

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

王琳^① 刘三亚^{*①} 陈辰^② 陈启望^③

^①(厦门大学信息学院 厦门 361005)

^②(华侨大学信息科学与工程学院 厦门 361021)

^③(宁波大学信息科学与工程学院 宁波 315000)

摘要: 原模图低密度奇偶校验(P-LDPC)码已经广泛应用于各种通信系统, 为了使其能够满足不同应用场景下系统对纠错性能、硬件资源损耗以及功耗等方面的要求, 需要对P-LDPC码进行进一步的设计优化。该文主要从标准信道环境下基于双P-LDPC(DP-LDPC)码的联合信源信道编码(JSCC)系统的属性研究、系统设计优化以及性能表现等角度入手, 对近些年出现的针对该系统环境所做的优化分析工作进行了综述。表明进行的优化工作属实显著地改善了系统性能, 为面向工业互联网(II)的LDPC码的研究工作提供些许思路。最后, 该文对未来的研究工作进行了展望, 为感兴趣的研究学者提供参考以继续推进。

关键词: 工业互联网; 低功耗; 联合信源信道编码; 原模图低密度奇偶校验码

中图分类号: TN911.22

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)01-0249-14

DOI: [10.11999/JEIT190762](https://doi.org/10.11999/JEIT190762)

Overview of Low Power Data Link Algorithms Design for Industrial Internet——Necessity, Reality and Prospect of JSCC Design

WANG Lin^① LIU Sanya^① CHEN Chen^② CHEN Qiwang^③

^①(College of Information, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

^②(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

^③(College of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo 315000, China)

Abstract: Protograph Low Density Parity Check (P-LDPC) code is widely used in various communication systems. In order to meet the requirements of error correction performance, hardware resource loss and power consumption in different application scenarios, further design optimization of P-LDPC codes is needed. This paper focuses on the properties of Joint Source-Channel Coding (JSCC) system based on Double P-LDPC (DP-LDPC) codes in standard channel environment, the optimization of code design and performance behavior, etc. The design and optimization for the system environment in recent years is summarized. It shows that the design optimization work has significantly improved the system performance, which provides some ideas for the research of Industrial Internet (II)-oriented LDPC code. Finally, the future research work is discussed for the reference and promotion of interested scholars.

Key words: Industrial Internet (II); Low power consumption; Joint Source-Channel Coding (JSCC); Protograph Low Density Parity Check (P-LDPC) code

1 引言

工业互联网(Industrial Internet, II)是各种工业设备终端的联网化, 包含各种各样的应用场景,

比如制造业、零售业、通用工业和运输业等领域。II应用需要考虑许多因素, 例如节点成本、网络成本、电池寿命、数据传输速率(吞吐率)、延迟、移动性, 网络覆盖范围以及部署类型等。无线通信技术是II传输的基础, 不同的应用场景需要不同的无线通信模块, 这些应用领域的增长引领了无线通信模块的主要增长。随着II应用的快速发展, 无线网络需要支持数以亿计的无线设备^[1], 对无线通信技术提出了更高的要求, 通信系统设计面临更加

收稿日期: 2019-10-08; 改回日期: 2019-11-16; 网络出版: 2019-11-25

*通信作者: 刘三亚 sanyaliu1106@gmail.com

基金项目: 国家自然科学基金(61671395)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61671395)

严峻的挑战。面临这个挑战性问题,联合信源信道编码(Joint Source-Channel Coding, JSCC)已经成为潜在的解决方案之一^[2-8]。与传统的信源信道分离级联编译系统相比, JSCC可以更加有效地利用信源或者信道特征提高整体系统的性能,且需要的码长更短,因此更适合于资源有限、延迟敏感的物联网应用。

1963年, Gallager^[9]提出一类新的线性分组纠错码,称为低密度校验(Low Density Parity Check, LDPC)码,它可以用其非常稀疏的校验矩阵来表示^[2,3,6,8]。80年代初,研究学者提出了它的图形化的表示方法——Tanner图^[10]。90年代, MacKay等人^[11]采用迭代译码算法使得LDPC码具有逼近香农限的优异性能,从而引起了大量学者的广泛关注,掀起了信道编码理论界的研究热潮^[12-22]。值得注意的还有Zyablov等^[23]和Margulis^[24]关于LDPC的研究工作,由于缺乏结构性,传统的LDPC码具有较高的编码和解码复杂度,在一定程度上限制了它们在通信系统中的应用。为了解决这个问题,学术界付出了巨大的努力寻找方法以设计出更高效的LDPC码^[12,16,20,21,25-37]。文献^[33,38-40]对LDPC码的迭代译码算法进行了改进,以获得更好的译码性能。近二十年,学者们研究了各种修正渐进分析工具,其中以高效、精确而突出的有密度进化(Density Evolution, DE)^[5,31]、外部信息转移(EXtrinsic Information Transfer, EXIT)^[26-28]和渐进重量分布(Asymptotic Weight Distribution, AWD)^[41,42]。DE和EXIT作为两种最流行的优化LDPC码的辅助工具,在计算迭代译码阈值以及预测低信噪比区域的渐近误差性能尤为适用。AWD则适用于预测最小(汉明)距离以及高信噪比区域的渐近误差性能。另外,DE和EXIT与码型和信道类型均有关,而AWD只受码型影响。据之前的研究结果可知,LDPC码的要获得靠近容量限的译码阈值通常受到最小距离的影响,这就意味着,对于LDPC码来说,不管在低信噪比还是在高信噪比区,要获得出色的纠错性能还是非常困难的,这些理论的进步极大地推动了LDPC码的码型构造和译码设计。LDPC码在现代通信系统中发挥了重要作用,越来越受到学术界和工业界的关注^[26-47]。如今,它已经广泛应用于各种通信和数据存储系统,例如深空通信系统^[48,49]、无线通信系统^[50]、光通信系统^[51]、水声通信系统^[52]和磁记录系统^[53,54],成为信道编码领域的研究热点。LDPC码的综述类的文章可参考文献^[22,35,55-58]。

早期多数靠近容量限的LDPC码是非规则的,

非规则结构导致它们2次编码的复杂。为了克服这个缺点, Richardson等人^[22,59]提出了一类新的LDPC码,即多边类型(Multi-Edge-Type, MET)LDPC码。2003年, Thorpe^[60]提出了一种基于模板的新型结构的LDPC码,称为原模图LDPC(Protograph LDPC, P-LDPC)码,属于MET-LDPC码的子类。原模图是具有相对较少节点的Tanner图,可用于构造任意大小的LDPC码,并且可以用于预测该LDPC码的性能。与传统的LDPC码相比, P-LDPC码具有更好的纠错性能和较低的复杂性^[61-63],可实现线性编码以及快速译码^[46,64-68],并且易于硬件实现^[62,63]。文献^[37,69]与文献^[56-58]分别提出了原模图EXIT(Protograph EXIT, PEXIT)算法和渐进重量计数器以便于P-LDPC的分析与设计,构造出具有接近容量限和最小线性距离属性的P-LDPC码。喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)提出的累加-重复-3-累加(Accumulate-Repeat-3-Accumulate, AR3A)码和累加-重复-4-判决-累加(Accumulate-Repeat-by-4-Jagged-Accumulate, AR4JA)码即为两种经典的P-LDPC码^[61-63]。

与分离级联的信源信道编码系统相比,通过利用信源压缩后的冗余信息在译码端进行联合译码的JSCC系统可以获得显著的编码增益。2010年,普林斯顿大学的Vincent Poor团队提出在编码端使用两个LDPC码(非结构化的规则LDPC码和非规则LDPC码)分别用做信源压缩和信道纠错,在译码端采用联合信源信道(Joint Source-Channel, JSC)译码器,该系统被称为双LDPC(Double LDPC, D-LDPC)码的JSCC系统^[70]。双P-LDPC(Double P-LDPC, DP-LDPC)码的JSCC系统使用结构简单、码率扩展性好的P-LDPC码代替传统的LDPC码,它是基于D-LDPC码JSCC系统的改进。研究表明,基于DP-LDPC码的JSCC系统相比基于D-LDPC码的JSCC系统可以获得更好的性能^[71]。

近些年,受早期研究LDPC码优越性的启发,研究人员针对基于DP-LDPC码的JSCC系统进行分析,以研究出适用于该系统环境的理论分析工具,进一步设计出更好的P-LDPC码,以不断改善系统性能。首先,文献^[72]发现信源统计概率对该系统的性能有重大影响(更多讨论见文献^[73,74]),发现误比特(Bit Error Rate, BER)性能随着信源熵减小而提高^[72-74]。考虑到这一观察结果,适用于该系统的信源码PEXIT被提出,用以计算信源译码阈值,这有助于预测并降低系统因信源码码率和信源统计概率产生的错误地板^[74]。其次,有大量研究致力于该系统下的码型设计与优化。文献^[75]从联合基矩阵 \mathbf{B}_J 的角度出发,提出了联合PEXIT(Joint

PEXIT, JPEXIT)算法,并借助该译码阈值分析工具针对信道码进行了重新设计,提高了基于DP-LDPC码的JSCC系统的瀑布区性能。文献[76]针对信源P-LDPC码进行了再设计与优化,有效降低了系统的错误地板。此外,为了降低JSCC系统的错误地板,文献[77]在信道码的校验节点(Check Nodes, CNs)与信源码的变量节点(Variable Nodes, VNs)之间添加了链接边,即第2类链接边 B_{L2} ,相当于增加译码过程中可用的信源比特信息。随后,文献[78,79]研究了基于DP-LDPC码的JSCC系统的连接关系。为了充分挖掘第1类链接边 B_{L1} 对整体系统性能的影响,在信道码和信源码固定的前提下,文献[79]提出了搜索最优 B_{L1} 的搜索算法,改善了系统的瀑布性能。最后,针对该联合系统也有一些匹配优化的研究工作,在文献[80]中,把信源码 B_s 和信道码 B_c 看作匹配码对,通过对码对进行设计优化,得到了译码门限比经典的参考码对低的码对,从而使得系统的瀑布区性能得以改善。考虑到度为2的变量节点对该系统的影响,文献[81]通过对信源码和信道码含有的度为2的变量节点进行设计优化,改善了系统的瀑布区性能。另外还有,文献[82-84]针对基于DP-LDPC码的JSCC系统在图像传输中的应用进行了研究,并提出了有效的方案。

本文主要针对在标准信道环境下基于DP-LDPC码的JSCC系统的分析以及近些年出现的针对该系统环境做的系统优化进行了总结,并给出了未来发展方向。首先,针对用于该系统的P-LDPC码、系统模型进行了介绍。其次,对系统属性相关的研究工作进行了介绍。继而通过举例总结来说明针对基于DP-LDPC码的JSCC系统中的P-LDPC码进行码型及相关算法设计与优化,能够给该系统性能带来显著的改善,以此为面向II的LDPC码的研究工作提供些许思路。最后,给出了未来的研究工作讨论,供感兴趣的读者参考和推进。

2 相关概念以及系统模型

2.1 原模图LDPC

P-LDPC码最早在文献[60]中提出,它是由极少变量节点和校验节点构成的因子图(原模图)经过

“重复-交织”操作而生成的。它可以表示为 $G_p=(V, C, E)$,即它是由变量节点集合 V ,校验节点集合 C 和边的集合 E 组成。每一条边 $e_{i,j} \in E$ 连接一个变量节点 $v_j \in V$ 和一个校验节点 $c_i \in C$ 。原模图中允许出现度为1的变量节点和重边,因此 $e_{i,j} \rightarrow (v_j, c_i) \in E$ 并不是一一映射。

原模图对应的邻接矩阵称为基础矩阵 B 。原模图LDPC码是与导出图相对应的,导出图是由原模图经过重复后再对同类型的边进行交织得到的,即:首先,对原模图重复 q 次,得到由 q 个相互独立的原模图组成的大原模图;其次,在该大原模图中,采用交织器分别对每 q 条同类型的边进行重排,经过交织之后得到的新原模图就是导出图,导出图即为P-LDPC码的因子图(即导出图与因子图是等价的)。

针对同一个原模图,可以通过改变复制次数与交织方式得到不同大小的导出图,即得到任意码长的P-LDPC码。另外需要说明的是,在扩展规则给定的情况下,P-LDPC码的性能主要取决于其原模图。本文中采用的原模图扩展规则为比较常用的渐进边增长(Progressive Edge Growth, PEG)算法[31]。具体描述为,获得大小为 $Q_m \times Q_n$ 的校验矩阵有两种方式:第一,采用PEG算法对原模图进行因子为 Q 的复制,然后每条边对各自对应的边进行排列;第二,首先采用PEG算法对原模图进行因子为 q_1 的扩展去除重边,然后再采用PEG算法对每一个类型的边构造 $q_2 \times q_2$ 准循环的结构,其中 $Q = q_1 q_2$ 。第2种方式比第1种方式具有更好的准循环结构,易于硬件实现。

2.2 基于DP-LDPC码的JSCC系统模型

基于DP-LDPC码的JSCC系统的方框图如图1所示[79]。发送端由两个P-LDPC码的串行级联形成,其中,外部的P-LDPC码进行信源压缩,内部的P-LDPC码用来进行信道编码。首先,信源 s 经过信源编码器生成信源码字 b 。然后, b 经过信道编码器后得到编码后的码字 c 。 c 经过二进制相移键控(Binary Phase Shift Keying, BPSK)调制得到传输信号 x ,经过加性高斯白噪声(Additive White

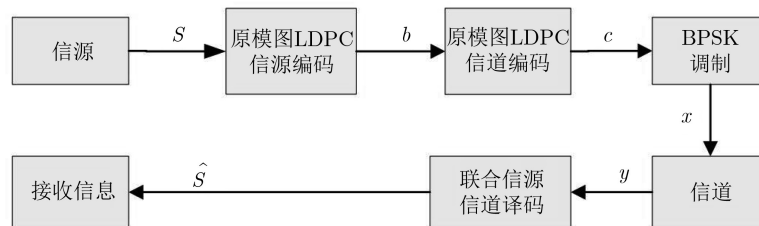


图1 基于DP-LDPC码的JSCC系统框图

Gaussian Noise, AWGN)信道传输后,输出得到信道的信息 y 。最后,在译码端, y 通过JSC译码、判决估计最终恢复出估计信源 \hat{s} 。

基于DP-LDPC码的JSCC系统的Tanner图如图2所示。黑色方块表示信码和信道码的CNs。黑色圆、白色圆和灰色圆分别表示信源VNs、打孔的信道VNs和传输的信道VNs。左边的Tanner图表示信源码,其基矩阵 \mathbf{B}_s 大小为 $m_s \times n_s$ 。右边的Tanner图表示信道码,其基矩阵 \mathbf{B}_c 大小为 $m_c \times n_c$ 。信源码CNs与信道码VNs之间的连线表示第1类链接边 \mathbf{B}_{L1} ,其基矩阵大小为 $m_s \times n_c$ 。信源码VNs与信道码CNs之间的连线表示第2类链接边 \mathbf{B}_{L2} ,其基矩阵大小为 $m_c \times n_s$ 。整个Tanner图对应的联合基矩阵 \mathbf{B}_J 表示为

$$\mathbf{B}_J = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_s & \mathbf{B}_{L1} \\ \mathbf{B}_{L2} & \mathbf{B}_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, \mathbf{B}_J 的大小为 $(m_s + m_c) \times (n_s + n_c)$ 。注意: \mathbf{B}_J 中的 \mathbf{B}_s 和 \mathbf{B}_c 的大小需要遵守匹配条件

$$n_c - m_c = m_s \quad (2)$$

另外,如果原始基矩阵不满足此匹配条件,但是可以通过扩展最小倍数至匹配的,可以采用PEG算法进行扩展。

进一步采用PEG算法通过“复制和排列”操作进行扩展,便可以获得对应的联合校验矩阵 \mathbf{H}_J ,即

$$\mathbf{H}_J = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_s & \mathbf{H}_{L1} \\ \mathbf{H}_{L2} & \mathbf{H}_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, \mathbf{H}_J 的大小为 $(M_s + M_c) \times (N_s + N_c)$,信源P-LDPC码的校验矩阵 \mathbf{H}_s 的大小为 $M_s \times N_s$,信道P-LDPC码的校验矩阵 \mathbf{H}_c 的大小为 $M_c \times N_c$,第一类链接校验矩阵 \mathbf{H}_{L1} 的大小为 $M_s \times N_c$,第二类链接校验矩阵 \mathbf{H}_{L2} 的大小为 $M_c \times N_s$ 。在本文中,所有信源码的CNs与信道码VNs之间的链接均为单链接(即形成信道码字的系统部分),因此 \mathbf{H}_{L1} 可以改写为 $[\mathbf{0}, \mathbf{I}]$ 。这样, \mathbf{H}_J 可以改写为

$$\mathbf{H}_J = \left[\begin{array}{c|c|c} \mathbf{H}_s & \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ \hline \mathbf{H}_{L2} & & \mathbf{H}_c \end{array} \right] \quad (4)$$

其中, \mathbf{I} 代表单位矩阵, $\mathbf{0}$ 矩阵表示无链接。

具体编码过程描述如下:

信源序列 $\mathbf{s} = (s_1, s_2, \dots, s_n) \in \{0, 1\}^n$ 为伯努利二进制独立同分布信源,信源熵计算公式为

$$H_{P(1)} = -p(1)\log_2 p(1) - (1-p(1))\log_2 (1-p(1)) \quad (5)$$

其中, $p(1)$ 为“1”的统计概率,且 $p(1) \neq 0.5$ 。则基于DP-LDPC码的JSCC系统的编码过程如下:

(1) 首先,信源序列 \mathbf{s} 经过信源编码器,即使用信源校验矩阵 \mathbf{H}_s 对其进行压缩得到 $\mathbf{b} = \mathbf{s} \cdot \mathbf{H}_s^T$ 。其中, \mathbf{b} 为压缩位序列。注意:此步骤为信源编码;

(2) 将 \mathbf{s}_p 和 \mathbf{b} 组合为 $[\mathbf{s}_p, \mathbf{b}]$,即将两个序列进行横向级联序列。其中, \mathbf{s}_p 是信源码VNs与信道码CNs有链接的部分对应的信源序列中的那一部分;

(3) 码字 $\mathbf{c} = [\mathbf{s}_p, \mathbf{b}] \cdot \mathbf{G}_{L2c} = [\mathbf{s}_p, \mathbf{b}] \cdot [\mathbf{I}, \mathbf{P}^T] = [[\mathbf{s}_p, \mathbf{b}] \cdot \mathbf{I}, [\mathbf{s}_p, \mathbf{b}] \cdot \mathbf{P}^T] = [\mathbf{s}_p, \mathbf{b}, \mathbf{p}]$ 。其中, \mathbf{G}_{L2c} 是大小为 $(N_s + N_c - M_c) \times (N_s + N_c)$ 的生成矩阵,它对应的校验矩阵是由矩阵 \mathbf{H}_{L2} 和 \mathbf{H}_c 进行水平级联而得。即有 $\mathbf{G}_{L2c} \cdot [\mathbf{H}_{L2}, \mathbf{H}_c]^T = \mathbf{0}$ 和 $\mathbf{G}_{L2c} = [\mathbf{I}, \mathbf{P}^T]$ 。另外, $\mathbf{p} = [\mathbf{s}_p, \mathbf{b}] \cdot \mathbf{P}^T$ 。注意,此步骤为信道编码;

(4) 对码字 \mathbf{c} 中的 \mathbf{s}_p 打孔之后进行传输。如果采用的信道码为删余的P-LDPC码,那么,其对应的校验位在传输之前也需要进行删余操作。

这里有两种特殊情况需要进行说明。第1种情况, \mathbf{s}_p 为 $\mathbf{0}$ 时,即说明相应的第2类链接基矩阵 \mathbf{B}_{L2} 为 $\mathbf{0}$ 。第2种情况, $\mathbf{s}_p = \mathbf{s}$,即说明相应的 \mathbf{B}_{L2} 是一个满秩矩阵,指信道码的CNs到信源码的所有VNs都有链接。本文中所涉及到的举例,全部属于第1种情况。

3 系统属性研究

3.1 信源统计特性对基于DP-LDPC码的JSCC系统的影响

文献[72]主要研究了信源属性对基于DP-LDPC码的JSCC系统性能的影响。具体地,由图3所示

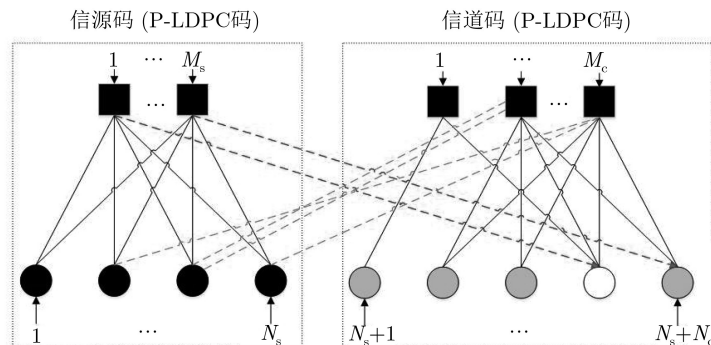


图2 基于P-LDPC码的JSCC系统的编码Tanner图

的仿真结果发现，满足无失真信源编码条件的前提下，基于DP-LDPC码的JSCC系统处理低熵值的信源性能更好，且信源熵值是影响系统性能的主导性因素，而且，传输较低熵值的信源时，能够极大地降低译码所需要的迭代次数以及时延。此外，对于熵值大于信源编码码率的信源，在译码端引入适当的边信息，依然可以实现该信源在系统中的可靠传输，而且在高信噪比区，边信息的引入可以显著降低传输较低熵值信源时译码的错误地板。

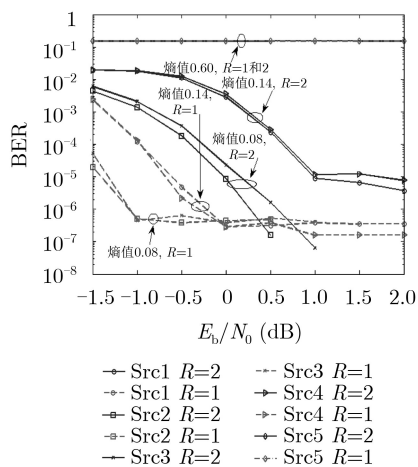


图3 不同熵值、不同传输码率时基于DP-LDPC码的JSCC系统BER性能

3.2 基于DP-LDPC码的JSCC系统可行性研究

图像的低频分量熵值较高，即信息量大，不适合进行数据压缩，也不适合用DP-LDPC码进行编码。因为只有熵足够低才能用DP-LDPC码进行编码，而且熵值越低，系统BER性能越好。而图像的高频分量熵值很低，几乎为0，即它们信息量低，冗余较多，因此，应该对其进行适当压缩以提高系统的效率。文献[82]采用基于DP-LDPC码的JSCC系统的编码方式对高频部分进行编码，不仅

能够对高频的数据进行适当地压缩，而且能够取得很好的效果。图像高频部分使用基于DP-LDPC的JSCC系统进行处理的不等保护传输系统框图如图4所示。

文献[82]提出两种不同的方案：第1种方案将采用不同的码率来构造UEP策略，记为UEP-2；第2种方案，将通过构造DP-LDPC码，使其具有UEP性能，然后应用于图像传输，记为UEP-3。为了更清楚直观地比较不同的UEP方案的优劣，文献[82]还跟文献[85]中的UEP方案(记为UEP-1)进行了对比。文献[82]采用的图像为JPEG格式的医学X射线图像，先对其进行 8×8 分块离散余弦变换(DCT)，之后再量化，把量化后的系数转换为二进制流，并在系统中进行分帧传输。图像进行DCT变换之后，可分为低频分量(含直流分量)和高频分量。低频分量表示图像中最重要的信息，对噪声最敏感，而高频分量描述的是图像的细节信息，属于图像的次要信息，对噪声较不敏感。因此，如前所述，用LDPC码对低频分量进行信道编码，用JSCC编码方式对高频部分进行编码。

图5中所示为SNR=0 dB时的恢复图像。可以直观地看到SNR=0 dB时，由UEP-3保护恢复出的3张图像基本得到完全恢复，没有任何噪声的存在，而由UEP-1和UEP-2方案保护恢复出来的3张图像显然仍然存在噪点。

综上所述，文献[82]提出的两种UEP方案中，都对图像进行了DCT变换，并且把系数分为两个等级：重要信息和次要信息。不同的是，两个码率的UEP方案UEP-2中，将两个不同等级的系数分离，分别进行编码，而在同一码率的UEP方案UEP-3中，并没有将不同等级的系数分离，它们将进行统一的编码。这也表明，基于同一码率的UEP方案比基于不同码率的UEP方案更加简洁，硬件复杂度更低。

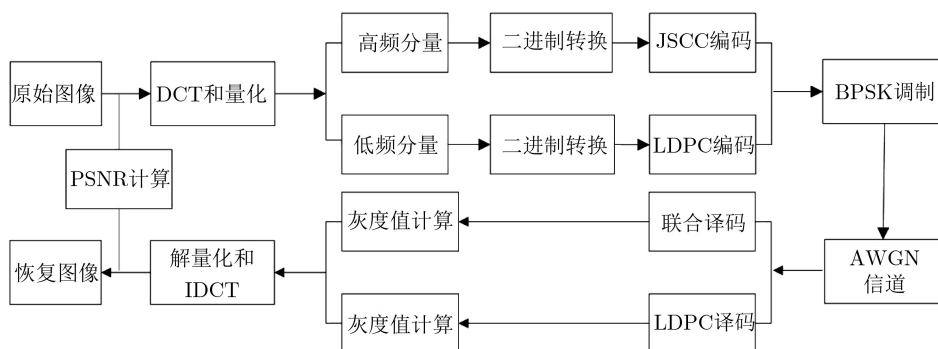


图4 图像高频部分使用基于DP-LDPC的JSCC系统进行处理的不等保护传输系统框图

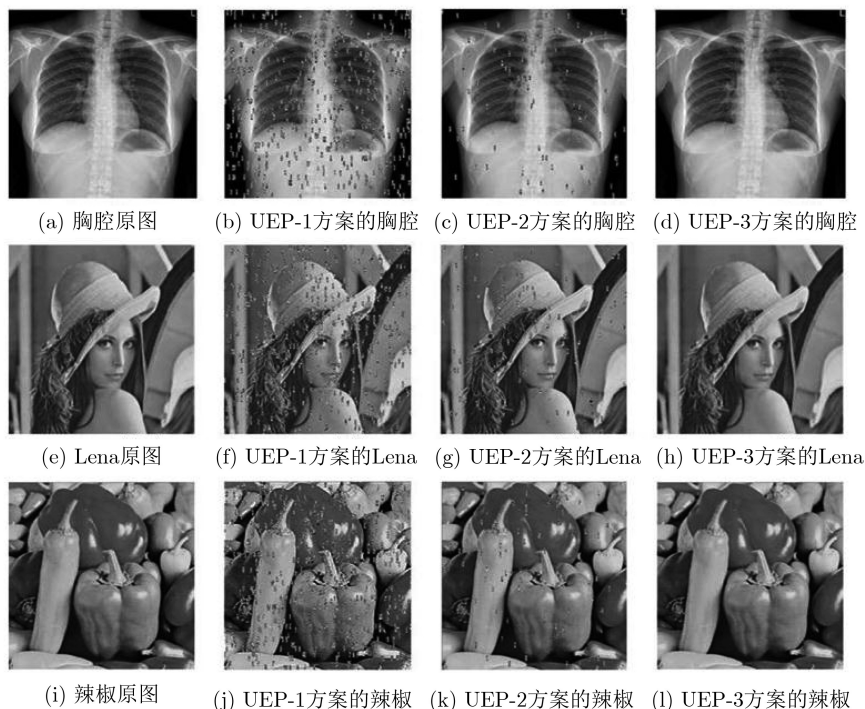


图5 SNR=0 dB时不同不等保护方案下恢复出的图像

4 系统优化

4.1 单成员要素优化

4.1.1 信源码优化

大部分基于P-LDPC码的JSCC系统直接使用纠错性能较好的P-LDPC码用作信源码对信源进行压缩编码^[73-75], 针对这种做法存在一个疑问: 具有最优纠错性能的P-LDPC码用作信源码时是否也是最优的呢? 即具有最低信道译码阈值的LDPC码是否具有最高信源译码阈值呢? 文献^[76]针对该问题进行了进一步的研究。

首先, 文献^[76]中对经典的P-LDPC码的信道译码阈值与信源译码阈值进行了计算, 得知具有更优的信道译码阈值的P-LDPC码不一定具有更好的信源译码阈值。为了获得压缩性能更好的信源码, 需要对信源P-LDPC码进行优化设计。通过采用差分进化搜索算法, 文献^[76]中得到1/2码率的信源P-LDPC码基矩阵 $\mathbf{B}_s^{1/2}$ 。此外, 文中还对信源P-LDPC码进行了码率自适应设计, 即设计了可变码率的信源P-LDPC码族。通过码型扩展设计了更低码率(例如, 1/3和1/4码率)的信源P-LDPC码。同样地, 利用差分进化算法, 搜索具有最高信源译码阈值的码型。文中最终得到了码率1/3和1/4的信源P-LDPC码, 对应的基矩阵表示为 $\mathbf{B}_s^{1/3}$ 和 $\mathbf{B}_s^{1/4}$ 。

图6为基于DP-LDPC码的JSCC系统分别采用1/2码率的R4JA码、AR4JA码、Non-precoded码和 $\mathbf{B}_s^{1/2}$ 码时的BER性能仿真。信道P-LDPC码选用

的均是1/2码率的AR4JA码。图6中展示了采用不同信源P-LDPC码对两个熵值接近压缩速率的信源进行压缩的情况, 以及对应的BER性能曲线。如图6所示, 当信源统计概率 $p(1) = 0.095$ 时, 采用R4JA码进行压缩时, 几乎无法正常译码, 并且随着信噪比的增大, BER性能也鲜有提升, 出现这种情况的原因是传输的信源的信源熵大于R4JA码的译码阈值。然而, 对于AR4JA码、Non-precoded码和 $\mathbf{B}_s^{1/2}$ 码, 传输的信源的信源熵都没有超出最大可恢复的信源熵值(信源译码阈值), 因此, 能够正常译码。由此表明, 基于DP-LDPC码的JSCC系统采用信源P-LDPC码的信源译码阈值越高, 能够成功重建的信源熵范围越大, 相应的系统的鲁棒性越

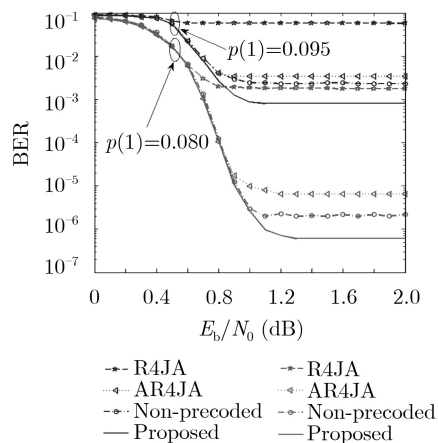


图6 基于DP-LDPC码的JSCC系统采用不同信源P-LDPC码的BER性能对比(码率为1/2)

强。另外，由图6可见，针对相同统计概率的信源，采用的信源码的信源译码阈值越高系统的错误地板越低。信源统计概率 $p(1) = 0.095$ 时，Non-pre-coded码的信源译码阈值($H_{th} = 0.456$)比AR4JA码的($H_{th} = 0.453$)仅略微大一点，对比错误地板性能差距也是显而易见的。信源统计概率 $p(1) = 0.080$ 时，观察结论类似。因此，与其他码型对比，信源编码速率 $R=1/2$ 时，信源P-LDPC码采用 $B_s^{1/2}$ 码时，针对两种不同统计概率的信源($p(1) = 0.095$, $p(1) = 0.080$)，错误地板性能均更优。

图7展示了优化的不同码率的信源码与Non-pre-coded码的BER性能对比情况。同样，为了观察系统的错误地板性能，采用熵值接近于压缩速率的信源。 $p(1) = 0.050$, $R = 1/3$ 时， $B_s^{1/3}$ 码和Non-pre-coded码用作信源码时，分别在 $BER=4.5 \times 10^{-3}$ 和 $BER=1.2 \times 10^{-2}$ 的地方出现错误地板。因此， $B_s^{1/3}$ 码用作信源码时系统的地板区性能明显优于选用Non-pre-coded码的情况。 $R = 1/4$ 时，分析结果类似。

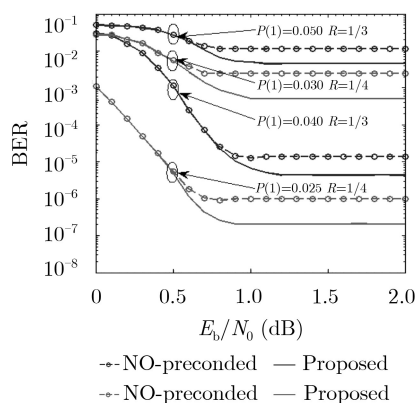


图7 基于DP-LDPC码的JSCC系统采用不同信源P-LDPC码的BER性能对比(码率为1/3和1/4)

可见优化的信源P-LDPC码的信源压缩能力更强，主要表现：与传统的P-LDPC码进行对比，可以成功重建的信源熵值的范围更大，而且，传输相同信源时，系统的地板区性能更优。

总之，文献[76]依据信源统计特性与信源编码速率的匹配准则，探索了信源P-LDPC码的优化设计的必要性。通过对比不同码型的信道译码阈值和信源译码阈值，表明了具有最优信道译码阈值的P-LDPC码并不一定具有最优的信源译码阈值，从而提出了用于信源压缩的P-LDPC码需要重新设计的观点。其次，利用信源PEXIT算法，提出了一种基于差分进化算法的码型搜索算法，设计出了高信源译码阈值的信源P-LDPC码。最后，由仿真结

果可见，在多种码率下，采用设计出的优化的信源P-LDPC码用作信源码时，系统具有更优的压缩性能，同时也表明进一步提升了系统的鲁棒性。通过对1/2码率的码进行码长扩展设计出了更低码率的码，为需要速率兼容的通信场景(例如混合自动重发请求(HARQ)系统)提供了可能。

4.1.2 信道码优化

对于分离的信道编码系统，译码器只是在校验节点和变量节点之间迭代信息，而对于基于DP-LDPC码的JSCC系统，软信息的迭代是在信源译码器和信道译码器之间进行，因此，在分离系统中最优的信道编码可能在联合系统中不一定也是最优。

基于JPEXIT算法，文献[75]提出了两种改进的信道码型 B_{IARA-1} 和 B_{IARA-2} (适当增加度为2的变量节点)，这两种码型相比于AR3A和AR4JA码，性能都有了一定的提高。EXIT分析阈值对比如表1所示。从仿真性能图8和图9中可以看出，改进的码型有0.3~0.5 dB的性能增益。

总之，经文献[75]分析研究发现，分离级联系统中最优的信道码在联合系统不再最优，P-LDPC码在JSCC系统中允许含有更多度为2的变量节点。因此，文中对经典的最优的AR4JA码和AR3A码进行了重新设计。JPEXIT分析和BER曲线仿真均表明，改进的基于DP-LDPC码的JSCC系统的瀑布区性能得到了明显改善。

表1 不同信源统计特性以及不同信道编码矩阵在基于DP-LDPC码的JSCC系统下对应的译码门限值

	$p(1) = 0.010$	$p(1) = 0.015$	$p(1) = 0.020$
B_{AR4JA}	-2.524	-1.450	-0.632
B_{IARA-1}	-3.145	-1.984	-1.155
B_{AR3A}	-3.248	-1.910	-0.965
B_{IARA-2}	-3.438	-2.254	-1.379

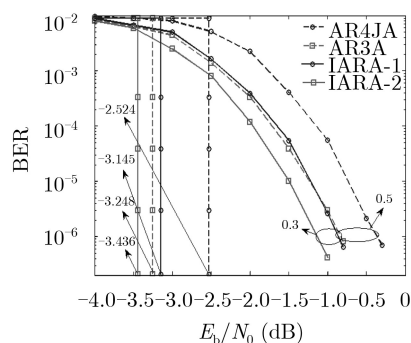


图8 基于DP-LDPC码的JSCC系统采用不同的信道P-LDPC码的BER性能对比($B_{L2} = 0$, $p(1) = 0.010$)

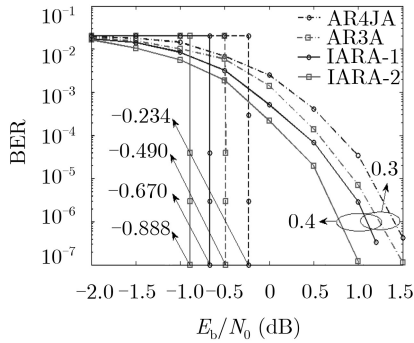


图9 基于DP-LDPC码的JSCC系统采用不同的信道P-LDPC码的BER性能对比($B_{L2} \neq 0, p(1) = 0.020$)

4.1.3 B_{L1} 优化

最近研究发现, 通过优化信源码和信道码之间的边连接(即联合基矩阵 B_J 中的 B_{L1} 和 B_{L2})可以提高JSCC系统的BER性能。文献[79]将具有不同行重的P-LDPC码用作信源码, 从同时考虑信源码和信道码的角度出发分析连接关系 B_{L1} , 在一定的约束条件下, 针对 B_{L1} 提出了基于JPEXIT和信源码PEXIT的搜索算法。该搜索算法可以用公式的形式描述为一个优化问题。这一过程的目标函数定义为

$$\min \delta(B_J, p(1)) \quad (6)$$

$$\text{s.t. } f(B_J, p(1)) = 1 \quad (7)$$

其中, $\delta(B_J, p(1))$ 表示通过JPEXIT计算的 B_J 的阈值。式(7)表示搜索目标及约束条件, 具体描述如下:

(1) $p(1) < p(1)^{st}$ 。 $p(1)^{st}$ 是指通过信源码PEXIT计算得到的信源统计概率阈值, 用以判断 $p(1)$ 是否满足无线通信标准 $BER=10^{-6}$ 的要求;

(2) B_{L1} 的每行只有一个“1”, 而且这些“1”在不同的列。

具体算法流程如表2所示。

针对较长码长的LDPC码, 在AWGN信道下进行EXIT分析与仿真, 分析结果均表明, 在 $BER=10^{-6}$ 下, 当信源统计概率 $p(1) = 0.08$ 和 $p(1) = 0.05$

表2 针对 B_{L1} 的搜索算法

(1) 给出 $p(1), B_s, B_c$, 且有 $B_{L2} = 0$;
(2) 初始化 $B_{L1} = 0$;
(3) 合并 B_s, B_c, B_{L1} 和 B_{L2} , 即为初始的 B_J ;
(4) $B_{J_min} \leftarrow B_J, \delta(B_{J_min}, p(1)) \leftarrow \delta(B_J, p(1))$;
(5) 如果 $p(1) < p(1)^{st}$
(6) 遍历除去信道码中的预编码器的所有的链接;
(7) 根据约束条件式(2)改变 B_{L1} ;
(8) 如果 $\delta(B_J, p(1)) < \delta(B_{J_min}, p(1))$
(9) $B_{J_min} \leftarrow B_J, \delta(B_{J_min}, p(1)) \leftarrow \delta(B_J, p(1))$;
(10) 输出: $B_{J_min}, \delta(B_{J_min}, p(1))$

时, 分别有0.25 dB, 1.10 dB的性能增益, 如图10所示。

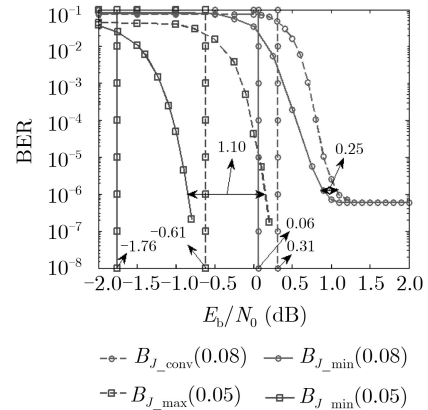


图10 当信源统计概率 $p(1) = 0.08$ 和 $p(1) = 0.05$ 时, 提出的搜索算法与传统优化方法的仿真结果对比

4.2 多成员要素优化

4.2.1 信源码与信道码联合优化

由于分离系统中最优的码型在JSCC系统中不一定也是最优的, 文献[80]基于P-LDPC的JSCC系统研究了信源码与信道码的联合优化设计, 以降低系统功耗。

文献[80]将信道码设计中的curve-fitting算法扩展到JSCC译码系统, 如图11所示, 通过跟踪信源译码器与信道译码器之间的互信息迭代, 提出信源码与信道码的联合最优设计准则。依据该设计准则, 在一定的约束条件下利用遗传算法搜索具有低SNR阈值的信源码与信道码。

对渐近无限长和中短长两种不同码长的码型, 文献[80]提出两种设计方案。图12为针对渐近无限长码长设计的码型的BER性能图。从图12中可以看出, 随着码长增加, 提出的码型性能较传统码型(R4JA, AR4JA)的优势越来越明显。针对中短码长, 文献[80]将码长的影响考虑到码型设计中。如

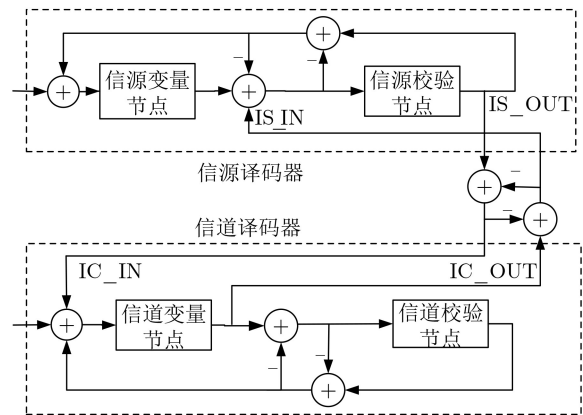


图11 信源译码器与信道译码器之间的互信息迭代译码框图

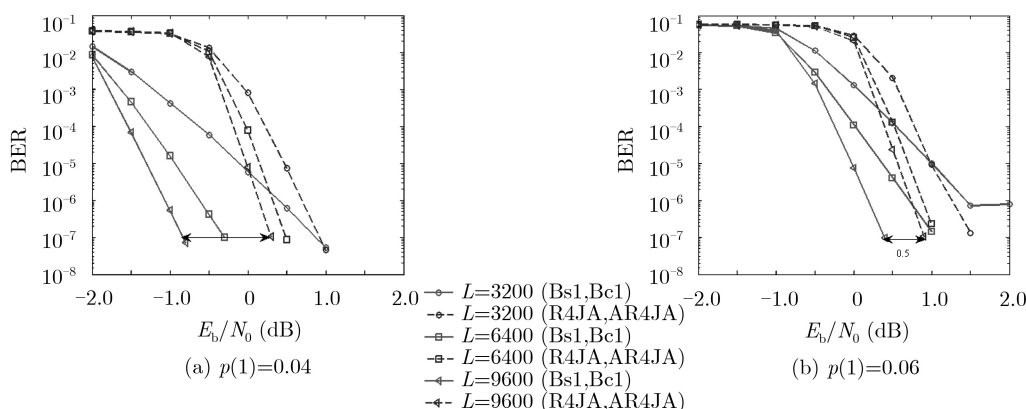


图 12 (R4JA, AR4JA)与针对渐近无限长码设计的码型BER性能对比

图13所示，在仿真码长 $L=3200$ 的情况下，与(R4JA, AR4JA)进行对比，提出的码型在 $p(1) = 0.04$ 与 $p(1) = 0.06$ 下分别有1 dB与0.7 dB的性能增益。

4.2.2 以度为2的变量节点为导向的联合优化

通过研究已知度为2的变量节点对系统的影响较大，在基于DP-LDPC码的JSCC系统中含有更多的度为2的变量节点时，在瀑布区和地板区的性能可能会有明显的改善。将DP-LDPC码作为一个整体，可以从整体的角度去设计，特别是度为2的变量节点的分配问题。

文献[81]采用差分进化算法搜索最优的 B_J ，其中，消耗函数为JPEXIT算法计算的联合译码阈值 $(E_b/N_0)_{th}$ 。通过对优化的 B_J 观察，针对基于DP-LDPC码的JSCC系统中整合角度设计 B_J 的步骤可以归纳为：

- (1) 根据 $p(1)$, m_s, n_s, m_c, n_c 确定度为2的变量节点的数量，然后确定预编码结构和度较高的变量节点数量；
- (2) 确定度为2变量节点的分配方案 (o_s, o_c) ，如

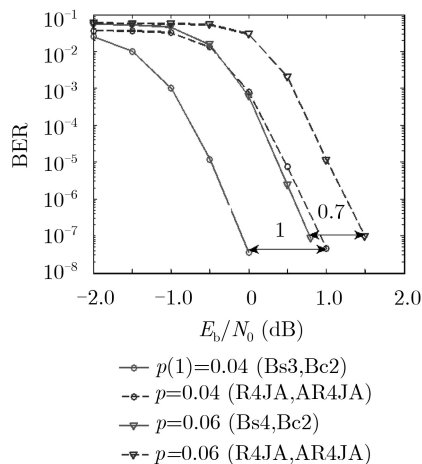


图 13 (R4JA, AR4JA) 与针对中短长码设计的码型BER性能对比 ($L=3200$)

有需要，对这些度为2的变量节点，搜索最优的排列方式；

(3) 为了减少搜索空间和复杂度，初始化预编码结构和度为3的结构；

(4) 给出其余元素的约束条件，然后利用差分算法以译码阈值为消耗函数搜索最优的 B_J 。

如图14所示， $B_{J4}^{0.01}$ 与 $B_{J1}^{0.01}$ ， $B_{J2}^{0.01}$ 和 $B_{J3}^{0.01}$ 对比，分别在 1×10^{-5} , 1×10^{-6} 和 1×10^{-7} 的BER水平处有0.8 dB, 0.4 dB以及0.1 dB的编码增益。如图15所示，随着度为2变量节点的数量增加， $B_{J2}^{0.04}$ ， $B_{J3}^{0.04}$ 和 $B_{J4}^{0.04}$ 的BER水平逐渐下降，它们相对于 $B_{J4}^{0.04}$ 在 1×10^{-7} 的BER水平处分别有0.30 dB, 0.40 dB和0.45 dB的编码增益。从编码复杂度的角度来讲，尽管信道P-LDPC码随着度为2的变量节点的增加，其边链接在减少，但是信源P-LDPC码的边链接是在增加，因此，整体的边链接数量基本保持不变，即整体的算法复杂度保持不变。在 $p(1) = 0.04$ 的情况下，整体的复杂度略有降低。

总之，文献[81]针对尺寸匹配的 B_J 提出了一种整体的分配设计方案。从整体的角度出发，考虑到度为2的变量节点在编码设计中的重要性，确定了

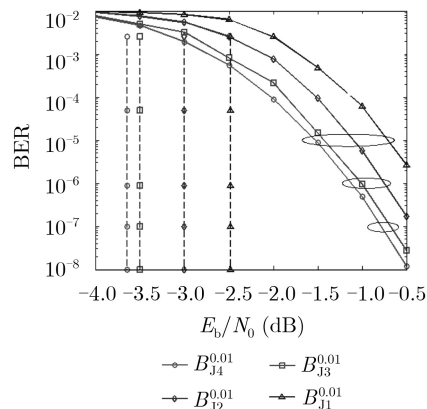


图 14 不同 B_J 在统计概率为 $p(1) = 0.01$ 时的BER性能对比

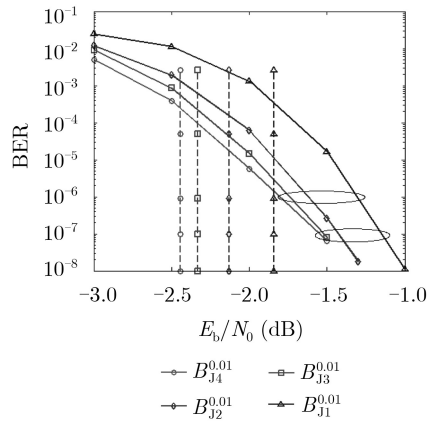


图 15 不同 B_j 在统计概率为 $p(1) = 0.04$ 时的BER性能对比

B_j 满足线性最小距离前提下度为2变量节点的最大数量。并且通过分析得出了度为2变量节点在信道P-LDPC码和信源P-LDPC码的分配方案：即尽可能多地分配度为2变量节点给信道P-LDPC码，可以获得更好的瀑布区性能。最后，给出了一般化的整体角度设计的步骤。仿真结果表明改进的 B_j 具有更好的性能，即分配度为2变量节点的最优方案能够使得系统性能得到改善，并且含有最大数量的度为2变量节点的 B_j 的性能最优。

5 结束语

随着信息时代的爆炸式发展，面对II中巨大的通信传输能耗，P-LDPC码在各种通信系统中已经显示出它们的优势，成为低功耗、低成本JSCC系统候选者。如何在JSCC方案中找到最佳码型仍然是一个值得继续探究的问题。本文针对P-LDPC码及其在各种改进系统中进行的相关研究分析以及部分设计优化工作做了总结归纳，这些设计理念也将启发其他类型码(例如猛兽代码^[86]和极性代码^[87])的分析与设计优化，以更加适用于各种各样的现代通信系统。

该研究领域已经引起较多学者的关注，未来尚有许多问题需要解决：

(1) 基于全部要素的联合基础矩阵优化，以同时提高瀑布区和地板区的性能；

(2) 从全局的角度出发，应用环境(包括信源统计和信道状态)与系统设计参数(包括信源码率和信道码率)之间的匹配标准有待进一步研究；

(3) 整体联合基础矩阵设计或者系统译码算法^[88-90]结构优化有待研究，以降低系统复杂性更加易于硬件实现；

(4) 针对不同信源类型、不同信道环境以及有损信源编码系统等等的探究工作也尚待展开。

因此，未来需要付出更多的努力致力于该低功耗、低成本系统的进一步研究。

参考文献

- [1] LIN Jie, YU Wei, ZHANG Nan, *et al.* A survey on internet of things: Architecture, enabling technologies, security and privacy, and applications[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2017, 4(5): 1125–1142. doi: [10.1109/JIOT.2017.2683200](https://doi.org/10.1109/JIOT.2017.2683200).
- [2] GUYADER A, FABRE E, GUILLEMOT C, *et al.* Joint source-channel turbo decoding of entropy-coded sources[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2001, 19(9): 1680–1696. doi: [10.1109/49.947033](https://doi.org/10.1109/49.947033).
- [3] 周延蕾, 梁钊, 蒙山, 等. 信源信道联合编码的一种方法[J]. 电子与信息学报, 2001, 23(11): 1110–1115.
ZHOU Yanlei, LIANG Zhao, MENG Shan, *et al.* A joint source/channel coding design[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2001, 23(11): 1110–1115.
- [4] PU Lingling, WU Zhenyu, BILGIN A, *et al.* LDPC-based iterative joint source-channel decoding for JPEG2000[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, 16(2): 577–581. doi: [10.1109/TIP.2006.888329](https://doi.org/10.1109/TIP.2006.888329).
- [5] RICHARDSON T, SHOKRROLLAHI A, and URBANKE R. Design of capacity-approaching irregular low-density parity-check codes[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2001, 47(2): 619–637. doi: [10.1109/18.910578](https://doi.org/10.1109/18.910578).
- [6] DEL SER J, CRESPO P M, ESNAOLA I, *et al.* Joint source-channel coding of sources with memory using Turbo codes and the burrows-wheeler transform[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2010, 58(7): 1984–1992. doi: [10.1109/TCOMM.2010.07.090141](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2010.07.090141).
- [7] BI Chongyuan and LIANG Jie. Joint source-channel coding of JPEG 2000 image transmission over two-way multi-relay networks[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2017, 26(7): 3594–3608. doi: [10.1109/TIP.2017.2700765](https://doi.org/10.1109/TIP.2017.2700765).
- [8] 洪少华, 王琳. 基于原模图LDPC码的分布式联合信源信道编码[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(11): 2594–2599. doi: [10.11999/JEIT170113](https://doi.org/10.11999/JEIT170113).
HONG Shaohua and WANG Lin. Protograph LDPC based distributed joint source channel coding[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(11): 2594–2599. doi: [10.11999/JEIT170113](https://doi.org/10.11999/JEIT170113).
- [9] CALLAGER R G. *Low-Density Parity-Check Codes*[M]. Cambridge: MIT Press, 1963.
- [10] TANNER R. A recursive approach to low complexity codes[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1981, 27(5): 533–547. doi: [10.1109/TIT.1981.1056404](https://doi.org/10.1109/TIT.1981.1056404).
- [11] MACKAY D J C and NEAL R M. Good codes based on very sparse matrices[C]. The 5th IMA International Conference on Cryptography and Coding, Cirencester, UK, 1995: 100–111.
- [12] SPIELMAN D A. Linear-time encodable and decodable

- error-correcting codes[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1996, 42(6): 1723–1731. doi: [10.1109/18.556668](https://doi.org/10.1109/18.556668).
- [13] ALON N and LUBY M. A linear time erasure-resilient code with nearly optimal recovery[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1996, 42(6): 1732–1736. doi: [10.1109/18.556669](https://doi.org/10.1109/18.556669).
- [14] SIPSER M and SPIELMAN D A. Expander codes[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1996, 42(6): 1710–1722. doi: [10.1109/18.556667](https://doi.org/10.1109/18.556667).
- [15] MACKAY D J C and NEAL R M. Near Shannon limit performance of low density parity check codes[J]. *Electronics Letters*, 1997, 33(6): 457–458. doi: [10.1049/el:19970362](https://doi.org/10.1049/el:19970362).
- [16] LUBY M G, MITZENMACHER M, SHOKROLLAHI M A, et al. Practical loss-resilient codes[C]. The 29th ACM Symposium on Theory of Computing, El Paso, 1997: 150–159.
- [17] DAVEY M C and MACKAY D. Low-density parity check codes over $GF(q)$ [J]. *IEEE Communications Letters*, 1998, 2(6): 165–167. doi: [10.1109/4234.681360](https://doi.org/10.1109/4234.681360).
- [18] MACKAY D J C. Good error-correcting codes based on very sparse matrices[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1999, 45(2): 399–431. doi: [10.1109/18.748992](https://doi.org/10.1109/18.748992).
- [19] MACKAY D J C, WILSON S T, and DAVEY M C. Comparison of constructions of irregular Gallager codes[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1999, 47(10): 1449–1454. doi: [10.1109/26.795809](https://doi.org/10.1109/26.795809).
- [20] RICHARDSON T J and URBANKE R L. The capacity of low-density parity-check codes under message-passing decoding[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2001, 47(2): 599–618. doi: [10.1109/18.910577](https://doi.org/10.1109/18.910577).
- [21] RICHARDSON T J and URBANKE R L. Efficient encoding of low-density parity-check codes[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2001, 47(2): 638–656. doi: [10.1109/18.910579](https://doi.org/10.1109/18.910579).
- [22] RICHARDSON T and URBANKE R. The renaissance of Gallager's low-density parity-check codes[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2003, 41(8): 126–131. doi: [10.1109/MCOM.2003.1222728](https://doi.org/10.1109/MCOM.2003.1222728).
- [23] ZYABLOV V V and PINSKER M S. Estimation of the error-correction complexity for Gallager low-density codes[J]. *Problemy Peredachi Informatsii*, 1975, 11(1): 23–26.
- [24] MARGULIS G A. Explicit constructions of graphs without short cycles and low density codes[J]. *Combinatorica*, 1982, 2(1): 71–78. doi: [10.1007/BF02579283](https://doi.org/10.1007/BF02579283).
- [25] TEN BRINK S. Convergence behavior of iteratively decoded parallel concatenated codes[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2001, 49(10): 1727–1737. doi: [10.1109/26.957394](https://doi.org/10.1109/26.957394).
- [26] TEN BRINK S, KRAMER G, and ASHIKHMIN A. Design of low-density parity-check codes for modulation and detection[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2004, 52(4): 670–678. doi: [10.1109/TCOMM.2004.826370](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2004.826370).
- [27] ASHIKHMIN A, KRAMER G, and TEN BRINK S. Extrinsic information transfer functions: Model and erasure channel properties[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2004, 50(11): 2657–2673. doi: [10.1109/TIT.2004.836693](https://doi.org/10.1109/TIT.2004.836693).
- [28] FRANCESCHINI M, FERRARI G, and RAHELI R. Does the performance of LDPC codes depend on the channel?[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2006, 54(12): 2129–2132. doi: [10.1109/TCOMM.2006.885042](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2006.885042).
- [29] PENG F, RYAN W E, and WESEL R D. Surrogate-channel design of universal LDPC codes[J]. *IEEE Communications Letters*, 2006, 10(6): 480–482. doi: [10.1109/LCOMM.2006.1638622](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2006.1638622).
- [30] XIAO Hua and BANIHASHEMI A H. Improved progressive-edge-growth (PEG) construction of irregular LDPC codes[J]. *IEEE Communications Letters*, 2004, 8(12): 715–717. doi: [10.1109/LCOMM.2004.839612](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2004.839612).
- [31] HU Xiaoyu, ELEFThERIOU E, and ARNOLD D M. Regular and irregular progressive edge-growth tanner graphs[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2005, 51(1): 386–398. doi: [10.1109/TIT.2004.839541](https://doi.org/10.1109/TIT.2004.839541).
- [32] RICHTER G and HOF A. On a construction method of irregular LDPC codes without small stopping sets[C]. 2006 IEEE International Conference on Communications, Istanbul, Turkey, 2006: 1119–1124. doi: [10.1109/ICC.2006.254897](https://doi.org/10.1109/ICC.2006.254897).
- [33] 周琳, 吴镇扬. 迭代结构的信源信道联合解码及其简化算法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(10): 2427–2431.
ZHOU Lin and WU Zhenyang. Simplified iterative joint source-channel decoding algorithm[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(10): 2427–2431.
- [34] ZHENG Xia, LAU F C M, and TSE C K. Constructing short-length irregular LDPC codes with low error floor[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2010, 58(10): 2823–2834. doi: [10.1109/TCOMM.2010.083110.080638](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2010.083110.080638).
- [35] BONELLO N, CHEN Sheng, and HANZO L. Low-density parity-check codes and their rateless relatives[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2011, 13(1): 3–26. doi: [10.1109/SURV.2011.040410.00042](https://doi.org/10.1109/SURV.2011.040410.00042).
- [36] MOURA J M F, LU Jin, and ZHANG Haotian. Structured low-density parity-check codes[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2004, 21(1): 42–55. doi: [10.1109/MSP.2004](https://doi.org/10.1109/MSP.2004).

- 1267048.
- [37] LIVA G, SONG Shumei, LAN Lan, *et al.* Design of LDPC codes: A survey and new results[J]. *Journal of Communications Software and Systems*, 2006, 2(3): 191–211. doi: [10.24138/jcomss.v2i3.283](https://doi.org/10.24138/jcomss.v2i3.283).
- [38] EL-HAJJAR M and HANZO L. EXIT charts for system design and analysis[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2014, 16(1): 127–153. doi: [10.1109/SURV.2013.050813.00137](https://doi.org/10.1109/SURV.2013.050813.00137).
- [39] YAZDANI M R, HEMATI S, and BANIHASHEMI A H. Improving belief propagation on graphs with cycles[J]. *IEEE Communications Letters*, 2004, 8(1): 57–59. doi: [10.1109/LCOMM.2003.822499](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2003.822499).
- [40] TAGHAVI M H and SIEGEL P H. Adaptive methods for linear programming decoding[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2008, 54(12): 5396–5410. doi: [10.1109/TIT.2008.2006384](https://doi.org/10.1109/TIT.2008.2006384).
- [41] BURSHTEIN D and MILLER G. Asymptotic enumeration methods for analyzing LDPC codes[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2004, 50(6): 1115–1131. doi: [10.1109/TIT.2004.828064](https://doi.org/10.1109/TIT.2004.828064).
- [42] LITSYN S and SHEVELEV V. Distance distributions in ensembles of irregular low-density parity-check codes[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2003, 49(12): 3140–3159. doi: [10.1109/TIT.2003.820012](https://doi.org/10.1109/TIT.2003.820012).
- [43] VARNICA N, FOSSORIER M P C, and KAVCIC A. Augmented belief propagation decoding of low-density parity check codes[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2007, 55(7): 1308–1317. doi: [10.1109/TCOMM.2007.900611](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2007.900611).
- [44] KIM K J, CHUNG J H, and YANG K. Bounds on the size of parity-check matrices for quasi-cyclic low-density parity-check codes[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2013, 59(11): 7288–7298. doi: [10.1109/TIT.2013.2279831](https://doi.org/10.1109/TIT.2013.2279831).
- [45] TASDIGHI A, BANIHASHEMI A H, and SADEGHI M R. Efficient search of girth-optimal QC-LDPC codes[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2016, 62(4): 1552–1564. doi: [10.1109/TIT.2016.2523979](https://doi.org/10.1109/TIT.2016.2523979).
- [46] STEINER F, BÖCHERER G, and LIVA G. Protograph-based LDPC code design for shaped bit-metric decoding[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2016, 34(2): 397–407. doi: [10.1109/JSAC.2015.2504298](https://doi.org/10.1109/JSAC.2015.2504298).
- [47] MU Xijin, SHEN Conghui, and BAI Baoming. A combined algebraic- and graph-based method for constructing structured RC-LDPC codes[J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20(7): 1273–1276. doi: [10.1109/LCOMM.2016.2558152](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2558152).
- [48] ANDREWS K S, DIVSALAR D, DOLINAR S, *et al.* The development of turbo and LDPC codes for deep-space applications[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2007, 95(11): 2142–2156. doi: [10.1109/JPROC.2007.905132](https://doi.org/10.1109/JPROC.2007.905132).
- [49] CALZOLARI G P, CHIARI M, CHIARALUCE F, *et al.* Channel coding for future space missions: New requirements and trends[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2007, 95(11): 2157–2170. doi: [10.1109/JPROC.2007.905134](https://doi.org/10.1109/JPROC.2007.905134).
- [50] UCHOA A G D, HEALY C T, and DE LAMARE R C. Iterative detection and decoding algorithms for MIMO systems in block-fading channels using LDPC codes[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(4): 2735–2741. doi: [10.1109/TVT.2015.2432099](https://doi.org/10.1109/TVT.2015.2432099).
- [51] DJORDJEVIC I B. On the irregular nonbinary QC-LDPC-coded hybrid multidimensional OSD-modulation enabling beyond 100 Tb/s optical transport[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(16): 2669–2675. doi: [10.1109/JLT.2013.2272328](https://doi.org/10.1109/JLT.2013.2272328).
- [52] RAFATI A, LOU Huang, and XIAO Chengshan. Soft-decision feedback turbo equalization for LDPC-coded MIMO underwater acoustic communications[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2014, 39(1): 90–99. doi: [10.1109/JOE.2013.2241933](https://doi.org/10.1109/JOE.2013.2241933).
- [53] SONG H, TODD R M, and CRUZ J R. Low density parity check codes for magnetic recording channels[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2000, 36(5): 2183–2186. doi: [10.1109/20.908351](https://doi.org/10.1109/20.908351).
- [54] KURKOSKI B M, SIEGEL P H, and WOLF J K. Joint message-passing decoding of LDPC codes and partial-response channels[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2002, 48(6): 1410–1422. doi: [10.1109/TIT.2002.1003830](https://doi.org/10.1109/TIT.2002.1003830).
- [55] KSCHISCHANG F R. Codes defined on graphs[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2003, 41(8): 118–125. doi: [10.1109/MCOM.2003.1222727](https://doi.org/10.1109/MCOM.2003.1222727).
- [56] LIN Shu and COSTELLO D J. Error Control Coding: Fundamentals and Applications[M]. 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2004.
- [57] RYAN W E. An Introduction to LDPC Codes[M]. VASIC B. CRC Handbook for Coding and Signal Processing for Recording Systems. Boca Raton: CRC Press, 2004.
- [58] RICHARDSON T and URBANKE R. Modern Coding Theory[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2008.
- [59] RICHARDSON T and URBANKE R. Multi-edge type LDPC codes (2004)[EB/OL]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.106.7310>, 2002.
- [60] THORPE J. Low-Density Parity-Check (LDPC) codes constructed from protographs[R]. IPN Progress Report, 2003: 42–154.
- [61] DIVSALAR D, JONES C, DOLINAR S, *et al.* Protograph

- based LDPC codes with minimum distance linearly growing with block size[C]. 2005 IEEE Global Telecommunications Conference, St. Louis, France, 2005: 1152–1156.
- [62] ABBASFAR A, DIVSALAR D, and YAO K. Accumulate-repeat-accumulate codes[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2007, 55(4): 692–702. doi: [10.1109/TCOMM.2007.894109](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2007.894109).
- [63] 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](https://doi.org/10.1109/JSAC.2009.090806).
- [64] VAN NGUYEN T, NOSRATINIA A, and DIVSALAR D. Bilayer protograph codes for half-duplex relay channels[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(5): 1969–1977. doi: [10.1109/TWC.2013.040413.111745](https://doi.org/10.1109/TWC.2013.040413.111745).
- [65] FANG Yi, GUAN Yongliang, BI Guoan, *et al.* Rate-compatible root-protograph LDPC codes for quasi-static fading relay channels[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(4): 2741–2747. doi: [10.1109/TVT.2015.2420570](https://doi.org/10.1109/TVT.2015.2420570).
- [66] VAN NGUYEN T. Design of capacity-approaching protograph-based LDPC coding systems[D]. [Ph. D. dissertation], The University of Texas at Dallas, 2012.
- [67] FANG Yi, BI Guoan, and GUAN Yongliang. Design and analysis of root-protograph LDPC codes for non-ergodic block-fading channels[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14(2): 738–749. doi: [10.1109/TWC.2014.2359221](https://doi.org/10.1109/TWC.2014.2359221).
- [68] KARIMI M and BANIHASHEMI A H. On the girth of quasi-cyclic protograph LDPC codes[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2013, 59(7): 4542–4552. doi: [10.1109/TIT.2013.2251395](https://doi.org/10.1109/TIT.2013.2251395).
- [69] LIVA G and CHIARI M. Protograph LDPC codes design based on EXIT analysis[C]. 2007 IEEE Global Telecommunications Conference, Washington, USA, 2007: 3250–3254.
- [70] FRESIA M, PERÉZ-CRUZ F, POOR H V, *et al.* Joint source and channel coding[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2010, 27(6): 104–113.
- [71] HE Jiguang, WANG Lin, and CHEN Pingping. A joint source and channel coding scheme based on simple protograph structured codes[C]. 2012 International Symposium on Communications and Information Technologies, Gold Coast, 2012: 65–69.
- [72] WANG Lin, WU Huihui, and HONG Shaohua. The sensitivity of joint source-channel coding based on double protograph LDPC codes to source statistics[C]. The 9th International Symposium on Medical Information and Communication Technology, Kamakura, Japan, 2015: 213–217.
- [73] WU Huihui, WANG Lin, and HONG Shaohua, *et al.* Performance of joint source-channel coding based on protograph LDPC codes over rayleigh fading channels[J]. *IEEE Communications Letters*, 2014, 18(4): 652–655. doi: [10.1109/LCOMM.2014.022714.140112](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2014.022714.140112).
- [74] CHEN Chen, WANG Lin, and XIONG Zixiang. Matching criterion between source statistics and source coding rate[J]. *IEEE Communications Letters*, 2015, 19(9): 1504–1507. doi: [10.1109/LCOMM.2015.2454505](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2015.2454505).
- [75] CHEN Qiwang, WANG Lin, HONG Shaohua, *et al.* Performance improvement of JSCC scheme through redesigning channel code[J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20(6): 1088–1091. doi: [10.1109/LCOMM.2016.2554543](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2554543).
- [76] CHEN Chen, WANG Lin, and LIU Sanya. The design of protograph LDPC codes as source codes in a JSCC system[J]. *IEEE Communications Letters*, 2018, 22(4): 672–675. doi: [10.1109/LCOMM.2018.2804382](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2018.2804382).
- [77] NETO H V B and HENKEL W. Multi-edge optimization of low-density parity-check codes for joint source-channel coding[C]. The 9th International ITG Conference on Systems, Communication and Coding, München, Deutschland, 2013: 1–6.
- [78] HONG Shaohua, CHEN Qiwang, and WANG Lin. Performance analysis and optimisation for edge connection of JSCC system based on double protograph LDPC codes[J]. *IET Communications*, 2018, 12(2): 214–219. doi: [10.1049/iet-com.2017.0787](https://doi.org/10.1049/iet-com.2017.0787).
- [79] LIU Sanya, CHEN Chen, WANG Lin, *et al.* Edge connection optimization for JSCC system based on DP-LDPC codes[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2019, 8(4): 996–999. doi: [10.1109/LWC.2019.2903442](https://doi.org/10.1109/LWC.2019.2903442).
- [80] CHEN Chen, WANG Lin, and LAU F C M. Joint optimization of protograph LDPC code pair for joint source and channel coding[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2018, 66(8): 3255–3267. doi: [10.1109/TCOMM.2018.2814603](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2018.2814603).
- [81] CHEN Qiwang, WANG Lin, HONG Shaohua, *et al.* Integrated design of JSCC scheme based on double protograph LDPC codes system[J]. *IEEE Communications Letters*, 2019, 23(2): 218–221. doi: [10.1109/LCOMM.2018.2890243](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2018.2890243).
- [82] XU Liangliang, WANG Lin, HONG Shaohua, *et al.* New results on radiography image transmission with unequal error protection using protograph double LDPC codes[C]. The 8th International Symposium on Medical Information

- and Communication Technology, Firenze, Italy, 2014: 1–4.
- [83] CHEN Qiwan, WANG Lin, and HONG Shaohua. An image pre-processing approach for JSCC scheme based on double protograph LDPC codes[C]. The 16th International Symposium on Communications and Information Technologies, Qingdao, China, 2016: 109–112.
- [84] DENG Li, SHI Zhiping, LI Ouxun, *et al.* Joint coding and adaptive image transmission scheme based on DP-LDPC codes for IoT scenarios[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 18437–18449. doi: [10.1109/ACCESS.2019.2895368](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2895368).
- [85] RAHNAVAR N and FEKRI F. New results on unequal error protection using LDPC codes[J]. *IEEE Communications Letters*, 2006, 10(1): 43–45. doi: [10.1109/LCOMM.2006.1576564](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2006.1576564).
- [86] SHOKROLLAHI A. Raptor codes[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(6): 2551–2567. doi: [10.1109/TIT.2006.874390](https://doi.org/10.1109/TIT.2006.874390).
- [87] 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. doi: [10.1109/TIT.2009.2021379](https://doi.org/10.1109/TIT.2009.2021379).
- [88] 陶雄飞, 王跃东, 柳盼. 基于变量节点更新的LDPC码加权比特翻转译码算法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(3): 688–693. doi: [10.11999/JEIT150720](https://doi.org/10.11999/JEIT150720).
- TAO Xiongfei, WANG Yuedong, and LIU Pan. Weighted bit-flipping decoding algorithm for LDPC codes based on updating of variable nodes[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(3): 688–693. doi: [10.11999/JEIT150720](https://doi.org/10.11999/JEIT150720).
- [89] 鄢懿, 张灿, 郭振永, 等. 基于混沌密钥控制的联合信源信道与安全算术码编译码算法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(10): 2553–2559. doi: [10.11999/JEIT151429](https://doi.org/10.11999/JEIT151429).
- YAN Yi, ZHANG Can, GUO Zhenyong, *et al.* Joint source channel and security arithmetic coding controlled by chaotic keys[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(10): 2553–2559. doi: [10.11999/JEIT151429](https://doi.org/10.11999/JEIT151429).
- [90] 吕毅博, 胡伟, 王琳. Beyond-BP译码算法综述: 原理与应用[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(6): 1503–1514. doi: [10.11999/JEIT161288](https://doi.org/10.11999/JEIT161288).
- LÜ Yibo, HU Wei, and WANG Lin. Survey of Beyond-BP decoding algorithms: Theory and applications[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(6): 1503–1514. doi: [10.11999/JEIT161288](https://doi.org/10.11999/JEIT161288).
- 王琳: 男, 1963年生, 教授, 研究方向为信息论与宽带无线通信理论.
- 刘三亚: 女, 1988年生, 博士生, 研究方向为联合信源信道编码.
- 陈辰: 女, 1990年生, 讲师, 研究方向为联合信源信道编码.
- 陈启望: 男, 1990年生, 讲师, 研究方向为联合信源信道编码.