

一种 TPC 硬判决译码改进算法研究

钟 志, 张微微, 单明广

(哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院, 150001 哈尔滨, zhongzhi@hrbeu.edu.cn)

摘 要: 针对 Turbo 乘积码(TPC)传统硬判决译码算法中某些错误可以检测但无法纠正的问题,提出了一种改进的 TPC 硬判决译码算法. 该算法在对传统硬判决译码算法进行多次迭代的基础上,通过串接检错、估算错误总数、构造错码候选码字集、选取最优码字等步骤来解决传统算法可检而不可纠的错误图样问题. 仿真结果表明:在误比特率为 10^{-5} 时,与传统硬判决迭代译码算法相比,本文提出的算法能够提高 0.9 dB 的增益.

关键词: TPC; 硬判决; 迭代译码

中图分类号: TN911.22

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)05-0123-03

A modified algorithm of hard decision decoding for TPC

ZHONG Zhi, ZHANG Wei-wei, SHAN Ming-guang

(College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, 150001 Harbin, China, zhongzhi@hrbeu.edu.cn)

Abstract: A modified algorithm was proposed in this paper to deal with the problem that the conventional algorithm of hard decision decoding for Turbo Product Code(TPC) can not correct some detected error symbols. Based on multiple iteration steps of the conventional algorithm of hard decision decoding, the modified algorithm can correct the wrong symbols by detecting them, estimating their total number, constructing their candidate sequences and then selecting the optimum sequence among the candidates. Simulation results show that the modified algorithm can provide a gain of 0.9 dB over the conventional algorithm at BER of 10^{-5} .

Key words: TPC; hard decision; iterative decoding

自从 R. Pyndiah^[1]提出分组 Turbo 码(也称为 Turbo 乘积码)以来,因其在译码性能上接近 Turbo 卷积码(TCC),且比 TCC 具有更好的渐进性能,从而吸引众多国内外学者对 TPC 技术展开了大量的研究,但这些研究大多是基于软输入-软输出(SISO)进行的^[2-5]. 随着光纤传输技术的不断发展,光纤传输的速率越来越快^[6],软判决译码时所需软信息的获得越来越困难^[7],相应地对信道译码速度的要求也越来越高. 相对软判决译码,硬判决译码具有计算复杂度低,结构简单,实现容易,译码速度快等优点. 许多学者对 TPC 硬判决译码做了不少有益的研究^[8-9]. 这些文献为乘积码硬判决译码算法的应用与改进提供了理论基础. 文献[10]针对传统硬判决译码算法无法解决的“#”型错误图样,通

过对未译码的接收矩阵分别进行行列译码,并记录纠错码字的个数与位置来预定义“#”型错误图样,从而在接收矩阵的错误图样为“#”型时,能够对其准确判别并正确译码. 虽然与传统硬判决译码相比,应用该算法能够提高 0.5 dB 的增益,但在实际应用中,还存在着其他可以检测而传统硬判决译码算法无法纠正的错误图样.

本文在对传统硬判决译码算法无法纠正的错误图样进行大量分析的基础上,提出了一种新的硬判决译码改进算法. 该算法通过传统硬判决迭代译码之后串接检错、估算错误总数、构造错码候选码字集、选取最优码字等操作来实现. 最后对以扩展 Hamming 码(16,11,4)为子码的 TPC 码进行蒙特卡洛仿真.

1 乘积码的硬判决译码

级联译码是一种最简单且被广泛应用的译码

收稿日期: 2009-07-09.

基金项目: 航天支撑基金,哈尔滨工程大学校基金资助项目(HEUFT009).

作者简介: 钟 志(1976—),男,副教授.

算法^[10]. 译码器由 1 个行硬判决译码器和 1 个列硬判决译码器级联组成, 输入矩阵先按行进行译码, 然后将行译码输出矩阵进行列译码, 得到的列译码输出矩阵即为译码输出值. 为提高译码性能, 一般通过多次行列迭代来译码. 其基本迭代结构如图 1 所示.

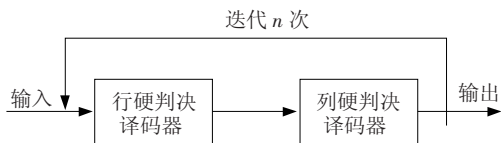


图 1 传统硬判决迭代译码

其中行(列)硬判决译码器采用代数译码算法. 如果一致校验矩阵为 H 的线性分组码 $C(n, k, d)$ 经信道传输后对应的码字为 R , 代数译码器设法从 R 中得到正确的错误图样 E' , 然后计算估值码字 C' . 具体的译码步骤如下:

- 1) 计算校正子 $S = R \times H^T$;
- 2) 根据校正子 S 找出错误图样 E' ;
- 3) 得到译码器的输出——估值码字 $C' = R - E'$, 若 $C' = C$, 则译码正确, 否则译码错误.

如果二维乘积码 $P = C_1 \otimes C_2$ 的两个构成码 C_1 和 C_2 的最小汉明距离分别为 d_1 和 d_2 , 则乘积码 P 能够纠正长为 $t = \lfloor (d_1 d_2 - 1)/2 \rfloor$ 的随机错误. 扩展汉明码的最小汉明距离 $d = 4$, 那么以扩展汉明码为分量码的乘积码 P 能够纠正 7 个随机错误. 但由于扩展汉明码能够纠正 1 个错误, 所以当出现如图 2(a) 所示的“#”型 4 个错误时, 传统硬判决算法无法正确纠错. 同样也无法纠正如图 2(b)、2(c) 所示的错误图样, 且多次迭代情况下译码可能会增添新的错误出现. 图 2 中的例图属于常见错误图样类型, 它说明了硬判决译码器的缺陷, 也因此限制了级联的硬判决译码方式的应用.

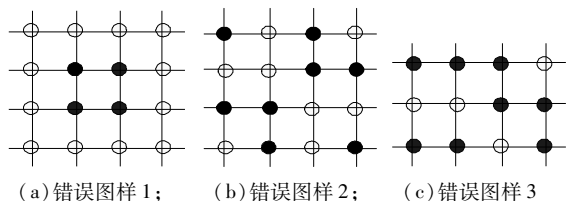


图 2 无法纠正的错误图样

2 改进的译码算法

基于扩展汉明码既能纠错又能检错的特性, 在扩展汉明码传统硬判决迭代译码后串接几个简单易行的操作, 形成一种新的硬判决译码改进算法. 其译码流程如图 3 所示.

具体译码过程如下:

1) 传统硬判决迭代译码. 对接收矩阵 R 进行传统硬判决迭代译码, 译码后得输出矩阵 R' .

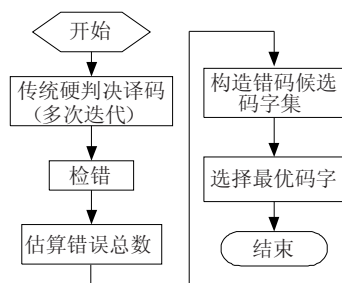


图 3 改进算法的流程

2) 检错. 判定 R' 中所有行和列的偶校验 c 是否被满足, 校正子 S 的元素是否全为零. 若 $c = 0$, 且 S 为零向量, 则译码成功, 否则存在错误, 记录检测到的错误行和列的位置. (设 p_1, p_2 分别为错误行和错误列所对应的位置组成的向量). 当 p_1 和 p_2 都为零向量, 则译码正确, 把 R' 作为最后的译码结果, 结束译码; 当 p_1, p_2 之一为零向量, 表示存在检测不到的错误, 把 R' 作为最后的译码结果, 结束译码; 当 p_1, p_2 均不为零向量, 进行步骤 3).

3) 根据 p_1, p_2 的值, 分别按矩阵的行和列估算错误总数 f_1 和 f_2 . 其中 f_1 为 p_1 中满足偶校验但校正子不为零向量的错行个数的 2 倍与 p_1 中不满足偶校验的错行个数的 3 倍之和; f_2 为 p_2 中满足偶校验但校正子不为零向量的错列个数的 2 倍与 p_2 中不满足偶校验的错列个数的 3 倍之和. 当 $f_1 \neq f_2$, 表示矩阵中仍然含有检测不到的错误, 把 R' 作为最后的译码结果, 结束译码; 当 $f_1 = f_2$, 进行步骤 4).

4) 根据 p_1 和 p_2 两个向量值, 构造错列码字的候选码字集. p_2 中每个错列都存在 2 个错误(由于级联译码过程中先进行了行译码, 后进行了列译码), 这 2 个错误位置从 p_1 中选取(每个错列都有 C_m^2 种修改方案, 设 p_1 含有 m 个元素), 并把相应位置的码元取反, 然后求出修改后的码字的校正子 S , 如果 S 为零向量, 则该码字即为相应错列的候选码字之一, 所有错列的全部候选码字就构成了候选码字集. 如果候选码字集不存在, 表示矩阵依然存在检测不到的错误, 把 R' 作为最后的译码结果, 结束译码; 否则进行步骤 5).

5) 选取最优码字. R' 中的每个错列都选择一个相应的候选码字来替代, 然后对修改后的码字矩阵检错. 如果 p_1' 和 p_2' 都为零向量(p_1' 和 p_2' 分别为改后矩阵检错时检测到的错误行和错误列所对应的位置组成的向量), 则译码正确, 将修改后的码字矩阵作为最终译码结果输出, 结束译码, 否则重复本步骤, 错列重新选取候选码字组合, 直到 p_1' 和 p_2' 都为零向量为止.

该算法能够纠正图 2 中可以检测到的错误图样,但当接收矩阵中包含无法正确检测到的隐含错误时,如当某行(列)码字中包含 4 个错误时,往往检测不到,则无法纠错。

3 译码性能仿真与分析

用 Matlab 数学仿真工具,对 AWGN 信道下 BPSK 调制体制的以(16,11,4)扩展汉明码为分量码的 TPC 进行蒙特卡洛仿真。仿真过程中,当译码错误的帧数达 20 帧时,该信噪比下的仿真结束。

图 4 给出了应用传统硬判决迭代译码算法和本文提出的改进后的译码算法对 TPC 进行译码的误比特率曲线。译码过程中,2 种算法的迭代次数均取 2 次。通过图 4 的曲线对比可以发现:与传统硬判决译码算法相比,从 1 dB 开始,随着信噪比的提高,改进算法译码性能的改善越来越明显,在误比特率为 10^{-5} 时,能够提供 0.9 dB 的增益。

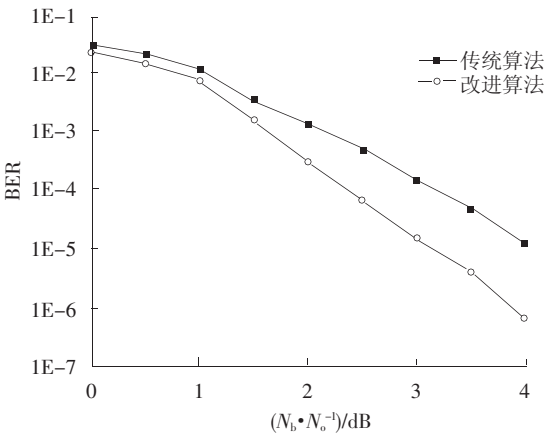


图 4 不同算法译码性能的比较

为了分析迭代次数对译码性能的影响,图 5 给出了改进算法在不同信噪比下分别迭代 1~4 次的误码率曲线。从该图可以看出,相对迭代 1 次的曲线,迭代 2 次后纠错性能改善较大,但迭代 3 次和 4 次的曲线与迭代 2 次的曲线相比,改进效果并不明显。因此该译码算法中传统硬判决译码的迭代次数取 2 次即可达到较好的译码效果。

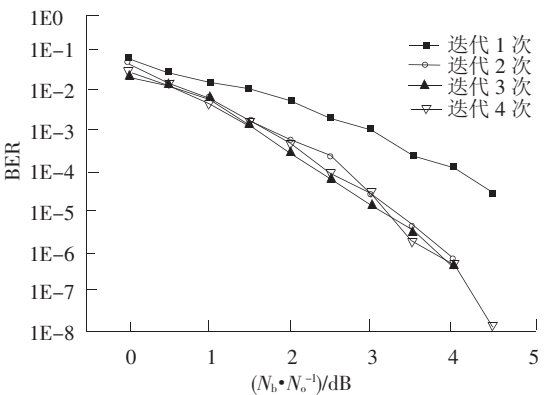


图 5 不同迭代次数的误码率曲线

上述仿真结果表明,在传统硬判决译码算法基础上译码复杂度增加不大的情况下,误码率为 10^{-5} 时,相对传统硬判决迭代译码,本文提出的改进译码算法能够提高 0.9 dB 的增益。

4 结 论

本文提出了一种改进的 TPC 硬判决译码算法,该算法在传统硬判决迭代译码结束后通过串接检错、估算错误总数、构造错码候选码字集、选取最优码字等几个简单的操作来实现,解决了传统硬判决译码算法中对某些错误只能检测而不能纠正的问题,进一步提高了 TPC 硬判决译码的纠错性能,在 BER 为 10^{-5} 时,相比传统硬判决译码,能够提高 0.9 dB 的增益。

参考文献:

[1] PYNDIAH R, GLAVIEUX A, PICART A, et al. Near optimum decoding of product codes [C]//Global Telecommunications Conference, 1994. GLOBECOM '94. Communications: The Global Bridge, IEEE. San Francisco, CA: IEEE, 1994(1):339-343.

[2] THESLING W H, XIONG F. Pragmatic approach to soft-decision decoding of linear block codes [J]. IEEE Proceedings on Communications,1995,142(1): 40-47.

[3] HIRST S A, HONARY B, MARKARIAN G. Fast chase algorithm with an application in turbo decoding [J]. IEEE Transaction on communications,2001,49(10):1693-1699.

[4] ARGON C, MCLAUGHLIN S W. An efficient chase decoder for turbo product codes [J]. IEEE Transaction on Communications,2004,52(6):896-898.

[5] 翟吉博,毛志刚. IEEE802.16e 中的 BTC 码编译码方案 [J]. 信息技术,2008(6):51-54.

[6] 钟竞东,梁钊. 长距离高速光纤通信中的 FEC 技术及其研究进展 [J]. 光子技术,2006(2): 92-96.

[7] ANDERSEN J D. Product codes for optical communication [C]//Optical Communication. 28th European Conference. Piscataway:IEEE, 2002(3):1-2.

[8] JUSTESEN J, HOHOLDT T. Analysis of iterated hard decision decoding of product codes with reed-solomon component codes [C]//Proceedings ITW 2007. Lake Tahoe:[s. n.], 2007:174-177.

[9] SCHWARTZ M, SIEGEL P H, VARDY A. On the asymptotic performance of iterative decoders for product codes [C]//The International Symposium on Information Theory 2005. Adelaide:[s. n.], 2005:1758-1762.

[10] AL-SHAIKHI A A, KOUSSA M A. Modified algorithm for hard decision decoding of product codes [C]//Wireless Communications and Networking Conference, 2004. Piscataway: IEEE, 2004:1760-1763. (编辑 张 宏)