

基于压缩感知和虚警概率的电力线脉冲噪声抑制方法*

谭周文^{1,2}, 刘宏立^{1†}, 陈炳权³, 马子骥¹

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南人文科技学院 信息学院, 湖南 娄底 417100;
3. 吉首大学 物理科学与信息工程学院, 湖南 吉首 416000)

摘要:针对 OFDM 电力线通信中噪声抑制方法依赖于脉冲噪声特征参数及脉冲噪声稀疏度的问题, 提出一种基于压缩感知和虚警概率的宽带电力线脉冲噪声抑制算法. 该算法利用 OFDM 零子载波观测脉冲噪声投影, 采用基追踪降噪方法对脉冲噪声进行粗估计, 并设计基于虚警概率的自适应脉冲噪声检测门限, 根据门限得到粗估计的脉冲噪声支撑集, 在支撑集上通过最小二乘方法对脉冲噪声幅度进行重构, 接收信号减去估计的脉冲噪声可得到去噪的 OFDM 信号. 仿真结果表明, 提出的算法在未知脉冲噪声稀疏度的情况下可以对噪声信号进行重构, 算法的性能优于传统压缩感知及非线性去噪方法, 能可靠有效的对宽带电力线脉冲噪声进行抑制.

关键词: 电力线通信; 虚警概率; 压缩感知; 脉冲噪声; 正交频分复用

中图分类号: TP393

文献标志码: A

Impulse Noise Mitigation Method Based on Compressive Sensing and False-alarm Probability in Power Line Communication

TAN Zhouwen^{1,2}, LIU Hongli^{1†}, CHEN Bingquan³, MA Zijl¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. College of Information, Hunan University of Humanities, Science and Technology, Loudi 417100, China;
3. College of Physics Science and Information Engineering, Jishou University, Jishou 416000, China)

Abstract: In terms of the problem that the suppression of impulse noise (IN) in orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) based power line communication depends on the characteristic parameters and sparsity of IN, this paper proposed a suppression algorithm based on compressive sensing (CS) and False-Alarm probability. In this approach, the projection of IN is observed using OFDM zero carriers, and the rough estimation of IN is carried out by using the method of base pursuit denoise (BPDN). Then, an adaptive impulse noise detection threshold based on false alarm probability is designed, and the support set of IN is obtained according to the designed threshold. Finally, the IN in power line communication is reconstructed by the least square method. The original OFDM signal can be derived by subtracting the estimated IN from the received OFDM signal. The simulation results show that the proposed algorithm can re-

* 收稿日期:2017-07-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61771191), National Nature Science Foundation of China(61771191); 中央国有资本经营预算项目(财企[2013]470号), Central State-Owned Capital Management and Budget Project(2013-470); 中央高校基本科研项目(1053214004), Fundamental Research Funds for the Central Universities(1053214004); 湖南省自然科学基金资助项目(2017JJ2052), Natural Science Foundation of Hunan Province(2017JJ2052)

作者简介:谭周文(1981-), 男, 湖南娄底人, 湖南大学博士研究生

† 通讯联系人, E-mail: honglilou@hnu.edu.cn

construct the IN well even if the sparsity conditions of IN is unknown, the performance of the algorithm is superior to the traditional compressed sensing and the nonlinear denoising methods, and this algorithm is reliable and effective for mitigating IN in broadband power line communication.

Key words: power line communication; false alarm probability; compressive sensing; impulse noise; OFDM

电力线通信有望在电话业务量增加的情况下发挥其重要的作用,其主要的优点是成本低廉,具有无处不在的网络结构。但是现存电力线主要用于电力传输,在其上存在传输路径损耗,多径传输以及各种噪声。因此,电力线不适合于用来进行信号的传输。电力通信中的路径损耗主要来源传输线的趋肤效应和介电损耗,而多径传输主要是因为发射机和接收机之间的阻抗不匹配^[1],导致发送符号扩展到多个相邻符号中,引起内部符号干扰^[2](ISI)。许多研究已经得出结论,噪声是影响电力线通信性能最关键因素之一,其时刻存在于电力线通信环境中,不能用高斯白噪声描述,主要分为两种类型:背景噪声和脉冲噪声^[3]。脉冲噪声的特征主要由持续时间,内部到达时间以及噪声幅度确定^[4]。根据它和工频电源周期的关系,可以将脉冲噪声分为同步于工频周期的脉冲噪声、异步于工频周期的脉冲噪声以及异步脉冲噪声^[5]。异步脉冲噪声对宽带电力通信系统的性能损害最大,它是由电力线上开关的瞬变引起的,具有很高的功率和不可预测的性质^[6],本文着重抑制电力线通信中的异步脉冲噪声。

为了抑制脉冲噪声,不同文献提出了各种对脉冲噪声进行抑制的方法。简单通用的方法是在时域对接收信号进行限幅、消隐操作^[7-8]。这些方法实现方便,复杂度比较低,但电力线上的脉冲噪声是时变的,在实际应用中很难得到最优的限幅或者消隐门限。Andreou等^[9-10]采用纠错编码技术抑制电力线脉冲噪声,该技术通过增加发送数据的冗余位以减少传输过程中错误位的发生。Ndo^[11]提出了一种基于检测理论的自适应门限估计方法,该方法能够根据矩估计的噪声参数自适应计算噪声的消隐门限,但它使电路的复杂性和计算量增加。Zhikov^[12]提出了一种无需噪声特征参数降低脉冲噪声的方法,对OFDM解调信号在频域进行脉冲噪声补偿,通过迭代方法降低通信系统的脉冲噪声,该方法对轻度脉冲噪声能产生较好的效果,当脉冲噪声幅度增加或者OFDM信号使用高阶调制时,噪声抑制效果将大大降低。另一方面,压缩感知作为一个新出现

的理论,引起了很多学者的注意,该方法可以将高维信号从低维信号中恢复出来^[13],已被用于解决通信系统中的许多问题,其中一个主要的方面就是进行电力线脉冲噪声抑制。Naffouri^[14]使用压缩感知方法粗略估计脉冲噪声,然后使用基于先验信息的矩阵对脉冲噪声位置进行精确估计,最后使用MMSE的方法对信号进行恢复。该方法需要预先知道脉冲噪声的概率密度函数,在实际电力线通信中,脉冲噪声的概率密度往往是难以预测的。Mehboob和Ren^[15-16]提出了自适应的脉冲噪声抑制方法对脉冲噪声进行重构,但该方法需预先知道脉冲噪声的特征参数,如方差等,一旦参数估计不准确,噪声抑制的效果将难以满足实际需求。

综上所述,电力线通信中针对脉冲噪声的各种抑制算法各有优缺点,为了在噪声抑制过程中减少对脉冲噪声特征参数的依赖,本文提出了一种基于压缩感知和虚警概率的电力线脉冲噪声抑制算法。首先,利用宽带电力线通信中未使用的零载波对脉冲噪声进行观测,根据基追踪(BPDN)降噪的方法实现脉冲噪声的粗估计,在OFDM通信子载波较多的情况下,采用合理的虚警概率设计脉冲噪声的限幅门限,根据门限确定脉冲噪声支撑集合,在此基础上使用最小二乘方法对这些支撑集位置上的脉冲幅度进行精确的估计。接收信号减去估计的脉冲噪声估计值即可实现脉冲噪声的抑制效果。

1 脉冲噪声模型

脉冲噪声的存在给电力线通信带来了严重的威胁,为了从根本上消除噪声干扰的问题,已有相当多的学者从时域和频域方面对脉冲噪声进行了研究。考虑到电力线上噪声的幅度特性以及脉冲事件的时间特性,采用一类特殊的 Middleton A类噪声模型对电力线噪声进行建模,该模型脉冲噪声的发生是一个伯努力高斯随机过程^[17]。总的噪声表示如下:

$$u_k = \omega_k + i_k; \quad k=0,1,\dots,N-1 \quad (1)$$

式中: k 表示时域OFDM符号的采样时刻; u_k 表示

电力线上出现的总的噪声成分; ω_k 代表背景噪声; i_k 代表脉冲噪声,其可以进一步表示成:

$$i_k = b_k \cdot g_k; \quad k=0,1,\dots,N-1 \quad (2)$$

其中: g_k 表示均值为零的高斯白噪声; b_k 是伯努力过程,其概率密度函数如下:

$$P_r(b_k) = \begin{cases} p, b_k = 1 \\ 1-p, b_k = 0 \end{cases} \quad k=0,1,\dots,N-1 \quad (3)$$

其中: p 表示脉冲噪声发生的概率,某一时间段内噪声的概率密度可以表示如下:

$$P_{u_k}(u_k) = (1-p) \cdot G(u_k, 0, \sigma_\omega^2) + p \cdot G(u_k, 0, \sigma_i^2 + \sigma_\omega^2) \quad (4)$$

$G(\cdot)$ 是高斯概率密度函数:

$$G(x, \mu, \sigma_x^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x^2}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma_x^2}\right) \quad (5)$$

为了仿真参数的设置,在此定义 σ_ω^2 和 σ_i^2 分别是加性高斯白噪声和脉冲噪声的方差. $\text{SNR} = 10$

$\log_{10}(\sigma_s^2/\sigma_\omega^2)$ 表示信号与背景噪声的功率比,单位是 dB, $\text{SINR} = 10 \log_{10}(\sigma_s^2/\sigma_i^2)$ 表示信号与脉冲噪声的功率比,单位是 dB.

2 提出的噪声抑制算法

电力线通信是一个复杂的发送接收过程,整个通信过程由许多环节构成.为了分析噪声抑制算法的性能,需要搭建完整的通信系统模型.图 1 是 OFDM 通信系统中提出的脉冲噪声抑制结构示意图. OFDM 通信将串行数据并行地调制在多个正交的子载波上,这样可以降低每个子载波的码元速率,增大码元的符号周期,提高系统的抗衰落和干扰能力.假定 OFDM 通信中总的子载波数目是 N ,其中零子载波的个数是 M ,则数据子载波的个数是 $N-M$,零载波在所有子载波中的位置分布在接收端是已知的^[18].

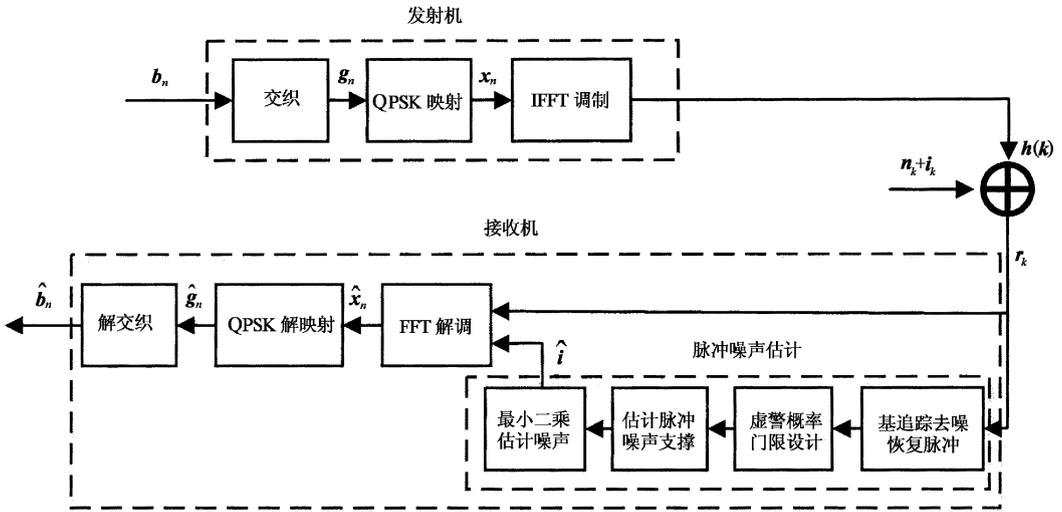


图 1 脉冲噪声抑制框图
Fig. 1 The block diagram of IN suppression

在发送端,输入的二元比特数据 b_n 经过交织处理后首先映射成 QPSK 调制的复信号 x_n . 然后,这些符号被送入 OFDM 调制器产生时域信号,发送的时域 OFDM 向量 s 可以表示为:

$$s = \mathbf{F}^+ x_n \quad (6)$$

式中: $+$ 表示共轭转置操作, \mathbf{F} 是一个离散傅里叶变换(DFT)矩阵,形式如下:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \alpha^0 & \alpha^0 & \alpha^0 & \cdots & \alpha^0 \\ \alpha^0 & \alpha^1 & \alpha^2 & \cdots & \alpha^{(N-1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha^0 & \alpha^{(N-1)} & \alpha^{2(N-1)} & \cdots & \alpha^{(N-1) \cdot (N-1)} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中 $\alpha = \frac{1}{\sqrt{N}} e^{-\frac{2\pi j}{N}}$.

信号经过并串转换以及模数转换后发送到电力线上. 在接收端,时域的 OFDM 信号可以表示为:

$$r = h * s + n + i \tag{8}$$

其中 * 表示卷积操作, n 表示电力线上的时域白高斯噪声, i 表示电力线上的时域脉冲噪声, h 表示信道的传输特性. 假定 $T \subset Z$ 是属于数据子载波的频率索引, $\hat{T} \subset Z$ 表示零载波的频率索引, F_1 和 F_2 分别表示矩阵 F 中由 $j \in T$ 和 $j \in \hat{T}$ 对应列所构成的矩阵^[19]. 则接收信号后, 对信号做离散傅里叶变换可以得到频域的信号:

$$y = F \cdot r = F \cdot (h * s + n + i) = F_1 \cdot (h * s + n + i) + F_2 \cdot (n + i) \tag{9}$$

我们需要将脉冲噪声 i 从投影到零载波子空间上的信号中估计出来. 根据式(9)零子载波上所观测到的接收信息可以表示为

$$y' = F_2 \cdot i + \tilde{n} \tag{10}$$

y' 可以看成是一个 N 维的脉冲噪声在 M 维基信号上的投影, $\tilde{n} = F_2 \cdot n$ 表示一个长度为 M 的随机干扰过程, 可以看成是白噪声. 在电力线通信中, 脉冲噪声是很少发生的, 如果一段时间内脉冲噪声的数量为 K , 则认为该脉冲噪声是一个 K 稀疏的信号, 可以采用压缩感知的方法将其从接收的空载波上恢复出来^[20]. 在提出的脉冲噪声抑制算法中, 论文主要工作为在接收端对脉冲噪声进行估计. 如图 1 所示, 提出的算法采用基追踪去噪恢复脉冲模块、虚警概率门限设计模块、估计脉冲噪声支撑模块以及最小二乘噪声估计模块等重构接收信号中的脉冲噪声, 然后将估计的脉冲噪声从接收信号中减去, 最后将去噪信号送往解调模块进行解调, 脉冲噪声的估计流程如图 2 所示, 算法的具体实现将在下一节详细讨论.

3 脉冲噪声估计和抑制

3.1 基追踪降噪粗估脉冲噪声

本文将压缩感知技术应用用于 OFDM 电力线通信的脉冲噪声抑制中. 基本思想是从不携带任何数据信息的零载波中恢复出稀疏的脉冲噪声信号. 压缩感知的基本测量模型如下所示:

$$b = \Phi \cdot a + n \tag{11}$$

式中: a 是一个具有 $\mu < \omega$ 稀疏度的向量; Φ 是一个 $\nu \times \omega$ 的测量矩阵; n 是白高斯噪声; b 是一个 ν 维的观测向量. 从含噪信号 b 中估计出稀疏信号 a 涉及到病态方程组求解问题, 这个方程组有无穷多解. 然而, 当向量 a 是一个稀疏的向量时, 求解方程(11)可以得到确定的解. 将式(11)与式(10)进行比较, 可以

观察到两个式子有相同的类型, 其参数的关系为:

$$(b, a, n, \Phi, u, v, \omega) \rightarrow (y', i, \tilde{n}, F_2, K, M, N) \tag{12}$$

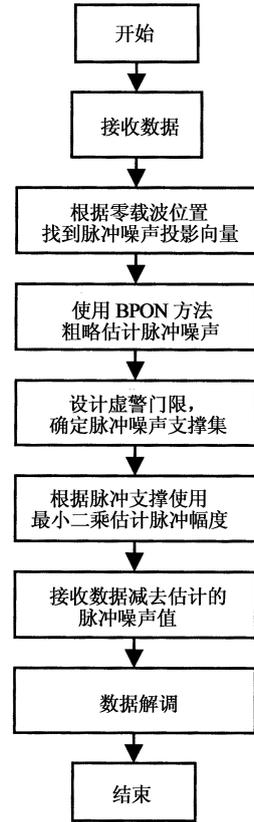


图 2 脉冲噪声估计流程图

Fig. 2 The flow chart of IN estimation

压缩感知的基本原理就是在观察矩阵 Φ 满足一定条件的情况下, a 可以使用多项式时间凸规划或者贪婪算法将 a 计算出来. 通用的凸规划算法如下:

$$\min \| a \|_1 \text{ s. t. } \| b - \Phi a \|_2 \leq \epsilon \tag{13}$$

其中 ϵ 与噪声 n 的方差有关. 为了恢复出宽带电力线上受背景噪声干扰的脉冲噪声, 可以采用基追踪降噪压缩感知方法对投影到零载波上的脉冲噪声进行粗估计. 根据文献[21]的算法, 与式(13)类似, 可以对式(10)的 i 进行计算得到 \tilde{i} , 具体表示如下:

$$\min \| i \|_1 \text{ s. t. } \| y' - F_2 \cdot i \|_2 \leq \epsilon \tag{14}$$

3.2 基于虚警概率的门限

由于存在高斯白噪声的干扰, 基追踪降噪方法估计得到的脉冲噪声 \tilde{i} 是不准确的, 该脉冲噪声混叠了高斯白噪声. 为了估计出脉冲噪声的准确位置, 本算法根据虚警概率设定一个门限值对粗估的脉冲信号进行限幅处理. 超过该门限的噪声认为是脉冲

噪声,低于该门限值的噪声认为是高斯白噪声,进而可以确定脉冲噪声的支撑集.在宽带电力线通信应用中,OFDM通信系统采用的子载波数目较多,因而OFDM信号的幅度分布以及电力线信道对输入信号的影响均可看成是近似高斯分布的.在无脉冲噪声出现的情况下,接收信号 r_n 将表现出均值为零方差为 σ_r^2 的高斯分布,其幅度分布 $|r_n|$ 是折叠的正态分布.将 $|r_n|$ 看成一个随机变量 \mathbf{X} ,其均值可以表示为:

$$\mu_x = \sigma_r \sqrt{\frac{2}{\pi}} \quad (15)$$

其中 σ_r 是随机变量 \mathbf{X} 的标准偏差, \mathbf{X} 的累计分布函数可以表示为:

$$F_X(x) = Pr(\mathbf{X} < x) = \text{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{2}\sigma_r}\right) \quad (16)$$

$\text{erf}(\cdot)$ 表示误差函数.在给定误差函数的条件下,可以得到对应的 x 值,

$$x = \sqrt{2}\sigma_r \text{erf}^{-1}(F_X(x)) \quad (17)$$

设定脉冲噪声限幅的门限为:

$$T = p \cdot \mu_x \quad (18)$$

当 $|r_n| > T$ 时,可以认为 r_n 被脉冲噪声干扰,当 $|r_n| < T$ 时,可以认为 r_n 没有被脉冲噪声干扰.每一个门限值 T 对应一个累积分布函数 $F_X(x)$,它可以衡量虚警概率的大小,比如, $F_X(T) = 0.90$ 表示平均10%的未被脉冲噪声干扰的接收信号 r_n 将会错误的认为被脉冲噪声干扰,虚警概率为 $P_{fa} = 1 - F_X(T)$.根据式(15),(17)和(18)可以求出参数 p 的值:

$$p = \sqrt{\pi} \cdot \text{erf}^{-1}(F_X(T)) \quad (19)$$

对于一个给定的 $F_X(T)$,上式可以提供一个合适的 p ,为了兼顾虚警概率和脉冲限幅门限的效果,可以根据实际的脉冲噪声状况选定合适的虚警概率,从而确定一个合适的门限 T .

3.3 确定脉冲噪声支撑集

当根据虚警概率得到了脉冲噪声的门限值后,可以对粗估的脉冲噪声进行限幅处理,从而得到粗估脉冲噪声支撑集合.对脉冲噪声支撑集进行估计时,首先需要根据接收信号对式(18)中的 μ_x 进行计算.为了便于计算,使用采样平均值代替 μ_x 的统计平均值,具体计算方法如下:

$$\mu_x = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |r_n| \quad (20)$$

式中 N 是接收信号的个数.该采样平均值随实际采样信号幅度的变化而变化,因此该门限是一个自适应

的门限值.粗估的脉冲可以用如下方法进行处理:

$$\hat{i}_{cs} = \begin{cases} \hat{i}_{cs}, & |\hat{i}_{cs}| > T \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (21)$$

根据处理后的脉冲噪声,可以得到脉冲噪声的支撑集,

$$\hat{\mathbf{I}} = \{n: \hat{i}_{cs}[n] \neq 0\} n=0, 1, \dots, N-1 \quad (22)$$

3.4 脉冲噪声幅度估计

由式(22)得到脉冲噪声的支撑集后,可以根据式(10)采用最小二乘的方法重构脉冲噪声的幅度.令 $\mathbf{F}_2 = [\boldsymbol{\varphi}_1, \boldsymbol{\varphi}_2, \dots, \boldsymbol{\varphi}_{N-1}]$, $\boldsymbol{\varphi}_j$ 表示一个 $M \times 1$ 向量,同时令 \mathbf{A}_{cs} 表示由列向量 $\{\boldsymbol{\varphi}_j: j \in \hat{\mathbf{I}}\}$ 所构成的子矩阵,式(10)可以改写成:

$$\mathbf{y}' = \mathbf{A}_{cs} \cdot \hat{\mathbf{i}} + \tilde{\mathbf{n}} \quad (23)$$

其中, $\hat{\mathbf{i}}$ 是一个 $M \times 1$ 的脉冲幅度向量,其非零值由支撑集 $\hat{\mathbf{I}}$ 确定.应用最小二乘方法重构脉冲噪声的最优幅度如下:

$$\hat{\mathbf{i}} = (\mathbf{A}_{cs}^H \cdot \mathbf{A}_{cs})^{-1} \mathbf{A}_{cs}^H \cdot \mathbf{y}' \quad (24)$$

通过式(24),可以得到精确的脉冲噪声估计.最后,将估计的脉冲噪声从接收的OFDM信号中减去,可以得到纯净的OFDM信号.

4 仿真结果及性能分析

4.1 仿真参数设置

在这一节中,对本文提出的基于压缩感知和虚警概率的去噪方法进行仿真. OFDM的数据块长度为1024,所以FFT的大小也为1024,数据子载波的个数为97,采用共轭对称的方式进行调制,所以总的的数据子载波的个数为194,零载波的个数为830,信号调制的方式为4PSK.虚警概率取0.95,对应的 $p=4.12$.在仿真过程中,本文重点关注噪声抑制方法的性能,不考虑电力信道对噪声抑制过程的影响.脉冲噪声模型采用第2节所述的伯努力高斯脉冲噪声模型.脉冲噪声的发生概率为 $p=0.015$, $\text{SINR}=26 \text{ dBm}$, $\epsilon=0.6\sigma_w^2$.在脉冲噪声发生的过程中始终产生高斯白噪声,高斯白噪声的大小由具体的信噪比确定.

4.2 提出算法与非线性脉冲噪声抑制算法比较

为了将提出的脉冲噪声抑制算法与其他噪声抑制方法进行对比,本文给出了OFDM电力线通信中非线性噪声抑制算法的仿真结果,主要包括自适应消隐去噪、限幅去噪以及限幅消隐相联合的混合去噪算法,图3比较了在不同信噪比条件下不同脉冲噪声抑制算法的性能.从图中很容易看出,当电力线

信道中只存在高斯白噪声时,系统表现出最佳性能.在没有采用去噪算法对噪声进行抑制时,系统的比特误码率最高,此时脉冲噪声对通信系统的影响非常严重,系统基本不能进行工作.由于限幅消隐相联合的混合去噪算法结合了限幅和消隐方法的优点,因此该去噪算法具有比单独使用限幅和消隐算法的更好性能.所有非线性去噪算法需要根据噪声的实际情况确定限幅或消隐门限,或者需要预先知道噪声的特征参数,比如方差等,这在实际通信中是很难实现的.从图中还可以看出,当信噪比大小超过一定门限时,提出的基于压缩感知和虚警概率的去噪算法明显优于其他非线性去噪算法.产生这一情况的原因可以解释如下:首先,提出的去噪算法不需要根据实际测试对限幅门限进行确定,其每次估计均是根据实际的脉冲噪声进行估计,噪声的时变特性对输出的误比特率影响不大.其次,和非线性噪声抑制算法相比,提出的算法在通信过程中不会对接收信号产生相位或者幅度失真,该算法能防止接收信号被二次干扰,因此,提出的噪声抑制算法具有比非线性噪声抑制算法更好的性能.

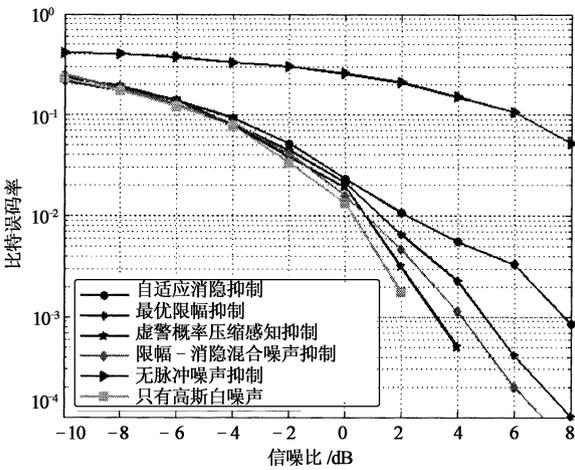


图3 提出算法与非线性脉冲噪声抑制算法比较
Fig. 3 The comparison of the proposed algorithm and the nonlinear IN suppression algorithms

4.3 不同压缩感知脉冲噪声抑制算法比较

图4比较了基于压缩感知和虚警概率的去噪算法与其它压缩感知去噪算法的不同性能.从图中可以看出,当采用3种压缩感知方法(基于压缩感知和虚警概率算法、自适应门限压缩感知算法以及基于MAP矩阵的压缩感知算法)进行去噪以后,系统的误码率相比于无噪声抑制的情况已大大降低,这说明使用压缩感知的方法确实能够对脉冲噪声得到有

效的抑制.在信噪比超过一定门限值(-2 dB)时,提出的算法以及自适应门限的压缩感知算法的去噪性能优于基于MAP矩阵的压缩感知算法.产生该现象的原因主要是因为基于MAP的压缩感知算法使用噪声的概率 p 与脉冲数量 N 的乘积 $N \cdot p$ 对脉冲的稀疏度进行估计.而在实际电力线信道中,噪声是时变的,脉冲噪声的稀疏度将不是一个固定的值,用一个固定的 $N \cdot p$ 值代替脉冲噪声的稀疏度是不准确的,一旦 $N \cdot p$ 的值超过脉冲噪声的稀疏度,使用压缩感知进行噪声估计将使接收信号的错误率大大增加.提出的算法以及自适应门限压缩感知算法根据噪声的实际情况确定噪声的稀疏度,能够准确的估计脉冲噪声的稀疏度,因此能在接收端精确的对脉冲噪声进行重构.从图中可以看出,这两种压缩感知去噪算法所得到的性能基本相当.为了获取粗估脉冲噪声的支撑集,自适应门限压缩感知算法需要知道噪声的特征参数,如背景噪声和脉冲噪声的方差,这些参数在实际测试中是很难得到的,这使得该方法的应用受到了很大的限制.而提出的算法不需要知道噪声的特征参数,只需满足调制的子载波数量足够大就可以,在宽带电力线通信中,这个条件是很容易满足的,因而该方法将是一种简便而有效的脉冲噪声抑制方法.

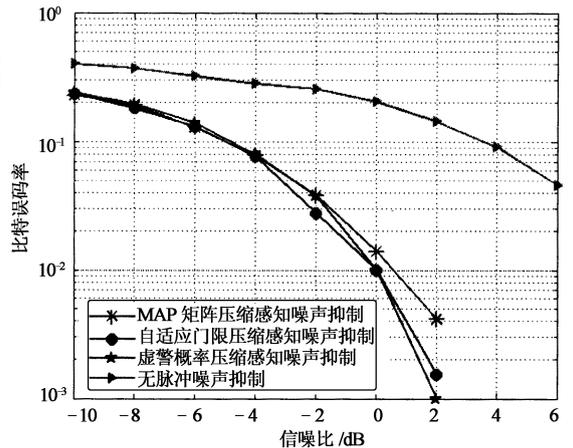


图4 不同压缩感知脉冲噪声抑制算法比较
Fig. 4 The comparison of different IN suppression algorithms based on compressed sensing

5 总结

论文提出了一种基于压缩感知和虚警概率的电力线脉冲噪声抑制算法,该算法能简单有效的去除

宽带电力线上的异步脉冲噪声. 首先,使用基追踪降噪的方法对投影在 OFDM 零子载波上的脉冲噪声进行粗估计,然后,根据虚警概率的原理设计脉冲噪声限幅门限,根据限幅门限确定粗估计脉冲噪声的支撑集,从而滤出脉冲噪声中的高斯白噪声. 最后,根据估计的脉冲噪声支撑集,使用最小二乘的方法对支撑集上的脉冲噪声进行幅度估计,准确重构脉冲噪声,将重构的脉冲噪声从接收信号中减去. 提出的算法联合了虚警概率和压缩感知的优点,在没有脉冲噪声特征参数的情况下,可以使用 OFDM 的零载波对脉冲噪声进行估计. 该算法的去噪性能优于传统的非线性脉冲噪声抑制算法,和自适应压缩感知算法相比,该方法不需要脉冲噪声的特征参数信息,在宽带电力线通信具有广泛的应用前景.

参考文献

- [1] PIANTE M D, TONELLO A M. On impedance matching in a power-line-communication system[J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems II Express Briefs, 2016, 63(7):653-657.
- [2] LLANO A, ANGULO I, ANGUEIRA P, *et al.* Analysis of the channel influence to power line communications based on ITU-T G.9904 (PRIME)[J]. Energies, 2016, 9(1):39.
- [3] HIMEUR Y, BOUKABOU A. Robust image transmission over powerline channel with impulse noise [J]. Multimedia Tools & Applications, 2017, 76(2):1-23.
- [4] 谷志茹, 刘宏立, 谭周文, 等. 基于实测电力噪声分布的窄带电力噪声建模[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(2):81-86.
GU Zhiru, LIU Hongli, TAN Zhouwen, *et al.* Modeling narrow-band power line noise based on distribution of field noise measurement[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2015, 42(2):81-86. (In Chinese)
- [5] JUWONO F H, GUO Q, CHEN Y, *et al.* Linear combining of nonlinear preprocessors for OFDM-based power-line communications[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(1):253-260.
- [6] ZHANG H, YANG L L, HANZO L. Compressed impairment sensing-assisted and interleaved-double-FFT-aided modulation improves broadband power line communications subjected to asynchronous impulsive noise[J]. IEEE Access, 2015, 99(4):81-96.
- [7] TSENG D F, YANG R B, TSAI T R, *et al.* Efficient clipping for broadband power line systems in impulsive noise environment[C]// IEEE International Symposium on Power Line Communications and ITS Applications. IEEE, 2012:362-367.
- [8] KORKI M, HOSSEINZADEH N, MOAZZENI T. Performance evaluation of a narrowband power line communication for smart grid with noise reduction technique[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2012, 57(4):1598-1606.
- [9] ANDREADOU N, PAVLIDOU F N. Mitigation of impulsive noise effect on the PLC Channel With QC-LDPC codes as the outer coding scheme[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(3):1440-1449.
- [10] ANDREADOU N, TONELLO A M. On the mitigation of impulsive noise in power-line communications with LT codes[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3):1483-1490.
- [11] NDO G, SIOHAN P, HAMON M. Adaptive noise mitigation in impulsive environment: application to power-line communications[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(2):647-656.
- [12] ZHIDKOV S V. Impulsive noise suppression in OFDM-based communication systems[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2003, 49(4):944-948.
- [13] CANDES E J, WAKIN M B. An introduction to compressive sampling[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2008, 25(2):21-30.
- [14] NAFFOURI T Y, SHAALAN F F, QUADEER A A, *et al.* Impulsive noise estimation and cancellation in DSL using compressive sampling[C]// IEEE International Symposium on Circuits and Systems. IEEE, 2011:2133-2136.
- [15] MEHBOOB A, LI Z, KHANGOSSTAR J. Adaptive impulsive noise mitigation using multi mode compressive sensing for powerline communications[C]// IEEE International Symposium on Power Line Communications and ITS Applications. IEEE, 2012:368-373.
- [16] REN G, QIAO S, YONG H. Asynchronous impulsive noise mitigation in OFDM using adaptive threshold compressive sensing[C]// Wireless and Microwave Technology Conference. IEEE, 2014:1-5.
- [17] RABIE K M, ALSUSAE E. On improving communication robustness in PLC systems for more reliable smart grid applications[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(6):2746-2756.
- [18] SHRESTHA D, MESTRE X, PAYARO M. Asynchronous impulsive noise mitigation based on subspace support estimation for PLC systems[C]// International Symposium on Power Line Communications and ITS Applications. IEEE, 2016:1-6.
- [19] LIU S, YANG F, DING W, *et al.* Double kill: compressive-sensing-based narrow-band interference and impulsive noise mitigation for vehicular communications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(7):5099-5109.
- [20] 张汗灵, 李红英, 周敏. 融合多特征和压缩感知的手势识别[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2013, 40(3):87-92.
ZHANG Hanling, LI Hongying, ZHOU Min. Hand posture recognition based on multi-feature and compressive sensing [J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2013, 40(3):87-92. (In Chinese)
- [21] CHEN S S, DONOHO D L, SAUNDERS M A. Atomic decomposition by basis pursuit[J]. Siam Review, 2001, 43(1):129-159.