

四表集抄通信网络虚拟化方案及组网算法研究

胡致远^{*①} 宋晓凤^① 黄天聪^① 李晓娣^①
周瑞芳^① 徐鑫^② 蒙占宇^③ 彭强^④

^①(重庆大学通信工程学院 重庆 400044)

^②(国网重庆市电力公司电力科学研究院 重庆 401123)

^③(国网电科院深国电公司 深圳 518000)

^④(中国移动通信集团重庆有限公司 重庆 401121)

摘要: 为了实现四表(水, 电, 气, 热)集抄行业之间的业务数据隔离, 提升本地网络的稳定性和覆盖能力, 该文提出四表集抄通信网络虚拟化方案。该方案采用虚拟接入点名称(APN)技术以及软件定义网络(SDN)切片技术构成端到端隔离的业务数据采集通道; 采用微功率无线和低压电力线载波构成实时可靠的本地双模虚拟网络, 进一步提出基于全局链路状态和分层迭代的组网算法。仿真及现场验证结果表明, 该方案降低了采集数据的丢包率和传输时延, 提高业务支撑能力, 保障行业之间的业务数据隔离, 提升通信网络基础设施复用能力。

关键词: 网络虚拟化; 高级量测体系; 双模系统; 资源复用

中图分类号: TN915

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)03-0588-06

DOI: 10.11999/JEIT 180396

Research on Network Virtualization Scheme and Networking Algorithm of Advanced Metering Infrastructure for Water, Electricity, Gas, and Heat Meters

HU Zhiyuan^① SONG Xiaofeng^① HUANG Tiancong^① LI Xiaodi^①
ZHOU Ruifang^① XU Xin^② MENG Zhanyu^③ PENG Qiang^④

^①(College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

^②(State Grid Chongqing Electric Power Co., Electric Power Research Institute, Chongqing 401123, China)

^③(China Gridcom Co., Ltd, State Grid Electric Power Research Institute, Shenzhen 518000, China)

^④(China Mobile Communications Group Chongqing Co. LTD., Chongqing 400044, China)

Abstract: In order to achieve service data isolation in advanced metering Infrastructure for water, electricity, gas, and heat Meters and improve the stability and coverage of local data collection network, a network virtualization scheme of Advanced Metering Infrastructure (AMI) is proposed. In this scheme, the end-to-end isolated service data collection channels are constructed utilizing virtual Access Point Name (APN) and Software Defined Network (SDN) slice technology. The micro-power wireless and low-voltage power line carriers are used to constructed a real-time and reliable local dual mode virtual network. Furthermore, the networking algorithm based on global link-state and hierarchical iterative algorithm are proposed. The simulation and experiments show the packet loss rate and transmission delay of collected data are decreased utilizing the proposed scheme, and business support capability is improved. Moreover, the service data isolation is implemented in AMI for water, electricity, gas, and heat Meters and multiplexing ability of communication network infrastructure is improved.

Key words: Network virtualization; Advanced Metering Infrastructure (AMI); Dual-mode systems; Resource multiplexing

收稿日期: 2018-04-27; 改回日期: 2018-09-17; 网络出版: 2018-10-08

*通信作者: 胡致远 hzy@cqu.edu.cn

基金项目: 2018年重庆市技术创新与应用示范重大主题专项项目(cstc2018jszxcytzx0042), 核高基重大专项(2017ZX01030001)

Foundation Items: 2018 Chongqing Technology Innovation and Application Demonstration Major Theme Special Project (cstc2018jszxcytzx0042), The Core Electronic Devices, High-end Generic Chips and Basic Software Major Project (2017ZX01030001)

1 引言

高级量测体系(Advanced Metering Infrastructure, AMI)由测量、采集、传送、储存、分析和应用等功能组成^[1],推动了智慧城市建设。AMI在水、电、气、热4个行业的集中采集,形成了“四表集抄”。电力采集系统覆盖面广且功能完善,因此可以在共用电力信息基础设施上实现对水、电、气、热四表集中采集和管理^[2]。传统四表集抄方案通过升级用电信息采集系统中的主站和集中器,使其适配不同行业的采集业务网协议^[3]。在本地网络中,水、气、热计量表通过微功率无线连接至电表,再由电表采用电力线载波通信(Power Line Carrier, PLC)连接至集中器^[4-6],由集中器实现协议转换和数据汇聚;最后通过无线公网^[7](2G/3G/4G)或无线专网(LTE230, LTE1800)将数据路由至电力主站,实现四表集抄。

然而传统四表集抄方案存在以下问题:其一,电力主站统一采集四表数据,导致其他行业主站不能对自己的采集终端进行实时操控;其二,电力系统安全管理大区的划分限制了行业主站之间的数据互通;其三,本地采集网络采用异构级联方式,限制了本地通信网络覆盖和行业数据隔离能力。因此,

需构建端到端隔离的四表集抄通信网络。文献[8]提出一种基于网络切片的网络效用最大化虚拟资源分配算法,研究无线网络频谱资源分配。文献[9]提出一种面向电力无线专网的虚拟资源优化分配机制,实现配电业务的隔离。文献[10]针对PLC组网提出基于2层链路拓扑的PRIME算法,此算法适应多变的载波信道环境。文献[11]提出采用基于节点深度的AODVjr微功率无线路由算法,有效减少路由开销和降低网络能耗。文献[12]从网络能量优化的角度出发,提出基于分簇机制的Zigbee混合路由能量算法——CLZBR算法,该算法提出备用节点的概念,以保证网络的稳定性。以上研究尚未解决四表集抄端到端隔离的传输需求,且本地组网模式单一。故本文提出采用虚拟APN技术和SDN切片技术构成端到端隔离的传输通道,在共享电力信息基础设施上实现四表业务独立采集。进一步提出基于PLC和微功率无线的双模本地网络混合组网算法,提高本地网络的稳定性和覆盖能力。

2 四表集抄通信网络虚拟化方案

四表集抄通信网络虚拟化方案物理架构和逻辑架构如图1(a)和图1(b)所示。

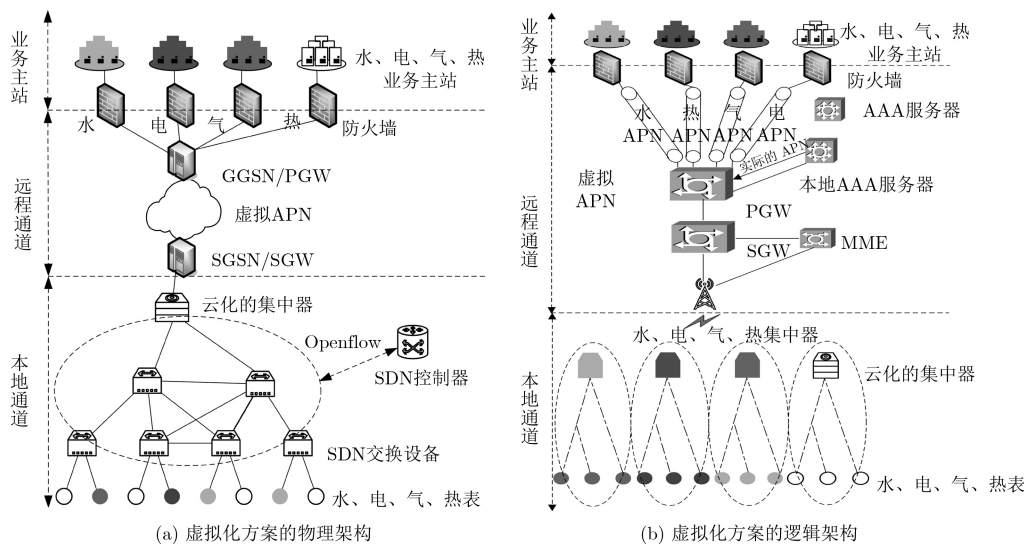


图1 四表集抄虚拟化方案架构

四表集抄业务覆盖面广,通信流量少,远程传输共享一个物理APN通道,通过配置出4个虚拟APN通道分别对接水、电、气、热业务主站,实现各业务主站对采集终端的直接采集与控制。本地网络采用PLC与微功率无线的双模通信方式构成多介质紧耦合条件下的SDN切片技术^[13],将四表集抄的本地混合物理网络切分为4个并行、独立的切片,通过OpenFlow协议的匹配字段将网络中不同

用户、不同业务进行调度,灵活地定义切片网络策略。另外采用云化技术^[14]将集中器云化成4个不同行业的虚拟集中器,4个虚拟集中器分别对接4个上行虚拟APN通道和下行SDN虚拟网络,实现采集传输通道端到端的隔离。

3 本地双模通信网络及组网算法

综合考虑覆盖率、建设成本、工程复杂度、通

信实时性和可靠性等,四表集抄本地网络采用低压电力线载波和微功率无线紧耦合的双模通信方式,本地网络双模通信的混合物理拓扑抽象为有权图 $G(V(G), E(G))$, 如图2所示。其中 $V(G)$ 为图 G 的节点集合, 元素 $v \in V$ 为图 G 的节点或中心节点; $E(G)$ 为图 G 的边集合, 元素 $e_{ij}, e_{ij}' \in E$ 为图 G 中节点之间的边。其中实线表示低压电力线载波方式, 虚线表示微功率无线方式。本文基于双模通信方式设计了两种混合组网算法, 即全局链路状态算法和分级迭代算法, 结合SDN技术为4个不同行业构建4张逻辑独立的本地虚拟网络的2层链路拓扑, 实现本地网络的切片组网。

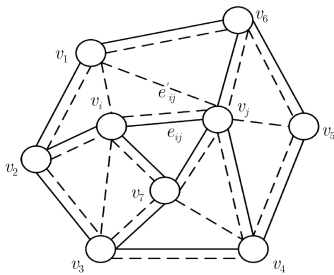


图2 混合网络拓扑的物理拓扑

3.1 全局链路状态算法

全局链路状态算法已知物理拓扑的全部信息, 物理拓扑模型参照图2。微功率无线通信方式的网络拓扑图为 $G_1(V_1, E_1)$, 对应的加权邻接矩阵为 $W_1 = (\partial_1, \partial_2, \dots, \partial_n)$; 低压电力线载波通信方式的网络拓扑图为 $G_2(V_2, E_2)$, 对应的加权邻接矩阵为 $W_2 = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ 。混合网络拓扑图为 $G_3(V_3, E_3)$, 对应的邻接矩阵为 W_3 如式(1)

$$W_3 = (\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n) \\ = (f(\partial_1, \omega_1), f(\partial_2, \omega_2), \dots, f(\partial_n, \omega_n)) \quad (1)$$

式中, $\gamma_i = f(\partial_i, \omega_i)$ 表示混合拓扑中节点之间存在的两条链路代价函数, $f(\partial_i, \omega_i)$ 可以有以下几种取值

$$f(\partial_i, \omega_i) = \alpha\partial_i + \beta\omega_i \quad (2)$$

$$f(\partial_i, \omega_i) = \max \text{ 或 } \min(\alpha\partial_i, \beta\omega_i) \quad (3)$$

$$f(\partial_i, \omega_i) = \alpha\partial_i \oplus \beta\omega_i \quad (4)$$

其中, 式(2)表示取两种通信方式的链路代价之和; 式(3)表示取两种通信方式的链路代价最大或最小; 式(4)表示当两种通信方式的链路代价都不好、或都好时同时使用, 其他情况则使用其一种。 (α, β) 分别为微功率无线方式、低压电力线方式在混合拓扑中的链路代价因子, 且 $(\alpha, \beta) \in [0, 1]$ 。

最优路径原则^[15]:

(1) 基于最小跳数的单目标模型: 模型的计算

复杂度最低, 只考虑源节点与目的节点之间的最小跳数。简化该模型, 将 e_{ij} 简化为1。对于路径 $P = (v_1, v_2, \dots, v_d)$, 优化函数表达式如式(5)所示

$$f(P(v_1, v_d)) = \min \sum_{i=1}^d e_{ij} \quad (5)$$

(2) 基于层次深度和信号强度的综合模型: 考虑网络通信效率、通信质量和通信成功率等因素, 定义节点之间的优化函数值如式(6)所示

$$e_{ij} = S_{ij} \times \eta_{ij}^l \quad (6)$$

式中, S_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间物理信号强度的特征值; l 为源节点所属层次; η_{ij} 为层间点对点通信成功率指数, $\eta_{ij} \in [0, 1]$ 。对于路径 $P = (v_1, v_2, \dots, v_d)$, 综合优化的函数表达式如式(7)所示

$$f(P(v_1, v_d)) = \max \sum_{i=1}^d e_{ij} \quad (7)$$

(3) 基于时延和误码率的多目标优化模型: 计算复杂度最高, 考虑网络传输中数据包的时延和误码率等因素, 定义元素 $e \in E$ 具有一组有序数列 (w^d, w^l) 作为属性。其中 w^d 为时延因素, 可加性度量; w^l 为误码率因素, 可乘性度量。对于路径 $P = (v_1, v_2, \dots, v_d)$, 时延和误码率如式(8)和式(9)所示

$$w^d(P) = \sum_{i=1}^{d-1} w_{i,i+1}^d \quad (8)$$

$$w^l(P) = 1 - \prod_{i=1}^{d-1} (1 - w_{i,i+1}^l) \quad (9)$$

对于某类服务 s , 路径 $P = (v_1, v_2, \dots, v_d)$ 上多目标优化函数表达式如式(10)所示, 表示该路径对于服务 s 的QoS值, 该函数值越大, 其QoS值越大。其中 $d_{\max}$ 表示服务 s 允许的最大时延; γ_s^d 和 γ_s^l 分别表示时延和误码率在函数表达式中的权重。

$$f(P_s(v_1, v_d)) = \max \sum_{i=1}^{d-1} [\gamma_s^d (d_{\max} - w^d(P_s)) \\ + \gamma_s^l (1 - w^l(P_s))] \quad (10)$$

全局链路状态算法步骤:

(1) 以集中器为根节点向微功率无线和低压电力线载波网络同时发起组网命令, 通过洪泛法最终根节点得到全局链路状态信息库;

(2) 根据链路代价函数 $f(\partial_i, \omega_i)$, 根节点将全局链路状态信息库的两个链路状态连通图叠加, 得到混合网络连通图;

(3) 各行业分别根据最优路径原则的组网优化目标之一为原则, 裁剪出4张逻辑独立的虚拟网络;

(4)获得4张以集中器为根的全局最优生成树，下发转发表。

3.2 分级迭代算法

分级迭代算法是已知邻居物理拓扑信息，物理拓扑模型参照图2，该算法是宽度优先，每一级的节点作为下一级节点的父节点逐级生长。每条链路的通信质量用 Q 表示， Q 基于层次深度和信号强度的综合模型的表示如式(11)所示，其中 R 为节点之间信号强度表征值， l 为信息源点的层次， η 为层间点对点通信成功率指数， $\eta \in [0, 1]$ ，可以根据实际测试统计取值。

$$Q = R \times \eta^l \quad (11)$$

其中， R 的取值为0或1，在微功率无线方式下(参考470 kHz频段)，小于等于-114 dBm， R 取0，反之取1；在PLC方式下(参考深国电公司的SG5000芯片)，小于等于-103 dBm， R 取0，反之取1。

$$Q_3 = \alpha Q_1 + \beta Q_2 \quad (12)$$

父节点用 X 表示，以 X 为根的生长子节点用 Y 表示， X 与 Y 之间的双模链路通信质量用 Q_3 表示，如式(12)，其中 Q_1 表示微功率无线， Q_2 表示低压电力线， α, β 分别为微功率无线方式、低压电力线方式在混合拓扑中的链路代价因子，且 $\alpha, \beta \in [0, 1]$ ，整体拓扑图如图3所示。

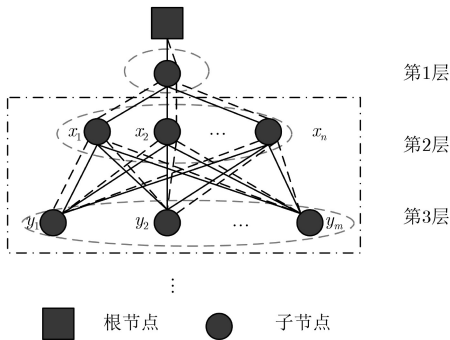


图3 混合网络的分级迭代结构

最大匹配原则^[16]：逐层匹配过程中，父节点和子节点的关系可以看作是二分图，如图3的虚方框。用二分图的最大匹配进行求解，使得 X 与 Y 之间总的链路通信质量 $S(Q)$ 最优，如式(13)，其中 Q_{ij} 表示父节点 x_i 与子节点 y_j 间的通信质量。考虑到实际链路的信道资源和节点的处理能力，每个节点可以生长的下一级节点的数量有限，假设最大均为 N ，即式(14)；每个子节点只能与一个父节点相连，即式(15)

$$S(Q) = \max \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m Q_{ij} \quad (13)$$

$$\forall d(x_i) \leq N \quad (14)$$

$$\forall d(y_i) = 1 \quad (15)$$

分级迭代算法步骤：

设定通信质量阈值为 $\varphi, \varphi \in (0, 1]$ ，通信响应时间为 T (T 取根节点与任意子节点完成一次通信时间的最大值，根据协议和实验 T 取0.03~2 s较为合理)。

(1)根节点发起初始化组网，未入网节点收到组网命令后，在满足预设通信质量阈值 φ 和响应时间 T 的条件下，父节点选择通信质量 Q 最大的 N 个子节点给予入网，不足 N 个节点的按实际数量入网；

(2)第1层节点成功入网后，判断是否所有节点全部入网。若全部入网，则组网完成。若未实现节点全部入网，则已入网节点发起组网命令，未入网节点在满足预设通信质量阈值 φ 和响应时间 T 的条件下，根据 $S(Q)$ 最大匹配原则给予入网。直至所有节点成功入网，得出4张逻辑独立的虚拟网络。

4 仿真与验证

4.1 2层链路算法的仿真实验

本文采用MATLAB仿真平台验证本地混合组网算法的性能，并与CLZBR算法和PRIME算法对比，仿真拓扑图参照图2，节点间虚实线上的数值取1~10的随机数，表示统一量化的链路代价。分级迭代算法中以通信质量为决策量，为方便对比相同拓扑下两种算法的性能，选择以节点之间链路代价的倒数为基数， φ 取0.4， T 取2 s。

在45 s时通过增加噪声干扰降低网络中部分通信链路质量，网络拓扑变化，本文的全局链路状态算法和分级迭代算法的平均丢包率比CLZBR算法和PRIME算法降低了1.8%，如图4所示。平均传输时延比CLZBR算法和PRIME算法减少20 ms，如图5所示。CLZBR算法和PRIME算法中路径唯一，需要重新寻路和局部恢复，导致在45 s时丢包率剧增，而本文提出的算法是基于双模方式，具有双通道，能有效抵御各种外界影响。其中图6为不同节点数时，全局链路状态算法和分级迭代算法的组网

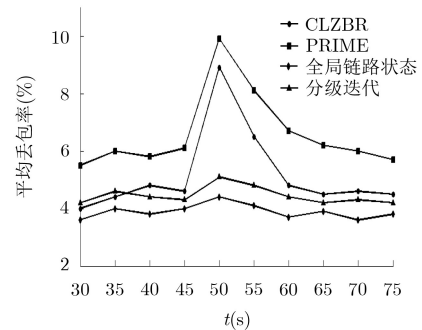


图4 平均丢包率性能比较

耗时情况(ΔT 为组网耗时归一化的计算时隙), 各个组网算法耗时与节点数量均呈指数关系。

在组网耗时上, 全局链路状态算法大于分级迭代算法。这由于全局链路状态算法保证全局路径最优, 但是算法耗时大, 其算法复杂度为 $O(N_V^2)$; 分级迭代是逐级最优, 可以快速组网, 其算法复杂度为 $O(N_V N_M)$ 。虚拟化方案下增加4倍节点, 计算复杂度是线性增加, 时间只增加4倍; 而非虚拟化方案, 增加4倍节点, 其复杂度是增加 4^2 。这是由于虚拟化方案分别组4张虚拟网络, 每张虚拟网络的节点变少, 所以组网耗时明显减少。

在分级迭代算法中, 我们对比分析了 φ 取0.2, 0.4, 0.6, T 取2 s的网络性能, 结果证明 φ 的取值越低, 组网层级越低, 组网时间越短, 通信性能越高。

4.2 现场测试

(1)虚拟网络配置: 采用华为UGW9811PGW配置不同行业集中器的虚拟APN, 如表1所示, 进一步按照FlowVisor机制配置flowspace, 实现4个虚拟网络切片。测试号码为1398384xxxx, IMSI为

表1 虚拟APN的配置表

业务类型	PGW地址(APN)	主站网关地址(APN)	VPN隧道地址(核心网侧)	VPN隧道地址(业务主站侧)	业务网络地址池
电力(APN1)	183.230.99.2	183.230.135.2	10.10.10.241/28	10.10.10.242/28	10.0.130.0/24
水务(APN2)		183.230.135.3	10.10.10.243/28	10.10.10.244/28	10.0.131.0/24
燃气(APN3)		183.230.135.4	10.10.10.245/28	10.10.10.246/28	10.0.132.0/24

460005491343568, IMEI为866051027266310。

(2)虚拟网络测试: 采用ping命令验证虚拟APN通道隔离性, 采用2层广播报文验证本地虚拟网络隔离性, 结果显示能实现完全隔离。由水、电、气主站分别发送采集命令, 采用轮询方式抄表, 平均每只表的抄表时间为1.25 s, 一次抄表的抄表成功率大于等于98%。现场验证结果表明本文提出的共享电力通信资源的虚拟网络方案实现了从远程通道到现场网络的端到端隔离, 也保障了多表集抄的抄表成功率。

5 结束语

本文提出了共享电力基础设施实现四表业务独立采集的四表集抄通信网络虚拟化方案, 采用虚拟APN技术通过云化的集中器与SDN切片技术对接, 形成端到端隔离的采集通道, 解决了不同行业之间的业务数据隔离和实时性控制问题。本文重点研究本地网络的虚拟化, 首先将不同通信介质的物理通道耦合成物理网, 并采用SDN将该物理网切分为逻辑独立的虚拟网络, 该虚拟网络可以根据不同

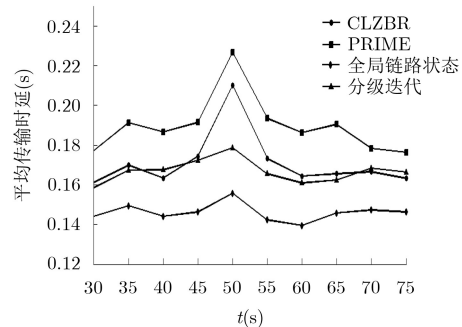


图5 平均传输时延性能比较图

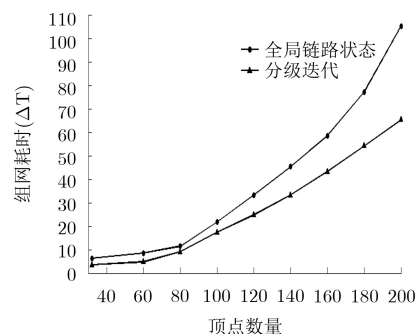


图6 混合组网算法的组网耗时对比

通信流量、QoS要求等实现不同行业的区分服务。现场实验结果证明了本方案的可行性。

参考文献

- [1] ZHOU Jiazhen, HU Qingyang, and QIAN Yi. Scalable distributed communication architectures to support advanced metering infrastructure in smart grid[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2012, 23(9): 1632–1642. doi: [10.1109/TPDS.2012.53](#).
- [2] 胡江溢, 祝恩国, 杜新纲. 用电信息采集系统应用现状及发展趋势[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(2): 131–135. doi: [10.7500/AEPS20130617005](#).
HU Jiangyi, ZHU Enguo, and DU Xingang. Application status and development trend of power consumption information collection system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(2): 131–135. doi: [10.7500/AEPS20130617005](#).
- [3] 华隽. 四表合一采集实现原理及未来发展形势研究[J]. *电力与能源*, 2016, 37(4): 445–447. doi: [10.11973/dlyny201604009](#).
HUA Juan. “Four-Meter Unified” collection principle and its future development[J]. *Power and Energy*, 2016, 37(4): 445–447. doi: [10.11973/dlyny201604009](#).

- [4] 谭周文, 刘宏立, 詹杰, 等. 电力线通信中的基于峰值估计和反馈补偿的自适应噪声抑制[J]. 通信学报, 2017, 38(12): 86–97. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2017283](#).
TAN Zhouwen, LIU Hongli, ZHAN Jie, *et al.* Adaptive noise mitigation based on peak estimate and feedback compensation in power line communication[J]. *Journal on Communications*, 2017, 38(12): 86–97. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2017283](#).
- [5] CHEN Xiang, WU Runze, and CAO Min. Research of OFDM power line carrier communication based on AMI[C]. IET International Communication Conference on Wireless Mobile and Computing. Shanghai, China, 2011, 278–281. doi: [10.1049/cp.2011.0891](#).
- [6] WANG Hong. A micro-power wireless communication method and device for local detection and control[C]. International Conference on Internet Technology and Applications, Wuhan, China, 2010, 1–3. doi: [10.1109/ITAPP.2010.5566273](#).
- [7] AMINU B, MURTAL A, and FALAH A. Design and performance analysis of uplinkSchedulers for smart metering over LTE[C]. 2017 IEEE Sensors, Glasgow, UK, 2017: 1–3. doi: [10.1109/ICSENS.2017.8233890](#).
- [8] 唐伦, 张亚, 梁荣, 等. 基于网络切片的网络效用最大化虚拟资源分配算法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(8): 1812–1818. doi: [10.11999/JEIT161322](#).
TANG Lun, ZHANG Ya, LIANG Rong, *et al.* Virtual resource allocation algorithm for network utility maximization based on network slicing[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(8): 1812–1818. doi: [10.11999/JEIT161322](#).
- [9] 孟洛明, 孙康, 韦磊, 等. 一种面向电力无线专网的虚拟资源优化分配机制[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(7): 1711–1718. doi: [10.11999/JEIT161043](#).
MENG Luoming, SUN Kang, WEI Lei, *et al.* Optimal resource allocation mechanism for electric power wireless virtual networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(7): 1711–1718. doi: [10.11999/JEIT161043](#).
- [10] ARUZUAGA A, BERGANZA I, SENDIN A, *et al.* PRIME interoperability tests and results from field[C]. IEEE International Conference on Smart Grid Communications, Gaithersburg, USA, 2010: 126–130. doi: [10.1109/SMARTGRID.2010.5622029](#).
- [11] BAI Leqiang, LIU Yi, QIAN Shiguang, *et al.* Improved AODVjr routing algorithm based on node depth in ZigBee network[C]. International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, Changsha, China 2016: 2042–2047. doi: [10.1109/FSKD.2016.7603495](#).
- [12] 钱志虹, 朱爽, 王雪. 基于分簇机制的Zigbee混合路由能量优化算法[J]. 计算机学报, 2013, 36(3): 485–493. doi: [10.3724/SP.J.1016.2013.00485](#).
QIAN Zhihong, ZHU Shuang, and WANG Xue. An cluster-based ZigBee routing algorithm for network energy optimization[J]. *Journal of Computer Science*, 2013, 36(3): 485–493. doi: [10.3724/SP.J.1016.2013.00485](#).
- [13] 刘江, 黄韬, 张晨, 等. An cluster-based ZigBee routing algorithm for network energy optimization[J]. 通信学报, 2016, 37(4): 159–171. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2016083](#).
LIU Jiang, HUANG Tao, ZHANG Chen, *et al.* Research on network virtualization slicing mechanism in SDN-based testbeds[J]. *Journal on Communications*, 2016, 37(4): 159–171. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2016083](#).
- [14] RAJESH N, XU Ke, WANG K C, *et al.* An information infrastructure framework for smart grids leveraging SDN and cloud[C]. Clemson University Power Systems Conference(PSC), Clemson, USA, 2016: 1–7. doi: [10.1109/PSC.2016.7462876](#).
- [15] WANG Yamin, LI Xiaoping, and RUIZ R. An exact algorithm for the shortest path problem with position-based learning effects[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2017, 47(11): 3037–3049. doi: [10.1109/TSMC.2016.2560418](#).
- [16] 谢志远, 吴晓燕, 杨星, 等. 10kV电力线载波通信自动组网算法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(16): 88–92. doi: [10.3969/j.issn.1000-1026.2012.16.016](#).
XIE Zhiyuan, WU Xiaoyan, YANG Xing, *et al.* Automatically dynamic routing algorithm for 10kV power-line carrier communication[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2012, 36(16): 88–92. doi: [10.3969/j.issn.1000-1026.2012.16.016](#).

胡致远: 男, 1965年出生, 博士后, 教授, 主要研究方向为智能电网、无线接入网。

宋晓凤: 女, 1995年出生, 硕士生, 研究方向为智能电网、工业互联网。

黄天聪: 1971年出生, 博士, 副教授, 主要研究方向为智能电网通信网络。