基于伴随式的分布式联合信源信道编码

潘旭洲 刘荣科 王 岩

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘 要: 提出一种基于伴随式(Syndrome)的具有抗差错性能的分布式联合信源信道编码方案. 在不增加编码端复杂度的前提下,设计一种新的基于伴随式的编码器,使其同时具有压缩和抗差错的性能;其次,设计相应的译码器,并改进现有的联合译码算法,在译码中引入新的信息交互过程,提高了译码性能. 仿真结果表明:该方案的性能优于现有的基于伴随式的分布式联合信源信道编码方案的性能,而且在信噪比较高时,该方案的性能也优于基于校验位(Parity)的分布式联合信源信道编码的性能.

关 键 词: 伴随式; 分布式联合信源信道编码; 级联编码; 抗差错性能

中图分类号: TN 911.2

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)01-0116-07

Syndrome-based distributed joint source-channel coding scheme

Pan Xuzhou Liu Rongke Wang Yan

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A syndrome-based error resilient scheme of distributed joint source-channel coding was addressed. Without increasing the complexity of the encoder, a new appropriate syndrome based encoder with compression and error resilient capability were designed. Secondly, a corresponding decoder was designed and the existing joint decoding algorithm was improved, introducing a new information exchange, to improve the performance of the decoder. Simulation results show that the performance of the proposed scheme is better than that of the existing syndrome-based distributed joint source-channel coding scheme in the noisy channel and the performance of the scheme is also better than that of the parity-based distributed joint source-channel coding when the signal to noise ratio (SNR) is high.

Key words: syndrome-based; distributed joint source-channel coding (DJSCC); concatenated coding; error resilient

分布式信源编码的理论基础是 Slepian-Wolf 和 Wyner-Ziv 理论[1-2]. 该理论证明了在理想信道下,当已知相关信源的联合分布特性并采用联合译码时,无论编码器是否互相通信,相关信源都可以压缩到一个同样的理论极限速率. 现有的分布式信源编码方案大多是利用信道码来实现的,如低密度奇偶校验码(LDPC, Low Density Parity Check)、Turbo 码[3-4]等. 主要的实现方式有 2 种:①基于校验位(Parity)的分布式信源编码(DISCUP, Distributed source Coding Using Parity);②基于伴随式(Syndrome)的分布式信源编码(DISCUS, Distributed source Coding Using Syndrome)[5-6]. 文献[6-7]研究表明:在理想信道下,基于 Syndrome 的分布式信源编码具有最优的压缩性能,而在噪声信道下,基于 Parity 的分布式信源编码的性能是较优的. 因为基于 Syndrome 的方案只对信源进行压缩,并没有抗差错特性;而基于 Parity 的方案在压缩的同时也具有一定的抗差

收稿日期: 2010-09-20; **网络出版时间**: 2012-01-06 15:11; **DOI**: CNKI:11-2625/V.20120106.1511.014
网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120106.1511.014.html
资助基金: 国家自然科学基金资助项目(60702012); 留学回国人员科研启动基金资助项目
作者简介: 潘旭洲(1986-),男,广东普宁人,硕士生,panxuzhou@gmail.com.

错功能. 在实际应用中,由于噪声信道的存在,更多的分布式信源编码方案采用基于 Parity 的分布式信源编码,并只利用一个信道码,完成了压缩和抗差错的功能,实现分布式联合信源信道编码[8-11]. 同时,也有很多学者研究基于 Syndrome 的分布式信源编码的抗差错性能. 文献[12-13]对校验矩阵进行扩展,并修改相应的编码方法,增加一定的复杂度,使得基于 Syndrome 的分布式信源编码具有一定的抗差错性能. 文献[14]通过设计合适的卷积码和优化的译码器,使得基于 Syndrome 的分布式信源编码也具有一定的抗差错性能,提出了基于 Syndrome 的分布式联合信源信道编码,但其性能不如同等条件下的基于 Parity 的分布式联合信源信道编码的性能. 文献[15]研究表明:如果每个相关信源都经过相互独立的噪声信道进行传输,则信源编码和信道编码分开设计具有最佳的性能. 文献[16]提出基于 LDPC 码和卷积码的级联编码,利用 LDPC 码完成基于 Syndrome 的分布式信源编码,再用卷积码对伴随式进行保护,实现压缩和抗差错的功能. 文献[17]提出利用两个 turbo 码级联实现分布信源编码(第 1 个 turbo 码完成基于 Syndrome 的分布式信源编码,第 2 个 turbo 码作为信道码),发现级联编码的性能比利用一个 turbo 码实现的分布式联合信源信道编码的性能差.

在噪声信道下,针对上文提到的基于 Syndrome 的分布式信源编码的问题,本文提出了一种新的基于 Syndrome 的具有强抗差错特性的分布式联合信源信道编码方案. 基于级联编码的分布式信源编码可以看成是两个信道码的级联,第一个信道码用于压缩,另一个信道码用于抗差错. 如果采用两个相同的信道码(如 LDPC 码)进行级联编码,则编码端是两个结构完全相同的编码器的级联. 于是,本文从级联编码入手,设计一种新的编码器,使得该编码器同时具有级联编码方案中两个编码器的功能,即同时具有压缩和抗差错的功能;在译码端,根据编码器设计相应的译码器,并改进现有的联合译码算法,在译码中引入新的信息交互,形成一个相互促进的循环,提高了译码性能,从而提高了整个系统的性能. 由于 LDPC 码比较适合分布式信源编码且性能较好,本文利用 LDPC 码实现基于 Syndrome 的分布式联合信源信道编码,利用一个 LDPC 编码器实现了压缩和抗差错的功能. 仿真结果表明:本文所提出的基于 Syndrome 的分布式联合信源信道编码的性能优于级联编码和现有的基于 Syndrome 的分布式联合信源信道编码的性能,而且在信噪比较高时,该方案的性能也优于基于 Parity 的分布式联合信源信道编码的性能.

1　分布式联合信源信道编码

分布式联合信源信道编码将分布式信源编码和信道编码联合起来考虑,这被认为是一种可行的且有效的做法. 在噪声信道下,假设信源 $\boldsymbol{X}$ 和 $\boldsymbol{Y}$ 到译码器的信道容量分别为 C_1 和 C_2,其编码码率为 R_X 和 R_Y. 从文献[15]可得,若信道容量区域 $\{(R_X,R_Y)\mid R_X<C_1,R_Y<C_2\}$ 与 Slepian Wolf 区域[1-2]有交集,则分布式联合信源信道编码有可能实现无差错译码;若两区域无交集,则不可能实现差错概率任意小的编译码. 即 DJSCC 区域为信道容量区域与 Slepian-Wolf 区域的交集,见图 1.

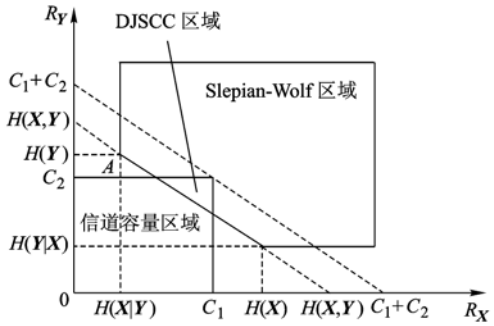


图 1　DJSCC 区域(信道容量区域与 Slepian-Wolf 区域的交集)

在实际中,无差错传输有时是不可能实现的. 例如高斯白噪声信道(AWGN, Additive White Gaussion Noise)的信道容量是信噪比 E_b/N_0 的确定性函数,低信噪比时的信道容量区域可能与 Slepian-Wolf 区域不相交. 本文的目的之一便是研究在这种情况下,如何编译码能够使得最终的差错概率尽可能小.

本文主要研究不对称压缩(信源 $\boldsymbol{Y}$ 在译码端无误可得,并作为边信息)的分布式联合信源信道编码,其框架示意图如图 2 所示. 边信息 $\boldsymbol{Y}$ 可以看成是信源 $\boldsymbol{X}$ 经过相关信道后的输出,在译码端无误可得;信源 $\boldsymbol{X}$ 经过联合信源信道编码后得到码字 $\boldsymbol{C}_{\text{ext}}$;码字 $\boldsymbol{C}_{\text{ext}}$ 经过真实的噪声信道后到达联合译码端,并结合边信息 $\boldsymbol{Y}$ 进行联合译码,从而恢复出信源 $\boldsymbol{X}$.

在分布式联合信源信道编码中,关键的问题是设计联合编码器和联合译码器. 联合编码器必须满足 3 个主要条件:①编码所用的信道码必须适用于分布式信源编码,且性能接近 Slepian-Wolf 极限;②该编码器能够对压缩后的码字进行保护,

具有差错保护的功能;③编码器的复杂度必须尽可能低. 联合译码器可以根据编码器来设计,同时可以根据译码器设计优化的译码算法,从而提高系统性能. 联合信源信道编码器和译码器的设计很大程度决定了分布式联合信源信道编码的性能.

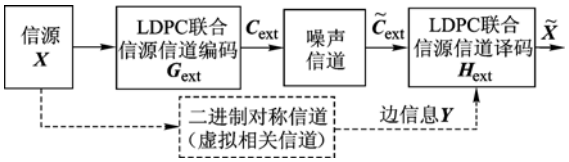


图2 边信息在译码端可得的分布式联合信源信道编码框架图

2 编码器设计

与现有的基于 Syndrome 的分布式联合信源信道编码方案不同,本文从级联编码的思路入手,设计一种新的基于 Syndrome 的编码器,使得该编码器同时具有级联编码方案中两个编码器的功能,即用一个 LDPC 码实现了压缩和抗差错的功能. 文献[17]采用两个 turbo 码级联,实现具有抗差错性能的分布式信源编码. 若采用两个 LDPC 码级联,用第 1 个 LDPC 码(外码)进行信源压缩,编码得到伴随式;用第 2 个 LDPC 码(内码)抗差错,编码得到码字 $\boldsymbol{C}$. 如果内码为系统码(生成矩阵 $\boldsymbol{G}_{in}=[\boldsymbol{P}',\boldsymbol{I}]$,$\boldsymbol{I}$ 为单位阵),则最终的输出码字 $\boldsymbol{C}=[\boldsymbol{P},\boldsymbol{S}]$,$\boldsymbol{S}$ 为外码编码得到的伴随式,$\boldsymbol{P}$ 为内码针对伴随式添加的冗余.

$$\boldsymbol{S}=\boldsymbol{X}\boldsymbol{H}_{out}^{T} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{C}=\boldsymbol{S}\boldsymbol{G}_{in}=\boldsymbol{S}\cdot[\boldsymbol{P}',\boldsymbol{I}]=[\boldsymbol{P},\boldsymbol{S}] \tag{2}$$

其中,$\boldsymbol{H}_{out}$为外码的校验矩阵.

分析编码后的码字,可将码字分成两部分:①信源压缩的结果 $\boldsymbol{S}$;②为保护信源压缩结果添加的冗余 $\boldsymbol{P}$. 正是这两部分的组合才使得级联编码具有抗差错和压缩的功能. 如果把级联编码端的两个编码器看成一个联合编码器,编码输入为 $\boldsymbol{X}$,编码输出为 $\boldsymbol{C}$,则该联合编码器便同时具有了压缩和抗差错的功能.

因此,可以设计一个新的 LDPC 编码器,使得编码结果的结构与级联编码结果的结构是类似的,即

$$\boldsymbol{C}_{ext}=\boldsymbol{X}\boldsymbol{G}_{ext}=[\boldsymbol{P}_1,\boldsymbol{S}_1] \tag{3}$$

其中,$\boldsymbol{C}_{ext}$为编码结果;$\boldsymbol{G}_{ext}$为新编码器的生成矩阵;$\boldsymbol{S}_1$ 是对信源 $\boldsymbol{X}$ 进行分布式信源编码所得到的伴随式;$\boldsymbol{P}_1$ 是针对 $\boldsymbol{S}_1$ 添加的冗余,用于抗差错. 于是,从编码结果来看,该编码器就同时具有压缩和抗差错的功能(即级联编码中两个编码器的功能之和);在译码端,根据 $\boldsymbol{G}_{ext}$,可以生成一个对应的校验矩阵 $\boldsymbol{H}_{ext}$,并依此设计一个新的译码器,利用 $\boldsymbol{H}_{ext}$实现联合迭代译码,即用一个 LDPC 编码器和一个 LDPC 译码器实现了级联编码(两个编码器两个译码器)的功能,实现了基于 Syndrome 的分布式联合信源信道编码.

联合编码器具体的实现方法不是固定的,不同的实现方法会带来性能的差异. 特别地,如果让该联合编码器的编码结果与级联编码的结果相同,即 $\boldsymbol{C}_{ext}=\boldsymbol{C}$.

$$\boldsymbol{C}_{ext}=\boldsymbol{X}\boldsymbol{G}_{ext}=[\boldsymbol{P}_1,\boldsymbol{S}_1]=\boldsymbol{C}=\boldsymbol{S}\boldsymbol{G}_{in}=\boldsymbol{X}\boldsymbol{H}_{out}^{T}\boldsymbol{G}_{in}=[\boldsymbol{P},\boldsymbol{S}] \tag{4}$$

可以得到联合编码器的生成矩阵 $\boldsymbol{G}_{ext}=\boldsymbol{H}_{out}^{T}\boldsymbol{G}_{in}$,即 $\boldsymbol{G}_{ext}$是级联码方案中外码的校验矩阵与内码的生成矩阵的乘积. 假设级联编码方案中,外码的 $\boldsymbol{H}_{out}$阵(用于分布式信源编码的检验矩阵)大小是 $(n-k)\times n$;内码的生成矩阵 $\boldsymbol{G}_{in}$(用于信道编码的生成矩阵)大小是 $(n-k)\times n_1$,则新的编码器的生成矩阵的大小为 $n\times n_1$. 这可以看成是新的编码器的生成矩阵 $\boldsymbol{G}_{ext}$的一种构造方法. 本文便采用这种方法设计基于 LDPC 码的联合信源信道编码器,从而实现了基于 Syndrome 的分布式联合信源信道编码.

3 联合译码器及联合译码算法设计

3.1 译码器设计

在译码端,根据编码端的生成矩阵 $\boldsymbol{G}_{ext}$,可以生成相应的校验矩阵 $\boldsymbol{H}_{ext}$,并利用边信息进行联合迭代译码. 根据第 2 节的设计,编码端的生成矩阵 $\boldsymbol{G}_{ext}$是级联编码方案中外码的校验矩阵与内码的生成矩阵的乘积. 于是,根据生成矩阵 $\boldsymbol{G}_{ext}$可以设计相应的校验矩阵,具体如图 3 所示. 假设级联编码方案中,外码的 $\boldsymbol{H}_{out}$阵大小是 $(n-k)\times n$,内码的生成矩阵 $\boldsymbol{G}_{in}$大小是 $(n-k)\times n_1$,对应 $\boldsymbol{H}_{in}$阵大小是 $(n_1-n+k)\times n_1$,并假设 $(n-k)>(n_1-n+k)$,则译码端的校验矩阵 $\boldsymbol{H}_{ext}$大小为 $(n-k)\times(n_1+2n-k)$.

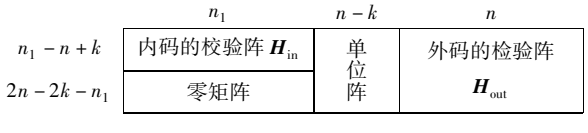


图3 校验矩阵 $\boldsymbol{H}_{ext}$

在编码端,编码后的码字为 $\boldsymbol{C}=[\boldsymbol{P},\boldsymbol{S}]$,$\boldsymbol{S}$ 为对信源进行分布式信源编码得到的伴随式,$\boldsymbol{P}$ 为针对 $\boldsymbol{S}$ 添加的冗余. 在译码端,将接收到的码字

扩展为 $\boldsymbol{C}'=[\boldsymbol{P}',\boldsymbol{S}',\boldsymbol{S}',\boldsymbol{Y}]$,$\boldsymbol{Y}$ 为边信息. 如果译码正确,则有 $\boldsymbol{C}'\boldsymbol{H}_{\text{ext}}^{\text{T}}=\boldsymbol{0}$ ($[\boldsymbol{P},\boldsymbol{S}]\boldsymbol{H}_{\text{in}}^{\text{T}}=\boldsymbol{0}$,且 $[\boldsymbol{S},\boldsymbol{X}][\boldsymbol{I}|\boldsymbol{H}_{\text{out}}]^{\text{T}}=\boldsymbol{0}$). 因此,不需要对 LDPC 码的译码算法进行修改,可以直接利用它进行译码. 在一次迭代译码过程中,可以同时纠正伴随式 $\boldsymbol{S}$ 和边信息 $\boldsymbol{Y}$,从而实现用一个译码器完成级联编码中两个译码器的功能,实现联合译码.

3.2　译码算法设计

为了分析简单,可以近似把矩阵分解成两大部分:前半部分矩阵(内码校验阵 $\boldsymbol{H}_{\text{in}}$ 和零矩阵)、后半部分矩阵(单位阵和外码校验阵 $\boldsymbol{H}_{\text{out}}$),如图 3 所示.

在一次迭代译码过程中,利用前半部分矩阵对 $[\boldsymbol{P},\boldsymbol{S}]$ 进行译码,实现信道码的纠错译码功能,对伴随式 $\boldsymbol{S}$ 进行纠错,提高 $\boldsymbol{S}$ 的可靠性;利用后半部分矩阵对 $[\boldsymbol{S},\boldsymbol{Y}]$ 进行译码,实现分布式信源编码的译码功能,找出与边信息 $\boldsymbol{Y}$ 最为接近的码字,作为信源 $\boldsymbol{X}$.

在迭代译码过程中,由于前半部分矩阵的译码能够有效纠正伴随式 $\boldsymbol{S}$ 中的错误,必须把译码得到的伴随式 $\boldsymbol{S}$ 传递到后半部分矩阵的译码中去,以提高分布式信源编码的性能;同时由于后半部分矩阵的译码能够利用信源压缩的冗余,纠正伴随式 $\boldsymbol{S}$ 的部分错误,应该将译码得到的 $\boldsymbol{S}$ 反馈到前半部分矩阵的译码中去,以提高前半部分矩阵的译码性能. 因此,必须对原来的 LDPC 译码算法进行改进,设计一种新的联合译码算法,在迭代译码过程中,进行信息交互,并形成一个相互促进的良性循环,从而提高整个联合译码器的性能,提高译码输出 $\boldsymbol{X}$ 的准确性.

再者,对于后半部分矩阵,存在列重为 1 的列,而且这些列对应于伴随式 $\boldsymbol{S}$. 这使得在译码的垂直过程,对于这些信息节点 $\boldsymbol{S}$ 根本没有进行更新. 因此也必须对 LDPC 码的基本译码算法进行改进,以提高译码性能.

基于上述的分析,改进的联合译码算法具体如下所示:

$$L(q_{mj})=L(c_j)=\ln(p_j^0/p_j^1)$$
$$\forall m\in M(j),\forall j \tag{5}$$

式中,$L(q_{mj})$ 为校验节点传向变量节点的软信息,并初始化为信道输入对数似然比(LLR,Log Likelihood Ratio);$L(c_j)$ 为变量节点 j 的初始化软信息;$M(j)$ 表示与变量节点 j 相连的校验节点的集合;$N(m)$ 表示与校验节点 m 相连的变量节点的集合;p_j^0,p_j^1 为变量节点 j 为 0 或 1 的概率.

1) 水平/行过程. 对所有 m,n,计算:

$$A_{mj}=\sum_{\substack{n\in N(m)\\ n\neq j}}\Psi(L(q_{mn})) \tag{6}$$

$$S_{mj}=\prod_{\substack{n\in N(m)\\ n\neq j}}\text{sign}(L(q_{mn})) \tag{7}$$

其中,A_{mj},S_{mj} 为中间变量;

$$\Psi(x)=\ln(\tanh(|x/2|))=\ln((1-\text{e}^{|x|})/(1+\text{e}^{|x|})) \tag{8}$$

在水平迭代过程中,对前半部分矩阵和后半部分矩阵所对应的 A_{mj},S_{mj} 进行区分. 属于前半部分矩阵的 A_{mj},S_{mj} 只与属于前半部分矩阵的变量节点进行消息更新;属于后半部分矩阵的 A_{mj},S_{mj} 只与属于后半部分矩阵的变量节点进行消息更新. R_{mj} 为变量节点传向校验节点的软信息.

$$R_{mj}=-S_{mj}\Psi(A_{mj}) \tag{9}$$

2) 垂直/列过程. 对所有 m,n,计算:

$$L(Q_j)=\sum_{m\in M(j)}R_{mj}+L(c_j) \tag{10}$$

$$L(q_{mj})=L(Q_j)-R_{mj} \tag{11}$$

其中,$L(Q_j)$ 为变量节点的判决软信息;$L(q_{mj})$ 为变量节点的迭代软信息. 在此过程中,将上一次迭代中,前半部分矩阵译码得到的伴随式 $\boldsymbol{S}$ 的判决软信息 $L(Q_j)$ 传递到后半部分矩阵的译码中去;同时在译码迭代次数 iteration 为 n_0(n_0 为常数)的倍数时,将后半部分矩阵译码得到的伴随式 $\boldsymbol{S}$ 的软信息反馈到前半部分矩阵的译码中去. 这样,在译码过程中,基于前后两部分矩阵的译码能够进行信息交互,并形成相互促进的良性循环. 假设外码 $\boldsymbol{H}_{\text{out}}$ 阵的大小是 $(n-k)\times n$;内码的 $\boldsymbol{G}_{\text{in}}$ 阵的大小是 $(n-k)\times n_1$,对应 $\boldsymbol{H}_{\text{in}}$ 阵的大小是 $(n_1-n+k)\times n_1$.

$$L(q_{mj})=L(Q_{j-n+k})\quad n_1<j<n_1+n-k \tag{12}$$

$$L(c_j)=L(Q_{j+n-k})$$
$$n_1-n+k<j<n_1\quad \text{iteration}\%n_0=0 \tag{13}$$

3) 判决.

① 对 $L(Q_j)$ 判决.

$$\hat{x}_n=\begin{cases}0 & L(Q_j)\geqslant 0\\ 1 & L(Q_j)<0\end{cases}\quad n=1,2,\cdots,N \tag{14}$$

② 译码正确的条件不是 $\boldsymbol{C}'\boldsymbol{H}_{\text{ext}}^{\text{T}}=\boldsymbol{0}$,而是 $[\boldsymbol{S}',\boldsymbol{Y}'][\boldsymbol{H}_i,\boldsymbol{H}]^{\text{T}}=\boldsymbol{0}$,其中 $[\boldsymbol{H}_i,\boldsymbol{H}]$ 为 $\boldsymbol{H}_{\text{ext}}$ 的后半部分矩阵. 若 $[\boldsymbol{S}',\boldsymbol{Y}'][\boldsymbol{H}_i,\boldsymbol{H}]^{\text{T}}=\boldsymbol{0}$,译码正确;否则继续迭代直到最大迭代次数.

4　仿真结果与分析

为了更好地评估所提方案的性能,本文将其

与现有的基于 Syndrome 的分布式联合信源信道编码方案进行对比,同时,也与级联编码方案和基于 Parity 的分布式联合信源信道编码方案进行对比.

4.1 与现有的基于 Syndrome 的 DJSCC 方案[12-13]进行性能比较

实验条件与文献[12-13]的仿真条件一样,端到端的码率都为 1/2,信源 $\boldsymbol{X}$ 与边信息 $\boldsymbol{Y}$ 的相关信道为二进制对称信道,且相关信道 $P_{\mathrm{BSC}}=0.02$;真实的噪声信道也为二进制对称信道;译码迭代次数都为 30. 在本文提出的方案中,编码器采用$(n,k)=(600,300)$的 LDPC 码,其生成矩阵由$(n,k)=(600,400)$的 LDPC 码的校验阵和$(n,k)=(300,200)$的 LDPC 码的生成矩阵相乘得到. 其中,$(n,k)=(600,400)$的 LDPC 码的度分布为 $\lambda(x)=x^2$ 和 $\rho(x)=x^8$,$(n,k)=(300,200)$的 LDPC 码的度分布为 $\lambda(x)=x^2$ 和 $\rho(x)=x^8$. 仿真的比较结果如图 4 所示.

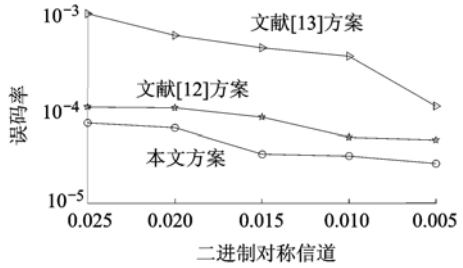


图 4 3 种编码方案的误码率曲线($P_{\mathrm{BSC}}=0.02$)

由图 4 可以看出,在端到端码率相同且复杂度相当的条件下,噪声信道的错误转移概率为 0.005 至0.025 时,本文所提方案的误码率比文献[13]所提的基于 Syndrome 的分布式联合信源信道编码的误码率低一个数量级,同时也低于文献[12]所提方案的误码率. 在端到端的码率固定时,本文提出的基于 Syndrome 的分布式联合信源信道编码方案具有更强的抗差错性能,综合性能更好.

同时,由于本文采用新的基于信息交互的联合迭代译码算法,当译码迭代次数增多时,信息交互的作用就越明显,性能便会越好;而在文献[12-13]中,译码迭代次数只为 30 次,这在一定程度上限制了本方案的性能,使得本方案的性能优势并不是十分明显. 如果译码的迭代次数增加,本文所提方案的性能能够得到显著的提升.

如图 5 所示,当迭代次数为 100 时,在同等噪声条件下,本方案的误码率能够再降低一个数量级,达到 10^{-6}. 文献[18]指出,随着译码迭代次数的增加,LDPC 码的性能会逐步提升,但是提升幅度相对较小. 因此,在译码迭代次数增多时,本文所提方案的性能得到显著提升的原因主要是采用了新的联合迭代译码算法. 这就有理由相信,随着译码迭代次数的增加,本文所提方案能够比现有的基于 Syndrome 的分布式联合信源信道编码方案取得更加明显的性能优势.

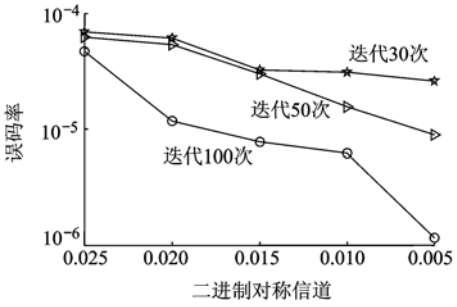
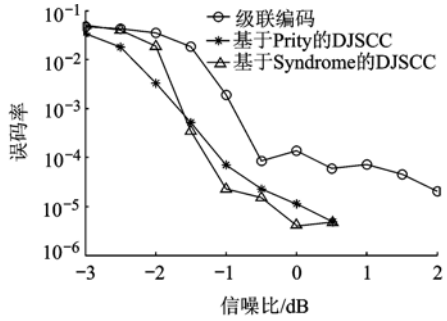


图 5 不同译码迭代次数的误码率曲线($P_{\mathrm{BSC}}=0.02$)

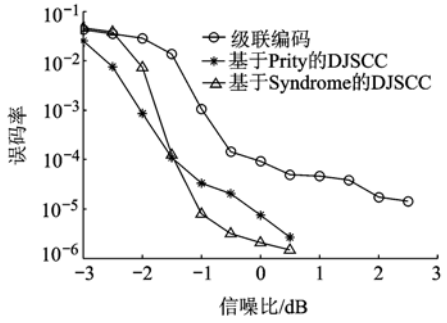
4.2 与级联编码和基于 Parity 的 DJSCC 方案进行性能比较

实验中,编码端都采用同样的码长,并有同样的端到端码率为 0.75,迭代次数都为 100. 级联编码的外码为$(n,k)=(4\,000,2\,000)$的 LDPC 码,内码是$(n,k)=(3\,000,2\,000)$的 LDPC 码,总码率为$\left(\frac{2\,000}{4\,000}\right)\times\left(\frac{3\,000}{2\,000}\right)=0.75$. 其中内码的度分布为 $\lambda(x)=x^2$ 和 $\rho(x)=x^8$,外码的度分布为 $\lambda(x)=x^2$ 和 $\rho(x)=x^5$. 基于 Syndrome 的分布式联合信源信道编码采用与级联编码相同的 LDPC 码构造生成矩阵. 编码端的矩阵 $\boldsymbol{G}_{\mathrm{ext}}=\boldsymbol{H}_{\mathrm{out}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{G}_{\mathrm{in}}$,码率为 0.75,$(n,k)=(3\,000,4\,000)$的 LDPC 码. 基于 Parity 的分布式联合信源信道编码采用同样码长的 LDPC 码. 其中$(n,k)=(4\,000,2\,286)$,度分布为 $\lambda(x)=x^2$ 和 $\rho(x)=x^7$. 编码时只将校验位传到译码端,码率为 $(n-k)/k=0.75$. 信源 $\boldsymbol{X}$ 与边信息 $\boldsymbol{Y}$ 的相关信道为二进制对称信道. 假设误码率达到 10^{-7}量级,可以认为是无误译码. 仿真表明,采用$(n,k)=(4\,000,2\,000)$的 LDPC 码进行分布式信源编码,在理想信道下,当相关信道的错误转移概率 P_{BSC} 为 0.05 时,误码率可以达到 10^{-7}量级. 因此在实验中,相关信道的参数 P_{BSC}的值选取在 0.05 附近,其值分别为 $P_{\mathrm{BSC}}=0.06$,$P_{\mathrm{BSC}}=0.055$ 和 $P_{\mathrm{BSC}}=0.05$. 真实的噪声信道假设为 AWGN. 仿真结果如图 6 所示.

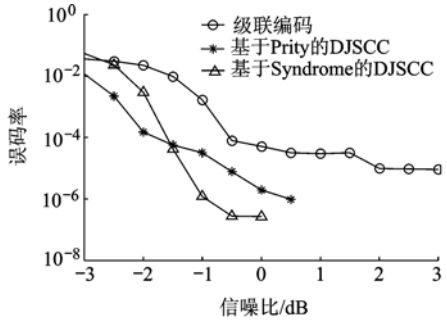
由图 6 可知,本文所提方案的性能明显优于级联编码的性能. 当信噪比大于 -1 dB 时,基于 Syndrome 的分布式联合信源信道编码的性能比级联编码的性能提升 3 ~ 4 dB. 这主要是由于联合信源信道编码采用了新的联合译码算法,能在迭



a　$P_{BSC}=0.06$



b　$P_{BSC}=0.055$



c　$P_{BSC}=0.05$

图 6　3 种编码方案的误码率曲线

代译码过程中进行信息交互,有效地利用了信道码的纠错能力及信源的压缩冗余,从而提高了系统的性能.

其次,在信噪比较低时,基于 Syndrome 的分布式联合信源信道编码的性能比基于 Parity 的分布式联合信源信道编码的性能稍差;而当信噪比大于 -1.5 dB 时,基于 Syndrome 的分布式联合信源信道编码的性能优于基于 Parity 的性能. 从图 6c 可以得到,当相关信道的 P_{BSC} 为 0.05 且信噪比大于 -1 dB 时,基于 Syndrome 的分布式联合信源信道编码的性能能够比基于 Parity 的分布式联合信源信道编码的性能提升 1.5 dB. 当端到端的码率固定时,基于 Syndrome 的分布式联合信源信道编码将码率分成两部分,一部分用于压缩,另一部分用于抗差错. 因此,在信噪比较低时,码字错误较多,超出了基于 Syndrome 的联合编码的纠错能力,导致不能纠正噪声信道引起的错误,且出现错误传播,从而导致分布式信源编码的译码失败;在信噪比较高时,基于 Syndrome 的分布式联合信源信道编码能够完全纠正噪声信道引起的错误,同时通过联合译码,在译码过程中进行信息交互,利用了信源压缩的冗余,进一步提高抗差错性能;而基于 Parity 的分布式联合信源信道编码方案中,增加的校验位只是增加了信源压缩的冗余,有助于纠错,并不能保证完全纠正噪声信道引起的错误.

同时,基于 Syndrome 的分布式联合信源信道编码的性能还与信源的相关程度及编码端的码率分配有关. 当编码器分配给用于压缩的码率与信源的相关程度越匹配时,即编码器对压缩和抗差错的码率分配越得当时,基于 Syndrome 的联合编码性能就越好. 从图 6 可以看出,当总码率为0.75 不变,用于压缩的码率为 0.5 不变时,随着信源相关性的增大,基于 Syndrome 的联合信源信道编码性能就越优于基于 Parity 的联合信源信道编码的性能.

此外,基于 Syndrome 的分布式联合信源信道编码的性能与编码采用的 LDPC 码的性能有关. 在编码端,不同方法产生的生成矩阵会使系统的性能出现差异. 本文采用的生成矩阵是由两个 LDPC 码的矩阵相乘得到,则这两个 LDPC 码的性能很大程度决定了联合编码方案的性能. 如果这两个 LDPC 码的性能越好,基于 Syndrome 的分布式联合信源信道编码的性能就越好.

5　结　论

1) 本文所提方案的性能明显优于级联编码的性能. 在同等噪声条件下,相比于级联编码的性能,本方案的性能有 3 ~ 4 dB 的提升.

2) 在编码端的复杂度相当的条件下,本方案的性能优于现有的基于 Syndrome 的分布式联合信源信道编码方案的性能,并且随着译码迭代次数的增多,本方案的性能优势会更加明显.

3) 在高斯信道下,当信噪比大于 -1.5 dB 时,本方案的性能优于基于 Parity 的分布式联合信源信道编码的性能,有 1 dB 左右的性能提升.

参考文献 (References)

[1] Slepian J D, Wolf J K. Noiseless coding of correlated information sources[J]. IEEE Trans Inf Theory, 1973, 19(4): 471 - 480

[2] Wyner A D, Ziv J. The rate-distortion function for source coding with side information at the decoder[J]. IEEE Trans Inf Theory, 1975, 22(1): 1 - 10

[3] Liveris A D, Xiong Z, Georghiades C N. Compression of binary sources with side information at the decoder using LDPC codes

[J]. IEEE Comm Letters, 2002, 6: 440 – 442

[4] Aaron, Girod B. Compression with side information using turbo codes[C]//Proc of Data Compression Conference (DCC). USA: IEEE Computer Society, 2002: 252 – 261

[5] Pradhan S S, Ramchandran K. Distributed source coding using syndromes (DISCUS): design and construction[C]//Proceeding of the Data Compression Conf. USA: IEEE Computer Society, 1999: 626 – 643

[6] Tan P, Xie K, Li J. Slepian-wolf coding using parity approach and syndrome approach [C]//Proceeding of Information Sciences and Systems. Baltimore, MD: IEEE, 2007: 708 – 713

[7] Garcia-Frias J, Xiong Z. Distributed source and joint source-channel coding: from theory to practice[C]//Acoustics, Speech and Signal Processing. USA: IEEE, 2005, 5: 1093 – 1096

[8] Liveris A D, Xiong Z X, Georghiades C N. Joint source-channel coding of binary sources with side information at the decoder using IRA codes[C]//Proc IEEE Workshop Multimedia Signal Processing. Virgin Islands: IEEE, 2002: 53

[9] Garcia-Frias J, Zhao Y, Zhong W. Turbo-like codes for transmission of correlated sources over noisy channels[J]. Signal Processing Magazine, 2007, 24(5): 58 – 66

[10] Zhu X, Zhang L, Liu Y. A distributed joint source-channel coding scheme for multiple correlated sources[C]//Fourth International Conference of Communications and Networking. China: IEEE, 2009: 1 – 6

[11] Herzet C, Toto-Zarasoa V, Roumy A. Error resilient non-asymmetric slepian-wolf coding[C]//IEEE International Conference on Digital Object Identifier. Dresden: IEEE, 2009: 1 – 5

[12] Heidarzadeh A, Lahouti F. On robust syndrome-based distributed source coding over noisy channels using LDPC codes[C]//Signal Processing and Communications. Dubai: IEEE, 2007: 400 – 403

[13] Li J, Hu R. Slepian-Wolf cooperation: a practical and efficient compress-and-forward relay scheme[C]//Proc 43rd Annual Allerton Conf on Communications, Control and Computing. St Louis, MO: IEEE, 2005: 275 – 279

[14] Xue G, Zhang W, Hao C. Syndrome-based error resilient scheme of distributed joint source-channel coding[C]//Communications Technology and Applications. Beijing: IEEE, 2009: 555 – 559

[15] Barros J, Servetto S D. Network information flow with correlated sources[J]. IEEE Trans Inform Theory, 2006, 52(1): 155 – 170

[16] Hu R, Viswanathan R, Li J. A new coding scheme for the noisy-channel slepian-wolf problem: separate design and joint decoding[C]//Global Telecommunications Conference. Dallas Texas: IEEE, 2004: 51

[17] Hua G, Cao L, Chen C. Distributed source coding under noisy transmission environments[C]//IEEE International Conference on Multimedia and Expo. Beijing: IEEE, 2007: 320 – 323

[18] Mansour M M, Shanbhag N R. Turbo decoder architectures for low density parity check codes[C]//Global Telecommunications Conference. Taiwan: IEEE, 2002, 2: 1383 – 1388

(编 辑:赵海容)

(上接第 110 页)

[2] Unsalan C, Boyer K L. Classifying land development in high-resolution panchromatic satellite images using straight-line statistics [J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 2004, 42(4): 907 – 919

[3] Lorette A, Descombes X, Zerubia J. Texture analysis through a Markovian modelling and fuzzy classification: application to urban area extraction from satellite images[J]. International Journal of Computer Vision, 2000, 36(3): 221 – 236

[4] 文贡坚,李德仁,叶芬. 从卫星遥感全色图像中自动提取城市目标[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2003, 28(2): 212 – 218

Wen Gongjian, Li Deren, Ye Fen. Automatic extraction of urban area from satellite panchromatic remote sensing images[J]. Journal of Wuhan University: Geomatics and Information Science, 2003, 28(2): 212 – 218(in Chinese)

[5] Zhong Ping, Wang Runsheng. Using combination of statistical models and multilevel structural information for detecting urban areas from a single gray-level image[J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 2007, 45(5): 1469 – 1482

[6] Sirmacek B, Unsalan C. Urban area detection using local feature points and spatial voting[J]. Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE, 2010, 7(1): 146 – 150

[7] May S, Inglada J. Urban area detection and segmentation using OTB[C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2009 IEEE International. Cape Town, South Africa: [s. n.], 2009, 4: 928 – 931

[8] Wang Min. Influence of number of features on texture based residential area extraction from remotely sensed imagery[C]//Image and Signal Processing, 2nd International Congress on. Tianjin: [s. n.], 2009: 1 – 4

[9] Pesaresi M, Gerhardinger A, Kayitakire F. A robust built-up area presence index by anisotropic rotation-invariant textural measure [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2008, 1(3): 180 – 192

[10] Movellan J. Tutorial on gabor filters[R/OL]. (1996) http://mplab. ucsd. edu/wordpress/tutorials/gabor. pdf

[11] Viola P, Jones M J. Robust real-time face detection [J]. Int J Comput Vis, 2004, 57(2): 137 – 154

[12] Gonzalez Raphael, Woods Richard E. Digital image processing, second edition [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 598 – 600

[13] Lipton A J, Fujiyoshi H, Patil R S. Moving target classification and tracking from real-time video[C]//Applications of Computer Vision, Fourth IEEE Workshop on. Princeton, New Jersey: [s. n.], 1998: 8 – 14

(编 辑:赵海容)