

基于电力线通信的 LDPC 码分层译码算法研究

蔡丽萍¹, 马晓伟¹, 李俊红²

(1 中国石油大学 计算机与通信工程学院, 山东 青岛 266580;

2 中国移动通信集团河北有限公司邢台分公司, 河北 邢台 054000)

摘 要: 针对电力线信道多径延迟效应和脉冲噪声影响问题, 建立了基于电力线的 LDPC-OFDM 系统模型. 并基于该模型, 对低密度奇偶校验码(LDPC)的译码算法进行深入研究. 基于最小和置信传播(Belief Propagation, BP)译码算法原理, 改进分层和积译码算法, 提出一种基于修正因子的分层最小和对数似然比译码算法. 仿真结果表明, 该算法译码复杂度低, 迭代收敛速度快, 能够有效降低电力线 LDPC-OFDM 系统的误码率(BER), 提高传输效率.

关键词: 电力线通信; LDPC; 最小和; 分层译码算法

中图分类号: TP31

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2013)05-0125-04

A Study of LDPC Codes Layered Decoding Algorithm on Power Line Communications

CAI Li-ping¹, MA Xiao-wei¹, LI Jun-hong²

(1 College of Computer and Communication Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2 China Mobile Group's Hebei Co., Ltd. Xingtai Branch, Xingtai 054000, China)

Abstract: For Power Line Communication channels multipath delay effects and impulse noise, the system of LDPC-OFDM based on low-voltage power line is built. The Low Density Parity Check Codes decoding algorithm is studied based on the system. According to the min-sum BP algorithm, a coefficient is designed to modify layered sum-product algorithm, so the layered min-sum BP algorithm based coefficient is proposed. The algorithm is convenient to implement for its low decoding complexity and fast speed of iterative. The simulation shows that the algorithm not only achieve a better error performance under the system of LDPC-OFDM, but also improve the transmission efficiency.

Key words: power line communication; LDPC; min-sum; layered decoding algorithm

1 引言

低压电力线是用电设备输送电能, 而非用来传送数据, 其信道特性十分复杂, 既存在多种噪声, 又存在多径衰落, 对信号产生干扰. 为保证数据的可靠通信, 信道编码是重要组成部分.

常用的信道编码技术有卷积码、Turbo 码和低密度奇偶校验码(LDPC)等. LDPC 码是一种基于二部图和迭代译码的信道编码方案^[1], 具有很强的纠错抗干扰能力和较低的差错平底特性^[2]. OFDM

可以较好地解决多径衰落现象, 且频谱利用率高、纠错能力强. 由于 LDPC 码与 OFDM 优良的性能, 使它们非常适合应用在低压电力线通信中, 被认定是最适合应用在恶劣的低压电力线信道环境中的编码调制方案^[3-4].

LDPC 码译码算法中分层译码算法^[5](Layered Decoding Algorithm)虽然具有较高的译码迭代收敛速度, 但其译码过程复杂, 实现难度较大. 文中针对电力线存在的脉冲噪声, 建立基于电力线的 LDPC-OFDM 系统模型, 根据最小和译码算法原理,

加入修正因子,改进分层译码算法.系统仿真表明改进的算法能有效抑制脉冲噪声的影响,提高译码性能,降低译码复杂度和误码率.

2 LDPC-OFDM 系统建模

2.1 A 类加性高斯噪声模型

Middleton A 类噪声模型可以用于表征电力线信道中脉冲噪声^[6],建模为高斯噪声和脉冲噪声的和,可以通过调整脉冲系数模拟噪声特性,非常接近实验值.根据 A 类噪声模型,噪声幅度 z 的概率密度函数为:

$$P_A(z) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{e^{-A} A^m}{m!} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_m} \cdot \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma_m^2}\right) \quad (1)$$

式中, A 为脉冲系数, $\Gamma = \sigma_G^2 / \sigma_I^2$ 是高斯噪声与脉冲噪声的功率比, $\sigma^2 = \sigma_G^2 + \sigma_I^2$ 是总的噪声功率,

$\sigma_m^2 = \sigma^2 \cdot \left(\frac{m}{A}\right) + \frac{1}{\Gamma} + \Gamma$, 其中 σ_G^2 是服从高斯分布的

背景噪声的功率, σ_I^2 是服从泊松分布 $\frac{e^{-A} A^m}{m!}$ 的窄带脉冲噪声的功率.脉冲系数 A 值越大,脉冲噪声出现的频度越高, A 类噪声越接近高斯噪声,反之 A 值越小, A 类噪声越接近脉冲噪声.

2.2 系统建模

低压电力线 LDPC-OFDM 系统结构如图 1 所示.信源产生数据后,经过 LDPC 编码, QPSK 调制后,经由 OFDM 发射进入低压电力线信道,经 OFDM 接受信息之后,进行 QPSK 解调、LDPC 译码,然后进行误比特率计算.其中 OFDM 系统包括同步计算和降低峰均比等功能.卷积码 OFDM 系统与图 1 大体相同,只是对信息进行卷积编码和 Viterbi 译码, LDPC 码与卷积码的性能比较会在仿真结果中给出.

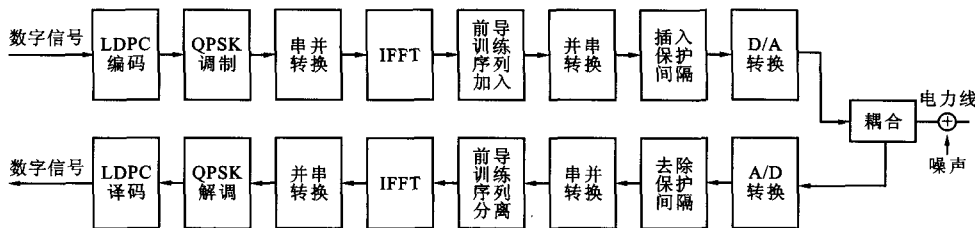


图 1 LDPC-OFDM 系统框图

3 基于修正因子的分层最小和译码算法

3.1 算法的基本思想

分层译码算法的思想是将 LDPC 码的校验矩阵按水平方向分层,每一层可看作独立译码,各层的交集构成完整的码.每层更新后,立刻更新该层每个非零元素对应列所有非零元素对应的变量节点信息,然后再对校验矩阵的下一层进行译码,这样下一层可以直接利用上一层的更新结果,译码收敛速度快,可以节省一半的平均迭代次数.

改进的分层最小和译码算法的基本思想首先是根据电力线通信与无线通信的不同,改进对数似然比信息,由于电力线脉冲噪声与高斯白噪声存在很大差异,若仍采用传统的 BP 算法,可能会导致误码率性能下降,因此针对电力线信道,需要对对数似然比 LLR 进行修正^[7];其次根据最小和译码算法原理,简化运算量,降低分层译码算法复杂度,便于实现;由于利用最小和近似算法,译码性能会降低,因此最后引入修正因子,对算法译码过程进行修正,在

译码性能上弥补最小和带来的不足.

3.2 最小和译码算法原理

和积译码算法的整个译码过程可以看作在 Tanner 的二部图上的置信传播(BP)算法的应用,对于每个变量节点,信道初始化对数似然比信息 LLR 为:

$$L(c_i) = \log \frac{\Pr(c_i = 0 | y_i)}{\Pr(c_i = 1 | y_i)} = 2y_i / \sigma^2 \quad (2)$$

记校验节点 j 传向变量节点 i 的信息为:

$$L(r_{ji}) = \left(\prod_{i' \in S_{\Lambda_i}} \text{sign}(L(q_{ij})) \right) \cdot \varphi \left(\sum_{i' \in S_{\Lambda_i}} \varphi(|L(q_{ij})|) \right) \quad (3)$$

其中 $L(q_{ij})$ 是变量节点传向校验节点的信息,根据 $\varphi(x)$ 的特性做如下变换:

$$\begin{aligned} \varphi \left(\sum_{i' \in S_{\Lambda_i}} \varphi(|L(q_{ij})|) \right) &= \\ \varphi \left(\varphi \left(\min_{i' \in S_{\Lambda_i}} (|L(q_{ij})|) \right) \right) &= \min_{i' \in S_{\Lambda_i}} (|L(q_{ij})|) \end{aligned} \quad (4)$$

最后进行迭代更新并尝试译码:

$$L(e_i) = L(c_i) + \prod_{j \in S_i} L(r_{ji}) \quad (5)$$

若 $L(e_i) > 0$, 则 $\hat{c}_i = 1$, 否则 $\hat{c}_i = 0$. 停止条件: 若 $H^T \hat{C} = 0$ 或迭代次数达到最大迭代次数, 则结束, 否则迭代次数加 1, 继续译码.

3.3 算法的实现

记电力线信道中译码算法初始化似然比信息为 $L(c_i)$, 针对电力线信道对第 3.2 中的似然比 LLR 进行如下修正:

$$\begin{aligned} L(c_i) &= \log \frac{\Pr(c_i = 0 | y_i)}{\Pr(c_i = 1 | y_i)} \\ &= \log \sum_{m=0}^{\infty} \frac{A^m}{m!} \frac{1}{\sigma_m} \cdot \exp\left(\frac{-(y_i - 1)^2}{2\sigma_m^2}\right) - \\ &\quad \log \sum_{m=0}^{\infty} \frac{A^m}{m!} \frac{1}{\sigma_m} \cdot \exp\left(\frac{-(y_i + 1)^2}{2\sigma_m^2}\right) \end{aligned} \quad (6)$$

实际应用中, 通常选择合适的 L , 对 $m = 0, 1, \dots, L$ 求有限项和, 一般取 $L = \max\{2, \lceil 10A \rceil\}$. 可以看出, 接收信号小于 1 时, LLR 与接收信号成正比; 若接收信号大于 1, 由于脉冲噪声的出现, LLR 值降低, 符合电力线信道特性.

加入修正因子, 直观上根据第 3.2 部分, 修正因子 α 可以通过计算 $|L(r_{ij})|$, $|L'(r_{ij})|$ 的均值来求得, 即:

$$\alpha = \frac{E|L'(r_{ij})|}{E|L(r_{ij})|} \quad (7)$$

根据文献[8]中通过计算和仿真认为, 列重为 3, 行重为 6 的规则 LDPC 码的尺度因子 α 一般取为 1.25.

在第 n 次迭代中, 记变量节点 i 传递给第 l 层校验节点 j 的信息为 $L(q_{ji}^{(n)})$, 校验节点传向变量节点的信息为 $L(r_{ji}^{(n)})$, 变量节点后验概率为 $L(Q_i^{(n)})$, 改进的分层算法译码描述如下:

(1) 首先初始化对数似然比信息为:

$$L(Q_i^{(0)}) = L(c_i) \quad (8)$$

(2) 对校验矩阵进行逐层译码, 每一层中变量节点 i 传向校验节点 j 的信息为:

$$L(q_{ji}^{(n)}) = L(Q_i^{(n)}) - L(r_{ji}^{(n-1)}) \quad (9)$$

(3) 根据最小和算法原理, 校验节点 j 传向变量节点 i 的信息为:

$$L'(r_{ji}^{(n)}) = \left(\prod_{i' \in S_{ji}} \text{sign}(L(q_{ji'}^{(n)})) \right) \cdot \min_{i' \in S_{ji}} (|L(q_{ji'}^{(n)})|) \quad (10)$$

加入修正因子, 变为:

$$L(r_{ji}^{(n)}) = \frac{1}{\alpha} \cdot L'(r_{ji}^{(n)}) \quad (11)$$

(4) 更新变量节点的后验概率信息为:

$$L(Q_i^{(n)}) = L(r_{ji}^{(n)}) + L(q_{ji}^{(n)}) \quad (12)$$

4 性能仿真及分析

首先对卷积码和 LDPC 码的性能进行了仿真比较, 码率均为 1/2, 其中卷积码采用 Viterbi 译码算法, LDPC 码采用对数域 BP 译码算法. SNR 为信噪比, 在仿真参数相同的情况下, 仿真性能误码率 BER 曲线如图 2 所示. 仿真结果表明, 卷积码误码率下降速度缓慢, 在信噪比较高的情况下仍然具有较大的误码率, 差错平底特性较为严重, 对于恶劣的电力线信道环境并不适应. LDPC 码性能优于卷积码, 在信噪比较高的情况下, 误码率明显降低, 且 LDPC 码具有较低的差错平底特性.

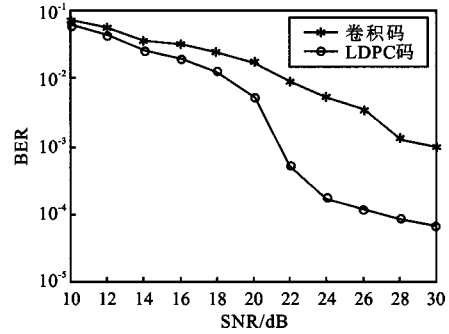


图2 LDPC 码与卷积码 BER 曲线

随后对对数域 BP 算法、最小和算法以及改进的分层译码算法进行了仿真, 采用码率为 1/2 的规则 LDPC 码, 其列重为 3, 编码码字长 1000, 采用 QPSK 调制, OFDM 子载波数为 256, FFT 长 256. 仿真的 BER 性能曲线如图 3 所示. 仿真结果表明, 在低压电力线环境中, 最小和算法性能略差于对数域 BP 算法, 约有 1dB~2dB 的损失, 但这两种算法误码率下降比较慢, 不能很好地适应电力线信道环境; 相比于以上 2 种算法, 针对电力线改进的分层最小和译码算法, 不仅复杂度降低很多, 而且译码性能在信噪比较高的情况下有所提高, 误码率降低更快, 差错平地特性更低, 译码性能更优.

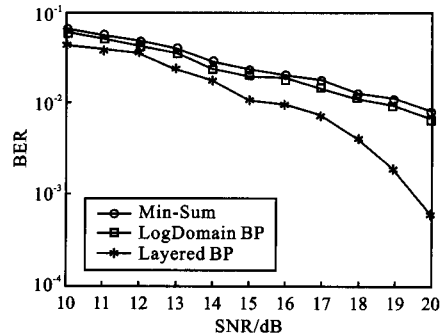


图3 LDPC-OFDM 系统 BER 曲线

表 1 为 BP 算法、最小和算法和改进的分层最小和译码算法每一次迭代的运算复杂度,对于码率为 1/2 的(N,k,2k)规则 LDPC 码,由表可以看出改进的分层最小和译码算法相对于 BP 算法虽然加法

运算增加,但乘法运算降低约一个数量级,复杂度明显降低;相对于最小和算法,虽然复杂度稍微有所提高,但其性能却提高很多,译码过程中迭代收敛速度也提高了。

表 1 算法复杂度与迭代次数

译码算法	加法运算	乘法运算	迭代次数
LLR BP 算法	$Nk(5k+1)+N$	$Nk(4k-1)$	20
最小和算法	$Nk(k+2)+N/2(\text{Log}_2 2k)$	——	20
改进的分层算法	$Nk(k+2L+2)+N/2(\text{Log}_2 2k)$	$5Nk+2L$	10

5 结束语

本文建立了一种基于电力线的 LDPC-OFDM 系统,将电力线噪声建模为 Middleton A 类噪声模型,分析和积算法、最小和算法和分层译码算法,提出了一种基于修正因子的分层最小和译码算法,并对以上算法进行仿真。仿真结果表明,改进的分层最小和译码算法复杂度明显降低,收敛速度加快,消除了更多的脉冲噪声,大大改善了系统的 BER 性能,译码性能显著提高。由此可见 LDPC-OFDM 技术在低压电力线环境中能实现较好的数据传输。

参考文献:

[1] Gallager R G. Low density parity-check codes[M]. Cambridge: MIT Press,1963.

[2] Nikoleta Andreadou, Costas Assimakopoulos. Performance evaluation of LDPC codes on PLC channel compared to other coding schemes[C]//IEEE International Symposium on Power Line Communication and Its Applications. Pisa:IEEE,2007:296-301.

[3] Christine Hsu, Neng Wang, Wai-Yip Chan. Improving homeplug power line communications with LDPC coded OFDM[C]//IEEE Telecommunications Energy Conference. Providence:IEEE, 2006:1-7.

[4] Stefano Galli, Anna Scaglione, Zhifang Wang. For the

grid and through the grid; the role of power line communications in the smart grid[J]. Proceedings of the IEEE,2011,99(6):998-1027.

[5] 郭琨,黑勇,周玉梅,等. 一种应用于不可分层 LDPC 码的并行分层译码算法[J]. 电子与信息学报,2010,32(8):1956-1960.

[6] Wen-miao Song, Lei Huang, Cheng-qun Yin. Modified decoding for low density parity check codes over power line channels[C]// 4th Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Dalian:IEEE, 2008:1-4.

[7] 送文妙,张建昕. 基于电力线信道的改进 LDPC 码译码算法研究[J]. 微电子学与计算机,2009,20(6):171-173.

[8] Jinghu Chen, Marc P C Fossorier. Near optimum universal belief propagation based decoding of low-density parity check codes[J]. IEEE Trans on Communications,2002,50(3):406-414.

作者简介:

蔡丽萍 女,(1969—),高级工程师,硕士生导师。研究方向为无线通信系统与技术、电力载波通信。

马晓伟 男,(1987—),硕士研究生。研究方向为无线通信系统与技术、电力载波通信、电力载波通信。

李俊红 女,(1981—),通信工程师。研究方向为移动通信核心网。