

OFDM通信技术在智能电网中的实现

文/湖南铁道职业技术学院 张彦宇

为了改善智能电网的通信速度和可靠性，将正交频分复用（OFDM）多载波电力线通信（PLC）技术应用与智能电网。研究了具有鲁棒模式的G3标准OFDM技术，通过6LoWPAN组网及路由技术接入集中器及表计构成自动抄表系统（AMR），并对现场的信道环境及AMR系统进行了测试，测试结果表明：G3标准OFDM技术的通信速率及可靠性较频移键控扩频（S-FSK）方式具有明显的改善和提高。

自动计量系统是使用智能电表通过多种通信介质，按需或以设定的方式测量、收集并分析用户用电数据、提供开放式双向通信的系统，是智能电网最基础和核心的部分。AMR要求高速可靠的通信。电力线通信技术是AMR系统主要的通信方式，这是因为通过在与传递电能同一路径的线路上确定通信链路，传递信息，不需要重新铺设专用的通信通路，所以投入少；并且电力线通信不会像有线的方式被密集建筑物所阻挡，从而减少安装和维护费用。

在长期单载波PLC技术垄断电力线通信技术市场后，最近，被称为G3和PRIME标准的基于OFDM窄带PLC技术进入了市场，提供高的通信速率，鲁棒的通信模式，灵活的通信方式，这些是AMR双向通信的关键。OFDM正交频分复用技术克服了S-FSK技术易受干扰和频带利用率低的问题，从而允许高效信道纠错编码，提高了通信的鲁棒性和通信速率。PRIME是被西班牙

电力和PRIME联盟所发起的OFDM PLC技术，PRIME工作频段是42~88 kHz，属于欧洲标准CENELEC EN50065-1的A频段，调制方式有DBPSK/DQPSK/D8PSK，通信速率最高可达128.6 Kbit/s；G3是被法国电力（ERDF）和美信公司（MAXIM）所推荐的OFDM PLC技术，G3的工作频段从CENELEC A扩展到CENELEC B\C\D、扩展到美国标准的FCC频段和日本标准的ARIB频段，调制方式除了DBPSK/DQPSK/D8PSK，还有鲁棒（ROBO）的调制方式，通信速率可达300 Kbit/s。在我国，电力线负载主要集中于100 kHz以下的低频段，所以在此频段的时频干扰和阻抗不匹配问题突出。本文选择工作频段较高，并且具有鲁棒模式的G3 OFDM做为实现AMR系统的通信技术，重点论述了AMR系统的软件架构，及构建多表计AMR系统的路由技术，并对1台集中器三台载波表的AMR系统进行了典型环境的现场测试。

AMR系统组成及路由技术

AMR系统是由集中器和智能电表通过电力线构成的双向互通的智能电网。其中G3 OFDM作为通信终端，与集中器相连称为主模块，与表计相连称为从模块。G3标准规定了中压和低压电网的通信协议，如图1所示。包括基于OFDM的物理层，确保能够在恶劣的信道环境

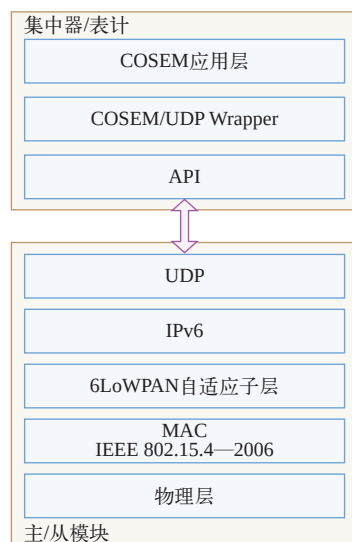


图1 基于G3 OFDM技术的AMR通信协议

基金项目：湖南省高核科学研究项目（16C1050）。

中通信；基于IEEE 802.15.4协议的MAC层，更好的适配较低的通信速率；基于6LoWPAN协议的自适应路由层，提供灵活高效的组网管理和路由技术；以及组合了IPv6和UDP的网络层。

基于图1的协议模型，如果要实现多表计AMR系统，路由和组网技术是关键，G3 OFDM采用符合6LoWPAN协议的路由技术。G3 OFDM网络拓扑是MESH网，如图2所示，由全功能设备（FFD）组成，每个节点可以作为终端节点，也可作为中继节点。在设备准备加入网络时，向周围的节点广播路由请求消息（RREQ），见图2a，并在每个转发节点的路由表记录下一跳的地址和路由代价。当请求信息通过一定的路径到达协调器后，根据不同路径的路由代价选择最优路径，并由协调器发起路由响应（RREP），通过最短路径回到源节

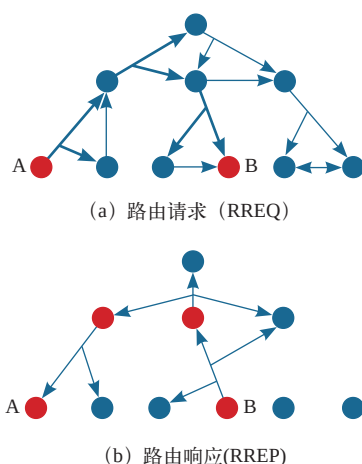


图2 路由发现过程

点，见图2b。

目前G3 OFDM自动抄表系统的通信模式是：表和集中器可以实现双向半双工通信，表和表之间不能直接通信。在通信网络中，表作为全功能设备可以中继和转发路由信息，表的路由终端节点始终是作为协调器的集中器。

在路由发现过程中，前向路由

请求时计算路由代价并存储和转发路由代价。在路由响应时，根据路由代价确定路由通路。所以路由代价是实现G3 OFDM路由的关键。6LoWPAN协议草案中关于路由代价的计算仍然待定，本文确定路由代价计算如下：

$$\begin{aligned} \text{Link Cost} = & \text{AdpKr} \times \text{MOD_Kr} + \\ & \text{AdpKm} \times \text{MOD_Km} + \text{AdpKc} \times \\ & (\text{Tone}_{\text{Max}} - \text{Tone}_A) / \text{Tone}_{\text{Max}} + \text{AdpKq} \times \\ & (\text{Max}(\text{LQI}) - \text{LQI}) / \text{Max}(\text{LQI}) + \\ & \text{AdpKh} \times 1 + \text{AdpKrt} \times \text{Route}_A / \\ & \text{Route}_{\text{Max}} \end{aligned} \quad (1)$$

在式(1)中，链路质量(LQI)的计算如下：

$$\text{LQI} = \text{Mod}_{\text{ind}} \times \text{Tone}_A \text{Mod}_{\text{ind}} \times \text{Tone}_A \quad (2)$$

路由代价是沿着此路径的链路代价总和。式(1)、式(2)中的参数如下表所示。

由6LoWPAN路由协议及此路

表 路由代价参数

参数	描述	范围	默认值	参数	描述	范围	默认值
AdpKr	计算路由代价的常数	0~31	6	Tone_{Max}	当前模式最大数量Tone	0~216	与频段和调制模式有关
AdpKc	计算路由代价的常数	0~31	5	Tone_A	当前模式激活Tone数量	0~216	在MAC层可读出
AdpKq	计算路由代价的常数	0~31	5	Route_1	当前模式激活路由数量	0~节点数	记录在主模块路由表中
AdpKh	计算路由代价的常数	0~31	5	$\text{Route}_{\text{Max}}$	当前模式最大数量路由	0~节点数	记录在主模块路由表中
AdpKrt	计算路由代价的常数	0~31	5	Mod_{ind}	调制模式的索引	0~3	0.2—ROBO, 1—DBPSK 2—DQPSK, 3—D8PSK
MOD_Kr	调制指数	0~1	1—ROBO 0—其他				
MOD_Km	调制指数	0~3	3—ROBO, 2—DBPSK 1—DQPSK 0—D8PSK				

由代价算法，可以确定最大14跳路由，并且路由代价根据工作频段和调制模式的不同实时更新，所以在每种工作模式下均可保证表计至集中器的路径为最优。

AMR系统现场评测结果

AMR系统的组成如图1所示，

集中器侧的G3模块称为主模块，表计侧的G3模块称为从模块。主从模块的通信路由由上节确定。此测试系统由一台集中器，3台表计组成如图3所示，实现自动抄表功能：集中器发抄表请求至某表，某表响应并发确定的数据包至集中器，集中器计算包错误率（PERs）。

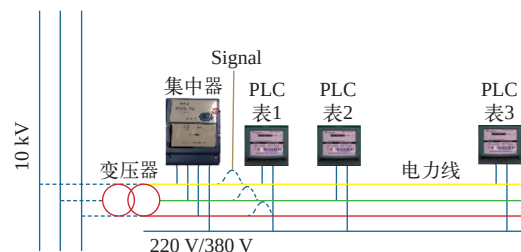


图3 AMR测试系统

选择一种典型的电力线分布环境，中国典型的商住楼完成现场测试，如图4所示。地下一二楼为商场、超市，从1楼至5楼为居民楼。

将集中器固定在地下二层的配电室变压器的低压侧，三台电表从地下商场一直移到居民楼1~5层，集中器和表间的距离不断增加。用频谱

仪抓取信道的频谱特性，用相同的频谱仪抓取 G3模块耦合器前的信号频谱，用集中器读出PERs，并画PERs曲线。

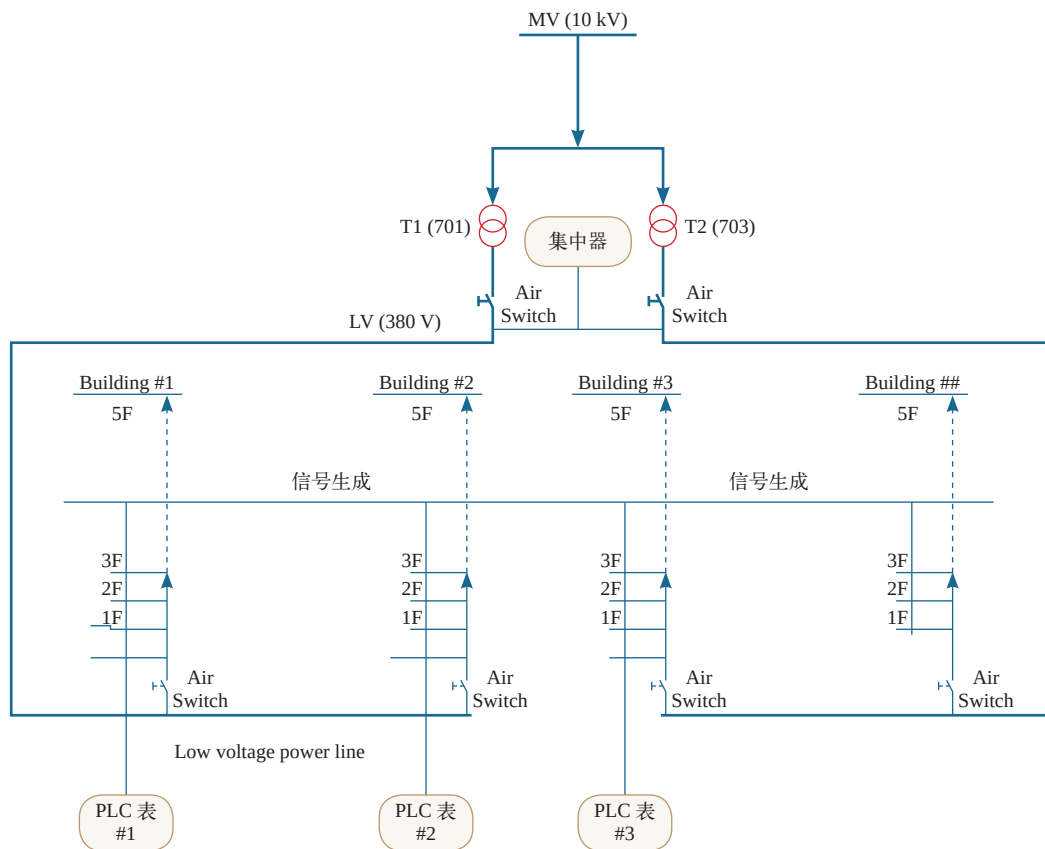


图4 商住楼测试环境

1. 信道特性

电力线网络分布广泛，信道特性非常复杂，用统一的数学模型难以描述。但是可以在确定的地点和时间，用电力线的频谱特性来直观地描述信道特性。在完成AMR系统现场测试之前，用频谱仪抓取图4商住楼信道频谱特性，如图5所示。

图5显示，在频谱曲线中有背景噪声和窄带干扰，当频率范围从10~100 kHz，窄带干扰比较大，当频率高于100 kHz后，窄带干扰逐渐减小，背景噪声依然存在，但是功率低且平稳。图6是将观察的频带范围缩小至200 kHz得到的结果，相当于对图5的噪声和干扰进行了放大。从图中可见，窄带干扰最大达



图5 噪声和干扰测量2MHz频段

到了8 dBm，其频带宽度有1 kHz左右，分布于38 kHz频率附近，如果是CENELEC A频段，则这些干扰会

影响其相应频带的子信道，使通信性能恶化，所以在测试中，不考虑CENELEC A频段。

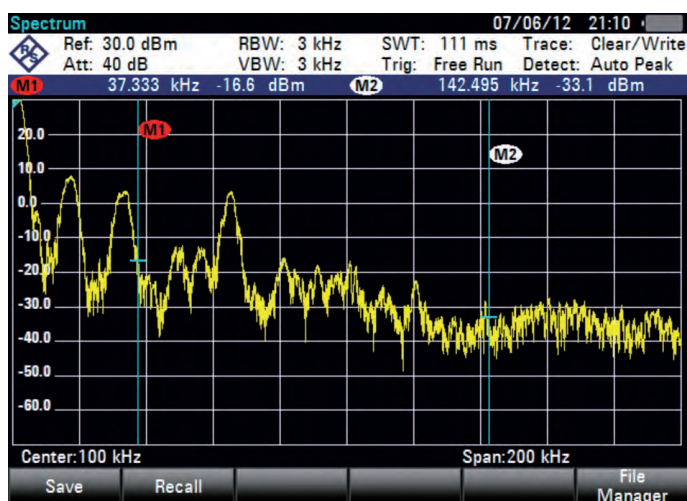


图6 噪声和干扰测试200 kHz频段

2. 商居楼测试结果

图4显示了商居楼的测试环境，大楼地下1、2层包含商场、超市，从1楼至5楼是居民楼，集中器固定在地下2层的配电室，表计在不同的测试点间移动。在上节测试并分析了商住楼电力线信道特性。在测试中使用的G3 OFDM模块的工作模式为：MOD3(CENELEC BC, ROBO)，MOD4(CENELEC BC, DBPSK)。

图7显示了在商场环境测试得到的PERs曲线，测试时间是上午的10:00开始，是商场开放时间，此时所有用电设备都正常使用，干扰和噪声均比较大。横坐标显示通信距离，纵坐标显示PERs曲线。在距离为15 m时PERs是‘0’，没有丢包率，通信完全成功。当通信距离逐渐增加，PERs在MOD3和MOD4不断变化，但是趋势是相同的，在35 m的距离比45 m的距离高，但是45 m的距离比60 m的距离低，所以通信性能并不是随着测试距离的增加而恶化。在通信距离90 m时，PERs为100%，即发出的包全部丢失，通信完全失败。

图8显示了在居民楼测试得到的PERs曲线，测试时间是下午的

14:00开始，因为不是周末，所以居民楼的用电设备相对较少，通信环境相对干净。表计从1单元的1楼移至3单元的5楼，测试得到的PERs曲线如图7所示。图中所示横坐标为楼层，纵坐标为PERs。在3单元1楼PERs最高，达到100%，通信完全失败。在1单元5楼PERs是‘0’，通信完全成功，从曲线中还可以看出MOD3的通信性能比MOD4好。MOD3的调制模式是ROBO，即鲁棒的通信模式，所以这种是最可靠的模式。

图9是商场环境0~200 kHz的功率谱密度，G3 OFDM工作在CENELEC BC (98.4~146.8 kHz) 频段。从图中可以看到，在37 kHz附近有强的干扰，这与图6的频谱相似，但是这些干扰是在信号的频带之外，不会破坏CENELEC BC频段的信号，所以不影响通信。

结束语

发展智能电网要求高速的电力线通信技术，单载波和双载波的通信技术已经不能满足智能电网的双向通信需求，OFDM技术作为一种高速、可靠的多载波电力线技术，

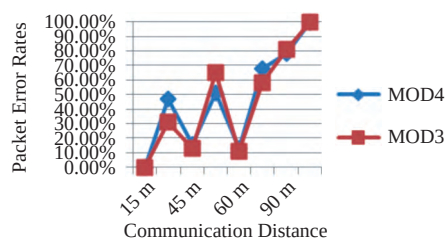


图7 商场环境PERs

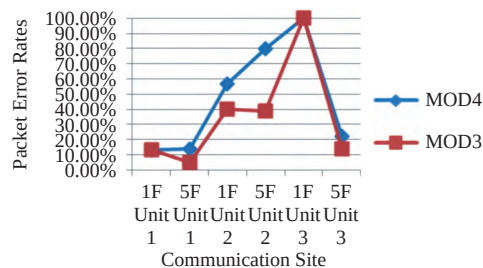


图8 居民楼PERs

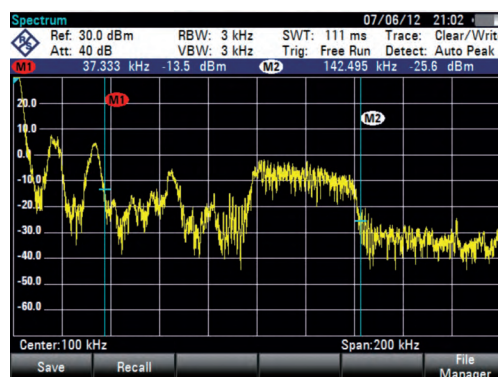


图9 在商场环境的功率谱

在智能电网中得到广泛应用。G3标准OFDM技术因为ROBO的通信模式，更高的扩展频段，在我国电网环境比较适用。所以本文选取G3标准OFDM技术，构建AMR系统。组成多表计AMR系统的关键是路由技术，采用6LoWPAN协议的路由技术，对路由代价的算法没有规定，本文根据G3标准，设计并实现了路由代价算法。在测试中选取典型的商居楼的测试环境，对1个集中器3个表计组成的AMR系统进行现场测试，测试结果显示ROBO模式的通信性能更可靠，CENELEC BC频带更适于现场域通信。EA