

基于零空间矩阵匹配的极化码参数盲识别算法

张天骐 胡延平* 冯嘉欣 张晓艳

(重庆邮电大学信号与信息处理重庆市重点实验室 重庆 400065)

摘要: 针对目前极化码参数盲识别问题, 该文提出一种基于零空间矩阵匹配的极化码参数盲识别算法。由于极化码生成矩阵的构造是确定的, 其生成矩阵都是满秩的方阵, 该算法首先利用极化码编码中信道可靠性估计删除生成矩阵中冻结位码字对应的行, 再找出该矩阵在二元域中的零空间矩阵作为该码长下的监督矩阵, 用不同长度码长的监督矩阵与待检测的码字迭代相乘, 根据乘积结果中“1”的比例来判断码字的码长、信息位个数和位置分布。仿真结果表明, 针对200组码长64, 信息位个数30的极化码, 在最大误比特率不超过0.06时, 识别率能保持在80%以上。

关键词: 非合作信号处理; 极化码; 盲识别

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)12-2953-07

DOI: 10.11999/JEIT190935

Blind Identification Algorithm of Polarization Code Parameters Based on Null Space Matrix Matching

ZHANG Tianqi HU Yanping FENG Jiaxin ZHANG Xiaoyan

(Chongqing Key Laboratory of Signal and Information Processing (CQKLS&IP), Chongqing University of
Posts and Telecommunications (CQUPT), Chongqing 400065, China)

Abstract: To solve the problem of blind identification of polar codes' parameters, a blind recognition algorithm of polar codes based on zero space matrix matching is proposed. The construction of polar codes' generation matrix is certain, and all the generation matrices are full rank square matrices, first the rows corresponding to the frozen bit codes are deleted by using the channel reliability estimation in the polar code encoding. Then, the null space matrix of this matrix in the binary field is found out as the supervision matrix under the code length. The code word is iteratively multiplied by the supervision matrix of different code lengths, according to the proportion of "1" in the product result, the code length, number and position distribution of information bits of the code word are determined. The simulation results show that for the 200 groups of polar code with 64-code-length and 30-information-bits, the recognition rate can be kept above 80% when the maximum bit error rate is less than 0.06.

Key words: Non-cooperative signal processing; Polar codes; Blind recognition

1 引言

为了进一步使信道编码的性能逼近香农限,

2009年Arikan^[1]基于信道极化现象提出了首个在码长趋近于无穷时能达到香农极限传输速率进行无差错传输的编码方式, 将其命名为极化码(polar code)。极化码的编译码复杂度较低, 而且相对于LDPC码的随机构造, 极化码的构造方法是确定的, 只需要给定编码长度, 就能够确定极化码的编译码结构, 并且可以通过生成矩阵的形式完成编码过程。2016年11月18日, 在美国内华达州里诺召开的3 GPP RAN1 #87次会议, 极化码被选定为5 G中eMBB(增强移动宽带)场景下控制信道编码方案^[2]。

信道编码盲识别在最近几年成为非合作通信领域中一个热门的研究课题, 它受到了越来越多国内

收稿日期: 2019-11-21; 改回日期: 2020-04-16; 网络出版: 2020-07-13

*通信作者: 胡延平 530129515@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金(61671095, 61702065, 61701067, 61771085), 信号与信息处理重庆市市级重点实验室建设项目(CSTC2009CA2003), 重庆市研究生科研创新项目(CYS19248), 重庆市教育委员会科研项目(KJ1600427, KJ1600429)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61671095, 61702065, 61701067, 61771085), The Project of Key Laboratory of Signal and Information Processing of Chongqing (CSTC2009CA2003), Chongqing Graduate Research and Innovation Project (CYS19248), The Research Project of Chongqing Educational Commission (KJ1600427, KJ1600429)

外研究人员的关注,也有许多优秀的相关研究成果随之发表、应用。文献[3]以码重分析识别法为基础,提出一种联合码重分布、汉明距离分布以及深度分布特性的线性分组码识别算法。文献[4]结合线性分组码码重分布特征与信息熵的概念和性质,提出了一种基于码重分布信息熵的线性分组码编码参数盲识别方法。文献[5]针对循环码构造出候选校验矩阵,使其与截获矩阵相乘判断校验矩阵是否存在并利用对应的多项式来识别码字长度、同步时刻和生成多项式。文献[6]首次提出了RS码的盲识别方法,通过对码字进行伽罗华域傅里叶变换(Galois Field Fourier Transform, GFFT)得到连零码谱来实现RS码参数的识别。此外,针对卷积码、Turbo码、LDPC码等不同信道编码方式,也有大量的盲识别研究[7-9]。极化码作为当前热门5 G信道编码研究对象[10],目前国内外还没有针对该码参数的盲识别研究,此方向也非常具有研究价值。

虽然极化码属于线性分组码,可以采用一些适用于线性分组码的译码算法进行译码[11],但由于一般的极化码是非系统码且不具备循环码的特性,于是传统的信道编码盲识别方法并不适用于极化码。针对这个问题,本文提出一种基于零空间矩阵匹配的极化码参数盲识别算法。该方法利用极化码生成矩阵的确定性,根据极化码比特信道选取的规则,构造出不同码长的校验矩阵,再基于校验矩阵匹配的方法进行极化码参数的盲识别。

2 极化码简介

2.1 信道极化

信道极化现象是极化码的基础,它分为信道组合和信道分解两部分。信道组合就是对给定的 N 个二进制输入离散无记忆信道(Binary Digital Memoryless Channal, B-DMC) W 利用递归的方法,来构造一个组合信道 $W_N: X^N \rightarrow Y^N (N = 2^n, n \geq 0)$ 。如 $n=1$ 时得到向量信道 W_2 如图1所示。

通过进一步操作,可将 $N=2^n$ 个信道进行组合,图2所示为递归结构的一般形式,其中 R_N 表示比特反转排序操作。

通过信道组合阶段, N 个独立信道 W 被组合成信道 W_N ,接下来就将信道 W_N 分解成 N 个二进制输入坐标信道 $W_N^{(i)}$ 。根据Arikan在文献[1]中提出的信道极化定理,当 N 以2的幂次趋于无穷大时,子信道 $W_N^{(i)}$ 的容量极化为两类,一类是容量为0的纯噪声信道,另一类是容量为1的无噪声信道。

极化码的基本思想为:通过构造出各极化子信道 $W_N^{(i)}$,并且只在无噪声信道上传输随机的信息位

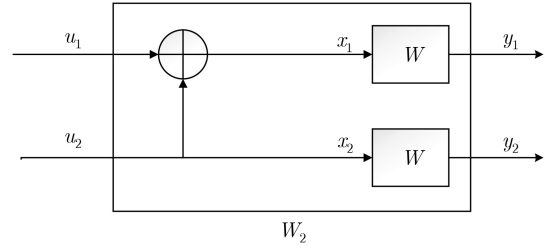


图1 信道 W_2

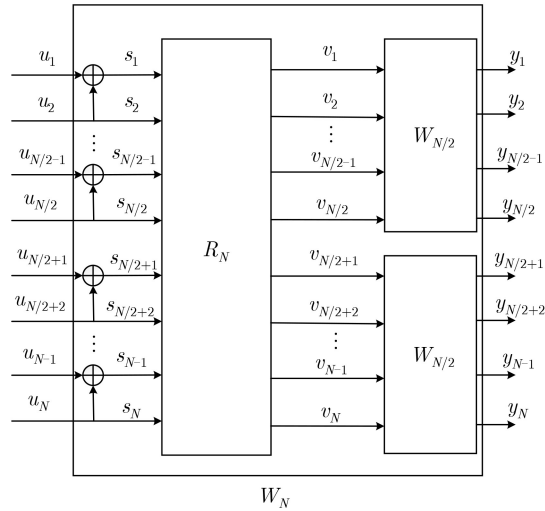


图2 信道 W_N

比特,其他信道传输固定的冻结位比特,这样极化码就能达到理论上的信道容量[12]。

2.2 极化码编码

极化码属于二元线性分组码,它的编码过程可以用生成矩阵的形式表示

$$\mathbf{x}_1^N = \mathbf{u}_1^N \times \mathbf{G}_N \quad (1)$$

其中, $\mathbf{u}_1^N$ 为原始比特序列, $\mathbf{x}_1^N$ 为编码后的比特序列, $\mathbf{G}_N$ 为生成矩阵,码长 $N = 2^n$, n 为正整数。生成矩阵表示为

$$\mathbf{G}_N = \mathbf{B}_N \cdot \mathbf{F}^{\otimes n} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{F}^{\otimes n}$ 表示对矩阵 $\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$ 的 n 次克罗内克积,有递归式 $\mathbf{F}^{\otimes n} = \mathbf{F} \otimes \mathbf{F}^{\otimes (n-1)}$; $\mathbf{B}_N$ 是排序矩阵,用以完成比特反序重排操作[13]。

可以看出生成矩阵 $\mathbf{G}_N$ 是一个 $N \times N$ 的满秩矩阵,假设 A 是一个元素个数为 k 的正整数的集合, A 中每个元素对应着信息位所在的行数,则其补集 A^c 中的元素对应冻结位所在的行数。 $\mathbf{u}_A$ 表示向量 $\mathbf{u}_1^N$ 中下标属于集合 A 的元素组成的子向量,于是编码公式可写为

$$\mathbf{x}_1^N = \mathbf{u}_A \times \mathbf{G}_N(A) + \mathbf{u}_{A^c} \times \mathbf{G}_N(A^c) \quad (3)$$

一般情况下,极化码的冻结比特均取0,本文

也仅讨论所有冻结比特向量 u_{Ac} 为 $\mathbf{0}$ 的情况，此时编码公式可进一步简化为

$$\mathbf{x}_1^N = \mathbf{u}_A \cdot \mathbf{G}_N(A) \quad (4)$$

例如 $N = 4$, $k = 2$, $A = \{2, 4\}$,

$$\mathbf{G}_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \text{极化码}[4, 2, \{2, 4\}, (0)] \text{具体}$$

的编码映射关系为 $\mathbf{x}_1^4 = \mathbf{u}_1^4 \cdot \mathbf{G}_4 = (u_2, u_4) \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$ 。

2.3 极化信道可靠性估计

对于二进制删除信道(Binary Erasure Channel, BEC)，可以使用巴氏参数来进行计算各子信道的可靠度。在任意二进制输入离散无记忆信道(Binary Discrete Memoryless Channel, B-DMC)中，巴氏参数的定义为

$$Z(W) = \sum_{y \in Y} \sqrt{W(y|0)W(y|1)} \quad (5)$$

其中， Y 是输出符号集合， $W(y|x)$ 为转移概率(x 取0或1)。对任意信道 W 都满足 $0 \leq Z(W) \leq 1$ ，且当 W 是删除概率为 ε 的BEC时，有 $Z(W) = \varepsilon$ ，可以通过以下递推公式来计算各个子信道的巴氏参数 $Z(W_N^{(i)})$

$$\left. \begin{aligned} Z(W_{2N}^{(2i-1)}) &\leq 2Z(W_N^{(i)}) - [Z(W_N^{(i)})]^2 \\ Z(W_{2N}^{(2i)}) &= [Z(W_N^{(i)})]^2 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

其中，第1个不等式在BEC信道中能取到等号，递归的初始条件为 $Z(W_1^{(1)}) = \varepsilon$ ，且 $Z(W_N^{(i)})$ 为等效比特信道 $W_N^{(i)}$ 的删除概率。 $Z(W_N^{(i)})$ 越小，则相应信道的对称容量 $I(W_N^{(i)})$ 越大，信道也就越可靠。编码时选择巴氏参数最小的 k 个子信道放置消息比特，其余的子信道则用于传输冻结比特。

例如 $N = 8$, $\varepsilon = 0.5$ 时巴氏参数计算结果如图3。如果选择4个信道作为信息信道，那么其索引集合为 $A = \{4, 6, 7, 8\}$ 。相比其它编码方案，极化码具有最优的理论性能、低编译码复杂度等优势^[14]，并且同时具有代数编码和概率编码两者各自的一些特点^[15]，针对以上介绍的极化码，本文对其参数盲识别进行了研究。

3 极化码盲识别原理及方法

假设发送端等概率发送码长为 $N_0 = 2^{n_0}$ ，信息位个数为 k_0 ($1 \leq k_0 \leq N_0/2$)的极化码，经过删除概率为 ε_0 的二进制删除信道传输。截获若干条完整码字组成的长度为 L 的比特流信息，非合作方需要从该截获比特流中估计出发码字的各项参数，包括码长、信息位个数以及信息位分布情况。

由于极化码性质，需考虑估计的码长范围为2的正整数次幂。2017年2月3GPP在希腊雅典召开了RAN1#88次会议，确定了5G中极化码的最大母码长度 $N_{\max}$ 在下行控制信道中为512，上行控制信道中为1024。再考虑到编码的实用性以及较短码字重复性对估计带来的干扰，本文码长估计范围取 $[16, 1024]$ ，码率范围为 $0 < r = \frac{k}{N} \leq \frac{1}{2}$ 。

3.1 识别原理

不同码长的极化码对应着不同的满秩生成矩阵，按照极化码信道可靠性估计对生成矩阵进行化简，取其在二元域中的零空间矩阵与截获比特流迭代相乘，根据乘积结果的匹配度来对极化码参数进行盲识别，以下是具体原理。

对于一般的线性系统分组码，都存在监督矩阵 $\mathbf{H}$ 使得码字与 $\mathbf{H}$ 在二元域相乘的结果为 $\mathbf{0}$ 。而极化码属于非系统码且其生成矩阵 $\mathbf{G}_N$ 为满秩的 $N \times N$

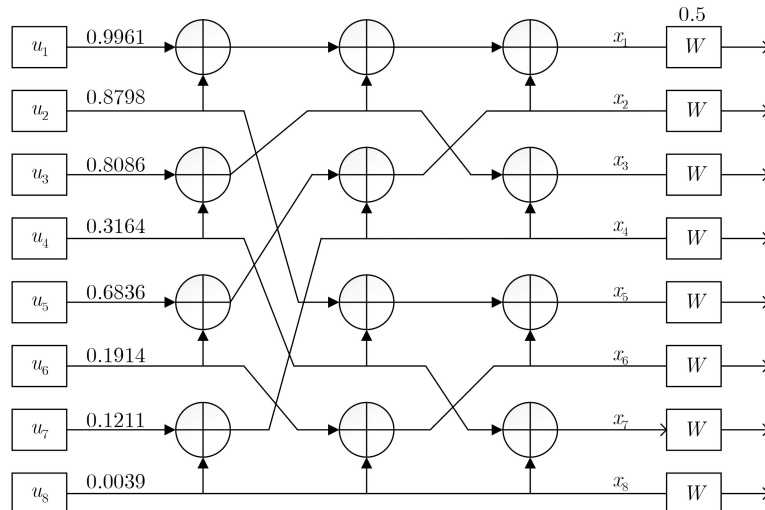


图3 BEC(0.5)下巴氏参数计算结果

方阵,就不存在传统定义上的监督矩阵,这里则用生成矩阵 $\mathbf{G}_N$ 的子矩阵 $\mathbf{G}_N(A)$ 的零空间矩阵来定义极化码的监督矩阵 $\mathbf{H}_N(A)$ 。

定义: $\mathbf{G}_N(A)$ 是生成矩阵 $\mathbf{G}_N$ 去掉冻结位对应行数的 $k \times N$ 子矩阵,其在二元域中的零空间矩阵定义为对应极化码的监督矩阵 $\mathbf{H}_N(A)$,即有 $\mathbf{G}_N(A) \cdot \mathbf{H}_N(A) = \mathbf{0}$, $\mathbf{H}_N(A)$ 是个 $N \times (N - k)$ 的二元域矩阵。

结合式(4)就不难得出 $\mathbf{x}_1^N \cdot \mathbf{H}_N(A) = \mathbf{0}$,即码字与监督矩阵的乘积为 $\mathbf{0}$ 。取码长为 N ,信息位个数为 k 以及信道删除概率 ε 下的监督矩阵,使截获比特流与监督矩阵迭代相乘,每次相乘后将监督矩阵右移 N 位继续相乘,则迭代次数为 $\lfloor L/N \rfloor$, $\lfloor \cdot \rfloor$ 为向下取整符号。记录乘积结果为 $\mathbf{0}$ 的次数为 z ,定义 z 与迭代次数的比值为匹配度 η ,即

$$\eta = \frac{z}{\lfloor L/N \rfloor} \quad (7)$$

接下来分析匹配度 η 与监督矩阵参数 N, k 以及信道删除概率 ε 的关系。

引理: 设正整数 $k_1 > k_2$,令 A_1 是一个包含 k_1 个正整数元素的集合, A_2 是 A_1 的一个子集,包含 k_2 个元素。当冻结位全取0时,参数为 $[N, k_1, \{A_1\}, (0)]$ 的极化码包含了参数为 $[N, k_2, \{A_2\}, (0)]$ 极化码的所有码字。

证明: 冻结位全取0时的编码公式为式(4),当 $A_2 \subset A_1$ 时,生成矩阵 $\mathbf{G}_N(A_2)$ 就是 $\mathbf{G}_N(A_1)$ 的一个减少了若干行的子矩阵,且任意比特序列 $\mathbf{u}_{A_2}$ 是相对应 $\mathbf{u}_{A_1}$ 的一个子向量,则它们的乘积也存在着包含关系,即 $[N, k_1, \{A_1\}, (0)]$ 的码字包含了所有 $[N, k_2, \{A_2\}, (0)]$ 的码字,后者码字相当于前者所有 $\mathbf{u}_{A_1}$ 中 $\{A_1/A_2\}$ 对应位取0的结果。证毕

推论: 监督矩阵 $\mathbf{H}_N(A_1)$ 是监督矩阵 $\mathbf{H}_N(A_2)$ 经过线性列变换后的一个子矩阵,也就是说 $\mathbf{H}_N(A_1)$ 中所有列向量可由 $\mathbf{H}_N(A_2)$ 中的列向量线性表示。

证明: 初始条件同引理, $\mathbf{H}_N(A)$ 是 $\mathbf{G}_N(A)$ 在 $\text{GF}(2)$ 中的零空间中所有向量组成的矩阵,也即齐次线性方程组 $\{\mathbf{G}_N(A)|0\}$ 的解空间。 $\mathbf{H}_N(A_1)$ 和 $\mathbf{H}_N(A_2)$ 分别是 $\mathbf{G}_N(A_1)$ 和 $\mathbf{G}_N(A_2)$ 的监督矩阵,即 $\mathbf{G}_N(A_1) \cdot \mathbf{H}_N(A_1) = \mathbf{0}$, $\mathbf{G}_N(A_2) \cdot \mathbf{H}_N(A_2) = \mathbf{0}$;由于 $\mathbf{G}_N(A_2)$ 是 $\mathbf{G}_N(A_1)$ 的减行子矩阵,则 $\mathbf{G}_N(A_1)$ 可表示为 $\mathbf{G}_N(A_1) = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_N(A_2) \\ \mathbf{G}_x \end{bmatrix}$,其中 $\mathbf{G}_x$ 是 $\mathbf{G}_N(A_1)$ 比 $\mathbf{G}_N(A_2)$ 多出的 $k_1 - k_2$ 行拼成的矩阵。

这里使用反证法,设 $\mathbf{H}_N(A_1)$ 中存在列向量 V 不能由 $\mathbf{H}_N(A_2)$ 中的列向量线性表示,则必有 $\mathbf{G}_N(A_2) \cdot V \neq \mathbf{0}$,那么 $\mathbf{G}_N(A_2) \cdot \mathbf{H}_N(A_1) \neq \mathbf{0}$ 。

又 $\mathbf{G}_N(A_1) \cdot \mathbf{H}_N(A_1) = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_N(A_2) \\ \mathbf{G}_x \end{bmatrix} \cdot \mathbf{H}_N(A_1) = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_N(A_2) \cdot \mathbf{H}_N(A_1) \\ \mathbf{G}_x \cdot \mathbf{H}_N(A_1) \end{bmatrix}$,乘积结果的上半部分不等于 $\mathbf{0} \Rightarrow \mathbf{G}_N(A_1) \cdot \mathbf{H}_N(A_1) \neq \mathbf{0}$,这与前面的条件相矛盾,故推论成立。证毕

根据极化码的编码过程和匹配度 η 的定义,当监督矩阵所取码长、信息位个数及分布与发送码字一致时,匹配度 η 达到最大值,该特性就能作为判断监督矩阵参数和截取码字参数是否一致的依据。在做估计时,先选定一个估计参数,遍历另外两个参数,利用匹配度对估计参数进行识别。在引理和推论中有提到码字以及监督矩阵分别在一定情况下存在着包含的关系,于是在识别过程中会出现这一性质造成的误识别现象,需要在判别方法上来予以优化。

3.2 识别步骤

(1) 码长识别: 二进制删除信道的删除概率 ε 从0取到1,码率 r 均取最大值 $\frac{1}{2}$,构造不同码长 $N(N = 16, 32, \dots, 1024)$ 下的监督矩阵,表示为 $\mathbf{H}_N(1/2, \varepsilon)$ 。将初始比特流与不同参数的监督矩阵迭代相乘,计算出它们的匹配度 η ,排除 η 值等于0或接近0的 N 值,取 η 值较高处对应的 N 值为备选码长。

进一步减小监督矩阵的码率 r ,比如取 $\mathbf{H}_N(1/3, \varepsilon)$, $\mathbf{H}_N(1/4, \varepsilon)$, $\mathbf{H}_N(1/5, \varepsilon)$ 等等,继续求出不同 ε 和 N 下的匹配度 η ,直到只剩唯一 N 值在各 ε 下对应的 η 有较大值且其他值趋近于0的时候,判断该码长为待识别码长 N_0 。

(2) 信息位个数识别: 在识别出码长的情况下,依旧遍历所有 ε 值,监督矩阵的信息位个数 k 从1取到 $N/2$,也即取 $\mathbf{H}_{N_0}(1/N_0, \varepsilon)$, $\mathbf{H}_{N_0}(2/N_0, \varepsilon), \dots, \mathbf{H}_{N_0}(1/2, \varepsilon)$ 同样与初始比特流迭代相乘,求出它们的匹配度 η 。

当 k 值从 $k_0 - 1$ 增加到待识别信息位个数 k_0 时,匹配度会出现一个明显大幅上升的现象。于是计算所有信息位个数取值 k 与 $k - 1$ 匹配度之间的差值,判断匹配度差值最大的信息位个数即为所求 k_0 。该判别方法能有效减少3.2节中提到的误识别现象。

(3) 信息位位置识别: 在二进制删除信道中,识别信息位和冻结位位置等价于对信道删除概率 ε 进行识别。在已经识别出码长 N_0 和信息位个数 k_0 的情况下,用同样的方法求出 $\mathbf{H}_{N_0}(k_0/N_0, \varepsilon)$ 的匹配度,记录匹配度最大值对应的 ε 值连续区间。该区间下 k_0 个信息位信道的选取顺序是一致的,用该范围内的 ε 值作为BEC的删除概率就能判断出源码信息位和冻结位的分布情况。

4 仿真验证和性能分析

4.1 参数识别仿真

假设在无误码的情况下, 接收端接收到由100个码长 $N_0=128$, 信息位个数 $k_0=35$ 的极化码所组成的比特流, 仿真采用删除概率 $\varepsilon_0=0.5$ 的二进制删除信道。

(1) 首先进行码长识别, 用固定码率 $1/2$ 、不同码长和信息位分布的监督矩阵 $\mathbf{H}_N(1/2, \varepsilon)$ 与比特流迭代相乘得到的匹配度结果如图4。

可以看出 $n=6, 7$ 时匹配度能达到最大值, 接下来进一步减小监督矩阵的码率, 使监督矩阵的线性无关向量组增多, 对码字的校验更加严格来排除干扰项。码率取 $1/3$ 时匹配度计算结果如图5。

从图5中就能看出当且仅当 $n=7$ 时匹配度最大, 于是估计出码长 $N_0=2^n=128$ 。

(2) 在估计出码长之后, 监督矩阵遍历所有 k 值求出匹配度, 再求出相邻 k 值之间的匹配度差值, 仿真结果如图6。

由图6知在 k 取35时匹配度差值最大, 于是以此估计出信息位个数 $k_0=35$ 。

(3) 在码长和信息位个数估计出来之后, 将参数代入构造的监督矩阵中, 重复上面的步骤得出删除概率 ε 的取值范围, 仿真结果如图7。

图7中 ε 在 $[0.48, 0.78]$ 范围内匹配度的取值最大为1, 说明在该删除概率范围BEC中极化码编码

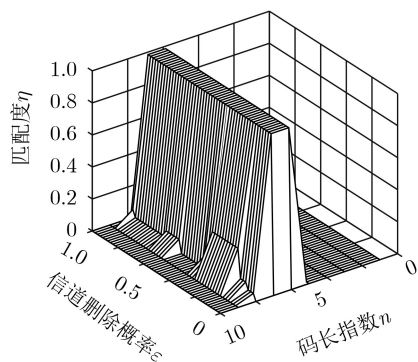


图4 (128, 35)极化码码长预识别

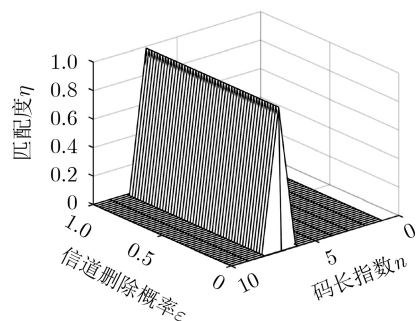


图5 (128, 35)极化码码长精确识别

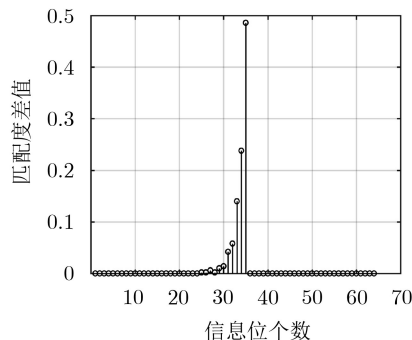


图6 (128, 35)极化码信息位数识别

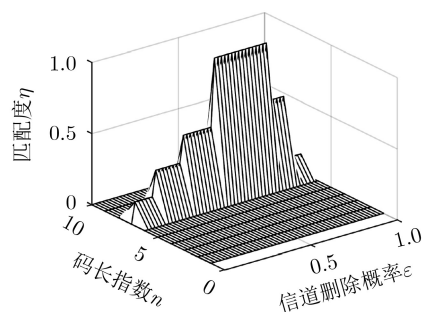


图7 信道删除概率范围识别

k_0 个信息位的位置选取顺序一致, 参考2.3节中极化码信道的可靠性估计, 就能推断出该极化码信息位和冻结位的分布情况。

4.2 仿真结果验证

在完成仿真估计后, 将估计参数代入监督矩阵中对估计结果进行校验。信道删除概率取中间值0.64, 用码长为128、信息位个数从1取到64的监督矩阵 $\mathbf{H}_{128}(k/128, 0.64)$ 与比特流迭代相乘后得到的匹配度结果如图8。

可以看到匹配度在信息位个数 $k=35$ 时上升至最大值1, 且在之后一直保持该值。产生这一现象的原因, 一旦监督矩阵信息位个数 k 取值大于码字信息位个数 k_0 , 监督矩阵中的检验向量都是码字零空间中向量的子集, 于是匹配度会与正确值持平。

在存在误比特率的情况下也有该现象, 误比特率设值为0.02, 当监督矩阵取 $k \geq 35$ 时匹配度均为0.072, 如图9。

4.3 性能分析

图10是对码长和信息位个数分别为(32, 12), (64, 30)和(128, 60)的极化码用本文算法进行100次蒙特卡洛仿真的结果, 其中横坐标为误比特率, 取值范围为0~0.3, 纵坐标分别为码长和信息位个数识别率。

图10(a)中接收端收到了由200个极化码所组成的比特流, 当码字参数分别为(32, 12), (64, 30)和(128, 60)时, 码长正确识别率达到80%以上则需系

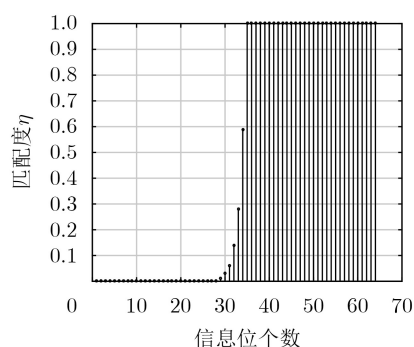


图8 识别参数匹配度验证

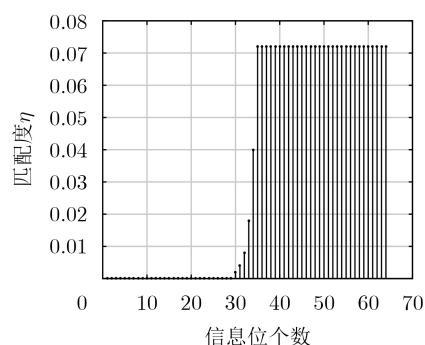
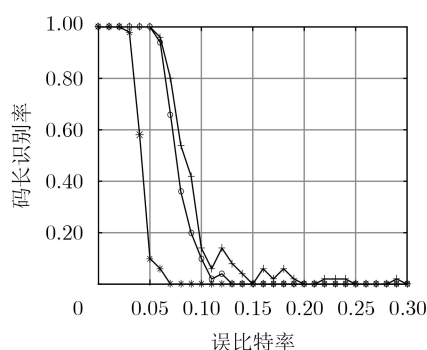
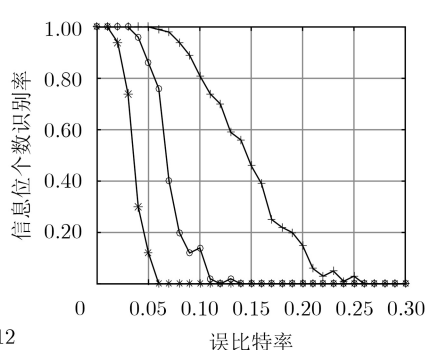


图9 误比特率0.02情况下的匹配度验证



(a) 码长识别率



(b) 信息位数识别率

图10 对不同极化码盲识别的性能仿真图

统允许的最大误比特率分别可达 7.0×10^{-2} , 5.78×10^{-2} , 3.45×10^{-2} 。图10(b)中接收端收到了由500个码字所组成的比特流,信息位数识别率达到80%以上则需系统允许的最大误比特率分别可达 9.5×10^{-1} , 5.6×10^{-2} , 2.7×10^{-2} 。

5 结束语

本文提出了利用极化码生成矩阵的零空间来构造监督矩阵,定义监督矩阵与信息比特迭代相乘结果中“0”的比例为匹配度,根据匹配度对极化码参数进行盲识别的算法。在仅已知若干码字信息流比特的情况下,该算法能对不同码长的极化码进行识别,并且不仅可以识别出码字信息位的个数,还能通过估计二进制删除信道的删除概率来对信息位的位置分布进行判断。此外,由于码长识别只需计算2的整数次幂且码率控制在1/2以下,本算法运算量小并在有误码的情况下也具备一定的识别能力,对不同码长的极化码在不同误码情况下进行了多次仿真,仿真结果表明码长越短、接受码字组数越多,则参数识别的容错率越高,该算法在工程中具备一定的实际应用价值。

参考文献

- [1] ARIKAN E. Channel polarization: A method for constructing capacity-achieving codes[C]. 2008 IEEE International Symposium on Information Theory, Toronto, Canada, 2008: 1173–1177. doi: [10.1109/ISIT.2008.4595172](https://doi.org/10.1109/ISIT.2008.4595172).
- [2] GAMAGE H, RAJATHEVA N, and LATVA-AHO M. Channel coding for enhanced mobile broadband communication in 5G systems[C]. 2017 European Conference on Networks and Communications, Oulu, The Republic of Finland, 2017. doi: [10.1109/EuCNC.2017.7980697](https://doi.org/10.1109/EuCNC.2017.7980697).
- [3] 杨燕子, 李迟生, 罗伟娟. 线性分组码的盲识别技术研究[J]. 现代电子技术, 2018, 41(3): 23–26. doi: [10.16652/j.issn.1004-373x.2018.03.006](https://doi.org/10.16652/j.issn.1004-373x.2018.03.006).
- [4] 陈金杰, 杨俊安. 基于码重分布信息熵的线性分组码盲识别方法[J]. 通信技术, 2018, 51(7): 1553–1560. doi: [10.3969/j.issn.1002-0802.2018.07.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-0802.2018.07.012).
- [5] CHEN Jinjie and YANG Jun'an. Linear-block-code blind recognition based on code-weight-distribution information entropy[J]. *Communications Technology*, 2018, 51(7): 1553–1560. doi: [10.3969/j.issn.1002-0802.2018.07.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-0802.2018.07.012).
- [6] 张天骐, 王俊霞, 江晓磊, 等. 基于校验矩阵匹配的循环码参数盲识别算法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(4): 901–907. doi: [10.11999/JEIT160575](https://doi.org/10.11999/JEIT160575).
- [7] ZHANG Tianqi, WANG Junxia, JIANG Xiaolei, et al. Blind Recognition of Cyclic Code Based on Check Matrix

- Match Algorithm[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(4): 901–907. doi: [10.11999/JEIT160575](https://doi.org/10.11999/JEIT160575).
- [6] 刘健, 谢锴, 周希元. RS码的盲识别方法[J]. 电子科技大学学报, 2009, 38(3): 363–367. doi: [10.3969/j.issn.1001-0548.2009.03.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-0548.2009.03.011).
- LIU Jian, XIE Nuo, and ZHOU Xiyuan. Blind recognition method of RS coding[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2009, 38(3): 363–367. doi: [10.3969/j.issn.1001-0548.2009.03.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-0548.2009.03.011).
- [7] 解辉, 黄知涛, 王丰华. 信道编码盲识别技术研究进展[J]. 电子学报, 2013, 41(6): 1166–1176. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2013.06.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2013.06.019).
- XIE Hui, HUANG Zhitao, and WANG Fenghua. Research progress of blind recognition of channel coding[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013, 41(6): 1166–1176. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2013.06.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2013.06.019).
- [8] 姚智刚, 解辉, 韩壮志, 等. 基于分段Walsh-Hadamard变换的卷积码盲重构算法[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(9): 2047–2054. doi: [10.11999/JEIT181139](https://doi.org/10.11999/JEIT181139).
- YAO Zhigang, XIE Hui, HAN Zhuangzhi, et al. Blind reconstruction of convolutional code based on partitioned walsh-hadamard transform[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(9): 2047–2054. doi: [10.11999/JEIT181139](https://doi.org/10.11999/JEIT181139).
- [9] 吴昭军, 张立民, 钟兆根, 等. 低信噪比下归零Turbo码码长及其帧同步识别[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(9): 2063–2070. doi: [10.11999/JEIT180903](https://doi.org/10.11999/JEIT180903).
- WU Zhaojun, ZHANG Limin, ZHONG Zhaogen, et al. Blind recognition of code length and synchronization of turbo codes on trellis termination at low SNR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(9): 2063–2070. doi: [10.11999/JEIT180903](https://doi.org/10.11999/JEIT180903).
- [10] 于清苹, 史治平. 5G信道编码技术研究综述[J]. 无线电通信技术, 2018, 44(1): 1–8. doi: [10.3969/j.issn.1003-3114.2018.01.01](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-3114.2018.01.01).
- YU Qingping and SHI Zhiping. Research of channel coding techniques in 5G communications[J]. *Radio Communications Technology*, 2018, 44(1): 1–8. doi: [10.3969/j.issn.1003-3114.2018.01.01](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-3114.2018.01.01).
- [11] 吴道龙. 极化码构造与译码算法研究[D]. [博士学位], 西安电子科技大学, 2016.
- WU Daolong. Study on construction and decoding algorithms for polar codes[D]. [Ph. D. dissertation], Xidian University, 2016.
- [12] TAL I and VARDY A. List decoding of polar codes[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2015, 61(5): 2213–2226. doi: [10.1109/TIT.2015.2410251](https://doi.org/10.1109/TIT.2015.2410251).
- [13] 崔冰清, 褚丽莉, 孙国栋. 极化码在BEC信道下的性能分析[J]. 通信技术, 2017, 50(10): 2172–2177. doi: [10.3969/j.issn.1002-0802.2017.10.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-0802.2017.10.007).
- CUI Bingqing, CHU Lili, and SUN Guodong. Performance analysis of polarization codes in BEC channel[J]. *Communications Technology*, 2017, 50(10): 2172–2177. doi: [10.3969/j.issn.1002-0802.2017.10.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-0802.2017.10.007).
- [14] 陈凯. 极化编码理论与实用方案研究[D]. [博士学位], 北京邮电大学, 2014.
- CHEN Kai. Research on polar coding theory and practical applications[D]. [Ph. D. dissertation], Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014.
- [15] 张亮. 极化码的译码算法研究及其应用[D]. [博士学位], 浙江大学, 2016.
- ZHANG Liang. On the investigation and application of decoding algorithms of polar codes[D]. [Ph. D. dissertation], Zhejiang University, 2016.
- 张天骐: 男, 1971年生, 博士后, 研究方向为扩频信号的盲处理、神经网络实现以及信号的同步处理.
- 胡延平: 男, 1994年生, 硕士生, 研究方向为信道编码参数盲识别技术.
- 冯嘉欣: 女, 1996年生, 硕士生, 研究方向为卫星扩频信号的捕获.
- 张晓艳: 女, 1995年生, 硕士生, 研究方向为语音信号处理、语音增强.

责任编辑: 马秀强