

基于节点相关度的电力线载波通信路由算法

梅 杨¹, 宗群龙²

(1. 河南工程学院 电气信息工程系, 河南 郑州 451191;

2. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 针对窄带电力线网络节点通信状态变化剧烈和通信成功率低的问题, 提出了一种新的基于节点相关度的动态网络分簇算法。该算法根据接收信号强度、历史抄通概率和网络连通度选取簇头节点, 根据节点相关度确定簇内成员; 在算法稳定工作阶段, 路由以固定数据传输和网关节点主动发起传输相结合的方式来完成数据收集; 当部分网络节点以现有路径不能正常通信时采取基于邻居节点数目的概率泛洪机制重构网络, 可保证数据的即时传输。分析表明该路由器具有灵活性、实用性和有效性。

关键词: 低压电力线通信; 路由; 节点相关度; 概率泛洪; 数据融合

中图分类号: TP 913

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2010)03-0095-03

本文主要研究基于动态中继转发的窄带低压电力线载波通信(L-PLC)路由算法^[1-15]。首先以网络通信的观点分析低压电力线通信网络的特殊性问题, 其次提出一种基于节点相关度的分簇路由动态组网方法, 然后以概率泛洪路由修复机制作为路径失效的补充方式。

1 低压载波网络通信模型分析

1.1 低压电力线通信网络特性

工业与民用建筑低压配电线路的接线方式一般根据负荷的等级、容量和分布情况来确定。从通信角度讲, 低压配电网接线方式基本属于基于树形的混合拓扑结构, 并具有其自己的特点, 所以在设计载波网络路由器时一定要关注几个方面^[13]: 剧烈变化的网络拓扑结构使得电力线通信网络具有了很多 Ad hoc 网络特征; 网络中没有专用的路由或交换器, 无法实现信号的转发和放大; 带宽的限制, 客观造成了载波通信能力较小和通信成功率较低的状况; 信道共享, 在一个供电变压器下, 电力线载波信道完全共享(分相), 信息以广播的方式发布, 电力线载波通信需要通过软路由将同一个物理子网划分成多个逻辑子网。

1.2 低压电力线网络模型

低压配电网的电力线通信系统是由设在监控室的主机和分布在电网内的一定数量的通信处理终端(电力载波从节点)组成。图 1 为典型低压配电网三相电力线通信网络逻辑拓扑结构。单相电力线通信逻辑网关放置在各相的起始处, 如图 1 中的 A、B、C 三相的 1、2、3 位置处, 其实质为集中器引出的 3 个通道接口, 每一个网关负责单相电网内各自节点的组网。配置柜处放置集中器, 负责协调系统、收集 3 个单相网关数据, 并与外界交互信息。

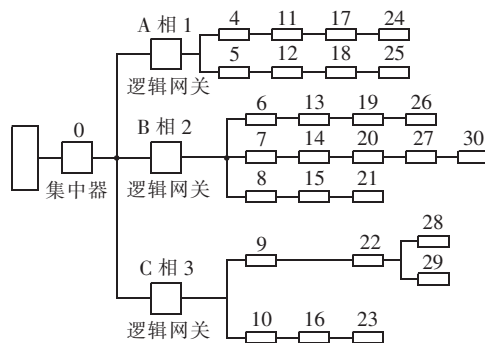


图 1 三相电力线通信网络逻辑拓扑
Fig.1 Logical topology of three-phase power line communications network

电力线载波网络数据链路的连通能力和通信范围是有限的, 假设某个台区内单相电力线上用户节点总数为 n , 因通信距离和噪声干扰的原因, 网关直接可靠通信的节点数 m , 剩余 $n-m$ 个节点虽然在物理上是连通的, 但是在数据链路层上是断开的。为了建立整个通信网络, 必须先建立网络的部分节点的通信链路, 然后由这些节点作为中继节点进行通信距离的扩展, 才能将所有的网络节点纳入整个通信网络。所以, 本文的路由算法的设计过程中必须解决动态中继点的选取、网络路由的建立、维护和重构等相关问题。

本文分析的网络结构是以分层结构为基础的动态分簇组网模型, 它借鉴了完全分布式和分层中心式结构的优点, 将网络划分成多个簇, 每个簇由一个簇头和多个普通节点构成, 如图 2 所示。若干个节点组成子网(簇), 每个子网中的节点数不同, 子网中的节点通过簇头接入虚拟骨干网, 网关是一个软件抽象接口, 运行在集中器节点上。

2 基于节点相关度的动态分簇算法

本文将由 n 个载波节点组成的平面网络抽象为

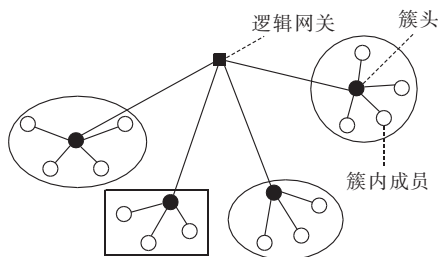


图2 电力线载波网络分簇模型

Fig.2 Clustering model of power line carrier network

一个连通图 $G=(V,E)$, $|V|$ 表示网络节点集合, $|E|$ 表示节点之间的双向链路集合。网络节点分布具有随机的特征,同一小区域中节点由于距离近,具有物理位置的相关性,利用节点所处的物理位置来构建子网,能提高网络的稳定度。

在详述算法之前,本文引入下面几个概念。

定义1 最大通信半径:在系统拓扑 $G=(V,E)$ 中设 r 是网络中节点的逻辑最大通信半径,若 $D(u,v)$ 或 $D(v,u)$ 表示节点 u,v 之间的载波传输链路,那么当节点 u,v 能直接通信时, $D(v,u) < r$ 成立;否则 $D(v,u) > r$ 。

定义2 节点相关度:对于给定节点 $u,v \in G(V)$,用 $R(v,u)$ 表示节点 u,v 之间的传输对应关系,即节点 u,v 之间的相关度。当节点 u,v 满足条件 $D(v,u) < r$ 时,表示 u,v 为邻节点,其相关度值 $R(v,u) = 1$ 。当节点 u,v 满足条件 $D(u,v) > r$ 时, u,v 之间需要通过 $d-1$ 个中间节点的转发才可以相互通信,则相关度值 $R(v,u) = d$ 。

定义3 网络连通度:节点的邻居节点(即满足 $R(v,u) = 1$)的数目。

定义4 历史抄通概率:对于给定节点 $u,v \in G(V)$, $P(v,u)$ 表示节点 u,v 之间历史通信成功率。

所设计的路由算法的工作过程是周期性的,每轮循环分为簇的建立阶段和稳定的数据收集阶段。其中,簇的建立阶段又细分为:簇头选择和簇的形成。当数据通信阶段部分节点不能正常通信时,以概率泛洪方法完成最后数据内容交换。

2.1 簇的建立阶段

2.1.1 簇头的选择

在网络初始化阶段,由集中器节点广播“竞选簇头”的消息,所有接收到此消息的节点将根据接收信号强度、历史抄通概率和网络连通度决定是否参加竞选。节点首先计算信号强度与历史抄通概率的乘积,若该值小于某一阈值,直接放弃竞争,并在接下来的时间段内选择加入某一个簇;若该值大于某一阈值,则节点向网络主节点发送“竞选簇头”的消息,该消息包括本节点历史抄通概率和网络连通度信息。网络主节点接收到所有参加竞选节点发送的“竞选簇头”消息后,以接收信号强度为主,竞选节点的历史抄通概率和网络连通度 d 为辅,选择 k 个节点作为簇头,并广播“任命簇头”消息。接收到此消息的节点如果发现任命的簇头中有自己,就当选为簇头。

2.1.2 簇的形成

节点当选簇头后,发送“重新加入簇”消息告知其他节点自己是新簇头。非簇头节点根据与广播簇头的相关度值 $R(v,u)$ 来选择加入哪个簇,并发送“请求加入簇”消息告知该簇头。由于载波网络节点的随机聚集性,因此必然存在许多非簇头节点处于2个或多个簇头的重复覆盖区域内,此时簇头将根据自身的网络连通度以及与非簇头的相关度值 $R(v,u)$ 确定是否接收该节点加入本簇。具体原则如下:

a. 若节点与簇头的相关度值 $R(u,v) = 1$,说明该节点是簇头的相邻节点,则允许加入该簇;

b. 若 $R(u,v) \geq 2$,则该节点优先加入网络连通度较低的簇头所在簇。

2.1.3 参数计算方法

a. 节点相关度的计算。由于电力线载波网络中的物理节点位置相对固定,因此每隔10~20个周期确定1次节点连通度基本能够符合网络的整体要求。即在节点收到网关节点发送的“竞选簇头”信息后,节点首先向周围节点发送 n_{TT} (最多可以被转发的次数) = 0 的请求信息,通过接收到的应答信息确定自身的连通度 d_0 ;之后,将本身的接收信号强度、历史抄通成功率和 d_0 发送给网关节点。而当节点接收到簇头发送的“重新加入簇”消息后,可以根据消息中 n_{TT} 的减小值确定与簇头的相关度。

b. 历史抄通成功率。定义如式(1)所示:

$$P_{i+1} = P_i \times 0.8 + 0.7 \times \text{flag} \quad (1)$$

P_{i+1} 为第 $i+1$ 次 u,v 节点通信后的成功率,若 $P_{i+1} > 1$ 时直接赋1, flag 为第 $i+1$ 次 u,v 节点通信成功标志,当通信成功时 $\text{flag} = 1$,通信失败 $\text{flag} = 0$,设初始概率 $P_0 = 0.7$ 。0.8 和 0.7 为默认参数,现场调试时可根据台区的通信稳定情况调整。

2.2 路由数据收集阶段

在稳定工作阶段,分为2种通信方式:

a. 固定数据传输,在特定时间段内簇内成员将数据发送至簇头,经过一段时间的数据收集,簇头运用数据融合技术来处理数据,并将最终结果发送给网关节点;

b. 逻辑网关发起的主动通信,网关根据收集的节点信息首先确认目标节点的簇头,然后逐级查询,发送带有多级簇头的信息。

在完成数据通信以后簇头还会将簇内的成员情况发送给网关节点,以便于网关点每经过一定周期重新统计网络节点总数 N ,确保在簇头选择时能取得较佳的数目。

2.3 基于似然概率的泛洪网络重构机制

在完成载波网络组网后的网络运行中,考虑到电力线网络信道的时变性和未知性,当簇头发现某些簇内节点不能正常通信(不能正常收集节点信息)时,将逐级上报至网关,并由网关在完成当前数据传输后以泛洪机制来获取节点数据。泛洪算法(flooding)是一种传统的广播式路由技术,它不需要维护网络的拓扑结构和路由计算,接收到消息的节

点以广播形式转发数据包给所有的邻居节点,这个过程重复执行,直到数据包到达目的地或已经达到预先设定的最大跳数。早期泛洪算法在电力线网络中已有涉及,要么是固定概率的泛洪要么是所有节点的遍历泛洪,这些方式实现简单,但会出现消息的“内爆”和“重叠”。根据以上不足,本文拟利用基于网络邻居节点数的概率泛洪机制。

如果一个节点没有目的节点的路径或者要执行广播校时等命令时,这个节点就要通过广播路径发送消息。假设需要的广播成功率值的定义如式(2)所示。

$$P_u=1-(1-\rho)^n \tag{2}$$

其中, P_u 为要求泛洪达到的通信成功率, ρ 是节点要转发泛洪命令的概率, n 是节点的邻居节点数量。从式(2)可知,在给定 n 值的情况下,为了防止出现消息“盲点”,可以在满足通信成功率 $P_u>99.99\%$ 情况下确定各节点转发的概率值(见表 1)。

表 1 邻居节点数量与重发概率 ρ 的关系
Tab.1 Relationship between probability ρ of resending and number of neighboring nodes

邻居节点的数量	ρ	P_u
6	1	1
8	0.9	0.9999999
10	0.8	0.9999941
15	0.5	0.9999969
20	0.4	0.9999963
30	0.3	0.9999977

表 1 数据表明,这种概率泛洪算法降低了网络流量,如果节点数量愈多,且适当地减小路径消息的长度以及合理确定报间隙的时间,该算法将会获得更好的性能。相似算法在 MANETs 中已有涉及,文献[16]中节点重播消息的概率值是根据节点的密度动态地调整,有关实验证明在相同条件下,概率泛洪算法比传统的泛洪算法的重播量改善 50%。

3 结语

本文提出了一种基于节点相关度的电力载波通信路由算法,该算法引入了节点相关度概念,根据接收信号强度和网络连通度选取簇头节点,根据节点相关度确定簇内成员;并且提出根据载波网络邻居节点数目的似然概率的泛洪网络重构机制。分析表明,该算法可使簇头更均匀地分布在整个网络中,使其更适合担当数据转发任务,提高了网络的稳定度,若有节点在现有情况下出现中断,能在较少的时间内恢复逻辑链路链接。

由于该算法是基于分簇的,主要适合于网络节点较多的情况,在网络节点相对比较少的情况下还需深入研究。

参考文献:

[1] 殷树刚. 载波抄表系统稳定运行的研究[J]. 电力系统通信,2002,23(5):14-16.

YIN Shugang. Research of keeping carrier meter reading system work stably[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2002,23(5):14-16.

[2] 俞田白,杨将新,赵玉玺. 楼宇控制系统中的电力线载波通信路由[J]. 电网技术,2006,30(9):88-91.

YU Tianbai,YANG Jiangxin,ZHAO Yuxi. A routing algorithm of edifice control system based on power line singal carrier[J]. Power System Technology,2006,30(9):88-91.

[3] 徐超群,高明煜. 低压电力载波通信技术在城市路灯远程智能监控中的应用[J]. 电讯技术,2006,46(6):145-149.

XU Chaoqun,GAO Mingyu. Application of low-voltage power line communication in a city street lamp long-distance intelligent monitoring system[J]. Telecommunication Engineering,2006,46(6):145-149.

[4] ESMAILIAN T,GULAK P G,KSCHISCHANG F R. A discrete multitone power line communications system[C]//2000 IEEE International Conference on Acoustics,Speech,and Signal Processing (ICASSP). Istanbul,Turkey:IEEE,2000:2953-2956.

[5] XU Dianguo,MOU Yingfeng,LIU Xiaosheng. A novel intelligent control method in MAC protocol for the robustness of power line communication networks[C]//Proceedings of the 2003 IEEE International Symposium on Intelligent Control. Houston,USA: IEEE,2003:586-591.

[6] CAVDAR I H,Performance analysis of FSK power line communications systems over the time-varying channels:measurements and modeling[J]. IEEE Transations on Power Delivery,2004,19(1):111-117.

[7] MOROSI S,MARABISSI D,ENRICO DEL R,et al. A rate adaptive bit-loading algorithm for in-building power-line communications based on DMT-modulated systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2006,21(4):1892-1897.

[8] 张友兵,曹一家,程时杰. 低压电力线正交频分复用系统同步问题的量化研究[J]. 电力系统自动化,2004,28(18):36-40.

ZHANG Youbing,CAO Yijia,CHENG Shijie. Influence of synchronization errors on OFDM based communication system for low voltage power lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004,28(18):36-40.

[9] 赵宇明,王赞基,郭静波,等. 考虑功率谱限制的电力线通信比特分配算法[J]. 中国电机工程学报,2006,26(5):143-148.

ZHAO Yuming,WANG Zanji,GUO Jingbo,et al. A novel bit-loading algorithm for energy spectrum limited power-line communication systems[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(5):143-148.

[10] 戚佳金,刘晓胜,李贵娇,等. 低压窄带电力线通信信道编码方法[J]. 电力自动化设备,2008,28(3):78-81.

QI Jiajin,LIU Xiaosheng,LI Guijiao,et al. Channel coding methods of narrow-band LV power line communication [J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(3):78-81.

[11] BROWN P A. Some key factors influencing data transmission rates in the power line environment when utilizing carrier frequencies above 1 MHz[C]//Proceedings of International Symposium on Power Line Communications and its Applications (ISPLC). Tokyo,Japan:[s.n.],1998:67-75.

[12] MAJUMDER A,CAFFERY J J. Power line communications:an overview[J]. IEEE Potentials,2004,23(4):4-8.

[13] 刘晓胜,周岩,戚佳金. 电力线载波通信的自动路由方法研究[J]. 中国电机工程学报,2006,26(21):76-81.

LIU Xiaosheng,ZHOU Yan,QI Jiajin. Method study of automatic routing for power line communication[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(21):76-81.

[14] 刘晓胜,戚佳金,宋其涛,等. 基于蚁群算法的低压配电网电力线通信组网方法[J]. 中国电机工程学报,2008,28(1):71-76.

LIU Xiaosheng, QI Jiajin, SONG Qitao, et al. Method of constructing power line communication networks over low-voltage distribution networks based on ant colony optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(1): 71-76.

- [15] ZHANG Subing, LIU Zemin. A QoS routing algorithm based on ant algorithm[C]//25th Annual IEEE Conference on Computer Network (LCN 2000). Tampa, USA: IEEE, 2000: 574-578.
- [16] YASSEIN M B, KHAONA M O, MACKENZIE L M, et al. Improving the performance of probabilistic flooding in MANETs [C]//Proceedings of International Workshop on Wireless Ad

-hoc Networks(IWWAN-2005). London, UK: [s.n.], 2005: 23-26.
(责任编辑: 李 玲)

作者简介:

梅 杨(1962-),女,河南郑州人,副教授,从事智能控制系统、电力电子技术研究和教学工作(E-mail: 416138169@qq.com);

宗群龙(1982-),男,河南开封人,硕士研究生,研究方向为信息与信号处理、嵌入式系统应用。

Routing algorithm of power line communication network based on node relevance

MEI Yang¹, ZONG Qunlong²

(1. Department of Electrical Information Engineering, Henan Institute of Engineering, Zhengzhou 451191, China; 2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: As the node state of power line communication network changes exquisitely and its success rate is very low, a dynamic clustering algorithm based on the node relevance is proposed, which selects cluster head according to the signal intension, historic communication probability and node connectivity rate, and determines the cluster members based on node relevance. Within the steady working stage, the router completes the data collection by the fixed data transmission and the gateway initiating transmission. When some nodes could not communicate properly via existing paths, the probabilistic flooding mechanism based on the number of neighboring nodes is used to rebuild network for ensuring the real-time data transmission. Analysis shows that this router has better flexibility, practicality and effectiveness.

Key words: low-voltage power line communication; routing; node relevance; probabilistic flooding; data fusion