

DOI: 10.7667/PSPC170407

# 中压配电网电力线载波通信系统自适应频点选择算法

薛晨, 王艳, 焦彦军

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

**摘要:** 在电力线载波通信中应用正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术需要进行频点的优选。在分析信道输入阻抗对电压传输特性影响的基础上, 提出一种基于在线测量信道输入电抗的频点优选算法。首先在默认频点下完成通信节点的入网, 然后通过在线监测信道输入电抗筛选出部分频点, 在这些频点处测试上、下行信号强度, 通过简单计算优选频点作为子载波通道。以保定市实际中压配网为例进行仿真验证。仿真结果表明所提算法在保证通信质量前提下, 可以筛选掉大量不可用频点, 提高了频点优化速度。

**关键词:** 中压配电网; 电力线载波通信; OFDM; 频点选择; 信道特性

## Adaptive frequency selection algorithm for power line carrier communication system in medium voltage distribution network

XUE Chen, WANG Yan, JIAO Yanjun

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** Optimization of frequency points is needed for the application of Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) technology in power line carrier communication. Based on the analysis of the influence of channel input impedance on voltage transmission characteristics, a frequency selection algorithm based on on-line measurement of channel input reactance is proposed. First, the communication node network is completed under the default frequency, then partial frequency points are selected by online monitoring the channel input reactance, testing the uplink and downlink signal strength at these frequency points. Sub carrier channel frequency points are optimized after simple calculation. The simulation of the actual medium voltage distribution network in Baoding is taken as an example. The simulation results show that the proposed algorithm can filter out a large number of unavailable frequency points under the premise of guaranteeing the communication quality. Thus the frequency optimization speed is improved.

This work is supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2016MS90).

**Key words:** medium-voltage distribution network; power line carrier communication; OFDM; frequency selection; channel characteristics

## 0 引言

电力线载波通信(Power Line Communication, PLC)利用现有的电力线进行数据传输, 随着正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术的成熟, 基于 OFDM 的载波通信技术在通信速率、抗干扰能力和自适应能力等方面能够满足配电自动化的业务需求, 已成为配电自动化系统通信的重要组成成分<sup>[1-3]</sup>。

中压电力线信道特性复杂多变, 噪声和衰减等电力线信道特性具有显著的频率选择性特征<sup>[4-6]</sup>。在保定市花庄变电站 10 kV 配网出线上进行自主研发的载波装置现场测试中发现, OFDM 子载波频点的选择对通信质量影响很大, 良好的基于传输特性的 OFDM 频点选择算法是保证通信可靠性的关键。

现阶段, OFDM 子载波频点的选择大多在 OFDM 自适应调制算法中完成, 如 Hughes-Hartogs 算法<sup>[7]</sup>和 Chow 算法<sup>[8]</sup>, 这些算法均为在已知通信频点的情况下进行自适应比特功率分配和调制方式选择, 而实际配电网信道特性是时变未知的, 首先需要确定通信频点, 之后才涉及 OFDM 自适应调制算

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (2016MS90)

法。目前基于信道特性的频点识别相关文献较少, 基于子载波集的自适应 OFDM 选频算法虽然能够根据信道噪声情况选择合适的子载波<sup>[9]</sup>, 但计算较复杂。文献[10]提出一种前导序列辅助下的跨频带 OFDM 频点选择方法, 主从节点间采用逐个频点互发信号商议的模式选择较优频点, 这种方法当可选频点较多、网络规模较大时商议时间较长, 不符合配电自动化多载波节点组网以及实时数据传输的要求。

本文提出一种基于输入电抗分量的中压配电网 PLC 频点选择算法, 推导了信道电压传输特性与输入阻抗之间的关系, 给出了频点优选算法的实现步骤, 并仿真验证了频点选择算法的有效性。

## 1 信道输入阻抗对电压传输特性的影响

如图 1 所示, 粗实线表示长度为  $l_1$  的传输线, 特性阻抗为  $Z_{c1}$ , 传输常数为  $\gamma_1$ , 线路首端电压电流为  $U_1, I_1$ , 末端电压电流为  $U_l, I_l$ ,  $Z_l$  为负载阻抗,  $z=0$  为参考点, 取在线路末端负载处。

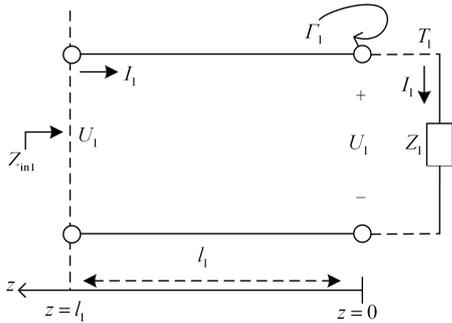


图 1 传输线端接负载

Fig. 1 Transmission line derived terminated load

由传输线方程可得末端电压  $U_l$  和首端电压  $U_1$  之比为

$$\frac{U_l}{U_1} = \frac{U_l}{U_1 \cosh(\gamma_1 l_1) + Z_{c1} I_1 \sinh(\gamma_1 l_1)} = \frac{Z_l}{Z_l \cdot \cosh(\gamma_1 \cdot l_1) + Z_{c1} \cdot \sinh(\gamma_1 \cdot l_1)} \quad (1)$$

由文献[11]知, 式(1)可整理为

$$\frac{U_l}{U_1} = \frac{(1 + \Gamma_1) \cdot e^{-\gamma_1 l_1}}{1 + \Gamma_1 \cdot e^{-2\gamma_1 l_1}} \quad (2)$$

式中,  $\Gamma_1$  是  $z=0$  处的电压反射系数,  $\Gamma_1 = \frac{Z_l - Z_{c1}}{Z_l + Z_{c1}}$ 。

线路首端输入阻抗:

$$Z_{in1} = Z_{c1} \cdot \frac{Z_l \cdot \cosh(\gamma_1 \cdot l_1) + Z_{c1} \cdot \sinh(\gamma_1 \cdot l_1)}{Z_{c1} \cdot \cosh(\gamma_1 \cdot l_1) + Z_l \cdot \sinh(\gamma_1 \cdot l_1)} \quad (3)$$

由式(1)、式(3)可得:

$$\frac{U_l}{U_1} = \frac{Z_{c1} \cdot Z_l}{Z_{c1} \cdot \cosh(\gamma_1 l_1) + Z_l \cdot \sinh(\gamma_1 l_1)} \cdot \frac{1}{Z_{in1}} \quad (4)$$

将双曲函数表达式代入式(4)整理可得:

$$\frac{U_l}{U_1} = \frac{Z_{c1} \cdot e^{-\gamma_1 l_1}}{\frac{Z_l + Z_{c1}}{2 \cdot Z_l} - \frac{Z_l - Z_{c1}}{2 \cdot Z_l} \cdot e^{-2\gamma_1 l_1}} \cdot \frac{1}{Z_{in1}} = \frac{(1 + \Gamma_1) \cdot e^{-\gamma_1 l_1}}{1 - \Gamma_1 \cdot e^{-2\gamma_1 l_1}} \cdot \frac{Z_{c1}}{Z_{in1}} \quad (5)$$

一般地, PLC 信道可表示为多段主干线路串联并带有多条分支的网络拓扑, 如图 2 所示。其中  $l_i (i=1, \dots, n)$  为主干信道各段线路长度;  $Z_{ci}, \gamma_i (i=1, \dots, n)$  为对应线路特性参数;  $Z'_{in i} (i=1, \dots, n)$  表示从各节点看后续主干信道的输入阻抗;  $Z'_{in i} (i=i=1, \dots, n-1)$  为各个分支的输入阻抗;  $Z_{Ti} (i=i=1, \dots, n-1)$  为分支所接变压器等效阻抗;  $U_i (i=1, \dots, n)$  为各节点的电压;  $\Gamma_i (i=1, \dots, n)$  为各节点电压反射系数;  $Z_{eq}$  为信道末端后续网络的等效阻抗。

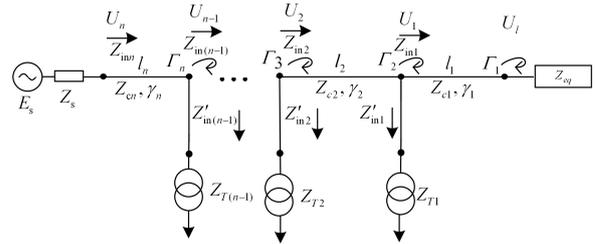


图 2 典型中压配电网拓扑图

Fig. 2 Network topology of typical medium voltage distribution

则图 2 中首末两端电压传递函数为

$$\frac{U_l}{U_n} = \frac{U_l}{U_1} \times \frac{U_1}{U_2} \times \dots \times \frac{U_{n-2}}{U_{n-1}} \times \frac{U_{n-1}}{U_n} = \frac{(1 + \Gamma_1) \cdot e^{-\gamma_1 l_1}}{1 + \Gamma_1 \cdot e^{-2\gamma_1 l_1}} \times \frac{(1 + \Gamma_2) \cdot e^{-\gamma_2 l_2}}{1 + \Gamma_2 \cdot e^{-2\gamma_2 l_2}} \times \dots \times \frac{(1 + \Gamma_{n-1}) \cdot e^{-\gamma_{n-1} l_{n-1}}}{1 + \Gamma_{n-1} \cdot e^{-2\gamma_{n-1} l_{n-1}}} \times \frac{(1 + \Gamma_n) \cdot e^{-\gamma_n l_n}}{1 - \Gamma_n \cdot e^{-2\gamma_n l_n}} \times \frac{Z_{cn}}{Z_{in n}} \quad (6)$$

式中:  $\Gamma_1 = \frac{Z_{eq} - Z_{c1}}{Z_{eq} + Z_{c1}}$ ;  $\Gamma_2 = \frac{Z_{in1} // Z'_{in1} - Z_{c2}}{Z_{in1} // Z'_{in1} + Z_{c2}}$ ; ... ;

$$\Gamma_n = \frac{Z_{in(n-1)} // Z'_{in(n-1)} - Z_{cn}}{Z_{in(n-1)} // Z'_{in(n-1)} + Z_{cn}}。$$

忽略线路的电阻与电导, 近似认为  $\gamma_i (i=1 \dots n)$

为纯虚数, 式(6)可整理为

$$\begin{aligned} \left| \frac{U_l}{U_1} \right| &= \frac{|1+\Gamma_1|}{|1+\Gamma_1 \cdot e^{-2\gamma_1 l_1}|} \times \dots \times \frac{|1+\Gamma_{n-1}|}{|1+\Gamma_{n-1} \cdot e^{-2\gamma_{n-1} l_{n-1}}|} \times \\ &\frac{|1+\Gamma_n|}{|1-\Gamma_n \cdot e^{-2\gamma_n l_n}|} \times \frac{|Z_{cn}|}{|Z_{inn}|} \geq \frac{|1+\Gamma_1|}{|1+\Gamma_1|} \times \dots \times \\ &\frac{|1+\Gamma_{n-1}|}{|1+\Gamma_{n-1}|} \times \frac{|1+\Gamma_n|}{|1+\Gamma_n|} \times \frac{|Z_{cn}|}{|Z_{inn}|} \end{aligned} \quad (7)$$

由式(7)可以看出,对于PLC信道,从首端看入的输入阻抗模值 $|Z_{inn}|$ 的减小有利于电压传输幅频特性的增大,文献[12-14]的信道特性仿真结果也支持了这一结论。实际上随着频率的改变,输入阻抗电抗分量变化比电阻分量变化更为明显,电抗分量的大小更能表明电压传输特性的衰减,故可在线监测信道输入电抗的值进行频点的优选。

## 2 基于输入电抗的中压配电网频点选择算法

### 2.1 默认频点下的通信节点入网

以型号为SM2200的OFDM载波芯片为例,阐述其频点选择过程。该芯片的通信频带范围为3~500 kHz,每间隔约5 kHz为一个通信频点,共108个可选通信频点,允许选择18个子载波信道。PLC网络为主一从网络,每个从节点都有一个已知的物理ID以及入网后由主节点分配的逻辑ID,信号由主节点向从节点传输为下行传输,反之为上行传输。为叙述简便,只考虑主节点与一个从节点之间的频点优化过程。

设定默认的初始通信频点为在3~500 kHz频带范围内均匀选取的18个频点。按如下方式在默认频点上建立主从节点之间的初始通信连接:

1) 主节点在默认频点上广播搜索节点信息。

2) 从节点在默认频点上接收信息,若接收到主节点发出的搜索信息,则在默认频点处返回请求注册信息,请求注册信息中包含自己的物理ID。

3) 主节点在默认频点上接收到从节点的请求注册信息后,根据从节点的物理ID确定从节点身份,返回给该从节点注册入网信息,给从节点分配网络中唯一的逻辑ID。

经过主从节点之间在默认频点上的初始通信,从节点完成入网过程。

### 2.2 频点优选算法

以默认频点上建立的初始通信链路为基础,按以下步骤进行频点优选:

1) 主(从)节点依次在108个可选频点上发送特定信号,监测输入信道的电压、电流,求得各频点下的输入电抗绝对值 $|X_{in1}|$ ( $|X_{in2}|$ ),以 $|X_{in1}|$ ( $|X_{in2}|$ )小于某阈值作为标准选出主(从)节点

侧较优的频点,其集合记为集 $f_{主}$ ( $f_{从}$ )。

2) 主(从)节点通过默认频点将集 $f_{主}$ ( $f_{从}$ )发送给对侧,选取 $f_{主}$ 与 $f_{从}$ 的交集 $f_{交}$ 作为预选出的待测试频点。

3) 主节点依次在 $f_{交}$ 的各个频点处向从节点发送等强度信号,从节点统计可接收到信号的频点及信号强度,将接收到信号的频点集记为向量 $f_{下行}$ 。从节点通过默认频点将 $f_{下行}$ 及其信号强度发送给主节点。

4) 从节点依次在 $f_{交}$ 的各个频点处向主节点发送等强度信号,主节点统计可以接收到的频点及信号强度,将接收到信号的频点集合记为集合 $f_{上行}$ 。

$f_{下行}$ 与 $f_{上行}$ 取交集记为 $f_{双向}$ ,则 $f_{双向}$ 中的频点为下行、上行通信均可用的频点。

5) 主节点根据 $f_{双向}$ 中的各频点上、下行信号强度优选出18个通信频点作为该主一从节点之间的通信信道,并通过默认频点告知从节点,频点优选过程完成。

若 $f_{双向}$ 中频点个数 $n$ 大于18,则依次计算 $f_{双向}$ 中各频点处的频点质量 $Q_i$ :

$$Q_i = 0.7Q_{上i} + 0.3Q_{下i}, \quad i=1,2,\dots,n \quad (8)$$

式(8)中, $Q_{上i}$ 、 $Q_{下i}$ 分别为 $f_{双向}$ 中第 $i$ 个频点的上行、下行信号强度,上行信号强度权重0.7,下行信号强度权重0.3,主要考虑到正常运行情况下上行数据帧长度大于下行命令帧长度,上行数据流量大于下行数据流量<sup>[15]</sup>,故对上行链路的信道质量要求更高。实际应用中可根据上、下行通信传输信息量及在线监测的上、下行通信质量灵活选取信号强度权重。

将频点质量 $Q_i$ 由大到小排序,优选出 $Q_i$ 值较大的18个频点。这18个频点对应的 $Q_i$ 求和可得到优选频点下的总链路质量 $Q$ 值。

若 $f_{双向}$ 中频点个数 $n$ 小于18个,则将 $f_{双向}$ 中的所有频点选为通信频点,对于剩余 $18-n$ 个载波信道,主、从节点按照信号强度优选不同频点。即在下行通信时,主节点从集合 $f_{下行}$ 减去 $f_{双向}$ 的剩余频点集中优选出下行信号强度较大的 $18-n$ 个频点;在上行通信时,从节点从集合 $f_{上行}$ 减去 $f_{双向}$ 的剩余频点集中优选出上行信号强度较大的 $18-n$ 个频点。

算法流程图如图3。

## 3 仿真实验

图4为保定市东尹庄559—花庄站531之间部分

中压配网网络拓扑图, 实线为架空线 JKLYJ-240 mm<sup>2</sup>, 虚线为电缆 YJV-22-3×240 mm<sup>2</sup>, 各段线路长度如图所示。PLC 信道模型中变压器  $Z_{Ti}$  ( $i=1, 2, \dots, 10$ ) 取恒定阻抗 500  $\Omega$  [16], 载波机内阻抗取为 75  $\Omega$ 。在节点 1 与节点 7 之间进行 PLC 通信时, 设 1 节点为主节点, 7 节点为从节点, 则节点 1→7 为下行传输, 节点 7→1 上行传输。仿真中假定载波机可接收到电压衰减值  $\geq -40$  dB 的信号, 并用电压衰减值代替信号强度。

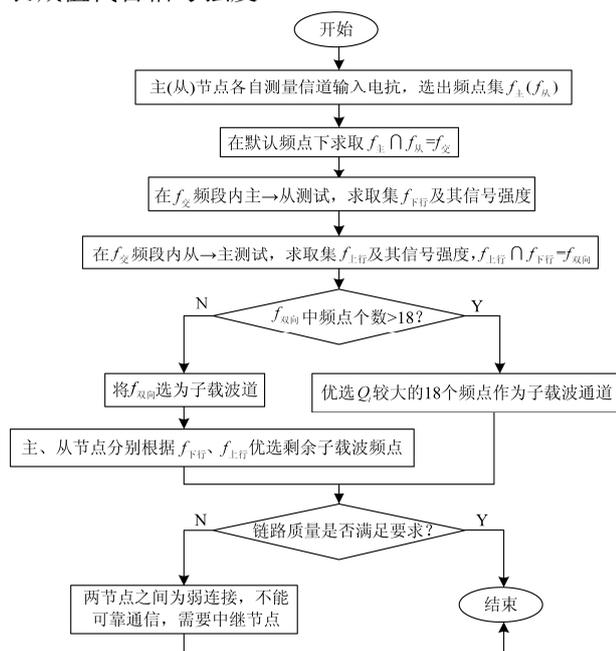


图 3 频点优选算法流程图

Fig. 3 Flow chart of frequency selection algorithm

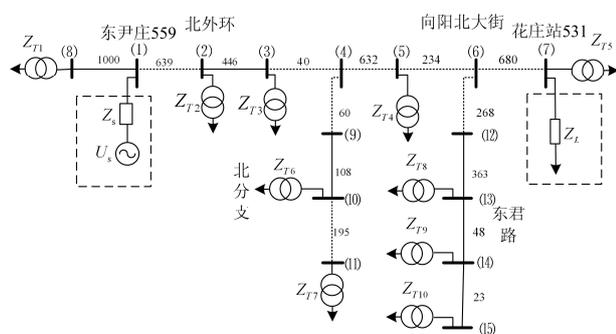


图 4 东尹庄—花庄站网络拓扑图

Fig. 4 Network topology of Dongyinzhuang—Huazhuang station

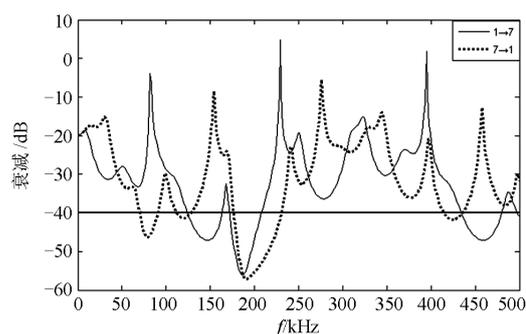
表 1 为两节点间的载波机在 3~500 kHz 频段内均选的 18 个默认频点下, 能够通信的下行、上行频点个数。可见图 4 配网中所选两节点间在 18 个默认频点中始终有若干个频点可通信, 2.1 节中使用默认频点完成主从节点之间的初始连接是可行的。

图 5 给出了考虑变电站介入损耗<sup>[17]</sup>时的节点 1 与 7 之间的传输特性, 其中电压衰减特性曲线如图 5(a), 信道输入阻抗模值如图 5(b), 输入电抗绝对值如图 5(c)。

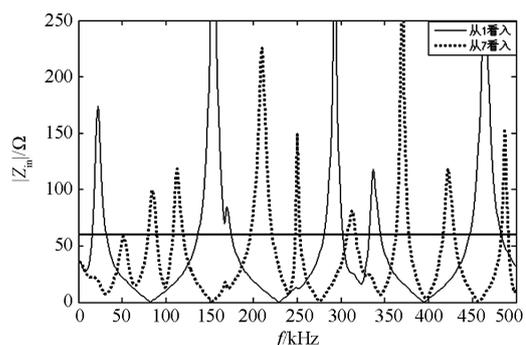
表 1 节点间在默认频点下可通信的频点个数

Table 1 Number of points to communicate in default frequency between nodes

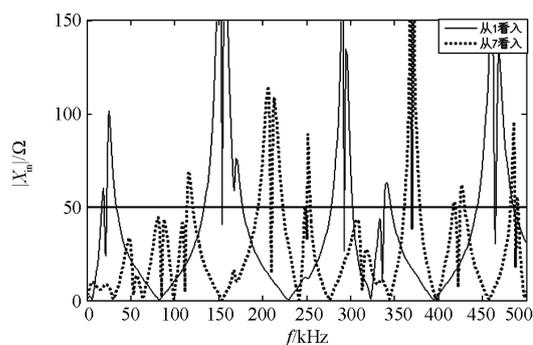
主↔从	1↔7	11↔7	2↔7	9↔14
下行、上行	14、13	16、17	13、9	17、12



(a) 电压衰减特性



(b) 信道输入阻抗



(c) 信道输入电抗

图 5 节点 1 与 7 之间的传输特性

Fig. 5 Transmission characteristics between nodes 1 and 7

由图 5 可以看出, 电压传输特性较高的频点处信道输入阻抗呈现较小值, 与之对应的电抗分量也呈现较小值, 这与第 1.2 中的理论推导是一致的。通过图 5(a)、5(c)对比可知, 电压衰减量  $\geq -40$  dB 基

本对应信道输入电抗绝对值 $\leq 50 \Omega$ ，故 2.2 节中频点优选算法 $|X_{in1}|$ 、 $|X_{in2}|$ 的阈值取为 $50 \Omega$ 。按照第 2.2 中所述，主节点 1 与从节点 7 之间频点优选过程中，所得各个集合所含频点个数分别为： $f_{主}$  (73)， $f_{从}$  (87)， $f_{交}$  (61)， $f_{下行}$  (52)， $f_{上行}$  (49)， $f_{双向}$  (43)。

表 2 中列出了用本文方法、输入阻抗选频法和全频点扫描法得到的优选频点总链路  $Q$  值。其中输入阻抗选频法的阈值选为  $60 \Omega$ ，即 $|Z_{in}| \leq 60 \Omega$ 。

表 2 节点间频点优选后的总链路  $Q$  值

Table 2 Total link  $Q$  value after frequency optimization

主 $\leftrightarrow$ 从	between nodes		
	输入电抗选 频法	输入阻抗选 频法	全频点扫 描法
1 $\leftrightarrow$ 7	-383	-395	-357
11 $\leftrightarrow$ 7	-349	-369	-342
2 $\leftrightarrow$ 7	-380	-422	-368
9 $\leftrightarrow$ 14	-467	仅选出 13 个双向 可通信频点	-460

由表 2 可知，节点 1 $\leftrightarrow$ 7、11 $\leftrightarrow$ 7 之间通信时，由本文方法与输入阻抗选频法得到的  $Q$  值均接近于全频点扫描得到的  $Q$  值，可见这两种方法均可行。第 3 组节点之间由输入电抗选频得到的  $Q$  值仍接近全频点扫描得到的  $Q$  值，而由输入阻抗选频得到的  $Q$  值偏小，不甚理想。第 4 组节点之间由输入电抗选频得到的  $Q$  值仍接近全频点扫描得到的  $Q$  值，但此时输入阻抗选频法得到的可用频点数仅为 13 个，无法进一步优化。综上可见采用输入电抗选频比采用输入阻抗选频更优。

表 3 列出了与表 2 相对应的频点优选过程中  $f_{交}$  所含频点的个数，可见由本文方法预选出的频点相比于总频点数(108 个)减少了一半左右，筛除了大量不可用频点。该方法虽增加了测量信道输入电抗的时间，但节省了在大量不可用频点处测量信号下行、上行信号强度的时间。算法所需的输入电抗可以由各个 PLC 装置独立测量迅速得到，而在各频点处测量下行、上行信号强度牵涉到通信协议的实施，速度较慢。可见基于输入电抗的频点优选算法可显著提高优选频点的速度。

表 3 节点间频点优选过程中  $f_{交}$  所含频点个数

Table 3 Number of frequency points in  $f_{intersection}$  in the process of frequency selection between nodes

主 $\leftrightarrow$ 从	输入电抗选频法	输入阻抗选频法	全频点扫描法
1 $\leftrightarrow$ 7	61	57	108
11 $\leftrightarrow$ 7	69	63	108
2 $\leftrightarrow$ 7	65	59	108
9 $\leftrightarrow$ 14	49	13	108

## 4 结论

将 OFDM 调制解调技术应用于中压配电网 PLC 通信需要进行频点优选。理论分析表明 PLC 信道输入阻抗较小的频点处电压传输特性衰减较小。使用默认频点完成节点入网过程，基于载波节点自主测量信道输入电抗的方法，预选出部分通信效果可能较好的频点，在这些频点处进行下行、上行信号强度测试，最终选出较优频点。仿真实验表明该算法可筛选掉大量不可用频点，减小了测试下行、上行信号强度的工作量。优选算法考虑了载波通信对下行、上行传输质量的不同要求，实现过程简单，可以提高采用 OFDM 技术的 PLC 装置频点优化速度。

## 参考文献

- [1] 焦邵华, 矫坚, 由欣, 等. 具有高可靠性的网络化配电线载波系统的研究与实现[J]. 电网技术, 2000, 24(12): 32-36.  
JIAO Shaohua, JIAO Jian, YOU Xin, et al. Study and implementation of network based distribution line carrier system with high reliability[J]. Power System Technology, 2000, 24(12): 32-36.
- [2] 易浩勇, 梁卢鸿, 张俊敏, 等. 混合线路载波通信在配电自动化中的应用[J]. 电力系统通信, 2009, 30(2): 12-14, 18.  
YI Haoyong, LIANG Luhong, ZHANG Junmin, et al. Application of mixed line carrier communication in distribution automation system[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2009, 30(2): 12-14, 18.
- [3] 索超男, 张慧, 赵雄文. 小波基在低压电力线信道有色背景噪声建模中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(4): 121-125.  
SUO Chaonan, ZHANG Hui, ZHAO Xiongwen. Research on the application of wavelet basis functions in modeling of colored background noise for low-voltage power line channels[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 121-125.
- [4] 苏岭东, 翟明岳, 何欣. 基于时频峰值滤波的电力线通信噪声消除方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 15-20.  
SU Lingdong, ZHAI Mingyue, HE Xin. A new noise mitigation method based on time frequency peak filtering in powerline communication system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 15-20.
- [5] GOTZ M, RAPP M, DOSTERT K. Power line channel characteristics and their effect on communication system design[J]. IEEE Communications Magazine, 2004, 42(4): 78-86.

- [6] 翟明岳, 苏岭东. 基于 EMD-TFPF 算法的电力线通信噪声消除技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 51-56.  
ZHAI Mingyue, SU Lingdong. A noise mitigation method based on EMD-TFPF in power line communication system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 51-56.
- [7] HUHES-HARTOGS D. Ensemble modem structure imperfect transmission media[Z]. U.S: Patent Nos.4 4, 679, 227 (July1987), 4,731, 816 (Macrh1988) and 4, 833, 706 (May1989).
- [8] CHOW P S, CIOFFI J M, BINGHAM J A C. A practical discrete multitone transceiver loading algorithm for data transmission over spectrally shaped channels[J]. IEEE Transactions on Communication, 1995, 43(234): 773-775.
- [9] 鲍卫东. 电力线通信 OFDM 系统中基于子载波集的自适应分配算法[J]. 电力信息与通信技术, 2016, 14(2): 62-65.  
BAO Weidong. Sub-carrier set based adaptive allocation algorithm of OFDM system in power line communication[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2016, 14(2): 62-65.
- [10] 李建岐, 陆阳, 高鸿坚. 基于信道认知在线可定义的电力线载波通信方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(20): 5235-5243.  
LI Jianqi, LU Yang, GAO Hongjian. On (power-) line defined power line communication solution based on channel sensing[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(20): 5235-5243.
- [11] 王东, 王艳, 焦彦军, 等. 基于局部反射理论的中压配电网电力线通信信道建模法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(2): 178-183.  
WANG Dong, WANG Yan, JIAO Yanjun, et al. Channel modeling method of power line communication for medium voltage distribution network based on partial reflection theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(2): 178-183.
- [12] 罗汉武, 蔡伟, 乐健. 电力线载波通信信道特性的影响因素分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(7): 73-78.  
LUO Hanwu, CAI Wei, LE Jian. Analysis of influence factors on power-line communication channel characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(7): 73-78.
- [13] 黄银龙, 乐健, 王东旭, 等. 环网下电力线载波通信信道特性的影响因素分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 135-139.  
HUANG Yinlong, LE Jian, WANG Dongxu, et al. Analysis of influence factors on power-line communication channel characteristics under ring topology[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(17): 135-139.
- [14] 黄银龙, 蔡伟, 毛涛, 等. 具有格状网的电力线载波通信信道特性的分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 1-6.  
HUANG Yinlong, CAI Wei, MAO Tao, et al. Analysis of power-line communication channel characteristics of the network with mesh topology[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 1-6.
- [15] 董亚波, 高锋. 低压电力线载波通信网络结构分析[J]. 电网技术, 2003, 27(2): 58-62.  
DONG Yabo, GAO Feng. Analysis of structure of carrier communication network for low voltage power line[J]. Power System Technology, 2003, 27(2): 58-62.
- [16] 郭以贺, 谢志远, 石新春, 等. 基于多导体基于多导体传输线的中压电力线通信信道建模[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(7): 1185-1189.  
GUO Yihe, XIE Zhiyuan, SHI Xinchun, et al. Modeling of medium voltage power line communication channel based on multi-conductor lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 34(7): 1185-1189.
- [17] 焦彦军, 刘万顺, 郑卫文, 等. 配电网载波通信的衰耗分析[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(8): 37-40.  
JIAO Shaohua, LIU Wanshun, ZHENG Weiwen, et al. Attenuation analysis of distribution line carrier channels in distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(8): 37-40.

收稿日期: 2017-03-23; 修回日期: 2017-09-19

作者简介:

薛晨(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为中压电力载波通信; E-mail: xuechen678@163.com

王艳(1981—), 女, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为中压电力载波通信、电力系统继电保护; E-mail: 18288061@qq.com

焦彦军(1963—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统分析与控制、电力系统继电保护等。

(编辑 葛艳娜)