

基于 IR-UWB 系统的高速准循环 LDPC 编解码器设计

曾辉 黄鲁 杨灿美

(中国科技大学电子与科学技术系, 合肥, 230027)

摘要: 阐述了一种基于脉冲无线电超宽带(Impulse radio ultra-wideband, IR-UWB)系统的高速低密度奇偶校验码(Low density parity-check codes, LDPC)算法推导及其性能比较,分析了渐进添边算法(Progressive edge-growth, PEG)结合分块准循环(Quasi-cyclic, QC)的方式实现校验矩阵的构造以及单位阵(I 矩阵)和 Q 矩阵作为子循环矩阵时的性能,并通过 Matlab 仿真的误比特曲线对算法进行分析。该 LDPC 解码器的设计采用一种基于变量因子的最小和(Minimum sum, MS)译码算法,硬件复杂度较低,在标准 UWB 衰弱信道中,误码率 10^{-6} 下产生约 3.2 dB 信噪损失。

关键词: 脉冲无线电超宽带;渐进添边算法;准循环;低密度奇偶校验码

中图分类号: TP911.22 **文献标志码:** A

High-Rate Quasi-Cyclic LDPC Design for IR-UWB System

Zeng Hui, Huang Lu, Yang Chanmei

(Department of Electronic Science & Technology, University of Sciences & Technology of China, Hefei, 230027, China)

Abstract: The derivation and the performance analysis of a kind of high-rate low density parity check (LDPC) codes algorithm are proposed for the application of impulse radio ultra-wideband (IR-UWB) communication system. The PEG algorithm is combined with block quasi-cyclic manner to construct the parity check matrix and the two different algorithms performance are compared by using the matrix I and matrix Q as the sub-block cyclic matrix. The performance analysis is conducted with bit-error curve from Matlab simulation. Moreover, the minimum sum (MS) decoding algorithm based on a variable factor of the design is proposed and the final low complexity low density parity-check code (LDPC) decoder incurs only about 3.2dB signal-to-noise ratio (SNR) loss with the error rate of 10^{-6} bit in standard UWB fading channels.

Key words: impulse radio ultra-wideband (IR-UWB); progressive edge-growth algorithm (PEG); quasi-cyclic (QC); low-density parity check code (LDPC)

引 言

通信系统将具有更高的数据传输速率,且逐渐转向宽带通信。其中超宽带系统最为典型。超宽带系统拥有更宽的带宽(3.1~10.6 GHz)以及高的数据传输速率(802.15.3a 协议下的数据速率大于 100

Mb/s), 并且系统复杂度很低, 硬件消耗低。为了提高数据高速传输的可靠性, LDPC 成为 UWB 系统中极为重要的信道编码方式, 因为它有近乎香农极限(Shannon-Limit)的纠错能力。

LDPC 由 Gallager^[1] 在 1962 年提出, 它的硬件实现较复杂。因为当时硬件的集成水平的限制, 直到 20 世纪 90 年代, Mackay 重新研究 LDPC 码, 才引发对其的研究热潮。文献[2]给出了离 Shannon 极限只有 0.004 5 dB 的 LDPC 码, 但是随机构造法使得实现较为困难, 硬件实现过于复杂。文献[3]提出了准循环矩阵的方式能更有效地实现 LDPC 码校验矩阵的构造。

本文的 IR-UWB 系统用来实现高速率视频的实时通信, 系统基带是单比特接收机^[4]以二次微分式高斯脉冲调制每比特信息的方式实现长物理帧的传输, 为减少时延, 决定采用并行编译码。UWB 系统也采用其他编码方式, 例如 RS^[5], Turbo^[6] 以及组合码^[7] 等。RS 码相对其他线性分组码, 同码率时纠错能力较强, 硬件复杂度低^[8], 但只限于中短型码。而 Vertebi, Turbo 等卷积码, 其较高的译码复杂度, 卷积码更适于串行传输。相比之下, LDPC 对长码字的性能更优异, 每个物理帧传输的有效码作为一个编码单元。译码复杂度高于 RS 码, 但低于 Turbo, 可实现完全并行译码^[9]。

1 校验矩阵的构造与编码

LDPC 码是一类基于稀疏校验矩阵(H 阵)的线性分组码, 可在硬件上有效实现的 LDPC 编码有 Hu 等提出的渐进边增长(Progressive edge-growth, PEG)算法。此法采用逐步优化的思路, 通过在 Tanner 图(图 1)上依次添加边来构造最终的结点关系图, 每次添加的边都尽可能地减少对图中其他边的影响, 具体算法见文献[10]。虽然纠错性能好, 但无法简单编码, 不太适于长码, 并且译码存储复杂度过高。

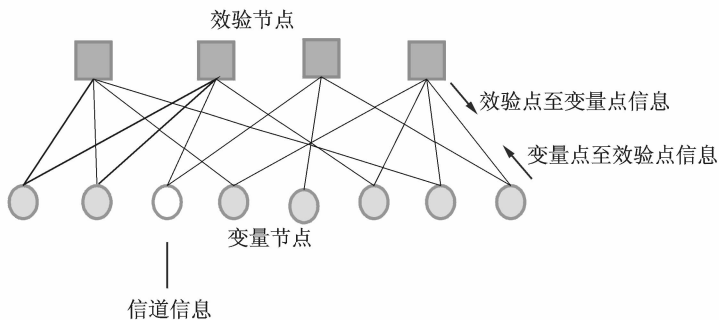


图 1 基于 Tanner 图的 LDPC 信息传递

Fig. 1 LDPC message channel based on tanner

根据香农理论, 构造随机矩阵在硬件上难以实现, 由此诞生了由几何代数的方法构造 LDPC 校验矩阵——准循环^[3], 即用循环移位矩阵块构造 H 阵。常用的循环移位矩阵有 I 矩阵、 D 矩阵和 Q 矩阵。 Q 矩阵中“1”的分布无规律, 可以通过皇后算法获得, 但需用额外的存储空间, 一般用查找表的方式在硬件上实现。

然而, 直接以 QC 实现长码字校验矩阵的构造硬件实现仍显复杂, 译码存储不易实现。文献[11]给出了校验矩阵 PEG 构造方法, PEG 算法构造的 Tanner 图具有最小的距离和良好的环长(图 1 粗线示), 这些环长对信息概率的统计不利, 使得节点之间传递的外部消息的独立性降低, 削弱了抗干扰能力。结合 QC-LDPC 码的循环矩阵构造 LDPC 校验矩阵, 在中短码长时可以获得与随机构造的规则码相当的性能。文献[11]阐述的构建较大围长的 LDPC 校验矩阵方法——消环算法, 消除 H 阵中的短环(一般消除 4, 6 和 8 环)。

综上所述, 可先用 PEG 算法构造基矩阵, 在所记录的环中取出长度最短环的“1”元素, 消除 Tanner

图中的短环,“0”元素用“-1”替代;接着,随机产生子矩阵偏移量代替矩阵中非“-1”元素,并用相应维的循环移位 Q 矩阵或 I 矩阵代替矩阵中的对应其偏移量的元素,可进一步消除所生成 H 阵中的短环,“-1”代表该循环矩阵为全零矩阵。这种 H 阵的构造法,大大降低了硬件实现的复杂度,更适于长型码字,译码存储也简单得多。

1.1 仿真结果与分析

IEEE 802.15.3a 协议关于 UWB 信道给出了基于 S-V 模型的 4 种场景模式,具体 UWB 室内信道特征见文献[12]。其中存在视距信号的 CM1 模式,其主要考虑加性高斯白噪声(Additive white Gaussian noise, AWGN),多径干扰以及信号幅度呈现近乎对数正态分布的衰落。信道相对其他场景更稳定,适合近距离室内 UWB 通信系统模拟仿真。

本系统采用 BPSK 调制,编码器的设计旨在实现校验矩阵性能的比较,因此可选择二进制加性高斯白噪声信道,采用一般的 MS 译码方式。仿真中分别以原始 PEG 算法和本文阐述的算法(I 与 Q 循环矩阵)构造 3 类不同的 H 阵:码长 $n=900$ (PEG 适于中短型码),码率 $R=1/2$,变量节点的维度分布^[10]为 $\lambda(x)=0.3x+0.16x^2+0.17x^3+0.37x^6$,每个循环移位矩阵定为维长 15 的 I/Q 矩阵(Q 阵中任选其一)。译码迭代次数为 15。图 2 显示了其性能曲线,该设计阐述的构造校验矩阵的方式,性能更接近于 PEG 算法。 Q 矩阵作为准循环矩阵,性能更显优越。

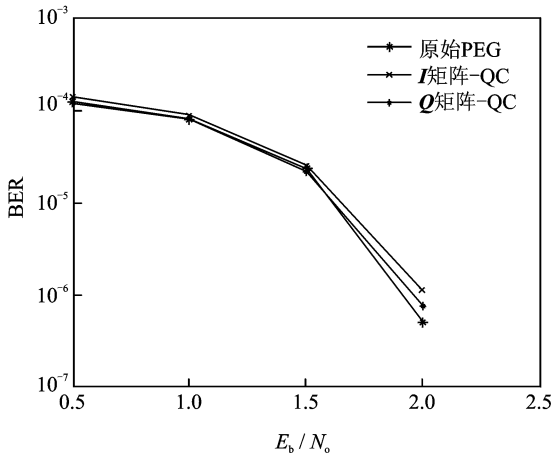


图 2 I/Q 矩阵的 QC-LDPC 性能比较

Fig. 2 I/Q matrix QC-LDPC performance comparison

图 3 显示 PEG 算法与本文讨论的算法在码率 $R=1/2$ 和 $5/6$ 下的仿真实验结果(其他条件相同)。由图可见,信噪比较低时,基于 I 矩阵和 Q 矩阵 QC-LDPC 的性能相当;高信噪比时,基于 Q 矩阵的 LDPC 优于基于 I 矩阵的 LDPC 码的性能,而随着码率的升高,两者的性能都有所降低。对于 $R=1/2$ 码率,码长为 $n=1800$,误码率为低于 10^{-6} 时,两者 SNR 都在 2 dB 左右。

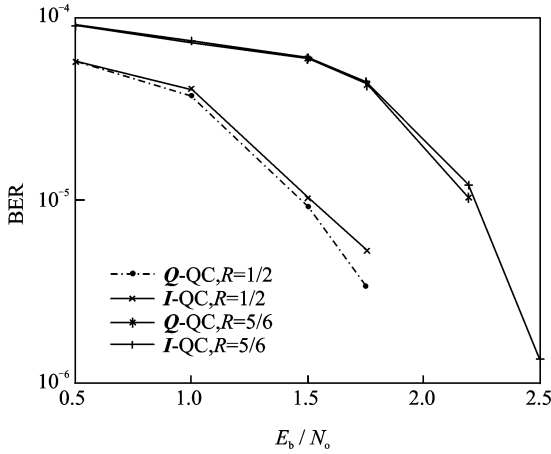
1.2 快速并行编码实现

令 x 为待编码的信息序列, p 为校验序列,根据校验矩阵 H 的定义

$$H \times [x, p] = 0$$

线性分组码的一般性特征: n 为信息位长(矩阵块数), m 为校验阵部分的块数,左边为信息比特部分,右边为校验比特部分。

$$H = [H_I^M \mid H_p^M] \quad (1)$$

图3 $R=1/2$ 和 $5/6$, I/Q 矩阵 QC-LDPC 性能对比Fig. 3 $R=1/2$ or $5/6$ I/Q matrix QC-LDPC performance comparison

$$\begin{aligned} [\mathbf{H}_I^M | \mathbf{H}_P^M] \times [x_1, x_2, \dots, x_n, p_1, p_2, \dots, p_m] &= [0] \\ \mathbf{H}_I^M \times [x_1, x_2, \dots, x_n] &= \mathbf{H}_P^M \times [p_1, p_2, \dots, p_m] \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)分解为以下形式

$$\begin{aligned} p_1 &= \mathbf{H}_{I1}^M \times [x_1, x_2 \dots x_n] \\ p_2 &= \mathbf{H}_{I2}^M \times [x_1, x_2 \dots x_n] + \mathbf{H}_{P2,1}^M \times p_1 \\ p_3 &= \mathbf{H}_{I3}^M \times [x_1, x_2 \dots x_n] + \mathbf{H}_{P3,1}^M \times p_1 + \mathbf{H}_{P3,2}^M \times p_2 \\ p_4 &= \mathbf{H}_{I4}^M \times [x_1, x_2 \dots x_n] + \mathbf{H}_{P4,2}^M \times p_2 + \mathbf{H}_{P4,3}^M \times p_3 \\ &\vdots \\ p_m &= \mathbf{H}_{Im}^M \times [x_1, x_2 \dots x_n] + \mathbf{H}_{Pm,m-2}^M \times c_{m-2} + \mathbf{H}_{Pm,m-1}^M \times p_{m-1} \end{aligned}$$

式中: \mathbf{H}_{Im}^M 表示矩阵 \mathbf{H}_I^M 的第 m 行元素, $\mathbf{H}_{Pm,n}^M$ 表示矩阵 \mathbf{H}_P^M 中第 m 行 n 列的元素。这种编码方式可实现并行高速编码。

综上所述,低发射功率的 UWB(-41.3 dBm/MHz)接收端信噪比较低,选择 I 矩阵更适合在电路实现,其不需要 I 矩阵的存储空间,矩阵运算时只需循环矩阵的移位矢量就可实现有效编码。文献[13]采用可配置循环移位寄存器实现高速并行编码;译码存储也相对简单,否则,需要额外用上 Q 矩阵的存储空间和独立的矩阵运算单元。

2 改进型最小和译码

LDPC 通常译码方式主要有软判决的置信译码(Belief propagation, BP)和加权比特翻转(Weighted bit flip, WBF)的迭代译码,如文献[14]复合译码性能的分析。本决定采用性能更优越,复杂度较高的 BP 译码来满足本系统高性能的要求,其通用的有对数域 BP,以及在其基础上改进的最小和译码。为降低复杂度又提出了改进型最小和,主要对其中 $\phi(x)$ 近似。文献[15]提出了用线性函数逼近方法分段地处理以达到近似 $\phi(x)$ 函数的目的,但是其硬件实现的复杂度过高。实际运用中只需个变量因子分段近似即可,分段区间是有限的,因子取值相对有限,并且这个变量也可用来均衡信道信噪。

2.1 变量因子最小和译码

$\phi(x)$ 表达式如下

$$\phi(x) = -\log[\tanh(x/2)] = \phi^{-1}(x)$$

图 4 为 $\phi(x)$ 的示意图,随 x 的增大, $\phi(x)$ 值呈下降指数迅速减小,所以 $|L(r_{ji})|$ 中占主要作用的是绝对值较小的 $\beta_{ij} = |L(q_{ji})|$,从而简化对数 BP 译码算法,可得

$$\phi\left[\sum_{i \in V, \lambda_i} \phi(|L(q_{ij})|)\right] \approx \phi\left[\phi\left(\min_{i \in V, \lambda_i} |L(q_{ij})|\right)\right] = \min_{i \in V, \lambda_i} |L(q_{ij})| \quad (3)$$

$$L^k(r_{ji}) = \prod_{i \in V, \lambda_i} \alpha_{ij} \min_{i \in V, \lambda_i} |L^{(k-1)}(q_{ij})| = \prod_{i \in V, \lambda_i} \text{sign}(L^{(k-1)}(q_{ij})) \min_{i \in V, \lambda_i} |L^{(k-1)}(q_{ij})| \quad (4)$$

$$L^k(r_{ji}) = \prod_{i \in V, \lambda_i} \alpha_{ij} \min_{i \in V, \lambda_i} |L^{(k-1)}(q_{ij})| = \prod_{i \in V, \lambda_i} \text{sign}(L^{(k-1)}(q_{ij})) \alpha \times \min_{i \in V, \lambda_i} |L^{(k-1)}(q_{ij})| \quad (5)$$

变量节点 v 利用校验节点传递的第 k 次迭代的信息 $L^k(r_{ji})$ 计算信息节点信息 $L^k(q_{ij})$

$$L^k(q_{ij}) = \sum_{j' \in C, \lambda_j} L^k(r_{j'i}) + L(c_i) \quad (6)$$

出于节省存储空间的考虑,解码算法如下

$$L^k(r_{ji}) = \prod_{j' \in C, \lambda_j} \text{sgn}(L^{k-1}(Q_i) - L^{(k-1)}(r_{ji})) \times \min_{j' \in C, \lambda_j} |L^{k-1}(Q_i) - L^{(k-1)}(r_{ji})| \quad (7)$$

$$L_j^{(1)} = \prod_{j' \in C, \lambda_j} \text{sgn}(L(c_i)) \times \min_{j' \in C, \lambda_j} |L(c_i)| \quad (8)$$

$$L^k(Q_i) = L(c_i) + \sum_{j' \in C, \lambda_j} L_{j'i}^k \quad (9)$$

Min 的取值是个近似的结果,添加调整参数 α , 让其更近似于对数域 BP, 如式(5)所示。对比两种算法流程,解码算法中 $L^k(r_{ji})$ (校验节点传递给变量节点相关概率信息)更新不需要 $L(q_{ij})$ (变量节点传递给校验节点的相关概率信息),只需要计算 $L^{k-1}(Q_i) - L^{(k-1)}(r_{ji})$,这样减少了解码过程中信息的存储量。

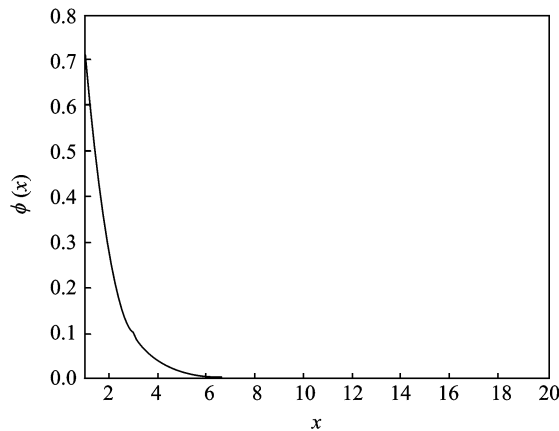
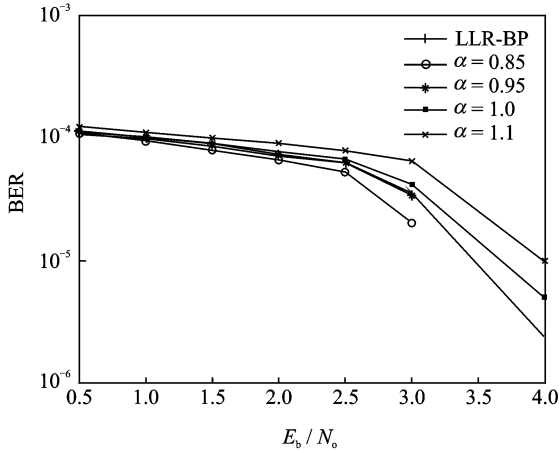


图 4 函数 $\phi(x)$ 示意图

Fig. 4 Function $\phi(x)$ sketch

2.2 译码仿真结果分析

鉴于 UWB 系统实时传送的物理帧长,以及校验矩阵的构造方式,选择 $(n, k) = (1\ 800, 900)$ 的码字,循环移位维长定为 30。该系统接收机^[4]在信道估计时提取的每比特概率信息可直接用于 LDPC 译码。仿真在 CM1 场景模型^[9]下进行,译码迭代次数为 20,输入 20 帧数据,图 5 给出了对数 BP 与变量因子 MS 译码的性能结果。实验中对 MS 算法进行 α 取值遍历,从图中可以得到在低信噪比时,两种译码的性能差距较小,但随着信噪比的增大,对数译码 BP 仍显示其优良的性能。对较低信号发射功率的 UWB 系统,该改进的 MS 译码更适合于 UWB 系统,因为其硬件实现复杂度低于对数 BP 译码,且其译

图5 (1 800,900)LDPC 码在 α 下的性能遍历Fig.5 (1 800,900) LDPC performance traversal on α

码具有调节功能。图中 $\alpha = 0.85$ 或 0.95 时,译码性能优于对数 BP,在硬件实现中,只需要加乘法器即可,而 α 的取值可在量化分析后获得。

图6显示了(1 800,900)码字在 $\alpha = 0.8$ 时不同迭代次数下的译码性能。可以看出,随着迭代次数的增加,BER 呈下降趋势。信噪比较低时,性能没有因迭代次数而有较大的改变,拥有较低的译码延迟,这更有利于 UWB 系统高速率传输的特性。当迭代次数超过 15 时,BER = 10^{-6} ,信噪比小于 3.3 dB。迭代运算过程中如果 $c \times \mathbf{H}^T = 0$ 成立,则译码成功,反之,迭代次数达到指定数(具体得实际测试而定)时退出,译码结束。

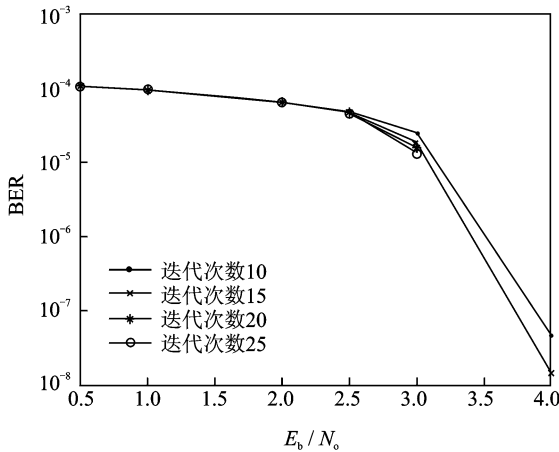


图6 (1 800,900)码字在迭代次数不同的性能

Fig.6 (1 800,900) performance comparison on traversal num

3 结束语

本文分析了 PEG 算法结合分块准循环矩阵构造校验矩阵的方法、QC-LDPC 快速编码的实现策略以及改进型变量因子最小和译码算法,并对它们进行了相关性能分析比较。编解码部分的仿真性能对

比可得:相比 AWGN 信道,本设计的 LDPC 码在标准 S-V 模型 CM1 场景的衰弱信道中,多损失至少 1 dB 的信噪。总之,PEG 算法结合分块 QC 构造的校验矩阵,因其具有准循环结构,因此方便硬件存储及实现,变量因子最小和译码方式提供了译码参数调节的功能,有利于优化译码性能均衡信道衰弱,适用于低发射功率下的 IR-UWB 系统。

参考文献:

- [1] Gallager R. Low density parity check codes[J]. IRE Transaction on Information Theory, 1962, 8(1):21-28.
- [2] Chung S Y, Forney G D, Richardson Jr J, et al. On the design of low-density parity check codes within 0.004 5 dB of the Shannon limit [J]. IEEE Comm, Letter, 2001, 5(2):58-60.
- [3] Mu Liwei, Liu Xingcheng. Construction of binary LDPC convolutional codes based on finite fields [J]. IEEE Communication Letters, 2012, 16(6):897-900.
- [4] Yin Huarui, Wang Zhengdao, Ke Lei, et al. Monobit digital receivers: Design, performance, and application to impulse radio[J]. IEEE Trans on Communication, 2010, 58(6):1695-1704.
- [5] 张朝霞,王华奎. 跳时 Reed-Solomon 码的超宽带多址接入方式[J]. 太原理工大学学报, 2012, 43(2):119-122.
- Zhang Zhaoxia, Wang Huakui. The multiple access of ultra-wide band based on reed-solomon codes [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2012, 43(2):119-122.
- [6] Haniffuddin H, Mohammad R, Mansor W. A review of turbo coding with channel estimate for single input single output system in ultra-wideband channel [C] // 8th IEEE International Colloquium on Signal Processing and its Applications. Hong kong: IEEE, 2012:528-532.
- [7] Nyembezi N, Wasim Q. M. Concatenated RS-convolutional codes for ultra-wideband multiband OFDM ultra-wideband[C] // IEEE 2006 International Conference on Ultra-Wideband. Waltham, MA, USA: IEEE, 2006:137-142.
- [8] Sung-Woo C, Sang S. RS decoder architecture for UWB [C]//8th International Conference on Advanced Communication Technology. Phoenix Park: IEEE, 2006:808.
- [9] Peng Xiao, Zhao Xiongxin, Xie Qian. A macro-layer level fully parallel layered LDPC decoder SOC for IEEE 802. 15. 3c application [C]//2011 International Symposium on VLSI Design, Automation and Test. Hsinchu, Taiwan: IEEE, 2011:1-4.
- [10] Hu Xiaoyu, Eleftheriou E. Regular and irregular progressive edge-growth tanner graphs [J]. IEEE Trans on Information Theory, 2005, 51(1): 386-398.
- [11] Wang Yuliang, Ping Gong. An improved construction method of QC-LDPC codes based on the PEG algorithm[C] //2011 Third Pacific-Asia Conference on Circuits, Communications and System. Wuhan: IEEE, 2011:1-4
- [12] Andreas F M. Channel models for ultra-wideband personal area net-works[J]. IEEE Wireless Communications, 2003, 10(6): 14-21.
- [13] 徐鹰,卫国. 基于 FPGA 的 QSBC-LDPC 码编码器的设计与实现[J]. 数据采集与处理, 2008, 23(6):713-717.
- Xu Ying, Wei Guo. Design and implementation of QSBC-LDPC encoders based on FPGA [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2008, 23(6):713-717.
- [14] Alfa A S, Jun C. Hybrid linear programming based decoding algorithm for LDPC codes[J]. IEEE Trans on Communications, 2011, 59(3):740-749.
- [15] 徐鹰,卫国,朱近康. 一种基于最小区域选择的 LDPC 码迭代译码算法[J]. 中国科学技术大学学报, 2008, 38(12):1365-1371.
- Xu Ying, Wei Guo, Zhu Jinkang. Min-zone selection decoding algorithm for LDPC codes[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2008, 38(12): 1365-1371.

作者简介:



曾辉(1986-),男,硕士研究生,研究方向:无线通信基带实现、数字系统与数字芯片集成, E-mail: huiustc@sina. cn.



黄鲁(1961-),男,副教授,研究方向:模拟/射频 IC 设计。



杨灿美(1966-),男,博士后,研究员,研究方向:通信数字基带系统集成电路设计、低功耗与高密度 SoC 架构与设计、信号处理及其在无线通信与雷达中应用。

