

基于对数符合度下的 RSC 码识别

钟兆根¹, 吴昭军², 张立民², 王志青³

(1. 海军航空大学航空基础学院, 山东 烟台 264001; 2. 海军航空大学航空作战勤务学院, 山东 烟台 264001;
3. 海军航空兵第二师电子对抗雷达声纳中心, 山东 莱阳 265200)

摘 要: 提出了一种基于对数符合度下的识别新算法。首先, 从总的 RSC 码编码方程成立概率出发, 引入能够很好衡量编码方程成立大小的对数符合度概念, 其次, 从 RSC 码约束长度较小特征出发, 构建出编码约束长度为 3~7 的多项式数据库, 通过遍历构建的数据库多项式, 计算多项式所对应的对数符合度值, 最后, 查找最大的对数符合度值所对应的多项式, 即完成多项式识别。该算法只需遍历所构建的 RSC 码多项式库, 减少遍历次数, 其计算量大大减少; 由于算法直接利用的是未经量化的软判决信息, 所以具有较强的低信噪比适应性。仿真结果表明: 在较低的信噪比条件下, 参数的识别率能达到 90% 以上, 同时与现有算法相比, 所提算法对参数的识别性能与时效性具有明显的优势。

关键词: 对数符合度; RSC 码; 多项式数据库; 多项式识别

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2018211

Blind recognition of RSC based on logarithmic conformity

ZHONG Zhaogen¹, WU Zhaojun², ZHANG Limin², WANG Zhiqing³

1. The School of Basis of Aviation Science, Naval Aviation University, Yantai 264001, China

2. The School of Aviation Support, Naval Aviation University, Yantai 264001, China

3. The Electronic Radar and Sonar Center, Second Division of Aviation, Laiyang, 265200, China

Abstract: A new algorithm based on logarithmic conformity was proposed. Firstly, based on the probability of total RSC coding equation, the concept of logarithmic coincidence degree, which could measure the establishment of coding equation, was introduced. Then because of constraint length of RSC, the polynomial database could be generated, and then logarithmic conformity of every polynomial could be calculated when traversing the database. As the results, the RSC could be recognized, because the correct polynomial could make the conformity maximum. The algorithm has small amount of calculation because of finite traversal, which was 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 and its performances are obviously superior to those of existing algorithms.

Key words: logarithmic conformity, RSC code, polynomial database, recognition of polynomials

1 引言

在现代数字通信技术中, 信道编码技术是不可缺少的重要技术之一, 在同等通信信道环境下, 好

的信道编码技术能够降低系统的发射功率。Turbo 码作为一种非常具有前景的编码方法, 自 1993 年提出以来, 不断引起通信界学者们的重视和研究^[1], 如今被广泛运用于卫星通信、深空探测等领域^[2],

收稿日期: 2017-07-25; 修回日期: 2018-06-04

通信作者: 吴昭军, wuzhaojun1992@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.91538201); 泰山学者工程专项基金资助项目 (No.ts201511020)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.91538201), Taishan Scholar Special Foundation (No.ts201511020)

同时作为 3G、4G 信道编码的备选方案之一。递归系统卷积码 (RSC, recursive system convolutional codes) 常作为 Turbo 码的分量编码器, Turbo 码的识别问题首先要解决的是恶劣信噪环境下, 分量编码器多项式的识别, 因为这是后续参数识别的前提, 如交织器参数识别^[3-4], 所以完成低信噪比下 RSC 码识别对于整个 Turbo 码参数的识别具有重要意义^[5]。

Barbier^[6]利用截获的硬判决码元构建二元域中的线性方程组, 通过在二元域中求解方程组解, 实现参数的识别, 但该方法不适用于有误码存在的条件。文献[7]提出了一种改进的欧几里德算法, 该算法适用于 $\frac{1}{2}$ 码率的卷积码, 但同样不适用于高误码

率的实际信道环境; 刘健等^[8]从提高算法容错性的角度出发, 提出了基于 Walsh-Hadamard 变换方法, 相比于以往的识别方法, 该算法对误码的适应性大大提升, 但算法的计算量随编码寄存器个数呈指数级增加。文献[9]首次提出了基于最大期望算法下的 RSC 码盲识别方法, 该方法虽然具有低信噪比下的容错性, 但是计算量十分巨大, 并且在迭代过程中, 算法有时收敛不到全局极小值点。文献[10]定义了校验方程符合度概念, 构建出以编码器系数概率为变量的代价函数, 利用迭代方式对系数求偏导, 得到最优的编码系数, 但该方法同样并不稳定, 往往第一次迭代的值就决定最终的迭代值。

针对上述算法中出现的问题, 本文首先引入了能够很好衡量编码方程成立概率大小的对数符合度概念, 其次针对 RSC 码元实际的特征, 构建出了约束长度为 3~7 的多项式库, 利用未经量化的软判决信息, 计算数据库中每个多项式对应的对数符合度值, 通过求最大对数符合度所对应的多项式, 即完成多项式识别。提出的算法计算复杂度较低, 仅与截获码元的长度以及数据库大小有关, 而且容错性能较好。

2 RSC 识别模型的建立

RSC 码主要由前向结构和反馈编码结构 2 个部分组成^[11], 反馈编码结构能够使 RSC 码的线性关联长度更长, 整个结构等效于一个无限长冲激响应滤波器, 即当输入码重为 1 信息序列时, 编码器的输出码重趋近于无穷大。理论上已经证明 RSC 码作为分量编码器要比一般的卷积码作为分量编码器的性能要好。RSC 码以其特殊的编码结构被广泛运

用作 Turbo 码的分量编码器。码率为 $\frac{1}{2}$ 的 RSC 码编码结构如图 1 所示。

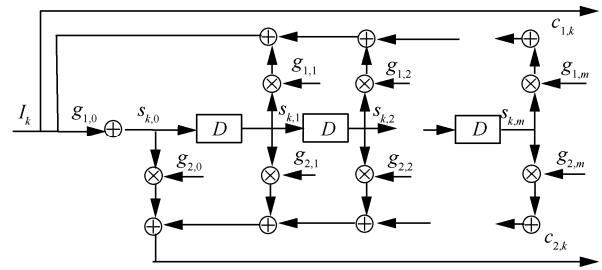


图 1 码率为 $\frac{1}{2}$ 的 RSC 码编码结构

图 1 中 I_k 为 k 时刻的信息码元, $c_{1,k}$ 与 $c_{2,k}$ 分别为 k 时刻的第 1 路和第 2 路码元输出, $s_{k,0}$ 为反馈节点与信息码元 I_k 的和, $s_{k,i}(1 \leq i \leq m)$ 为寄存器状态, 取值为 0 或 1, 其中, m 为寄存器的个数; D 为延时单元, 其前馈结构的生成多项式表达式为 $g_{2,0} + g_{2,1}D + \dots + g_{2,m}D^m$, 反馈生成多项式表达式为 $g_{1,0} + g_{1,1}D + \dots + g_{1,m}D^m$, 其中, m 为寄存器的个数。整个生成多项式记为 $(g_{2,0}, g_{2,1}, \dots, g_{2,m}; g_{1,0}, g_{1,1}, \dots, g_{1,m})$, 通常以八进制表示。以 (1 1 1; 1 0 1) 为例, 整个生成多项式表示为 (7, 5)。将图 1 以编码多项式的形式来表示, 可得到

$$C_1(D) = I(D) \tag{1}$$

$$C_2(D) = I(D) \frac{g_{2,0} + g_{2,1}D + \dots + g_{2,m}D^m}{g_{1,0} + g_{1,1}D + \dots + g_{1,m}D^m} \tag{2}$$

其中, $C_1(D)$ 、 $C_2(D)$ 为第 1、2 路的码元多项式, 可以表示为

$$C_1(D) = c_{1,0} + c_{1,1}D + \dots + c_{1,k}D^k + \dots \tag{3}$$

$$C_2(D) = c_{2,0} + c_{2,1}D + \dots + c_{2,k}D^k + \dots \tag{4}$$

$I(D)$ 为编码前的信息序列, 可以表示为 $I_0 + I_1D + \dots + I_kD^k + \dots$, 联立式(1)和式(2)可以进一步得到

$$C_2(D)(g_{1,0}D^0 + \dots + g_{1,m}D^m) \oplus C_1(D) \cdot (g_{2,0}D^0 + \dots + g_{2,m}D^m) = 0 \tag{5}$$

由式(5)可知, 正确的 RSC 生成多项式能够使信息比特、编码比特满足式(5)的约束关系, 这是 RSC 码生成多项式识别的出发点。

本文假定 Turbo 码码率、交织长度已经完成了

识别，这在实际工程中，利用有限域高斯消元方法已经能够完成识别，如文献[12-13]分别就码率、交织长度等参数提出了极为可行的方法，所以本文要在以上参数已经完成识别的条件下，仅利用截获的每路软判决序列识别 RSC 码的生成多项式。

3 RSC 码识别算法

3.1 算法的基本思想

本文提出的算法总的出发点是从式(5)着手，利用截获的码元信息和遍历的多项式参数来衡量等式(5)成立的可能性大小。即正确的编码多项式能够使截获的信息序列最大限度的满足等式(5)，即

$$\mathbf{g}^* = \arg \max_{\mathbf{g}} \prod_{k=1}^N P(C_{2,k}(D)g_1(D) \oplus C_{1,k}(D)g_2(D) = 0) \quad (6)$$

其中， $\mathbf{g} = \{g_{1,0}, \dots, g_{1,m}, g_{2,0}, \dots, g_{2,m}\}$ ， N 为构建的编码约束方程数目。由于

$$C_{1,k}(D) = c_{1,k}D^0 + c_{1,k+1}D + \dots + c_{1,k+m}D^m \quad (7)$$

$$C_{2,k}(D) = c_{2,k}D^0 + c_{2,k+1}D + \dots + c_{2,k+m}D^m \quad (8)$$

生成多项式 $g_1(D)$ 和 $g_2(D)$ 可写为

$$g_1(D) = g_{1,0}D^0 + g_{1,1}D + \dots + g_{1,m}D^m \quad (9)$$

$$g_2(D) = g_{2,0}D^0 + g_{2,1}D + \dots + g_{2,m}D^m \quad (10)$$

在一个码元的约束长度下，式(5)可进一步转化为

$$\sum_{i=0}^m \oplus g_{1,i}c_{2,k-i} \oplus \sum_{i=0}^m \oplus g_{2,i}c_{1,k-i} = 0 \quad (11)$$

故进一步，式(6)可以转化为

$$\mathbf{g}^* = \arg \max_{\mathbf{g}} \prod_{k=1}^N P\left(\sum_{i=0}^m \oplus (g_{1,i}c_{2,k-i} \oplus g_{2,i}c_{1,k-i}) = 0\right) \quad (12)$$

算法通过遍历多项式数据库，寻出使式(12)中成立的概率最大的系数。

分析式(12)可知，要识别多项式参数，需要计算在某一多项式参数下，同一约束长度下的码元使等式成立的概率值，由于每个等式成立的概率相互独立，故需要将其的概率作乘积运算，显然算法复杂度将大大增加，不利于算法的时效性，所以考虑采用对数似然比运算来简化式(12)，即作对数运算，得到

$$\mathbf{g}^* = \arg \max_{\mathbf{g}} \sum_{k=1}^N \ln \left(\frac{P\left(\sum_{i=0}^m g_{1,i}c_{2,k-i} \oplus g_{2,i}c_{1,k-i} = 0\right)}{P\left(\sum_{i=0}^m g_{1,i}c_{2,k-i} \oplus g_{2,i}c_{1,k-i} = 1\right)} \right) \quad (13)$$

由式(13)定义对数似然符合度为

$$J_k = \ln \left(\frac{P\left(\sum_{i=0}^m g_{1,i}c_{2,k-i} \oplus g_{2,i}c_{1,k-i} = 0\right)}{P\left(\sum_{i=0}^m g_{1,i}c_{2,k-i} \oplus g_{2,i}c_{1,k-i} = 1\right)} \right) \quad (14)$$

式(14)定义的对数符合度值表征了遍历的某一多项式参数使一个约束长度下码元之间的约束关系成立的概率大小。显然， J 越大，成立的概率越大。将式(14)代入式(13)，进一步简化为式(15)一样的形式。

$$\mathbf{g}^* = \arg \max_{\mathbf{g}} \sum_{k=1}^N J_k \quad (15)$$

RSC 码参数的识别问题即可等效为遍历搜寻式(15)值最大的参数。

3.2 对数符合度的计算与算法的实现

式(15)中存在定义的对数符合度，下面重点针对对数符合度的计算方法进行研究。不妨记

$$L(a) = \ln \frac{P(a=0)}{P(a=1)}, \quad \text{则式(14)可以转化为}$$

$$J_k = L\left(\sum_{i=0}^m g_{1,i}c_{2,k-i} \oplus g_{2,i}c_{1,k-i}\right) \quad (16)$$

由文献[14-15]的结论，式(16)进一步化简为

$$J_k = 2 \operatorname{artanh} \left(\prod_{i \in \phi_1} \tanh \left(\frac{L(c_{2,k-i})}{2} \right) \prod_{i \in \phi_2} \tanh \left(\frac{L(c_{2,k-i})}{2} \right) \right) \quad (17)$$

其中，集合 $\phi_1 = \{i | g_{1,i} = 1, i = 0, 1, \dots, m\}$ ，集合 $\phi_2 = \{j | g_{2,j} = 1, j = 0, 1, \dots, m\}$ 。求取式(17)的近似值，得到式(17)的近似表达式^[14-15]为

$$J_k \approx \prod_{i \in \phi_1} \operatorname{sign}(L(c_{2,k-i})) \prod_{i \in \phi_2} \operatorname{sign}(L(c_{1,k-i})) \cdot \min_{\substack{i \in \phi_1 \\ j \in \phi_2}} (|L(c_{2,k-i})|, |L(c_{1,k-i})|) \quad (18)$$

假定信道环境为高斯白噪声，设 $a_{0,t}$ 与 $a_{1,t}$ 分别为第 1 路和第 2 路在时刻 t 时，截获的软判决码元信息，由贝叶斯公式可得 $c_{x,t} = 1$ 的后验概率，如式(19)所示，其中， $x=0,1$ 。

$$P(c_{x,t} = 1 | a_{x,t}) = \frac{P(a_{x,t} | c_{x,t} = 1)P(c_{x,t} = 1)}{P(a_{x,t})} \quad (19)$$

由全概率公式可得

$$P(a_{x,t}) = P(a_{x,t} | c_{x,t} = 1)P(c_{x,t} = 1) + P(a_{x,t} | c_{x,t} = 0)P(c_{x,t} = 0) \quad (20)$$

又由于 $c_{x,t}$ 为随机码元, 故可得 $P(c_{x,t}=0) = P(c_{x,t}=1) = 0.5$, 由式(19)和式(20)进一步得到

$$P(c_{x,t}=1|a_{x,t}) = \frac{P(a_{x,t}|c_{x,t}=1)}{P(a_{x,t}|c_{x,t}=1) + P(a_{x,t}|c_{x,t}=0)} \quad (21)$$

$$P(c_{x,t}=0|a_{x,t}) = \frac{P(a_{x,t}|c_{x,t}=0)}{P(a_{x,t}|c_{x,t}=1) + P(a_{x,t}|c_{x,t}=0)} \quad (22)$$

其似然比为

$$\frac{P(c_{x,t}=0|a_{x,t})}{P(c_{x,t}=1|a_{x,t})} = \frac{P(a_{x,t}|c_{x,t}=0)}{P(a_{x,t}|c_{x,t}=1)} \quad (23)$$

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, 故进一步得到似然比的计算式如式(24)所示。

$$\frac{P(c_{x,t}=0|a_{x,t})}{P(c_{x,t}=1|a_{x,t})} = e^{\frac{4a_{x,t}}{2\sigma^2}} \quad (24)$$

其中, σ^2 为噪声方差, 对两边取对数, 进一步得到 $c_{x,t}$ 的对数符合度为

$$L(c_{x,t}) = \frac{-4a_{x,t}}{2\sigma^2} \quad (25)$$

由于采用 2PSK 调制方式, 信噪比 SNR、信号幅度 A 与噪声方差 2, 三者之间的关系为

$$SNR = \frac{A^2}{2\sigma^2} \quad (26)$$

又因为设置的信号幅度为 1, 故 $c_{x,t}$ 的对数符合度进一步简化为

$$L(c_{x,t}) = -4SNRa_{x,t} \quad (27)$$

从式(18)来看, J_k 的求解方法是容易实现的, 仅仅存在取符号运算与大小比较运算。

结合得到的由对数符合度计算方法, 进一步得到多项式的识别方法, 即遍历所有可能的 RSC 码生成多项式参数, 正确的多项式参数一定能够使方程成立概率最大, 而不正确的多项式参数得到的对数符合度值一定在 0 附近徘徊, 同时需要注意的是, 在工程实际中, 作为 Turbo 码分量编码器的 RSC 码约束长度最大不会超过 7, 因为约束长度太大, 必然会增加编码器中寄存器的个数, 导致工程中译码的复杂度成倍增加, 而性能优越的好码个数是有限的, 当约束长度不大于 7 时, 总的生成多项式个数

为 905 个, 其中, 约束长度为 3 的个数为一种, 约束长度为 4 的个数为 10 种, 约束长度为 5 的个数为 42 种, 约束长度为 6 的个数为 170 种, 约束长度为 7 的个数为 682 种^[16], 故可以在开始识别之前构建 RSC 生成多项式数据库, 遍历数据库中的 RSC 码多项式参数, 则最大的对数符合度值所对应的多项式参数就是估计的参数。

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 按照约束度从 3~7 的顺序, 构建出多项式数据库, 多项式参数以 0、1 序列保存。

步骤 2 从头到尾遍历构建的多项式数据库, 计算在每一个多项式下、每一时刻的约束长度下对数符合度值。

步骤 3 求取步骤 2 中多项式在不同时刻的对数符合度之和, 得到 $[J_{s,1}, J_{s,2}, \dots, J_{s,w}]$, 其中, w 为数据库中 RSC 码生成多项式个数, $J_{s,i}$ 表示数据库中第 i 个多项式对应的对数符合度的总和。

步骤 4 比较不同多项式总的对数符合度, 求取 $\max[J_{s,1}, J_{s,2}, \dots, J_{s,w}]$ 所在的位置, 从而估计出正确识别多项式在数据库中的位置, 完成识别。

虽然算法的推导过程是基于 $\frac{1}{2}$ 码率的 RSC 码, 但该算法同样适应于 $\frac{1}{n}$ 的 RSC 码, 此时只需要将 $\frac{1}{n}$ 的 RSC 码拆分成 $n-1$ 个 $\frac{1}{2}$ 码率的 RSC 码, 逐个应用本文算法进行识别。

3.3 算法的计算复杂分析

设截获的软判决码元长度为 L , 遍历的生成多项式寄存器个数为 m , 则能够构建的编码方程个数最多为 $L-m+1$ 个, 故针对某个多项式, 首先需要进行 $2m(L-m+1)$ 次的乘法运算和 $2m(L-m+1)$ 次的比较运算, 得到不同时刻的方程对数符合值, 然后进行 $L-m+1$ 次的加法运算得到总的对数符合度值。设构建的多项式数据库中多项式个数为 N 个, 则总的乘法次数为 $2Nm(L-m+1)$ 次, 加法次数为 $N(L-m+1)$, 比较运算次数为 $2Nm(L-m+1)$, 由于 N 与 L 远大于 m , 故总的计算复杂度近似为 $o(NL)$ 。

通过以上分析可知: 本文算法运算量近似与利用截获码元个数以及生成多项式数目成正比, 如果在识别之前, 能够实现 m 值的估计, 那么遍历

的多项式将大大减少，从而算法的时效性也将大大提高。

4 仿真验证及分析

4.1 算法有效性的验证

首先验证算法对于参数识别的有效性，设定编码的 RSC 码多项式为 $\left(\frac{1+D+D^4+D^6}{1+D^5+D^6}\right)$ ，八进制表示为(103,145)，在构建的生成多项式数据库中的索引编号为 253，设定噪声环境中信噪比为 3 dB，截获码元数目为 1 000，调制方式为 2PSK，按照本文提出的算法步骤，通过遍历生成多项式数据库，求解对数符合度值，记录每次遍历的多项式所对应的对数符合度值，如图 2 所示。

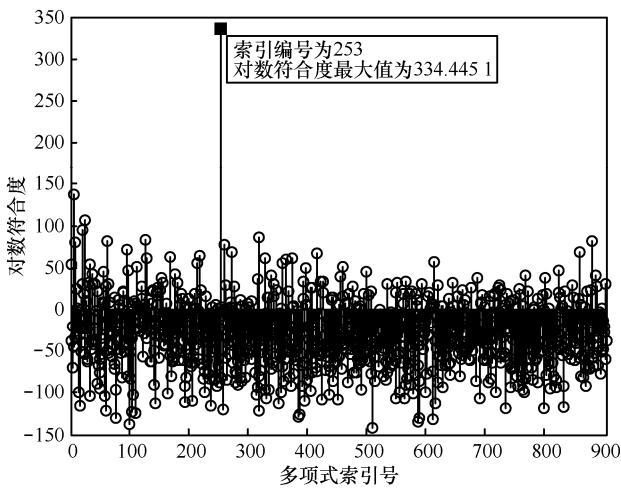


图 2 不同多项式所对应的对数符合度值

从图 2 的结果来看，在索引编号为 253 时，对数符合度出现最大值为 334.445 1，从而识别出编码多项式，该多项式索引号与仿真设定的多项式索引号一致，说明本文算法对于 RSC 码的识别有效。

4.2 码元长度与信噪比对符合度值的影响

从算法的原理来看，截获码元数目以及环境噪声强度对于对数符合度的大小有较大的影响，本节主要考察这 2 种因素对于符合度的影响情况，设定 RSC 码的编码多项式为(7,5)，信噪比取值范围为-2~6 dB，步长为 2 dB，截获码元数目范围为 200~2 500，步长为 200，记录不同信噪比以及截获码元数目下的对数符合度值，结果如图 3 所示。

从图 3 来看，截获码元数目越多，对数符合度值越大，二者是单调递增的关系。同时还应该注意到，信噪比主要影响曲线增加的快慢程度，信噪比

越大，曲线越陡峭，反之则越缓。由此可知，信噪比和截获的码元数目越大，正确识别出多项式参数的概率就越大。

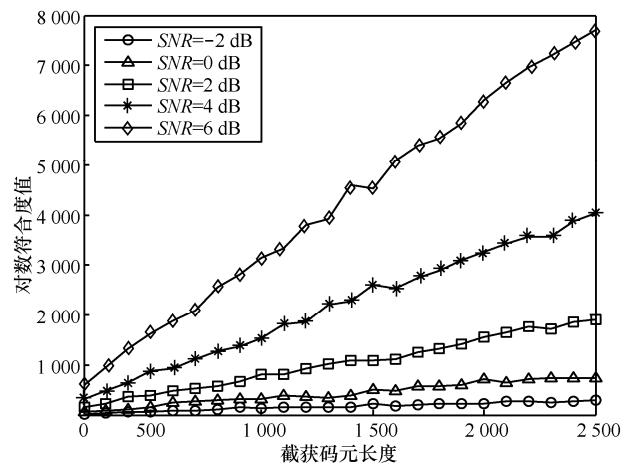


图 3 信噪比与截获码元数目对符合度的影响

4.3 正确多项式和不正确多项式对符合度的影响

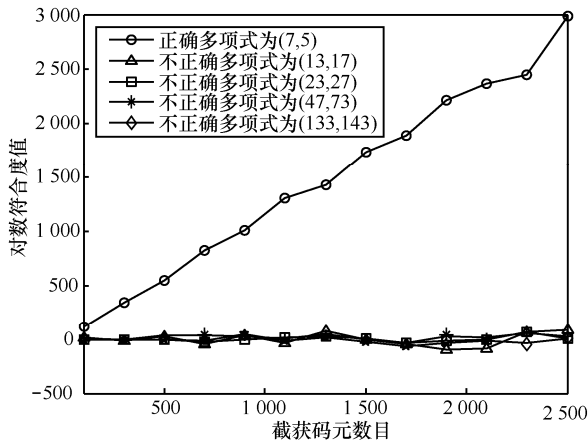
进一步分析正确多项式和不正确多项式对数符合的差异程度，设定正确多项式为(7,5)，编码时，遍历的不正确多项式分别为(13,17)(23,27)(47,73)(133,143)。首先固定信噪比值 SNR=3 dB，截获码元数目范围为 200~2 500，步长为 200，记录这 5 种多项式在不同的截获码元长度下的对数符合度值，结果如图 4(a)所示；然后固定截获码元数目为 1 000，设定信噪比 SNR 取值范围为-3~6 dB，同样记录这 5 种多项式在不同的信噪比下的对数符合度值，结果如图 4(b)所示。

从图 4 记录的结果来看，正确多项式与不正确多项式的对数符合度差距较为明显，特别是当截获的码元数目增大以及环境信噪比增大时，两者的差距将会更加明显，能够从对数符合度上将其区分开来，进一步说明了本文算法的正确性，同时表明了通过增加截获码元的数目以及增加信噪比，能够改善算法的性能。

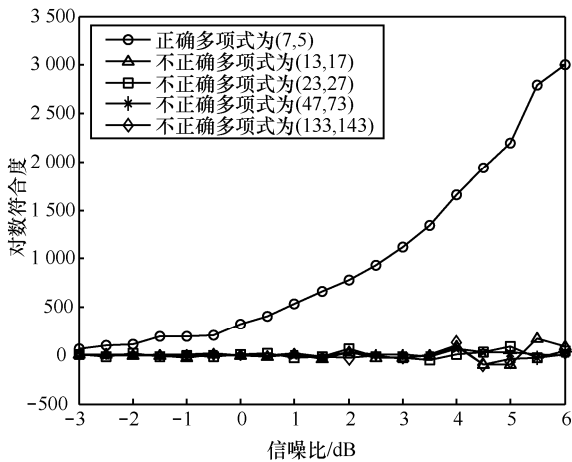
4.4 算法的容错性分析

算法容错性能分析，主要从编码约束长度以及截获的码元数量上来考察算法的识别性能。

首先考察编码约束长度对算法的影响，设定截获的码元个数为 1 000，编码多项式依次为(7,5)(13,17)(23,27)(47,73)(113,143)，代表编码结构中寄存器个数 m 为 2~6，设定信噪比 SNR 为-5.5~3 dB，取值步长为 0.5 dB，仿真次数为 1 000 次，得到结果如图 5 所示。



(a) 不同码元数目下, 5种多项式符合度对比



(b) 不同信噪比下, 5种多项式符合度对比

图 4 正确与不正确多项式的对数符合度对比

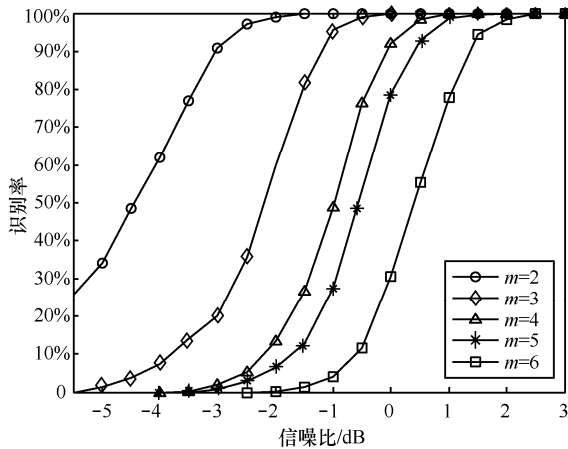


图 5 不同编码约束长度对于算法的影响

其次考察截获码元数量对于算法性能的影响, 设定编码多项式为(45,67), 其约束长度为 6, 设定截获码元数量 L 分别为 500、1 000、1 500、2 000 及 2 500 这 5 个值, 信噪比 SNR 为 $-2\sim 3$ dB, 取值步长为 0.5 dB, 蒙特卡洛仿真次数为 1 000 次, 结果如图 6 所示。

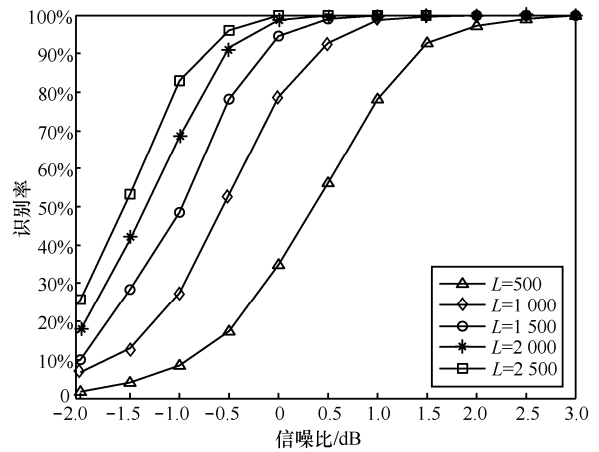


图 6 码元长度对于算法性能的影响

从图 5 可看出, 编码约束长度对于参数的识别率影响是比较大的, 原因是当约束长度增加越大, 在同一信噪比下的约束关系就越容易破坏, 在识别率曲线上表现为随着约束长度增加和信噪比的减少, 参数识别率急剧下降; 从图 6 可知, 截获的码元数量能够有效地增加算法的识别性能, 原因是截获的码元越多, 越能够反映出实际的统计特性, 正确的多项式所对应的对数符合度值与不正确的多项式对应的符合度值差距越大。整体来看, 本文算法的容错性能较强, 在信噪比小于 0 dB 时, 部分多项式的识别率在 90% 以上。

4.5 与其他算法比较

与本文算法进行比较的是基于软判决的识别算法^[17]以及由 Walsh-Hadamard 算法改进而来的快速 Walsh-Hadamard 变换 (FWHT, the fast Walsh-Hadamard transform) 算法^[18]。首先针对算法对于参数识别性能的比较, 设定编码器的编码约束度为 3, 截获码元数目为 1 000, 将 3 种算法在同一条件下, 针对参数的识别率进行比较, 蒙特卡洛实验次数为 1 000 次, 记录正确识别率如图 7 所示。

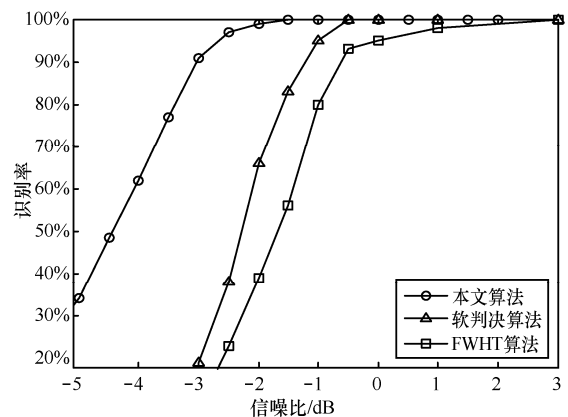


图 7 3 种算法识别性能的比较

从图 7 所得到的结果来看, 本文算法要好于基于软判决算法以及 FWHT 算法, 主要因为本文首先构建了 RSC 码生成多项式数据库, 将实际中不可能的多项式进行了剔除, 避免了多余的生成多项式对于算法的干扰, 而基于软判决算法以及 FWHT 算法, 本质上是一个盲目的穷尽算法, 穷尽的多项式越多, 对于识别而言越不利。

其次, 针对 3 种算法实时性的比较, 在不同的编码约束长度下, 采用这 3 种算法进行识别, 记录这 3 种算法完成一次识别所需要的时间, 结果记录于表 1 中。

表 1 3 种算法的识别时间对比

寄存器个数	本文算法/s	软判决算法/s	FWHT 算法/s
$m=2$	0.019 9	0.716	0.045 6
$m=3$	0.113 2	1.798	0.048 5
$m=4$	0.364 3	5.174	0.064 2
$m=5$	1.194	21.152	0.144
$m=6$	4.104 2	97.684	0.484

从表 1 来看, 识别实时性最好的是 FWHT 算法, 其次是本文所提出的识别算法, 最差的是基于软判决的算法。产生这种结果的主要原因是基于软判决的算法利用了信道中的软判决信息, 计算方法本身就很简单, 同时采用穷尽遍历的方式, 其计算效率很低, FWHT 算法是 Walsh-Hadamard 算法的改进, 采用了蝶形变换, 能够实现并行运算, 计算效率大大增加, 故其实时性最好, 而本文算法通过构建 RSC 码多项式数据库剔除了大量不可能的多项式, 减少许多无用的参数遍历, 从而实现计算效率的提高, 虽然本文算法的实时性不如 FWHT 算法, 但从图 7 可知, 本文算法的识别性能要远远好于 FWHT 算, 故综合实时性和识别性能, 本文算法是最优的算法。

5 结束语

本文首先利用 RSC 码编码结构, 构建了 RSC 码参数的识别模型; 再根据截获信道的软判决信息, 引入了对数符合度的概念来衡量编码方程成立的概率大小; 同时利用 Turbo 码分量编码器的 RSC 码编码约束长度较小的特点, 构建了 RSC 码生成多项式数据库, 通过遍历多项式数据库, 求取最大对数符合度对应的多项式, 从而进行参数识别。与软判决算法和 FWHT 算法相比, 本文算法的识别性能

优异, 实时性较好, 在信息截获领域具有一定的工程实用性。

值得注意的是, 本文假定的调制方式为 2PSK, 对于其他调制方式, 还需要进一步推导其对数符合度的简便计算方法, 同时, 下一步的研究工作是利用软判决信息建立起分量编码器与 Turbo 码交织器的联合识别模型, 从而为 Turbo 码盲译码提供重要的信息。

参考文献:

- [1] MUKHTAR H, AL-DWEIK A, SHAMI A. Turbo product codes: applications, challenges, and future directions[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(4): 3052-3069.
- [2] LI H, GAO Z, ZHAO M, et al. Partial iterative decode of turbo codes for on-board processing satellite platform[J]. IEEE Journals & Magazines, 2015, 12(11):1-8.
- [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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] BARBIER J. Reconstruction of turbo-code encoders[J]. The International Society for Optical Engineer, 2005, 5819(5):463-473.
- [7] 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]. 国防科技大学学报, 2012, 34(6):159-162.
- [8] 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.
- [9] DEBESSU Y G, WU H C, JIANG H. Novel blind encoder parameter estimation for turbo codes[J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(16): 1917-1920.
- [10] YU P D, LI J, PENG H. A least square method for parameter estima-

- tion of RSC sub-codes of turbo codes[J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(4): 644-647.
- [11] 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 H Z, LUO X B, LIU J. Research on blind recognition of turbo codes[J]. Journal of Radio Engineering, 2015, 45(5): 24-27.
- [12] NASERI A, AZMON O, FAZELI S. Blind recognition algorithm of Turbo codes for communication intelligence systems[J]. International Journal of Computer Science Issues, 2011, 8(6): 68-72.
- [13] 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 M, LU K, LI X H, et al. Blind recognition method for the turbo codes on trellis termination[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2016, 38(6): 1424-1427.
- [14] HAGENAUER J, OFFER E, PAKER L. Iterative decoding of binary block and convolutional codes[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1996, 42(2): 429-445.
- [15] MOOSAVI R, ERIK G. Fast blind recognition of channel codes[J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(5): 1393-1405.
- [16] 东阳. Turbo 码盲识别技术研究与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
DONG Y. The Identification of Turbo-codes and its' implementation[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.
- [17] 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 P D, LI J, PENG H. A novel algorithm for channel coding recognition using soft-decision[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(5): 302-305.
- [18] 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 X X, WANG W H. A study of parallel FWHT algorithm based on SIMD-BF model[J]. Computer Era, 2011, (1): 30-32.

[作者简介]



钟兆根 (1984-), 男, 江西南昌人, 博士, 海军航空大学讲师, 主要研究方向为通信信号盲分离与统计信号处理。



吴昭军 (1992-), 男, 四川遂宁人, 海军航空大学博士生, 主要研究方向为信道编码盲识别。

张立民 (1966-), 男, 辽宁开原人, 博士, 海军航空大学教授, 主要研究方向为卫星信号处理及应用。

王志青 (1987-), 男, 山东临沂人, 海军航空兵第二师电子对抗雷达声纳中心助理工程师, 主要研究方向为航空电子对抗数据分析与处理。