



智能电网中基于平衡树的无线 Mesh 接入网络路由算法

赵彦平¹, 唐国琦², 李 良³, 全明睿¹

(1.国网山西省电力公司检修分公司, 山西 太原 030032; 2.北京邮电大学, 北京 100876;

3.北京智芯微电子科技有限公司, 北京 100192)

摘要:在智能电网(smart grid, SG)接入层的无线 Mesh 网络(wireless mesh networks, WMNs)应用中,针对数据流过度地集中在关键节点而导致数据拥塞问题发生,提出一种基于平衡树的无线 Mesh 网络路由算法。在传统 AODV(ad hoc on-demand distance vector routing)算法的基础上,使用平衡树模型,综合考虑节点剩余容量和转发数据所需的路由跳数建立路由判据模型,合理地选择下一跳中继节点,均衡节点数据流。路由算法仿真采用 OPNET 平台实现,就网络的吞吐量、通信时延以及网络丢包率 3 个重要方面,对所提的路由算法与传统 AODV 算法的性能进行了对比分析。仿真结果表明,提出的算法能够有效地解决无线 Mesh 网络中的数据拥塞问题,相比于传统 AODV 算法能明显提高网络吞吐量,减小网络通信时延和丢包率,进而提高网络整体的可靠性。

关键词:智能电网;无线 Mesh 网络;数据拥塞;平衡树模型;路由算法

中图分类号:TP393

文献标志码:A

文章编号:1673-825X(2018)02-0178-06

Balanced tree based routing algorithm for wireless Mesh access network in smart grid

ZHAO Yanping¹, TANG Guoqi², LI Liang³, QUAN Mingrui¹

(1.Smart Grid Shanxi Electronic Power Company, Taiyuan, 030032, P.R.China;

2.Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, P.R.China;

3.Beijing Smart chip Microelectronics Technology Company Limited, Beijing, 100192, P.R.China)

Abstract: Aiming at the data congestion of nodes caused by over-centralized data flow in the WMNs(wireless mesh networks) applied in the access layer of smart grid, a balanced tree based WMNs routing algorithm is proposed in this paper. Based on the traditional AODV(ad hoc on-demand distance vector routing) algorithm, using balanced tree model, the proposed algorithm considers the residual capacity of nodes and the hop count required for forwarding data to establish the routing criterion model, and then selects the relay node more reasonably and balances the data flow of nodes. The routing algorithm is simulated using OPNET platform, and the network routing algorithm proposed in our paper is compared with the traditional AODV algorithm in terms of network throughput, communication delay and packet loss rate. Result shows that the proposed algorithm can effectively solve the problem of data congestion, reduce the communication delay and packet loss rate, and enhance the reliability and throughput of the WMNs in smart grid.

Keywords: smart grid; wireless mesh networks; data congestion; balanced tree model; routing algorithm

0 引言

智能电网的发展为智慧城市的建设创造了必要

的基础条件,是智慧城市建设不可或缺的重要组成部分,同时是电力产业发展的必然趋势^[1]。近年来,由于现有电网中的业务种类繁多,且不同的业务

对网络性能有不同的要求^[2],无线 Mesh 网络在智能电网的发展中得到了广泛的应用,它可以将多种不同类型的无线网络集中在一起进行统一管理,为智能电网中不同的业务类型提供多种不同的无线通信服务。无线 Mesh 网络同时具有 WLAN(wireless local area networks)和 Ad hoc 二者的优势,支持多点对多点的网状通信模式^[3],具有电磁辐射小、多跳、自组织、自平衡、分布式控制等优点,是一种传输速率高、网络容量大和覆盖范围广的无线网络,它的出现为解决智能电网“最后一公里”接入问题提供了新的思路^[4],因此,如何更有效地利用无线 Mesh 网络成为发展智能电网的当务之急。

针对上述问题,研究者对无线 Mesh 网络作出了深入的研究,在路由算法方面,针对当前智能电网中存在的大量智能组件,M. S. Kemal 等^[5]提出了 MTFW(maximum traffic flow weight)算法^[5],用以解决 Mesh 网络在智能电网中网关数据的收集问题。文献[6]提出了一种直线路由算法,使用接近于直线的路径向源节点和出口网关发送简要报文,为 Mesh 骨干网络提供了一个实用的解决方案。文献[7]深入研究了 GPSR(greedy perimeter stateless routing)和 RPL(routing protocol for low power and lossy networks)路由算法在智能电网无线 Mesh 领域网中的应用特性,证明了这 2 种路由算法是无线 Mesh 领域网络中最合适的路由算法。文献[8]基于传统的 AODV(ad hoc on-demand distance vector routing)路由算法设计了一种 AODV-UU(AODV-uppsala university)路由算法,并将该算法应用到智能电网的监管系统中,结果表明,该算法可以有效地提高系统的吞吐量,降低网络的通信时延。文献[9]基于链路质量和负载感知提出了一种预期路径带宽路由度量模型 EPBW(expected path bandwidth),实验结果表明基于该度量模型的路由算法可以大大提高无线 Mesh 网络的性能。文献[10]提出了一种改进的、基于路径稳定性的路由算法 RS-MAODV(multicast AODV base on path stability),利用链路间的相关性,选择最稳定的链路进行数据传输,数据结果表明,该算法可以有效降低系统的丢包率和通信时延。

以上算法虽然可以一定程度提高网络性能,但在无线 Mesh 网络中,当节点的数据缓存队列过长时,以上算法均不能根据实际情况均衡节点的数据流,最终将导致节点数据拥塞,致使系统丢包率和传输时延上升^[11]。针对上述问题,本文使用平衡树模型,综合考虑节点剩余容量和数据转发所需跳数建

立路由判据模型,提出了一种基于平衡树的无线 Mesh 网络路由算法 AODV-BT(AODA-balance tree),仿真结果表明,AODV-BT 算法能有效地解决智能电网中存在的数据拥塞问题,提高 Mesh 网络的吞吐量和可靠性,降低系统的通信时延和丢包率,有效提高网络的整体性能。

1 系统结构

1.1 智能电网中的无线 Mesh 网络结构

无线 Mesh 网络在智能电网中的网络拓扑如图 1 所示。该网络结构采用典型的混合 Mesh 网络结构^[12],每个 Mesh 用户终端除了要传输自己的数据之外,还要为其他节点提供路由功能。无线 Mesh 网络在智能电网中的主要功能是为电网中的实时监控系统和控制系统提供无线接入服务。由于不同的无线 Mesh 用户终端会分布在不同的地理位置,智能电网中的无线 Mesh 网络结构通常分为 2 层:第 1 层是 Mesh 骨干网,由 Mesh 主网关构成,其主要功能是将 Mesh 子网关收集的数据进行汇聚并上传至核心网络;第 2 层是 Mesh 接入网,由 Mesh 子网关和 Mesh 用户终端构成。Mesh 子网关主要提供无线网关和路由功能,即收集 Mesh 用户的数据并将数据上传给 Mesh 主网关,同时作为路由器为 Mesh 用户提供数据转发和路由功能。Mesh 用户终端的功能主要是作为主机和路由器。作为主机,负责采集并上传用户信息数据;作为路由器运行路由发现、路由维护等基本的路由协议,为其他用户提供路由和数据转发服务。

无线 Mesh 网络实现了 Mesh 用户之间的互联,同时使所有 Mesh 用户可以共享核心网络的资源。在上述的 Mesh 网络结构中,由于接入层有大量的用户,需要传输大量数据,使其成为整个网络结构的核心。在 Mesh 网络中,距离 Mesh 子网关较远的用户节点需要以多跳的方式将数据传至 Mesh 子网关,因此,靠近网关的用户终端需要转发数据会相对较多,容易使该用户终端的数据缓存队列排队等待时间过长,进而会造成网络数据拥塞,影响系统的吞吐量、时延和可靠性。所以,深入研究和分析接入网的特点和性能是解决无线 Mesh 网络问题的第一步。

1.2 智能电网接入层无线 Mesh 网络建模

为了更好地分析接入网的网络结构特点以及其中可能存在的问题和风险,本文建立了接入网的网络模型,如图 2 所示。

无线 Mesh 接入子网的网络拓扑由至少一个 Mesh 子网关(sub mesh gateway, SMG)和多个 Mesh

用户终端构成。为了保证任意的 Mesh 用户终端都可以将自己的数据上传至子网关,本文假设,每个 Mesh 用户到网络中子网关的距离小于 h_{max} , h_{max} 表示在 Mesh 子网关有效通信范围内,距离其最远的 Mesh 用户终端到该子网关的跳数。则在图 2 中 n 需满足 $n \leq h_{max}$, 以确保第 n 层用户节点可以将数据传至 Mesh 子网关。此外,根据 Mesh 用户终端到 Mesh 子网关的最小跳数,对接入网进行分层:①与 Mesh 子网直接相邻的 Mesh 用户终端即到 Mesh 子

网关最小跳数为 1 的用户终端为第 1 层;②与第 1 层用户终端直接相邻且到 Mesh 子网关最小跳数为 2 的 Mesh 用户为第 2 层。以此类推,定义第 n 层节点与第 $n-1$ 层节点直接相邻且到 Mesh 子网关的最小跳数为 n 。这样,以 Mesh 子网关为中心,以到 Mesh 子网关最小跳数为半径,建立一个多层次的智能电网接入层网络模型,并假设第 1 层节点可以和 Mesh 子网关进行直接通信,而第 i 层 ($i \geq 2$) 的节点只能通过其之前的节点将数据转发至 Mesh 子网关。

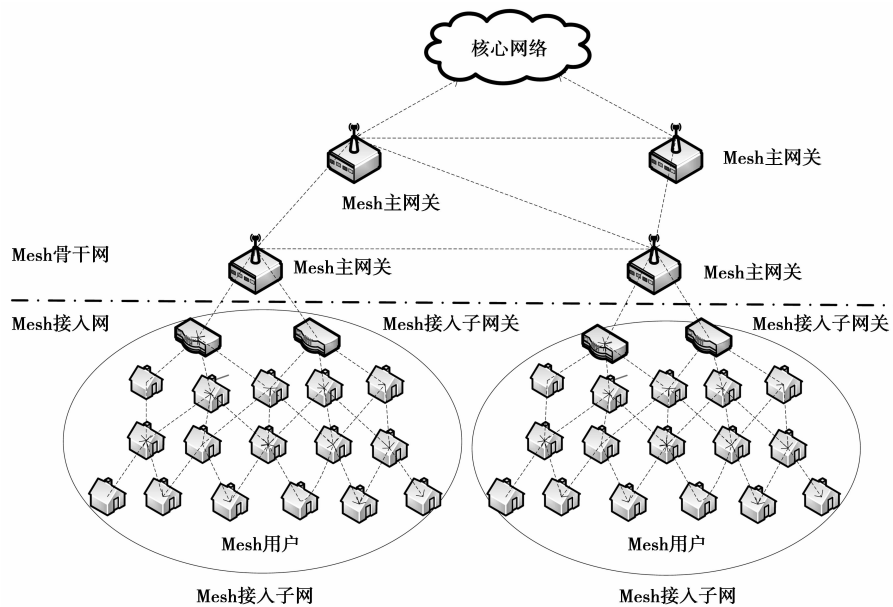


图 1 无线 Mesh 网络在智能电网中的结构

Fig.1 Wireless mesh network in smart grid

本文将接入网的结构表示为 (N, L) , 其中, N 表示所有 Mesh 终端所组成的集合, L 表示所有可用链路组成的集合, 则对于任意节点 $u, v \in N$, (u, v) 表示从节点 u 到节点 v 的所有链路。接入网络模型如图 2 所示。图 2 中, 当第 3 层的节点 i, j, k 到第 2 层节点的链路分别为 (i, v) , (j, v) 和 (k, v) , 即节点 i, j, k 均选择第 2 层的 v 节点作为他们的转发节点时, 便将节点 v 看作是关键字节点, 而随着 v 节点转发的数据包不断增多, 其缓存队列会不断增加, 当其剩余的数据缓存队列长度为 0 时, 就称该节点为拥塞节点。当节点 v 变成拥塞节点后, 节点 i, j, k 的数据缓存队列便会迅速增加, 进而成为新的拥塞节点, 以此类推, 第 4 层中以 i, j, k 为下一跳的节点也会成为新的拥塞节点, 即这种拥塞现象会反向传播, 最终导致整个网络的吞吐量下降、通信时延和丢包率增加。而且, 越靠近 Mesh 子网关的通信节点由于其转发的数据量多, 越容易成为拥塞节点, 导致网络数据拥塞。

同时, 由于每个 Mesh 用户终端都可以为其他用户转发数据, 任何一个终端都有可能成为拥塞节点。因此, 根据电力数据传输特点设计适合无线 Mesh 网络的路由算法是有效利用 Mesh 网络解决智能电网“最后一公里”接入问题的关键。

2 基于平衡树的无线 Mesh 网络数据转发机制

针对智能电网无线 Mesh 网络中由于数据流过度集中造成的网络数据拥塞问题, 本文在传统 AODV 路由算法的基础上, 引入平衡树模型, 综合考虑节点剩余容量和转发数据所需跳数作为主要路由判据, 提出了一种基于平衡树的无线 Mesh 网络路由算法 AODV-BT, 通过分析节点的剩余容量, 平衡智能电网中各节点之间的流量, 减少了关键字节点的数据流负载, 有效地解决网络数据拥塞的问题, 提高了网络吞吐量, 降低了网络时延和丢包率。

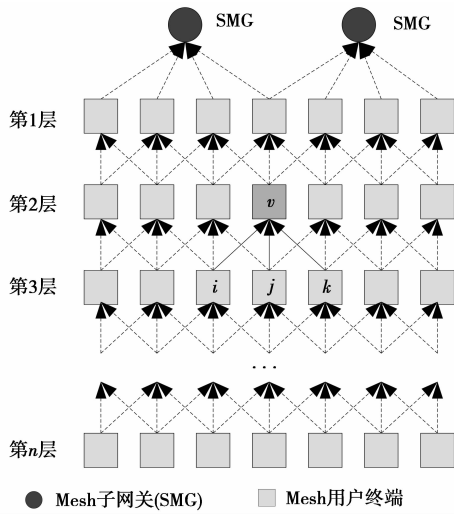


图 2 接入层网络模型

Fig.2 Access network model

2.1 AODV 路由算法

AODV 是一种反应式路由协议,其路由发现和路由保持过程不需要记录节点每一跳的详细路由信息^[13]。AODV 路由算法以跳数作为度量值,设任意 2 个 Mesh 用户终端之间的权重为 W ,相邻 2 个终端之间的权重为 1,则任意 2 个节点 u, v 之间的权重可表示为

$$W(u, v) = HOP(u, v) = \begin{cases} 1, & \text{节点 } u \text{ 和节点 } v \text{ 相连} \\ \infty, & \text{节点 } u \text{ 和节点 } v \text{ 不相连} \end{cases} \quad (1)$$

从源节点 S 到目的节点 D 的最优路由定义为转发数据通过最少跳数的路径。因此,在 AODV 路由协议中任意 2 节点间的路由判据 M 定义为

$$M(S, D) = \min \sum_{u \rightarrow v}^{S \rightarrow D} HOP(u, v) \quad (2)$$

2.2 基于平衡树的路由判据模型

平衡树原指在一棵树中,任意节点的左右子树的高度差不超过 1。本文将该思想扩展为在通信网络中相同层级的任意节点到根节点的路径权重应该相近或相等。

定义节点剩余容量为节点可以用来存储和转发的数据容量。假设任意节点 v 的数据缓存队列总容量为 C_v ,在某一时刻 t 已经被占用的容量为 $U_v(t)$,则该节点在 t 时刻的节点剩余容量 $A_i(t)$ 可表示为

$$A_v(t) = \begin{cases} C_v - U_v(t), & U_v(t) < C_v \\ 0.01, & U_v(t) = C_v \end{cases} \quad (3)$$

综合考虑数据转发所需跳数 (HOP) 和节点剩余容量 (A) 作为路由判据,计算 2 个节点之间的权重 ω 为

$$\omega(u, v) = \alpha/A_v(t) + (1 - \alpha)HOP(u, v) \quad (4)$$

(4) 式中, α 表示相应因素在权重中的比重,取值为 0 到 1。由 (3) 式和 (4) 式得到任意 2 节点间的路由判据 M 为

$$M(S, D) = \min \sum_{u \rightarrow v}^{S \rightarrow D} \omega(u, v) \quad (5)$$

2.3 AODV-BT 路由算法

AODV-BT 算法的流程如图 3 所示。该算法对路由表进行了修改,将节点维护的路由表中的路由判据字段替换成新的路由判据量,即将跳数字段替换成 M 来选择下一跳路由。

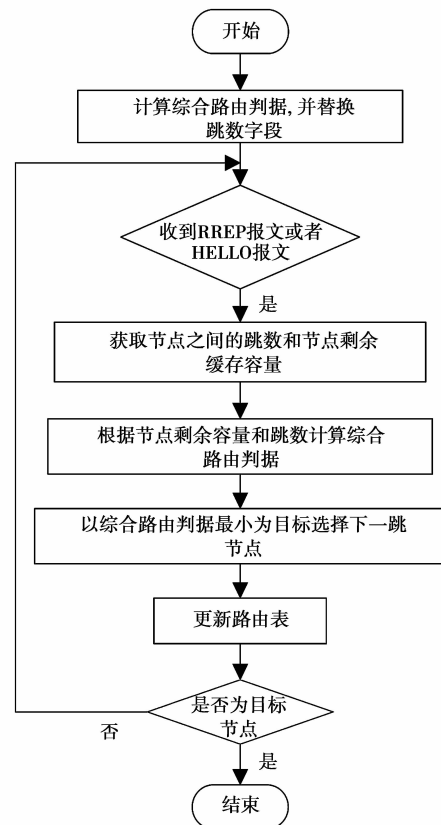


图 3 AODV-BT 路由算法流程

Fig.3 AODV-BT routing algorithm process

在智能电网中,每个节点都是固定的,因此,无线通信链路质量相对稳定。节点间的链路一旦建立,在短时间内不会发生突发变化。本文根据这个特点,设计路由表中节点剩余容量的更新策略:节点剩余容量随着数据的传输发生改变,节点每传输完一次数据,其剩余容量就会增加一次,同时这个变化会立刻更新到路由表中,下一跳节点的剩余容量信息由路由请求回复数据包 (route replies package, RREP) 和 HELLO 数据包进行传递,只有当节点接收到 RREP 数据包或 HELLO 数据包时才会更新路由表中的路由判据。源节点根据更新后的路由判据

M 重新确定下一跳节点,以此保证在每次路由选择时都是基于最新的节点剩余容量信息。

3 数值结果分析

本文采用网络仿真软件 OPNET,对 AODV-BT 和 AODV 路由算法进行仿真,并对其路由性能进行对比分析。主要性能包括:网络的吞吐量、通信时延以及网络丢包率。

3.1 参数设置

根据对无线 Mesh 接入网在智能电网中的网络结构及其网络模型的分析,在 OPNET 中搭建仿真场景,为了更好地分析路由算法的性能,仿真场景中的所有通信节点均使用静态 IP 地址。仿真参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Tab.1 Simulation parameters

参数	数值
仿真时间/min	30
仿真场景面积/km ²	5×5
通信节点个数	25
α 值设置	0.85
通信速率/(Mbit · s ⁻¹)	11
节点模型	Opnet 中 Manet Station 节点模型
路由协议	AODV, AODV-BT

3.2 仿真结果分析

图 4 是随网络运行时间变化,AODV-BT 和 AODV 路由算法在相同场景下的数据平均吞吐量,结果表明:随着网络的运行 2 种算法的网络吞吐量均趋于稳定,AODV-BT 路由算法的网络吞吐量明显高于 AODV 路由算法。

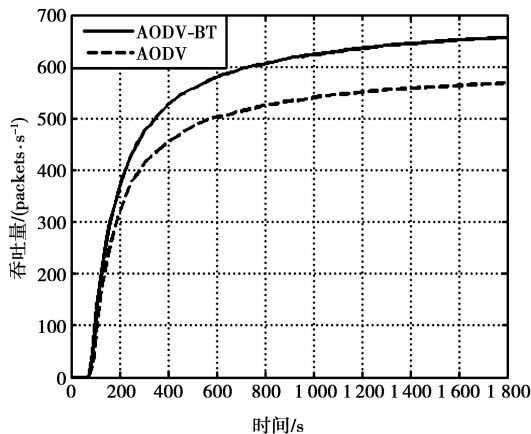


图 4 Mesh 网络平均吞吐量

Fig.4 Average throughput of mesh network

图 5 为随网络运行时间的变化,AODV-BT 和 AODV 路由算法在相同场景下的通信时延,结果表明:和传统 AODV 路由算法相比,AODV-BT 路由算法可以有效降低网络的通信时延,并且时延抖动相对平缓。

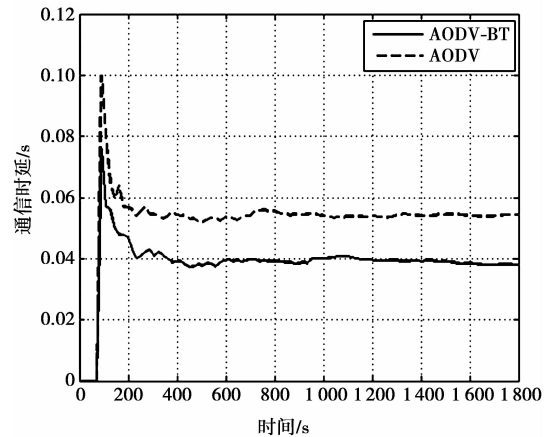


图 5 Mesh 网络平均通信时延

Fig.5 Average delay of mesh network

图 6 反映了 AODV-BT 和 AODV 路由算法在相同场景下的丢包率随网络运行时间的变化情况,结果表明,本文所提机制能够大大降低网络的丢包率,提高网络的可靠性。

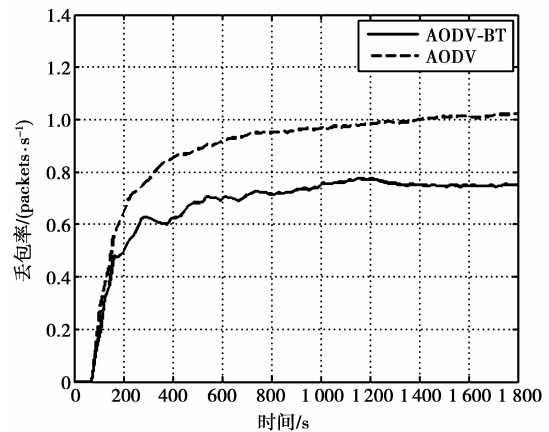


图 6 Mesh 网络平均丢包率

Fig.6 Average packet dropped of mesh network

通过以上仿真分析可以看出,本文提出的基于平衡树的 AODV-BT 算法,可以将网络中的数据流量均匀地分布在各个节点上,提高节点的数据传输效率,从而提高整个网络的吞吐量,同时,还能有效地减少网络的通信时延和误码率。

4 结束语

本文深入研究了无线 Mesh 网络在智能电网中的应用特点,对其网络结构进行了建模,分析了该网

络结构中存在的问题。并针对无线 Mesh 网络中存在的节点数据拥塞问题设计了一种基于平衡树的 AODV-BT 路由算法。该算法将传统的 AODV 路由算法和平衡树模型相结合,引入节点剩余容量作为路由判据,使得无线 Mesh 网络中的数据流量能够均匀地分布在网络的各个节点而不会聚集在少数节点上,有效地解决了智能电网无线 Mesh 网络中存在的由于节点数据拥塞而导致整体网络性能下降的问题。最后,利用 OPNET 仿真平台对该路由算法进行仿真。仿真结果表明,相比传统的 AODV 路由算法,本文提出的 AODV-BT 路由算法能够有效地提高网络的吞吐量,降低通信时延和丢包率,增强网络的可靠性和有效性。但是,本文只针对单一场景进行仿真分析,并未考虑多接入点的情况,因此,在未来的研究中将结合节点内部的排队机制,进一步研究 AODV-BT 路由算法在复杂场景下的路由性能。

参考文献:

- [1] VINEETHA C P, BABU C A, Smart grid Changes, Issues and Solutions, intelligent green building and smart grid [C]//2014 International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG). Taipei, China:IEEE Press, 2014:1-4, 23-25.
- [2] WU Dapeng, ZHANG Puning, WANG Honggang, et al. Node Service Ability aware Packet Forwarding Mechanism in Intermittently Connected Wireless Networks[J]. IEEE Transaction on Wireless Communications, 2016, 15(12): 8169-8181.
- [3] 胡伏湘.基于 AODV 的无线 Mesh 网络路由协议优化设计[J].湖南师范大学自然科学学报,2015,38(3):85-90.
HU Fuxiang. Optimization Design of Routing Protocol of Wireless Mesh Network Based on Aodv[J].Journal of Natural Science of Hunan Normal University,2015,38(3):85-90.
- [4] GHARAVI H, HU Bin. Multigate mesh routing for smart grid last mile communications [C]//In Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). USA: IEEE Press,2011, 275-280.
- [5] KEMAL M S, CEOCEA A, OLSEN R L. Gateway placement for wireless mesh networks in smart grid network planning[C]//2016 10th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG).Bydgoszcz, Poland:IEEE,2016:144-147.
- [6] XU Yi, WANG Wenye. Wireless mesh network in smart grid: Modeling and analysis for time critical communications [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(7): 3360-3371.
- [7] HO Quangdung, GAO Yue, RAJALINGHAM G. Performance and applicability of candidate routing protocols for smart grid's wireless mesh neighbor area networks [C]// IEEE International Conference on Communications.USA:IEEE Press, 2014:3682-3687.
- [8] BABA A E, RUPPERT S A, JABER N, et al. AODV adaptation for semi-static smart grid monitoring systems [C]// 2012 IEEE International Conference on Smart Grid Engineering (SGE). UOIT Oshawa, Canada: IEEE Press, 2012.
- [9] DENG Xiaoheng, LIU Qiang, LI Xu, et al. Channel Quality and Load Aware Routing in Wireless Mesh Network [C]//IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC).USA:IEEE Press,2013:2068-2073.
- [10] 李帅,蔡明.基于路径稳定性的 MAODV 路由协议的改进[J].现代电子技术,2015,38(5):1-4.
LI Shuai, CAI Ming. MAODV routing protocol improvement based on stability of path [J]. Modern electronics technique, 2015, 38(5): 1-4.
- [11] WU Dapeng, ZHANG Hongpei, WANG Honggang, et al. Quality of Protection (QoP)-Driven Data Forwarding for Intermittently Connected Wireless Networks [J]. IEEE Wireless Communication, 2015, 22(4): 66-73.
- [12] METS K, OJEA J A, DEVELDER C. Combining power and communication network simulation for cost-effective smart grid analysis [J]. Communications Surveys Tutorials, 2014, 16(3): 1771-1796.
- [13] WU Dapeng, WANG Yanyan, WANG Honggang, et al. Dynamic Coding Control in Social Intermittent Connectivity Wireless Networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(9): 7634-7646.

作者简介:



赵彦平(1974—),男,山西代县人,高级工程师,主要研究方向为输变电运维检修管理。E-mail:zhaoyanping2003@163.com。



唐国琦(1990—),男,硕士研究生,主要研究方向为无线通信、无线自组织网络、智能电网等。E-mail:tgqbupt@bupt.edu.cn。



李良(1982—),男,广西梧州市人,工程师,主要研究方向为电力物联网技术、智能间隔棒技术等。E-mail:liliangbj@163.com。



全明睿(1986—),男,山西运城人,工程师,主要研究方向为超特高压输电线路运维检修。E-mail:quanmr@126.com。

(编辑:张 诚)