



一种交叠分层诱导的 PLC 自动路由算法设计

郑建宏^{1,2,3}, 陈鹤云¹, 周朋光¹, 徐浩¹

(1. 重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065;

2. 教育部移动通信工程研究中心, 重庆 400065;

3. 重庆重邮信科通信技术有限公司, 重庆 400065)

摘要: 针对电力线信道中存在幅值波动很大且具有强时变特性脉冲噪声, 严重影响电力载波网络通信性能的问题, 分析了电力线网络拓扑结构以及电力线载波通信经典路由算法, 并在此基础上提出了一种交叠分层诱导的自动路由算法 (OHIA), 重点验证了该算法的可行性, 并给出了诱导因子传递过程、路由寻址过程以及基于预测的路由维护策略。通过 NS-3 仿真平台建立 PLC 节点模型, 分别仿真蚁群算法和交叠分层诱导的 PLC 自动路由算法。仿真结果表明, 相比蚁群算法, 交叠分层诱导的自动路由算法明显改善了强时变信道环境下第一次通信成功率, 并在 PLC 大规模组网方面取得较大进步。

关键词: 电力载波通信; 组网路由; 分层诱导; 自动路由

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2018003

Design of automatic routing algorithm based on overlapping hierarchical induction

ZHENG Jianhong^{1,2,3}, CHEN Heyun¹, ZHOU Pengguang¹, XU Hao¹

1. School of Communication and Information Engineering,

Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

2. Ministry of Education Mobile Communication Engineering Research Center, Chongqing 400065, China

3. Chongqing Post Information Technology Co., Ltd., Chongqing 400065, China

Abstract: Aiming at the problem of impulse noise with large amplitude fluctuation and strong time-varying characteristics, which seriously affected the communication performance of power carrier network, the power line network topology and the classical routing algorithm of power line carrier communication were analyzed, and on this basis, an algorithm of overlapping hierarchical induction algorithm (OHIA) was proposed, which proved the feasibility of the algorithm and gave the inductive factor transfer algorithm, route addressing process and forecast based route maintenance strategy. Through the NS-3 simulation platform to establish the PLC model, respectively, ant colony algorithm and overlapping layer induced PLC automatic routing algorithm were simulated. The simulation results show that compared with the ant colony algorithm, the proposed algorithm improves the success rate of the first communication in the strong time-varying channel environment, and makes great progress in the large-scale networking of PLC.

Key words: power line carrier communication, network routing, induced factor, automatic routing

收稿日期: 2017-05-12; 修回日期: 2017-09-22

基金项目: 国家科技重大专项基金资助项目 (No.2016ZX03002010-003)

Foundation Item: The National Science and Technology Major Project of China (No.2016ZX03002010-003)

1 引言

电力线载波通信 (power line carrier communication, PLC) 技术是指利用现有的电力传输线作为传输媒介, 以载波形式进行高速数据传输的一种通信方式, 具有覆盖范围广、投资低、运行和维护成本低等特点。因此, 它广泛应用于远程抄表、路灯控制等领域。然而以电力线作为媒介的载波通信网络本身受强衰减、时变的强噪声特性^[1,2]和接入负载特性的影响, 通信可靠性大大降低。

国内外关于提高电力线载波通信可靠性的研究主要集中在提高通信能力和建立网络中继两个方面。前者主要研究信道特性^[3]、噪声^[4]、信源编码和信道编码^[5]、调制与解调方法^[6], 后者主要研究多级中继路由算法的设计与改进^[7-23]。

目前已有大量学者对 PLC 路由算法进行研究, 并取得了一定研究成果, 但仍有许多不足之处。参考文献[7,8]仿真了小节点数情况下电力线网络组网蚁群算法。参考文献[9-13]基于电力线信道各方面特点, 改进了蚁群算法中的评价函数。蚁群算法及改进的蚁群算法自适应性较好, 但网络搜索具有盲目性, 同时需要专用交互协议协调节点间通信, 因此占用了大量带宽, 系统时效性较低, 所以并不适应 PLC 大规模组网。相比之下, 分簇算法中的非交叠分簇算法直接通过广播组网, 无需迭代, 时效性较高。参考文献[14,15]提出了一种非交叠的动态路由算法, 该算法层次分明, 网络速度快。参考文献[16]仿真了非交叠分簇算法, 但组网结果拥有较多优化空间; 在此基础上, 参考文献[17]在节点相关度, 即每个节点到中心节点跳数方面进行优化; 参考文献[18]在父节点流量平衡方面有更多考虑; 参考文献[19]提出了从信噪比距离方面进行重组, 优化节点到上一级节点路径选择以得到更好的组网结果。然而, 非交叠分簇算法只有单一节点之间的通信链路, 这意

味着, 一旦发生通信链路故障, 一个全球性的或本地的网络重建必须进行, 导致网络经常会带来大量的时延, 这不符合电力线通信网络的实时性和抗毁性的要求。

上述研究内容通过算法层面仿真, 从理论上验证了算法对组网结果有一定的优化, 但存在前文分析的不足之处, 在实际工程应用中难以实现。本文针对蚁群算法网络搜索盲目性以及传统分层算法网络故障恢复缓慢的问题, 在信道和链路动态变化的电力线载波通信网络环境中, 以提高通信可靠性和扩大 PLC 组网规模为目标, 提出了一种分层诱导的 PLC 自动路由方案, 通过 NS-3 仿真验证本算法具有更好的通信性能。

2 电力载波通信网络特点及建模

实际的电力线通信网物理拓扑比较复杂, 但总体上可以抽象为以树型为基础的混合拓扑。典型的电力载波通信网物理拓扑结构如图 1 所示, 中心节点安放位置靠近三相变压器, 子节点通过电力线与中心节点以及其他单元进行数据交换。由于三相变压器各相之间衰减较大, 若没有相间耦合, 三相之间可认为是相互独立的状态, 因此在研究电力载波通信网络时, 通常取其中一相进行研究。

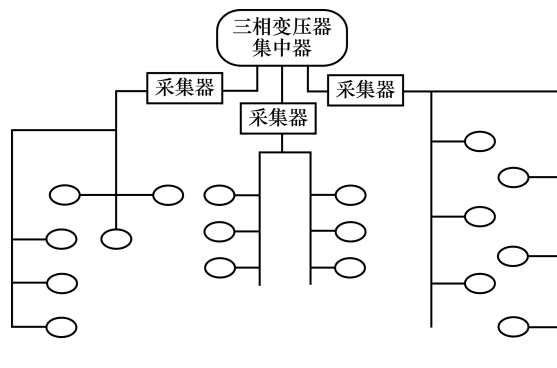


图1 典型的电力载波通信网物理拓扑结构

取电力线载波通信网其中一相, 图 2 所示为电力线载波通信网一相的可能树型拓扑。标号为 1 的节点代表中心节点, 2~45 号节点代表子节点。

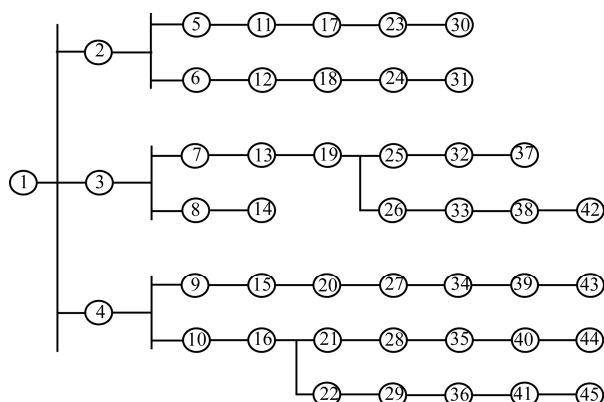


图2 电力线载波通信网一相的可能树型拓扑

由于电力载波通信拓扑类似于树型结构,通常电力通信的树型拓扑深度很深,很多地方是由一条长直的电力线物理连通(如图2所示),因此取一个特殊场景进行研究,将一条长直的电力线上的拓扑转换为可能的逻辑拓扑,如图3所示。

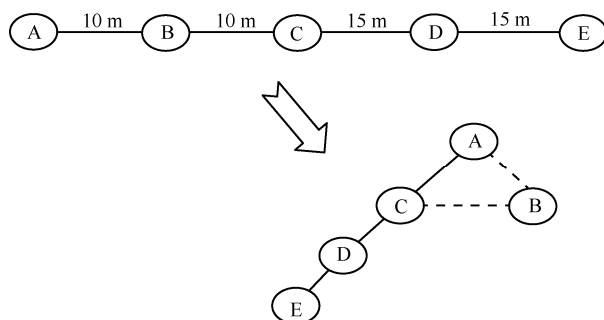


图3 电力载波逻辑拓扑动态变化

在路由算法中,跳数是衡量路由算法的一个重要指标,假设此时电力通信网络通信情况良好(有效通信距离为20 m以上),毫无疑问,A节点寻址E节点的路径为A-C-D-E,若下一刻通信环境变差,有效通信距离降到20 m以下,原来的路径A-C-D-E将变得不可靠,而电力线网络是一种庞大的网络,如果采用重新组网来恢复链路损坏,耗时巨大。但是此刻在逻辑拓扑中还存在一条次优路径(A-B-C-D-E)。同时,值得注意的是,A-C链路不是永远地损坏,下一刻有可能又会恢复。所以,为了解决逻辑上由于通信受时变噪声影响而造成某条暂时链路中断的问题,不仅需要采用自动路由算法自动搜寻可靠的中继节点,完成网

络的自愈,而且路由算法需要适应PLC信道的时变噪声特性。

3 基于交叠分层诱导算法原理

3.1 算法核心思想

基于分层诱导的PLC自动路由算法可理解为最初中心节点根据目的节点散发的诱导因子选择一条最优路径路由,逐层靠近目的节点诱导性越发强烈,当通信链路发生瞬时障碍时,从当前节点中记录目的节点对其邻居节点的诱导因子重新动态规划最优下一步路径,从而寻找到的节点。

运用分层诱导因子算法规划电力载波通信动态路由、初始化网络以及动态规划新路径,不仅算法简单而且利于工程实现。特别地,类似于多级目录深度搜索算法,分层诱导算法十分适合逻辑拓扑为树型结构的电力载波通信网,利用分层策略组网充分考虑电力载波通信网的多路径连通性,同时每次选择的下一跳节点将越来越接近目的节点,并逐步收敛于目的节点。

3.2 组网策略

为了方便讨论,做如下假设。

- 网络中的所有节点都有一个唯一的物理地址。网关节点的物理地址是0,物理地址的其他子节点是 $1, 2, \dots, n$ (网络中的节点数未知)。
- 任一节点至少可以与其他节点通信。
- 电力线通信链路对称,可以实现节点间的双向通信。

分层诱导算法步骤如下。

步骤1 网络中子节点收到中心节点发送的信标信息后,发送关联请求信息至中心节点。

步骤2 中心节点接收到子节点发送的关联请求信息,关联确认信息包含有中心节点为请求节点分配的节点标识,对关联请求信息进行处理,检查关联请求节点合法性,如果合法,发送关联确认信息至请求节点;如果非法,则丢弃关联请求信息。中心节点处理完每个关联请求信息后,

将重启关联定时器；如果该定时器超时，中心节点没有继续收到关联请求信息，则认为第一层节点组网完成。

步骤 3 第一层节点组网完成后，中心节点请求第一层节点发送信标信息，并启动定时器，进行第二层节点组网。处于同层和未组网节点接收到第一层节点所发送的信标信息后，设定该一级节点为本节点的临时代理节点，并向所述临时代理节点发送关联请求信息，所述临时代理节点转发该关联请求信息至中心节点；中心节点接收到临时代理节点转发的关联请求信息，对关联请求信息进行处理，检查关联请求节点合法性，如果合法，发送关联确认信息至临时代理节点，临时代理节点将关联确认信息转发至请求节点；如果非法，则丢弃关联请求信息。所述关联确认信息包含有中心节点为请求节点分配的节点标识；如果定时器超时，中心节点没有继续收到关联请求信息，则认为第二层节点组网完成。

步骤 4 重复步骤 3，直至所有节点都完成组网。

图 4 所示为分层诱导算法组网过程，为了获得较多邻居通信链路，采用交叠分层聚类思想，其中，实线代表最优路径，虚线代表实际存在但不是首选最优的通信链路。中心节点 A 发送组网信标，收到信标的 B1、B2、B3 节点依次发送入网请求，中心节点 A 确认入网合法性后将 B1、B2、B3 节点作为第一层节点加入网络。等待定时器超时后，确认第一层组网完成，依次设置 B1、B2、B3 为临时代理节点，重启定时器开始第二层节点组网。直到最后没有节点请求入网，定时器超时，则认为组网完成。

从图 4 中可以看出，在实际逻辑拓扑中，层与层之间存在多条通信链路，同层中也存在合理的通信链路。为了保证 PLC 路由算法的高时效性，最优路径常常考虑最小跳数，当通信链路受到噪声影响，出现某条链路失效时，网络中还存在

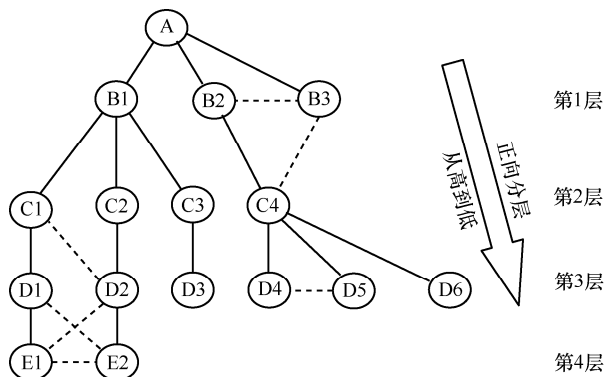


图 4 分层诱导算法组网过程

次优路径到达目的节点。研究的重点就是在某次链路失效时，如何快速寻找到次优路径完成通信。

在蚁群算法中有和诱导因子类似的概念：信息素。蚁群算法在组网和路由时都是根据信息素来计算下一跳选择。特别地，在最初没有信息素时，需要释放蚂蚁进行盲目随机迭代，但这并不适合 PLC 大规模组网的要求。蚁群算法信息素更新完成之后，由于 PLC 网络环境时变严重，每次只按照最优源路由的方式寻路也是不可取的。所以本文在其基础上提出了诱导算法：诱导因子来源于每次组网之后节点逆向迭代传递，具有目的性和方向性；诱导因子记录在各个节点，当源路由方式失效，则在当前节点通过查询到目的节点的诱导因子动态选择下一跳路径。

诱导因子传递过程如下：当组网完成之后，采用逆向诱导因子传递的方式，在每个高层节点记录下层提供的诱导因子信息，融合自身节点和低层节点提供的诱导因子，经过处理之后并再向上层传递。诱导因子逆向传递过程如图 5 所示。中心节点发出诱导因子收集命令，从最低层开始，D1 节点计算自身关联诱导因子默认为 1，D1 节点向邻居节点发送诱导因子 $Q(D1, D1)=1$ 。C1 节点接收到 D1 节点传递的诱导因子，结合分层、通信质量等因素计算得到一个 $Q(C1, D1)=a$ 的诱导因子，同时 C1 节点还接收到其他邻居节点传递的诱导因子，例如 $Q(C1, D2)=c$ ，若其他邻居节点传递



过程中还包含已有的 D1 节点的诱导因子, 此时保存最大值, 经过处理之后存储。等待第 3 层节点传递完毕, 第 2 层 C1 向上传递诱导因子, B1 节点接收到依次计算 $Q(B1, B1)=1, Q(B1, C1)=d, Q(B1, D1)=e, \dots, Q(B1, D2)=f$ 。从图 5 中可以看出, B1 会从 C1、C2 节点都获得包含 D1 节点的诱导因子, 默认选择最大诱导因子存储和传递。

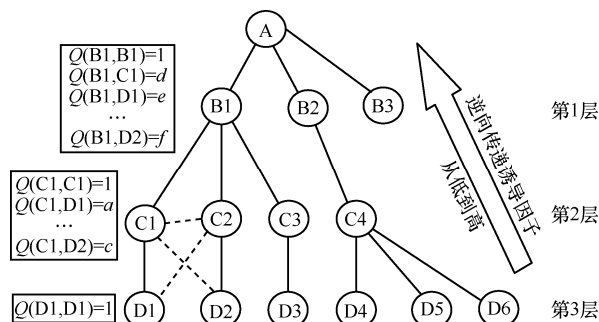


图 5 逆向诱导因子传递

特别地, 蚁群算法中并没有给出信息素具体存储的方式, 也没有对信息素产生的具体存储消耗进行说明。由本文所提出的诱导因子传递过程可得出如下简单结论: 诱导因子存储量最大的节点为中心节点, 设网络规模为 m , 中心节点有 a 个邻居, 则诱导因子最大存储量为 $m \times a$, 对于节点来说是可以接受的。

3.3 自动路由分析

分层组网和诱导因子传递完毕, 本文将分析通信链路质量因噪声影响导致通信失败的问题。分层诱导算法选择原理如图 6 所示, 某时刻路径 B-E 因为受噪声影响, 在蚁群算法中, 如果源路由路径通信链路发生第一次失败, 等待定时器超时后, 中心节点将重新送出搜索蚂蚁迭代搜索网络拓扑, 如果网络规模较大, 那么重新搜索过程将消耗大量时间。而在 PLC 通信网络中, 由于通信环境相对恶劣, 这种问题是时有发生。非交叠分簇路由算法虽然时效性强, 但如果发生通信链路受噪声影响而出现某链路中断时, 便造成一次通信的失败。交叠分簇路由算法虽然拥有较非交叠路由算法更多的连通路, 但是出现故障时往往

不能确定剩余路径或不能确定剩余路径中的较优路径, 导致此时通常无法选取通信路径或选取路径具有盲目性。

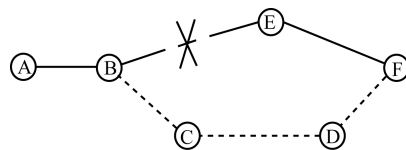


图 6 分层诱导算法选择原理

分层诱导路由算法的工作过程如下: 中心节点 A 将发送数据分组到子节点 F, 中心节点计算目的节点 F 对其邻居节点 B 诱导性因子 $Q(B, F)$ 更大, 进而计算比较 $Q(E, F)$ 和 $Q(C, F)$, 由于 $Q(E, F) > Q(C, F)$, 则路由路径为源 A-B-E-F, 路径具有最小跳数, 符合 PLC 路由强时效性的规则。但是当通信环境变差 (B-E 链路损坏), 那么首次通信将失败, 在 B 节点没有接收到 ACK 帧, 定时器超时, 此时, 数据分组在 B 节点重新选择一条次优路径 B-C-D-F 进行通信, 通信成功后将按照 F-D-C-B-A 路径返回中心节点。

特别地, 由于 PLC 网络的逻辑拓扑是一个基于树型的十分庞大的网络拓扑, 当通信链路某一段链路出现暂时性中断时, 等待一次超时时间很长, 如果能在出现通信失败的节点重新规划路径, 提高第一次通信成功率将会大大增加网络的传输效率。

3.4 几种具体情况的解决办法

3.4.1 诱导因子正反馈过程

在每次发送数据分组时, 都是对通信路径进行的一次验证, 成功与失败会被标记, 在空闲阶段, 将采用带预测 (失败标记次数) 选择性更新, 优先验证失败次数较多的链路路径, 若出现诱导因子改变, 即时更新链路诱导因子。成功次数较多, 则加深整条链路诱导因子的一个水平。

3.4.2 节点加入

新节点加入流程: 新节点上电之后, 搜索周围是否存在其他节点, 并选择一个作为自己的临时代理节点; 新节点在选择临时代理节点时, 若

搜索到的节点中有中心节点,则优先选择中心节点作为临时代理节点,若没有则依次选择一级节点、二级节点作为临时代理节点;若在同一级中,搜索到多个节点,则新节点选择信号质量最好的节点作为临时代理节点。

新增加节点通过临时代理节点向中心节点发送关联请求信息,中心节点收到关联请求信息之后,检查新增节点合法性,如果非法,则丢弃关联请求信息;如果合法,则为其分配节点标识,然后组装关联确认信息到临时代理节点,由临时代理节点转发到新增加节点。

中心节点发出关联确认信息之后,所经过的所有节点,即中间节点,需要根据关联确认信息内容,添加中间节点的诱导因子信息,即将本中间节点记录临时代理节点的子节点中增加了一个新子节点(新子节点就是发送关联请求的节点)。

3.4.3 节点退出

节点退出分为两种情况:节点主动退出和节点被动退出。

节点主动退出:如果节点由于某些原因需要退出网络(如线路更新、拆卸等问题),则需要事先通知其上层节点和网关节点。具体过程如下:节点发出离网请求,各邻居节点删除该节点在本地诱导因子,并向上层转发该节点离网请求,直到该节点诱导因子全部删除,代表该节点离网。

节点被动退出:如有节点非正常离网,在通信寻址失败或者更新诱导因子更新失败之后,若存在的所有链路将不能到达该节点,则判断为离网,删除该节点相关的所有存储的诱导因子。

3.5 算法公式

本文计算目标节点对当前节点的诱导因子并不是直接得到的,而是根据当前节点的邻居节点中所有目的节点的诱导因子值经过跳数衰减、通信成功次数和通信质量联合计算而得,具体迭代原理见诱导因子初始化过程,这里只给出递推公式。

诱导因子计算式为:

$$Q_{kd} = \begin{cases} \max\{\theta \cdot Q_{id} \cdot \left(\frac{1}{\eta}\right)^{\delta}\}, i \in \text{allowed}_k & (1) \\ 1, k = d \end{cases}$$

其中, Q_{kd} 为 k 节点到 d 节点的诱导因子。 θ 为诱导因子跳数衰减因子,以保证节点之间在可靠通信的基础上能够以最小跳数寻址路由。 Q_{id} 为 k 节点的邻居节点 i 到 d 节点的诱导因子。 $\left(\frac{1}{\eta}\right)^{\delta}$ 为根据通信质量下通信成功次数加深的因数。 $i \in \text{allowed}_k$ 为 k 节点的所有能到达的邻居节点。当 $k=d$ 时,表示计算本身的诱导因子,默认为 1。

如果有多个诱导因子同时传递,那么本地节点只保存最优的 3 个诱导因子作为备用寻路。

4 仿真结果

基于英属哥伦比亚大学(University of British Columbia, UBC)提供 NS-3 的 PLC 模块,在 NS-3 仿真平台验证了本文所提算法的有效性,其中路由仿真在 NS-3 仿真生成 XML 文件,导入 netanim 生成路由图。

为了更好地仿真,建立了如图 7 和图 8 所示的中心节点和子节点模型。

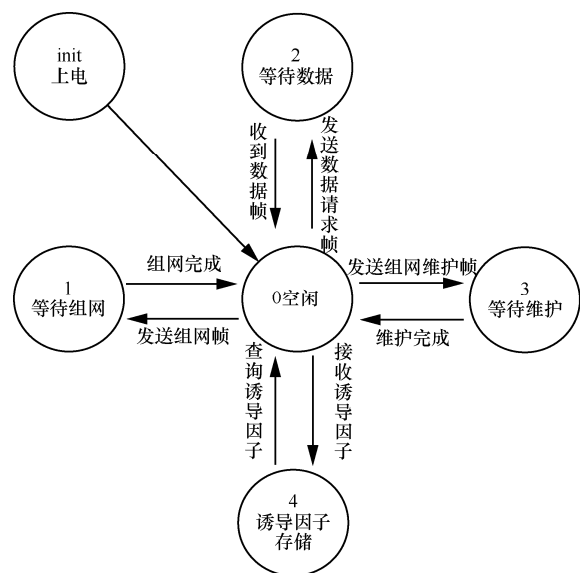


图7 中心节点仿真模型

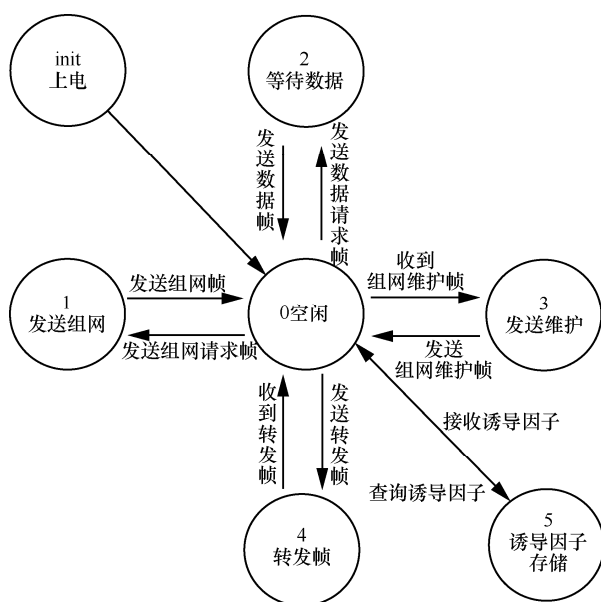


图8 子节点仿真模型

4.1 网络算法仿真

在 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 区域, 50 个节点随机分布, 中心节点位于中心区 (49.5, 50.0), 物理 ID 为 0。其余节点 ID 分别为 1, 2, 3, ..., 49。为了模拟电力线

信道的时变性和随机性, 节点间的有效通信距离设置为 $20 \sim 25\text{ m}$ 的随机值。

网络化进程采用了蚁群算法和本文交叠分层诱导算法。仿真结果分别如图 9 和图 10 所示。相同形状的节点属于同一逻辑层。显然, 只存在最优单一解的蚁群算法结构简单, 逻辑关系清晰。然而, 单一的通信链路导致抗干扰性差。在此基础上改进了单一链路路由方式, 在原有算法的基础上增加了邻居链接, 提供了备份链接, 降低了网络重构的频率, 在一定程度上保证了通信的可靠性和稳定性。

在实际路由过程中, 链路故障分析如图 11 所示, 中心节点与 38 号节点最优通信路径为 0-31-27-49-34-38 (图 11 中粗虚线路径), 当通信环境变差之后, 节点 27 到节点 49 链路失效, 节点 34 到节点 38 链路失效, 此时蚁群算法需要重新迭代寻找次优路径。如果采用交叠分层诱导的方法, 在节点 27 通信失效之后, 通过计算自身存储的对节点 38 的诱导因子, 选择下一跳为节点 15; 在节点

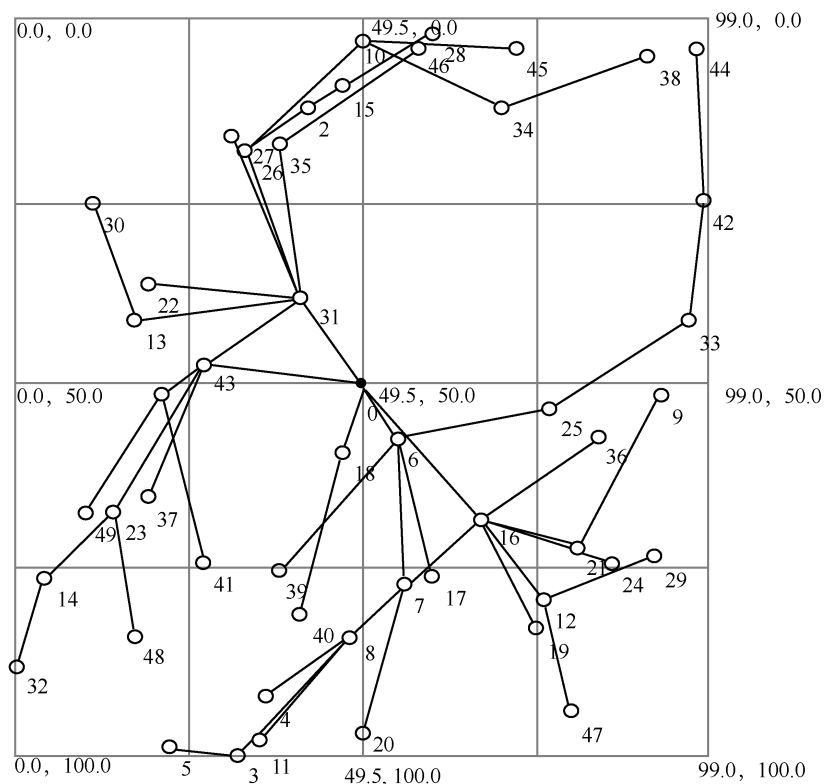


图9 蚁群最优单一路由网络组网结果

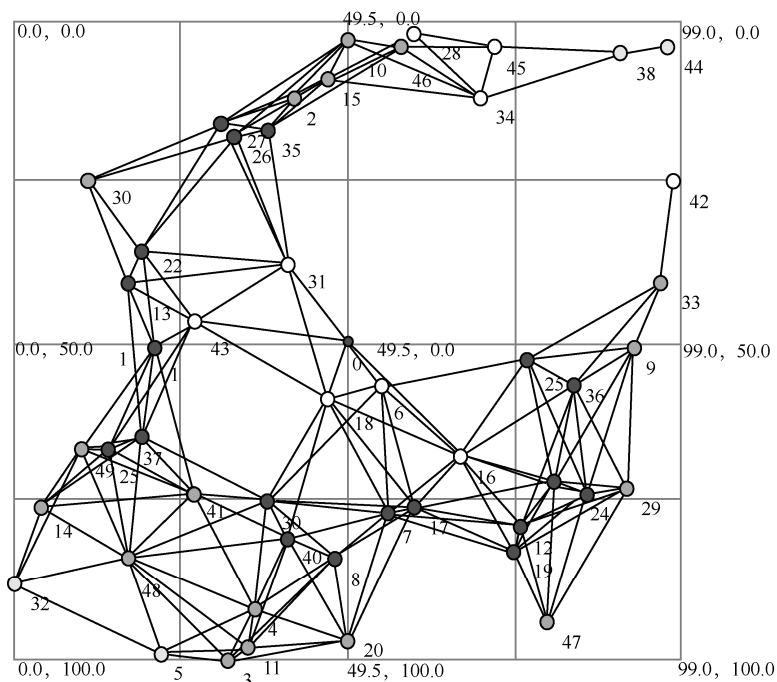


图 10 交叠分层聚类算法组网结果

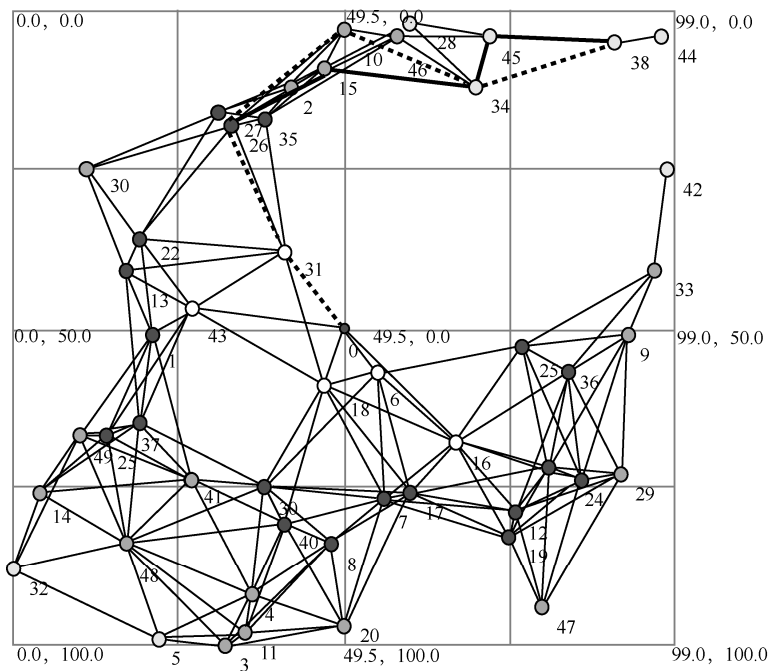


图 11 链路故障分析

34 通信失效之后, 通过计算自身存储的对节点 38 的诱导因子, 选择下一跳为节点 45, 则新的通信路径为 0-31-27-15-34-45-38 (图 11 粗实线路径)。

4.2 通信可靠性分析

蚁群算法只有当路由的每个路由节点都成功

通信, 才可以从中心节点通信到目的地完成。由于每个节点通信失效概率为 p , 则有:

$$P_0 = 1 - p \quad (2)$$

其中, P_0 是每个节点通信的成功率, 所以数据传输成功的概率 P 为:



$$P = P_0^m = (1 - p)^m \quad (3)$$

其中, m 是链路中的节点个数, 作为改进的分层诱导聚类算法:

$$P_0 = 1 - p \cdot [1 - (1 - p)^2]^2 \quad (4)$$

所以式 (3) 可改写为:

$$P = P_0^m = \left\{ 1 - p \cdot [1 - (1 - p)^2]^2 \right\}^m \quad (5)$$

图 12 为蚁群算法和交叠分层诱导算法的理论值分析, 当 $p=0.1$ 时, P 随 m 的增加而变化。由此可以得出结论: 在通信成功率一定的条件下, 蚁群算法在网络规模扩大到一定数量时已经无法满足良好的通信性能, 而交叠分层诱导算法仍然有较好的通信性能。

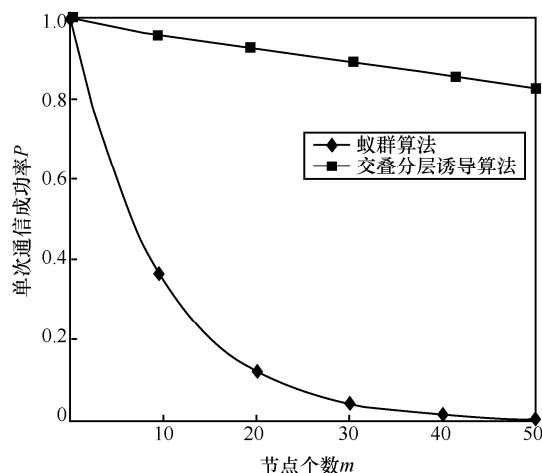


图 12 网络规模对通信可靠性影响

图 13 显示了在固定网络规模 ($m=50$) 的情况下, 两种方法通信成功率 P 随着链路通信失效概率 p 的增加的变化。从图 13 中可以看出, 交叠分层算法较蚁群算法更能适应通信环境恶劣的 PLC 网络。

为了得到更加真实的实验数据, 在 NS-3 中仿真了本文的交叠分层聚类算法的实际通信可靠性, 在链路失效概率 $p=0.1$, 节点数量 $m=5, 10, 20, 30, 40, 50$ 时, 随机对节点通信 200 次, 统计通信一次成功率次数, 仿真结果如图 14 所示。

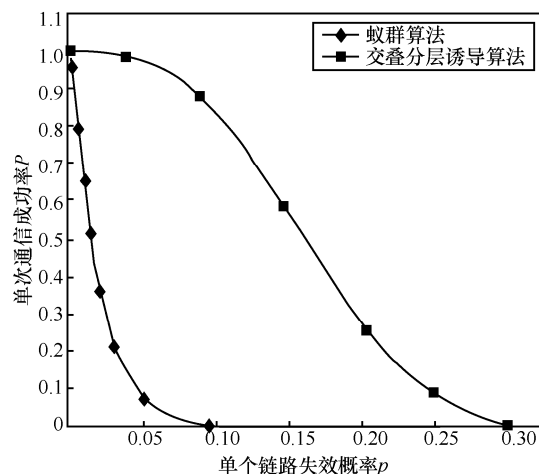


图 13 单个链路失效概率对通信可靠性影响

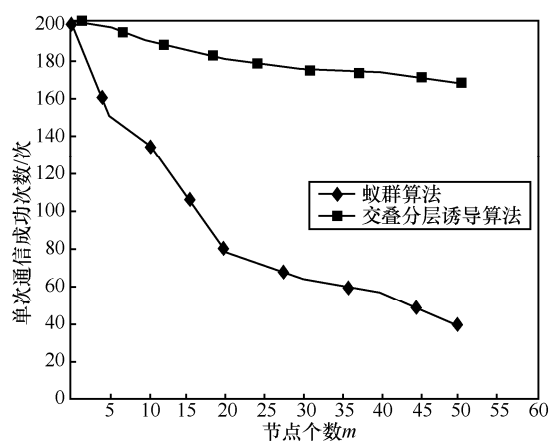


图 14 NS-3 可靠性仿真

从图 14 中可以看出, 由于通信节点是随机选定的, 所以蚁群算法仍然在小范围内存在单次通信成功的可能, 与理论分析收敛于无法正常通信 (单次通信成功率接近于 0) 有一定误差, 但仍与本文提出的分层诱导方式上有较大差距。

分层诱导路由方式通过交叠聚类的组网方式获得了更多的邻居链路, 且分布诱导因子的方式使得出现通信障碍时能够迅速寻找有效的剩余路径。结合本次仿真结果表明, 分层诱导算法在扩大 PLC 组网规模和提高通信可靠性上有较大突破。

5 结束语

本文首先分析了低压电力线通信网络拓扑的

特点, 寻找到在 PLC 网络特有的树型拓扑下除最优路由路径外还存在为数不多的次优路径。分析了传统聚类路由算法和蚁群算法的优缺点, 提出了一种新的交叠分层诱导的路由算法, 同时给出了链路故障恢复、节点连接和退出问题的具体解决方案, 在 NS-3 平台进行了有效仿真验证。仿真结果表明, 改进的路由算法可以实现网络建立、重建的快速和灵活, 具有较强环境适应性, 同时适应 PLC 扩大规模组网。

参考文献:

- [1] WANG Z, GAN Y, HOU H, et al. L-PLC channel characteristics prediction based on SVM[C]//IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, April 6-8, 2008, Sanya, China. Piscataway: IEEE Press, 2008: 1778-1783.
- [2] PIANTE M D, TONELLO A M. Characteristics of the PLC channel: reciprocity, symmetry and port decoupling for impedance matching[C]//International Symposium on Power Line Communications and ITS Applications, March 20-23, 2016, Bottrop, Germany. Piscataway: IEEE Press, 2016: 93-97.
- [3] GUO J, WANG Z, LV H, et al. Transmission characteristics of low-voltage distribution networks in China and its model[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1341-1348.
- [4] MENG J. Noise analysis of power-line communications using spread-spectrum modulation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(3): 1470-1476.
- [5] YUAN F S. Improvement of PLC reliability by using adaptive code-distance channel coding[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2008, 29(188): 44-48.
- [6] ZHANG Y, WENG G, CAO Y. Distribution line carrier communication in networked power quality monitoring system[J]. Transactions of China Electro Technical Society, 2010, 25(6): 116-121.
- [7] 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 X S, QI J J, SONG Q T, 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.
- [8] 戚佳金, 徐殿国, 周岩, 等. 低压电力线通信网络特性模型与组网算法[J]. 中国电机工程学报, 2009(16): 56-62.
QI J J, XU D G, ZHOU Y, et al. Characteristics model and routing algorithm of power-line communications over low-voltage distributions[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(1): 71-76.
- [9] COLSON C M, NEHRIR M H, WANG C. Ant colony optimization for microgrid multi-objective power management[C]//Power Systems Conference and Exposition, March 15-18, 2009, Seattle, WA, USA. Piscataway: IEEE Press, 2009: 1-7.
- [10] SREEJITH S, CHANDRASEKARAN K, SIMON S P. Application of touring ant colony optimization technique for optimal power flow incorporating thyristor controlled series compensator[C]//TENCON 2009-2009 IEEE Region 10 Conference, January 23-26, 2009, Singapore. Piscataway: IEEE Press, 2009: 1-6.
- [11] KE C, XIN G, HU X. Routing algorithm of power line carrier meter reading based on ant colony genetic algorithm[C]//IEEE International Conference on Industrial Informatics, July 25-27, 2012, Shanghai, China. Piscataway: IEEE Press, 2012: 196-201.
- [12] HAN Q, QI F, SU Y, et al. Services paths planning for electric power communication network based on improved ant colony optimization[C]//15th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS), September 25-27, 2013, Hangzhou, China. Piscataway: IEEE Press, 2013: 1-3.
- [13] HONG L, CHU D, BO H, et al. Topology discovery algorithm based on ant colony algorithm of power line carrier sensor network[C]//International Conference on Communication Software and Networks, February 27-28, 2009, Macau, China. Piscataway: IEEE Press, 2009: 102-105.
- [14] JIA-JIN Q I, LIU X S, DIAN-GUO X U, et al. Simulation study on cluster-based routing algorithm and reconstruction method of power line communication over lower-voltage distribution[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(4): 65-71.
- [15] RAN Q H, YU-CHENG W U, MEI-JUAN Q I. Research on automatic routing method of low-voltage power line carrier network[J]. Power System Protection & Control, 2011, 39(10): 53-58.
- [16] 戚佳金, 刘晓胜, 徐殿国, 等. 低压电力线通信分簇路由算法及网络重构[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(4): 65-71.
QI J J, LIU X S, XU D G, et al. Simulation study on cluster-based routing algorithm and reconstruction method of power line communication over lower-voltage distribution[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(4): 65-71.
- [17] 杨梅, 宗群龙. 基于节点相关度的电力线载波通信路由算法[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(3): 95-97.
YANG M, ZONG Q L. Routing algorithm of power line communication network based on node relevance[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(3): 95-97.
- [18] HUANG C, NING Y. Study on cluster-based dynamic routing algorithm in Power Line Communication network[C]//IEEE International Conference on Automation and Logistics, August 15-17, 2012, Zhengzhou, China. Piscataway: IEEE Press, 2012: 461-465.
- [19] 冉庆华, 吴玉成, 祁美娟. 低压电力线载波通信网络自动组网方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(10): 53-58.
RAN Q H, WU Y C, QI M J. Research on automatic routing method of low-voltage power line carrier network[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(10): 53-58.
- [20] 刘明, 张治中, 程方. 5G 与 Wi-Fi 融合组网需求分析及关键技术研究[J]. 电信科学, 2014, 30(8): 99-105.
LIU M, ZHANG Z Z, CHENG F. Analysis of network demand and research on the key technology for integration of 5G and Wi-Fi[J]. Telecommunications Science, 2014, 30(8): 99-105.
- [21] 卓琨, 张衡阳, 郑博, 等. 无人机自组网研究进展综述[J]. 电



信科学, 2015, 31(4): 134-144.

ZHUO K, ZHANG H Y, ZHENG B, et al. Progress of UAV Ad Hoc network: a survey[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(4): 134-144.

- [22] 李洁. 互联网汽车发展及关键技术分析[J]. 电信科学, 2016, 32(8): 34-38.

LI J. Introduction and critical technology analysis of internet of vehicle[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(8): 34-38.

- [23] 刘甲男, 杜彦洁, 孟宪义. 基于互联网思维的能源互联网发展[J]. 电信科学, 2016, 32(3): 176-182.

LIU J N, DU Y J, MENG X Y. Development of energy internet based on internet thinking[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(3): 176-182.

[作者简介]



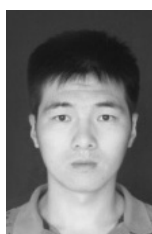
郑建宏 (1961-), 男, 重庆邮电大学通信与信息工程学院教授、博士生导师, 教育部移动通信工程研究中心主任, 重庆重邮信科通信技术有限公司副总经理兼 CTO, 主要从事通信工程、信号与信息处理方面的工作。



陈鹤云 (1992-), 男, 重庆邮电大学通信与信息工程学院硕士生, 主要研究方向为嵌入式物联网。



周鹏光 (1992-), 男, 重庆邮电大学通信与信息工程学院硕士生, 主要研究方向为大规模 MIMO。



徐浩 (1992-), 男, 重庆邮电大学通信与信息工程学院硕士生, 主要研究方向为 5G 信道。