

多粒度传送网绿色单播路由保护机制

石峻岭, 王兴伟, 黄敏

(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004)

摘要: 综合业务请求的服务质量(QoS, quality of service)要求、节能要求, 以及遭遇单链路或单个节点失效时的生存性要求, 提出了一种多粒度传送网中的绿色单播路由保护机制。基于 K 最短路径算法, 计算符合 QoS 需求的路径; 根据最小波长转换次数, 在多层辅助图上进行资源分配; 根据业务请求的保护等级, 提供了三级保护机制。仿真实验基于 EON (Europe optical network) 拓扑, 通过与现有机制在阻塞率、保护/工作资源比和负载均衡度方面的性能对比, 表明提出的机制是可行且有效的。

关键词: 多粒度传送网; 单播路由保护机制; 节能; QoS

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)Z1-0113-05

Mechanism for green unicast routing protection in multi-granularity transport networks

SHI Jun-ling, WANG Xing-wei, HUANG Min

(College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: The mechanism for green unicast routing protection is designed with the constraint of quality of service (QoS), energy consumption and the survivability of single link or node failure considered. The path is calculated under the constraint of QoS based on K -shortest path algorithm. The resource allocation is done on multi-layer auxiliary graph considering the minimum times of wavelength conversion. Three protection levels are provided according to the service demands. The mechanism is implemented over EON (Europe optical network) topology by simulation. Performance evaluation has been done on the blocking probability, the protecting/working resource ratio and the load balance degree by comparing with certain existent mechanism. It has been shown that the proposed mechanism is both feasible and effective.

Key words: multi-granularity transport network; unicast routing protection; save energy; QoS

1 引言

网络的快速发展为人们的生活提供了很多便利, 但同时也面临诸多挑战。首先, 由于网络中的链路承载了巨大的数据业务, 一旦发生数据丢失则会造成巨大损失, 因此网络的生存性显得尤为重要。其次, 由于网络中传输数据的多样化导致用户所要求的服务质量不尽相同, 因此现代网络能够

满足业务请求不同服务质量的要求。同时, 现代化网络中元器件传输速率的逐渐升高导致网络所消耗的电能也越来越多, 温室气体的排放也会不断增加, 因此对于网络节能的研究势在必行。

许多学者针对路由的保护机制和节能要求提出了解决方法。文献[1]针对节点故障提出了一种共享备份路由的方法。当有路由器出现故障时, 备份路由器代替故障路由器工作, 并把其中的信息复制

收稿日期: 2014-10-16

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基金资助项目(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); The Specialized Research Fund of the Doctoral Program of Higher Education for the Priority Development Areas(20120042130003); The Fundamental Research Funds for the Central Universities(N110204003, N120104001)

到备份路由器中。文献[2]将共享风险链路组的概念引入路由保护中，计算每条链路和工作路径上的链路同时发生故障的概率。文献[3]提出了一种能量感知的路由和分配机制。该机制在拥塞、缓存和延迟的约束下能够通过 Q-学习来降低能量的消耗。文献[4]提出了可用性保证能量节约设计模型。使用专用路径保护作为保护策略，经过多次迭代和链路权重更新将某些资源转换成睡眠状态。

但是，目前对于综合考虑 QoS 节能单播路由保护机制的研究相对较少，仍存在很大的发展空间。本文即旨在解决这一问题：首先，利用模糊数学中的隶属度结合 K 最短路径算法为业务请求计算符合 QoS 需求的路径；接下来根据多层辅助图以及能耗计算公式和波长转换次数选出能耗最小的路径；最后根据最小波长转换次数的计算结果在多层辅助图上对业务请求进行资源的分配。

2 模型设计

2.1 网络模型

多粒度传送网用 $G(V, E)$ 表示，其中， V 表示节点集合， E 表示链路集合。每个物理链路上有 W 个波长， $|W|$ 表示链路上波长的个数， e_{ij} 表示节点 (v_i, v_j) 之间链路。将网络节点做出适当调整：将路由设备和光层传输设备进行融合，使其能够适应多粒度的业务请求。节点由核心路由器、光收发器和多粒度光交叉连接器 (MG-OXC) 构成；相邻网络节点间通过光纤进行连接，并在光纤链路上配备了前置光放大器、中继光放大器、光再生器和后置光放大器。

2.2 业务模型

单播业务请求表示为 $R(s, d, AP_i)$ ，其中， s 表示源节点， d 表示业务请求的目的节点。 AP_i 表示业务请求的类型，根据 ITU-TG1010，每一种 AP_i 对应一组 QoS 需求空间和请求保护类型 ($[Band_{min}, Band_{max}]$, $[De_{min}, De_{max}]$, $[Jr_{min}, Jr_{max}]$, $[Ls_{min}, Ls_{max}]$, $[a_0^t, a_1^t, a_2^t, a_3^t, pro]$)，前 4 项分别表示带宽、延迟、延迟抖动和出错率的需求区间， $[a_0^t, a_1^t, a_2^t, a_3^t]$ 表示 4 种参数所占比例大小， pro 表示保护等级。

同时，业务请求的带宽要求小于 1 个波长的业务请求属于次波长级的业务请求；大于 1 且小于 4 的为波长级；大于 4 且小于 16 的为波带级。

2.3 网络能耗分析模型

业务请求在特定路径上传输所消耗的能耗 $E_{P_j}(R_i)$ 的计算如下

$$E_{P_j}(R_i) = E_{P_j}^e(R_i) + E_{P_j}^o(R_i) + E_{P_j}^t(R_i) \quad (1)$$

$$E_{P_j}^e(R_i) = 2(E_{me} + E_{frame} + E_{lc} + E_{port}^c + E_{port}^f) \quad (2)$$

$$E_{P_j}^o(R_i) = [(E_{tx}^c + E_{rx}^c + W_i \times E_{wxc}^c + B_i \times E_{bxc}^c + n_j^{wc} \times E_{wc}^c + W_i \times n_j^{bc} \times E_{bc}^c) + (E_{tx}^f + E_{rx}^f + W_i \times E_{wxc}^f + B_i \times E_{bxc}^f + n_j^{wc} \times E_{wc}^f + B_i \times n_j^{bc} \times E_{bc}^f)] \times hop_{P_j} \quad (3)$$

$$E_{P_j}^t(R_i) = [(E_{pre}^c + E_{post}^c + E_{pre}^f + E_{post}^f) + n_j^{amp}(E_{amp}^c + E_{amp}^f) + n_j^{rev}(E_{rev}^c + E_{rev}^f)] \times hop_{P_j} \quad (4)$$

其中， $E_{P_j}^e(R_i)$ 、 $E_{P_j}^o(R_i)$ 和 $E_{P_j}^t(R_i)$ 分别表示业务请求 R_i 在路径 P_j 上传输时核心路由器、光层和传输消耗的传输能耗，其定义式如式(2)~式(4)所示； W_i 和 B_i 是业务请求的带宽等级标识符； n_j^{wc} 、 n_j^{amp} 和 n_j^{rev} 分别表示业务请求 R_i 在路径 P_j 上传输需要的波长转换次数、中继光放大器的个数以及光再生器的个数； hop_{P_j} 是路径 P_j 的跳数； E_{me} 、 E_{frame} 和 E_{lc} 分别表示核心路由器主控引擎、底架以及线卡的能耗； E_{port}^c 、 E_{tx}^c 、 E_{rx}^c 、 E_{wxc}^c 、 E_{bxc}^c 、 E_{wc}^c 、 E_{bc}^c 、 E_{pre}^c 、 E_{post}^c 、 E_{amp}^c 和 E_{rev}^c 分别表示核心路由器线卡上端口、光发射器、光接收器、波长交换端口、波带交换端口、波长转换器、波带转换器、前置光放大器、后置光放大器、中继光放大器和光再生器的恒定能耗，而上标是 f 的参数为对应的波动能耗。

2.4 多层辅助图

本文结合文献[8]提出波长分层图的概念提出多层辅助图，包括：波带分层图、波长分层图和虚波长分层图。设网络中每根光纤中有 $|W|$ 个波长、 $|B|$ 个波带。波带分层图的构造方法如下：对于任意节点 $v_k \in V$ ，将 v_k 复制 $|B|$ 次，记为 $v_k^{b,m}$ ， $m=1,2,\dots,|B|$ ，称为波带 B 的波带节点，将波带节点对 $(v_i^{b,m}, v_j^{b,m})$ 之间的链路 e_{ij}^b 称为波带 B 的波带链路，从而构造出一个 $|B|$ 层的波带分层图；在构建波长分层图时对 v_k 复制 $|W|$ 次，任意的波长节点 $v_k^{w,1}, v_k^{w,2}, \dots, v_k^{w,m}$ 之间都可以通过波长转换链路来连接；在建立虚波长分层图时，将 v_k 复制 1 次，形成虚波长节点，即仅增加一层虚波长层。多层辅助图的更新方法即删除对应分层上的已消耗波长。

2.5 最小化路径能耗

当次波长级业务请求 R 可以在虚波长拓扑上找到与之相同的路径时，其能耗为 0；若次波长级业务请求 R 没有在虚波长拓扑上找到与之相同的

路径, 则按照式(1)的方法计算能耗。

为确保能耗最小, 需要求出一条链路的最小波长(波带)转换次数。将文献[9]中的算法进行改进: 对于某路径 P 所经过的所有链路赋予一个向量, 存储 P 上各波长的占用情况, 0 为已被占用, 1 为未被占用; 将每个属于 P 的链路的每个波长链路抽象成一个波长节点, 同样用 0、1 标识; 为了使这一拓扑完整, 在两端增加 2 个虚节点, 到其他抽象波长节点的链路权重为 0; 将值为 1 的相邻抽象波长节点相连, 形成若干条链路, 若链路为平行直线,

$$f_{P_i}^{band} = \begin{cases} 0, & band_{max}^i \leq Band_{min} \\ \frac{band_{max}^{P_i} - Band_{min}}{Band_{max} - band_{min}^{P_i}}, & band_{min}^{P_i} \leq Band_{min} < band_{max}^{P_i} \leq Band_{max} \\ \sigma \left(\frac{Band_{max} - band_{min}^{P_i}}{band_{max}^i - Band_{min}} \right), & Band_{min} < band_{min}^{P_i} < Band_{max} < band_{max}^{P_i} \\ \omega, & band_{min}^{P_i} \geq Band_{max} \end{cases} \quad (6)$$

其中, σ 是用于调节隶属度的小数。 ω 为一较小固定值, 以避免选择带宽过于充足的链路而浪费资源。

P_i 的延迟、延迟抖动和出错率满足隶属度计算与式(6)类似, 在此不赘述。得到 QoS 各个参数的满足隶属度后, 就可以计算路径 P_i 的整体满意度, 如式 (7) 所示。

$$C_{P_i} = a_0 \times f_{P_i}^{band} + a_1 \times f_{P_i}^{de} + a_2 \times f_{P_i}^{jr} + a_3 \times f_{P_i}^{ls} \quad (7)$$

其中, a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 为各参数权重, 其和为 1。

3 绿色单播路由保护机制的设计

3.1 优化目标

本文的优化目标是为单播业务请求计算出一对工作路径和保护路径, 且在保证满足这一对路径 QoS 需求的基础上使用最小的能耗对为业务请求进行传输。

3.2 路由计算

计算工作路径的算法流程如下。

Step1 运行 K 最短路径算法计算出 K 条最短路径。若计算失败, 则算法结束; 否则根据式(7)计算 K 条路径的 QoS 满足隶属度, 将其中存在满意度为 0 的路径删除, 其余路径放入路径集合 P 中, $P = \{P_1, P_2, \dots, P_K\}$, $P_i \in P$, $0 \leq i \leq K$, 初始 $i=0$, 业务请求的路径上的传输能耗 $E_R = \text{MAX}$ 。若业务请求为波长级以上转 Step3.1。

Step2.1 若业务请求为次波长级, 将集合 P

其权重为 0; 若链路为斜线, 其权重为 1; 再根据最短路径算法即可得到权重最小的路径, 权重即为业务请求在路径 P 上的最小波长转换次数, 经过的抽象波长节点即为选择的具体波长。

2.6 QoS 满意度

路径 P_i 的整体带宽的计算如下

$$\begin{aligned} band_{min}^{P_i} &= \min \{ band_{min}^{pq} \mid e_{pq} \in P_i \} \\ band_{max}^{P_i} &= \max \{ band_{max}^{pq} \mid e_{pq} \in P_i \} \end{aligned} \quad (5)$$

P_i 的带宽满足隶属度如式(6)所示。

中的路径 P_i 取出, 在虚波长拓扑上寻找是否有与路径 P_i 的实际物理链路相同且剩余带宽资源足够的虚链路。若存在, 则工作路径 $P_w = P_i$, 算法结束。

Step2.2 判断 i 的大小, 若 $i < K$, 则 $i=i+1$ 转 Step2.1, 否则令 $i=0$, 转 Step3.1。

Step3.1 将集合 P 中的路径 P_i 取出, 根据 2.5 节所述的方法计算路径最小波长转换次数和能耗。若 $E_{P_i} < E_R$, 则选取 P_i 为工作路径, $P_w = P_i$, 算法结束。

Step3.2 判断 i 的大小, 若 $i < K$, 则 $i=i+1$ 转 Step3.1, 否则 P_w 即为业务请求的工作路径。

Step4 算法结束。

3.3 波长分配方案

波长分配的算法流程如下。

Step1 若业务请求为次波长级, 则判断其工作路径是否在虚波长分层图上存在, 若是, 则在虚波长图上直接分配, 更新多层辅助图, 算法结束。

Step2 根据 3.2 节计算出工作路径的最小波长转换次数来进行波长分配, 更新链路带宽和多层辅助图, 算法结束。

3.4 保护机制

3.4.1 1+1 专用保护和 1:1 专用保护

按照 3.2 节中工作路径的计算方法计算 1+1 专用保护和 1:1 专用保护路径前, 需要先按照以下公式对网络中的链路进行更新。

$$c'_{ij} = \begin{cases} +\infty, & e_{ij} \in P_w \\ 1 - f_{ij}^{\text{band}}, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

其中, P_w 表示业务请求的工作路径; f_{ij}^{band} 为链路 e_{ij} 的带宽满意度, 算法与式(6)类似。

3.4.2 m:n 共享保护

m:n 共享保护中链路权重更新式如下

$$c''_{ij} = \begin{cases} +\infty, & e_{ij} \in P_w \\ \delta(1 - f_{ij}^{\text{band}}), & e_{ij} \notin P \cap \text{band}_{ij}^s > \text{Band}_{\min} \\ 1 - f_{ij}^{\text{band}}, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

其中, band_{ij}^s 表示 e_{ij} 可供共享的带宽资源; δ 是调节因子, $0 < \delta < 1$, 代表当链路的共享资源大于请求要求的带宽时, 可以使更多可共享的链路被选中。

计算共享保护路径的算法流程描述如下: 首先根据式(9)更新网络中的链路权重; 接下来利用 Dijkstra 算法为业务请求计算最短保护路径 P_p , 若路径计算失败, 则业务被阻塞, 算法结束。

4 仿真实现与性能评价

本文采用文献[10]中的 GSA(green spark algorithm)算法与本文提出的绿色单播路由保护机制 GURP 进行比较。实验在 EON (europe optical network) 上运行。阻塞率、保护/工作资源比和负载均衡度的实验结果如表 1 所示。

表 1 性能对比结果

| 业务强度/ 参数/算法 | 阻塞率 | | 保护/工作资源比 | | 负载均衡度 | |
|----------------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|
| | GSA | GURP | GSA | GURP | GSA | GURP |
| 100 | 0.070 0 | 0.060 0 | 1.401 0 | 1.402 0 | 1.900 0 | 2.350 0 |
| 200 | 0.135 0 | 0.110 0 | 1.400 0 | 1.411 0 | 1.800 0 | 2.100 0 |
| 300 | 0.195 0 | 0.150 0 | 1.410 0 | 1.395 0 | 1.520 0 | 1.700 0 |
| 400 | 0.290 0 | 0.240 0 | 1.380 0 | 1.360 0 | 1.350 0 | 1.450 0 |
| 500 | 0.350 0 | 0.300 0 | 1.350 0 | 1.350 0 | 1.300 0 | 1.400 0 |
| 600 | 0.410 0 | 0.370 0 | 1.340 0 | 1.330 0 | 1.270 0 | 1.380 0 |

可以看出, GSA 的阻塞率始终比 GURP 高, 这是因为 GSA 在计算路径时将 QoS 参数作为各个链路的权重, 而 GURP 首先以带宽作为权重计算出 K 条路径, 之后再考察这 K 条路径的整体

QoS 参数是否满足业务请求需求。考察保护/工作资源比随业务强度的变化情况时, 整体趋势降低主要是因为随着业务强度的增大, 共享保护可以利用共享链路随之增加, 但业务请求中还有着专用保护, 所以, 保护/工作资源比的下降趋势不大。同时, 由于业务请求是随机产生, 存在一定的随机性, 专用保护和共享保护的比例也存在随机性, 所以存在小幅度波动。考察负载均衡度时, 因为 GURP 中不存在考虑负载均衡度的参数, 因此 GSA 的负载均衡度的值始终小于 GURP。但是 GURP 的负载均衡度与 GSA 的差值不大, 这主要是因为 GURP 机制是一个可以处理多粒度业务请求的路由保护机制, 不同粒度的结合可以充分利用物理链路的带宽资源。

网络能耗的实验对比结果如下: 当业务数量分别为 200、400、600、800 和 1 000 时, GSP 与 GURP 的网络能耗比依次为 1.020 4、1.061 2、1.083 3、1.080 0 和 1.081 9。可以看出, GSA 的网络能耗始终高于 GURP 的网络能耗。这主要是因为 GSA 没有最小化波长转换次数的策略, 同时 GSA 的次波长级业务请求在路由时没有考虑虚波长链路, 而这无疑增加了能量的消耗。

5 结束语

本文提出并仿真实现了一种多粒度传送网中的绿色单播路由保护机制。设计了新型的网络节点结构及能耗计算公式; 将 QoS 参数转换为相应的隶属度对路径进行计算; 设计了多层辅助图以便于计算最小波长转换次数和相应的波长分配; 并提供了 3 种保护策略。本文设计的绿色单播路由保护机制能够满足不同业务请求的 QoS 需求, 兼顾业务在路径上传输消耗的电能, 并合理地利用网络资源。

参考文献:

- [1] PALKOPOULOU E, SCHUPKE D A, BAUSCHERT T. Shared backup router resources: realizing virtualized network resilience[J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(5): 140-146.
- [2] HYANG W, EYTAN M, KAYI L. Diverse routing in networks with probabilistic failures[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2010, 18(6): 1895-1907.
- [3] ZENG Y Y, WU J, XIONG N X, et al. Energy-efficient routing and rate allocation for delay tolerant networks[A]. 32nd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops[C].

2012.260-266.

- [4] TAN S F, ZHANG X N, LI L M, *et al.* Green optical networks with Availability Guarantee[A]. The 11th International Symposium on Communications & Information Technologies[C]. 2011.97-102.
- [5] 谢小民, 王兴伟, 温占考等. 一种面向认知网络的 QoS 路由协议[J]. 计算机学报, 2013, 36(9): 1456-1464.
- XIE X M, WANG X W, WEN Z K, *et al.* A QoS routing protocol for cognitive networks[J]. Chinese Journal of Networks, 2013,36(9): 1456-1464.
- [6] WANG X 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] CHEN C, BANERJEE S. A new model for optimal routing and wavelength assignment in wavelength division multiplexed optical networks[A]. Proceedings IEEE INFOCOM[C]. Los Alamitos, USA, 1996.164-171.
- [9] CHING F, FANG H, LIN S. On dynamic wavelength assignment in wavelength-convertible multi-granular optical network[J]. IEEE Transactions on Communications, 2009, 57(8): 2221-2224.
- [10] RICCIARDI S, PALMIERI F, FIORE U, *et al.* An energy-aware dynamic RWA framework for next-generation wavelength-routed networks[J]. Computer Networks, 2012, 56: 2420-2442.

作者简介:



石峻岭 (1989-), 女, 辽宁沈阳人, 东北大学博士生, 主要研究方向为社交网络、路由保护机制等。



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。