

联合 LDPC 解码的宽带电力线信道 噪声抑制迭代方法

陈 喆 袁 康 殷福亮

(大连理工大学信息与通信工程学院, 大连, 116024)

摘 要: 宽带低压电力线信道的噪声干扰很强, 严重影响通信系统性能。本文提出一种联合 LDPC 解码的宽带电力线信道噪声抑制迭代方法。该方法利用 LDPC 解码与迭代噪声抑制相互促进的特点, 在传统迭代噪声抑制算法基础上, 通过增加 LDPC 解码器来对接收端均衡后的信号进行解码, 以抑制信号中的干扰噪声, 提高迭代过程中噪声估计的准确性, 改善噪声抑制性能。本文方法的迭代收敛较快, 噪声抑制性能好。仿真实验验证了本文方法的有效性。

关键词: 电力线信道; 低密度奇偶校验; 迭代噪声抑制; 收敛

中图分类号: TM73; TN915.853 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2013)11-1504-07

Iterative Noise Suppression Method United with LDPC Decoding in Broadband Power Line Channel

CHEN Zhe YUAN Kang YIN Fu-liang

(School of Information and communication Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, 116024)

Abstract: In a broadband low voltage power line channel, the interference from channel noise is heavy and results in a poor communication performance. An iterative method integrating with the LDPC decoding is proposed to suppress the noise in broadband power line channel. When an LDPC decoding and an iterative noise suppression are combined, they can benefit each other, and further promote the communication performance. The LDPC decoder is introduced into the traditional iterative noise suppression algorithm to decode the equalized signal at a receiver, which can suppress the interfering noise effectively, increase the estimation accuracy for noise in the iterative process and then improve the noise suppression performance. The proposed method has a good performance for noise suppression and a fast convergence speed. The simulation experiments reveal the effectiveness of the proposed method.

Key words: power line channel; LDPC; iterative noise suppression; convergence

1 引言

电力线网络具有成本低、覆盖范围广等优点, 使其成为家庭宽带网络接入最具潜力的方案之一。但电力线通信信道噪声较强, 严重影响其通信质量。因此, 如何有效地抑制电力线信道的噪声干扰, 这是电力线通信要解决的关键问题之一。

近年来, 有关电力线信道噪声抑制方法的研究已经取得一定进展, 提出了一些信道噪声抑制方法, 包括限幅置零消噪方法^[1-3]、迭代消噪方法^[4]以及各种改进方法^[5-7]。2009 年, 文献[5]提出在每两个码元间插零来估计每个码元中的噪声能量, 用接收信号向量减去该噪声向量来实现去噪, 并进行多次迭代, 该方法以牺牲带宽为代价, 降低了传输速

收稿日期: 2013-05-17; 修回日期: 2013-08-03

基金项目: 国家自然科学基金资助课题(61172110, 61172107); 高等学校博士学科点专项科研基金资助课题(200801410015); 大连市优秀青年科技人才基金项目(2008J23JH025); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(DUT13LAB06)

率。2010 年,文献[6]提出了故障译码(syndrome decoding)方法,该方法利用奇偶校验矩阵计算症状向量,进而估计噪声值,并多次迭代实现去噪,但该方法涉及到矩阵伪逆计算,计算复杂度较高。2012 年,文献[7]提出首先估计脉冲噪声的位置、幅值和相位,然后将其从时域接收信号中减除,并进行多次迭代来消除脉冲噪声,该方法需要分别估计噪声的幅值、相位和位置,因此其计算量大。

上述方法是对传统噪声抑制迭代方法的改进,传统迭代方法基于最大似然检测,对噪声估计不准确。为此,本文提出了一种联合 LDPC 解码的电力线信道噪声抑制迭代方法。首先,在迭代中通过增加 LDPC 解码模块,来对每次迭代中均衡后的信号进行 LDPC 解码,以削弱信号中的噪声。然后,通过 OFDM 调制变换到时域来估计噪声。最后,从接收信号中减除估计的噪声。随着迭代次数增加,噪声逐渐被消除,LDPC 解码性能逐渐提升,有助于进一步消除噪声。LDPC 解码与去噪有机的结合在了一起,二者相辅相成,使算法对噪声的估计更加准确,从而提高迭代噪声抑制算法性能。

2 LDPC 解码算法

LDPC 编码是一种线性分组编码,它具有编码简单、译码复杂度低的特点。本文使用国际电信联盟(ITU)2010 年颁布的 G. 9960 协议^[8]中的奇偶校验矩阵通过矩阵相乘进行编码,校验矩阵维数是 960×1920 ,编码后码长为 1920,码率为 $1/2$ 。本文采用对数域置信传播算法(Belief Propagation Algorithm, BPA)^[9]进行解码,该算法是作用在 Tanner 图上的迭代解码算法,其具体步骤如下:

(1) 初始化。计算信道传给变量节点的初始对数似然比消息(软消息) llr_n ,即接收码元 y_n 与 $(1, 0)$ 和 $(-1, 0)$ 欧氏距离之比取对数, $n = 1, 2, \dots, N$ 。(BPSK 调制, -1 表示'0', 1 表示'1')

$$msg_v_n c_m^0 = llr_n = \ln(P_n(0)/P_n(1)) \quad (1)$$

(2) 迭代处理

a) 校验节点消息处理:

$$msg_c_m v_n^{iter1} = 2 \tanh^{-1} \left(\prod_{j \in N(m) \setminus n} \tanh \left(\frac{1}{2} msg_v_j c_m^{iter1-1} \right) \right) \quad (2)$$

b) 变量节点消息处理:

$$msg_v_n c_m^{iter1} = llr_n + \sum_{i \in M(n) \setminus m} msg_c_i v_n^{iter1} \quad (3)$$

c) 解码判决:根据式(4),若 $msg_v_n^{iter1} \geq 0$,则 $z_n^{iter1} = 0$;否则, $z_n^{iter1} = 1$ 。

$$msg_v_n^{iter1} = llr_n + \sum_{m \in M(n)} msg_c_m v_n^{iter1} \quad (4)$$

(3) 若 $z_n^{iter1} H^T = 0$ 或者迭代次数达到给定值,迭代结束,否则,返回步骤(2)继续迭代。

3 传统的电力线信道噪声迭代消除算法

传统的电力线信道噪声迭代消除算法如图 1 所示。

该算法建立在迭代噪声消除算法^[4]和 LDPC 解码的基础上,考虑了信道的影响,每次迭代开始要做信道均衡,迭代过程中要用到估计的信道冲击响应 h' 。一方面,若接收信号中噪声很强,迭代算法仅依据欧氏距离检测信号,可能发生误判,使算法性能下降;另一方面,随解码迭代次数增加,误码率逐渐下降,最后保持稳定,导致 LDPC 解码性能尚未充分发挥。所以,该算法最终的误码率性能并不能令人满意。

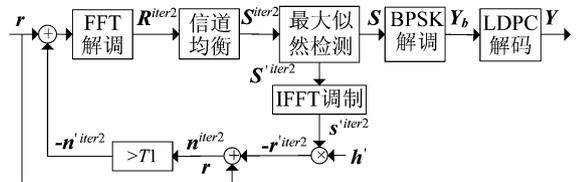


图 1 传统的电力线信道噪声迭代消除算法框图

Fig. 1 Block diagram of traditional noise iterative mitigation algorithm for PLC channel

4 改进的电力线信道噪声迭代消除算法

考虑到传统的迭代消噪算法仅依据欧式距离检测信号,对噪声估计不准确,尽管含有 LDPC 解码模块,但迭代消噪模块和 LDPC 解码模块是分离的,当 LDPC 解码能力达到极限时,该算法的误码率性能能达到极限。在改进的电力线信道噪声迭代消除算法中,将 LDPC 解码放在迭代中,用于对信道均衡后的信号解码,进一步消除信号中的噪声,提高迭代过程中算法对噪声估计的准确性,其原理如图 2 所示。在本文方案中,主要包括迭代消噪模块,LDPC 解码模块等。

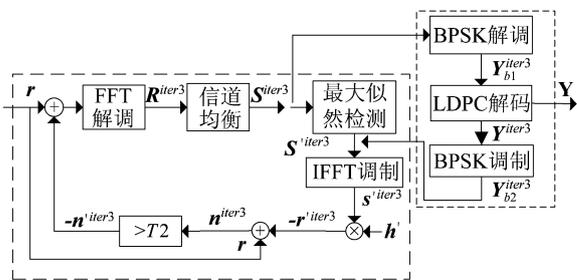


图2 本文方法的实现框图

Fig. 2 Block diagram of the proposed method

下面对其各个模块进行说明。

(1) 迭代消噪模块

迭代消噪模块如图2大虚线框所示。利用LDPC解码对均衡后的信号解码,消除部分噪声,再变换到时域,通过与时域接收信号 r 相减,来估计噪声值,再从 r 中减去估计的噪声值,实现噪声抑制。通过多次迭代,对噪声的估计逐渐准确,噪声消除效果逐渐变好。

(2) LDPC解码模块

LDPC解码模块如图2小虚线框所示。利用BPA算法通过迭代进行解码。由于LDPC编码后的序列前半部分是信息位,后半部分是校验位,LDPC解码后的序列前半部分是信息位,后半部分是校验位,因此,在迭代中,LDPC解码后无需再次编码。

此外,还有最大似然检测模块,信道均衡模块。最大似然检测模块依据码元距星座图上的点 $(-1, 0)$ 、 $(1, 0)$ 的欧氏距离,将其判决为相应的点对应的值。信道均衡模块采用迫零准则进行均衡。

很明显,改进的迭代算法与传统迭代算法区别在于:改进迭代算法从第二次迭代开始,便用LDPC解码取代最大似然检测。第一次迭代时,噪声干扰很强,LDPC解码性能很差,从第二次迭代开始,脉冲噪声逐渐变弱,LDPC解码性能逐渐提高,因此从第二次开始用LDPC解码取代最大似然检测,可减小计算量,也有助于提升算法性能。此外,LDPC解码迭代次数小于最大解码迭代次数,表明解码输出码字与校验矩阵相乘为0,即经过迭代噪声消除和LDPC解码的共同作用,已经从 r 中恢复出了原信号,所以迭代结束。

LDPC解码包含最大似然检测,经过迭代解

码,它对噪声消除效果比单纯的最大似然检测的效果好。这样通过 $r - r^{iter3}$ 估计噪声 n 时, n^{iter3} 会更接近实际噪声 n ,再从接收信号 r 中减去估计的噪声 n^{iter3} ,得到的信号更接近原始的未受噪声干扰的信号;此外,随着迭代次数增加,脉冲噪声得到削弱,噪声高斯性逐渐增强,LDPC解码性能提高。因此,在迭代中,LDPC解码与消噪相互促进,最终,经过多次迭代得到令人满意的消噪效果。

下面将本文方法的实现步骤总结如下:

(1) 第一次迭代时,按照传统算法的消噪过程进行,对信道均衡后的信号做最大似然检测,估计噪声,从接收信号中减去估计的噪声;

(2) 从第二次迭代开始,对接收信号 r 进行FFT解调,变换到频域,得到 R^{iter3} ($iter3$ 指迭代次数),做信道均衡得到 S^{iter3} ,对 S^{iter3} 做LDPC解码,即用图2小虚线框中的LDPC解码代替最大似然检测;

(3) 对 Y^{iter3}_{b2} 做IFFT调制,变换到时域,得到 s'^{iter3} ,将 s'^{iter3} 与估计的信道时域冲激响应 h' 卷积得到 r^{iter3} , r 减去 r^{iter3} ,得到通过LDPC解码估计出的噪声 n^{iter3} ;

(4) 设定阈值 $T2$,若噪声 n^{iter3} 的幅值大于阈值 $T2$,则认为是脉冲噪声,保持不变;小于阈值 $T2$ 则不认为是噪声将其置零,得到 n^{iter3} 。用接收信号 r 减去 n^{iter3} ,作为下一次迭代的初始值;

(5) 重复步骤(2)~(4),进行下一次迭代,当迭代次数达到设定值或者LDPC解码迭代次数小于最大解码迭代次数时,结束迭代,输出 Y 。

5 仿真实验与结果讨论

为了验证本文方法的有效性,我们进行了计算机仿真实验。

本文利用Bernoulli-Gaussian(BG)模型^[10]对电力线信道噪声建模;利用Zimmermann和Dostert提出的MK模型^[11],模拟了100M带宽四径电力线信道;采用LDPC码编码。本文实验在基于正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术的电力线通信系统上进行,系统框图如

图 3 示。仿真了限幅、置零、限幅置零、传统的迭代消噪、改进的迭代消噪算法。

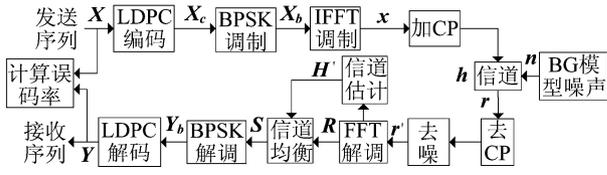


图 3 电力线通信仿真系统

Fig. 3 Power line communication simulation system

5.1 噪声与信道模型

BG 模型将电力线信道噪声看作背景噪声和脉冲噪声的混合噪声。背景噪声可简化为高斯白噪声,将其记为 w_k ,其均值为 0,方差为 σ_c^2 。脉冲噪声是呈伯努利分布的高斯白噪声,将其记为 i_k ,伯努利分布概率为 φ ,高斯白噪声均值为 0,方差为 σ_i^2 。用 μ 表示两个高斯白噪声方差的比值,即: $\mu = \sigma_i^2 / \sigma_c^2$ 。

电力线信道噪声可表示为 n_k :

$$n_k = w_k + i_k \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

MK 模型的信道频域响应为:

$$H(f) = \sum_{k=1}^L g_k e^{-(\alpha_0 + \alpha_1 \cdot f^s) \cdot l_k} e^{-j2\pi f \tau_k} \quad (6)$$

其中, L 表示路径数; g_k 代表路径 k 上与反射和传输系数相关的权重因子; α_0, α_1 表示衰减参数; s 表示衰减因子的指数; l_k 表示路径 k 的长度; τ_k 表示路径 k 上的传输时延,即 $\tau_k = d_i / \nu_p$ 。

本文先发送块状导频,为提高信道估计的准确性,对接收的导频信号进行置零及迭代消噪处理,最后利用最小二乘 (Least-Square, LS) 准则^[12] 估计信道。

5.2 仿真实验及分析

在以下实验中, BG 模型噪声参数 $\mu = 500, \varphi = 0.1$ 。影响两种迭代噪声消除算法最终误码率性能的因素有两个:消噪迭代次数和解码迭代次数。实验时将传统迭代算法解码迭代次数固定,增加消噪迭代次数,找到传统算法误码率性能趋于稳定时的消噪迭代次数,在此基础上,增加解码迭代次数,找到传统算法最佳误码率性能。本文使用的算法按照相同思路进行。

(1) 限幅、置零、限幅置零算法

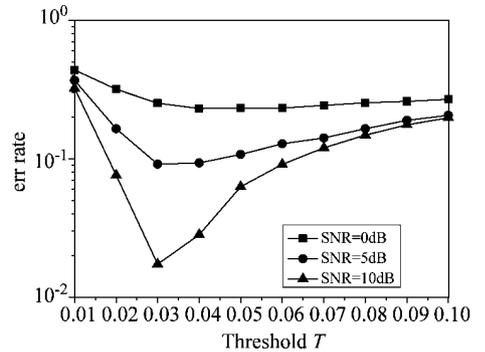


图 4 误码率随阈值 T 变化曲线

Fig. 4 Err rate variation curve with threshold T

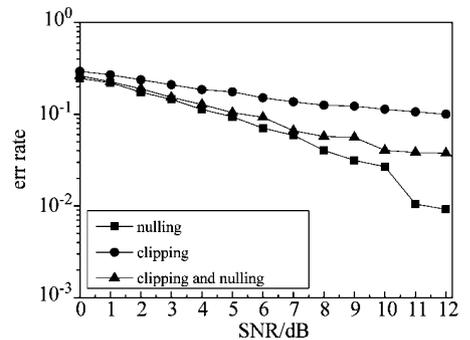


图 5 限幅、置零、限幅置零算法误码率曲线

Fig. 5 Err rate curve of nulling, clipping, clipping and nulling

限幅、置零、限幅和置零的仿真结果如图 4 和图 5 所示。由图 4 可以看出,当信噪比为 0dB, 阈值 T 在 0.04 附近时,误码率最低,信噪比为 5dB、10dB 时, T 在 0.03 附近时误码率最低。因此,图 5 实验是在 T 为 0.03 时仿真的。由图 5 可知,在同等条件下,置零算法在三种算法中误码率最低。脉冲噪声较强,置零算法对噪声的抑制效果比限幅算法的好,而限幅置零算法介于两者之间,实验验证了相同条件下,置零算法在三种算法中误码率较低。

(2) LDPC 解码迭代次数为 10, 消噪迭代次数为 1~6, 传统迭代算法

图 6 可见, LDPC 解码迭代次数和信噪比相同时,随消噪迭代次数增加,传统迭代算法误码率呈下降趋势。图 7 表明,消噪迭代次数为 5、6 时,两条误码率曲线基本上重合,表明消噪迭代次数大于 5 时,传统迭代算法性能趋于稳定。通过不断迭代,算法对噪声的估计逐渐准确,误码率逐渐下降,但是该算法对噪声估计能力有限,误码率性能会最终达到稳定。

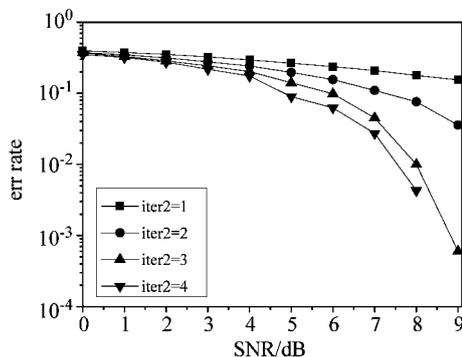


图 6 iter2 为 1~4 时的误码率曲线

Fig. 6 BER curve when iter2 = 1-4

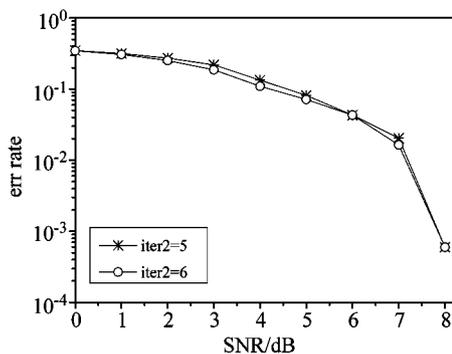


图 7 iter2 为 5 或 6 时的误码率曲线

Fig. 7 BER curve when iter2 = 5-6

分别考虑了影响传统迭代算法最佳性能的两个因素,解码迭代次数和消噪迭代次数,并找到了传统迭代算法的最佳误码率性能,此时增加解码迭代次数或者消噪迭代次数,其误码率性能基本保持不变。

(4) LDPC 迭代次数为 10,消噪迭代次数为 2、3、4、5,改进算法仿真

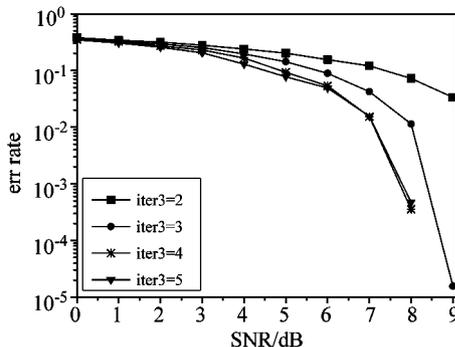


图 9 迭代次数为 2~5,改进算法 BER 曲线

Fig. 9 error rate curve of the proposed method with iteration number 2~5

(3) 消噪迭代次数为 5,LDPC 解码迭代次数为 10、12、15、20,传统迭代算法

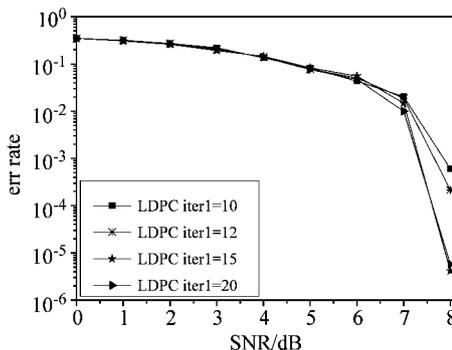


图 8 iter2 = 5, LDPC 解码迭代次数为 10、12、15、20 误码率曲线

Fig. 8 BER curve when iter2 = 5 and the iteration of LDPC decoding is 10, 12, 15, 20

由实验(2)知,LDPC 解码迭代次数固定为 10,消噪迭代次数为 5 时,迭代算法性能稳定,此时,增加 LDPC 解码迭代次数,由图 8 可以看出,当 LDPC 解码迭代次数为 20 时,传统迭代算法性能提升空间很小了,达到最佳性能。实验 2、3 通过控制变量法

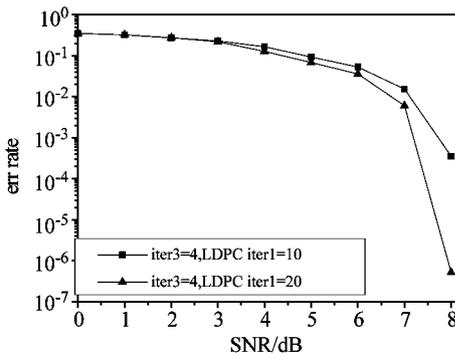


图 10 迭代次数为 4, LDPC 解码迭代次数为 10、20 时的 BER 曲线

Fig. 10 Iteration 4, the iteration of LDPC decoding is 10, 20, err rate curve

由图 9 可以看出,改进算法在消噪迭代次数大于 4 时,误码率基本保持稳定。如图 10 所示,消噪迭代次数为 4 时,为减小实验次数,改进算法在实验 3 的基础上将 LDPC 解码迭代次数设置为 20,其误码率性能虽然不能保证是最佳的,但是接近最佳。如果该条件下,改进算法较传统算法最佳误码率性能好,则改进算法在误码率性能上较传统算法具有优势。

(5) LDPC 最大迭代次数为 10,消噪迭代次数为 2、3,传统噪声消除迭代算法和改进算法对比

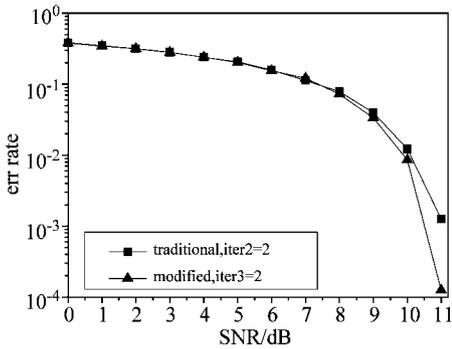


图 11 迭代次数为 2, 两种算法 BER 比较

Fig. 11 Iteration 2, BER contrast of the two algorithm

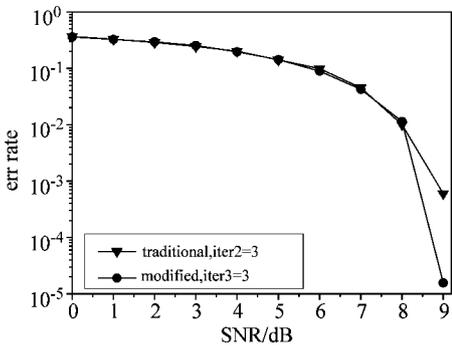


图 12 迭代次数为 3, 两种算法 BER 比较

Fig. 12 Iteration 3, BER contrast of the two algorithm

由图 11、图 12 可见, 相同条件下, 改进算法 BER 较低, 在高信噪比条件下, 比较明显。改进算法在迭代中用 LDPC 解码替代最大似然检测, 对噪声估计较准确, 误码率较低。信噪比较高时, 脉冲噪声较弱, 噪声高斯性较强, LDPC 解码性能较好, 迭代中对噪声的估计更加准确, 改进算法的优势比较明显。

(6) 两种算法迭代次数分别为 4、5, LDPC 最大解码次数为 20, 改进算法和传统噪声消除迭代算法最佳误码率性能对比

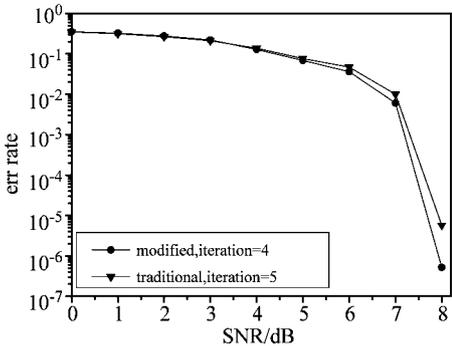


图 13 两种算法最佳性能对比曲线

Fig. 13 Comparison of the best performance of the two algorithm

实验 6 在实验 3、4 的基础上, 对比了改进算法与传统算法的最佳误码率性能, 改进算法的误码率较低, 证明了改进算法在误码率性能上的优势。改进算法在迭代中引入 LDPC 解码, 其对噪声消除效果好于最大似然检测, 提高了迭代算法对噪声估计准确性。虽然改进算法运算量较大, 但是传统算法性能达到最佳时, 即使增加解码迭代次数或者消噪迭代次数, 其误码率下降不明显, 而改进算法误码率较低, 尤其是信噪比高时, 两种算法误码率对比比较明显。

6 结论

针对基于最大似然检测的迭代去噪算法的不足, 本文提出了一种基于 LDPC 码解码的噪声抑制迭代算法。传统的迭代去噪算法依据欧式距离检测信号, 估计噪声, 对噪声估计不准确。改进的算法将 LDPC 码解码从迭代之外放入迭代内, 通过解码, 噪声被消除的更充分, 这样在迭代中对噪声的估计更准确, 去噪效果好, 误码率低。该算法的一大特点是利用了 LDPC 解码和迭代消噪的互补性优势, 二者相互促进, 向着“噪声抑制”这一目标共同发挥作用。计算机仿真结果表明, 在 LDPC 解码和消噪迭代次数、信噪比相同时, 改进算法误码率较低, 收敛较快; 随 LDPC 解码及消噪迭代次数增加, 传统迭代算法的性能达到最佳时, 改进算法误码率较低。

参考文献

- [1] Al-Mawali K S, Hussain Z M. Adaptive-threshold clipping for impulsive noise reduction in OFDM-based power line communications[C]. The 2009 International Conference on Advanced Technologies for Communications, Hai Phong, Vietnam, 2009: 43-48.
- [2] Kim Y H, Kim K H, Oh H M, Kim K H, Kim S C. Mitigation of effect of impulsive noise for OFDM systems over power line channels[C]. IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, Jeju city, Korea, 2008: 386-390.
- [3] Zhidkov S V. Analysis and comparison of several simple impulsive noise mitigation schemes for OFDM receivers [J]. IEEE Transactions on Communications, 2008, 56 (1): 5-9.

- [4] Haering J, Vinck A J H. OFDM transmission corrupted by impulsive noise[C]. Proceedings of the 2000 International Symposium on Power-Line Communications and its Applications, Limerick, Ireland, 2000: 9-14.
- [5] Rouissi F, Tlili F, Degardin V, Ghazel A, Lienard M. Impulsive noise cancellation based on zero insertion technique for high bit rate powerline communication system. Telecommunications[C]. IEEE International Conference on Telecommunications, Marrakech, Morocco, 2009: 276-280.
- [6] Mengi A, Vinck A J H. Successive impulsive noise suppression in OFDM [C]. IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, Rio de Janeiro, Brazil, 2010: 33-37.
- [7] Kitamura T, Ando H, Ohno K, Itami M. The impulsive noise reduction using it's replica signal under class-A impulsive channel[C]. IEEE International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, Taipei, China, 2012: 463-467.
- [8] Recommendation ITU-T G. 9960 unified high-speed wireline based home networking transceivers-System architecture and physical layer specification[S]. 2010.
- [9] 朱庆, 吴乐南. 低复杂度校验节点调度的 LDPC 串行译码算法[J]. 信号处理, 2013, 29(5): 550-556.
Zhu Q, Wu L N. Low-Complexity Check-Node-Based Serial Scheduling Belief Propagation for LDPC Codes[J]. Journal of Signal Processing, 2013, 29(5): 550-556. (in Chinese)
- [10] Ndo G, Siohan P, Hamon M H. Adaptive noise mitigation in impulsive environment: application to power-line communications[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(2): 647-656.
- [11] Zimmermann M, Dostert K. A multipath model for the powerline channel[J]. IEEE Transactions on Communi-

cations, 2002, 50(4): 553-559.

- [12] 李琦, 李宏伟, 蔡斌, 张建忠, 耿耿, 王舒. OFDM 频偏信道联合估计算法[J]. 信号处理, 2013, 29(2): 201-207.
Li Q, Li H W, Cai B, Zhang J Z, Geng G, Wang S. Joint Frequency Offset and Channel Estimation Algorithm for OFDM [J]. Journal of Signal Processing, 2013, 29(2): 201-207. (in Chinese)

作者简介



陈喆 男, 1975 年 11 月生, 黑龙江省泰来人, 2003 年 10 月毕业于大连理工大学信号与信息处理专业, 获工学博士学位, 现为大连理工大学副教授。主要研究方向为数字信号处理、语音信号处理、通信信号处理、非平稳信号处理。

E-mail: zhechen@dlut.edu.cn



袁康 男, 1989 年 5 月生, 河南省南阳人, 2013 年 6 月毕业于大连理工大学电子信息工程专业, 获工学学士学位, 现为大连理工大学硕士研究生。主要研究方向为宽带电力线通信。

E-mail: yuangangkang@mail.dlut.edu.cn



殷福亮 男, 1962 年 11 月生, 辽宁省清源人。现为大连理工大学教授, 兼任中国电子学会理事, 中国电子学会教育分会副主任委员, 中国图像图形学会常务理事, 中国电子学会信号处理专业委员会委员, 中国通信学会通信理论与信号处理专业委员会委员, 教育部高等学校电子信息工程专业课程指导委员会委员, 《通信学报》和《信号处理》编委。主要研究方向为语音增强、说话人识别、语音编码、语音盲分离、通信信号处理等。E-mail: flyin@dlut.edu.cn