

基于窗口扩展的空间耦合 LDPC 码滑窗译码算法设计

刘 洋^{1,2}, 钱燕芝^{1,2}, 王希阳^{1,2}, 孙 莎^{1,2}

(1. 西安科技大学通信与信息工程学院, 西安, 710054; 2. 西安市网络融合通信重点实验室, 西安, 710054)

摘要 针对传统的空间耦合 LDPC(SC-LDPC)码滑窗译码算法由于窗口截断导致性能损失的问题,提出了一种基于窗口扩展的 SC-LDPC 码滑窗译码算法来提高窗口内信息可靠性,从而提升滑窗译码算法性能。并在此基础上,提出了一种低时延的提前终止窗口滑动策略,减少窗口滑动次数,实现译码性能和译码时延的有效折中。仿真结果表明,相较于传统滑窗译码算法,所提出的基于窗口扩展的滑窗译码算法的译码性能在窗口尺寸较小时,性能增益约为 1.8 dB,随着窗口尺寸的增大,尽管性能增益逐渐减小,但仍优于传统滑窗译码算法,接近于次最优的置信传播译码算法。还推导了译码复杂度计算表达式和译码时延表达式。分析结果表明,相较于传统滑窗译码算法,尽管窗口扩展带来的单个窗口内校验节点数目的少量增加导致了单个窗口内译码复杂度有所增高,但由于减少了窗口滑动次数,因此整体译码复杂度与传统滑窗译码算法基本一致,且译码时延得到显著降低。

关键词 空间耦合 LDPC 码;滑窗译码算法;译码性能;译码时延

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2025.03.014

中图分类号 TN92;TD655 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2025)03-0112-07

A Sliding Window Decoding Algorithm Based on Window Extension for Spatially Coupled LDPC Codes

LIU Yang^{1,2}, QIAN Yanzhi^{1,2}, WANG Xiyang^{1,2}, SUN Sha^{1,2}

(1. College of Telecommunication and Information Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Xi'an Key Laboratory of Network Convergence Communication, Xi'an, 710054, China)

Abstract In view of the truncated window causing the performance loss by the conventional sliding window decoding (SWD) algorithm to spatially coupled LDPC (SC-LDPC) codes, a SWD algorithm is proposed based on window extension (ESWD) in this paper to improve the reliabilities of the information in the decoding window, upgrading further the whole decoding performances. On this basis, a low latency with early termination window sliding scheme is proposed to reduce the number of sliding, realizing the good trade-off between the decoding performance and decoding latency. The simulation results show that the proposed ESWD algorithm has about 1.8 dB gain with decoding window size being small, compared with the conventional SWD algorithm. And with the increment of window size, though the performance gain decreases gradually, the performance is still superior to that of the sliding window decoding algorithm.

收稿日期: 2023-12-30

基金项目: 国家自然科学基金联合基金重点项目(U19B2015)

作者简介: 刘 洋(1988—),女,河南洛阳人,讲师,博士,研究方向为矿井通信。E-mail:lyang@xust.edu.cn

引用格式: 刘洋,钱燕芝,王希阳,等. 基于窗口扩展的空间耦合 LDPC 码滑窗译码算法设计[J]. 空军工程大学学报, 2025, 26(3): 112-118.
LIU Yang, QIAN Yanzhi, WANG Xiyang, et al. A Sliding Window Decoding Algorithm Based on Window Extension for Spatially Coupled LDPC Codes[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2025, 26(3): 112-118.

at close decoding performance of the sub-optimal belief propagation algorithm. Moreover, the decoding complexity and latency expressions are also derived. The analysis results show that compared with the conventional SWD algorithm, although the slight increase of the decoding complexity in one decoding window is resulted by the additional few check nodes due to the window extension in the proposed ESWD algorithm, the whole decoding complexity keeps almost the same with the conventional SWD algorithm and the decoding latency is significantly reduced.

Key words spatially coupled LDPC codes; sliding window decoding algorithm; decoding performance; decoding latency

信道编码技术在航空通信系统中发挥着关键作用,其通过提高抗干扰能力、可靠性、频谱利用率等性能,为航空通信系统的正常运行和性能提升提供了重要支持。空间耦合低密度奇偶校验码(spatially coupled low density parity check code, SC-LDPC)作为一种具有空间耦合特点的结构化 LDPC (low density parity check code, LDPC),能够在单个设计中结合规则 LDPC 码^[1]和不规则 LDPC 码^[2]的最佳特征:最小距离线性增长特性和逼近容量限的阈值特性,在有限的迭代次数内达到更低的误码率,同时频谱效率接近香农极限。这些特征使其成为了航空通信系统中的理想选择^[3]。然而 SC-LDPC 码要达到出色的最大后验概率门限,需要非常大的耦合长度和块长度。在应用置信传播(belief propagation, BP)算法时,会产生较高的译码复杂度和较大的译码时延^[4-5],这使得 BP 算法在计算上不切实际。为了解决这个问题,Iyengar 等^[6]首次提出将滑窗译码(sliding window decoding, SWD)算法应用于 SC-LDPC 码,这种方法不仅保持了置信传播算法在性能方面的优势,同时有效降低了译码时延、译码复杂度,目前已被用作 SC-LDPC 码的标准译码方法。

为了更好地提高 SWD 算法的译码性能,文献[7]提出了 Zigzag 窗口译码器,它实质上是利用 SWD 算法的卷积增益来提高译码性能。文献[8]提出了一种通过监测目标符号平均错误概率可实现的最小值来改进 SC-LDPC 码的 SWD 算法,该算法根据存储的似然信息产生更准确的估计值,以提高译码性能。与传统的 SWD 算法相比,文献[9]加入了重复使用之前目标符号的边缘信息和信息放大的方法,从而获得优异的性能。此外,许多研究方案都集中于减轻错误传播的影响,以提高 SWD 算法的译码性能^[10-13]。文献[10]提出了针对每个译码窗口的部分综合征检查停止规则,以减轻误差传播的影响,并通过传统的加权比特翻转算法提高滑动窗口译码器的误差下限性能。文献[11]提出了一种基于平均对数似然信息的窗口扩展算法来缓解误差传

播,结果表明所提出的算法在瀑布区和误差底限区误码率(bit error ratio, BER)性能更好复杂度可接受。与改进 SWD 算法不同,文献[12~13]中引入了 2 种新的 SC-LDPC 码结构来缓解误差传播,并将其命名为校验节点(check node, CN)掺杂和变量节点(variable node, VN)掺杂,使得 SWD 算法能够以轻微的速率损失为代价从误差传播中恢复。文献[14]通过在窗口内计算边信息更新前后的残差值,动态选择可靠度最低(残差值最大)的边信息优先传输,降低了边信息无效更新的频率来抑制错误传播。

此外,降低译码时延和译码复杂度同样是滑窗译码算法研究的重要目标。文献[15]设计的窗口译码器通过并行执行所有窗口的迭代来降低译码时延。文献[16]通过窗口内不同串行或非均匀更新规则的组合来降低译码的时延。此外,许多研究方案都集中于提前终止窗口迭代来降低译码复杂度。以往研究中的提前终止策略主要分为 2 种方法:基于奇偶校验(parity check, PC)的方法^[17-18]和基于 LLR 的方法^[19-20]。基于 PC 的方法通过检查与当前窗口相关的校验方程是否满足,而基于 LLR 的方法通常根据每个变量节点的输出 LLR 估计平均软误码率。在迭代次数没有达到最大时,根据这些条件决定何时停止窗口迭代。结合提前终止规则,文献[21]研究了滑动窗口的最优窗口大小,有效地折中了译码性能和译码复杂度。

为进一步有效控制译码时延和降低窗口译码的性能损耗,本文提出了一种关于 SC-LDPC 码滑窗译码的改进算法,即基于窗口扩展的滑窗译码算法(SWD algorithm based on window extension, ESWD)。该算法首先对窗口形状进行优化,通过纵向扩展窗口大小来提高窗口内信息的可靠性,进一步提高窗口的译码性能。在此基础上,结合窗口形状结构的特点,提出了一种新的窗口滑动方案,该方案通过提前终止窗口滑动达到低时延的目的。对不同码构造的 SC-LDPC 码进行仿真,结果表明所提算法相比于传统 SWD 算法表现出卓越的译码性能。

同时推导了译码时延表达式和译码复杂度表达式,分析结果表明 ESWD 算法相对于传统 SWD 算法,译码时延得到显著降低,单个窗口的计算复杂度由于窗口内校验节点的增加而有所增加,但窗口提前终止滑动使得两者的整体译码复杂度差距得到减少,基本与传统滑窗译码算法保持一致。

1 SC-LDPC 码

LDPC 码分为规则 LDPC 码和非规则 LDPC 码。规则 LDPC 码的编译码过程相对简单,但其性能的适用性和灵活性受限于不同应用场景。非规则 LDPC 码具有更高的灵活性,可以根据不同应用场景的需求对其进行优化。从空间耦合角度来看,SC-LDPC 码是将多个相同但互不相关的规则 LDPC 码耦合得到,由于其两端的少数低度校验节点而带来的“轻微非规则性”,使它同时具有规则 LDPC 码的最小距离线性增长特性和非规则 LDPC 码逼近容量限的阈值特性,能够保证其在瀑布区表现出优异误码性能的同时又具有很低的错误平层, Kudekar 等^[22]将这种现象命名为阈值饱和,并在二进制擦除信道^[22]和二进制无记忆对称信道^[23]中得到了严格证明。如图 1 所示,本文在 AWGN 信道下,设置最大迭代次数为 30,针对不同码长的误码性能对比结果也证实了 SC-LDPC 码的优越性。

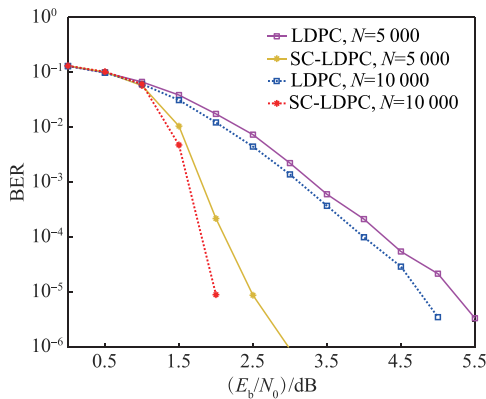


图 1 度为(3,6)的 LDPC 码和 SC-LDPC 码的误码性能对比
Fig. 1 BER performance comparisons between an (3,6) LDPC code and SC-LDPC code

SC-LDPC 码的构造具体如下:1 个 (d_v, d_c, L) SC-LDPC 耦合链是通过耦合 L 个不相交的小型 (d_v, d_c) LDPC 原模图构建而成,其中 d_v 为原模图中连接到变量节点的边数, d_c 为原模图中连接到校验节点的边数, L 为耦合长度。每个分组 LDPC 码原模图与空间耦合 LDPC 码原模图(也称为耦合链)中的一个位置依次对应,记为 $t, t=1, 2, \dots, L$ 。

在此,考虑用传统的全耦合连接模式耦合 L 个 LDPC 原模图。具体来说, $ms = \gcd(d_v, d_c) - 1$, 其中 ms 为耦合宽度, $\gcd(d_v, d_c)$ 为 d_v 和 d_c 的最大公约数。在每个位置则有 d'_v 个检验节点和 d'_c 个变量节点,其中 $d'_v = d_v / \gcd(d_v, d_c)$, $d'_c = d_c / \gcd(d_c, d_v)$ 。为了将这 L 个 LDPC 码原模图连接起来,对于位置 t 的每一个变量节点,将 d_v 条边均匀独立地连接到位置 $t+i, i=0, 1, \dots, ms$ 上的校验节点。为了终止耦合链,只需在耦合链的右侧添加 ms 个校验节点位置,即可保证耦合链末端边缘位置上的变量节点的边均可连到校验节点上。1 个 $(3, 6, L)$ SC-LDPC 耦合链如图 2 所示,红色圆圈和蓝色方块分别代表变量节点和校验节点。1 个 (d_v, d_c, L) SC-LDPC 耦合链可以视为 1 个 SC-LDPC 的原模图,其相关矩 $\mathbf{B}$ 称为 (d_v, d_c, L) SC-LDPC 的基矩阵定义为式(1),其中子矩阵 $\mathbf{B}_i, i=0, 1, \dots, ms$ 为相同的 $d'_v \times d'_c$ 全 1 矩阵。通过对 (d_v, d_c, L) SC-LDPC 耦合链进行“M-lifting”操作,可以得到 1 个 (d_v, d_c, L, M) SC-LDPC 码。具体来说,矩阵 $\mathbf{B}$ 中“1”和“0”分别用 $M \times M$ 随机置换矩阵和 $M \times M$ 全零矩阵替换得到, M 定义为扩展因子。

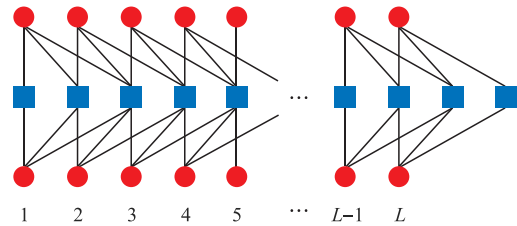


图 2 1 个 $(3, 6, L)$ SC-LDPC 耦合链

Fig. 2 An $(3, 6, L)$ SC-LDPC coupling chain

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_0 & & & & \\ \vdots & \mathbf{B}_0 & & & \\ \mathbf{B}_{ms} & \vdots & \ddots & & \\ & \mathbf{B}_{ms} & & \mathbf{B}_0 & \\ & & \ddots & \vdots & \\ & & & \mathbf{B}_{ms} & \end{bmatrix} \quad (1)$$

$(L+ms)d'_v \times Ld'_c$

2 传统滑窗译码算法

由于 SC-LDPC 码的奇偶校验矩阵呈现非零对角带的结构,这种对角线阶梯结构提供了一个条件,即 VN 的子块只与 CN 的局部组相连。因此, BP 算法可以在窗口的限制维度内执行,称为 SWD 算法,它将 BP 译码方案分解为一系列次优译码步骤,译码窗口沿着对角线带滑动,直到整个帧译码完毕。图 3 为 SC-LDPC 码奇偶校验矩阵的窗口滑动的情况,窗口大小为 W ,其中红色虚线矩形和红色实线

矩形分别表示当前译码窗口和下一个译码窗口。每个译码窗口都有 $W Md'_c$ 个变量节点和 $W Md'_v$ 个校验节点。SWD 算法对当前译码窗口中由第 1 部分变量节点(黄色高亮的垂直阴影区域)和其他相关变量节点(蓝色高亮的垂直阴影区域)组成的子码执行 BP 算法,并尝试译码当前译码窗口中的符号子集(第 1 部分中的符号),这些符号被称为目标符号。成功译码目标符号后(或达到最大迭代次数后),译码窗口向下移动 Md'_v 个校验节点,向右移动 Md'_c 个变量节点,进入下一个译码窗口,并执行 BP 算法译码下一个译码窗口中的连续目标符号。译码过程一直持续到整个码字译码完毕,且滑动总数为 L 。

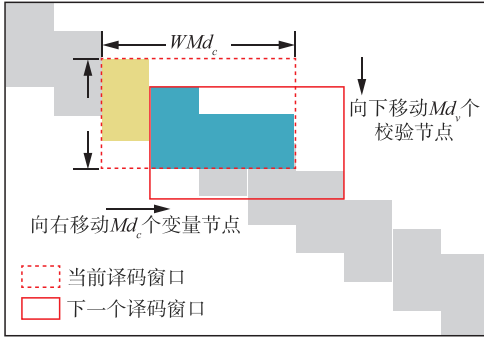


图 3 SC-LDPC 码奇偶校验矩阵的传统 SWD 算法

Fig. 3 Traditional SWD algorithm on the parity check matrix for an SC-LDPC code

译码主要过程如下:假设第 t ($1 \leq t \leq L$) 个译码窗口中的发送子码为 $s^t = (s_1^t, s_2^t, \dots, s_n^t)$, 相应的接收序列为 $y^t = (y_1^t, y_2^t, \dots, y_n^t)$, $n = W Md'_c$ 。第 t 个译码窗口中, v_j^t 为第 j 个变量节点, $j = 1, 2, \dots, W Md'_c$ 。第 k 个校验节点, $k = 1, 2, \dots, W Md'_v$ 。此外,在第 t 个译码窗口的第 l 次迭代中, $L_{j,k}^t(l)$ 为变量节点 v_j^t 传递给校验节点 c_k^t 的信息, $L_{k,j}^t(l)$ 为校验节点 c_k^t 传递给变量节点 v_j^t 的信息。

初始化:第 t 个窗口的变量节点 v_j^t 初始概率似然信息 $L_{j,k}^t(0)$ 来自于信道信息 $L_{ch,j}^t$, 并将 $L_{j,k}^t(0)$ 发送给与其相连的校验节点 c_k^t , 即:

$$L_{j,k}^t(0) = L_{ch,j}^t = \ln \left(\frac{\Pr(s_j^t = 0 | y_j^t)}{\Pr(s_j^t = 1 | y_j^t)} \right) \quad (2)$$

变量节点更新:变量节点 v_j^t 到校验节点 c_k^t 的外部信息计算式为:

$$L_{j,k}^t(l) = L_{j,k}^t(0) + \sum_{q \in C_j^t \setminus c_k^t} L_{q,j}^t(l-1) \quad (3)$$

式中: $q \in C_j^t \setminus c_k^t$ 为连接到变量节点 v_j^t 的校验节点集合,但不包括校验节点 c_k^t 。

校验节点更新:校验节点 c_k^t 到变量节点 v_j^t 的外部信息计算式为:

$$L_{k,j}^t(l) = 2 \tanh^{-1} \left(\prod_{p \in V_k^t \setminus v_j^t} \tanh \left(\frac{L_{p,k}^t(l)}{2} \right) \right) \quad (4)$$

式中: $p \in V_k^t \setminus v_j^t$ 为连接到校验节点 c_k^t 的变量节点集合,但不包括变量节点 v_j^t 。

判决输出为:

$$L_j^{\text{total},t} = L_{j,k}^t(0) + \sum_{q \in C_j^t} L_{q,j}^t(l) \quad (5)$$

式中:当 $L_j^{\text{total},t} \geq 0$ 时,判决 $\hat{s}_j^t = 0$, 否则 $\hat{s}_j^t = 1$ 。这里 $\hat{s}_j^t$ 为 s_j^t 的估计值。

3 基于窗口扩展的滑窗译码算法

3.1 算法描述

图 4 为 1 个 (d_v, d_c, L) SC-LDPC 耦合链。传统 SWD 算法中,蓝色实线框为译码窗口。由于窗口截断导致窗口内小型 SC-LDPC 码末尾相连的 ms 个校验节点(绿色斜线方块)遗留在外,SC-LDPC 码末尾的 ms 个变量节点(红色空心圆圈)呈低度状态,称窗口内这种小型 SC-LDPC 码为不完整 SC-LDPC 码。相关校验节点都在窗口内的小型 SC-LDPC 码为完整 SC-LDPC 码。据文献[9]的研究表明,完整 SC-LDPC 码由于变量节点关联的边信息都参与节点的更新,因此其信息的可靠性高于不完整 SC-LDPC 码信息。受此启发,本文通过纵向扩展窗口确保窗口内小型 SC-LDPC 码的完整性来提高窗口内信息的可靠性。具体而言,如图 5 所示,蓝色边框由方框变为不规则五边形,通过改变耦合链中窗口的形状将窗口内 VN 关联的校验节点都包含进来。

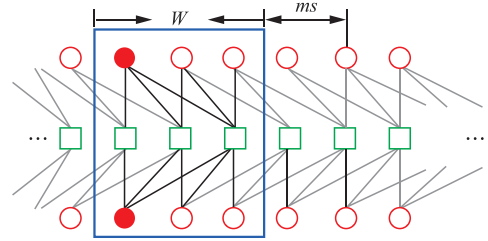


图 4 传统滑窗译码算法的 Tanner 图解

Fig. 4 Traditional SWD algorithm on Tanner graph

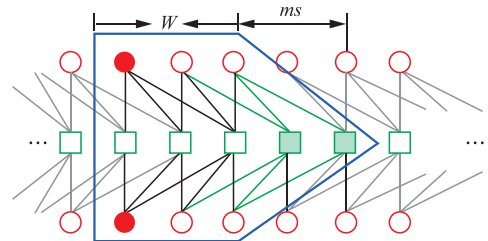


图 5 基于窗口扩展的滑窗译码算法的 Tanner 图解

Fig. 5 ESWD algorithm on Tanner graph

对应的奇偶校验矩阵如图 6 所示,红色实线框和红色虚线框分别为当前译码窗口和下一个译码窗

口,相比传统滑窗译码算法,窗口的垂直高度扩展为 $(W+ms)Md'_v$,宽度为 WMd'_c ,每个译码窗口校验节点个数从 WMd'_v 增至 $(W+ms)Md'_v$ 。窗口的垂直扩展使得窗口内所有变量节点度都为 d_v ,从而保证了小型 SC-LDPC 码的完整性。每个窗口由目标符号(橙色垂直线区域)和其余相关变量节点(蓝色交叉线区域)组成。在窗口范围内运行 BP 算法,当成功译码目标符号后(或达到最大迭代次数后),窗口在奇偶校验矩阵中向右下角滑动到下一个窗口并执行同样的操作。

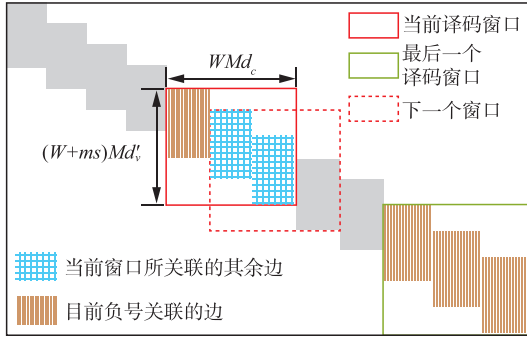


图 6 SC-LDPC 码奇偶校验矩阵的 ESWD 算法

Fig. 6 ESWD algorithm on the parity check matrix for an SC-LDPC code

当窗口位置位于 $L-W+1$ (绿色虚线方框)时,所提算法的窗口右侧与奇偶校验矩阵(partial check matrix, PCM)的右边界重合,且窗口内所有变量节点相连的边信息由于窗口的纵向扩展都包含在窗口内。如果窗口继续滑动,译码窗口就会从 PCM 中滑出,窗口的有效尺寸(被处理的 VN 和 CN 的数量)将会减小,直到最后一组作为目标符号的译码完成。由于窗口垂直扩展使得窗口内的子码两端均为低度校验节点,而 SC-LDPC 码由于两端低度的校验节点带来的高可靠性使其具有阈值饱和特性,受此启发,在第 $L-W+1$ 个窗口时停止窗口滑动并将窗口内的所有符号作为目标符号进行译码操作,窗口中的码字可以看作是 $L=W$ 的小型完整 SC-LDPC 码且窗口的两端可视为终止(如果假设译码信息从左端输入),总译码时延便可通过减少窗口滑动次数而降低。

3.2 时延分析和复杂度分析

3.2.1 时延分析

对于 1 个 (d_v, d_c, L, M) SC-LDPC 码,假设 T_R 和 T_D 分别表示采用 BP 译码算法时接收 1 帧数据的时间和译出 1 帧数据的时间。无论是传统 SWD 算法还是所提出的 ESWD 算法,窗口截断会导致分段式地接收数据,但接收的总数据数量相同,因此 2 种滑窗译码算法接收 1 帧数据的时间都为 T_R 。

传统 SWD 算法的窗口尺寸设置为 $WMd'_v \times WMd'_c$,目标符号个数为 Md'_c 。当窗口位置 t 小于 $L-W+1$ 时,译出目标符号的时间为 $(W/L)T_D$;当 t 位于 $L-W+1$ 和 L 之间时,滑动窗内符号个数不足 WMd'_c ,减少为 $(L-t+1)Md'_c$ 个,译出目标符号的时间为 $(L-t+1/L)T_D$,则传统 SWD 算法总时延为:

$$T = T_R + \sum_{p=1}^{L-W+1} \frac{W}{L} T_D + \sum_{p=L-W+2}^L \frac{L-p+1}{L} T_D = T_R + (L-W+1) \frac{W}{L} T_D + \sum_{p=L-W+2}^L \frac{L-p+1}{L} T_D \quad (6)$$

ESWD 算法的窗口尺寸设置为 $(W+ms)Md'_v \times WMd'_c$,当窗口位置 t 小于 $L-W+1$ 时,目标符号个数为 Md'_c 。当 t 为 $L-W+1$ 时,窗口内的变量节点将全部译出且不再继续滑动。因此总时延为:

$$T = T_R + \sum_{p=1}^{L-W+1} \frac{W}{L} T_D = T_R + (L-W+1) \frac{W}{L} T_D \quad (7)$$

对比式(6)和式(7)可以看出,所提出的 ESWD

算法的时延显著降低了 $\sum_{p=L-W+2}^L \frac{L-p+1}{L} T_D$ 。

3.2.2 复杂度分析

在译码过程中,衡量译码复杂度的标准是数学运算量,尤其是复杂数学运算量,运算量主要取决于节点的度数。根据 BP 译码过程,对于度为 d_v 的变量节点,每次节点更新都需要进行“+/-”运算。对于度为 d_c 的校验节点,每次节点更新都需要进行 box-plus 运算。每个 box-plus 操作包括 3 个“+/-”操作、1 个“ $\times/\div$ ”操作和 4 个“exponential/logarithm”操作。因此,SC-LDPC 码的译码复杂度主要取决于校验节点的更新。在这种情况下,不考虑两端度数较低的 CNs 带来的不清晰复杂度,认为 CN 的度数都为 d_c 。设 I_{avg} 为每个目标符号节点更新的平均迭代次数,其计算式为:

$$I_{avg} = (\sum_{t=1}^L I_t) / L \quad (8)$$

式中: I_t 为节点在迭代过程中的更新次数。

传统 SWD 算法和所提的 ESWD 算法的总体计算复杂度如表 1 所示。相比传统 SWD 算法,ESWD 算法的单个窗口的计算复杂度因窗口内校验节点的增加而增加。但 ESWD 算法的提前终止窗口滑动使得二者的整体计算复杂度差距减少,与传统 SWD 算法基本一致。

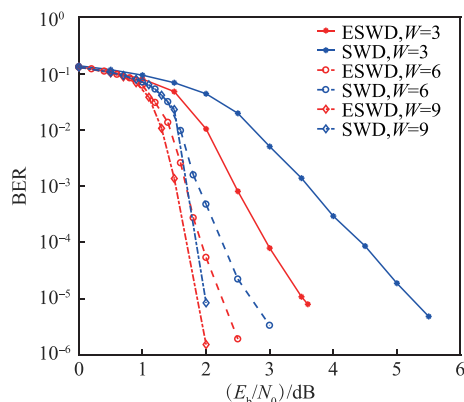
表 1 不同译码算法的总体译码计算复杂度比较

Tab.1 Comparison of the total decoding complexity between different decoding algorithms

算法	总体译码计算复杂度
SWD	$WMd'_c(d_c-2)I_{\text{avg}}L$
ESWD	$(W+ms)Md'_c(d_c-2)I_{\text{avg}}(L-W+1)$

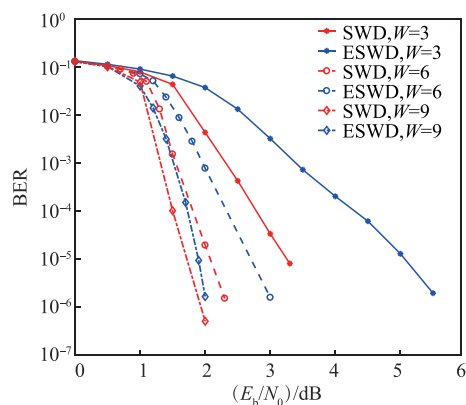
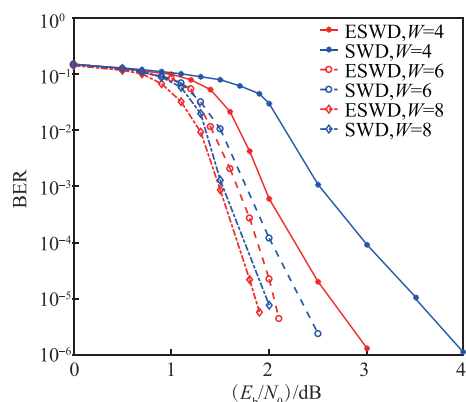
4 仿真结果

本节将研究提出的 ESWD 算法的误码率性能。首先考虑在 AWGN 信道上传输的 $(3, 6, 30, 200)$ SC-LDPC 码, 设置最大迭代次数为 15, 码长为 12 000, 码率为 0.466。图 7 为同码长、不同窗口大小下 2 种算法的译码性能, 可以看出所提的 ESWD 算法的性能均明显优于传统 SWD 算法。当窗口大小 $W=3$, $\text{BER}=1 \times 10^{-5}$ 时, ESWD 算法相比传统 SWD 算法的增益约为 1.8 dB。然而, 随着窗口的增大, 改进算法的性能改进变得不太显著。这是由于随着窗口增大, 传统的滑窗译码性能会变好, 从而其改进的空间也会变小。

图 7 针对 $(3, 6, 30, 200)$ SC-LDPC 码的不同译码算法的 BER 性能比较Fig. 7 BER performance comparisons between different decoding algorithms for an $(3, 6, 30, 200)$ SC-LDPC code

为了进一步验证算法的可行性, 对不同耦合长度的 $(3, 6, 100, 200)$ SC-LDPC 码性能进行仿真。如图 8 所示, 其中 $L=100$, 码长为 40 000, 码率为 0.49, 最大迭代次数为 15, 改进的算法仍然保持优异的性能增益。

此外, 还仿真了不同度分布的 $(4, 8, 30, 200)$ SC-LDPC 码, 码长为 12 000, 码率为 0.45, 最大迭代次数为 15, 以证实所提出算法的改进, 如图 9 所示, 对比传统 SWD 算法, 不同的窗口大小, ESWD 算法的误码率仍得到显著提高。

图 8 针对 $(3, 6, 100, 200)$ SC-LDPC 码的不同译码算法的 BER 性能比较Fig. 8 BER performance comparisons between different decoding algorithms for an $(3, 6, 100, 200)$ SC-LDPC code图 9 针对 $(4, 8, 30, 200)$ SC-LDPC 码的不同译码算法的 BER 性能比较Fig. 9 BER performance comparisons between different decoding algorithms for an $(4, 8, 30, 200)$ SC-LDPC code

5 结语

本文基于 SC-LDPC 码的滑窗译码算法提出了基于窗口扩展的滑窗译码算法, 通过改变窗口形状来提高窗口内信息的可靠性, 进一步提高总体译码性能。在此基础上, 结合所提出算法中窗口的结构特点, 提出了一种低时延的窗口滑动策略, 所提算法使得译码性能和延时在一定程度上得到了有效折中。对于不同的 SC-LDPC 码进行了性能仿真对比, 仿真结果表明所提算法的性能优于传统滑窗译码算法。此外推导不同译码算法的译码时延计算式和译码复杂度计算式并进行分析对比, 结果表明所提出的 ESWD 算法相比于传统 SWD 算法, 译码时延得到显著降低。ESWD 算法的提前终止窗口滑动使得两者的整体计算复杂度差距得到减少, 而且窗口越大差距越小。

参考文献

- [1] MACKAY D J C, NEAL R M. Near Shannon Limit

- Performance of Low Density Parity Check Codes[J]. Electronics Letters, 1996, 32(18): 1645.
- [2] LUBY M G, MITZENMACHER M, SHOKROLLAHI M A, et al. Improved Low-Density Parity-Check Codes Using Irregular Graphs[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2001, 47(2): 585-598.
- [3] 郭兴阳, 褚振勇, 梁俊, 等. 卫星通信中的一种改进 LDPC 译码算法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2011, 12(3): 60-63.
- GUO X Y, CHU Z Y, LIANG J, et al. An Advanced LDPC Decoding Algorithm for Satellite Communication[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2011, 12(3): 60-63. (in Chinese)
- [4] JIMENEZ FELSTROM A, ZIGANGIROV K S. Time-Varying Periodic Convolutional Codes with Low-Density Parity-Check Matrix[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1999, 45(6): 2181-2191.
- [5] PUSANE A E, FELTSTROM A J, SRIDHARAN A, et al. Implementation Aspects of LDPC Convolutional Codes[J]. IEEE Transactions on Communications, 2008, 56(7): 1060-1069.
- [6] IYENGAR A R, PAPALEO M, SIEGEL P H, et al. Windowed Decoding of Protograph-Based LDPC Convolutional Codes over Erasure Channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2012, 58(4): 2303-2320.
- [7] ABU-SURRA S, PISEK E, TAORI R. Spatially-Coupled Low-Density Parity Check Codes: Zigzag-Window Decoding and Code-Family Design Considerations[C]//2015 Information Theory and Applications Workshop (ITA). San Diego, CA: IEEE, 2015: 275-281.
- [8] MO S Y, CHEN L. Improved Sliding Window Decoding of Spatially Coupled Low-Density Parity-Check Codes[C]//2017 IEEE Information Theory Workshop (ITW). Piscataway, NJ: IEEE, 2017: 126-130.
- [9] ALI I, KIM J H, KIM S H, et al. Improving Windowed Decoding of SC LDPC Codes by Effective Decoding Termination, Message Reuse, and Amplification[J]. IEEE Access, 2017, 6: 9336-9346.
- [10] KANG P, XIE Y X, YANG L, et al. Reliability-Based Windowed Decoding for Spatially Coupled LDPC Codes[J]. IEEE Communications Letters, 2018, 22(7): 1322-1325.
- [11] LIAN Q F, CHEN Q W, ZHOU L, et al. Adaptive Decoding Algorithm with Variable Sliding Window for Double SC-LDPC Coding System[J]. IEEE Communications Letters, 2023, 27(2): 404-408.
- [12] ZHU M, MITCHELL D G M, LENTMAIER M, et al. A Novel Design of Spatially Coupled LDPC Codes for Sliding Window Decoding[C]//2020 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). Los Angeles, CA: IEEE, 2020: 473-478.
- [13] ZHU M, MITCHELL D G M, LENTMAIER M, et al. Decoder Error Propagation Mitigation for Spatially Coupled LDPC Codes[C]//2020 International Symposium on Information Theory and Its Applications (ISITA). Kapolei, HI: IEEE, 2020: 175-179.
- [14] 周华, 李子杰. 空间耦合低密度奇偶校验码残差滑窗译码算法[J]. 电子与信息学报, 2024, 46(3): 867-874.
- ZHOU H, LI Z J. Residual Sliding Window Decoding Algorithm for Spatially-Coupled Low-Density Parity-Check Codes[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2024, 46(3): 867-874. (in Chinese)
- [15] KLAIBER K, CAMMERER S, SCHMALEN L, et al. Avoiding Burst-Like Error Patterns in Windowed Decoding of Spatially Coupled LDPC Codes[C]//2018 IEEE 10th International Symposium on Turbo Codes & Iterative Information Processing (ISTC). Piscataway, NJ: IEEE, 2018: 1-5.
- [16] UL HASSAN N, PUSANE A E, LENTMAIER M, et al. Non-Uniform Window Decoding Schedules for Spatially Coupled LDPC Codes[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(2): 501-510.
- [17] FRENZEL J, MÜLLER-WEINFURTNER S, HUBER J, et al. Comparison of Windowed-Decoder Configurations for Spatially Coupled LDPC Codes under Equal-Complexity Constraints [EB/OL]. (2020-04-27) [2023-12-01]. <https://arxiv.org/abs/2004.12973v1>.
- [18] HE Z T, PENG K W, SONG J, et al. Efficient Sliding Window Decoding of Spatially Coupled LDPC Codes for Broadcasting[C]//2020 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EEx-Polytech). St. Petersburg: IEEE, 2020: 102-105.
- [19] HASSAN N U, SCHLÜTER M, FETTWEIS G P. Fully Parallel Window Decoder Architecture for Spatially-Coupled LDPC Codes[C]//2016 IEEE International Conference on Communications (ICC). Kuala Lumpur: IEEE, 2016: 1-6.
- [20] UL HASSAN N, PUSANE A E, LENTMAIER M, et al. Reduced Complexity Window Decoding Schedules for Coupled LDPC Codes[C]//2012 IEEE Information Theory Workshop. Lausanne: IEEE, 2012: 20-24.
- [21] 张娅妹, 周林, 陈辰, 等. 窗口可变的空间耦合 LDPC 码滑窗译码算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2020, 47(3): 128-134.
- ZHANG Y M, ZHOU L, CHEN C, et al. Sliding Window Decoding Algorithm for Spatially Coupled LDPC Codes with a Variable Window[J]. Journal of Xidian University, 2020, 47(3): 128-134. (in Chinese)
- [22] KUDEKAR S, RICHARDSON T J, URBANKE R L. Threshold Saturation via Spatial Coupling: Why Convolutional LDPC Ensembles Perform so Well over the BEC[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2011, 57(2): 803-834.
- [23] KUDEKAR S, RICHARDSON T, URBANKE R L. Spatially Coupled Ensembles Universally Achieve Capacity under Belief Propagation[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2013, 59(12): 7761-7813.

(编辑: 徐楠楠)