

基于自适应阈值的脉冲抑制迭代算法研究

包晓安,郭 铭,胡国亨,王志勇,俞成海,张 娜

(浙江理工大学信息学院,杭州 310018)

摘 要: 电力线信道中存在的脉冲噪声是信号衰减的主要因素,通常采用非线性消隐的 CISA 迭代算法来消除脉冲噪声,抑制脉冲干扰,但固定阈值的设定并不精确,使得有效信号被消隐处理。为进一步提升降噪性能,提出了一种基于自适应阈值脉冲抑制迭代算法(OISA 迭代算法),该算法引入了 CE 卷积编码算法和 VD 译码算法来提高噪声估计性能,并采用自适应阈值的方法进行更加精确的消隐处理。仿真实验表明,OISA 迭代算法在 OFDM 系统的性能上比 CISA 迭代算法有所提升。

关键词: OISA;脉冲抑制;消隐处理;自适应阈值

中图分类号: TN91

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2017)05-0676-05

0 引 言

电力线载波通信(PLC)是通过电力线进行信号传输的一种通信方式,电力线作为已经完善搭建的基础设施,可大大降低通信成本^[1]。但由于其设计之初主要用于传输电能,并非专为通信服务所设计,通信质量受到信道的噪声干扰、多径效应和信道衰弱等因素影响^[2]。在 PLC 的众多干扰因素中,脉冲噪声对电力线通信系统的影响最为显著,因此非常有必要采用一定技术对脉冲噪声进行抑制^[3]。

目前国内外有很多关于电力线通信系统中的脉冲噪声抑制方法的研究,可分为参数法和非参数法两大类^[4]。参数法利用数学模型来描述脉冲干扰,常用的方法包括限幅法、深度限幅法、消隐法和联合消隐法等,虽然这些方法能够精准地识别脉冲噪声,但存在着去噪性能差和算法计算量大等不足。非参数法利用脉冲干扰的某些特性来抑制干扰,比如 Hu 等^[5]、Haring 等^[6]提出了一种传统的抑制迭代算法,该算法在时域上利用阈值检测器去估计并通过多次迭代来消隐脉冲噪声,但这种技术对脉冲噪

声的识别不够完善,对原始信号进行消隐处理,导致系统误码率没有很好解决。

本文采用 CE 卷积编码及 VD 译码作为信道编码方式,两种算法分别为性能优良的编码算法和对应的最佳译码算法,可减少接受信号端获取的错误信号码,提高传输的可靠性。Ndo 等^[7]提出的传统抑制迭代算法(CISA 迭代算法)采用固定阈值来进行脉冲噪声的消隐,如果阈值设定过大,将无法覆盖所有的脉冲信号,而阈值过小又不能保证真实有效的信号样本能够不被消隐处理^[8]。本文提出了一种自适应阈值脉冲抑制迭代算法(OISA 迭代算法),根据接受信号的分布特征来判定阈值的大小,对脉冲噪声进行自适应阈值估计判定。通过仿真实验比较 CISA 迭代算法和 OISA 迭代算法性能,以验证 OISA 在 OFDM 系统上的传输效率和脉冲噪声抑制效果。

1 模型简介

PLC 系统中存在的干扰严重影响了通信质量,OFDM 技术具有频谱利用率高、传输速度快和抗多径干扰能力好等优点^[9],因此 OFDM 技术被广泛应用于

收稿日期:2016-11-23 网络出版日期:2017-04-25

基金项目:国家自然科学基金项目(61379036,61502430);浙江理工大学“521 人才培养计划”基金项目;浙江省重大科技专项重点工业项目(2014C01047)

作者简介:包晓安(1973-),男,浙江金华人,教授,硕士,主要从事自适应软件、软件测试与智能信息处理方面的研究。

通信作者:张 娜,E-mail:zhangna@zstu.edu.cn

电力线信道中。由于脉冲噪声的幅值具有高斯噪声的特性,可利用泊松-高斯分布模型对脉冲噪声进行建模^[10]。

1.1 OFDM 基带模型

正交频分复用技术(OFDM)是一种改进多载波调制的新型高速传输技术,其基本思想是在频域内将给定信道划分成等频率间隔的多个子载波,将高

速信息流变换成低速率的多路并行数据流,每路数据流分别在相应的子载波上进行传输,在接收端再将正交子载波解调,最后恢复成高速信息流。各相邻子信道上的信号在频谱上相互重叠且相互正交,减少了子载波间的相互干扰,又提高了频谱的利用率。OFDM 系统的基带模型如图 1 所示。

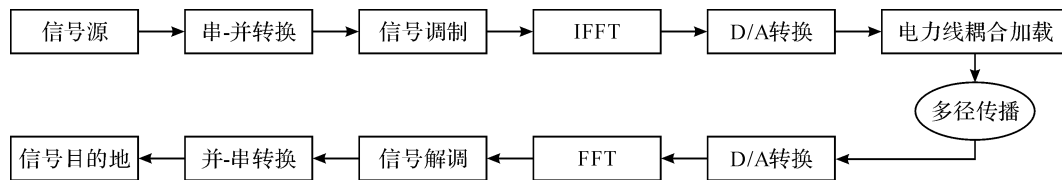


图 1 OFDM 系统基带模型

OFDM 符号由一组经过相移键控(PSK)或者正交幅度调制信号(QAM)的子载波构成,其基带模拟信号可表示为^[11]:

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} S_k e^{j2\pi \frac{k}{N} t} = \sqrt{N} \cdot IDFT_N \{S_k\},$$

$$0 \leq n < N \quad (1)$$

其中: N 为子载波个数之和, S_k 是一个正交调幅的符号序列, $IDFT_N$ 表示 N 阶离散傅里叶变换,因此可采用更高效的快速傅里叶反变换/快速傅里叶变换(FFT/IFFT)来实现多个载波的调制和解调,进一步简化 OFDM 系统结构,大大降低实现复杂度。

1.2 脉冲噪声模型

脉冲噪声分为异步的非周期和同步的周期脉冲噪声^[12],对于时域脉冲噪声模型,Al-Mawali 等^[13]提出了一种基于泊松分布模型的脉冲噪声模型,见式(2)。该模型可以理解为脉冲噪声以 c_k 概率分布,且幅度以 d_k 随机设定,这类脉冲噪声随机的出现在每一个传输数据中。

$$b_k = c_k d_k \quad (2)$$

其中: c_k 符合泊松分布, d_k 用均值为 0、方差为 $\sigma_w^2 = (1/2)E[|d_k|^2]$ 的加性高斯白噪声来表示。由于脉冲噪声的产生频率服从泊松过程,因此脉冲的到达服从到达率为每秒单元的柏松分布,这样 i 次脉冲噪声在 1 s 内到达的概率为:

$$P(i) = P(X = i) = e^{-n} \frac{n^i}{i!}, i = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

泊松-高斯分布模型被认为是脉冲噪声仿真效果较好的统计概率模型,适合于描述单位时间内随机噪声发生的次数。本文利用此分布模型将脉冲噪声与加性高斯白噪声相加,构成本文系统仿真环境下总的噪声模型,其中的加性高斯白噪声用于模拟电力线中的背景噪声。

2 改进的迭代抑制算法

2.1 OISA 迭代抑制算法

脉冲噪声是影响 PLC 系统传输性能的一个重要因素,通常采用 CISA 迭代算法来抑制脉冲干扰抑制,该方法在 OFDM 接收机之前施加一个迭代处理,处理过程中能够获取信号中的脉冲,同时衰减脉冲在时域中的能量,从而达到抑制脉冲的效果。CISA 迭代算法的基本思想是在时域或者频域中更好地预测脉冲,对预测到的脉冲进行阈值消隐处理,通过阈值检测器能够很好地估计噪声属于脉冲噪声还是 AWGN 噪声。

为进一步提升算法性能,本文在 CISA 迭代算法基础上提出了 OISA 迭代算法,该算法引入了 CE 卷积编码算法以及 VD 译码算法来提高噪声估计性能。前者能够生成相互关联的码元,而后者能够识别并纠正错误码元,两者结合可以得到良好的纠错性能,减少接受端对错误信号的获取,进而降低系统的误码率。

OISA 迭代算法的主要思想为:首先对原始接收信号进行 OFDM 解调器处理;然后通过 FFT^[14]将时域信号转化成频域信号;紧接着经过 VD 译码器,对接收码进行译码,并纠正其中的错误比特;最后对输出信号进行条件判断,如果满足迭代条件则输出信号,否则继续迭代。在新的迭代中,VD 译码器处理得到的比特流通过 CE 卷积编码器进行编制和转换得到频域信号,频域信号再进行 OFDM 调制获得时域信号,计算此时的时域信号与原始接收信号的差值 $n_e^{(i)}$,当 $|n_e^{(i)}|$ 大于阈值 OT 时,将 $n_e^{(i)}$ 作为当前阈值赋值给 $u_e^{(i)}$,反之,则将 $u_e^{(i)}$ 赋值为 0,避免下次迭代过程中对有效信号的消隐,用公式可以描述为:

$$u_e^{(i)} = \begin{cases} 0, & |n_e^{(i)}| \leq OT \\ n_e^{(i)}, & |n_e^{(i)}| > OT \end{cases} \quad (4)$$

利用 $u_e^{(i)}$ 阈值对前一次的迭代信号进行消隐处理获

取新的迭代信号,重复以上的迭代步骤直至满足实验条件,跳出迭代循环,得到脉冲迭代抑制处理后的信号,算法框架如图2所示。

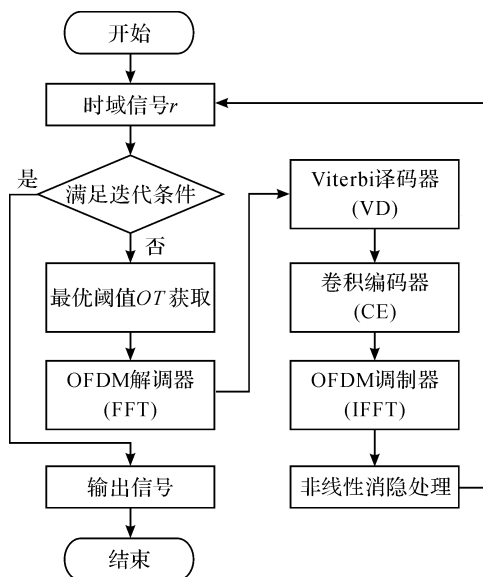


图2 OISA 抑制脉冲迭代算法框架

2.2 自适应阈值算法

传统的迭代算法采用固定阈值来进行脉冲噪声的消隐,但固定阈值的设定并不能消除在接受信号中所存在的所有脉冲影响,还会对一些有效信号进行非线性消除。Zhidkov 等^[15]认为,传统的 OFDM 接收机的固定阈值一般可以设定的范围 0~15 dB,相对应系统的信噪比幅度变化时在 0~18 dB 之间。在不同概率的脉冲噪声环境下,最佳阈值的大小设定并不相同,因而本文采用了一种具有更高效率的自适应阈值计算方法,该方法根据接受信号的分布特征来判定阈值的大小。根据接受得到的信号 $r^{(l)}$,获取它的峰值、中位值以及均值,从而通过峰值以及均值差获得脉冲噪声估计 (impulsive noise estimation, INE),同时通过中位值以及均值计算得到 ω 值,其中 δ 是本文实验过程中的调节因子,根据实验测得其范围在 5.1 ± 0.1 ,可以得到较好的信噪比,最后计算得到的 INE 和 ρ 的比值来获取自适应阈值 OT ,算法框图见图3。

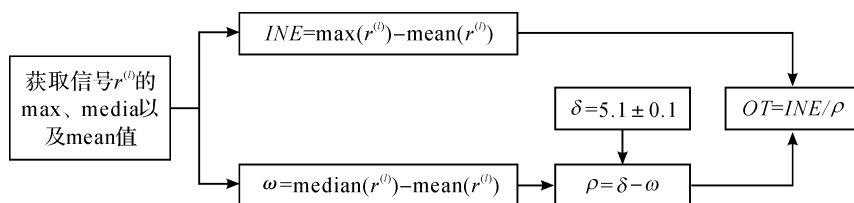


图3 自适应阈值算法流程

在改进的脉冲抑制迭代算法中,首先设定初始的迭代次数为 0,通过 OFDM 调制解调器处理原始信号,由于在原始接收信号中掺杂着脉冲噪声和 AWGN 噪声,因此在调制器前必须对该信号进行处理,利用脉冲估计器来判断噪声类别,该估计器通过自适应阈值的计算获得下次迭代过程中所需要的参数 $r^{(l+1)}$,具体的迭代算法如下:

输入:原始接受信号 r ,最大迭代次数 L ,迭代次数 l 。

输出:脉冲抑制处理过后的信号 $\hat{S}^{(l)}$ 。

1. $l = 0; r^{(l)} = r;$
2. OFDM 解调器处理 $r^{(l)}$,经过快速傅里叶变换得到 $R^{(l)}$;
3. Viterbi 译码器获取 $R^{(l)}$,处理得到 $S^{(l)}$;
4. for($l = 0; l \leq L; l++$) {
5. $INE = \max(r^{(l)}) - \text{mean}(r^{(l)});$
6. $\omega = \text{median}(r^{(l)}) - \text{mean}(r^{(l)});$
7. $\rho = \delta - \omega;$
8. 计算 $OT = INE / \rho;$

9. CE 编码器获取 $S^{(l)}$,处理得到 $\tilde{X}^{(l)}$;

10. OFDM 调制器处理 $\tilde{X}^{(l)}$,经过傅里叶逆变换得到 $\tilde{s}^{(l)}$;

11. 信号 $r^{(l)} - \tilde{s}^{(l)}$ 获得 $n_e^{(l)}$;

12. if ($|n_e^{(l)}| > OT$) $u_e^{(l)} = 0$;

13. else $u_e^{(l)} = n_e^{(l)}$;

14. $r^{(l+1)} = r^{(l)} - u_e^{(l)}$;

15. 调用步骤 2 和 3 的方法得到 $S^{(l+1)}$;

16. if ($S^{(l)} = S^{(l+1)}$) break;

17. }

18. $\hat{S}^{(l)} = S^{(l)}$; // $\hat{S}^{(l)}$ 是最终的输出信号

用新得到的信号 $r^{(l+1)}$ 替代 $r^{(l)}$,重复以上的迭代步骤,直至某一次迭代过程中 VD 译码器的输出信号 $S^{(l)}$ 等于前一次迭代 VD 译码器的输出信号 $S^{(l-1)}$,或者迭代次数超过最大迭代次数,迭代终止。此时 l 表示迭代满足条件时的迭代次数,最后得到的输出信号即为 $\hat{S}^{(l)}$,且 $\hat{S}^{(l)} = S^{(l)} = S^{(l-1)}$ 。经过多次迭代后,脉冲噪声被较好地抑制,获得良好的误码率,提高了 OFDM 系统的传输性能。

3 实验分析

为了验证本文提出的基于 OISA 脉冲抑制迭代算法的有效性,针对不同情况将系统分成四个环境下运行:

- 信道 A 中只有高斯白噪声;
- 信道 B 中有高斯白噪声和脉冲噪声;
- 加入 CISA 抑制脉冲迭代算法于信道 B 中;
- 加入 OISA 抑制脉冲迭代算法于信道 B 中。

本文实验中对这四种信道环境下,采用相对脉冲消隐效果比较好的 BPSK 调制方式,观察 OFDM 电力线系统的误码率性能的变化以及两种迭代算法的传输效率,其仿真结果如图 4—图 7 所示。

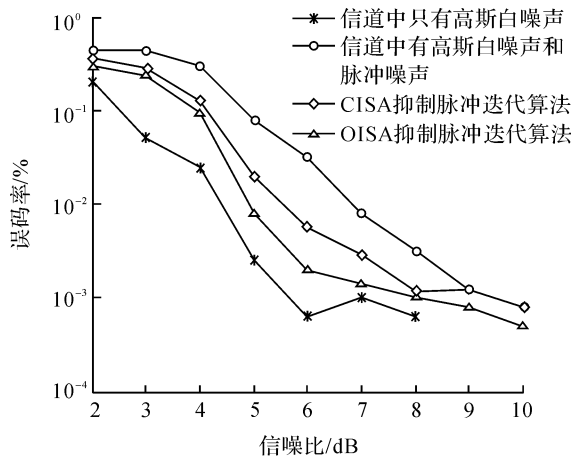


图4 轻度噪声下的系统误码率性能对比

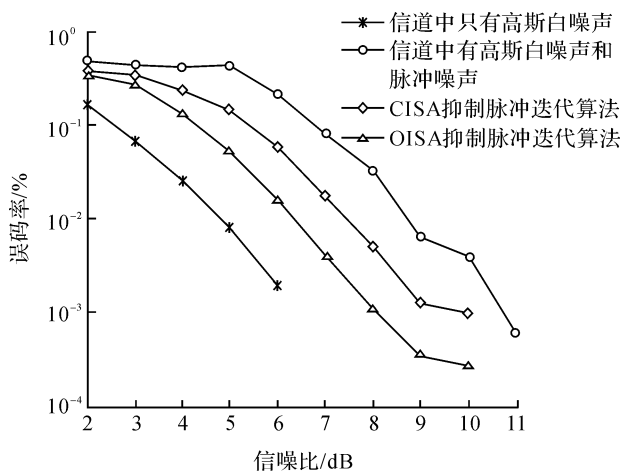


图5 中度噪声下的系统误码率性能对比

图4—图6中信噪比和误码率曲线反映了这两类去噪算法的性能,从图中可见,如果在接收端不进行脉冲抑制迭代处理,OFDM系统的通信性能大幅度降低,这是因为脉冲噪声的干扰会破坏调制后的OFDM符号,导致在OFDM接收端无法恢复该符号所传递的原始信号。实验通过泊松过程去产生脉

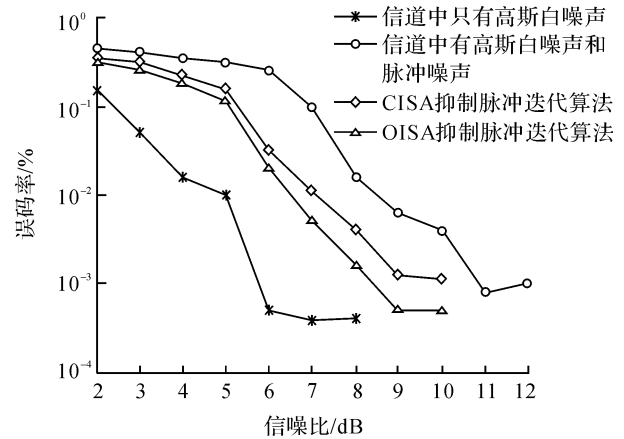


图6 重度噪声下的系统误码率性能对比

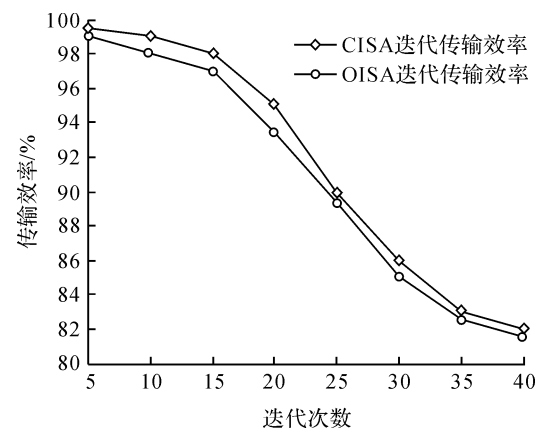


图7 CISA和OISA算法的传输效率对比

冲噪声,分别在轻度、中度、重度的噪声环境下,比较CISA脉冲抑制迭代算法和OISA脉冲抑制迭代算法。其中在图4中,两种脉冲抑制迭代算法的性能在4~8 dB信噪比下抑制效果比较好,而在图5和图6中,脉冲抑制效果主要体现在信噪比5~9 dB区间。相对于CISA传统迭代算法,本文采用具有纠错性能的CE卷积编码器和VD译码器,并用自适应阈值改善了原迭代算法固定阈值不精确的问题,因此在误码率改善上,本文算法优于CISA算法。从图7中的传输效率比较结果可以发现,相同迭代数的条件下,传统的CISA迭代算法的传输效率比OISA算法要高,但是差别并不大,两者在迭代次数15~30区间,对OFDM系统的传输效率影响最大。实验结果表明,本文提出的一种基于OISA的脉冲抑制迭代算法有效降低了系统的误码率,在各个噪声环境下,其抑制脉冲噪声的抑制效果相对稳定。

4 结语

目前,迭代抑制算法已经普遍应用在脉冲噪声抑制的研究中,本文提出了一种基于OISA的脉冲

抑制算法,该算法在传统的抑制迭代算法中加入了CE卷积编码器VD译码器,同时在脉冲估计器中加入自适应阈值检测器,其中自适应阈值的计算可以更好地对脉冲进行消隐处理。在本文仿真实验中,采用了消隐效果较好的BPSK调制方式,分别在轻度、中度和重度3种不同噪声下,对比了本文算法和传统的迭代算法,得出改进算法在系统的误码率的性能上能够得到更好的改善。在实验中还发现OISA迭代算法的传输效率相较CISA迭代算法偏低,而综合实验分析,相对于本文提出的OISA算法在误码率改善方面,对传输效率的影响在可接受范围内。在未来的研究工作中,可以将此迭代抑制算法应用到基于OFDM低压电力线系统的视频传输领域中,分析研究误码率对于PSNR性能的影响,从而开展提高视频的视觉质量的研究工作。

参考文献:

- [1] 曹军威, 万宇鑫, 涂国煜, 等. 智能电网信息系统体系结构研究[J]. 计算机学报, 2013, 36(1):143-167.
- [2] 张高境, 熊兴中. 电力载波通信中的干扰特性及抑制技术分析[J]. 电信科学, 2016, 32(2):182-188.
- [3] 邹婷, 李有明, 郭涛, 等. 电力线通信系统中的脉冲干扰抑制研究[J]. 移动通信, 2015, 39(7):84-87.
- [4] LIN J, NASSAR M, EVANS B L. Impulsive noise mitigation in powerline communications using sparse bayesian learning[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(7):1172-1183.
- [5] HU X, CHEN Z, YIN F. Impulsive noise cancellation for mimo power line communications[J]. Journal of Communications, 2014, 9(3):241-247.
- [6] HARING J, VINCK H. OFDM transmission corrupted by impulsive noise[C]//4th International Symposium on Power-Line Communications and its Applications (ISPLC2000), IEEE Transactions on Communications, 2000:9-14.
- [7] NDO G, SIOHAN P, HAMON M H. An adaptive procedure for impulsive noise mitigation over power line channels[C]//Global Telecommunications Conference, 2009. IEEE, 2009: 1-6.
- [8] ZHIDKOV S V. Performance analysis and optimization of OFDM receiver with blanking nonlinearity in impulsive noise environment[J]. Vehicular Technology IEEE Transactions on, 2006, 55(1):234-242.
- [9] 孙欣丽, 王萍. 滤波器组多载波技术仿真性能分析[J]. 电子测量技术, 2016, 39(5):41-45.
- [10] ZIMMERMANN M, DOSTERT K. Analysis and modeling of impulse noise in broadband powerline communications [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2002, 44(1):249-258.
- [11] 陈西宏, 胡茂凯, 孙际哲, 等. 多径衰落信道下多音干扰OFDM系统性能分析[J]. 北京理工大学学报, 2014(1):83-87.
- [12] 谷志茹, 刘宏立, 詹杰, 等. 智能电网窄带OFDM通信系统噪声抑制[J]. 电工技术学报, 2014, 29(11):269-276.
- [13] AL-MAWALI K S, HUSSAIN Z M. Adaptive-threshold clipping for impulsive noise reduction in OFDM-based power line communications [C]//International Conference on Advanced Technologies for Communications. IEEE, 2009:43-48.
- [14] 毛珍丽, 金学波. 基于傅里叶级数的织物成结褶皱模拟研究[J]. 浙江理工大学学报, 2012, 29(4):498-502.
- [15] ZHIDKOV S V. On the analysis of OFDM receiver with blanking nonlinearity in impulsive noise channels [C]//Intelligent Signal Processing and Communication Systems, 2004. IEEE, 2004: 492-496.

Research on Pulse Suppression Iterative Algorithm Based on Adaptive Threshold

BAO Xiaoan, GUO Ming, HU Guoheng, WANG Zhiyong, YU chenghai, ZHANG Na

(School of Information Science & Technology, Zhejiang Sci-Tech university, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The impulse noise in power line channel is the main factor of signal attenuation. The CISA iterative algorithm of non-linear blanking is usually used to eliminate the impulse noise and suppress impulse interference. However, the setting of fixed threshold value is not precise so that effective signals suffer blanking processing. In order to further enhance the performance of noise reduction, an adaptive iterative algorithm based on adaptive threshold pulse suppression (OISA iterative algorithm) is proposed in this paper. The CE convolutional coding algorithm and VD decoding algorithm are introduced in this algorithm to improve the noise estimation performance, and adaptive threshold method is applied to carry out more accurate blanking processing. The simulation experiment shows that the OISA iterative algorithm has better performance than CISA iterative algorithm in OFDM system.

Key words: OISA; pulse suppression; blanking processing; adaptive threshold

(责任编辑: 康 锋)