面向智能用电交互业务的多频PLC MAC协议研究与仿真实现

针对智能用电交互业务需求及低压PLC网络信道特征，提出一种面向智能用电交互业务的多频PLC MAC协议功能。采用基于前导序列的频率认知机制为处于不同位置处链路选择不同的通信频率，可应对PLC信道的频率选择性和“因地为主，因时为辅”的变化规律，提高节点接入率、接入速度和网络可靠性。针对智能用电交互业务需求，采用轮询和CSMA/CA相结合的传输媒质共享方式，支持由从站发起的业务，提高媒体利用率。最后，基于开源网络仿真工具NS－3搭建了面向智能用电交互业务的多频PLC MAC协议仿真平台，可实现工作频率配置及展示、节点接入率、MAC层吞吐量和应用层吞吐量及时延等性能的统计。

安春燕[1] 李建岐[1] 汪涛[2] 高鸿坚[1]/1. 国网智能电网研究院 2. 北京邮电大学

安春燕/工程师

关键词/Keywords

智能用电交互业务·
PLC MAC协议·
协议仿真·

0 引言

智能用电交互提供电网和客户之间的实时交互，通过交互，电网可以及时、准确和低成本地获取用户的用电信息，且可以通过控制一些高耗电设备的开关来实时调整电网负荷，保障电网安全稳定运行；客户可以查询用电信息、缴费信息和实时电价等，可根据电价政策及负荷状态等灵活调整用电时间和实现分布式电源接入，提高用电效率。智能用电交互对于满足客户个性化、多样化、便捷化和互动化服务需求，提高电网效率、调整电网负荷和实现安全可靠用电等具有重要作用，是低压智能电网的发展趋势[1-2]。

电力线载波通信（Power Line Communication，PLC）作为电网特有的通信方式，无需布网，且分布广泛，是智能配用电网及低压台区智能化应用中不可或缺的通信方式之一[3]。然而，PLC信道恶劣，网络可靠性制约了其发展和应用。因此，在研究面向智能配用电交互业务的PLC网络之前必须了解PLC网络的信道特性，并设计合理、有效的应对机制。

从表现形式来看，PLC信道表现出明显的频率选择性和“因地为主，因时为辅”的变化规律[4]。因此，为了应对PLC信道特点，提高PLC网络的可靠性，文献[5]设计了一种灵活的数字前端，使得PLC设备的中心频点可以在一个较大的范围内灵活移动，且其频率带宽也可以灵活配置。

本文面向营销互动业务，基于文献[5]的数字前端技术，研究多频PLC MAC协议功能，根据信道具体情况为PLC网络中不同链路选择中心频点、带宽均不同的工作频率。然后，基于网络仿真工具NS－3对所提协议功能进行仿真，并测试其性能。

1 多频PLC MAC协议研究

1.1 研究背景与动机

面向智能用电交互业务的PLC网络需要支持由客户发起的业务，例如客户的用电信息、缴费信息查询业务等；需要支持异构服务质量（Quality of Service，QoS），满足不同速率、时延要求数据的传输需求；需要具有较大的覆盖范围和较高的信道利用率。

面向智能用电交互业务的PLC网络以低压配电网络为通信载体，受低压电

国家电网公司科技项目《新型电力线载波通信系统研究与开发》。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

网拓扑结构影响。首先，通信距离和网络位置密切相关，如城市密集区的通信距离较短，郊区、城镇其次，农村的通信距离较长。这导致不同地区PLC网络的最佳通信范围不同，如城市密集区可采用宽带PLC通信技术，提供高速服务。偏远地区可采用窄带PLC技术，提供基本的通信服务。其次，网络分支多、负载多、噪声和谐波干扰较大。由于不同地理位置的负载、噪声和网络拓扑结构不同，其噪声分布和谐波频率也均不相同，即不同区域的最佳通信频率不同。因此，为不同链路选择不同工作频率，应对PLC信道频率选择性衰落和“因地为主，因时为辅”的变化规律，可改善PLC网络的性能。

由于PLC信道恶劣，大部分PLC协议引入中继技术来改善网络的覆盖范围。而中继的引入意味着同一个数据包需要多次进行传输，降低系统传输的有效数据量。因此，面向智能用电交互业务的PLC网络在满足节点接入需求的前提下应该限制中继的个数和级别，提升网络端到端吞吐量性能。

很多PLC网络采用载波监听多址接入（Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance，CSMA/CA）技术，如PRIME、G3等。但CSMA/CA的信道利用率低，在PLC网络中支持高速业务时存在很大的问题。此外，PLC网络隐藏节点问题明显，会进一步恶化CSMA/CA算法的性能。与此同时，面向智能用电交互业务的PLC网络节点个数多、大部分业务如采抄业务等数据量小，这导致传统时分多址接入（Time Division Multiple Access，TDMA）、频分多址接入（Frequency Division Multiple Access，FDMA）方式效率不高。轮询方式适合不同节点业务量分布均匀，且对实时性要求不高的网络，但其不支持由客户发起的业务。因此，单纯的一种信道接入方式难以满足智能用电交互业务的需求。

1.2 同步及频率认知

支持多频通信对于改善PLC网络性能具有重要的作用。然而，当使用多频通信时必须解决多频网络的同步和工作频率认知问题。本文提出基于前导序列的同步及频率认知机制。这里的前导序列为特殊设计的、持续时间短但鲁棒性非常强的信号序列[6]，可用来为定时同步、频率认知提供服务。

假设网络中具备注册、管理功能的站点称为主站，其他站点称为从站。在PLC网络中，主站周期性地调度同步周期进行网络同步及频率认知工作。同步周期的流程如图1所示，主要包括以下几个步骤。

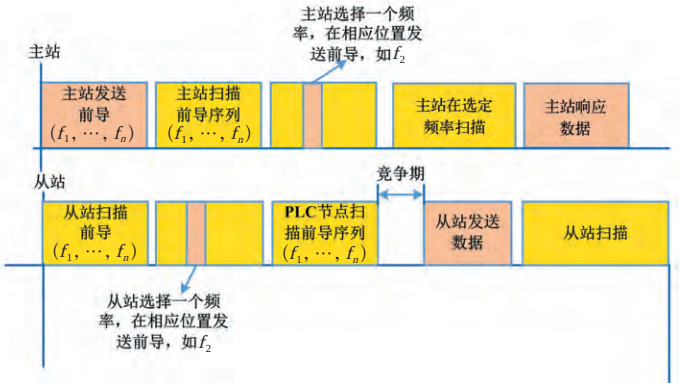

图1 同步周期

1）主站依次通过不同的频率发送前导序列。主站先通过较窄带宽的频率发送前导，依次类推，最后通过带宽最大的频率发送前导。这主要是因为前导信号序列短，当使用大带宽发送时，持续时间非常短，对同步准确度的要求较高，上述前导发送策略使得可依次校正同步误差，便于捕获通过大带宽发送的前导。

与此同时，从站依次将工作频率调至各频率，试图接收前导信号。从站可通过多个频带接收到前导。

2）需要注册或者需要通过CSMA/CA方式发送数据的从站选择一个接收到前导的频率，并在相应的时间里通过该频率发送前导。

与此同时，主站依次将工作频率调整到各频率，试图接收前导信号。主站接收到前导意味着有从站希望通过该频率发送数据。主站可能监听到从站希望通过不同的频率发送数据。

3）主站在其第2个步骤中监听到前导的频率，并在其对应的时间里通过该频率发送前导，告知从站未来一段时间其将要通过何频率接收数据。与此同时，从站依次将工作频率调整到各频率，试图通过前导接收情况判断其频率申请是否被批准。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

4）频率申请被批准的从站以CSMA/CA的方式竞争发送数据。这里的数据只能是节点注册请求/注册确认、频率更新请求/频率更新确认等控制数据。

当从站上电后，需要和主站进行同步。此时，从站首先选定一个工作频率监测一段时间，根据监测到前导的情况判断MAC帧结构，并试图和主站进行同步。若一段时间内通过该频率未监测到任何前导，则更换其他频率进行监测。

从站和网络同步之后，仍旧需要监听一段时间，并根据监听结果分析使用各频率时的信道状态，并选择最佳的工作频率，即频率认知过程。此外，从站在正常工作过程中仍在同步周期中判断使用各频率时的信道状态，为频率切换做准备。

1.3 信道接入

面向智能用电交互业务的PLC网络采用以轮询方式为主，以CSMA/CA、TDMA方式为辅的信道接入方式，支持由从站发起的业务，满足业务的异构化需求。具体来说，对于采抄业务，主站采用轮询方式；对于对实时性要求较高且数据量较短的告警业务等，从站以CSMA/CA的方式发送；对于带宽要求较大的业务，节点可以申请专用传输时间，即TDMA方式。

1.4 MAC周期

面向智能用电交互业务的PLC网络MAC周期结构如图2所示。MAC周期包括同步周期和数据传输周期。数据周期为数据传输时隙，在此期间，从站获得主站的认可后才能够发送数据。从站主要通过两种途径获得主站数据发送认可：一种是收到主站的轮询数据包；另一种是根据其业务需求向主站申请TDMA时隙并得到主站的确认。

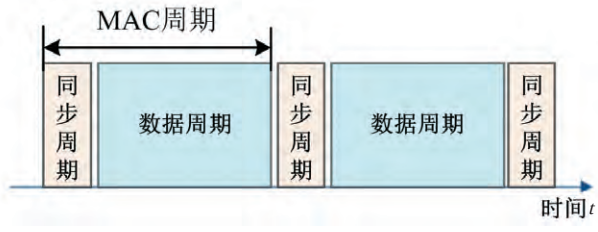

图2 MAC周期

2 多频PLC MAC协议仿真实现

2.1 仿真平台架构

基于开源网络仿真工具NS－3进行协议功能仿真实现。NS－3定义了开放系统互联参考模型（Open System Interconnection，OSI）为5层协议模型，具有清晰的分层架构。在仿真实现中，重点实现了数据链路层（Data Link Layer，DDL）的媒体接入控制层（Medium Access Control，MAC），对DLL的逻辑链路控制子层（Logic Link Control，LLC）功能和物理层功能、信道等进行了简化实现。

2.2 MAC层功能实现

在面向智能用电交互业务的PLC网络仿真实现中，MAC层主要功能包括同步、频率认知、组网及网络维护、媒体接入控制、资源分配和频率选择等功能。MAC层功能主要由PlcMac、PlcMasterMac、PlcSlaveMac和PlcMacHeader4大类来实现。

PlcMac类是PLC仿真平台的MAC层实体类，实现MAC层的主体功能，目前包括媒体接入控制、频率搜索、数据封装和时隙分配等，部分函数在子类中具体实现。

PlcMasterMac类是PLC仿真平台主站端的MAC层实体类，功能与PlcMac相似，重写PlcMac类的部分函数后，实现主站端的功能，如注册管理、调度等。

PlcSlaveMac类是PLC仿真平台从站端的MAC层实体类，功能与PlcMac相似，重写PlcMac类的部分函数后，实现从站端的功能，如工作频率评估和选择、注册。

PlcMacHeader为MAC头部类，包括源地址、目的地址、中继地址、中继次数和通信频带等信息。

2.3 其他模块实现

信道的主要功能是模拟数据传输过程中的信号衰减和噪声。本仿真实现采用实测的衰减和噪声数据，即将实测衰减和噪声数据存储为txt格式，供仿真实现调用。

物理层主要实现数据/控制信息以比特流形式进行发送/接收的功能，并提供和MAC层的接口。在仿真实现中对物理层的实现进行了简化，即当接收信噪比小于预定门限值时，认为数据包丢失；当接收信噪比大于预定门限值时，根据产生的随机数判断是否进行丢包操作。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2.4 脚本

在面向智能用电交互业务的PLC协议仿真实现中，脚本具有配置网络拓扑等PLC仿真场景、可用工作频率等仿真关键参数的功能，同时也是仿真运行的入口。脚本配合band.h和band.cc文件可实现任意中心频点、任意带宽的工作频率配置，并可为网络选择任意个数的工作频率。

3 多频PLC MAC协议仿真测试

对面向智能用电交互业务的PLC协议仿真实现进行测试，包括多频通信、节点接入、MAC吞吐量、应用层吞吐量和时延性能等。

在测试中，假设网络包含60个从站，从站到主站的数据为在华北某典型城市典型小区实测的衰减和噪声数据。系统工作频率如表1所示，在仿真实现中可进行配置。

表1 工作频率配置

编号	起始频率 / MHz	终止频率 / MHz	带宽 / MHz
1	0.15	0.306 25	0.156 25
2	0.326 25	0.482 5	0.156 25
3	0.962 5	1.275	0.312 5
4	1.275	1.9	0.625
5	1.6	2.85	1.25
6	2.95	4.2	1.25

3.1 多频通信测试

多频通信测试是为了验证面向智能用电交互业务的PLC协议及仿真实现均支持多频通信，可根据信道衰减及噪声情况为不同的链路选择不同的通信频率。系统工作频率可通过脚本文件进行配置。在本次测试中，为了清楚展现出节点间的工作频率，假设网络包含1个主站和15个从站。

当工作频率配置为1号、2号和3号频率时，节点只能在1号、2号和3号频率中寻找最佳工作频率。图3为频率设置一个实例，在该实例中，节点均通过2号频率通信。从表1可以看出，3号频率完全覆盖了1号频率和2号频率，1号频率上信道条件差在很大程度上代表了3号频率上的信道条件差。在图4所示的测试实例中，工作频率配置为4号、5号和6号频率。从图4中可以看出，大部分节点选择了4号频率，仅有两个节点选择了6号频率。

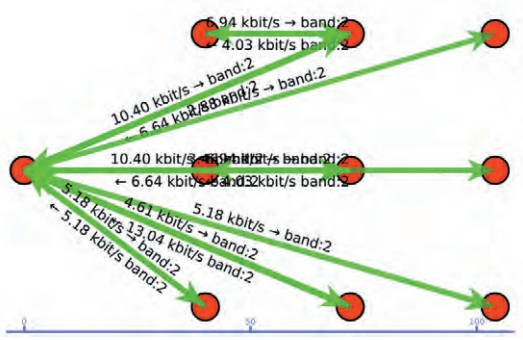

图3 多频通信测试（工作频率组：1号、2号和3号频率）

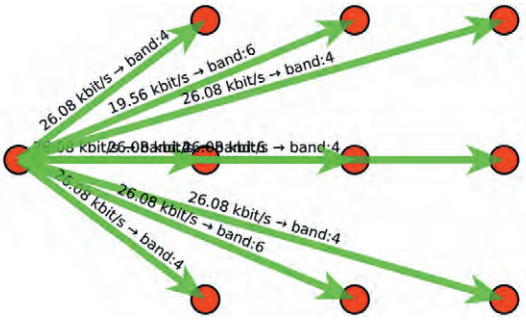

图4 多频通信测试（工作频率组：4号、5号和6号频率）

3.2 节点接入测试

节点接入测试的目的是验证节点接入率及接入速度随工作频率的变化。从图5中可以看出，当仅使用1号工作频率时，在32 s时仅有约18%的用户接入网络，当使用1～3号频率时，约有90%的用户接入网络，当使用1～5号频率时，在28 s时全部节点均已接入网络。图5表明，使用多频技术可有效改善PLC网络的用户接入率性能。

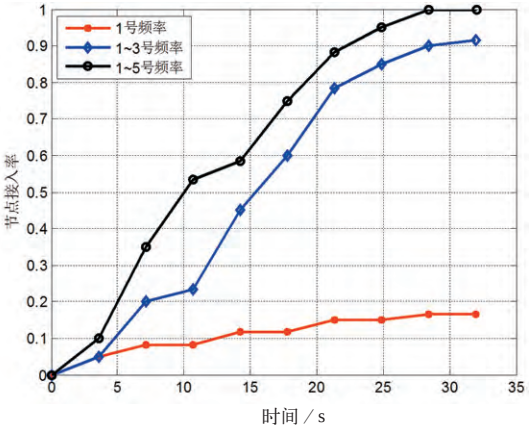

图5 节点接入率和时间、频率个数关系

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3.3 MAC吞吐量测试

MAC吞吐量测试的目标是验证面向智能用电交互业务的PLC协议仿真实现可以支持MAC层吞吐量的统计，为评估协议MAC层吞吐量提供依据。从图6中可以看出，在组网开始阶段，MAC层吞吐量随工作频率个数的增加而增加，这主要是因为新增工作频率的带宽较大。

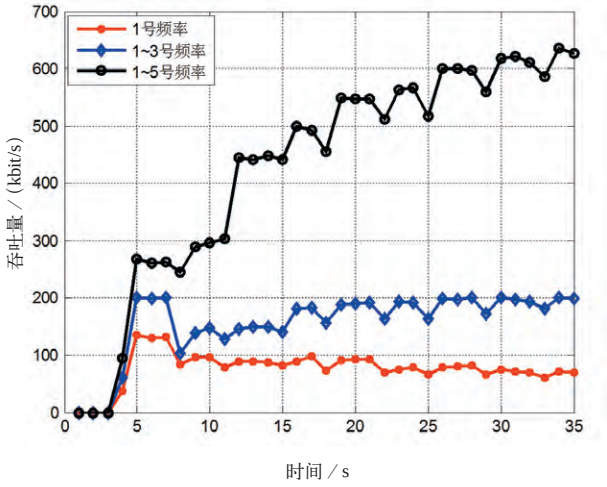

图6 MAC层吞吐量和时间、频率个数关系

3.4 应用层吞吐量及时延测试

应用层吞吐量及时延测试的目标是验证面向智能用电交互业务的PLC协议仿真实现可以支持应用层吞吐量及时延的统计，为评估PLC网络性能提供依据。在仿真过程中，会在NS－3.18根目录的Simulation文件夹下生成SeverRxStats.txt、SeverRxFile.txt、ClientRxStats.txt和ClientRxFile.txt 4个文件。其中SeverRxStats.txt包含3列：第1列表示数据包源节点的IP地址；第2列表示节点接收到数据包的长度；第3列表示该数据包的时延。SeverRxFile.txt文件包含两列：第1列表示源节点的IP地址，第2列表示主站共收到来自该源节点的数据量。ClientRxStats.txt包含3列：第1列表示数据包源节点的IP地址；第2列表示节点接收到数据包的长；第3列表示该数据包的时延。ClientRxFile.txt统计了所有从站节点共收到来自主站的应用层数据量。

4 结束语

提出了面向智能用电交互业务的多频PLC MAC协议功能，并基于NS－3仿真平台进行了仿真实现。仿真结果表明，多频通信可以增加节点的接入率，降低网络的组网时间，对于改善PLC网络可靠性，满足智能用电交互业务需求具有重要作用。此外，本文的仿真实现为PLC协议MAC层吞吐量、接入率及接入速度、应用层吞吐量及时延的评估提供了依据，为协议的实用化研发奠定了基础。

参考文献

[1] 赵丙镇，刘建明，栗宁，等. 智能用电交互中的融合通信技术[J]. 电力系统通信，2011，32(228)：1-5.

[2] 谢狄辉，杨跃平. 智能用电信息交互平台研究与应用[J]. 机电信息，2012(6)：31-32.

[3] 李建岐，陆阳，赵涛，等. 新一代电力线载波通信关键技术探讨[J]. 电力信息与通信技术，2013，11(12)：1-5.

[4] Gotz M，Rapp M，Dostert K. Power line channel characteristics and their effect on communication system design [J]. IEEE Communication Maganize，2004，42(4)：78-86.

[5] 一种用于电力线载波通信的数字前端系统及其实现方法[P/OL]. 申请号：201310091035.6.

[6] 一种用于电力线载波通信的定时同步方法及系统[P/OL]. 申请号：201310478479.5.

（收稿日期：2015－05－26）EA

作者简介

安春燕（1987-），女，工程师，主要研究方向为电力线载波通信。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net