

## 室内低压电力线载波通信模型\*

崔双<sup>1</sup> 华伟<sup>1</sup> 贾鹏飞<sup>1</sup> 蒋凯<sup>2</sup> 邓胜吉<sup>2</sup>

(1. 四川大学电子信息学院 成都 610065; 2. 中国民航局第二研究所 成都 610041)

**摘要:** 文章提出了一种室内低压电力线载波通信传输效率的模型,可获得多枝节、多阻抗负载的室内电力线通信系统频带为1~300 MHz的传输特性。传输效率模型由电力线材料本身固有物理量及其所处环境的参数推导而来,模型基于对电力线每个枝节连接截面的传输效率分析,得到系统总的传输效率。同时利用实测的幅频特性,对双线传输线分析得到的模型进行了修订,使模型计算结果与出其他不同模型拓扑的传输效率测试结果相吻合,对实际的电力线载波通信系统中频带的预选有指导意义。

**关键词:** 电力线通信;信道建模;传输函数;多枝节

**中图分类号:** TM711 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.50

## Model for indoor low-voltage power line communication

Cui Shuang<sup>1</sup> Hua Wei<sup>1</sup> Jia Pengfei<sup>1</sup> Jiang Kai<sup>2</sup> Deng Shengji<sup>2</sup>

(1. College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. The Second Research Institute of CAAC, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** An indoor low-voltage power-line carrier communication transmission model is proposed, which is suitable for multi branch topology, multi load impedance in the frequency band of 1~300 MHz. The transfer function is derived from the parameters of the wire material itself and its environment. The model is based on the transmission efficiency of each connection section, than the total transmission efficiency of the system is obtained. According to the measured amplitude-frequency characteristics, the theoretical model is modified to make it possible to simulate the transmission characteristics of different model topologies. The proposed model is helpful in frequency bands pre-selection for actual power line systems.

**Keywords:** power line communication; channel modeling; transfer function; multi-branch

## 1 引言

随着三网合一的演进,电力线系统通信应用技术也不断被扩展<sup>[1-2]</sup>。家庭电力线布局上采用的多线并联以及家用电器的随机接入,造成信号信噪比<sup>[3]</sup>和衰减特性下降,使得电力线系统变得复杂,而预先了解电力线传输特性便于实际系统的设计<sup>[4]</sup>。多数研究是将电力线看作是平行双线,并将其等效为矩阵或者双端口的传输网络,描述模型的传输函数<sup>[5-6]</sup>;其中较为常用的方法是利用级联网络形式给出了的宽带电力线系统的通道模型分析<sup>[7]</sup>。在对电力线模型研究逐步深入的同时,研究频带也在逐渐的展宽或者深入研究特定应用场景。孔慧娟等对9~500 kHz窄带低压电力线信道的阻抗进行测试,得到不同位置的阻抗具有时变性特点<sup>[8]</sup>。侯华俊等人研究了20 MHz频带内电力线信道的特性,探究了线上非理想因素的影响<sup>[9]</sup>。另外也有通

过理论推导和测量结果计算权重参数来共同组成电力线系统的传输函数方法出现<sup>[10]</sup>。对于不匹配造成反射的相关联的路径,可以将反射因素引入到传输函数内<sup>[11]</sup>。这些从基础理论推导获得的传输函数大多研究在60 MHz带内,需要反演的系数较多,影响了其函数的普适性,没有达到AVplug2标准中80 MHz频带范围。

本文给出了1~300 MHz频带内一般性的室内低压电力线通信系统模型。将电力线等效为具有衰减特性的平行双线模型,利用传输线理论,以电力线本身及其所处的环境材料参数为基础进行功率传输效率的推导,获得整个电力线系统的传输函数。传输效率的测试与模型计算的结果表明其有较高的吻合度。

## 2 电力线模型分布参数

本文实际测试使用绝缘材料包裹的双导线型电力线,

收稿日期:2017-02

\* 基金项目:国家自然科学基金闵行联合基金(U1433129, U1633129)资助项目

其单根导线的直径  $d$  为 0.9 mm, 两导线中心点之间的距离  $D$  为 2.24 mm。根据双线传输线的特性, 将实测中使用的电力线近似为平行双线, 其分布参数为:

$$L = \frac{\mu}{\pi} \cdot \ln[(D + \sqrt{D^2 - d^2})/d] \quad (1)$$

$$C = \pi\epsilon/\ln[(D + \sqrt{D^2 - d^2})/d] \quad (2)$$

$$R = 2/(\pi d) \cdot \sqrt{2\pi f\mu/(2\sigma_2)} \quad (3)$$

$$G = \pi\sigma_1/\ln[(D + \sqrt{D^2 - d^2})/d] \quad (4)$$

式中:  $f$  为频率,  $\mu$  为导体间介质的磁导率,  $\epsilon$  为导体间介质的介电常数,  $\sigma_1$  为导体间介质的电导率, 包裹导线的材料为 PVC 混合物, 取  $\sigma_1$  值为  $10^{-8}$  S/m; 铜导线的电导率  $\sigma_2$  为  $5.9 \times 10^7$  S/m; 磁导率  $\mu$  为  $1.26 \times 10^{-6}$  H/m, 介电常数  $\epsilon$  为  $1.2 \times 10^{-11}$  F/m。因此, 可获得电力线与频率相关的特征阻抗和传播常数如式(5)、(6)所示:

$$Z_0 = \sqrt{(R + j\omega L)/(G + j\omega C)} \quad (5)$$

$$\gamma = \alpha + j\beta = (R + j\omega L)(G + j\omega C) \quad (6)$$

式中:  $\alpha$  为衰减常数,  $\beta$  为相位常数。

### 3 多枝节电力线模型分析

#### 3.1 任一段电力线的传输特性

如图 1 所示, 其中  $Z_B$  为负载阻抗,  $L$  为电力线的长度, 电力线的特征阻抗为  $Z_0$ 。首先电磁波从点 A 输入, 当到达点 B 时, 由于电力线的特征与负载阻抗产生不匹配时会在点 B 产生反射。假设电磁波在点 A 开始进入电力线时的电压为  $U$ , 那么根据传输线理论, 电磁波到达点 B 时的电压为:

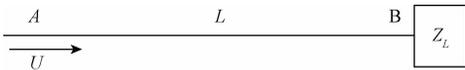


图 1 任一段电力线模型

$$U_B = U^+ e^{\gamma L} (1 - \Gamma e^{-2\gamma L}) \quad (7)$$

其 B 点的反射系数为:

$$\Gamma = (Z_L - Z_0)/(Z_L + Z_0) \quad (8)$$

此时电磁波到达 B 点传输给负载的功率为:

$$P_L = \frac{1}{2} \text{Re}(U_B I_B) = \frac{1}{2} \text{Re}\left(\frac{|U^+|^2}{Z_L^*} (e^{2\gamma L} - |\Gamma|^2 e^{-2\gamma L})\right) \quad (9)$$

由于  $Z_L$  接收的功率可以描述为:

$$P'_L = \frac{1}{2} \text{Re}\left[\frac{|U^+|^2}{Z_L^*} \cdot (1 - |\Gamma|^2)\right] \quad (10)$$

比较式(9)与(10)得到信号经过  $L$  长度电力线衰减后的功率传输效率:

$$\eta_r = \frac{1 - |\Gamma|^2}{e^{2\gamma L} - |\Gamma|^2 e^{-2\gamma L}} \quad (11)$$

#### 3.2 $T_x$ 与 $R_x$ 间任意连接点端面的传输效率

为建立符合电力线通信系统中存在的多阻抗、多枝节

及环境参数等特点, 本文根据分析的电力线系统拓扑结构如图 2 所示, 其中  $T_x$  和  $R_x$  分别表示发射机和接收机, 将连接  $T_x$  和  $R_x$  的电力线作为主线, 随机连接在主线上有  $N$  条枝节, 将主线分割成  $N+1$  段, 长度依次为  $L_i$  ( $1 \leq i \leq N+1$ , 下同)。枝节长度为  $l_m$  ( $1 \leq m \leq N$ , 下同), 阻抗为  $Z_m$ 。为简化分析, 假设主线上任意位置的特征阻抗均为  $Z_0$ 。用  $P_m$  表示图 2 中枝节电力线与主线的连接点。从  $R_x$  到  $T_x$  的方向, 依次分析每个枝节与主线连接点端面的阻抗与反射, 继而获得各个端面传输效率函数, 最终构成整个通信系统模型的传输效率。

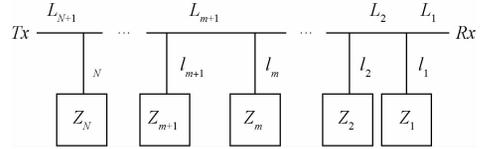


图 2 带有多枝节的电力线通信系统模型

首先分析枝节电力线及其连接的阻抗, 通过阻抗等效原则, 可以得到每根枝节电力线连接阻抗等效到主线上的等效阻抗式(12), 表示为  $Z_m$ 。

$$Z_{in} = Z_0 \frac{Z_L \cosh(\gamma L) + Z_0 \sinh(\gamma L)}{Z_0 \cosh(\gamma L) + Z_L \sinh(\gamma L)} \quad (12)$$

仿照 2.1 节的分析, 考虑到电力线主线与枝节电力线在连接点上为并联关系, 分析枝节电力线及其连接的阻抗, 可以得到每根枝节电力线连接阻抗等效到主线上的等效阻抗; 同样也可以得到某一连接点的总阻抗。

通过逐级带入求出第  $m$  个连接点端面的总阻抗, 并考虑所在点处的反射系数, 可以得到每个连接点处的传输效率为  $\eta_m$ 。

又由于进入到连接点的信号功率会被并联的枝节和主线重新分配, 枝节与主线上阻抗不同, 造成分别有不同的功率分配。有用的功率为分配到主线上的功率, 所以有用功率分配比为:

$$\eta_{s_m} = \frac{P_{d_m}}{P_{s_m}} = \text{Re}(Z_{d_m}^*)/\text{Re}(Z_{s_m}^*) \quad (13)$$

所以从始端到终端, 带有  $N$  根枝节电力线的电力线系统模型的总传输效率为:

$$\eta = \prod_{m=1}^N \eta_r \cdot \eta_{s_m} \quad (14)$$

在实际中  $T_x$  和  $R_x$  都存在各自的内阻, 可将其看作是连接在主线是末端上的长度为 0 的带负载的枝节电力线, 因此能够利用上述理论进行有效实际仿真测试。

#### 3.3 传输函数的修正

上述的分析中, 线上衰减常数  $\alpha$  包含了分布参数的衰减因素, 线上的实际衰减还有辐射和反射损耗, 且衰减特性与频率和电力线长度相关。为了使得计算的算法简洁实用, 可以忽略多径反射及辐射因素, 本文仅需要根据一种简单的实例测量, 并对比仿真结果, 就可以提取出修正

参数,而且能够适应其他单枝节和多枝节类型的拓扑结构的传输特性的计算。为此根据图 3 所示的电力线网络拓扑结构的实测与仿真结果进行修正分析,得到新的传输常数  $\gamma'$  值为:

$$\gamma' = \frac{\sqrt{F}}{2}\alpha + \beta \quad (15)$$

电力线线长  $L_i$  和  $l_m$  修正为:

$$L'_i = 1.16L_i (i = 1, \dots, N + 1) \quad (16)$$

$$l'_m = 1.16l_m (m = 1, \dots, N) \quad (17)$$

将修正后的  $\gamma'$ 、 $L'_i$  和  $l'_m$  重新代入(7)~(14)即可得到修正后的电力线传输函数。

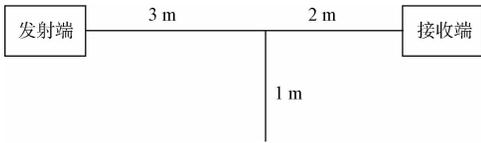


图 3 用于参数修正的电力线拓扑结构

如图 4 所示,可以看到随着频率的增加,实测的结果中凸起的部分逐渐缓慢的减小,而未修正的仿真结果则几乎不变,且其凹槽频率点的位置逐渐偏离;修正之后的仿真结果在凹槽频点的位置及凸起幅度都有很好的吻合。

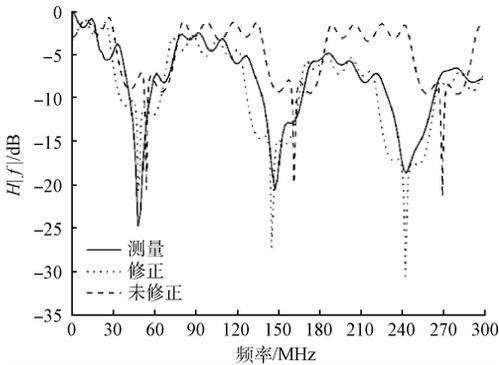


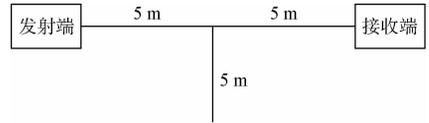
图 4 图 3 中电力线拓扑的测量结果、修正的仿真结果及未修正的仿真结果

#### 4 电力线系统模型的传输函数验证

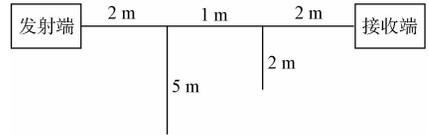
为了验证本文提出的传输效率的数学模型,使用安捷伦矢量网络分析仪 E5061B 进行了实际的电力线网络拓扑结构的测试。测试时,将主线发射端和接收端连接在矢量网络分析仪的两个端口(端口阻抗 50  $\Omega$ ),枝节终端保持开路状态。

对于图 5 所示的带有单枝节的电力线系统拓扑网络结构,以及图 6 所示的带有多枝节的电力线拓扑网络结构,实测和仿真传输效率的计算结果分别如图 7、图 8 所示。可以看到对于 5 m、10 m 带有单枝节的电力线系统,其仿真与实测的幅频特性曲线在上沿起伏上及频点位置对应上具有

较好的一致性。

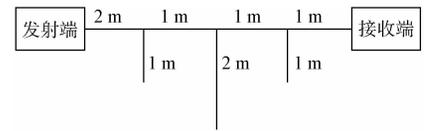


(a) 带有 1 根枝节的 10 m 长电力线

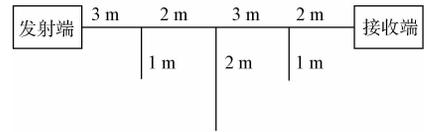


(b) 带有 2 根枝节的 5 m 长电力线

图 5 单枝节的电力线系统拓扑网络结构

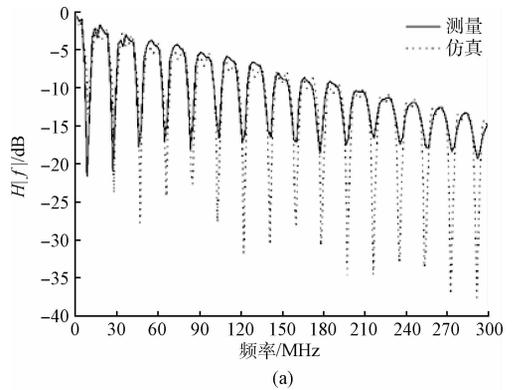


(a) 带有 3 根枝节的 5 m 长电力线

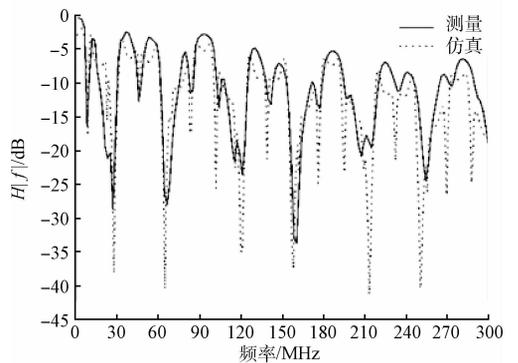


(b) 带有 3 根枝节的 10 m 长电力线

图 6 多枝节的电力线拓扑网络结构



(a)



(b)

图 7 图 5 中对应的电力线拓扑结构的测量与仿真结果

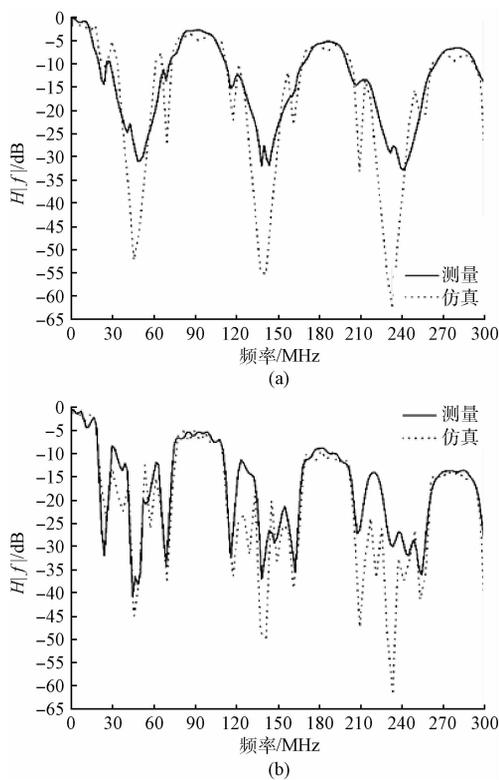


图8 图6中对应的电力线拓扑结构的测量与仿真结果

对比仿真与测量的结果,可以看到在1~30 MHz频带内,测量与仿真的传输曲线吻合较好。随着频率增加,测量结果的幅频特性的下沿即最小值上与理论仿真结果差异变大,可能是高频下算法理论的适用性问题<sup>[12]</sup>,需要进一步分析和研究。

## 5 结论

本文建立了一个有代表性的电力线系统模型,通过从电力线双线及其所处环境的固有物理属性特性参数入手,利用传输线理论在频带1~300 MHz给出了传输函数的仿真与实测的对比结果,仿真的结果与测量的传输效率曲线具有较高的吻合度,实现了对测量结果的起伏位置的预测。利用此种参数修正实现了对于实际不同类型的电力线拓扑结构及其带载枝节有着更为精确的表述,简单准确,有助于在实际方案设计中获得可靠的信息。

## 参考文献

[1] 黄丹平,于少东,田建平,等.基于电力线室内定位算法研究[J].仪器仪表学报,2016,37(1):136-143.

- [2] 易茂祥,陶金,吴友杰,等.一种基于电力线的现场总线设计与仿真[J].电子测量与仪器学报,2015,29(2):258-264.
- [3] 陈宜文,许斌,郝建华,等.电力线噪声信道下基于小波包变换的OFDM信号检测[J].电子测量技术,2015,38(12):111-115.
- [4] 陈宜文,许斌,郝建华,等.基于OFDM技术的电力线通信系统建模与仿真[J].国外电子测量技术,2015,34(2):21-26.
- [5] ZWANE F, AFULLO T J O. An alternative approach in power line communication channel modelling[J]. Progress in Electromagnetics Research C, 2014(47):85-93.
- [6] MOSALAOSI M, AFULLO T J O. A deterministic channel model for multi-access broadband powerline communication[C]. IEEE Africon. IEEE, 2015:1-5.
- [7] BANWELL T, GALLI S. A novel approach to the modeling of the indoor power line channel part I: circuit analysis and companion model [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2):655-663.
- [8] 孔慧娟.窄带低压电力线信道的阻抗测量与特性分析[J].电子测量技术,2012,35(3):57-61.
- [9] 侯华俊,吴斌,熊勇.宽带电力线信道研究及建模[J].电子测量技术,2009,32(4):53-55.
- [10] GALLI S, BANWELL T C. A deterministic frequency-domain model for the indoor power line transfer function[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(7):1304-1316.
- [11] TAN B, TOMPSON J. Powerline communications channel modelling methodology based on statistical features[J]. Eprint Arxiv, 2012.
- [12] 晏奇林,赵翔,徐龙华,等.高频传输线分布参数的研究[J].四川大学学报:自然科学版,2016,53(4):799-804.

## 作者简介

崔双,硕士研究生,主要研究方向为电力线通信。

E-mail:751274463@qq.com

华伟(通讯作者),博士,副教授,主要研究方向为射频电路设计、等离子体设计、频谱检测技术等。

E-mail:huaw@scu.edu.cn