

基于软信息的分组交织和卷积码联合识别

陈泽亮, 巩克现, 彭 华, 于沛东
(信息工程大学信息工程学院, 河南郑州 450002)

摘要: 针对非合作数字通信系统中分组交织和卷积码的盲识别问题, 提出了一种基于软信息的信道编码识别方法. 该方法利用软信息建立了符合度的概念, 首先利用采样序列的总符合度实现交织行数和卷积码校验向量的识别; 然后通过每路采样序列平均符合度的变化规律实现交织起点行坐标的识别; 最后根据解交织后数据的符合度实现交织列数和交织起点列坐标的识别. 仿真结果表明, 本文算法能在较高误码率下实现分组交织和卷积码的盲识别, 与硬判决算法相比, 达到较高正确率时, 本文算法具有约 5dB 的信噪比增益.

关键词: 非合作数字通信系统; 分组交织; 卷积码; 盲识别; 软信息; 信道编码

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2018)06-1454-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.06.026

Joint Blind Recognition of Packet Interleaver and Convolution Code Based on Soft Information

CHEN Ze-liang, GONG Ke-xian, PENG Hua, YU Pei-dong
(Information Engineering University, Zhengzhou, Henan 450002, China)

Abstract: A blind recognition method of channel coding based on soft information was proposed for packet interleaver and convolution code in a non-cooperative digital communication system. The method builds conformity degree concept using the soft information. It identifies the row number of interleaving matrix and the parity-check vector of convolution code by using the total conformity degree of the sample sequence. And the row coordinate of starting point is identified by the change rule of average conformity degree of each sampling sequence. Finally, the column number of interleaving matrix and the column coordinate of starting point are recognized according to the conformity degree of de-interleaved data. Simulation results show that the proposed method provides an optimal performance in the noisy environment, and has 5dB SNR gain when achieving the relatively high accuracy compared with the recognition algorithm based on hard information.

Key words: non-cooperative digital communication system; packet interleaver; convolution code; blind recognition; soft information; channel coding

1 引言

在实际数字通信系统中, 外来的脉冲干扰, 同频道干扰, 多径和衰落信道等都会引起突发错误. 用纠正随机独立差错的信道编码技术来纠正这些突发错误效果常常不明显. 为了抵抗这些突发错误, 发送方通常采用数据交织技术, 即在发送端对数据进行交织, 接收端进行解交织, 使信道的突发错误分散开, 把突发错误变成独立的随机错误, 从而充分发挥纠错编码的作用^[1].

在非合作通信中, 侦察方截获到通信信号后, 为了恢复通信的原始信息, 必须对交织器和编码参数进行识别. 实际应用中, 常用的交织器有两种, 分别为分组交织和卷积交织. 对于卷积交织的识别, 已有文献取得了较好的识别效果. 文献[2]利用帧同步码参与卷积交织的信息, 根据帧同步码和码字序列的列累积量实现交织周期的识别, 同时根据帧同步码列累积量之间的分布规律实现卷积交织宽度和交织深度的识别, 取得了较好的识别效果. 对于分组交织的识别, 文献[3]利用

随机变量, 编码序列 c_u 可看成已知量, 则根据文献[11]关于二元域中独立随机变量概率计算的相关结论有

$$F_k = \prod_{u=0}^{N_0-1} (1 - 2P(h_u = 1)P(c_{k-u} = 1)) \quad (3)$$

由图 1 可知, 在一个交织块中, 同一行中相邻的编码数据, 经分组交织按列读出后距离变成交织行数 m . 对图 2 中交织后序列 y_k 进行采样, 当采样间隔为 m 时, 得采样后的序列为 y^0, y^1, \dots, y^{m-1} , 其中 $y^l = (y_l, y_{l+m}, \dots, y_{l+Km}), l=0, 1, \dots, m-1$, 每个数据序列 y^l 代表图 3 中的一行(图 3 阴影部分所示的一行). 定义校验方程的总符合度为

$$D = \sum_{l=0}^{m-1} \sum_{\substack{v=0 \\ k=N_0-1+vm_0}}^{\lfloor (K-N_0+1)/n_0 \rfloor N_0-1} \prod_{u=0}^{N_0-1} (1 - 2P(h_u = 1)P(y_{k-u}^l = 1)) \quad (4)$$

其中 y_{k-u}^l 是采样序列 $y^l = (y_0^l, y_1^l, \dots, y_K^l)$ 中的信息, $K+1$ 表示采样序列 y^l 的长度, $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整. 若定义 $F'_k = \prod_{u=0}^{N_0-1} (1 - 2P(h_u = 1)P(y_{k-u}^l = 1))$, 由于 y^l 代表图 3 中阴影部分所示的一行信息, 则序列 y^l 在同一交织块内的数据符合校验关系 $F'_k = 1$, 此时, 会使总符合度 D 值往有利方向增大; 而 y^l 中跨交织块的信息并不一定符合校验关系, 此时 $F'_k = 1$ 或 $F'_k = -1$, 且 F'_k 取值为 1 和 -1 是随机的(假设码字为 0 和 1 是随机的, 这是符合实际的), 此时对 F'_k 累加时其值会抵消, 不会对符合度 D 的值产生影响.

上述分析是当采样间隔 m 和校验向量 \mathbf{h} 都取值正确时 D 值的情况, 而当采样间隔 m 错误时(无法得到图 3 中阴影部分所示的一行信息)或校验向量 \mathbf{h} 错误时, 由于此时校验关系成立和不成立是随机的, 即 F'_k 取值为 1 和 -1 是随机的, 则有 $D \approx 0$. 因此总符合度 D 可作为测试参数 m 和 \mathbf{h} 识别是否正确的依据, 即

$$[\hat{m}, \hat{\mathbf{h}}] = \arg \max_{\{m, \mathbf{h}\}} \{D\} \quad (5)$$

在实际应用中, 式(4)中 y_k^l 的值是不得而知的, 接收端得到的只有序列 r_k^l (r_k^l 是与 y_k^l 一一对应的接收序列). 于是, 在式(4)中本文用 y_k^l 的后验概率 $p_k^l = P(y_k^l = 1 | r_k^l)$ 取代概率值 $P(y_k^l = 1)$ (其中 $p_k^l = 1/(e^{2r_k^l/\sigma^2} + 1)$, σ^2 为 AWGN 信道的噪声功率). 同时由于 \mathbf{h} 是通过遍历得到(实际中, 卷积码寄存器的个数有限, 本文 \mathbf{h} 遍历 $m_0 \leq 8$ 的所有校验向量), 所以有 $P(h_u = 1) = h_u$. 则式(4)可改写为

$$D^l = \sum_{l=0}^{m-1} \sum_{\substack{v=0 \\ k=N_0-1+vm_0}}^{\lfloor (K-N_0+1)/n_0 \rfloor N_0-1} \prod_{u=0}^{N_0-1} (1 - 2h_u p_{k-u}^l) \quad (6)$$

则实际中, 交织行数 m 和卷积码校验向量 \mathbf{h} 可通过下式进行识别

$$[\hat{m}, \hat{\mathbf{h}}] = \arg \max_{\{m, \mathbf{h}\}} \{D^l\} \quad (7)$$

通过式(7)求得卷积码校验向量 \mathbf{h} 后, 可根据 n_0 和 k_0 求得卷积码的编码系数^[12].

3.2 交织起点行坐标 i 的估计原理

若假设图 2 中交织后序列 y_k 的交织起始点为 $in+j$, 其中 i 表示交织块中的第 i 行(交织起点行坐标), j 表示交织块中的第 j 列(交织起点列坐标). 则由图 3 可知序列 $\mathbf{y}^0 = (c_{in+j}^1, c_{in+j+1}^1, \dots, c_{in+n}^1, c_{in+1}^2, c_{in+2}^2, \dots, c_{in+n}^2, \dots, c_{in+1}^N, \dots, c_{in+n}^N)$. 若令 $\mathbf{b}_{uv} = (c_{un+v}^1, \dots, c_{un+n}^1, c_{un+1}^2, \dots, c_{un+n}^2, \dots, c_{un+1}^N, \dots, c_{un+n}^N)$, 则可知采样序列 $\mathbf{y}^0, \mathbf{y}^1, \dots, \mathbf{y}^{m-1-i}, \mathbf{y}^{m-i}, \dots, \mathbf{y}^{m-1}$ 分别与数据序列 $\mathbf{b}_{ij}, \mathbf{b}_{(i+1)j}, \dots, \mathbf{b}_{(m-1)j}, \mathbf{b}_{0(j+1)}, \dots, \mathbf{b}_{(i-1)(j+1)}$ 对应. 本节考虑交织列数 n 为码分组长度 n_0 整数倍的情况(实际中, n 通常为 n_0 的倍数, 对于 n 不为 n_0 倍数的情况将在 3.3 节进行说明). 当交织起点行坐标 $i=0$ 时, 采样序列 $\mathbf{y}^0, \mathbf{y}^1, \dots, \mathbf{y}^{m-1}$ 分别与序列 $\mathbf{b}_{0j}, \mathbf{b}_{1j}, \dots, \mathbf{b}_{(m-1)j}$ 对应, 此时序列 $\mathbf{y}^0, \mathbf{y}^1, \dots, \mathbf{y}^{m-1}$ 的起点在图 3 所示交织块中的同一列, 即采样序列 $\mathbf{y}^0, \mathbf{y}^1, \dots, \mathbf{y}^{m-1}$ 的起点相对于卷积码起点的位置相同; 当交织起点行坐标 $i \neq 0$ 时, 前面 $m-i$ 路采样序列 $\mathbf{y}^0, \mathbf{y}^1, \dots, \mathbf{y}^{m-1-i}$ 与数据序列 $\mathbf{b}_{ij}, \mathbf{b}_{(i+1)j}, \dots, \mathbf{b}_{(m-1)j}$ 对应, 其余 i 路序列 $\mathbf{y}^{m-i}, \dots, \mathbf{y}^{m-1}$ 与序列 $\mathbf{b}_{0(j+1)}, \dots, \mathbf{b}_{(i-1)(j+1)}$ 对应, 此时采样序列 $\mathbf{y}^0, \mathbf{y}^1, \dots, \mathbf{y}^{m-1}$ 和采样序列 $\mathbf{y}^{m-i}, \dots, \mathbf{y}^{m-1}$ 的起点在图 3 所示交织块中的不同列, 即采样序列 $\mathbf{y}^0, \mathbf{y}^1, \dots, \mathbf{y}^{m-1}$ 的起点相对于卷积码起点的位置会出现断层现象.

下面以 $n_0=2$, 交织列数 n 为 n_0 整数倍的情况为例, 对 i 的估计原理进行说明. 若假设交织起点行坐标为 i , 则序列 $\mathbf{b}_{ij}, \mathbf{b}_{(i+1)j}, \dots, \mathbf{b}_{(m-1)j}$ 和 $\mathbf{b}_{0(j+1)}, \dots, \mathbf{b}_{(i-1)(j+1)}$ 对应的校验方程不同. 若设数据序列 $\mathbf{b}_{ij}, \mathbf{b}_{(i+1)j}, \dots, \mathbf{b}_{(m-1)j}$ 对应的校验方程为 $\mathbf{h}_0 = (g_{0,0}, g_{1,0}, g_{0,1}, g_{1,1}, \dots, g_{0,m_0}, g_{1,m_0})$, 则 $\mathbf{b}_{0(j+1)}, \dots, \mathbf{b}_{(i-1)(j+1)}$ 对应的校验方程为 $\mathbf{h}_1 = (g_{1,0}, g_{0,0}, g_{1,1}, g_{0,1}, \dots, g_{1,m_0}, g_{0,m_0})$, 且其中 $\mathbf{g}_0 = (g_{0,0}, g_{0,1}, \dots, g_{0,m_0})$, $\mathbf{g}_1 = (g_{1,0}, g_{1,1}, \dots, g_{1,m_0})$ 为卷积码的两路编码系数. 当 $i < m-i$ 时, 利用 3.1 节识别方法得到的校验向量为 \mathbf{h}_0 , 此时采样序列 $\mathbf{b}_{0(j+1)}, \dots, \mathbf{b}_{(i-1)(j+1)}$ 并没有对校验方程总符合度 D 的值作出贡献; 反之, 得到的校验向量为 \mathbf{h}_1 . 为了便于表示, 令 $M = \lfloor (K - N_0 + 1)/n_0 \rfloor + 1$, 则定义每路采样序列的平均符合度为

$$\bar{D}^l = \frac{1}{M} \sum_{v=0}^{M-1} \prod_{u=0}^{N_0-1} (1 - 2h_u p_{k-u}^l) \quad (8)$$

当 $i < m-i$ 时, 若利用式(7)得到校验向量 \mathbf{h}_0 , 并利用 \mathbf{h}_0 对每路采样序列 \mathbf{y}^l 求其符合度 \bar{D}^l , 则前面 $m-i$ 路采样序列 \bar{D}^l 的值较大, 其余 i 路采样序列 \bar{D}^l 值较小. 所以根据 \bar{D}^l 的变化规律可对交织起点行坐标 i 进行识别.

为了对断层进行量化判断, 下面将对断层的判决

门限进行推导. 假设校验关系涉及 d 个比特(即校验向量 \mathbf{h} 中有 d 个比特为 1), 则每路采样序列的平均符合度可改写为

$$\bar{D}^l = \frac{1}{M} \sum_{v=0}^{M-1} \prod_{t=0}^{d-1} (1 - 2p_{k-u_t}^l) \quad (9)$$

其中 $p_{k-u_t}^l$ 是与 $h_{u_t} = 1$ ($0 \leq u_t \leq N_0 - 1$) 相对应的接收信息后验概率. 由 3.1 节可知, y_k^l 的后验概率 $p_k^l = 1/(e^{2r_k^l/\sigma^2} + 1)$, 根据 $\tanh(L(a)/2) = 1 - 2P(a = 1)$, $\tanh(\cdot)$ 为双曲正切函数, 可将每路采样序列的平均符合度进一步改写为

$$\bar{D}^l = \frac{1}{M} \sum_{v=0}^{M-1} \prod_{t=0}^{d-1} \tanh\left(\frac{r_{k-u_t}^l}{\sigma^2}\right) \quad (10)$$

为了推导 \bar{D}^l 的均值和方差, 需用到如下关于噪声方差 σ^2 的量^[13]

$$\begin{aligned} a_\sigma &= \int_{-\infty}^{+\infty} \tanh\left(\frac{x}{\sigma^2}\right) \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{(x-1)^2}{2\sigma^2}\right) dx \\ b_\sigma &= \int_{-\infty}^{+\infty} \tanh^2\left(\frac{x}{\sigma^2}\right) \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{(x-1)^2}{2\sigma^2}\right) dx \end{aligned} \quad (11)$$

根据文献[13], 对于不符合校验关系的采样序列, 其发送序列可看作随机的 0、1 序列, 此时各 r_k^l 独立同分布, 且 $r_k^l \sim [N(-1, \sigma^2) + N(+1, \sigma^2)]/2$, 由于 r_k^l 分布的偶对称性和函数 $\tanh(\cdot)$ 的奇对称性, 以及 $\tanh^2(\cdot)$ 的偶对称性, 可得 \bar{D}^l 的均值为

$$E_0[\bar{D}^l] = 0 \quad (12)$$

方差为

$$V_0[\bar{D}^l] = \frac{1}{M^2} \sum_{k=N_0-1+mn_0}^{M-1} E_0\left(\prod_{t=0}^{d-1} \tanh^2\left(\frac{r_{k-u_t}^l}{\sigma^2}\right)\right) = \frac{1}{M} b_\sigma^d \quad (13)$$

对于符合校验关系的采样序列, 不妨设发送序列为全 0 序列, 则各 r_k^l 也独立同分布, 且有 $r_k^l \sim N(+1, \sigma^2)$. 但因为采样序列 \mathbf{y}^l 中跨交织块的信息并不符合校验关系, 所以此时只有交织块内 $(n - N_0 + 1)M/n$ 个校验方程符合校验关系, 而跨交织块的 $(N_0 - 1)M/n$ 个校验方程不符合校验关系 (N_0 可由 3.1 节得到). 则根据文献[13], 可得此时 \bar{D}^l 的均值为

$$E_1[\bar{D}^l] = \frac{n - N_0 + 1}{n} a_\sigma^d \quad (14)$$

方差为(由于两个不同的校验关系共同涉及的比特个数很小, 大多接近于 0 或等于 0, 所以在式(15)中将其默认为 0, 即近似认为两个校验关系独立)

$$V_1[\bar{D}^l] = \frac{n - N_0 + 1}{Mn} (b_\sigma^d - a_\sigma^{2d}) + \frac{N_0 - 1}{Mn} b_\sigma^d \quad (15)$$

为了得到最小化错误概率情况下门限阈值 Th 的设置, 此时, 阈值 Th 应使得虚警概率与漏检概率相等, 因此可

得到断层的判决门限值为

$$\text{Th} = \frac{\sqrt{V_0[\bar{D}^l]}}{\sqrt{V_0[\bar{D}^l]} + \sqrt{V_1[\bar{D}^l]}} E_1[\bar{D}^l] \quad (16)$$

但由于交织列数此时是未知的, 所以无法求得式(16)的最佳判决门限. 但可根据 $E_0[\bar{D}^l]$ 和 $V_0[\bar{D}^l]$ 以及概率论中的“ 3σ ”法则, 求得

$$\text{Th}_{3\sigma} = E_0[\bar{D}^l] + 3\sqrt{V_0[\bar{D}^l]} \quad (17)$$

则最终可根据式(17)对每路采样序列的平均符合度进行判决, 根据出现断层的位置得到交织起点行坐标 i 的值. 同时可根据式(16)缩小交织列数 n 遍历的范围, 即交织列数 n 的取值应使得最佳判决门限 Th 大致处在断层的中间位置.

3.3 交织列数 n 和交织起点列坐标 j 的估计原理

利用 3.1 节和 3.2 节求得交织行数 m , 卷积码校验向量 \mathbf{h} , 以及交织起点行坐标 i 后 (n 为 n_0 整数倍时), 假设不同的交织列数 n 和交织起点列坐标 j , 对接收的软信息序列 r_k 进行解交织. 若 n 和 j 正确, 则可以得到正确的解交织序列; 若 n 或 j 错误, 则会得到错乱的解交织序列. 假设 r_k 解交织后的序列为 t_k , 并定义解交织序列的校验方程符合度为

$$D'' = \sum_{k=N_0-1+mn_0}^{(m(K+1)-N_0+1)/n_0} \prod_{u=0}^{N_0-1} (1 - 2h_u p_{k-u}) \quad (18)$$

其中 $p_k = 1/(e^{2t_k/\sigma^2} + 1)$, 由于每路采样序列 \mathbf{y}^l 的数据长度为 $K + 1$, 这里假设解交织序列 t_k 的长度为 $m(K + 1)$. 则可以知道只有当 n 和 j 都正确时, 得到的解交织序列才是卷积编码序列, 此时式(18)中 D'' 的值最大. 所以 D'' 可作为判断 n 和 j 是否正确的依据

$$[\hat{n}, \hat{j}] = \arg \max_{[n, j]} \{D''\} \quad (19)$$

实际中, n 通常为 n_0 的倍数, 若 n 不为 n_0 的整数倍, 则可同时遍历参数 i, j, n 对接收的软信息序列 r_k 进行解交织, 然后利用解交织序列的符合度 D'' 实现这三个参数的识别, 即

$$[\hat{n}, \hat{j}, \hat{i}] = \arg \max_{[n, j, i]} \{D''\} \quad (20)$$

3.4 算法总结及复杂度分析

首先设定交织行数 m 的最大可检测值 m_{\max} , 最小可检测值 m_{\min} ; 以及校验向量 \mathbf{h} 的遍历区间 Φ . 则本文算法可总结如下:

算法 1 分组交织参数和卷积码校验向量的识别流程

输入: 接收软判决信息序列 r_k

输出: 分组交织行数 m , 分组交织列数 n , 交织起点行坐标 i , 交织起点列坐标 j , 卷积码校验向量 \mathbf{h}

算法流程:

步骤 1 交织行数 m 从 m_{\min} 到 m_{\max} 变化, 并根据 m 对接收软信息序列 r_k 进行采样, \mathbf{h} 遍历 Φ 中的取值, 根据式(6)求得每组测试参

数下 D' 的值,最后利用式(7)求得 m 和 h 的正确值.

步骤2 利用式(8)求得每路采样序列的平均符合度 \bar{D}' ,并根据 \bar{D}' 的变化规律对交织起点行坐标 i 进行识别.若能得到识别结果,则转置步骤3;否则,转置步骤4.

步骤3 根据式(16)大致设定交织列数 n 的最大可检测值 n_{\max} ,最小可检测值 n_{\min} .交织列数 n 从 n_{\min} 到 n_{\max} 变化,交织起点列坐标 j 从 0 到 $n-1$ 变化,对接收的软信息序列 r_k 进行解交织,根据式(18)求得每组测试参数下 D'' 的值,最后利用式(19)求得 n 和 j 的正确值.

步骤4 交织列数 n 从 n_{\min} 到 n_{\max} 变化,交织起点列坐标 j 从 0 到 $n-1$ 变化,交织起点行坐标 i 从 0 到 $m-1$ 变化,对接收的软信息序列 r_k 进行解交织,根据式(18)求得每组测试参数下 D'' 的值,最后利用式(20)求得 i, j, n 的正确值.

假设校验向量 h 的遍历个数为 M_h 个,则对于步骤1,本文算法需要计算 $(m_{\max} - m_{\min})M_h$ 步,每一步的计算量为 $m_i \cdot \lfloor (K+1)/n_0 \rfloor \cdot N_0$,其中 m_i 为每一步中交织矩阵的行数 ($m_{\min} \leq m_i < m_{\max}$);对于步骤2,本文算法需要计算 m 步,每一步计算量约为 $\lfloor (K+1)/n_0 \rfloor \cdot N_0$;对于步骤3,本文算法需要计算 $(n_{\max} - n_{\min})n_i$ 步,每一步计算量约为 $\lfloor m(K+1)/n_0 \rfloor \cdot N_0$,其中 n_i 为每一步中交织矩阵的列数 ($n_{\min} \leq n_i < n_{\max}$);对于步骤4,本文算法需要计算 $m(n_{\max} - n_{\min})n_i$ 步,每一步计算量约为 $\lfloor m(K+1)/n_0 \rfloor \cdot N_0$.

4 仿真实验及性能分析

本节仿真实验以编码系数为 $g_0 = (1, 1, 0, 1)$, $g_1 = (1, 1, 1, 1)$ 的 $(2, 1, 3)$ 卷积码以及编码系数为 $g_0 = (1, 0, 1, 1, 0, 1, 1)$, $g_1 = (1, 1, 1, 1, 0, 0, 1)$ 的 $(2, 1, 6)$ 卷积码(相应的校验向量可参见3.2节的分析)为例进行分析,实验采用的分组交织行数为 $m = 19$,分组交织列数为 $n = 26$.算法中考虑交织行数最大可检测值 $m_{\max} = 100$,最小可检测值 $m_{\min} = 2$;交织列数的最大可检测值 $n_{\max} = 100$,最小可检测值 $n_{\min} = 2$.仿真的统计结果均通过100次蒙特卡洛试验获得.

为了更好地展示本文算法的性能,将本文算法与现有容错性能相对较好的基于高斯约旦消元分析算法[4~7]进行对比分析,且由于本文的识别环境与文献[7]类似(交织类型为分组交织,底码为卷积码),在此以文献[7]为例进行对比分析.本文算法所利用的接收信息为软信息 r_k ,对于文献[7]算法由于要利用高斯约旦消元法求秩,所以需使用硬判决信息,在此对已知的软信息序列 r_k 进行硬判决后,再利用文献[7]的方法进行识别.仿真采用的交织起点行坐标 $i = 4$,交织起点列坐标 $j = 6$.对于 $(2, 1, 3)$ 卷积码,本文算法使用数据量为20000bit,文献[7]算法使用数据量为500000bit;对于 $(2, 1, 6)$ 卷积码,本文算法使用数据量为40000bit,文献[7]算法使用数据量仍为500000bit.

在不同信噪比下,本文算法交织行数 m 和卷积码

校验向量 h 的正确识别率与文献[7]算法交织行数 m 和交织列数 n 的正确识别率如图4所示.从图4可以看出,本文算法和文献[7]算法,其正确识别率都随着信噪比的增加而增加.由于本文算法引入了软信息,其抗噪性能要明显优于文献[7]算法,在90%正确率处,对于 $(2, 1, 3)$ 卷积码和 $(2, 1, 6)$ 卷积码,本文方法都具有约5dB的信噪比增益,这是使用软信息所带来的优势(文献[7]算法采用的高斯约旦消元法,虽然具有一定容错能力,但其仍是一种有限域消元法,容错能力较为有限).同时,从图4可以看出, $(2, 1, 3)$ 卷积码的识别性能要比 $(2, 1, 6)$ 卷积码好,这是因为 $(2, 1, 3)$ 卷积码的编码约束长度 N_0 要小,从而交织块每行数据中符合校验关系的方程个数要多.

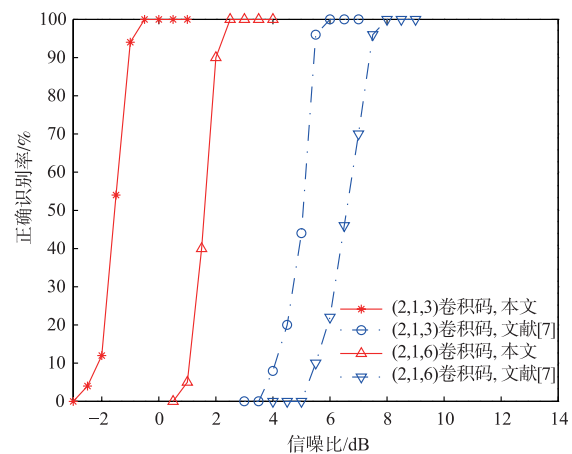


图4 本文算法与文献[7]算法的性能对比

下面对本文所提算法和文献[7]算法的复杂度进行简单的对比分析.文献[7]算法需分两个步骤完成,对于第一个步骤,文献[7]算法需要计算约 $(m_{\max} - m_{\min})(n_{\max} - n_{\min})$ 步,每一步利用高斯约旦消元的计算量约为 $\lfloor (K+1)/n_i \rfloor \cdot n_i^2$,由于文献[7]算法只利用了一路采样序列,且 $\lfloor (K+1)/n_i \rfloor$ 必须远大于 n_i (高斯约旦消元法的要求),所以文献[7]算法需要较多的截获数据;对于第二个步骤,文献[7]算法需要计算约 mn 步,每一步计算量约为 $\lfloor m(K+1)/n_0 \rfloor \cdot N_0$.需要说明的是本文算法利用软信息对分组交织参数进行识别,其计算以实数域乘法操作为主,而文献[7]算法以比特操作为主.从3.4节的分析来看,本文算法的计算复杂度要高于文献[7] (主要因为校验向量 h 的遍历区间较大,且以乘法操作为主),但本文算法的复杂度在可以承受的范围里,且从实验结果来看,其性能得到了较大提高.

其它仿真参数不变,在交织起点行坐标分别为 $i = 4$ 和 $i = 9$ 的情况下.对于 $(2, 1, 3)$ 卷积码,固定信噪比 $SNR = 1$ dB,在不同数据量条件下,交织行数 m 和校验

向量 \mathbf{h} 的正确识别率如图 5 中红线所示;对于 (2,1,6) 卷积码,固定信噪比 $\text{SNR} = 4\text{dB}$,在不同数据量条件下, m 和 \mathbf{h} 的正确识别率如图 5 中蓝线所示. 从图 5 可以看出,本文 m 和 \mathbf{h} 的正确识别率随数据量的增加而增加. 且达到相同正确识别率时,交织起点行坐标 $i = 4$ 时所需的数据量要比 $i = 9$ 时少,这是因为当 $i < m - i$ 时,只有 $m - i$ 路采样序列 $\mathbf{y}^0, \mathbf{y}^1, \dots, \mathbf{y}^{m-1-i}$ 对式 (6) 中校验方程总符合度 D' 的值作出贡献,也就是说,本文 3.1 节中的识别方法在 $i = 4$ 时对采样序列的利用更加充分.

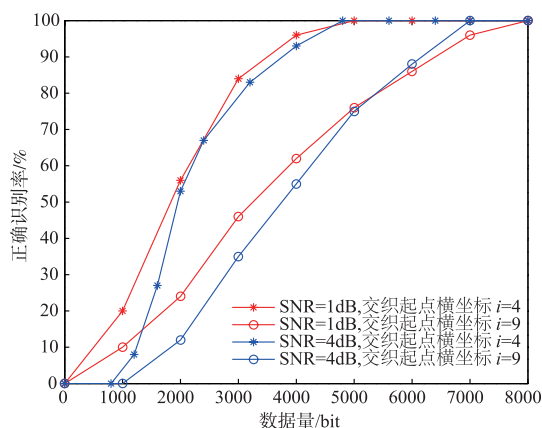


图5 m 和 \mathbf{h} 的正确识别率与数据量的关系

对于 (2,1,6) 卷积码,在交织起点行坐标 $i = 4$, 交织起点列坐标 $j = 6$, 信噪比 $\text{SNR} = 3\text{dB}$, 数据量分别为 400000bit 和 4000000bit 的实验条件下,根据 3.2 节中式 (8) 求得每路采样序列的平均符合度 \bar{D}' , 其变化规律分别如图 6 中红线和蓝线所示,其中实线表示通过 3.2 节求得的最佳判决门限 Th , 虚线表示求得的“ 3σ ”判决门限 $\text{Th}_{3\sigma}$ (数据量为 400000bit 时可得 $\text{Th} = 0.0181$, $\text{Th}_{3\sigma} = 0.0078$; 数据量为 4000000bit 时可得 $\text{Th} = 0.0181$, $\text{Th}_{3\sigma} = 0.0025$). 从图 6 可以看出,前面 $m - i = 15$ 路采样序列平均符合度 \bar{D}' 的值较大,而其余 $i = 4$ 路采样序列平均符合度 \bar{D}' 的值较小,且两者的差距较大,所以利用本文 3.2 节中的方法能较好地对交织起点行坐标 i 进行识别. 且可看出数据量越多,每路采样序列的平均符合度统计越充分,其断层更加明显,即更有利于判决. 所以当信噪比较低时可适当增加数据量来改善识别性能 (实际中也可利用 3.3 节解交织的方法,同时遍历 i, j, n 这三个参数,利用解交织后的符合度实现这三个参数的识别,但复杂度会增加 m 倍).

对于 (2,1,3) 和 (2,1,6) 卷积码,在交织起点行坐标 $i = 4$, 交织起点列坐标 $j = 6$ 的实验条件下. 固定数据量为 16000bit, 交织列数 n 和交织起点列坐标 j 的正确识别率和信噪比的关系如图 7 所示,从图 7 可看出, n 和 j 的正确识别率随信噪比的增加而增加. 固定信噪比 $\text{SNR} = 1\text{dB}$, n 和 j 的正确识别率和数据量的关系如图 8 所示,从

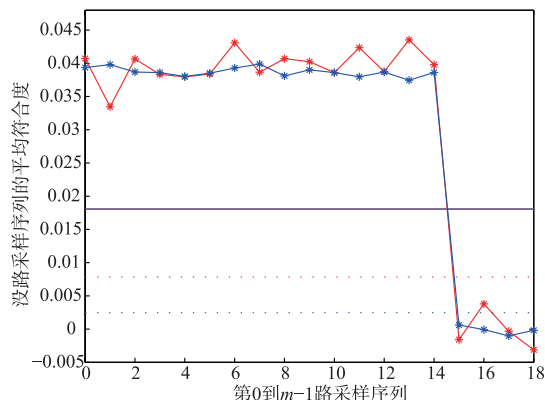


图6 (2,1,6)卷积码交织起点行坐标 i 的识别效果图

图 8 可看出, n 和 j 的正确识别率随数据量的增加而增加. 且从实验结果可看出, (2,1,3) 卷积码的识别性能比 (2,1,6) 卷积码要好,这是因为 (2,1,3) 卷积码编码约束长度要短,在数据量相同时,其符合校验关系的方程个数要多,对解交织后的符合度统计更加充分.

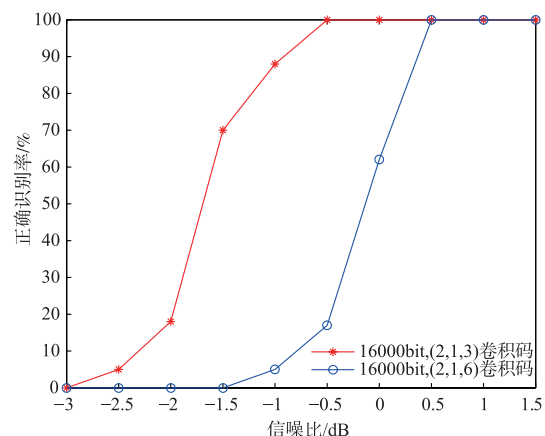


图7 n 和 j 的正确识别率与信噪比的关系

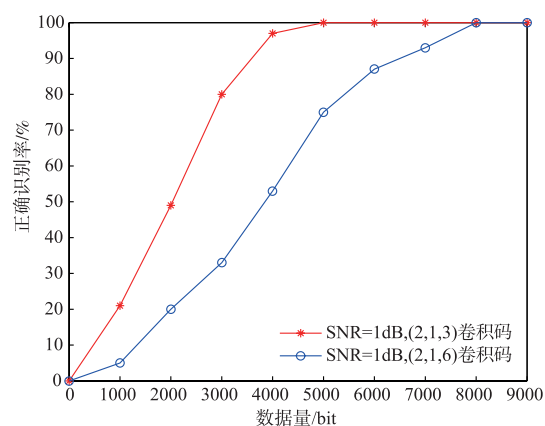


图8 n 和 j 的正确识别率与数据量的关系

5 结束语

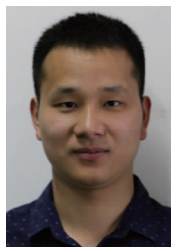
本文针对分组交织和卷积码的盲识别问题,提出

了一种基于软信息的识别方法. 该方法利用软信息建立了符合度的概念, 首先根据交织器中相邻码元交织后距离为交织行数的关系, 对采样后的数据求总符合度实现交织行数和卷积码校验向量的识别; 然后根据每路采样序列平均符合度的变化规律实现交织起点行坐标的识别; 最后根据解交织序列的符合度实现交织列数和交织起点列坐标的识别. 同时, 本文算法利用校验方程成立和不成立时, 其符合度为 +1 和 -1 的随机特性, 很好地避免了跨交织块信息对符合度衡量准则的影响. 仿真结果表明本文算法识别性能良好, 具有较强的容错能力, 且能较完备地实现分组交织和卷积码相关参数的识别, 可更好地适应实际环境.

参考文献

- [1] Cao S, Chen J, Damask J N, et al. Interleaver technology: comparisons and applications requirements [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(1): 281 - 289.
- [2] 解辉, 王丰华, 黄知涛. 卷积交织器盲识别方法 [J]. *电子与信息学报*, 2013, 35(8): 1952 - 1957.
XIE H, WANG F H, HUANG Z T. A method for blind recognition of convolutional interleaver [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(8): 1952 - 1957. (in Chinese)
- [3] Burel G, Gautier R. Blind estimation of encoder interleaver characteristics in a non cooperative context [A]. *Proceedings of the IASTED International Conference on Communication, Internet and Information Technology* [C]. Scottsdale, AZ, USA: ACTA Press, 2003. 275 - 280.
- [4] Sicot G, Houcke S. Blind detection of interleaver parameters [A]. *Proceeding of the ICASSP 2005* [C]. Philadelphia, USA: IEEE Press, 2005. 829 - 832.
- [5] Sicot G, Houcke S. Blind detection of interleaver parameters [J]. *Signal Processing*, 2009, 89(4): 450 - 462.
- [6] Lu L, Li K H, Guan Y L. Blind detection of interleaver parameters for non-binary coded data streams [A]. *IEEE International Conference on Computing* [C]. Dresden: IEEE, 2009. 1 - 4.
- [7] 陆凯, 张旻, 李歆昊. 基于矩阵秩统计的卷积码分组交织盲识别 [J]. *探测与控制学报*, 2015, 37(3): 40 - 44.
LU K, ZHANG M, LI X H. Blind identifying of convolutional code and packet interleaver based on matrix rank statistic [J]. *Journal of Detection & Control*, 2015, 37(3): 40 - 44. (in Chinese)
- [8] 刘骏, 李静, 于沛东. 一种 Turbo 码随机交织器的迭代估计方法 [J]. *通信学报*, 2015, 36(6): 201 - 206.
LIU J, LI J, YU P D. Iterative estimation method for random interleaver of Turbo codes [J]. *Journal on Communications*, 2015, 36(6): 201 - 206. (in Chinese)
- [9] 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): 301 - 306.
YU P D, LI J, PENG H. A novel algorithm for channel coding recognition using soft-decision [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013, 41(2): 301 - 306. (in Chinese)
- [10] Yu P D, Li J, Peng H. A least square method for parameter estimation of RSC sub-codes of turbo codes [J]. *IEEE Communication Letters*, 2014, 18(4): 644 - 647.
- [11] Hagenauer J, Offer E, Papke L. Iterative decoding of binary block and convolutional codes [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2002, 42(2): 429 - 445.
- [12] 张永光, 楼才义. 信道编码及其识别分析 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- [13] Yu P D, Peng H, Li J. On blind recognition of channel codes within a candidate set [J]. *IEEE Communication Letters*, 2016, 20(4): 736 - 739.

作者简介



陈泽亮 男, 1992 年 4 月出生于湖南岳阳. 信息工程大学硕士生, 主要研究方向为信道编码识别分析.
E-mail: zelchen@163.com



巩克现 男, 1976 年 8 月出生于山东泰安. 信息工程大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为信道编码分析、通信信号处理等.
E-mail: ggkx@163.com