

DOI: 10.3979/j.issn.1673-825X.2012.04.012

## 基于原模图 LDPC 码的不等保护传输性能研究

聂浩斌<sup>1</sup>, 何继光<sup>2</sup>, 王琳<sup>2</sup>

(1. 重庆邮电大学 重庆市移动通信重点实验室 重庆 400065; 2. 厦门大学 通信工程系 福建 厦门 361005)

**摘要:** 不等错误保护(unequal error protection, UEP) 是多媒体数据传输的一个重要举措。在接收状态不理想的情况下, 采用不等错误保护技术能够有效地保护传输过程中更重要的数据。利用星座图中信号点高低比特位的不同错误性能, 将 JPL(jet propulsion laboratory) 实验室提出的易于实现且性能优异的原模图低密度奇偶校验码(proto-graph low density parity check, PLDPC) 与四进制脉冲幅度调制(pulse amplitude modulation, 4PAM) 相结合实现在加性高斯白噪声信道(additive white Gaussian noise channel, AWGNC) 下传输数据的不等保护。仿真结果表明, 当码长较小时, 原模图 LDPC 码与规则 LDPC 码不等保护性能相当, 随着码长增长, 原模图 LDPC 码的性能优于规则 LDPC 码。

**关键词:** 原模图低密度奇偶校验码; 不等错误保护(UEP); 加性高斯白噪声信道(AWGNC)

中图分类号: TN911.22

文献标识码: A

文章编号: 1673-825X(2012)04-0452-05

## Transmission performance about unequal error protection for protograph LDPC-based codes

NIE Hao-bin<sup>1</sup>, HE Ji-guang<sup>2</sup>, WANG Lin<sup>2</sup>

(1. Key Lab of Mobile Communication in Chongqing, CQUPT, Chongqing 400065, P. R. China;

2. Dept. of Electronic Engineering, Xiamen Institute of Technology, Fujian 361005, P. R. China)

**Abstract:** Unequal error protection(UEP) is an important measurement regarding transportation of multimedia data. When the channel is in poor receiving condition, introduction of unequal error protection can effectively protect the more important transmitted data. In this paper, we make use of different performances of high and low bits of the constellation and combine protograph low density parity check(PLDPC) codes proposed by JPL which show better performances than conventional LDPC codes with pulse amplitude modulation(4PAM) to realize the unequal error protection of transmitted data through AWGNC. We can get from simulation results that the BER performance of PLDPC codes is almost equal to that of regular LDPC codes when code length is small. The BER performances of PLDPC codes are more competitive than regular LDPC codes as the code length increases.

**Key words:** protograph low density parity check(PLDPC) code; unequal error protection(UEP); additive white Gaussian noise channel(AWGNC)

## 0 引言

在许多通信系统中, 所传输的数据有不同的错误敏感度。对噪声特别敏感的部分重要信息, 在传输过程中需实行重点保护, 而对噪声不是特别敏感的次要信息则可以在传输过程中实行较少的保护来节省传输带宽和功率。在信道编码领域内, 关于数据的不等错误保护, 一直是应用价值比较高的研究

课题。不等错误保护(unequal error protection, UEP) 对于网络传输和视频传输中重要数据的保护都有重要意义。尤其是在多媒体通信当中, 数据帧头包含的控制信息一旦出错, 可能导致这一帧的数据传送失败, 保护帧头显得格外重要。假若对全部信息采用等价保护则是一种功率浪费, 因此, 采用不等保护方案可以有效地节省功率。1967 年, Masnick 和 Wolf 等<sup>[1]</sup> 人最先介绍不等错误保护码。之后, 使用

收稿日期: 2012-03-26 修订日期: 2012-05-16

基金项目: 国家自然科学基金(60972053)

**Foundation Item:** The National Natural Science Foundation of China(60972053)

其他方法得到的不等保护码被相继提出<sup>[2-3]</sup>。近几年对多级编码、Turbo 码等编码方案中的不等错误保护都有研究<sup>[4-6]</sup>。自 UEP 码提出以来,关于 UEP 方案的实现有很多途径,比如通过有目的地设计调制中的信号星座实现 UEP,利用高阶调制中一个信号星座点的高低比特位的不同误码性能来实现,高比特位能够获得比低比特位更好的错误性能。有些信道码<sup>[7-8]</sup>本身就具备不等保护特性,具有不同连接度的节点,误码性能不一样,对于变量节点,连接度越高,误码性能越好。另外,分层调制结合不同的前向纠错码能够提供更好的误码性能<sup>[9]</sup>。

本文将性能比较优越的原模图 LDPC 码(protograph low density parity check code)<sup>[10]</sup>与 4PAM(pulse amplitude modulation)调制相结合,实现传输数据的不等保护,并与基于规则 LDPC 码的系统传输性能进行比较。结果表明,当码长较小时,原模图 LDPC 码的误码性能与规则 LDPC 码的误码性能相当。在误码率(bit error rate, BER)为  $10^{-6}$  数量级时,码率为 1/2,码长为 256 的 AR4JA 码高比特位误码性能比(3,6)规则 LDPC 码差 0.35 dB,低比特位误码性能比(3,6)规则 LDPC 码差 0.4 dB。BER 为  $10^{-6}$  数量级时,码率 1/2,码长为 512 的 AR4JA 码高比特位误码性能比(3,6)规则 LDPC 码差 0.05 dB,低比特位误码性能比(3,6)规则 LDPC 码差 0.2 dB。随着码长的增加,原模图 LDPC 码性能优于(3,6)规则 LDPC 码。

### 1 原模图 LDPC 码

LDPC 码是一类由稀疏的校验矩阵(记为  $H$  矩阵)定义的线性分组码,每个校验矩阵都可由一个含有两类节点集合的 Tanner 图表示:一类为编码后比特的变量点集合,用  $V$  表示,另一类为校验约束关系的校验点集合,用  $C$  表示。由集合  $V, C$  以及这两类节点之间关联的边所组成的图形称为 Tanner 图。而原模图 LDPC 码可以看作一个由极少变量点和校验点构成的 Tanner 图。与 LDPC 码 Tanner 图的定义类似,原模图  $G = (V, C, E)$  也是由变量点集合  $V$ 、校验点集合  $C$  以及连接变量点和校验点的边的集合  $E$  组成。原模图中的每条边  $e \in E$  分别连接一个变量点  $V_i \in V$  和一个校验点  $C_j \in C$ ,每一条边都被看作一类边。在原模图中是允许平行边存在的,因此  $e \rightarrow (V_i, C_j) \in V \times C$  并不是一一映射的,原模图对应的校验矩阵称为基础矩阵,用  $B$  表示。

原模图 LDPC 码是与导出图相对应的 LDPC 码。导出图是由原模图经过重复后再对同类型的边进行交织后得到的,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,之后再

对大原模图中每个同类型的  $q$  条边用一个交织器进行重排,经过交织后得到的原模图就是导出图,导出图与 LDPC 码的因子图其本质是一样的。从导出图产生的整个过程可以看出,基础矩阵  $B$  和扩展规则是影响原模图 LDPC 码性能的 2 个主要因素。在本文之后的讨论过程中,都假设扩展规则为文献[11]中的改进型的 PEG(progressive edge-growth)算法。

下面给出原模图 LDPC 码因子图的生成过程,如图 1 所示。考虑图 1a 所示的原模图,基础矩阵为  $B$ 。图 1a 经过  $q = 2$  次重复后得到图 1b,之后对图 1b 中相同类型节点间的边进行置换便得到导出图,如图 1c 所示,该因子图对应的 LDPC 码称为原模图 LDPC 码。通过改变  $q$  值,能够得到任意码长的原模图 LDPC 码。

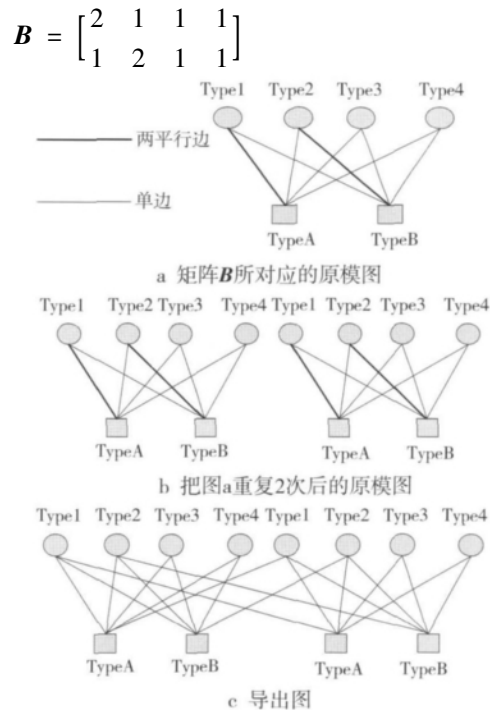


图 1 原模图 LDPC 码因子图的生成过程  
Fig. 1 Generate procedure of factor graph for protograph LDPC code

原模图中,允许变量节点集  $V$  中包含删余变量节点。假设有  $V_u$  个删余变量节点,则未删余变量节点  $V_i = |V| - V_u$  个。那么码率的计算将变为  $R = (|V| - |C|) / V_i$ 。其中,  $|V|$  表示变量节点的个数,  $|C|$  表示校验节点的个数。

### 2 系统模型

#### 2.1 调制模型

在本文中,我们采用格雷映射的 4PAM,如图 2 所示。星座信号定义为  $\chi = \{-3, -1, 1, 3\}$ 。任意 2 个星座点之间的最小欧氏距离为  $d_{\min}$ 。对于

4PAM,  $b_H$  表示星座信号点的高比特位,  $b_L$  表示星座信号点的低比特位,  $b_L$  和  $b_H$  的 BER 为<sup>[12]</sup>

$$BER(b_H) = \frac{1}{2}Q\left[\frac{d_{\min}}{2\sigma}\right] \quad (1)$$

$$BER(b_L) = Q\left[\frac{d_{\min}}{2\sigma}\right] \quad (2)$$

注意到,  $BER(b_H) = 1/2 BER(b_L)$ 。又信噪比为

$$SNR = \frac{E_s}{E_N} = \frac{2\left(\frac{1}{2}d_{\min}\right)^2 + 2\left(\frac{1}{2}d_{\min} + d_{\min}\right)^2}{4\sigma^2} = \frac{5d_{\min}^2}{4\sigma^2} \quad (3)$$

因此, BER 可以写为

$$BER(b_H) = \frac{1}{2}Q\left[\frac{d_{\min}}{2\sigma}\right] = \frac{1}{2}Q\left[\frac{\sqrt{SNR}}{4}\right] \quad (4)$$

$$BER(b_L) = Q\left[\frac{d_{\min}}{2\sigma}\right] = Q\left[\frac{\sqrt{SNR}}{4}\right] \quad (5)$$



图 2 格雷映射 4PAM 星座图

Fig. 2 Generalized 4PAM constellation with Gray mapping

### 2.2 通信系统模型

4PAM 在加性高斯白噪声信道下的通信系统模型如图 3 所示,其中采用的映射器,我们使用格雷 4PAM 映射器,由信源产生的二元信号经编码器后产生编码码字,映射器将信号映射到信号星座点上(此前需将码字分解成上下支路信号来联合选择星座信号点)通过信道加噪后,迭代解映射器从信道接收到信号并进行解映射。最后对解映射器的软输出采用对数域 BP 算法进行译码。

### 2.3 软输出迭代译码

如果解码结果为软输出,如比特对数似然比,我们能够推导出如下迭代解映射算法。

一个星座信号集用  $\chi$  表示,星座的大小  $M =$

$$LLR(b_H) = \log \frac{\exp\left(-\frac{(y+3)^2}{2\sigma^2} + L(b_L)\right) + \exp\left(-\frac{(y+1)^2}{2\sigma^2} - L(b_L)\right)}{\exp\left(-\frac{(y-3)^2}{2\sigma^2} + L(b_L)\right) + \exp\left(-\frac{(y-1)^2}{2\sigma^2} - L(b_L)\right)} \approx \max\left\{2L(b_L), \frac{2}{\sigma^2}(y+2)\right\} -$$

$$\max\left\{2L(b_L) + \frac{6}{\sigma^2}y, \frac{4}{\sigma^2}(y+1)\right\} \quad (8)$$

$$LLR(b_L) = \log \frac{\exp\left(-\frac{(y+3)^2}{2\sigma^2} + L(b_H)\right) + \exp\left(-\frac{(y-3)^2}{2\sigma^2} - L(b_H)\right)}{\exp\left(-\frac{(y+1)^2}{2\sigma^2} + L(b_H)\right) + \exp\left(-\frac{(y-1)^2}{2\sigma^2} - L(b_H)\right)} \approx \max\left\{2L(b_H), \frac{6}{\sigma^2}y\right\} -$$

$|\chi|$ , 每  $m = \text{lb } M$  个比特经信道传输后,通过解映射算法,第  $i$  个比特  $B_i$  的对数似然比可以表示为

$$LLR(B_i) = \log \frac{P(B_i = 0 | y)}{P(B_i = 1 | y)} = \log \frac{\sum_{\beta \in \chi_i^{(0)}} p(X = \beta | y)}{\sum_{\beta \in \chi_i^{(1)}} p(X = \beta | y)} = \log \frac{\sum_{\beta \in \chi_i^{(0)}} p(y | X = \beta) P(X = \beta)}{\sum_{\beta \in \chi_i^{(1)}} p(y | X = \beta) p(X = \beta)} = \log \frac{\sum_{\beta \in \chi_i^{(0)}} p(y | X = \beta) \exp\left(\sum_{j=1}^m \text{sgn}(f(\beta, j)) L(B_j)\right)}{\sum_{\beta \in \chi_i^{(1)}} p(y | X = \beta) \exp\left(\sum_{j=1}^m \text{sgn}(f(\beta, j)) L(B_j)\right)} \quad (6)$$

(6) 式中:  $\chi_i^{(0)}$  表示第  $i$  个比特为 0;  $\chi_i^{(1)}$  表示第  $i$  个比特为 1;  $f(\beta, j)$  表示符号  $\beta$  的第  $j$  个比特;  $L(B_j) = \log(p(B_j = 0)/p(B_j = 1))$  表示第  $j$  个比特的对数似然比;  $p(y | X = \beta)$  为传输符号  $\beta$  接收到  $y$  的概率密度函数。

$$\text{sgn}(b_j) = \begin{cases} 1, & b_j = 0 \\ -1, & b_j = 1 \end{cases} \quad (7)$$

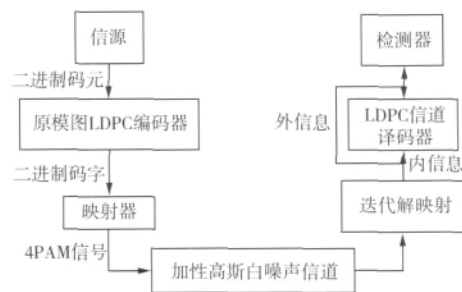


图 3 原模图 LDPC 码 4PAM 调制的系统方框图

Fig. 3 Systematic block diagram of protograph LDPC codes with G4PAM

对于 4PAM 星座图,在加性高斯白噪声信道下,高低比特位对应的对数似然比分别为<sup>[13]</sup>

$$\max \left\{ 2L(b_H) + \frac{2}{\sigma^2}(y+2), \frac{4}{\sigma^2}(y+1) \right\} \quad (9)$$

### 3 仿真结果与分析

基础矩阵为

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 1 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

分别经过 64, 128, 256 和 1 024 次扩展后经过删余操作得到码长为 256, 512, 1024 和 4 096 的 AR4JA 码, 该码通过 4PAM 调制, 得到高低比特位的误码率, 并对仿真结果进行了进一步分析。仿真是在 AWGN 信道下进行的, 译码算法采用对数域 BP 软输出迭代译码算法。

首先对码率  $R = 1/2$ , 信息长  $k = 128$  的 (3, 6) 规则 LDPC 码与信息长  $k = 128$  的 AR4JA 码进行误码性能仿真, 其高低比特位 BER 比较曲线如图 4 所示。(3, 6) 规则 LDPC 码和 AR4JA 码误码性能差别不大。在 BER 为  $10^{-6}$  数量级时, 码长为 256 的 (3, 6) 规则 LDPC 码比码长为 256 的 AR4JA 码高比特位误码性能好约 0.35 dB, (3, 6) 规则 LDPC 码低比特位误码性能比 AR4JA 码好约 0.4 dB。

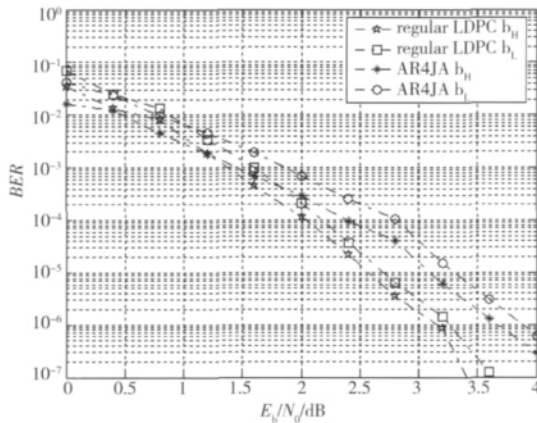


图 4 码率  $R = 1/2$ , 码长为 256 的规则 LDPC 码与 AR4JA 码高低比特位的 BER 性能曲线

Fig. 4 BER performance for high and low bits of regular LDPC codes and AR4JA codes with  $R = 1/2$ , code-length 256

码率  $R = 1/2$ , 信息长  $k = 256$  的 (3, 6) 规则 LDPC 码与信息长  $k = 256$  的 AR4JA 码高低比特位误码性能如图 5 所示, BER 为  $10^{-6}$  时, 码长为 512 的 (3, 6) 规则 LDPC 码高比特位性能相比 AR4JA 码差 0.05 dB, 低比特位误码性能比 (3, 6) 规则 LDPC 码差 0.2 dB。可见, 在短的码长时, 二者高低比特位误码性能相差不大。然而原模图 LDPC 码易用硬件实现结构简单的高速编码器。因此, 在不等保护性

能相当的情况下, 可以选择原模图 LDPC 码来实现对重要数据实现更高级别的保护。

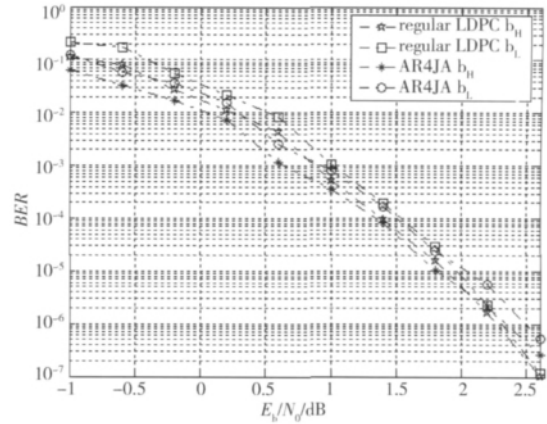


图 5 码率  $R = 1/2$ , 码长为 512 的规则 LDPC 码与 AR4JA 码高低比特位的 BER 性能曲线

Fig. 5 BER performance for high and low bits of regular LDPC codes and AR4JA codes with  $R = 1/2$  and code-length 512

对于码长分别为 1 024 和 4 096 的 AR4JA 码和 (3, 6) 规则 LDPC 码的高低比特位的性能曲线如图 6 和图 7 所示。从图 6 和图 7 中可以看出, 在长码的情况下 AR4JA 码的不等保护性能要优于 (3, 6) 规则 LDPC 码。因此对于长码, 我们可以考虑使用原模图 LDPC 码来实现某些应用场合所需要的不等保护性能。

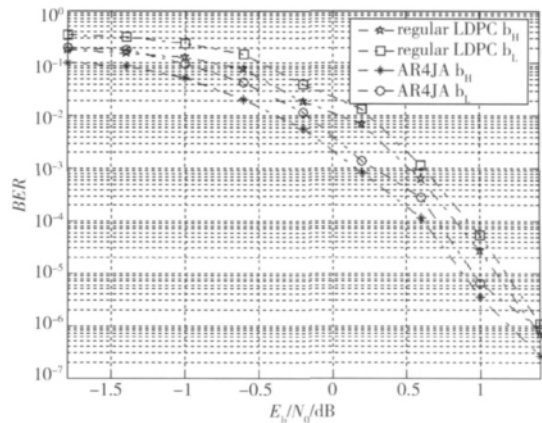


图 6 码率  $R = 1/2$ , 码长为 1 024 的规则 LDPC 码与 AR4JA 码高低比特位的 BER 性能曲线

Fig. 6 BER performance for high and low bits of regular LDPC codes and AR4JA codes with  $R = 1/2$  and code-length 1 024

另外, 从所有仿真结果可以看出, 低比特位 BER 大致等于两倍的高比特位 BER。这一结果与理论值基本吻合。

### 4 结 语

本文的主要目的是研究基于原模图 LDPC 码的不等保护传输性能。我们将 4PAM 与原模图 LDPC

码相结合来达到此目的。仿真结果表明这一方案不仅可以实现传输数据的不等保护,并且其不等保护性能在短码时与(3,6)规则 LDPC 码相当。在性能相当的情况下,由于原模图 LDPC 码编码更易于实现,码率可变等特性,利用原模图 LDPC 来实现不等保护可以减少硬件的复杂度。随着码长的增加,原模图 LDPC 码性能优于(3,6)规则 LDPC 码。

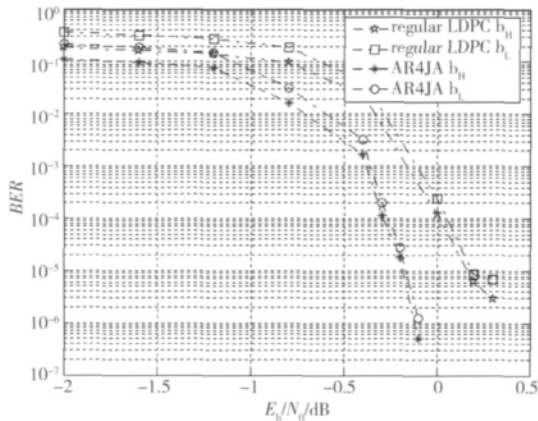


图 7 码率  $R = 1/2$ , 码长为 4 096 的规则 LDPC 码与 AR4JA 码高低比特的 BER 性能曲线

Fig. 7 BER performance for high and low bits of regular LDPC codes and AR4JA codes with  $R = 1/2$  and code-length 4 096

参考文献:

[1] MASNICK B, WOLF J. On linear unequal error protection codes [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1967, 13(4): 600-607.  
 [2] KILGUS C C, GORE W C. Cyclic codes with unequal error protection [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1971, 17(2): 214-215.  
 [3] BOYARINOV I, KATSMAN K. Linear unequal error protection codes [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1981, 27(3): 168-175.  
 [4] BOYARINOV I M, KATSMAN G L. Linear Unequal Error Protection [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1981, 27(2): 168-175.  
 [5] ISAKA M, FOSSORIER M P C, MORELOS-ZARAGOZA R H, et al. Multilevel Coded Modulation for Unequal Error Protection and Multistage Decoding-Part II: Asymmetric Constellations [J]. IEEE Transactions on Communications, 2000, 48(5): 774-786.  
 [6] 刘军清, 谢丹桂, 郑胜. 一种基于不等纠错保护的图像传输方法 [J]. 电路与系统学报, 2010, 15(4): 115-119. LIU Jun-qing, XIE Dan-gui, ZHENG Sheng. An image transmission method based-UEP [J]. Circuit and System, 2010, 15(4): 115-119.

[7] RICHARDSON T J, SHOKROLLAHI M A, URBANKE R L. Design of Capacity-Approaching Irregular Low-Density Parity-Check Codes [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2001, 47: 619-637.  
 [8] 刘冰, 高俊, 陶伟, 等. 带宽有效传输下多进制 LDPC 码的不等错误保护 [J]. 信号处理, 2011, 27(7): 1088-1094. LIU Bing, GAO Jun, TAO Wei, et al. Unequal Error Protection Nonbinary LDPC Codes for Bandwidth Efficient Transmission [J]. Signal Processing, 2011, 27(7): 1088-1094.  
 [9] DEETZEN N V, SANDBERG S. Design of Bandwidth-Efficient Unequal Error Protection LDPC Codes [J]. IEEE Transactions on Communications, 2010, 58(3): 802-811.  
 [10] THORPE J. Low-density parity-check (LDPC) codes constructed from protographs [R]. [s.l.]: IPN Progress Report, 2003: 42-154.  
 [11] BONELLO N, CHEN Sheng, HANZO L. Construction of regular Quasi-Cyclic protograph LDPC codes based on vandermonde matrices [J]. IEEE Transactions Veh Technol, 2008, 54(4): 2583-2588.  
 [12] NIU Dimin, PENG Kewu, SONG Jian. LDPC Coded Modulation with Unequal Protection [C]// Communications, Circuits and Systems, 2008. ICCAS 2008. International Conference on. [s.l.]: Conference Publications, 2008: 114-118.  
 [13] XIE Qiu-liang, PENG Ke-wu, SONG Jian. On the Channel Capacity and Iterative Demapping of Generalized 4PAM over AWGN Channel [C]// IEEE Singapore International Conference on Communication Systems. Singapore: Conference Publications, 2008: 860-863.

作者简介:



聂浩斌(1986-),女,湖南人,硕士研究生,主要研究方向为 LDPC 信道编码理论。E-mail: NieHaoBin@163.com.

何继光(1988-),男,湖南人,硕士研究生,主要研究方向为联合信源信道编码。

王琳(1963-),男,重庆人,教授,博士,教育部新世纪人才,现为厦门大学通信工程系博士生导师,研究方向为宽带/超宽无线通信技术算法设计与硬件实现。

(编辑:魏琴芳)