

DOI: 10.7667/PSPC171539

基于拥塞感知的ASON路由算法

胡邦权¹, 王先培², 简子倪², 陈敬佳³, 范勇锋¹, 向辉¹, 朱国威², 罗智⁴

(1. 国网湖北省电力公司荆门供电公司, 湖北 荆门 448000; 2. 武汉大学电子信息学院, 湖北 武汉 430072;
3. 国网湖北省电力公司, 湖北 武汉 430077; 4. 中建水务环保有限公司, 北京 100000)

摘要: 针对网络中瞬间涌现的大量并发数据流导致网络拥塞的问题, 提出了一种改进的拥塞感知路由算法。该算法可实时根据节点和邻居节点到目的节点的路径长度及拥塞状况选择路径, 以自动交换光网络(Automatically Switched Optical Network, ASON)网数据包拥塞指标为链路代价值, 根据网络实际的信息包传输状况, 对各节点链路进行加权计算。该算法能够动态感知网络拥塞状态, 是一种可自适应调节的路由算法。仿真实验表明, 相比传统最短路径路由算法, 所提算法能够有效提高 ASON 网动态选路的合理性及传输网数据的传输效率, 优化网络资源利用率。

关键词: 自动交换光网络; 拥塞感知; 路由算法; 电力传输网

Research on ASON routing algorithm based on congestion aware

HU Bangquan¹, WANG Xianpei², JIAN Zini², CHEN Jingjia³, FAN Yongfeng¹, XIANG Hui¹, ZHU Guowei², LUO Zhi⁴

(1. State Grid Hubei Electric Power Company Jingmen Power Supply Company, Jingmen 448000, China;
2. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
3. State Grid Hubei Electric Power Company, Wuhan 430077, China;
4. China Construction Water Affairs Environmental Protection Co, LTD., Beijing 100000, China)

Abstract: An improved congestion aware routing algorithm is proposed to solve the problem that the network is about to enter the congested state when a large number of instant concurrent data stream flow emerge in network. The algorithm can select the path according to the path length and congestion condition of the node and the neighbor node to the destination node in real time, use the ASON (Automatically Switched Optical Network) network packet congestion index as the link value, and calculate the link of each node according to the actual packet transmission status of network. It is an adaptive adjustment routing algorithm which can dynamically sense network congestion state. Simulation results show that compared with the shortest path routing algorithm, the proposed algorithm can effectively improve the transmission efficiency of transmission network and optimize the utilization rate of network resources.

This work is supported by Youth Science Foundation (No. 51707135).

Key words: ASON; congestion aware; routing algorithm; power transmission system

0 引言

电力通信网作为电力系统的实体网络, 依托电网建设同时也为电网安全稳定运行与电网企业规范化管理提供重要保障^[1-4]。为适应电力通信发展的新形势, 自动交换光网络^[5-7](Automatically Switched Optical Network, ASON)交换技术被提了出来。ASON 可实现业务的动态连接和时隙资源的动态分配, 被认为是新一代的光传输网。路由技术作为其

核心技术^[8], 对动态选路的连接实现起到了重要的作用。传统的 IP 网络多采用开放最短路径优先(Open Shortest Path First, OSPF)协议, 可实现路由的动态发现。但是, 鉴于 ASON 路由的高灵活性要求, 基于通用多协议标志交换(Generalized Multiprotocol Label Switching, GMPLS)协议扩展的 OSPF-TE 路由协议成为了 ASON 的主流。其中, ASON 中各段链路的开销值一般选择链路代价值为参考, 进行 OSPF-TE 路由协议动态选路优化, 也是各研究人员努力优化设置的重要参数之一。合理的链路代价值设置, 可优化业务路由路径, 提升 ASON 资源利用率,

基金项目: 青年科学基金项目(51707135)

减小网络风险, 提高业务质量及网络安全。

当网络中流量变大时, 在路由器处理速度有限情况下, 最短路径算法直接导致拥堵的节点更加拥堵, 网络性能将会持续恶化。为解决这类问题, 对能够实时感知拥塞的路由算法进行研究极有必要。为此, 本文对电网控制业务的路由计算策略进行了研究, 提出了一种 ASON 网络链路代价计算方法, 根据网络实际的信息包传输状况, 对各节点链路进行加权计算, 以提高 ASON 网动态选路的合理性, 优化网络资源利用效率。

1 ASON 网络路由技术分析

1.1 ASON 路由的功能组件

与传统 IP 路由比较, ASON 路由是一种基于端到端的路由协议, 需要提前建立连接, 而 IP 网络中的路由不需要。为更好地满足 ASON 路由体系的发展需求, 国际电信联盟给了一种 ASON 路由技术方法, 该方法包括了路由结构、路径选择、抽象信息、路由属性及状态图转移等功能组件^[9]。其中, 4 种路由结构组件间的关系如图 1 所示。

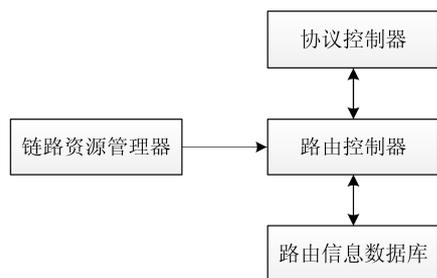


图 1 ASON 路由功能组件示意图

Fig. 1 ASON routing functional components diagram

1.2 ASON 路由模式

ASON 网络针对多种需求, 提出了 3 种路由模式, 分别为源路由选路、分层路由技术和逐跳选路^[10-12]。不同模式面向不同需求, 拥有不同作用及特征。具体如下。

1) 源路由选路模式

该模式通过分布节点的路由控制器和连接控制器联合实现。由于一条路由通道很可能通过多个路由域, 因此, 选路过程中, 由第一个复杂节点其所在域的路由选择, 同时选择下一路由域的入口节点, 以此类推, 直至到达目的节点。

2) 分层路由模式

ASON 网络具有分层路由体系结构。各子网能够掌握自身所在层的拓扑结构, 并能够进行动态连接, 但是无法获取其他层的情况。各层次中均含有

一个路由控制器、链路资源管理器及连接控制器, 以实现本子网路由选择的功能, 同时各层子网间通过主站点实现路由选择。

3) 逐跳选路模式

该模式的路由选择是以节点微电位进行的。类似于 IP 网络中的信息传输方式, 不同于源路由选路模式。逐跳选路中, 路由控制器永远只得到下一跳信息, 减少了各节点路由数据库的容量。

1.3 ASON 路由算法

1) 最短路径路由算法

ASON 网络中, 路由算法负责在源宿节点间计算出一条路由通道, 为其分配带宽。而最短路径路由算法就是要找到一条给定节点和网络中其他节点间开销最小的通道。

这里主要介绍两种最短路径路由算法, 即迪杰斯特拉(Dijkstra)算法^[13-14]和弗洛伊德(Floyd)算法^[14]。Dijkstra 算法是一种典型的单源最短路径算法, 用来计算一个节点到达网络中剩余节点的最短路径。该算法是以起点为中心, 层层向外扩展直至到达目的节点为止, 不允许边权值为负值。该算法思路如下: 将网络中节点细分为三种, 即为标识节点、临时性标识节点和永久性标识节点。具体算法思想如下。

步骤 1: 初始化。划分网络中节点集合 V 为两个子集, 用 S (标识节点集)和 T (未标识节点集)表示。其中 $T=V-S$ 。

步骤 2: 计算每个未标识节点 t 的距离 $D(t)$ 。由 $D(t)$ 值查找集合 T 中距离 s 最近的节点 d , 从而得到节点 s 到节点 d 的最短路径长度 $D(d)$ 。其中 $D(t)$ 表示源节点到节点 t 的最短路径长度, 同时要求该路径不包括 T 中其他的未标识节点。

步骤 3: 更新节点集合 S 、 T , $S=S \cup \{d\}$, $T=T \cup \{d\}$ 。判断集合 T 是否为空集。是, 则结束计算; 否则转到步骤 2。

Floyd 算法是用来解决两点间最短路径的一种路由算法, 该算法边权值可以为负, 负权值回路在该算法中被禁止。该算法基本思想为: 对一个网络节点为 n 的网络, 生成 $n \times n$ 的方阵, 其中对角线元素为 0, 其他元素用来表示节点间的路径长度。

步骤 1: 初始化, 方阵中, 任意两点间有边权值的看作此两点的最短路径。

步骤 2: 对任两节点 v_i 和 v_j , 两节点存在边, 则以此边权值为最短路径, 否则, 将该值设为最大值。

步骤 3: 原路径中增加中间节点, 判断增加前后两节点间路径的变化, 如果减小了, 则以该值为新的矩阵元素, 更新矩阵。

最短路径路由算法设定网络中的数据包总是沿距离目标节点开销值最小的路径传递,是一种静态算法,网络拓扑一旦固定,路由通道也随之确定。该算法从不考虑网络中数据包传输状态,即使当部分节点由于数据包大量积累导致传输性能急剧下降,以至于无法及时传输它所收到的数据包时,最短路径策略也没有提供优化机制为拥塞数据包重新路由。而网络中介数较大的节点是多条路径交叉的节点,这些节点往往需要承担更多的数据。因此,当网络中流量变大时,在路由器处理速度有限的情况下,最短路径算法直接导致拥堵的节点更加拥堵,网络性能将会持续恶化。为解决这类问题,对能够实时感知拥塞的路由算法进行研究极有必要。

2) 约束条件的路由算法

约束条件的路由算法是指:通过满足约束条件,提供合理的业务路由,达到减小网络资源占用、提高网络负载能力的目的。作为流量工程的一个重要组成单元,约束条件类型主要由资源属性、业务流主干属性及拓扑信息等因素组成。其中:

资源属性包括链路损耗、色散、波长转换能力、长度;

业务流质量受限条件包括带宽、误码率、串扰、可靠性、阻塞率;

拓扑状态信息包括可用带宽。

以上分析可知,路由受到多种约束条件类型的限制,而如何量化约束条件,是约束条件路由算法的关键问题。按照约束条件类型对路由算法的影响分类,可将约束条件分成两种。

(1) 前验性条件,包含时延、带宽、波长连续性和资源类型等条件。

(2) 后验性条件,包含长度、可靠性和拥塞等条件。

为解决多约束路由算法问题,诸多学者对此进行了研究。文献[15]研究了容量优化的约束路由算法,其通过引入负载均衡思想,提出了一种启发式路由算法,在比较路由选择过程中链路负载与网络整体均值情况下,利用动态链路权重调整实现负载均衡的目的。文献[16]提出了一种基于最小综合成本的路由计算方法,该方法结合组播成员动态特性提出了一种动态组播路由算法,优化了波长转换次数、分光次数等问题。而分析已有的基于约束的路由问题,可将其分为权值法、剪枝法和选择法三种。

权值法通过将约束条件转换为权值变量,对传统最短路径算法进行加权,优化算法结果;剪枝法通过剪去不满足条件的路径,实现路径的计算;选择法则通过泛洪的方式首先计算出不含约束条件的

多条可用路径,之后利用多种约束条件在其中择优选择。

2 一种拥塞感知的路由算法

电力传输网承担着电力系统生产调度、经营管理及企业信息化等多种业务需求,其工作状态直接影响着电力系统的安全稳定运行。同时,信息网中的数据传输需要路由器为其分配路由通道,路由器路由策略将直接制约着信息网的信息传输效率,进而影响电网的工作状态。电力系统信息业务中,线路的继电保护业务的时延要求最高,规定传输保护信息的路由时延应小于等于 $10\text{ ms}^{[17]}$,以上规定对信息网路由配置提出了更高的要求。实际网络中的路由器均有固定的计算速度和存储容量,因此,它每一个时间步能够处理的数据量是固定的,如果网络中瞬间涌现大量的并发数据流,那么网络势必会进入拥塞状态。为了快速消纳网络中的数据包,高效、简便的路由算法设计极其重要。然而对于传统的路由算法,如最短路径算法,一旦设置完毕,其在实际运行过程中往往是静态运行的。而一个好的路由策略应该是能够动态感知网络拥塞状态,可自适应调节的算法。为此,本文研究了一种改进的拥塞感知路由算法,可实时根据节点和邻居节点到目的节点的路径长度及拥塞状况选择路径。

2.1 拥塞感知算法分析

假设节点 S 发一个数据包给目标节点 t ,首先计算该节点 S 的所有邻居节点的权重参数值 H_i ,该参数用来表征数据包通过邻居节点 i 的代价权重,其计算方法如式(1)所示。

$$H_i = \beta \frac{E_i}{\sum_{j \in g(i)} E_j} + (1 - \beta) \frac{L_i}{\sum_{j \in g(i)} L_j} \quad 0 \leq \beta \leq 1 \quad (1)$$

式中: $g(i)$ 为节点 S 的所有邻居节点集合; L_i 是节点 i 到节点 t 的最短路径长度; $E_i = c_i / k_i$, 是用来评估数据包在节点 i 的等待时间, c_i 为节点 i 的队列长度, k_i 为节点 i 单位时间内每次能够发送的数据包长度; β 为参变量; j 为节点 i 的邻居节点。

当节点 i 发生拥塞时, c_i 值会很大,导致 E_i 也会增加。对实际的信息网络而言,重要的信息节点,其对应路由器的处理能力也会相应较高,因此可以通过节点重要度判别方法,对 k_i 值进行加权赋值。文献[18-19]用节点度值大小表征节点重要度,度值大的节点 k_i 值较大。由文献[19]可知,节点重要度不仅与节点度值有关,也会受到相邻节点和其所在位置的影响,为此,本节参考文献[19],用节点重

要度指标衡量节点的重要性, 根据节点重要度评估值对 k_i 进行赋值。

首先定义节点重要度贡献矩阵如式(2)所示。

$$\mathbf{H}_{IC} = \begin{bmatrix} 1 & \delta_{12}D_2/\langle k \rangle^2 & \cdots & \delta_{1n}D_n/\langle k \rangle^2 \\ \delta_{21}D_1/\langle k \rangle^2 & 1 & \cdots & \delta_{2n}D_n/\langle k \rangle^2 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \delta_{n1}D_1/\langle k \rangle^2 & \delta_{n2}D_2/\langle k \rangle^2 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: n 为网络中的节点数; $\langle k \rangle$ 为网络的平均度值; 若节点 v_i 的度值为 D_i , 则节点 v_i 将自身重要度 $D_i/\langle k \rangle^2$ 贡献给它的每一邻居节点; δ_{ij} 为网络的邻接矩阵对应元素, 当 v_i 和 v_j 直接连接时值为 1, 否则为 0; 对角线上的数值 1, 表示节点对自身的重要度贡献比例值。

由节点重要度贡献矩阵定义可以发现其与网络的邻接矩阵拥有相似的矩阵结构, 用来反映网络中各节点对重要度的贡献关系。具体而言, $H_{IC}(ij)$ 表征节点 j 对节点 i 的重要度贡献比例。 \mathbf{H}_{IC} 可以看作是邻接矩阵的映射, 映射规则如式(3)所示。

$$\begin{cases} \delta_{ij} \rightarrow \delta_{ij}D_j/\langle k \rangle^2 & i \neq j \\ \delta_{ij} \rightarrow 1 & i = j \end{cases} \quad (3)$$

为了进一步表征节点在信息传输中的作用, 本文参考网络效率定义方法, 给出了节点 p 的效率 I_p 的定义如式(4)所示。

$$I_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1, i \neq p}^n \frac{1}{d_{pi}} \quad (4)$$

式中: n 为网络中的节点数; d_{pi} 为节点 p 和节点 i 间的距离。由节点效率定义可以看出, I_p 表示节点到达其他节点的难易程度, 是节点 p 对信息包传输贡献值的量化, 该值越大表示该节点所处位置越重要。因而, 节点效率值可以一定程度反映节点的重要程度。

本节给出了融合以上两种因素的节点重要度评价矩阵 \mathbf{H}_R , 其中节点效率值表征节点位置信息, 节点重要度贡献矩阵 \mathbf{H}_{IC} 表征相邻节点的贡献度。节点重要度评价矩阵 \mathbf{H}_R 定义如式(5)。

$$\mathbf{H}_R = \begin{bmatrix} I_1 & \delta_{12}I_2D_2/\langle k \rangle^2 & \cdots & \delta_{1n}I_nD_n/\langle k \rangle^2 \\ \delta_{21}I_1D_1/\langle k \rangle^2 & I_2 & \cdots & \delta_{2n}I_nD_n/\langle k \rangle^2 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \delta_{n1}I_1D_1/\langle k \rangle^2 & \delta_{n2}I_2D_2/\langle k \rangle^2 & \cdots & I_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, H_{Rij} 表示 \mathbf{H}_R 中任意元素, H_{Rij} 表示节点 j 对节点 i 的重要度贡献值。根据 H_{Rij} 定义方法, 定义节点 i 的重要度 Q_i 如式(6)所示。

$$Q_i = I_i \sum_{j=1, j \neq i}^n \delta_{ij}D_jI_j/\langle k \rangle^2 \quad (6)$$

由重要度定义可知, Q_i 表示所有与节点 i 相连节点重要度贡献值和与节点 i 效率值之积。该定义方法能够综合表征节点的全局重要度和局部重要度, 更加贴合实际网络情况, 提高网络节点重要度评估精度。

2.2 算法流程

通过以上分析, 给出基于拥塞感知路由算法的路由计算流程, 如下所述。

步骤 1: 初始化网络参数。

步骤 2: 首先计算节点 i 的重要度 Q_i , 得到加权的 k_i 值, 进而计算网络中节点 S 的权重参数值 H_i 。

步骤 3: 判断参数值 H_i 中最小值是否不止一个, 是的话, 随机选择其中一个最小值对应的节点作为下一跳目的节点; 否则直接选择参数值 H_i 中最小的作为下一跳节点。

步骤 4: 判断下一跳节点是否与数据包的上一个路由节点重复, 是的话重新选择下一跳路由节点; 否则, 转入步骤 5。

步骤 5: 判断网络中所有节点是否都计算完毕, 若否, 转入步骤 2; 若是, 表示所有节点都已找到下一跳路由路径, 结束流程。

对所述算法分析可以发现, 当 $\beta=0$ 时, 该算法即是最短路径算法, 通过调节 β 值, L_i 和 E_i 的权重值将会相应变化, 所述路由算法效率值也会对应变化。

3 仿真实验

本节用平均传输时间和 t 时刻网络中剩余数据包总数 N_t 描述路由算法的效率, 平均传输时间计算方法如式(7)所示。

$$\langle T \rangle = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N T_j \quad (7)$$

式中: T_j 为数据包 j 在信息网中的生存时间总和, 由等待时间和传输时间两部分组成; N 为信息网中的数据包总数。

N_t 表示 t 时刻网络中所有未到达目的节点的数据包总数。

根据本节所述改进路由算法, 数据包动态处理流程图如图 2 所示。

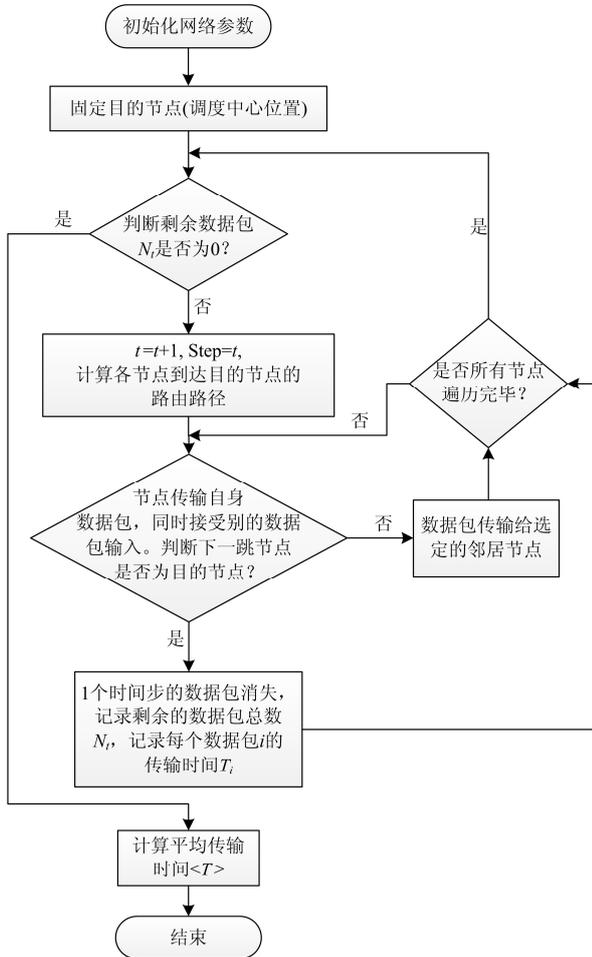


图 2 数据包处理流程图

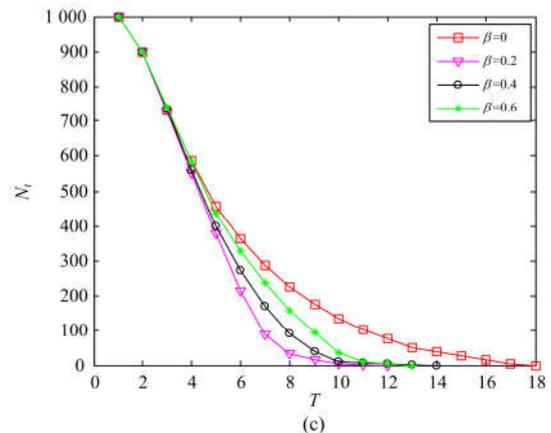
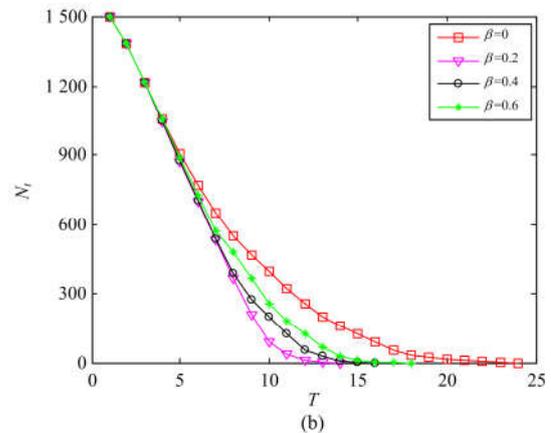
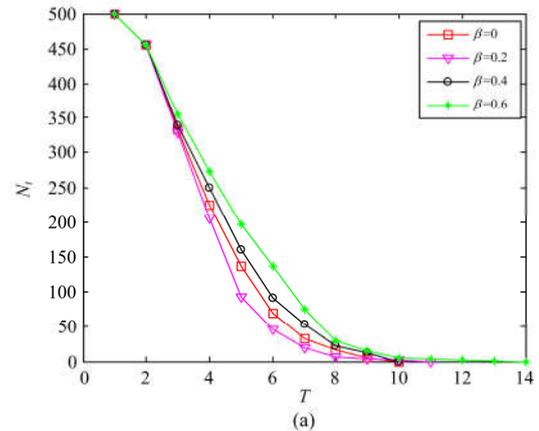
Fig. 2 Data packet processing flow chart

为对比两种路由算法的效率, 本节参考文献 [13-14], 首先生成节点数目为 $n=1000$ 的无标度信息网络, 具体生成算法如下: 初始节点数设为 5, 每增加一个新的信息节点, 与 $m=3$ 个已存在节点相连, 连接概率满足 $P_i = k_i / \sum_j k_j$, 其中 k_i 表示节点 i 的度值, $\sum_j k_j$ 表示网络中所有节点的度值的累加和。

首先定性研究不同路由策略下 N_i 的变化, 用来研究不同通过路由策略对数据包传输效率的影响。仿真中设置数据包个数 $N=500, 1000, 1500, 2000$, 用来模拟网络从不拥塞到拥塞的过程。图 3 用来描述 N_i 与参数 β 之间的关系, 本文设定 $\beta=0.2, 0.4, 0.6$ 。 $\beta=0$ 时即是最短路径路由策略。

从图 3 可以发现, 随着网络中数据包总数的增加, 相比本文所提的改进拥塞感知路由算法, 最短路径算法 ($\beta=0$) 下, 网络的整体处理性能下降最为明显。从图 3(b)到图 3(d)中的曲线可以明显看出本

文所提算法的优势, 即网络中数据包越多, 最短路径算法阻塞越严重, 本文算法的优势越明显。同时, 由图中也可以发现, N_i 的变化与路由参数 β 有着直接的联系, 选择适当的 β 值可以有效地提高信息网数据包的处理速度。由以上 4 个图可知, $\beta=0.2$ 时, 信息网应对拥塞的表现性能最佳。另外需要说明的是图 3(a)中最短路径算法表现不像其他 3 个子图中那么差, 这是因为图 3(a)中数据包总数为 500, 整个网络的数据包数量相对较少, 极难进入拥塞状态, 因此, 此时网络中不同的路由算法, 其性能表现差异性不大。



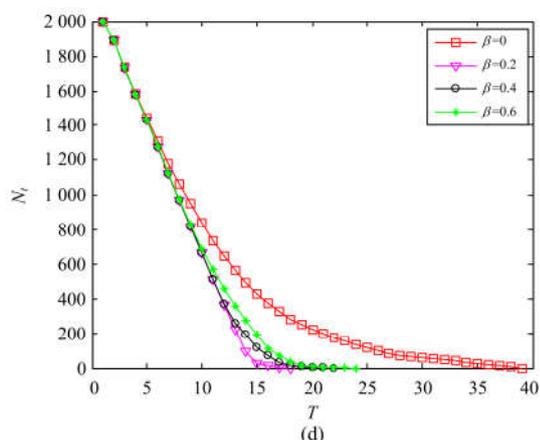


图 3 t 时刻数据包个数 N_t 与路由参数 β 之间的关系
Fig. 3 Relationship between the number of data packets N_t of t time and the routing parameter β

为进一步分析参数 β 对网络性能的影响, 本节研究平均传输时间 $\langle T \rangle$ 与参数 β 间的变化关系, 如图 4 所示。设定参数 β 取值范围 $[0, 0.9]$, 间隔 0.1, 设置数据包 $N=500, 1\ 000, 1\ 500, 2\ 000$ 。

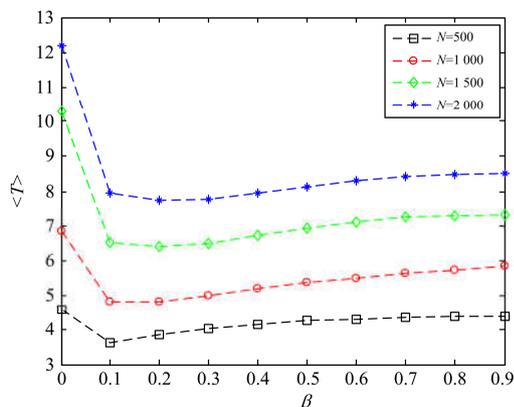


图 4 平均传输时间与路由参数 β 之间的关系
Fig. 4 Relationship between the average transmission time and the routing parameter β

由图 4 可以看出, 平均传输时间 $\langle T \rangle$ 随着参数 β 的增加, 整体呈现先下降后上升的趋势。即存在着一个参变值使得网络的整体传输性能效率最高, 平均传输时间最小, 该值即可认为是使改进拥塞感知路由算法性能最好的参数值。分析原因可知, 虽然本节所提改进路由算法选择了距离较大的路径, 但是也成功地避免了拥堵的节点, 使得数据包的平均等待时间大大减小, 导致网络整体的平均传输时间减小。进一步分析数据包数目 N 不同时的网络平均传输时间曲线, 可以发现, 改进的拥塞感知路由算法整体平均传输时间 $\langle T \rangle$ 比最短路径算法 ($\beta=0$) 要

小, 特别是对于数据包总数较大的网络, 该现象更加明显, 该结果也和前面的分析相一致。

4 结论

本文首先介绍了 ASON 网络路由技术的一些基本情况, 包括 ASON 路由的功能组件、路由模式及路由算法。其中, 路由算法部分主要从最短路径路由算法和多约束条件的路由算法两个角度进行分析。之后, 以 ASON 网数据包拥塞指标为链路代价值, 提出了一种考虑链路代价的路由计算方法。该方法根据网络实际的信息包传输状况, 对各节点链路进行加权计算, 以提高 ASON 网动态选路的合理性, 优化网络资源利用效率。仿真实验表明, 相比最短路径路由算法, 本文所提算法能够有效提高传输网数据传输效率, 优化网络资源利用率。

参考文献

- [1] 曾瑛, 朱文红, 邓博仁, 等. 基于电网影响因子的电力通信网关键节点识别[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 102-108.
ZENG Ying, ZHU Wenhong, DENG Boren, et al. Crucial node decision algorithm based on power network impact factor in electric power communication network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 102-108.
- [2] 李鹏, 卫星, 郭利军, 等. 智能变电站继电保护运维防误技术研究及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(19): 123-129.
LI Peng, WEI Xing, GUO Lijun, et al. Study and application of relay protection maintenance anti-misoperation technology in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(19): 123-129.
- [3] BO Z Q, LIN X N, WANG Q P, et al. Developments of power system protection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 1-8. DOI: 10.1186/s41601-016-0012-2.
- [4] 孙静月, 崔力民, 李珊君. 基于业务的电力通信网络脆弱性分析评价方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(24): 138-145.
SUN Jingyue, CUI Limin, LI Shanjun. Vulnerability evaluation method of electric power communication network based on business[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(24): 138-145.
- [5] 曹毅宁, 叶亚斌, 郑小平, 等. 智能光网络中基于冲突避免的通道恢复机制[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009, 49(10): 1632-1634.
CAO Yining, YE Yabin, ZHENG Xiaoping, et al. Collision avoidance mechanism for path restoration in auto switched optical works[J]. Journal of Tsinghua

- University (Science and Technology), 2009, 49(10): 1632-1634.
- [6] 周贤伟, 吴启武, 王建萍, 等. 一种高效的 ASON 安全光路建立协议[J]. 光子学报, 2009, 38(8): 2071-2076.
ZHOU Xianwei, WU Qiwu, WANG Jianping, et al. An efficient secure lightpath establishment protocol in ASON[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(8): 2071-2076.
- [7] 李健, 杨爱平, 顾毓仪, 等. 新的 ASON 路由实现方案[J]. 通信学报, 2006, 27(6): 72-80.
LI Jian, YANG Aiping, GU Wanyi, et al. Novel ASON routing implementation[J]. Journal on Communications, 2006, 27(6): 72-80.
- [8] 谭志, 纪越峰. 多域分层 ASON 路由技术[J]. 北京邮电大学学报, 2007, 30(1): 114-117.
TAN Zhi, JI Yuefeng. The routing of multi-area and hierarchical in the ASON[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2007, 30(1): 114-117.
- [9] WU R, CHEN Z, ZHU D. A novel routing algorithm of SRLG constraints with conditional failure probability in mesh optical network[C] // International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, September 23-25, 2011, Wuhan, China: 1-4.
- [10] 王勇, 利韶聪, 陈宝仁. 电力通信业务应用及发展分析[J]. 电力系统通信, 2010, 31(217): 44-47.
WANG Yong, LI Shaocong, CHEN Baoren. Application and development analysis of electric power communication service[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2010, 31(217): 44-47.
- [11] 齐鸣. 基于 ASON 技术的电力通信网络方案设计与实施[D]. 北京: 北京邮电大学, 2011.
QI Ming. Design and practice of power communication network solution based on ASON technology[J]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2011.
- [12] WU R, ZHU D, CHEN Z. An improved resource scheduling algorithm based on the PSO in mobile grid[C] // 2011 7th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, September 23-25, 2011, Wuhan, China: 1-4.
- [13] TAKAOKA T. Shortest path algorithms for nearly acyclic directed graphs[J]. Theoretical Computer Science, 1998, 203: 143-150.
- [14] BACKHOUSE R C, VAN DEN EIJNDE J P H W, VAN GASTEREN A J M. Calculating path algorithms[J]. Science of Computer Programming, 1994, 22(1-2): 3-19.
- [15] 吴启武, 王文君, 王建萍, 等. 基于多条件约束的 ASON 动态组播路由算法[J]. 光电子·激光, 2012, 23(1): 98-105.
WU Qiwu, WANG Wenjun, WANG Jianping, et al. A dynamic multicast routing algorithm based on multi-constraint in ASON[J]. Journal of Optoelectronics-laser, 2012, 23(1): 98-105.
- [16] 光纤通道传输保护信息通用技术条件: DLT 364—2010[S].
General specification of transmitting protection information on optical channel: DLT 364—2010[S].
- [17] CHEN Z Y, WANG X F. A congestion awareness routing strategy for scale-free networks with tunable clustering[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2006, 364: 595-602.
- [18] CHEN Z, WANG X. Effects of network capacity under variations of network structure and routing strategy[C] // IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, April 23-25, 2006, Lauderdale, USA: 150-155.
- [19] 周璇, 张凤鸣, 李克武, 等. 利用重要度评价矩阵确定复杂网络关键节点[J]. 物理学报, 2012, 61(5): 1-7.
ZHOU Xuan, ZHANG Fengming, LI Kewu, et al. Finding vital node by node importance evaluation matrix in complex networks[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(5): 1-7.

收稿日期: 2017-10-17; 修回日期: 2017-12-29

作者简介:

胡邦权(1966—), 男, 高级工程师, 研究课题及方向为电力系统通信及信息安全; E-mail: 278585126@qq.com

王先培(1963—), 男, 教授, 研究方向为实时系统安全与可靠性; E-mail: xpwang@whu.edu.cn

简子倪(1994—), 女, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为通信与信息系统。E-mail: jianzini@whu.edu.cn

(编辑 魏小丽)