

文章编号: 1671-0576(2021)04-0045-07

# 基于多段 CRC 和部分路径拓展的极化码译码算法

付辰轩<sup>1</sup>, 武霄泳<sup>2</sup>, 费聚锋<sup>2</sup>, 林加涛<sup>2</sup>, 张志龙<sup>1</sup>

(1. 北京邮电大学, 北京 100876; 2. 上海无线电设备研究所, 上海 201109)

**摘 要:** 为了兼顾极化码译码算法的性能和复杂度, 提出了一种基于多段循环冗余校验 (cyclic redundancy check, CRC) 和部分路径拓展的极化码译码算法。该算法基于部分路径拓展的思路, 通过计算译码比特的对数似然比及其期望的定量关系, 自适应选择硬判决模式或者路径拓展模式。在此基础上, 设计了五种校验位分段策略, 通过将信息比特分成多段并在其后添加 CRC 实现算法在复杂度和可靠性之间折中。仿真结果表明, 通过设定合理的参数和分段策略, 在误帧率达到  $10^{-4}$  时, 与 CRC 辅助的连续删除列表译码算法相比, 所提算法的复杂度可降低约 81%。

**关键词:** 极化码译码; 低复杂度; 循环冗余校验; 部分路径拓展; 误帧率

**中图分类号:** TN911.22

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1671-0576.2021.04.008

## Decoding Algorithm of Polarization Code Based on Multi-segment CRC and Partial Path Expansion

FU Chen-xuan<sup>1</sup>, WU Xiao-yong<sup>2</sup>, FEI Ju-feng<sup>2</sup>, LIN Jia-tao<sup>2</sup>, ZHANG Zhi-long<sup>1</sup>

(1. Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

2. Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** In order to balance the performance and complexity of polarization code decoding method, a decoding algorithm based on multi-segment cyclic redundancy check (CRC) and partial path expansion is proposed. The algorithm adopts the scheme of partial path expansion, and selects the hard decision mode or path expansion mode adaptively by comparing the logarithmic likelihood ratio of decoded bits and its expected value. Five check bit segmentation strategies are designed. By dividing the message bits into multiple segments and adding CRC after them, the algorithm realizes the compromise between complexity and reliability. Simulation results show that by setting reasonable parameters and segmentation strategy, the complexity of the proposed algorithm can be reduced by 81% compared with CRC-aided successive cancellation list decoding algorithm when the frame error rate is  $10^{-4}$ .

**Key words:** polarization code decoding; low complexity; cyclic redundancy check; partial path expansion; frame error rate

收稿日期: 2021-09-13

基金项目: 上海航天科技创新基金(SAST2020-051); 陕西省重点研发计划(2019ZDLGY07-10)

作者简介: 付辰轩(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事移动通信、机器学习与大数据处理技术研究。

## 0 引言

极化码是 2009 年由 ARIKAN<sup>[1]</sup>提出的一种新型纠错编码技术。与低密度奇偶校验 (low density parity check, LDPC) 码<sup>[2]</sup>、Turbo 码<sup>[3]</sup>通过实验证明达到香农极限<sup>[4]</sup>不同,极化码是第一种能够通过理论证明达到香农容量的编码方案,并且凭借较低的编译码复杂度,成为了学术界的热点。

连续删除 (successive cancellation, SC) 极化码译码算法<sup>[1]</sup>具有  $O(N \log N)$  的复杂度,并且在码长  $N$  趋于无穷时,译码性能接近香农极限。但由于实际条件下码长受限,以至于信道极化不够彻底,导致 SC 译码算法的误码率性能不理想。文献<sup>[5]</sup>提出了连续删除列表 (successive cancellation list, SCL) 译码算法。该算法通过在译码过程中尽可能保留更多的译码路径,解决了 SC 译码算法在有限码长下性能不足的问题,但同时也提高了算法复杂度。文献<sup>[6]</sup>在 SCL 的基础上引入循环冗余校验 (CRC),提出了 CRC 辅助的 SCL (CRC-aided SCL, CA-SCL) 译码算法。该算法进一步提升了译码性能,但仍然没有解决算法复杂度较高的问题。此后,对译码二叉树进行提前剪枝<sup>[7]</sup>和在 SCL 译码中插入两段 CRC 的方法被提出<sup>[8]</sup>,这两种方法能够在一定程度上降低译码算法复杂度。

针对传统极化码译码算法无法兼顾复杂度和性能的弊端,提出一种多段 CRC 的部分路径拓展 (multi-segment CRC-aided and partial path expansion SCL, MCA-PE-SCL) 译码算法。该算法的核心思想是通过引入部分路径拓展规则<sup>[9]</sup>,在译码比特足够可靠时进行硬判决,在其余情况下进行路径拓展,目的是降低达到路径上限  $L$  的速度,降低译码算法的复杂度。在此基础上再引入循环冗余校验,在 CRC 总的校验位数一致的原则下,设计多段 CRC 策略,确保错误译码结果能够被剔除,从而提升译码的可靠性。同时由于每次 CRC 后只会保留一条译码路径,可进一步降低译码算法复杂度。

## 1 极化码

极化码是基于信道极化提出的信道编码方式。信道极化由信道联合和信道分裂两个阶段组成。

对本文涉及的部分物理量符号定义方式进行说明,用  $\mathbf{a}_N^N$  代表  $1 \times N$  维行向量  $(a_1, \dots, a_N)$ ,  $\mathbf{a}_i^j$  ( $i \geq 1, j \leq N$ , 且  $i \leq j$ ) 代表子向量  $(a_i, \dots, a_j)$ ;  $\mathbf{W}: X \rightarrow Y$  表示输入集合为  $X$ , 输出集合为  $Y$  的通用二元离散无记忆信道 (binary-input discrete memoryless channels, B-DMC);  $\mathbf{W}$  的信道转移概率表示为  $\mathbf{W}(y | x)$ , 其中  $x \in X$ ,  $y \in Y$ 。

信道联合阶段是以递归的方式组合  $N$  个给定的 B-DMC, 产生一个  $N$  维输入、 $N$  维输出的矢量信道  $\mathbf{W}_N: X^N \rightarrow Y^N$ , 其中  $X^N, Y^N$  分别表示  $N$  次信道输入和输出符号构成的集合,  $N = 2^k, k$  为正整数。

信道分裂是将  $\mathbf{W}_N$  分裂成具有相互依赖关系的  $N$  个分裂子信道  $\mathbf{W}_N^{(i)}: X \rightarrow Y^N \times X^{i-1}$ ,  $1 \leq i \leq N$ 。定义子信道的  $\mathbf{W}_N^{(i)}$  的转移概率为

$$\mathbf{W}_N^{(i)}(\mathbf{y}_1^N, \mathbf{u}_1^{i-1} | u_i) \triangleq \sum_{\mathbf{u}_{i+1}^N \in X^{N-i}} \mathbf{W}_N(\mathbf{y}_1^N | \mathbf{u}_1^N) \quad (1)$$

式中:  $(\mathbf{y}_1^N, \mathbf{u}_1^{i-1})$  代表  $\mathbf{W}_N^{(i)}$  的输出;  $u_i$  代表  $\mathbf{W}_N^{(i)}$  的输入。根据式(1)可以得出:  $\mathbf{W}_N$  的第  $i$  个输入元素与其前  $i-1$  个信道输入和前  $N$  个输出有关联, 而 SC、SCL 译码算法将利用  $\mathbf{W}_N^{(i)}$  计算译码比特对数似然比来完成比特判决操作。

## 2 基于部分路径拓展和多段 CRC 的极化码译码算法

### 2.1 部分路径拓展策略

SCL 算法在译码路径数未达到上限  $L$  时, 同时保留“0”和“1”两种译码结果, 总体译码复杂度较高。而 SC 算法在译码过程中, 每个比特译码时只进行硬判决, 保留“0”或“1”中的一种译码结果, 总体译码复杂度较低。因此, 考虑定义一个路径拓展规则, 通过比较每个译码比特的对数似然比  $L(u_i)$  与其期望  $E(L(u_i))$  的大小关系, 进行

硬判决。如果当前信息比特对数似然比  $L(u_i) > 0$ , 并且相对于  $E(L(u_i))$  足够大, 则硬判决为 0; 如果当前信息比特满足  $L(u_i) < 0$ , 且相对于  $E(L(u_i))$  足够小, 则硬判决为 1; 其余情况, 则保留两种可能的译码路径。这就是部分路径拓展的基本原理。图 1 为部分路径拓展译码树示意图。

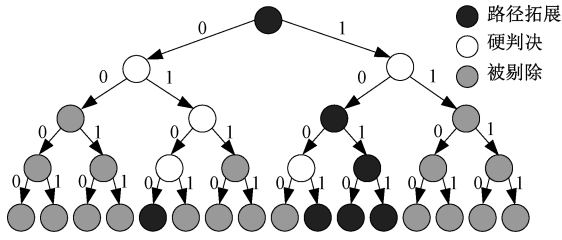


图 1 部分路径拓展译码树示意图

由文献[10]可知, 高斯信道条件下, 当输入比特全为 0 时, 可以证明每个信息比特的 SC 对数似然比都服从均值为  $m_N^{(i)}$ 、方差为  $2m_N^{(i)}$  的高斯分布, 其中  $m_N^{(i)}$  表示分裂子信道  $W_N^{(i)}$  的对数似然比的期望。每个比特对数似然比的期望的计算公式可以由文献[5]中对数似然比的递推公式得出, 表达式为

$$\begin{cases} m_{2N}^{(2i-1)} = \varphi^{-1}[1 - (1 - \varphi(m_N^{(i)}))^2] \\ m_{2N}^{(2i)} = 2m_N^{(i)} \\ m_1^{(1)} = 2/\sigma^2 \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$\varphi(x) = \begin{cases} 1 - \frac{1}{\sqrt{4\pi|x|}} \int_{-\infty}^{+\infty} \tanh\left(\frac{u}{2}\right) \times \\ \exp\left[-\frac{(u-x)^2}{4|x|}\right] du, & x > 0 \\ 1, & x = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\varphi(\cdot)$  是在  $[0, +\infty)$  上连续单调递减的函数, 且有  $\varphi(0) = 1, \varphi(+\infty) = 0$ ;  $\sigma$  为高斯白噪声信道的标准差;  $u$  为微分变量。

设部分路径拓展系数为  $\alpha$ , 极化码译码部分路径拓展规则满足

$$\hat{u}_i = \begin{cases} 0, & L_i(u_i) > \alpha E(L(u_i)) \\ 1, & L_i(u_i) < \alpha E(L(u_i)) \\ \text{路径拓展,} & \text{其他情况} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\hat{u}_i$  为第  $i$  个信息比特的译码判决结果;  $L_i(u_i)$  为第  $l$  条路径上第  $i$  个比特位的对数似然比。

当  $\alpha$  较小时, 信息比特的对数似然比达到可靠条件较容易, 会有更多的路径进行硬判决; 反之, 若  $\alpha$  较大, 信息比特的对数似然比达到可靠条件较困难, 只有较少的路径会进行硬判决。

### 2.2 多段 CRC 策略

循环冗余校验可以用来检测数据传输过程中可能出现的错误。在信息比特序列末尾加上 CRC, 使得组合后的新信息比特序列能够整除设定好的生成多项式。在极化码接收端, 将部分路径拓展译码后的序列与生成多项式进行模 2 除法, 如果余数不为 0, 说明极化码译码结果出现错误, 则剔除当前译码结果, 从而降低译码误帧率。

传统的 CA-SCL 译码算法采取在整段信息比特后添加 CRC 的方式, 相对于 SCL 译码算法, 仅仅提高了性能, 并没有解决 SCL 复杂度较高的问题。本文设计的多段 CRC 策略采取在信息比特的不同特定位置分别插入 CRC 的方式, 通过多段循环冗余校验, 达到降低译码算法复杂度的目的。

多段 CRC 的设计应该遵循总校验位数相同的原则, 也就是在不同的 CRC 分段策略下, CRC 的总校验位数是相同的, 这样才能保证在不同分段情况下 CRC 所占的空间资源是相等的, 从而保证整个极化码译码流程中的码率  $R$  不变。本文设计了五种校验位分段策略, 用  $a$  段  $b$  位代表 CRC 总校验位共分为  $a$  段, 每一段包括  $b$  位校验位。具体包括: 1 段 24 位、2 段 12 位、3 段 8 位、4 段 6 位、6 段 4 位。每种分段策略中的 CRC 编码器都遵循: 将极化码信息比特按照 CRC 分段数平均拆分成若干段, 然后将每段信息比特和对应的 CRC 生成多项式传入 CRC 编码器, 得到整合的序列, 最后将此序列送入极化码编码器, 进行后续的编译码操作。

### 2.3 MCA-PE-SCL 译码算法

本文所提的 MCA-PE-SCL 算法在部分路径拓展的基础上, 引入多段 CRC 策略进行校验, 进而达到从两方面共同降低极化码译码复杂度的目的。MCA-PE-SCL 算法的译码流程如图 2 所示。其中部分路径拓展译码器和循环冗余校验器的个数  $n$  由 CRC 分段数确定。

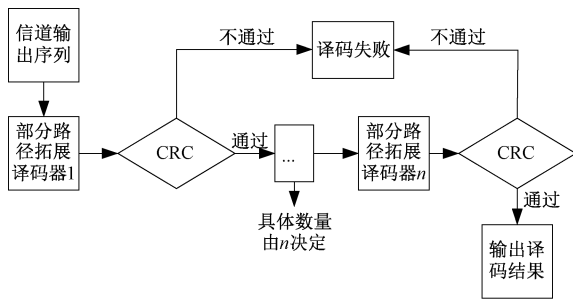


图 2 MCA-PE-SCL 算法流程图

MCA-PE-SCL 译码算法的实现步骤如下。

首先在输入端将信息比特平均分为  $n$  段，每一段后加入相等数量的 CRC 校验位。这里添加的  $n$  段 CRC 校验位之和应该与其他分段策略的总 CRC 位数  $m_0$  相等，即  $m_1 + m_2 + \dots + m_n = m_0$ 。完成信息比特和校验位的序列联合后，输入序列依次进入极化码编码器和调制器，再经过加性高斯白噪声信道的传输后开始译码。

译码阶段相当于在译码树上分  $n$  段比特进行译码。其中每段比特的译码又要经过部分路径拓展译码和 CRC 两个步骤。当第  $t$  ( $1 \leq t < n$ ) 段译码序列经过部分路径拓展译码器时，通过式(2)得到每个比特的对数似然比期望，再通过式(4)来选择进行硬判决或者路径拓展。随后从部分路径拓展译码器中存活的路径按照度量值大小进行降序排列，依次进入循环冗余校验器。当第一条译码路径通过校验时，将此路径作为最可靠路径进行保留，并结束第  $t$  段 CRC 环节，以保留路径作为唯一存活路径，进行第  $t+1$  段比特序列的译码。

第  $t+1$  段序列的对数似然比计算全部依赖于前  $t$  段比特译码后所存活下来的序列，相当于此时的译码二叉树上，从根节点到第  $t$  段最后一个比特之间仅存在一条译码路径。而第  $t+1$  段比特的译码方法与第  $t$  段相同，以此类推，直到最后一段，即第  $n$  段比特序列，经过第  $n$  个部分路径拓展译码器和循环冗余校验器，将每段循环冗余校验器输出的唯一存活译码序列进行整合，即为最终的极化码译码结果。在整个译码过程中，若存在任意一段比特序列，在经过部分路径拓展译码后，没有能够通过 CRC 的译码路径，则证明当前帧译码失败，提前终止并进行下一帧译码。

### 3 仿真与分析

为了验证所提译码算法的复杂度与误帧率性能，进行了仿真实验。相关实验参数设定为：极化码码长  $N=1024$ ，码率  $R=0.5$ ，译码路径列表上限  $L=8$ ，译码帧数为  $10^4$ ，信噪比  $E_b/N_0 \in [1 \text{ dB}, 3 \text{ dB}]$ ，调制方式采用二进制相移键控 (BPSK)，信道条件为加性高斯白噪声信道，部分路径拓展系数  $\alpha \in [0.1, 0.6]$ ，CRC 分段数  $n \in \{1, 2, 3, 4, 6\}$ 。

#### 3.1 复杂度仿真

在 MCA-PE-SCL 算法译码过程中，时间复杂度主要由每个译码比特对数似然比的计算，以及对数似然比与其期望的对比过程决定。而上述两个过程的时间复杂度与译码路径数量成正比。因此本文以译码过程中存活的路径数量来衡量极化码译码算法的复杂度，并分两种情况对比分析不同分段策略下的 MCA-PE-SCL 算法与 CA-SCL 算法的复杂度。

第一种是相同信噪比、相同部分路径拓展系数  $\alpha$  情况下，不同 CRC 分段策略的译码存活路径数对比。取信噪比  $E_b/N_0 = 2 \text{ dB}$ ，部分路径拓展系数  $\alpha = 0.2$ ，译码路径数随分段策略变化的仿真结果如图 3 所示。

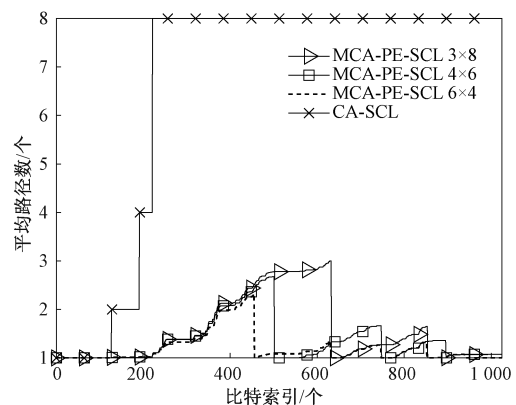


图 3 译码路径数随分段策略变化仿真图

由图 3 可以看出，随着 CRC 校验位分段数的增加，译码过程中存活路径被剔除到只剩一条的情况越来越多，每一次经过分段循环冗余校验器后，后续比特进行译码时存活路径数均明显减少，

相当于开始新的一次部分路径拓展 SCL 算法。在  $E_b/N_0=2$  dB,  $\alpha=0.2$  条件下,CA-SCL 算法的总译码路径数为 6 799,不同分段策略的 MCA-PE-SCL 算法总译码路径数如表 1 所示。

表 1 不同分段策略下 MCA-PE-SCL 算法对应的总译码路径数

分段策略	总译码路径数
1 段 24 位	3 034.91
2 段 12 位	1 935.42
3 段 8 位	1 577.26
4 段 6 位	1 363.25
6 段 4 位	1 222.14

可知,译码复杂度随校验位分段数增多呈递减趋势。相同初始参数与信道环境下,相对于传统 CA-SCL 算法,不同分段策略的 MCA-PE-SCL 算法的复杂度分别降低了 55.36%,71.53%,76.08%,79.95%,82.02%。

第二种是相同信噪比、相同分段策略情况下,不同  $\alpha$  的译码存活路径数对比。取信噪比  $E_b/N_0=1$  dB,CRC 分段策略为 2 段 12 位,译码路径数随  $\alpha$  变化的仿真曲线如图 4 所示。

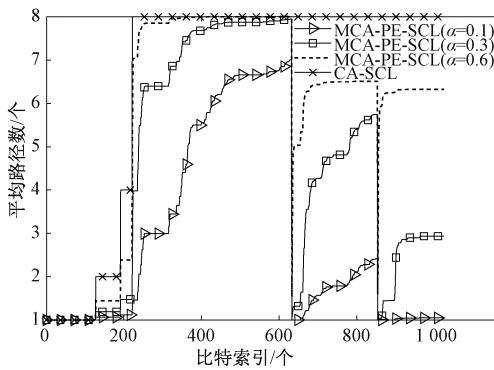


图 4 译码路径数随  $\alpha$  变化仿真图

可知,随着  $\alpha$  的降低,每层比特对应的存活译码路径数越来越少。原因是  $\alpha$  越小,对应的路径拓展要求就越低。根据 2.1 节中的路径拓展规则,译码过程直接进行硬判决的比特就越多,总的译码存活路径则越少,所对应的译码复杂度也越低。

基于本文仿真参数,在不同信噪比下,CA-SCL 算法的总译码路径数均为 6 799。当  $\alpha=0.2$  时,译码路径列表上限  $L=8$ ,不同信噪比下 MCA-PE-SCL 算法对应的总路径数如表 2 所示。

表 2 不同信噪比下 MCA-PE-SCL 算法对应的总译码路径数

分段策略	总译码路径数		
	$E_b/N_0 = 1$ dB	$E_b/N_0 = 2$ dB	$E_b/N_0 = 3$ dB
1 段 24 位	6 468.91	4 063.60	1 141.91
2 段 12 位	5 340.55	2 678.52	1 065.49
3 段 8 位	4 633.64	2 081.66	1 041.83
4 段 6 位	4 066.14	1 736.15	1 034.06
6 段 4 位	3 630.90	1 470.95	1 028.94

由表 2 可知,与 CA-SCL 算法相比,MCA-PE-SCL 算法的复杂度大大降低。定义路径数占比为 MCA-PE-SCL 算法路径数与 CA-SCL 算法路径数之比,取信噪比为 2 dB,部分路径系数为 0.2,CRC 分段策略为 3 段 8 位,可以得出路径数占比为 30.61%,即与 CA-SCL 算法相比,MCA-PE-SCL 算法复杂度降低了 69.39%。

在低信噪比情况下,多段 CRC 对复杂度的优化效果大于部分路径拓展。取信噪比为 1 dB,部分路径系数为 0.2,整段 24 位 CRC,可以得出其路径数占比为 95.15%,相比于 CA-SCL 算法,复杂度只降低了 4.85%,优化效果相对较差。但如果在此基础上,引入 2 段、3 段、4 段、6 段的 CRC,所降低的复杂度百分比分别为 21.45%,31.85%,40.20%,46.60%,复杂度优化程度有大幅提升。

随着信噪比的增大,对于降低复杂度,部分路径拓展起到的作用逐渐增大,多段 CRC 起到的作用逐渐减小。以表 2 中最后一列路径数据为例,在信噪比提升到 3 dB 时,从上到下,每种分段策略译码算法对应前一分段方法的复杂度分别只有 1.13%,0.35%,0.11%,0.08%的提升。

可知,引入部分路径拓展和多段循环冗余校验的 MCA-PE-SCL 算法能够在全信噪比区间下有效降低译码复杂度。

### 3.2 误帧率仿真

为了验证 MCA-PE-SCL 算法的可行性,将其在预设帧数下与 CA-SCL 算法进行误帧率仿真对比。

当  $\alpha=0.2$  时,不同分段策略的 MCA-PE-SCL 译码算法与传统的 CA-SCL 算法的误帧率对比仿真结果如图 5 所示。

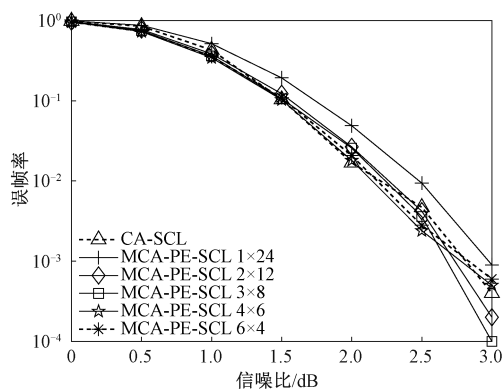


图 5 不同情况下各译码算法误帧率对比仿真图

由图 5 可知,在所取信噪比区间内,分段策略为 1 段 24 位的 MCA-PE-SCL 算法的误帧率一直处于最高的状态。随着分段数的增加, MCA-PE-SCL 算法的误帧率有所下降,并且存在误帧率低于 CA-SCL 算法的情况,此时前者在译码复杂度和可靠性方面均优于后者。综合对比所提算法与 CA-SCL 算法的复杂度和误帧率可以得出,在  $\alpha = 0.45$ , CRC 分段策略为 6 段 4 位时,两种算法误帧率均为  $4 \times 10^{-4}$ ,前者复杂度相对于后者降低了约 81.00%。

MCA-PE-SCL 算法在引入多段 CRC 分段策略时,存在两种影响:一是校验位数越多,校验位的部分路径拓展译码出错的概率越大;二是校验位数越多,经 CRC 得出的译码路径正确的概率越大。图 6 为不同信噪比条件下的 MCA-PE-SCL 算法误帧率仿真结果。

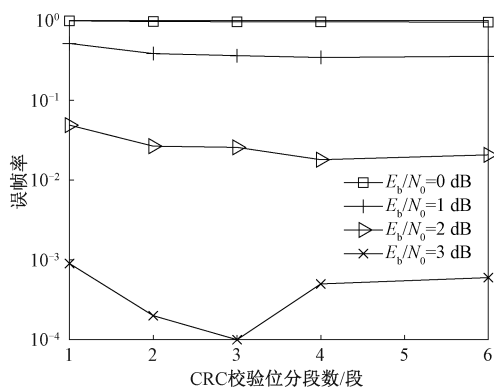


图 6 不同信噪比下的 MCA-PE-SCL 算法误帧率仿真图

由图 6 可知,在  $\alpha = 0.2$  的情况下,除信噪比为 0 时, MCA-PE-SCL 算法的误帧率随分段数增加而减小,其他信噪比条件下误帧率都随着校验

位分段数的增加,先下降后上升。误帧率先下降说明,在前三种分段较少的策略中,影响一的作用大于影响二,此时误帧率大小主要由分段数所主导;接下来的上升趋势说明当分段数过多时,影响二带来的作用大于影响一,误帧率大小主要由单次 CRC 的校验位数所决定。随着信噪比的增大,对应的误帧率最低的 MCA-PE-SCL 算法的 CRC 分段数逐渐减小,不同信噪比下的最低误帧率 CRC 分段策略如表 3 所示。

表 3 不同信噪比下的最低误帧率 CRC 分段策略

信噪比/dB	最低误帧率	分段策略
0	$9.56 \times 10^{-1}$	6 段 4 位
1	$3.44 \times 10^{-1}$	4 段 6 位
2	$1.80 \times 10^{-2}$	4 段 6 位
3	$1.00 \times 10^{-4}$	3 段 8 位

## 4 结论

本文针对 SCL、CA-SCL 算法复杂度过高的弊端,提出了一种基于多段循环冗余校验和部分路径拓展的极化码译码算法。该算法定义部分路径拓展规则,并引入循环冗余校验,设计五种多段 CRC 插入方案,通过将接收序列按照校验位分段数依次通过两种译码器,达到了降低译码复杂度的目的。与 CA-SCL 算法的对比仿真结果证明,选取合适的部分路径拓展参数和分段策略, MCA-PE-SCL 算法可在保证误帧率满足要求的前提下极大地降低译码复杂度,为极化码译码在权衡复杂度和误帧率性能的方案提供了一种具有参考价值的算法。

## 参考文献

- [1] ARIKAN E. Channel polarization: a method for constructing capacity-achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(7): 3051-3073.
- [2] GALLAGER R G. Low-density parity-check codes [J]. IRE Transactions on Information Theory, 1962, 8(1): 21-28.
- [3] BERROU C, GLAVIEUX A, THITIMAISHIMA P. Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: turbo-codes(1)[C]// IEEE International

- Conference on Communications. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1993: 1064-1070.
- [4] SHANNON C E. A mathematical theory of communication[J]. Bell System Technical Journal, 1948, 27(3): 379-423.
- [5] TAL I, VARDY A. List decoding of polar codes[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2015, 61(5): 2213-2226.
- [6] NIU K, CHEN K. CRC-aided decoding of polar codes[J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(10): 1668-1671.
- [7] CHEN K, LI B, SHEN H, et al. Reduce the complexity of list decoding of polar codes by tree-pruning[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(2): 204-207.
- [8] ZHOU H Y, ZHANG C, SONG W Q, et al. Segmented CRC-aided SC list polar decoding[C]//2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference, Nanjing, China. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2016: 7504469.
- [9] 李伟杰. 极化码编译码技术的研究与优化[D]. 北京: 北京邮电大学, 2020.
- [10] ZHANG Z, ZHANG L, WANG X, et al. A split-reduced successive cancellation list decoder for polar codes[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(2): 292-302.

(上接第26页)

与接收到的回波功率无关,用该检波信号解调输出的角误差所表征的目标偏角与真实的目标偏角基本一致,且角误差信号的建立时间短(不超过200  $\mu\text{s}$ )。因此基于连续检波对数放大器的回波测角设计完全适用于对角误差检测响应速度要求较高的应用场景。

## 5 结论

连续检波对数放大器具有动态范围大、输出信号建立时间短、输出交流分量与输入调制度成正比等特点,可以用于单脉冲回波测角系统。基于连续检波对数放大器的测角方法具有结构简单、调试简便、可靠性高等优点,缩短了角误差信

号的建立时间,适用于对测角响应速度要求较高的制导系统。

## 参考文献

- [1] 高峰. 雷达导引头概论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 92-93.
- [2] 刘忠. 基于DRFM的线性调频脉压雷达干扰新技术[D]. 长沙: 国防科技大学, 2006.
- [3] 穆虹. 防空导弹雷达导引头设计[M]. 北京: 宇航出版社, 1996: 313-315.
- [4] 高峰. 多普勒雷达导引头信号处理技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001: 230-235.
- [5] 弋稳. 雷达接收机技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 83-86.

欢迎订阅《制导与引信》期刊