

基于业务优先级的电力调度数据网拥塞规避算法

曾 瑛¹, 李伟坚¹, 陈媛媛², 唐良瑞²

(1. 广东电网公司电力调度控制中心, 广东 广州 510600;

2. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

摘要: 为了保障电力调度数据网的可靠性, 提出一种基于业务优先级的电力调度数据网拥塞规避算法。首先, 根据不同业务对时延、带宽要求的不同, 将其划分为具有不同优先等级的业务。其次, 判断节点的拥塞状态, 并对严重拥塞或中度拥塞节点缓存队列中的数据按业务优先级进行位置调整, 丢弃位于严重拥塞阈值后的低优先级业务, 并通知其源节点重新选择路由。最后, 建立适应度函数, 根据二进制粒子群优化(Binary Particle Swarm Optimization, BPSO)算法进行路由重新选择。仿真结果表明, 算法优先保证了高优先级业务的服务质量(Quality of Service, QoS), 从而优化了网络资源, 均衡了网络负载。

关键词: 电力调度数据网; 业务优先级; 节点拥塞; 拥塞规避; 二进制粒子群优化

A congestion avoidance algorithm based on the service priority for electric power dispatching data network

ZENG Ying¹, LI Wei-jian¹, CHEN Yuan-yuan², TANG Liang-rui²

(1. Power Dispatch and Control Center of Guangdong Power Grid, Guangzhou 510600, China;

2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: To ensure the reliability of electric power dispatching data network, a congestion avoidance algorithm based on the dispatching data service priority is proposed. Firstly, according to different requirements for the delay and bandwidth, the dispatching data services can be divided into several services with different priorities. In accordance with the service priorities, the positions of data packets are adjusted in the serious or moderate congestion node cache. The services with low priority are discarded, which are located after serious congestion threshold, and their source nodes are informed to choose route. Then, the fitness function is built and the optimal routing is selected employing binary particle swarm optimization (BPSO) algorithm. Simulation results show that the quality of service (QoS) of the services with high priority is firstly ensured. Meanwhile, the network resource can be optimized and network loads can be balanced.

Key words: electric power dispatching data network; service priority; node congestion; congestion avoidance; binary particle swarm optimization (BPSO)

中图分类号: TM73 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)02-0049-07

0 引言

电力调度数据网是现代大型互联电网的重要组成部分, 是实现电网调度自动化的基础^[1-2]。随着电力系统向数字化方向的发展, 电力系统的数

基金项目: 广东电网科技项目复杂大电网下新一代电力信息通信组网及智能输变电支撑技术研究(K-GD2012-292)

据应用逐渐增多^[3], 对通信技术的要求也越来越多, 电力系统传统的通信承载方式越来越难于满足用户的需求^[4-5]。因此, 将IP网络作为电力调度数据网的主要数据承载方式, 得到极大的发展。然而, 由于电力调度数据网的覆盖面积不断增大, 承载的业务种类逐渐增多, 而由业务突发性引起的网络数据流的不确定性, 进而在某一时刻, 造成IP网络中某一节点或部分链路发生拥塞是不可避免的。调度数据网一旦出现信息拥塞, 将很可能影响调度数据业务的正常运转, 危害电力系统的生产管理和安全运行^[6]。鉴于此, 如何缓解节点或链路拥塞已成为影响电力调度数据网安全稳定运行、管理的关键问题。

拥塞规避是缓解网络中节点或链路拥塞的重要方法,其能有效地规避网络中的拥塞现象、均衡网络中的负载、进而为业务提供高质量的服务。传统的拥塞规避机制一般基于蚁群优化(Ant Colony Optimization, ACO)^[7-8]或改进 ACO 算法^[9-12]实现,文献[7]中当检测到链路拥塞或即将发生拥塞时,从目的节点发送“拥塞应答蚂蚁”重新探索路径,当“拥塞应答蚂蚁”到达拥塞节点,表明存在一条新的非拥塞路径。拥塞节点将立即切换到新路径,进而减缓拥塞状态。文献[9]采用与传统 ACO 相反的信息素引导模式,对信息素的更新引入惩罚和奖励机制,并在此基础上设计了一种能够规避拥塞的 QoS (Quality of Service, QoS) 路由算法求解单播路由问题,同时实现网络负载的均衡。文献[10-11]在拥塞发生时采用双向蚂蚁寻路的方法,提高了新路径搜索的速度;使用新的寻路准则保障了认知网络的 QoS 需求。虽然传统的拥塞规避方法有效规避了链路上的拥塞,但并未合理考虑节点拥塞状态和业务优先级,不能很好地规避节点拥塞。此外,利用 ACO 重新为低优先级业务选择路由时速度慢,容易出现早熟收敛和停滞现象。

基于此,以 IP 网络作为电力调度数据网的主要数据承载方式,针对节点拥塞问题,提出基于业务优先级的拥塞规避算法(Congestion Avoidance algorithm based on the Service Priority, CASP)。首先,根据不同业务对时延和带宽的要求不同,将电力调度数据业务划分为具有不同优先级的 6 个等级。其次,对严重拥塞节点或中度拥塞节点缓存队列的数据按业务优先级进行位置调整,丢弃位于严重拥塞阈值后的低优先级业务,并通知被丢弃业务的源节点根据二进制粒子群优化(Binary Particle Swarm Optimization, BPSO)算法^[13-16]重新进行路由选择。仿真结果表明,在规避节点拥塞时考虑业务优先级,优先保障高优先级业务的 QoS;丢弃低优先级业务,从而缓解了严重拥塞节点的拥塞程度;综合考虑最短路径与网络资源,为被丢弃的低优先级业务寻找满足其要求的最优路径,优化了网络资源,均衡了网络负载。

1 业务模型分析

随着信息与通信技术的迅速发展,电力调度数据网覆盖范围不断增加,其覆盖范围内设备种类繁多,数量庞大,因此,业务流量增大,且由于电力调度数据网承载的部分业务具有随机性特点,容易造成网络节点拥塞。为优先保障时延要求较高且带宽需求较大业务的 QoS,在规避节点拥塞时应考虑

业务优先级,对不同业务提供有差别的服务。

电力调度数据网承载的业务主要是安全 I 区、安全 II 区和应急指挥系统业务。安全 I 区业务是以 SCADA/EMS 等调度自动化系统、安稳管理信息系统等为代表的实时监控业务,安全 II 区业务是以保护管理信息系统、电能计量遥测系统等为代表的调度运行管理业务^[17-18]。当检测出节点发生拥塞时,为了优先保证时延要求较高业务的 QoS,优先为最大容忍时延小的业务提供服务;此外,为了最大程度地缓解节点拥塞程度,优先确保带宽较大业务得到服务。因此,根据电力调度数据业务对时延、带宽的不同要求,将电力调度数据业务划分为具有不同优先级的 6 类业务,其中,时延小、带宽大的业务优先级最高。结合以上分析,调度数据网业务等级及优先级划分如表 1 所示,其中优先级标识 P_i ,越大表示业务的优先级越高,现有调度数据网中宽带时延敏感业务与宽带非实时业务较少,但随着电力信息通信网的宽带化发展,未来调度数据网承载的业务种类及其带宽需求也随之增加,此两类业务也随之出现。

2 电力调度数据网拥塞规避算法

2.1 拥塞检测方法

电力调度数据网中节点具有接收数据包和存储转发功能。由于将相邻节点传输过来的数据包存储在节点缓存区,当有大量相邻节点在某一时刻同时传输数据包经过此节点时,会导致节点发生拥塞。为检测节点在某一时刻的拥塞状态,采用与文献[6]相同的方法计算节点缓存区的数据包数量,并通过与上限、下限阈值比较进而确定当前节点状态。假设 $Q_{i,t}$ 表示 t 时刻节点 i 的缓存队列长度, R_{iH} 、 R_{iL} 分别表示节点 i 的严重拥塞阈值和中度拥塞阈值, $Flag_i$ 为节点拥塞状态标识,则检测节点拥塞的具体方法为:

(1) 若 $Q_{i,t} < R_{iL}$, 则表示节点 i 无拥塞, $Flag_i = 0$;

(2) 若 $R_{iL} \leq Q_{i,t} < R_{iH}$, 则表示节点 i 处于中度拥塞状态, $Flag_i = 1$;

(3) 若 $R_{iH} \leq Q_{i,t}$, 则表示节点 i 处于严重拥塞状态, $Flag_i = 2$ 。

2.2 拥塞节点的规避策略

当检测到节点发生严重拥塞或中度拥塞时,对节点缓存区队列中的数据包按其业务优先级进行位置调整。假设时刻 t 拥塞节点 i 缓存队列中的数据包为具有不同优先级的 S_1, S_2, \dots, S_9 , 则图 1 示意了对拥塞节点 i 缓存队列中的数据包按优先级进行位置调整的过程。

表 1 调度数据网业务等级及优先级划分
Table 1 Level and priority classification of the service in dispatching data network

业务等级	优先级标识 P_r	时延要求/ms	带宽要求/(kbit/s)	对应业务(单节点带宽/kbit/s, 最大容忍时延/ms)
宽带时延敏感业务	5		≥ 2048	调度自动化系统主站互联业务(2048,100)
窄带时延敏感业务	4	≤ 500	< 2048	保护信息管理业务(远方修改定值、远方投退等)(64,100)
				调度自动化系统(SCADA/EMS)远动业务(64,100) 功角测量(PMU)业务(384,100) 安稳管理信息系统(64,30) 调度电话(19.2,150)
宽带时延次敏感业务	3	$500 \sim 10^4$	≥ 2048	未来调度数据业务(≥ 2048 ,秒级)
窄带时延次敏感业务	2		< 2048	电能计量遥测业务(64,秒级)
宽带非实时业务	1	$\geq 10^4$	≥ 2048	未来调度数据业务(≥ 2048 ,分钟级)
窄带非实时业务	0		< 2048	保护信息管理业务(故障录波等)(64, 10~15 min)

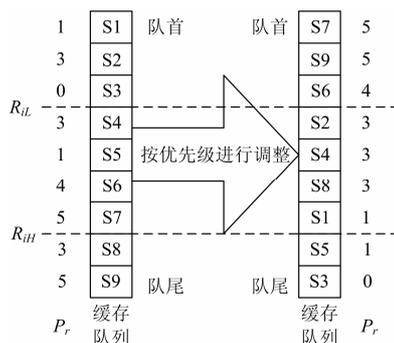


图 1 节点缓存区数据包位置调整过程

Fig. 1 Process of adjusting positions of data packets in the node cache

对拥塞节点 i 缓存队列中的数据按业务优先级进行位置调整后, 将位于严重拥塞阈值后的低优先级业务丢弃, 并发送消息通知被丢弃的低优先级业务源节点为其重新选择路由。由于重新选择路由时需要考虑不同路径的可用带宽和其传输时延两方面因素, 则此优化问题为多目标优化问题。由于 BPSO 不要求被优化函数具有可微、可导、连续等性质, 并且具有收敛速度快, 算法简单, 容易实现, 控制参数少, 计算速度快等特点, 选择 BPSO 来求解此多目标优化问题。

2.3 BPSO 求解最优路径

2.3.1 问题描述

针对电力调度数据业务对通信指标要求的不同, 在为其重新选择路由时应综合考虑不同通信指标对业务的不同要求。根据电力调度数据业务对时

延与带宽的要求构造相应的目标函数, 以获取符合业务通信需求的传输路径。由于路径传输时延和其可用带宽具有不同量纲, 缺乏统一的度量标准, 难以进行比较和运算, 必须对其进行归一化处理。对于路径传输时延, 当其大于业务可容忍的最大时延时, 不能保证业务的 QoS, 因此不能选择此路径传输业务; 当其小于可容忍的最大时延时, 此路径可作为传输业务的备选路径。假设 D_{\max} 表示调度数据业务可容忍的最大传输时延, $D(x)$ 为备选路径 x 上的传输时延, 则对路径 x 上的传输时延按式(1)进行归一化处理。

$$f_D(x) = \begin{cases} \frac{D_{\max} - D(x)}{D_{\max}} & D(x) < D_{\max} \\ 0 & D(x) \geq D_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $D(x) = \sum_{i \in x} D(i) + \sum_{l \in x} D(l)$, $D(i)$ 表示路径 x 上节点 i 的时延, $D(l)$ 表示路径 x 上链路 l 的传输时延。

假设以 $B(x)$ 表示备选路径 x 的可用带宽, B_{\max}, B_{\min} 分别表示可选路径集中可用带宽的最大值和最小值, 则对路径 x 的可用带宽按式(2)进行归一化处理。

$$f_B(x) = \frac{B(x) - B_{\min}}{B_{\max} - B_{\min}} \quad (2)$$

选择满足式(3)条件的路径 x 作为传输低优先级业务的最优路径。

$$\begin{cases} \max f_D(x) \\ \max f_B(x) \\ \text{s.t.} \begin{cases} D(x) \leq D_{\max} \\ B(x) \geq B \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

其中：约束条件 $D(x) \leq D_{\max}$ 保证了调度业务在路径 x 上的可靠传输； B 表示请求通信的业务所需带宽，约束条件 $B(x) \geq B$ 保证了业务所需带宽不超过路径 x 的当前可用带宽。

2.3.2 基于 BPSO 的路由选择优化模型求解

1) 粒子编码

采用二进制粒子群编码方式。取源节点到目的节点的路径作为备选粒子，粒子的维数为 m ，表示粒子的位置信息，取 1 或 0，分别对应节点是否在该路径上。

2) 适应度函数评价

利用三角模融合算子^[19]将路径传输时延和可用带宽进行融合，从而建立适应度函数，将多目标优化问题转化为单目标优化问题。适应度函数为

$$F(x) = \frac{f_D(x) \cdot f_B(x)}{1 - f_D(x) - f_B(x) + 2f_D(x) \cdot f_B(x)} \quad (4)$$

3) 粒子更新

首先，将初始化的粒子位置作为粒子 i 初始的历史最优解 P_i ，从粒子群中找出适应度值最大的粒子位置作为初始的粒子群当前全局最优解 P_g 。对粒子 i ，将其当前适应度值和 P_i 所对应的适应度值作比较，若优于 P_i 的，则重置 P_i ；将 P_i 所对应的适应度值与 P_g 所对应的作比较，若其比 P_g 的更优，则重置 P_g 。

其次，如果当前全局最优解 P_g 满足最佳路由条件，则结束并输出当前最优解；否则，根据当前全局最优解和每个粒子的历史最优解更新粒子位置 $X(C)$ ，得到新的粒子群 $X(C+1)$ 。

假设 $X_{ik}(C), V_{ik}(C)$ 分别表示第 C 迭代次数时粒子 i 的第 k 维位置和速度，则第 i 个粒子的第 k 维速度更新公式为

$$V_{ik}(C+1) = \omega \cdot V_{ik}(C) + c_1 \cdot \text{rand}() \cdot (P_{ik}(C) - X_{ik}(C)) + c_2 \cdot \text{rand}() \cdot (P_{gk}(C) - X_{ik}(C)) \quad (5)$$

其中： c_1, c_2 为学习因子； ω 为惯性权重； $\text{rand}()$ 是在 $[0,1]$ 范围内的随机数； $P_{ik}(C)$ 是至当前迭代次数粒子 i 经历的最好位置即粒子 i 的历史最优解； $P_{gk}(C)$ 是至当前迭代次数粒子群中所有粒子经历的最好位置即粒子群当前全局最优解。

为了增强粒子群跳出局部最优的能力，在 ω 中引入自适应扰动机制。

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{L} \cdot C \cdot \left(1 - \frac{g}{g_{\max}}\right)^g \quad (6)$$

式中， $\omega_{\max}, \omega_{\min}$ 分别是 ω 的极大值和极小值； L, C 分别表示总的迭代次数和当前迭代次数； g_{\max} 是扰动因子 g 的极大值， g 的计算公式参考文献[16]。

因此，第 i 个粒子的第 k 维位置更新公式为

$$X_{ik}(C+1) = \begin{cases} 1, \text{rand}() < \text{sig}(V_{ik}(C+1)) \\ 0, \text{rand}() \geq \text{sig}(V_{ik}(C+1)) \end{cases} \quad (7)$$

其中， $\text{sig}(\cdot)$ 为 sigmoid 函数，通常取 $\text{sig}(x) = 1/(1+\exp(-x))$ 。

3 仿真分析

为验证所提出的拥塞规避算法的性能，使用 Matlab7.9 仿真平台对 CASP 算法和未考虑业务优先级的拥塞规避算法的性能进行仿真对比分析。仿真模型为随机生成 20 个节点的网络拓扑图，并随机生成每条链路的时延和可用带宽。每条链路的可用带宽最大不超过 200 MHz，网络时延不超过 500 ms，各个节点缓存区大小为 50 MHz。仿真的网络拓扑结构如图 2 所示，各链路对应的时延和带宽如图标识，其中 (D, B) 表示链路上的时延 (D/ms) 和可用带宽 (B/MHz) 。仿真过程中，设置节点 V1~V2 为源节点，V18~V19 为目的节点。

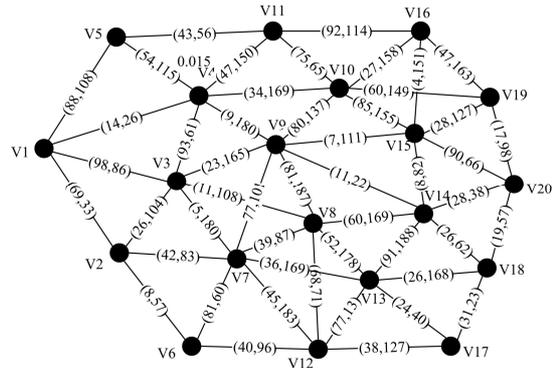


图 2 仿真网络结构图

Fig. 2 Simulation network structure

仿真过程中，随机产生各个节点的初始数据包分布，其业务类型与优先级按照表 1 所示的业务类型及优先级随机生成。以 K_i 表示节点 i 的数据处理能力，参考文献[6]，由于实际的调度数据网通常采用分层设计原则，核心层、骨干层和接入层节点的数据处理能力有差异。为简化仿真过程，本文假设拓扑图中各个节点的数据处理能力相同，鉴于业务具有突发性特征，设置仿真场景为某一时刻网络中出现拥塞的场景。参考文献[15]，将路由选择优化模型中的参数分别设置如下： $c_1=2, c_2=2, \omega_{\max}=0.9$,

$\omega_{\min}=0.4$, $g_{\max}=10$, $G=10$, 最大迭代次数为 200, 粒子群大小为 40。

为验证 BPSO 算法具有较快的收敛速度, 在粒子群大小和蚁群大小相同的情况下, 仿真了 BPSO 算法、ACO 算法的收敛特性。图 3 为分别采用 BPSO 算法、ACO 算法求解从源节点到目的节点的最优路径问题时的收敛特性。可以看出, 在粒子群大小与蚁群大小相同的情况下, 分别采用 BPSO 算法、ACO 算法求解同源、目的节点的最优路径时, 采用 BPSO 算法能更快的收敛到最优解。

为体现本文提出的拥塞规避算法对高优先级业务需求的保证, 对比 2 个拥塞规避算法。算法 1 中对拥塞节点缓存队列中的业务按先进先出的顺序进行处理, 业务不分优先级; 算法 2 是 CASP 算法。2 个算法中丢弃的位于严重拥塞阈值后的业务均采用 BPSO 算法重新选择路由。

采用本文提出的拥塞检测方法, 对网络中各个节点的拥塞状态进行实时检测, 某时刻检测出严重拥塞节点为 V9, 中度拥塞节点为 V3, V7 和 V13。表 2、表 3 分别为采用算法 1、算法 2 规避节点拥塞的情况对比。在算法 1 中, 当检测到节点处于严重

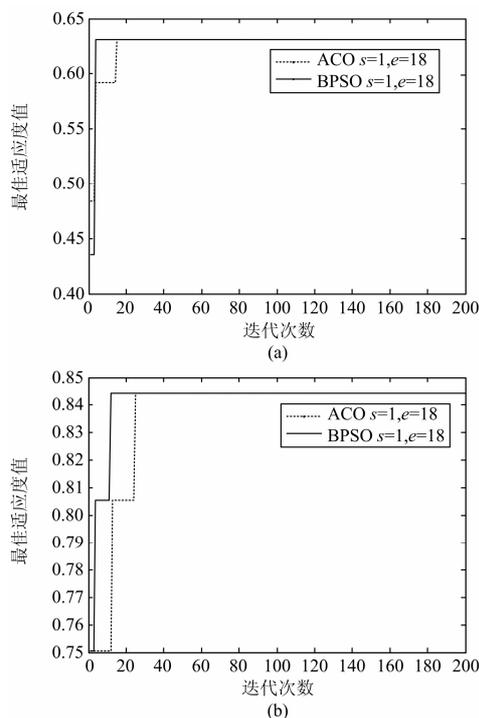


图 3 BPSO 与 ACO 收敛特性对比

Fig. 3 Comparisons of the convergences of BPSO and ACO

表 2 采用算法 1 规避节点拥塞的结果分析

Table 2 Result analysis of avoiding node congestion employing algorithm 1

V9 丢弃的业务(业务时延/ ms, 业务带宽/MHz)	重新选择的路径(路径时延/ ms, 路径带宽/MHz)	算法 2 中对应 业务的优先级	算法 2 中对应业务的路径(路 径时延/ms, 路径带宽/MHz)
业务 1 (319.1682,2.0196)	(2,6,12,8,14,15,19) (212,46)	5	(2,3,9,15,19) (84,104)
业务 2 (290.9213,2.4707)	(2,6,12,8,14,18) (202,46)	5	(2,3,9,14,18) (86,22)
业务 3 (3.4705×10 ⁴ ,2.3173)	(2,6,12,17,18) (117,23)	1	(2,3,9,14,18) (86,22)
业务 4 (8.1855×10 ³ ,1.7278)	(2,6,12,8,14,18) (202,46)	2	(2,3,9,14,18) (86,22)
业务 5 (7.9605×10 ³ ,2.4037)	(2,6,12,17,18,20) (130,23)	3	(2,3,9,14,20) (88,22)
业务 6 (4.4298×10 ³ ,0.1133)	(1,4,10,19,20,18) (146,26)	2	(1,4,9,14,18) (60,22)
业务 7 (4.7780×10 ⁵ ,0.0643)	(1,4,10,16,15,14,18) (109,26)	0	(1,4,10,16,15,14,18) (109,26)

表 3 采用算法 2 规避节点拥塞的结果分析

Table 3 Result analysis of avoiding node congestion employing algorithm 2

V9 丢弃的业务(业务时延/ ms, 业务带宽/MHz)	业务 优先级	重新选择的路径(路径时延/ ms, 路径带宽/MHz)	算法 1 中对应业务的路径(路 径时延/ms, 路径带宽/MHz)
业务 1 (5.1350×10 ⁵ ,1.7235)	0	(2,6,12,8,14,20) (204,38)	(2,3,9,14,20) (88,22)
业务 2 (1.4763×10 ⁵ ,0.8798)	0	(2,6,12,8,14,15,19) (212,46)	(2,3,9,15,19) (84,104)
业务 3 (4.6562×10 ⁴ ,1.8245)	0	(1,5,4,10,19) (236,108)	(1,3,9,15,19) (156,86)
业务 4 (6.0284×10 ⁵ ,0.8106)	0	(1,4,10,19,20) (125,26)	(1,4,9,14,20) (62,22)
业务 5 (4.9573×10 ⁴ ,1.5318)	0	(2,6,12,8,14,20,19) (221,38)	(2,3,9,15,19) (84,104)
业务 6 (9.1869×10 ⁴ ,1.2829)	0	(1,5,4,10,19) (236,108)	(1,3,9,15,19) (156,86)
业务 7 (5.3643×10 ⁵ ,0.6372)	0	(2,6,12,8,14,20) (204,38)	(2,3,9,14,20) (88,22)
业务 8 (8.1855×10 ⁴ ,2.0278)	1	(2,6,12,8,14,18) (202,46)	(2,3,9,14,18) (86,22)
业务 9 (4.4298×10 ⁵ ,0.1133)	0	(1,4,10,19,20,18) (146,26)	(1,4,9,14,18) (60,22)
业务 10 (4.7780×10 ⁵ ,0.0643)	0	(1,4,10,16,15,14,18) (109,26)	(1,4,9,14,18) (60,22)

拥塞状态时, 丢弃位于严重拥塞阈值后的业务, 并通知被丢弃业务的源节点根据 BPSO 算法为其重新选择路径。表 2 表明采用算法 1 为被节点 V9 丢弃的业务重新选择的的路径与采用算法 2 时对应业务的路径的时延对比。根据算法 1, 在节点 V9 处被丢弃的业务 1 重新选择的的路径为(2,6,12,8,14,15,19), 其路径时延为 212 ms, 而在算法 2 中此业务的优先级为 5, 其传输路径和路径时延分别为(2,3,9,15,19)和 84 ms。显然, 算法 1 丢弃了时延要求较高的业务, 这是因为算法 1 中并未区分业务优先级, 未对不同业务提供有差别的服务。此外, 采用算法 1 时为丢弃业务选择的路径传输时延高于采用算法 2 时的, 这表明算法 2 较算法 1 为高优先级业务提供更好的服务。表 3 表明采用算法 2 为被丢弃低优先级业务重新选择的的路径传输时延与算法 1 中对应业务的路径时延对比。结合表 2 与表 3 可知, 采用算法 2 时节点 V9 处丢弃的业务优先级较采用算法 1 时丢弃的业务优先级低, 并且从表 3 中可知, 在 V9 处被丢弃的业务 3 重新选择的的路径及其传输时延分别为(1,5,4,10,19)和 236 ms, 其业务优先级为 0, 但采用算法 1 时此低优先级业务路径及其传输时延为(1,3,9,15,19)和 156 ms, 显然, 采用算法 2 时选择的路径传输时延高于采用算法 1 时的, 结合对表 2 的分析可知, 采用算法 2 优先确保了高优先级业务的 QoS 需求, 对不同优先级业务提供有差别的服务。

4 结论

根据不同调度数据业务对时延与带宽的需求不同, 对调度数据业务进行了优先级划分。当检测到节点拥塞时, 丢弃位于严重拥塞阈值后的低优先级业务, 一方面优先保证了高优先级业务的 QoS 需求, 另一方面缓解了拥塞节点的拥塞程度; 与传统的拥塞规避算法中采用的 ACO 算法相比, BPSO 算法的收敛速度更快, 节省了运行时间; 此外, 采用 BPSO 算法为被丢弃的低优先级业务重新选择路径时, 综合考虑备选路径的时延与可用带宽, 不仅保证了业务的服务质量, 而且优化了网络资源, 均衡了网络负载。

参考文献

[1] 谈苏伟. 中国南方电网调度自动化实时通信的现状分析和研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(22): 109-114.
TAN Su-wei. Analysis and research of real-time communication current situation in power dispatch automation for China south power grid[J]. Power System

Protection and Control, 2010, 38(22): 109-114.
[2] 黄伟, 葛敏辉, 方兴其. 华东区域电力调度数据网应用接入规范[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(18): 100-103.
HUANG Wei, GE Min-hui, FANG Xing-qi. Study on accessing specification of power dispatching application to the SGD net in East China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(18): 100-103.
[3] 高明, 袁玲, 李文云, 等. 电力调度系统信息化的几个问题探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(14): 138-142, 154.
GAO Ming, YUAN Ling, LI Wen-yun, et al. Study on several problems of power dispatching system information construction[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(14): 138-142, 154.
[4] 谭贤柱, 张众发. 电力调度数据网建设研究[J]. 电力系统通信, 2012, 33(241): 15-19.
TAN Xian-zhu, ZHANG Zhong-fa. Research on construction of electric power dispatching data network[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2012, 33(241): 15-19.
[5] 管爱东, 郑建国, 周明全. IP over SDH 技术在电力系统数据网中的应用[J]. 计算机技术与发展, 2006, 16(7): 195-200.
GUAN Ai-dong, ZHENG Jian-guo, ZHOU Ming-quan. Application of IP over SDH technology in power system data net[J]. Computer Technology and Development, 2006, 16(7): 195-200.
[6] 李高望, 鞠文云, 段献忠, 等. 电力调度数据网传输特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(22): 141-148.
LI Gao-wang, JU Wen-yun, DUAN Xian-zhong, et al. Transmission characteristics analysis of the electric power dispatching data network[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(22): 141-148.
[7] 戚佳金, 刘晓胜, 张良. 一种低压配电网电力线载波通信网络中继算法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 73-78.
QI Jia-jin, LIU Xiao-sheng, ZHANG Liang. A power-line carrier communications relay algorithm for low-voltage distribution[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(14): 73-78.
[8] 王少威, 万山明, 周理兵, 等. 利用蚁群算法辨识 PMSM 伺服系统负载转矩和转动惯量[J]. 电工技术学报, 2011, 26(6): 18-25.
WANG Shao-wei, WAN Shan-ming, ZHOU Li-bing, et al. Identification of PMSM servo system's load torque and moment of inertia by ant colony algorithm[J].

- Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(6): 18-25.
- [9] 万博, 卢昱, 陈立云, 等. 基于改进蚁群算法的拥塞规避 QoS 路由算法[J]. 计算机工程, 2011, 37(20): 49-51. WAN Bo, LU Yu, CHEN Li-yun, et al. QoS routing algorithm with congestion avoidance based on improved ant colony algorithm[J]. Computer Engineering, 2011, 37(20): 49-51.
- [10] 王传臣, 张润彤, 李丹丹, 等. 认知网络中的拥塞规避多径路由算法[J]. 电子学报, 2011, 39(8): 1858-1863. WANG Chuan-chen, ZHANG Run-tong, LI Dan-dan, et al. Multiple-path routing algorithm with congestion avoidance in cognitive networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(8): 1858-1863.
- [11] LI Dan-dan, ZHANG Run-tong, WANG Rui. A multiple-path routing algorithm with congestion avoidance based upon ant colony algorithm in cognitive networks[J]. Journal of Computational Information Systems, 2010, 6(8): 2473-2482.
- [12] 章小强, 管霖, 王同文. 针对特征选择问题的改进蚁群算法及其在电力系统安全评估中的应用[J]. 电工技术学报, 2010, 25(12): 154-160, 166. ZHANG Xiao-qiang, GUAN Lin, WANG Tong-wen. Kernel feature identification based on improved ant colony optimization algorithm for transient stability assessment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(12): 154-160, 166.
- [13] Yannis Marinakis, Georgia-Roumbini Iordanidou, Magdalene Marinaki. Particle swarm optimization for the vehicle routing problem with stochastic demands[J]. Applied Soft Computing Journal, 2013, 13(4): 1693-1704.
- [14] 何怡刚, 祝文姬, 周炎涛, 等. 基于粒子群算法的模拟电路故障诊断方法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(6): 163-171. HE Yi-gang, ZHU Wen-ji, ZHOU Yan-tao, et al. An analog circuit diagnosis method based on particle swarm optimization algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(6): 163-171.
- [15] 李淑红, 张巧荣. 二进制粒子群算法在路径规划中的应用[J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(21): 4953-4955, 5009. LI Shu-hong, ZHANG Qiao-rong. Application of binary particle swarm optimization algorithm in path planning[J]. Computer Engineering and Design, 2009, 30(21): 4953-4955, 5009.
- [16] 李明, 石为人. 基于二进制粒子群算法的异构传感器网络成本最优节点部署机制[J]. 计算机科学, 2010, 37(12): 63-66. LI Ming, SHI Wei-ren. Optimal sensor deployment scheme in heterogeneous sensor networks based on binary particle swarm algorithm[J]. Computer Science, 2010, 37(12): 63-66.
- [17] 刘丽榕, 刘宗岐, 王玉东, 等. 国家电网调度数据网第二平面建设方案探讨[J]. 科技情报开发与经济, 2010, 20(35): 77-80. LIU Li-rong, LIU Zong-qi, WANG Yu-dong, et al. Discussion on the second plane construction scheme of state grid dispatching digital network (SGDnet)[J]. Sci-Tech Information Development & Economy, 2010, 20(35): 77-80.
- [18] 章晋龙, 陈璨, 魏畅, 等. 广东电网公司“十二五”二次系统规划[R]. 广州: 广东电网公司电力调度通信中心, 广东电网公司电力通信设备运维中心, 广东省电力设计研究院, 2010. ZHANG Jin-long, CHEN Can, WEI Chang, et al. The 12th five-year secondary system planning of Guangdong Power Grid Corporation [R]. Guangzhou: Power Dispatch and Communication Center of Guangdong Power Grid Corporation, Power Communication Equipment Operation Center of Guangdong Power Grid Corporation, Guangdong Electric Power Design Institute, 2010.
- [19] SUN Yi, YU Li, ZHANG Jing, et al. Joint MAC-PHY layer resource allocation algorithm based on triangle module operator for multi-service OFDM system[C] // 2011 3rd International Conference on Environmental Science and Information Application Technology (ESIAT 2011). Amsterdam: Elsevier, 2011: 163-169.

收稿日期: 2013-05-02; 修回日期: 2013-05-30

作者简介:

曾 瑛 (1972-), 女, 工学学士, 高工, 主要从事通信网系统分析和运行方式管理工作; E-mail: 13922720563@139.com

李伟坚 (1965-), 男, 工学学士, 高工, 主要从事通信网系统分析和运行方式管理工作;

陈媛媛 (1988-), 女, 工学学士, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统通信, 无线传感器网络及异构融合网络。