

## 级联LDPC码和CCK的编码调制性能分析\*

李 强\*\* 李少谦

(电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室 成都 610054)

**【摘要】**在加性白高斯信道下, 比较了补码键控最优译码和多数逻辑软判决译码的性能, 分析了补码键控在衰落信道的性能, 并提出了补码键控外层级联低密度极性校验码的结构, 提供了补码键控的软判决输出算法, 仿真结果证明补码键控外层级联低密度极性校验码在衰落信道下有明显的性能增益。

**关键词** 补码键控; 低密度极性校验码; 外码级联; 多数逻辑译码; 最大似然译码

**中图分类号** TN911.22 **文献标识码** A

## Performance Analysis of Coded Modulation Concatenated CCK and Low-Density Parity-Check Code

Li Qiang Li Shaoqian

(National Key Laboratory of Communication, UEST of China Chengdu 610054)

**Abstract** In this thesis, the performance of complementary code keying is compared between optimal decoding and majority logic decoding algorithm, and analyzed in fading channels. A structure concatenating low-density parity-check code and complementary code keying and the algorithm of soft-decision output for complementary code keying are presented, the simulation result show more better performance than complementary code keying in rayleigh fading channels.

**Key words** complementary code keying; low-density parity-check; outer code concatenated; majority logic decoding; maximum likelihood decoding

随着高速数据业务需求的不断增长, 寻求一种能以较低代价并可靠支撑高速数据率的信号波形的任务也越来越迫切。Harris和朗讯公司联合开发的补码键控(Complementary Code Keying, CCK)技术, 充分利用了补码的相关性特征, 具有良好的距离属性和简单结构, 当采用Rake接收技术时, 在多径信道下能获得优良的性能<sup>[1]</sup>, 且解调方法十分有效。1998年7月, IEEE 802.11工作组正式采纳了CCK技术作为无线局域网(Wireless Local Area Network, WLAN)物理层高速数据传输的调制方案, 最高数据传输率可达11 Mbps<sup>[2]</sup>。

CCK的软判决最大似然译码要求计算接收矢量和所有可能码字之间的相关值, 计算量非常大<sup>[3]</sup>。计算相关值已知的最有效算法是快速Hadamard变换(Fast Hadamard Transform, FHT), 把采用FHT的译码器称为FHT译码器, 但FHT译码器对于某些系统也不够快, 例如软件无线电系统。多数逻辑译码方法算法简单, 虽然在低信噪比时, 性能比最大似然译码算法差, 但软判决多数逻辑译码相对于最大似然译码性能损失很小。

WLAN的信道多是室内信道, 对于户外较为恶劣的信道条件, CCK的性能并不是很好。在第四代蜂窝移动通信系统中, 由于其优良性能和简单的译码算法, 低密度极性校验码(Low-Density Parity-Check Code, LDPC)码将会是重要的信道纠错码的备选方案, 为了利用CCK在多径信道下的优良特性, 采用外层级联LDPC码和信道交织技术, 利用软判决多数逻辑译码算法, 使CCK技术可用于更广的信道条件, 并大大提

2003年8月29日收稿

\* 国家“863”计划资助项目, 编号: 2001AA1230131

\*\* 男 29岁 博士生 主要从事信道新编译码技术, 新型调制技术, MIMO技术等方面的研究

高了CCK的性能。

## 1 LDPC编译码

LDPC码是一种线性分组奇偶校验码,它采用基于因子图的置信传播(Belief Propagation, BP)迭代译码算法进行译码。其性能接近Turbo码,不规则LDPC码甚至超过Turbo码性能。Turbo码因为采用打孔方式调整码率,可能会产生低重量码字,导致在高信噪比时误码率性能曲线趋于平坦<sup>[4]</sup>。而LDPC码的码字间距离会随码长增大而增加,使其译码错误均可被检测,这个特点有实用价值,如在ARQ体制下可实现无误传输。

LDPC码的校验矩阵 $H$ 是一个稀疏矩阵。对 $GF(2)$ 而言, $H$ 的行和列中‘1’的个数分别表示各信息比特和校验比特的次分布度。其中“行次”表示参与每个检验方程的信息比特数;“列次”表示每个信息比特参与检验的次数。“列次”越大,LDPC码的性能可以任意接近香农限。但是如果“列次”太大,会导致译码时“圈”的数目急剧增加,从而严重恶化译码性能,一般“列次”大于2。此外,“列次”对 $H$ 的每列相等时,称为规则LDPC码,否则为不规则LDPC码。不规则LDPC码比规则LDPC码具有更好的性能。

假设LDPC码的次分布对为 $(\rho_i, \lambda_i)$ ,则LDPC的码率<sup>[5]</sup>:

$$R = 1 - \frac{\int_0^1 \lambda_i(x) dx}{\int_0^1 \rho_i(x) dx} \quad (1)$$

在编码时,首先由次分布对 $(\rho_i, \lambda_i)$ 随机产生 $H$ 矩阵,然后用高斯消除法产生对应的生成矩阵 $G$ 。对于要发送的源信息 $s$ ,编码序列 $t := G^T s$ 。如果接收的信息序列是 $r := ht + n$ ,其中 $h$ 为信道衰落系数, $n$ 为零均值高斯白噪声,其方差为 $\sigma^2$ 。

在译码过程中,信息比特节点和校验节点之间迭代交换可信度信息,设连接到校验节点 $m$ 的所有比特节点集合为 $N(m)$ ;连接到比特节点 $n$ 的所有校验节点集合是 $M(n)$ 。其译码详细步骤如下:

### 1) 初始化

用软判决方法对每个比特节点进行初始化,设为 $P_n, n=1, 2, \dots, N$ ,  $N$ 为编码块长。同时,把每个比特节点传给校验节点的可信度 $p_{n \rightarrow m}$ 初始化为 $p_n$ 。

### 2) 校验节点 $\rightarrow$ 比特节点

每个校验节点 $m$ 收集所有输入信息 $p_{n \rightarrow m}$ ,根据连接到节点 $m$ 除 $n$ 外的其他所有比特节点的输入信息,更新比特节点 $n$ 的可信度为

$$p_{m \rightarrow n} = 2 \tanh^{-1} \left( \prod_{n \in N(m)/n} \tanh(p_{n \rightarrow m} / 2) \right) \quad (2)$$

### 3) 比特节点 $\rightarrow$ 校验节点

每个比特节点 $n$ 传输它的可信度到与之相连的所有校验节点为

$$p_{n \rightarrow m} = p_n + \sum_{m \in M(n)/m} p_{m \rightarrow n} \quad (3)$$

### 4) 迭代停止判决

译码器把连接到比特 $n$ 的所有校验节点的置信度加起来,得到比特 $n$ 的后验概率,即:

$$q_n = p_n + \sum_{m \in M(n)} p_{m \rightarrow n} \quad (4)$$

然后对 $q_n$ 进行硬判决,译码结果矢量 $\hat{t}$ 用 $H$ 进行校验。如果 $H\hat{t} = 0$ ,译码结束。否则重复步骤1)~3),直到达到最大迭代次数为止。

## 2 CCK调制

CCK是一种已编码调制技术,它把扩频、信道编码和调制作为一个整体进行设计,从而提高系统的整体性能。CCK码由256个8码片的码字集合所定义。码字组成为如下方程<sup>[2]</sup>:

$$c = \left[ e^{j(\theta_0 + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3)}, e^{j(\theta_0 + \theta_2 + \theta_3)}, e^{j(\theta_0 + \theta_1 + \theta_3)}, -e^{j(\theta_0 + \theta_3)}, e^{j(\theta_0 + \theta_1 + \theta_2)}, e^{j(\theta_0 + \theta_2)}, -e^{j(\theta_0 + \theta_1)}, e^{j\theta_0} \right] \quad (5)$$

式中  $\phi_i \in \left\{0, \frac{\pi}{2}, \pi, -\frac{\pi}{2}\right\}$ ,  $i = 0, 1, 2, 3$ 。  $\phi_0, \phi_1, \phi_2, \phi_3$  的编码依赖于输入的 8 个比特 ( $d_0 \sim d_7$ )，其中 ( $d_0, d_1$ ) 基于差分正交相移键控 (Quadrature Phase Shift Keying, QPSK) 编码  $\phi_0$ ，用格雷映射方式。 ( $d_2, d_3$ ), ( $d_4, d_5$ ) 和 ( $d_6, d_7$ ) 基于 QPSK 调制分别编码  $\phi_1, \phi_2$  和  $\phi_3$ ，二进制映射，如表 1 所示。

表 1 CCK 相位编码表

双比特模式 [ $d_i, d_{i+1}$ ] ( $d_i$ 时间上先进入)	相位 $\phi_i$	双比特模式 [ $d_i, d_{i+1}$ ] ( $d_i$ 时间上先进入)	相位 $\phi_i$
00	0	10( $\phi_0, 11$ )	$\pi$
01	$\pi/2$	11( $\phi_0, 10$ )	$-\pi/2$

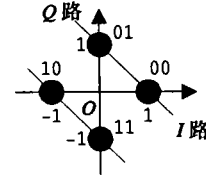


图 1 CCK 调制星座图

从式(5)可知，每个相位信息包含在多个码片符号中。大数逻辑判决的原理是通过每个接收比特的简单计算，产生每个信息符号值的“候选”。硬判决大数逻辑译码中，接收到多数“候选”的值就成为译码符号。软判决大数逻辑译码中，候选是“软”值，并经过平均后得到每个信息符号的“软估计”。候选应该包含尽可能多的码比特，这样，局部噪声才不至于严重影响信息符号的估计。

CCK译码中，用  $(\hat{\phi}_0, \hat{\phi}_1, \hat{\phi}_2, \hat{\phi}_3)$  表示对  $(e^{j\phi_0}, e^{j\phi_1}, e^{j\phi_2}, e^{j\phi_3})$  的软估计，假设发射信号是  $\{y_i, i = 0, 1, \dots, 7\}$ ，接收矢量为  $\{r_i, i = 0, 1, \dots, 7\}$ ，则  $(\hat{\phi}_0, \hat{\phi}_1, \hat{\phi}_2, \hat{\phi}_3)$  计算如下<sup>[3]</sup>：

$$\begin{cases} \hat{\phi}_1 = (-r_1 r_0^* + r_3 r_2^* - r_5 r_4^* + r_7 r_6^*) / 4 \\ \hat{\phi}_2 = (r_2 r_0^* - r_3 r_1^* - r_6 r_4^* + r_7 r_5^*) / 4 \\ \hat{\phi}_3 = (-r_4 r_0^* - r_5 r_1^* + r_6 r_2^* + r_7 r_3^*) / 4 \end{cases} \quad (6)$$

$(\hat{\phi}_0)$  根据  $(\hat{\phi}_1, \hat{\phi}_2, \hat{\phi}_3)$  计算如下：

$$\hat{\phi}_0 = \frac{1}{8} (r_0 - r_1 \hat{\phi}_1 + r_2 \hat{\phi}_2 + r_3 \hat{\phi}_1 \hat{\phi}_2 - r_4 \hat{\phi}_3 + r_5 \hat{\phi}_1 \hat{\phi}_3 + r_6 \hat{\phi}_2 \hat{\phi}_3 + r_7 \hat{\phi}_2 \hat{\phi}_3) \quad (7)$$

和 LDPC 码级联时，LDPC 译码器的输入要求是每个信息符号的似然概率。因此还需要根据  $(\hat{\phi}_0, \hat{\phi}_1, \hat{\phi}_2, \hat{\phi}_3)$  计算每个发送信息比特是 0 或 1 的概率。由图 1 所示的星座图可知，第一个比特的概率比可表示为估计符号  $\hat{\phi}_i, i = 0, 1, 2, 3$  到直线  $l_1$  和  $l_2$  的距离比，即：

$$\frac{P(b_1 = 0)}{P(b_1 = 1)} = \left( \frac{(\hat{\phi}_i)_R + (\hat{\phi}_i)_I + 1}{(\hat{\phi}_i)_R + (\hat{\phi}_i)_I - 1} \right)^2 \quad (8)$$

第二个比特的概率比类似可得。

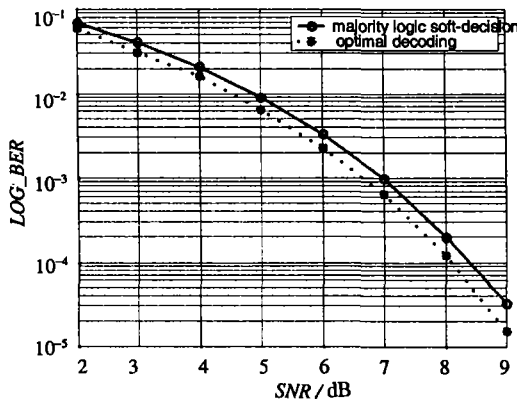


图 2 CCK 在 AWGN 性能

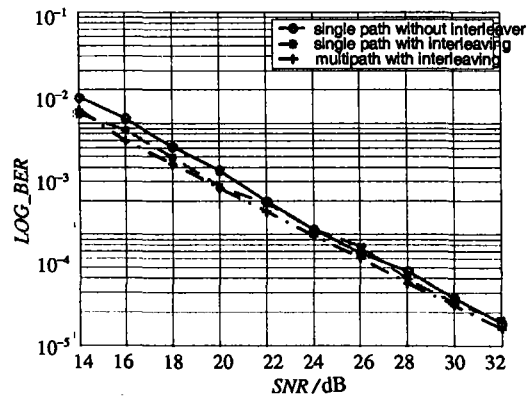


图 3 CCK 在衰落信道的性能

图2、3分别演示了CCK在AWGN信道和瑞利衰落信道下的性能，瑞利衰落信道下译码方法采用最大似然判决，衰落率 $f=Tf_c=0.04$ ，由图可知，在AWGN信道下，大数逻辑译码的性能略差于最大似然译码，衰落信道中，有信道交织的CCK性能优于无信道交织的情况，但相差并不太大，原因是仿真中的交织深度不够大。另一方面，在多径信道下，性能比单径信道的性能好，因为在仿真中假理想信道估计，多径信道的影响体现在衰落更快，而交织深度是一样的，那么多径信道下交织较充分，因而性能反而更好。

### 3 级联LDPC和CCK码的性能

从图3可知，CCK在衰落信道下的性能很差，当SNR=32 dB时，BER才近似为 $10^{-4}$ 。原因是因为CCK码集合中各码字间互相关特性并不太好，尤其在衰落环境下，信道对信号的干扰严重恶化了码字间的互相关性。因此本文采用外层级联LDPC码来校正CCK的解调错误，提高CCK的性能增益。

系统中采用(504, 3, 6)的规则LDPC码，交织深度为两个编码块，采用随机交织器。CCK解调采用大数逻辑软判决算法。信道分别是AWGN和Rayleigh衰落信道，其中衰落信道为3径，采用ITU的M.1225标准channel A多径信道模型，系统组成如图4所示。

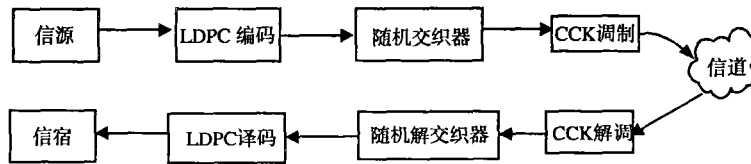


图4 仿真系统模型

仿真过程中，假理想信道估计，未采用Rake接收技术。图5、6所示分别为在AWGN和Rayleigh衰落信道下，CCK级联LDPC外码的仿真结果。由此可见，BER=10<sup>-5</sup>时，在AWGN信道下，CCK所需最低SNR为9 dB，CCK级联LDPC的最低SNR比为6 dB，改善了3 dB。在Rayleigh信道下，BER为10<sup>-4</sup>时，CCK和级联LDPC的CCK所需的最低SNR分别为33 dB和22 dB，显然有11 dB的性能增益。即级联LDPC码的CCK调制的性能比单独CCK调制有明显的性能增益，衰落信道下的效果更为明显。

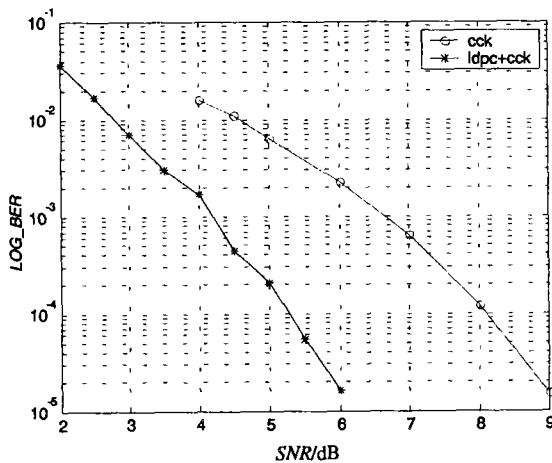


图5 CCK级联LDPC在AWGN的性能

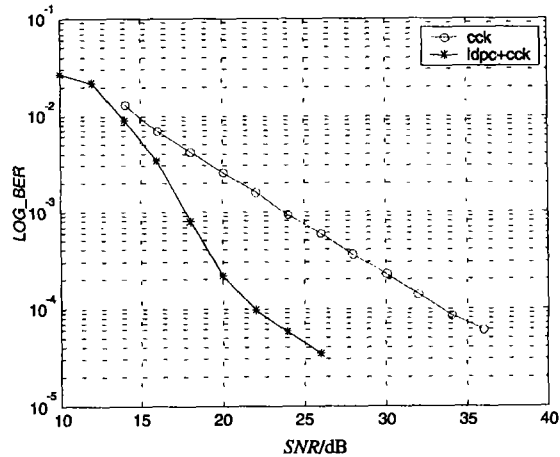


图6 CCK级联LDPC在Rayleigh信道的性能

### 4 结束语

无论在AWGN还是在多径衰落信道下，CCK级联LDPC结构相对于CCK调制编码，都能获得一定的性能增益，在衰落信道下，增益更为明显，BER为10<sup>-4</sup>时，增益可达11 dB。由于LDPC码译码相对简单，并能获得接近香农限的性能，CCK在多径环境下有较好的性能，因此在第4代蜂窝移动通信系统中，LDPC与CCK将会得到广泛的应用。尤其采用Rake接收技术时，CCK的优势会更为明显，这正是我们下一步的工作。

## 参 考 文 献

- [1] Andren C, Webster M. CCK modulation delivers 11 Mbps for high rate IEEE 802.11 extension [S]. Portable by design conference spring, 1999
- [2] IEEE Std 802.11b-1999[S]
- [3] Feldman J, Ibrahim A F, Frigo M. A noise-adaptive algorithm for first-order reed-muller decoding[J]. Vehicular Technology Conference, IEEE 56<sup>th</sup>, 2002, 2, (24-28): 758-762
- [4] 贺玉成, 杨 莉, 慕建军, 等. LDPC码的不可检测错误概率分析[J]. 通信学报, 2002, 23(1): 1-7
- [5] Robert G, Gallager. Low-density parity-check codes[C]. Cambridge, 1963
- [6] Halford K, Halford S, Webster M, *et al.* Complementary code keying for rake-based indoor wireless communication[C]. Circuit and Systems, Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium, 1999. 4, 427-430
- [7] David J, Mackay C, Radford M N. Good codes based on very sparse matrices[C]. Cavendish Lab. Cambridge. Depts. of Statistics and Science, Univ. of Toronto, Canada, 1995
- [8] Chen Jinghu, Marc P, Fossorier C. Decoding low-density parity-check codes with normalized app-based algorithm[C]. Department of E.E, Univ. of Hawaii, 2001

编 辑 漆 蓉

· 科研成果介绍 ·

## 大功率微波无间隙机械波导开关

主研人员: 王文祥 孙嘉鸿 张兆镗 余国芬 宫玉彬 周 鹏 赵国庆

大功率微波无间隙机械波导开关利用斜面匹配配合的原理研制出了一种新型无间隙大功率波导开关, 该开关在旋转过程中有间隙存在, 利用切换动作, 当旋转到位后, 间隙自动消失, 实现良好啮合, 保证了极低的插损及避免打火, 以利于大功率微波的传输。

## 100 kW发射机中多注速调管工作状态检测和保护系统

主研人员: 张 冰 于秀云 严 亮 关 涛 李天明 马文多

100 kW发射机中多注速调管工作状态检测和保护系统研制了在强电磁干扰条件下的高重频脉冲检测和变送技术, 采用光钎隔传导技术解决了高电位上失偏压保护控制的问题, 克服了速调管打火损坏调制器的问题与电磁干扰等问题, 改善了冷阴极撬棒的保护功能。

· 渠 涌 ·