

低压电力线信道中脉冲噪声的建模及仿真

李平, 赵志辉, 张振仁

(第二炮兵工程学院, 陕西 西安 710025)

摘要: 在低压电力线信道的各种噪声中, 随机脉冲噪声是影响高速电力线通信的主要因素。首先分析了低压电力线信道的噪声特性, 尤其是脉冲噪声; 通过将噪声状态分组, 并引入过渡状态, 建立了基于分群马尔可夫链的脉冲噪声统计模型, 并用单差错状态 Fritchman 模型的无差错游程分布来拟合实际测量的概率曲线, 从而得出模型的各参数值。最后进行了相应的测量及仿真, 给出了脉冲间隔时间和脉冲宽度的概率分布曲线。仿真研究结果表明, 所建模型是有效的。

关键词: 电力线通信; 信道特性; 脉冲噪声; 马尔可夫模型

Modeling and simulation of the impulse noise in low voltage power line communication channel

LI Ping, ZHAO Zhi-hui, ZHANG Zhen-ren

(The Second Artillery Engineering Institute, Xi'an 710025, China)

Abstract: In various noises of the channel of low-voltage power line, the random impulse noise is the main factor that influences high-speed power line communication. In this paper, channel noises of low voltage power line, especially impulsive noise are introduced firstly, and then based on a Partitioned Markov Chain, the statistical model of impulsive noise is established. The error-free intervals distribution of single mistake state Fritchman model is used to fit the measured actually, and every parameter value of the model is obtained. Finally, the measurement and simulation results of pulse width and interarrival times are given. The simulation results show that the established models are available.

Key words: power line communication; channel characteristics; impulse noise; Markov model

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)05-0058-05

0 引言

电力线路作为世界上分布最广泛、结构最坚固的网络, 深入到千家万户, 将低压电力线用作通信信道具有其独特的优势。同时由于低压电力线上负荷的多样性和时变性, 以及复杂的网络结构, 低压电力线信道又表现出阻抗变化大、高噪声、信号衰减大和时变性等缺点。为了保证其通信质量和提高通信速率, 有必要研究合适的信号编码、调制、传输和解调方法, 在进行这些研究时, 首先需对信道特性有详细的了解。在电力线信道特性中, 最难建模分析的是随机脉冲噪声, 而它也正是影响电力线通信的主要因素。国外已有学者对脉冲噪声的统计规律进行了研究, 并得到一些结论^[1~3]。

本文在分析电力线脉冲噪声的基础上, 通过一个分群的马尔可夫链建立了脉冲宽度和脉冲间隔时间的统计模型, 并进行了相应的测量及仿真。旨

在分析脉冲噪声的统计规律, 为低压电力线通信的相关研究提供技术支持。

1 低压电力线的噪声特性

电力线上的噪声分为非人为噪声和人为噪声。非人为噪声是自然现象, 如雷电在电力线上引起的噪声; 人为噪声来自各种电器、机电产品以及电力线路自身。电力线的主要噪声并不是加性高斯白噪声, 文献[1, 4]将低压电力线信道内的噪声分为五类:

1) 背景噪声: 时时存在, 其频谱占据了整个通信带宽。背景噪声的功率谱密度 (PSD) 相对较低, 且随时间的变化而缓慢发生变化。背景噪声与传输信号一样被用户配电网所衰减。经测量发现背景噪声的主要来源是交直流两用电动机。

2) 窄带噪声: 窄带噪声多为带调制幅值的正弦干扰信号, 主要是由引入电力线的中短波广播信号

的干扰而产生。它通常随着白天与夜晚而不同, 夜晚一般比白天幅度高。

3) 与工频异步的周期性脉冲噪声: 这种噪声的重复频率一般为 50~200 Hz, 主要是由电视接收机和计算机显示器产生的。脉冲的重复频率依赖于电视机和显示器的扫描频率标准, 而对高分辨率和图像质量的追求将使这些频率越来越高。

4) 与工频同步的周期性脉冲噪声: 脉冲的重复频率为工频或工频的整数倍。脉冲的持续时间很短, 频率覆盖范围大, 功率大, 功率谱密度随频率的升高而下降。由工频电压触发的可控硅整流器是产生这种噪声的主要根源。

5) 随机脉冲噪声: 闪电和负载的开关操作都会产生随机脉冲噪声, 而且每个脉冲噪声都将影响很宽的频带。它的到达时间是随机的, 持续时间从几微秒到几毫秒。脉冲噪声的功率谱密度有时会比背景噪声高出 50 dB。

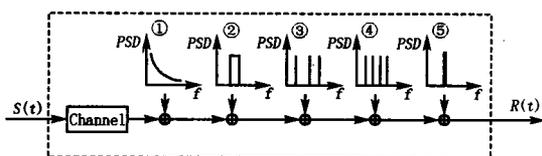


图 1 电力线信道中的各类噪声

Fig.1 The additive noise in the powerline environment

图 1 给出了电力线信道中各类噪声的功率谱分布的示意图。通常, 前三种噪声随时间变化缓慢, 常归结为背景噪声。后两种噪声的强度高, 时变性强, 当出现这些噪声时, 功率谱密度会突然上升, 数据传输会造成很大的误差, 是影响电力线通信的主要因素。

2 脉冲噪声分析

经测量发现, 电力线上的主要干扰是周期性出现的, 尤其是二次谐波噪声, 而且其幅值比时不变连续干扰大许多。产生这种周期性干扰的原因是由于许多用电设备会在工频交流电基波的某个固定相位上释放出干扰。另外许多大功率的用电设备, 如电机等, 会在电网上产生很多的高次谐波。这些高次谐波只存在于工频的整数倍的频率内, 但能量较大, 且频率有可能延伸到几万赫兹。如果信号频率正好与它们重叠, 则对通信的可靠性会产生很大的影响。

在实际情况中, 由于有大量的用电设备同时释放出干扰, 而这些干扰的瞬时功率、周期、相位等又变化很大, 各不相同, 因此最终会在电力线上产

生时不变的连续干扰。这种干扰表现为平均功率较小, 但是频谱很宽而且持续存在。

除了上述的周期性和连续性的干扰外, 电力线上还存在许多随机发生的干扰, 即随机脉冲噪声。随机脉冲噪声通常是由于高压开关的操作、雷电、较大的负荷变化、电力线路上的短路故障等引起的, 往往是能量很大的脉冲干扰或脉冲干扰群, 持续时间较短, 但能量很集中, 频谱也很宽。

高压开关的断开和闭合在电力线路上导致的暂态过程会产生一系列的电磁脉冲(脉冲群), 而这一暂态过程受多种因素影响, 分散性极大。雷电会在电力线路上产生能量很大的电流和电压脉冲, 波形的上升时间很短, 下降时间相对较长。雷击过电压在低压网络内传播时, 遇阻抗不同的节点时将发生反射, 产生振荡波, 其频率和传播速度与电路内的各种参数有关。显然, 这种脉冲会对载波通信产生很大的影响。

另外, 低压电力线路上的各种大功率负载的突然开关、大功率电机的启停过程、功率因数补偿电容器的投切以及短路、故障切除和重合闸等都会引起电压、电流的突变和谐波分量的增加。而在离接收机近距离的范围内, 某些中小功率的负载, 如日光灯、计算机等的开关也会产生较大的突发脉冲干扰而影响通信。上述这些干扰的持续时间较短, 从几十微秒到几秒不等, 强度大小也不等, 出现时间也是随机的, 具有很大的不可预测性。如果它们正好发生在数据通信过程中, 由于其高能量、宽频谱的特性, 通常会使得所传数据的若干位甚至整个数据传输过程发生错误。

综上所述, 脉冲噪声是低压电力线通信的严重有害源, 其对数据传输的影响程度主要是由脉冲的幅度、脉宽和间隔时间决定。文献[1]根据测量结果得出了如下结论: 脉冲噪声强度一般比背景噪声水平高 10 dB, 有时可以超过 40 dB, 脉冲强度与噪声源的强度和噪声源离接收装置的距离有关; 主要脉冲系列的脉冲频率(由脉冲间隔时间决定)一般为 100 Hz, 它与 50 Hz 电源电压的正负周期同步; 对于 100 Hz 脉冲噪声, 其脉宽变化达到几个百分点; 脉宽与所选定的幅度水平 T 有关, 一般来说, 脉冲宽度随幅度水平增加而减小; 有些噪声源将增加背景噪声功率(如真空吸尘器和搅拌机), 其它一些将增加脉冲噪声功率(如复印机以 0.01 的概率产生高于背景噪声 27 dB 的 100 Hz 周期脉冲, 灯光调节器以同样的概率产生高于背景噪声 40 dB 的脉冲噪

声)。表 1 中列出了常用电器所产生的脉冲的幅度和宽度值。

表 1 常用电器对电力线产生的脉冲噪声幅度和宽度

Tab.1 Impulse amplitude and width of electrical appliance

噪声 电器	幅度/mV		脉冲宽度/ μ s	
	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差
电熨斗	369.3	585.8	760.2	347.9
空调器	285.4	457.6	755.9	407.7
立体声	279.1	447.0	536.9	357.2
白炽灯	951.1	494.4	774.1	462.6
洗衣机	363.1	512.8	488.8	265.7
显示器	197.2	311.3	722.4	34.3
微波炉	213.8	255.5	3 584.7	193.5
电动缝纫机	41.6	50.1	148.2	115.5
加热器	87.9	119.7	105.3	56.0

3 脉冲噪声的仿真模型

电力线数据通信中位错误或突发事件错误都是由脉冲事件所引起的。对脉冲事件的振幅、宽度和时间间隔的概率统计信息可以作为电力线信道建模的基础。考虑到脉冲为随机事件的事实，其特性可以用随机变量来描述，这里通过一个分群的马尔可夫链(Partitioned Markov Chain)对脉冲宽度和脉冲间隔时间进行建模和仿真。

3.1 Fritchman 模型

Fritchman 模型是用离散时间有限状态马尔可夫序列来表征离散信道的^[5]，它很适合建模信道的突发差错，且较容易从差错分布估计出模型的参数，因此得到了相当的重视^[6]。对二进制信道，Fritchman 模型将状态空间分成了 k 个好状态和 $N-k$ 个坏状态，好状态表示无差错的传输，而坏状态总是会产生传输差错，因此，差错生成矩阵 B 中的元素不是 0 就是 1，不需要对它们进行估计。一个具有两个好状态和一个坏状态的 Fritchman 模型如图 2 所示。

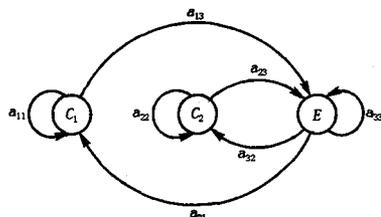


图 2 三状态的 Fritchman 模型

Fig.2 Three states Fritchman model

这个模型具有状态转移概率矩阵

$$P = \begin{bmatrix} p_{1,1} & 0 & p_{1,3} \\ 0 & p_{2,2} & p_{2,3} \\ p_{3,1} & p_{3,2} & p_{3,3} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: $p_{i,j}$ ($i, j=1, 2, 3$)是由第 i 个状态到第 j 个状态的状态转移概率。矩阵中每一行的转移概率之和为 1, 故矩阵 P 共有 4 个独立参数。

令 $\bar{O} = \{O_1, O_2, \dots, O_T\}$ 为差错序列, 其中 $O_k = 1$ 表明第 k 个传输比特出现了差错, 而 $O_k = 0$ 表明第 k 个传输比特无差错。用 $(O^m 11)$ 表示观察到一个差错之后连续出现 m 个或者更多个无差错传输的事件, 该事件发生的概率称为无差错游程分布, 记为 $P(O^m 11)$ 。

对于图 2 所示的 Fritchman 模型, 有:

$$P(O^m 11) = \sum_{k=1}^2 \frac{p_{3,k}}{p_{k,k}} (p_{k,k})^m \quad m \geq 1 \quad (2)$$

可见, 对于单差错状态 Fritchman 模型的情况, 无差错游程唯一地确定了各个模型参数。

3.2 脉冲宽度和脉冲间隔时间的仿真模型

为了对脉冲宽度和脉冲间隔时间进行建模和仿真, 把噪声状态分为两组 $A(i=1,2, \dots, \nu)$ 和 $B(i=1+\nu, 2+\nu, \dots, n)$, A 中的 ν 个状态表示没有脉冲事件发生的情况, B 中的 $w = n - \nu$ 个状态表示有脉冲事件发生的情况。

为保证单差错状态以便计算模型参数, 引入过渡状态 (transition states)^[1,2], 这一状态概括了状态在 A 与 B 之间的相互转换, 如图 3 所示。(各组内的状态之间不能相互转移)

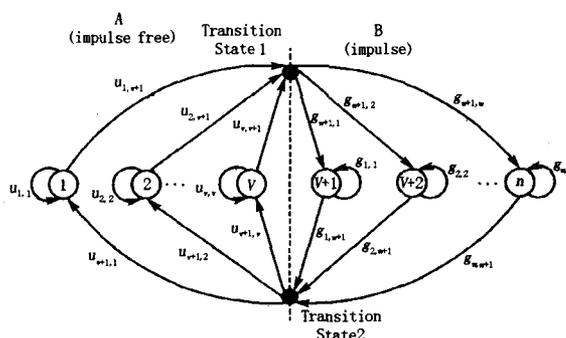


图 3 脉冲噪声的分群 Markov 模型

Fig.3 Partitioned Markov-chain for the impulsive noise events

采用这一方法, 可以对没有脉冲事件发生的状态和有脉冲事件发生的两种情况用两个独立的转移概率矩阵来描述, 分别为矩阵 U 和 G :

$$U = \begin{bmatrix} u_{1,1} & 0 & \cdots & 0 & u_{1,v+1} \\ 0 & u_{2,2} & \cdots & 0 & u_{2,v+1} \\ \vdots & & & 0 & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & u_{v,v} & u_{v,v+1} \\ u_{v+1,1} & u_{v+1,2} & \cdots & u_{v+1,v} & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$G = \begin{bmatrix} g_{1,1} & 0 & \cdots & 0 & g_{1,w+1} \\ 0 & g_{2,2} & \cdots & 0 & g_{2,w+1} \\ \vdots & & & 0 & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & g_{w,w} & g_{w,w+1} \\ g_{w+1,1} & g_{w+1,2} & \cdots & g_{w+1,w} & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

由互补概率分布函数 cpf (表示随机变量 X 超过值 x 的概率 P):

$$cpf(x) = P(X > x) \quad (5)$$

可知脉冲宽度大于某个宽度 t_w 的概率 cpf_w , 用离散时间 k 表示为:

$$\begin{cases} cpf_w(k) = 1 & k = 0 \\ cpf_w(k) = \sum_{j=1}^w g_{w+1,j} \cdot g_{j,j}^k & k = 1, 2, \dots \end{cases} \quad (6)$$

其中: $g_{w+1,j}$ 表示从临界状态 $w+1$ 向 B 中的某个状态 j 过渡(脉冲开始发生)时的转移概率, $g_{j,j}$ 表示 B 中的某个状态不发生状态转移(脉冲保持)的概率。

脉冲间隔时间超过某一时间跨度 t_d 的概率 cpf_d , 用离散时间 k 表示为:

$$\begin{cases} cpf_d(k) = 1 & k = 0 \\ cpf_d(k) = \sum_{j=1}^v u_{v+1,j} \cdot u_{j,j}^k & k = 1, 2, \dots \end{cases} \quad (7)$$

其中: $u_{v+1,j}$ 表示从临界状态 $v+1$ 向 A 中的某个状态 j 过渡(脉冲开始消失)时的转移概率, $u_{j,j}$ 表示 A 中的某个状态不发生状态转移(无脉冲保持)的概率。

两个 cpf 都是一些加权指数之和, 都可以通过矩阵 U 和 G 的元素来计算。矩阵 U 和 G 中的元素可由测定的脉冲宽度和脉冲间隔时间通过曲线拟合技术来确定。

比较式(2)与式(6)、式(7), 可看出它们都是加权指数和的形式, 因此可以用无差错游程分布曲线来拟合实际测量的概率曲线, 进而可以得到模型的各项参数值, 再根据式(6)、式(7)可以得到相应的仿真曲线。

4 测量及仿真结果

选择与文献[2]中近似的试验条件: 带宽为 500 kHz~20 MHz, 采用采样时间间隔为 80 μ s 的尖峰

检波器, 单个测量的持续时间为 10 s。通过连续测量与统计, 得到脉冲间隔及脉宽的统计曲线如图 4、图 5 中的实线所示。可以看到在脉冲间隔时间(IAT)的测量中, 90%以上的间隔时间低于 200 ms, 在 200 ms 以上的间隔时间测量值呈指数分布; 对脉冲宽度的测量中, 仅约 3%的脉冲宽度超过 1 ms。

为简化计算, 设仿真模型中 A 组和 B 组中的状态数均为 2, 即 $v = w = 2$, 根据测量曲线, 可以通过拟合得到模型的参数值:

$$U = \begin{bmatrix} 0.9999583 & 0 & 0.0000417 \\ 0 & 0.9960 & 0.0040 \\ 0.0950 & 0.9050 & 0 \end{bmatrix}$$

$$G = \begin{bmatrix} 0.8966 & 0 & 0.1034 \\ 0 & 0.3906 & 0.6094 \\ 0.0948 & 0.9052 & 0 \end{bmatrix}$$

由此得到仿真曲线如图 4、图 5 中的虚线所示。

可以看出, 仿真曲线和测量曲线的重合度较好, 只是在小概率区间略有偏差。

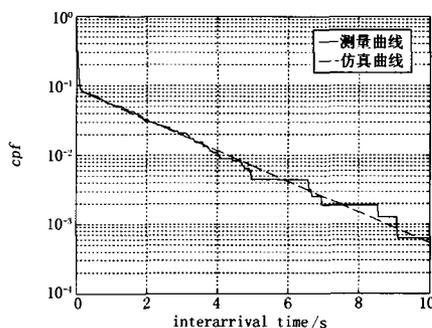


图 4 脉冲时间间隔的概率分布曲线

Fig.4 The probability distribution of impulse interval times

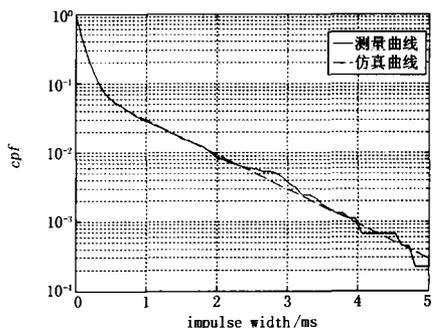


图 5 脉冲宽度的概率分布曲线

Fig.5 The probability distribution of impulse width

需要说明的是, 对于不同的电力线测试环境, 得到的测量及仿真曲线也不尽相同。在对模型参数简化处理后, 由于参数减少, 各状态间划分的合理

性完全取决于选定的阈值,模型参数对实际信道中可能出现的突发小幅度的脉冲噪声信号不够敏感。但就应用于粗粒度的编码方式验证测试而言,该模型基本符合要求。

5 结束语

噪声干扰是影响电力线高速通信的主要因素,尤其是随机脉冲噪声会给电力线信道带来很强的时变性,其功率谱的突然上升会引起信噪比的突降和解调数据的突发错误,甚至导致通信失败。本文测量分析了电力线信道中的脉冲噪声,建立基于分群马尔可夫链的统计模型,用单差错状态Fritchman模型的无差错游程分布曲线来拟合实际测量的概率曲线,得出模型的各项参数值。相对于文献[2],模型参数得到了简化。仿真研究结果表明所建模型是有效的。

参考文献

- [1] Zimmermann M, Dostert K. An Analysis of the Broad band Noise Scenario in Power-line Networks[A]. In: Proceedings of the 4th International Symposium on Powerline Communications and Its Applications[C]. 2000. 131-138.
- [2] Zimmermann M, Dostert K. Analysis and Modeling of Impulsive Noise in Broad-band Powerline Communica-

tions[J]. IEEE Trans on Electromagnetic Compatibility, 2002, 40(1): 249-258.

- [3] Chan M H L, Donaldson R W. Amplitude, Width and Interarrival Distributions for Noise Impulses, and Bit Error Rates on Intrabuilding Powerline Communication Networks[J]. IEEE Trans on Electromagnetic Compatibility, 1989, 31: 320-323.
- [4] Hooijen O. A Channel Model for the Residential Power Circuit Used as a Digital Communications Medium[J]. IEEE Trans on Electromagnetic Compatibility, 1998: 331-336.
- [5] Fritchman B D. A Binary Channel Characterization Using Partitioned Markov-chains[J]. IEEE Trans on Inform Theory, 1967, 13(2): 221-227.
- [6] Babich F, Kelly O E, Milstein L B. Generalized Markov Modeling for Flat Fading[J]. IEEE Trans on Communications, 2000, 48(4): 347-351.

收稿日期: 2006-09-08; 修回日期: 2006-11-21

作者简介:

李平(1974-),男,博士研究生,主要研究方向为低压电力线高速数据传输、通信信号处理; E-mail: ping502@163.com

赵志辉(1977-),女,硕士,主要研究方向为进化计算与计算智能、图形图像处理;

张振仁(1940-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为非线性信号处理、输配电系统自动化及电力设备故障监测与诊断。

(上接第 57 页 continued from page 57)

- [2] Menzies R W, Zhang Y. Advanced Static Compensation Using a Multilevel GTO Thyristor Inverter[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1995, 10(3).
- [3] Schauder C D, Mehta H. Vector Analysis and Control of Advanced Static VAR Compensators[J]. IEEE Proceedings-C, 1993, 140(4).
- [4] 陈华元,王幼毅,周汝景. STATCOM 鲁棒非线性控制[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(3): 44-49. CHEN Hua-yuan, WANG You-yi, ZHOU Ru-jing. Non-linear Robust Control of STATCOM [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(3): 44-49.
- [5] 谢小荣,崔文进,唐义良,等. STATCOM 无功电流的鲁棒自适应控制[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21

(4): 35-40.

XIE Xiao-rong, CUI Wen-jin, TANG Yi-liang, et al. Reactive Current Self-accommodate Robust Control of STATCOM[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(4): 35-40.

收稿日期: 2006-09-13; 修回日期: 2006-11-21

作者简介:

李洪美(1969-),女,讲师,硕士,从事人工智能在电力系统中的应用方面的研究; E-mail: lhmjcn@163.com

李振然(1935-),男,教授,硕士,从事人工智能在电力系统中的应用方面的研究;

汪旒(1980-),女,讲师,硕士,从事电力系统稳定性方面的研究。