

DOI: 10.7667/PSPC170182

低压电力线载波通信信道衰减特性测量与分析

李松浓¹, 胡晓锐¹, 郑可¹, 孙洪亮¹, 侯兴哲¹, 王毅^{1,2,3}

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

摘要: 研究低压配电网信号传输衰减特性对提高电力线通信系统中物理层信号传输的稳定性和可靠性具有重要意义。通过实测低压电力线横截面积、长度及网络结构对信号传输衰减的影响, 精确计量和分析了宽频带范围内信号的幅频衰减特性随电力线基础特性变化的趋势, 提出利用近距离和常态 T 型网络模型研究电力线信道多径传输的频率选择性衰落。通过仿真和实测直观展示了电力线基础特性影响信号传输衰减的统计效果, 对深刻理解和把握低压电力线信号传输特性形成的本质原因具有重要借鉴作用, 为预测复杂配电网中信号传输特性提供了一种有效分析方式。

关键词: 低压配电网; 幅频衰减特性; 电力线信道; T 型网络模型

Measurement and research on attenuation characteristics of low voltage power line communication channel

LI Songnong¹, HU Xiaorui¹, ZHENG Ke¹, SUN Hongliang¹, HOU Xingzhe¹, WANG Yi^{1,2,3}

(1. State Grid Chongqing Electric Power Research Institute, Chongqing 401123, China;
2. Postdoctoral Workstation, State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 401123, China;
3. Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: To study the attenuation characteristics of signal transmission in low voltage distribution network is very important to optimize the stability and reliability of the physical layer of signal transmission in the local communication system. This paper measures signal transmission attenuation influenced by cross-sectional area, length and network structure of low voltage power line, calculates and analyzes the amplitude frequency attenuation characteristics change with the basic properties of power line within the range of wide band accurately. The little distance and normal T type network structure models are proposed to research the frequency selective fading caused by multipath transmission of power line communication channels. Simulation and measurement statistics results of signal transmission attenuation characteristics influenced by basic characteristics are showed by diagrams intuitively. Those results are very useful for understanding and grasping the essential reasons of low voltage power line transmission characteristics, which provides an effective analysis method for the prediction of signal transmission characteristics in complex distribution network.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China "Research on Power Utilization Information Acquisition System and Monitoring & Diagnosis Optimization Techniques for Equipment Performance", China Postdoctoral Science Foundation (No. 2015T80961), and Natural Science Foundation of Chongqing (No. cstc2016jcyjA0214).

Key words: low-voltage power distribution network; amplitude frequency attenuation characteristics; power line communication channel; T type network structure models

0 引言

低压电力线载波通信(LV-PLC)是利用电力线作

为传输介质, 实现供电和同步数据传输。电力线作为通信信道, 凭借其覆盖范围最广、无需大量投资和本身坚强的网络架构, 在智能电网、远程集中抄表和家居自动化领域引起了广泛的关注^[1-2]。但低压配电网是一个开放的网络, 不同负载的随机接入、切出, 使电力线信道表现出剧烈的时变性, 加上负载阻抗不匹配和各种噪声干扰, 使电力线信道环境十分恶劣。就衰减特性而言, 同一配电变压器台区

基金项目: 国家电网公司科技项目“用电信息采集系统及设备性能监测和诊断优化技术研究”; 中国博士后科学基金资助项目(2015T80961); 重庆市自然科学基金资助(cstc2016jcyjA0214)

内, 用户距离数据采集器的位置不同及用户本身电力线网络架构的不同, 都直接影响通信双方的信号传输。

目前, 国内外针对低压电力线信道的衰减特性已有大量研究^[3]。文献[4]中采用频点电压比较法, 测量典型台区内信号的传输衰减特性, 得出衰减随距离和频率的升高而增加, 城区高层建筑的衰减比农村和城乡结合部更恶劣。文献[5]设计了以网络分析仪为核心的传输测量方案, 对低压配电网扩频信号的传输衰减特性、相位和群时延特性进行了测量。文献[6]测量不同时刻一个工业建筑内的衰减特性, 得出不同时刻随着接入负载的不同, 信号的衰减特性会产生剧烈变化。

通过分析国内外对低压电力线衰减特性进行的测量研究^[7-17], 不难发现: 1) 目前大量测量研究侧重于室内或商业楼宇, 其测量场地环境复杂多变, 具有一定的随机性, 同时是一类基于电力线盲拓扑结构的测量, 这种测量方式虽然适合对特定应用场景电力线衰减特性的研究, 但缺少对影响电力线衰减特性的各单因素的分析, 因此缺少系统性衰减分析方法, 难以准确把握和预测电力线衰减特性; 2) 各类测试电力线衰减特性的发射信号采用不同的调制方式和中心频率, 以致对衰减特性的测量局限在很窄的某段频带范围内, 缺乏对宽频域多频点衰减特性的分析研究; 3) 由于国内外低压配电网结构、负载接入等有很大差别, 国外测量得到的电力线载波通信特性不能完全照搬至国内, 同时随着电力线缆的更新换代, 有必要针对我国电力线架构的实际情况, 测量分析电力线缆的基本特性及网络结构对高频信号传输的影响。本文将复杂的电力线网络进行简化, 逐个考虑影响电力线通信的因素, 对低压电力线横截面积、长度及 T 型结构网络等进行了大量实测研究, 根据测量结果总结出电力线信号衰减特性并分析了其成因。

1 测量方法

电力线信号衰减特性测量使用如图 1 所示的测量框图。其中, 电力线网络为模拟搭建的各种测量场景。使用仪器包括信号发生器、耦合器、示波器和频谱分析仪。

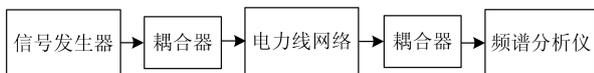


图 1 衰减特性测量系统框图

Fig. 1 Measurement system diagram of attenuation characteristic

实际测试当中, 在发送端利用信号发生器发射不同频点的正弦信号, 经耦合器加载到电力线传输网络中, 而在接收端采用同特性(包括幅频、相频特性)的耦合器将电力线信号导出到频谱仪上进行同步测量。耦合器在电路中主要有三个作用: 1) 为信号发生器和频谱仪连接电缆提供一个转接接口; 2) 耦合器内部的高通滤波器保证高频信号顺利通过, 同时衰减电网的工频信号; 3) 耦合器内部的高频耦合线圈实现强电测和弱电测的物理分离, 保证测量设备和人员安全^[4]。

为评估耦合器的衰减特性, 实验前需测量信号发生器和频谱仪通过耦合器连接时的衰减特性, 结果如图 2 所示。从图 2 中可以看出, 信号最大衰减为 0.31 dB, 在所关心的频率范围内, 由接入耦合器带来的信号衰减很小。

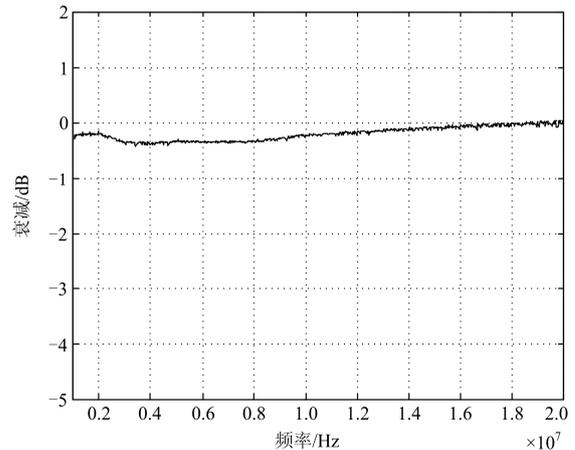


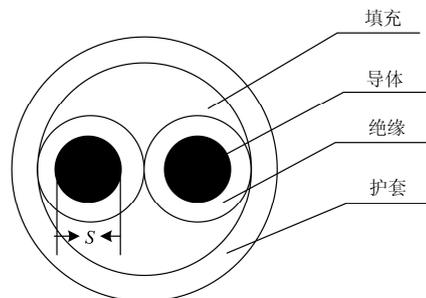
图 2 耦合器衰减特性图

Fig. 2 Coupling attenuation characteristic diagram

2 测量选材及安排

2.1 测试电缆选择

目前常用低压线缆由护套、屏蔽层、绝缘层、导体和填充物等部分构成。常见线缆绝缘层材料采用聚氯乙烯, 线芯为铜芯材质, 本实验选择两种常见结构的电缆进行测试, 其截面如图 3 所示。



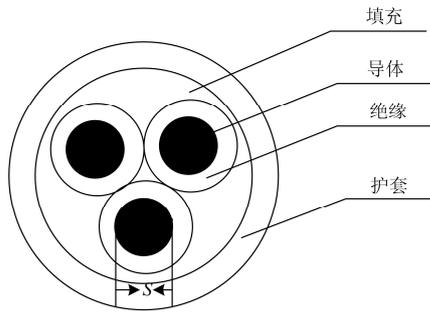


图3 两种类型线缆截面图
Fig. 3 Two types of cable section

其中, S 为线芯的横截面积。实验中使用 3 种不同规格的线缆进行测量, 具体参数如表 1 所示。

表 1 3 种不同规格线缆参数表

Table 1 Parameter table of three different kinds of specification cables

类型	长度/m	横截面积 S/mm^2	线芯材质	线缆特征 描述
A	90	1.5	铜芯	两芯线缆
B	12	4	铜芯	两芯线缆 三芯线缆,
C	20/50/70/90	1	铜芯	选择相线和 中性线传输

选择 3 种常用电缆进行测量, 需要考虑每次测量连线时, 线缆的缠绕方式及线路走向可能对测量结果产生影响, 因此实验中采用护线套、线槽对线缆进行固定, 保证测量的一致性。

2.2 具体安排

1) 测量环境: 为消除外界环境对实验结果的干扰, 测试场所选在屏蔽室中进行。

2) 测量频段: 选取的测量频段为 100 kHz~2 MHz, 此频段包含了现在智能电网在线监控和管理、低压远程抄表和家居智能系统等应用频段。

3) 测量因素: 包括线缆横截面积、线缆长度及 T 型网络结构。

4) 测量统计: 对结果数据进行多次测量并计算统计平均值以确保测试数据的有效性和代表性。

3 仿真与实测结果分析

电力线信号衰减特性与线缆材质、横截面积、长度以及载波频率有密切关系。信号衰减特性与传输距离和频率的关系式可以近似表示为^[9]

$$A(f, d) = e^{-(a_0 + a_1 f^k) \cdot d} \quad (1)$$

式中: f 表示信号频率; d 为线缆长度; a_0 、 a_1 和 k 均为常量, 其值由线缆特性和频率决定。因此可

通过测量线缆横截面积、长度及 T 型网络模型对衰减特性的影响来获取相关数据并分析其成因。

3.1 线缆横截面积对衰减特性的影响

为了评估横截面积对信号传输衰减的影响, 实验中选择长度为 90 m 的不同横截面积的线缆进行测试, 衰减特性如图 4 所示。

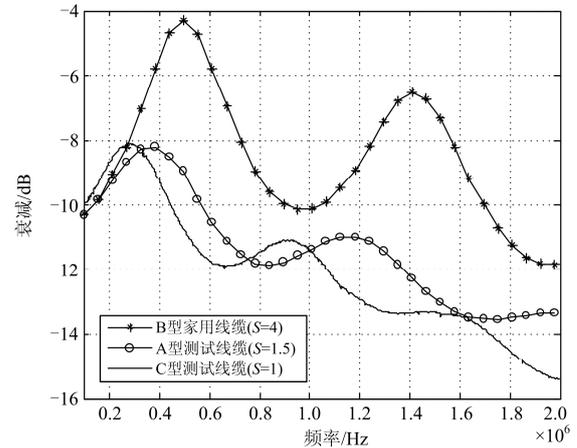


图4 不同横截面积线缆衰减特性图
Fig. 4 Diagram of different cross-sectional area cable attenuation characteristic

从图 4 可以看出, 在线缆材质和长度相同时: 1) 线芯横截面积越小, 信号传输衰减越大; 2) 横截面积小的线缆具有更好的抗衰减抖动能力。

线缆横截面积的不同在电气特性上表现为不同的阻抗特性, 图 4 也就代表了不同阻抗特性电缆的衰减特性。另外可以看出, A 型和 C 型线缆相对于 B 型线缆具有更好的抗随机脉冲噪声的能力, 但对信号发射功率的要求却要高些。

3.2 线缆长度对衰减特性的影响

为分析电力线长度和信号衰减特性之间的关系, 选择相同材质不同长度的 C 型电缆进行测量, 测量框图如图 5 所示。

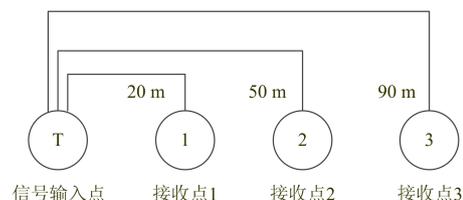


图5 不同电力线长度测量

Fig. 5 Measurement of different power lines length

为充分观测信号衰减的抖动特性, 在测量中将测试频段扩展至 20 MHz。图 6 显示了在不同传输距离时信号的衰减特性。

从图 6 中可以看出, 在线缆材质和横截面积相

同时：1) 信号衰减的幅值随着线缆长度和频率的增加而增大；2) 不同长度线缆信号衰减近似呈线性衰减；3) 在某些频段，如(100~500) kHz 的低频段及 14 MHz 以上的高频段，信号传输出现明显的频率选择衰减。

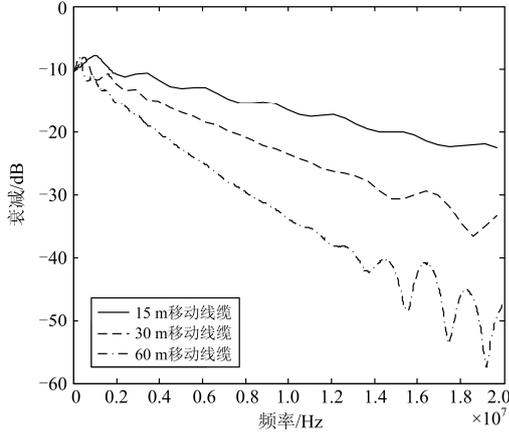


图 6 不同长度线缆衰减曲线

Fig. 6 Attenuation curve of different length cables

电力线是非均匀不平衡传输线，信号在电力线阻抗失配处会产生反射、折射和驻波等复杂现象，接收端收到的是多径信号的叠加。因此信号衰减的幅频特性曲线表现出波动性，并且衰减抖动出现的位置很难预料。

3.3 电网结构对衰减特性的影响

实际当中，低压配电网拓扑结构比较复杂，但任何一个复杂的 PLC 网络都可看作由多个 T 型网络串联或并联组成^[11-12]。T 型网络结构如图 7 所示。

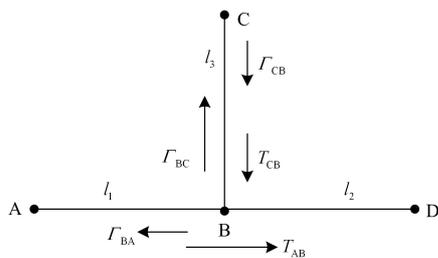


图 7 T 型网络结构图

Fig. 7 Diagram of the T network structure

发送端 A 发送信号并传输给接收端 D，B 为一分支节点，连接到不同电力线网络或负载，3 根线缆的长度分别记为 l_1 、 l_2 、 l_3 ， Γ 和 T 分别表示阻抗不匹配节点处的反射系数和传输系数。为简化模型，假设每根线缆的特征阻抗均为 z_0 ，且在收发端 A、D 处阻抗匹配，因此，T 型网络中，阻抗不匹配点在 B 和 C 两点。

根据传输线理论，在阻抗不匹配分支节点 B 处

的反射系数和传输系数分别为

$$\Gamma = \frac{Z_L - z_0}{Z_L + z_0} \text{ and } T = \Gamma + 1 \quad (2)$$

式中， $Z_L = \frac{z_0}{n-1}$ 表示传输线特性阻抗， n 为分支节点数，包括发送和接收端口。因此可对式(2)进一步改写为

$$\Gamma = \frac{Z_L - z_0}{Z_L + z_0} = \frac{\frac{z_0}{n-1} - z_0}{\frac{z_0}{n-1} + z_0} = \frac{2-n}{n} \quad (3)$$

$$\text{and } T = \Gamma + 1 = \frac{2}{n}$$

C 点处的反射系数和传输系数分别为

$$\Gamma = \frac{Z_D - z_0}{Z_D + z_0} \text{ and } T = \frac{2Z_D}{Z_D + z_0} \quad (4)$$

式中， Z_D 为负载阻抗。因此，由多个 T 型网络级联的电力线多径信道传输模型可以表示为

$$H(f) = \sum_{i=0}^N \left[\prod_{k=1}^K \Gamma_{ik} \prod_{m=1}^M T_{im} \right] A(f, d_i) e^{-j2\pi f \tau_i} \quad (5)$$

式中： N 表示信号能到达接收端的路径数； $\prod_{k=1}^K \Gamma_{ik} \prod_{m=1}^M T_{im}$ 表示主要路径的权值； $A(f, d_i)$ 为线缆衰减量； τ_i 为路径时延。

3.3.1 衰减特征仿真效果

为更好地把握电力线网络的衰减特性，基于对同种材质不同长度线缆所测的信号衰减值，采用最小二乘算法，可对式(1)的衰减特性模型中各参数进行拟合。例如，以 90 m 的 C 型移动线缆在 100 kHz~20 MHz 频率范围内的衰减特性数据可拟合出模型参数分别为 $a_0 = -0.2599$ 、 $a_1 = 1.219e-7$ 、 $k = 0.7751$ ，拟合曲线和实测曲线如图 8 所示。

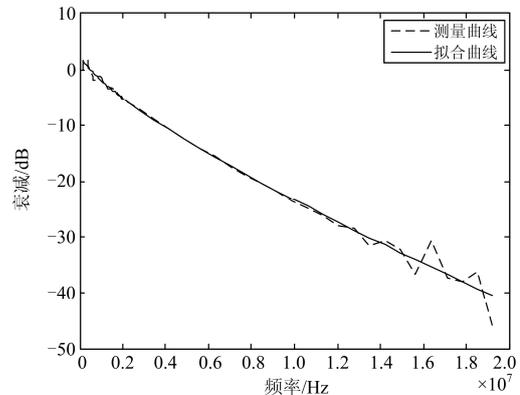


图 8 衰减实测曲线与仿真曲线对比图

Fig. 8 Comparison between measured curves and simulation curves

从图 8 可以看出, 拟合得到的线缆衰减特性与实际测量衰减特性基本一致。拟合曲线与实测曲线的均方根误差(RMSE)为 1.363, 此值较大的原因是实测数据在低频(100~500) kHz 和 高频(14~20) MHz 区间内, 由于收发机与测量线缆阻抗的不完全匹配, 引起部分频段出现频率选择性衰减。

同理, 对所测量的不同长度的线缆衰减特性进行拟合, 可得到不同长度线缆衰减参数, 其值如表 2 所示。

表 2 不同长度线缆的拟合参数

线缆长度/m	a_0	a_1	k
20	0.932	2.392e-8	0.9
90	-0.2599	1.219e-7	0.7751
-150	1.09e-3	3.36e-7	0.7
200	9.33e-3	3.24e-7	0.7
300	8.40e-3	3.0e-9	1

为了进一步仿真 T 型网络的衰减效果, 可计算图 7 所示单个 T 型网络的传输函数的模值实现, 即计算式(5)中 $H(f)$ 的幅频特性。图 7 中信号发送端点为 A, 接收端点为 D。假设在收发端点处线缆阻抗匹配, 且使用同种型号电缆, 分支 BC 之间的线缆阻抗设定为 100Ω 。端点 C 为开路状态, 负载阻抗按 $Z_L = 10^6 \Omega$ 来进行计算。各条分支线缆的长度分别设为: $l_1 = 10 \text{ m}$ 、 $l_2 = 10 \text{ m}$ 、 $l_3 = 20 \text{ m}$, 选用 5 条路径叠加传输来进行模型仿真。根据上述设定条件, 可以计算得到各路径反射系数、路径长度和时延。其值如表 3 所示。

表 3 T 型网络模型多径参数

路径	信号传输节点	反射系数	路径长度/m	时延/ μs
1	A->B->D	0.6667	40	21.0526
2	A->B->C->D	0.4444	60	31.5786
3	A->(B->C->) ² B->D	-0.1481	80	42.1053
4	A->(B->C->) ³ B->D	0.0494	100	52.6316
5	A->(B->C->) ⁴ B->D	-0.0165	120	63.1579

根据各路径反射系数计算相应传输系数, 同时按表 3 所拟合得到的参数计算 $A(f, d_i)$, 最终可得到 T 型网络传输特性的幅频特性(衰减特性)和相频特性, 如图 9 所示。

从图 9 中可以看出, T 型网络随频率呈波浪式递减衰减, 在上述仿真条件下大约每隔 2 M 即会出现一个深度衰减频点。基于上述 T 型网络模型的仿真分析, 为精准研究配电网基础结构对信号传输衰减特性的影响, 提出建立近距离和常态两种 T 型衰

减模型来实测这种变化的特性及其成因。近距离 T 型衰减模型即在不考虑主径 A-B-D 段的线缆衰减对信号传输的影响下, 只分析由于接入的分支造成的多径传播所引起的衰减。而常态衰减模型是为模拟实际配电网分支结构的传输特性, 需要同时考虑主径和多径传输对信号衰减造成的影响。

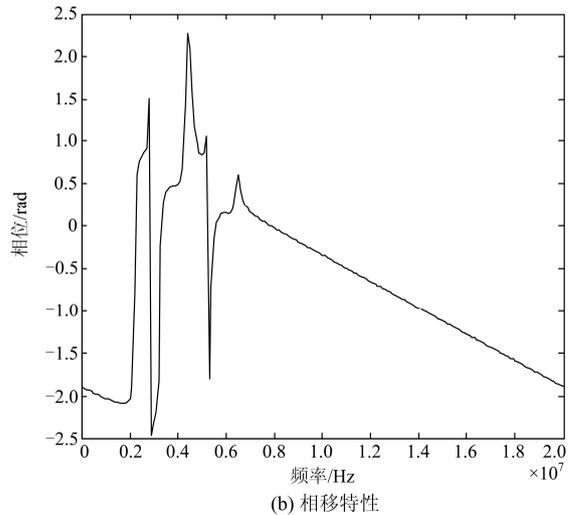
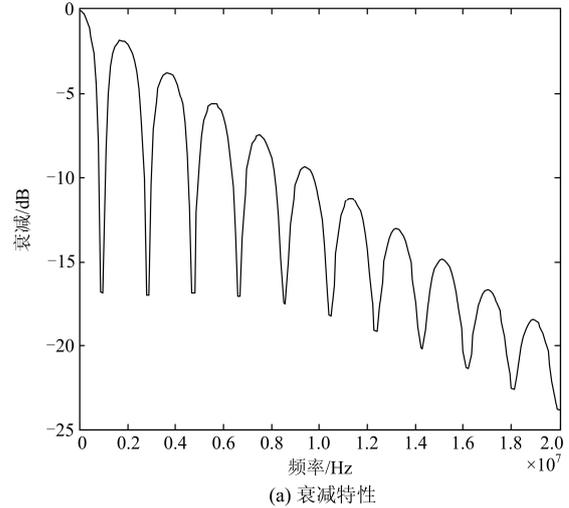


图 9 T 型网络衰减特性和相移特性仿真图

Fig. 9 Attenuation and phase shift characteristics simulation of T network

3.3.2 分支线缆对近距离通信的影响

T 型网络测试模型如图 10 所示, 为单独考察分支线缆对信号传输衰减的影响, 将 T 型网 A-D 段线缆长度配置为 20 cm, 此长度较短故称为近距离, 该段线缆上信号衰减可忽略不计, 选择将分支线缆桥接在 A-D 段中间位置处, 因此结合式(2)式(5)可以推断信号衰减主要是由分支线缆接入所引发多径传播而带来的, 测试中通过改变分支线缆长度来

对比研究信号的衰减特性。

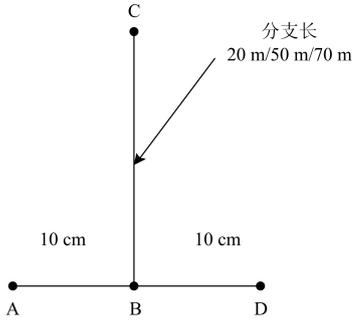


图 10 T 型结构测量图

Fig. 10 Measurement figure of T type structure

1) 单分支线缆对近距离通信的影响

实验中首先测量单分支线缆 T 型网络模型对信号传输衰减的影响, 分支分别连接 20 m、50 m、70 m 长的 C 型线缆, 测量得到的频域衰减特性如图 11 所示。

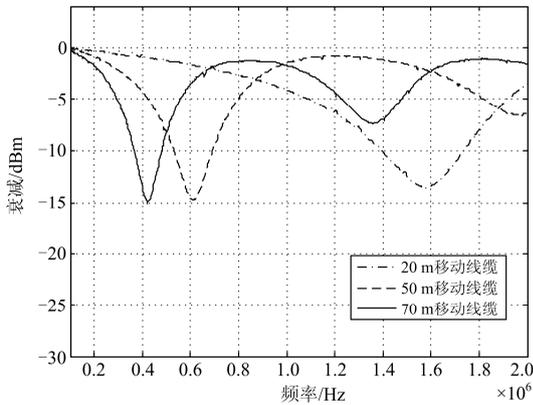


图 11 单个 T 型网络衰减特性图

Fig. 11 Attenuation characteristics of signal T network

从图 11 中可以看出: 当接入单分支线缆时, 信号在某些频点会出现深度衰减, 且随着分支线缆长度的增加, 深度衰减的频点位置向低频移动。如单分支接长度为 20 m 线缆时, 出现深度衰减的频点位置在 1.6 MHz 处, 而当分支长度增加到 70 m 时, 在 400 kHz 出现第一个深度衰减, 并在 1.36 MHz 左右出现第二次深度衰减。图 11 中 20 m 分支线缆衰减特性与图 9(a)中仿真特性变化基本一致, 2 M 频段范围内皆存在一个深度衰减频点, 但最大衰减幅度有 3 dB 左右差异且深衰减频点有平移, 这主要是仿真计算中引入了负载阻抗 Z_L , 且测试线缆阻抗与仿真设定的理论值不完全吻合造成的。

上述测量结果的形成, 是由于线缆阻抗不匹配和信号多径传播使得在某些衰减频率点处引发谐

振, 直传信号和分支反射信号相叠加, 且多径信号间存在相位差, 造成传输过程中的频率选择性衰减。因此从这种近距离通信方式可看出, 分支线缆对主干线缆通信的可靠性具有很大干扰。

2) 多分支线缆对近距离通信的影响

图 12 为两个 T 型网络级联和单个 T 型网络的信号衰减特性对比图。两个 T 型网络级联时的分支分别接长度为 20 m 和 50 m 的 C 型线缆, 主干线缆仍采用近距离通信的方式。从图中可以看出, 两个 T 型网络级联时信号衰减特性近似为单个 T 型网络衰减特性的叠加, 即级联后深度衰减频点的位置与两单分支曲线相同, 幅度为两者的叠加。这正好验证了式(5)多分支级联线性叠加的传输特性。如单分支接 20 m 线缆时, 其在 1.6 MHz 处有 13 dB 的衰减, 单分支接 50 m 移动线缆时, 在 600 kHz 处有 15 dB 的衰减, 当双分支接 20 m 和 50 m 移动线缆时, 在 600 kHz 和 1.6 MHz 频点处出现深度衰减, 且衰减幅度与单分支时的衰减相近。当所接双分支线缆长度均为 20 m 时, 其衰落特性与接单分支 20 m 的衰减特性也非常相似, 只是衰减幅值进一步增大。

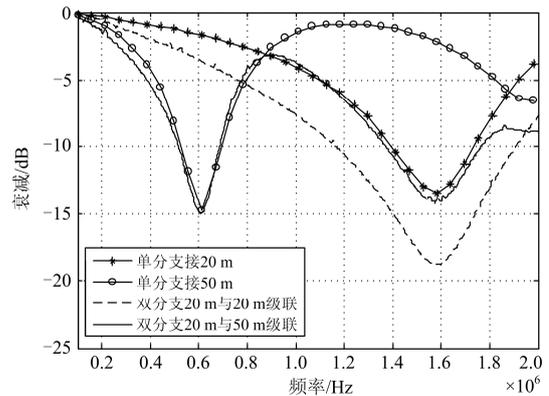


图 12 两个 T 型网络级联衰减特性图

Fig. 12 Attenuation characteristics of double T network cascade

3.3.3 常态 T 型衰减模型

在实际电力线载波通信过程中, 不同长度和阻抗特性的分支线缆是随机独立接入信号收发端之间的电力线路上的。但这种随机接入在实际中又形成一种统计常态, 即分支线缆在主干线缆中桥接位置总是在一定范围内变动。为模拟常态下电力线载波信号的传输特性, 本文选择具有代表性的 90 m 移动电缆作为测试的主干线缆, 而在该电缆的发端、距发端 50 m 处和收端分别桥接 12 m 的 B 型线缆各一次作测试, 3 种桥接方式所测得的衰减特性如图 13 所示。

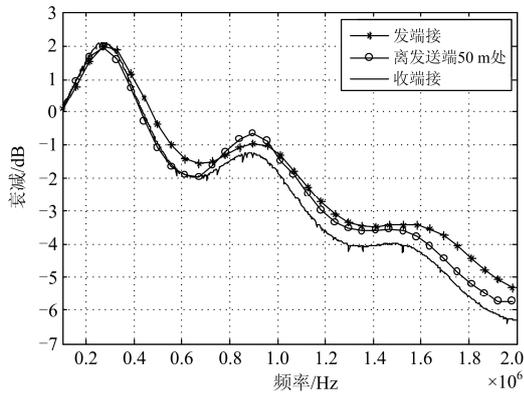


图 13 常态 T 型网络衰减特性图

Fig. 13 Attenuation characteristic of normal T type network

从图 13 中可以看出, 在常态 T 型网络模型主干线缆的不同位置接入分支线缆时, 传输信号衰减特征曲线的变化情况基本一致, 但随着分支线缆接

入点离发射端越远, 信号衰减幅值有所增大。相比于近距离衰落模型的测试结果, 常态衰落模型在 100 kHz~2 MHz 频率范围内没有非常显著的衰减波谷, 此时近距离衰落模型中多径传输的衰减效应相对减弱, 测量结果反映了主径和多径传输的综合衰减效应。

3.4 总结

通过以上分析研究可以看出, 实测近距离和常态 T 型网络衰减特性与式(5)衰落模型仿真结果的变化趋势相近, 即频带范围内呈波浪式递减衰落。另外, 信号传输随电力线基础特性的变化表现出不同的衰减特性, 这主要是由于电力线阻抗的失配和电网结构变化带来的多径传播效应造成某些频点处的深度衰落和抖动。而在横截面积、长度和电网结构三类基础特性的影响下, 衰减特性又各自有着具体表现, 总结如表 4 所示。

表 4 三类基础特性对电力线传输衰减的影响

Table 4 Power line transmission attenuation based on three kinds of basic characteristics

变量	描述	结论
横截面积	90 m 的 A/B/C 型电缆	(1) 线芯横截面积越小, 信号传输衰减越大; (2) 横截面积小的线缆具有更好的抗衰减抖动能力。
长度	20 m/50 m/90 m C 型电缆	(1) 信号衰减的幅值随线缆长度和频率的增加而增大; (2) 长度一定的线缆, 衰减的幅频曲线总体呈现出线性衰减的趋势;
电网结构	单分支、近距离模型	(3) 在某些频段, 如(100~500) kHz 的低频段及 14 MHz 以上的高频段, 信号传输出现明显的频率选择衰减。 当接入单分支线缆时, 信号在某些频点会出现深度衰减, 且随着分支线缆长度的增加, 深度衰减的频点位置向低频移动。
	多分支、近距离模型	为单分支衰减特性的叠加, 主要表现为深度衰减频点位置相同及衰减幅度的叠加。
	常态模型	(1) 分支线缆在常态 T 型网络主干线缆的不同位置接入时, 传输信号衰减特征变化趋势基本一致, 且相对于近距离通信各频点的深度衰减幅度较平缓; (2) 随着分支线缆接入点离发射端越远, 信号衰减幅值有所增大。

4 结语

本文通过实测低压电力线横截面积、长度以及 T 型网络结构对信号传输衰减特性的影响, 给出了宽频带范围内信号衰减随电力线基础特性变化的统计特征图, 重点对比研究了近距离和常态 T 型网络实测模型与电力线多径传输仿真模型的衰减效果图。根据测量结果得出了一系列直观结论, 并对每一种特性变量情况下衰减特性形成的原因作了针对性的分析和总结, 重点分析了电力线阻抗失配和分支线缆多径传播效应对信号的频率选择性衰减。

从测量方法、测量材质和测量环境的选取都作了优化考虑, 同时测试数据是经过反复测量并计算

统计均值以确保结果的可靠性和代表性, 研究成果对深刻理解低压电力线信号传输特性形成的本质原因具有重要意义, 也为预测复杂配电网中信号传输的衰减特性提供一种有效的分析方式。

参考文献

- [1] 郭昊坤, 衡思坤, 应展烽, 等. 低压电力线通信信道特性研究综述[J]. 电力系统通信, 2012, 234(33): 1-5.
GUO Haokun, HENG Sikun, YING Zhanfeng, et al. Survey of the characteristics of low-voltage power line communication channel[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2012, 234(33): 1-5.
- [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): 149-155.

- CAI Wei, LE Jian, JIN Chao, et al. Overview of the channel modeling methods of power-line carrier communication[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 149-155.
- [3] 陈凤, 郑文刚, 申长军, 等. 低压电力线载波通信技术及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(22): 188-195.
- CHEN Feng, ZHENG Wengang, SHEN Changjun, et al. Low-voltage power line carrier communication technology and its application[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(22): 188-195.
- [4] 李丰, 田海亮, 王思彤. 低压电力线窄带载波通信信道阻抗与衰减特性的现场测量及分析[J]. 电测与仪表, 2011, 54(48): 90-96.
- LI Feng, TIAN Hailiang, WANG Sitong. Field measurement and analysis of the impedance and attenuation characteristics of the low-voltage power line narrowband carrier channel[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2011, 54(48): 90-96.
- [5] 郭静波, 王赞基. 低压配电网扩频信号传输特性及通信系统实现对策[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(7): 78-82.
- GUO Jingbo, WANG Zanji. Spread spectrum signal transmission over low voltage distribution networks and realization countermeasures of the communication system[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(7): 78-82.
- [6] CHAN MORGAN H L, DONALDSON R W. Attenuation of communication signals on residential and commercial intrabuilding power-distribution circuits[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1986, 28(4): 220-230.
- [7] 王乔晨, 郭静波, 王赞基. 低压配电网电力线高频噪声的测量与分析[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(1): 18-21.
- WANG Qiaochen, GUO Jingbo, WANG Zanji. Measurement and analysis of high frequency noises on low-voltage power networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(1): 18-21.
- [8] 马强, 陈启美, 李勃. 跻身未来的电力线通信(二)电力线信道分析及模型[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(4): 72-76.
- MA Qiang, CHEN Qimei, LI Bo. Predictive schemes for future power line communication part two PLC channel analysis and model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(4): 72-76.
- [9] ZIMMERMANN M, DOSTERT K. A multipath model for the power line channel[J]. IEEE Transactions on Communication, 2002, 50(4): 553-559.
- [10] 张众发, 江志. 室内低压电力线信道特性测量与分析[J]. 电测与仪表, 2008, 513(45): 25-30.
- ZHANG Zhongfa, JIANG Zhi. Measurement and study on indoor low-voltage power line channel[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2008, 513(45): 25-30.
- [11] 肖勇, 房莹, 张婕, 等. 低压电力线载波通信信道特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(20): 20-25.
- XIAO Yong, FANG Ying, ZHANG Jie, et al. Research on characteristics of low voltage power line communication channel[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(20): 20-25.
- [12] HE H, CHENG S, ZHANG Y, et al. Analysis of reflection of signal transmitted in low-voltage powerline with complex wavelet[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(1): 86-91.
- [13] THOMAS B, STEFANO G. A novel approach to the modeling of the indoor power line channel, part 1: circuit analysis and companion model[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 655-662.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.

收稿日期: 2017-02-13; 修回日期: 2017-05-31

作者简介:

李松浓(1980—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为用电信息采集系统。E-mail: lxpecolicee@163.com

(编辑 魏小丽)