

LDPC编码自适应加载MIMO-OFDM系统性能分析

杨万全, 袁爱平

(四川大学电子信息学院 成都 610064)

【摘要】介绍了LDPC校验阵的构造及编译码算法, 采用了随机法构造LDPC校验阵, 编码基于高斯消去直接进行译码采用无穷阶量化时的置信传播算法; 讨论了OFDM自适应加载技术与多输入多输出技术, 结合自适应比特功率分配算法与基于多载波调制的比特分配方案实现了该加载分配技术; 给出了LDPC编码的自适应加载MIMO-OFDM系统的模型。经仿真分析得出, 二元域上非规则LDPC编码的系统性能优于多元域上的, 自适应加载MIMO-OFDM技术大大提高了系统传输速率, 有效增强了系统抗衰落性。

关键词 自适应加载; 低密度校验码; 多输入多输出; 正交频分复用
中图分类号 TN386 **文献标识码** A

Performance Analysis of MIMO-OFDM Systems with Adaptive-Loading Based on LDPC Codes

YANG Wan-quan and YUAN Ai-ping

(College of Electronics and Information, Sichuan University Chengdu 610064)

Abstract The construction of the check matrix and the coding and decoding algorithms of low density parity check (LDPC) are introduced. The adaptive loading technique of orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) and multiple-input multiple-output (MIMO) are discussed. The model of the LDPC coded MIMO-OFDM system with adaptive-loading is given. The performance of the system under multiple-path rayleigh fading channels is simulated and analyzed. It is obtained that the performance of irregular LDPC coded system based on GF(2) is better than that based on GF(q, q > 2). The presented MIMO-OFDM system can greatly enhance the transfer rate and has an excellent anti-fading feature under multiple-path fading channels.

Key words adaptive-loading; low density parity check codes; multiple input multiple output technique; orthogonal frequency division multiplexing

正交频分复用(OFDM)技术有效减小了ISI, 且正交利用有限频带, 强烈抑制多径衰落和窄带干扰, 对其进行前向交错编码将进一步提高OFDM系统的BER/SER性能。低密度校验码(LDPC)在具有实用意义的解码复杂度下具有接近香农极限的性能^[1], 而且在非正则图上构造的基于GF(q)域上的LDPC码性能要好于Turbo码^[2]。文献[3]从信息论的角度证明, 多天线技术(MIMO)可大大增加无线通信系统的容量, 并改善其性能。基于OFDM、LDPC以及MIMO的上述优势, 本文将三者综合考虑, 并结合OFDM的比特、能量以及调制的自适应技术, 对系统整体性能进行了仿真研究。

1 LDPC校验阵构造及编译码方法

LDPC校验矩阵构造分为随机化方法和系统化

方法两大类^[4]。其中随机化方法构造较易, 但编码复杂度较高; 系统化方法构造复杂, 但可得循环和准循环特性的LDPC码, 编码复杂度因和码长成线性关系而达到最低。相应地, LDPC码编码包含校验矩阵完全随机或具有循环和准循环结构两种方法^[4]。随机方法可基于高斯消去直接编码或基于近似下三角矩阵有效编码; 循环码或者准循环码的编码用移位寄存器实现。LDPC译码基于编码Tanner图结构的消息传递(message passing, MP)算法类思想, 采用无穷阶量化时的置信传播(belief propagation, BP)算法^[5], 译码复杂度最高, 性能好。

系统中, 采用随机法构造校验矩阵, 产生一列重为要求列重向下取整的校验矩阵, 而后对其进行行列 q 进制数的填充达到要求列重, 形成不规则校验阵 H 。校验阵转化为生成阵 G 时采用高斯思想先将校

验阵化为下三角阵, 初等变换到右单位阵 $H = [P | I]$, 由 $G = [I | P']$ 可得。直接编码形成不规则LDPC码。

多元BP译码与二元BP译码的基本原理相同^[6], 只是在 $GF(q)$ 中每个噪声符号 x_n 由 b 个噪声比特 $(x_{n_1}, x_{n_2}, \dots, x_{n_b})$ 构成, 则噪声符号 x_n 在状态 a 的先验概率变为:

$$f_n^a = \prod_{i=1}^b g_{n_i}^{a_i} \quad (1)$$

式中 $a \in GF(q)$ 且 a_i 是 a 的二进制表示的第 i 个比特; $g_{n_i}^{a_i}$ 表示第 i 个噪声比特在状态 a_i 的先验概率。

另外, 假定 H_{mn} 为 $m \times n$ 的校验阵, $N(m) = \{n: H_{mn} \neq 0\}$ 为参与校验集 z_m 的所有比特节点的集合, 则给定 $x_n = a$ 和所有 $x_k \in N(m) \setminus n$ 的可分概率分布的条件下, 满足校验 $z_m = 0$ 的概率 r_{mn}^a 的计算, 可通过定义部分和 $\sigma_{mk} = \sum_{j:j \leq k} H_{mj} x'_j$ 、

$$\rho_{mk} = \sum_{j:j \geq k} H_{mj} x'_j, \text{ 并且计算 } \text{Prob}[\sigma_{mj} = a] = \sum_{\{s,t:H_{mj}t+s=a\}} \text{Prob}[\sigma_{mj} = s] q_{mj}^t \text{ 而得到有效处理:}$$

$$r_{mn}^a = \text{Prob}[(\sigma_{m(n-1)} + \rho_{m(n+1)}) = z_m - H_{mn} a] = \sum_{s,t:s+t=z_m-H_{mn}a} \text{Prob}[\sigma_{m(n-1)} = s] \text{Prob}[\rho_{m(n+1)} = t] \quad (2)$$

给定 $M(n) \setminus m$ 校验集合提供信息情况下 $(x_n = a)$ 的概率 q_{mn}^a 类似处理。

采用BP算法进行译码, 初始化近似采用“欧氏”距离法^[7], 原因在于OFDM系统中信道时域加高斯噪声经FFT后, 概率分布已改变; 但接收符号与星座图中符号间距越小, 相似性越大。

2 OFDM自适应加载与多输入多输出技术

自适应比特、调制与功率分配技术最基本的思想是注水原理, 其基本物理意义在于: 当信道信噪比较大时, 信号对应的分配功率也较大; 而当信噪比较低时, 信号功率也应该较低。文献[8]的自适应比特功率分配算法首先确定系统信能达到最优的门限, 然后确定各个子载波的比特分配方式, 最后调整各个子载波的功率。但是由于实际中子信道比特分配数与调制方式的限制, 虽可采用“平均化处理方法”, 但最后1 bit的分配仍存在问题。文献[9]给出了基于多载波调制的比特分配方案, 解决了这一

问题。本文结合这两种算法, 先用文献[8]算法进行初始化, 再用文献[9]算法进行优化, 行之有效。

初始化比特分配是一个限定比特分配数 B , 使能量最小化的问题, 即:

$$\sum_{n=1}^N e_n(b_n) \rightarrow \min \text{ Subject to } \sum_{n=1}^N b_n = B$$

$$b_n \in Z, b_n \geq 0 \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

式中 $e_n(b)$ 表示第 n 个子信道传送 b 个比特时所需要的能量。具体初始化算法如下: 根据各子信道的信噪比计算第 i 个子信道所分配的比特数:

$$\hat{b}(i) = \log_2(1 + \text{SNR}(i) / \text{GAP})$$

式中 GAP 是 E_b/N_0 的调制参数。先将 $\hat{b}(i)$ 向着 $b(i)$ 取整, 约束 $b(i)$ 的取值为 $\{0, 1, 2, 4, 6, 8\}$ 中的某数; 最后计算出每个子信道中的能量分配:

$$e_i(b(i)) = (2^{b(i)} - 1) / \text{GNR}(i), \text{GNR}(i) = \text{SNR}(i) / \text{GAP}$$

在给定比特的初始化后, 进行比特最优分配, 假设初始分配比特数 $B' \leftarrow 0$, 对于每条信道令: $\Delta e_j(b_j) = e_j(b_j + 1) - e_j(b_j)$, 则如现所有信道分配总比特数未达到规定比特数 B , 选择能量增量最小的信道给予1 bit分配, 即:

$$m = \arg \min \Delta e_i(b_i + 1)$$

$$1 \leq i \leq N, B \leftarrow B + 1, b(m) \leftarrow b(m) + 1$$

否则, 选择能量增量最大的信道去除1 bit分配, 即:

$$l = \arg \max \Delta e_j(b_j)$$

$$1 \leq j \leq N, B \leftarrow B - 1, b(l) \leftarrow b(l) - 1$$

最后比特解决算法如下: 检查找出最多包含一个不符比特约束条件的输入比特所在信道 v , 找出比特分配具有最大能量增量的信道 i , 求 $E_1 = \Delta e_v(b(v)) - \Delta e_i(b(i))$; 找出只分配了0或1个比特的子信道中要求最小能量增加的信道 j , 求 $E_2 = \Delta e_j(b(j) + 1) - \Delta e_v(b(v))$; 根据 E_1 和 E_2 的最小值, 处理各种比特变化。

将OFDM与MIMO两种技术相结合, 不仅大大提高了系统的传输速率, 而且通过分集系统具有很强的可靠性。如果所考虑的信道状态信息完善, 应用奇异值分解算法(SVD)能够将MIMO信道中的子信道分解成并行且互不干扰的SISO信道^[10], 更易于MIMO/OFDM的联合。本文基于SVD信道技术进行系统仿真, 避免了MIMO子信道间的相互干扰。

3 系统模型及仿真分析

基于LDPC码的联合自适应比特、调制与功率分配的MIMO-OFDM系统模型如图1所示。

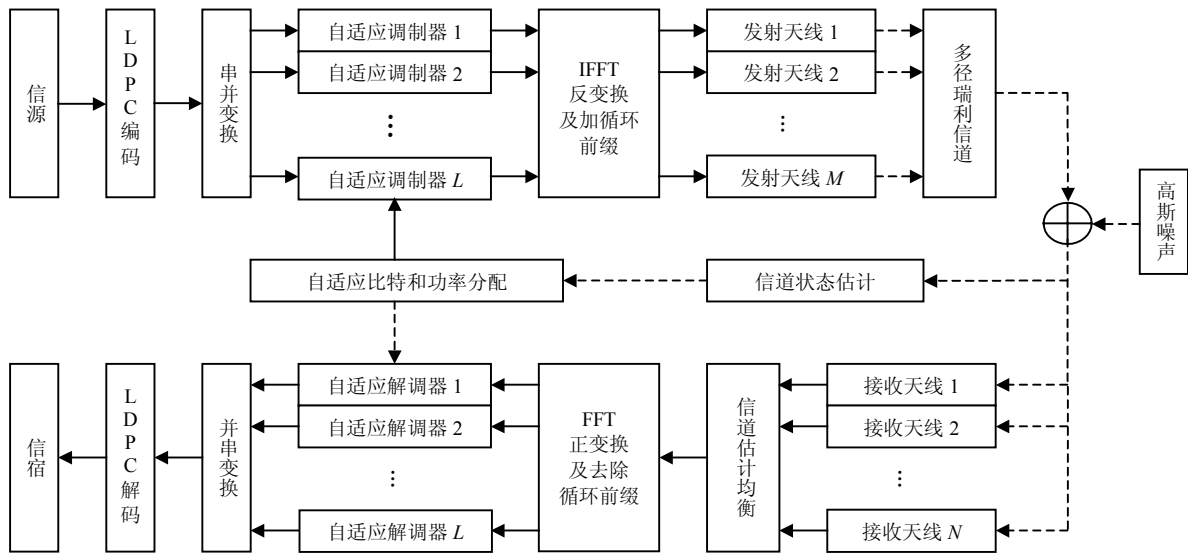


图1 MIMO-OFDM系统模型

为了研究系统性能,在采用功率延迟分布进行描述多径Rayleigh信道上做基带仿真。非规则LDPC码码长为1 080, 码率为1/3, 列重分别为2.4与4.8两种, 以便比较。译码最大迭代次数为100次。信噪比在噪声方差固定时, 通过信号功率分配的递增改变而递增改变。具体仿真参数如表1所示。

表1 仿真参数

仿真参数	LDPC-COFDM系统
纠错编码方式	GF(2)或GF(q, q≠2)上(720,1 080)非规则LDPC
自适应调制方式	BPSK、QAM、16QAM、64QAM、256QAM
单支天线载波个数	64
OFDM符号长度	80
循环前缀长度	16
一次并行比特数	90×发射天线数
MIMO方式	1×1links, 2×2links, 3×3links
高斯白噪声方差	10 ⁻³
三径延时分布	[0, 1倍传输符号间隔, 2倍传输符号间隔]
三径功率延时	
截面采样值	指数分布 [1, 1/e, 1/e ²]

根据图1所示的系统模型与表1所示仿真参数进行仿真, 得到图2~图5的结果。

从图中可以看出, 所有LDPC编码系统较未编码系统都有非常大的编码增益, 进一步验证了LDPC码具有非常强的纠错能力。在图2中, 2×2 links下, 基于GF(q, q≠2)域上LDPC编码的系统编码增益大于基于GF(2)域上LDPC编码的系统编码增益, 而且q越大, 编码增益越大。在图3中, (720,1 080)非规则LDPC码在不同的MIMO下作性能比较, 可看出,

MIMO的links数越大, 编码系统或未编码系统性能都越好。

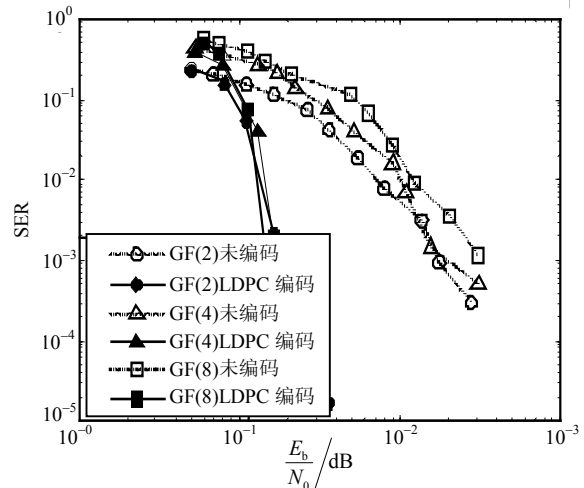


图2 不同域上LDPC码的性能比较

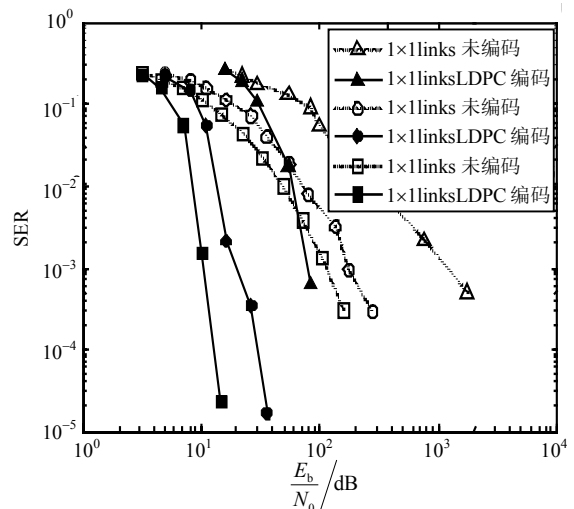


图3 不同MIMO下LDPC码的性能比较
在图4中, 编码或未编码MIMO系统的性能好于

对应的编码或未编码接收分集系统的性能。在图5中, E_b/N_0 较小时, 基于GF(2)域上平均列重4.8的(720,1 080)非规则LDPC编码的系统性能并不比基于平均列重2.4的LDPC编码的系统性能好, 但随着 E_b/N_0 的不断增大, 列重较重的LDPC码表现出了更优越的性能, 中间的过渡性问题可由非规则LDPC的“波浪效应”与译码迭代次数限制解释。

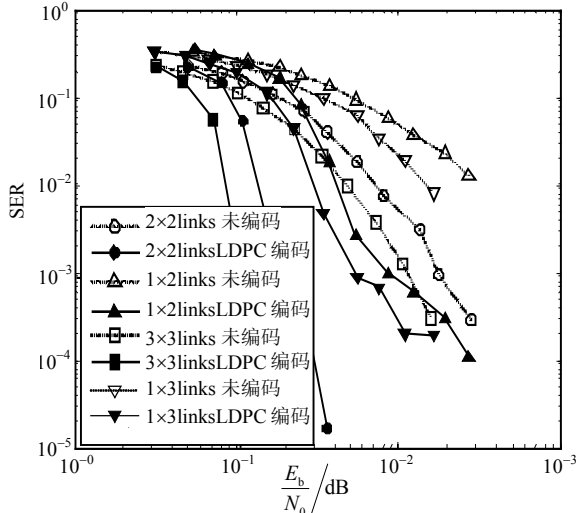


图4 MIMO与分集系统中LDPC码的性能比较

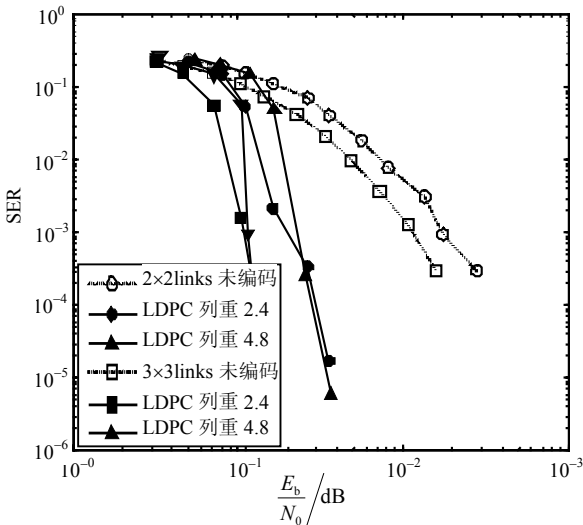


图5 不同列重下LDPC码的性能比较

4 结 论

仿真结果表明, GF(2)上的非规则LDPC编码的系统性能好于GF(q, q ≠ 2)域上的; MIMO-OFDM系

统的性能好于SISO-OFDM的; MIMO-OFDM系统的性能好于选择性分集系统的性能。可以说, LDPC编码的自适应加载MIMO-OFDM系统在多径衰落信道下表现出非常优越的抗衰落性能, 将成为3G/Beyond 3G通信系统中富有吸引力的技术。

参 考 文 献

- [1] MACKAY D, NEAL R M. Near shannon limit performance of low density parity check codes[J]. Electronic Letters, 1996, 32(18): 1645-1646.
- [2] MACKAY D. Good error correcting codes based on very sparse matrices[J]. IEEE Trans on Information Theory, 1999, 45(2): 399-431.
- [3] FOSCHINI G J, GANS M J. On limit of wireless communication in a fading environment when using multiple antennas[J]. Wireless Pers Commun, 1998, 6(3): 311-335.
- [4] 何善宝. 低密度奇偶校验码的编码研究[EB/OL]. [2004-09-10]. <http://www.eetop.cn/bbs>
- [5] HE Shan-bao. Study on encoding of LDPC codes[EB/OL]. [2004-09-10]. <http://www.eetop.cn/bbs>.
- [6] RICHARDSONAND T, URBANKE R. The capacity of low-density parity check codes under message-passing decoding[J]. IEEE Trans on Information Theory, 2001, 47(4): 599-618.
- [7] DAVEY M C, MACKAY D. Low density parity check codes over GF(q)[J]. IEEE Communication Letters, 1998, 2(6): 165-167.
- [8] 马丕明, 袁东风, 杨秀梅, 等. 基于IEEE 802.11a 标准的LDPC编码的OFDM无线通信系统[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(1): 163-166.
- [9] MA Pi-ming, YUAN Dong-feng, YANG Xiu-mei, et al. LDPC coded OFDM wireless communication system based on IEEE 802.11a standard[J]. Systems Engineering and Electronics, 2005, 27(1): 163-166.
- [10] CHOW P S, CIOFFI J, BINGHAM J. A practical discrete multitone transceiver loading algorithm for data transmission over spectrally shaped channels[J]. IEEE Trans Comm, 1995, 43(2): 773-775.
- [11] CAMPELLO J. Discrete bit loading for multicarrier modulation systems[D]. Stanford : Stanford University, 1999.
- [12] HE J, MODY N A, SUNG J H, et al. LDPC coded OFDM with Alamouti/SVD diversity technique[EB/OL]. [2005-05-12]. <http://www.yamacraw.org>.

编辑 张俊