

未来大数据环境下的配用电通信网虚拟网络架构及应用

亓峰¹ 唐晓璇¹ 邢宁哲² 季浩³

(1. 北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室, 北京, 100876; 2. 国网冀北电力有限公司, 北京, 100053; 3. 国网天津市电力有限公司, 天津, 300000)

摘要: 根据智能配电网的通信需求, 本文提出了基于无线 Mesh 网和电力线通信网的智能配电网通信框架。在此框架的基础上, 设计了一个遗传算法和启发式算法, 为不同类型的业务分别建立虚拟网络并将其映射到异构的物理网络中, 通过增加传输分集来保证实时业务的可靠性。通过仿真, 验证两种映射算法在保证实时业务可靠性的基础上, 使尽力而为型业务的吞吐率达到最大化。

关键词: 智能电网; 网络虚拟化; 无线 Mesh 网络; 遗传算法; 启发式算法

中图分类号: N915 文献标志码: A

Virtual Network Architecture and Application for Smart Distribution Grid in Future Large Data Environment

Qi Feng¹, Tang Xiaoxuan¹, Xing Ningzhe², Ji hao³

(1. State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing, 100876, China; 2. State Grid Jibei Electric Power Company Limited, Beijing, 100053, China; 3. State Grid Tianjin Electric Power Company Limited, Tianjin, 300000, China)

Abstract: According to communication requirements of the smart grid, WMN and the power line-based communication framework for smart grid communications is proposed. Based on the framework, a genetic algorithm and a heuristic algorithm are proposed to establish virtual networks for various types of services respectively, and are embedded in the heterogeneous substrate network. Finally, the simulation experiment shows that the reliability of real time services is achieved by increasing transmission diversity enhancement, while throughput of the best-effort service is maximized.

Key words: smart grid; network virtualization; wireless Mesh network; genetic algorithm; heuristic algorithm

引言

随着电力通信网的快速发展, 网络承载业务多样化、数据多元化、信息海量, 为网络架构带来了新的挑战。网络虚拟化的提出是改变现有网络架构僵化问题的一种主要技术途径^[1]。网络虚拟化的本质是通过抽象、分配、隔离机制在一个公共物理网络上独立地操作多个虚拟网络, 从而能够有选择性地进

行资源分配与调度,最大化物理网络资源利用率、提高服务质量、降低网络操作和维护成本。其中网络虚拟化的关键技术是虚拟网络映射问题,即研究如何将虚拟节点和虚拟链路映射到合适的底层物理节点和链路上。

无线 Mesh 网络(Wireless mesh network, WMN)的出现引起了人们的广泛关注。其方便部署的特性以及使用无线多跳连接从而扩大覆盖范围的优势使得无线 Mesh 网络得到业界的广泛认可^[2]。另外,电力线通信(Power line communication, PLC)也是一种新兴的通信方式,它不需要额外的基础设施建设,使得其在多种网络的竞争当中具有一定优势。然而,由于网络干扰和链路衰减导致的误比特率和丢包,无线 Mesh 网络和电力线通信的链接属于有损链路。如果只采用传统的网络设计方法,就只能提供尽力而为服务,因此很难保证实时服务的可靠性,这样的前端网络设计架构对大数据处理的瓶颈问题的解决效果是远远不能达到人们预期的。然而,网络虚拟化(Network virtualization, NV),是一种很有前途的技术,它支持各种终端到终端的定制服务,保障期其性能的稳定性。网络虚拟化允许这些大数据服务在共享的底层网络中作为独立的和隔离的虚拟网络运行。因此,本文设计了一个基于网络虚拟化的智能电网通信框架,以满足各种不同的大数据处理服务的要求。在此框架下,实时的数据处理服务是映射到 WMN 和 PLC 网络,由这两个虚拟网络来进行处理。网络虚拟化中无线 Mesh 网络采用正交频分多址(Orthogonal frequency division multiple access, OFDMA)作为多址接入方案^[3-6]。以这种接入方式,不同的虚拟网络分配不同的子载波,从而自然分离。并且在多个子载波上并行传输,带来分集增益,这也就是该框架的另一优势,即通过两个底层网络和分配的子载波的增强型传输分集改善实时服务的可靠性。

1 网络虚拟化基础结构设计和问题建模

1.1 网络虚拟化基础结构设计

NV 是一种有前景的技术,通过允许多个异构网络共存于一个共享底层网络(Shared underlying network, SN)克服了智能电力通信网的难以融合的优点。这些异构网络被称为虚拟化网络(Virtualization networks, VNs),它提供量身定制的端到端服务。VNs 从 SN 中独立出来,从而提供更大的灵活性、可配置性和管理性。每个衬底节点能够支持多个虚拟节点,而且各个 VNs 独立运行互不干扰。如图 1 所示,不同的拓扑结构的两个异构 VNs(VN1 和 VN2)共存于一个 SN 中,它们分别操作并提供不同的数据处理服务。

由于智能电力通信网要求各种应用服务(包括实时和尽力而为的服务),NV 的设计思想非常适合智能电网通信。也就是说,不同的应用程序在通信基础设施上在不同的 VNs 上运行。经过适当的资源配置,这些 VNs 可以互不影响地独立运行。NV 的一个重大挑战是如何处理从虚拟节点和虚拟链接映射到物理节点和链接,即高效映射方法的虚拟映射问题。然后就是当虚拟节点和虚拟链接映射到 SN 中的衬底节点和路径时,则虚拟映射完成。这两个阶段或以独立,或以协调的方式,实现节点及链接映射。网络虚拟化技术能共享底层网络资源,在此基础上建立多个相互隔离的虚拟网络。每个虚拟网络由虚拟节点和节点之间的虚拟链路组成。利用底层网络设备对网络虚拟化的支持,虚拟网络能在对底层网络不产生影响的前提下,开展新型网络体系结构和相关技术的研发。在网络虚拟化环境中,网络服务提供商(Internet service provider, ISP)分离为基础设施提供商(Infrastructure provider, InP)和服务提供商(Service provider, SP),使网络技术的改进和创新不再受传统运营商之间沟通的限制而变得更加灵活。InP 管理运营底层的物理网络,SP 依据用户的虚拟网络请求中节点和链路的约束租用 InP 的物理网络资源,此过程为虚拟网络映射,已经被证明是一个 NP-Hard(Non-polynomial hard problem)问题。

在智能电力通信网的中,WMN 和 PLC 网络均在同一时间建立在 SN 上。由于两个网络 PHY 的传输介质不同,它们可能具有不同的拓扑结构和不同的传输特性。此时 VNs 可以嵌入到基于多种需求的

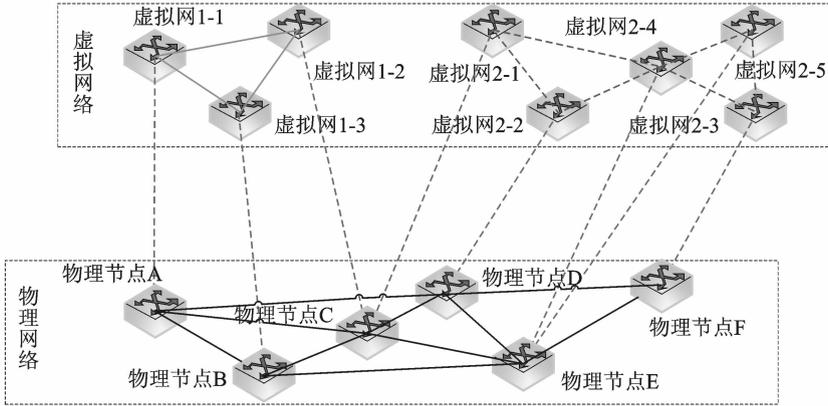


图1 多个 VNs 共存于一个 SN

Fig. 1 Multiple VNs in one SN

两个异构 SNs 中。这一特性使得智能电力通信网中的虚拟映射成为一个独特而富有挑战性的研究课题。由于映射到智能电力通信网中的节点是确定的,作为通信服务终端只是根据指定的电力设备来确定。然而,在智能配电网的环境中,有两个 SN(即无线 Mesh 网和 PLC 网络)可用于链接的映射。由于 PLC 网络能力的限制,它仅适合于数据量小的服务。因此,建立在控制与操作区中控制和操作服务的 VNs,并嵌入到异构网络,保证了电力通信网中业务多样性的要求。将管理与数据区的管理和操作合并到一个 VN 中,然后将该 VN 映射到 WMN 中提供尽力而为的传输服务。下面介绍虚拟网络的映射模型,为在 WMN 和 PLC 网络上进行虚拟映射奠定基础。

在虚拟网络映射问题中,底层物理网络形式化为一个无向图 $G^s = (N^s, L^s, A_N^s, A_L^s)$,其中, N^s 和 L^s 分别表示底层节点集合和底层链路集合,并把 L^s 中的链路组成的路径记为 P^s ; A_N^s 表示底层节点属性集合,如节点的 CPU 资源或物理位置; A_L^s 表示底层链路属性集合,如链路的带宽资源或延迟特性。虚拟网络请求形式化为一个无向图 $G^v = (N^v, L^v, C_N^v, C_L^v)$,其中, N^v 和 L^v 分别表示虚拟节点集合和虚拟链路集合, C_N^v 表示虚拟节点约束集合, C_L^v 表示虚拟链路约束集合。为了更精确地描述虚拟网络映射问题,下面给出虚拟网络映射的定义。

定义 1 设底层物理网络为 G^s , 虚拟网络为 G^v , 则称从 G^v 到 G^s 子集的映射 $M: G^v \rightarrow (N', P', R_N, R_L)$ 为一次虚拟网络映射,其中, $N' \subset N^s, P' \subset P^s$; R_N 和 R_L 分别表示分配给虚拟网络请求的节点资源集合和链路资源集合。从虚拟网络映射的定义可以看到,虚拟网络映射问题可以分解为两个子问题,即虚拟节点映射问题和虚拟链路映射问题。

定义 2 底层物理网络为 G^s , 虚拟网络为 G^v , 则称从 G^v 到 G^s 子集的映射 $M^N: (N^v, C_N^v) \rightarrow (N', R_N)$ 为一次虚拟网络节点映射。

定义 3 底层物理网络为 G^s , 虚拟网络为 G^v , 则称从 G^v 到 G^s 子集的映射 $M^L: (L^v, C_L^v) \rightarrow (P', R_L)$ 为一次虚拟网络节点映射。

1.2 问题建模

先分析 PLC 网络和 WMN 网络中的关键参数,给出 PLC 网络和 WMN 网络的底层映射模型,进而建立问题模型。在 PLC 网络和 WMN 网络中,需要传送请求的控制和操作消息,因此分析两种网络的分别传送不同信息的成功概率,进而约束目标函数。

首先分析 PLC 网络的误包率带来的成功传输概率问题。误包率用 θ_F 表示,终端到基节点的跳数用 h 表示。当请求的控制和操作服务的流量负载不是很重时,即处于免竞争时段,资源总是可以被分配

的。因此,控制消息在 PLC 上传输的成功概率是

$$P_{CR} = (1 - \theta_p)^h \tag{1}$$

给定的第 i 跳的碰撞概率 p , 连续传输概率 $C_{p(i)}$ 可以通过 $C_{p(i)} = 1 - p$ 来计算。基于这些理论, 在 PLC 上的操作信息传送的成功概率是

$$P_{OP} = \prod_{i=1}^h (C_{p(i)} (1 - \varepsilon_p)) \tag{2}$$

再分析无线 Mesh 网络的子载波分配问题^[7-10]。相较于 PLC 网络, WMN 提供了更高的带宽和比特率。因此, 在设计中, WMN 必须支持管理与数据区的 VN 而不是控制与操作区的 VN。为了保证实时服务的质量, 不同的 VN 应保持独立, 不应相互干扰。NV 的一个基本原则是, 当多个 VN 共存于同一物理层的无线 Mesh 网络时, 一个 VN 的活动应该不会影响任何其他 VN, 反之亦然。与传统意义上的虚拟网络映射不同, 不需要物理节点到虚拟节点的映射, 而物理链路到虚拟链路的映射转化为物理层子载波的分配调度虚拟化, 即一个控制 CC 和若干个 TD 组成虚拟网络, TD 之间存在固定的子载波进行控制和操作信息的传输。因此, 无线 Mesh 网络的结构如图 2 所示。

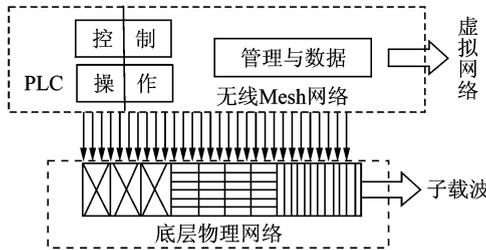


图 2 基于 OFDMA 网络设计的智能通信网

Fig. 2 Intelligent network based on OFDMA grid

无线 Mesh 网络和 PLC 网络都可以抽象成无向有权图, 分别表示为 $G_w = (N, L_w)$ 和 $G_p = (N, L_p)$ 。这两个网络具有相同的节点集 N , 其中 $|N| = n$ 。集合 N 包含一个 CC (记为 n_0) 和 $(n-1)$ TD (记为 n_i , 其中 $i=1, 2, \dots, n$)。除 CC 外, 每个 TD 节点都具有 3 个 VN 请求, 即控制服务请求、操作服务请求以及最佳流量请求。控制服务请求由 $cr(i) = (L_{cr}(i), R_{cr}(i))$ 表示, 其中 $L_{cr}(i)$ 为主要控制消息长度, $R_{cr}(i)$ 为可靠性要求。 $cr(i)$ 映射到异构的 SN 后的实际传输概率是 $P_{cr}(i)$ 。矩阵 $[s_{cr}(i, j)]_{n \times (n-1)}$ 用来记录控制服务的无线电子载波分配方式。操作服务请求由 $op(i) = (L_{op}(i), R_{op}(i))$ 表示, 其中 $L_{op}(i)$ 和 $R_{op}(i)$ 分别为主要操作消息长度和可靠性要求。 $op(i)$ 的实际传输成功概率为 $P_{op}(i)$ 。矩阵 $[s_{op}(i, j)]_{n \times (n-1)}$ 用来记录无线电子载波分配方式。最佳流量请求由 $bf(i) = (rs(i))$ 表示, 其中 $rs(i)$ 为最佳流量的实际满意部分, 即实际流量。同理, 矩阵 $[s_{bf}(i, j)]_{n \times (n-1)}$ 用来记录无线电子载波分配方式。

为了满足实时服务可靠性要求和在不违背子载波频率约束的条件下最大化业务总吞吐量^[11], 可以将问题设定为

$$\text{maximize } \sum_{i=1}^{n-1} bf(i) \tag{3}$$

满足如下约束条件

$$P_{cr}(i) \geq R_{cr}(i), P_{op}(i) \geq R_{op}(i), bf(i) \geq rs(i) \quad i = 1, 2, \dots, n-1$$

$$\sum_{j=1}^{n-1} s_{cr}(i, j) + \sum_{j=1}^{n-1} s_{op}(i, j) + \sum_{j=1}^{n-1} s_{bf}(i, j) \leq S(i) \quad i = 1, 2, \dots, n-1$$

根据式(3)可知, 该优化问题是 NP 问题。为了有效地解决这一问题, 采用了智能优化算法中的遗

传算法和启发式算法来解决该问题。

2 算法描述

2.1 虚拟网络映射算法

虚拟网络映射算法描述如下。输入:虚拟网络映射需求 $G^v = (N^v, L^v, C_N^v, C_L^v)$ 和底层物理网络 $G^s = (N^s, L^s, A_N^s, A_L^s)$

输出:虚拟节点映射关系 X

(1)对于虚拟网络映射请求根据收益进行排序;

(2)While(仍存在未映射的虚拟节点);

(3)选取有最大收益的虚拟网络映射请求的节点 u ;

(4)构造候选集合 $S(u)$, 满足 $\forall v \in S(u), C_N^v \leq A_N^s$ // 候选集中的节点均能满足 u 的节点约束要求;

(5)如果 $S(u)$ 为空, 则将节点 u 放入请求队列, 等待下一轮节点映射;

(6)从候选集合 $S(u)$ 中选取能使优化目标最大化的物理节点 v , 令 $x_{uv} = 1$;

这里的收益, 可以指吞吐量, 公平性和利用率等, 下面两种算法分别均采用吞吐量作为收益。

2.2 遗传算法

由于优化目标以及参数调整的多样化, 可以证明找到最优解是一个非确定多项式问题。而遗传算法在建立数学模型时不需要考虑问题的内在性质, 对于任意形式的目标函数和约束, 无论是线性的还是非线性的, 离散的还是连续的均可处理。遗传算法直接对结构对象进行操作, 不存在求导和函数连续性的限定; 具有内在的隐并行性和更好的全局寻优能力; 采用概率化的寻优方法, 能自动获取和指导优化的搜索空间, 自适应地调整搜索方向, 不需要确定的规则。因此, 本文采用遗传算法来解决上述问题, 主要步骤如下。

首先进行遗传算法的初始化过程: 设置遗传种群数目为 P , 迭代次数为 G , 交叉概率为 P_c , 变异概率为 P_v 。本文采用二进制编码方式, 无线 Mesh 网络和 PLC 网络都含有 N 个节点, 由于 CC 节点只用于控制和调度, 不参与染色体编码。因此, 仅对 $n-1$ 个 TD 节点进行编码。将个体染色体设置为 $\text{gene} = [\text{cr}_1, \text{cr}_2, \dots, \text{cr}_{n-1}; \text{op}_1, \text{op}_2, \dots, \text{op}_{n-1}; \text{bf}_1, \text{bf}_2, \dots, \text{bf}_{n-1}]$, 每个染色体相当于当前 TD 节点参数设置。在搜索最优解的过程中, 可以同时控制服务请求、操作服务请求和最佳流量请求进行优化。在初始化和编码之后, 对种群中的每个个体进行评估, 将拥有最佳适应度的解作为局部个体最优解, 对于初始种群来说同时也是全局最优解。确定一个适当的适应度函数, 从而评价每个染色体的优劣, 使得种群向更好的方向繁衍。

结合式(3)的优化目标和约束, 3 种服务信息的可靠性由传送成功概率影响, 另外, 也要考虑无线电子载波的分配问题, 因此确定适应度函数如下

$$f = \alpha \left(\frac{R_{cr}}{P_{cr}} + \frac{R_{op}}{P_{op}} + \frac{rs}{bf} \right) + \beta \left(\frac{s_{cr} + s_{op} + s_{bf}}{S} \right) \quad (4)$$

根据计算的适应度结果, 将适应度高的优化个体直接遗传到下一代或通过配对交叉产生新的个体再遗传到下一代。遗传算子分为选择、交叉、变异三个方面。每次运算先由选择操作挑选出两个染色体, 继而由交叉概率判断是否进行交叉, 最后依变异概率对交叉后的结果进行调整。将经过选择、交叉、变异后的结果作为新的种群, 重复上述操作直到达到迭代次数 G , 所有记录中的适应度函数最高的结果即为所求最优解。由于遗传算法的特性, 非常容易将遗传算法用到并行计算和群集环境中。一种方法是直接把每个节点当成一个并行的种群看待。然后有机体根据不同的繁殖方法从一个节点迁移到另一个节点。另一种方法是“农场主/劳工”体系结构, 指定一个节点为“农场主”节点, 在本文中就是 CC 节

点,负责选择有机体和分派适应度的值,另外的节点作为“劳工”节点,即本文的 TD 节点负责重新组合、变异和适应度函数的评估。因此遗传算法非常适合未来大数据环境下的流量传送。

2.3 启发式算法

基于虚拟网络映射算法的策略,本文的启发式算法采用三步走策略:首先,计算 PLC 网络中实时服务的成功概率;然后,进行无线网格网络的实时服务的子载波分配;最后,最大化最优服务吞吐量。下面,详细介绍每一步的实现过程。

首先,PLC 网络作为实时服务的传输介质之一。根据式(1)和式(2),可以计算 PLC 网络中的实时业务传输的成功概率(用 P_{PLC} 表示)。

另外,无线 Mesh 网络作为实时服务的另一种传输介质,以提高分集增益和可靠性。 P_{WMN} 为无线 Mesh 网络中实时业务传输的成功概率, R_{REQ} 为实时业务的可靠性要求。由于实时业务在两个 SN 上进行传输,分集增益使得该实时业务的可靠性等于至少在一个 SN 上传输成功的概率。可以得到

$$\frac{(1 - P_{\text{PLC}})(1 - P_{\text{WMN}})}{1 - R_{\text{REQ}}} \leq 1 \quad (5)$$

根据 PLC 网络中得到实时业务传输成功概率,在无线 Mesh 网络中,可靠性的下界可以表示为

$$P_{\text{WMN}} \geq \frac{R_{\text{REQ}} - P_{\text{PLC}}}{1 - P_{\text{PLC}}} \quad (6)$$

最后,为了使得业务吞吐量最大化,无线 Mesh 网络的残差 $G^* = (N, E^*)$ 用于最佳流量的计算。

为了使得网络吞吐量最大化,并降低智能优化算法的计算复杂度,本文提出一种启发式算法,并证明该算法可以在多项式时间内得到解决。该算法核心思想包括两个阶段。第一阶段是在分层结构中从顶层到底层限制链接能力。第二阶段是尽可能地从底层到顶层推送流量。第一阶段可以避免过多流量进入容量较小的上行链路。经过计算,该算法的计算复杂度为 $O(|E^*| \cdot |N|)$ 。图 3 为启发式算法流程图。

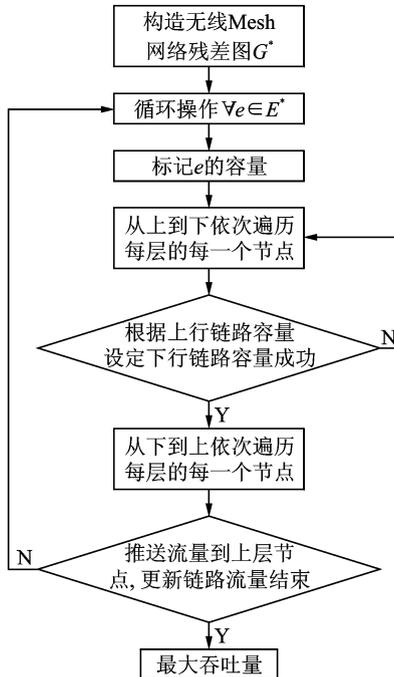


图 3 启发式算法流程

Fig. 3 Heuristic algorithm process

3 性能分析

为了评估 NV 框架的性能^[12],进行如下仿真。仿真场景设置如下:生成包含一个 CC 和 10 个 TD 的节点集。TD 节点编号为 1 至 10。每个节点配备有两个无线电设备,每个无线电有 128 个子载波。由于上行业务流和下行业务流对称,为便于分析,只考虑上行链路最佳流量。

图 4 显示了 PLC 网络对最大吞吐量的影响。最低的曲线对应只有无线网状网络来支撑所有的 VN 的,没有使用 PLC 网络的情况。在这种情况下,无线 Mesh 网络要为实时服务分配更多的子载波,以保证其可靠性要求。因此,用于分配给最佳流量调度的剩余子载波较少,导致较低的吞吐量。另一种极端的情况是,PLC 的可靠性足够高,以满足所有的实时服务的需求,无线 Mesh 网的全部子载波均可用于最佳流量调度。在这种情况下,理想的最大的吞吐量为遗传算法计算的吞吐量。另外,从 0.1 到 0.001 改变 PLC 的 PER(ϵ_p)得到一系列仿真图像。较低的 ϵ_p 意味着 PLC 可提供更高的传输可靠性,因而 WMN 中更多的子载波可以用于最佳流量的调度。因此可得最佳流量的最大吞吐量与 PLC 的误包率(Packet error rate,PER)负相关。

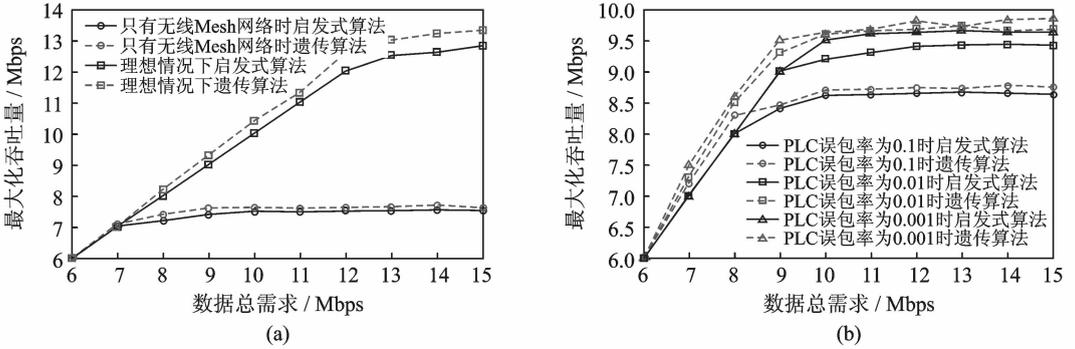


图 4 两种算法下 PLC 网络对最大吞吐量的影响

Fig. 4 Maximum throughput of PLC network with two algorithm

根据图 4 可以发现,遗传算法得到的最大吞吐量总是优于启发式算法,这是因为遗传算法总是搜索最大迭代范围内的最优解,相较于启发式算法,需要更高的时间复杂度和资源。启发式算法牺牲少量吞吐量减少换来了时间复杂度的显著降低,因此启发式算法更加实用。

4 结束语

为了满足智能电力通信网中多样化的信息服务以及未来大数据分析处理环境的各种要求,设计了 NV 的框架。在该框架下,实时服务由映射到无线 Mesh 网络与 PLC 网络的 VN 进行支持,而最佳流量则是通过无线 Mesh 网络进行控制。在无线 Mesh 网络的 NV 上,生成基于 OFDMA 技术的虚拟节点。在合理分配子载波资源的情况下,VN 自然分离,互不干扰,独立工作。经过验证,实时服务的可靠性要求在提出的框架内能够得到保证。由于提出的多目标优化问题是 NP 问题,故采用了智能优化算法中的遗传算法和三步走的启发式算法进行解决。仿真结果证明了两种方法的有效性。

由于 VN 映射和子载波分配问题都是不确定性多项式时间问题,为保证实时服务的可靠性,本文设计一个遗传算法和启发式算法来解决该问题。综上所述,本文的贡献如下:

(1)设计了一个基于 NV 的配电网通信架构,为解决未来大数据环境下的数据分析处理瓶颈问题提供了有效的前端架构,同时也为日益增长的电力通信网中的业务提供高效的处理平台。

(2)设计虚拟网络映射模型,并提出相应映射算法,为 WMN 和 PLC 网络的映射提供有效模型。

(3)为解决 VN 映射和子载波分配问题,设计了一个遗传算法和一个启发式算法,并进行两种算法之间的比较。

参考文献:

- [1] Ma Y, Ji X D, Jiang J M, et al. A resource allocation algorithm using compensation timeslot for self-healing in heterogeneous networks[C]//Proceedings of the IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications Workshop. London, UK: IEEE, 2013:122-126.
- [2] Xia L F, Li W J, Zhang H, et al. A cell outage compensation mechanism in self-organizing RAN[C]//Proceedings of the 2011 7th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM). Hubei, China: IEEE, 2011:23-25.
- [3] Premnath K N, Rajavelu S. Challenges in self-organizing networks for wireless telecommunications[C]//Proceedings of the 2011 International Conference, Recent Trends in Information Technology. Chennai, Tamil Nadu, India; [s. n.], 2011: 1331-1334.
- [4] Gao Y, Li Y, Zhou S D, et al. System level performance of energy efficient dynamic mechanical antenna tilt angle switching in LTE-Advanced systems [C]//Proceedings of the 2013 IEEE International Wireless Symposium. Beijing, China: IEEE, 2013:1-4.
- [5] Fehske A J, Klessig H, Voigt J, et al. Concurrent load-aware adjustment of user association and antenna tilts in self-organizing radio Networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(5): 1974-1988.
- [6] Li W J, Yu P, Jiang Z X, et al. Centralized management mechanism for cell outage compensation in LTE networks[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2012(2012):1-8.
- [7] Jiang Z X, Yu P, Su Y L, et al. A cell outage compensation scheme based on immune algorithm in LTE networks[C]//Proceedings of the Network Operations and Management Symposium. Hiroshima, Japan: [s. n.], 2013:1-6.
- [8] Amirijoo M, Jorguseski L, Litjens R, et al. Effectiveness of cell outage compensation in LTE networks[C]//Proceedings of the Consumer Communications and Networking Conference. Las Vegas, USA: [s. n.], 2011:642-647.
- [9] Amirijoo M, Jorguseski L, Kürner T, et al. Cell outage compensation in LTE networks: Algorithms and performance assessment[C]//Proceedings of the 2011 IEEE 73rd Vehicular Technology Conference. Budapest, Hungary: IEEE, 2011:1-5.
- [10] Yuan G, Yi L, Hongyi Y, et al. Energy efficient joint optimization of electric antenna tilt and transmit power in 3GPP LTE-advanced: A system level result[C]//Proceedings of the 2013 IEEE 9th International Colloquium on Signal Processing and its Applications (CSPA). Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE, 2013: 135-139.
- [11] Huffner F, Komusiewicz C, Liebtrau A, et al. Partitioning biological networks into highly connected clusters with maximum edge coverage[J]. IEEE/ACM Transactions on Computational Biology and Bioinformatics, 2014, 11(3):455-467.
- [12] Chang Y T, Wu C L, Cheng H C. Integrated cross-correlation and genetic algorithm to improve TDOA-based locating system in preventing radio interference[C]//Proceedings of the IEEE International Symposium on Consumer and Control. Taiwan, China: IEEE, 2014: 1078-1081.

作者简介:



元峰(1971-),男,教授,研究方向:通信软件、智能电网信息通信,E-mail:hooring@foxmail.com。



唐晓璇(1991-),女,硕士研究生,研究方向:移动通信网、电力通信网。



邢宁哲(1978-),男,高级工程师,博士生,研究方向:网络与信息安全。



季浩(1983-),男,硕士研究生,研究方向:低压电子通信技术。