

# 基于 LDPC 码的 WCDMA 下行链路性能仿真

徐位凯, 王琳

(厦门大学通信工程系, 厦门 361005)



**摘要:** LDPC 码是一类靠近 Shannon 限的高效信道编码, 在 AWGN 信道下具有非常优越的性能。在讨论了 LDPC 码的基本原理之后, 构建了基于 LDPC 码的 WCDMA 下行链路, 改进了 LDPC 码的译码过程。仿真结果表明, 在高速传输速率下 (384kbit/s), 不规则 LDPC 码具有优于 Turbo 码的性能, 这对于 LDPC 码应用到复杂无线通信系统中具有重要意义。

**关键词:** LDPC 码; Turbo 码; 信度传播; WCDMA 下行链路

**中图分类号:** TN911.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-731X (2007) 08-1833-03

## Simulation of LDPC Codes over WCDMA Downlink Channels

XU Wei-kai, WANG Lin

(Department of Communication Engineering, Xiamen University, Xiamen, 361005, China)

**Abstract:** LDPC codes, which have good performances over AWGN channel, are the efficiently channel coding of near Shannon limits. After describing elements of LDPC codes, LDPC coded WCDMA downlinks were constructed, meanwhile, decoding process was improved. In high rate condition (384kbit/s), simulating results show that performances of irregular-LDPC codes are than that of Turbo codes. It is important value for LDPC coding in complex wireless communication systems.

**Key words:** LDPC codes; Turbo codes; belief propagation; WCDMA downlinks

### 引言

第三代移动通信 (3G) 业务的特点是多媒体化和智能化, 多媒体业务的支持需要实时、高速的链路。为了提高系统容量, 无线通信系统往往都要采用高效纠错编码来保证链路质量, WCDMA 采用了卷积码与 Turbo 码的混合方案作为其信道编码方案<sup>[1]</sup>, 低速的话音业务采用卷积码, 而高速的数据业务则采用 Turbo 码。LDPC 码 (Low Density Parity Check Codes) 是 1962 年由 Gallager 首先提出的<sup>[2]</sup>, 后为 Mackay 重新发现<sup>[3]</sup>。LDPC 码在 AWGN 信道下具有非常好的性能, 目前最好的仿真结果表明, 不规则 LDPC 码在 AWGN 信道下距离香农限仅仅 0.0045dB<sup>[4]</sup>。与 Turbo 码类似, LDPC 码也是一类靠近 Shannon 限的“随机码”, 相对于 Turbo 码它的优点是译码复杂度低, 译码可以很方便的采用自适应的迭代终止方法, 其缺点则是编码复杂度较大。在编码方面, S. Lin 等人发展了代数和组合的校验矩阵编码方法可以有效的降低编码复杂度<sup>[5-7]</sup>。

本文主要研究了 WCDMA 系统中 LDPC 码的实现以及性能分析, 论文结构安排如下, 第一部分为引言, 第二部分论述了 LDPC 码的基本原理, 第三部分给出了 WCDMA 中下行链路的 LDPC 编、译码系统结构, 第四部分为仿真结果

与分析, 最后给出结论。

### 1 LDPC 码

LDPC 码是一种线性分组码, 它的特性由校验矩阵完全确定, 这类码可以非常方便的用 Tanner 图进行描述<sup>[8]</sup>。假定校验矩阵如图 1(a)所示, 图 1(b)是校验矩阵 H 对应的 Tanner 图, 校验矩阵 H 中的每一列

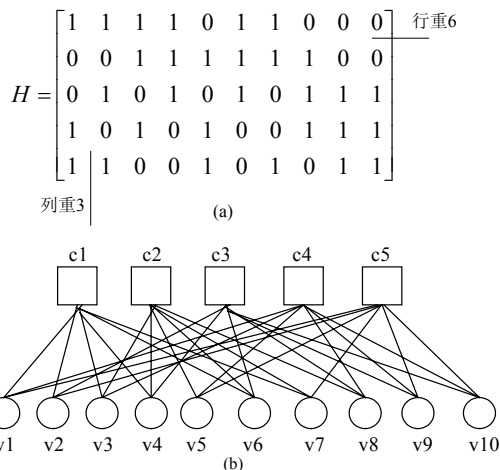


图1 校验矩阵与 Tanner 图的关系

用变量点  $v_i (i=1,2,...)$  表示, 每一行用校验点  $c_i (i=1,2,...)$  表示, Tanner 图中的边对应了矩阵中“1”的位置, 每个节点所连接的边数称为这个节点的度, 由 Tanner 图引入规则 (不规则) LDPC 码的统一表示方法: 度分布函数<sup>[9]</sup>:

$$\lambda(x) = \sum_{i=2}^{d_v} \lambda_i x^{i-1} \quad \rho(x) = \sum_{i=2}^{d_c} \rho_i x^{i-1} \quad (1)$$

收稿日期: 2006-02-30 修回日期: 2006-12-29  
基金项目: 教育部新世纪优秀人才计划(NCET-04-0601); 福建省科技重点项目(2006H0039)。  
作者简介: 徐位凯(1976-), 男, 四川人, 硕士, 讲师, 研究方向为宽带无线数字通信系统; 王琳(1963-), 男, 重庆人, 博士, 教授, 博导, 副院长, 研究方向为宽带无线数字通信系统。

其中,  $\lambda(x)$  表示变量点的度分布,  $\rho(x)$  表示校验点的度分布,  $\lambda(1)=1, \rho(1)=1$ .  $\lambda_i(\rho_i)$  表示从度为  $i+1$  的变量点(校验点)发出的边占所有边的比例。例如, 对于规则的(3, 6)-LDPC 码, 有  $\lambda(x) = x^2, \rho(x) = x^5$ 。

LDPC 码的译码采用了信度传播算法 (Belief Propagation Algorithm) [9], 其过程如下

(1) 初始化

Tanner 图中, 对每个变量点赋予由信道得到的对数似然比 (LLR, Log Likelihood Ratio), 作为变量点的初始信息

$$LLR(p_n) = LLR_{LDPC}^{int}(u_n) = \log \frac{P_{LDPC}^{int}(u_n = 0)}{P_{LDPC}^{int}(u_n = 1)} \quad (2)$$

对于校验节点, 假定每个校验点的初始信息是等概率的 ( $r_{mn}^0 = r_{mn}^1 = 0.5$ )

$$LLR^{(0)}(r_{mn}) = \log \frac{r_{mn}^0}{r_{mn}^1} = 0 \quad (3)$$

(2) 变量点到校验点 (bit to check)

$$LLR^{(k)}(q_{mn}) = LLR^{(k-1)}(p_n) + \sum_{m' \in M(n) \setminus m} LLR(r_{m'n}) \quad (4)$$

式中  $k$  表示当前的迭代次数

(3) 校验点到变量点 (check to bit)

$$LLR^{(k)}(r_{mn}) = 2ar \tanh(\prod_{n' \in N(m) \setminus n} \tanh(LLR^{(k-1)}(q_{mn'})/2)) \quad (5)$$

(4) 计算变量点的后验概率

$$LLR^{post}(u_n) = LLR(p_n) + \sum_{m' \in M(n) \setminus m} LLR^{(k)}(r_{m'n}) \quad (6)$$

(5) 判决

根据如下规则进行译码判决

$$\hat{u}_i^{(k)} = \begin{cases} 0 & \text{if } LLR^{(k)}(q_n) > 0 \\ 1 & \text{if } LLR^{(k)}(q_n) < 0 \end{cases} \quad (7)$$

if  $UH^T \neq 0$ , 则转到(2)。

## 2 WCDMA 下行链路 LDPC 码结构

WCDMA 下行链路物理层结构如图 2 所示, 通过分析, 发现 LDPC 码嵌入到 WCDMA 中只与物理层有关。因此, 将标准中采用 Turbo 码的情形 (速率  $\geq 64\text{kb/s}$ ) 用 LDPC 码来替代, 这时需要注意的是专用业务信道 (DTCH, Dedicated Traffic Channel) 与传输时间间隔 (TTI, Transmission Time Interval) 之间的关系, 从而构造出长度匹配的 LDPC 码。下面以  $144\text{kb/s}$  为例分析编码复用结构, 此时,  $TTI=20\text{ms}$ , 因此, 传输块大小为:  $144000\text{bit/s} * 20\text{ms} = 2880$  比特, 然后加上 16 比特的 CRC 校验, 则 LDPC 输入端的长度应为 2896 比特, 如图 3 所示。另外, 标准规定 WCDMA 中的 Turbo 码的码率为  $1/3$ , 分量码的寄存器个数为 3, 由于寄存器归 0 会引入额外的 12 个尾比特, 为了保证 LDPC 码编码后的速率匹配, LDPC 编码输出应为  $2896 * 3 + 12 = 8700$  比特, 此时得到的 LDPC 码的码率近似为 0.33。类似的分析, 当传输速率为  $64\text{kb/s}$  和  $384\text{kb/s}$  时, LDPC 码的编码输入输出关系与码率如表 1 所示。

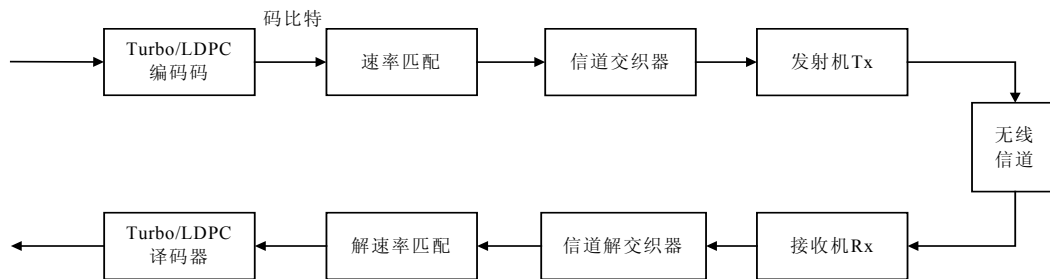


图 2 WCDMA 简化的下行链路结构

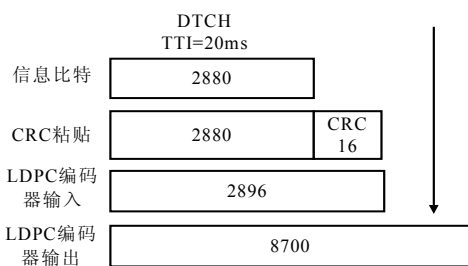


图 3 速率为 144k 时 LDPC 码帧结构

表 1 WCDMA 下行链路 LDPC 码参数配置

速率	LDPC 输入 K	输出 N	近似码率 R
64k	1296	3800	0.34
144k	2896	8700	0.33
384k	3856	11580	0.33

WCDMA 下行链路中 LDPC 码的设计除了要考虑上面

描述的帧结构以为, 另一个重要的方面是对 LDPC 码译码初始信息的处理。这里, 译码还是完全遵循前面描述的信度传递算法, 对于平衰落信道的 BPSK 调制, 很明显, 初始信息  $LLR_{LDPC}^{int} = \frac{2\alpha y}{\sigma^2}$ , 其中  $y$  为经信道污染的码元,  $\sigma^2$  为噪声方差,  $\alpha$  为衰落因子。初始信息的准确与否与正确译码紧密相关, 因此, 在 WCDMA 系统中需要通过估计方法准确估计噪声方差和信号幅度。由于 WCDMA 下行链路中本身有导频信号, 因此, 我们利用导频信号改进了 LDPC 码的译码过程, 即通过导频估计噪声方差  $\sigma^2$  和信号幅度  $\alpha$ , 假定经过信道均衡的接收信号满足高斯分布, 因此, LDPC 码的初始译码信息为  $LLR_{LDPC}^{int} = \frac{2\alpha y}{\sigma^2}$ , 具体实现框图如图 4 所示。

## 3 仿真结果

考虑到不规则 LDPC 码比规则 LDPC 码具有更好的性

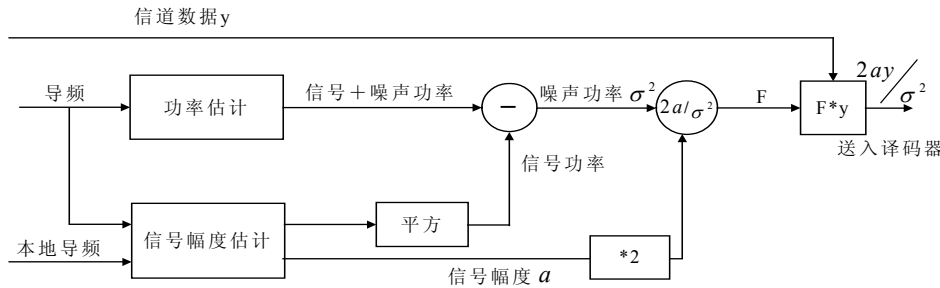


图 4 利用导频信号估计噪声方差和信号幅度

能, 本文采用了不规则 LDPC 码作为替代 Turbo 码的方案。首先考察了在 AWGN 信道下, 具有相同帧结构的不规则 LDPC 码与 Turbo 码的性能。不规则 LDPC 码采用了密度进化方法构造<sup>[3]</sup>, 当码率为 0.33 时, 得到度分布函数为

$$\lambda(x) = 0.2696x + 0.1958x^2 + 0.1323x^5 + 0.0835x^6 + 0.0180x^{12} + 0.0796x^{13} + 0.00239x^{14} + 0.0311x^{15} + 0.0122x^{17} + 0.1669x^{35} + 0.00856x^{38} \quad (8)$$

$$\rho(x) = x^5 \quad (9)$$

该 LDPC 码的门限值  $\sigma = 1.29414\text{dB}$ , 距离 Shannon 限仅仅  $0.07274\text{dB}$ 。在 AWGN 信道下, 采用 BPSK 调制的该 LDPC 码的误码率曲线与 Turbo 的误码率曲线如图 5 所示, 该 Turbo 的结构与 WCDMA 标准规定的一致, 即递归卷积码 (RSC, Recursive Systematic Convolutional) 为  $(1, 13/15)_{\text{oc}}$ , 译码采用了 MAP 算法, 交织方式为随机交织。从图 5 可以看出, 在中、低信噪比时 Turbo 码的性能优于 LDPC 码, 但在高信噪比时, LDPC 码的 BER 随信噪比增加下降得很快, 而 Turbo 码存在一定的“错误地板”, 从总体看, 二者的性能差别不大。

WCDMA 下行链路的验证采用了 Coware 公司的仿真软件包 SPW4.81 (Signal Processing Worksystem), 由 SPW 的自定义模块功能, 我们构造了 LDPC 码的编译码模块, Turbo 码为系统自带。根据 3gpp 标准 WCDMA 下行链路有以下两种专用物理信道 (DPCH, Dedicated Physical Channel) 的功率分配方案<sup>[10]</sup>, 即功率比值  $\text{DPCH\_Ec}/I_{\text{or}}$ , 分别用 Case1 和 Case2 表示, 如表 2 所示。表 2 中信道模型说明: Static 为静态单径非衰落信道; Fading\_1 和 Fading\_2 分别为 2 径和 3 径衰落信道, 终端移动速度均为  $3\text{km/h}$ ; Fading\_3 和 Fading\_6 均为 4 径衰落信道, 终端移动速度分别为  $120\text{km/h}$  和  $250\text{km/h}$ ; Moving 表示衰落固定, 第二径的延时  $\tau$  在一个范围内变化的 2 径信道; Birth-Death 信道与 Moving 信道类似,

只是延时  $\tau$  为随机变化。我们对这两种功率分配方案下 LDPC 码与 Turbo 码的误比特率性能进行了仿真实验。结果如图 6-7 所示, 分别为  $144\text{kb/s}$  和  $384\text{kb/s}$  的 LDPC 码和 Turbo 码的 BER 性能曲线, 图中横坐标为信干比  $I_{\text{or}}/I_{\text{oc}}$ , 纵坐标为 BER, “T-”表示 Turbo 码, “L-”表示 LDPC 码。从图 6 的性能图可以看到, 在  $144\text{kb/s}$  时 Turbo 码和 LDPC 码两者性能几乎没有什么差别, 总体来说, LDPC 码的性能稍稍好一点, 同时, 两种功率分配方案对性能也没什么影响。但当速率为  $384\text{kb/s}$  时, LDPC 码相对于 Turbo 码有比较大的性能增益, 特别是功率分配方案 2 时更为明显, 这也与基带时的结果比较一致, 即在高信噪比条件下, LDPC 码比 Turbo 码性能更优。当然也有某些信道条件下 Turbo 码性能优于 LDPC 码的, 如 DPCH 功率分配方案 Case1 时, LDPC 码的性能就差于 Turbo 码, 这主要是由于 LDPC 码译码性能对初始估计信息的敏感性导致的, 而某些信道下可能导致初始信息估计的不准确。另外, LDPC 码作为一种“渐进性能码”, 即在长帧情况下会表现出更好的性能, 这从  $384\text{kb/s}$  和  $144\text{kb/s}$  的比较中也可以看出,  $384\text{kb/s}$  时具有更明显的性能增益。

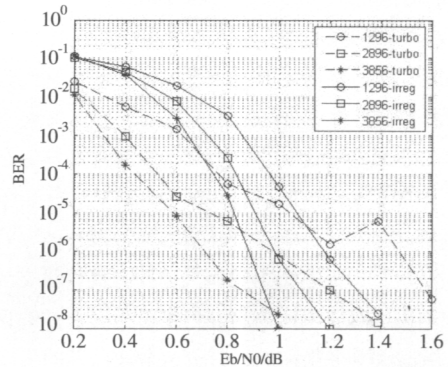


图 5 AWGN 条件下 Turbo 码与 LDPC 码性能比较

表 2 不同信道条件下的  $\text{DPCH\_Ec}/I_{\text{or}}$  (dB)功率分配

		Static	Fading_1	Fading_2	Fading_3	Fading_6	Moving	Birth-Death
144k	Case1	-9.9	-10.6	-8.1	-9.0	-6.0	-10.9	-8.7
	Case2	-9.8	-6.8	-5.1	-8.5	-5.5		
384k	Case1	-5.6	-6.3	-5.5	-5.9	-2.9		
	Case2	-5.5	-2.2	-3.2	-5.1	-2.1		

$$T_{n_0} = \frac{1}{\mu_{1over}^{n_0}} + T_{n_0-1}, j = n_0 \quad (5)$$

因此,

$$\frac{\lambda_{1over}^{j+1}}{\lambda_{1over}^{j+1} + \mu_{1over}^j} (T_{j+1} - T_j) = -\frac{1}{\lambda_{1over}^{j+1} + \mu_{1over}^j} + \frac{\mu_{1over}^j}{\lambda_{1over}^{j+1} + \mu_{1over}^j} (T_j - T_{j-1}) \quad 1 \leq j \leq n_0 - 1 \quad (6)$$

$$T_{n_0} - T_{n_0-1} = \frac{1}{\mu_{1over}^{n_0}} \quad (7)$$

令  $Z_j = T_j - T_{j-1}$ , 那么(6)和(7)分别转化为

$$\frac{\lambda_{1over}^{j+1}}{\lambda_{1over}^{j+1} + \mu_{1over}^j} Z_{j+1} = -\frac{1}{\lambda_{1over}^{j+1} + \mu_{1over}^j} + \frac{\mu_{1over}^j}{\lambda_{1over}^{j+1} + \mu_{1over}^j} Z_j \quad 1 \leq j \leq n_0 - 1 \quad (8)$$

$$Z_{n_0} = T_{n_0} - T_{n_0-1} = \frac{1}{\mu_{1over}^{n_0}} \quad (9)$$

于是我们得到

$$Z_{n_0-1} = \frac{1}{\mu_{1over}^{n_0-1}} \left( \frac{\lambda_{1over}^{n_0}}{\mu_{1over}^{n_0}} + 1 \right) \quad (10)$$

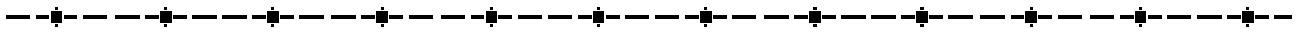
用类推的方法, 得到

$$Z_1 = T_1 - T_0 = \frac{1}{\mu_{1over}^{n_0}} \left[ 1 + \sum_{j=2}^{n_0} \prod_{i=2}^j \left( \frac{\lambda_{1over}^i}{\mu_{1over}^i} \right) \right] \quad (11)$$

最后, 通过等式(2)和(3), 我们得出

$$T_1 - T_0 = T_1 = \frac{1}{\gamma_1} = \frac{1}{\mu_{1over}^{n_0}} \left[ 1 + \sum_{j=2}^{n_0} \prod_{i=2}^j \left( \frac{\lambda_{1over}^i}{\mu_{1over}^i} \right) \right] \quad (12)$$

宏小区溢出流的  $1/\gamma_0$  和  $1/\omega_0$  求解等式证明原理相同。



(上接第 1835 页)

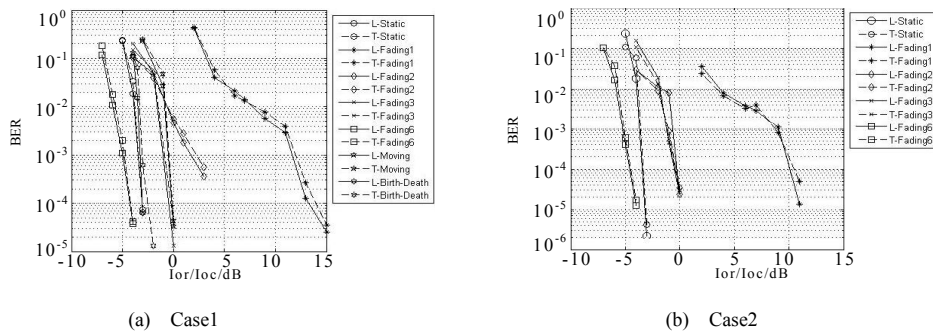


图 6 WCDMA 下行 144k 性能曲线

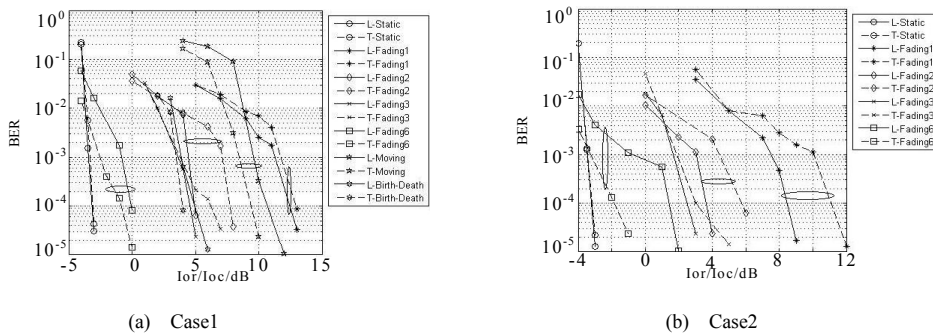


图 7 WCDMA 下行 384k 性能曲线

## 4 结论

LDPC 码作为一类靠近 Shannon 限的高效纠错码, 在现在以及未来的无线通信系统中具有广泛的应用前景, 本文探讨了 LDPC 码在 WCDMA 系统下行链路中的性能, 仿真结果表明, 该码在复杂的无线信道环境下同样具有优越的性能, 基于上面的结果与分析, 我们可以预测 LDPC 码可以作为未来的 B3G 系统信道编码的备选方案。当然, LDPC 码的应用还存在编码复杂度较大的问题, 在未来的研究中, 我们会致力于简化编码算法以及 LDPC 码硬件实现方面的研究。

### 参考文献:

[1] 3GPP TS 25.212, Multiplexing and channel coding (FDD) [S].  
 [2] Gallager R G. Low-density parity-check codes [J]. IRE Trans. Inform. Theory (S0018-9448), 1962, 8(1): 21-28.  
 [3] Mackay D J C. Good error-correcting codes based on very sparse matrices [J]. IEEE Trans. Inform. Theory (S0018-9448), 1999, 46(3): 399-431.

[4] Chung S Y, Forney J G D, Richardson T, Urbanke R. On the design of low-density parity-check codes within 0.0045 dB of the Shannon limit [J]. IEEE Commun. Lett (S1089-7798), 2001, 5(2): 58-60.  
 [5] Chen J Xu, Djurdjevic I, Lin S. Near-Shannon quasi-cyclic low-density parity-check codes [J]. IEEE Trans. Commun (S0090-3778), 2004, 52(7): 1038-1042.  
 [6] Tang H, Xu J, Kou Y, Lin S, Abdel-Ghaffar K. On algebraic construction of Gallager and circulant low-density parity-check codes [J]. IEEE Trans. Inform. Theory (S0018-9448), 2004, 50(6): 1269-1279.  
 [7] Rosenthal J, Vontobel P O. Constructions of LDPC codes using Ramanujan graphs and ideas from Margulis [C]// Proc. of the 38-th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing, Illinois, 2000, 248-257.  
 [8] Tanner R M. A recursive approach to low complexity codes [J]. IEEE Trans. Inform. Theory (S0018-9448), 1981, 27(9): 533-547.  
 [9] Richardson T, Urbanke R. The capacity of low-density paritycheck codes under message-passing decoding [J]. IEEE Trans. Inform. Theory (S0018-9448), 2000, 47(2): 599-618.  
 [10] 3GPP TS 25.101, User Equipment (UE) radio transmission and reception (FDD)[S].