

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2013.12.002

一种码率自适应信源信道联合编码系统*

肖 旻**

(厦门理工学院 通信工程系,福建 厦门 361024)

摘 要:双 LDPC 码系统是新近出现的一种信源信道联合编码系统,该系统的性能虽然好但不稳定,在信源熵增加时会产生很高的误码平台。为了解决这一问题,提出了一种码率自适应双 LDPC 码系统,此系统采用码率自适应 LDPC 码作为信源码,当信源熵变化时可以灵活地调整信源码率,从而保证系统在高低不同的信源熵情况下都具有优秀、稳定的性能。仿真结果显示,在高低不同的信源熵情况下,所提出的码率自适应双 LDPC 码系统性能均好于传统双 LDPC 码系统,而且在误比特率为 10^{-6} 时都没有出现误码平台。

关键词:双 LDPC 码系统;信源信道联合编码;信源熵;码率自适应

中图分类号:TN911.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2013)12-1551-04

A Rate-compatible Joint Source and Channel Coding System

XIAO Min

(Communication Engineering Department, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China)

Abstract: Double LDPC (DLDPC) code systems which have been proposed recently are a class of joint source and channel coding systems. The performance of a DLDPC code system is good but not stable, and especially a high error floor arises when the source entropy increases. In this paper, a rate-compatible DLDPC (RC-DLDPC) code system is proposed to solve the problem. The RC-DLDPC code system working with a rate-compatible LDPC code as its source code can flexibly change its source rate when the source entropy changes, so as to achieve excellent and stable performances under different source entropies. Simulation results show that under different source entropies, the proposed RC-DLDPC code systems outperform the traditional DLDPC code systems without any error floors at $BER = 10^{-6}$.

Key words: double LDPC code system; joint source and channel coding; source entropy; rate-compatible

1 引 言

信源信道分离定理在实际应用中的局限性^[1]促成了信源信道联合编码技术的研究和发展。这方面工作主要分为两大类:一类是给出了信源压缩的格式(如 JPEG),根据压缩后信息序列的特性进行信道编码^[2-3];另一类则是直接假设信源为存在冗余的信息序列,在没有任何压缩格式的情况下,探讨如何利用这些冗余信息设计信源信道联合编码方

案^[4-5]。从研究对象来看,上述的第二类研究工作具有更大的普遍意义,其中 2010 年被提出的双 LDPC (Double LDPC, DLDPC) 码系统引起关注^[3-6]。该系统的信源码和信道码都采用了 LDPC 码(以下分别称为信源 LDPC 码和信道 LDPC 码),这样既可以在信源解码器和信道解码器中统一采用信度传播 (Belief Propagation, BP) 算法,又可以用 Tanner 图来

* 收稿日期:2013-09-24;修回日期:2013-11-19 Received date:2013-09-24;Revised date:2013-11-19
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61202013)
Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No. 61202013)
** 通讯作者: xiaomin_xmut@163.com Corresponding author: xiaomin_xmut@163.com

联合分析和优化这样一个级联系统。研究结果显示,DLDPC 码系统的性能好于传统的信源信道联合编码系统^[5]。

然而,DLDPC 码系统对信源信息的统计特性很敏感,当信源熵增加时,会造成误码平台 (error floor),而且信源熵越大,误码平台越高,有时甚至在误比特率 (Bit Error Rate, BER) 为 10^{-2} 就出现误码平台,使得编码增益几乎为 0。这是由于当信源熵增加时,如果仍然保持信源码率不变,压缩比就会过大,从而导致信源 LDPC 码的译码无法收敛,性能急剧下降^[5]。为了解决这一问题,本文提出一种码率自适应双 LDPC (Rate-compatible DLDPC, RC-DLDPC) 码系统,可以根据信源熵的大小灵活调整信源 LDPC 码的码率,有效降低误码平台,增强系统的鲁棒性。

2 DLDPC 码系统

DLDPC 码系统由信源 LDPC 码和信道 LDPC 码组成,假设信源 LDPC 码和信道 LDPC 码的校验矩阵分别为 H_{sc} 和 H_{cc} ,信源输入的用户信息序列为 s (假设为列序列),则根据 DLDPC 码系统的编码结构^[5],输出信源码字 b (假设为列序列) 为

$$b = H_{sc} s \tag{1}$$

这里的信源编码跟一般 LDPC 码的编码不同,并不是用生成矩阵,而是用校验矩阵直接生成信源码字 b 。而信道编码与一般 LDPC 码相同,需要先将校验矩阵 H_{cc} 转换成生成矩阵 G_{cc} ,再由下式得到信道码字 c :

$$c = G_{cc}^T b \tag{2}$$

因为信源编码器的输出是信道编码器的输入,所以整个 DLDPC 码系统编码过程可以表示如下:

$$c = G_{cc}^T b = G_{cc}^T (H_{sc} s) \tag{3}$$

从式(3)可以看出,若 H_{sc} 的行数和列数分别为 m_{sc} 和 n_{sc} , H_{cc} 的行数和列数分别为 m_{cc} 和 n_{cc} ,则 s 的长度为 n_{sc} , b 长度为 m_{sc} , c 长度为 n_{cc} 。定义信源 LDPC 码的码率为 $R_{sc} = m_{sc}/n_{sc}$ (与信源压缩比互为倒数),信道 LDPC 码的码率为 $R_{cc} = (n_{cc} - m_{cc})/n_{cc}$,整个编码结构的码率为 $R = R_{cc}/R_{sc}$ ^[5]。

图 1 给出了上述 DLDPC 码系统的 Tanner 图,左半部分表示信源 LDPC 码,右半部分为信道 LDPC 码。其中第 $n_{sc} + 1$ 到第 $n_{sc} + m_{sc}$ 的变量节点是信源 LDPC 码和信道 LDPC 码的公共部分,也是信源码和信道码在 BP 译码时相互传递信息的纽带,通过信

息的交流,互相纠正错误,从而实现信源信道的联合译码。关于具体的译码过程,请参考文献^[5]。

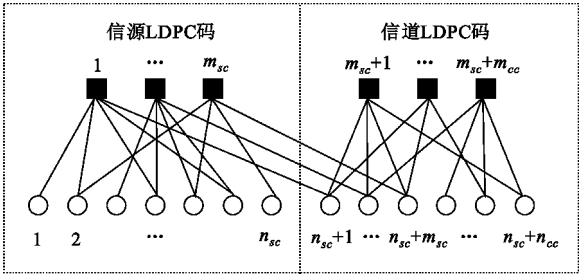


图 1 DLDPC 码系统的 Tanner 图
Fig. 1 The Tanner graph of a DLDPC code system

3 码率自适应 LDPC 码

码率自适应 LDPC 码 (Rate-compatible LDPC, RC-LDPC) 作为一种码率可根据需求灵活变化的信道编码方案,广泛应用于各种通信系统中。根据实现方法的不同,RC-LDPC 码主要分为以下 3 种类型:码率自适应删余型 (Rate-compatible Punctured) LDPC 码、码率自适应扩展型 (Rate-compatible Extended) LDPC 码、码率自适应缩短型 (Rate-compatible Shortened) LDPC 码。其中,码率自适应缩短型 LDPC 码 (以下简称 RCS-LDPC 码) 具有实现简单、性能优秀的特点,并且在不同码率情况下只需要使用一对编译码器,更加节省硬件成本^[7-8]。

RCS-LDPC 码通过“缩短”来改变信道码率的基本思路是:从一个高码率的母码 (mother code) 开始,当码率需要降低时,发送端的编码器将部分信息位设置为固定值 (0 或 1),接收端的译码器相应认为这些信息位已知,这样使得真正参与编译码的信息位变少了,而校验位数量不变,从而实现信道码率的降低。

RCS-LDPC 码的最大优势在于:无论码率怎么变化,收发端都只需要存储一个校验矩阵,从而节约了存储空间,也降低了硬件复杂度。另外,值得一提的是,从 Tanner 图的角度看,信息位被缩短,意味着这些信息位对应的变量节点 (也叫信息节点) 及其相连的边都被剪除 (pruned),从而有利于减少 Tanner 图中的小环 (short cycle),所以缩短这种方法也常被用来改进 LDPC 码的性能^[9]。

4 RC-DLDPC 码系统的设计

如前所述,信源码率 $R_{sc} = m_{sc}/n_{sc}$,其中 n_{sc} 是用

户信息序列的长度, m_{sc} 是信息压缩后的长度, R_{sc} 越大, 就意味着压缩比越小。那么, 当信源熵增加时, 我们可以提高 R_{sc} , 降低压缩比, 以此来保证系统性能, 避免出现较高的误码平台。本文利用码率可以灵活调整的 RCS-LDPC 码作为信源 LDPC 码, 当信源熵增加时, 提高 R_{sc} , 反之则降低 R_{sc} , 从而实现码率自适应 DLDPC 码系统, 更好地应对变化的信源熵, 增强鲁棒性。

与以往不同的是, 本文是将 RCS-LDPC 码作为信源 LDPC 码, 而不是信道 LDPC 码。根据第 2 节中 DLDPC 码的编码过程可知, 若将信源 LDPC 码的用户信息序列 s 缩短 k 位, 则新的码率为 $R'_{sc} = m_{sc}/(n_{sc}-k) > R_{sc}$ 。由此可见, 同样是 RCS-LDPC 码, 当其作为信道码时, 缩短后的信道码率是降低的; 而当其作为 DLDPC 码系统的信源码时, 缩短后的信源码率反而是提高了。所以, 当信源熵增加时, 我们可以通过缩短 RCS-LDPC 码来提高信源码率, 降低压缩比, 保证系统性能。

对于 RCS-LDPC 码的设计, 以往文献大多采用密度进化方法优化缩短分布 (Shortening Distribution)^[7], 但这种方法存在两个局限: 一是仅适用于母码为不规则 LDPC 码的情况; 二是该方法以无限码长为假设前提, 在有限码长情况下的优化效果不好。因此, 本文在缩短分布的基础上, 又引入了缩短图样 (Shortening Pattern) 这一新的设计参量, 能够更好地提高 RCS-LDPC 码在有限码长情况下的性能。

缩短分布只是指明了在码率变化时信息位需要被缩短的比例, 而缩短图样则进一步指出了具体哪些信息位需要被缩短。假设用 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_k\}$ 表示缩短图样, 其中 s_i 是一个二进制变量, 表示第 i 个信息位是否被缩短, 为 1 则保留, 为 0 则被缩短。注意到, 缩短一个信息位, 在 Tanner 图中等效为该信息位对应的信息节点及其所连接的边被剪除, 根据这一特点, 本文在设计缩短图样时提出两个“缩短准则”来优化缩短后码型的性能: 一是优先缩短造成较多小环的信息节点, 称为准则 1; 二是缩短时让校验节点的度尽可能集中, 称为准则 2。

对于准则 1, 是因为缩短环上的信息节点, 意味着该节点所在环被拆分^[9], 所以这里提出优先缩短造成较多小环的信息节点, 更有利于减少 Tanner 图中的小环, 提高码型的性能。对于准则 2, 是由于许多研究显示, LDPC 码校验节点的度越集中, 码型的性能越好。在这两个准则的控制下, 设计出的缩短图样比随机生成的缩短图样更为有效, 能更好地增

强 RCS-LDPC 码的性能, 进而也就有利于提高 RC-DLDPC 码系统的性能。

5 RC-DLDPC 码系统的仿真性能

为了验证本文所提出的 RC-DLDPC 码系统性能, 在不同信源熵情况下对该系统进行了仿真, 并与传统的 DLDPC 码系统进行了性能比较。仿真环境和参数为: AWGN 信道, BPSK 调制, 信源为二进制独立同分布 Bernoulli 信源, 采用 BP 译码算法, 最大迭代次数均为 50, 每个仿真点在找到 100 个错误码字后结束。

首先采用 (3, 6) 规则二进制 LDPC 码作为信源码和信道码, 且 $(m_{sc}, n_{sc}, R_{sc}) = (1600, 3200, 0.5)$, $(m_{cc}, n_{cc}, R_{cc}) = (1600, 3200, 0.5)$ 。图 2 给出了在不同信源熵 h 情况下, 传统 DLDPC 码系统与 RC-DLDPC 码系统的性能比较。可以看出, 当信源熵增加时, 传统 DLDPC 码系统没有码率自适应的能力, 信源码率始终为 0.5, 从而造成了很高的误码平台; 而且信源熵越大, 平台越高, 当 $h = 0.44$ 时, 编码效率几乎为 0。而本文提出的 RC-DLDPC 码系统由于采用了 RSC-LDPC 码作为信源码, 当信源熵增加时, 能够自适应地提高信源码率 R_{sc} , 使得系统的性能在不同信源熵情况下基本保持不变, 体现出很强的鲁棒性。

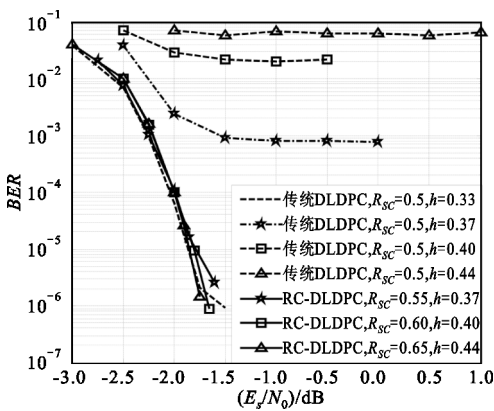


图 2 采用规则 LDPC 码的 RC-DLDPC 码系统性能
Fig. 2 The performances of the RC-DLDPC code system with regular LDPC codes as the source code and the channel code respectively

为了验证 RC-DLDPC 码系统的普适性, 进而采用不规则二进制 LDPC 码作为信源码和信道码, 且 $(m_{sc}, n_{sc}, R_{sc}) = (3200, 6400, 0.5)$, $(m_{cc}, n_{cc}, R_{cc}) = (3200, 6400, 0.5)$, 不规则 LDPC 码的度分布如式 (4) 所示:

$$\begin{aligned} \lambda(x) &= 0.25105x + 0.30938x^2 + \\ &\quad 0.00104x^3 + 0.43853x^9, \\ \rho(x) &= 0.63676x^6 + 0.36324x^7 \end{aligned} \tag{4}$$

图 3 是在不同信源熵 h 情况下,传统 DLDPC 码系统与 RC-DLDPC 码系统的性能比较图。从图中可以看出,当 $h=0.44$ 时,传统 DLDPC 码系统就出现了误码平台,随着信源熵的增加,性能急剧恶化;而本文设计的 RC-DLDPC 码系统能够在信源熵增加时自适应地提高信源码率 R_{sc} ,有效地降低了误码平台,保证了整个系统的稳定性能。

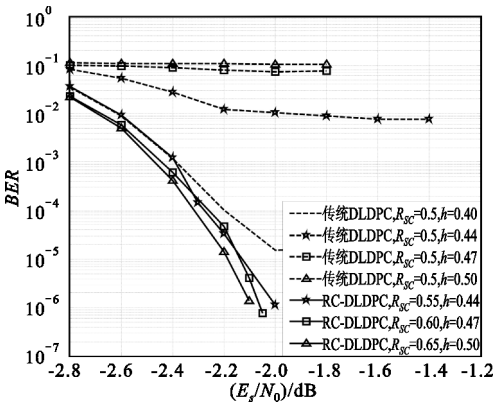


图 3 采用不规则 LDPC 码的 RC-DLDPC 码系统性能
Fig.3 The performances of the RC-DLDPC code system with irregular LDPC codes as the source code and the channel code respectively

6 结 论

本文提出了 RC-DLDPC 码系统,该系统利用码率自适应 LDPC 码作为信源码,使得信源码率能够随着信源熵的增加而自适应地提高,从而解决了传统 DLDPC 码系统在高信源熵情况下的高误码平台问题。AWGN 信道下的仿真结果显示,在不同信源熵情况下,本文所提出的 RC-DLDPC 码系统将传统 DLDPC 码系统的误码平台降低了 3 ~ 4 个数量级,虽然牺牲了一定的信息传输率,但是能够保证整个信源信道联合编码系统在不同信源熵情况下的稳定性能,增强了系统的鲁棒性。下一步将研究该 RC-DLDPC 码系统在马尔科夫信源下的性能。

参考文献:

[1] Vembu S, Verdu S, Steinberg Y. The Source-Channel Separation Theorem Revisited [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1995, 41(1):44-54.

[2] Sanchez V, Mandal M K. Efficient channel protection for JPEG2000 bitstream [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2004, 14(4):554-558.

[3] Pu L, Wu Z, Bilgin A, et al. LDPC-based iterative joint source-channel decoding for JPEG2000 [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(2):577-581.

[4] Ordentlich E, Seroussi G, Verdú S, et al. Universal algorithms for channel decoding of uncompressed sources [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2008, 54(5):2243-2262.

[5] Fresia M, Perez-Cruz F, Vincent-Poor H, et al. Joint source and channel coding [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2010, 27(6):104-113.

[6] He J, Wang L, Chen P. A joint source and channel coding scheme base on simple protograph structured codes [C]//Proceedings of 2012 IEEE International Symposium on Communications and Information Technologies. Gold Coast, Australia:IEEE, 2012:65-69.

[7] Tian T, Jones C R. Construction of rate-compatible LDPC codes utilizing information shortening and parity puncturing [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2005(5):789-795.

[8] Zhou L, Bai B, Xu M. Design of nonbinary rate-compatible LDPC codes utilizing bit-wise shortening method [J]. IEEE Communications Letters, 2010, 14(10):963-965.

[9] Liu X, Wu X, Zhao C. Shortening for irregular QC-LDPC codes [J]. IEEE Communications Letters, 2009, 13(8):612-614.

作者简介:



肖 旻(1982—),女,福建龙岩人,2011 年于厦门大学获博士学位,现为讲师,主要研究方向为信道编码、信源信道联合编码、网络编码。

XIAO Min was born in Longyan, Fujian Province, in 1982. She received the Ph. D. degree from Xiamen University in 2011. She is now a lecturer. Her research interests include channel coding, joint source and channel coding, network coding.

Email:xiaomin_xmut@163.com