

# 一种新的低压电力线载波网络软件路由器设计<sup>①</sup>

宗群龙<sup>1</sup> 郑善贤<sup>1</sup> 潘萍<sup>2</sup> (1.湖南大学 电气与信息工程学院 湖南 长沙 410082;

2.长沙师范学校 电子信息工程系 湖南 长沙 410100)

**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软件路由器的设计方法。该路由器根据接收信号强度、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;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。分析表明这种路由器具有灵活性、实用性和有效性。

**关键词:** 电力线载波通信;节点相关度;分簇;概率泛洪

## Design of a New Software Router for Low-Voltage Power Line Carrier Networks

ZONG Qun-Long<sup>1</sup>, ZHENG Shan-Xian<sup>1</sup>, PAN Ping<sup>2</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Electronic Information Engineering Department, Changsha Normal College, Changsha 410100, China)

**Abstract:** In this paper, design of a new software routing is proposed for power line communication. With regard to the great changes in channel state as well as the small ratio of successful communication, dynamic clustering based on correlation of node is used. According to the intension of signal, the probability of communication and connectivity of node, the router selects cluster head and the members of cluster based on Node correlation. When the communication of some network nodes is unusual, the router adopts mechanism of probabilistic flooding based on the number of nearby nodes to rebuild network. This method can guarantee real-time data transmission. The analysis shows that this router is flexible, practical and effective.

**Keywords:** power line carrier communication; node correlation; clustering; probabilistic flooding

## 1 引言

近年来,低压电力线作为通信媒介技术被广泛地研究,并已应用于集中抄表系统<sup>[1]</sup>、智能楼宇<sup>[2]</sup>和路灯控制<sup>[3]</sup>等工程中。然而,由于低压配电网最初的设计是以传输电能为目的,接入网络的电气节点的开断都能影响网络的噪声、阻抗、信号衰减<sup>[4,5]</sup>。电力线信道的剧烈变化使得节点之间的网络连接变的很不可靠,甚至影响网络的逻辑拓扑结构。

目前基于电力线载波组网的研究较少主要有一下几个方面:如文献<sup>[6]</sup>中提出的基于蚁群的最短路径路由算法,不过其大量的资源消耗在路径探测上面,由

于现有窄带载波速率的限制其很难达到 Qoc 的要求;文献<sup>[2]</sup>中提出了基于传输矩阵的路由算法,这种算法简单且易于使用,但树型结构的路由表很难适应动态变化的载波网络;文献<sup>[7]</sup>提出 DQRA,其以具有并行运算的特点能较好的避免寻址的时候演变成完全 N-P 问题,但由于其是基于估计网络拓扑的技术,所以在电力网络运用的前景也不明朗。

## 2 电力线载波网路通信模型

### 2.1 低压电力线通信网路特性

从通信角度讲,低压配电网基本属于基于树形的

① 收稿时间:2009-05-31

混合拓扑结构, 并有其自己的特点, 所以在设计载波网络路由器时一定要关注一下几个方面<sup>[5]</sup>: 剧烈变化的网络拓扑结构使得电力线通信组网具有了很多 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, 电力线通信组网需要通过路由器将同一个物理子网划分成多个逻辑子网。

### 2.2 低压电力线通信网络模型

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(电力载波节点)组成。图 1 为典型低压配电网三相电力线网络逻辑拓扑结构。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三个载波通道接口, 每一个网关负责每相电网内节点的组网。配置柜处放置集中器, 负责协调系统、收集三个单相网关数据, 并与外界交互信息。

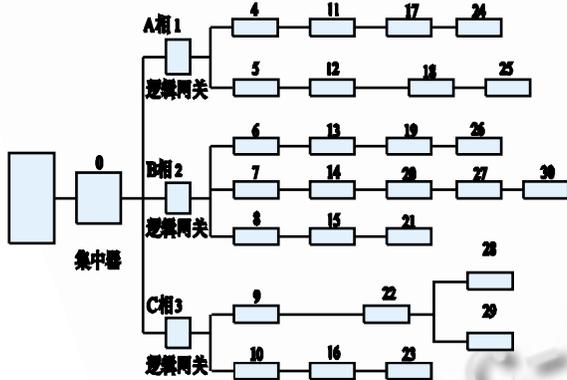


图 1 三相电力线网络通信逻辑拓扑

电力线通信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去是断开的。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, 软件路由器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。

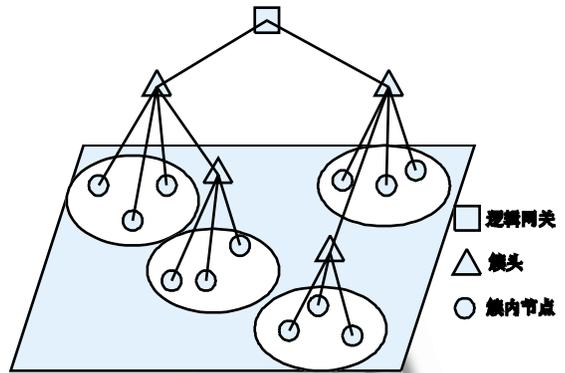


图 2 载波网络分簇模型

本文分析的网络结构是以分层结构为基础的动态分簇模型, 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。

### 3 基于节点相关度的分簇算法

本文将由  $n$  个载波节点组成的平面网络抽象为一个连通图  $G=(V,E)$ ,  $|V|$  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, 本文引入以下概念:

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  $u,v \in G(V)$ , 符号  $R(v,u)$  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  $u,v \in G(V)$ , 符号  $P(v,u)$  表示节点  $u,v$  之间的历史通信成功

率。

### 3.1 簇的建立

本文设计的路由器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通信阶段。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。

#### 3.1.1 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。

#### 3.1.2 簇的形成

节点当选簇头以后,发送“重新加入簇”消息告知其它节点自己是新簇头。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:

1) 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。

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

#### 3.1.3 参数的技术

1) 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  $Q_{oc}$  的要求。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  $TT=0$ (最多可以被转发 0 次)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  $d_0$  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  $TT$  的减小值确定与簇头的相关度。

2) 历史抄通成功率.定义如式(1)

$$P_{i+1} = P_i * 0.95 + 0.8 * flag \quad (1)$$

$P_{i+1}$  为第  $i+1$  次  $U, V$  节点通信后的成功率,若  $P_{i+1}$  大于 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  $flag=1$ , 通信失败  $flag=0$ , 设初始概率  $P_0=0.7$ 。0.95 和 0.8 为默认参数,现场调试时可用根据载波网络的通信稳定情况来调整。

### 3.2 稳定工作阶段

在稳定工作阶段,分为两种通信方式:一、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;二、逻辑网关发起的主动通信,网关根据收集到的节点信息首先确定目标节点的簇头,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,以便于网关节点每经过一定周期重新统计网络节点总数  $N$ , 确保在簇头选择的时候能取得较佳的数目。

### 3.3 概率泛洪重构机制

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行,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从节点数据。泛洪算法(flooding)是一种传统的广播式路由技术,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,这些方法实现简单,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来修复路由。

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公式(2)

$$P = 1 - (1 - Q)^N \quad (2)$$

其中  $P$  为要求泛洪达到的通信成功率,  $Q$  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”,我们可以在满足通信成功率 大于 99.99%

情况下确定各节点转发的概率值(见表 1)。

表 1 邻居节点的数量与概率  $\rho$  的关系

邻居节点的数量	概率值 $\rho$	$P_{Tr}$
4	1	1
6	0.9	0.999999
8	0.8	0.999999
13	0.5	0.999938
20	0.4	0.999996
30	0.3	0.999997

表 1 中的数据表明, 这种概率洪泛算法能降低了网络的流量, 如果节点数量较多, 且适当地减小路径的长度以及合理确定发送报文间隙的时间, 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[8]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, 概率洪泛算法比传统的洪泛算法的重播量改善 50%。

## 4 仿真及结果分析

### 4.1 仿真环境及参数设定

在典型的低压电力线载波集中抄表系统中, 设其配电半径为 100m, 在配电范围内分布 40 个用户节点, 以 PC 机作为仿真硬件平台, 以 MATLAB6.5 为编译和仿真环境。设定: ①40 个节点在区域内随机分布, 但是剔除‘孤岛’问题, ②经过软件路由器完成路由探测后, 分配节点逻辑 ID 为 1~40, ③由于电力线信道是时变的, 设电力线的最大通信距离是 60m, 在 30 米内的通信成功率为 100%, 30m-50m 通信成果率为 70%, 50m-60m 通信成功率为 50%。

### 4.2 仿真结果分析

为了对比, 本文采用两种方法对设定的数据进行仿真。图 3 是采用文献 2 中的传输矩阵理论进行路由初始化后的逻辑拓扑图。图 4 为采用本文的设计思路, 以通信成功率和节点相关度为主要参数的仿真拓扑图。

从仿真结果可以得出以下结论: ①由图 4 可知利用节点相关度的分簇路由器能实现电力线网络通信的中继功能, 建立网关和网络内节点的通信; ②观察两种逻辑拓扑图, 分析节点 30 的路径, 在图 4 中集中器通过 5→16→30 来和 30 节点通信, 而在图 3 中集中器通过 4→30 来完成通信, 路径中继深度较小。对比路径可以看出虽然 4→30 只通过一级中继就能通信, 但由于节点间距离较远使通信成功率急剧下降, 反而在多次抄读的情况下需要更多的时间; ③整体分

析, 图 4 的逻辑拓扑的网络路径的中继深度小于或等于图 3 中相同目的节点路径的中继深度, 本文的基于通信成功率和节点相关度的路由器不追求单次通信的最短路径, 而是通过延长不可靠通信路径的方法来保证整体的通信成功率。

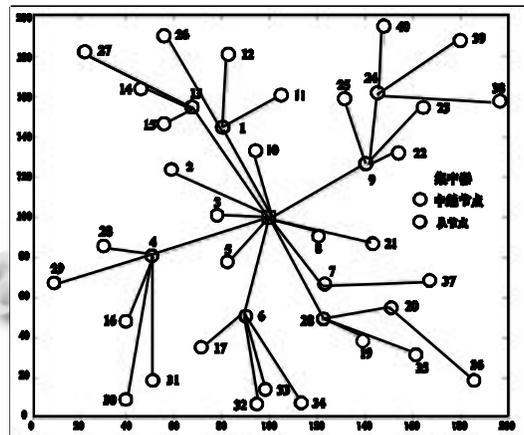


图 3 基于传输矩阵理论的逻辑拓扑图

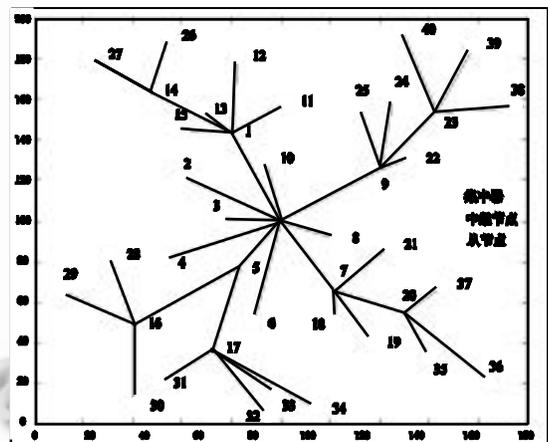


图 4 基于节点相关度分簇的逻辑拓扑图

## 5 结语

本文提出的基于节点相关度的电力线载波网络分簇软件路由器的方法主要解决一下两个方面的问题:

1) 针对电力线载波通信状态变化剧烈的特点为了能稳定通信引入了历史抄通成功率的概念, 该成功率以平均累计和的方法更新, 能通过调整公式(1)的参数提供不同灵敏度的抄通成功率以适应现场信道变化的需要;

2) 针对网络通信的不可靠性, 当部分节点不能依靠现有路径通信时通过概率泛洪抄读数据, 既能保证数据在规定时间内完成, 又相当大程度上减少重发次数。

(下转第 61 页)

### 参考文献

- 1 殷树刚.载波抄表系统稳定运行的研究.电力系统通信, 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.电网技术, 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.电讯技术, 2006,46(6):145 - 149.
- 4 Brown PA. Some key factors influencing data transmission rates in the power line environment when utilizing carrier frequencies above 1 MHz. Proc. of International Symposium on Power line Communications and its Applications (ISPLC), Mar 1998.67 - 75.
- 5 Majumder A, Caffery JJ. Power line communications: an overview. Potentials, IEEE, 2004,23(4):4 - 8.
- 6 刘晓胜,周岩,戚佳金.电力线载波通信的自动路由方法研究.中国电机工程学报, 2006,26(21):76 - 81.
- 7 Zhang SB, Liu ZM. A QoS routing algorithm based on ant algorithm. Local Computer Networks, 2000.LCN 2000. Proc. 25th Annual IEEE Conference on Volume, Issue, 2000. 574 - 578.
- 8 L.M.M.M. BaniYassein, M.Ould-Khaoua, S.Papanastasiou. Improving the performance of probabilistic flooding in MANETs. Proc. of International Workshop on Wireless Ad-hoc Networks (IWWAN-2005). May 2005.