

## 比特交织迭代译码系统的迭代控制

宫丰奎 李兵兵 葛建华 刘鹏  
(西安电子科技大学 ISN 国家重点实验室 西安 710071)

**摘要** 利用迭代译码时的外部信息交换图特点,提出了一种非常简单有效的迭代控制策略。首先通过外部信息交换图分析得到一个有关信噪比的迭代次数矢量,其次系统根据估计信噪比选择对应值,从而实现迭代控制。该方案实现简单,同时也减少了系统延迟,便于分析系统性能。

**关键词** 比特交织编码调制,迭代译码,外部信息交换图,迭代控制

中图分类号: TN919.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)09-1659-04

## Iterative Control of Bit-Interleaved Coded Modulation with Iterative Decoding

Gong Feng-kui Li Bing-bing Ge Jian-hua Liu Peng  
(State Key Laboratory of ISN, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract** A simple and efficient iterative control algorithm is proposed. An iterative degree vector about SNR is firstly derived by analysis of extrinsic information transfer chart, iterative control is then implemented by selecting the relevant value according to estimated SNR. Simple in realization and high in performance, this method can be utilized in performance analysis.

**Key words** Bit-Interleaved Coded Modulation (BICM), Iterative Decoding (ID), EXtrinsic Information Transfer (EXIT) chart, Iterative control

### 1 引言

比特交织编码调制(BICM)<sup>[1]</sup>及其迭代译码<sup>[2, 3]</sup>以其高性能、低复杂度而成为一种通信领域中极具竞争力的编码调制方案<sup>[4]</sup>。Huang<sup>[5]</sup>在他的博士论文中,也详细研究了BICM迭代译码(BICM-ID)系统应用于无线通信时的诸多问题,取得了一些成果。利用迭代译码可以大大提高系统性能,迭代次数越多,系统的渐进性能就越好,但迭代次数增加,必然会增加复杂度以及系统延迟,对系统的时钟要求也必然提高,因此必须折中考虑。上述文献在研究BICM-ID系统时,都是先确定一个比较适中的迭代译码次数,在此基础上进行仿真研究,没有涉及到迭代次数如何控制的问题。上述方法虽然比较简便,但存在的一个最为明显的缺点就是不能自适应地随信道环境变化,因此会引起达不到性能要求或者浪费系统时钟周期的现象。同时,在进行BICM-ID系统的相关研究时,可能会由于迭代次数不够或者过多而影响分析结果。如果系统在迭代译码的过程中根据某一规则自适应控制迭代次数,可以解决上述问题,但却会带来另外的缺陷:其一,规则选择要适合从低到高整个信噪比区间需要很高的实现复杂度;其二,规则所需判决参数的获得会引起系统不必要的延迟。因此,作者采用了如下方案来实现迭代控制:(1)根据系统对迭代次数要求特点,选择变化比较剧烈的信噪比区间。(2)

利用外部信息交换(EXIT)图<sup>[6,7]</sup>分析系统在不同信噪比下取得近最佳的性能所需要的迭代次数,这部分利用计算机仿真实现,得到一个关于一定区间内不同信噪比的最佳迭代次数矢量 $V_I$ 。信噪比间隔 $\Delta$ 不必很小,因此,该矢量长度很小。(3)将该矢量存储于一个较小的单元形成查找表。(4)通过信噪比估计算法估计信噪比,并以信噪比间隔 $\Delta$ 量化。(5)根据估计信噪比选择相应的迭代次数。

可见,上述算法仅仅增加了一个非常小的存储空间以及简单的迭代次数选择策略(信噪比估计算法是迭代译码中必须单元),大部分的工作都预先通过计算机仿真及EXIT图分析完成,对系统的实现复杂度以及延迟几乎没有影响。

本文安排如下:第2节利用EXIT图研究信噪比区间内迭代次数对系统性能的影响特点;第3节根据得到特点制定控制策略,并生成所需矢量;第4节利用计算机仿真验证算法性能;最后是对全文的总结。

### 2 迭代次数对系统性能的影响特性

#### 2.1 EXIT图

我们知道,软输入软输出解映射器以及SISO译码器输入输出都是对数似然比信息,利用对数似然比信息的EXIT图可以很好地预测迭代次数,其中SISO解映射(或译码器)的输入及输出外部对数似然比(LLR)信息表示为 $A_1, E_1$ (或 $A_2, E_2$ )。根据文献[5-7]:假定映射器输入比特等概率分布,则 $A_1$ 与解映射比特 $I$ 间的互信息量为

$$\begin{aligned}
 I_{A_1} &= I(V; A_1) \\
 &= \frac{1}{2} \sum_{v=0,1} \int_{-\infty}^{+\infty} p_{A_1}(\xi|V=v) \\
 &\quad \cdot \log_2 \frac{2p_{A_1}(\xi|V=v)}{p_{A_1}(\xi|V=0)+p_{A_1}(\xi|V=1)} d\xi, \\
 &0 \leq I_{A_1} \leq 1
 \end{aligned} \tag{1}$$

上式  $v \in \{0,1\}$ ,  $p_{A_1}(\xi|V=v)$  表示条件概率密度函数, 即发送比特  $v$  时,  $A_1$  值为  $\xi$  的概率, 可以模型化为

$$p_{A_1}(\xi|V=v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{A_1}} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma_{A_1}^2}\left(\xi - \frac{\sigma_{A_1}^2}{2}(2v-1)\right)^2\right\} \tag{2}$$

同样输出  $E_1$  与解映射比特  $V$  间的互信息量为

$$\begin{aligned}
 I_{E_1} &= I(V; E_1) \\
 &= \frac{1}{2} \sum_{v=0,1} \int_{-\infty}^{+\infty} p_{E_1}(\xi|V=v) \\
 &\quad \cdot \log_2 \frac{2p_{E_1}(\xi|V=v)}{p_{E_1}(\xi|V=0)+p_{E_1}(\xi|V=1)} d\xi, \\
 &0 \leq I_{E_1} \leq 1
 \end{aligned} \tag{3}$$

其中  $p_{E_1}(\xi|V=v)$  表示发送比特  $v$  时, 解映射器输出  $E_1$  值为  $\xi$  的条件概率。

这样, 以高斯信道为例,  $A_1$  作为独立高斯随机变量输入解映射器, 根据式(1), 式(2), 每选择一个  $\sigma_{A_1}^2$  值, 得到相应的一个  $I_{A_1}$ 。即互信息  $I_{E_1}$  可以表示为先验互信息  $I_{A_1}$  及信噪比  $E_b/N_0$  的函数

$$I_{E_1} = f_1(I_{A_1}, E_b/N_0) \tag{4}$$

具体计算时,  $p_{A_1}(\xi|V=v)$  可以通过式(2)计算得到,  $p_{E_1}(\xi|V=v)$  需要通过 Monte Carlo 仿真得到。同样, SISO 译码器输入互信息量  $I_{A_2}$  及输出互信息量  $I_{E_2}$  可以类似得到, 两者之间的传输关系可以表示为

$$I_{E_2} = f_2(I_{A_2}) \tag{5}$$

注意到此时由于假理想比特交织, 式(5)与信道特性无关, 仅取决于外编码本身(如卷积编码的存储长度等)。

图 1 是选择比特数为 40000 时的输出  $E_1$  的一次概率分布直方图。具体绘制 EXIT 图时, 首先将  $I_{A_1}$  作为横坐标,  $I_{E_1}$  为纵坐标, 得到关于 SISO 解映射器的输入输出信息特性曲线(亦称为传输特性曲线, 见文献[5]), 如图 2 细实线所示。根据式(1), 由于  $I_{A_1}$  与信噪比有关, 因此该特性曲线与信噪比有关, 图 2 共给出 3dB 到 9dB 间隔 1dB 的 9 条相关特性曲线。接下来交换外 SISO 译码器的输出特性的坐标轴, 即  $I_{A_2}$  作为纵坐标,  $I_{E_2}$  为横坐标, 得到 SISO 译码器的输入输出特性曲线(如图 2 中粗实现所示)。最后将两条曲线画在同一坐标系中, 就形成了 EXIT 图。可以利用折线来更好地指示迭代过程(即互信息量的转换过程, 如图 2 虚折线所示), 解映射

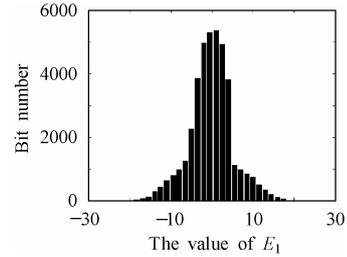


图 1 SISO Demapper 输出 LLR ( $E_1$ ) 的 Monte Carlo 仿真直方图  
Fig. 1 Simulated histogram of SISO demapper's output LLR ( $E_1$ )

器输出  $I_{E_1}$  对应解码器输入  $I_{A_2}$ , 相应的译码器输出  $I_{E_2}$  返回作为解映射器输入  $I_{A_1}$  ( $I_{E_1} = I_{A_2}$ ,  $I_{E_2} = I_{A_1}$ ), 迭代过程如此重复进行。EXIT 图可以很好地指示迭代收敛性能<sup>[5-7]</sup>, 两特性曲线相交处对应的  $I_{E_2}$  越大, 表示经多次迭代后, 系统的收敛性能就越好(误比特率越低)。

需要说明, 虽然 Monte Carlo 仿真在计算互信息量接近 1 时准确度不够, 但信噪比较低时足以表示互信息的转换, 信噪比较高时可以根据得到的规律进行推理。

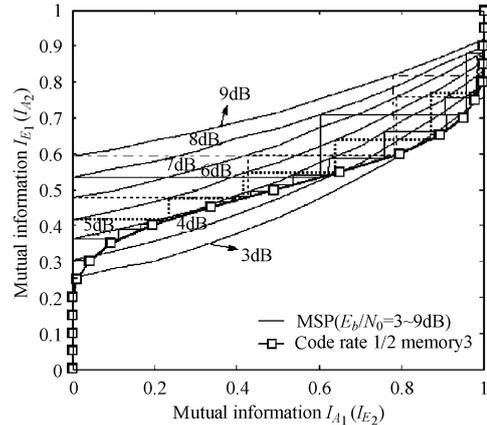


图 2 MSP 映射的迭代译码对应得 EXIT 图解  
Fig.2 EXIT chart with MSP mapping and rate 1/2, memory 3 convolutional code

### 2.2 信噪比区间内迭代次数的选择准则及存储矢量生成方法

本小节通过分析各个信噪比下的 EXIT 图特点, 得出与迭代次数有关的选择准则, 进而得到一个近最佳迭代次数矢量, 为引出本文迭代控制方法提供基础。

作者通过研究发现, 不同映射虽然对迭代次数的要求不同, 但总的趋势都一致, 本文以 16QAM 的 MSP 映射为例说明整个信噪比区间内迭代次数对系统性能的影响特点。图 2 为 Rayleigh 信道下信噪比矢量 3dB~9dB, 间隔为 1dB 时 SISO 解映射器和 1/2 码率的 16 状态 SISO 译码器间的 EXIT 图, 折线表示的是互信息量转换过程。

分析可见, 整个信噪比区间上存在如下特点:

(1)  $E_b/N_0 \leq 3\text{dB}$  时, EXIT 图中对应解映射和译码器的两条互信息量特性曲线(分别表示为  $s_1$ ,  $s_2$ ) 在图极左侧相交, 表示迭代次数对性能改进无几, 因此仅一次译码即可, 不需反馈迭代;

(2) 随信噪比增加,  $E_b/N_0 < 5\text{dB}$ ,  $s_1$  和  $s_2$  相交点右移, 但仍处于EXIT图左侧, 相交点对应的  $I_{E_2}$  仍然很小, 这表示所需迭代次数增加, 性能有所改善, 但收敛后的性能仍然不佳;

(3) 信噪比达到一定值后(如图 2 所示,  $E_b/N_0$  约为 5dB 时), 两条曲线  $s_1, s_2$  正巧形成一窄的通道(即EXIT图瓶颈), 表示互信息量交换的折线恰好可以通过, 使得它们在右侧相交。可见系统EXIT图瓶颈处, 达到收敛所需迭代次数最多, 对应常见系统误码率曲线中的陡降;

(4) 信噪比继续增加时, EXIT 图中折线跨越较大, 并呈现增加趋势。表示系统收敛所需迭代次数逐渐减少, 这部分系统性能改进较大, 迭代译码的作用也最为明显;

(5) 信噪比高于某一值后, 如本例 9dB,  $s_1$  和  $s_2$  在图极右侧相交, 少数几次迭代就可以得到一个非常理想的性能(较大的  $I_{E_2}$ ), 一般一律选择 3 次迭代即可, 此时对应误码率曲线中的错误平台;

近最佳迭代次数选择方法就是利用各个信噪比时的 EXIT 图得到该信噪比下每次迭代译码器输出的互信息量, 若当前迭代信息量较前次信息量的增加小于预设值  $\Delta I$ , 则认为迭代次数已近最佳, 从而记录该值, 若不满足上述条件, 则进行下次迭代。具体实现如表 1 所示。

表 1 近最佳迭代次数选择准则

Tab.1 Selective method of near optimum iterative degree

```

initialize:
i = 1;
 $E_b/N_0 = \min(E_b/N_0 \text{ Vector});$ 
 $I_{E_2}(0) = 0;$ 
while  $E_b/N_0 < \max(E_b/N_0 \text{ Vector})$ 
n = 1;
ITER: Perform nth iteration, calculate  $I_{E_2}(n);$ 
if  $I_{E_2}(n) - I_{E_2}(n-1) < \Delta I$ 
 $V_i(i) = n-1; i = i + 1;$ 
else
n = n + 1; return to ITER;
end if
 $E_b/N_0 = E_b/N_0 + \Delta;$ 
end while
    
```

由于EXIT图根据Monte Carlo仿真得到, 因此比较适合信噪比不高的情况, 信噪比较高时, 如本例 9dB, 选择迭代次数为 3 次比较合理。根据表 1 的近最佳迭代次数选择准则, 信噪比区间 3dB~9dB, 间隔 0.2dB 时, 得到的近最佳所需迭代次数矢量为:  $V_I = [2\ 2\ 2\ 2\ 2\ 3\ 3\ 4\ 6\ 7\ 20\ 12\ 10\ 8\ 7\ 6\ 5\ 5\ 5\ 4\ 4\ 4\ 4\ 4\ 4\ 4\ 3\ 3\ 3\ 3\ 3\ 3]$ 。进一步, 从图 2 可以看出, 考虑到信噪比为 5dB 时为瓶颈, 所需迭代次数远高于其它信噪比情况。在仿真系统性能, 特别是在实际接收机实现时, 该处值会导致系统延迟非常大、实现复杂度增加。作者认为, 可以在该处考虑一种次最佳的方法来进行折衷, 即将该极大值用次极大值代替, 如上例中用 12 代替 20(当然也可以根据情

况适当减小)。因此, 可以修正迭代次数矢量为  $V_I = [2\ 2\ 2\ 2\ 2\ 3\ 3\ 3\ 4\ 6\ 7\ 12\ 12\ 10\ 8\ 7\ 6\ 5\ 5\ 5\ 4\ 4\ 4\ 4\ 4\ 4\ 4\ 3\ 3\ 3\ 3\ 3\ 3]$ , 完成上述信噪比矢量仿真需要的平均迭代次数为  $\bar{V}_I = 4.7$ 。需要说明的是, 采用修正后的迭代次数矢量时, 系统在相应的信噪比区间(最大约 4.8dB~5.2dB)处, 性能会有所下降, 但由于此处为瓶颈, 损失性能不会太大。

### 3 迭代控制方法

基于上述近最佳迭代次数矢量, 可以得出一种非常简单的迭代控制方法。令估计信噪比为 SNR, 信噪比矢量间隔为  $\Delta$ , 则选择迭代次数为

$$n = \begin{cases} 1, & E_b/N_0 < 3\text{dB} \\ V_I \left( \left\lceil \frac{\text{SNR} - 3}{\Delta} \right\rceil + 1 \right), & 3\text{dB} \leq E_b/N_0 < 5\text{dB} \\ V_I \left( \left\lfloor \frac{\text{SNR} - 3}{\Delta} \right\rfloor + 1 \right), & 5\text{dB} \leq E_b/N_0 \leq 9\text{dB} \\ 3, & E_b/N_0 > 9\text{dB} \end{cases} \quad (6)$$

其中  $\lfloor \cdot \rfloor$  表示下取整,  $\lceil \cdot \rceil$  表示上取整,  $V_I(m)$  表示矢量  $V_I$  的第  $m$  个元素, 式(6)中用到一个迭代次数较大者优先原则, 即以瓶颈对应信噪比点为基准, 保证两侧都可以取得近最佳性能。如估计信噪比为 4.7dB,  $\Delta = 0.2\text{dB}$  时, 迭代次数  $n = V_I(\lceil (4.7 - 3)/0.2 \rceil + 1) = V_I(10) = 7$ ; 若估计信噪比为 5.3dB, 同样可以计算选择迭代次数为

$$n = V_I(\lfloor (5.3 - 3)/0.2 \rfloor + 1) = V_I(12) = 12$$

控制模块根据式(6)原则选择迭代次数, 控制判决器输出第  $n$  次迭代后对数似然信息的判决结果。系统框图如图 3 所示。其中的信噪比估计算法可以参照文献[8]。

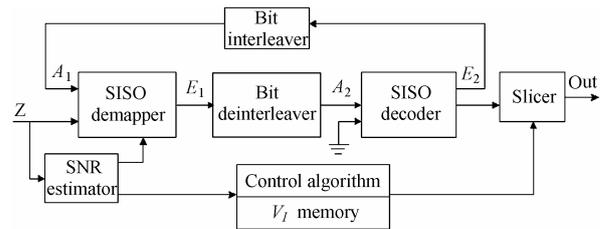


图 3 BICM-ID 系统的迭代控制框图  
Fig.3 The diagram of BICM-ID system with iterative control algorithm

### 4 计算机仿真

图 4 比较了本文算法与采用传统的 3 次迭代以及 8 次迭代后 BICM-ID 系统的仿真结果, 系统为已知全部信道状态信息的 Rayleigh 信道, 卷积码采用 1/2 码率, 生成多项式为 [15 17], 迭代次数矢量表采用信噪比间隔为 0.5 的修正矢量  $V_I = [2\ 2\ 3\ 4\ 20\ 9\ 6\ 5\ 4\ 4\ 4\ 3\ 3]$ , 可见采用迭代控制后的系统, 最主要的优势就是不受预先设定的迭代次数值的影响, 可以得到系统的近最佳性能曲线, 性能要优于固定迭代次数的方案, 而且所需要的平均仿真时间也会缩短。

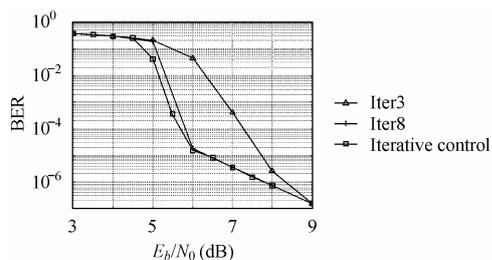


图 4 传统 BICM-ID 性能与采用迭代控制系统性能的仿真比较

Fig.4 Performance comparison of traditional BICM-ID and system with iterative control algorithm

## 5 结束语

本文提出的迭代控制方法非常适用于 BICM-ID 系统, 仿真结果也证明了算法的有效性, 利用 BICM-ID 的迭代控制, 可以方便有效地用以研究系统性能, 如不同映射、卷积编码方式等等因素对系统性能的影响。另外, 在仿真研究时, 迭代控制的 BICM-ID 系统也可以在保证性能的情况下较大幅度节省时间, 这点也是进行仿真研究的一个很大优势。

## 参考文献

- [1] Caire G, Taricco G, Biglieri E. Bit-interleaved coded modulation. *IEEE Trans. on Information Theory*, 1998, 44(5): 927-946.
  - [2] Li X D, Ritcey J A. Bit-interleaved coded modulation with iterative decoding. *IEEE Proc of ICC'99, Hongkong:IEEE*, 1999: 858-863.
  - [3] Li X D, Ritcey J A. Bit-interleaved coded modulation with iterative decoding and 8PSK signaling. *IEEE Trans. On Communications*, 2002, 50(8): 1250-1257.
  - [4] Chindapol A, Ritcey J A. Design, analysis, and performance evaluation for BICM-ID with square QAM constellations in Rayleigh fading channels. *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, 2001, 19(5): 944-957.
  - [5] Huang Yuheng. Bit-interleaved coded modulation with iterative decoding for wireless communications, University of Washington, 2004.
  - [6] Brink S T. Convergence of iterative decoding. *Electronics Letters*, 1999, 35(10): 806-808.
  - [7] Brink S T. Convergence behavior of iteratively decoded parallel concatenated codes. *IEEE Trans. on Communications*, 2001, 49(10):1727-1737.
  - [8] Pauluzzi D R, Beaulieu N C. A comparison of SNR estimation techniques for the AWGN channel. *IEEE Trans. on Communications*, 2000, 48(10):1681-1691.
- 宫丰奎: 男, 1979 年生, 博士生, 助教, 研究方向为无线通信系统、第四代移动通信关键技术等。
- 李兵兵: 男, 1955 年生, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为图像通信以及数字通信。
- 葛建华: 男, 1961 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为数字通信系统、移动通信以及 HDTV 等。
- 刘 鹏: 男, 1978 年生, 博士生, 研究方向为数字通信、图像通信。