

低信噪比下归零Turbo码码长及其帧同步识别

吴昭军^① 张立民^{*①} 钟兆根^② 于柯远^① 杨芸丞^②

^①(海军航空大学信息融合研究所 烟台 264001)

^②(海军航空大学航空基础学院 烟台 264001)

摘 要: 针对目前高斯消元法在归零Turbo码长、帧同步等参数识别过程存在容错性能低且计算复杂度高的缺点, 该文提出一种低信噪比(SNR)下基于差分似然差(DLD)的识别算法。首先通过定义差分似然差的概念, 利用归零Turbo码帧头两码元差分似然差为正值(“+”)的特性, 构建分析矩阵实现码长的识别; 其次, 提出基于最小错误判决准则下的差分似然差“+”位置门限判决方法, 完成帧同步; 最后, 从工程实际出发, 遍历寄存器个数的可能值, 实现码率、寄存器个数以及交织长度识别。仿真实验表明: 所提算法对于归零Turbo码码长、帧同步等参数识别有效, 差分似然差“+”位置分布与分析的数据结构特征一致, 判决门限能够有效判断差分似然差“+”位置, 同时, 算法容错性能较强, 在信噪比为-5 dB条件下, 码长、帧同步等参数识别率能够达到90%以上, 并且算法的复杂度远小于现有算法。

关键词: 归零Turbo码; 差分似然差; 帧结构特征; 码长; 帧同步; 识别

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)09-2063-08

DOI: 10.11999/JEIT180903

Blind Recognition of Code Length and Synchronization of Turbo Codes on Trellis Termination at Low SNR

WU Zhaojun^① ZHANG Limin^① ZHONG Zhaogen^②
YU Keyuan^① YANG Yuncheng^②

^①(Department of Information Fusion, Naval Aviation University, Yantai 264001, China)

^②(School of Aviation Basis, Naval Aviation University, Yantai 264001, China)

Abstract: In order to overcome the shortcomings of low fault-tolerance and high computational complexity in the process of parameter identification such as code length and synchronization of Turbo code, a new algorithm based on Differential Likelihood Difference (DLD) at low Signal-to-Noise Ratio (SNR) is proposed. Firstly, the concept of DLD is defined, and the analysis matrix is constructed to identify the code length by using the characteristic that the DLD between two codes in Turbo frame terminal is positive (“+”); Secondly, a method based on the minimum error decision criterion to decide DLD “+” position is proposed to complete frame synchronization. From the engineering practice, the possible values of the number of registers are traversed to realize the recognition of the code rate, the number of registers and the interleaving length. Simulation results show that the proposed algorithm is effective in identifying parameters such as code length and frame synchronization, the position distribution of DLD “+” is consistent with the data structure characteristics of the analysis, and the threshold can effectively determine the position of DLD “+”. At the same time, the algorithm has strong fault-tolerant performance. Under the condition of SNR -5 dB, the identification of code length, frame synchronization and other parameters can reach more than 90%, and the complexity of the algorithm is far less than the existing algorithms.

Key words: Turbo codes on trellis termination; Differential Likelihood Difference (DLD); Frame structure characteristics; Code length; Frame synchronization; Recognition

收稿日期: 2018-09-20; 改回日期: 2019-01-15; 网络出版: 2019-04-02

*通信作者: 张立民 iamzlm@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61179016), 泰山学者工程专项(ts201511020)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61179016), Taishan Scholar Special Foundation (ts201511020)

1 引言

Turbo码自1993年提出以来,不断受到通信界的关注,如今已经广泛应用于卫星通信以及深空探测等领域^[1,2]。归零Turbo码参数的识别问题,首先要解决的是归零Turbo码码长、同步位置、码率等基本参数的识别,因为目前大量Turbo码分量编码器^[3-5]以及交织器^[6-9]等重要参数识别算法都以码长、码率、帧同步参数已知为前提,研究恶劣信道下适用的码长、帧同步、码率等参数的识别对于分量编码器以及交织器的识别同样具有重要意义。

目前针对归零Turbo码识别的算法主要集中在分量编码器、伪随机交织器等参数的识别,这些算法往往假定Turbo码码长、帧同步、码率等为已知,这导致分量器以及伪随机交织器算法的实际应用受限。然而针对Turbo码码长、码率、帧同步等参数的识别算法较少,绝大部分研究工作局限于构建分析矩阵,采用二元域中高斯消元方法。文献^[10]针对线性分组码码长以及帧同步参数识别,提出了二元域中高斯消元方法,该方法虽然针对的是线性分组码的识别,但是对于后续Turbo码相关参数的识别提供了理论基础;文献^[11-16]针对归零Turbo码以及不归零Turbo码的码长以及码率识别问题,提出基于高斯消元求解矩阵秩量比的算法,该算法在无误码和Turbo码码长较小时,具有一定的工程实用性,但是一旦误码率出现或是码长增加时,算法的适用性将大打折扣;为了克服直接高斯消元方法带来的不足,文献^[17,18]提出了误码条件下,基于最小判决错误概率下的消元列判决算法,该方法提高了以往高斯消元方法容错性不足的缺点,但是却增加了求解判决门限时间消耗,同时随着码长和误码的增加,算法的识别性能将会急剧下降;文献^[19]从提高参数识别容错性角度出发,首先构建一系列的分析矩阵,然后采用小区域滑动窗方式,判别分析矩阵列与列之间的相关性,该方法虽然在容错性上具有一定的改进,但是同样具有实时性不好的缺点。

鉴于目前算法存在的不足,本文提出了一种低信噪比下,直接利用截获的软判决信息完成参数识别算法。本算法首先定义出差分似然差概念,将截获的软判决序列转化为相邻码元之间差分似然差序列;其次利用归零Turbo码特殊的编码结构,即帧头两码元间差分似然差为正的,构建分析矩阵,当分析矩阵的列数等于归零Turbo码码长整数倍时,帧头所在列的1阶累积量将远远大于其它列,从而完成码长识别;再次,基于最小判决错误概率准则得到差分似然差“+”的检测门限,通过

遍历“+”位置,完成帧同步;最后利用码长、码率、寄存器个数以及交织长度之间的数量关系,完成码率、寄存器个数以及交织长度的识别。提出的算法直接利用了截获的软判决信息,具有较强的低信噪比鲁棒性,同时,避免了复杂的高斯消元,其参数的实时性得到大大提高。

2 Turbo码原理以及高斯消元方法缺陷

目前常用的Turbo码结构是并行级联型,其通用的结构示意图如图1所示。

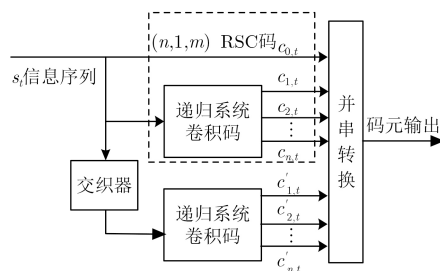


图1 归零Turbo码编码结构

图1中, s_t 表示 t 时刻的信息码元, 码元序列 $(c_{0,t}, c_{1,t}, \dots, c_{n,t})$ 表示第1个分量编码器输出, 而 $(c'_{1,t}, c'_{2,t}, \dots, c'_{n,t})$ 表示第2个分量编码器编码输出, 然后将并行的编码码元串行输出。

在Turbo码编码结构中, 分量编码器常常采用递归系统卷积码(Recursive System Convolutional, RSC), 图2所示为码率为1/2的RSC码结构。

图2中的编码结构由两部分构成, 即反馈部分和前向编码结构, 以编码多项式的形式可以表示为

$$C_0(D) = S(D) \quad (1)$$

$$C_1(D) = S(D) \frac{g_{1,0} + g_{1,1}D + \dots + g_{1,m}D^m}{g_{0,0} + g_{0,1}D + \dots + g_{0,m}D^m} \quad (2)$$

其中, $S(D)$, $C_1(D)$ 以及 $C_2(D)$ 为码元多项式。

目前针对归零Turbo码码长、码率以及帧同步参数识别算法, 主要是基于有误码条件下的高斯消元法^[17,18], 但是算法性能难以突破误码0.01的量级。实际的信道环境较为恶劣, 误码情况常常达到 10^{-1} 量级, 所以该方法在误码较大和码长较大的情况下不适用; 基于此, 本文首先定义出差分似然差的概念, 直接利用信道截获的软判决信息, 构建出差分似然差新序列, 利用归零Turbo码特殊的编码结构, 完成归零Turbo码码长、帧同步、码率等参数的识别。

3 基于差分似然差下的归零Turbo参数识别

由分量编码器的特点可知, 在时刻 t 的输出码元与信息码元之间的关系为

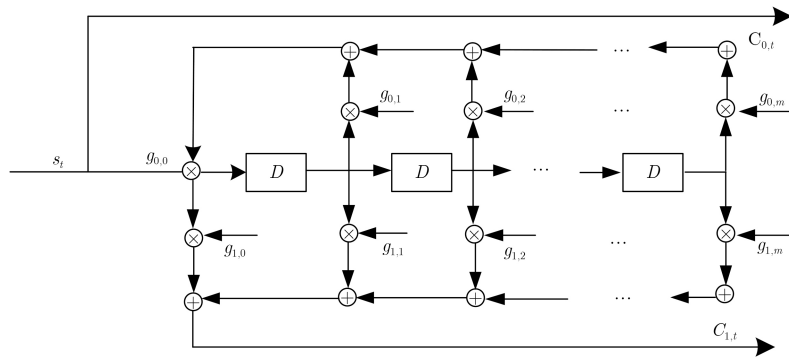


图 2 RSC码编码结构图

$$c_{i,t} = \left(c_{0,t} \oplus \sum_{j=1}^m \oplus I_{t,j} \cdot g_{0,j} \right) \cdot g_{i,0} \oplus \sum_{j=1}^m \oplus I_{t,j} \cdot g_{i,j} \quad (3)$$

式(3)中 $c_{i,t}$ ($0 \leq i \leq t$)表示第 i 路 t 时刻的码元, m 为编码器中寄存器个数; $I_{t,j}$ 表示 t 时刻, 寄存器 j 的状态, 取值为0或是1; $g_{i,j}$ ($0 \leq i \leq n, 0 \leq j \leq m$)表示第 i 路RSC码多项式第 j 个系数。

实际RSC码编码器中, 为了获得码元之间最大的约束长度, 一般多项式要满足 $g_{i,0}=1$, 故式(3)进一步化简为

$$c_{i,t} = c_{0,t} \oplus \sum_{j=1}^m (g_{0,j} \oplus g_{i,j}) \cdot I_{t,j} \quad (4)$$

将式(4)进一步变形, 得到 $c_{i,t}$ 与 $c_{0,t}$ 二元域中差分结果为

$$c_{i,t} \oplus c_{0,t} = \sum_{j=1}^m (g_{0,j} \oplus g_{i,j}) \cdot I_{t,j} \quad (5)$$

同理可知,

$$c_{i,t} \oplus c_{j,t} = \sum_{k=1}^m (g_{j,k} \oplus g_{i,k}) \cdot I_{t,k} \quad (6)$$

从式(5)与式(6)来看, Turbo码分量编码器在同一时刻 t 下, 不同支路码元之间差分结果仅仅与该时刻寄存器状态、编码多项式参数有关。由于归零Turbo码在每帧数据开始编码时, 寄存器状态为全0, 故在编码初始时刻, 归零Turbo码前 n 码元差分结果一定为0。这就为Turbo码码长识别以及帧同步参数识别提供可能。

3.1 码长识别

为了克服硬判决码元丢失了大部分信道度量信息, 同时克服基于高斯消元法容错性极差的不足, 本文直接利用信息截获的软判决信息, 在实数域中完成参数的识别。首先引入在时刻 t , 码元 c_t 似然差^[20]的概念, 即

$$\text{LD}(c_t) = 2P(c_t = 0|x_t) - 1 \quad (7)$$

式(7)中 $\text{LD}(c_t)$ 代表了 c_t 取值为0的可能性大小, 当

$\text{LD}(c_t)$ 越接近于1, 则 $c_t = 0$ 的可能性就越大; 反之, $\text{LD}(c_t)$ 越接近于-1, 则 $c_t = 1$ 的可能性就越大。在似然差的基础上, 进一步定义在时刻 t 下, 两码元 $c_{i,t}$ 与 $c_{j,t}$ 之间差分似然差的概念, 即

$$\text{DLD}(c_{i,t} \otimes c_{j,t}) = \text{LD}(c_{i,t}) \cdot \text{LD}(c_{j,t}) \quad (8)$$

概率值 $P(c_t = 0|x_t)$ 可以用似然函数来计算, 设截获码元 $c_{i,t}$ 与 $c_{j,t}$ 的软判决信息在时刻 t 为分别为 $x_{i,t}$ 以及 $x_{j,t}$, 信道噪声为0均值, 方差为 σ^2 的高斯白噪声, 设定调制方式为2PSK, 载波的幅度为 A , 则

$$P(c_{i,t} = 0|x_{i,t}) = \frac{P(x_{i,t}|c_{i,t} = 0) P(c_{i,t} = 0)}{P(x_{i,t}|c_{i,t} = 0) P(c_{i,t} = 0) + P(x_{i,t}|c_{i,t} = 1) P(c_{i,t} = 1)} \quad (9)$$

在没有任何先验信息条件下, $P(c_{i,t} = 1) = P(c_{i,t} = 0) = 0.5$, 故式(9)进一步化简为

$$P(c_{i,t} = 0|x_{i,t}) = \frac{1}{1 + e^{2Ax_{i,t}/\sigma^2}} \quad (10)$$

联立式(7), 式(8), 式(10), 得到差分似然差实用的计算公式

$$\text{DLD}(c_{i,t} \otimes c_{j,t}) = \left(\frac{1 - e^{2Ax_{i,t}/\sigma^2}}{1 + e^{2Ax_{i,t}/\sigma^2}} \right) \cdot \left(\frac{1 - e^{2Ax_{j,t}/\sigma^2}}{1 + e^{2Ax_{j,t}/\sigma^2}} \right) \quad (11)$$

当时刻 t 为归零Turbo码帧同步初始时刻时, 由于寄存器的状态为全0, 由差分似然差的概念可知, $\text{DLD}(c_{i,t} \otimes c_{j,t}) > 0$, 且信噪比越大, $\text{DLD}(c_{i,t} \otimes c_{j,t})$ 越趋近于1。由此, 可以将截获的软判决信息, 从前到后连续两项之间利用式(11)求取差分似然差, 从而得到新的差分似然差序列, 然后利用新序列, 构建一系列分析矩阵, 当分析矩阵的列数等于归零Turbo码的码长或是其整数倍时, 分析矩阵中数据帧初始位置所在列元素将大于0, 其1阶累积量将远远大于其它列上1阶累积量; 当分析矩阵

的列数不等于码长的整数倍时,分析矩阵各列上的元素正负号随机出现,其1阶累积量近似为0。

由上述归零Turbo码码长识别原理,可以进一步得到具体的码长识别步骤如下:

步骤1 将截获的软判决码元序列转化为似然差LD;

步骤2 将转化的似然差序列从前到后,相邻两项之间依次按照式(11)求取差分似然差DLD新序列;

步骤3 构建分析矩阵 $\mathbf{A}_{M \times j}$,设截获的码长为 L_s ,设定分析矩阵列数为 j (初始值取1),行数 M 为一定值,将步骤2中的数据按行方向依次排入分析矩阵中;

步骤4 求取步骤3中分析矩阵每列元素的1阶累积量,得到行向量 $\mathbf{s}_{1 \times j}$,同时存储行向量中最大的元素值于向量 $\mathbf{cum}$ 中,即 $\mathbf{cum}(j) = \max(\mathbf{s}_{1 \times j})$;

步骤5 $j=j+1$,重复步骤3和步骤4,直到 $M \cdot j > L_s$,算法停止,此时输出归零Turbo码码长参数 $L = \max(\mathbf{cum}(j))$ 。

3.2 帧同步位置识别

首先定义差分似然差结果为正的位置为“+”,结果符号为不确定的位置为“×”。分析式(5)、式(6)可知, $c_{i,t} \oplus c_{j,t}$ 的结果,不仅与寄存器状态有关,而且与多项式系数也有关系。对每帧数据刚开始编码时,设 $g_{i,k} = g_{j,k} (0 \leq k \leq k_1)$,则在时间 $0 \leq t \leq k_1$,不论寄存器状态为何值,码元 $c_{i,t}$ 与 $c_{j,t}$ 之间的差分似然差一定为“+”;同理在每帧数据编码结束时,编码器需要增加相应的收尾比特,使得寄存器状态归零,若 $g_{i,k} = g_{j,k} (k_2 \leq k \leq m)$,则不论寄存器状态怎样,码元 $c_{i,t}$ 与 $c_{j,t}$ 之间的差分似然差也一定为“+”。由式(5)可知,码元前向差分似然运算中,由于 $g_{i,0} = 1 (0 \leq i \leq n)$,从帧同步位置起到第 $n-1$ 个位置一定为差分似然差“+”位置,紧随其后是经过交织处理的第1码元与未经过交织处理的码元做差分似然差,其结果为不确定“×”位置,然后紧接着是 $n-2$ 个差分似然差“+”位置和1个差分似然差不确定位置“×”,即帧同步时,初始数据帧的数据结构特征如图3所示。

其次当帧同步后,由于在RSC码多项式系数中 $g_{0,m} = g_{1,m} = \dots = g_{n,m} = 1$,由归零比特添加方法可知,在每帧末尾 $2n$ 个差分似然差数据中,前 $n-1$ 个比特位置是“+”,倒数第 n 个比特位和最后一个比特位之间是 $n-1$ 个“+”,故 $2n$ 个结尾比特数据特征如图4所示。

由图3以及图4可知,帧同步后,帧头以及帧尾数据结构特征,具有4大特点:

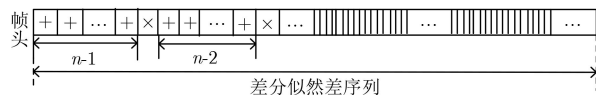


图3 帧同步头数据结构特征

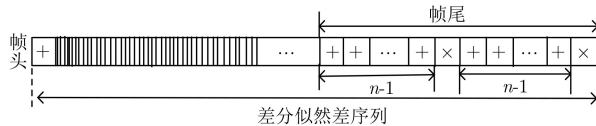


图4 帧同步末尾数据结构特征

(1) 同步头位置一定是确定差分似然差“+”位置;

(2) 第1个差分似然差不确定位置“×” ps_1 与第2个差分不确定位置“×” ps_2 关系为

$$2ps_1 - 1 = ps_2 \quad (12)$$

(3) 帧同步后,第1个差分似然差“×” ps_1 与倒数第2个差分似然差“×” ps'_2 ,关系为

$$ps'_2 = L - ps_1 \quad (13)$$

其中, L 为码长

(4) 帧尾最后一个差分似然差“+”位置与码长之差为1。

在归零Turbo码帧同步分析中,帧同步后数据结构4大特征已经明确,下面重点解决如何在分析矩阵中检测出差分似然差“+”位置,为帧同步位置识别准备条件。检测的基本思想是利用“+”位置与“×”位置所在列元素统计特性,合理设定门限,从而实现检测。首先研究差分似然差“+”位置的统计特性。

在码元 c 为0,1条件下,截获的软判决信息 x 的条件概率密度函数 $f_0(x)$ 与 $f_1(x)$ 分别为

$$f_0(x) = f(x|c=0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-(x+1)^2/2\sigma^2} \quad (14)$$

$$f_1(x) = f(x|c=1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-(x-1)^2/2\sigma^2} \quad (15)$$

由于是差分似然差“+”所在列,则相邻两码元之间必须满足的条件是 $c_k = c_{k+1} = 1$ 或是 $c_k = c_{k+1} = 0$,每种情况概率为0.5。设 x 为 c_k 软判决信息, y 为 c_{k+1} 软判决信息,则差分似然差“+”位置的均值为

$$u_+ = 0.5 \left(\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1 - e^{-2x/\sigma^2}}{1 + e^{-2x/\sigma^2}} f_0(x) dx \right)^2 + 0.5 \left(\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1 - e^{-2x/\sigma^2}}{1 + e^{-2x/\sigma^2}} f_1(x) dx \right)^2 \quad (16)$$

差分似然差“+”位置的方差为

$$\sigma_+^2 = 0.5 \left(\int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{1 - e^{-2x/\sigma^2}}{1 + e^{-2x/\sigma^2}} \right)^2 f_0(x) dx \right)^2 + 0.5 \left(\int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{1 - e^{-2x/\sigma^2}}{1 + e^{-2x/\sigma^2}} \right)^2 f_1(x) dx \right)^2 - u_+^2 \quad (17)$$

其次, 进一步研究差分似然差“×”位置的统计特性。由于“×”位置的不确定性, c_k 与 c_{k+1} 取值0, 1随机, 总共有4种情况, 每种情况的概率为0.25, 则差分似然差“×”位置的均值与方差分别为

$$u_{\times} = 0.25 \left(\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1 - e^{-2x/\sigma^2}}{1 + e^{-2x/\sigma^2}} (f_0(x) + f_1(x)) dx \right)^2 \quad (18)$$

$$\sigma_{\times}^2 = 0.25 \left(\int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{1 - e^{-2x/\sigma^2}}{1 + e^{-2x/\sigma^2}} \right)^2 (f_0(x) + f_1(x)) dx \right)^2 - u_{\times}^2 \quad (19)$$

由大数定律, 当分析矩阵的行数 M 足够大时, 两种分布趋近于正态分布。在确定了概率分布后, 进一步求解判决门限 Λ 。考虑两种假设条件: H_0 : 分析矩阵第 i 列为差分似然差“+”位置; H_1 : 分析矩阵第 i 列为差分似然差“×”位置, 则在 H_0 和 H_1 两种假设条件下, 第 i 列分析矩阵的1阶累积量的均值和方差分别为: $u_0 = Mu_+$, $\sigma_0^2 = M\sigma_+^2$; $u_1 = Mu_{\times}$, $\sigma_1^2 = M\sigma_{\times}^2$ 。

“+”位置的平均错误判决概率为

$$P_e = P(D_0|H_1)P(H_1) + P(D_1|H_0)P(H_0) \\ = 0.5 \int_{-\infty}^{\Lambda} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} e^{-(x-u_1)^2/2\sigma_1^2} dx \\ + 0.5 \int_{\Lambda}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_0} e^{-(x-u_0)^2/2\sigma_0^2} dx \quad (20)$$

其中, D_0 与 D_1 分别为判决域。

将式(18)两边同时对 Λ 求导数, 并令其等于0, 得到门限为

$$\Lambda = \frac{(u_1\sigma_0^2 - u_0\sigma_1^2) - \sigma_1\sigma_0 \sqrt{(u_0 - u_1)^2 + 2 \ln \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_1} (\sigma_0^2 - \sigma_1^2) \right)}}{\sigma_0^2 - \sigma_1^2} \quad (21)$$

由以上的分析, 得到归零Turbo码帧同步算法的具体步骤:

步骤1 将截获的软判决信息转化为似然差的形式;

步骤2 将似然差序列依次作前向两两相乘得到差分似然差新序列;

步骤3 构建分析矩阵 $\mathbf{A}_{M \times L}$, 其中 L 为识别的码长参数, 将步骤2得到的序列按行方向排入分析矩阵, 同时按照式(19)解算出判决门限;

步骤4 计算步骤3中分析矩阵每列的1阶累积量, 将累积量与判决门限相比较, 若大于门限, 则判定为差分似然差“+”位置, 并存储该位置;

步骤5 遍历步骤4中差分似然差“+”位置作为帧同步头, 判断在该同步位置的情况下, 其它差分似然差“+”与“×”的位置关系是否满足帧同步后的4个结构特点, 若是则输出同步位置参数; 反之, 继续遍历, 直到遍历完成。

由图4可知, 归零Turbo码码元路数 N 与第1个差分似然差“×”位置 ps'_1 存在关系

$$N = 2ps'_1 - 1 \quad (22)$$

设一帧交织长度为 l' , 则码长 L , 码元路数 N , 寄存器个数 m 三者关系为

$$l' = \frac{L - (N+1)m}{N} \quad (23)$$

在实际工程应用中, 寄存器个数 m 求取一般从2~7, 可以通过遍历 m 的可能值来满足式(21)的关系完成 m 以及 l' 参数的识别。

3.3 计算复杂度分析

从码长识别算法来看, 首先需要将截获的软判决信息转化为差分似然差, 设截获的数据长度为 L_s , 则需要进行 L_s 次的指数运算以及乘法运算; 然后通过构建分析矩阵, 计算分析矩阵每列元素的1阶累积量, 近似需要 $(M+L_s)L_s/(2M)$ 次的加法运算, 最后需要 $\lfloor L_s/M \rfloor + 1$ 次求最大值运算, 求得码长参数, 综合运算步骤可知, 提出的码长识别算法计算复杂度近似为 $O(L_s^2)$ 量级; 从帧同步算法步骤来看, 设差分似然差“+”个数为 v 个, 则参数识别过程中最多需要进行 vML 次加法运算, 1次门限计算以及 vL 次的大小比较运算, 综合帧同步算法的步骤, 可知其计算复杂度近似为 $O(L)$ 。对于高斯消元而言, 对于每一个分析矩阵都要进行初等列变化, 同时求取判决门限并做比较运算来判决消元列, 由于高斯消元的计算复杂度与矩阵列数的立方成正比, 故完成一次码长识别, 高斯消元法的计算复杂度近似为 $1+2^3+\dots+(L_s/M)^3$, 其运算量为 $O(L_s^4)$; 完成1次帧同步识别, 运算量近似为 $O(L^4)$ 。故本文算法计算量要远远小于高斯消元法。

4 仿真验证

4.1 码长识别及帧结构验证

仿真设定交织长度为100, 码率为1/5, 两分量编码器为1/3码率的RSC码, 多项式为 $1+D^2+D^3$, $1+D+D^3$ 以及 $1+D+D^2+D^3$, 此时码长为518, 设定信噪比为-5 dB, 交织方式为随机交织, 截获的数据量为0.259 Mbit. 记录在不同分析矩阵中, 最大差分似然差值累积量, 即码长识别算法步骤中cum, 其结果如图5(a)所示; 同时固定分析矩阵列数 $l=518$, 统计各列差分似然差累积量, 记录结果如图5(b)所示, 此时门限值 $\lambda=23.28$.

首先从图5(a)来看, 当列数为518时, 最大差分似然差值取得最大值为52.11, 列数正好等于设定的码长, 说明码长识别有效, 同时设定的信噪比为-5 dB, 信道噪声环境较为恶劣, 而列数为518的分析矩阵的最大差分似然差要明显大于其它位置, 说明算法有极好的抗噪声性能; 其次从图5(b)来看, 此时差分似然差“+”位置(大于门限)为: 1, 2, 4, 7, 9, 513, 514, 516, 517, 由此可知: (1)同步头为差分似然差“+”(特点1正确); (2)第1个“×”位置与第2个“×”位置分别为3和5, 满足 $2 \times 3 - 1 = 5$, 同时, 识别出 $N=5$; (3)第1个“×”位置为3, 倒数第2个“×”位置为515, 满足

$515 = 518 - 3$ (特征3正确); (4)最后1个差分似然差“+”位置为517, 与码长相差为1(特征4正确), 满足推导的同步的4个特点, 说明数据帧结构特点分析是正确的. 最后从2~7遍历 m , 发现当且仅当 m 为3时, 满足式(21), 得到交织长度 $l'=100$, 与仿真设定相符.

4.2 算法容错性能分析

仿真1 实际码长大小对算法性能影响

设定实际编码码长为68, 158, 248, 368, 分量编码器多项式为 $(1+D+D^2, 1+D^2)$, 帧同步位置设定为126, 216, 276, 336, 构建的分析矩阵行数 $M=250$, 统计在不同信噪比下, 参数的识别率, 结果如图6所示.

从图6的结果来看, 码长对算法的性能影响较大, 随着码长的增加, 算法性能逐渐恶化, 从整体识别效果来看, 本文所提算法性能较好, 在-6 dB条件下, 码长以及帧同步识别参数识别率能够达到90%以上的识别率, 说明本文提出的基于差分似然差的参数识别算法抗噪声性能较强.

仿真2 M 值设定对算法性能的影响

设定实际编码码长为158, 帧同步位置设定为126, 分量编码器RSC码多项式为 $(1+D+D^2, 1+D^2)$, 构建的分析矩阵行数 M 取值为250, 500,

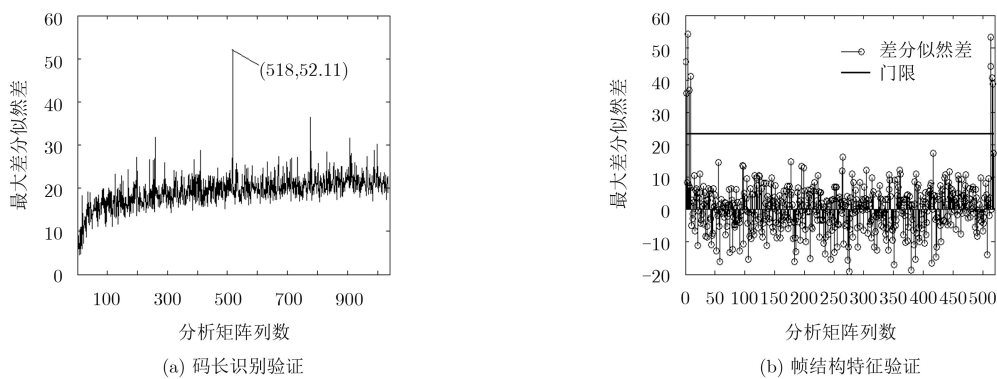


图5 不同列数下得到差分似然差值

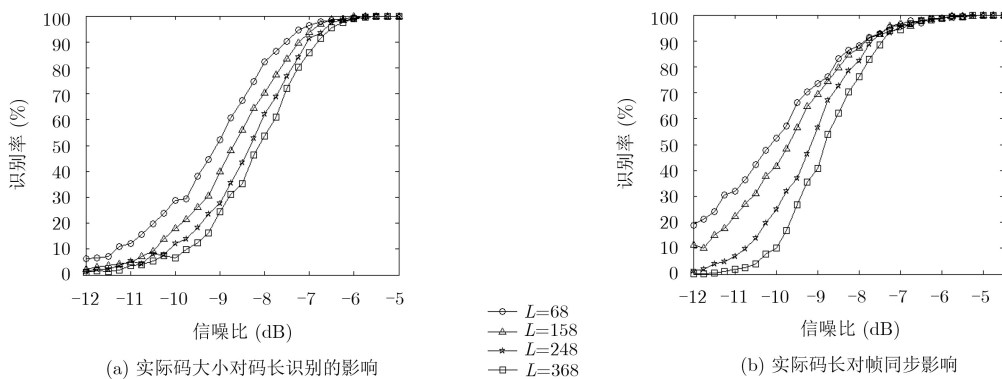


图6 实际码长大小对算法性能影响

750, 1000, 信噪比SNR范围为: $-15 \sim -3$ dB, 间隔0.25 dB取值, 蒙特卡洛试验次数为1000, 统

计在不同信噪比下, 参数的识别率, 结果如图7所示。

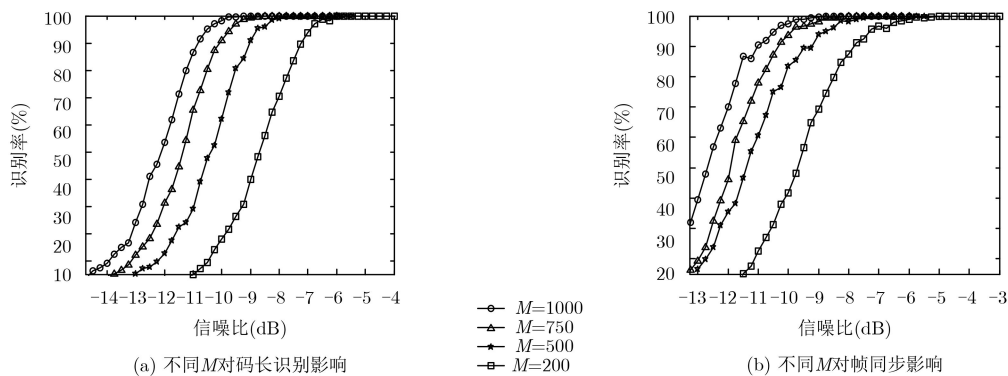


图7 不同M对算法性能影响

从图7仿真结果来看, 分析矩阵行数M对参数识别影响比较明显, 当分析矩阵中M较大时, 算法的性能得到增强, 主要原因是M越大, 差分似然差的统计特性就越能够接近于理论推导, 设定的理论门限就越精确。

仿真3 与其它算法比较

与本文算法进行比较的是文献[17]改进的高斯消元法、文献[19]小区域检测算法以及高斯消元法[11]。设定码长为158, 分量编码器RSC码为 $(1+D+D^2, 1+D^2)$, 截获码块数目为500, 首先比较在不同信噪比下, 这4种算法抗噪声性能, 得到如图8所示的结果。

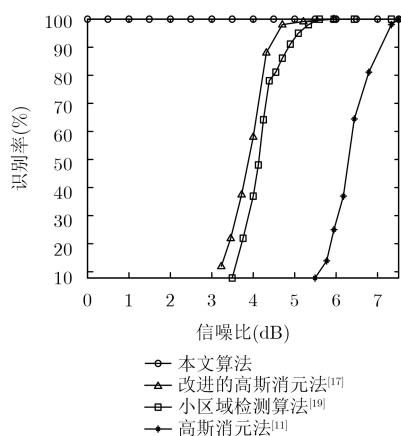


图8 4种算法的抗噪声性能对比

从图8结果来看, 本文算法在0 dB以上能够达到100%的识别率, 其容错性能要远远好于其它3种算法; 改进的高斯消元法预计小区域检测算法相接近, 而单纯的高斯消元法性能最差。

5 结论

本文针对归零Turbo码码长、帧同步等参数识

别问题, 首先定义出两码元差分似然差的概念, 将截获的软判决信息转化为差分似然差新序列, 利用帧头相邻码元之间的差分似然差结果为正的特性, 实现码长识别; 其次分析了归零Turbo码帧同步后, 数据帧头与帧尾的结构特点, 总结出了帧同步后, 4个数据结构特征, 进而实现归零Turbo码帧同步; 最后利用码长、码率、寄存器个数之间的数量关系, 通过遍历寄存器个数, 实现码率以及寄存器个数识别。本文所提出的算法计算复杂度低, 容错性较强, 非常适用于低信噪比下码长较长的归零Turbo码参数识别。

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.
- [2] LI Hang, GAO Zhen, ZHAO Ming, *et al.* Partial iterative decode of turbo codes for on-board processing satellite platform[J]. *China Communications*, 2015, 12(11): 1–8.
- [3] 张立民, 吴昭军, 钟兆根. 一种基于遗传算法的RSC码盲识别方法[J]. *航空学报*, 2017, 38(11): 321246. doi: [10.7527/S1000-6893.2017.321246](https://doi.org/10.7527/S1000-6893.2017.321246).
- [4] ZHANG Limin, WU Zhaojun, and ZHONG Zhaogen. Blind identification of RSC code based on genetic algorithm[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2017, 38(11): 321246. doi: [10.7527/S1000-6893.2017.321246](https://doi.org/10.7527/S1000-6893.2017.321246).
- [4] 张立民, 吴昭军, 钟兆根. 基于校验方程符合度下的Turbo码编码器盲识别[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(9): 2155–2161. doi: [10.11999/JEIT161391](https://doi.org/10.11999/JEIT161391).
- [4] ZHANG Limin, WU Zhaojun, and ZHONG Zhaogen. Blind recognition of Turbo code encoder based on conformity of parity-check equation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(9): 2155–2161. doi: [10.11999/JEIT161391](https://doi.org/10.11999/JEIT161391).

- [5] 于沛东, 彭华, 巩克现, 等. 基于最小二乘代价函数的卷积码盲识别方法[J]. 电子学报, 2018, 46(7): 1545–1552. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2018.07.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2018.07.002).
YU Peidong, PENG Hua, GONG Kexian, *et al.* Blind recognition of convolutional codes based on least-square cost-function[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2018, 46(7): 1545–1552. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2018.07.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2018.07.002).
- [6] 陈泽亮, 李静, 彭华, 等. 利用Gibbs采样进行优化的Turbo码交织器识别[J]. 电子学报, 2018, 46(1): 15–23. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2018.01.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2018.01.003).
CHEN Zeliang, LI Jing, PENG Hua, *et al.* An optimization method using Gibbs sampler for Turbo-code interleaver identification[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2018, 46(1): 15–23. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2018.01.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2018.01.003).
- [7] 吴昭军, 张立民, 钟兆根. 低信噪比下随机交织器识别[J]. 电讯技术, 2018, 58(1): 52–58. doi: [10.3969/j.issn.1001-893x.2018.01.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-893x.2018.01.010).
WU Zhaojun, ZHANG Limin, and ZHONG Zhaogen. Blind recognition of random interleaver at low SNR[J]. *Telecommunication Engineering*, 2018, 58(1): 52–58. doi: [10.3969/j.issn.1001-893x.2018.01.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-893x.2018.01.010).
- [8] 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): 1926–1930. doi: [10.11999/JEIT141556](https://doi.org/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): 1926–1930. doi: [10.11999/JEIT141556](https://doi.org/10.11999/JEIT141556).
- [9] 刘骏, 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): 1213–1218. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2016.05.029](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2016.05.029).
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): 1213–1218. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2016.05.029](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2016.05.029).
- [10] BUREL G and GAUTIER R. Blind estimation of encoder and interleaver characteristics in a non cooperative context[C]. International Conference on Communications, Internet and Information Technology, Scottsdale, USA, 2003, 17–19.
- [11] NASERI A, AZMOON O, and FAZELI S. Blind recognition algorithm of Turbo codes for communication intelligence systems[J]. *International Journal of Computer Science Issues*, 2011, 8(6): 68–72.
- [12] SWAMINATHAN R and MADHUKUMAR A S. Classification of error correcting codes and estimation of interleaver parameters in a noisy transmission environment[J]. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2017, 63(3): 463–478. doi: [10.1109/TBC.2017.2704436](https://doi.org/10.1109/TBC.2017.2704436).
- [13] 吴昭军, 张立民, 钟兆根. 归零Turbo码参数的盲识别[J]. 电讯技术, 2017, 57(5): 561–567. doi: [10.3969/j.issn.1001-893x.2017.05.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-893x.2017.05.012).
WU Zhaojun, ZHANG Limin, and ZHONG Zhaogen. Blind recognition of parameters of Turbo code on trellis termination[J]. *Telecommunication Engineering*, 2017, 57(5): 561–567. doi: [10.3969/j.issn.1001-893x.2017.05.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-893x.2017.05.012).
- [14] 张永光. 一种Turbo码编码参数的盲识别方法[J]. 西安电子科技大学学报: 自然科学版, 2011, 38(2): 167–172. doi: [10.3969/j.issn.1001-2400.2011.02.030](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-2400.2011.02.030).
ZHANG Yongguang. Blind recognition method for the Turbo coding parameter[J]. *Journal of Xidian University*, 2011, 38(2): 167–172. doi: [10.3969/j.issn.1001-2400.2011.02.030](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-2400.2011.02.030).
- [15] 李啸天, 张润生, 李艳斌. 归零Turbo码识别算法[J]. 西安电子科技大学学报: 自然科学版, 2013, 40(4): 161–166. doi: [10.3969/j.issn.1001-2400.2013.04.027](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-2400.2013.04.027).
LI Xiaotian, ZHANG Runsheng, and LI Yanbin. Research on the recognition algorithm of Turbo codes on trellis termination[J]. *Journal of Xidian University*, 2013, 40(4): 161–166. doi: [10.3969/j.issn.1001-2400.2013.04.027](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-2400.2013.04.027).
- [16] HUANG Li, CHEN Wengu, CHEN Enhong, *et al.* Blind recognition of k/n rate convolutional encoders from noisy observation[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2017, 28(2): 235–243. doi: [10.21629/JSEE.2017.02.04](https://doi.org/10.21629/JSEE.2017.02.04).
- [17] MARAZIN M, GAUTIER R, and BUREL G. Dual code method for blind identification of convolutional encoder for cognitive radio receiver design[C]. Proceedings of 2009 IEEE Globecom Workshops, Honolulu, USA, 2009: 1–6.
- [18] ZRELLI Y, GAUTIER R, RANNOU E, *et al.* Blind identification of code word length for non-binary error-correcting codes in noisy transmission[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2015(1): 43. doi: [10.1186/s13638-015-0294-5](https://doi.org/10.1186/s13638-015-0294-5).
- [19] 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): 1423–1428.
ZHANG Min, LU Kai, LI Xinhao, *et al.* Blind recognition method for the turbo codes on trellis termination[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2016, 38(6): 1423–1428.
- [20] YU Peidong, PENG Hua, and LI Jing. On blind recognition of channel codes within a candidate set[J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20(4): 736–739. doi: [10.1109/LCOMM.2016.2525759](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2525759).

吴昭军: 男, 1992年生, 博士生, 研究方向为信道编码识别。

张立民: 男, 1966年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为卫星信号处理及应用。

钟兆根: 男, 1984年生, 博士, 讲师, 研究方向为扩频信号处理。

于柯远: 男, 1992年生, 博士生, 研究方向为信道编码识别。

杨芸丞: 男, 1994年生, 硕士生, 研究方向为扩频通信。