

电力线载波抄表系统的负载均衡算法研究

潘丹,邵卫

(中南民族大学 工商学院,湖北 武汉 430065)

摘要: 为提高电力线载波通信系统的可靠性和性能,论述了远程抄表系统的架构和特点,分析了路由算法研究的必要性,提出了基于遗传算法的负载均衡路由算法。该算法通过网络节点变化、拓扑结构动态优化目标并自动组网。仿真与试验结果表明,该算法能为电力线载波远程抄表系统提供有效的自动组网方式,保证系统通信的负载均衡,与传统编号顺序查询路由方式相比,减小网络延迟性达 20% 以上,提高网络联通性超过 15%。

关键词: 电力线载波通信;远程抄表系统;路由算法;负载均衡;遗传算法

中图分类号: TN914; TM73

文献标识码: A

Research on load-balance algorithm for meter reading system based on power line communication

PAN Dan, SHAO Wei

(Business College, South-central University For Nationalities, Wuhan 430065, China)

Abstract: In order to improve system reliability and performance, this paper describes the architecture and characteristic of the meter reading system, analyzes the importance of the routing algorithm for meter reading system, and proposes a load-balance routing algorithm based on the genetic algorithm which can adjust the topology of the system dynamically to satisfy the optimization target. Through the simulation and experiments, the results showed that this algorithm can supply an effective way for organizing the meter reading system based on power line communication, ensure the load balance of all nodes. Compare to the traditional numerical order routing methods, this algorithm can reduce the network delay of up to 20 percent, improve network connectivity more than 15%, effectively improve network reliability and performance.

Key words: power line communication; meter reading; routing algorithm; load balance; genetic algorithm

近年来,电力行业的远程自动抄表技术蓬勃发展。抄表系统从应用环境划分,可以分为面向企业的用电现场服务与管理系统和面向居民的远程抄表系统 RMS (Remote Meter-Reading System)。对于用电现场服务与管理系统,由于企业用户每月的用电量巨大,除了抄读用电现场的相关数据外,还需要具有防窃电以及用电调度等功能。在实际的应用中,用电现场服务与管理系统的结构是 1 个电表配备 1 个终端,终端通过 GPRS/CDMA 无线通信网络将用电现场数据实时地传送到数据服务器。对于面向居民的远程抄表系统,如果也像用电现场服务与管理系统一样在每个电表上使用一个具有 GPRS/CDMA 无线通信功能的终端,昂贵的设备费用会

令客户无法承受。因此,在实际应用中,面向居民的 RMS 常常使用电力线载波通信 PLC (Power Line Communication) 技术,从而形成了基于电力线载波的远程抄表系统 RMSPLC (Remote Meter-Reading System based on Power Line Communication)^[1]。电力线载波通信通常根据电压分为高(>100 kV)、中(1 kV~100 kV)、低(<1 kV)电压网络^[2],其中以低压电力线载波通信的应用最为广泛。在家庭自动化和智能建筑里,电力线载波通信为各种传感以及报警设备提供网络链接。庞大的低压电力线网络为通信提供了良好的基础,然而,电力线载波的信道很复杂,电力线对于通信感兴趣的频率衰减非常大,而且电力线载波网络的噪声会随着接入电网仪器的数量和

网络与通信 Network and Communication

阻抗特性而改变^[3-4]。因此,在基于电力线载波的集中抄表系统中,其通信网络存在时变性、频率选择性、强干扰性等问题。所以,设计出有效的基于电力线载波的集中抄表系统有效的自动路由算法对提高系统的可靠性起到重要的作用^[5]。

目前,对于 PLC 网络路由算法的研究不多,少量的研究成果只考虑到了路由算法的智能化而忽略了系统硬件平台的实际计算能力和存储容量,因此,这些算法不宜使用在实际工程中。本文提出了基于遗传算法的负载均衡路由算法。

1 基于电力线载波的远程抄表系统

1.1 系统的架构以及相关定义

基于电力线载波的远程抄表系统由数据服务器、集中器 SN(Sink Node)、采集器 DCN(Data Collection Node)构成,其拓扑结构如图 1 所示。在该系统中,数据服务器位于电力系统管理部门,用来存储居民用电相关数据;集中器位于小区变压器区,用来控制采集器采集电表数据并通过 GPRS/CDMA 无线网络传送相关数据到数据服务器;采集器被安装在电表箱中,通过 RS485 接口或者脉冲接口采集 1 个或者多个电表。集中器和采集器、采集器与采集器之间通过电力线载波进行通信。在实际的工程实现中,采集器的主控芯片采用 Atmega16L,集中器的主控芯片采用 Atmega64L,路由路径和数据存储采用 AT45DB161B 芯片。

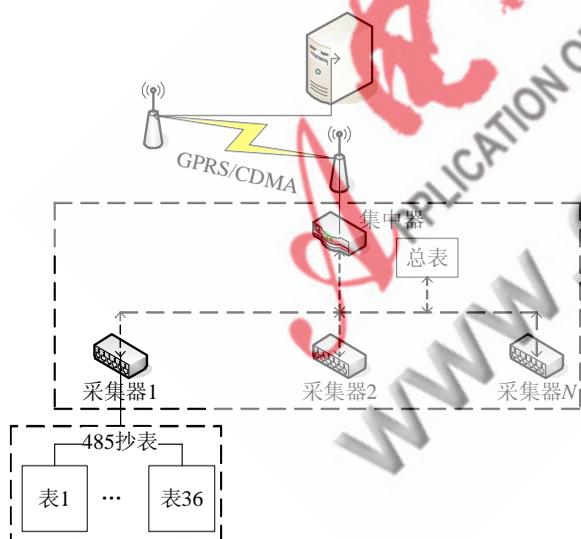


图 1 基于电力线载波的远程抄表系统

为了对系统的路由算法进行描述,下面对算法相关的术语进行定义。

(1)采集器编号。每个采集器有一个类似于 IP 网络的采集器编号,在一个集中器控制的电力线载波通信网络中,集中器的编号是唯一的。

(2)中继。由于电力线载波通信的距离不远,因此集中器不能和每一个采集器进行直接通信。当集中器通过

采集器 A 去读取采集器 B 的数据时,称采集器 A 为采集器 B 的中继。

(3)中继级数。采集器 A 通过 N 个采集器中继后才能与集中器进行通信,则采集器 A 的中继级数为 N 。

(4)中继序号。采集器 A 是采集器 B 的中继,则 A 的采集器编号是采集器 B 的中继序号。

(5)采集器负载。采集器 A 被 N 个另外的采集器当作中继,则采集器 A 的采集器负载为 N 。

1.2 系统的特点

由于电力线载波通信具有时变性、频率选择性、强干扰性等特点,基于电力线载波的远程抄表系统有自己的组网特点:

(1)网络稳定性差,通信丢包率高,网络拓扑变化大。这些特点要求网络通信协议的容错能力加强,在网络的采集器出现通信失败、增加新的采集器以及撤除了采集器后,通信协议要对网络进行动态的管理。

(2)低成本要求导致的弱计算能力。由于远程抄表系统的用户是面向普通居民,所以成本必须被控制。低成本导致了硬件的计算能力很弱。这样,路由算法只有在集中器实现,采集器不用保存路由路径。

(3)路由算法的工程实现要求简单。大部分智能路由算法其实是目标优化问题,而目标优化问题的代表算法包括遗传算法和蚁群算法等^[6-8]。这些算法的实现过程大多是经过多次迭代,这样导致计算资源被大量占用。所以弱计算能力的远程抄表系统需要占用计算资源少的简化路由算法。

1.3 路由算法对系统的作用

由于系统环境和硬件的特点,研究出易于实现、性能优越的路由算法,对于提高系统的可靠性和通信的有效性是十分重要的。其作用主要体现在:

(1)系统的灵活性在路由算法的支持下得到提高。由于远程抄表系统的设备是动态地增加或者减少的过程,一方面,采集器个数随着用户的增多而增加,另一方面,采集器可能随着使用时间的变化而更新。这样,电力线通信设备的拓扑是动态变化的,只有动态的路由算法才能满足拓扑变化的性能要求。

(2)系统的适用性在路由算法的支持下加强。由于电力线载波通信的强衰减性,其直接通信距离十分有限。在路由算法的支持下,电力线载波通信网络将具有无线自组织网络的多跳路由功能^[9-10]。这样,电力线载波网络的通信距离被延长,系统的适用性得到加强。

(3)系统的抗干扰能力提高。电力系统的信道性能具有时变性,在信道存在较强的干扰源时,距离干扰源近的采集器的通信受到严重影响。当某采集器通信因为受干扰而被中断时,路由算法将对网络的路由表进行动态调整,减少由于通信中断采集器带来的连锁通信故障。

2 电力线载波抄表系统的路由算法

2.1 电力线载波抄表系统的路由算法流程

电力线载波抄表系统的路由算法分为集中器路由算法和采集器路由算法。集中器路由算法需要对整个网络的路由路径进行选择 and 存储,并在与采集器进行通信时,在数据报中指明路由路径采集器之间进行通信。采集器路由算法不需要维护网络的路由路径,只需要按照 2.4 节的通信协议进行数据传送。

集中器路由算法的流程图如图 2 所示。在图 2 中,适应度值的定义和遗传算法的染色体选择分别如 2.2 节和 2.3 节中描述。传送数据按照 2.4 节的通信协议来对数据进行组包。

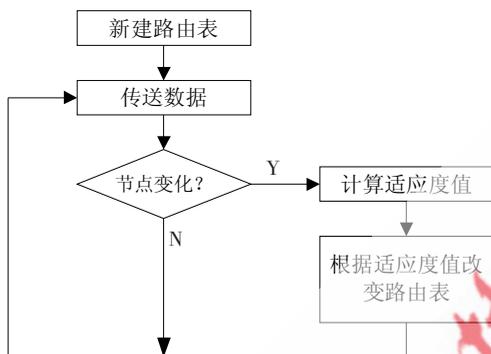


图 2 基于遗传算法的路由算法流程图

2.2 网络适应度函数

在电力线载波网络的拓扑被确定后,网络就具有了无线自组织网络的一些特点。为了对网络的性能进行评价,需要对采集器中继适应度函数、采集器存活适应度函数、链路负载适应度函数以及网络适应度函数进行计算,这些函数值被计算出来后,将作为遗传算法相关操作的依据。这些适应度函数的定义如下:

采集器中继适应度函数 RF (Relay Fitness) 用来评价采集器与集中器通信路径的优劣,其定义为:

$$RF = \min \sum m_i \quad (1)$$

式中, m_i 代表采集器的中继级数。

采集器存活适应度函数 AF (Active Fitness) 用来评价采集器接入网络的优劣,其定义为:

$$AF = \min \sum (1 - \frac{N_c}{N}) \quad (2)$$

式中, N 为采集器个数, N_c 为接入到网络中的采集器个数。

链路负载适应度函数 LLF (Link Load Fitness) 用来评价某个拓扑下的链路负载优劣,其定义为:

$$LLF = \min \sum_{n=1}^{N_1} |\rho_n - \rho| \quad (3)$$

式中, ρ_n 是采集器的下一级子采集器个数, ρ 是中继级数相同的采集器的下一级平均采集器个数,其定义为:

$$\rho = \frac{N_2}{N_1} \quad (4)$$

式中, N_1 是同级的采集器个数, N_2 是下一级采集器总数。

网络适应度函数 NF (Network Fitness) 是由节点选择适应度函数、节点存活率适应度函数和链路负载适应度函数通过加权而得到的评价函数,用来评价网络性能的优劣,其定义为:

$$NF = \alpha_1 RF + \alpha_2 AF + \alpha_3 LLF \quad (5)$$

式中, α_1 、 α_2 、 α_3 是权重,满足 $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1$ 。

2.3 遗传算法的染色体选择

在本系统研究的路由算法中,采用简化的遗传算法进行路由路径的优化选择。遗传算法是模拟自然界生物进化机制发展起来的随机全局搜索和优化方法。遗传算法中的个体或当前近似解被编码为由字母组成的串,即染色体,染色体的值被称之为基因。基因能在域决策变量上被唯一地描述。在本系统的路由算法中,用 1 个 8 bit 二进制数字表示采集器的中继编号,这个 8 bit 二进制数字被选为遗传算法的基因。如果对应采集器的中继为集中器,其基因则为 00000000。在集中器中,所有的基因根据采集器编号顺序构成一个染色体,基因所在染色体中的字节位置代表对应采集器的编号。通过染色体,可以计算出采集器中继适应度函数、采集器存活适应度函数、链路负载适应度函数以及网络适应度函数的函数值,以供遗传算法的选择等操作中使用。同时,当网络的染色体确定后,电力线载波远程抄表系统的网络拓扑也被确定下来。例如,如果电力线载波网络的染色体为字符串 a: 00000000 00000000 00000000 00000001 00000010 00000011 00000011 00000100, 其对应的网络拓扑如图 3 所示。

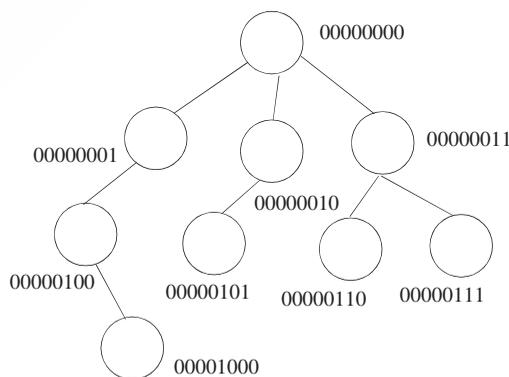


图 3 染色体 a 对应的网络拓扑

2.4 路由算法的通信协议

由于采集器和集中器的计算能力都是很有限制的,因此路由表的维护都是在集中器进行。集中器在网络初始的时候建立网络路由表,在网络正常运行时,对路由表进行动态维护。基于中继路径的通信协议数据包地址域数据描述如图 4 所示。

...	目标地址	中继地址 1	中继地址 2	...	中继地址 n	源地址	...
...	中继地址 1	中继地址 1	中继地址 2	...	中继地址 n	集中器地址	...
...	中继地址 k	中继地址 1	中继地址 2	...	中继地址 n	中继地址 k-1	...
...	中继地址 n	中继地址 1	中继地址 2	...	中继地址 n	中继地址 n-1	...
...	中继地址 n-1	中继地址 n-2	中继地址 n-3	...	中继地址 1	中继地址 n	...

A 集中器命令 B 中继 k 接收命令 C 采集器接收命令 D 采集器回应数据包

图 4 带有中继路径通信协议数据包的地址域数据

在图 4 所示的通信协议数据包中,数据包分为上行数据包(数据从采集器发送到集中器)和下行数据包(数据从集中器发送到采集器)。数据包 A 为集中器发送的下行命令,其目标地址为中继地址 1,中继地址 1、中继地址 2 等是集中器与目标地址采集器通信需要经过的采集器编号,中继地址 n 是需要上传数据的目标采集器地址。数据包 B 代表采集器地址为 k-1 的采集器在收到采集器地址为 k-2 的采集器的命令后,将数据包格式进行改变后的数据包。数据包 C 为采集器地址为 n 的采集器收到采集器地址为 n-1 的采集器发送的数据包。数据包 D 是采集器地址为 n 的采集器将数据回送给集中器的数据包的地址域地址,数据上行的处理过程与下行的处理过程是一样的。

3 算法仿真

在算法的仿真中,考虑一栋 10 层楼,每层楼有 10 个采集器,采集器之间能否进行通信简化成空间距离。考虑一栋大楼的布局规范,任意 2 个节点的坐标由 A_1 与 A_2 给定, $A_1(x_1, y, z_1)$ 与 $A_2(x_2, y, z_2)$ 的距离 d 通过公式(6)给定。假设 L 是采集器直接通信设定阈值,如果 $d \leq L$,则 2 个采集器之间可以直接进行通信,否则需要通过中继方式进行通信。

$$d = \begin{cases} |x_1 - x_2| & z_1 = z_2 \\ |x_1 + x_2| + |z_1 - z_2| & z_1 \neq z_2 \end{cases} \quad (6)$$

3.1 负载均衡性

考虑到集中器的计算能力比较弱,在遗传算法的实现过程中,首先对基于电力线载波的网络拓扑进行确定,以保证公式(1)和公式(2)的要求。算法对拓扑的确定过程是分层进行的,首先通过集中器选择出能直接与集中器进行通信的采集器,归为集合 J_1 ,然后通过 J_1 选择出中继级数为 1 的采集器,归为集合 J_2 ,依次类推,将所有的采集器接入到网络中。在仿真中, $AF=0$ 。因此,算法的难点是通过动态优化得到最小的 LLF 。图(5)和图(6)是用按顺序和简化遗传算法进行选择的采集器负载比较,从结果可以看出,简化遗传算法可以很大程度地提高系统的负载均衡性。

3.2 网络联通性

采集器序号顺序算法没有考虑网络发生故障的情

况,而简化遗传算法充分考虑了网络的拓扑结构和网络联通性。从图 7 所示的仿真结果来看,在 20%采集器发生故障的情况下,简化遗传算法维持 100%的联通性,顺序算法只有 91%的联通性;随着故障点的增加,简化遗传算法的网络联通性均优于顺序算法。

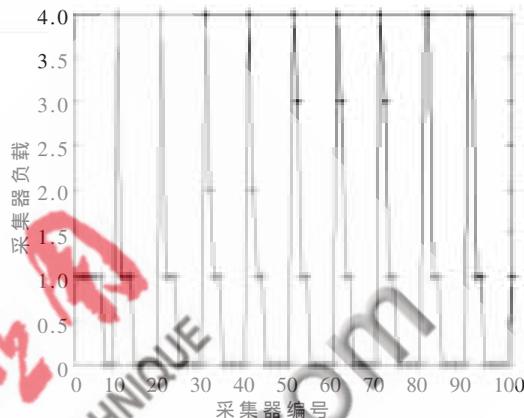


图 5 按照采集器编号排序进行选择的采集器负载

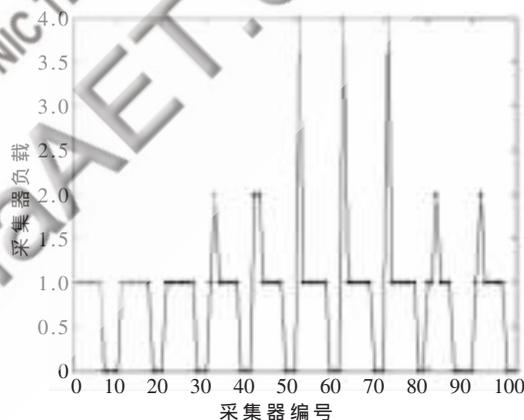


图 6 按照简化遗传算法进行选择的采集器负载

3.3 网络延迟性

网络延迟是反映网络运行状态的一个直观指标。在电力抄表系统中如果网络延迟的阈值越大,抄表数据将不能及时更新。从如图 8 所示的仿真结果来看,由于简化遗传算法动态考虑到网络的距离和时间参数,形成中继器,网络延迟比顺序算法减少了 20% 以上,网络性能得到了大大的提高。

仿真的算法在实际系统中的应用,效果证明,该路由算法在不增加系统成本的前提下对提高系统的可靠性和稳定性有很大的作用,已经被应用在浙江省电力企业相关产品中。

在基于电力线载波的抄表系统中,路由算法对中继的选择往往没有考虑到节点的负载均衡问题,选择中继一般以编号为顺序查询或随机选取。这样建立的路由表,有些采集器的负载很重,当采集器通信发生故障时,

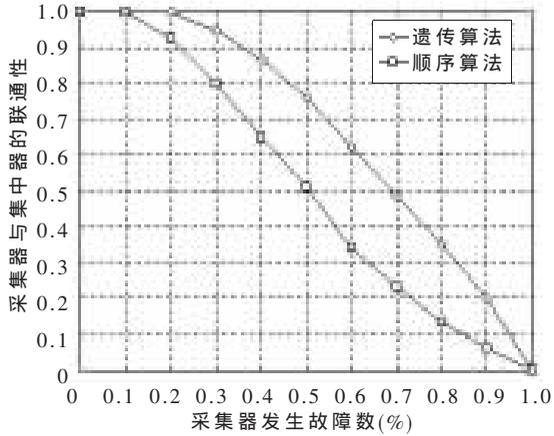


图7 采集器发生故障下的网络联通性

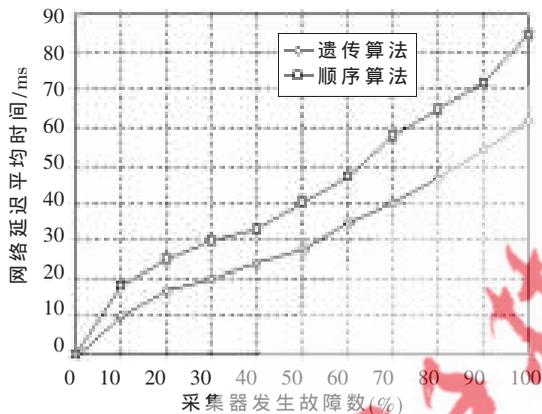


图8 采集器数量增多的网络延迟性

大量的采集器通信会受影响。

本文为基于电力线载波的抄表系统提出了一种多目标优化的路由算法。这种路由由算法考虑了系统的负载均衡问题并基于简化的遗传算法实现,减小了网络的延迟性,提高了网络联通性,非常适用于计算资源和存储资源都不丰富的硬件平台。通过仿真和实验结果分析,

算法能很好地提高基于电力线载波的抄表系统的性能。
参考文献

- [1] 葛郁枫. 低压电力线载波自动抄表系统及应用[J]. 能源与环境, 2006, 3(4): 78-80.
- [2] FERREIRA H C, GROVK H M, HOOIJEN. Power line communications: An overview[J]. Digital Object Identifier, 1996, 2(24): 558-563.
- [3] 姜霞, Nguimbis, 程时杰. 低压配电网载波通信噪声特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(11): 30-35.
- [4] 程晓荣, 苑津莎, 侯思祖, 等. 中压宽带电力线通信接入及信道特性测试与分析 [J]. 电力系统及自动化, 2005, 29(14): 69-72.
- [5] 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[J]. 2006, 26(21): 76-81.
- [6] DEGARDIN V, LIENARD M, DEGAUQUE P. Optimization of equalization algorithm for power line communication channel[J]. Electronics Letters, 2003, 39(5): 483-485.
- [7] KHANNA R, LIU H, CHEN H H. Self-Organization of sensor networks using genetic algorithms [C]. ICC apos, 2006.
- [8] TORO F D, ORTEGA J, FERNANDEZ J, et al. PS-FGA: A parallel genetic algorithm for multiobjective optimization [R]. Proceedings of the 10th Euromicro Workshop on Parallel, Distributed and Network-based Processing, 2002.
- [9] XU Y, BIEN S, MORI Y, et al. Topology control protocols to conserve energy in wireless ad hoc networks [R]. Technical Report 6, University of California, Los Angeles, Center for Embedded Networked Computing, 2003.

(收稿日期: 2009-04-09)