

## 基于带宽利用率的指数函数调制路由算法

翟 永, 李 宁, 王晓飞

(南京电子技术研究所, 南京 210039)

**摘 要:** 带宽利用率是网络传输能力评价的核心指标, 其值过高节点会出现拥塞现象, 导致网络性能急剧下降。为此, 基于该指标提出一种指数函数调制的路由算法 EBURM。构建一个目标函数模型, 给出目标函数中传输效率、带宽利用率和步长因子的理论值和计算公式, 并在当前主流园区网架构基础上, 利用仿真工具对 OSPF 经典路由机制和 EBURM 路由机制进行验证比较。实验结果表明, EBURM 在控制路径条数目为 5 以内的条件下, 具有优良的线性特征, 可最大限度调节网络中源节点的流量发送策略, 降低流量传输的代价。

**关键词:** 传输代价; 可用带宽; 迭代算法; 指数函数; 路由算法

**中文引用格式:** 翟 永, 李 宁, 王晓飞. 基于带宽利用率的指数函数调制路由算法[J]. 计算机工程, 2018, 44(6): 93-99, 103.

**英文引用格式:** ZHAI Yong, LI Ning, WANG Xiaofei. Routing algorithm with exponential function modulation based on bandwidth utilization[J]. Computer Engineering, 2018, 44(6): 93-99, 103.

## Routing Algorithm with Exponential Function Modulation Based on Bandwidth Utilization

ZHAI Yong, LI Ning, WANG Xiaofei

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China)

**[Abstract]** Bandwidth utilization is a core index in network transmission capability evaluation. Too large bandwidth utilization will cause node congestion and make the performance of the network drop dramatically. Aiming at this problem, based on bandwidth utilization, a bandwidth utilization routing algorithm with exponential function is proposed, named EBURM. It firstly puts forward an objective function in mathematics, then studies and calculated several key elements and factors in the objective function, and gives the the theoretical values and calculation formula of transmission of efficiency, bandwidth utilization and step factor. In the current popular enterprise intranet network architecture, EBURM is compared with classical OSPF routing mechanism by using simulation tools. Experimental result shows that the EBURM has excellent linear characteristics under the condition and the number of EBURM path is less than five. EBURM can adjust the traffic transmission strategy of the source node in the network to reduce the cost in the traffic transmission.

**[Key words]** transmission cost; available bandwidth; iterative algorithm; exponential function; routing algorithm

**DOI:** 10.19678/j.issn.1000-3428.0046548

### 0 概述

路由算法和选路机制实现的好坏会影响整个网络运行的效率。笔者研究并使用过与链路和节点传输代价相关的路径算法, 这种以容量作为主要参数的路由机制在传输数据时总是沿最大容量路径传输, 容易导致网络中不同源目节点对间的最优路径趋于重合和归一, 在网络拓扑中产生瓶颈节点, 造成越来越多的流量需要通过这条链路或节点传输。此时如不及时采用网络资源调度方案, 拥塞便会在这

些链路和节点发生。此类路由机制简单易用, 对路由器的 CPU 和内存消耗小、生产制造成本低, 从而造成极大的传输代价和带宽资源极大浪费。以欧洲科研教育骨干网 GEANT 为例<sup>[1]</sup>, 其平均链路利用率仅为 2% 左右, 但某些链路的带宽占用高达 90%, 网络链路整体上浪费极其严重。

为避免关键节点和拥塞产生, 高端路由器都将高速路由表计算能力、灵活的服务等级能力、高品质的服务质量作为最大的卖点<sup>[2-4]</sup>, 本质上流量调度机制是网络制造商的核心知识产权。

**基金项目:** 国家部委基金。

**作者简介:** 翟 永(1982—), 男, 高级工程师, 主研方向为网络服务质量管理、信息系统架构; 李 宁、王晓飞, 高级工程师。

**收稿日期:** 2017-03-28      **修回日期:** 2017-05-18      **E-mail:** njtntp2891@163.com

过去研究人员专注于开发简单易用的路由传输协议和流量调度机制,工作主要集中在根据网络拓扑和实际流量检测调整路由参数优化网络流量<sup>[5-6]</sup>,其中路由器可以根据当前拓扑和连接权重自动计算新的路由。这种链路状态路由协议有较低的计算开销和稳定性,但在应用时存在以下问题:1)链路状态协议认为每条等价链路传输流量的机会是均等的;2)衡量代价指标的关键参数的应用场景有一定限制;3)即使选定合理的关键参数,找出最短路径本身也是困难的。

在第1个问题中,最优路径之外的链路和节点没有任何传输流量的机会。为此,文献[7-8]提出多路径路由算法,充分整合空闲链路。针对第2个问题,文献[9-11]基于延迟中断、流片大小、时延敏感进行改进,文献[12]引入一个无维度的代价参数进行路由机制设计。这些算法提供了流量控制和调度的灵活性,在小规模网络中可以避免链路的拥塞,但均具有应用敏感性。文献[13-14]提出的连接权重算法相对具有较好的最优逼近性,但在较低的带宽利用率下性能差异也很明显。针对第3个问题,文献[15]将局部搜索技术引入最优点查询算法中,但即使对于一个较小的网络来说,最优连接权重最终也会遇到NP问题<sup>[16]</sup>。

文献[17-19]通过链路利用率计算传输代价,但在计算时没有把目的节点带宽分配与源节点发送流量的定量评估作为一个考虑的因素,这不切实际。实际上,在工程应用中即使投入巨大的成本,创造大的利用率也极其困难<sup>[20]</sup>。

本文考虑带宽利用情况,提出一种指数函数调制的路由算法 EBURM。该算法在一定时间内,以带宽利用率作为关键参数,通过指数函数加权分布式地调节流量,并采用迭代算法搜索,在输入-分配均等、可选链线条数等条件约束下,计算传输代价最小值,使数据流通过指数惩罚模型沿着非最短路径传输,从而提高算法的计算效率、拟合度和实用性,减轻最短链路的压力,达到降低传输总代价的目的。

## 1 EBURM 算法模型

### 1.1 OSPF 路由机制

信息通信网络的寻址和路由结构决定了其所具有的特征以及所提供的路由服务能力。国内外存在大量关于路由转发机制和协议的研究成果,总体上仍处于研究和讨论阶段,尤其是路由协议的应用场景、代价权重选择、计算复杂度还处于争议阶段。路由协议的演进和继承、商用与推广则更遥远。

目前,传统的路由处理机制和路由转发模型仍占据统治地位。由于 OSPF 路由协议具有自愈能力强、维护简单的特点,因此其在现有多数大型智慧园区中仍被广泛使用。OSPF 路由协议依托 Dijkstra 路径优先算法工作。Dijkstra 是一种最短路径树的构造方法,以数据源节点为起点,计算到其他目的节点的最短路径的“单源最短路径”算法。Dijkstra 按非降次序逐条构造从原始节点到各个节点的最短路径,找到和节点相距最短的节点以及到这个节点的路径,以此类推从而构建全网的链路状态数据库(Link State Database, LSDB)<sup>[21]</sup>。每台 OSPF 路由器根据自己周围的网络拓扑结构生成链路状态通告(Link State Advertisement, LSA),并通过更新报文将 LSA 发送给网络中的其他 OSPF 路由器。每台 OSPF 路由器根据自己周围的网络拓扑结构生成 LSDB,并将 LSDB 转换成一张带权的有向图,这张图便是对整个网络拓扑结构的真实反映。各个路由器得到的有向图是完全相同的。

从数学模型上来说,OSPF 在创建带权有向图时,以所选链路状态参数为代价关键参数,定义了一种链接点间的代价函数,并以此代价函数为基准从源节点开始比较下一跳代价的大小,记录最小值的节点和路径,并将路径在整个网络拓图中公告。从而使数据流在路由协议层次上具有一种路径选择的可能。本文用图1所示的网络拓扑图来阐述 OSPF 流量模型和指数流量模型的区别。

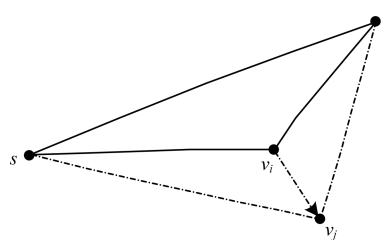


图1 2种流量模型对比示意图

在图1中,假设 $(s, t)$ 是节点 $s$ 到节点 $t$ 的最短路径,连接代价为 $w_s^t$ ,  $(v_i, t)$ 是从节点 $v_i$ 到节点 $t$ 的邻接路径,连接代价为 $w_{v_i}^t$ ,  $(s, v_i)$ 是从节点 $s$ 到节点 $v_i$ 的邻接路径,连接的代价为 $w_s^{v_i}$ 。假设从 $s$ 经 $v_i$ 到 $t$ 的距离与 $s$ 直接到 $t$ 的距离代价之间的差为 $d_{s, v_i}^t$ 且 $d_{s, v_i}^t > 0$ ,对于OSPF路由协议,只有当 $d_{s, v_i}^t = 0$ 时,也即 $w_s^t = w_s^{v_i} + w_{v_i}^t$ 时节点流量才会均量地在2条路径上传输;否则,当 $d_{s, v_i}^t > 0$ 时,节点 $s$ 只会选择路径 $(s, t)$ 向节点 $t$ 发送数据。因此,可以利用如下包含 $d_{s, v_i}^t$ 的分段函数表示OSPF算法模型:

$$X(d_{s, v_i}^t) = \begin{cases} 1, & d_{s, v_i}^t = 0 \\ 0, & d_{s, v_i}^t > 0 \end{cases} \quad (1)$$

式(1)表明一个节点是否在 OSPF 的传输路径上是明确的。由该式可知,经过 OSPF 协议从源节点  $s$  传输数据到目的节点  $t$  的路径数量的总和为  $\sum X(d'_{s,v_i})$ 。因此,所选择的任意路径传输源节点流量的占比为  $1/\sum X(d'_{s,v_i})$ 。

## 1.2 EBURM 路由机制

在图 1 中,假设存在节点  $v_j$ ,使得  $d'_{s,v_i} > 0$ 。如果采用式(1)所述的算式进行流量分配,即使链路  $(s,t)$  的传输代价比链路  $(s,v_j,t)$  的传输代价只有微弱的优势,链路  $(s,v_j,t)$  也得不到任何传输数据的机会,这与最大化利用网络全部可用链路传输数据的思想相互违背。因此,应当给予传输代价高的链路一定的数据传输机会,从而间接降低繁忙链路的传输代价,进而降低源节点传输流量的总代价,即需要对式(1)进行改进。从直观上  $X(d'_{s,v_i})$  按照  $\{0,1\}$  模式转发流量,如果使转发模型  $X(d'_{s,v_i})$  的取值在  $[0,1]$  之间平滑,那么未被路由机制选中的链路将获得相对公平的数据转发机会。考虑到指数分布在区间  $[0, +\infty]$  上具有优良的平滑性,利用指数函数对式(1)进行改进得到式(2)。

$$X(d'_{s,v_i}) = \begin{cases} \mu e^{-\mu d'_{s,v_i}}, & d'_{s,v_i} \geq 0 \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (2)$$

对比式(1)和式(2)可知,流量并非沿着最短路径进行传输,那些非最短路径仍可以根据节点对之间的利用率分布情况获得相应的传输机会,这就是 OSPF 路由模型与 EBURM 的第一个区别。式(2)在  $[0, +\infty]$  是递减函数,映射到物理空间,以链路带宽利用率作为衡量指标时,带宽利用率越低的链路将获得优先传输的机会,反之则越小。

在图 1 中,定义任意边  $l$  具有容量  $C_l$ ,定义当前时刻源节点  $v$  发送窗口大小为  $\varphi$ ,节点  $s$  到节点  $t$  的待发总流量为  $K_s(\varphi)$ ,定义单位时间内链路  $l$  上的流量为  $f$ ,定义单位时间内链路  $l$  的平均带宽利用率作为衡量链路代价的关键参数,用  $\alpha$  表示,那么  $\alpha = f/C_l$ 。通过式(2)可知,  $2/C_k$  值越大传输流量时获得传输流量的概率越小,反之越大。那么,通过上述假设可以得出总的传输代价为:

$$F(\varphi) = \sum_i \sum_j \varphi_i^j \sum_l X_l \alpha_l \quad (3)$$

因此,本文的目的转换成寻找函数  $F(\varphi)$  的最小值,也就是在单位时间内及链路带宽利用率期望值下寻找目标函数的最小值。本文直接参考文献[22],不再证明目标函数  $F(\varphi)$  最小值的存在性。

由假设条件知任意节点  $i$  发出的总流量  $K(\varphi) = \sum_j \varphi_i^j$ ,并且任意路径传输流量总和  $X_l \alpha_l \leq C_l$ ,对式(3)附加上述条件限制,利用拉格朗日极值法,当偏导数为 0 时存在极小值,令:

$$g_i(\varphi) = \sum_j \varphi_i^j - K_i(\varphi), f_l(\varphi) = X_l \alpha_l - C_l \quad (4)$$

将式(4)带入式(3),得到:

$$F(\varphi, \lambda, v) = \sum_i \sum_j \varphi_i^j \sum_l X_l \alpha_l + \sum_l \lambda_l (X_l \alpha_l - C_l) + \sum_i v_i (\sum_j \varphi_i^j - K_i(\varphi)) \quad (5)$$

因为  $(s,t)$  之间可传输流量的全部链路数量的集合,所以可将式(5)整理为:

$$F(\varphi, \lambda, v) = \sum_i \sum_j \varphi_i^j (\sum_l X_l (\alpha_l + \lambda_l) + v_i) - \sum_l \lambda_l C_l - \sum_i v_i K_i(\varphi) \quad (6)$$

由拉格朗日最小极值法求式(6)中  $F(\varphi, \lambda, v)$  关于  $\varphi, \lambda, v$  的偏导数,并令其结果为 0:

$$\frac{\partial F}{\partial \lambda} = \sum_i \sum_j \varphi_i^j X_l - C_l = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial F}{\partial v} = \sum_j \varphi_i^j - K_i(\varphi) = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \varphi} = \sum_l X_l (\alpha_l + \lambda_l) + v_i = 0 \quad (9)$$

对式(7)~式(9)分别利用梯度下降法得到式(10)~式(12),用于计算目标代价的综合迭代算式:

$$\lambda(n+1) = \lambda(n) - \gamma_\lambda (\sum_i \sum_j \varphi_i^j X_l^j - C_l) \quad (10)$$

$$v(n+1) = v(n) - \gamma_v (\sum_j \varphi_i^j - K_i(\varphi)) \quad (11)$$

$$\varphi(n+1) = \varphi(n) - \gamma_\varphi (\sum_l X_l (\alpha_l + \lambda_l) - (-v_i)) \quad (12)$$

为便于计算,将式(2)简化成:  $X(d'_{s,v_i}) = \mu e^{-\mu d'_{s,v_i}}$  ( $d'_{s,v_i} \geq 0$ ),以便在迭代计算时带回式(10)~式(12)。

式(10)~式(12)所表示的物理意义分别如下:式(10)表示当前时刻目的节点从当前链路  $l$  反馈到源端代价值的表达函数;式(11)表示当前时刻,源端从总流量  $K(\varphi)$  中拆解一定流量到当前链路  $l$  中发送代价的表达式;式(12)表示当前时刻目标端分配给源端的分配速率。

将当前时刻式(10)、式(11)的函数值分别带入式(12)进行计算,直到  $\varphi(n+1) = \varphi(n)$  停止迭代,也就是源节点以  $\varphi(n)$  大小发送数据链路的代价趋近于目标。将源节点邻接目标节点的  $\varphi$  值的集合带入式(3)可计算此时的代价函数值。

## 2 EBURM 算法关键问题分析

在迭代式(10)~式(12)的使用过程中会遇到以下关键的技术问题:1)为使迭代公式加速如何设置外部条件;2)为保持带宽计算具有相对的稳定性和高可信度如何选择统计时长;3)如何选择和决定迭代步长。针对上述 3 个问题,下文将逐个讨论。

### 2.1 传输效率

提高传输效率可以提升迭代公式的计算速度。确定传输效率时可以确定式(3)中源节点与目标节点链路的数量。定义当前时刻,源节点  $s$  发送窗口大小为  $\varphi$ 。为不失一般性,定义全部目标节点反馈

给源结点  $s$  总的可用带宽为  $c_s$ , 节点  $s$  到全部目标节点的待发总流量为  $K$ , 则其中有流量  $r$  在全部目标节点集合的随机通道上传输的概率为:

$$B_{n, \frac{1}{m}}(r) = \binom{K}{r} \cdot \left(\frac{1}{c_s}\right)^r \cdot \left(1 - \frac{1}{c_s}\right)^{K-r} \quad (13)$$

由牛顿二项式定理可知传输全部流量  $K$  的概率为:

$$T_1 = \frac{a_1^{K,n}}{K} = \frac{c_s}{K} \left(1 - \frac{1}{K}\right)^{c_s-1}$$

对其求微分得:

$$\frac{dT_1}{dK} = \frac{d}{dK} \left( \frac{1}{K} \left(1 - \frac{1}{K}\right)^{c_s-1} \right) = 0 \Rightarrow K_{\text{opt}} = c_s$$

可见, 下一目标节点集合反馈给源节点  $s$  的可用带宽总和等于节点  $s$  待发总流量时, 可以获得最大发送效能。进一步有:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{c_s}{K} \left(1 - \frac{1}{K}\right)^{c_s-1} \xrightarrow{K_{\text{opt}} = c_s} \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 - \frac{1}{n}\right)^{c_s-1} \approx e^{-1} \quad (14)$$

因此, 由式(13)可以预料到采用传统路由计算方法在带宽利用率达到  $1/e$  时, 代价函数不可避免地出现拐点, 此后目标节点如继续接收数据, 链路的传输代价将以更快的速度增长。因此, 在后续的计算与仿真中, 需要特别加以标注, 以便将代价目标函数控制在线性特征区间内, 这与以前的仿真算法有所不同。

## 2.2 带宽利用率

EBURM 算法需要依赖上一时刻统计出的带宽利用率数据。通过对目前路由器市场的了解, 绝大多数中高端路由器在“一定时间尺度”下, 具有针对端口的带宽利用率统计功能。“一定时间尺度”在路由器、商用网管软件、通信对分析工具上的实现是厂商的核心功能之一: 足够长非压缩的时间片数据可以很大程度上表述网络带宽利用率特性和行为特性, 以便于规划网络流量; 足够短的时间片可细化网络事件顺序, 提高网络事件的分析能力。EBURM 所指的“一定时间尺度”要适当地长, 以便将其控制在可信区间内, 从而充分真实地保持统计可靠性。但也不可无限制地长, 否则会延长整个网络拓扑的 LSDB 生成时间, 使路由表迟迟不能收敛, 造成业务中断。从文献[23]可知, 可用带宽统计方差与统计时间的长度成反比关系, 函数式为:  $f(\tau) = 2.8 \sqrt{\text{var}(A_i)/k_z^{0.6}}$ , 统计时间过短, 链路可用带宽的随机变化很大, 随着时间变长, 可用带宽的统计值的方差变小。该文献实验结果中,  $f(\tau)$  在 400 ms 以后趋于稳定。

TCP/IP 中有很多自带的时钟, 考虑到网络源节点目的节点 TCP 链接对之间的数据都存 RTT 往返时间。为了使模型及后续的算法在工程使用中具有实际的物理意义, EBURM 采用源节点到下一节点集

合中往返时间的最大值作为本算法的计算时间上限, 利用这个时钟计数作为 EBURM 仿真激活到算法迭代结束的时间。

在仿真环境中由于受流量和时间状态机制的影响, 要获得贴近真实环境的 RTT 值并不容易。因此, 本文所采用的 RTT 值依赖大型园区网, 在真实网络环境中以终端本地为起点, 采用网络程序一次测量真实网络拓扑环境中所有源节点、目的节点之间的链路往返时间, 以及 RTT 时间内网络的带宽利用率, 并采用 MATLAB 程序调用反馈结果以便在式(3)、式(10)~式(12)中开展迭代计算。

## 2.3 步长因子

$\gamma_\lambda, \gamma_v, \gamma_\varphi$  的选择直接决定节点迭代计算的时间成本。 $\gamma_\lambda, \gamma_v, \gamma_\varphi$  选取过小, 算法计算时间就会很长, 甚至超过限定的 RTT 值, 到达限定时间后必须强制初始化解法。 $\gamma_\lambda, \gamma_v, \gamma_\varphi$  选取过大, 计算得到的最小值与真实最小值相差较大, 上一时段得到的 RTT 值落在可信区间的概率降低。文献[24-26]指出迭代步长是一个与特征方程特征解相关的函数, 具有公式  $x_{k-1} = x_k - \frac{1}{\lambda_{k-1}}(Ax_k - b)$  形式的迭代步长是矩阵特征多项式的解。最速下降法收敛的充分条件和必要条件是: 特征值全部大于 0, 并且迭代步长  $0 < h < 2/\lambda_A^{\max}$ 。观察式(10)~式(12), 其恰好具有相似的形式。由此可以断定,  $\gamma_\lambda, \gamma_v, \gamma_\varphi$  的值与式(10)~式(12)相应的矩阵方程的特征解有密切的关系。假设源节点选取链路的数量为  $n$ , 根据本算法的基本思路及式(2), 带宽利用率最小的那条链路具有最大特征。根据上述定理, 缩小迭代初始值, 可以计算得出式(10)~式(12)中  $\gamma_\lambda, \gamma_v$  的迭代步长的初期最大值可选择  $2\mu e^{-\mu d_{s,v_i}^L/C_l}$  和  $2/K_i(\varphi)$ 。 $\gamma_\varphi$  与  $\gamma_\lambda, \gamma_v$  略有不同, 它受输入  $v$  和输入  $n$  的影响, 其取值受当前时刻的带宽利用率和源节点待发总流量的大小影响。可推断其值应在区间  $[2\mu e^{-\mu d_{s,v_i}^L/C_l}, 2/K_i(\varphi)]$  或  $[2/K_i(\varphi), 2\mu e^{-\mu d_{s,v_i}^L/C_l}]$  之间选择。文献[25-26]证明可变步长对降低搜索迭代次数及时间具有很明显的作。从直观感觉来看, 源节点待发流量越大, 可用于传输的空闲带宽越大, 源节点流量传送到目的节点的代价越小。因此, 在  $[2\mu e^{-\mu d_{s,v_i}^L/C_l}, 2/K_i(\varphi)]$  或  $[2/K_i(\varphi), 2\mu e^{-\mu d_{s,v_i}^L/C_l}]$  之间以中点向其中的较小值以迭代次数  $m$  ( $m$  为 RTT 时间内迭代次数的总和) 等分, 从大到小依次给  $\gamma_\varphi$  赋值。

## 3 仿真分析

在讨论迭代式的步长、迭代计算时间、加速收敛法等关键决定因素的基础上, 本节将构建对 EBURM 算法机制及性能仿真的验证环境。

### 3.1 仿真拓扑

图2所示的内容是当前大型园区典型的骨干网络拓扑架构,本文利用 OPNET 构建该图所示的拓扑作为仿真图形。在图2中,R1和R2是具有路由功能的数据中心高端网络设备,R3~R5是高端路由设备,R6、R7是具有路由功能的中高端网络设备。图中所有设备完全运行相同版本的 OSPF 协议。在图2中网元的设计都是双链路的,终端计算机通过 R6、R7 互联到网络中,通过中间路由过程可以访问到对应的目标服务。终端计算机访问目标服务时,通过 display lsdb 和 traceroute 指令看到 R7 到 R1 的最短路径是 R7、R4、R1。很显然从 R1 到 R7 之间的路径不止一条,EBURM 并不希望看到这样的结果。EBURM 路由机制希望根据带宽利用率的实际情况分布从 R1 到 R7 的流量,同时计算得出链路不同利用率下,可达路径的多少及利用率对传输代价的影响。

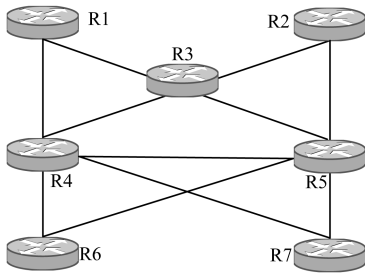


图2 用于仿真计算的企业网络拓扑图

### 3.2 $\alpha$ 和 RTT 的测量方法

本文对  $\alpha$  和 RTT 的测量都是离线且采用 Windows 网络程序实现的。在仿真程序中采用特定数据包,采集源节点与目标节点之间的往返时间和接口的使用率对象数据。考虑当前企业网典型的全双工特性,如图3所示,本文所采用的网络处理程序运行步骤如下:

1) 仿真调试计算机运行路径处理程序,存入拓扑中存在的全部节点和路径。

2) 打开本地时钟计数器,同时到预存储节点抓取协议数据单元 (Protocol Data Unit, PDU), 读取接口参数中的  $ifInOctets$ 、 $ifOutOctets$ 、 $ifSpeed$  变量值。其中:  $ifInOctets$  为入接口上接收的字节总数,包括成帧字符;  $ifOutOctets$  为出接口上接收的字节总数,包括成帧字符;  $ifSpeed$  为带宽预估值。

3) 返回时计算每一节点时钟计数器的差值,通过差值得出每一邻接节点间 RTT 值,同时计算每一节点的  $\alpha = \frac{\max(ifInOctets, ifOutOctets) \times 8 \times 100}{\Delta ifSpeed}$  值,根据已存储的路径计算路径带宽利用率总和,对其进行从低到高排序。

4) 计算每条路径的 RTT 总和,取其中最大值作为存储节点处理程序的时间尺度。

5) 将数据存储在接口地址组当中,等待 MATLAB 程序调用。

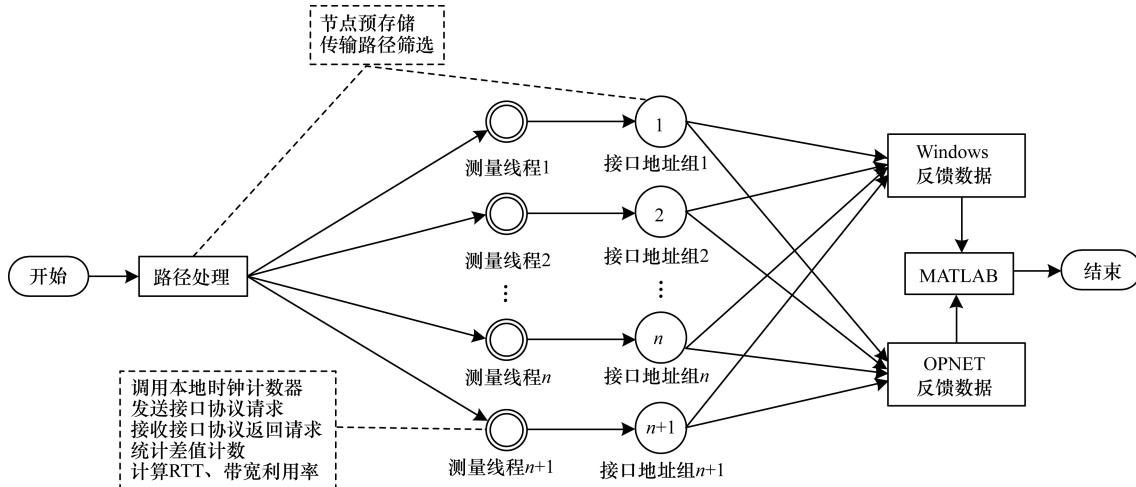


图3 仿真调试计算平台上运行的程序流程

### 3.3 数据计算步骤

接收  $\alpha$  和 RTT 的值后,依据  $t=1,2,\dots$  进行以下计算步骤:

1) 令  $X(d_{s,v_i}^t) = \mu e^{-\mu d_{s,v_i}^t} (d_{s,v_i}^t \geq 0)$ , 接收带宽利用率反馈值,输入初始参数  $\mu = 1/d_{s,v_i}^t$ 。

2) 判断待发总流量  $K$  与临近节点自高到低可用带宽的总和,带宽总和小于  $K$  依次选取可用路径,控制路径总数,使路径总数小于 5。

3) 按照  $K, C_i$  初始化区间步长  $\gamma_\lambda, \gamma_v, \gamma_\varphi$ , 并带入式(10)~式(12)。

4) 反馈链路代价步长,将新的链路代价值传给数据源端,计算数据源端  $s$  的需求代价,计算源端流量拆解大小。

5) 直到  $\varphi(n+1) = \varphi(n)$ , 计算总代价。

### 3.4 仿真结果

EBURM 计算的目标结果之一是将总的链路代价与 OSPF 进行比较。在探讨 EBURM 相比 OSPF 有何优势之前,需要确定传输代价目标函数和传输路径的个数以及带宽利用率之间有何关系,以便采取干预措施使 EBURM 不至于无限制地拆解数据

包,从而使仿真符合物理信息的实际情况。由于无论是在企业内部的生产网络还是在本文所述的实验环境中,试图取得恒定的带宽利用率都具有相当大的难度,因此本文针对“输代价目标函数-传输路径的个数以-带宽利用率”的讨论选取对所有带宽利用率的全部情况。

在实验与模拟环境中,客户端连接在 R6 或 R7 下方,在生产网络中全网配置 OSPF 路由协议。在客户端上运行 MATLAB 计算环境、Windows 网络客户端程序、OPNET 仿真程序。

1) 采取干预措施,使备选链路控制在一定范围内有一定理论和工程实践意义。

在模拟终端上读取路由器链路状态参数,获取图 2 中特定时间内的 interfaces. ifTable 数据均值(在读取程序中注入本地时钟计数函数 currentTime. Millisecond 计算传输时间),排序后得到表 1 所示数据。

表 1 R7 到 R2 前 3 条备选路径表

| 序号 | 路径          | 带宽利用率/% | 备注     |
|----|-------------|---------|--------|
| 1  | R7→R5→R2    | 10.1    | 最优路径   |
| 2  | R7→R5→R3→R2 | 14.7    | 备选路径 1 |
| 3  | R7→R4→R3→R2 | 20.2    | 备选路径 2 |

结合表 1,在联调程序中针对上述带宽利用率情况进行比对,结果如图 4 所示。

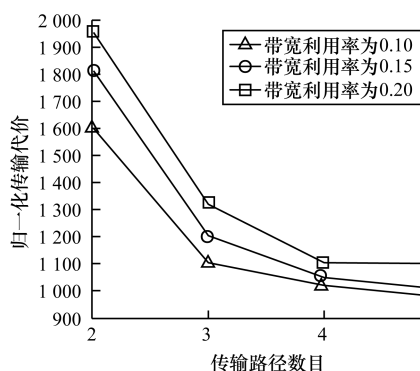


图 4 链路数目和带宽对传输代价的影响

图 4 显示,当链路的带宽利用率越小,且可用于传输数据的路径条数越多,传输代价目标函数的值越小。由于 EBURM 设计的仿真流量最大为 1 000 bit/s,当仿真中出现可用于传输流量的路径数量多于 4 条以后,带宽利用率对代价值的影晌趋于相同,本文选择 5 条作为路径选择的上限,这在上文算法设计时也有所体现。另一方面,采取干预措施控制备选链路的数据,可以使 EBURM 不至于无限制的拆解数据包还可以在路由上避免产生环路和小片数据产生,从而使算法更趋于线性和具有工程实际意义。

2) 验证采用 EBURM 算法时,图 3 所示网络拓扑路由表空间的生成情况。

在生产网络中跟踪 R2 背后的某个地址网段,反馈的结果如图 5 所示传输,可以看出,途径 R5 路由器上存在下一跳接口 10.0.0.121。



图 5 R7 到 R2 路径的跟踪结果

登录到 R5 路由器,观察由 R7 到 R2 的 OSPF 路由表项,如图 6 所示。可以观察到存在子网 10.0.0.120 以及对应互联接口,以及存在一条到达 R2 的最佳 OSPF 链路状态路径。

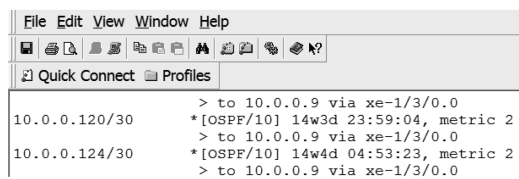


图 6 R5 中 R7 到达 R2 的路由表项

在本地计算机上运行 OPNET 程序,按照图 2 构建拓扑图,按照 EBURM 修订 OSPF 节点功能、构建背景流量、数据业务流。仿真结果如图 7 所示。

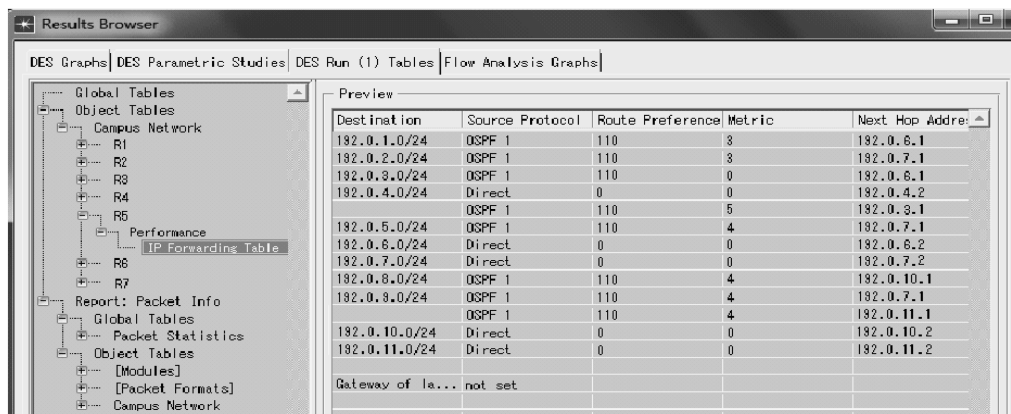


图 7 R5 的 OPNET 路由表仿真结果

在仿真过程中可以观察到 R5 存在一条途径 R3 的非最短路径,可以使流量沿着 R3 传输到 R2。

3)将 EBURM 算法的代价与经典的 OSPF 路由协议的代价进行比较计算。

以企业生产网络为基础,确定传输路径条数、带宽利用率、代价的趋势关系之后,为了使论文所述的算法具有一定的适用性,调整链路的带宽为 1 000 Mb/s,同时将在仿真时输入的数据从 1 Mb/s 逐步提升到 1 000 Mb/s。据此将 EBURM 代价与 OSPF 代价进行对比,经过仿真得到的结果如图 8 所示。

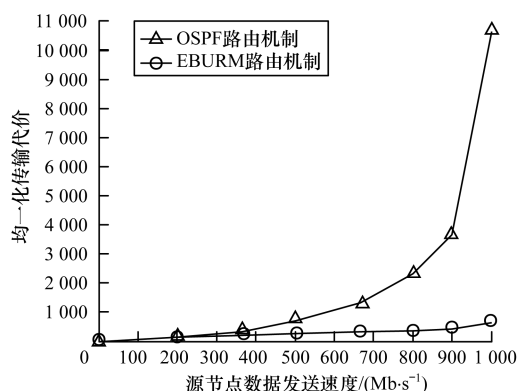


图8 不同流量下 EBURM 与 OSPF 的传输代价比较

可以看出,利用 MATLAB 程序仿真,OSPF 路由协议在链路带宽利用率约为 0.367 附近传输代价开始出现拐点。随着源节点传输速度的增加,出现数据传输延迟和数据丢包的情况,传输代价也相应的增加,在源节点数据发送速度增加到 650 Mb/s 时网络已经出现较为严重的拥塞,而采用 EBURM 算法时,传输代价却可以保持近似线性变化。因此,EBURM 算法相比传统 OSPF 路由器协议算法在性能上具有较大优势。

#### 4 结束语

本文在统计链路带宽利用率的基础上,基于流量优化理论提出 EBURM 路由算法。利用搜索技术、拉格朗日最小极值法、牛顿二项式定理、可变步长等相关理论,通过分析优化目标函数以及对迭代函数中的关键问题,将流量在多个有效且合适的路径上进行分割,从而降低网络传输代价,提高网络的整体性能。

EBURM 在可用带宽、链路条数、代价总和的仿真计算中,基于企业网络的现状和路由深度设置了限定条件。在下一步工作中,将根据终端用户的实际特性、网络架构进行分类分析、充分计算,以便保证路由相对的稳定性。另外,EBURM 仿真程序并不

是在一个工具平台中实现的,其借用了 MATLAB 的计算能力和 OPNET 的网络模拟能力,影响了算法的实用性。因此,今后将更多地生产环境中利用一个工具和语言进行编写模拟。

#### 参考文献

- [1] UHLIG S, QUOTIN B, LEPROPRE J, et al. Providing public intradomain traffic matrices to the research community [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2006, 36(1): 83-86.
- [2] CHEN Jian. Juniper router products introduction; reference description [EB/OL]. [2016-10-28]. <http://max.book118.com/html/2015/0728/22201499.shtm>.
- [3] HUAWEI. High-end router product introduction; reference description [EB/OL]. [2016-10-28]. <http://www.doc88.com/p-386731950343.html>.
- [4] Cisco. Network convergence system 6008 single-chassis system data sheet; reference description [EB/OL]. [2016-10-28]. <http://www.cisco.com/c/en/us/products/routers/network-convergence-system-6000-series-routers/index.html>.
- [5] FORTZ B, THORUP M. Internet traffic engineering by optimizing OSPF weights [C]//Proceedings of IEEE INFOCOM'00. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2000: 519-528.
- [6] FORTZ B, REXFORD J, THORUP M. Traffic engineering with traditional IP routing protocols [J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(10): 118-124.
- [7] HOPPS C. Analysis of an equal-cost multi-path algorithm; RFC 2992 [S]. 2000.
- [8] KELLY F, VOICE T. Stability of end-to-end algorithms for joint routing and rate control [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2005, 35(2): 5-12.
- [9] 燕洪成, 张庆君, 孙 勇. 空间延迟中断容忍网络拥塞控制策略研究 [J]. 通信学报, 2016, 37(1): 142-150.
- [10] 蔡岳平, 王昌平. 软件定义数据中心网络混合路由机制 [J]. 通信学报, 2016, 35(4): 44-52.
- [11] 杨 洋, 杨家海, 王 会, 等. 网络时延敏感型业务流自适应负载均衡算法 [J]. 通信学报, 2015, 36(3): 131-141.
- [12] STEVENS W R. TCP/IP 详解 (卷 I: 协议) [M]. 吴 英, 张 玉, 许昱玮, 译. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [13] KVALBEIN A, HANSEN A F, CICIC T, et al. Fast IP network recovery using multiple routing configurations [C]//Proceedings of the 25th International Conference on Computer Communications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2006: 1-11.
- [14] BURIOL L, RESENDE M, RIBEIRO C, et al. A memetic algorithm for OSPF routing [C]//Proceedings of the 6th INFORMS Telecommunications Conference. Copenhagen, Denmark: University of Copenhagen, 2002: 187-188.

(下转第 103 页)

## 5 结束语

针对已有传感器网络路径覆盖研究存在的不足,本文提出了一种最小化节点移动距离的路径覆盖算法。首先证明最小化节点移动距离的路径覆盖是 NP 难问题,然后利用曲线离散将路径分割成路径点,克服现有算法仅适用于直线路径的不足,最后通过 3 组启发式规则逐步移动节点以覆盖路径。实验结果表明,在路径点数量和概率阈值参数改变的情况下,该算法在减小时间复杂度和移动距离等方面具备较好的性能。下一步将考虑实现能耗最小的路径覆盖。

### 参考文献

- [1] 任丰原,黄海宁,林 闯. 无线传感器网络[J]. 软件学报,2003,14(7):1282-1291.
- [2] 陶 丹,马华东. 有向传感器网络覆盖控制算法[J]. 软件学报,2011,22(10):2317-2334.
- [3] 高跃跃,王 瑞,万旺根,等. 无线传感器网络中的模糊信息暴露路径分析[J]. 计算机工程,2012,38(9):62-65.
- [4] 李 明,胡江平. 异构有向传感器网络两阶段动态覆盖算法[J]. 计算机工程,2017,43(9):99-104.
- [5] TAN R, XING G, WANG J, et al. Exploiting reactive mobility for collaborative target detection in wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2010, 9(3):317-332.
- [6] TANG S, MAO X, LI X Y. Optimal k-support coverage paths in wireless sensor networks[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2009:1-6.
- [7] HEFEEDA M, BAGHERI M. Randomized k-coverage algorithms for dense sensor networks[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Computer Communications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2007:2376-2380.
- [8] 李 磊,张宝贤,黄河清,等. 无线传感器网络路径覆盖问题研究[J]. 电子与信息学报,2010,32(10):2429-2433.
- [9] ZHANG Y, HUANG H, SUN P, et al. Improving path-coverage for moving targets in wireless multimedia sensor networks[J]. Journal of Communications, 2014, 9(11):843-850.
- [10] LIAO Z, WANG J, ZHANG S, et al. Minimizing movement for target coverage and network connectivity in mobile sensor networks [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2015, 26(7):1971-1983.
- [11] FU Z X, YOU K Y. Optimal mobile sensor scheduling for a guaranteed coverage ratio in hybrid wireless sensor networks[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2013(1):559-562.
- [12] 吴文铁,李 敏,文永革. 基于能量感知的无线传感器网络 Sink 节点移动方案[J]. 计算机工程,2015,41(5):118-124.
- [13] 肖 甫,王汝传,叶晓国,等. 基于改进势场的有向传感器网络路径覆盖增强算法[J]. 计算机研究与发展, 2009,46(12):2126-2133.
- [14] LU Z, LI W W, PAN M. Maximum lifetime scheduling for target coverage and data collection in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(2):714-727.
- [15] 李 娜,向凤红,毛剑琳,等. 多障碍场景的有向传感器网络覆盖优化算法[J]. 计算机工程,2015,41(4):19-25.
- [16] 朱立瑞. 群智能优化算法及其在路由优化策略中的应用[D]. 长春:吉林大学,2013.
- [17] COHEN R, NAKIBLY G. On the computational complexity and effectiveness of N-hub shortest path routing[J]. IEEE ACM Transactions on Networking, 2008,16(3):691-704.
- [18] FONG J, GILBERT A, KANNAN S, et al. Better alternatives to OSPF routing [J]. Algorithmica, 2005, 43(1/2):113-131.
- [19] 郭超平,张 恒,张海林. 自私网络中带宽与路由的联合分配机制[J]. 北京邮电大学学报,2010,33(5):61-65.
- [20] 杨晓琴,章丽芳,曹庆黄. 基于链路带宽利用率的路由选择算法[J]. 计算机应用,2012,32(9):2422-2425.
- [21] 王 峰. 中国互联网带宽年年扩容但问题仍严重[EB/OL]. [2016-10-28]. <http://news.sohu.com/20150422/n411647342.shtml>.
- [22] CHEN Xusheng. Shortest path algorithm in OSPF[J]. H3C-IToIP Sloution Expert in H3Care Club, 2009, 2(2):4-8.
- [23] PALOMAR D P, CHIANG M. A tutorial on decomposition methods for network utility maximization[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(8):1439-1451.
- [24] MANISH J. End-to-end available bandwidth estimation and its applications[D]. Atlanta, USA: Georgia Institute of Technology, 2013:80-81.
- [25] 李鸿仪. 理想化最速下降法及其逼近实例[J]. 上海第二工业大学学报,2011,28(1):8-13.
- [26] 姚俊峰,杨献永,彭小奇,等. 基于混沌变量的变步长梯度下降优化算法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2003,43(12):1676-1678.
- [27] 林嘉宇,刘 荧. 神经网络的梯度下降训练方法中的学习步长优化[J]. 信号处理,2002,18(1):43-48.

编辑 金胡考

编辑 金胡考

(上接第99页)