基于原模图 LDPC 码的分布式联合信源信道编码

洪少华* 王 琳

(厦门大学通信工程系 厦门 361005)

摘要:该文提出一种基于原模图低密度奇偶校验(P-LDPC)码的分布式联合信源信道编译码系统方案。该方案编码端,分布式信源发送部分信息位及校验位以同时实现压缩及纠错功能;译码端,联合迭代信源信道译码的运用进一步发掘信源的相关性以获得额外的编码增益。此外,论文研究了所提方案在译码端未知相关性系数的译码算法。
 仿真结果表明,所提出的基于 P-LDPC 码的分布式联合信源信道编译码方案在外部迭代次数不大的情况可以获得较大的性能增益,并且相关性系数在译码端已知和未知系统性能基本相当。
 关键词:分布式联合信源信道编码;相关信源;联合迭代译码;原模图 LDPC 码
 中图分类号: TN911.22
 文献标识码: A
 文章编号: 1009-5896(2017)11-2594-06
 DOI: 10.11999/JEIT170113

Protograph LDPC Based Distributed Joint Source Channel Coding

HONG Shaohua WANG Lin

(Department of Communication Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: This paper proposes a Distributed Joint Source-Channel Coding (DJSCC) scheme using Protograph Low Density Parity Check (P-LDPC) code. In the proposed scheme, the distributed source encoder sends some information bits together with the parity bits to simultaneously achieve both distributed compression and channel error correction. Iterative joint decoding is introduced to further exploit the source correlation. Moreover, the proposed scheme is investigated when the correlation between sources is not known at the decoder. Simulation results indicate that the proposed DJSCC scheme can obtain relatively large additional coding gains at a relatively small number of global iterations, and the performance for unknown correlated sources is almost the same as that for known correlated sources since correlation can be estimated jointly with the iterative decoding process. **Key words**: Distributed Joint Source-Channel Coding (DJSCC); Correlated sources; Iterative joint decoding; Protograph LDPC code (P-LDPC)

1 引言

分布式编码理论由 Slepian 和 Wolf于 1973 年提 出:两个离散相关信源在不相互通信进行分布式压 缩编码,在接收端实现联合译码能达到信源相互通 信的联合编译码相同的性能,即 Slepian-Wolf (SW) 定理。可以说,分布式信源编码(Distributed Source Coding, DSC)可以有效地将编码端的复杂度转到解 码端,并能获得较高的编码效率。近年来,随着 DSC 技术应用越来越广泛,如无线传感器网络、无线视 频监控、多视角视频采集等,DSC 技术在国内外已

成为重要的研究内容^[1-6]。

现有的 DSC 技术实现方案大多是基于信道码 实现的,如Turbo码、低密度奇偶校验(Low Density Parity Check, LDPC)码等, 且已有研究证明: 针对 离散相关信源,若采用的信道码的编译码性能达到 香农限,那么用该信道码实现压缩的效率能够接近 SW 限。基于信道编码理论的 DSC 技术主要有两种 实现方式:基于伴随式(Syndrome)的 DSC 方案^[7-10] 与基于校验位(Parity)的 DSC 方案^[11-15]。研究表明: 在理想信道下,基于 Syndrome 的 DSC 方案具有最 优的压缩性能,而在噪声信道下,基于 Parity 的 DSC 方案性能比较优。这是因为基于 Syndrome 的 DSC 方案只对信源进行压缩,并没有抗差错特性; 而基于 Parity 的 DSC 方案,虽然只利用了一个信 道码,却同时实现了压缩与抗差错功能,即实现了 分布式联合信源信道编码(Distributed Joint Source-Channel Coding, DJSCC).

收稿日期: 2017-02-10; 改回日期: 2017-05-31; 网络出版: 2017-06-30 *通信作者: 洪少华 hongsh@xmu.edu.cn

基金项目: 福建省自然科学基金(2014J01248), 国家自然科学基金 (61271241, 61671395)

Foundation Items: The Natural Science Foundation of Fujian Province (2014J01248), The National Natural Science of Foundation of China (61271241, 61671395)

DJSCC 将 DSC 技术与信道编码联合考虑,同 时实现了压缩与抗差错功能,更适合实际的应用场 景,深受国内外研究学者们的关注^[13-18]。通常 DJSCC 技术可以分为两大类,一类为不对称压 缩^[13-15],即其中一个分布式信源在译码端无损可 得,并作为其他分布式信源的边信息以进行联合译 码;另一类为对称或"非不对称"压缩^[16-18],即所 有的分布式信源均实现压缩效果。目前相比于不对 称结构,对称或"非不对称"的 DJSCC 技术研究 工作相对较少。文献[16]研究了加性高斯白噪声 (AWGN)信道下,利用 Turbo 码实现两路相关信源 同时传输的 DJSCC 方案。文献[17]研究了基于 LDGM(Low-Density Generator Matrix)码实现的 "非不对称"结构的 DJSCC 方案,并分析其在 AWGN 与多接入噪声信道的性能。文献[18]基于 LDPC 码给出通用的"非不对称"结构的 DJSCC 实现方案,并借助 EXIT 分析算法优化相关码型及 码率。

原模图 LDPC(P-LDPC)码鉴于其独特的构造 方式,具有简单的编译码结构,易于硬件实现;且 在性能又明显优于传统的 LDPC 码^[19]。为此,本文 提出一种基于 P-LDPC 码的 DJSCC 系统。文章第 2 节详细描述了基于 P-LDPC 码的 DJSCC 系统的 编译码结构;第3节探究了所提 DJSCC 系统在译 码端未知相关性系数的译码思想;第4节给出了仿 真结果与分析,最后一节对全文进行了总结。

2 基于 P-LDPC 码的 DJSCC 系统

图 1 所示为本文所提的基于 P-LDPC 码的 DJSCC 系统结构。不失一般性,假设通信系统有两 个相关信源 S_1 和 S_2 ,其中信源概率为 $P[S_1 = 0] =$

 $P[S_2 = 0] = 1/2$,两者间的相关性定义为 ρ ,通常建 模为虚拟的转移概率为 $P[S_2 ≠ S_1|S_1] = \rho$ 的 BSC 信 道,调制模式为 BPSK,信道模型为 AWGN 信道。

2.1 编码端

假设信源 S_1 和 S_2 信息序列长度均为 k bit, 经过 P-LDPC 编码后分别产生长度为 P_1 与 P_2 的校验位, 则编码后总码长分别为 $n_1 = k + P_1$ 与 $n_2 = k + P_2$, 相应的编码码率为 $R_1 = k/n_1$ 与 $R_2 = k/n_2$ 。和传统的 基于 Parity 的 DJSCC 系统^[12,18]类似,所提的 DJSCC 系统分布式信源均发送部分信息位及校验位以同时 实现压缩及纠错功能。如图 1 所示,信源 S_1 只发送 信息比特的前 αk 部分及校验比特,其中 α 是介于 0 至 1 之间的常数;而信源 S_2 则发送信息比特的后 $(1-\alpha)k$ 部分及校验比特。因此,分布式信源 S_1 和 S_2 的压缩率分别为 $R_{S1} = (\alpha k + P_1)/k$ 和 $R_{S2} = ((1-\alpha)k$ + $P_2)/k$ 。

2.2 译码端

2.2.1 P-LDPC 译码 在译码端, P-LDPC 码译码器 采样经典的 BP 译码算法,唯一不同点在于编码比 特的初始化似然信息(LLRs)值。不失一般性地以信 源 *S*₁ 为例进行说明。

设 Z_1 为信源 S_1 编码比特的初始化 LLRs 值。图 2 所示为信源 S_1 编码后比特发送过程图,可以明显 发现 Z_1 将由两部分组成,第1部分为 S_1 发送的经过 AWGN 信道的信息,包括前 αk 信息比特及校验比 特。该部分与传统的信道编码处理方式类似,利用 接收到的有噪声信息进行初始化。假设接收到的信 息为 r_1 ,则其初始化 LLRs 值为

$$Z_{1}^{j} = L_{c}\left(r_{1}\right) = \begin{cases} 2r_{1}^{j} / \sigma^{2}, & j = 1, 2, \cdots, \alpha k\\ 2r_{1}^{j-k+\alpha k} / \sigma^{2}, & j = k+1, \cdots, k+P_{1} \end{cases}$$
(1)



图 1 基于 P-LDPC 码的 DJSCC 系统



图 2 信源 S₁ 的发送信道模型

第 2 部分为信源 S_1 未发送的后 $(1 - \alpha)k$ 信息比特,将从接收到的信源 S_2 发送的信息 r_2 获得,相应的计算过程如式(2)和式(3):

$$P(r_{2}|S_{1}^{j}=1) = P(S_{2}^{j}=0|S_{1}^{j}=1) \cdot P(r_{2}^{j-\alpha k}|S_{2}^{j}=0) + P(S_{2}^{j}=1|S_{1}^{j}=1) \cdot P(r_{2}^{j-\alpha k}|S_{2}^{j}=1) = \rho \cdot P(r_{2}^{j-\alpha k}|S_{2}^{j}=0) + (1-\rho) \cdot P(r_{2}^{j-\alpha k}|S_{2}^{j}=1)$$
(2)
$$P(r_{2}|S_{1}^{j}=0) = P(S_{2}^{j}=0|S_{1}^{j}=0) \cdot P(r_{2}^{j-\alpha k}|S_{2}^{j}=0) + P(S_{2}^{j}=1|S_{1}^{j}=0) \cdot P(r_{2}^{j-\alpha k}|S_{2}^{j}=1)$$
(1)

$$+ \rho \cdot P\left(r_2^{j-\alpha k} \mid S_2^j = 1\right)$$
(3)

则

$$Z_{1}^{j} = \ln \frac{P(r_{2}|S_{1}^{j} = 1)}{P(r_{2}|S_{1}^{j} = 0)}$$

$$= \ln \frac{\rho + (1-\rho) \cdot \frac{P(r_{2}^{j-\alpha k}|S_{2}^{j} = 1)}{P(r_{2}^{j-\alpha k}|S_{2}^{j} = 0)}}{(1-\rho) + \rho \cdot \frac{P(r_{2}^{j-\alpha k}|S_{2}^{j} = 1)}{P(r_{2}^{j-\alpha k}|S_{2}^{j} = 0)}}$$

$$= \ln \frac{\rho + (1-\rho) \cdot \exp(2r_{2}^{j-\alpha k}/\sigma^{2})}{(1-\rho) + \rho \cdot \exp(2r_{2}^{j-\alpha k}/\sigma^{2})}$$

$$= \ln \frac{\rho + (1-\rho) \cdot \exp(L_{c}(r_{2}))}{(1-\rho) + \rho \cdot \exp(L_{c}(r_{2}))},$$

$$j = \alpha k + 1, \alpha k + 2, \cdots, k \qquad (4)$$

在 Z_1 初始化后利用传统的 BP 译码算法即可实 现 P-LDPC 译码。

2.2.2 联合迭代信源信道译码 从上述的 P-LDPC 译码算法可以看出,信源的相关性只在初始化 LLRs 值用到。为了进一步发掘信源间的相关性以获得额 外的性能增益,所提的 DJSCC 系统引入联合迭代 译码思想^[20],相应的实现框图如图 1 所示。在 P-LDPC 译码得到信息序列的判决似然信息

 $L^{(i)}(\hat{S}_1)$ 和 $L^{(i)}(\hat{S}_2)$ 后,基于相关性系数 ρ 根据式(5) 和式(6)计算信息比特的相关外部信息: $L^{(i)}(\hat{S}_1) = L^{(i)}(z \oplus \hat{S}_2) \approx \operatorname{sign}(L(z))$

$$\sum_{\text{ex}} (S_1) = L^{(i)} \left(z \oplus \widehat{S}_2 \right) + \text{Exp}\left(\left(L_{\rho}(z) \right) \right)$$

$$+ \text{sign}\left(L^{(i)} \left(\widehat{S}_2 \right) \right) + \min\left(\left| L_{\rho}(z) \right|, \left| L^{(i)} \left(\widehat{S}_2 \right) \right| \right) \quad (5)$$

$$L_{\text{ex}}^{(i)} \left(\widehat{S}_2 \right) = L^{(i)} \left(z \oplus \widehat{S}_1 \right) \approx \text{sign}\left(L_{\rho}(z) \right)$$

$$\cdot \operatorname{sign}\left(L^{(i)}\left(\widehat{S}_{1}\right)\right) \cdot \min\left(\left|L_{\rho}(z)\right|, \left|L^{(i)}\left(\widehat{S}_{1}\right)\right|\right) \quad (6)$$

其中, $L_{\rho}(z) = \lg((1-\rho)/\rho)$ 。考虑到信源间的相关 性可能会在一定范围内波动,所提方案实时估计信 源间的相关性系数: $\hat{\rho} = P(\hat{z}^{(i)} = 1)$,其中 $\hat{z}^{(i)} = \hat{S}_{1}^{(i)}$ $\oplus \hat{S}_{2}^{(i)}$, $\hat{S}_{1}^{(i)} = \hat{S}_{2}^{(i)}$ 为硬判决结果且 \oplus 为模 2 加。最后 将计算得到的外部信息 $L_{ex}^{(i)}(\hat{S}_{1})$ 和 $L_{ex}^{(i)}(\hat{S}_{2})$ 反馈给 P-LDPC 译码器进行再次译码,即实现外部迭代。 鉴于信息比特反馈的相关外部信息,再次的 P-LDPC 译码其初始化 LLRs 值将做相应的改变。 具体的是,通过 AWGN 信道接收的信息比特的初始 化 LLRs 值设为 $L_{c}(r_{s}), s = 1, 2$ 与相应的相关外部信 息之和;未发送的信息比特的初始化 LLRs 值直接 设为相应的相关外部信息。例如,对于信源 S_{1} ,再 次译码时相应的初始化 LLRs 值分别为

$$Z_{1}^{j} = L_{c}\left(r_{1}\right) + L_{\text{ex}}^{(i-1)}\left(\widehat{S}_{1}^{j}\right), \quad j = 1, 2, \cdots, \alpha k$$
(7)

$$Z_1^j = L_{\text{ex}}^{(i-1)} \left(\widehat{S}_1^j \right), \quad j = \alpha k + 1, \alpha k + 2, \cdots, k$$
 (8)

经过几次外部迭代后,根据 $L^{(i)}(\hat{S}_1)$ 和 $L^{(i)}(\hat{S}_2)$ 硬判决得到最后的信息估计值。

3 译码端未知相关性系数的译码思想

从上述的译码端算法可以发现,译码端译码过 程需要知道信源间的相关性系数ρ,否则无法完成 未发送部分信息位的初始化 LLRs 值及后续的联合 迭代译码。然而,信源的相关性系数一般情况在译 码端是未知的。为此,本节给出一种译码端未知相 关性系数的联合迭代译码思想。

众所周知,译码端完全准确知道信源的相关性 大小并不现实,但是估算其范围还是相对容易的。 基于此考虑,在获得信源的相关性范围后,译码端 首先将信源的相关性系数统一设定为某个确定值 (*p*)进行信息位的初始化 LLRs 值,然后同样运用联 合迭代思想既实现对信源的相关性估计以逐步逼近 真实的相关性,又可以在译码过程中发掘信源间的 相关性以获得额外的性能增益。可以发现,译码端 未知相关性系数的联合迭代译码结构与前面译码端 已知相关性系数的联合迭代译码结构是一致的,唯 一的不同点在于第 1 次初始化 LLRs 值的相关性系 数值:若译码端未知相关性系数,则基于设定的相关性系数 $\tilde{\rho}$;反之基于已知的相关性系数 ρ 。因此不管译码端是否已知相关性系数,所提的 DJSCC 系统译码端实现结构不变,具体的联合迭代译码步骤如下:

(1) 根据信道接收信息 $r_1 与 r_2$ 计算 $L_c(r_1)$ 与 $L_c(r_2)$; 与此同时,设置 $L_{ex}^0(\hat{S}_1) = L_{ex}^0(\hat{S}_2) = 0$;

(2)外部迭代: for *i* = 1,2,…。

(a)计算初始化 LLRs 值: $Z_1 与 Z_2$,其中i = 1时 若译码端未知相关性系数,基于设定的相关性系数 $\tilde{\rho}$,否则基于已知的相关性系数 ρ ;

(b)运行 BP 迭代译码得到信息序列的判决似然 信息: $L^{(i)}(\hat{S}_1) = L^{(i)}(\hat{S}_2)$;

(c)硬判决获得判决序列: $\hat{S}_{1}^{(i)} 与 \hat{S}_{2}^{(i)}$;

(d)估算相关性系数 $\hat{\rho} = P(\hat{z}^{(i)} = 1)$,其中 $\hat{z}^{(i)} =$

 $\widehat{S}_{1}^{(i)} \oplus \widehat{S}_{2}^{(i)}$ 且 \oplus 为模 2 加,并计算相应的 LLRs 值 $L_{\overline{\rho}}^{(i)}(\widehat{z})$;

(e)估算相关外部信息: $L_{ex}^{(i)}(\widehat{S}_1) 与 L_{ex}^{(i)}(\widehat{S}_2);$

(3)外部迭代后,根据 $L^{(i)}(\hat{S}_1) 与 L^{(i)}(\hat{S}_2)$ 硬判决 得到最后的信息估计值。

4 仿真结果与分析

AR4JA 码是广泛应用的一类 P-LDPC 码,其 具有地板区性能良好,最小码距随码长成线性增长 以及码率可扩展等特性,相应的原模图如图 3 所示, 图中空心圆代表删余变量节点。本文仿真使用码率 为 3/4 的 AR4JA 码,其对应的原模图基矩阵为

0	0	0	0	0	0	1	2	0
1	1	3	1	3	1	0	3	1
2	3	1	3	1	2	0	1	1

仿真中,帧长设为 6000 bit,参数 α 取 1/2 实 现对称压缩,此时相应的压缩率为(6000×1/3 +3000)/6000=5/6, BP 译码迭代最大次数设为 100 次,仿真终止条件为每个信噪比值检测到 50 帧出



图 3 AR4JA 码的原模图

错。仿真假设信源间具有较强的相关性,相关性范围为 $0 < \rho \le 0.1$;译码端未知相关性系数时设定固定值 $\tilde{\rho} = 0.05$ 。

图 4 所示为译码端已知相关性系数 $\rho = 0.01$ 与 $\rho = 0.08$,所提的基于 P-LDPC 码的 DJSCC 系统 随着外部迭代次数增加误码率(Bit Error Ratio, BER)性能曲线。可以明显看到,随着外部迭代次数 的增加,系统性能逐步提高,只是提高的幅度逐渐 降低并趋向零值。仔细比较可以发现外部迭代 4 次 后系统性能提高幅度不大,说明外部迭代4次基本 可以获得联合迭代算法所能获得的额外增益。纵向 比较可以看到,随着相关性系数的增加,系统性能 大幅度降低,这是因为译码过程中从另一信源获得 的相关信息相对不准确导致的;此外,联合迭代算 法所能获得的额外增益随着相关性系数的增加而变 大(具体的在 BER 为 10^{-5} 时由 $\rho = 0.01$ 的0.2 dB 增 加至 $\rho = 0.08$ 的 0.8 dB), 究其原因是在相关性系数 较大时,基于相关性系数初始化 LLRs 值准确性相 对较低,故可发掘的信源相关性空间相对较大,因 此联合迭代算法所能获得额外增益较大。

图 5 所示为相同条件所提的基于原模图 LDPC 码与传统 LDPC 码的 DJSCC 系统的 BER 性能曲线,其中传统 LDPC 码考虑列重为 3 的规则 LDPC 码。可以明显看出所提的基于原模图 LDPC 码的 DJSCC系统具有较大的性能增益(具体的在 BER 为 10^{-5} 时 $\rho = 0.01$ 有 0.5 dB, $\rho = 0.08$ 有 1.1 dB)。即 使传统 LDPC 码的 DJSCC 系统也采用本文所提的 联合迭代信源信道译码,同样外部迭代 4 次基本获得联合迭代算法所能获得的额外增益,所提的基于 原模图 LDPC 码的 DJSCC 系统也至少有 0.2 dB 的 性能增益。

图 6 所示为相关性系数在译码端未知时所提 DJSCC 系统的 BER 性能曲线。可以发现,由于设 定的相关性系数与确切的相关性系数有一定的偏 差,因此,第1次外部迭代译码后系统性能相对较 差($\rho = 0.01$ 时相差 0.1 dB, $\rho = 0.08$ 时相差 0.2 dB)。然而,随着外部迭代次数的增加,估计的相关 性系数愈来愈接近真实值,因此系统性能也越来越 逼近相关性系数已知的系统性能;仔细比较可以看 出,同样在外迭代4次时相关性系数未知的系统性 能基本与相关性系数已知的系统性能相当。由此可 见,即使相关性系数已知的系统性能相当。由此可 DJSCC 系统仍可获得与相关性系数已知相当的系 统性能。



图 4 相关性系数在译码端已知所提 DJSCC 系统的 BER 性能



图 5 所提的基于原模图 LDPC 码与传统 LDPC 码的 DJSCC 系统的 BER 性能



图 6 相关性系数在译码端未知所提 DJSCC 系统的 BER 性能

5 结束语

考虑到原模图 LDPC(P-LDPC)码的优势,本文 提出一种基于原模图 LDPC 码的 DJSCC 系统方案, 给出详细的编码端与译码端算法;同时给出相关性 系数在译码端未知的联合迭代译码算法。仿真结果 表明,所提出的基于 P-LDPC 码的 DJSCC 系统方 案不管译码端是否已知相关性系数,在外迭代 4 次 即可获得联合迭代所能带来的额外性能增益且两者 性能相当。未来工作将针对该系统借助原模图 EXIT 分析方法对 P-LDPC 码型进行优化以进一步提高系 统性能。

参考文献

[1] 秦智超,周正,赵小川.一种分簇无线传感器网络中的分布式

信源编码算法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(2): 328-334. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.00723.

QIN Zhichao, ZHOU Zheng, and ZHAO Xiaochuan. A distributed source coding algorithm for clustering wireless sensor networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(2): 328–334. doi: 10.3724/SP.J.1146. 2012.00723.

[2] 宋娟, 吴成柯, 张静, 等. 基于分类和陪集码的高光谱图像无损压缩[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(1): 231-234. doi: 10.3724/SP.J.1146.2010.00274.

SONG Juan, WU Chengke, ZHANG Jing, et al. Lossless compression of hyperspectral images based on classification and coset coding[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(1): 231–234. doi: 10.3724/SP.J.1146. 2010.00274.

- [3] ZHANG J, LI H, and CHEN C. Distributed lossless coding techniques for hyperspectral images[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2015, 9(6): 977–989. doi: 10.1109/JSTSP.2015.2402118.
- [4] QIAN Z and ZHANG X. Reversible data hiding in encrypted images with distributed source encoding[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2016, 26(4): 636–646. doi: 10.1109/TCSVT.2015.2418611.
- [5] FANG Y, STANKOVIC V, CHENG S, el al. Analysis on tailed distributed arithmetic codes for uniform binary sources
 [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2016, 64(10): 4305–4319. doi: 10.1109/TCOMM.2016.2599535.
- [6] ALJOHANI A, NG S, and HANZO L. Distributed source coding and its applications in relaying-based transmission[J]. *IEEE Access*, 2016, 4: 1940–1970. doi: 10.1109/ACCESS.2016. 2537739.
- [7] PRADHAN S and RAMCHANDRAN K. Distributed source coding using syndromes (DISCUS): Design and construction
 [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2003, 49(3): 626-643. doi: 10.1109/TIT.2002.808103.
- [8] GEHRIG N and DRAGOTTI P. Symmetric and asymmetric Slepian-Wolf codes with systematic and non-systematic linear codes[J]. *IEEE Communications Letters*, 2005, 9(1): 61–63. doi: 10.1109/LCOMM.2005.1375242.
- [9] LIVERIS A, XIONG Z, and GEORGHIADES C. Compression of binary sources with side information at the decoder using LDPC codes[J]. *IEEE Communications Letters*, 2002, 6(10): 440–442. doi: 10.1109/LCOMM.2002.804244.
- [10] ALJOHANI A, BABAR Z, NG S, *el al.* Distributed source-channel coding using reduced-complexity syndromebased TTCM[J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20(10): 2095–2098. doi: 10.1109/LCOMM.2016.2584598.
- [11] GARCIA-FRIAS J and CABARCAS F. Approaching the Slepian-Wolf boundary using practical channel codes[J]. Signal Processing, 2006, 86(11): 3096–3101. doi: 10.1016/ j.sigpro.2006.03.018.
- [12] SARTIPI M and FEKRI F. Distributed source coding using short to moderate length rate-compatible LDPC codes: The entire Slepian-Wolf rate region[J]. *IEEE Transactions on*

Communications, 2008, 56(3): 400-411. doi: 10.1109/ TCOMM.2008.060006.

- [13] CEN F. Distributed joint source and channel coding with low-density parity-check codes[J]. *IEEE Communications Letters*, 2013, 17(12): 2336–2339. doi: 10.1109/LCOMM.2013. 101613.131616.
- [14] VAEZI M and LABEAU F. Distributed source-channel coding based on real-field BCH codes[J]. *IEEE Transactions* Signal Processing, 2014, 62(5): 1171–1184. doi: 10.1109/TSP. 2014.2300039.
- [15] DELIGIANNIS N, ZIMOS E, OFRIM D, et al. Distributed joint source-channel coding with copula-function-based correlation modeling for wireless sensors measuring temperature[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(8): 4496–4507. doi: 10.1109/JSEN.2015.2421821.
- [16] GARCIA-FRIAS J and ZHAO Y. Near-Shannon/Slepian-Wolf performance for unknown correlated sources over AWGN channels[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2005, 53(4): 555–559. doi: 10.1109/TCOMM.2005.844959.
- [17] ARCIA-FRIAS J, ZHAO Y, and ZHONG W. Turbo-like codes for transmission of correlated sources over noisy channels[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2007, 24(5): 58–66. doi: 10.1109/MSP.2007.904813.
- [18] SHAHID I and YAHAMPATH P. Distributed joint sourcechannel coding using unequal error protection LDPC codes[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2013, 61(8): 3472–3482. doi: 10.1109/TCOMM.2013.070213.120264.
- [19] THORPE J. Low-density parity-check (LDPC) codes constructed from protographs[R]. IPN Progress Report 42–154, JPL, 2003.
- [20] DANESHGARAN F, LADDOMADA M, and MONDIN M. LDPC-based channel coding of correlated sources with iterative joint decoding[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2006, 54(4): 577–582. doi: 10.1109/ TCOMM.2006.873062.
- 洪少华: 男,1983年生,副教授,研究方向为信息论与编码、图 像压缩与处理、非线性信号处理.
- 王琳: 男,1963年生,教授,研究方向为信息论与编码、宽带 无线通信.