



研究与开发

基于改进变分模态分解的电力线宽带载波通信干扰耦合协同抑制方法

董丹丹, 孙宁

(国网河南省电力公司安阳供电公司, 河南 安阳 455000)

摘要: 电力线宽带载波通信干扰耦合加重了子载波间的频域拖尾, 降低了抑制方法的敏感性, 通信质量较差, 对此, 提出了基于改进变分模态分解的电力线宽带载波通信干扰耦合协同抑制方法。以电力线宽带载波通信的信道特性为基础, 建立了存在多径传播和多普勒效应的通信信道模型, 模拟发出通信信号, 利用改进变分模态分解算法预处理原始信号, 将抑制问题转化为变分问题, 同时以非约束性变分问题的离散形式表示信号, 对变分问题不断更新, 完成对信号的分离处理, 实现对通信干扰的协同抑制。实验结果表明, 所提方法在应用过程中, 误比特率低、频率偏移小, 抑制过程的敏感性得到了提高, 具有实际应用价值。

关键词: 变分模态分解; 电力线带宽; 载波通信; 干扰; 耦合; 协同抑制

中图分类号: TM73

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2023084

Interference coupling cooperative suppression method for wideband carrier communication based on improved variational mode decomposition

DONG Dandan, SUN Ning

Anyang Power Supply Company of State Grid Henan Electric Power Company, Anyang 455000, China

Abstract: The interference coupling of power line broadband carrier communication aggravates the frequency domain tailing between subcarriers, reduces the sensitivity of suppression methods, and the communication quality is poor. Therefore, a cooperative suppression method of interference coupling of power line broadband carrier communication based on improved variational modal decomposition was proposed. Based on the channel characteristics of power line broadband carrier communication, a communication channel model with multipath propagation and Doppler effect was established, the communication signal was simulated, the original signal was preprocessed by using the improved variational modal decomposition algorithm, and the suppression problem was transformed into a variational problem. At the same time, the signal was expressed in the discrete form of unconstrained variational problem. The variational problem was continuously updated to complete the separation and processing of the signal, and realize the cooperative suppression of communication interference. The exper-



rimental results show that the proposed method has low bit error rate, small frequency offset, and practical application value.

Key words: variational modal decomposition, power line bandwidth, carrier communication, interference, coupling, cooperative suppression

0 引言

电力线宽带载波通信环境中存在大量干扰,严重影响通信质量,除此之外,复杂的网络结构和繁多的负载类型^[1-3],也是干扰通信质量的重要因素^[4-6]。因此,研究电力线宽带载波通信干扰抑制方法是信息宽带传输的重点内容。

在目前的研究中,对于电力线宽带载波通信干扰抑制技术,在国内外均有成熟的资料和文献,例如,相关学者研究了信道估计误差和子载波相关性的影响^[7-8],在保证良好的信道估计的情况下,混合检测方案的性能优于纯 MMSE。在慢衰落信道中,期望信道估计窗口大小与时域扩展因子 $N_{\text{sub-T}}$ 有关。尽管存在子载波相关的情况下混合检测的性能下降,即使相关系数高达 0.7,混合检测仍然工作良好。当频域扩展因子 $N_{\text{sub-F}}$ 增加时,性能有所提高,但对于大的 $N_{\text{sub-F}}$ 值,频率分集增益几乎饱和。但是在时域和频域中进行二维扩展时,多普勒频偏、多径时延及多径信道复增益等参数处理过程不明确,不可直接应用移动通信系统中的相关成果。而不同国家的研究内容更符合本国的配电网环境。国外更注重宽带信道的多导体传输,国内则是从信道特性出发,研究更实用的干扰抑制方法。如文献[9]提到的抑制方法,主要利用子空间算法处理目标信号,构建相关函数,同时估计噪声和干扰的概率密度分布函数,将两者结合在一起,优化抗干扰门限,实现干扰抑制,在简单的环境中,该方法十分有效,但是在复杂的网络环境中,子载波间的频域拖尾加重,抑制方法很难完全发挥自身的性能,存在敏感性差的问题。文献[10]提到的基于压缩感知的抑制方法中存在类似问题,该方法利用对噪

声分量的压缩对噪声进行重构,减去有效子载波上的脉冲噪声,从而达到抑制的效果,在整个过程中,同样会加重子载波间的频域拖尾,降低抑制方法的敏感度,达不到理想的抑制效果。

因此,提出基于改进变分模态分解的电力线宽带载波通信干扰耦合协同抑制方法,创新性地应用改进变分模态分解算法将抑制问题转化为变分问题,分离多分量信号,引入拉格朗日乘子,将各个子信道的数据通过串并变换为子数据流,不断更新信号分量,协同抑制电力线宽带载波通信干扰因子。

1 协同抑制方法

1.1 通信信道模型建立

电力线宽带载波通信的信道质量对通信质量有较大的影响,而能够对信号质量产生影响的干扰因子有很多,主要是多普勒效应和多径传播^[11-13]。因此,在建立电力线宽带载波通信信道模型时,将上述特点与模型相结合。由此建立的通信信道模型为:

$$h(t, \alpha) = \sum_{i=1}^L c_i(t) e^{j(2\pi f_i(t)t + \varphi_i(t))} \chi(\alpha - \alpha_i(t)) \quad (1)$$

其中, L 表示信道中的多径数, $\alpha_i(t)$ 表示路径上的时延, α 表示时延, i 表示路径, t 表示时刻, $f_i(t)$ 表示多普勒频率, $c_i(t)$ 表示幅度衰落, $\varphi_i(t)$ 表示附加相位, α_i 表示多径时延^[14]。假设信道不变,则电力线宽带载波通信信道表示为:

$$h(\alpha) = \sum_{i=1}^L c_i e^{j\varphi_i} \chi(\alpha - \alpha_i) \quad (2)$$

其中:

$$\varphi_i = 2\pi f_i t + \varphi_i \quad (3)$$

其中, 路径 i 的复数衰落为 $h_i = c_i e^{j\phi_i}$ 。利用计算机软件模拟通信信道, 同时将真实的电力宽带载波通信环境作为依据, 模拟干扰因子 (如噪声调制类干扰、单音干扰和多音干扰、梳状谱干扰等), 将通信信道置于干扰环境中, 发送载波通信信号。考虑电力线宽带载波通信高速的特点, 信道往往被分成多个正交子信道, 以并联的方式进行传输工作, 在处理这些干扰因子时就需要采用协同抑制手段, 避免多径传输干扰通信效果。因此, 将上述内容作为后续分析处理过程中所采用的通信信道模型, 使用改进变分模态分解算法处理通信信号。

1.2 通信信号预处理

由通过上述过程建立的通信信道模型产生发出通信信号, 为了抑制通信中的干扰因子, 采用改进变分模态分解算法预处理通信信号。在通信过程中, 信号可能来自不同路径, 产生的干扰问题对通信信号产生了非常严重的破坏, 在预处理通信信号前, 对信道进行正交性划分, 获得多个子信道, 通过调制技术处理各个子信道中的数据, 增加子信道中的符号周期, 降低干扰因子对信道的不利影响, 再对原始信号进行预处理, 得到通信信号的非线性调频模态。表达式为:

$$g(t) = a(t) \cos \left(2\pi \int_0^t f(s) ds + \phi \right) \quad (4)$$

其中, $a(t)$ 表示 $g(t)$ 的瞬时幅度, 在整个处理过程中, 始终大于 0; $f(s)$ 表示瞬时频率, 同样大于 0; ϕ 表示 $g(t)$ 的初始相位^[15]。

在实际通信过程中, 由于第 0 级信道编码上的数据是必需的, 所以存在干扰因子、遍历的功率和信道衰落损失, 对于估计的信道衰落, 信号中不仅包含多个模态, 还存在一定水平的高斯白噪声, 分析第 0 级信道编码的子载波, 生成干扰数据, 此时, 设目标信号中包含了 K 个模态, 混叠状态下的载波通信信号受干扰模型为:

$$x(t) = \sum_{i=1}^K a_i(t) \cos \left(2\pi \int_0^t f_i(s) ds + \phi_i \right) + n(t) \quad (5)$$

其中, $n(t)$ 表示高斯白噪声, 为干扰项;

$i=1, 2, \dots, K$; $f_i(s)$ 表示单音干扰和多音干扰频率; ϕ_i 表示初始梳状谱信号快衰落因子。1 个干扰因子存在于多个模态中, 迭代得到的中心频率也会重叠, 进入信号的预处理过程, 即对其数学表达式的解析过程。利用改进变分模态分解算法对其进行解析, 解析处理完成后, 得到:

$$g_A(t) = a(t) \exp \left(j \left(2\pi \int_0^t f(s) ds + \phi_0 \right) \right) \quad (6)$$

定义信号的解调算子为:

$$D(t) = \exp \left(-j 2\pi \left(\int_0^t f_d(s) ds - f_c t \right) \right) \quad (7)$$

调制算子为:

$$M(t) = \exp \left(j 2\pi \left(\int_0^t f_d(s) ds - f_c t \right) \right) \quad (8)$$

当调制算子的瞬时频率 $f_d(t)$ 与 $f(t)$ 相等时, 利用解调算子将解析信号 $g_A(t)$ 调制到频载附近:

$$g_A^d(t) = g_A(t) D(t) \quad (9)$$

根据调制和解调过程, 将式 (5) 转化为:

$$x(t) = \sum_{i=1}^K u_i(t) \cos \left(2\pi \int_0^t f_i(s) ds \right) + v_i(t) \cos \left(2\pi \int_0^t f_i(s) ds \right) + n(t) \quad (10)$$

其中, $u_i(t)$ 和 $v_i(t)$ 表示解调信号。经过上述过程, 原始通信信号转变为包含多个模态的多分量信号, 根据解调信号的二阶导数估计出原始信号的带宽, 将干扰抑制问题转化为变分问题。

1.3 基于改进变分模态分解的通信信号分离处理

对于处理后的信号, 其约束性变分问题的离散形式表示为:

$$\begin{aligned} \min_{\{u_i\}, \{v_i\}, \{f_i\}} & \sum_{i=1}^K \left(\|\Omega u_i\|_2^2 + \|\Omega v_i\|_2^2 \right) \\ \text{s.t.} & \left\| g - \sum_{i=1}^K (P_i u_i + Q_i v_i) \right\|_2 \leq \omega \end{aligned} \quad (11)$$

其中, ω 表示信号的上界, 由干扰的强度决定, P_i



和 Q_i 的表达式为:

$$P_i = \text{diag}[\cos(\varphi_i(t_0)) \cdots \cos(\varphi_i(t_{N-1}))] \quad (12)$$

$$Q_i = \text{diag}[\sin(\varphi_i(t_0)) \cdots \sin(\varphi_i(t_{N-1}))] \quad (13)$$

其中, Ω 表示修正二阶差分算子, 表达式为:

$$\Omega = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & \cdots & 1 & -2 & 1 \\ 0 & \cdots & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

利用改进变分模态分解的求解原理, 将干扰抑制问题转变为非约束性问题。表达式为:

$$L_a(\{u_i\}, \{v_i\}, \{f_i\}, m, \lambda) = \sum_{i=1} \left(\|\Omega u_i\|_2^2 + \|\Omega v_i\|_2^2 \right) + \frac{\alpha}{2} \left\| m + \sum_{i=1} (P_i u_i + Q_i v_i) - g + \frac{\lambda}{\alpha} \right\|_2^2 - \frac{1}{2\alpha} \|\lambda\|_2^2 \quad (15)$$

其中, λ 表示拉格朗日乘子, m 表示噪声, α 表示惩罚因子。求解 L_a 的最小值, 初始化各项参数, 令 $i = i + 1$, 更新 u_i 、 v_i 、 g_i 和 f_i , 重复上述过程中, 直到 i 等于信号包含的模态个数 K 。利用式 (16) 更新 λ^{k+1} :

$$\lambda^{k+1} = \lambda^k + \alpha \left(m^{k+1} + \sum g_i^{k+1} - g \right) \quad (16)$$

初始化 $\lambda^{k+1} = 0$, $i = 0$, 令 $i = i + 1$, 更新 u_i^{k+1} 、 v_i^{k+1} , 重复上述过程, 直到 $i = K$, 完成信号的分离处理, 对变分问题进行求解, 完成对多分量信号的分离处理, 达到抑制干扰耦合的目的, 同时将各个子信道的数据通过串并变换为子数据流, 分别调制到子载波中, 实现通信干扰耦合的协同抑制。

2 实验仿真与分析

2.1 实验仿真模型

在电力线宽带载波通信干扰耦合协同抑制方法设计完成后, 在 MATLAB 平台上设计实验方案, 对抑制方法产生的作用进行仿真, 设置实验帧数为 1 000, 实验仿真模型如图 1 所示。

图 1 中 S 表示源节点, D 表示目的节点, R1

和 R2 表示中继节点, 在转发信号时, 采用统一的方式, 避免影响实验结果。为了达到理想的实验效果, 假设模型内节点之间的信道环境是理想的, 并且中继节点能够正确解码发送的信号, 在此基础上, 设计统一的实验参数。实验参数设置见表 1。

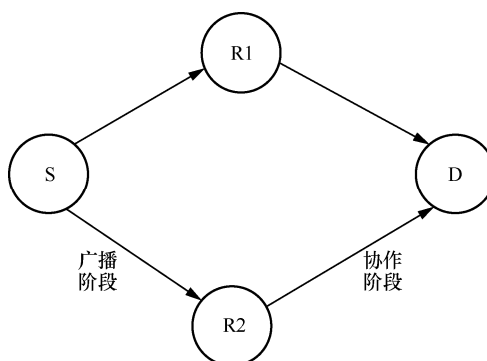


图 1 实验仿真模型

表 1 实验参数设置

编号	相关参数	参数值
1	子载波数	64
2	FFT 点数	128
3	信道多径数	8
4	最大多普勒频移	50 Hz
5	载波频率	900 MHz
6	有效距离理论值	1 km
7	子载波间隔	15 kHz
8	循环前缀	16
9	调制方式	BPSK
10	相关编码	1-D

在参数设置完成后, 设计两组实验, 分别是信号频率偏移实验和通信信号的比特误差实验, 通过这两组实验验证抑制方法的敏感性。

2.2 信号频率偏移实验

电力线宽带载波通信在受到干扰的情况下, 会改变接收信号的幅度和相位, 破坏载波间的正交性。针对这一问题, 设计信号频率偏移实验, 以二进制相移键控 (binary phase shift keying, BPSK) 的方式对信号进行调制, 默认信噪比为 20 dB, 载波数为 64, 以与矢量方向相同的信号分量为同相分量, 以与矢量信号正交 (与同相分量相互垂直) 的信号分

量为正交分量，一一对应于接收信号频率，在归一化频偏下对经过抑制处理的接收信号进行判决。

实验为对比实验，引入的抑制方法有基于压缩感知的抑制方法和利用子空间算法的抑制方法。得到的接收信号频率偏移实验结果如图2所示。

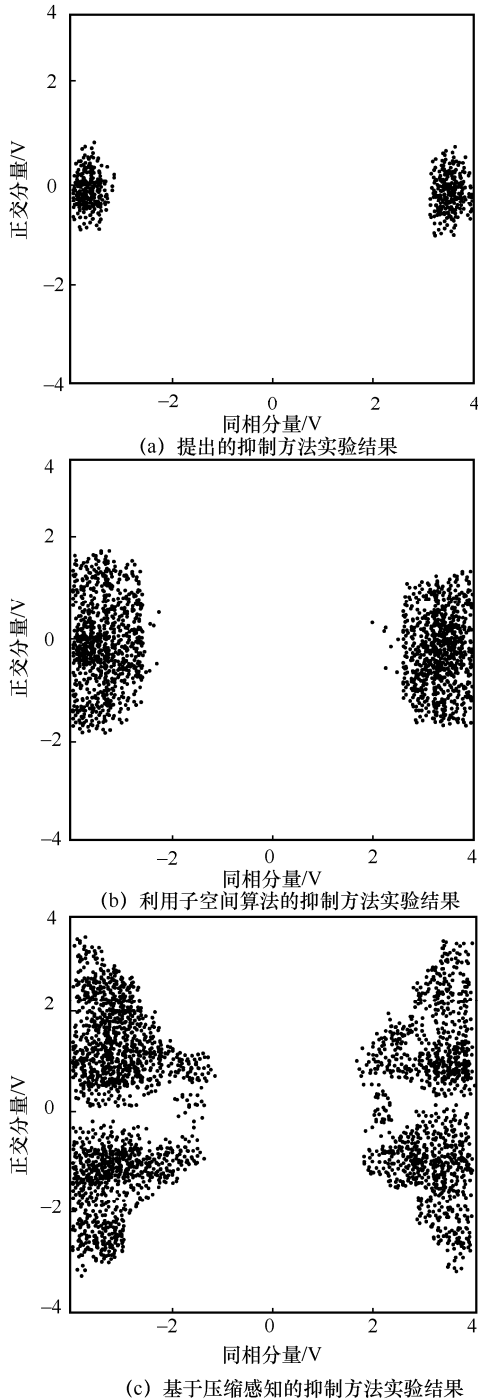


图2 接收信号频率偏移实验结果

观察图2中实验结果可知，图2(a)显示的实验结果中，接收信号落点比较集中，说明信号在传输和处理过程中能够完全恢复，不会影响通信效果；图2(b)和图2(c)接收信号落点分散且杂糅在一起，严重影响通信接收端对信号的正确恢复，由此可知，实验所使用的3种抑制方法，原始信号经过提出的抑制方法处理后，信号的频率偏移程度非常小，在实际环境中能够保证信号的完整性，另外两种抑制方法在实验中接收信号频率偏移较大，也很难保证原始信号的完整性。

2.3 干扰抑制性能实验

使用不同的抑制方法处理电力线宽带载波通信干扰信息，在处理完成后，利用计算机软件统计抑制方法的误比特率(bit error ratio, BER)，绘制误比特率曲线，同时针对载波通信的特点，计算不同抑制方法的载波干扰比(carrier to interference ratio, CIR)，通过这两个实验指标分析抑制方法的处理性能。误比特率和载波干扰比的计算式为：

$$\text{BER} = \frac{b_s}{B} \times 100\% \quad (17)$$

$$\text{CIR} = \frac{S}{I} \quad (18)$$

其中， b_s 表示错误比特数，单位为bit； B 表示传输的总比特数，单位为bit； S 表示信号功率，单位为W； I 表示干扰功率，单位为W。经过计算和统计，不同抑制方法的BER和CIR实验结果如图3所示。

图3中，方法1表示提出的抑制方法，方法2表示基于压缩感知的抑制方法，方法3表示利用子空间算法的抑制方法，其BER越小、CIR越小，说明抑制效果越好。通过图3中显示的两组实验结果可知，在BER实验结果中，所提抑制方法误比特率曲线要明显低于另外两组结果，说明所提方法能够较好地抑制通信干扰，改善电力线宽带载波通信环境。在CIR实验结果中，所提抑制方



法载波干扰比在 15 dB 以下,这是因为增加子信道中的符号周期降低了干扰因子对信道的不利影响;并且,分离处理多分量信号将干扰抑制问题转变为非约束性问题的同时,引入了拉格朗日乘子,所提方法降低了载波通信干扰的影响,抑制效果明显。综上所述,提出的基于改进变分模态分解的干扰耦合协同抑制方法在实际应用上抑制效果更好,频率偏移小、误比特率低,整体性能优于常规的抑制方法,敏感性更强。

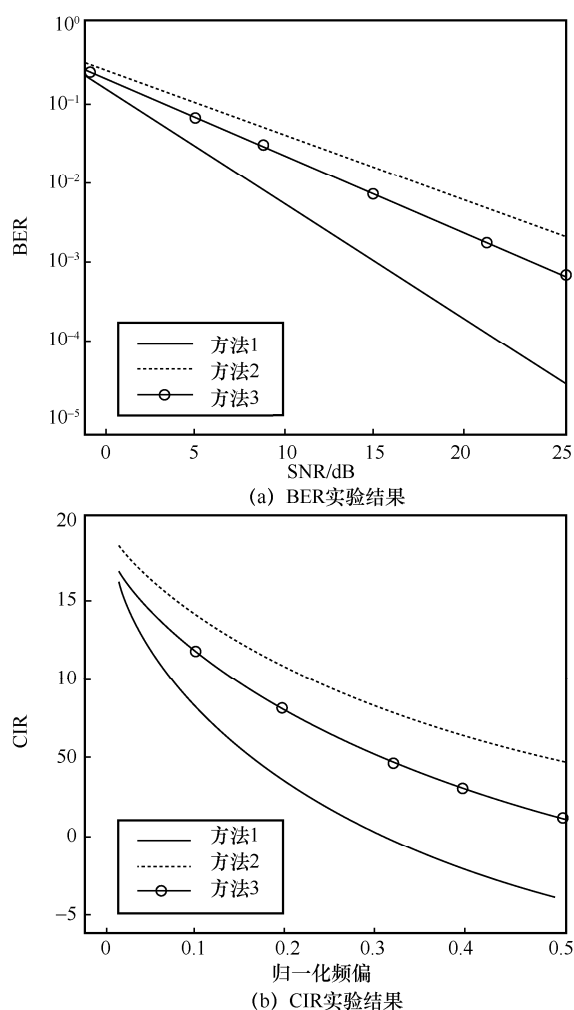


图3 不同抑制方法的 BER 和 CIR 实验结果

3 结束语

本文将改进变分模态分解技术引入电力线载波通信中,设计通信干扰耦合协同抑制方法,强

化通信质量,具有高水平的敏感性,协同抑制性能有了进一步的提高,协同效果明显。

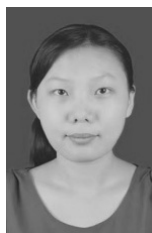
但是受时间、技术水平的限制,本文在研究中假设的信道十分理想,只重点研究了干扰协同抑制问题,还有许多内容没有完善,因此,在后续研究中,针对不理想信道的情况展开更细致的探讨与分析,分析不理想信道对电力线宽带载波通信的影响,完善干扰抑制方法。

参考文献:

- [1] 石智永,侯尽然,管晓峰,等. 电力线宽带载波通信干扰过滤技术研究[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(7): 75-80.
SHI Z Y, HOU J R, GUAN X F, et al. Research on interference filtering technology of power line broadband carrier communication[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2020, 36(7): 75-80.
- [2] 金鑫,肖勇,曾勇刚,等. 低压电力线宽带载波通信信道建模及误差补偿[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(9): 2800-2808.
JIN X, XIAO Y, ZENG Y G, et al. Channel modeling and error compensation of low-voltage power line broadband carrier communication[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2800-2808.
- [3] 王清,荆臻,李琮琮,等. 宽带电力线载波通信物理层资源分配新算法[J]. 电测与仪表, 2021, 58(7): 124-129.
WANG Q, JING Z, LI C C, et al. A novel algorithm of physical layer resource allocation for broadband power line carrier communication[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(7): 124-129.
- [4] 韩伟,叶俊君,肖超,等. 考虑电压无功耦合特性的多馈入系统换相失败预防控制方法[J]. 电工电能新技术, 2022, 41(3): 63-71.
HAN W, YE J J, XIAO C, et al. Prevention and control method of commutation failure in MIDC considering voltage and reactive power coupling characteristics[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2022, 41(3): 63-71.
- [5] 杨挺,何子阳,孙兆帅,等. 面向并发多业务的宽带电力线载波通信跨层资源分配算法研究[J]. 电网技术, 2021, 45(8): 3257-3267.
YANG T, HE Z Y, SUN Z S, et al. Research on cross-layer resource allocation algorithm of broadband power line carrier communication for concurrent multi-service[J]. Power System Technology, 2021, 45(8): 3257-3267.
- [6] 潘鹏宇,胡海涛,肖冬华,等. 高速列车变流器“扫频式”

- dq 阻抗测量中的频率耦合干扰机理及抑制策略[J]. 电工技术学报, 2022, 37(4): 990-999, 1009.
- PAN P Y, HU H T, XIAO D H, et al. Frequency coupling interference mechanism and suppression strategy for frequency-sweeping-based dq impedance measurement of high-speed train converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(4): 990-999, 1009.
- [7] ZHOU Y, WANG J, SAWAHASHI M. Downlink transmission of broadband OFCDM systems—part I: hybrid detection[J]. IEEE Transactions on Communications, 2005, 53(4): 718-729.
- [8] ZHOU Y, WANG J, SAWAHASHI M. Downlink transmission of broadband OFCDM systems—part II: effect of Doppler shift[J]. IEEE Transactions on Communications, 2006, 54(6): 1097-1108.
- [9] 冯奕军, 洗庆祺. 配用电泛在业务盲区通信子载波干扰抑制方法[J]. 沈阳工业大学学报, 2021, 43(4): 378-383.
- FENG Y J, XIAN Q Q. Subcarrier interference suppression method for communication in ubiquitous service blind zone of power distribution[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2021, 43(4): 378-383.
- [10] 丁剑飞, 孙德春, 李兆刚. 基于压缩感知的电力线脉冲噪声抑制改进算法[J]. 计算机应用研究, 2020, 37(S2): 289-290.
- DING J F, SUN D C, LI Z G. Improved power line impulse noise suppression algorithm based on compressed sensing[J]. Application Research of Computers, 2020, 37(S2): 289-290.
- [11] 江守其, 李国庆, 辛业春, 等. 大规模风电接入的柔性直流电网故障电流协同抑制方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(23): 125-134.
- JIANG S Q, LI G Q, XIN Y C, et al. Coordinated suppression method for fault current of flexible DC power grid integrated with large-scale wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(23): 125-134.
- [12] 武翠霞, 张培峰, 杨军佳, 等. CMOS 神经元电路耦合同步对噪声的抑制作用[J]. 微电子学与计算机, 2021, 38(9): 105-108.
- WU C X, ZHANG P F, YANG J J, et al. The role of synchronization of CMOS neuronal circuitry in noise suppression[J]. Microelectronics & Computer, 2021, 38(9): 105-108.
- [13] 吴龙文, 聂雨亭, 张宇鹏, 等. 基于变分模态分解的自适应滤波降噪方法[J]. 电子学报, 2021, 49(8): 1457-1465.
- WU L W, NIE Y T, ZHANG Y P, et al. An adaptive filtering denoising method based on variational mode decomposition[J]. Acta Electronica Sinica, 2021, 49(8): 1457-1465.
- [14] 郭佳辉, 高一轩, 刘昌伟, 等. 基于 VMD 变分模态分解的冲击波信号时频分析[J]. 弹箭与制导学报, 2022, 42(1): 118-122.
- HUI G J, GAO Y X, LIU C W, et al. Time-frequency analysis of shock wave signals based on VMD variational mode decomposition[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2022, 42(1): 118-122.
- [15] 张友俊, 彭姚, 吴国青. 基于折叠短截线耦合理论的新型宽带带阻滤波器设计[J]. 固体电子学研究与进展, 2021, 41(3): 197-202.
- ZHANG Y J, PENG Y, WU G Q. Design of a novel wideband bandstop filter based on Coupling theory of folded stubs[J]. Research & Progress of SSE, 2021, 41(3): 197-202.

[作者简介]



董丹丹 (1986—), 女, 国网河南省电力公司安阳供电公司副高级工程师, 主要研究方向为电能计量、采集模块通信、反窃电和线损管理等。

孙宁 (1986—), 男, 国网河南省电力公司安阳供电公司工程师, 主要研究方向为电力营销、信息采集和配电抢修。