

文章编号: 1672-2892(2012)01-0022-05

## 基于低压电力线的高速载波模块设计

林佳森, 李 智, 李乔峰, 马一森

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610065)

**摘 要:** 选择有效的方案实现智能电网中的双向实时通信至关重要, 电力线载波(PLC)技术提供了一种适合中国国情的低成本解决方案。介绍了 OFDM PLC 调制技术的优势, 通过分析低压电力线通信信道输入阻抗, 建立了低压电力线载波模块系统模型。并在关于电力线信道的研究基础上, 设计了基于低压电力线的高速载波模块。测试结果表明, 该载波模块设计方案具有较高的接收灵敏度和抗噪声能力。

**关键词:** 智能电网; 正交频分复用; 电力线载波; 阻抗; 电力线载波模块

**中图分类号:** TN761

**文献标识码:** A

## Design of high-speed PLC module based on low voltage power line

LIN Jia-sen, LI Zhi, LI Qiao-feng, MA Yi-sen

(College of Electronic and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610065, China)

**Abstract:** Effective choice of the solution is essential to achieve a real-time, bi-directional(full-duplex) communication of the smart grid. The Power Line Carrier(PLC) technology provides a low-cost solution, which suits China's own national conditions. In this paper, the advantages of OFDM PLC modulation technology are introduced. A PLC module of system model is established through the analysis of the input impedance under the low-voltage power line channel. The high-speed PLC module based on low-voltage Power Line is also designed according to the studies of power line channel. The results show that the design of the PLC module has featured high receiving sensitivity and anti-noise ability.

**Key words:** smart grid; Orthogonal Frequency Division Multiplexing; Power Line Carrier; impedance; PLC module

随着国家全面实施“两改一同价”、“阶梯电价”以及“一户一表”工程政策, 申办一户一表用电的客户数量激增, 基层供电企业负担大幅增加(诸如抄、核、收人员工作量加大, 费用增加等)<sup>[1]</sup>。传统的人工上门抄表、手持终端抄表等方式已不能满足供用电管理现代化的需要。电力线载波抄表因不用额外增加网络改造和后续费用而备受青睐。本文在对低压电力线通信信道研究的基础上, 设计和实现了低压电力线高速载波模块, 并对模块的通信性能进行了测试。

### 1 OFDM PLC 调制技术的优势

目前满足国家电网智能电表系列标准的抄表通信方式有 RS485 通信、红外通信、载波抄表、公网通信(GSM、GPRS、CDMA)抄表等<sup>[2]</sup>。电力线载波通信技术利用已有的电力配电网络进行通信, 不需要重新布线, 信号不会因为通过建筑物墙壁而受到衰减甚至屏蔽, 成本相对较为低廉等, 使得这项技术成为智能电网通信系统领域的重要发展方向。

虽然电力线载波通信具有很多优点, 但是电力线的初衷是传输 50 Hz 工频电力信号, 并不是为了通信, 故低压电力线通信环境非常恶劣, 因此选择合适的调制技术至关重要。本系统采用的是正交频分复用通信技术(OFDM), 其主要思想就是将信道分成若干正交子信道, 将所传输的高速数据流转换成并行的低速数据流, 调制到每个子信道上进行传输, 从而实现数据的高速传输<sup>[3-4]</sup>。

低压电力线载波通信采用 OFDM 技术来实现, 具有频带利用率高、抗码间串扰能力强、抗信道衰落、抗噪

声干扰、可用FFT算法实现等优点<sup>[5]</sup>。图1为OFDM与FSK在CENELEC A频带的比较。

图1显示了OFDM比FSK通信性能优异的原因。OFDM技术在10 kHz至95 kHz之间采用8个频率，充分利用85 kHz通道带宽。相比之下，FSK在相同带宽下仅通过2个频率发送数据。2种情况都发送4位数据位和4位纠错位。OFDM可采用单个字符发送全部8位数据。FSK发送同样数据需要4个字符。由于OFDM的频谱利用率更高，因此可以使用相同通道传输更多数据，实现更高的数据速率。

在CENELEC A频段下， $R_{SN}$ 为12 dB，误码率(BER)为 $10^{-4}$ 时，FSK调制解调器仅能以2 kbps的传输速率进行通信，每发送10 000个数据位将丢失1位数据。而OFDM系统则能够以最高32 kbps的速率传输数据，所要求的 $R_{SN}$ 仅为4 dB。由此可见，OFDM调制结合误码纠错技术，能够使系统性能改善8 dB，数据速率提高16倍。在FCC(10 kHz至490 kHz)和ARIB(10 kHz至450 kHz)频段内，由于带宽的提高，有效通信速率达到100 kbps以上。

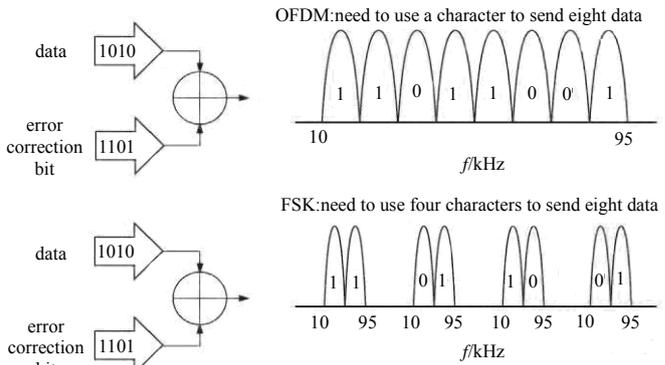


Fig.1 Comparison between OFDM and FSK  
图1 OFDM与FSK的比较

## 2 低压电力线通信信道阻抗的测试

将低压电力线作为通信信道时，首先要了解低压电力信道的复杂特性，尤其对低压电力线的输入阻抗特性进行研究十分必要。

### 2.1 测试环境网络拓扑图

室内低压电力线信道物理上呈现出一种树状结构。发射机与接收机分别位于不同的树枝末端，从发射机到接收机除了直接路径外，还有许多从直接路径不同位置延伸出来的分支。这些分支的长度不同，末端连接的设备(负载)也不同，并且这些设备随机地接入与移走。通电与断开都将导致末端所呈现的阻抗发生变化<sup>[6]</sup>，因此PLC通信性能好坏强烈依赖于电力网络拓扑结构和网络信道特性。图2给出了测试环境的网络拓扑图。

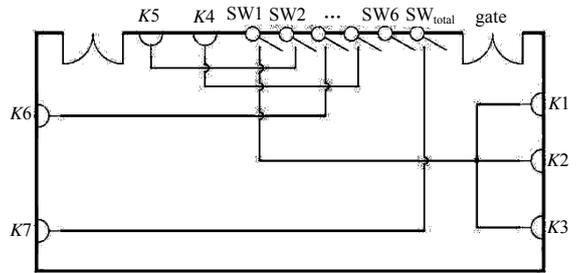


Fig.2 Topological graph of test condition  
图2 测试环境拓扑图

### 2.2 输入阻抗特性

低压电力线载波通信信道输入阻抗的大小，直接影响到传输信号的耦合效率，是低压配电网用作载波通信信道的一个重要参数<sup>[7-8]</sup>。大量研究测量表明，低压电力线输入阻抗非常低，其阻抗分布在 $0.5 \Omega \sim 80 \Omega$ ，因此信号源产生的信号必须通过可提供大电流的功率放大器放大后，才可以不失真地耦合到低压电力线上。图3为低压线路输入阻抗的测量方法。

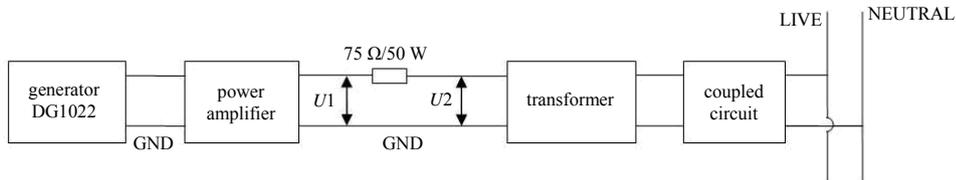


Fig.3 Circuit used for measuring the input impedance  
图3 输入阻抗测量电路

由信号源DG1022产生不同频率(30 kHz~550 kHz)的正弦波。测试所使用耦合器的频带为1 kHz~1 MHz。在测试信号频率范围内， $C6(1 \mu F)$ 、 $C7(1 \mu F)$ 的等效阻抗可以忽略不计。测量功率放大器输出电压 $U1$ 和变压器次级两端电压 $U2$ ，根据电路理论公式可求出输入阻抗 $Z$ 。因此线上阻抗可表示为：

$$|Z| = \frac{|U2|}{|U1| - |U2|} \times R \quad (1)$$

式中 $R$ 为测量电阻(75  $\Omega$ )。

### 2.3 阻抗测试数据分析

低压电力线输入阻抗数据由表 1 给出,其中  $Z_1, Z_2, Z_3$  分别为墙上插座  $K_1, K_5, K_6$  测得的输入阻抗数据。

使用最小二乘法对数据进行处理,得到处理后的曲线如图 4 所示。从图 4 可以看出,在测试信号频率范围内,低压电力线通信信道输入阻抗的变化范围为  $1 \Omega \sim 13 \Omega$ 。鉴于影响低压电力线输入阻抗的因素比较多(载波信号的频率,低压电力线上多种多样、千变万化的负载,以及低压电力线输电网络拓扑变化等),图 4 给出的曲线并不能代表所有的测试环境。

表 1 输入阻抗测试结果

Table 1 Test results of the impedance			
$f/\text{kHz}$	$Z_1/\Omega$	$Z_2/\Omega$	$Z_3/\Omega$
30	12.2	3.8	2.4
50	7.4	6.6	2.3
100	4.2	3.8	1.4
150	3.2	4.4	1.3
200	3.8	5.1	2.8
250	5.3	3.8	2.8
300	5.3	5.2	3.1
350	6.4	5.4	4.7
400	7.1	4.7	4.5
450	7.2	5.7	4.3
500	5.4	5.3	4.7
550	6.3	5.0	5.4

### 3 载波模块系统设计

载波 modem 采用模块化设计,将从电力线上接收的数据进行处理,然后根据需要,与主 CPU 通过串口进行数据交换。将主 CPU 发出的数据通过电力线载波发送,完成载波通道通信过程<sup>[9]</sup>。图 5 为低压电力线高速载波模块系统框图。载波 modem 完成从主 CPU 接收数据后向电力线载波转发,以及载波 modem 从线路上接收正确信息后转发到主 CPU 的功能。

本文设计的低压电力线高速载波模块采用差分信号的方案。相对于以“地”作为基准的单端信号方案系统,差分信号方案具有以下好处:第一,差分信号对外部电磁干扰是高度免疫的,一个干扰源对差分信号对的每一端影响都是相同的。因为由电压差来决定信号,两边的干扰相抵,信号不会有大幅变化;第二,差分信号有利于识别微小信号。在差分信号系统中,可以选择两输入端的平均信号作为基准点,这就减小了信号的摆动范围。而在以“地”做基准的单端信号方案的系统里,测量信号的精确值依赖系统内“地”的一致性,信号源和信号接收器之间的距离越远,它们局部“地”的电压值之间有差异的可能性就越大,恢复微小信号的可能性就会越小。

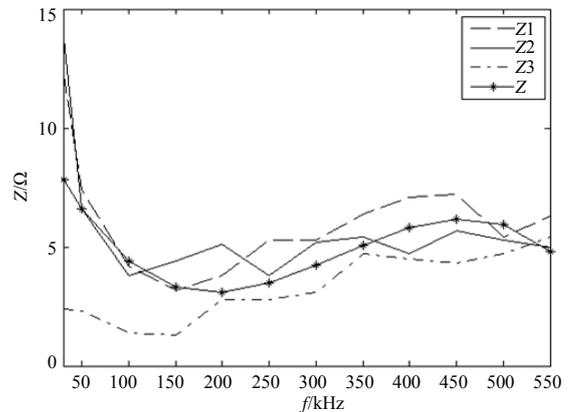


Fig.4 Impedance versus frequency  
图 4 输入阻抗-频率关系图

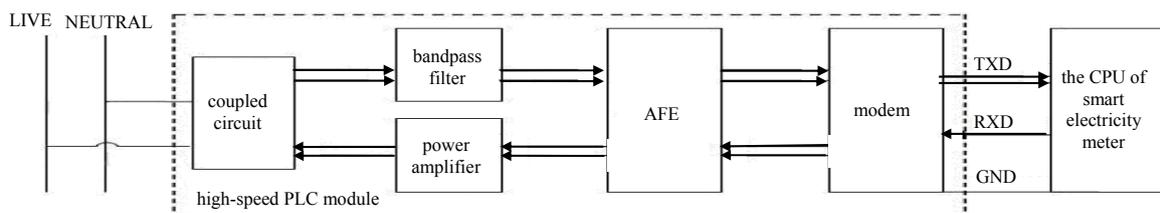


Fig.5 Block diagram of system  
图 5 系统框图

#### 3.1 PLC 芯片组的概述

MAX2990 和 MAX2991 是专门为以电力线介质为通信信道而设计的通信芯片,MAX2990 调制解调器和 MAX2991 模拟前端组成的 PLC 芯片组能够支持可靠的远距离数据通信。MAX2990 采用 16 位 MAXQ 微控制器内核,组合了 PHY 和 MAC 层。在  $10 \text{ kHz} \sim 490 \text{ kHz}$  频段可提供  $100 \text{ kbps}$  数据速率;在  $10 \text{ kHz} \sim 95 \text{ kHz}$  频段速率可达  $32 \text{ kbps}$ 。MAX2991 包括两级自动增益控制和片上可编程滤波器,动态范围可达  $62 \text{ dB}$ 。两款器件均工作在 CENELEC, FCC 和 ARIB 频段<sup>[10-11]</sup>。

#### 3.2 信号耦合电路

信号耦合电路是将载波通信模块与电力线连接的关键单元。其主要功能有:1) 滤除  $220 \text{ V}_{\text{AC}} / 50 \text{ Hz}$  的交流信号;2) 抑制瞬时电压冲击(如:雷击造成的过电压、电网电压的浪涌和尖峰电压及静电放电电压等);3) 能够高效率地将发射信号耦合到电力线,保证在电力线上的有效信号功率;4) 对来自电力线上的有用信号实现最小

的衰减和最佳接收。信号耦合部分电路的设计如图 6 所示。

变压器 T1 频带为 1 kHz~1 MHz, 可有效滤除 220 V<sub>AC</sub>/50 Hz 的交流信号, 并且隔离强、弱电系统, 避免 220 V 市电对实验仪器和人造成伤害。双向瞬态电压抑制二极管 Z1, Z2, 可承受 1 500 W 的瞬时脉冲功率, 其箝位响应时间仅为 1 ps (10<sup>-12</sup>s), 可有效防止由雷击造成的过电压冲击、电网电压的浪涌和尖峰电压、某些用电设备所产生的尖峰干扰脉冲、工业火花及静电放电电压等噪声<sup>[12]</sup>对电路系统造成的破坏和干扰。

### 3.3 功率放大电路

功率放大电路的主要任务是将载波调制信号进行功率放大, 高效不失真地输出信号, 使耦合到电力线的最大输出信号电平、二次和三次谐波分量符合 DL/T698.35-200X 中对输出信号频率、信号最大输出电平等指标的要求。载波发射信号由芯片 MAX2991 的 9 脚 (TXOUTP)、10 脚 (TXOUTN) 输出到功率放大电路中, 波形为 V<sub>p-p</sub>=3 V 的 OFDM 信号。图 7 给出了载波模块的功率放大电路。经测试和研究表明, 电力线的输入阻抗非常低, 在负荷比较重的情况下, 甚至在 1 Ω 以下, 因此载波通信信号发送装置必须具有很低的输出阻抗。本文采用桥式推挽功率放大电路, 即 BTL 电路。与 OTL, OCL 电路相比, BTL 电路可以充分运用电源电压。在理想情况下, 相同电源电压, 相同负载, BTL 电路输出电压可增大 1 倍, 输出功率可增大 4 倍。图 7 中通信模拟电源滤波电容的总容量为 2 440 μF, 满足国家电网公司智能电能表系列标准中规定的滤波电容放电时间常数不小于 10 倍工频周期, 总容量不小于 2 200 μF 的要求。

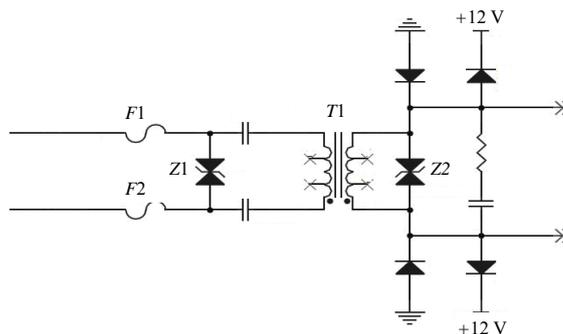


Fig.6 Signal coupling circuit  
图 6 信号耦合电路

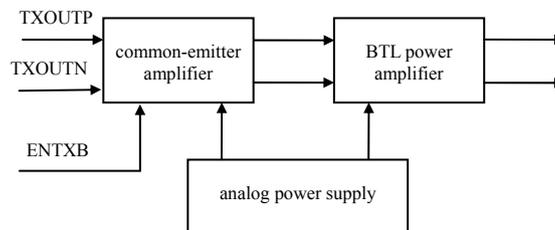


Fig.7 BTL power amplifier  
图 7 BTL 功率放大电路

## 4 测试数据

### 4.1 测试方案示意图

如图 8 所示, 使用高速载波模块 A 发送信号, 高速载波模块 B 接收信号。2 台机器使用相同的软件。发送到接收间串联 1 台 80 dB 的大功率可调节衰减器。衰减器与高速载波模块之间使用同轴电缆连接, 以降低干扰。调节衰减器的衰减值, 使得高速载波模块 B 刚好能够完全接收到发送端发送的信号, 并用示波器记录当前的发送端信号波形、频谱, 当前接收端经过低通滤波器之后的波形 (MAX2991 的 Pin45, Pin46) 和频谱及衰减器当前的衰减值, 通过衰减器的衰减值和发送电平计算接收灵敏度。

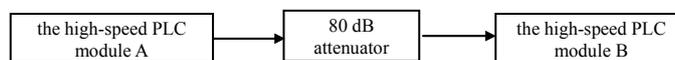


Fig.8 Test diagram  
图 8 测试示意图

### 4.2 测试数据

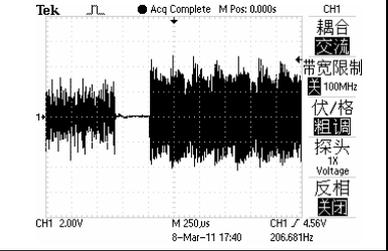
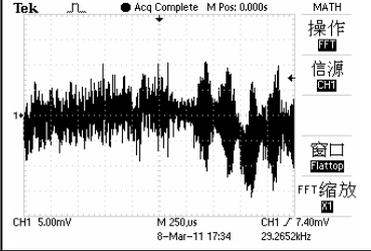
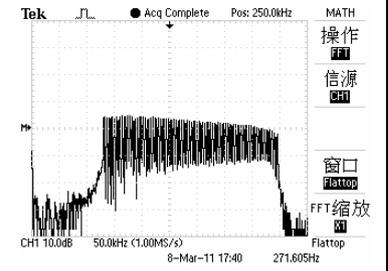
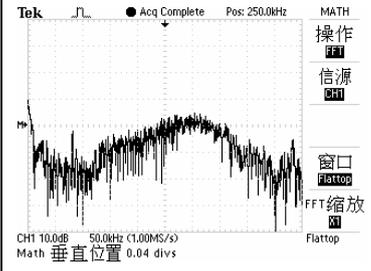
具体测试数据见表 2。

## 5 结论

本文设计了一种基于 OFDM 通信技术的低压电力线高速载波模块, 该模块集成度高, 工作可靠, 有较高的接收灵敏度和抗干扰能力, 通信速度较快。

由于低压电力线载波信道具有剧烈的时空波动性<sup>[13]</sup>, 可靠的通信距离不但取决于通信模块的性能, 而且会随着电力系统的实际运行状况以及低压电力线的拓扑结构不同而产生波动, 因此应采取中继措施, 以提高系统通信的综合可靠性。在系统中采用中继技术, 研究合理有效的中继路由选择算法, 提高网络层通信能力, 是今后本载波模块的研究重点和改进方向。

表2 发送-接收端测试数据  
Table2 Test results of the transmitter and receiver

frequency range of the transmitter	130 kHz-450 kHz	peak attenuation	87 dB
peak to peak value of the transmitter	8 V	receiver sensitivity	0.357 mV
gain	0 dB		
waveform of the transmitter		waveform of the receiver MAX2991(Pin45,Pin46)	
the frequency spectrum of the transmitter		the frequency spectrum of the receiver MAX2991(Pin45,Pin46)	

#### 参考文献:

- [1] 张旭辉. 低压电力线载波抄表系统的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2003.
- [2] Q/GDW354-2009. 智能电能表功能规范[S]. 国家电网公司:中国电力出版社, 2009.
- [3] 佟学俭,罗涛. OFDM移动通信技术原理与应用[M]. 北京:人民邮电出版社, 2003.
- [4] Richard Van Nee,Ramjee Prasad. OFDM for Wireless Multimedia Communications[M]. Boston:Artech House, 2000.
- [5] Bahai A R S,Saltzberg B R. Multi-Carrier Digital Communications:Theory and Applications of OFDM[M]. 2nd ed. New York:Springer, 2004.
- [6] 李姣军,曾孝平,张众发. 一种基于电力线通信的OFDM自适应比特与功率分配算法[J]. 信息与电子工程, 2007,5(1): 15-21.
- [7] 罗文亮. 基于低压配电网的OFDM 调制技术及其应用研究[D]. 西安:西安理工大学, 2010.
- [8] 张有兵,程时杰,何海波,等. 低压电力线高频载波通信信道的建模研究[J]. 电力系统自动化, 2002,26(23):62-66.
- [9] Q/GDW364-2009. 单相智能电能表技术规范[S]. 国家电网公司:中国电力出版社, 2009.
- [10] Maxim Integrated Products. MAX2990 Datasheet[Z]. 2008.
- [11] Maxim Integrated Products. MAX2991 Datasheet[Z]. 2009.
- [12] Manfred Zimmermann,Klaus Dostert. An Analysis of the Broadband Noise Scenario in Power line Networks[C]// Proceedings of the 4th International Symposium on Power line Communications and Its Applications. Limerick,Ireland:[s.n.], 2000.
- [13] 王振朝,侯惠然,甘玉涛. 基于混沌理论的低压电力线通信信道建模研究[J]. 电测与仪表, 2007(8):20-24.

#### 作者简介:



林佳森(1986-), 男, 山东省济宁市人, 在读硕士研究生, 研究方向为OFDM调制技术及电力线载波通信.email:linjiasen007@gmail.com.

李智(1975-), 男, 成都市人, 副教授, 研究方向为无线传感器网络、自组织网络、感知无线电、无线网络安全、嵌入式系统、电力线载波通信。

马一森(1986-), 男, 山东省济宁市人, 在读硕士研究生, 研究方向为无线传感器网络、通信电路与系统、通信信号处理。

李乔峰(1988-), 男, 四川省绵阳市人, 在读硕士研究生, 研究方向为OFDM调制技术及电力线载波通信。