

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202412016



# 双空间耦合 LDPC 码滑窗译码算法改进

练秋芳, 孙小芳, 陈启望, 鲁紫君, 周林

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 针对基于联合信源信道编码系统的双空间耦合低密度奇偶校验(LDPC)码的译码性能优化问题,提出一种引入监督的滑窗译码算法。首先,在当前译码窗口内加入监督位;其次,监督位监视当前窗口内最可靠的对数似然值和最小平均错误概率,并将其分别放入存储器的对应位置中;然后,窗口内的码字进行下一轮迭代,直至满足译码迭代终止条件;最后,译码器根据存储的对数似然值估计译码结果。仿真结果表明:在加性高斯白噪声信道和瑞利衰落信道下,引入监督的滑窗译码算法性能在错误平层和瀑布区均有显著提升。

**关键词:** 联合信源信道编码; 双空间耦合低密度奇偶校验码; 滑窗译码算法; 监督

**中图分类号:** TN 911.22

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-5013(2025)04-0448-07

## Improvement of Sliding Window Decoding Algorithm for Double Spatially Coupled LDPC Codes

LIAN Qiufang, SUN Xiaofang, CHEN Qiwan,  
LU Zijun, ZHOU Lin

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** With regard to the decoding performance optimization issue of double spatially coupled low-density parity-check (LDPC) codes in a joint source-channel coding system, a supervised sliding-window decoding algorithm is proposed. First, supervisor bits are incorporated within the current decoding window. Then, the supervisor bits supervise the most reliable log-likelihood values and the minimum average error probabilities within the current window, they are placed into the corresponding positions in the memory, respectively. Next, the codewords within the window undergo the next round of iteration until the decoding termination conditions are met. Finally, the decoder estimates the decoding result based on the stored log-likelihood values. Simulation results show that under both additive Gaussian white noise and Rayleigh fading channels, the performance of the supervision sliding-window decoding algorithm is significantly improved in both the error floor and waterfall regions.

**Keywords:** joint source-channel coding; double spatially coupled LDPC code; sliding window decoding algorithm; supervision

香农的分离定理一直是通信系统设计的准则,未来 6G 通信系统具备更高可靠性、超低时延、高吞吐量的特点。传统的分离系统因其固有局限,难以满足日益严苛的通信需求。因此,联合信源信道编码(JSCC)系统应运而生。Sayood 等<sup>[1]</sup>将 JSCC 技术应用于图像传输领域,JSCC 系统的信道译码器可以充分利用信源中残留的冗余信息。Hagenauer<sup>[2]</sup>提出软输出维特比译码算法,该算法通过信源序列的

**收稿日期:** 2024-12-12

**通信作者:** 练秋芳(1998—),女,助理实验师,主要从事联合信源信道编码的研究。E-mail:lianqiufang@hqu.edu.cn。

**基金项目:** 国家自然科学基金青年基金资助项目(62101195);福建省科技计划项目(2024I0016)

后验概率来控制信道译码器。2009 年, Fresia 等<sup>[3]</sup>提出信源和信道都是低密度奇偶校验(LDPC)码的 JSCC 系统。若信源熵低于信道容量, 码字无限长的分离系统可以高可靠传输, 但复杂度激增。相较之下, JSCC 系统在低复杂度环境下展现更优性能。JSCC 系统译码端利用信源压缩编码冗余, 实现显著性能提升<sup>[4]</sup>。1999 年, Felstrom 等<sup>[5]</sup>率先引入卷积 LDPC(CC-LDPC)码的概念, CC-LDPC 码的结构更加规则, 易于硬件实现。LDPC 码经耦合形成卷积结构的 LDPC 码, 此类码称空间耦合 LDPC(SC-LDPC)码<sup>[6]</sup>。当 SC-LDPC 码的码长足够长时, 置信传播(BP)译码阈值可达到最大后验译码阈值<sup>[7]</sup>, 但会导致较大的译码延迟。SC-LDPC 码特殊的耦合结构促使译码算法可在固定窗口内执行, 此算法称为滑窗译码(SWD)算法<sup>[8]</sup>, SWD 算法以牺牲部分译码性能来换取减小译码延迟。为提升 SWD 算法的译码性能, 许多学者提出了引入监督<sup>[9]</sup>、窗口可变<sup>[10]</sup>等优化思想。Ali 等<sup>[11]</sup>提出 3 种改善滑窗译码算法的方法, 即有效的译码终止、边信息的重利用和有用信息的放大方法。Golmohammadi 等<sup>[12]</sup>提出双 SC-LDPC(DSC-LDPC)码的 JSCC 系统, 译码器能充分利用信源压缩后的冗余信息进一步提高性能。滑可变窗译码(SVWD)算法被证明在 DSC-LDPC 码的 JSCC 系统中能有效改善译码性能<sup>[13]</sup>。基于此, 本文设计了一种改进的滑窗译码(iSWD)算法。

## 1 基于 DSC-LDPC 码的 JSCC 系统

### 1.1 DSC-LDPC 码的构造

SC-LDPC 码的构造过程, 如图 1 所示。图 1 中:  $L$  为耦合长度;  $t$  为第  $t$  个位置上的 LDPC 码。SC-LDPC 码的原模图由  $b_v$  个变量节点(图 1 中圆形节点, VNs)、 $b_c$  个校验节点(图 1 中方形节点, CNs)和连接两种节点的边组成。SC-LDPC 码是由规则 LDPC 码复制、边扩展和耦合得到<sup>[14-15]</sup>。

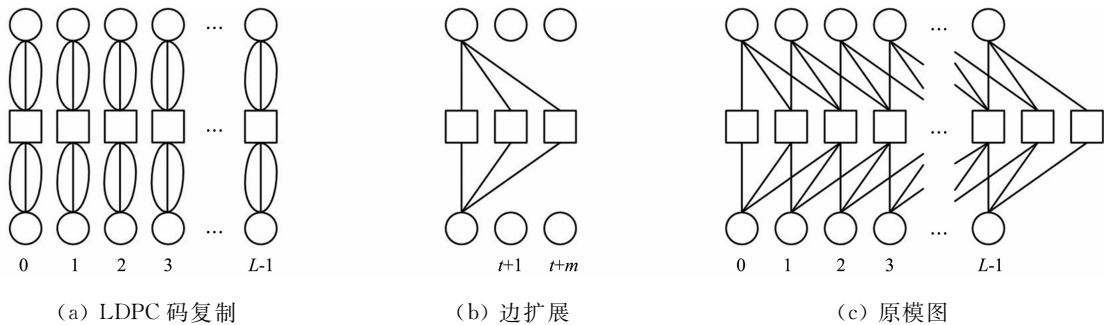


图 1 SC-LDPC 码的构造过程

Fig. 1 Construction process of SC-LDPC code

SC-LDPC 码的原模图单元可用基矩阵  $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 3 & 3 \end{bmatrix}$  表示,  $\mathbf{B}$  的元素表示连接边的数量。通过边扩展<sup>[15]</sup>(图 1(b)), 将第  $t(0 \leq t < L)$  个位置上的  $\mathbf{B}$  划分为  $m+1$  个子基矩阵  $\mathbf{B}_i = \begin{bmatrix} 1 & 1 \end{bmatrix}, i = \{0, 1, \dots, m\}$ , 并且满足  $\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_1 + \dots + \mathbf{B}_m$ ,  $m$  称为耦合宽度。 $\mathbf{B}$  用矩阵表示为

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & \vdots \\ \mathbf{B}_m & \cdots & \mathbf{B}_0 \\ \vdots & & \vdots \\ 0 & \cdots & \mathbf{B}_m \end{bmatrix}_{(L+m)b_c \times Lb_v} \quad (1)$$

将基矩阵扩展  $M$  次, 即可得到校验矩阵,  $M$  被称为扩展因子。DSC-LDPC 码的信源是  $(3, 12)$  SC-LDPC 码, 信道是  $(3, 6)$  SC-LDPC 码。为了让系统正常工作, 信源和信道需满足尺寸匹配条件  $b_c^{\text{sc}} = b_v^{\text{cc}} - b_c^{\text{cc}}$  和  $L^{\text{sc}} + m = L^{\text{cc}} - m$ ,  $L^{\text{sc}}$  和  $L^{\text{cc}}$  分别是信源耦合长度和信道耦合长度。信道和信源参数分别用上标 cc 和 sc 标识区分。DSC-LDPC 码的原模图, 如图 2 所示。图 2 中: 阴影填充的节点为信源的 CNs 连接到信道的 VNs 部分。

因为 DSC-LDPC 码的参数满足  $b_v^{\text{cc}} - b_c^{\text{cc}} - b_c^{\text{sc}} = 0$ , 所以基矩阵可用联合基矩阵  $\mathbf{B}_j$  表示, 即

$$\mathbf{B}_j = \begin{bmatrix} \mathbf{B}^{\text{sc}} & \mathbf{B}^{\text{L}} \\ 0 & \mathbf{B}^{\text{cc}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

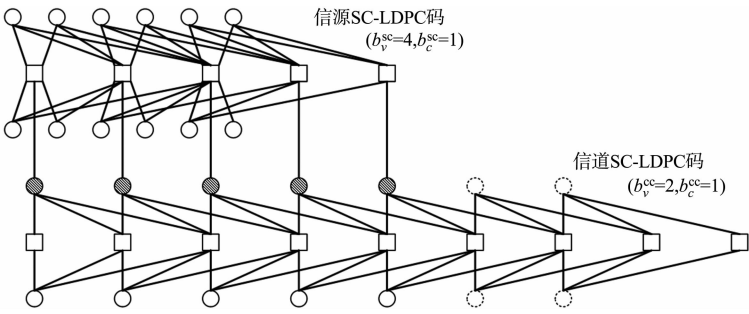


图 2 DSC-LDPC 码的原模图

Fig. 2 Protograph of DSC-LDPC code

式(2)中; $\mathbf{B}_L$  是大小为  $(L^{sc}+m)b_c^{sc} \times L^{cc}b_v^{cc}$  的连接矩阵,表示信源校验节点与信道变量节点的连接关系。

1.2 DSC-LPDC 码的编码

SC-LDPC 码的校验矩阵  $\mathbf{H}$  转置为

$$\mathbf{H}_{[0,L-1]}^T = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_0^T(0) & \cdots & \mathbf{H}_m^T(m) & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & \mathbf{H}_0^T(L-1) & \cdots & \mathbf{H}_m^T(m+L-1) \end{bmatrix} \quad (3)$$

子矩阵  $\mathbf{H}_i(t), 0 \leq i \leq m$  定义为

$$\mathbf{H}_i(t) = \begin{bmatrix} h_i^{(1,1)}(t) & \cdots & h_i^{(1,b_v^M)}(t) \\ \vdots & & \vdots \\ h_i^{(b_c^M,1)}(t) & \cdots & h_i^{(b_c^M,b_v^M)}(t) \end{bmatrix}_{b_c^M \times b_v^M} \quad (4)$$

比特为“1”,概率为  $P_1 < 1/2$  的二进制无记忆伯努利信源可以直接将接收到信息序列  $\mathbf{s}$  用校验矩阵  $\mathbf{H}^{sc}$  进行压缩,编码后得到序列  $\mathbf{u}$ ,即  $\mathbf{u} = \mathbf{s}(\mathbf{H}^{sc})^T$ 。信道 SC-LDPC 码编码采用校验和编码算法<sup>[16]</sup>。信道编码器是一个系统编码器,编码后的码字可以表示为  $\mathbf{v}_i = [v_i^{(0)}, v_i^{(1)}]$ ,  $0 \leq i < L^{cc}$ ,  $v_i^{(0)}$  是信息位(图 2 中阴影填充的 VNs),  $v_i^{(1)}$  是校验位(图 2 中无填充的 VNs)。  $v_i^{(0)}, v_i^{(1)}$  具体编码为

$$\left. \begin{aligned} v_i^j &= u_i^j, & 1 \leq j \leq (b_v^{cc} - b_c^{cc})M, \\ v_i^j &= \sum_{k=1}^{(b_v^{cc}-b_c^{cc})M} v_i^{(k)} h_0^{(j-(b_v^{cc}-b_c^{cc})M,k)}(i) + \sum_{c=1}^m \sum_{k=1}^{b_c^{cc}M} v_{i-c}^{(k)} h_c^{(j-(b_v^{cc}-b_c^{cc})M,k)}(i), \\ & (b_v^{cc} - b_c^{cc})M + 1 \leq j \leq b_v^M M. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

为匹配信源码特性而额外引入不参与信道编码的 VNs 称为删余节点(图 2 中虚线)。

1.3 DSC-LPDC 码的译码

DSC-LDPC 码编码端是用  $\mathbf{H}^{sc}$  和  $\mathbf{H}^{cc}$  单独编码,译码端(SWD 算法)同时对信源和信道进行联合译码。DSC-LDPC 码的 SWD 算法,如图 3 所示。图 3 中: $p$  表示目标符号(绿色横线区域)的位置。一个窗口内有  $b_v^M W$  个 VNs 和  $b_c^M W$  个 CNs,  $W$  表示窗口大小。因为目标符号和上一个窗口有直连的边,所以上一个窗口对数似然值直接传递到当前窗口。当目标符号译码完成,窗口向右移动,译码下一个目标符号,直到整帧码字译码完成。

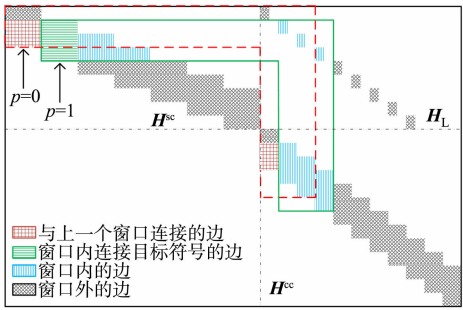


图 3 DSC-LDPC 码的 SWD 算法

Fig. 3 SWD algorithm of DSC-LDPC code

以加性高斯白噪声信道(AWGN)为例,DSC-LDPC 码的 SWD 算法信息传递过程有如下 4 个步骤。

1) 初始化。信源端的初始化可用  $Z_v^{sc} = \lg((1-p_1)/p_1)$  计算,信源初始化只与信源统计特性有关。信道初始化可表示为  $Z_v^{cc} = 2y/\sigma_n^2$ ,  $y$  为经过信道后的观测值,  $\sigma_n^2$  为信道噪声的方差。

2) 迭代。迭代仅发生在窗口内的节点,且包含水平步骤和垂直步骤。  $L_{c \rightarrow v}^{sc,(k)}$  和  $L_{v \rightarrow c}^{cc,(k)}$  分别为信源和信道中第  $c$  个 CNs 传递给第  $v$  个 VNs 的对数似然值;  $L_{c \rightarrow v}^{sc \rightarrow cc,(k)}$  和  $L_{v \rightarrow c}^{cc \rightarrow sc,(k)}$  分别为信源中第  $c$  个 CNs 传

递给信道中第  $v$  个 VN 的对数似然值和信道中第  $v$  个 VN 传递给信源中第  $c$  个 CN 的对数似然值;  $L_{v \rightarrow c}^{\text{sc},(k)}$  和  $L_{v \rightarrow c}^{\text{cc},(k)}$  分别为信源和信道中第  $v$  个 VN 传递给第  $c$  个 CN 的对数似然值。

用 CNs 传递给 VN 的对数似然比公式(水平步骤)为

$$\tanh\left(\frac{L_{c \rightarrow v}^{\text{sc} \rightarrow \text{cc},(k)}}{2}\right) = \prod_v \tanh\left(\frac{L_{v \rightarrow c}^{\text{sc},(k)}}{2}\right), \quad c = 1, 2, \dots, (L^{\text{sc}} + m)M. \quad (6)$$

$$\tanh\left(\frac{L_{c \rightarrow v}^{\text{sc},(k)}}{2}\right) = \tanh\left(\frac{L_{v \rightarrow c}^{\text{cc} \rightarrow \text{sc},(k)}}{2}\right) \prod_{v' \neq v} \tanh\left(\frac{L_{v' \rightarrow c}^{\text{sc},(k)}}{2}\right), \quad c = 1, 2, \dots, (L^{\text{sc}} + m)M. \quad (7)$$

$$\tanh\left(\frac{L_{c \rightarrow v}^{\text{cc},(k)}}{2}\right) = \prod_{v' \neq v} \tanh\left(\frac{L_{v' \rightarrow c}^{\text{cc},(k)}}{2}\right), \quad c = 1, 2, \dots, (L^{\text{cc}} + m)M. \quad (8)$$

用 VN 传递给 CN 的对数似然比(垂直步骤)为

$$L_{v \rightarrow c}^{\text{sc},(k)} = Z_v^{\text{sc}} + \sum_{c' \neq c} L_{c' \rightarrow v}^{\text{sc},(k)}, \quad v = 1, 2, \dots, b_v^{\text{sc}} L^{\text{sc}} M. \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} L_{v \rightarrow c}^{\text{cc},(k)} &= Z_v^{\text{cc}} + L_{v \rightarrow c}^{\text{cc},(k-1)} + \sum_{c' \neq c} L_{c' \rightarrow v}^{\text{cc},(k-1)}, \\ v &= (2iM + 1, 2iM + 2, \dots, 2iM + M). \quad 0 \leq i < (L^{\text{cc}} - m). \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} L_{v \rightarrow c}^{\text{cc},(k)} &= Z_v^{\text{cc}} + \sum_{c' \neq c} L_{c' \rightarrow v}^{\text{cc},(k-1)}, \\ v &= ((2i + 1)M + 1, (2i + 1)M + 2, \dots, (2i + 1)M + M), \quad 0 \leq i < (L^{\text{cc}} - m). \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} L_{v \rightarrow c}^{\text{cc} \rightarrow \text{sc},(k)} &= Z_v^{\text{cc}} + \sum_{c' \neq c} L_{c' \rightarrow v}^{\text{cc},(k-1)}, \\ v &= (2iM + 1, 2iM + 2, \dots, 2iM + M), \quad 0 \leq i < (L^{\text{cc}} - m). \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式(9)~(12)中:  $L_{c \rightarrow v}^{\text{sc},(0)} = L_{c \rightarrow v}^{\text{sc},(0)} = L_{c \rightarrow v}^{\text{sc} \rightarrow \text{cc},(0)} = 0$ 。式(10)是计算与信源相连的信道 VN 的对数似然值,而式(11)是计算不与信源相连的信道 VN 的对数似然值。

3) 译码判决。迭代步骤完成后,先计算目标符号的对数似然值,即

$$L(s_v) = Z_v^{\text{sc}} + \sum_c L_{c \rightarrow v}^{\text{sc},(k)}. \quad (13)$$

随后,根据目标符号的对数似然值估计译码结果,当  $L(s_v) \geq 0$  时,译为 0,否则,译为 1。

4) 窗口滑动。若当前窗口满足目标符号的错误概率小于阈值( $\beta = 10^{-6}$ )或迭代次数等于最大值,则表示译码完成,保存译码结果和与下一个窗口内的校验节点相连边(图 3 蓝色竖线区域)的信息,窗口向右滑动一个位置,重复步骤 1~3,直到整个码字译码完成。否则,返回步骤 2,迭代次数  $k+1$ ,重新迭代译码。

## 2 改进的 SWD 算法

为改善 JSCC 系统的 DSC-LDPC 码的译码性能,窗口内引入监督,监控译码过程中平均错误概率  $\bar{P}_e$  可达到的最小值,并保存  $\bar{P}_e$  和  $\bar{P}_e$  为最小值时信源目标符号的对数似然值。

### 2.1 平均错误概率计算

在 SWD 算法中,译码结果都是根据译码终止时产生的对数似然值来估算码字  $\hat{s}$ 。但研究表明,目标符号的平均错误概率  $\bar{P}_e$  不随迭代次数增加而单调减小。因此,当目标符号满足译码停止条件时,平均错误概率  $\bar{P}_e$  未必是这一帧码字译码过程中的最小值,即译码结果不一定是最优的。基于这一译码现象,设计一种改进的 SWD(iSWD)算法。iSWD 算法在窗口内引入监督,监控窗口可达到的最小平均错误概率  $P_{\min}$  和对应的目标符号对数似然值。监督机制可以优化算法的译码性能,使其更加适用于各种噪声和干扰环境。

由式(13)可以得到码字  $s_v$  的后验似然估计值  $L(s_v)$ ,则分别计算  $s_v$  为 1 和 0 的后验概率  $P_1(s_v)$  和  $P_0(s_v)$ 。即

$$\left. \begin{aligned} P_1(s_v) &= \frac{1}{1 + e^{-L(s_v)}}, \\ P_0(s_v) &= \frac{1}{1 + e^{L(s_v)}}. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

此次迭代的错误概率取  $P_1(s_v)$  和  $P_0(s_v)$  的最小值,即

$$P_e(s_v)=\min\{P_1(s_v),P_0(s_v)\}。 \tag{15}$$

第  $p$  个窗口的信源目标符号的平均错误概率  $\overline{P_e}(p)$  为

$$\overline{P_e}(p)=\frac{1}{b_v^{sc}M}\sum_{v=pb_v^{sc}M}^{(p+1)b_v^{sc}M-1}P_e(s_v)。 \tag{16}$$

在 iSWD 算法中,窗口内的码字在进行 BP 译码时都会被监督。每个窗口内信源目标符号的个数是  $b_v^{sc}M$ 。存储器 C 的长度为  $b_v^{sc}M$ ,用来存储平均错误概率  $\overline{P_e}(p)$  达到最小值时的目标符号似然估计值。存储器 C 只是存储信源目标符号的似然估计值,因此,其长度与窗口大小无关,从而节省存储空间。当译码终止时,根据存储器 C 中的内容进行译码。存储器 C 里存的具体内容为  $L(s_{pb_v^{sc}M}),L(s_{pb_v^{sc}M+1}),\cdots,L(s_{(p+1)b_v^{sc}M-1})$ 。

2.2 iSWD 算法

iSWD 算法重点在于监测信源目标符号的平均错误概率  $\overline{P_e}(p)$  达到最小值时的似然估计值。首先,初始化  $P_{\min}=1$ ,存储器 C 的内存清空。译码第  $p$  个窗口,接收窗口内的码字,并进行 BP 译码后,算出信源目标符号的  $\overline{P_e}(p)$ 。如果此次迭代的平均错误概率满足  $\overline{P_e}(p)\leq P_{\min}$ 。最小平均错误概率将会被更新,即  $P_{\min}=\overline{P_e}(p)$ 。此次迭代得到的每个信源目标符号似然估计值也会被更新存储在存储器 C 中的对应位置。如果此次迭代的平均错误概率不满足  $\overline{P_e}(p)\leq P_{\min}$ ,则  $P_{\min}$  和存储器 C 中的内容都不进行更新,迭代次数加 1,直接执行下一轮迭代。

iSWD 算法监控的是信源目标符号的平均错误概率,不需要分别监控信源和信道的平均错误概率,从而减小算法复杂度和所需存储器的容量。DSC-LDPC 码中信源和信道直接有信息传递,进行联合译码,所以 iSWD 算法监督信源目标符号就可以提高系统整体性能。

iSWD 算法

- 1: for  $p=0\rightarrow L^c$  do
- 2:  $P_{\min}=1$ ,存储器 C 内存清空;
- 3: 开始迭代,并将迭代次数  $k$  设为 0;
- 4: while  $k<I_{\max}$  do
- 5: 在窗口内执行 BP 算法,  $k=k+1$ ;
- 6: if  $\overline{P_e}(p)\leq P_{\min}$  then
- 7:  $P_{\min}=\overline{P_e}(p)$ ,更新存储器 C;
- 8: end if
- 9: if  $\overline{P_e}(p)\leq 10^{-6}$  then
- 10: 停止此次译码,并跳转至步骤 13;
- 11: end if
- 12: end while
- 13: 基于存储器 C 中的似然估计值估计译码目标符号;
- 14: end for。

3 仿真性能分析

在 iSWD 算法的仿真实验采用  $\frac{1}{4}$  码率的信源码和  $\frac{1}{2}$  的信道码,基矩阵分别为

$$\boldsymbol{H}^{sc}=[3\ 3\ 3\ 3],\quad \boldsymbol{H}^{cc}=[3\ 3]。 \tag{17}$$

耦合宽度  $m=2$ 。此外,耦合长度分别为  $L^{sc}=20$  和  $L^{cc}=16$ ,最大迭代次数  $I_{\max}=30$ 。

每一个码字需要仿 20 000 帧,仿真的码字采用二进制相移键控(BPSK)调制方式。在实验仿真中,为测试 iSWD 算法的性能,分别测试了 AWGN 信道和瑞利衰落信道中不同信噪比( $R_{\text{SN}}$ )下的误码率( $R$ )。通过这两种不同信道的测试,可以更全面地评估算法的性能和稳定性,并确定其在不同环境下的

应用潜力。因此,获得的实验结果可以为算法优化和改进提供重要的参考依据。

AWGN 信道下  $W=6, W=10$  的误码率,分别如图 4、5 所示。由图 4、5 可知: 误码率性能最差的是扩展因子为 80 的 SWD 算法,而误码率性能最好的是扩展因子为 160 的 iSWD 算法,即扩展因子越大,误码率性能越好,这是因为扩展因子的大小与码长成正相关,扩展因子为 80、120 和 160 时,DSC-LDPC 码的信息码长分别为 5 120、7 680 和 10 240;iSWD 算法在 AWGN 信道下传输,不同参数条件下,均能改善译码性能,在窗口大小为 6、扩展因子为 120、误码率为  $4 \times 10^{-4}$  时,iSWD 算法相较于 SWD 算法的译码增益约为 0.69 dB,iSWD 算法的改进有限,在窗口大小为 10,扩展因子为 160 时,iSWD 算法的译码增益与 SWD 算法较为接近,这是因为窗口较大和 DSC-LDPC 码的码长较长时,SWD 算法的错误概率在迭代过程中更易收敛到最小值,有更优的译码性能,改进的空间更小。

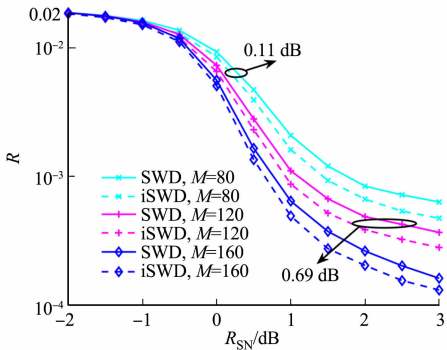


图 4 AWGN 信道下  $W=6$  的误码率  
Fig. 4 Bit error rate with  $W=6$   
under AWGN channels

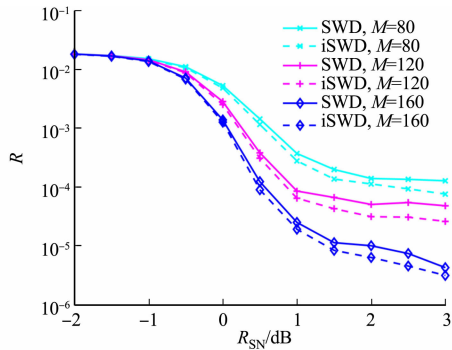


图 5 AWGN 信道下  $W=10$  的误码率  
Fig. 5 Bit error rate with  $W=10$   
under AWGN channels

为验证 iSWD 算法在不同信道中的普适性,iSWD 算法在瑞利衰落信道中也进行了仿真实验。瑞利衰落信道下  $M=80, M=160$  的误码率,分别如图 6、7 所示。

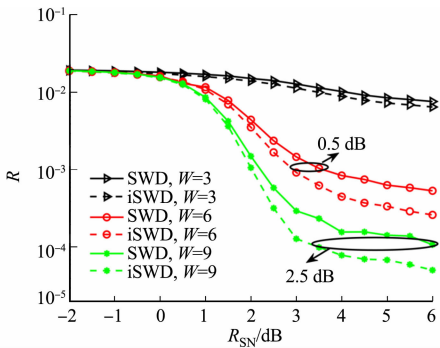


图 6 瑞利衰落信道下  $M=80$  的误码率  
Fig. 6 Bit error rate with  $M=80$   
under Rayleigh fading channels

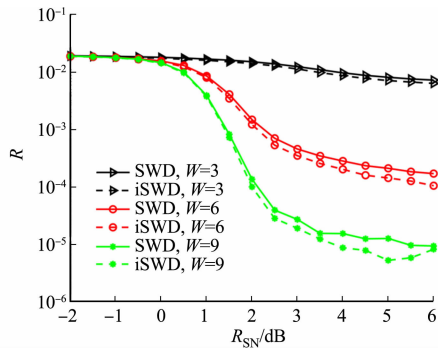


图 7 瑞利衰落信道下  $M=160$  的误码率  
Fig. 7 Bit error rate with  $M=160$   
under Rayleigh fading channels

由图 6、7 可知:当窗口大小为 9、扩展因子为 80、误码率为  $1 \times 10^{-4}$  时,iSWD 算法相较于 SWD 算法,其译码性能有显著的提升,译码增益高达 2.5 dB;而当窗口大小为 6、扩展因子为 80、误码率为  $1 \times 10^{-3}$  时,iSWD 算法的译码增益约为 0.5 dB,这意味着 iSWD 算法可以更有效地对噪声和干扰进行抑制,提高数据传输的可靠性;在瑞利衰落信道中,iSWD 算法对不同参数的 DSC-LDPC 码系统性能均有改善。

## 4 结束语

针对目标符号错误概率不随迭代次数而单调减小的问题,设计了一种适用于 DSC-LDPC 码的 iSWD 算法。该算法的主要思想是监督窗口目标符号错误概率可达到的最小值,并保存对应目标符号的对数似然值。译码终止时,根据保存的对数似然值估算译码结果。改进的算法未增加额外的迭代运算,因此,不会提高译码复杂度。由仿真实验可知,在 AWGN 信道和瑞利衰落信道下,iSWD 算法在瀑

布区和平层区的性能均得到改善,有望应用到未来低延迟、高可靠的流媒体传输中。

参考文献:

[1] SAYOOD K,BORKENHAGEN J C. Use of residual redundancy in the design of joint source/channel coders[J]. IEEE Transactions on Communications,1991,39(6):838-846. DOI:10.1109/26.87173.

[2] HAGENAUER J. Source-controlled channel decoding[J]. IEEE Transactions on Communications,1995,43(9):2449-2457. DOI:10.1109/26.412719.

[3] FRESIA M, PEREZ-CRUZ F, POOR H V. Optimized concatenated LDPC codes for joint source-channel coding [C]//IEEE International Symposium on Information Theory. Seoul:IEEE Press,2009:2131-2135.

[4] 王琳,刘三亚,陈辰,等. 工业互联网低功耗数据链算法设计综述:联合信源信道编码设计的必要性、现实与前景 [J]. 电子与信息学报,2020,42(1):249-262. DOI:10.11999/JEIT190762.

[5] FELSTROM A J,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. DOI:10.1109/18.782171.

[6] 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. DOI:10.1109/TIT.2010.2095072.

[7] LENTMAIER M,SRIDHARAN A,COSTELLO D,*et al.* Iterative decoding threshold analysis for LDPC convolutional codes[J]. IEEE Transactions on Information Theory,2010,56(10):5274-5289. DOI:10.1109/TIT.2010.2059490.

[8] 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. DOI:10.1109/TIT.2011.2177439.

[9] MO Shiyuan,CHEN Li. Improved sliding window decoding of spatially coupled low-density parity-check codes[C]//IEEE Information Theory Workshop. Taiwan:IEEE Press,2017:126-130. DOI:10.1109/ITW.2017.8277945.

[10] 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. DOI:10.11999/JEIT190762.

[11] 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,2018,6:9336-9346. DOI:10.1109/ACCESS.2017.2771375.

[12] GOLMOHAMMADI A,MITCHELL D G M. Concatenated spatially coupled LDPC codes with sliding window decoding for joint source-channel coding[J]. IEEE Transactions on Communication,2022,70(2):851-864. DOI:10.1109/TCOMM.2021.3126750.

[13] LIAN Qiufang,CHEN Qiwan,ZHOU Lin,*et al.* Adaptive decoding algorithm with variable sliding window for double SC-LDPC coding system[J]. IEEE Communications Letters,2023,27(2):404-408. DOI:10.1109/LCOMM.2022.3222560.

[14] DIVSALAR D,DOLINAR S,JONES C R,*et al.* Capacity approaching protograph codes[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,2009,27(6):876-888. DOI:10.1109/JSAC.2009.090806.

[15] MITCHELL D G M,LENTMAIER M,COETELLO D J. Spatially coupled LDPC codes constructed fromprotographs[J]. IEEE Transactions on Information Theory,2015,61(9):4866-4889. DOI:10.1109/TIT.2015.2453267.

[16] PUSANEA E,FELTSTROM A J,SRIDHARAN A,*et al.* Implementation aspects of LDPC convolutional codes [J]. IEEE Transactions on Communications,2008,56(7):1060-1069. DOI:10.1109/TCOMM.2008.050519.

(责任编辑: 陈志贤      英文审校: 陈婧)