

分组 Turbo 码软判决自适应 Chase 译码算法的研究*

张 薇¹, 刘星成¹, 赵连强²

(1. 中山大学 电子与通信工程系, 广东 广州 510275;
2. 辽宁移动通信有限责任公司锦州分公司, 辽宁 锦州 121000)

摘 要: 针对二进制分组 turbo 码提出了一种加快译码速度的软判决译码算法—自适应门限 Chase 译码算法(ATC)。该算法以迭代 Chase 算法为基础, 根据传输系统编码方案和信道条件联合确定 Chase 算法中不可靠比特数, 从而可以减少测试序列的数目, 并利用外信息的三角函数代替迭代译码时的归一化因子, 以达到降低软判决译码复杂度的目的; 与迭代 Chase 译码算法相比, 该算法可在译码复杂性和译码性能之间达到平衡。仿真结果表明: ATC 算法能在保持 turbo 码的译码性能基础上, 提高译码速度, 降低译码复杂度。

关键词: 分组 turbo 码; Chase 译码; 自适应门限; 软判决

中图分类号: TN911.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2005) 04-0047-04

分组 turbo 码的 SISO 译码是 Ramesh Pyndiah 提出的一种新的译码方法^[1-3]。对 BTC (Block Turbo code) 采用迭代 Chase 译码算法, 可以获得与卷积 Turbo 码相似的性能, 而其实现更为简单。由于 BTC 码的最小距离可以通过选择子码而得到保证, 从而避免卷积 turbo 码在中、高信噪比时, 其性能几乎不再随信噪比增加而改善的“地板”效应。在高码率 ($R > 0.8$) 情况下, 译码性能更优^[1]。同时由于 BTC 构码时采用行列交织, 增大了码间距, 起到噪声均化作用, 可以纠正随机和突发错误图样。很多编译码方面的学者就 BTC 码译码算法及 BTC 码的应用方面进行了大量研究。其中, 文献 [4] 对迭代 Chase 译码算法中的外信息加权因子作了修改, 采用外信息的三角函数代替原来的归一化因子, 降低了译码复杂度。而文献 [5] 提出一种加快 BTC 译码算法, 并用硬件说明该算法的优越性。文献 [6] 将 BTC 码应用至光纤通信系统, 并在模拟实验环境验证了在 10Gb/s 的光纤系统中, BTC 码在二进制对称信道传输时, 其性能曲线距 Shannon 限只有 0.9dB。对于多元码应用迭代译码算法的研究, 文献 [7] 提出简单的位转换类 Chase 算法, 该算法以较小的复杂度增加为代价获得较 KV 算法明显的性能改进^[8]。

迭代 Chase 算法译码性能接近最大似然译码, 对于信息位较多的码, 其译码复杂度低于最大似然

译码算法。BTC 码采用迭代 Chase 算法译码时, 根据计算子译码器输出码字的可靠性来获得外信息, 上一子译码器的外信息作为下一子译码器的输入, 该输入将使下一子译码器获得更好的软判决输出, 从而使译码结果趋向精确。

为了进一步降低迭代 Chase 译码算法的复杂度, 本文给出一种改进的 BTC 译码算法—自适应门限 Chase 算法 (ATC)。文中分别将 ATC 算法与迭代 Chase 算法应用于 BTC 译码。给出在 AWGN (additive white Gaussian noise) 信道条件下, BTC 码在 BPSK (Biphase Shift Keying) 调制下的迭代 Chase 算法和 ATC 译码算法的仿真结果。并对仿真结论进行了分析。

1 自适应门限 Chase 译码算法 (ATC)

Chase2 算法将选择判决输出码字时的竞争码字数目减至 2^p 个 (p 是接收序列中的不可靠比特数目)。当 p 较大时, 译码复杂度随 p 的增加而呈指数规律增长。为降低译码复杂度, 本文借鉴文 [6] 与 [4] 提出自适应门限 Chase 算法。该算法的主要思想是根据传输系统中传输码字和信噪比的条件, 与 Chase2 算法联合确定接收序列中的不可靠比特数目, 从而减小根据测试序列生成的竞争码字空间大小。并在利用外信息迭代译码时, 采用文 [4] 中提出的外信息的三角函数代替原来的归一化

* 收稿日期: 2004-11-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (90304011); 广东省自然科学基金资助项目 (04009739); 东南大学移动通信国家重点实验室开放基金资助项目 (A0403)。

作者简介: 张薇 (1976 年生), 女, 硕士研究生; **通讯联系人:** 刘星成; E-mail: isslxc@zsu.edu.cn

因子。

以一个码字译码为例, ATC 算法译码过程如下:

(1) 根据接收序列 R 得到硬判决序列 R_k , 对 R 的可靠性进行排序, 找出 R_k 中 p 个不可靠比特。

(2) 对接收序列中 p 个较不可靠元素, 根据如下门限进行映射

$$r_i = \begin{cases} +1 & r_i > T \\ -1 & r_i < -T \\ r_i & |r_i| \leq T \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, p$$

$$\text{其中门限: } T(\gamma) = (\gamma + 1) \times \sqrt{(k/n) \times (E_b/N_0)}$$

如果 $|r_i| \leq T$, 则 r_i 为接收序列不可靠元素。此时不可靠比特数变为 p' ($p' \leq p$)。门限函数 $T(\gamma)$ 与接收序列量化阶数、码率和信噪比有关。 γ 是自适应门限 Chase 算法的置信因子, 与量化阶数有关。改变信噪比和所用编码方案时, 算法可以自适应调节门限大小。

(3) 如果在门限范围内没有找到不可靠元素, 则将 R 中可靠度最低的元素所对应的 R_k 中比特作为不可靠比特。

(4) 根据不可靠比特生成测试序列。测试序列与判决序列模 2 加后送入硬判决译码器, 获得竞争码字集 C' 。再竞争码字集中找出与接收序列 R 欧氏距离最小的码字作为译出码字 D , 如果竞争码字集中所有码字与接收序列 R 具有相同欧氏距离, 则直接输出该码字的上一次译码结果。

BTC 码 ATC 迭代译码结构图如图 1。

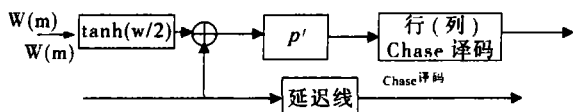


图 1 BTC 码迭代自适应门限 Chase 迭代译码结构

Fig.1 Block diagram of elementary BTC decoder, using adaptive threshold Chase decoding algorithm

图 1 中 p' 是由门限函数与 Chase2 算法联合确定的。由图 1 看出, 在迭代译码的一次子译码过程中, 根据上一子译码器的输出计算出的外信息经过三角函数 $\tanh(w/2)$ 修正, 与接收序列 $R(m)$ 相加, 再根据不可靠比特位生成 $2^{p'}$ 个测试序列, 然后将 $2^{p'}$ 个测试序列送入译码器进行译码。

2 仿真结果

分组 turbo 码译码仿真采用 BCH (15, 5, 7)²

码。ATC 算法、迭代 Chase 算法均是在 AWGN 信道, BPSK 调制方式下进行。对于迭代译码, 译码复杂度与其行/列译码过程中遍历的平均测试模式及所需硬判决次数有关。

ATC 算法中, 根据译码性能及迭代过程逐步推进来设置置信因子 γ 的取值。本文仿真 γ 预置为: $r(k) = [0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1]$, 仿真采用 8 级量化, $\beta = N/N_{\max}$ (N 和 $N_{\max}$ 分别为译码过程中的迭代次数和最大迭代次数)^[3]。硬判决采用 Peterson 译码算法^[8]。迭代 Chase 算法设定 $p = 3$ 。仿真过程中, 分组 turbo 译码器执行 4 次完全迭代。

首先, BCH (15, 5, 7)² 经 BPSK 调制, 并在 AWGN 信道传输。对于 10^6 信息比特, 其迭代 Chase 译码算法译码误码率如表 1 所示; 而采用自适应门限 ATC 译码算法进行译码, 仿真误码率结果如表 2 所示。

表 1 BCH (15, 5, 7)² 迭代 Chase 译码 BER 性能

Tab.1 BCH (15, 5, 7)² iterative Chase decoding BER

信噪比	1dB	1.5dB	1.8dB	2dB	2.5dB
1 次	1.78E-02	9.60E-03	6.45E-03	4.46E-03	2.12E-03
2 次	9.30E-04	2.45E-04	5.23E-05	3.05E-05	3.24E-06
3 次	3.13E-04	6.75E-05	4.06E-05	1.62E-05	0.00E+00
4 次	2.30E-04	5.87E-05	3.06E-05	0.00E+00	0.00E+00

表 2 BCH (15, 5, 7)² 迭代自适应门限 Chase 译码 BER 性能

Tab.2 BCH (15, 5, 7)² iterative adaptive threshold Chase decoding BER

信噪比	1dB	1.5dB	1.8dB	2dB	2.5dB
1 次	2.19E-02	1.20E-02	8.40E-03	5.83E-03	2.71E-03
2 次	1.14E-03	2.70E-04	1.09E-04	7.50E-05	5.09E-06
3 次	3.47E-04	7.17E-05	5.04E-05	2.78E-05	0.00E+00
4 次	2.81E-04	6.80E-05	3.75E-05	0.00E+00	0.00E+00

从表 1 和表 2 可以看出, 采用迭代 Chase 译码算法译码时, 随着迭代次数增加, 译码性能得到明显改善; 但当迭代次数大于 3 次时, 性能改善趋缓。3 至 4 次完全迭代可以获得比较低的 BER。同时看到在迭代译码过程中, 当 $E_b/N_0 \geq 1.5$ dB 时, 采用迭代译码可以获得比较好的译码性能。

比较表 1 和表 2, 可以得出: 采用 ATC 算法, 可以获得与迭代 Chase 算法相比拟的译码性能。但 ATC 算法可以减少译码复杂性, 且易于实现。在仿真过程中, 根据迭代次数和信噪比分别用了两种量化方法。当迭代次数比较小 (1 次) 时, 我们采用均匀 8 级量化, 译码性能较好; 当迭代次数增加,

采用 $[-1, +1]$ 之间 8 级量化, 如此处理可以获得比较好的译码性能。

对于本仿真结果, 与 Pyndiah^[3] 中 BCH (16, 11, 4)² 码的仿真结果对比, 可以看到在 BER 为 10^{-5} , 两者均迭代 3 次时, ATC 译码性能提高约 7 dB。

图 2、图 3 分别表示译码迭代次数为 1、2 次, 信噪比为 1 至 6 dB 时所需的硬判决译码次数。最左边的柱状图表示应用迭代 Chase 算法迭代译码所需的硬判决译码次数 (HDDs), 对于同一迭代译码过程, 其 HDDs 不随信噪比变化而变化。向右依次是信噪比为 1 至 6 dB 时, ATC 算法迭代 1、2 次所需的 HDDs。由图看出: 随着信噪比的增加, ATC 算法可以节省硬判决次数。在同一图中比较, $E_b/N_0 = 6$ dB 时, 所需硬判决次数约为迭代 Chase 算法的

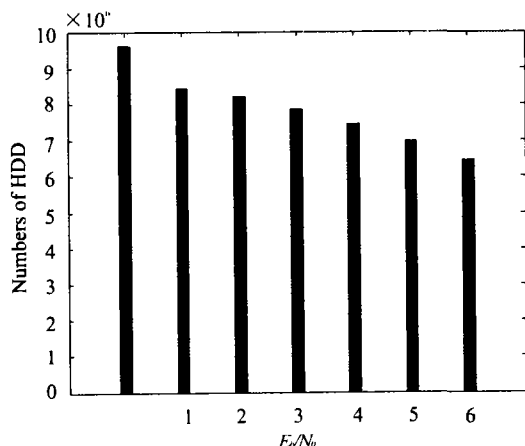


图 2 不同信噪比时 ATC 迭代 1 次 HDD 数

Fig.2 The number of HDDs carried out once ATC iterative decoding

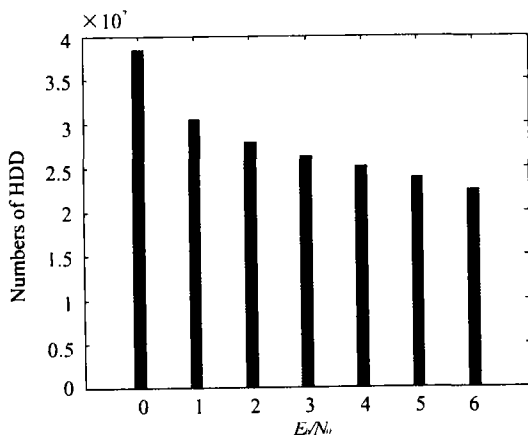


图 3 不同信噪比时 ATC 迭代 2 次 HDD 数

Fig.3 The number of HDDs carried out twice ATC iterative decoding

2/3, 甚至更少; 图 2、图 3 统一比较, 随着迭代次数增加, ATC 算法将硬判决次数降为迭代 Chase 算法的 3/5, 从而减少了译码时延。采用 ATC 译码算法, 减少了 Chase 译码算法需要生成的测试序列数目, 从而减小了利用欧氏距离从竞争码字集搜索译码结果的时间。说明本文提出的 ATC 算法在降低译码性能的基础上减少了译码复杂度, 提高了译码速度。

3 结 论

BTC 码所获得的编码增益主要来自它在译码方式上的改进, 迭代在其性能改善方面起很大的作用。随着迭代次数的增加, 性能越来越好。但达到一定的迭代次数之后, 改善程度趋缓。

本文提出的 ATC 算法应用到 BTC 译码过程中可以达到与迭代 Chase 算法基本相近的性能, 但明显减少了迭代译码过程中的译码复杂性, 算法易于实现。该算法有三个优点: ①该算法对接收序列的可靠性进行了更细致的划分; ②该算法减少了译码过程所需的硬判决译码次数; ③该算法减少了软判决译码时遍历的合法竞争码字空间。

综上所述, 本文提出的 ATC 算法与迭代 Chase 算法相比, 能够在保持基本相同译码性能的前提下, 显著减少所需硬判决译码次数和合法竞争码字, 大大加快了软判决迭代译码的速度。

参考文献:

- [1] PYNDIAH R, GLAVIEUX A, PICART A, et al. Near optimum decoding of product codes [C]. Proc. GLOBECOM'94, San Francisco, CA, 1994, 1: 1003 - 1010.
- [2] PYNDIAH R M. Near optimum Decoding of product codes [J]: Block Turbo Codes. IEEE Trans. Comm, 1998, 46(8): 170 - 182.
- [3] PICART A, PYNDIAH R. Adapted iterative decoding of product codes [C]. Global Telecommunications Conference - Globecom'99, Rio de Janeiro, Brazil, 1999, 5: 2357 - 2362.
- [4] ZHIPEI C, LEILEI S, Parhi K K. On the performance/complexity tradeoff in block turbo decoder design [J]. IEEE Trans. Comm., 2004, 52(2): 173 - 175.
- [5] KYUNGCHUL Y, HYUNGSHIK S, YUNBO J, et al. An efficient high - speed block turbo code decoding algorithm and hardware architecture design [C]. SIPS 2003. IEEE Workshop on, 2003: 41 - 44.
- [6] MIZUOCHI T, MIYATA Y, KOBAYASHI T, et al. Forward error correction based on block turbo code with 3 - bit soft decision for 10 - Gb/s optical communication systems [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2004, 10(2): 376 - 3

- [7] HAITAO X, CHENG Z, CRUZ J R. A chase - type algorithm for soft - decision reed - solomon decoding on rayleigh fading channels [C]. GLOBECOM '03, IEEE, 2003, 3: 1751 - 1755.
- [8] KOETTER R, VARDY A. Algebraic soft - decision decoding of Reed - Solomon codes [J]. IEEE Trans. Inform. Theory, 2003, 49(11): 2809 - 2825.
- [9] CHASE D. A class of algorithms for decoding block codes with channel measurement information [J]. IEEE Trans. Inf. Theory, 1972, IT - 18(1): 170 - 182.
- [10] ELIAS P. Error - free coding [J]. IRE Trans. Inf. Theory, 1954(4): 29 - 37.
- [11] MAHRAN A, BENAÏSSA M. Adaptive chase algorithm for block turbo codes [J]. Electronics Letters, 2003, 39(7): 617 - 619.
- [12] 马秀莲, 李廷芳, 吕叔香. 数字通信差错控制技术 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991.
- [13] 王新梅. 纠错码与差错控制 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 1989.

Study of Adaptive Chase Algorithm for Block Turbo Codes

ZHANG Wei¹, LIU Xing-cheng¹, ZHAO Lian-qiang²

(1. Department of Electronics and Communications Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
2. Liaoning Mobile communication LTD. Jinzhou Branch. Liaoning Jinzhou 121000, China)

Abstract: A novel soft-decision decoding algorithm, called as adaptive-threshold Chase algorithm (ATC), is proposed. The idea is based on excluding some of the least reliable bits from those be processed according to the Chase algorithm. A relation between the threshold and channel condition is established. The ATC algorithm uses trigonometric function of extrinsic information in stead of the scaling factor. Compared with the iterative Chase algorithm, the proposed algorithm for the binary block turbo code can achieve tradeoffs between decoding complexity and decoding performance. In the experiments, the Hard Decision Decoding numbers are considered as the comparing standard. Simulation results show that the proposed algorithm is faster than the iterative Chase algorithm and has relatively low decoding complexity.

Key words: block turbo code (BTC); Chase algorithm; adaptive threshold; soft decoding

(上接第 42 页)

Polarization Fatigue and History Memory Effect in Ferroelectrics

ZHU Gui-wen¹, ZHOU Wei-hua², SHEN Han¹, CHEN Min¹

(1. Department of Physics, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
2. Department of Physics, Yi Chun College, Yichun, 336000, China)

Abstract: Dielectric hysteresis loop is an important method for the research of ferroelectricity, but there are non-ferroelectric effects, such as non-linear conductance, non-linear paraelectric capacitance, et al, to be separated. To get rid of this problem, a new method called differential hysteresis loop is introduced. Based on this method, some non-ferroelectric effects are quite easily to be separated, and the pure ferroelectric effect can be obtained. The experiments of PZT and BST ceramics reveal that pure ferroelectric differential loop can be accurately fitted by Gaussian functions, polarization fatigue can be described with the variations of the peak positions, heights, half height half widths of the Gaussian peaks. Moreover, the experiment proved that polarization fatigue effects relate closely to the sample's thermodynamic history.

Key words: ferroelectrics; polarization fatigue; hysteresis loop