具有格状网的电力线载波通信信道特性的分析

黄银龙[1]，蔡 伟[2]，毛 涛[1]，汪 妮[1]，乐 健[1]

（1.武汉大学电气工程学院，湖北 武汉 430072；2.国网电力科学研究院，湖北 武汉 430074）

摘要：智能配电网除传统的树状拓扑结构外，还将出现环网、格状网等结构。建立具有这些特殊拓扑配电网的电力线信道模型，并进行信道特性影响因素的分析是在智能配电网中应用电力线载波通信技术的必要前提和重要依据。通过基于信息节点的建模方法建立格状网拓扑的信道模型，并仿真分析前后主干长度、格网主干长度、分支长度、分支负载等因素对格网拓扑下信道传输特性的影响规律，重点分析了这些影响因素对信号衰减的影响。通过实验验证了所得结果的正确性和有效性。所提出的分析方法和所得结论为设计智能配电网电力线载波通信的调制方法提供了必要的理论基础和技术手段。

关键词：电力线载波通信；格网拓扑；信道传输特性；频率衰减

Analysis of power-line communication channel characteristics of the network with mesh topology

HUANG Yin-long[1], CAI Wei[2], MAO Tao[1], WANG Ni[1], LE Jian[1]

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
2. State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: In the intelligent power distribution network, there are not only tree-topology but also ring-topology, mesh-topology and so on. To establish the power line channel models of the distribution networks with these special topologies and analyse the factors that influence the channel characteristics is the premise and the important basis in application of the PLC in smart distribution network. Based on a universal channel modeling method that is based on information nodes, this paper analyses the influence laws of multiple factors on channel transmission characteristics of the network with mesh topology through simulation, such as the front and rear trunk length, the mesh trunk length, the branch length and the load impedance. The correctness and general applicability of the proposed approach and the conclusions are verified through lab measurements. The proposed analysis method and the conclusions can be used as necessary theoretical basis and technical means to power-line communication modulation method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51007065).

Key words: power-line communication; mesh topology; channel transmission characteristics; frequency attenuation

中图分类号： TM73 文献标识码：A 文章编号： 1674-3415(2014)11-0001-06

0 引言

电力线载波通信（PLC）是利用电力线作为信息传输媒介进行数据或语音等传输的一种特殊通信方式[1]。电力线遍及千家万户，其作为通信媒介具有应用的广泛性和经济性[2]，且具有投资少，见效快，与电网建设同步等得天独厚的优势[3]。但与通信专用的通信信道相比，电力线载波通信信道十分复杂，且电气特性与之完全不同，因此如何利用电力线实现可靠通信，是电力技术领域和通信领域共同关注的问题[4-5]。目前中压配电网载波通信的研究热点主要集中在通信信道建模[6-7]，噪声干扰特性[8-9]，组网技术[10]和阻抗匹配[11]等方面。传统的信道建模方法：自顶向下法[12]和自底向上法[13]难以应用于环网等网络新拓扑，本文首先依据文献[7]提出的适用于各种网络拓扑的基于信息节点的电力线信道建模方法，建立了基本格状网的电力线载波通信信道传输特性的数学模型；基于该模型，研究了格状网主干长度、分支线路长度、支路负载阻抗等因素对信道传输特性的影响规律，重点分析了这些影响因素对信号衰减的影响。通过仿真计算和实验验证了所得结果的正确性和有效性。

1 基于信息节点的建模方法

基于信息节点的电力线信道建模方法主要思想是在信号源、负载及电力线靠近网络节点处均设

基金项目：国家自然科学基金项目(51007065)

置一个信息节点，如图 1 中 D_{11}，…，D_{i1} 和 D_{j1} 等，另外在信号源与其内阻之间设置信息节点 D_S，不同对象的信息节点放置如图 2 所示；然后根据传输线理论和电路基本理论写出所有信息节点之间的电压电流关系式；最后求解信号源与负载间的传输特性。

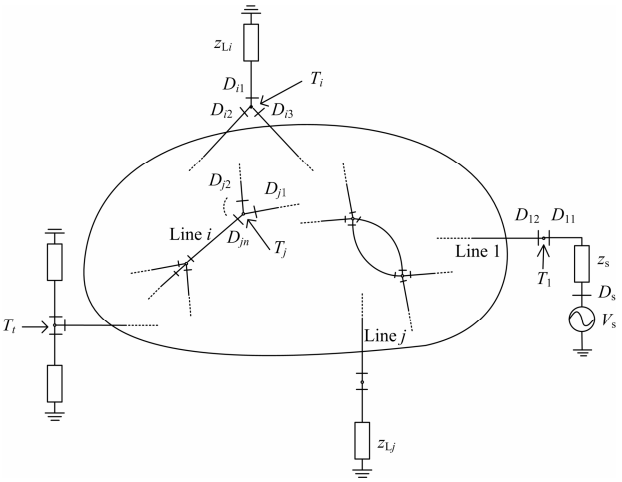

图 1 复杂网络拓扑

Fig. 1 Complex network topology

设图 1 所示的电力网络由 m 条电力线和 n 个负载组成。则共有 S=2m+n+2 个信息节点。对每个信息节点均需求解出该节点的电压和流出该节点的电流，则整个电力网络共有 4m+2n+4 个未知量。本文中的电流参考方向均以流出网络节点为正。

对任一条电力线 line1，如图 2（a）中，可写出两个传输线方程，因此 m 条电力线可以写出 2m 个方程。

对于 n 个负载，如图 2（b）所示，其上电压 U 和电流 I 满足欧姆定律，可写出 n 个方程。

与信号源相接的信息节点为 D_1 和 D_S，如图 2(c) 所示，根据电路理论可得两个方程。

对于信息节点，如图 2(d)所示的与 j 个信息节点与某个网络节点相连，由 KCL 与 KVL 可得到 j 个独立的方程。整个网络中与网络节点相连的信息节点共有 2m+n+1 个，所有与某个网络节点相连的信息节点均不与其他网络节点相连，故整个网络可共列出 2m+n+1 个独立方程。

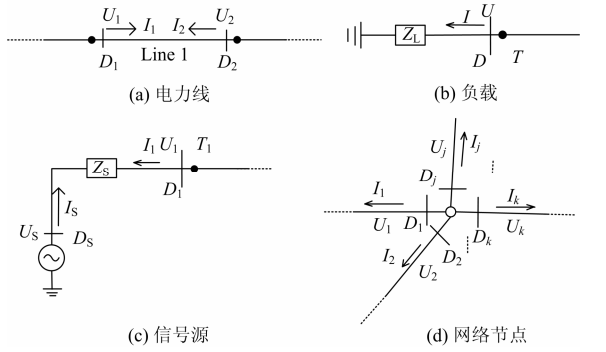

图 2 信息节点

Fig. 2 Information nodes

所以对于由 m 条电力线和 n 个负载组成的电力网络，根据以上推导可得出的独立方程数目共有 2m+n+2m+n+1+2=4m+2n+3 个。

由于未知信息节点的电压和电流共有 4m+2n+4 个，而独立方程为 4m+2n+3 个，且构成线性无关的齐次线性方程组，可求出任意两个未知量之间的比值关系，即很容易得出网络中信号接收点与信号源间的电压传输特性为

$$H_i(f)=\frac{U_{Zi}}{U_S} \tag{1}$$

由以上方法可以很方便地利用软件计算出信号接收点与信号源之间的电压传输特性的理论表达式，从而对影响信道传输特性的因素及其影响规律进行分析。

2　格状网拓扑

在图 3 所示格状网拓扑中，AB-CD 为前后主干线路，EF-GH 为分支线路，BE-EC-CG-GB 为格网主干线路，EG 为连支线路。采用型号为 Agilent 8753D 的网络分析仪，输出功率为 10 dB，设置信号源内阻 Z_S 和负载阻抗 Z_L 为 50 Ω；分支负载 Z_{L1}、Z_{L2} 均为 5 Ω；所有线路采用相同的材质，单位长度电容 C_0、电感 L_0、电阻 R_0 分别为 96 pF/m、276 nH/m、1 mΩ/m，忽略单位长度电纳；当所有线路长度均为 10 m 时，图 4 中所示为从信号发射源 V_S 到接收点 D 的电压传输的幅频特性，定义信号源的衰减为 A 点电压与信号源电压 V_s 的比值，图 5 为信号源的衰减特性，信号传输频率范围为 1~40 MHz。

分析图 5 可知，随着频率的增加，信号源的衰减呈现减小趋势。

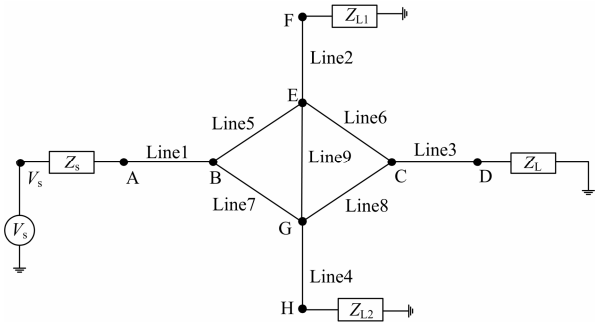

图 3 简单格状网拓扑

Fig. 3 Simple mesh topology

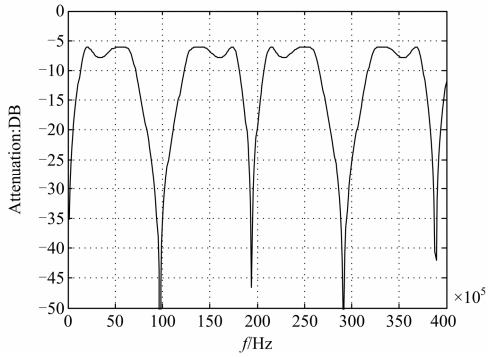

图 4 简单格状网的电压传输幅频特性

Fig. 4 Voltage transmission characteristics of simple mesh-topology

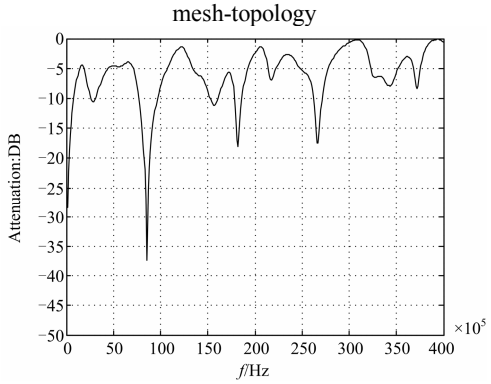

图 5 信号源的衰减

Fig. 5 Attenuation of the signal source

3　前后主干长度改变的影响

在图 3 所示格状网拓扑中，保持其他线路长度均为 10 m，改变 AB-CD 的长度分别为 10 m、20 m、30 m 和 40 m 时，图 6 中所示为从信号发射源 V_S 到接收点 D 的电压传输的幅频特性，信号传输频率范围为 1~40 MHz。图 7 为前后主干改变对电压源衰减的影响。

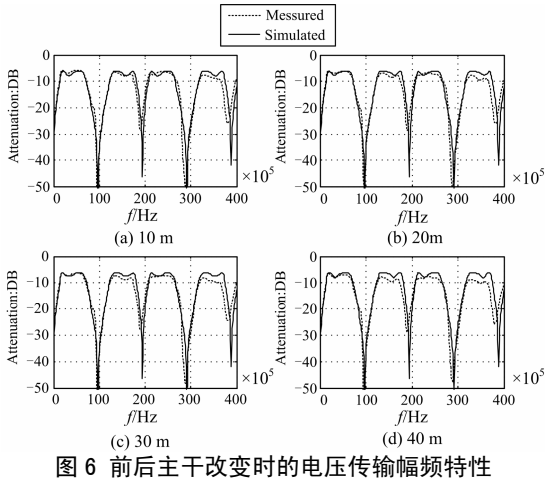

图 6 前后主干改变时的电压传输幅频特性

Fig. 6 Voltage transmission characteristics when longitudinal trunk changed

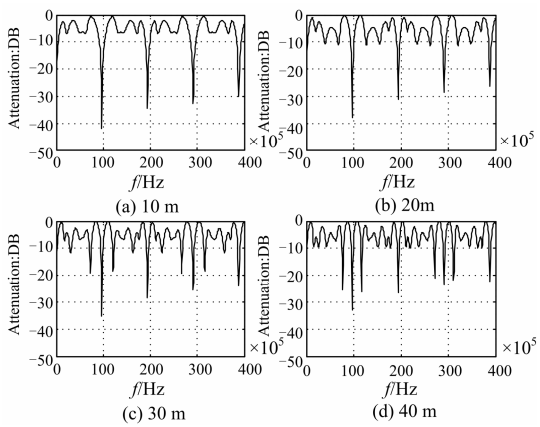

图 7 前后主干改变对电压源衰减的影响

Fig. 7 Attenuation of the signal source when longitudinal trunk changed

由图 6 中可知，AB-CD 长度的改变对电压传输幅频特性几乎没有影响，故在以后的讨论中均忽略 AB-CD 的长度改变对电压传输幅频特性的影响。

4　格网参数改变的影响

4.1 线路长度改变的综合影响

在图 3 所示格状网拓扑中，当格网主干 BE-EC-CG-GB、连支 EG 与分支 EF-GH 的长度分别为 5 m、10 m、15 m、20 m 时，图 8 中所示为从信号发射源 V_S 到接收点 D 的电压传输的幅频特性，信号传输频率范围为 1~40 MHz。

由图 8 中可知，随着格网主干、分支与连支长度的增加，衰减峰的个数逐渐增加，依次为 2、4、6、8 个。

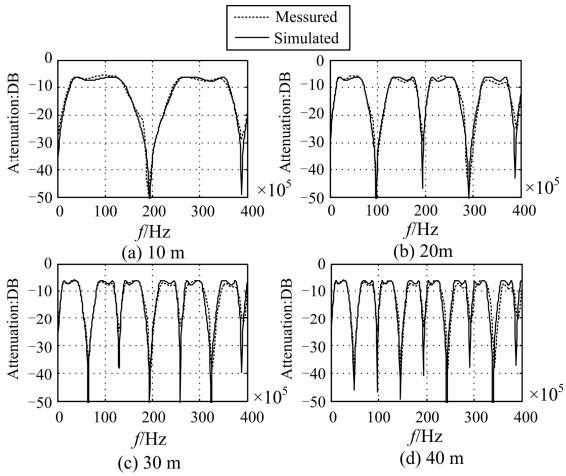

图 8 线路长度成比例改变时的电压传输幅频特性

Fig. 8 Voltage transmission characteristics when the line length of mesh-topology changed proportionally

4.2 仅改变连支长度

在图 3 所示格状网拓扑中，保持格网主干 BE-EC-CG-GB 与分支 EF-GH 的长度均为 10 m，改变 EG 的长度分别为 10 m、20 m、30 m 和 40 m 时，图 9 中所示为从信号发射源 V_S 到接收点 D 的电压传输的幅频特性，信号传输频率范围为 1~40 MHz。

由图 9 中可知，仅改变连支长度时，对衰减峰的影响较大，会出现新的频率衰落点，影响衰减峰的个数。

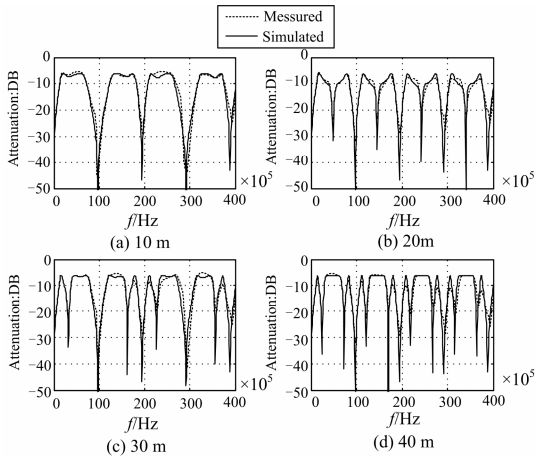

图 9 连支长度改变时的电压传输特性

Fig. 9 Voltage transmission characteristics when the link length changed

4.3 仅改变分支长度

在图 3 所示格状网拓扑中，当格网主干 BE-EC-CG-GB 均为 10 m，EG 长度为 10 m，改变分支 EF-GH 的长度分别为 10 m、20 m、30 m 和 40 m 时，图 10 中所示为从信号发射源 V_S 到接收点 D 的电压传输的幅频特性，信号传输频率范围为 1~40 MHz。

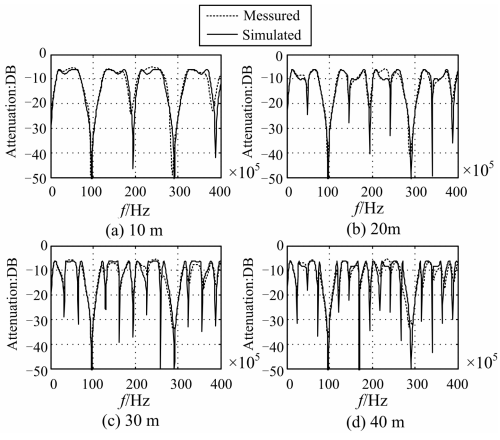

图 10 分支长度改变时的电压传输特性

Fig. 10 Voltage transmission characteristics when the branch length changed

由图 10 中可知，保持格网主干与连支长度不变，而仅改变分支长度时，在衰减峰处将出现新的频率衰落点。

4.4 仅改变格网主干长度

在图 3 所示格状网拓扑中，当分支 EF-GH 的长度均为 10 m，EG 长度为 10 m，改变格网支路 BE-EC-CG-GB 的长度分别为 10 m、20 m、30 m 和 40 m 时，图 11 中所示为从信号发射源 V_S 到接收点 D 的电压传输的幅频特性，信号传输频率范围为 1~40 MHz。

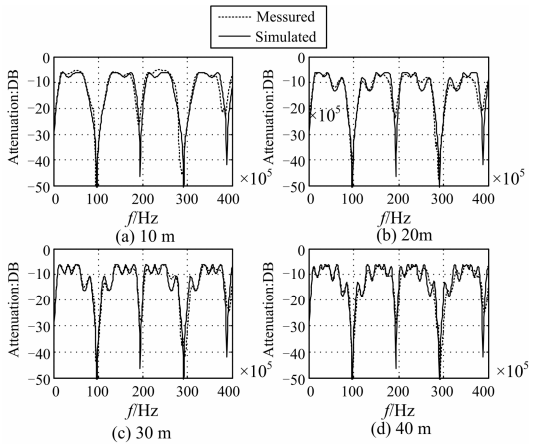

图 11 格网主干长度改变的电压传输特性

Fig. 11 Voltage transmission characteristics when the trunk line length changed

由图 11 中可知，保持格网分支与连支长度不变，而仅改变格网主干支路长度时，在衰减峰处将出现一些波动。

5 负载阻抗变化的影响

在图 3 所示格状网拓扑中，当分支 EF-GH、连支 EG 以及格网支路 BE-EC-CG-GB 的长度分别均为 10 m。改变分支负载 Z_{L1} 和 Z_{L2} 为 0 Ω、5 Ω、10 Ω、20 Ω、50 Ω、100 Ω、200 Ω、500 Ω 和 1 000 Ω 时，图 12 中所示为从信号发射源 V_S 到接收点 D 的电压传输的幅频特性，信号传输频率范围为 1~40 MHz。

由图 12 中可知，随着分支负载的增加，电压传输幅频特性的衰减峰峰值的位置和大小基本不变，但是某些衰减谷处会逐渐增加，最终形成衰减峰。

6 结论

本文通过仿真和物理实验分析了各种因素对具

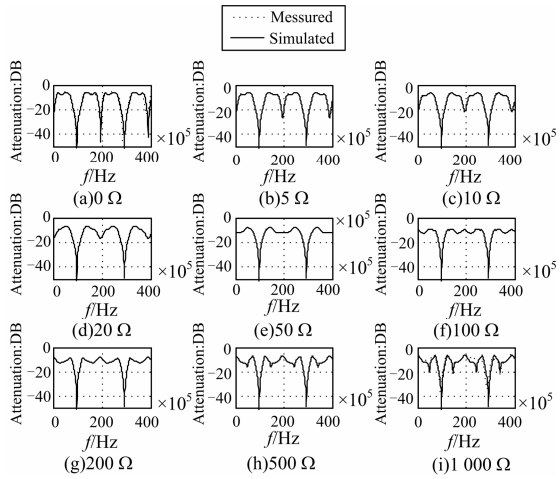

图 12 负载阻抗改变时电压传输特性

Fig. 12 Voltage transmission characteristics when load impedance changed

有格状网拓扑的电力线信道传输特性影响的规律。由分析结果可得：1）纵向主干长度对电压传输幅频特性几乎没有影响；2）分支长度、格网主干长度与连支长度共同影响电压传输幅频特性的衰减峰的个数：分支长度与连枝长度的改变，均会在原来的衰减峰范围内出现许多频率衰落点，而格网主干长度的改变会在原来的衰减峰范围内产生小范围的波动；3）随着负载阻抗的增加，电压传输幅频特性的衰减峰峰值的位置和大小基本不变，但是某些衰减谷处会逐渐增加，最终形成衰减峰。本文所提出的分析方法和所得结论为设计具有格网的智能配电网电力线载波通信的调制方法提供了必要的理论基础和技术手段。

参考文献

[1] MAJUMDER A, CAFFERY J. Power line communication[J]. IEEE Potentials, 2004, 23(4): 4-8.

[2] 蔡伟, 乐健, 靳超, 等. 电力线载波通信信道建模技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 149-154.
CAI Wei, LE Jian, JIN Chao, et al. Overview of the channel modeling method of power line carrier communication[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 149-154.

[3] 张在玲, 韩富春, 朱永利, 等. 非均匀传输特性的低压电力线载波传输模型[J]. 电工技术学报, 2004, 19(4): 107-110.
ZHANG Zai-ling, HAN Fu-chun, ZHU Yong-li, et al. The carrier wave communication transmission model of low-voltage power line based on the uneven transmission characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(4): 107-110.

[4] 仲元昌, 曾孝平. 低压电力线扩谱通信系统及抗干扰性能分析[J]. 电工技术学报, 2004, 19(9): 82-85.
ZHONG Yuan-chang, ZENG Xiao-ping. Spread spectrum communication system on low voltage power line and its analysis of anti-jamming capability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(9): 82-85.

[5] 刘晓胜, 张良, 周岩, 等. 低压电力线载波通信新型组网模型性能分析[J]. 电工技术学报, 2012, 27(11): 271-277.
LIU Xiao-sheng, ZHANG Liang, ZHOU Yan, et al. Performance analysis of novel low-voltage power line communication model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(11): 271-277.

[6] STEFANO G, THOMAS C B. A deterministic frequency-domain model for the indoor power line transfer function[J]. IEEE Jour on Selected Areas in Communication, 2006, 24(7): 1304-1316.

[7] 蔡伟, 乐健, 刘开培. 基于信息节点的智能配电网中压电力线载波通信信道建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(28): 150-156.
CAI Wei, LE Jian, LIU Kai-pei. A channel modeling technology for the medium-voltage power-line carrier in smart power distribution grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(28): 150-156.

[8] 吴军基, 郭昊坤, 孟绍良, 等. 电力线通信信道背景噪声建模研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(23): 6-10.
WU Jun-ji, GUO Hao-kun, MENG Shao-liang, et al. Modeling of background noise in power line communication channel[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(23): 6-10.

[9] MENG Ju-lian. Noise analysis of power-pine communications using spread-spectrum modulation[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2007, 22(3): 1470-1476.

[10] 冉庆华, 吴玉成, 祁美娟. 低压电力线载波通信网络自动组网方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(10): 53-58.
RAN Qing-hua, WU Yu-cheng, QI Mei-juan. Research

on automatic routing method of low-voltage power line carrier network[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(10): 53-58.

[11] 范函, 张浩. 一种电力线载波通信自适应阻抗匹配方案[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(8): 79-82.
FAN Han, ZHANG Hao. A solution of adaption impedance matching for power line communication system[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(8): 79-82.

[12] 戚佳金, 徐殿国, 周岩, 等. 低压电力线通信网络特性模型与组网算法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(15): 56-62.
QI Jia-jin, XU Dian-guo, ZHOU Yan, et al. Characteristics model and routing algorithm of power-line communications over low-voltage distributions[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(15): 56-62.

[13] ANATORY J, KISSAKA M M, MVUNG-I N H. Channel model for broadband power-line communication[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2007, 22(1): 135-141.

收稿日期：2013-08-26； 修回日期：2013-10-17

作者简介：

黄银龙(1990-)，男，硕士研究生，主要从事电力系统通信方面的研究工作；E-mail：ylhuang2008@126.com

蔡 伟(1987-)，男，博士研究生，从事配电网技术方面的研究工作；

毛 涛(1986-)，女，硕士研究生，主要从事微电网运行与控制技术的研究。