

DOI: 10.7667/PSPC201920

基于 LPWAN 的泛在电力物联网

陈皓勇¹, 陈永波², 王晓娟¹, 陈武涛¹, 李志豪¹

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510641; 2. 中兴通讯股份有限公司, 江苏 南京 210012)

摘要: 高比例的可再生能源接入、电力市场化改革和“互联网+”智慧能源的快速发展需要大量的数据支撑, 并实现物理、商业、信息的广泛互联、智能互动。关键步骤之一是建立泛在电力物联网(Ubiquitous Power Internet of Things, UPIoT), 实现电力系统中人与物、物与物、人与人之间随时随地通信。首先介绍了 UPIoT 的发展背景与基本概念、主要的低功耗广域网络(Low Power Wide Area Network, LPWAN)技术, 然后以 LoRa 物联网解决方案为例介绍了基于 LPWAN 的 UPIoT 的体系架构及性能。最后探讨了 UPIoT 的应用前景, 并指出了 UPIoT 需重点研究和解决的两个特殊问题, 即: 低压电力线载波通信(PLC)和强电磁干扰环境下的信号处理。

关键词: “互联网+”智慧能源; 泛在电力物联网; LPWAN; 电力线载波通信; 微弱信号处理

Ubiquitous power internet of things based on LPWAN

CHEN Haoyong¹, CHEN Yongbo², WANG Xiaojuan¹, CHEN Wutao¹, LI Zhihao¹

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

2. ZTE, Nanjing 210012, China)

Abstract: In the context of integration of high penetration renewable energy, electricity market reforms, and internet plus smart energy, massive data support is needed and the physical, commercial, and information interconnections of power (energy) grids must be strengthened. A key step is to construct the Ubiquitous Power Internet of Things (UPIoT), and realize the connections among people and things in the power system at anytime and anywhere. The development background and concept of UPIoT and the major Low Power Wide Area Network (LPWAN) technologies are introduced at first. Then the architecture and performance of LPWAN based UPIoT are elaborated by taking the LoRa IoT solution as an example. Finally, the application prospect of UPIoT is discussed, and the special problems of UPIoT, namely low-voltage power line carrier communication (PLC) and signal processing in strong electromagnetic interference environment are pointed out, which need to be further studied.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900100).

Key words: internet plus smart energy; ubiquitous power internet of things; LPWAN; power line communication; weak signal processing

0 引言

能源互联网来自于美国著名经济趋势专家里夫曼提出的 Energy Internet, 他认为能源互联网有几大特征:

- 1) 以可再生能源为主要一次能源;
- 2) 支持超大规模分布式发电系统与分布式储能系统接入;
- 3) 基于互联网技术实现广域能源共享;

4) 支持交通系统的电气化。

随着“互联网+”智慧能源的进一步发展, 未来的电网(能源)网的发展趋势是加强三个互联, 即物理互联、信息互联、商业互联。

首先是加强物理互联, 在现有电网的基础上, 实现多种能源形式(电、冷、热、气等)的互联和综合利用, 即综合能源系统。第二个是加强信息互联, 也就是基于更先进的信息通信技术实现在任何时间、任何地点、任何人、任何物都能顺畅地通信, 物联网就属于信息互联的一部分。第三个是加强商业互联, 就是建立市场机制以及更高层次的共享经济模式。

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2016YFB0900100)

随着能源生产与消费革命推进，传统能源服务商正逐步向以客户为中心的综合能源服务商转型，构建有机融合的多能互补综合能源系统，实现多种能源形式优化互补，响应国家“互联网+”智慧能源倡议，是当下能源发展热点趋势。2019年3月，国家电网全面部署 UPIoT，并抓紧落实“三型两网、世界一流”战略。UPIoT 是实现电力系统发输配用环节的海量数据连接，这其中包括 80%以上的小数据连接需求，达到物物、人物、人人相连的效果。坚强的智能电网和 UPIoT 共同构成了“互联网+”智慧能源的电网，这两者互补，实现能源、业务、数据的三流合一。中共中央 9 号文要求“管住中间，放开两头”，其实就是把电网变成电能通道，实现供需两侧的自主选择。在高比例的可再生能源、电力市场化改革、“互联网+”智慧能源的背景下，大量的数据需要连接和处理，但目前这些数据并未被真正利用。国家电网做 UPIoT 的初衷就是要把这些数据真正地利用起来，利用公司的电网基础设施和独特的数据资源优势大力培育基于能源电力大数据的互联网创新业务，在新的更高层次形成核心的竞争力。

无线、宽带、互联网技术、低功耗广域网络(LPWAN)技术等的迅猛发展使得 UPIoT 的部署不断加快，见图 1^[1]。近年来有不少关于物联网方面的研究，文献[2]提出一种安全、高效的数据采集方案，文献[3]概述了物联网的相关技术，着重介绍了其技术、协议和应用场景等问题；文献[4]则阐述了物联网在智能电网中的不同应用场景；文献[5]探究了大数据在物联网中的应用，并给出若干有待解决的关键问题，为以后的研究提供方向。文献[6]阐述

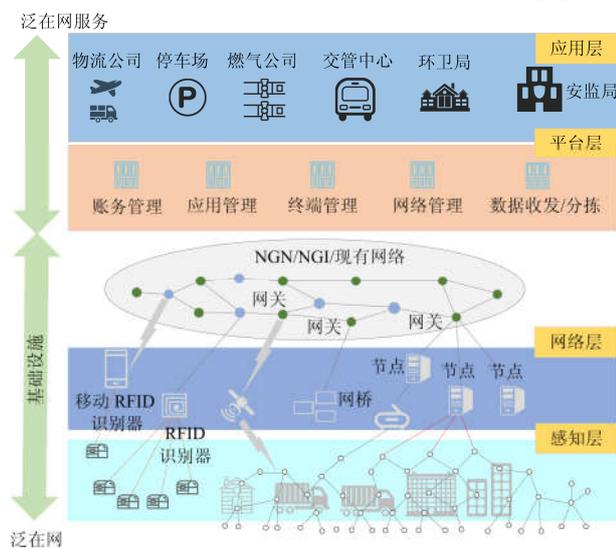


图 1 泛在网示意图

Fig. 1 Diagram of ubiquitous network

了电力物联网的定义和网络架构的主要技术特征。文献[7]主要介绍了网络架构中感知层传感器信息模型；文献[8]对分布式感知、协同估计/检测以及其在电力系统方面的应用进行了深入探究。但目前对于 UPIoT 的介绍和比较研究还比较匮乏，本文主要研究了 UPIoT 的现状，指出建设 UPIoT 的关键在于感知层的建设，感知层的建设完备后才能进行下一步的建设。本文综述了基于 LPWAN 前沿技术的 UPIoT，并给出 UPIoT 的应用前景和 UPIoT 需研究和解决的特殊问题，为后面的研究提供方向。

1 泛在电力物联网(UPIoT)

UPIoT 利用各种现代信息、通信技术，围绕电力系统生产的各环节，实现万物互联、人机交互，是一个泛在感知设备状态、应用便捷、处理信息高效的智慧系统。UPIoT 属于“互联网+”智慧能源的重要组成部分。从“互联网+”智慧能源的设想过渡到 UPIoT 的具体方案是一个自然的阶段，即建立“互联网+”智慧能源信息互联的基础。“泛在”即无处不在，而电网本身作为一个泛在网，仅体现在电能上，却没有在数据或信息方面体现电网的“泛在”。UPIoT 就是要实现数据和信息的泛在，即实现基础数据连接的下沉，海量小数据智能连接就能实现泛在感知。图 2 为“互联网+”智慧能源的框架图，表明了“互联网+”智慧能源是一个信息网络与物理网络高度结合的综合网络，各生产环节中的连接与数据成为驱动“互联网+”智慧能源的关键因素之一。

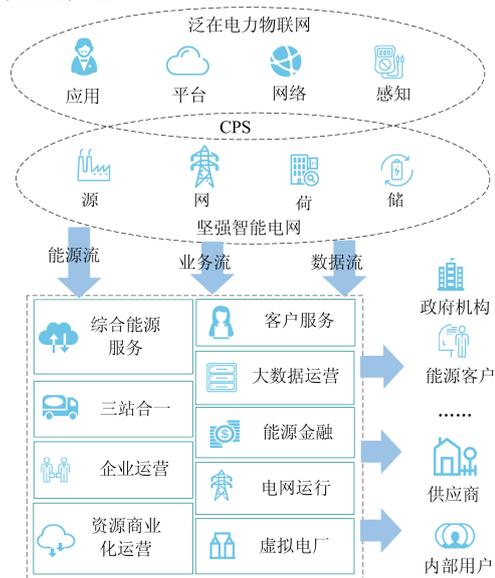


图 2 “互联网+”智慧能源的框架图

Fig. 2 Framework of internet plus smart energy

图 3 表示了泛在网络与物联网、传感网之间的关系^[9], 并由此可知 UPIoT 基础是物联网。在高比例可再生能源^[10-11]、电力市场化改革^[12-13]以及“互联网+”智慧能源^[14-16]的背景下, 大量的基础小数据需要连接, 单个数据价值密度低, 但海量的数据则具有巨大的价值, UPIoT 则是实现基础数据连接的重要途径。这些海量的数据主要包括能源电力用户侧小数据连接以及能源电力发输配各环节小数据连接, 用户侧小数据种类繁多, 主要涉及居民家庭、各种建筑、农工商企业、公共基础设施等等的能源消费主体; 发输变配电小数据主要涉及环境数据、设备状态数据、附属设施状态数据、电气设施的微气象数据等。

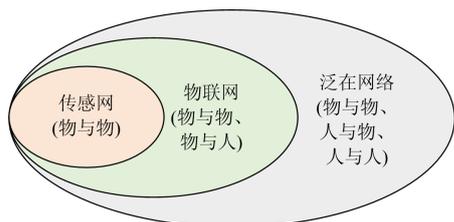


图 3 泛在网络与物联网、传感网之间的关系

Fig. 3 Relationship among UPIoT, internet of things and sensor network

UPIoT 包含感知层、网络层、平台层、应用层^[17], 如图 4 所示。

1) 感知层: 是 UPIoT 的基础层, 通过物联网设备对电网的基础设施、电气设备、设备周围环境等进行泛在感知, 如智能电表、温湿度传感器等。

2) 网络层: 用于将感知层采集的信息传输至平台层, 包括无线网、以太网、电力专网等。

3) 平台层: 其实现各类采集数据的管理功能, 包括物联网网络管理、物联网操作系统等等, 是公共基础平台。数据采用不同的加密手段进行互传, 深度挖掘海量数据的价值, 同时对外提供应用开发的 API。



图 4 UPIoT 的网络架构

Fig. 4 Network architecture of UPIoT

4) 应用层: 是 UPIoT 的顶层结构, 通过云计算等技术实现感知数据的处理和分析, 实现 UPIoT 的智能应用, 如车联网、环境监控、电力资产管理等。

物联网架构的一个部分是前端智能的感知层终端到物联网通信模组、通信模组到基站, 这部分就是物联网无线通信核心技术。基站收集数据后, 可以上传到云服务器平台, 可以通过传统的运营商 3G/4G/5G 网络, 也可以通过电力有线/无线专网, 在这个平台的基础上可以建立各种各样的业务应用, 这就是从感知层到网络层、到平台层、最终到应用层的完整环节。物联网是逐渐发展起来的, 当前 UPIoT 仍处于初步布局的阶段, 电力物联网的感知层主要由各种传感识别设备实现信息的采集、识别和汇集^[18], 所以当前发展重点应该是在感知层和网络层, 只有这两层的基础建好以后, 才可以建平台层、应用层。

2 低功耗广域网络(LPWAN)技术

目前的电网已经通过光纤、有线等方式完成了关键节点的通信连接, 但在“互联网+”智慧能源的背景下, 已经不能满足当前电网对基础小数据的需求。为满足小数据连接需求, LPWAN 技术成为物联网技术中又一发展热点。当前主流的无线通信技术有两种: 第一种是如 WIFI, Zigbee 等的无线通信, 但其有效工作距离较短; 第二种是无线蜂窝技术。但这两种主流技术都不能为基础小数据提供有效的连接方案。由于 LPWAN 技术覆盖面广、传输速率低、能耗小、成本低廉、连接数量大等优点^[19], 可为高度分散、测量点众多的小数据提供完美的解决方案, UPIoT 的应用具有“碎片化”的特点^[20]。UPIoT 是“互联网+”智慧能源变革中的重要基石, LPWAN 技术在“互联网+”智慧能源中将起到关键作用。LPWAN 技术和目前的电力专网、无线网相辅相成, 共同促进 UPIoT 的发展。

UPIoT 的构建方式是将网络连接整合到各种厂房、设备和装置, 连接智能网络中的这些设备, 并使用数据分析从设备中提取有价值、切实可行的洞察。UPIoT 在电网中的应用可以帮助电力公司和电网系统运营商通过匹配整个电网的电能供应和需求降低资本投入, 并通过更加精细的负荷预测最大限度减少备用电源的配置, 扩大可再生能源的市场份额, 减少弃光弃水弃风、弃风、弃光; 同时, 各种设备的数据信息通过 UPIoT 传输到控制中心, 可帮助执行远程的故障诊断, 最大限度的减少现场访问。

LPWAN 技术按照工作频谱划分主要有两种: 一种是 LoRa、SigFox、Ingenu RPMA 等技术, 它们

工作于未授权频谱；另一种则相反，如 EC-GSM、LTE Cat-m、NB-IoT 等，它们主要是工作在授权频谱下。由文献[21]可知，根据不同的实际情况，可将 LoRa 的网络建设和运营模式划分成三类：国家级运营商主导，行业优势企业主导和中小企业联合。本论文主要介绍基于 LoRa 的 UPIoT 的方案。LoRa 资产部署成本低，有很好的室内覆盖力、便于安装的优点，采用 AES-128 加密，并使用免 GPS 的地理定位技术，无需额外提供电源。表 1 是关于 LoRa、Sigfox、eMTC 和 NB-IoT 的技术特点分析^[22]。

表 1 几种无线通信技术特点对比

Table 1 Comparison of several wireless communication technology features

	LoRa	Sigfox	eMTC	NB-IoT
频带	868 MHz (欧洲) 915 MHz (美国) 433 MHz (亚洲)	868 MHz (欧洲) 915 MHz (美国)	授权频段: 4G 频段	授权频段: 850 M、900 M 和 1 800 MHz
最大范围	15~45 km (空旷) 15~22 km (郊区) 3~8 km (城市)	30~50 km (乡村) 3~10 km (城市)	147 dB 10~20 km (农村) 1~2 km (城市)	15 km
传输速率	0.25~50 kbit/s	100 bit/s	1 Mbps	65 kb/s
发送功率	10~18 dBm	0~14 dBm	20 dBm	23 dBm
商用程度 (2017 年底)	2013 年商用, 全球超过 150 个国家和地区部署。	已部署 26 个国家(主要在欧洲) 中国未进入。	2016 年商用, 全球多个国家部署。	2017 年部署, 已经商用。

随着现今通信技术的发展, LoRa 技术提供了一个很好的解决方案, 当然目前还有一些其他的通信方式来实现数据的传递^[23], 比如在短距离段用电力载波能信(Power Line Communication, PLC)或者 Zigbee, 或使用 GPRS 直接连接到每个电表端点。但是跟 LoRa 相比: PLC 具有一定带宽的限制使用不够灵活^[24]; Zigbee 通信距离不足且组网复杂, 路由迂回; GPRS 则运行成本较高。LoRa 有以下优势: 功耗低, 免去电池需经常更替的问题; 覆盖范围广, 解决了现有的通信技术通信距离不足的问题; 采用星型组网方式不需要计算各种通信链路问题, 一个基站在不同的使用条件下可以连几千甚至数万个节点, 组网方便且具有良好的扩展性。在 LoRa 组网中, 所有终端都会先连接基站, 基站之间可以通过网络互联到网络服务器。在这种结构下, 即使两个终端位于不同的区域, 连接不同的基站也能进行相

互通信, 从而进一步扩大数据传输的范围。同时基站安装地点灵活, 可以选点在有线电源的地点, 将一些耗电量高的工作交给基站处理, 从而进一步降低终端的能耗。终端与基站之间的通信可以通过不同的信道和编码率传输。编码速率主要取决于通信范围和通信时长, 且不同编码率之间的通信相互之间不干扰。LoRa 的编码速率介于 0.3~50 kbs。

3 基于 LPWAN 的泛在电力物联网(UPIoT)

本文介绍 CLAA(China LoRa Application Alliance) 联盟的云端一体化方案, 并采用非授权频段的黑盒化的物联终端, 实现快速、灵活、低成本、广覆盖、低功耗的 UPIoT 部署。UPIoT 核心工作是完成物联网终端与应用间数据的分发功能, 保证数据可靠及低成本传输。应用和终端均需要向物联网中心注册, 建立关联, 同时多业务应用公用统一的物联网, 降低建设和运营成本。上述功能和需求可以通过不同的网元实现, 此类网元如下: 物联网基站(IWG), 多业务平台(MSP), 弹性 UPIoT 云、认证中心(AUC)、网络管理系统(NMS)、位置计算服务器(LCS)、业务运营支撑系统(BOSS)、业务漫游交换服务器(SRX)^[25]。基于 LoRa 的 CLAA 的物联网核心架构如图 5 所示。

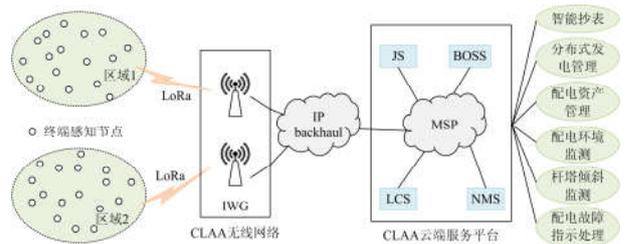


图 5 CLAA 的物联网核心构架

Fig. 5 Core architecture of CLAA IoT

终端节点对需要采集的数据进行采样, 经过 LoRa 终端射频模块将采集到的数据传输至 LoRa 基站。需采集的参数随 UPIoT 应用场景的改变而改变, 参数类型有电气参数、非电气参数以及其他类型参数。电气参数包括交流量(4 Bytes)、直流量(4 Bytes)、开关量(1 Bit)、状态量(1 Bit)、控制量(1 Bit)。非电气参数包括模拟量(4 Bytes)、状态量(1 Bit)。其他类型参数包括计量数据(4 Bytes)、档位数据(1 Bytes 或者多个 Bytes)。通过采集这些数据, 等到系统的运行状态, 综合得出最佳的控制决策。

传感器采集数据, 处理后将相关数据经过 LoRaWAN 传输至基站, 基站实现协议转换, 通过 GPRS 或者以太网回传至服务器。监控中心通过

DNS 域名和 TCP 知名端口建立 SSL 连接, 从而获得监控数据。同时基站也从监控中心接收各种控制命令, 传输至终端节点, 进而实现对监控对象的控制。终端采集节点上报数据主要有两种方式: 一种是定时上报数据, 一般少则 10 多分钟, 多则数个小时或者一天; 另一种是主站主动召唤终端节点上传数据, 采集终端响应主站发出的指令, 上传数据。数据传输速率与数据类型和采集频次有关, 且在传输的数据流量随应用场景的不同而发生改变。CLAA 网络协议(具体介绍详见第三章)规定了数据帧头、终端地址、版本、校验内容, 网络开销大概 30 Bytes 左右, 扩频因子 SF 为 12 时, 有效载荷约为 50 Bytes, SF 为 7 时, 有效载荷约为 220 Bytes^[26]。表 2 表示了 CLAA 网络 1 座基站网络容量情况。

表 2 网络负载与容量示例表

数据长度	发包频率	信道负载	扩频因子	空中时延/ms	传输速率/(kbit/s)	网络容量/个
8			7	36.1	5.47	3 989
			12	991.2	0.29	145
16	60 次/h	30%	7	51.5	5.47	2 796
			12	1 155.1	0.29	125
32			7	71.9	5.47	2 003
			12	1 646.6	0.29	87

4 泛在电力物联网的展望

4.1 应用前景

UPIoT 本质上是实现下沉基础数据的连接, 这些数据既包括能源电力发输配各环节的小数据, 也包括能源电力用户侧的小数据。

1) 用户侧小数据种类繁多, 主要涉及不同的能源消费主体, 包括智能电表、智能电器、智能充电桩, 甚至漏电监测以及能效管理、智能建筑、智能消防等。物联网在电力系统中的应用如图 6 所示。

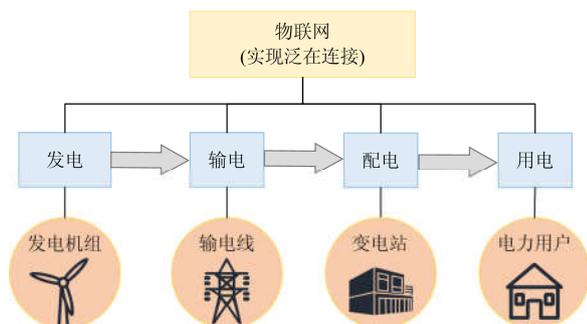


图 6 物联网在电力系统中的应用

Fig. 6 Application of IoT in power system

2) 发输变配电小数据主要包含环境数据, 例如

设备环境检测数据、设备状态检测数据、气象检测数据。

基于采集到的数据, 可以基于这些数据建立相应的服务, 如可以基于电力需求数据优化合同能源管理(节能服务)。UPIoT 可以看作是一个基础的平台, 在这个基础上可以开展一些创新性的增值服务, 比如综合能源服务, 还有互联网金融、大数据运营、大数据征信、光伏云网、线上供应链金融、虚拟电厂、基于区块链的新型能源服务、智能制造等。只需接口统一、管理软件适应, 适应不同的电力需求, 最终实现一张网、共平台、多业务应用场景的宏图。图 7 表示了 LoRa 网的组网结构图。

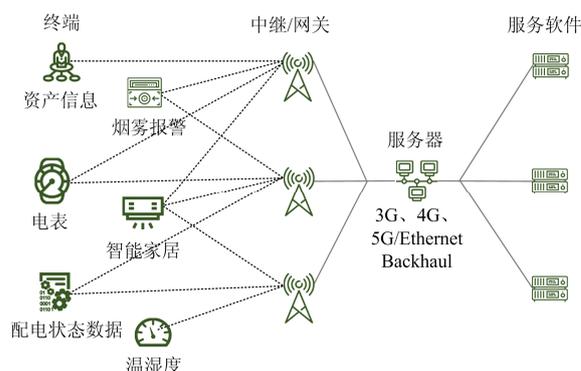


图 7 LoRaWAN 组网结构图

Fig. 7 Diagram of LoRaWAN

UPIoT 的应用场景包括:

1) 智能抄表

目前的抄表方式主要有: 人工抄表、本地自动抄表、现场无线抄表、预付费、智能抄表等^[27]。抄表地区有高楼密集区也有相对空旷的乡村区域, 每个房子都有一个独立的电表, 大都安装在户外, 用于读取用户用电信息。基于 LPWAN 的电力物联网可以灵活地接入这些电表^[28], 实现电表的泛在连接。

2) 配电网状态检测

由于配电网中电力设备、用电设备的高度分散、广泛分布, 导致其运行状态的信息采集或数据连接不完善, 给“互联网+”智慧能源的发展带来了一系列挑战。基于 LPWAN 的电力物联网可有效地接入这些设备, 助力“互联网+”智慧能源、可再生能源、电力市场改革等的建设。

3) 电气设备环境数据监测

环境条件的好坏关系到电气设备能否安全稳定运行, 如何有效且实时地监控电气设备的环境数据(如温度、湿度等)是电网安全运行的关键之一。由于环境数据监测点数量多且高度分散, 不利于数据的采集, 而基于 LPWAN 的电力物联网具有低功

耗, 远距离等特点, 可有效连接这些监测点, 实现电气设备环境数据的泛在连接。

4) 智能家居

在“互联网+”智慧能源应用中, 人们对物联网技术寄予了很高的期望, 希望能够拥有智能家居和家电, 如: 智能冰箱、智能电视、家庭安全系统、照明控制、火灾探测、温度监测。基于 LPWAN 的电力物联网可以灵活地接入这些负荷电器, 实现网、荷互动连接。

4.2 泛在电力物联网需研究和解决的特殊问题

目前电力行业使用的通信方式主要依赖于电力线载波通信, 也广泛采用微波通信、卫星通信和光纤通信的方式, 当前也在建设基于 LTE230 系统的电力无线专网等。PLC 是电网企业特有的一种依靠现有输电网络进行通信的技术, 因使用方便、成本低而被广泛使用^[29], 有可能成为泛在电力物联网独特的通信方式。近年来低压电力线载波通信已引起各方面的重视, 由于靠近用户侧, 低压电力线载波通信技术可被应用于各个行业, 尤其对于泛在电力物联网, 可以有效地发挥出自身的技术优势, 例如, 不占用无线频道资源, 能降低成本资金的投入、减少维护流程等^[30]。但是, 电力线通信信道自身的特性(如频率选择特性、输入阻抗特性、噪声干扰特性及信号衰减特性等^[31-33])会降低通信可靠性, 这些问题需要进一步研究和解决。由于低压电网连接着众多的用电设备, 每种用电设备都对电网有不同程度的噪声污染(谐波、脉冲等), 特别是一些开关电源设备、非线性用电设备和大功率变频设备等。另外, 配电变压器铁芯饱和、磁化曲线的非线性也会引起谐波干扰, 用电设备的接入和断开也有随机性。电力线路上的这些噪声干扰源不仅会造成信号误码率高, 还有可能使接收装置内部产生自干扰, 严重影响整个系统的工作^[34]。

另一方面, 电力系统中由于电气设备的各种操作(如: 运行方式的改变、开关操作、故障等)会造成电磁振荡, 会对 UPIoT 的信号造成各种电磁干扰^[35]。测量信号湮没在强噪声中, 给信号检测和处理带来一定的挑战, 因此强电磁干扰环境下的信号处理问题成为 UPIoT 急需研究和解决的特殊问题。弱信号检测的有两种基本方式: 1) 通过降低传感器和放大器的固有噪声来提高信噪比; 2) 通过研究产生噪声的原因以及噪声的规律提高输出信号的信噪比^[36]。不同方式的检测有不同的解决方法: 文献[35]针对不同的电磁干扰问题(如: 周期型、脉冲型、随机型)提出了不同的解决方法; 文献[37]分析了相关检测法和自适应滤波器如何进行弱信号处理; 文

献[38]提出一种基于压缩感知的弱信号处理算法, 适用于信号具有稀疏性的情况下。通过抑制噪声来提高信噪比是较为传统的弱信号处理方式, 但该方法在抑制噪声的同时也会使原始信号失真。因此, 目前的研究开始尝试运用非线性的方法(如: 分叉、混沌、分型)来处理弱信号处理的问题, 用于弥补传统方法的不足, 文献[36]深入研究了达芬振子在弱信号检测中的应用问题, 并通过实验证明了其有效性; 文献[39]研究基于混沌共振理论的弱信号处理, 通过搭建随机共振电路验证了对微弱信号的检测。这些理论与技术在 UPIoT 的应用问题还需要进一步研究。

5 结论

基于 LPWAN 技术的电力物联网可以实现电网的泛在连接, 本文综述了基于 LPWAN 技术的 UPIoT 以及其应用前景, 并指出了 UPIoT 需研究和解决的特殊问题, 为以后的研究提供基础。UPIoT 可分为感知层、网络层、平台层、应用层, 是未来“互联网+”智慧能源发展的基础, 建设 UPIoT 的前提是建立完备的感知层和网络层基础设施, 也是建设初期阶段需关注的重点。

参考文献

- [1] 江泽民. 新时期我国信息技术产业的发展[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(10): 1589-1607.
JIANG Zemin. Development of IT industry in China in the new age[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2008, 42(10): 1589-1607.
- [2] GUAN Zhitao, LI Jing, WU Longfei, et al. Achieving efficient and secure data acquisition for cloud-supported internet of things in smart grid[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2017, 4(6): 1934-1944.
- [3] AL-FUQAHA A, GUIZANI M, MOHAMMADI M, et al. Internet of things: a survey on enabling technologies, protocols and applications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(4): 2347-2376.
- [4] REKA S S, DRAGICEVIC T. Future effectual role of energy delivery: a comprehensive review of internet of things and smart grid[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 91: 90-108.
- [5] AHMED E, YAQOUB I, HASHEM I A T, et al. The role of big data analytics in internet of things[J]. Computer Networks, 2017, 129(2): 459-471.
- [6] 欧海清, 曾令康, 李祥珍, 等. 电力物联网概述及发展现状[J]. 数字通信, 2012, 39(5): 62-64.
OU Haiqing, ZENG Linggang, LI Xiangzhen, et al. Power networking overview and development status[J]. Digital Communication, 2012, 39(5): 62-64.

- [7] 荆孟春, 王继业, 程志华, 等. 电力物联网传感器信息模型研究与应用[J]. 电网技术, 2014, 38(2): 532-537.
JING Mengchun, WANG Jiye, CHENG Zhihua, et al. Research and application of sensor information model in power internet of things[J]. Power System Technology, 2014, 38(2): 532-537.
- [8] 陈皓勇, 王晓娟, 蔡永智, 等. 复杂电力(能源)系统的分布式感知与协同估计/检测研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 1-10.
CHEN Haoyong, WANG Xiaojuan, CAI Yongzhi, et al. Distributed sensing and cooperative estimation/detection of complex power/energy and energy systems[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 1-10.
- [9] 张平, 李世林, 胡铮. 增强性移动泛在智慧环境——物联网的高级态势[J]. 物联网学报, 2018, 2(1): 17-23.
ZHANG Ping, LI Shilin, HU Zheng. Enhanced-mobile ubiquitous smart environment—the super state of Internet of things[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2018, 2(1): 17-23.
- [10] 梁子鹏, 陈皓勇, 雷佳, 等. 考虑风电不确定度的风-火-水-气-核-抽水蓄能多源协同旋转备用优化[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2111-2119.
LIANG Zipeng, CHEN Haoyong, LEI Jia, et al. A multi-source coordinated spinning reserve model considering wind power uncertainty[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2111-2119.
- [11] 李刚, 刘继春, 魏震波, 等. 含分布式电源接入的市场多主体博弈分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(19): 1-9.
LI Gang, LIU Jichun, WEI Zhenbo, et al. Analysis of game among multi-agents in electrical power market with integration of distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 1-9.
- [12] 郭曼兰, 陈皓勇, 张聪, 等. 偏差电量考核机制下售电公司的最优经营策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(20): 17-25.
GUO Manlan, CHEN Haoyong, ZHANG Cong, et al. Optimal marketing strategy of retailers under energy deviation penalty[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(20): 17-25.
- [13] 白杨, 李昂, 夏清. 新形势下电力市场营销模式与新型电价体系[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 10-16.
BAI Yang, LI Ang, XIA Qing. Electricity business marketing modes in the new environment and new electricity pricing systems[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 10-16.
- [14] 葛海麟, 陈皓勇, 文俊中, 等. 基于能量网络理论的分布式供能系统分析[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 34-40.
GE Hailin, CHEN Haoyong, WEN Junzhong, et al. Distributed energy system analysis based on energy network theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 34-40.
- [15] 郑国太, 李昊, 赵宝国, 等. 基于供需能量平衡的用户侧综合能源系统电/热储能设备综合优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16): 8-18.
ZHENG Guotai, LI Hao, ZHAO Baoguo, et al. Comprehensive optimization of electrical/thermal energy storage equipments for integrated energy system near user side based on energy supply and demand balance[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(16): 8-18.
- [16] 王珺, 顾伟, 张成龙, 等. 智能社区综合能源优化管理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 89-97.
WANG Jun, GU Wei, ZHANG Chenglong, et al. Research on integrated energy management for smart community[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 89-97.
- [17] 邹维福, 陈景晖, 翁晓锋, 等. 电力物联网的风险分析及安全措施研究[J]. 电力信息与通信技术, 2014, 12(8): 121-125.
ZOU Weifu, CHEN Jinghui, WENG Xiaofeng, et al. The security analysis and countermeasure of Power Internet of Things[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2014, 12(8): 121-125.
- [18] 李勋, 龚庆武, 乔卉. 物联网在电力系统的应用展望[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(22): 232-236.
LI Xun, GONG Qingwu, QIAO Hui. The application of IOT in power systems[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(22): 232-236.
- [19] 夏莹莹, 刘琛, 邵震. LPWA, 物联网产业发展的新机遇[J]. 通信企业管理, 2015(10): 68-70.
- [20] 王艺. 物联网技术生态现状和展望[J]. 电信技术, 2016(5): 10-12.
WANG Yi. Current situation and prospect of internet of things technology ecology[J]. Telecommunications Technology, 2016(5): 10-12.
- [21] 郑浩. LoRa技术在低功耗广域网络中的实现和应用[J]. 信息通信技术, 2017, 11(1): 19-26.
ZHENG Hao. The implementation and application of LoRa modulation for LPWAN[J]. Information and Communications Technologies, 2017, 11(1): 19-26.
- [22] KRUPKA L, VOJTECH L, NERUDA M. The issue of LPWAN technology coexistence in IoT environment[C] // 2016 17th International Conference on Mechatronics-mechatronika (ME), December 7-9, 2016, Prague, Czech Republic: 1-8.
- [23] 刘颖, 王再英, 彭倩, 等. 基于 ZigBee 和 GPRS 的远程无线抄表系统设计与实现[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(30): 8058-8062.
LIU Ying, WANG Zaiying, PENG Qian, et al. Design and implementation of remote wireless meter reading system based on ZigBee and GPRS[J]. Science Technology &

- Engineering, 2012, 12(30): 8058-8062.
- [24] 成小良, 邓志东. 基于 ZigBee 规范构建大规模无线传感器网络[J]. 通信学报, 2008, 29(11): 158-164.
CHEN Xiaoliang, DENG Zhidong. Construction of large-scale wireless sensor network using ZigBee specification[J]. Journal on Communications, 2008, 29(11): 158-164.
- [25] 陈永波, 汤奕, 艾鑫伟, 等. 基于 LPWAN 技术的能源电力物联专网[J]. 电信科学, 2017, 33(5): 143-152.
CHEN Yongbo, TANG Yi, AI Xinwei, et al. Electricity internet of things based on LPWAN technology[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(5): 143-152.
- [26] 陈永波, 刘建业, 陈继军. 智慧能源物联网应用研究与分析[J]. 中兴通讯技术, 2017, 23(1): 37-42.
CHEN Yongbo, LIU Jianye, CHEN Jijun. Applications of intelligent energy internet of things[J]. ZTE Communications, 2017, 23(1): 37-42.
- [27] 林润泉. 智能抄表技术发展趋势[J]. 中国住宅设施, 2004(11): 12-14.
- [28] 赵太飞, 陈伦斌, 袁麓, 等. 基于 LoRa 的智能抄表系统设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(9): 298-301.
ZHAO Taifei, CHEN Lunbin, YUAN Lu, et al. Design and implementation of smart meter reading system based on LoRa[J]. Computer Measurement & Control, 2016, 24(9): 298-301.
- [29] 郭昊坤. 电力系统通信技术发展现状综述与展望[J]. 电子元器件与信息技术, 2017, 1(6): 1-6.
GUO Haokun. Review and prospect on the development of power system communication technology[J]. Journal of Electronic Components and Information Technology, 2017, 1(6): 1-6.
- [30] 张婧. 低压电力线载波通信技术研究与应[J]. 科技传播, 2018(16): 144-145.
ZHANG Jing. Research and application of low voltage power line communication technology[J]. Public Communication of Science & Technology, 2018(16): 144-145.
- [31] GUO Haokun, WU Junji, YING Zhanfeng. Modeling research of background noise in low-voltage power line communication channel[J]. Advanced Materials Research, 2012, 516-517: 1386-1390.
- [32] 应展烽, 吴军基, 郭昊坤, 等. 含周期性脉冲噪声的低压电力线噪声建模研究[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(9): 58-63.
YING Zhanfeng, WU Junji, GUO Haokun, et al. Modeling of low-voltage power line noise containing periodic pulses[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(9): 58-63.
- [33] 郭昊坤, 吴军基, 应展烽, 等. 电力线通信信道噪声测量与特性分析[J]. 电力系统通信, 2011, 32(11): 1-3.
GUO Haokun, WU Junji, YING Zhanfeng, et al. Measurement and analysis on channel noise of power line communication[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2011, 32(11): 1-3.
- [34] 吕英杰, 邹和平, 赵兵. 国内低压电力线载波通信应用现状分析[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(4): 33-36.
LÜ Yingjie, ZOU Heping, ZHAO Bing. Analysis on application of low-voltage power line carrier communication in China[J]. Power System and Clean Energy, 2010, 24(4): 33-36.
- [35] 安普春. 信号处理中的电磁干扰抑制方法研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
AN Puchun. Research on anti-electromagnetic interference in signal processing[D]. Shenyang: Northeastern University, 2014.
- [36] 吴冬梅. 基于达芬振子的微弱信号检测方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
WU Dongmei. Research on methodology of weak signal detection based on Duffing oscillator[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010.
- [37] 刘旭飞. 强噪声下微弱信号处理方法研究[J]. 科技信息, 2012(7): 83-84.
LIU Xufei. Research on methods of weak signal processing in strong noise[J]. Science & Technology Information, 2012(7): 83-84.
- [38] 马俊虎, 廖红舒, 谢进文, 等. 基于稀疏域元素位置信息积累的微弱信号检测算法[J]. 信号处理, 2017, 33(7): 985-992.
MA Junhu, MIAO Hongshu, XIE Jinwen, et al. A weak signal detection algorithm based on accumulation of sparse domain element location information[J]. Journal of Signal Processing, 2017, 33(7): 985-992.
- [39] 蔡志全. 强噪声背景下微弱信号检测与处理方法研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2014.
CAI Zhiqian. Study of weak signal detection and processing methods under the background of strong noise[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2014.

收稿日期: 2018-12-10

作者简介:

陈皓勇(1975—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统规划、运行与控制, 新能源并网与智能电网技术, 电力经济与电力市场, 综合能源系统等; E-mail: eehychen@scut.edu.cn

陈永波(1978—), 男, 中兴通讯股份有限公司 5G 智能电网行业总工, 研究方向为能源物联网、5G 技术及其在电力行业的应用等;

王晓娟(1994—), 女, 硕士研究生, 目前研究方向为电力系统分析运行与控制。

(编辑 葛艳娜)