



适用于 BPSK 系统的抗跳周 LDPC 译码算法^{*}

吴大中, 吴海东

(南京信息工程大学 南京 210044)

摘要: 采用 BPSK 调制方式的系统发生跳周现象后, 输入 LDPC 译码器的信息序列符号与原序列符号相反, 导致译码器失效。提出了基于置信传播算法的抗跳周 LDPC 译码算法。该算法通过增加一次迭代译码的运算量, 根据校验节点与变量节点之间传递的信息对初始似然比信息进行修正, 可以消除跳周对译码器的影响。仿真结果表明在不发生跳周时, 抗跳周 LDPC 译码算法与传统译码算法性能相同, 即抗跳周 LDPC 译码算法对初始似然比信息的修正不会导致译码性能损失。在跳周发生时, 传统译码算法失效。对校验节点奇数度的码字采用抗跳周译码算法可以完全克服跳周带来的影响, 译码性能与无跳周发生时相同。

关键词: 低密度奇偶校验码; 跳周; 二相相移键控; 置信传播算法

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2014.01.010

Anti-Cycle-Slip LDPC Decoding Algorithm for BPSK System

Wu Dazhong, Wu Haidong

(Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: When cycle-slip occurs in BPSK modulation system, sign of information sequence which is input of LDPC decoder is opposite to the original one. This problem will lead to decoder failure. Anti-cycle-slip LDPC decoding algorithm based on belief propagation was proposed. Modified algorithm modifies initial likelihood ratio information according to information between check nodes and variable nodes by an iterative decoding computation. Modified algorithm can eliminate the influence of cycle-slip and ensure normal function of LDPC decoder. Simulation result shows that modified decoding algorithm has the same performance with traditional decoding algorithm without cycle-slip, which means that the modification of initial likelihood ratio doesn't lead to decoding performance loss. When cycle-slip happens, traditional decoding algorithm fails. Decoding LDPC of odd check node degree by anti-cycle-slip algorithm will overcome the impact of cycle-slip totally. Modified algorithm has the same decoding performance no matter cycle-slip happens.

Key words: low-density parity-check code, cycle-slip, BPSK, belief propagation decoding

1 引言

对于采用二相相移键控 (binary phase shift keying, BPSK) 调制方式的系统, 由于接收信号经过某些非线性运算, 其载波相位可能存在相位模糊。在 BPSK 系统中, 载波

相位可能存在 $\pm 180^\circ$ 的相位模糊, 即可能发生跳周现象。此时译码器的输入数据符号与原序列相反, 导致译码器在跳周发生时失效。对 BPSK 系统跳周问题的处理方法包括以下 3 类。第 1 类方法通过提高相位估计算法的精确度, 降低跳周出现的概率, 即一种消除 V&V 算法载波相位模糊

^{*} 国家自然科学基金资助项目 (No.41175033), 江苏高校优势学科建设工程资助项目



的方法^[1],然而参考文献[1]中的方法只能在一定程度上降低跳周发生的概率,并不能完全避免跳周的发生。基于低密度奇偶校验码(low-density parity-check code, LDPC)译码软信息的迭代载波恢复算法^[2]提出了基于译码软信息辅助相位估计的方法。基于译码软信息的反馈结果增加了系统的复杂度,只适合载波偏差较小的情况,应用场合较为局限。第1类方法不能从根本上避免跳周现象的发生,因此需要其他方法应对已发生的跳周现象。第2类方法在数据帧头加入独特码,根据内容已知的独特码相位判断是否发生跳周^[3]。该方法作为一种解决相位模糊问题的普适性方法,可以解决一般的跳周问题,但独特码的引入增加了系统开销,提高了系统的复杂度。第3类方法根据相邻信号的相位差进行信息编码,即采用差分编码,但系统在采用差分编码的同时会引入 2.3 dB 的信噪比损失^[4]。

以上3种方法均在译码器之外解决跳周问题。一旦发生跳周的信息序列进入译码器,系统将不可避免地承担高误码率的风险。针对以上3种方法的不足,本文创新性地提出适用于PSK系统的抗跳周LDPC译码算法。即使进入译码器的信息序列发生跳周现象,译码器通过一次迭代译码输出的似然信息即可判断是否发生跳周。根据判断结果对输入序列进行相应的修正,保证了译码器在输入序列发生跳周时依然可以正常工作。其增加的复杂度仅为一次迭代译码的运算量,相当于LDPC译码迭代次数增加一次。本文提出的方法相比第2类方法降低了整个系统的复杂度,相比第3类方法没有给系统带来信噪比的损失。本文对PSK系统跳周问题进行了研究,分析了LDPC译码的相关算法,在此基础上,提出了修正后的抗跳周译码算法,通过不同环境对不同译码算法的性能进行了比较,表明修正后的抗跳周译码算法可以有效地消除跳周对译码器的影响。

2 LDPC 迭代译码算法

2.1 BP 译码算法

发送端码字序列为 $S=\{s_1, s_2, \dots, s_N\}$, S 经过 BPSK 调制后得到符号序列 $X=\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$, 其中 $x_n=1-2s_n$ 。信号传输经过高斯白噪声(AWGN)信道后,接收到的序列为 $Y=\{y_1, y_2, \dots, y_N\}$, 其中 $y_n=x_n+u_n$, u_n 为独立同分布的噪声变量。噪声变量均值为 0, 方差为 σ^2 。定义变量节点为 v_n , 校验节点为 c_m 。与校验节点 c_m 连接的变量节点集合为 $V(m)$, 与变量节点 v_n 连接的校验节点集合为 $C(n)$ 。在第 k 次迭代译码过程中, 校验节点 c_m 向变量节点 v_n 传递的置信信息为 P_{mn}^k , 变量

节点 v_n 向校验节点 c_m 传递的置信信息为 S_{nm}^k , 变量节点 v_n 输出的似然比信息为 L_n^k 。BP(belief propagation)迭代译码算法过程如下。

(1) 初始化: 变量节点似然比信息初始值如式(1)所示, 令 $S_{nm}^0=L_n^0$ 。

$$L_n^0 = \ln \frac{P(x_n=1|y_n)}{P(x_n=-1|y_n)} = \frac{2y_n}{\sigma^2} \quad (1)$$

(2) 校验节点信息计算: 校验节点 c_m 接收到来自 $V(m)$ 中变量节点的信息, 计算 P_{mn}^k , 如式(2)所示, 其中“ $\setminus$ ”为集合运算的差集运算。

$$P_{mn}^k = 2\alpha \tanh \prod_{n' \in C(n) \setminus n} \tanh(S_{n'm}^{k-1}/2) \quad (2)$$

(3) 变量节点信息计算: 变量节点 v_n 接收来自 $C(n)$ 中校验节点的信息, 计算 S_{nm}^k , 如式(3)所示。

$$S_{nm}^k = L_n^0 + \sum_{m' \in V(m) \setminus m} P_{m'n}^k \quad (3)$$

(4) 迭代终止判断: 变量节点在计算 S_{nm}^k 的同时, 计算 L_n^k , 如式(4)所示。根据 L_n^k 计算出输出码字序列 W^k , $W^k=\{w_1^k, w_2^k, \dots, w_N^k\}$, 如式(5)所示, 其中 $\text{sgn}()$ 表示取符号函数。定义 H 为 LDPC 码的校验矩阵, H^T 为其转置矩阵。若 $W^k H^T=0$, 说明当前输出码字满足校验方程, 迭代译码终止, W^k 为译码器输出码字; 否则继续迭代译码, 达到预设最大译码迭代次数后停止。

$$L_n^k = L_n^0 + \sum_{m \in V(m)} P_{mn}^k \quad (4)$$

$$w_n^k = (1 - \text{sgn}(L_n^k))/2 \quad (5)$$

2.2 最小和译码算法

最小和(MS)译码算法是对BP算法的简化近似处理。BP译码算法中变量节点信息计算较为复杂。特别对于较长的码字, BP算法涉及大量的乘法、对数以及指数运算。MS算法与BP算法的区别在于对式(2)进行了简化处理, 如式(6)所示, 降低了计算复杂度。在节点度相同的条件下, MS算法中变量节点与校验节点的计算复杂度近似相等。

$$P_{mn}^k = \left(\prod_{n' \in C(n) \setminus n} \text{sgn}(S_{n'm}^{k-1}) \right) \min_{n' \in C(n) \setminus n} |S_{n'm}^{k-1}| \quad (6)$$

MS算法采用的简化运算带来了一定程度上的译码性能损失。式(6)计算出的 P_{mn}^k 值的绝对值大于BP算法的计算值。为了保证MS算法计算出的 P_{mn}^k 更接近于BP算法的结果, 一些对MS算法的修正算法相继被提出, 如归一化MS算法^[5]、退火MS算法^[6]、自适应修正的MS算法^[7]、自纠

正最小和(CSCMC)算法^[8]。

3 抗跳周 LDPC 译码算法

3.1 码字的约束条件

输入译码器的信息序列为 $Y=\{y_1, y_2, \dots, y_N\}$, 假设跳周发生在信息序列的起始位置, 即信息序列的符号全部取反, 跳周后的信息序列为 $Y'=\{-y_1, -y_2, \dots, -y_N\}$ 。由式(1)可知, 发生跳周后, 变量节点的初始似然比信息符号取反。为了保证译码器可以正常工作, 必须保证在变量节点与校验节点之间传递的信息与无跳周情况下相同。根据式(2)、式(6)可知, 若 n' 取值均为偶数, 则所有 $C(n)$ 集合的基数为奇数, 可以保证 P_{mm}^k 的取值在两种情况下相同。 $C(n)(n=1, 2, \dots, N)$ 为变量节点 v_n 连接的校验节点集合, $C(n)$ 集合的基数为奇数, 即要求码字的校验节点度数为奇数。

LDPC 构造方法分为随机构造与确定性构造。两类构造方法均可构造校验节点度数为奇数的码字。PEG 算法^[9]是一种典型的伪随机构造方法。采用 PEG 算法构造码字, 输入信息为变量节点的度分布。通过调节变量节点度分布, 可以得到校验节点度数均为奇数的码字。近几年来, Lin S 教授的团队利用代数方法构造出 LDPC^[10-12]。许多其他性能优异的 LDPC 构造方法^[13-15]也相继出现, 采用参考文献[10]中提出的构造方法, 通过调整 masking 矩阵的结构可以实现校验节点的度数为奇数。由此可见, 抗跳周译码算法对码字校验节点度数的约束条件并不苛刻, 是可以实现的。图 1 为校验节点度数为 7 的非规则 QC-LDPC, 码长 512 bit, 码率为 1/2。

$$\begin{bmatrix} 0 & 14 & -1 & 0 & -1 & 14 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 0 & -1 & 8 & 3 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 7 & -1 & 24 & -1 & 11 & -1 & 29 & 20 & -1 & -1 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 22 & 4 & -1 & 18 & -1 & 3 & 25 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 14 & -1 & -1 & 16 & 21 & 7 & 0 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & -1 \\ 6 & -1 & -1 & 24 & -1 & 31 & 20 & 0 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 12 & -1 & 8 & 21 & 26 & -1 & 4 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 28 & -1 & 20 & -1 & 9 & 26 & 9 & 0 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

图 1 校验节点度数为 7 的 QC-LDPC

3.2 抗跳周译码算法

对码字校验节点度数的约束条件保证了式(2)、式(6)的计算结果不受跳周影响。根据式(3)变量节点传递信息的计算和式(4)似然比信息的计算, 需要对初始的似然比信息进行修正。根据上述思路对迭代译码中的软信息进行修正, 修正后的基于 BP 的抗跳周译码算法(ACS-BP)步骤如下。

(1) 变量节点初始似然比信息计算同式(1), 令 $S_{mm}^0=L_n^0$ 。

(2) 计算第一次迭代译码过程中, 校验节点向变量节点传递的信息 $P_{mm}^1 = 2\alpha \tanh \prod_{n' \in C(n) \setminus n} \tanh(S_{n'm}^0/2)$ 。

(3) 根据初始 LLR 值计算 $T_{n,1}^1$, 如式(7)所示。将初始 LLR 值符号取反计算 $T_{n,2}^1$, 如式(8)所示。比较 $T_{n,1}^1$ 与 $T_{n,2}^1$ 绝对值的大小, 若 $|T_{n,1}^1| < |T_{n,2}^1|$, 则初始 LLR 值取反, $L_n^0 = -L_n^0$; 反之则保持 L_n^0 的取值。

$$T_{n,1}^1 = L_n^0 + \sum_{m \in V(m)} P_{mm}^k \quad (7)$$

$$T_{n,2}^1 = -L_n^0 + \sum_{m \in V(m)} P_{mm}^k \quad (8)$$

(4) 采用修正后的 L_n^0 根据式(3)计算 S_{mm}^k , 根据式(4)计算 $L_n^k, k \geq 1$ 。迭代过程同 BP 算法。

(5) 迭代终止判断准确同 BP 算法。

由以上过程可知, ACS-BP 算法等价于在传统 BP 算法的基础上增添预处理部分。通过附加一次迭代的软信息计算, 实现对初始 LLR 值的修正, 以消除序列跳周对译码性能的影响。采用同样的方法对 MS 算法进行预处理, 可以得到 ACS-MS 算法。ACS-MS 算法与 ACS-BP 算法的差别仅在于第(2)步 P_{mm}^1 的计算方式不同。由此可见, 对译码算法的修正方法具有很好的独立性, 可以在不改变原算法的基础上仅通过附加较低的运算复杂度实现抗跳周功能。同样的方法可以应用于各种基于 BP 算法或 MS 算法的修正译码算法, 产生相应的抗跳周译码算法。

4 仿真结果

实验设计需要验证两个问题: 一是抗跳周译码算法在无跳周发生时可以无损译码, 即与传统译码算法性能相同; 二是抗跳周译码算法在跳周发生时可以正常译码, 译码性能近似甚至等于无跳周的结果。如抗跳周译码算法在两种情况下译码性能相同, 说明改进算法可以完全克服跳周对译码器产生的影响。仿真码字采用如图 1 所示的 QC-LDPC, 码长为 512 bit, 码率为 1/2, 分别对不同译码算法进行码字的仿真, 译码算法预设最大迭代次数 100 次。仿真结果如图 2 和图 3 所示。

如图 2 所示, 在不发生跳周时, ACS-MS 算法与 MS 算法性能相同, 说明 ACS-MS 对 L_n^0 的修正并没有带来译码性能的损失。图 3 展示了跳周发生条件下的仿真结果。传统的 MS 算法在跳周发生时完全失效, ACS-BP 算法与 ACS-MS 算法可以正常译码。由于传统 BP 算法性能优于 MS 算法,

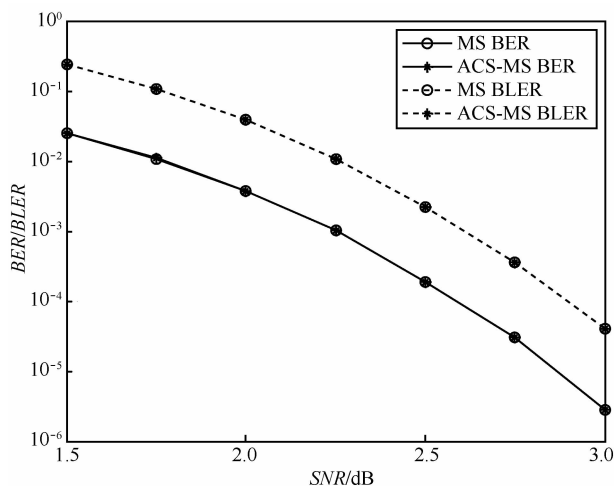


图2 无跳周时 MS 算法与 ACS-MS 算法译码性能

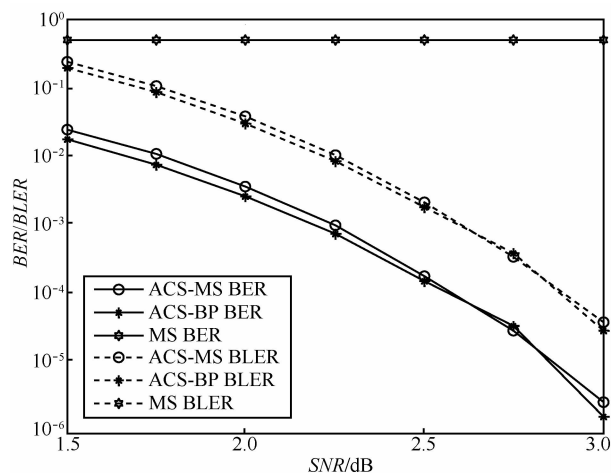


图3 发生跳周 3 种译码算法性能

修正后的 ACS-BP 算法依然保持其译码性能优势,进一步说明对译码算法的修正并没有破坏译码算法本身的性能。由图 2、图 3 可知,无论跳周是否发生,ACS-MS 算法在两种情况下均可保证误码率在信噪比为 2.8 dB 时达到 1×10^{-5} 以下,说明 ACS-MS 算法可以彻底解决接收序列跳周的问题。

5 结束语

对于可能发生跳周问题的 PSK 系统,本文提出 ACS-BP、ACS-MS 算法可以实现对校验节点度数为奇数的码字无损译码。修正的译码算法本质上是预处理方法与传统译码算法的结合。预处理方法仅通过一次迭代运算即可完成对初始似然比的修正,附加计算复杂度低。预处理方法不会影响传统译码的性能,可以与多种修正的 BP 算法、MS 算法结合,产生相应的抗跳周迭代译码算法。

抗跳周译码算法与校验节点奇数度的码字设计相结合,为系统解决跳周问题提供了参考方案,然而却不能解决某些已有的系统问题。如 WiMAX 标准 IEEE 802.16e 提供多种 QC-LDPC 码字,其校验节点度数并非全部为奇数,此时 ACS-BP 算法、ACS-MS 算法无法取得理想的效果。在下一步的研究工作中可以尝试逐渐放宽对码字校验节点度数的约束条件,设计出相应的低复杂度抗跳周译码算法。

参考文献

- 1 贺军,郭伟.一种新的消除 V&V 算法载波相位模糊的方法.电子与信息学报,2006,28(5):836~839
- 2 包建荣,詹亚峰,陆建华.基于 LDPC 译码软信息的迭代载波恢复.电子与信息学报,2009,31(10):2416~2420
- 3 Soleymani M, Girard H. The effect of the frequency offset on the probability of miss in a packet modem using CFAR detection method. IEEE Transactions on Communications, 1992, 40 (7): 1205~1211
- 4 Bennett W R, Davy J R. Data Transmissions. New York: McGraw-Hill, 1965
- 5 Chen J, Dholakia A, Eleftheriou E. Reduced-complexity decoding of LDPC codes. IEEE Transactions on Communication, 2005, 53 (8):1288~1299
- 6 Chen J, Fossorier M P C. Near-optimum universal belief propagation based decoding of low density parity check codes. IEEE Transactions on Communication, 2002, 50(3):406~414
- 7 姜明.低密度奇偶校验码译码算法及其应用研究.东南大学博士学位论文,2006
- 8 韩少聪,高飞飞,李云洲.一种改进的自纠正最小和 LDPC 码的译码算法.电信科学,2013,29(6):89~93
- 9 王平,朱宏鹏,李广侠.PEG-GLDPC 码设计与性能分析.数据采集与处理,2013,28(5):358~362
- 10 Ma X, Zhang K, Chen H, et al. Low complexity X-EMS algorithms for nonbinary LDPC codes. IEEE Transactions on Communication, 2012,60(1):9~13
- 11 Zhang L, Lin S, Abdel-Ghaffar K, et al. Quasi-cyclic LDPC codes on cyclic subgroups of finite fields. IEEE Transactions on Communication, 2011, 59(9):2330~2336
- 12 Zhang K, Huang X M, Wang Z F. A high-throughput LDPC decoder architecture with rate compatibility. IEEE Transactions on Circuits and Systems,2011,58(4):839~847
- 13 章坚武,颜欢,包建荣.一种基于伪循环 MDS 码的准循环 LDPC 码构造方法.电子与信息学报,2012,34(2):410~415
- 14 王琪,谢求亮,王昭诚.定码长多码率 QC-LDPC 码的构造.清华大学学报,2013,53(3):394~398
- 15 杨民,张文彦,钟杰.准循环多进制 LDPC 码构造.电子与信息学报,2013,35(2):297~302

(下转第 82 页)

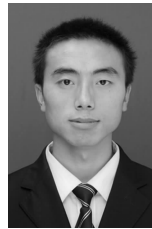


- 8 3GPP Tdoc R2-131055.Alternative Speed Estimation Solutions for Improving MSE. Alcatel-Lucent Shanghai Bell, 2013
- 9 3GPP Tdoc R2-131197. MSE-based Mobility Enhancement. Institute for Infocomm Research (I2R),2013
- 10 3GPP TR 36.932 V12.1.0. Technical Specification Group Radio Access Network; Scenarios and Requirements For Small Cell Enhancements for E-UTRA and E-UTRAN (Release 12), 2013
- 11 3GPP Tdoc R2-131315.Improving HO Performance in HetNet. Samsung,2013
- 12 3GPP Tdoc R2-130957.HO Performance Improvement in Hetnet. ZTE Corporation,2013
- 13 3GPP Tdoc R2-130963.Mobility Performance Improvement of High Speed UE.CATT,2013
- 14 3GPP Tdoc R2-131053.Views on How to Down Select Solutions for Improving Overall HO Performance. Fujitsu,2013
- 15 3GPP Tdoc R2-130961.Evaluation on Adjusting Parameters for the Handover Type. CATT,2013
- 16 3GPP Tdoc R2-131057. Discussion on UE Based Speed Estimation for Improving the Mobility Performance in HetNets. Alcatel-Lucent Shanghai Bell,2013
- 17 3GPP Tdoc R2-130933.RLF Recovery Enhancements. Qualcomm Incorporated,2013
- 18 3GPP Tdoc R2-131396.Fast Handover Using RSRQ/RSRP with SToS/Ping-Pong Avoidance. Intel Corporation,2013
- 19 3GPP Tdoc R2-131002.Mobility Performance Enhancement

Based on UE speed in HetNet.New Postcom,2013

- 20 3GPP Tdoc R2-131371.Improving HO Performance by Multicasting HO Command. Research In Motion UK Limited, 2013

[作者简介]



王东军,男,重庆邮电大学硕士研究生,主要研究方向为 LTE-Advanced 异构小蜂窝网络下的移动性管理研究。

符媛柯,女,重庆邮电大学硕士研究生,主要研究方向为 LTE-Advanced 异构小蜂窝网络下的移动性管理研究。

唐伦,男,博士,重庆邮电大学副教授、硕士生导师,主要研究方向为新一代无线通信、LTE-Advanced 异构小蜂窝网络。

陈前斌,男,博士,重庆邮电大学教授、博士生导师、通信与信息工程学院院长,主要研究方向为个人通信、多媒体信息处理与传输、下一代网络、LTE-Advanced 异构小蜂窝网络等。

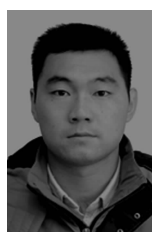
(收稿日期:2013-07-12)

(上接第 66 页)

[作者简介]



吴大中,男,南京信息工程大学副教授,主要研究方向为智能测控技术。



吴海东,男,南京信息工程大学硕士研究生,主要研究方向为信道编码技术。

(收稿时间:2013-09-27)

(上接第 72 页)

- 26 Shen J, Liu S, Zeng L, *et al.* Optimisation of cooperative spectrum sensing in cognitive radio network. IET Communications, 2009, 3(7)
- 27 Wang B, Liu K, Clancy T C. Evolutionary cooperative spectrum sensing game: how to collaborate. IEEE Transactions on Communications, 2010, 58(3)
- 28 Ian F A, Brandon F L, Ravikumar B. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks: a survey. Physical Communication, 2010(4)

[作者简介]



冯景瑜,男,西安邮电大学讲师,中国科学院大学在站博士后,主要研究方向为无线通信安全、认知无线电、协作频谱感知。

(收稿日期:2013-10-30)