路码元数据。由于是递归系统码,故而应满足:

$$C_1(D) = M(D) \quad (5)$$

进一步将式(1)进行变形,得到:

$$C_i(D) \cdot G_1(D) \oplus M(D) \cdot G_i(D) = 0, 2 \leq i \leq n \quad (6)$$

由式(6)的方程组可知:当估计的 RSC 生成多项式正确时,信息码元、编码码元、估计的 RSC 生成多项式一定满足式(6)的约束关系,该关系是识别的理论基础。

3 基于校验方程符合度的 RSC 识别算法

3.1 校验方程符合度

以常用的 1/2 码率的 RSC 为例,如果截获的信息码元与编码码元无误码时,则信息码元与编码码元应满足关系式:

$$C(D) \cdot G_1(D) \oplus M(D) \cdot G_2(D) = 0 \quad (7)$$

将 $C(D), M(D)$ 展开,得到:

$$C(D) = C_0 + C_1 \cdot D + \dots + C_k \cdot D^k + \dots \quad (8)$$

$$M(D) = M_0 + M_1 \cdot D + \dots + M_k \cdot D^k + \dots \quad (9)$$

因为编码器的反馈多项式 $G_1(D)$ 与前多项式 $G_2(D)$ 可以表示为

$$G_1(D) = g_0^1 + g_1^1 \cdot D + \dots + g_m^1 \cdot D^m \quad (10)$$

$$G_2(D) = g_0^2 + g_1^2 \cdot D + \dots + g_m^2 \cdot D^m \quad (11)$$

将式(7)在一个约束长度中展开成卷积的形式,得到式(12):

$$\sum_{i=0}^m \oplus C_{t+i}^k \cdot g_{m-i}^1 \oplus \sum_{i=0}^m M_{t+i}^k \cdot g_{m-i}^2 = 0 \quad (12)$$

式中, C_{t+i}^k, M_{t+i}^k 代表第 k 帧,位置为 $t+i$ 的编码码元与信息码元。

记式(12)左边为 H_k ,即

$$H_k = \sum_{i=0}^m \oplus C_{t+i}^k \cdot g_{m-i}^1 \oplus \sum_{i=0}^m M_{t+i}^k \cdot g_{m-i}^2$$

定义校验方程符合度 $F_{k,t}$ 为^[9,14]

$$F_{k,t} = 1 - 2P(H_{k,t} = 1) \quad (13)$$

式中, $P(H_{k,t} = 1)$ 表示 $H_{k,t}$ 取值为 1 的概率,定义的校验方程符合度意义是表征了校验方程成立的可能性大小,即当校验方程成立时,符合度的值等于 1,反之为-1。设截获的码元帧数目为 N ,则可以定义平均校验方程符合度的值为

$$\bar{F}_{k,t} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N F_{k,t} \quad (14)$$

平均校验符合度的值从统计的角度可以表征该 RSC 生成多项式使得整个截获的码元的校验方程成立的概率。

为了提高参数识别的性能,最好的方法就是充

分利用从信道截获的软判决信息，下面重点讨论，如何利用软判决信息求取校验方程符合度。

在式(12)中， $g_0^1, g_1^1, \dots, g_m^1$ 与 $g_0^2, g_1^2, \dots, g_m^2$ 分别为 RSC 反馈多项式与前项多项式系数，取值为 0 或 1，为待识别的常值，信息码元与冗余码元分别为随机序列，可认为统计独立，由文献[14]中二元域中随机变量的概率计算方法，可得：

$$F_{t,k} = \prod_{i=0}^m (1 - 2 \cdot P(C_{t+i}^k \cdot g_{m-i}^1 = 1)) \cdot \prod_{i=0}^m (1 - 2 \cdot P(M_{t+i}^k \cdot g_{m-i}^2 = 1)) \quad (15)$$

式中， g_i^1, g_i^2 (其中 $i = 0, \dots, m$) 为常数，取值为 0 或 1，则式(15)可进一步简化为

$$F_{t,k} = \prod_{i=0}^m (1 - 2 \cdot g_{m-i}^1 \cdot P(C_{t+i}^k = 1)) \cdot \prod_{i=0}^m (1 - 2 \cdot g_{m-i}^2 \cdot P(M_{t+i}^k = 1)) \quad (16)$$

由截获的软判决信息可以计算出 C_{t+i}^k 与 M_{t+i}^k 的后验概率值，将该后验概率值替换掉式(16)中的概率，即可求出检验方程符合度值。

设信道信噪比为 SNR(单位 dB)，截获的信息序列软判决码元为 $\mathbf{a}_k = [a_{k,1}, a_{k,2}, \dots, a_{k,L}]$ ，冗余序列的软判决码元为 $\mathbf{b}_k = [b_{k,1}, b_{k,2}, \dots, b_{k,L}]$ ，设码元序列的调制方式为 2PSK，由高斯白噪声中信噪比的定义(调制波形的幅度为 1)：

$$\text{SNR} = 10 \cdot \lg \left(\frac{1}{2\sigma^2} \right) \quad (17)$$

可得噪声的方差 σ^2 为

$$\sigma^2 = 1 / (2 \cdot 10^{0.1 \cdot \text{SNR}}) \quad (18)$$

由贝叶斯公式可得 C_{t+i}^k 的后验概率为

$$P(C_{t+i}^k = 1 | a_{t+i}^k) = \frac{P(a_{t+i}^k | C_{t+i}^k = 1)}{P(a_{t+i}^k)} \quad (19)$$

由全概率公式可得：

$$P(a_{t+i}^k) = P(a_{t+i}^k | C_{t+i}^k = 1) \cdot P(C_{t+i}^k = 1) + P(a_{t+i}^k | C_{t+i}^k = 0) \cdot P(C_{t+i}^k = 0) \quad (20)$$

又由于 C^k 为随机序列，故可得 $P(C_{t+i}^k = 0) = P(C_{t+i}^k = 1) = 0.5$ ，由式(18)，式(19)进一步得到：

$$P(C_{t+i}^k = 1 | a_{t+i}^k) = \frac{P(a_{t+i}^k | C_{t+i}^k = 1)}{P(a_{t+i}^k | C_{t+i}^k = 1) + P(a_{t+i}^k | C_{t+i}^k = 0)} \quad (21)$$

由于设定在高斯白噪声信道中，调制方式为 2PSK，0, 1 码元在星座图中映射为：-1, 1，故进一步得到后验概率化简的计算表达式为

$$P(C_{t+i}^k = 1 | a_{t+i}^k) = \frac{e^{\frac{2}{\sigma^2} a_{t+i}^k}}{e^{\frac{2}{\sigma^2} a_{t+i}^k} + 1} \quad (22)$$

将式(18)代入式(22)，进一步得到：

$$P(C_{t+i}^k = 1 | a_{t+i}^k) = \frac{e^{4 \times 10^{0.1 \cdot \text{SNR}} \cdot a_{t+i}^k}}{e^{4 \times 10^{0.1 \cdot \text{SNR}} \cdot a_{t+i}^k} + 1} \quad (23)$$

同理，可得到：

$$P(M_{t+i}^k = 1 | b_{t+i}^k) = \frac{e^{4 \times 10^{0.1 \cdot \text{SNR}} \cdot b_{t+i}^k}}{e^{4 \times 10^{0.1 \cdot \text{SNR}} \cdot b_{t+i}^k} + 1} \quad (24)$$

结合式(16)、式(23)、式(24)得到校验方程符合度计算表达式为

$$F_{k,t} = \prod_{i=0}^m \left(1 - 2 \cdot g_{m-i}^1 \cdot \frac{e^{4 \times 10^{0.1 \cdot \text{SNR}} \cdot a_{t+i}^k}}{e^{4 \times 10^{0.1 \cdot \text{SNR}} \cdot a_{t+i}^k} + 1} \right) \cdot \prod_{i=0}^m \left(1 - 2 \cdot g_{m-i}^2 \cdot \frac{e^{4 \times 10^{0.1 \cdot \text{SNR}} \cdot b_{t+i}^k}}{e^{4 \times 10^{0.1 \cdot \text{SNR}} \cdot b_{t+i}^k} + 1} \right) \quad (25)$$

3.2 参数的识别算法

由校验方程符合度的实际意义可知，当 RSC 生成多项式估计正确时，符合度为 1，反之为 -1，由于在工程实践中，RSC 码的编码器约束长度最大不会超过 7，因为约束长度太大，会导致译码时的复杂度增加，故能够产生性能优越的好码生成多项式个数是有限的，文献[15]给出了当约束长度小于等于 7 时，RSC 码多项式库，故可以在开始识别之前构建 RSC 生成多项式数据库，通过搜索整个数据库的多项系数，求取 1 帧或多帧码元的各个约束长度下的平均符合度值，那么正确的多项式所对应的平均符合度值一定是最接近于 1，从而完成 RSC 码多项式的识别。

基于上述的思想，可以得到 RSC 码多项式参数识别算法的具体步骤如下：

步骤 1 初始化 RSC 码生成多项式数据库；

步骤 2 假定 RSC 码多项式数据库中每一个多项式为可疑的正确参数，计算在每一个多项式下，每一个数据帧从头到尾一个约束长度下校验方程符合度值；

步骤 3 将步骤 2 中得到的每一个多项式对应的多个校验方程符合度求取平均值，得到 $[\bar{F}_1, \bar{F}_2, \dots, \bar{F}_s]$ ，其中 s 为数据库中 RSC 码生成多项式个数；

步骤 4 求取 $\max[\bar{F}_1, \bar{F}_2, \dots, \bar{F}_s]$ 值对应的位置编号，该编号即为正确识别的多项式参数在数据库中的编号，从而完成识别。

3.3 算法的计算复杂度分析

记载获的码块数目为 N ，交织长度为 L ，设数

数据库中多项式的编码约束长度为 m 的个数为 S_m , 按照工程实际 m 值大于 2 小于 8。由算法的步骤, 先对不同码块下的同一约束长度下的码元计算符合度, 所以首先要计算 N 次符合度值, 再求取一次平均, 由于一块码元约束长度为 m 的个数为 $L - m + 1$, 所以针对一个约束长度为 m 多项式, 需要计算 $N \cdot (L - m + 1)$ 次符合度值, 由于算法最后需要将 $L - m + 1$ 个位置的符合度求取平均, 选取最大值, 故总的算法运算量为: $\sum_{m=3}^7 S_m \cdot N \cdot (L - m + 1)$ 次的符合度计算, 两次的符合度平均计算, 一次大小比较计算。

通过构建 RSC 码生成多项式数据库, 大大减少了算法无用的遍历, 而校验方程符合度的计算仅是在一个编码约束长度下针对软判决码元的指数运算, 其计算方式比较简单, 故该算法的计算复杂度较小。

4 仿真实验

4.1 正确与不正确的生成多项式校验符合度对比

设定截获码元的交织长度为 500, 截获的交织帧数为 500 块, 信道的噪声环境为高斯白噪声, 信噪比为 5 dB, 选取正确的 RSC 多项式为: RSC(65,57), 约束长度为 6。在数据库中, 选取约束长度为 4 的 RSC(13,31); 选取约束长度为 5 的 RSC(23,31); 选取约束长度为 7 的 RSC(101,105)。将一帧数据中一个约束长度的起始码元位置作为变量, 每帧相同位置的符合度平均值作为因变量, 为了清晰地反映出符合度变化情况, 这里将每种生成多项式的前 50 个点(实际点数应为 495 个)在图中显示, 如图 2 所示的结果。

从图 2 可以明确地看出, 正确的多项式所对应的校验方程符合度值接近于 1 的, 而不正确的多项式所对应的符合度值在 0 dB 附近波动, 如果将不同位置下的符合度值继续求取均值, 则完全可以实现正确 RSC 多项式与不正确 RSC 多项式的区分, 仿真结果说明算法是可行的。

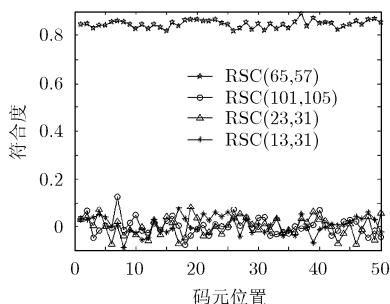


图 2 不同位置下的平均符合度值

4.2 不同噪声强度对校验符合度的影响

同样设定截获的码元交织长度为 500, 截获的码块数目为 500, 设定信道噪声为高斯白噪声, 信噪比大小为: -3 dB, -1 dB, 0 dB, 1 dB, 3 dB, 5 个值, 选取的正确 RSC 多项式仍为约束长度为 6 的 (65,57), 仿真出不同信噪比下, 正确的 RSC 多项式在约束长度下的平均校验符合度结果, 同样为更加清晰地看出符合度的变化情况, 这里只选取前 50 个点(实际点数为 495 个)如图 3 所示。

从图 3 可以看出算法的容错性能是比较强的, 即使在信噪比为 -1 dB 时, 各个位置的平均符合度距离 0 位置还是有较大的距离, 仍然能够识别。故而算法的容错性能能够满足高噪声环境的需求。

4.3 截获的码块数目与交织长度对平均校验符合度的影响

除了信道噪声对于 RSC 码参数的识别率具有较大的影响外, 截获的码块数量以及一帧的交织长度对于 RSC 参数的识别同样具有重要的影响, 仿真设定一帧的交织长度为 100, 截获的码块数目为 10, 50, 100, 500。以生成多项式数据库中多项式的索引编号为自变量, 以所有检验符合度的均值为因变量, 选取 (73,55) 多项式为正确的编码多项式, 该多项式在数据库中的索引号为 194, 信噪比设为 0 dB 得到如图 4 的结果。

分析图 4 的结果, 可得出: 同一信噪比下, 正确多项式的符合度值几乎不变, 变化的是不正确的多项式的复合度值, 其变化的趋势为随着截获码块数目的增加而增加。

下面设定截获的码块数目为 100 不变, 交织长度分别为 50, 100, 500, 1000, 噪声环境与选取的编码多项式与上述一样, 得到图 5 的结果。

分析图 5 中的实验结果, 可以得出: 在同一信噪比下, 正确的生成多项式对应的平均符合度值几乎不变, 而不正确多项式所对应的符合度值同样是随着交织长度的增加而减小。

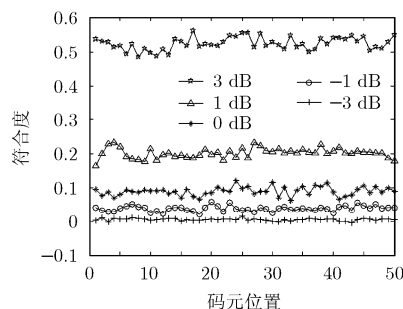


图 3 不同信噪比下, 正确多项式对应的平均校验符合度值

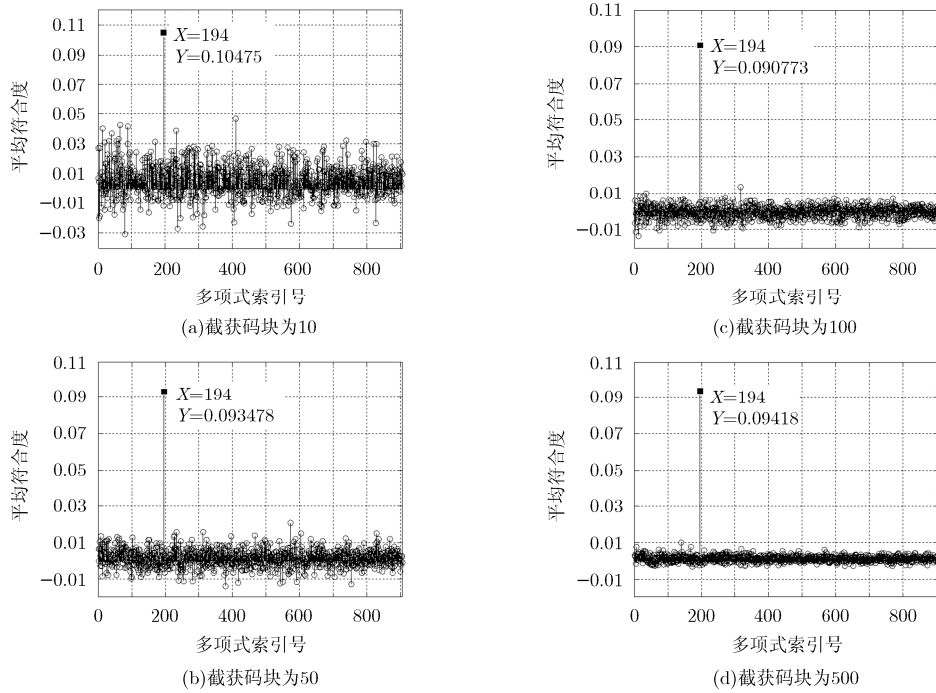


图4 不同码块下，不同的多项式平均符合度的分布情况

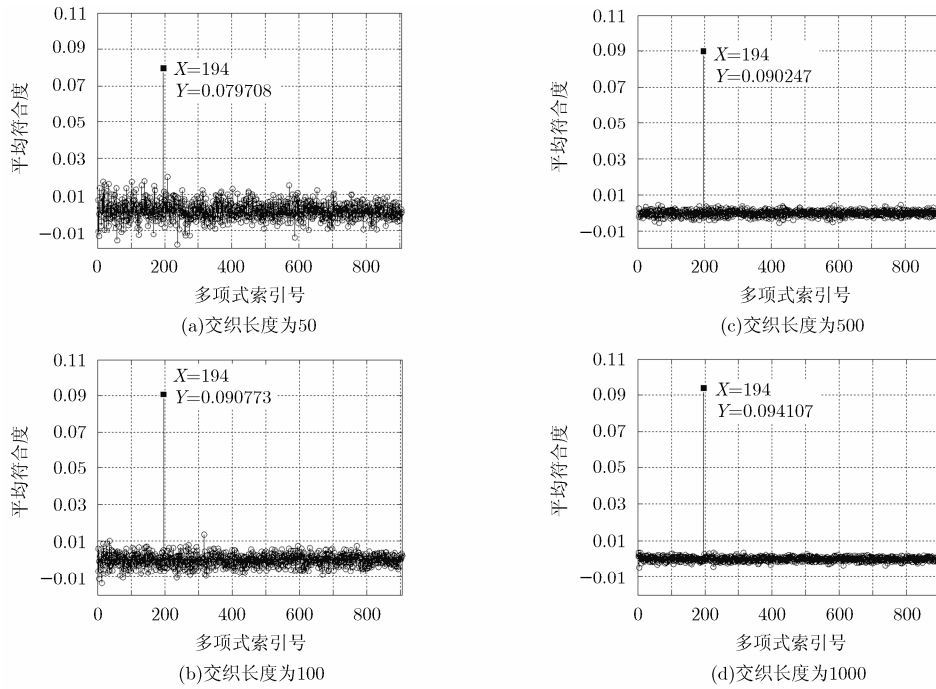


图5 不同交织长度下，不同的多项式平均符合度分布情况

综合上述分析可知，截获的码块数目越大且交织长度越长，算法的抗噪声性能越强。

4.4 算法的容错性能分析

4.4.1 交织块数目对参数识别正确率的影响 该仿真实验主要研究截获码块数量对与参数识别率的影响，设定仿真的条件为交织长度为100，截获码块的数目分别为：1, 10, 50, 100, 500。噪声环境为高

斯白噪声，信噪比强度变化范围为：-4 dB 到 5 dB，间隔 0.5 dB 变化，调制方式为 2PSK 调制，进行蒙特卡洛试验次数为 1000 次，得到识别结果，如图 6 所示。

从仿真结果上来看，可以得到两点结论：第一，算法的容错性能较好，在截获码块数目较少且在低信噪比情况下，参数的识别率依旧能够达到满意的

结果;第二,当码块数目较小时,算法的性能波动较大,如在1码块与10码块之间,同一识别率下,信噪比最大相差1.5 dB,但当码块数目增大到某一值时,算法的性能变换不大,由此可知:在实际的工程中,可以按照噪声强度,适当选择截获的码块数目,来减少计算量。

4.4.2 交织长度对参数识别正确率的影响 该噪声环境设定与噪声强度变化与4.4.1节中一样,截获的码块数设定为50,交织长度依次为50,100,200,500,1000,调制方式为2PSK调制,蒙特卡洛仿真次数为1000,得到识别结果如图7所示。

从图7可以看出交织块长度越大,算法的容错性能越好,特别是在交织长度较小时,算法的识别曲线的差异较为明显,而当交织长度增大到某一值时,算法识别曲线的提升不是太明显。

4.5 本文算法与其他算法的比较

下面将本文算法与文献[7]、FWHT算法进行比较,设定多项式参数为RSC(73,55),码元约束长度为6,截获的交织块数目为100,交织长度为100。通过蒙特卡洛试验,统计在不同信噪比下,3种算法对多项式的正确识别率,结果如图8所示。

从图8里3种算法的对比中可以得到本文算法的容错性能要略好于文献[7]以及FWHT算法,主

要原因是本文算法同样是充分利用了截获的软判信息,在有限的多项式数据库中减少了虚警与漏警值。

从计算量上来看,文献[7]与FWHT算法的计算量随约束长度 m 增加成指数倍的增长^[16],而本文算法几乎与 m 无关,仅与截获的码元个数成正比,所以从运算量上来看,本文算法要明显小于文献[7]和FWHT算法。

5 结束语

本文首先分析了Turbo码分量编码器即递归系统卷积码的编码结构,引入了检验方程符合度概念,构建出RSC码编码多项式数据库,通过遍历搜寻数据库的多项式,求出平均校验符合度最大的多项式数据库索引号,实现RSC编码器的盲识别。本文算法充分利用了软判决的信息,实现了低信噪比下的多项式高概率识别,同时该算法的运算量仅仅与截获的码元数量有关。综合来看,本文算法具有较强的容错性能与较低的运算量,具有较高的工程应用价值。

需要指出的是,本文假定Turbo码为不删余型,其码率已经完成识别,能够实现各路码元的分离,下一步研究方向为删余Turbo码的分量编码器及其删余模式的盲识别。

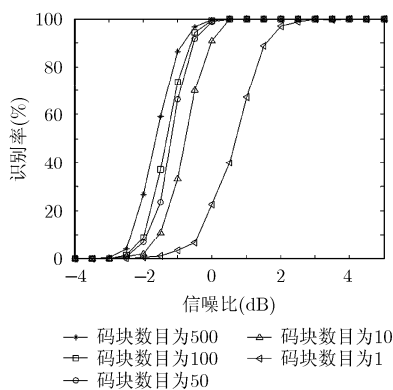


图6 不同码块数目下的参数识别率

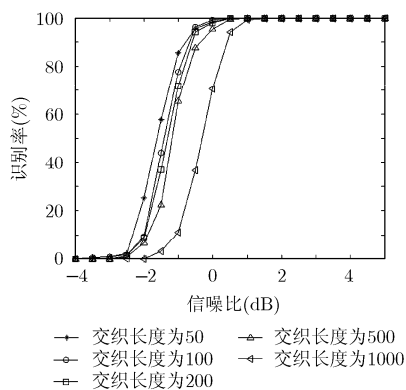


图7 不同交织长度下的参数识别率

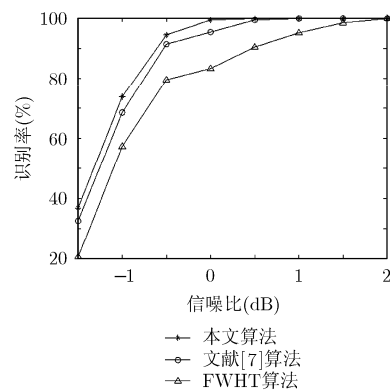


图8 3种算法的性能比较

参考文献

- [1] MUKHTAR H, AL-DWEIK A, and SHAMI A. Turbo product codes: Applications, challenges, and future directions [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, 18(4): 3052-3069. doi: 10.1109/COMST.2016.2587863.
- [2] 谢辉, 黄知涛, 王峰华. 信道编码盲识别技术研究进展[J]. *电子学报*, 2013, 41(6): 1166-1176.
XIE Hui, HUANG Zhitao, and WANG Fenghua. Research progress of blind recognition of channel coding[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013, 41(6): 1166-1176.
- [3] 任亚博, 张健, 刘以农. 高误码率下Turbo码交织器的恢复方法[J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(8): 1927-1930. doi: 10.11999/JEIT141556.
REN Yabo, ZHANG Jian, and LIU Yinong. Reconstruction of Turbo-code interleaver at high bit error rate[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(8): 1927-1930. doi: 10.11999/JEIT141556.
- [4] BARBIER J. Reconstruction of turbo-code encoders[J]. *The International Society for Optical Engineering*, 2005, 5819(5): 463-473.
- [5] 解辉, 王峰华, 黄知涛, 等. 基于改进欧几里得算法的卷积码

- 快速盲识别算法[J]. 国防科技大学报, 2012, 34(6): 159-162.
- XIE Hui, WANG Fenghua, HUANG Zhitao, *et al.* A fast method for blind recognition of convolutional codes based on improved Euclidean algorithm[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2012, 34(6): 159-162.
- [6] 刘健, 王晓军, 周希元. 基于 Walsh-Hadamard 变换的卷积码盲识别[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(4): 884-888. doi: 10.3724/SP.J1146.2009.00359.
- LIU Jian, WANG Xiaojun, and ZHOU Xiyuan. Blind recognition of convolutional coding based on Walsh-Hadamard transform[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(4): 884-888. doi: 10.3724/SP.J1146.2009.00359.
- [7] 于沛东, 李静, 彭华. 一种利用软判决的信道编码识别新算法[J]. 电子学报, 2013, 41(2): 302-305.
- YU Peidong, LI Jing, and PENG Hua. A novel algorithm for channel coding recognition using soft-decision[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013, 41(5): 302-305.
- [8] DEBESSU Y G, WU H C, and JIANG H. Novel blind encoder parameter estimation for Turbo codes[J]. *IEEE Communications Letters*, 2012, 16(16): 1917-1920.
- [9] YU Peidong, LI Jing, and PENG Hua. A least square method for parameter estimation of RSC sub-codes of Turbo codes[J]. *IEEE Communications Letters*, 2014, 18(4): 644-647.
- [10] 武恒洲, 罗霄斌, 刘杰. Turbo 码盲识别技术研究[J]. 无线电工程, 2015, 45(5): 24-27.
- WU Hengzhou, LUO Xiaobin, and LIU Jie. Research on blind recognition of Turbo codes[J]. *Journal of Radio Engineering*, 2015, 45(5): 24-27.
- [11] 张旻, 陆凯, 李歆昊, 等. 归零 Turbo 码的盲识别方法[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(6): 1424-1427.
- ZHANG Min, LU Kai, LI Xinhao, *et al.* Blind recognition method for the turbo codes on trellis termination[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2016, 38(6): 1424-1427.
- [12] 张旻, 陆凯, 李歆昊. Turbo 编码类型的盲识别方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(5): 701-707.
- ZHANG Min, LU Kai, and LI Xinhao. Blind identification for the type of Turbo code[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2015, 29(5): 701-707.
- [13] GORDANY P, KESHAVARZ-HADDAD A, and JAMAHHIDI A. Blind recovery of convolutional codes over noisy channels [C]. 24th Iranian Conference on Electrical Engineering, Shiraz, Iran, 2016: 1203-1207.
- [14] 刘俊, 李静, 彭华. 基于校验方程平均符合度的 Turbo 码交织器估计[J]. 电子学报, 2016, 44(5): 1213-1217.
- LIU Jun, LI Jing, and PENG Hua. Estimation of Turbo-code interleaver based on average conformity of parity-check equation[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2016, 44(5): 1213-1217.
- [15] 东阳. Turbo 码盲识别技术研究实现[D]. [硕士学位论文], 电子科技大学, 2015.
- DONG Yang. The Identification of Turbo-codes and its implementation[D]. [Master dissertation], University of Electronic Science and Technology of China, 2015.
- [16] 林晓娟, 王维欢. SIMD-BF 模型上的并行 FWHT 算法研究[J]. 计算机时代, 2011, (1): 30-32.
- LIN Xiaoxian and WANG Weihuan. A study of parallel FWHT algorithm based on SIMD-BF model[J]. *Computer Era*, 2011, (1): 30-32.
- 张立民: 男, 1966 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为卫星信号处理及应用.
- 吴昭军: 男, 1992 年生, 硕士生, 研究方向为信道编码识别.
- 钟兆根: 男, 1984 年生, 博士, 讲师, 主要研究方向为扩频信号处理.