

DOI: 10.7667/PSPC170100

基于多节点的低压宽带电力线信道建模方法研究

王毅^{1,2,3}, 邓子乔¹, 温慧安¹, 侯兴哲², 李松浓², 孙洪亮², 郑可²

(1. 重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065; 2. 国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆 401123;
3. 国网重庆市电力公司博士后科研工作站, 重庆 401123)

摘要: 随着宽带载波通信在用电信息采集系统中的规模运用, 如何搭建实验室数字化综合测试环境, 是亟需解决的问题。目前的点对点测试理论依据来源于传统的点对点电力线信道建模方法。电力线载波通信是工作在多级中继路由下, 电力线载波通信技术链路级与系统级性能测试需要构造多个节点之间的信道衰落模型。在二端口模型基础上, 提出了多节点的宽带电力线信道建模方法。以分支节点为中心对网络进行划分, 简化公式描述, 并结合典型T型网络分析不同信道相关性产生机制。通过实测信道响应与理论仿真结果进行对比, 证明该方法能够准确描述多节点电力线信道以及信道间相关特性, 为未来新型高速宽带电力线载波通信技术和系统级测试方法提供理论支撑。

关键词: 电力线载波通信; 电力线信道建模; 多节点; 信道相关性; 二端口模型

Study on multi-node broadband power line channel modeling

WANG Yi^{1,2,3}, DENG Ziqiao¹, WEN Huian¹, HOU Xingzhe², LI Songnong², SUN Hongliang², ZHENG Ke²

(1. College of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China; 2. State Grid Chongqing Electric Power Research Institute, Chongqing 401123, China;
3. Postdoctoral Workstation of the Chongqing Electric Power Corporation, Chongqing 401123, China)

Abstract: With the wide application of the broadband power line communication technology in AMI system, the most urgent need is to set up a digitization integrated test environment for the carrier communication. The existent testing method is mainly derived from the conditional point-to-point power line channel model. Due to the multi-stage relay routing mechanism in carrier communication, the multi-node channel model is proposed for the link-level and system-level performance testing. Based on the two-port network theory, the multi-node broadband power line channel modelling approach is presented. With this method, the system model is simplified through the sub-network centered by branch node and the mechanism of the correlation between different channels in the low voltage distribution network is analyzed under the classical T-shape network. Through comparing real-measured channel response with theoretical simulation result, it verifies that the proposed method can accurately describe multi-node power line channels and channel correlation, which can offer theoretical support for the system-level testing approach and novel high speed broadband power line communication in the future.

This work is supported by China Postdoctoral Science Foundation (No. 2015T80961) and Natural Science Foundation of Chongqing (No. cstc2016jcyjA0214).

Key words: power line communication; power line channel modeling; multi-node; channel correlation; two-port model

0 引言

从智能电网到能源互联网, 传统的电力系统需要不断地与信息系统进行更为深入的融合^[1-2]。电力

线载波通信技术(Power Line Communication, PLC)作为一种电力系统特有通信方式, 因其广泛性与经济性, 在用电信息采集系统、电网与用户双向互动、分布式能源控制与智能家居等领域具有独特优势。然而, 电力线载波通信相较于其他专用通信方式, 由于电力网络中复杂的拓扑结构、时变阻抗、不连续阻抗节点以及强脉冲干扰噪声等因素呈现出复杂

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(2015T80961); 重庆市自然科学基金(cstc2016jcyjA0214)

多变的多径衰落特性与强脉冲噪声特性^[3-5]。为满足未来智能电网中各类信息通信需求, 实现高速率、高可靠性的通信, 就需要通过行之有效的通信方式进行各类信息数据的传输。

目前用电信息采集系统的本地通信技术方案性能评估主要分为点对点的通信测试与多节点的网络通信测试。其中点对点的通信性能测试^[6-7]通过一次通信成功率对载波模块性能进行表征, 仅仅对单一载波模块通信性能进行评估。其中, 文献[7]通过搭建实际的电力分支线缆环境对电力线载波模块进行测试, 然而这类方法往往由于实验室环境的局限性无法充分体现低压配电网络中复杂拓扑结构下的时变负载以及强电力线脉冲噪声。国外早在 2000 年便开始了点到点的电力线信道模型研究, 主要分为两类: 自上而下 (Top-down)^[8-10]与自下而上 (Bottom-up)^[11-13]建模方法。其中自上而下的建模方法过度依赖于参数模型, 将电力线信道看作黑盒, 通过实测信道拟合得到模型参数。由于该信道模型为非线性模型, 不易获取其模型参数。值得庆幸的是文献[10]给出了几种可行的参数辨识方法。自下而上的建模方法以传输线理论为基础, 通过二端口网络 ABCD 传输矩阵对网络中传输线、分支以及负载等级联进行信道建模。近年, 文献[14-15]针对室内电力线网络给出了基于概率统计模型的电力线信道模型, 从信道频率响应角度, 对凹陷点和峰值点的位置与深度或高度进行了统计性分析, 进而构建基于测量的电力线信道模型。

然而, 点对点通信测试方法有其自身局限性, 首先, 无法对整个系统进行链路级和系统级测试, 如组网性能测试; 其次, 电力线网络本质为多路由多节点的通信网络, 对载波通信技术进行测试应当是基于多节点的信道模型; 最后, 同一网络下信道间往往存在一定程度的相关特性, 这对开展新型高速宽带 MIMO-PLC 技术^[16-19]以及无线与 PLC 融合的虚拟 MIMO 技术^[20-21]的研究工作起着至关重要的作用。此外, 低压配电网中多个节点之间的电力线信道相关性具体将影响物理层中节点间分集合并算法, 多输入多输出算法的性能, 同时也会影响网络层中节点间路由选择的效果。

多节点的网络通信测试方法能够从网络层面对载波技术进行链路级系统级性能评估。目前, 多节点通信测试方法少有相关研究, 主要有两种方案, 其一, 通过屏蔽箱与多级全频段程控衰减器实现; 其二, 通过在实验室环境搭建灵活可配置的配线柜。然而, 以上两种方法都有一定的缺点: 对于程控衰减器, 由于其幅频特性曲线无法表征出电力线信道

的多径衰落特性, 且难以描述实际电力网络中通信节点间信道存在的相关特性; 对于配线柜方案, 实验室场景往往过于单一, 无法代表整体的电力网络环境。此外, 它们都不具备良好的溯源性, 不便于推广, 并形成统一的规范化的测试标准。

为能够进一步实现对多节点网络通信环境的精确控制和模拟, 形成易于推广且可溯源的多节点网络通信测试方案。本文基于传输线理论, 采用自下而上的信道建模方法, 给出了一种基于多节点的电力线信道建模方法, 以分支节点为子网络中心对网络进行拆分, 简化公式描述, 便于计算机实现。以经典 T 型网络为分析对象, 分析了该场景下的信道间相关性产生机制。最后, 通过实测电力线信道对比仿真数据证明了该方法的有效性与正确性, 为未来宽带电力线载波通信系统级测试与链路仿真及其分析提供可行的信道理论支撑。

1 电力线电路模型

1.1 传输线理论

在电力线载波通信中, 高频载波信号主要以横电磁波(TEM)形式在电力线中传输^[22]。随着频率提高, 波长减小, 与电力传输线或其他电网分立元件几何尺寸可相比拟, 电压与电流将随空间变化而变化。基尔霍夫定律需要从集总电路过渡到分布电路, 图 1 给出了单位长度均匀双导体电力传输线的 RLCG 分布参量模型。

其中 R、L、C、G 分别为均匀传输线上单位长度 Δl 上的电阻、电感、电容与电导, R 为 R_1 与 R_2 组合电阻, 与导体材料、导体半径以及集肤厚度相关; L 为 L_1 与 L_2 组合电感, 电感 L、电容 C 和电导 G 与绝缘材料和导线结构相关。

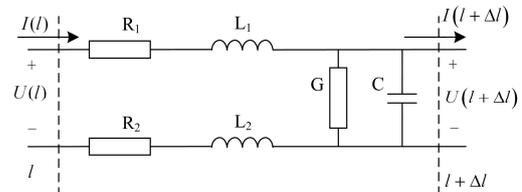


图 1 均匀双导体传输线 RLCG 分布参量模型

Fig. 1 RLCG distributed parameters model of uniform two-wire parallel conductor transmission line

根据基尔霍夫 KCL 与 KVL 定律容易得到均匀传输线的电路方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial u(l)}{\partial l} = -(R + j\omega L)i(l) \\ \frac{\partial i(l)}{\partial l} = -(G + j\omega C)u(l) \end{cases} \quad (1)$$

联立式(1)两微分方程易得 $u(l)$ 与 $i(l)$ 的解为

$$\begin{cases} u(l) = u^+ e^{-\gamma l} + u^- e^{\gamma l} \\ i(l) = \frac{1}{Z_c} (u^+ e^{-\gamma l} - u^- e^{\gamma l}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: u^+ 与 u^- 为积分常数, 由传输线边界条件确定; Z_c 为传输线的特征阻抗; γ 为传输线复传播常数。

$$Z_c = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (3)$$

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta \quad (4)$$

式中: $\alpha = \text{Re}(\gamma)$, 为衰减常数; $\beta = \text{Im}(\gamma)$, 为波相速。一般情况能够根据式(5)与式(6)对其进行估计。

$$\alpha(f) = (\alpha_0 + \alpha_1 f^K) \quad (5)$$

$$\beta(f) = \frac{2\pi f}{V_p} \quad (6)$$

式中: α_0 、 α_1 、 K 为常量; V_p 为信号在电力传输线上的传播速度, 与导线间绝缘材料介电常数有关; f 为信号频率。

1.2 二端口网络模型

一般电力传输网为复杂拓扑的多端口网络, 其中二端口网络为最基本的端口网络。在射频电路中, 端口网络可由多种参量矩阵对网络进行描述, 如: Z 参量、 Y 参量、 h 参量、 S 参量以及 $ABCD$ 参量。各类参量矩阵都能表征端口网络的电压电流特性, 且有其适应的场合。电力传输网络多为各类线缆级联与分支构成的多端口网络, 适宜通过 $ABCD$ 参量矩阵(级联矩阵)进行描述。

图 2 为一个二端口网络模型, 据射频电路定义有

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, A 、 B 、 C 、 D 复系数为频率 f 的函数, 表征了二端口网络的电气特性。

$$A = \frac{U_1}{U_2} \Big|_{(I_2=0)} \quad B = \frac{U_1}{I_2} \Big|_{(U_2=0)} \quad (8)$$

$$C = \frac{I_1}{U_2} \Big|_{(I_2=0)} \quad D = \frac{I_1}{I_2} \Big|_{(U_2=0)}$$

对图 2 源电压 U_s 与负载电压 U_2 有

$$U_s = U_1 + I_1 Z_s \quad (9)$$

$$U_2 = I_2 Z_l \quad (10)$$

由式(7)、式(9)与式(10)可得 1 端输入阻抗 $Z_{in}(f)$ 与信道频率响应 $H(f)$ 为

$$Z_{in}(f) = \frac{AZ_l + B}{CZ_l + D} \quad (11)$$

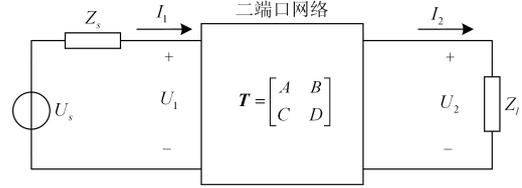


图 2 二端口网络模型

Fig. 2 Two-port network model

$$H(f) = \frac{U_2}{U_s} = \frac{Z_l}{AZ_l + B + CZ_l Z_l + DZ_s} \quad (12)$$

2 多节点低压电力线信道建模

2.1 低压电力网络中网络的分解

根据 1.2 节中的二端口网络模型可以得到低压电力网络中的一些常见的特定网络的 $ABCD$ 参量矩阵如均匀电力线、并联负载与并联分支线路的参量矩阵, 进而对复杂的低压电力网络进行分解。图 3 给出了低压电力网络中常见的三种基本的二端口网络模型。

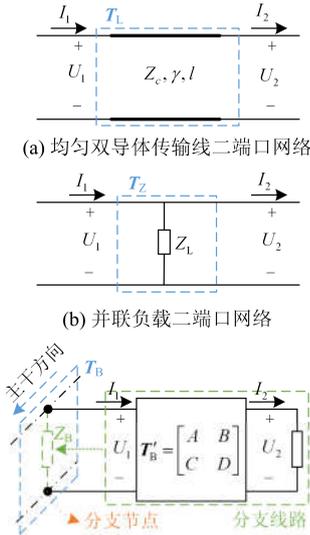


图 3 特定网络的二端口网络

Fig. 3 Specific two-port network

1) 电力传输线的 $ABCD$ 参量矩阵

电力传输线的二端口网络模型如图 3(a)所示, 当二端口网络为均匀双导体传输线时, 根据式(2)与式(7)易得

$$T_L = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma l) & Z_c \sinh(\gamma l) \\ \sinh(\gamma l)/Z_c & \cosh(\gamma l) \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中: l 为线缆长度; γ 为电力线传播常量; Z_c 为线缆特性阻抗; T_L 参量矩阵表征了双导体传输线上任

分支线路参量矩阵 T_{ni} 。

3) 由式(19)计算第 n_i 个子网络参量矩阵 T'_{n_i} 为

$$T'_{n_i} = T_{m_{i-1}, n_i} T_{n_i} T_{n_i, m_i} = T'_{n_{i-1}, n_i} T_{n_i} T'_{n_i, n_{i+1}} \quad (19)$$

式中:

$$T'_{n_{i-1}, n_i} = \begin{bmatrix} \cos h(\gamma_{n_{i-1}, n_i} l_{n_{i-1}, n_i} / 2) & Z_{c_{n_{i-1}, n_i}} \sin h(\gamma_{n_{i-1}, n_i} l_{n_{i-1}, n_i} / 2) \\ \sin h(\gamma_{n_{i-1}, n_i} l_{n_{i-1}, n_i} / 2) / Z_{c_{n_{i-1}, n_i}} & \cos h(\gamma_{n_{i-1}, n_i} l_{n_{i-1}, n_i} / 2) \end{bmatrix}$$

$$T'_{n_i, n_{i+1}} = \begin{bmatrix} \cos h(\gamma_{n_i, n_{i+1}} l_{n_i, n_{i+1}} / 2) & Z_{c_{n_i, n_{i+1}}} \sin h(\gamma_{n_i, n_{i+1}} l_{n_i, n_{i+1}} / 2) \\ \sin h(\gamma_{n_i, n_{i+1}} l_{n_i, n_{i+1}} / 2) / Z_{c_{n_i, n_{i+1}}} & \cos h(\gamma_{n_i, n_{i+1}} l_{n_i, n_{i+1}} / 2) \end{bmatrix}$$

4) 可由式(20)对子网络参量矩阵 T'_{n_i} 累乘得到完整网络的参量矩阵 $T_{s,t}$ 。

$$T_{s,t} = T'_{s, n_1} \left[\prod_{i=1}^N T'_{n_i} \right] T'_{n_N, t} \quad (20)$$

式中: N 为节点集 P 内节点总个数; T'_{s, n_1} 为源节点 s 至第一个中间节点 m_0 的级联参量矩阵; $T'_{n_N, t}$ 为最后一个中间节点 m_N 至端节点 t 的级联参量矩阵。

$$\text{令 } T_{s,t} = \begin{bmatrix} A_{s,t} & B_{s,t} \\ C_{s,t} & D_{s,t} \end{bmatrix}, \text{ 则 } s \text{ 与 } t \text{ 间信道响应 } H_{s,t}$$

可表示为

$$H_{s,t}(f) = \frac{U_t}{U_s} = \frac{Z_t}{A_{s,t} Z_t + B_{s,t} + C_{s,t} Z_s Z_t + D_{s,t} Z_s} \quad (21)$$

式中: Z_s 为发送端源阻抗; Z_t 为接收端负载阻抗。

2.3 T型网络下多节点电力线信道间相关性分析

为便于分析造成多节点间电力线信道相关性的原因,下面对经典电力线模型^[12, 17]中常见T型网络模型进行分析, T型网络模型如图5所示。其中 $N_i(i=1, 2, 3)$ 为信息节点, 节点 J 为线缆分支交点。节点 N_1 作为发送端, 节点 N_2 与 N_3 作为接收端。

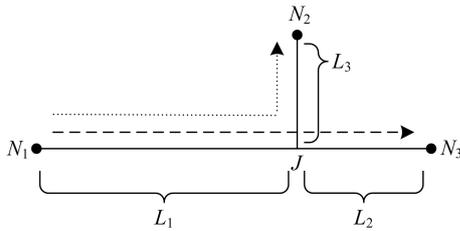


图5 T型网络

Fig. 5 T-shape network

对于图5中组成系统模型有

$$\begin{bmatrix} y_{N_2} \\ y_{N_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{N_1, N_2} \\ h_{N_1, N_3} \end{bmatrix} \bullet x_{N_1} + \begin{bmatrix} n_{N_2} \\ n_{N_3} \end{bmatrix} \quad (22)$$

式中: x_{N_1} 为节点 N_1 发送信号; y_{N_2} 、 y_{N_3} 表示为节点 N_2 、 N_3 接收信号; “ \bullet ” 表示卷积运算; h_{N_1, N_2} 与 h_{N_1, N_3} 分别为节点 N_1 至节点 N_2 与节点 N_1 至节点 N_3

的电力线信道单位脉冲响应; n_{N_2} 与 n_{N_3} 分别为节点 N_2 、 N_3 接收端的各类加性电力线噪声和。

据式(20), 对于节点 N_1 、 N_2 与 N_3 有

$$T_{12} = T_{N_1, J} T_{J(N_2)} T_{J, N_2} = \begin{bmatrix} A_{12} & B_{12} \\ C_{12} & D_{12} \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$T_{13} = T_{N_1, J} T_{J(N_3)} T_{J, N_3} = \begin{bmatrix} A_{13} & B_{13} \\ C_{13} & D_{13} \end{bmatrix} \quad (24)$$

式中, $T_{J(N_2)}$ 与 $T_{J(N_3)}$ 分别为由节点 N_2 与 N_3 看入节点 J 的分支线缆级联参数矩阵。比对式(23)与式(24), 不难发现节点 N_1 与 N_2 间的参量矩阵 T_{12} 与节点 N_1 与 N_3 间的参量矩阵 T_{13} 中, 具有共同参量矩阵分量 $T_{N_1, J}$, 令 $T_{N_1, J} = T_{\text{Com}}$, $T_{J(N_3)} T_{J(N_2)} = T_{\text{Diff}1}$, $T_{J(N_2)} T_{J, N_3} = T_{\text{Diff}2}$, 对于具有相同源阻抗 Z_s 的发端与相同负载 Z_t 的收端而言, 当 $T_{\text{Diff}1}$ 与 $T_{\text{Diff}2}$ 参量矩阵差异较小时, 其信道频率响应 H_{12} 与 H_{13} 将具有较大的相关性。

分别将式(23)与式(24)代入式(21), 能够得到节点 N_1 与 N_2 间信道频率响应 H_{12} 和节点 N_1 与 N_3 间信道频率响应 H_{13} 。

$$H_{12} = \frac{Z_t}{A_{12} Z_t + B_{12} + C_{12} Z_s Z_t + D_{12} Z_s} \quad (25)$$

$$H_{13} = \frac{Z_t}{A_{13} Z_t + B_{13} + C_{13} Z_s Z_t + D_{13} Z_s} \quad (26)$$

为便于分析, 对两信道响应倒数之差 ΔH 有

$$\Delta H = \frac{1}{H_{12}} - \frac{1}{H_{13}} = \frac{[(A_{J, N_2} - A_{J, N_3}) Z_t + (B_{J, N_2} - B_{J, N_3})] \Omega}{Z_t (A_{J, N_2} Z_t + B_{J, N_2}) (A_{J, N_3} Z_t + B_{J, N_3})} \quad (27)$$

式中, A_{J, N_2} , B_{J, N_2} 以及 A_{J, N_3} , B_{J, N_3} 分别为节点 J 至节点 N_2 与节点 N_3 的级联矩阵中的传输线 A 参量与 B 参量。此外, $\Omega > 0$, 为 ΔH 中参量的多项式因子。由式(27)不难发现, 当 $A_{J, N_2} = A_{J, N_3}$, $B_{J, N_2} = B_{J, N_3}$ 时, $\Delta H = 0$, H_{12} 与 H_{13} 近乎高度相关。此时, 据式(13)有

$$\frac{\tan h(\gamma_{J, N_2} L_3)}{Z_{c_{J, N_2}}} = \frac{\tan h(\gamma_{J, N_3} L_2)}{Z_{c_{J, N_3}}} \quad (28)$$

对于具有相同特性阻抗与信号传播特性的两段线缆, 则当且仅当 $L_2 = L_3$ 时, 式(28)成立。自此可以得出, 对于具有公共路径的电力线信道频率响应, 往往由于其公共路径使得其具有一定的相关性, 此外相关性程度主要受到电力网络中网络拓扑、负载以及电力线缆特性等因素的影响。在T型网络中, 对于同源、负载阻抗下, 针对具有相同特性阻抗与信号传播特性的线缆, 两信道响应间信道响应主要与两信道长度差值有关, 当长度差值越小, 信道间相关性越强。且该结论能够不失一般性地推广到

更多节点的低压电力线信道环境当中。

3 测试与验证

3.1 信道测试方法与场景

1) 测试方法

为精确地测量电力线信道频率响应, 本文通过 R&S ZNB4 矢量网络分析仪 (Vector Network Analyzer, VNA) 对待测试网络模型进行 S_{21} 散射参数测量来表征信道传输响应, 如图 6 所示。

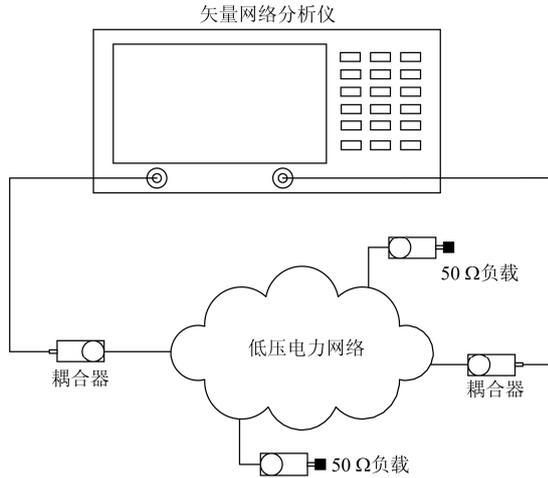


图 6 多节点电力网络测试图

Fig. 6 Measurement of multi-node power line network

其中, 电力线载波信号耦合器主要隔除工频电压, 耦合 100 kHz~30 MHz 的电力线载波信号, 耦合器与 VNA 通过 BNC 射频线缆连接, 避免自身信号传输损失以及外界电磁干扰, 保证测量数据的可信度。对于未连接到 VNA 的信息节点, 可通过耦合器端接 50 Ω 终端负载对接收端负载进行表征。

信道响应测试具体步骤如下所述。

(1) 校准矢量网络分析仪。

(2) 为实现多节点网络的信道响应模拟, 需要获取测试线缆的传输特性参量。本文采用文献[3]中的开短路法, 对单根电力传输线缆进行开短路输入阻抗测量。

(3) 结合步骤(2)中测试数据, 通过式(29)和式(30)对电力传输线的特性阻抗 Z_c 以及传播常数式(5)与式(6)中的 a_0 、 a_1 、 K 与 V_p 的参数进行最小二乘估计。

$$Z_c = \sqrt{Z_{\text{open}} Z_{\text{short}}} \quad (29)$$

$$\gamma = \arctan h \left(\sqrt{\frac{Z_{\text{short}}}{Z_{\text{open}}}} \right) / l \quad (30)$$

式中: Z_{open} 为单根电力传输线末端开路的输入阻抗; Z_{short} 为单根电力传输线末端短路时输入阻抗; l 为该测试线缆的长度。

(4) 搭建待测试信道场景, 分别对各信道进行如图 6 所示的 S 散射参数测量。

通过上述方法, 对于本次实验采用的电力线缆进行参数估计可得到 $a_0=0$, $a_1=2e-9$, $K=1$, $V_p=1.62e8$, $Z_c=120$ 。

2) 测试信道场景

图 7 给出了一个典型电力网络测试场景, 其中节点 A、B、C、D 为信息节点, 节点 E 接有电气负载。网络中的电力线均采用同一型号的线缆, 其次, 不失一般性地, 将节点 E 开路。对网络中任意信息节点进行 S_{21} 散射参量的测量。

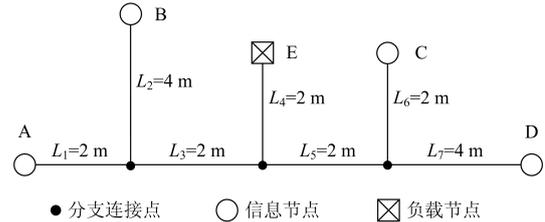


图 7 测试场景

Fig. 7 Test scenario

3.2 信道衰减特性对比

由于篇幅所限, 图 8 仅给出了图 7 所示电力线网络测试场景下的各信道间的测量与仿真对比的电力线信道幅度频响特性曲线, 对于 AB、AD、BC 与 CD 可发现, 实测信道响应往往更具频选衰落特性, 这主要是由于实测场景中所用电力传输线其线缆阻抗特性与传播特性并非完全一致, 使得信号在网络中将发生更为复杂的多径信号反射。

对于 AD 与 BC 实测信道幅度响应与仿真信道幅度响应基本吻合, 仅在 1~2.5 MHz 处存在 5 dB 内的误差, 而对于 AB 与 CD 信道, 由于分支线的复杂拓扑致使显著多径效应, 在多处峰值与峰谷点附近存在一定误差。此外 H_{AC} 在 1~2 MHz 处, 仿真信道衰减略小于实测信道响应; H_{BD} 在 1.8~2.5 MHz 处, 实测信道衰减略小于仿真数据。这主要是由于下面几个方面的原因: 首先, 该建模方法依赖于传输线缆的参数, 在估计二次参数时测量与拟合所带来的误差在所难免; 其次, 仿真中假设各段电力传输线均具有统一的电气特性; 最后, 矢量网络分析仪的测量误差。然而, 从图 8 中可以看到实测与仿真衰减特性曲线具有较高的相似度, 能够对实际场景中的电力线信道进行表征与模拟。

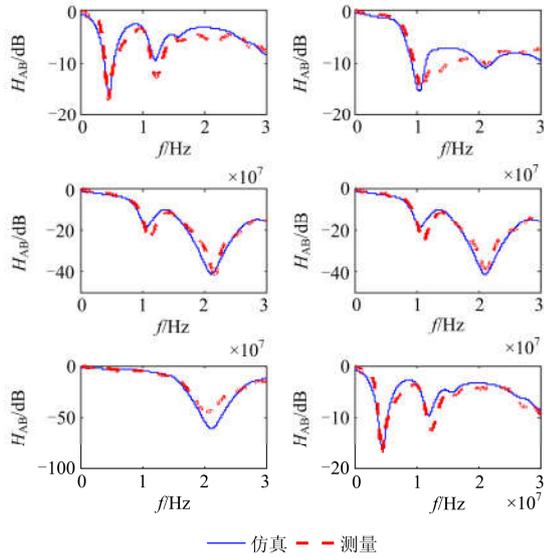


图 8 测试与建模信道衰减对比

Fig. 8 Channel attenuation comparison between measurement and simulation

3.3 信道间相关系数对比

信道与信道间的相关特性能够通过两个复随机变量在数学意义上的相关系数进行表征^[18]。

$$\rho_{i,j} = \frac{\langle H_i(f)H_j^*(f) \rangle - \langle H_i(f) \rangle \langle H_j^*(f) \rangle}{\sqrt{(\langle |H_i(f)|^2 \rangle - \langle H_i(f) \rangle \langle H_i^*(f) \rangle)(\langle |H_j(f)|^2 \rangle - \langle H_j(f) \rangle \langle H_j^*(f) \rangle)}} \quad (31)$$

式中： $\langle \cdot \rangle$ 表示信道传输函数的频域平均；*表示复共轭运算。

分别计算图 8 中各信道间相关系数得到表 1。

对表 1 中相关系数仅保留 3 位有效数字，绝对差值

表 1 测试与仿真信道相关系数对比

Table 1 Channel correlation coefficient comparison between measurement and simulation

信道对	测量	仿真	误差值
AB & AC	0.375	0.370	0.005
AB & AD	0.156	0.194	0.038
AB & BC	0.165	0.194	0.029
AB & BD	0.144	0.169	0.024
AB & CD	0.996	1.000	0.004
AC & AD	0.929	0.940	0.011
AC & BC	0.933	0.940	0.007
AC & BD	0.829	0.830	0.001
AC & CD	0.368	0.370	0.002
AD & BC	0.999	1.000	0.001
AD & BD	0.859	0.871	0.012
AD & CD	0.155	0.194	0.039
BC & BD	0.859	0.871	0.012
BC & CD	0.164	0.194	0.031
BD & CD	0.137	0.169	0.032

保留 4 位有效数字。由表 1 可知，最大误差为 0.04，最小误差约为 0.001。较大的相关系数误差主要是由于仿真数据与实测数据的误差，特别是多个仿真数据与实测信道差异引入额外的累积误差。通过表 1 分析可知，平均误差值大约为 0.012，其方差大约为 0.014。对比测量的信道相关系数，本文给出的方法充分考虑到信道的相关性，相关系数误差较小，能够较好地对多节点间信道的相关性进行表征。

4 结语

为构建具备整个电力拓扑网络特性的多节点宽带电力线信道模型，本文从传输线理论出发，在二端口模型的基础上，结合 ABCD 参量级联矩阵，给出了多节点电力线信道建模方法。通过经典 T 型电力线网络揭示不同节点电力线信道之间往往由于信道中具有公共路径或自身网络特性而存在一定的相关特性。通过实验测量的信道频率响应与相关系数计算对比进一步验证了本文基于二端口模型的多节点电力线信道建模方法的有效性与正确性，为用电信息采集系统数字化网络仿真测试环境下的系统级测试方法提供信道模型支撑。而电力线信道中的频率选择性衰落亦受负载阻抗时变的影响，构建合适有效的阻抗仿真模型并对接本文给出的多节点电力线信道模型将是下一步重点研究工作。

参考文献

- [1] 李映雪, 朱文广, 黄超, 等. 基于自组织临界性的电力异构通信网络稳定性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 118-122.
LI Yingxue, ZHU Wenguang, HUANG Chao, et al. Research on power heterogeneous communications network stability with SOC[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 118-122.
- [2] 孙可, 吴臻, 尚楠, 等. 以省为实体的区域能源互联网内涵框架及发展方向分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 1-9.
SUN Ke, WU Zhen, SHANG Nan, et al. Provincial regional energy internet framework and development tendency analysis[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 1-9.
- [3] ANASTASIADOU D, ANTONAKOPOULOS T. Multipath characterization of indoor power-line networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 90-99.
- [4] 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.
- [5] 邵天宇, 王立欣, 白瑾璐, 等. 低压电力线传输衰减模型的建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 68-74.
SHAO Tianyu, WANG Lixin, BAI Jinjun, et al. Modeling and simulation of low-voltage power line transmission signal attenuation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 68-74.
- [6] 肖勇, 张捷, 党三磊, 等. 智能计量设备电力线载波通信测试系统的设计[J]. 电测与仪表, 2014, 51(13): 14-20.
XIAO Yong, ZHANG Jie, DANG Sanlei, et al. Design of power line carrier communication testing system for smart metering[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(13): 14-20.
- [7] 王建龙, 蒙根. 实验室环境下的智能电表载波模块通信测试[J]. 电测与仪表, 2012, 49(4): 38-41.
WANG Jianlong, MENG Gen. The PLC module communication test of smart meters under the laboratory's environment[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2012, 49(4): 38-41.
- [8] ZIMMERMANN M, DOSTERT K. A multipath model for the powerline channel[J]. IEEE Transactions on Communications, 2002, 50(4): 553-559.
- [9] 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.
- [10] 张旭辉, 林海军, 刘明珠, 等. 基于蚁群粒子群优化的卡尔曼滤波算法模型参数辨识[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(4): 44-50.
ZHANG Xuhui, LIN Haijun, LIU Mingzhu, et al. Model parameters identification of UKF algorithm based on ACO-PSO[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(4): 44-50.
- [11] 何威, 周克, 张超, 等. 基于 QoS 策略的低压电力线信道容量研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(13): 106-111.
HE Wei, ZHOU Ke, ZHANG Chao, et al. Study of channel capacity for low power-line based on QoS strategy[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(13): 106-111.
- [12] GALLI S, BANWELL T. A novel approach to the modeling of the indoor power line channel - part II: Transfer function and its properties[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(3): 1869-1878.
- [13] RUIMING Y, HAITING T, WEI S, et al. Measurement of low voltage power line communication channel impedance and signal transmission modeling[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 161-168.
- [14] TONELLO A M, VERSOLATTO F, BÉJAR B, et al. A fitting algorithm for random modeling the PLC channel[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1477-1484.
- [15] HASHMAT R, PAGANI P, ZEDDAM A, et al. A channel model for multiple input multiple output in-home power line networks[C] // Power Line Communications and Its Applications (ISPLC), 2011 IEEE International Symposium on: IEEE, April 3-6, 2011, Udine, Italy: 35-41.
- [16] HASHMAT R, PAGANI P, ZEDDAM A, et al. MIMO communications for inhome PLC networks: measurements and results up to 100 MHz[C] // Power Line Communications and its Applications (ISPLC), 2010 IEEE International Symposium on: IEEE, March 28-31, 2010, Riode Janeiro, Brazil: 120-124.
- [17] BERGER L T, SCHWAGER A, PAGANI P, et al. MIMO power line communications[J]. Communications Surveys & Tutorials IEEE, 2015, 17(1): 106-124.
- [18] CHOE S, YOO J. Space time frequency coding based MIMO-OFDM over power line channels[J]. Electronics Letters, 2012, 48(16): 999-1000.
- [19] YOO J, CHOE S. Crosstalk ratio-based adaptive 2×2 MIMO-OFDM PLC[J]. Electronics Letters, 2014, 50(22): 1599-1600.
- [20] WANG Y, ZHEN S, HOU X Z, et al. Virtual-MIMO cooperation communication based on integrated power line and wireless communication system[J]. Advanced Materials Research, 2014, 986: 2086-2090.
- [21] LEE J H, KIM Y H. Diversity relaying for parallel use of power-line and wireless communication networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(3): 1301-1310.
- [22] LUDWING R, BRETCHKO P. RF circuit design: theory and application[M]. India: Pearson Education, 2000.
-
- 收稿日期: 2017-01-18; 修回日期: 2017-08-11
作者简介:
王毅(1981—), 男, 通信作者, 博士后, 副教授, 研究方向为电力线通信技术, 能源互联网; E-mail: wangyi81@cqupt.edu.cn
邓子乔(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力线信道建模; E-mail: dengzq@163.com
温慧安(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能电网通信。E-mail: wensdayh.a@gmail.com
- (编辑 周金梅)