

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210008

双模异构配电场域网多径并发传输动态决策算法

叶方彬, 孙剑桥, 姜驰, 赵羚, 汪金荣

(国网浙江省电力有限公司营销服务中心, 浙江 杭州 310007)

摘要: 为提高配电场域网节点间的传输速率和连通率, 构建了具有高速电力线宽带载波和微功率无线通信能力的混合多径双模异构配电场域网。首先论述了该场域网的拓扑结构、组网过程以及维护机制。其次设计了一种滑动窗口加权平均链路度量方法, 采用改进的跳数受限Bellman-ford最短路径算法计算混合多径路由, 并使用最近最多使用策略对各节点路由进行分散更新。在此基础上设计了一种自适应多径并发数据传输动态决策算法。最后将构建的该场域网应用到配电信息采集系统中, 并在实验室和工程现场对其性能进行了测试。测试结果表明, 该场域网比单模场域网在提高抄收率和缩短抄收时间方面效果明显。

关键词: 电力系统; 配电网络; 双模异构场域网; 多径并发传输; 高速电力线宽带载波; 微功率无线

Dynamic decision-making algorithm for multi-path parallel transmission of a dual-mode heterogeneous field network for a power distribution grid

YE Fangbin, SUN Jianqiao, JIANG Chi, ZHAO Ling, WANG Jinrong

(Marketing Service Center, State Grid Zhejiang Electric Power Limited Company, Hangzhou 310007, China)

Abstract: In order to improve the transmission and connection rates between the nodes of a power distribution field network, a hybrid multi-path dual-mode heterogeneous power distribution field network with high speed power broadband carrier and micro-power wireless communication capabilities is designed. First, the topological structure, the networking process and network maintenance mechanism of the field network are discussed. Secondly, a link measurement method based on a sliding window weighted average is designed, and hybrid multipath routing is calculated using a modified Bellman-Ford shortest path algorithm with limited hops and is refreshed in time intervals using the most recently used strategy. An adaptive multi-path parallel transmission dynamic decision-making algorithm is designed. Finally, the field network is applied to the power distribution information collection system, and tested in the laboratory and on site. The test results show that the dual-mode field network is more effective than the single-mode field network in increasing the copying rate and shortening the copying time.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 1100-201919158A-0-0-00).

Key words: power system; power distribution grid; dual-mode heterogeneous field network; multi-path parallel transmission; high speed power broadband carrier; micro-power wireless

0 引言

配电场域网是解决智能电网建设中最后一公里的通信问题, 电力线载波(PLC)与无线通信是配电场域网建设中两种主要通信方式^[1-2]。电力线载波利用

已架设电力线为载体进行通信, 线路建设成本低, 但在配电场域网应用过程中, 用电负荷起伏大, 并有大量散居用户, 以致线路阻抗时变性强、长距离线路干扰严重, 再加上配电变压器对载波信号的阻隔作用, 使得电力线载波在配电场域网中的应用受到制约^[3-4]。无线通信具有无需布线等特点, 但在配电场域网面对高密度服务, 以及高层、地下建筑等复杂环境下, 信号衰减严重, 通信质量不稳定^[5]。

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(1100-201919158A-0-0-00)

在智能电网建设过程中, 要求配电场域网在各种应用场景下, 都具有较高的连通率、传输速率和可靠性, 采用单一种通信方式很难满足上述要求^[6]。一些基于电力线载波的双模异构配电场域网方案被提出, 如 PLC + LoRa^[7]、PLC + 5G^[8]、PLC + Wi-Fi^[9]、PLC + RF^[10]以及 PLC + LTE^[11]等, 这些方案基本上采用“一主一辅”组网方式, 各通信方式独立组网并建各自路由, 即独立双模方式, 通信时从两个网络中选取最佳路由采用单路径方式进行数据传输。

目前采用正交频分复用技术的高速电力线宽带载波(HPLC)在系统建模^[12-13]、信道分析^[14-15]、阻抗匹配^[16]以及抗干扰技术^[17]等方面已被深入研究, 并在配电场域网中得到了应用^[18-19]。本文采用 HPLC 与微功率射频无线(RF)双模通信方式, 发挥两通信方式优点, 互补缺点, 组建混合双模异构配电场域网, 全网各节点拥有统一动态混合路由表, 采用自适应多径并发数据传输策略, 以提高配电场域网的连通率和传输速率, 并在实验室和工程现场验证了该方案的有效性。

1 双模异构场域网结构与组网

1.1 双模异构场域网结构

双模异构配电场域网拓扑结构如图 1 所示。

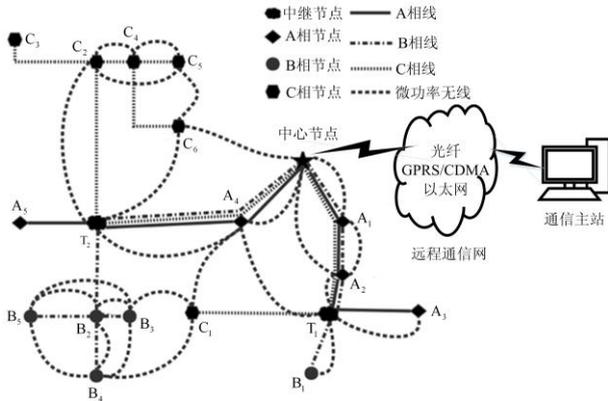


图 1 双模异构场域网拓扑图

Fig. 1 Topology of dual-mode heterogeneous field network

中心节点起网关作用, 负责组网、网络管理与维护等功能, 通过光纤、以太网等远程通信网与配电系统管理中心的通信主站进行数据交换, 通过 HPLC 或 RF 通信方式与网络中各节点进行数据交换。T₁ 与 T₂ 为 HPLC 通信的中继节点, 拥有三相线通信能力和数据中继转发功能; 节点 A₁—A₅ 具有 A 相线 HPLC 通信能力, B₁—B₅ 具有 B 相线 HPLC 通信能力, C₁—C₅ 具有 C 相线 HPLC 通信能力; 网

络中所有节点都具有 RF 通信能力。

1.2 双模异构场域网组网

1) 中心节点组网

在场域网中, 中心节点是其网关, 只有中心节点有权发起组网, 其组网流程如图 2 所示。

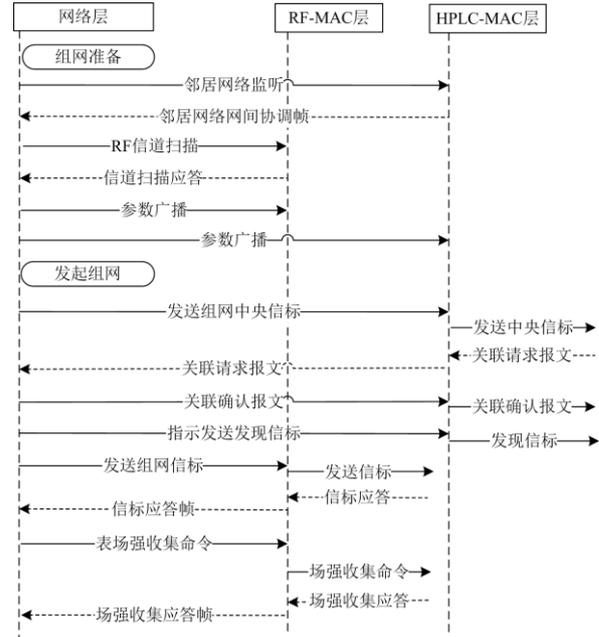


图 2 中心节点组网过程

Fig. 2 Networking process of central node

(1) 组网准备

中心节点首先在其 HPLC 链路的 MAC 层发起对网络间协调帧的侦听, 如果收到邻居网络发出的协调帧, 则与邻居网络按一定优先原则协调并确定本网络识别号和信标时隙等内容, 并依据本节点存储的允许入网站点 MAC 地址的表项集合, 确定本网络规模, 同时设定 HPLC 通信的信标时隙数量、时隙长度、载波 SNR 门限等参数; 其次在其 RF 链路 MAC 层约定信道组的各信道发起能量扫描, 如果扫描结果超过预先设定阈值, 则标记该信道组可用, 并设定 RF 通信时隙号、层次号、信标轮次以及场强门限等, 网络参数设定完成后, 分别通过 HPLC 和 RF 的广播信道进行全网通告。

(2) 发起组网

首先, 中心节点在其 HPLC 链路 MAC 层发送中央信标, 在 TDMA 时隙指示它周围一级节点向其发送关联请求报文, 中心节点对请求入网的节点进行身份验证后, 在 TDMA 时隙发送关联确认报文; 当一级节点接入网络后, 中心节点指示这些节点发送发现信标, 以触发新入网节点周围二级节点发送入网请求; 当二级节点入网后, 中心节点又指示新

入网二级节点发送发现信标,以触发该二级节点周围三级节点发送入网请求。以此循环,使距离中心节点远且层级高的节点也加入网络。同时中心节点指示各级中继节点发送代理信标,以向各级节点通知中央信标中时隙安排等内容。

其次,中心节点在其 RF 链路的可用信道上发送组网信标,依据各节点回复的信标应答帧,建立临时邻居表,依据临时邻居表,向各节点发送场强收集命令帧,依据各节点回复的场强收集应答帧,建立邻居场强表。

2) 游离节点入网

游离节点入网流程如图 3 所示。

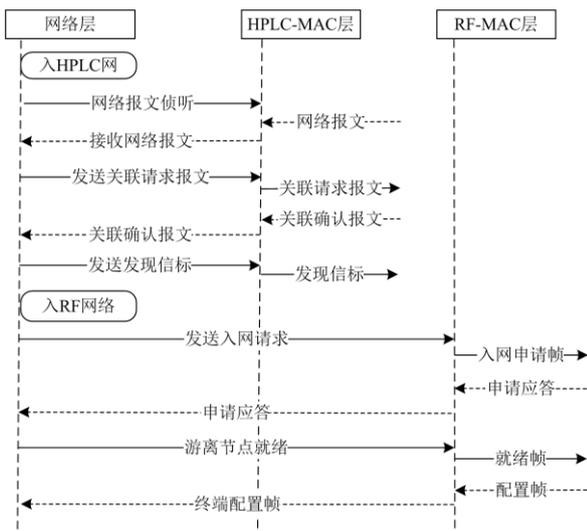


图 3 游离节点入网流程

Fig. 3 Access process of free node

游离节点开机后,首先通过 HPLC 链路 MAC 层接收并评估网络报文,选择信道质量好的站点为其代理站点,依据报文中的指示,发送关联请求报文。通过收到的关联确认报文判断是否允许入网,若允许,依据中心节点的分配来设置本节点的终端标识,并发送发现信标。若不允许,则依次向 RF 链路的每个信道组发送入网请求帧,在收到的所有入网请求应答帧中,选择一条最优路径,构造并发送游离节点就绪帧,并依据中心节点回复的配置节点帧,进行相关参数配置。

3) 网络动态维护

在组网和网络维护过程中,关键目标是创建并维护实时路由表。中心节点在组网时路由的创建,主要依据接收到的信标帧信息,主要包括发现列表报文,关联请求报文,关联确认报文和场强收集应答帧等报文,来判断各节点的信道质量;在组网完成后,路由的维护主要依据接收到的各节点定时发送

的发现列表报文、通信成功率上报报文等维护报文和收集的邻居场强表来判断各节点的信道质量。

中心节点依据在组网和网络维护中收集到的各节点信道质量信息计算各节点信道度量值,依据度量值计算到网络各节点的最优多径路由,建立混合多径路由表,并依次通过构造并发送配置参数帧,对各节点的路由表进行更新。

2 创建混合多径路由表

配电场域网内各节点部署后,节点移动性较小,网内节点主要与中心节点进行数据交换,节点之间数据交换量小,因此,配电场域网采用集中式路由,由中心节点管理全网混合多径路由表,重点维护各节点与中心节点之间的最优多径路由,并由中心节点通过配置参数帧更新网络各节点所存储的路由表。

2.1 链路度量

期望传输时间(ETT)被用来估算链路成功传送数据包的时间,计算如式(1)所示。

$$ETT = \frac{1}{S_r \cdot S_t} \cdot \frac{D}{B} \quad (1)$$

式中: S_r 和 S_t 分别表示接收和传送数据的成功率; D 表示数据包大小; B 为链路带宽。但 ETT 被证实不能反映链路时变性,采用加权累计传输时间(WCE)对 ETT 进行了改进^[20],其计算如式(2)所示。

$$WCE = (1 - \alpha) \cdot \sum_{i=1}^n ETT_i + \alpha \cdot ETT_j \quad (2)$$

式(2)中, $0 \leq \alpha \leq 1$ 为随场景可选参量,式中前段体现了该链路端到端的历史时延,后段选取当前 ETT 值。研究表明, WCE 没有考虑链路干扰,干扰敏感度量累计传输时间(IAW)被提出^[21],其计算如式(3)所示。

$$IAW = (1 - \alpha) \cdot \sum_{i=1}^n \frac{ETT_i}{SINR_i} + \alpha \cdot \frac{ETT_j}{SINR_j} \quad (3)$$

式中, $SINR_i$ 和 $SINR_j$ 表示无线链路历史信噪比和当前实时信噪比,则节点 u 与节点 v 之间链路的信噪比计算如式(4)所示。

$$SINR_i(u) = \frac{P_u(v)}{N + \sum_{\omega \in \eta(u)-v} \tau(\omega) P_u(\omega)} \quad (4)$$

式中: N 表示背景噪声; $P_u(v)$ 为节点 u 收到节点 v 的信号强度; $\eta(u)$ 为节点 u 可接收到的数据分组节点集合; $\tau(\omega)$ 为分组节点平均分组产生率。

本文依据双模异构配电场域网 HPLC 和 RF 链路特点以及获取相关参数的便利性,对 IAW 链路度量方法进行了简化,设计了一种滑动窗口加权平均

链路度量方法(SWA), 对链路历史统计值和瞬时值进行加权平均, 以提高链路度量值的收敛速度, 设定滑动窗口数为 4, 其定义如式(5)所示。

$$SWA = \frac{1}{4} \cdot \sum_{i=1}^4 \left(\beta_i \cdot \frac{ETT_i}{SNR_i} \right) \quad (5)$$

式(5)中计算最近 4 个 ETT 的值, 权值 β_i 依次取(0.1, 0.2, 0.3 和 0.4), 越靠近当前的值, 所取权值越大, 以减轻链路信道多变的影响; SNR 表示链路信噪比, 体现链路当前负载及环境干扰状况。各节点在网络维护周期中, 通过接收邻居节点发送的发现列表报文, 计算出与邻居节点通信成功率和时延, 从本节点物理层获取链路信噪比, 分别计算出本节点到邻居节点 RF 链路和 HPLC 链路的度量值。

2.2 创建混合多径路由表

异构配电网中, 中心节点负责组网控制、网络维护等功能, 在一个路由周期内, 通过接收网络各节点的计算列表报文、通信成功率上报报文和场强收集应答帧, 计算全网中各节点间通信链路的度量值, 动态维护网络节点 RF 链路邻接矩阵和 HPLC 链路邻接矩阵, 矩阵值为节点间链路的度量值, 若两节点无通信链路, 其值设置为无穷大, 中心节点掌握着整个网络的通信情况。

1) 混合多径路由表创建流程

考虑多径传输端到端时延、包乱序率和重排序时延等因素对多径并行传输的影响, 多径传输路径数不应超过 3 条^[22-23], 本文设计的多径路由算法生成的路径数控制为 3 条。为防止某些链路失效导致整个数据传输中断, 多径路径之间相同链路数应最少。混合多径路由表创建流程如图 4 所示。

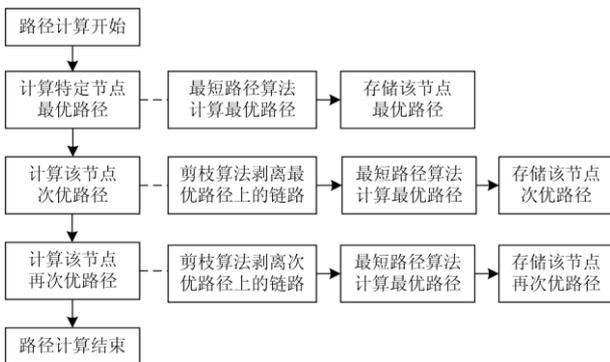


图 4 混合多径路由表创建流程

Fig. 4 Creation process of hybrid multipath routing table

路由开始计算前, 首先取 RF 链路邻接矩阵和 HPLC 链路邻接矩阵对应位置最小值作为最优邻接矩阵相应位置值。

依据最优邻接矩阵, 采用跳数受限最短路径算法计算最优路径。

计算次优路径时, 首先采用剪枝算法从最优邻接矩阵中剥离已生成的最优路径链路, 剥离时, 若该链路两节点间仍有大于当前链路度量值的另一通信链路度量值, 则将最优邻接矩阵中该两节点链路值替换为该值, 若无, 则该值设置为无穷大, 表示两节点无通信链路, 最后用剥离完成后的最优邻接矩阵采用跳数受限最短路径算法生成次优路径。

同理, 生成再次优路径时, 需从最优邻接矩阵中剥离已生成的最优路径和次优路径链路后, 采用最短路径算法生成再次优路径。

2) 跳数受限最短路径算法

若路由中的中继节点数过多, 一方面中继节点转发数据需要消耗时间, 另一方面也会影响数据传输的可靠性, 因此, 对生成的路由中的中继节点数进行限制, 本文对 Bellman-Ford 算法^[24]进行了改进, 对生成的最短路径中的中继节点数, 即边数进行限制, 改进后的算法如下。

依据最优邻接矩阵节点数 m 和链路数 n , 可生成一个具有 m 个节点 n 条边的无向图 $G(m, n)$, m 个节点分别编号为 $1, 2, 3, \dots, m$, 中心节点编号为 1; 用 $v(i, j)$ 表示节点 i 和节点 j 之间边的权值, 即链路度量值; 用 $d(i)$ 表示节点 i 到中心节点的距离, $d_0(i)$ 为上一次迭代完成后节点 i 到中心节点的距离; 生成路径的边数限定为 k ; 定义集合 P 为上轮迭代距离变小点的集合; 定义集合 Q 为本轮迭代距离变小点的集合。算法实现过程如下。

第一步, 算法初始化。首先令中心节点到本身的距离为 0, 其他节点到中心节点的距离为正无穷大, 即 $d(\mathbf{1})=0, d(i)=+\infty, i \in [2, \dots, m]$, 把中心节点 1 加入到集合 P 中, 迭代次数变量赋予初值 1; 同时设定上次迭代即第 0 次迭代, 中心节点的距离为 0, 即 $d_0(\mathbf{1})=0$, 其他各节点的距离为正无穷, 即 $d_0(i)=+\infty, i \in (2, \dots, m)$ 。

第二步, 假定在第 h 次 ($h \geq 1$) 迭代中, 按照节点编号依次使用集合 P 中的各节点 i 计算节点 j 到中心节点的距离:

$$d(j) = \min_{(i, j) \in n} [d(j), d_0(i) + v(i, j)]$$

假如 $d(j) < d_0(j)$ 并且当节点 j 不在集合 Q 中, 则把节点 j 加入到集合 Q , 同时从集合 P 中删除节点 i 。

第三步, 当集合 Q 为空, 或者迭代次数等于限定的边数 k 时, 运算结束, 那么 $d(i)$ 就是节点 i 到中心节点的最短距离, 若集合 Q 非空并且迭代次数小于 k 时, 执行第四步。

第四步, 把集合 P 清空, 同时把集合 Q 中的节点移至集合 P 中, 再清空集合 Q , 接着对节点

$i(i \in [1, \dots, m])$, 令 $d_0(i) = d(i)$, 并使迭代次数变量增 1 后, 再跳转到第二步重复运行。

2.3 多径路由表的更新

依据场域网中各节点重要性以及数据传输的频次, 对各节点路由的更新采用最近最多使用分散更新方法, 方法如下:

- 1) 给网内各节点设一定时器, 并置相同初值, 依据节点重要性, 设置不同递减步进, 重要性越高, 递减步进越大;
- 2) 若某节点定时器递减为 0 时, 更新该节点多径路由, 通过新生成的最优路径向该节点发送路由更新指令, 并置该节点定时器为初值;
- 3) 当中心节点与网络某节点进行一次数据交换后, 对该节点多径路由进行更新, 并置该节点定时器为初值;
- 4) 若某链路实时度量值与所记录的历史度量值变化超过 25% 时, 更新与该链路相连节点的多径路由, 并置该节点定时器为初值。

本方法避免路由集中更新对中心节点和网络带来的瞬时大负载, 也可使重要节点和通信频次高的节点获得较高路由更新机率, 网络也可实时感知网络状态的突变。

3 多径并发数据传输

当网络节点 S 向本网内某节点 D 发送数据时, 若该节点不为中心节点, 则由中心节点转发。节点 S 查询其到中心节点多径路由表, 假定查询出有三条可用路径, 路径 P_1 为 $S \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow D$, P_2 为 $S \rightarrow C \rightarrow D$, P_3 为 $S \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow G \rightarrow D$, 路径中链路类别与度量值如图 5 所示, 其中实线链路表示为 HPLC 链路, 点线表示 RF 链路。

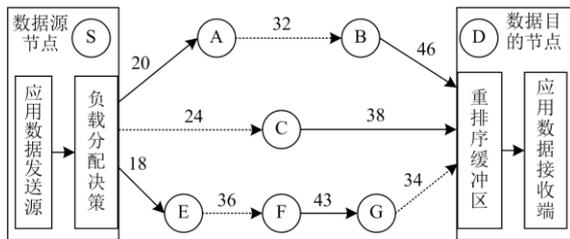


图 5 多径并发传输示意图

Fig. 5 Schematic of multipath parallel transmission

图 5 中节点 S 依据多径传输时延的预测值, 采用自适应多径并发传输策略向各路径分配数据, 各路径传输数据, 数据最后汇集到目的节点 D, D 对收到数据重新排序后, 送本节点应用层进行数据处理。

3.1 路径传输时延预测值

路径预测传输时延 T_{pa} 主要包括节点处理时延

T_{pr} (即为源节点分配数据时延和目的节点重排数据时延)、传输时延 T_{tr} (即为路径所含链路传输时延之和) 和路径所含中继节点转发时延 T_{sw} , 计算如式(6)所示。

$$T_{pa} = T_{pr} + T_{tr} + T_{sw} \quad (6)$$

针对每条路径, 节点处理时延和单个节点转发时延假定相同, 本文分别用 10 和 12 为例说明。则路径 P_1 传输时延为

$$T_{pa_1} = T_{pr} + 20 + T_{sw} + 32 + T_{sw} + 46 = 132$$

路径 P_2 传输时延为

$$T_{pa_2} = T_{pr} + 24 + T_{sw} + 38 = 84$$

路径 P_3 传输时延为

$$T_{pa_3} = T_{pr} + 18 + T_{sw} + 36 + T_{sw} + 43 + T_{sw} + 34 = 177$$

3.2 自适应多径传输策略

源节点依据多路径传输时延预测值, 自适应在多径负载均衡传输、单径传输、多径冗余传输三种模式间自主切换。其策略如下:

- 1) 设置路径传输时延门限值, 若多径路由表中某路径传输时延预测值小于门限值时, 则该路径标记为活跃路径;
- 2) 如果活跃路径数大于等于 2, 在活跃路径间采用多径负载均衡传输模式, 以提高节点吞吐量和传输速率, 减少链路数据拥堵, 降低端到端传输时延;
- 3) 如果活跃路径数为 1, 说明此时其他路径传输质量较差, 则在该活跃路径上进行单径传输, 避免多径传输时数据乱序造成的影响;
- 4) 如果活跃路径数为 0, 说明网络传输整体质量差, 采用多径冗余传输模式, 对传输数据包进行本地复制生成副本, 分别在最优路径和次优路径上进行传输, 以提高端到端递交率。

3.3 多径传输数据分配

假定节点多径传输时有 m 条活跃路径, 第 i 条活跃路径预测传输时延为 T_{pa_i} , 在 T 时间内需传送数据总包数为 N , 则该路径被分配数据包数计算如式(7)所示。

$$N_{pa_i} = \frac{T/T_{pa_i}}{\sum_{j=1}^m (T/T_{pa_j})} \cdot N = \frac{1/T_{pa_i}}{\sum_{j=1}^m (1/T_{pa_j})} \cdot N \quad (7)$$

为减少接收端接收数据的乱序问题, 活跃路径间数据包分配方法如下:

- 1) 依据数据包发送顺序, 依次给数据包编号, 设置一个计数器并置初值 0, 置计数器计数单位时长与链路度量值单位相同;
- 2) 传输起始时, 依次为每个活跃路径分配一个

数据包, 将数据包送该路径发送缓冲区, 随后启动计数器;

3) 当计数器值能被某路径传输时延值整除时, 就向该路径发送缓冲区依次分配一个新的数据包;

4) 重复第 3) 步, 直到所有数据包被分配, 计数器停止计数并置 0。

以 10 个数据包为例, 在图 5 所示的 3 条活跃路径之间数据包分配次序如图 6 所示。

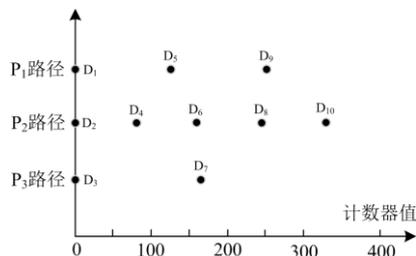


图 6 多径传输数据包分配示例图

Fig. 6 Example of multipath transmission packet allocation

在图 6 中: 路径 P_1 分配数据包依次为 D_1 、 D_5 、 D_9 ; 路径 P_2 分配数据包为 D_2 、 D_4 、 D_6 、 D_8 、 D_{10} ; 路径 P_3 分配数据包为 D_3 、 D_7 。该分配方法能减轻接收节点收到数据包的乱序问题。

4 实验测试

将构建的具有 HPLC 和 RF 通信能力的混合多径双模异构配电场域网, 应用到配电信息采集系统的智能电表上, 分别在实验室和工程现场, 对其在该系统中的性能进行测试。

4.1 实验室环境测试

在实验室搭建了如图 7 所示 16 节点菱形拓扑结构测试平台, 平台各节点的智能电表均放入各自屏蔽箱中, 节点之间通信由程控衰减器进行调节控制, 实现阻断、开放节点链路通信功能, 测试双模通信切换效果, 以模拟在不同通信场景下场域网的组网等功能, 搭建完成的测试环境如图 8 所示。

在测试中, 各节点放入具有双模通信的智能电表, 分别采用混合双模多径传输算法、混合双模单径传输算法、独立双模单径传输算法进行测试, 同时与单独采用 HPLC 通信的智能电表和单独采用 RF 通信的智能电表进行对照测试。测试中, 抄表软件使用 ToolStudio, 串口波特率设为 9 600 bps, 调试软件使用 WpsCacTool, 串口波特率设为 115 200 bps, 抄表数据项数为 6, 发送间隔为 300 ms, 最大并发数为 60。针对不同算法双模场域网、单模 HPLC 场域网和单模 RF 场域网, 分别连续测试 5 天, 调节不同节点衰减器的衰减率, 各模

拟 150 次不同组网环境, 测试其组网成功率、抄收率以及抄收时间等指标, 测试结果均值如表 1 所示。

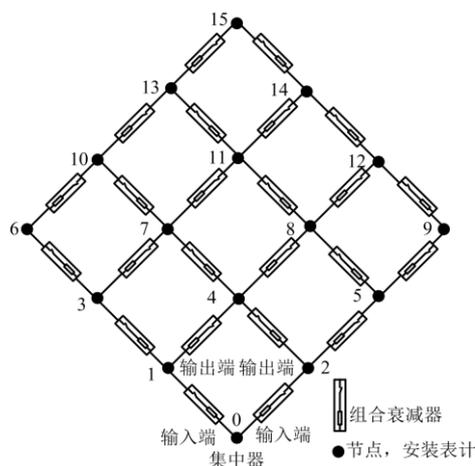


图 7 实验室测试平台拓扑图

Fig. 7 Topology of test platform in laboratory



图 8 实验室场域网测试环境

Fig. 8 Test environment of field network in laboratory

表 1 场域网实验室测试数据

Table 1 Test data of field networks in laboratory

场域网的类型	组网成功率/%	抄收率/%	停复电上报成功率/%	台区识别率%	抄收时间/s
混合双模(多径)	99.76	99.83	99.65	99.88	0.572
混合双模(单径)	99.65	99.69	99.63	99.83	0.638
独立双模(单径)	99.16	99.21	99.17	99.65	0.673
HPLC	96.74	96.62	95.12	93.83	0.879
RF	94.74	93.48	93.67	91.65	1.037

从表 1 数据可以看出, 采用具有 HPLC 和 RF 双模通信场域网的各项测试指标, 比只采用 HPLC 通信或 RF 通信的单模场域网均有明显提升, 其中前四项测试指标均高于 99%, 抄收时间低于 0.7 s; 在采用双模通信的场域网中, 采用混合双模多径传输的场域网性能最好, 其中组网成功率达 99.76%, 抄收率达 99.83%, 抄收时间降至 0.572 s。

4.2 现场测试

选取浙江省金华市某城乡结合部某台区进行

测试, 该台区具有低中高层建筑群以及散居住房, 具有典型的城乡配电场域网的使用环境, 该台变共 396 户。同时部署混合多径双模场域网、HPLC 场域网和 RF 场域网进行对比测试。采用并发抄表模式, 抄表数据项数为 9, 发送间隔为 300 ms, 最大并发数为 50, 超时设置为 30 s。共计测试 20 天, 每天进行 10 次数据汇集, 测试的每天平均抄表时间和抄收率如图 9 与图 10 所示。

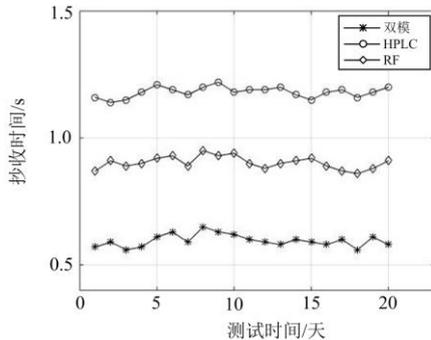


图 9 场域网工程现场抄收时间

Fig. 9 Copying time of field networks in jobsite

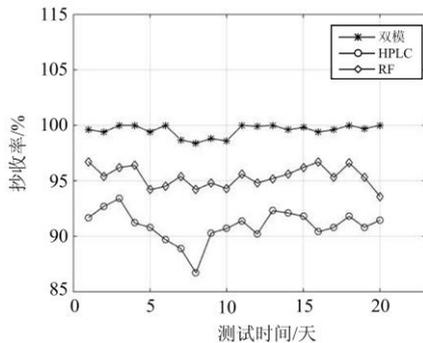


图 10 场域网工程现场抄收率

Fig. 10 Copying success rate of field networks in jobsite

从图 9 数据可计算出, 该台区 396 户抄表平均时间为: 双模场域网 0.596 s, HPLC 场域网 0.90 s, RF 场域网 1.18 s。从图 10 可看出, 双模场域网平均抄收率 99.58%, 比 HPLC 场域网和 RF 场域网有明显提升, 且稳定性好。

5 结论

配电场域网是解决智能电网建设中最后一公里的通信技术问题, 为提高该网络传输速率和连通率, 本文构建了具有 HPLC 和 RF 通信能力的混合多径双模异构配电场域网, 全网各节点拥有统一动态混合路由表, 采用多径并发数据传输策略, 并将该场域网应用到智能电网配电信息采集系统中, 在实验室和实际环境下对其性能进行了测试, 测试结果表

明: 1) 采用 HPLC 和 RF 的双模通信方式, 可实现这两种通信方式的优势互补, 提高双模异构场域网的连通率, 稳定性和鲁棒性; 2) 采用多径并发数据传输策略, 可提高网络中各节点的数据传输速率, 增强网络的实时性。此外, 该双模异构场域网还可应用到智能家居控制系统中, 实现冰箱、空调等家用电器的控制。

参考文献

- [1] 何奉禄, 陈佳琦, 李钦豪, 等. 智能电网中的物联网技术应用与发展[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 58-69. HE Fenglu, CHEN Jiaqi, LI Qin hao, et al. Application and development of internet of things in smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 58-69.
- [2] CHEN Haoyong, WANG Xiaojuan, LI Zhihao, et al. Distributed sensing and cooperative estimation/detection of ubiquitous power internet of things[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(2): 151-158. DOI: 10.1186/s41601-019-0128-2.
- [3] 王新刚, 赵舫. 计及通信资源优化的电力线载波通信路由算法研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(22): 79-83. WANG Xingang, ZHAO Fang. Research on power line carrier communication routing algorithm considering communication resource optimization[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(22): 79-83.
- [4] YAACOUB J P A, FERNANDEZ J H, NOURA H N. Security of power line communication systems: issues, limitations and existing solutions[J]. Computer Science Review, 2021, 39(1): 324-343.
- [5] 张泰民. 面向智能电网无线终端的安全通信和抗干扰关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020. ZHANG Taimin. Research on secure communication and anti-jamming technologies for wireless devices in smart grid[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [6] TANIA G, RICHA B. Advanced communication technologies and intelligent systems communication technologies in smart grid at different network layers: an overview[C] // Proceedings of International Conference on Intelligent Engineering and Management, June 13-15, 2020, London, UK: 177-182.
- [7] 汪晓华, 唐明, 宋玮琼, 等. 满足国家电网公司标准体系的 LoRa 用能采集专网技术研究及应用[J]. 电测与仪表, 2020, 57(8): 8-12. WANG Xiaohua, TANG Ming, SONG Weiqiong, et al. Research and application of dedicated LoRa electrical energy acquisition network under state grid standard system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(8): 8-12.
- [8] 陈皓勇, 李志豪, 陈永波, 等. 基于 5G 的泛在电力物联网[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 1-7.

- CHEN Haoyong, LI Zhihao, CHEN Yongbo, et al. Ubiquitous power internet of things based on 5G [J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(3): 1-7.
- [9] 坚葆林, 姜毅龙, 李许军. 基于 WiFi 通信的智能用电监控装置的设计[J]. *电气传动自动化*, 2017, 39(5): 59-62.
JIAN Baolin, JIANG Yilong, LI Xujun. Design of intelligent power monitoring device based on WiFi communication[J]. *Electric Drive Automation*, 2017, 39(5): 59-62.
- [10] ABOAGYE S, IBRAHIM A, NGATCHED T M N, et al. Design of energy efficient hybrid VLC/RF/PLC communication system for indoor networks[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(2): 143-147.
- [11] 唐元春, 林文钦, 陈力, 等. 面向电力无线专网的分层异构网络接入协同选择方案[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(19): 71-78.
TANG Yuanchun, LIN Wenqin, CHEN Li, et al. An access synergetic selection approach in hierarchical heterogeneous network oriented to power wireless communication[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(19): 71-78.
- [12] 刘玉新. 低压电力线载波通信系统建模和分析[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2019.
LIU Yuxin. Modeling and analysis of low-voltage power line carrier communication system[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2019.
- [13] FREDDY A P B, MANUEL B V, FERNANDO C R. Throughput analysis of wavelet OFDM in broadband power line communications[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 16727-16736.
- [14] KUMAR A, GHORAI S K. BER performance analysis of OFDM-based integrated PLC and MIMO-VLC system[J]. *IET Optoelectronics*, 2020, 14(5): 242-251.
- [15] 金鑫, 肖勇, 曾勇刚, 等. 低压电力线宽带载波通信信道建模及误差补偿[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(9): 2800-2808.
JIN Xin, XIAO Yong, ZENG Yonggang, et al. Modeling and error compensation for low-voltage broadband power line communications[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(9): 2800-2808.
- [16] WANG Bingting, CAO Ziping, SONG Fei. Design and evaluation of a T-shaped adaptive impedance matching system for vehicular power line communication[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 73843-73854.
- [17] 景皓, 张智远, 庞先海, 等. 一种低压电力线载波通信主动抗干扰技术[J]. *南京航空航天大学学报*, 2018, 50(5): 701-707.
JING Hao, ZHANG Zhiyuan, PANG Xianhai, et al. Active anti-jamming technique for low voltage power line carrier communication[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2018, 50(5): 701-707.
- [18] MLYNEK P, RUSZ M, BENESL L, et al. Possibilities of broadband power line communications for smart home and smart building applications[J]. *Sensors*, 2021, 21(1): 1-17.
- [19] 王鸿玺, 唐如意, 吴一敌, 等. 基于 HPLC 的智能抄表技术在客户侧泛在电力物联网中的研究及应用[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(3): 92-97.
WANG Hongxi, TANG Ruyi, WU Yidi, et al. Research and application of smart meter reading technology based on HPLC in customer side universal power internet of things[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(3): 92-97.
- [20] MAHMOOD K, NAZIR B, KHAN I A, et al. Search-based routing in wireless mesh network[J]. *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*, 2017, 2017(1): 246-261.
- [21] 吴永红. 多接口多信道无线 Mesh 网络信道分配与路由度量算法研究[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2019.
WU Yunhong. Research on channel assignment and routing metric algorithm for multi-radio multi-channel wireless mesh network[D]. Shenyang: Liaoning University, 2019.
- [22] WU Huan, WEN Xiangming, LU Zhaoming, et al. Adaptive multipath selection based Markova chain in the heterogeneous internet of things[J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2019, 2019: 2076-2089.
- [23] 杜文峰, 赖力潜, 吴真. 基于传输时延预测的多路径并发传输数据分配算法[J]. *软件学报*, 2015, 26(8): 2041-2055.
DU Wenfeng, LAI Liqian, WU Zhen. Transmission delay prediction based data allocation scheme for concurrent multipath transfer[J]. *Journal of Software*, 2015, 26(8): 2041-2055.
- [24] Mohan J, DEVANAGAONKAR S M, GARUR V V, et al. An improved approach for eliminating the loop in hybrid software defined network using modified Bellman-Ford algorithm[J]. *Journal of Interconnection Networks*, 2020, 20(4): 126-141.

收稿日期: 2021-01-04; 修回日期: 2021-03-23

作者简介:

叶方彬(1973—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为电力智能计量、用电信息采集; E-mail: yefangbin2020@163.com

孙剑桥(1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力智能计量、用电信息采集; E-mail: 340317416@qq.com

姜驰(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力智能计量、用电信息采集。E-mail: 381534421@qq.com

(编辑 周金梅)