

面向绿色互联网的低功耗多播路由算法

张金宏, 王兴伟, 黄敏

(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 基于路径节点驱动策略, 提出了一种绿色互联网中的一对多组播路由算法, 充分利用路径节点共享路径, 生成低功耗最短路径树, 提高用户 QoS 满意度。基于 CERNET2 拓扑仿真实现了该算法, 通过与现有的能量感知启发式路由算法在网络功耗、路由成功率和运行时间等方面的性能对比, 表明本文提出的算法具有更好的性能。

关键词: 绿色互联网; 功耗模型; 一对多多播路由; QoS 满意度; CERNET2

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)Z1-0134-07

Low-power multicast routing algorithm in green Internet

ZHANG Jin-hong, WANG Xing-wei, HUANG Min

(College of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: A path node-driven strategy based one-to-many multicast routing algorithm in green Internet (GIOMR) is proposed to generate a low-power shortest path tree, fully making use of the path node sharing paths and meanwhile improving user's QoS satisfaction degree. The GIOMR is implemented over CERNET2 topology by simulation. It has been shown that GIOMR has better performance on the network power consumption, the success rate of routing and the running time than efficient heuristics for energy-aware routing (EHER) algorithm.

Key words: green Internet; power model; one-to-many multicast routing; QoS satisfaction degree; CERNET2

1 引言

近年来, 日益增长的互联网用户数和不断增多的互联网应用使互联网的规模呈爆炸式的增长, 随之而来的网络能耗的巨幅攀升让全球 ICT (information communication technology) 业界的目光开始聚焦到节能问题上来。此外, 由于现阶段全球可再生清洁能源的供给比例不足 15%^[1], 大部分的能源消耗都会导致碳排放量的增长, 因此出于环境和经济因素的双重考虑, 在一对多多播场景下提出绿色路由算法并对其进行了实现与讨论。

以往衡量一个多播路由算法的好坏往往关注的是它的性能 (如控制端到端的延迟和带宽占用的能力), 但是随着绿色网络的兴起和人们对网络节

能主观意识的不断增强, 不仅要考虑其性能, 而且更要关注算法产生的多播树对网络节能的贡献。仅仅考虑最短路早已不能作为多播树生成的唯一约束, 近年来, 出现了针对低代价最短路径树构造问题的研究, 如 DDSP 算法^[2]、FLSPT 算法^[3]、SBPT 算法^[4]和 LCSPT 算法^[5]等。

文献[2]提出了目的驱动最短路径生成树 DDSP (destination-driven shortest path) 算法, 生成最短路径时采用“目的节点驱动”策略, 并结合 DDMC 启发式算法目的节点提供共享路径的做法来降低 SPT 的总代价。一般而言, 网络规模越大和目的节点数越多, 采用 DDSP 算法生成的多播树代价改善效果越显著。

文献[3]提出了快速低代价最短路径树 FLSPT

收稿日期: 2014-10-15

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目 (61225012, 71325002); 高等学校博士学科点专项科研基金优先发展领域资助课题 (20120042130003); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (N110204003, N120104001)

Foundation Items: The National Science Foundation for Distinguished Young Scholars of China(61225012, 71325002); Specialized Research Fund of the Doctoral Program of Higher Education for the Priority Development Areas(20120042130003); Fundamental Research Funds for the Central Universities(N110204003,N120104001)

(fast low-cost shortest path tree) 算法, 这种算法实质上是一种快速算法, 在 DDSP 算法的基础上通过改进节点的搜索过程来实现运算效率的优化。

Hiroshi Fujinoki 等^[4]提出最优最短路径树 (SBPT, shortest best path tree) 算法, 这个算法解决了一对多多播树建立时路径长度和带宽占用的权衡问题, 融合了 Dijkstra SPT 算法在确定最小路径长度和贪婪算法通过共享路径在网络带宽占用上的优势, 所构造的生成树上的发送方和所有多播目的接收方的总路径长度与用 Dijkstra SPT 算法确定的相同, 但是总的带宽占用大幅减少。

文献[5]受“目的节点驱动”思想的启发提出了“路径节点驱动”策略, 设计了一种路径节点驱动的低代价最短路径树 (LCSPT, least-cost shortest path tree) 算法, 该算法在保证构造最短多播路径树的前提下, 通过路径共享来最大限度地降低最短多播路径树的总代价。

由于“目的节点驱动”策略只考虑和目的节点共享路径; 而“路径节点驱动”策略不仅仅考虑目的节点共享路径, 而且考虑路径节点共享路径。一般来说, 一个目的节点与源节点间通常有多个路径节点, 即最大限度地降低多播树的代价可以通过路径节点更广泛地共享路径来实现。

基于这方面的考虑, 本文提出了一种绿色互联网一对多多播路由 (GIOMR, green Internet one-to-many multicast) 算法, 它基于路径节点驱动, 其 SPT 是低代价 SPT, 且在网络能耗、路由成功率和运行时间等方面该算法均有较好的表现。

2 问题描述

2.1 网络模型

网络模型可简化为连通图 $G(V, E)$, 如图 1 所示。 $V = (v_1, v_2, \dots, v_n)$ 表示顶点的集合, 每个顶点代表一个网络节点, 即网络中的路由器; $E = (e_1, e_2, \dots, e_l)$ 表示边的集合, 每条边代表网络中的链路。

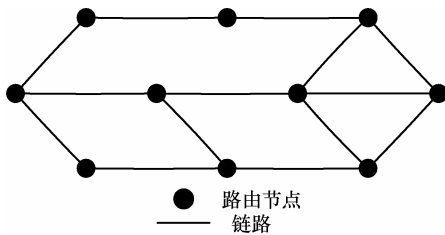


图 1 简化的网络模型

2.2 节点功耗模型

如图 2 所示, 路由器主要由底架、线卡、路由主控引擎、交换矩阵、转发及复制引擎等组成^[6]。其中, 主控引擎是路由器的控制中心, 用来对路由表进行控制。交换矩阵用来在路由器内部连接输入和输出端口。转发引擎用来完成包括数据输入和存储、报头分析、路由表查找等功能。复制引擎用于多播复制。

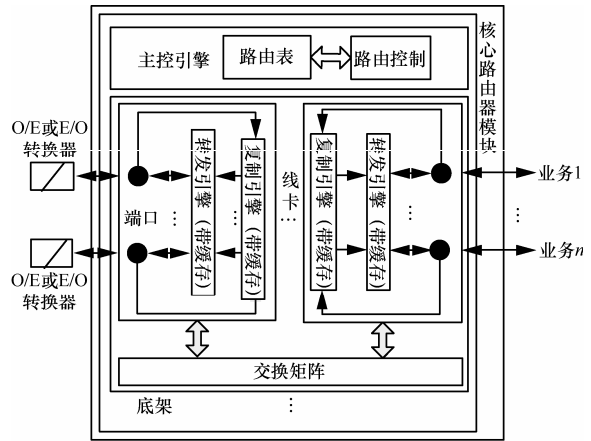


图 2 路由器结构

路由器功耗参数的符号和意义如表 1 所示。

参数符号	参数意义
P_{ctrl}^i	核心路由器 i 中主控引擎的功耗
P_{ford}^i	核心路由器 i 中转发引擎的功耗
P_{repl}^i	核心路由器 i 中复制引擎的功耗
P_{chass}^i	核心路由器 i 中一个底架的功耗
P_{port}^i	核心路由器 i 中一个端口的功耗
N_{chass}^i	核心路由器 i 中底架的数量
N_{lcard}^k	核心路由器 i 中底架 k 的线卡的数量
N_{port}^l	核心路由器 i 中底架 k 的线卡 l 上端口的数量
$trfc_l$	核心路由器中经过线卡 l 的流量
$trfc_p$	核心路由器中经过端口 p 的流量

定义网络中组件状态的标识符如表 2 所示, 取值均为 $\{0,1\}$, 其中 0 表示休眠状态, 1 表示工作状态。

状态标识符	意义
$ChaSt_i^k$	核心路由器中底架 k 的状态
$LkdSt_k^l$	核心路由器中线卡 l 的状态
$PortSt_i^p$	核心路由器中端口 p 的状态
$NodeSt_i$	核心路由器 i 的状态

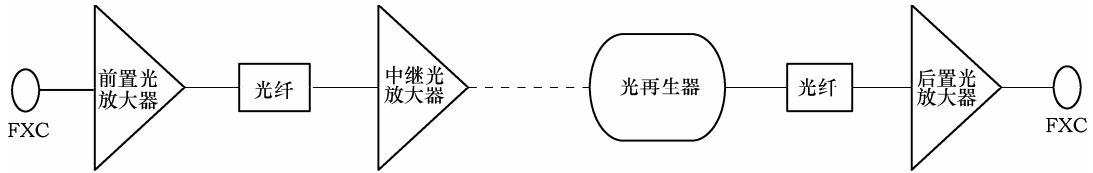


图 3 链路结构

节点功耗的数学表达式如式(1)所示。

$$P_{node}^i = P_{ctrl}^i + P_{repl}^i + \left(P_{chass}^i \times ChaSt_i^k + \sum_{k=1}^{N_{chass}^i} \left((P_{ford}^i + P_{repl}^i) \times LkdSt_k^l + \sum_{l=1}^{N_{lcrd}^k} \left(\sum_{p=1}^{N_{port}^l} (P_{port}^i (1 + \alpha' \cdot trf_p^{\beta'}) \times PortSt_l^p) \right) \right) \right) \quad (1)$$

2.3 链路功耗模型

链路结构如图 3 所示，包括链路中前置光放大器、中继光放大器、光再生器和后置光放大器等器件的功耗。其中，前置光放大器用来提高业务的发射功率；中继光放大器用来延长传输距离；光再生器用来对信号进行修整；后置光放大器用来转换信号的功率。

考虑链路功耗参数如表 3 所示。

参数符号	参数意义
P_{front}	链路 l 上前置光放大器的功耗
P_{reptr}	链路 l 上中继光放大器的功耗
P_{regen}	链路 l 上光再生器的功耗
P_{rear}	链路 l 上后置光放大器的功耗
N_{reptr}^j	链路 l 上中继光放大器的个数
N_{regen}^j	链路 l 上光再生器的个数
$trfc_j$	链路 l 上的流量

定义链路中组件状态的标识符如表 4 所示，取值均为 {0,1}，其中 0 表示空闲状态，1 表示工作状态。

状态标识符	意义
$RptrSt_j^a$	链路 j 上中继光放大器 a 的状态
$RgenSt_j^b$	链路 j 上光再生器 b 的状态
$Link_j$	链路 j 的状态

链路功耗的数学表达式如式(2)所示。

$$P_{link}^j = (1 + \alpha \cdot trf_j^\beta) \times \left(P_{front} + \sum_{a=1}^{N_{reptr}^j} (P_{reptr} \times RptrSt_j^a) + P_{rear} + \sum_{b=1}^{N_{regen}^j} (P_{regen} \times RgenSt_j^b) \right) \quad (2)$$

总功耗由节点功耗和链路功耗组成^[7]，如式(3)所示，其中， $|V|$ 和 $|E|$ 分别代表总节点数和总链路数。

$$P_{total} = \sum_{i=1}^{|V|} P_{node}^i \times NodeSt_i + \sum_{j=1}^{|E|} P_{link}^j \times LinkSt_j \quad (3)$$

2.4 QoS 参数模型

本文基于 QoS 的区分服务模型，通过报文中的 DS (differentiated services) 字段为用户提供特定的服务等级。本文的 QoS 参数模型定义为<可用带宽 bw ，延迟 dl ，延迟抖动 jt ，出错率 er >组成的四元组。

节点 i 中记录的链路可用带宽、延迟、延迟抖动和出错率依次为 bw_i 、 dl_i 、 jt_i 、 er_i 。链路 j 的可用带宽、延迟、延迟抖动、出错率依次为 bw_j 、 dl_j 、 jt_j 、 er_j 。

节点 i 经过链路 j 到达节点 k ，则节点 k 中记录的链路可用带宽 bw_k ，延迟 dl_k ，延迟抖动 jt_k ，出错率 er_k ，分别通过式(4)~式(7)表示。

$$bw_k = \min\{bw_i, bw_j\} \quad (4)$$

$$dl_k = dl_i + dl_j \quad (5)$$

$$jt_k = jt_i + jt_j \quad (6)$$

$$er_k = 1 - (1 - er_i)(1 - er_j) \quad (7)$$

相关各参数计算如下。

带宽 $bw_j = \min\{bw_{self}, bw_{ack}\}$ 表示链路 j 的当前可用带宽。其中， bw_{self} 为节点端口的可用带宽， bw_{ack} 为应答报文中的可用带宽值。

延迟 $dl_j = (RvTm - HdTm - SsTm)/2$ 表示节点处理延迟与链路传输延迟之和，与发送报文的时刻和接收报文的时刻有关。其中，参数 $RvTm$ 、 $HdTm$ 和 $SsTm$ 分别表示接收报文的时刻、处理时间和请求报文的发送时刻。

延迟抖动 $jt_j = |dl_j - dl_{pre}|$ 表示链路 j 上相邻两次延迟之差的绝对值。其中，参数 dl_{pre} 为上一次的链路延迟，初始 $dl_{pre} = 0$ 。

出错率 $er_j = (er_{self} + er_{ack})/2$ 表示数据分组在链路 j 上传输过程中出错的概率。其中，参数 er_{self} 和 er_{ack} 分别表示节点端口的出错率和应答报文中的出错率。

2.5 QoS 满意度模型

任一服务类型具有一个特定的参数区间，用户满意度取决于业务需求的 QoS 值在参数区间中的位置。本文通过一种评价 QoS 参数的方法来表示用户的满意程度。 bw_l 、 dl_l 、 jt_l 和 er_l 分别表示业务请求相应的 QoS 参数下限； bw_h 、 dl_h 、 jt_h 和 er_h 分别表示业务请求相应的 QoS 参数上限； bw 、 dl 、 jt 和 er 分别表示一对多多播树能够提供的 QoS 支持。QoS 参数满意度函数^[8]分别如式(8)~式(11)所示，其中， Ω 为正数， ε 为接近 0 的正小数， $\alpha > 1$ ， $0 < \beta < 1$ 。

$$Satis(bw) = \begin{cases} -\Omega & , & bw < bw_l \\ \varepsilon & , & bw = bw_l \\ \left(\frac{bw - bw_l}{bw_h - bw_l}\right)^\alpha & , & bw_l < bw < \frac{1}{2}(bw_l + bw_h) \\ \left(\frac{bw - bw_l}{bw_h - bw_l}\right)^\beta & , & \frac{1}{2}(bw_l + bw_h) \leq bw < bw_h \\ \zeta & , & bw = bw_h \\ 1 & , & bw > bw_h \end{cases} \quad (8)$$

$$Satis(dl) = \begin{cases} -\Omega & , & dl > dl_h \\ \varepsilon & , & dl = dl_h \\ \left(\frac{dl - dl_l}{dl_h - dl_l}\right)^\alpha & , & \frac{1}{2}(dl_l + dl_h) \leq dl < dl_h \\ \left(\frac{dl - dl_l}{dl_h - dl_l}\right)^\beta & , & dl_l < dl < \frac{1}{2}(dl_l + dl_h) \\ \zeta & , & dl = dl_l \\ 1 & , & dl < dl_l \end{cases} \quad (9)$$

$$Satis(jt) = \begin{cases} -\Omega & , & jt > jt_h \\ \varepsilon & , & jt = jt_h \\ \left(\frac{jt - jt_l}{jt_h - jt_l}\right)^\alpha & , & \frac{1}{2}(jt_l + jt_h) \leq jt < jt_h \\ \left(\frac{jt - jt_l}{jt_h - jt_l}\right)^\beta & , & jt_l < jt < \frac{1}{2}(jt_l + jt_h) \\ \zeta & , & jt = jt_l \\ 1 & , & jt < jt_l \end{cases} \quad (10)$$

$$Satis(er) = \begin{cases} -\Omega & , & er > er_h \\ \varepsilon & , & er = er_h \\ \left(\frac{er - er_l}{er_h - er_l}\right)^\alpha & , & \frac{1}{2}(er_l + er_h) \leq er < er_h \\ \left(\frac{er - er_l}{er_h - er_l}\right)^\beta & , & er_l < er < \frac{1}{2}(er_l + er_h) \\ \zeta & , & er = er_l \\ 1 & , & er < er_l \end{cases} \quad (11)$$

用户 QoS 满意度函数如式(12)所示，其中， a_{bw} 、 a_{dl} 、 a_{jt} 、 a_{er} 分别为带宽、延迟、延迟抖动、出错率对用户的重要程度，对于不同的业务类型和服务等级取不同的值，且它们的取值范围均为区间(0,1)， $a_{bw} + a_{dl} + a_{jt} + a_{er} = 1$ 。

$$Satis(QoS) = \left(\begin{matrix} a_{bw} \times Satis(bw) + a_{dl} \times Satis(dl) + \\ a_{jt} \times Satis(jt) + a_{er} \times Satis(er) \end{matrix} \right) \quad (12)$$

2.6 一对多多播模型

一对多多播问题的优化目标为最大化用户满意度和最小化多播树能耗，其目标函数如式(13)和式(14)所示。

$$Satis(QoS) \rightarrow \text{Maximize}\{Satis(QoS)\} \quad (13)$$

$$P_{total} \rightarrow \text{Minimize}\{P_{total}\} \quad (14)$$

其中， $Satis(QoS)$ 表示用户的 QoS 满意度， P_{total} 表示多播树总体功耗。

QoS 约束如式(15)~式(18)所示。

$$bw \geq bw_l \quad (15)$$

$$dl \leq dl_h \quad (16)$$

$$jt \leq jt_h \quad (17)$$

$$er \leq er_h \quad (18)$$

其中， bw_{pra} 、 dl_{pra} 、 jt_{pra} 和 er_{pra} 分别表示网络实际能够提供的带宽、延迟、延迟抖动和出错率， bw_l 、

dl_h 、 jt_h 和 er_h 分别表示业务请求对应的带宽下限、延迟上限、延迟抖动上限和出错率上限。

3 一对多多播路由算法设计

定义某一多播目的节点的路径节点为从源节点到该目的节点的最短路径上的所有节点。定义路径权重为节点到最近的路径节点的权重。构建最短路径树时，首先考虑最短路径和业务 QoS 需求，如果能找到多条满足 QoS 需求的最短路径，则考虑节点的路径权重。

3.1 解的表示

使用 $sol_{omni}(node_tree, QoS, Power)$ 表示一对多多播路由算法的一个从源节点到多播组成员的解，其中 $node_tree$ 表示由源节点和多播组成员组成的一棵多播树， QoS 表示由 \langle 带宽 bw 、延迟 dl 、延迟抖动 jt 、出错率 er \rangle 组成的四元组， $Power$ 表示解的功耗开销。

3.2 适宜度函数

定义基于路径节点驱动的一对多多播路由算法的适宜度函数如式(19)所示，用来作为选择邻居节点的依据。

$$Sui_{omni} = Satis(QoS) / Power \quad (19)$$

3.3 符号说明

假设有 n 个路由节点，每个路由节点维护一张路由表。对于节点 v_i 和节点 v_j ，使用 R_{ij} 表示节点 v_i 到节点 v_j 的路由表， $R_{ij}.next$ 表示 v_i 到 v_j 的下一跳路由， $R_{ij}.length$ 表示 v_i 到 v_j 的最短路径长度， $Source_{v_j}$ 表示节点 v_j 到 v_s 的最短路径的权重， $Path_{v_j}$ 表示节点 v_j 到最近的路径节点权重， $Neigh_{v_i}$ 为节点 v_i 的所有邻居集合，带宽为 $R_{ij}.bw$ ，延迟为 $R_{ij}.dl$ ，延迟抖动为 $R_{ij}.jt$ ，出错率为 $R_{ij}.er$ ，功耗为 $R_{ij}.power$ 。

3.4 算法伪码

下面给出基于路径节点驱动的低功耗一对多多播路由算法流程的伪码表示。

GIOMR

输入： $G(V, E)$ ，多播的源节点 v_s ，目的节点集

DS

输出：一对多多播树

1) 初始化参数： $\forall i, j \in V$ ，

2) $R_{ij}.bw \leftarrow \infty, R_{ij}.dl \leftarrow 0, R_{ij}.jt \leftarrow 0,$

$R_{ij}.er \leftarrow 0,$

3) $R_{ij}.power \leftarrow P_{Node}, Source_{v_j} \leftarrow \infty,$

$Path_{v_j} \leftarrow \infty,$

4) $Parent_{v_j} \leftarrow NULL, v_i$ 的邻居节点集

$NS_i,$

5) $R_{ij}.next \leftarrow NULL, R_{ij}.length \leftarrow \infty,$

$T \leftarrow \{v_s\};$

6) while $DS \not\subset T$ do

7) 计算 v_s 到 NS_s 中任一节点 v_n 的权重，

计算 P_{link} 和 P_{total} ；

8) 计算 QoS 参数信息，计算 $Satis(QoS)$ ；

9) $Source_{v_n} \leftarrow Sui_{omni}, Path_{v_n} \leftarrow Sui_{omni}$ ；

10) 记节点 v_i 是距离 v_s 权重值最小的邻居节点， $Parent_{v_i} \leftarrow v_s$ ；

11) 更新其距离权重值和路径节点权重值；

12) if $v_i \in DS$ then

13) 将 v_s 到 v_i 的路径中的所有节点标记为路径节点；

14) $Path_{v_i} \leftarrow 0$ ；

15) end if

16) $v_j \in NS_i$ ；

17) if $Source_{v_j} > Source_{v_i} + Sui_{omni}^{v_i v_j}$ then

18) $T \leftarrow T + \{v_j\}, v_s \leftarrow v_j$ ；

19) else if $Source_{v_j} < Source_{v_i} + Sui_{omni}^{v_i v_j}$

then

20) $R_{sj}.length \leftarrow length + 1, R_{sj}.next \leftarrow i,$

$Parent_{v_j} \leftarrow v_i$ ；

21) $Source_{v_j} \leftarrow Source_{v_i} + Sui_{omni}^{v_i v_j},$

$T \leftarrow T + \{v_i\}, v_s \leftarrow v_i$ ；

22) else if 节点 v_j 通过节点 v_i 有更小的 $Path_{v_j}$ then

23) $R_{sj}.length \leftarrow length + 1,$

$R_{sj}.next \leftarrow i, Parent_{v_j} \leftarrow v_i$ ；

24) $T \leftarrow T + \{v_i\}, v_s \leftarrow v_i$ ；

25) else $T \leftarrow T + \{v_j\}, v_s \leftarrow v_j$ ；

26) end if

27) end if

28) 更新带宽，延迟，抖动和出错率，

$P \leftarrow P_{total}$;

29) end if

30) end while

31) 由记录的下一跳和父节点计算源节点到多播组成员的一棵多播树;

32) 向多播树中各节点发送报文, 节点收到报文, 则记录相应路径信息

4 一对多多播路由算法的实现与性能评价

使用 20 台原型路由器参照 CERNET2^[9]拓扑构造测试平台, 如图 4 所示。

为了测试 GIOMR 的性能, 分别从网络功耗、路由成功率和运行时间等方面与能量感知启发式路由 (EHER, efficient heuristics for energy-aware routing) 算法^[10]进行性能比较。

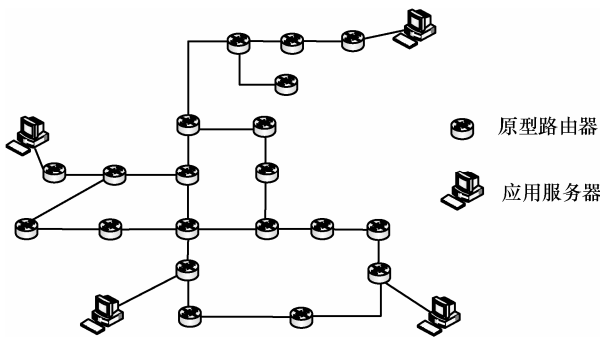


图 4 测试平台

网络功耗性能对比如图 5 所示, 随着多播组成员数量的增加, 网络功耗逐渐增大。GIOMR 的网络功耗低于 EHER, 这是因为 EHER 通过捆绑链路节能, 造成流量集中到单一链路, 随着流量的增加, 功耗逐渐增大, 而 GIOMR 通过将功耗作为度量值, 选择最小功耗的路径, 一定程度上避免了流量的聚合, 更有益于节能。

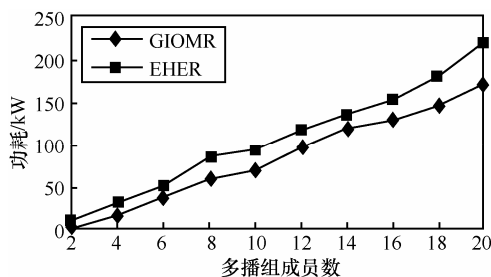


图 5 网络功耗对比

如果能为多播请求找到一棵完整的多播树, 则其路由成功率为 1, 否则把可以找到的多播成员节

点数占多播成员总数的比例作为路由成功率。路由成功率性能对比如图 6 所示, 随着多播组成员数量的增加, 网络资源逐渐显现不足, 不能为所有业务找到满足其 QoS 需求的路径, 路由成功率逐渐降低。从图 6 中可以看出, GIOMR 的路由成功率高于 EHER, 这是因为 EHER 捆绑流量至同一链路上, 导致该链路占用资源过多, 当有业务请求到来时, 网络资源可能不够用, 不能满足其 QoS 需求, 路由成功率随之降低。

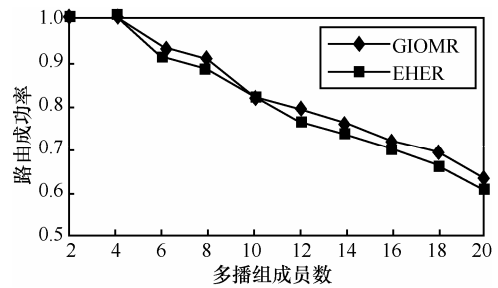


图 6 路由成功率对比

运行时间性能对比如图 7 所示, 随着多播组成员数量的增多, 运行时间逐渐增长。从图 7 中可以看出, GIOMR 的运行时间要高于 EHER, 这是因为 GIOMR 在处理业务请求之前需要计算所有邻居节点的信息, 而 EHER 只需通过捆绑链路确定路径即可。

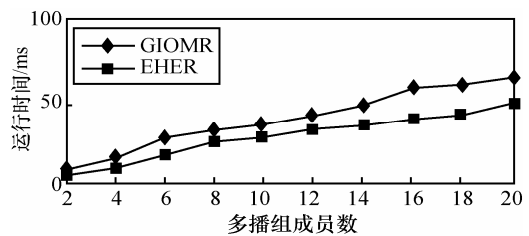


图 7 运行时间对比

5 结束语

基于全球网络功耗的急剧增长以及由此引发的能源问题、环境问题和经济问题等日益严重的大背景下, 本文提出了节点功耗模型和链路功耗模型, 采用区间形式和模糊函数刻画了用户 QoS 满意度, 在分析比较 DDSP 算法、FLSPT 算法、SBPT 算法和 LCSPT 算法的优缺点和算法复杂度之后基于路径节点驱动策略提出了一种绿色互联网一对多多播路由算法 GIOMR, 生成了一个低功耗的最短路径树, 并在仿真实验阶段与目前流行的 EHER 算法进行了功耗和性能比较, 最终的对比

比结果表明在保证用户 QoS 满意度的前提下, GIOMR 在网络一对多多播场景下的节能效果较为显著。

参考文献:

- [1] <http://www.china-nengyuan.com/news/17680.html>[EB/OL]. 2013.
- [2] ZHANG B X, MOUFTAH H T. A destination-driven shortest path tree algorithm[A]. Communications, ICC 2002[C]. 2002. 2258-2262.
- [3] 王涛, 李伟生. 低代价最短路径树的快速算法[J]. 软件学报, 2004, 15(5): 660-665.
WANG T, LI W S. A fast low-cost shortest path tree algorithm[J]. Journal of Software, 2004,15(5):660-665.
- [4] FUJINOKI H, CHRISTENSEN K J. The new shortest best path tree (SBPT) algorithm for dynamic multicast trees[A]. Local Computer Networks[C]. 1999.204-211.
- [5] 周灵, 王建新. 路径节点驱动的低代价最短路径树算法[J]. 计算机研究与发展, 2011, 48(5): 721-728.
ZHOU L, WAGN J X. Path nodes-driven least-cost shortest path tree algorithm[J]. Journal of Computer Research and Development, 2011, 48(5): 721-728.
- [6] WANG W, HOU W G, GUO L, *et al.* Energy saving and cost reduction in multi-granularity green optical networks[J]. Computer Networks,2011, 55(3):676-688.
- [7] WANG X W, CHENG H, HUANG M. Multi-robot navigation based QoS routing in self-organizing networks[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2013, 26(1): 262-272.
- [8] http://www.cernet.com/aboutus/internet2_tp.htm[EB/OL]. 2014.
- [9] LIN G, SOH S, CHIN K W, *et al.* Efficient heuristics for energy-aware

routing in networks with bundled Links[J]. Computer Networks, 2013, 57(8): 1774-1788.

作者简介:



张金宏 (1982-), 男, 辽宁开原人, 东北大学博士生, 主要研究方向为绿色网络、由算法及协议等。



王兴伟 (1968-), 男, 辽宁盖州人, 博士, 东北大学教授、博士生导师, 主要研究方向为未来互联网、云计算、网络安全和信息安全等。



黄敏 (1968-), 女, 福建长乐人, 博士, 东北大学教授、博士生导师, 主要研究方向为优化方法及其应用等。