光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250116001

基于可靠性函数的极化码PSS-RF-SCL译码算法

袁建国*，杨德意，向锦能
（重庆邮电大学 光电工程学院，重庆 400065）

摘　要： 针对串行抵消列表（Successive Cancellation List，SCL）译码框架下基于搜索集的路径分裂选择策略的缺陷，提出两种改进策略：基于可靠性函数的路径分裂策略和依靠辅助路径度量值（Auxiliary Path Metric，APM）的剪枝策略。在此基础上，提出一种新的译码算法——基于可靠性函数的路径分裂选择策略辅助串行抵消列表（Path Splitting Selecting Strategy Based on Reliability Function under the Successive Cancellation List，PSS-RF-SCL）译码算法。该算法在译码阶段，每个信息比特在进行路径分裂前，会计算所有路径的路径度量（Path Metric，PM）值。利用这些PM值，进一步计算该比特的可靠性函数值。算法将可靠性函数值低于其平均值（即阈值α）的信息比特视为需要进行路径分裂的比特，从而减少了多余的路径分裂次数。此外，算法计算每条路径的APM值，并将APM值高于正确译码路径的APM平均值（即阈值β）的路径视为不可靠路径，对不可靠路径进行剪枝，有效控制了译码列表总数。仿真结果表明，相较于传统的基于搜索集的路径分裂策略辅助的SCL译码算法，所提出的PSS-RF-SCL译码算法在保持相同译码性能的前提条件下，显著降低了译码复杂度。

关键词： 极化码；PSS-RF-SCL译码；可靠性函数；辅助路径度量值；路径分裂
中图分类号： TN91　**文章编号：** 1001－5868(2025)03－0515－07

PSS-RF-SCL Decoding Algorithm of Polar Codes Based on the Reliability Function

YUAN Jianguo，YANG Deyi，XIANG Jinneng
（School of Optoelectronic Engineering，Chongqing University of Posts and Telecommunications，Chongqing 400065，CHN）

Abstract： To address the disadvantage of the “path-splitting selecting strategy based on a search set under a successive cancellation list” decoding algorithm，a path-splitting strategy based on a reliability function and a pruning strategy relying on an auxiliary path metric (APM) are proposed. Subsequently，a path-splitting selecting strategy based on a reliability function under a successive cancellation list (PSS-RF-SCL) decoding algorithm is proposed. During the decoding of the algorithm，the path metric (PM) values for all paths is calculated before performing path splitting on each information bit. The reliability function value of the bit is calculated using these PM values. Information bits with reliability-function values below its average value (namely，the threshold α) are regarded as bits that require path splitting. This method is used to identify splitting bits and significantly reduces the splitting number. Additionally，paths with APM values above the APM average value (namely，the threshold β) of the correct decoding path are considered unreliable paths. Pruning the unreliable paths significantly reduces the total number of decoding lists. Simulation results show that compared with conventional path-splitting decoding algorithms based on search sets，the proposed PSS-RF-SCL decoding algorithm significantly reduces the decoding complexity without performance loss.

收稿日期：2025－01－16.
基金项目：国家自然科学基金项目（U21A20447，61971079）.
* **通信作者：**袁建国

Key words: polar codes; PSS-RF-SCL decoding; reliability function; auxiliary path metric; path splitting

0 引言

极化码因性能良好成为当前信道编码领域的研究热点,并且已经被采纳为5G控制信道的编码方案[1]。此前在提出极化码的同时也提出了串行抵消(Successive Cancellation, SC)译码算法。SC译码算法的优势在于不存在误码平层,但在码长有限时,由于信道未能完全极化,并且存在错误传播现象,其性能并不理想[2]。针对该问题,文献[3]提出串行抵消列表(Successive Cancellation List, SCL)译码算法。该算法通过保留多条译码路径,提高了获得正确译码结果的概率。文献[4]为获得更好的译码性能,将极化码与校验码结合,从而提出循环冗余校验码辅助串行抵消列表(Cyclic Redundancy Check Aid SCL, CA-SCL)译码算法。循环冗余校验(Cyclic Redundancy Check, CRC)码能够在译码的最终阶段从译码列表中挑选出相对正确的译码结果。CA-SCL译码算法有较好的译码性能,是目前主流的译码算法。然而,该算法在时间和空间复杂度方面存在较大挑战,这使其成为众多学者不断改进的方向。文献[5]将信息序列分段,并对每段信息序列进行CRC校验,从而提出基于分段CRC的SCL(Segment CRC Aided SCL, SCA-SCL)译码算法。该算法通过对每段信息序列进行校验,对错误译码路径进行剪枝,并且还可以提前中止已经失败的译码进程,从而降低了译码复杂度。为获得更好的译码性能,有研究者提出串行抵消列表比特翻转(Successive Cancellation List Bit-Flip, SCLF)译码算法[6],该算法在所有路径都未能通过CRC校验时会翻转不可靠比特并重新译码。

由于信息比特的可靠性并不完全一致,为进一步降低复杂度,有研究者提出只在不可靠信息比特上进行路径分裂。在此基础上,文献[7]提出搜索集的概念,可以利用极化信道偏序关系构造搜索集,搜索集包含大多数不可靠比特。文献[8]提出SCL基于搜索集的路径分裂选择策略辅助串行抵消列表(Path Splitting Selecting Strategy Based on Search Set under the Successive Cancellation List, PSS-SS-SCL)译码算法。PSS-SS-SCL译码算法通过构造搜索集囊括了大部分不可靠比特,并且只对不可靠比特进行路径分裂从而减少了分裂次数。相较于CA-SCL译码算法,PSS-SS-SCL算法在性能略微降低的情况下,较大降低了译码复杂度。但是在PSS-SS-SCL译码算法中,搜索集包含的分裂比特数量大于实际需要进行路径分裂的比特数量,造成了多余的分裂次数,从而使得译码复杂度升高。现有的依靠路径分裂策略辅助的SCL译码算法都是在搜索集中筛选出更需要进行路径分裂的比特,从而达到减少分裂次数的目的。然而,这种方法的效果并不完全理想。因此,本文提出一种基于可靠性函数的路径分裂选择策略的串行抵消列表(Path Splitting Selecting Strategy Based on Reliability Function under the Successive Cancellation List, PSS-RF-SCL)译码算法。该算法摒弃了搜索集,采用更符合实际译码情况的可靠性函数来选择需要进行路径分裂的比特。相较于基于搜索集的路径分裂策略辅助SCL译码算法,PSS-RF-SCL译码算法能够在不降低译码性能的前提下,显著降低译码复杂度。

1 极化码及其译码算法

在极化码编码前需要对极化子信道进行可靠性评估[9]。目前主要的可靠性估计算法有四种[7,10],本实验主要采用将信道近似为二进制输入AWGN信道的高斯近似(Gaussian Approximation, GA)法[10]。该方法假设发送端发送全零码字,计算出接收端的对数似然比(Logarithm Likelihood Ratio, LLR)均值。LLR均值越大,表示该极化信道越可靠[10]。在构造完成后,进行比特混合,将信息比特通过可靠性较高的极化子信道传输,冻结比特通过可靠性较低的极化子信道传输。设A为信息比特的索引合集,A^{C}为冻结比特的索引合集。比特混合后得到输入编码器的初始序列u_1^N。

对于一个码长为N的极化码,其编码方式为:

$$x_1^N = u_1^N \boldsymbol{G} \tag{1}$$

式中,$\boldsymbol{G}$为极化码的生成矩阵。编码得到的码字x_1^N在经过二进制相移键控(Binary Phase Shift Keying, BPSK)调制和信道传输后得到相应接收码字y_1^N。

1.1 CA-SCL译码算法

在接收端,通过计算接收码字的LLR作为比特

判决的依据和可靠性度量。第i个比特的对数似然比$L_N^{(i)}$的计算如公式(2)所示[11]：

$$L_N^{(i)}=\ln\frac{W_N^{(i)}(y_1^N,u_1^{i-1}|u_i=0)}{W_N^{(i)}(y_1^N,u_1^{i-1}|u_i=1)} \tag{2}$$

式中，$W(y|x)$为信道转移概率。在SC译码中，比特判决准则为[12]：

$$\hat{u}_i=\begin{cases}0, & i\in A^{\mathrm{C}}或L_N^{(i)}\geqslant 0\\ 1, & i\in A且L_N^{(i)}<0\end{cases} \tag{3}$$

$$PM_l^i=\begin{cases}PM_l^{i-1},\\ PM_l^{i-1}+|L_N^i(l)|,\end{cases}$$

式中，$\hat{u}_{i,l}$是第l条译码路径对第i个比特的估计值，$L_N^i(l)$表示第l条路径中第i个比特的对数似然比。

当解码过程中的路径数超过预设保留路径数L时，系统仅保留PM值最低的L条路径以继续后续的解码流程。在完成所有比特的解码后，对保留下来的所有候选路径执行循环冗余校验。从成功通过CRC校验的候选路径中，选取具有最小PM值的路径，该路径对应的码字随即被确定为最终的输出码字。CRC校验过程确保了输出码字的正确性。

1.2　PSS-SS-SCL译码算法

文献[8]提出的PSS-SS-SCL译码算法通过构造搜索集获得了需要进行路径分裂的比特集合。搜索集由每个码率为1的节点的首个比特组成。

如图1所示为一个码长为16的极化码二叉树。其中白色节点表示冻结比特，黑色节点表示信息比特，灰色节点表示其叶子节点既存在冻结比特，又存在信息比特。

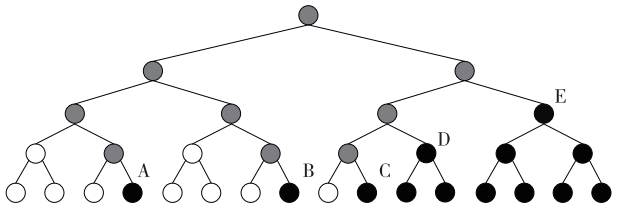


图1　极化码二叉树示意图

图中的{A,B,C,D,E}被称为码率1节点。所有码率1节点的首个比特$\{u_4,u_8,u_{10},u_{11},u_{13}\}$构成了搜索集。据文献[13]的统计，搜索集中大部分比特容易因信道干扰而产生错误。因此PSS-SS-SCL译码算法对搜索集内的比特进行译码时采用SCL译码，对搜索集外的比特则直接利用公式(3)进行硬判决。由于SCL译码会产生路径分裂，本文也将采取SCL译码的比特称作分裂比特。

从公式(3)中可以看出，对于冻结比特集合，直接将其值译为0。对于信息比特集合则通过对数似然比的符号来进行译码判决。并且对数似然比的绝对值越大，代表该比特的判决结果越可靠。

当CA-SCL译码器在译码A中的比特时，会进行路径分裂，同时保留$\hat{u}_i=0$和$\hat{u}_i=1$两种结果。然后根据公式(4)来更新路径度量(Path Metric，PM)值：

$$\begin{aligned}&\text{if}\quad \hat{u}_{i,l}=\frac{1}{2}(1-\mathrm{sgn}(L_N^i(l)))\\&\text{else}\end{aligned} \tag{4}$$

2　降低复杂度的译码策略

2.1　基于可靠性函数的路径分裂策略

现有的路径分裂策略都依靠搜索集来识别分裂比特，但搜索集是通过极化偏序关系构造的，与实际译码情况并不完全相符。并且搜索集包含的分裂比特数量较大，造成译码复杂度偏高。因此，提出通过可靠性函数的计算来判断信息比特是否需要进行路径分裂。

在CA-SCL译码当中，当u_i的$x(1\leqslant x\leqslant L)$条译码路径分裂后会产生$u_i=1$和$u_i=0$的$2x$条译码路径，其中$x$条是符合$u_i$硬判决结果的路径，其PM值将保持不变。用$\{A_1^{(i)},A_2^{(i)},\cdots,A_x^{(i)}\}$来表示它们的PM值大小。对于不符合$u_i$硬判决结果的路径，其PM值将变大。用$\{B_1^{(i)},B_2^{(i)},\cdots,B_x^{(i)}\}$来表示它们的PM值大小。对第$l$条译码路径，从$u_1$到$u_i$都没有出现译码错误的概率近似为$e^{-PM_l^{(i)}}$[14]。因此，信息比特$u_i$是否需要进行路径分裂，可以由$x$条符合硬判决结果的路径的总概率与$x$条不符合硬判决结果的路径的总概率之比来确定。如公式(5)所示：

$$F=\sum_{l=1}^{x}e^{-A_l^{(i)}}\Big/\sum_{l=1}^{x}e^{-B_l^{(i)}} \tag{5}$$

较大的F值表示在该比特中，由分裂产生的路径的可靠性要弱于原始路径的可靠性。因此，F值越大的u_i越不需要进行路径分裂，只需要对F值较小的u_i进行路径分裂即可。为通过阈值来判断u_i的F值较大或较小，需该F值拥有合适的分布范围。但由公式(5)得到的F值分布范围过大，不适用于阈值判断。因此，将其改写为公式(6)的可靠性函数：

$$E(i)=\log\left[\sum_{l=1}^{x}e^{-A_l^{(i)}}\Big/\left(\sum_{l=1}^{x}e^{-B_l^{(i)}}\right)^{1.2}\right] \tag{6}$$

经过大量的统计实验可以得到一个合适的阈值α,实验中阈值α的大小是通过大量统计可靠性函数值$E(i)$的平均值而获得的。将信息比特的可靠性函数值$E(i)$与α进行比较,可以判断出该信息比特是否需要进行路径分裂。因为$E(i)$的大小受到码长和信噪比的影响,所以本文统计出不同码长和信噪比下α的大小,如表1所示。

表1 阈值α的值

码长	E_b/N_0	α
1 024	1	38
	1.5	40
	2	40
	2.5	43
	3	45
512	1	20
	1.5	21
	2	23
	2.5	25
	3	27

$$APM_l^{(i)}=\begin{cases}APM_l^{i-1}+\left(\hat{u}_i-\dfrac{1-\mathrm{sgn}(L_i[l])}{2}\right)L_i[l], & i\in A^S\\ APM_l^{(i-1)}, & \text{else}\end{cases} \tag{7}$$

式中,A^S表示所有分裂比特的集合。正确路径的APM分布范围与PM相比要小得多,若某条路径的APM值超过这个范围,则可将其视作已经产生错误的路径。

综上所述,提出一个设定阈值β,在每个信息比特译码完成后进行判定。实验中阈值β的大小是通过统计正确译码路径的APM平均值来获得的。若某条路径的APM值大于设定的阈值β,则该路径被剪枝。通过对明显产生错误的路径进行剪枝,以减少多余译码操作,使得译码复杂度降低。APM的分布范围受信噪比和码长的影响较大。表2所示为通过统计不同信噪比和码长下正确路径的APM均值来获得阈值β大小的结果。

表2 阈值β的值

码长	E_b/N_0	β
1 024	1	30
	1.5	30
	2	25
	2.5	21
	3	17
512	1	18
	1.5	21
	2	19
	2.5	17
	3	17

对于信息比特u_i,若$E(i)<\alpha$,则进行SCL译码,否则进行硬判决译码。

2.2 路径剪枝策略

传统的PSS-SS-SCL译码算法是通过区分比特的可靠性,从而采用不同的译码方法使得译码复杂度降低。但是,译码过程中却没有考虑具体路径的可靠性。对于完全不可靠的路径没有提前剪枝,产生了多余的译码路径数。

在SCL译码中,都是通过PM值来衡量路径的可靠性。但是PM值更适合用来在所有路径中选择可靠性最高的路径,而不适合用来判断路径是否已经产生错误。因此,将辅助路径度量(Auxiliary Path Metric, APM)[15]值的大小作为路径是否已经出现错误的依据,APM只在分裂比特处进行累计,而在冻结比特和其他信息比特处保持不变。APM的计算如公式(7)所示:

3 一种改进的PSS-RF-SCL译码算法

为降低极化码译码算法的复杂度,基于上述章节中降低复杂度的译码策略,提出一种改进的PSS-RF-SCL译码算法。该算法译码步骤如图2所示。

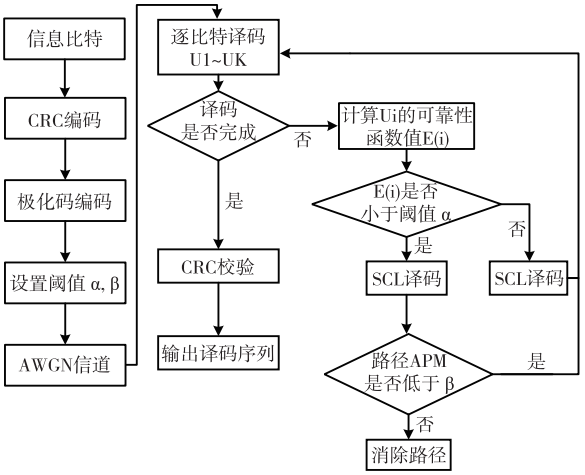


图2 PSS-RF-SCL编译码流程图

该算法根据可靠性函数,阈值α,β来判断需要的译码方式。在进行路径分裂前,计算出符合硬判

决结果的路径 PM 值 $A_x^{(i)}$ 和不符合硬判决结果的路径 PM 值 $B_x^{(i)}$。运用 $A_x^{(i)}$ 和 $B_x^{(i)}$ 计算出该比特的可靠性函数值 $E(i)$。当 $E(i)$ 小于阈值 α 时，进行 SCL 译码。当 $E(i)$ 大于阈值 α 时，则直接进行硬判决。当一个信息比特译码完成后，将每条路径的 APM 值与 β 进行比较。对 APM 值大于 β 的路径进行剪枝。其具体译码流程如表 3 所示。

表 3　PSS-RF-SCL 译码算法

START
Input：码长 N，接收端序列 y_1^N，阈值 α，阈值 β，冻结比特集合 A^C
Output：译码估计序列 $\hat{u}_1^N$
1：FOR i=1：N
2：IF $i \in A^C$
3：$\hat{u}_i=0$
4：ELSE
5：计算出 $A_x^{(i)}$ 和 $B_x^{(i)}$ 的值
6：计算出 $E(i)$ 的值
7：IF $E(i)<\alpha$
8：执行 SCL 译码
9：ELSE
10：执行 SC 译码
11：END IF
12：END IF
13：FOR l=1：L
14：IF $APM_l>\beta$
15：消除该路径
16：END IF
17：END FOR
18：END FOR
19：IF 存在通过 CRC 校验路径
20：选择其中 PM 值最小的路径作为输出序列 $\hat{u}_1^N$
21：ELSE
22：选择所有路径中 PM 值最小的路径作为输出序列 $\hat{u}_1^N$
23：END IF

4　仿真分析

本章通过仿真分析对 PSS-RF-SCL 译码算法的译码性能和复杂度与其他算法进行了比较，尤其是与现有的基于搜索集的路径分裂策略辅助 SCL 译码算法进行比较。为公平比较各个算法的性能，在仿真中对不同算法设置相同的码长 N，码率 R 以及最大列表数 L，并且在各个算法中添加的校验码长度是相同的。各个算法均采用 SNR=2.5 dB 的 GA 构造方法和 BPSK 调制，信道选用 AWGN 信道。

4.1　误码性能分析

图 3 和 4 展示了当码长 N=1 024，码率 R=1/2，最大列表数 L=8 和 L=16 时的误块率比较图。所有算法皆在信息序列末尾添加 16 位 CRC 校验码。当 L=8 时，所提出的 PSS-RF-SCL 译码算法与文献[8]中的 PSS-SS-SCL 以及文献[15]中的 PSD-SCL GA 译码算法相比性能一致。PSS-RF-SCL 译码算法仅与 CA-SCL 译码算法相比有较小的性能损失，但其译码复杂度大大降低。并且 PSS-RF-SCL 译码算法与复杂度更高的 PSD-SCL SA 译码算法相比性能损失更少。所提算法在大列表数时，更有优势。当 L=16 时，PSS-RF-SCL 译码算法的性能要优于 PSS-SS-SCL 以及两种不同的 PSD-SCL 译码算法。

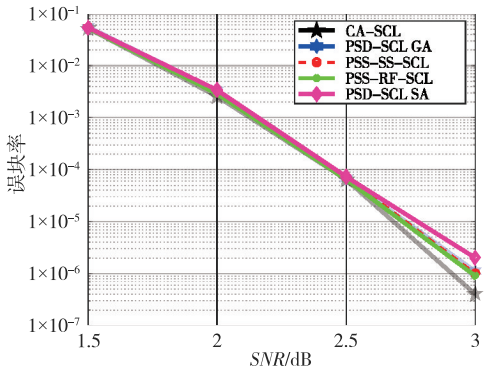


图 3　N=1 024，R=1/2，L=8 时各算法误块率仿真图

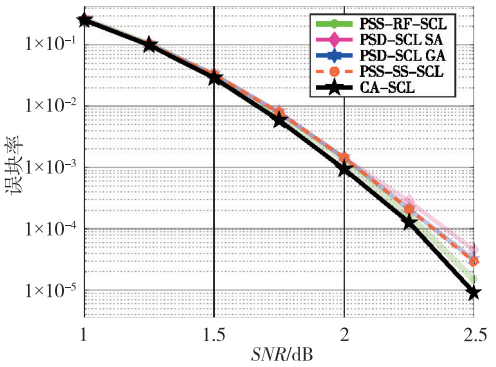


图 4　N=1 024，R=1/2，L=16 时各算法误块率仿真图

4.2　复杂度分析

SCL 译码器的译码复杂度主要与译码过程中使用的译码列表总数和分裂比特的数量有关。因此从上述两个方面来比较各个算法的复杂度。

当进行复杂度比较时，各个算法都设置码长 N=1 024，码率 R=1/2，列表数 L=8，添加 16 位校验码。

从图 5 可以看出，相较于传统的 PSS-SS-SCL 和 CA-SCL 译码算法，PSS-RF-SCL 译码算法的译码列表总数在信噪比为 2.5 dB 时下降了 37%，在信噪比为 3 dB 时下降了 70%。相较于复杂度更低的 PSD-SCL GA 译码算法，PSS-RF-SCL 译码算法的译码列表总数在信噪比为 3 dB 时也下降了 44%。与判决更严格的 PSD-SCL SA 译码算法相比，在信噪

比为3 dB时下降了24%。

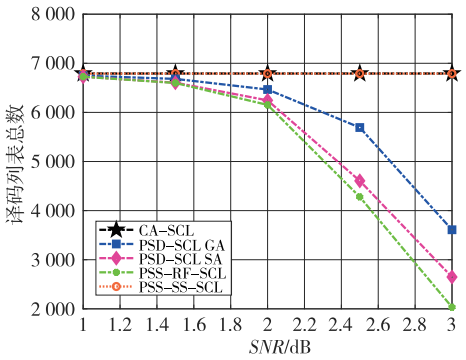


图5 不同算法的平均译码列表总数

由图6可知,PSS-RF-SCL译码算法的分裂次数在SNR为1 dB时为80,相较于CA-SCL译码算法下降了85%,相较于其他基于搜索集的路径分裂策略辅助SCL译码算法下降了33%。当信噪比为3 dB时,PSS-RF-SCL译码算法的分裂次数为8.3,相较于PSD-SCL GA译码算法下降了45%。虽然PSD-SCL SA译码算法的分裂次数与所提算法在信噪比为3 dB时基本一致,但其性能明显不如所提算法。

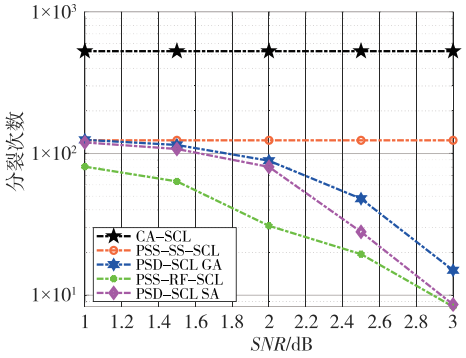


图6 不同算法的平均分裂次数

综上所述,所提算法在保持译码性能不低于PSS-SS-SCL译码算法性能的前提下,显著降低译码复杂度。无论是在分裂次数还是译码列表总数方面,所提算法都明显低于现有的基于搜索集的路径分裂策略辅助SCL译码算法。并且在大列表数时,所提算法还有一定的性能优势。

5 结论

本文采用了更符合译码实际情况的可靠性函数方法来识别需要进行路径分裂的比特。通过统计实验设定阈值α,只对可靠性函数值$E(i)$小于α的信息比特进行路径分裂,显著降低了分裂次数。此外,通过统计正确译码路径的APM均值设定了阈值β。运用阈值β对不可靠路径进行剪枝,降低了译码列表总数。因此与PSS-SS-SCL译码算法相比,在不降低译码性能的前提下,明显降低了译码复杂度。仿真结果表明,所提出的译码算法复杂度要低于现有的基于搜索集的路径分裂策略辅助SCL译码算法,并且能保持良好的译码性能。

参考文献:

[1] 陈发堂, 赵昊明, 石 丹, 等. 低时间复杂度的极化码译码算法[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2021, 33(4): 571-576.
Chen Fatang, Zhao Haoming, Shi Dan, et al. Decoding algorithm of polarization code with low time complexity [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2021, 33(4): 571-576.

[2] Coşkun M C, Pfister H D. An information-theoretic perspective on successive cancellation list decoding and polar code design [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2022, 68(9): 5779-5791.

[3] Tal I, Vardy A. List decoding of polar codes [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2015, 61(5): 2213-2226.

[4] 袁建国, 张 瑞, 张丰果, 等. CRC辅助PC-polar码的新颖编码算法[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2022, 34(6): 929-934.
Yuan Jianguo, Zhang Rui, Zhang Fengguo, et al. Novel coding algorithm of the CRC-aided PC-polar codes[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2022, 34(6): 929-934.

[5] Zhou H, Liang X, Li L, et al. Segmented successive cancellation list polar decoding with tailored CRC [J]. Journal of Signal Processing Systems, 2019, 91(8): 923-935.

[6] You W, Yuan J, Yu L, et al. An improved AS-SCLF decoding algorithm of polar codes based on the assigned set[J]. Optoelectronics Letters, 2022, 18(11): 694-698.

[7] 于永润. 极化码编译码技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
Yu Yongrun. Investigations on the construction and decoding of polar codes[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.

[8] Gao C, Liu R, Dai B, et al. Path splitting selecting strategy-aided successive cancellation list algorithm for polar codes [J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(3): 422-425.

[9] 刘顺兰, 王 燕. 一种基于奇偶校验码级联极化码的低复杂度译码算法[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(2): 637-645.
Liu Shunlan, Wang Yan. A low-complexity decoding algorithm based on parity-check-concatenated polar codes [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 44(2): 637-645.

[10] 袁建国, 贺京杰, 张丰果, 等. 基于分布式奇偶校验码的低复

杂度极化码SCLF译码算法[J]. 半导体光电，2023，44(6)：931-937.
Yuan Jianguo，He Jingjie，Zhang Fengguo，et al. SCLF decoding algorithm for low-complexity polar codes based on distributed parity check codes [J]. Semiconductor Optoelectronics，2023，44(6)：931-937.

[11] 刘　伟，段红光. 极化码自适应连续消除列表比特翻转译码算法[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版)，2021，33(1)：87-93.
Liu Wei，Duan Hongguang. Adaptive successive cancellation list bit-flip decoding of polar codes[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition)，2021，33(1)：87-93.

[12] Miloslavskaya V，Vucetic B，Li Y，et al. Recursive design of precoded polar codes for SCL decoding[J]. IEEE Transactions on Communications，2021，69(12)：7945-7959.

[13] Zhang Z，Qin K，Zhang L，et al. Progressive bit-flipping decoding of polar codes over layered critical sets [C]// GLOBECOM 2017-2017 IEEE Global Communications Conference，2017：1-6.

[14] Wang C H，Pan Y H，Lin Y H，et al. Post-processing for CRC-aided successive cancellation list decoding of polar codes[J]. IEEE Communications Letters，2020，24(7)：1395-1399.

[15] Wang X，Zhang H，Li J，et al. An improved path splitting decision-aided SCL decoding algorithm for polar codes[J]. IEEE Communications Letters，2021，25(11)：3463-3467.

作者简介：

袁建国(1968—)，男，重庆市人，博士，教授，硕士生导师，主要研究方向为通信系统中LDPC码与极化码编译码技术以及OFDM技术。