



无线 LoRa 在全业务泛在电力物联网终端层的应用

刘伟¹, 张雁丽², 刘洁¹, 邢丽娟²

- (1. 中国电力工程顾问集团东北电力设计院有限公司, 吉林 长春 130021;
2. 中国移动通信集团吉林有限公司信息技术中心, 吉林 长春 130000)

摘 要: 国家电网公司提出的“全业务泛在电力物联网”是能源网和物联网的融合演进, 是服务于广大用户的关键能源基础设施。随着电力物联网的战略兴起, 输电线路在线监测采集节点和监测规模将骤增, 采用何种技术体制建设现场通信网络, 兼顾考虑长距离、低功耗、高可靠等多重因素至关重要。对无线 LoRa 技术特点及优势进行了研究, 结合输电线路在线监测的应用场景及需求, 提出基于无线 LoRa 的输电线路在线监测组网方案并对其进行适应性分析, 研究成果在该领域具有一定参考意义。

关键词: 泛在电力物联网; 远距离无线电; 输电线路; 在线监测; 现场通信网络; 低功耗广域网络

中图分类号: TP510

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2020156

Application of wireless LoRa in multi-service state grid e-ubiquitous power internet of things

LIU Wei¹, ZHAGN Yanli², LIU Jie¹, XING Lijuan²

1. Northeast Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group Corporation, Changchun 130021, China
2. Information Technology Center of China Mobile Communications Group Jilin Co., Ltd., Changchun 130000, China

Abstract: The “multi-service state grid e-ubiquitous power internet of things” proposed by the State Grid Corporation of China is the integration and evolution of the energy network and the internet of things, and is a key energy infrastructure serving the majority of users. With the rise of the power internet of things strategy, the online monitoring and acquisition nodes and monitoring scale of transmission lines will increase rapidly. What kind of technical system will be used to construct the on-site communication network? It is important to consider multiple factors such as long distance, low power consumption, and high reliability. The characteristics and advantages of wireless LoRa technology was researched, combined with the application scenarios and requirements of on-line transmission line monitoring, the schemes of online monitoring base on wireless LoRa networking were proposed and adaptability was analyzed, the research results have certain reference significance in this field.

Key words: state grid e-ubiquitous internet of things, long range radio, transmission line, online monitoring, field communication network, LPWAN

1 引言

2019年年底,国家电网公司发布了《泛在电力物联网白皮书》,明确未来建设重点为“推动电网与互联网深度融合,着力构建能源互联网”,即充分应用大数据、云计算、物联网、移动互联网、人工智能等现代信息技术和先进通信技术,实现电力系统各个环节万物互联、人机交互,打造状态全面感知、信息高效处理、应用便捷灵活的全业务 SG-eIoT (state grid e-ubiquitous internet of things, 泛在电力物联网)。承载电力流的坚强智能电网与承载数据流的泛在电力物联网相辅相成、融合发展,共同构成能源流、业务流、数据流“三流合一”的能源互联网。

全业务泛在电力物联网“六全愿景”之一的“全环节物物互联”涵盖了电力系统的发、输、变、配、用、调度和经营管理等各个环节,输电线路在线监测在全业务泛在电力物联网总体架构中位于终端层,作为保障高压输电网可靠稳定运行的重要手段,随着泛在互联网战略兴起,监测范围将不再局限于重要输电区段或少量铁塔,未来将逐步向全线路、全状态、全天候方向发展。因此,需要探索一套高效、经济、可靠的现场通信组网方案来传输数据,解决输电线路的监测和管理等问题,以适应泛在电力物联网的海量终端连接需求。

本文深入研究并对比了目前较为成熟的现场无线通信技术,从网络覆盖范围、数据速率、设备功耗、抗干扰能力、网络可靠性、维护便利性等方面进行对比,推荐采用无线 LoRa (long range radio, 远距离无线电) 技术组建现场通信网络,并结合线路在线监测应用场景提出了组网方案和适应性分析,对未来网络建设具有一定借鉴意义。

2 全业务泛在电力物联网下的输电线路在线监测

2.1 全业务泛在电力物联网

早在 1999 年,在美国召开的移动计算和网络

国际会议中率先提出了物联网的概念。当时,将互联网、射频识别技术、无线数据通信技术等技术融合在一起,形成可实现全球物品信息共享的互联网。随着科技发展,物联网后来融入了智能感知、识别技术、数据计算等技术,成为一段时间内世界信息行业的重要发展趋势^[1]。M2M^[2] (machine to machine, 机对机) 和 CPS^[3] (cyber-physical system, 信息物理融合系统) 是物联网的两种重要应用形式。当前,物联网产业快速增长,正处于大爆发前的战略机遇期。物联网涉及的传感、通信、信息、智能化和安全等技术领域发展逐渐成熟,物联网逐步向工业互联网、智慧能源、智能电网等具体行业应用延伸,全球物联终端连接数将达到数百亿^[1]。

国家电网公司拟建设的“全业务泛在电力物联网”能够实时在线连接能源电力生产与消费各环节的人、机、物,全面承载并贯通电网生产运行、企业经营管理 and 对外客户服务等业务的新一代信息通信系统,实时在线感知人、机、物的位置、状态和运行数据,是支撑能源互联网高效、经济、安全运行的基础设施^[4]。全业务泛在电力物联网的总体架构为“四横两纵”的分层架构,“四横”自下而上分别为终端层、网络层、平台层和业务层,“两纵”指运维支撑和安全保障两个中心。“泛在”正是指终端层的万物互联和网络层的无处不在和无时不有,本文重点研究终端层的互联。

全业务泛在电力物联网终端层的总体功能架构如图 1 所示,自下而上分别为业务终端、现场通信网络和边缘物联代理 3 个层次,各类业务终端通过现场通信网络连接到边缘物联代理,经网络层传输至平台层。边缘物联代理是终端层的核心模块,主要实现通信协议适配、数据存储处理、管控策略、边缘计算、数据模型适配、安全策略、网络层接入,同时还能够以 API 的方式对外提供该装置的可编程可定制能力。现场通信网络由有

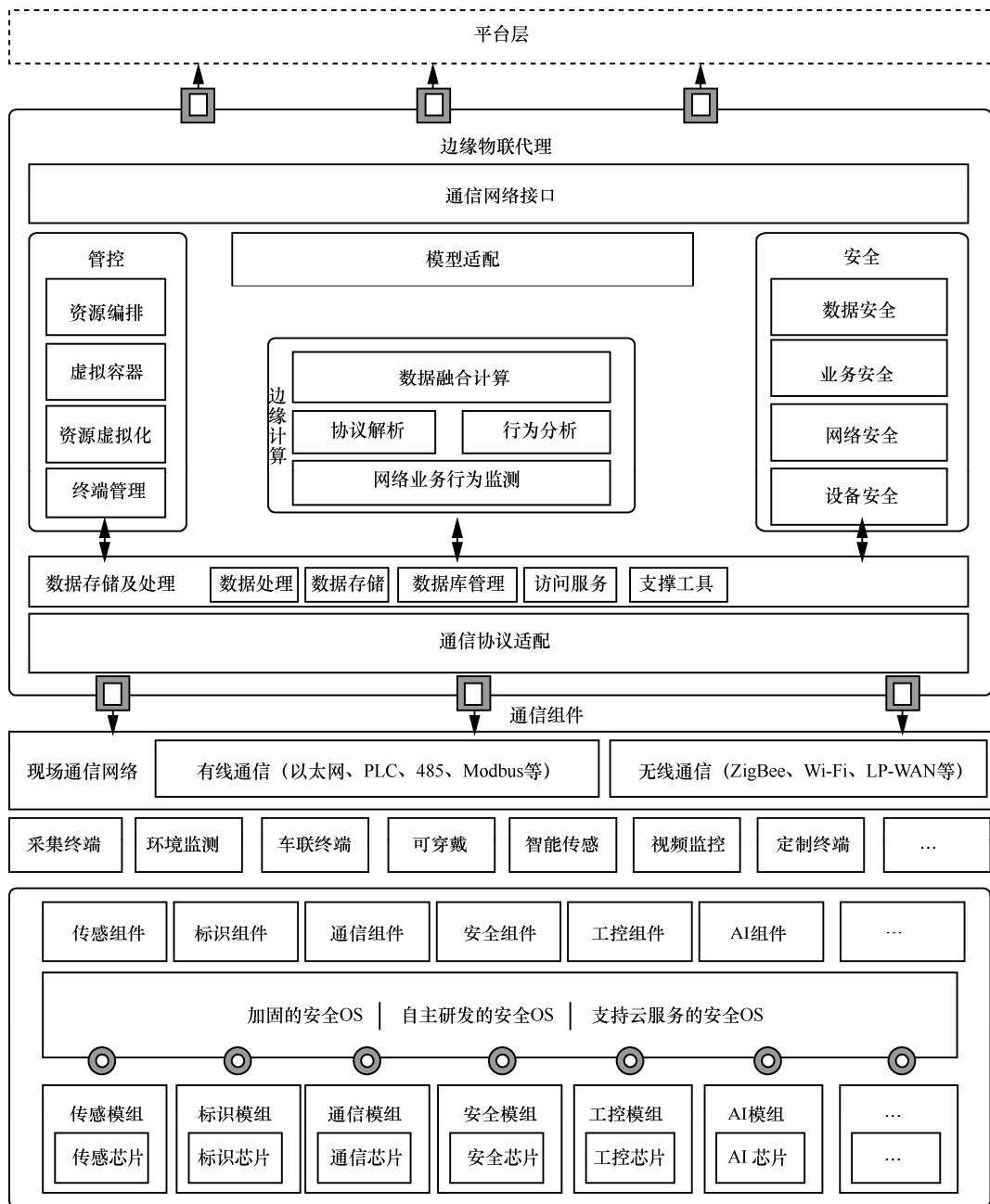


图1 电力物联网终端层总体功能架构

线通信网络和短距离低功耗无线通信网络组成，短距离无线技术主要有 ZigBee、LP-WAN、Wi-Fi 等，有线通信技术主要有 RS485、以太网、xPON、Modbus 等。

2.2 输电线路在线监测

从电力系统传统业务角度来看，在输电、变电、配电、用电和经营管理 5 个方面几十类业务

已经渗透了物联网应用。在输电业务中，应用物联网技术的典型业务有：架空输电线路监测、输电电缆在线监测、输电线路无人机巡检、雷电定位、电缆及通道防外破等。

随着电力建设的迅速发展，电网规模不断扩大，在复杂地形条件下的电网建设和运行维护工作越来越多。作为电力输送纽带的架空输电线路

具有分散性大、距离长、巡视及维护困难等特点，因此对输电线路本体及周边环境远程监控成为研究的热点。通过远程监控可将线路运行状态信息及时送到监测中心，可借助监控平台软件和人工对运行情况实时监控，减少现场巡视工作，协助运维人员对故障精准定位、快速修复。在线监测已成为智能电网的重要组成部分，是实现输电线路运行状态、检修管理、提升生产运行管理精益化水平的重要手段。输电线路在线监测综合利用高压电技术、电子测量技术、通信技术、太阳能技术、软件技术等对导线覆冰、温度、弧垂、微风振动、导线舞动、风偏、杆塔应力分布、杆塔倾斜、杆塔振动、绝缘子污秽、微气象、图像等状态进行远程不间断监控^[5]。按照国家电网公司现行的输电线路监测装置配置原则，根据线路重要程度、线路所处的外部环境、监控需求等选择性地配置上述一种或多种监测装置。

某省级电力公司的输电线路在线监测系统接入方式如图 2 所示，通过在省公司部署安全接入平台，监测终端可通过专线、APN 专线、专线加 Wi-Fi/4G-LTE 混合组网的方式接入公司信息内网。输电线路在线监测终端通过集成安全芯片与安全接入平台实现芯片级别的身份认证与国密算法数据加密，确保远程终端安全可靠接入信息内网，再通过 CMA（condition monitoring agent，状态监测代理）实现协议转换，最终将监测终端数据安全回传至主站。

2.3 新时代背景下的输电线路在线监测

在全业务泛在电力物联网时代，电力物联网管理平台为全业务提供水平化支撑，通过边缘物联代理、物联管理中心屏蔽底层网络差异，实现全环节物物相连的一次水平化；通过能力开放中心，资源整合打通用户、业务与终端实现协同，实现全业务云上运行的二次水平化；未来电力业务数据流、设备数据流、安全数据流将在全业务数据中心存储、管理和分析，实现“一次采集、处处使用”。

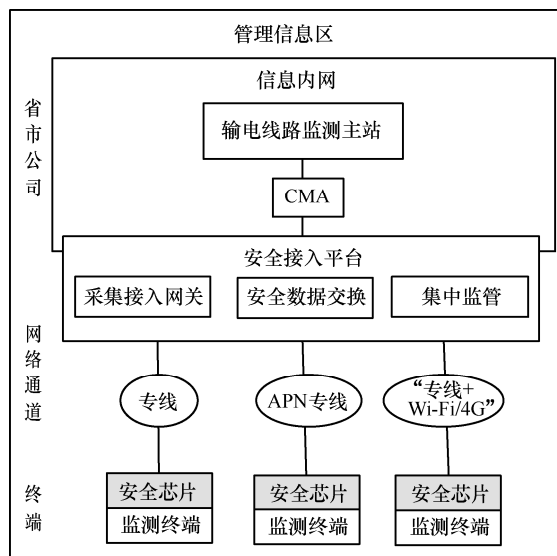


图 2 国家电网公司输电线路监测系统接入典型方式

当前，电力系统建设的输电线路在线监测系统仅仅是物联网在智能电网中的浅尝辄止，其采集节点及采集量均较小，未来全方位、海量的输电线路状态在线监测数据将作为终端层的一部分运行数据送入全业务数据中心，通过调用 API 支持第三方能力集成，从而实现远程监控职能。

3 输电线路在线监测下的低功耗广域网络

3.1 低功耗广域网络技术对比

本文研究的场景为架空输电线路，近些年交直流特高压输电线路呈现输电距离长、穿越地形地貌复杂、气象条件多样性等特点，要求其监测通信装置具备小型化、低功耗、架构简单、覆盖广、连接可靠等特性，故 LPWAN（low-power wide-area network，低功率广域网络）技术得到广泛关注。目前，较为成熟的技术有 NB-IoT（narrow band internet of things，窄带物联网）、LoRa、Sigfox、NWave、Weightless^[6]。

NB-IoT 出自于全球标准化组织 3GPP，由欧洲电信标准化委员会、无线行业企业协会、中国通信标准化协会和世界无线通信解决方案联盟等巨头共同推广，现已成为全业务泛在电力物联网终端层的首选技术。与 NB-IoT 相比，LoRa 技术



则小众许多,它是 Semtech 公司在 2013 年推出的一种新型基于 Sub GHz 的超长距离低功耗数据传输技术,该技术具有极高的接收灵敏度,最高可达 $-148\text{ dBm}^{[7]}$,与其他 Sub GHz 技术相比改善了 20 dB 接收灵敏度且兼具较低的功耗,采用线性扩频调制使其产品具有更高的网络连接可靠性与网络容量。各种技术主要对比见表 1,本文重点研究 LoRa 技术。

3.2 无线 LoRa 的技术特点及优势分析

(1) LoRa 数据分组结构

LoRa 数据分组分显性模式和隐性模式两种,区别在于使用显性模式时数据分组报头包含数据分组传输字节数、数据编码率以及是否采用 CRC 校验等信息。LoRa 数据分组结构如图 3 所示,其主要由前导码、报头和 CRC、有效载荷及载荷 CRC 校验组成。前导码是一个变量,设置范围是 6~65 535 byte,默认长度为 12 byte,其功能是数据流流入时保持数据同步;报头里主要包含有效载荷信息、前向纠错编码率以及可选的 16 位载荷 CRC 校验是否打开;有效载荷长度是变长的,在显性模式下该长度在报头中已确定,在隐性模式下该长度由配置寄存器来确定。

(2) LoRa 空中传输时间

LoRa 网络中有主动唤醒和空中唤醒两种方式。

前导码	报头	CRC	有效荷载	荷载 CRC 校验
	(显性模式下)			

图 3 LoRa 数据分组结构

主动唤醒利用 RTC 时钟定时或微处理器内部时钟定时对设备进行唤醒;空中唤醒即 LoRa 终端设备周期性的醒来检测是否有设备发送前导码,若检测到前导码立即进入正常收发状态,若未检测到则进入休眠状态。

在空中唤醒过程中,需连续发送前导码以覆盖接收端设备的休眠时间,所以前导码的空中传输时间对准确唤醒接收设备非常重要。在软件程序编写时,设备初始化时可设置信号带宽(BW)、扩频因子(SF)、编码率(CR)等关键参数。则 LoRa 的符号速率为:

$$T_s = \frac{2^{\text{SF}}}{\text{BW}} \quad (1)$$

则前导码的传输时间为:

$$T_{\text{preamble}} = (n_{\text{preamble}} + 4.25)T_s \quad (2)$$

其中, n_{preamble} 表示软件中设定的前导码的长度。

LoRa 数据分组空中传输时间包括前导码传输时间和报头及有效负载传输时间,符号个数计算如式(3):

表 1 5 种 LPWAN 技术主要对比

对比项目	NB-IoT	LoRa	Sigfox	Nwave	Weightless
技术创立时间	2016 年	2013 年	2009 年	2011 年	2012 年
频率/MHz	GSM 或 LTE 授权频段	433/470/868/915	868	Sub GHz	Sub GHz
数据速率	小于 100 kbit/s	0.3~50 kbit/s	100 bit/s	100 bit/s	30~100 kbit/s
距离/km	20	15 (郊区) / 5 (城市)	40 (乡村) / 10 (城市)	10	5+
待机功耗/mA	0.01	0.000 2	6×10^{-4}	NC	NC
最大节点数	十万级别	百万级别	百万级别	百万级别	百万级别
运营模式	公开/私有	公开/私有	私有	公开/私有	私有
标准化情况	3GPP	LoRaMAc: 否; LoRaWAN: 是	否	Weightless-N	是
建设成本	最高	最低	相对较高	中等	中等

$$n_{\text{payload}} = 8 + \max \left\{ \text{ceil} \left[\frac{8\text{PL} - 4\text{SF} + 28 + 16\text{CRC} - 20\text{IH}}{4(\text{SF} - 2\text{DE})} \right] (\text{CR} + 4), 0 \right\} \quad (3)$$

其中, PL 表示有效负载, SF 表示扩频因子, IH 表示是否禁用报头 (IH=0 使能, IH=1 禁用), DE 表示是否开启低数据速率优化 (DE=1 开启, DE=0 禁用), CR 为编码率。

报头和有效负载空中传输时间由式 (4) 计算:

$$T_{\text{payload}} = n_{\text{payload}} \times T_S \quad (4)$$

则 LoRa 数据分组空中传输时间由式 (2) 和式 (4) 计算可得:

$$T_{\text{packet}} = T_{\text{preamble}} + T_{\text{payload}} \quad (5)$$

(3) LoRa 的优势分析

由上述技术特点可知 LoRa 融合了多种技术, 包括扩频技术、前向纠错编码技术和数字信号处理技术, 其优势体现在以下几个方面。

- 采用扩频通信, 可利用高扩频因子扩大链路预算提高覆盖范围。
- 超低功耗使电池寿命大于 10 年, 接收电流为 12 mA, 待机电流仅为 0.2 μA 。
- LoRa 的测距及定位不采用接收信号强度, 而基于信号在空中传输时间来定位, 准确度高。
- 工作在非授权的免费频段, 基础设施建设、终端节点成本低, 其产业链发展更加迅速, 商业化推广更快。由对比表 1 可知, 与 LoRa 竞争的 NB-IoT 为授权频段, 其基于移动蜂窝网可直接叠加部署于 GSM、UMTS、LTE 网络, 网络服务质量有保证, 但自 2016 年标准化公布后, 其商业化和产业链还需要较长时间去探索和发展。故本文研究基于 LoRa 技术组网方案。

4 基于无线 LoRa 的输电线路在线监测组网方案及适应性分析

无线 LoRa 的典型应用如图 4 所示, 由若干终

端采集底层数据, 通过 LoRa 射频技术和 LoRa 链路层技术将数据发送到网关节点, 再通过电力系统专网通道将网关节点汇聚的数据发送到网络服务器和应用程序端。LoRa 网络架构中包含了终端、网关/基站、网络服务器和应用服务器 4 个部分^[8]。网关和终端之间采用星形网络拓扑, 由于 LoRa 的长距离特性, 它们之间得以使用单跳传输, 为了数据可靠传输, 终端节点可以同时发给多个网关节点。

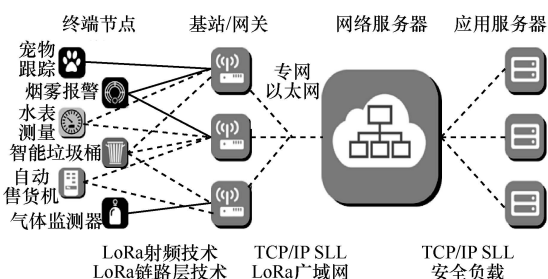


图 4 无线 LoRa 典型应用

基于上述典型应用, 将无线 LoRa 星形组网应用到输电线路在线监测场景中。如图 5 所示, 以一条 $\pm 800 \text{ kV}$ 的直流输电线路为例, 线路周边地貌为平原, 在每 10~15 km 输电线路跨段的铁塔上设置两个 LoRa 网关节点, 其线路跨段中间为成百上千个输电线路监测装置, 用以全方位实时监测线路运行的各项状态信息, 每个监测装置内含 1 个 LoRa 终端通信模块及电池 (监测装置电源可采用线上感应取电), 每个 LoRa 终端将监测装置采集到信息同时发送到邻近的两个 LoRa 网关节点, LoRa 网络服务器和应用服务器分别位于泛在电力物联网的网络层和平台层, 如此则构成 1 个 10~15 km 的 LoRa 现场通信网络, 通过电力系统专网 (如光传输网络、数据网络等) 将现场通信网络采集的信息回传至物联管理中心。LoRa 现场通信网络在输电线路在线监测场景下的适应性主要体现在以下 4 个方面。

(1) 据预测, 至 2020 年我国的输电线路总里程将达 159 万千米^[4]。未来泛在电力物联网战略下, 高压输电线路运行状态将大规模监测, 需要的终端数量将数亿个, 故采用终端间低成本的通信方式将大大降低

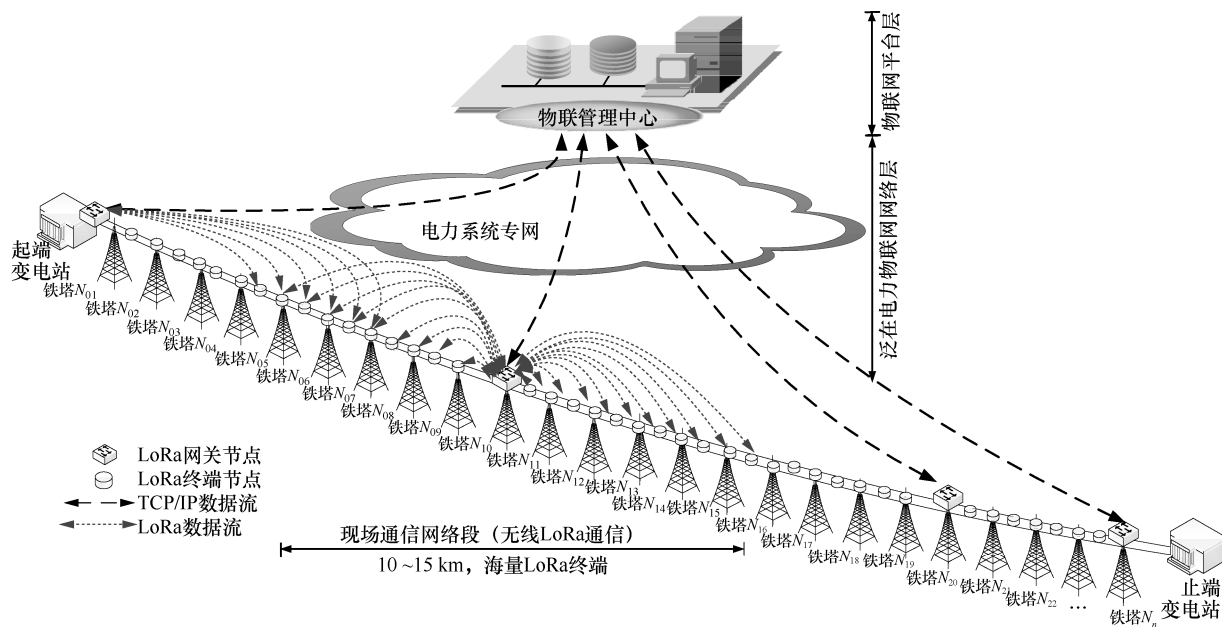


图5 基于无线 LoRa 的输电线路在线监测组网方案

应用成本, 而 LoRa 技术的高成熟度、广覆盖、低成本正好契合发展需要, 是该应用场景下的不二之选。

(2) 维护便利性方面, LoRa 通信的低功耗特性使得设备安装后可长时间持续运行, 大大降低了输电线路在线监测装置全寿命周期内的检修次数。

(3) LoRa 通信的数据传输速率与 ZigBee、Wi-Fi、蓝牙等相比较低, 但是输电线路在线监测的应用场合并没有大量数据传输, 仅上传温度、弧垂、电流、时间、位置等数据量不大的信息, 且采样周期在分钟级别, 故传输速率满足要求。

(4) 标准化的 LoRa 的链路层协议可同时支持“点到多点”和“多跳级联”两种拓扑结构, 与输电线路链路结构刚好吻合。

LoRa 技术在输电线路监测的应用仅仅是开端, 未来海量变电设备运行监测终端、变电站生产辅助系统监控终端、用电信息采集终端、配电自动化终端、分布式能源电站、汽车充电桩等应用大量普及后 LoRa 技术的优势将会愈发明显。

5 结束语

根据国家电网公司全业务泛在电力物联网总

体架构, 终端层作为物联网最基础的网络设施, 亟待解决研究和解决的问题很多。本文立足于输电线路在线监测应用场景, 提出基于无线 LoRa 技术的泛在电力物联网终端层现场通信解决方案, 该方案具有建设成本低、覆盖广、功耗低、维护便利等优点, 有较好的市场价值和推广价值。

参考文献:

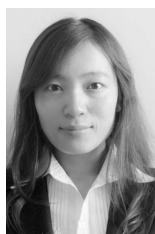
- [1] 何浩, 李勃. 探索物联网技术在电力设备状态检修中的合理使用[J]. 电子世界, 2019, 7(1): 33.
HE H, LI B. Exploring the rational use of internet of things technology in the condition maintenance of power equipment[J]. Electronic World, 2019, 7(1): 33.
- [2] 张云霞, 田烨. M2M 应用浅析[J]. 电信科学, 2009, 25(1): 4-8.
ZHANG Y X, TIAN Y. M2M application brief analysis[J]. Telecommunications Science, 2009, 25(1): 4-8.
- [3] 罗俊海, 肖志辉, 仲昌平. 信息物理系统的发展趋势分析[J]. 电信科学, 2012, 28(1): 127-132.
LUO J H, XIAO Z H, ZHONG C P. Analysis on development trends of cyber-physical system[J]. Telecommunications Science, 2012, 28(1): 127-132.
- [4] 国家电网公司信息通信部顶层设计组. 全业务泛在电力物联网 (SG-eIoT) 顶层设计总报告[R]. 2018.
Top-level Design Team of the Ministry of Information and Communication of the State Grid Corporation. Multi-service ubiquitous E internet of things (SG-eIoT) top-level design report[R]. 2018.
- [5] 张广新, 穆景龙, 马晖, 等. 输电线路交叉跨越距离在线监

- 测系统设计[J]. 现代电子技术, 2018, 24(41): 14-17.
- ZHANG G X, MU J L, MA H, et al. Design of cross-span distance online monitoring system for power transmission lines[J]. Modern Electronic Technology, 2018, 24(41): 14-17.
- [6] SHEN X, CAO M. Research and application of internet of things for high-voltage transmission line[C]//Proceedings of 2014 China International Conference on Electricity Distribution (CICED 2014). Beijing: China Electric Power Press, 2014: 23-26.
- [7] NECATI K, CAGTI G V. Analysis of low power wireless links in smart grid environments[J]. Computer Networks, 2013, 57(5): 1192-1203.
- [8] 赵静, 苏光添. LoRa 无线网络技术分析[J]. 移动通信, 2016, 40(21): 50-57.
- ZHAO J, SU G T. LoRa wireless network technology analysis[J]. Mobile Communication, 2016, 40(21): 50-57.

[作者简介]



刘伟 (1989-), 男, 中国电力工程顾问集团东北电力设计院工程师, 主要从事电力系统通信设计方面的工作。



张雁丽 (1989-), 女, 中国移动通信集团吉林有限公司信息技术中心工程师, 主要从事物联网系统运维方面的工作。



刘洁 (1980-), 女, 中国电力工程顾问集团东北电力设计院高级工程师、副总工程师, 主要从事电力系统通信设计方面的工作。



邢丽娟 (1987-), 女, 中国移动通信集团吉林有限公司信息技术中心工程师, 主要从事人工智能算法在电子渠道系统中的应用等方面的工作。