

基于单程建路的高效快速双向标签交换路径生成算法

金鑫^① 文安^① 黄维芳^① 刘年^① 魏承志^① 张剑波^{*②} 任智^②

^①(中国南方电网电力调度控制中心 广州 510623)

^②(重庆邮电大学移动通信技术重庆市重点实验室 重庆 400065)

摘要: 双向标签交换路径(LSP)是多协议标签传输应用(MPLS-TP)网络技术的重要组成部分,但现有的双向LSP生成算法因双程建路而在控制开销和用时方面导致冗余。为此,该文提出一种基于单程建路的高效双向LSP生成算法(EAEBL),在保障建路效果的前提下,通过控制消息的一次单程正向传递完成双向LSP的生成,从而减少建立双向LSP的控制开销和用时而且能够加快启动数据分组的传递。理论分析验证了EAEBL算法的有效性,仿真结果显示:与现有的4种双向LSP生成算法相比,EAEBL算法的建路控制开销和用时分别减少了14.7%和50%以上,数据分组在源LSR的等待时间则被减至趋近于0。

关键词: 多协议标签交换传输应用;双向标签交换路径;单程;控制开销

中图分类号: TP393.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2016)03-0707-06

DOI: 10.11999/JEIT150754

An Efficient Algorithm for Rapidly Establishing Bidirectional Label Switch Paths Based on Single Trips of Control Packets

JIN Xin^① WEN An^① HUANG Weifang^① LIU Nian^①
WEI Chengzhi^① ZHANG Jianbo^② REN Zhi^②

^①(CSG Power Dispatching Control Center, Guangzhou 510623, China)

^②(Chongqing Key Laboratory of Mobile Communication Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: Bidirectional Label Switch Paths (LSPs) are important parts of Multi-Protocol Label Switching-Transport Profile (MPLS-TP) networking technology. However, the existing algorithms of establishing bidirectional LSPs have redundancy in operation, control overhead, and waiting time of data packets. To address this problem, a novel algorithm based on single trips of control packets, Efficient Algorithm for Establishing Bidirectional LSPs (EAEBL), is proposed in this article. On the premise of completing the establishment of bidirectional LSPs, EAEBL only needs to transfer the control packet through a single trip, thus the redundancy in operation and control overhead is reduced and conveying data packets is accelerated. Theoretical analysis verifies the effectiveness of EAEBL. Simulation results show that EAEBL reduces the control overhead and delay for establishing bidirectional LSPs by at least 14.7% and 50%, respectively, as compared with three existing algorithms. Moreover, the waiting time of data packets in source LSPs is decreased to approach zero.

Key words: Multi-Protocol Label Switching-Transport Profile (MPLS-TP); Bidirectional LSPs; Single trips; Control overhead

1 引言

通过扩展 MPLS(Multi-Protocol Label

Switching)^[1,2]架构而得到的分组交换网络技术 MPLS-TP (Transport Profile)^[3,4]近年来受到人们关注。作为传送和数据技术融合发展的产物, MPLS-TP 致力于在网络中实现面向连接的跨域分组传输,它简化了 MPLS 技术的部分内容并在多个环节做了扩展,逐渐成为一种适应业务 IP 化、网络分组化的主流技术。

MPLS-TP 吸收了 GMPLS(Generalized Multi-Protocol Label Switching)^[5,6]中的双向 LSP (Label-Switched Path)技术^[7,8],使采用它的网络能支持正

收稿日期: 2015-06-24; 改回日期: 2015-09-27; 网络出版: 2015-11-19

*通信作者: 张剑波 1025083236@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金(61379159), 长江学者和创新团队发展计划基金(IRT1299), 南方电网科技项目(K-ZD2013-022)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61379159), The Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University (IRT1299), The Science and Technology Project of China Southern Power Grid Company (K-ZD2013-022)

反两个方向的 LSP。对于如何建立双向 LSP，人们已做了一些研究，目前的双向 LSP 生成算法已从初期的控制消息传递两个来回独立地建正向 LSP 发展到控制消息传递一个来回同时建双向 LSP。但我们经过深入研究发现现有的双向 LSP 生成算法在操作、控制开销和数据分组等待时间方面存在冗余，影响了控制开销和数据分组时延等性能，因此在本文中提出了一种仅需单程传递建路分组的双向 LSP 生成新算法解决上述问题。

本文后续内容组织如下：第 2 节介绍现有双向 LSP 生成算法；第 3 节详述提出的双向 LSP 建立新算法并加以分析；第 4 节对新算法进行仿真验证；最后，第 5 节总结全文并简介未来研究方向。

2 双向 LSP

目前已有一些关于在 GMPLS 和 MPLS-TP 网络中如何建立双向 LSP 的研究。文献[9]提出一种在两个已有的方向相反的单向 LSP 上通过控制层面的操作来建立双向 LSP 的算法(如图 1(a)所示)，该算法能够在逻辑上关联正(从源 LSR (Label Switching Router)到目的 LSR)、反两个方向的 LSP，但因为需要分别建立正、反向 LSP，较为繁琐。为了降低双向 LSP 标签分配失败的概率，文献[10]提出一种在 GMPLS 网络中建立双向标签路径的算法——ULS(Upstream Label Set)，如图 1(b)所示。在 ULS 中，从源 LSR 开始，上游 LSR 向下游 LSR 发送一个可选标签集合，下游 LSR 从该集合中选择一个标签发给上游 LSR，上游 LSR 发回 1 个 ResvConf 消息进行确认。ULS 比双向独立建路方式减少了一个消息回程，但传送标签集会导致冗余控制开销。

在 GMPLS 定义的双向 LSP 生成算法^[7,11]中，用标签请求消息和 Resv 消息分别为下、上行 LSP 分配不同的标签，如图 1(c)所示。与 ULS 相比虽然控制开销和建路耗时有所减少，但仍然需要 1 个来回且标签请求消息因携带标签而有冗余开销。文献[12]为 MPLS-TP 网络提出的双向 LSP 生成算法 NLDM(Novel Label Distribution Mechanism)采用反向建路方式且正、反向 LSP 用同样的标签，标签请求消息不再携带标签，但完成 LSP 生成仍需要 1 个完整的消息来回。

从上述内容可看出，目前 MPLS-TP 网络的双向 LSP 生成算法已经从 2 个消息来回发展到 1 个消息来回且标签请求消息不再携带标签；但我们通过深入研究发现，当前算法的双程建路方式在操作、

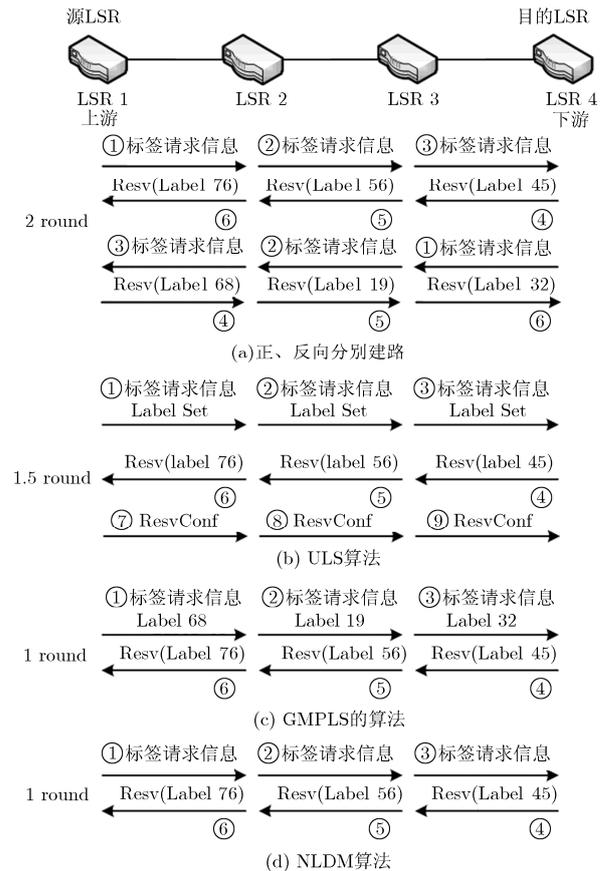


图 1 双向 LSP 建立过程

控制开销和路径启用时间方面仍然存在冗余，有必要加以解决以提高建路性能。

3 EAEBL 算法

为解决现有 MPLS-TP 双向 LSP 生成算法存在的控制开销和时间冗余问题，本文提出一种基于单程建路的高效双向 LSP 生成算法——EAEBL (Efficient Algorithm for Establishing Bidirectional LSPs)，采用单程建路的思想降低开销和用时。

3.1 EAEBL 算法包含的新机制

为减少控制开销和建路用时，在 EAEBL 算法中设计了以下 4 种新机制：

(1) 单程建路：在 EAEBL 算法中，上游节点为下游节点分配的标签供正、反两个方向的 LSP 使用，因此，只需要单程一次性的端到端标签请求消息传送，便能够完成双向 LSP 的建立，如图 2 所示。为了建立反向 LSP 的表项，标签请求消息需携带源节点地址 Src addr。

(2) 正向建路：现有的双向 LSP 生成算法通常采用“反向建路”或“正、反向建路”的方式，而 EAEBL 算法采用“正向建路”方式，从而为单程完成双向 LSP 建立打下基础。

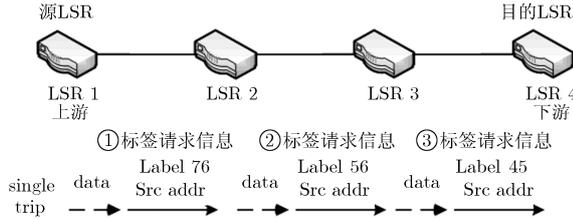


图 2 EAEBL 算法建立双向 LSP 的过程及数据分组传输

(3)且建且用：在现有的双向 LSP 生成算法中，源 LSR 上的数据分组要等到所有的 LSR 都被分配了标签后才能得到传送；而在 EAEBL 算法中，源 LSR 上的数据分组不必等到所有 LSR 都得到标签，只需在源 LSR 为下游的邻居节点 LSR2 分配了标签后，便可立即传送，如图 2 所示。这样，通过 LSP 的且建且用，便能以最快的速度启用新建的 LSP，使数据分组在源 LSR 的等待时间缩短至趋近于 0。

(4)2 维避重：为避免标签冲突，EAEBL 算法让每个 LSR 记录自己和其它节点已经使用的标签号，并在为其它节点分配标签时避免使用这些已用的标签号(现有算法通常只排除自己使用的标签)，从而从自己和其它节点两个维度避免标签重号，消除标签冲突的风险。LSR 获得其邻居节点使用的标签号的方法是：当有数据分组到达时，该 LSR 从数据分组头部取出标签号并进行保存，从而得以获知相邻 LSR 所使用的标签号。

3.2 算法操作

EAEBL 算法建立双向 LSP 的操作具体如下：

(1)源 LSR 收到需要它转发的数据分组后，获取通往目的节点的路由，然后选择一个未使用的标签，将其装入一个新建的标签请求消息，同时装入源节点地址 Src addr，然后将该消息发给下一跳 LSR，并建立相应的正向标签表项。

(1)位于路径中间的 LSR 收到上一跳 LSR 发来的标签后，建立反向标签表项；接着查找出通往目的节点的路由，选择一个未使用的标签，将其装入一个新建的标签请求消息，同时装入源节点地址 Src addr，然后将该消息发给下一跳 LSR；并且建立相应的正向标签表项。

(2)目的 LSR 收到上一跳 LSR 发来的标签后，建立相应的反向标签表项。

综上所述，双向 LSP 通过控制标签请求消息的单程一次性传递便得以建立。

3.3 性能分析

3.3.1 开销分析 本小节对 EAEBL 算法的通信开销和存储开销进行详细分析。

(1)通信开销分析：EAEBL 算法让标签请求消息携带源地址，会引入新的通信开销，即单程传送一个地址的开销；但现有算法皆采用双程及以上的控制消息传送方式，因此在建立双向 LSP 的总通信开销上至少比 EAEBL 多 $(l_r - l_l - l_A)(n - 1)$ ，其中 l_r, l_A 分别为 Resv 消息和节点地址的长度， n 为 LSP 包含的节点数。下面证明上述论断。

引理 1 EAEBL 算法建立双向 LSP 的通信开销比现有算法至少减少 $(l_r - l_l - l_A)(n - 1)$ 。

证明 设标签和标签请求消息的长度为分别为 l_p 和 l_l ， h_{LS} 和 h_{RC} 分别为标签集(Label Set)与 ResvConf 消息的长度。定义建立 1 条双向 LSP 的通信开销 C 为所有节点发送的控制消息的比特数之和，计算如式(1)：

$$C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} l_{i,j} \quad (1)$$

其中， m_i 为第 i 个节点发送的控制消息总数， $l_{i,j}$ 为第 i 个节点发送的第 j 个控制消息的长度。于是，上文所述现有双向 LSP 生成算法的通信开销分别为

$$C_{\text{分建}} = 2(n - 1)(l_p + l_r) \quad (2)$$

$$C_{\text{ULS}} = (n - 1)(l_p + l_{LS} + l_r + l_{RC}) \quad (3)$$

$$C_{\text{GMPLS}} = (n - 1)(l_p + l_l + l_r) \quad (4)$$

$$C_{\text{NLDM}} = (n - 1)(l_p + l_r) \quad (5)$$

不难看出，NLDM 算法的通信开销最小。而 EAEBL 算法的通信开销为

$$C_{\text{EAEBL}} = (n - 1)(l_p + l_l + l_A) \quad (6)$$

由于 Resv 消息包含源节点地址(32 bit)、标签(20 bit)和“Message ID”(32 bit)等字段，因此有

$$l_r > l_l + l_A \quad (7)$$

结合式(5)~式(7)，可得

$$C_{\text{EAEBL}} < C_{\text{NLDM}} \quad (8)$$

而且可进一步算得减少的通信开销 C_s 为

$$C_s = (l_r - l_l - l_A) \times (n - 1) = (196 - 20 - 32) \times (n - 1) = 144n - 144 \text{ (bit)} \quad (9)$$

即 EAEBL 算法的通信开销低于现有相关算法，而且至少低 $(144n - 144)$ bit。证毕

(2)存储开销分析：在现有双向 LSP 生成算法中，每个 LSR 都会保存自己已使用的标签号；而根据 EAEBL 算法，LSR 既要保存自己使用的标签号，也会保存邻居 LSR 使用的标签号。假设在 MPLS-TP 网络中每个 LSR 平均使用的标签号数量为 N ，每个 LSR 发往各邻居的平均标签号数量相等(随机均匀)；则可知现有双向 LSP 生成算法中一个 LSR 要保存的平均标签号数量为 N ，占用内存空间

20N bit; 在 EAEBL 算法中一个 LSR 要保存的平均标签号数量为 2N, 占用内存空间 40N bit; 由于标签长度为 20 bit, 因此 N 最大值=1M(=10²⁶), 则现有算法和 EAEBL 算法的在存储标签上的最大开销分别为 2.5 MB (20 Mb)和 5 MB (40 Mb); 因为在其它方面的存储开销相同, 因此 EAEBL 算法的存储开销最多增加 2.5 MB(通常情况下因标签未用完而不会增到最大)。目前微型计算机的内存通常都在 1 GB 以上, 路由器的内存则更大, 因此 2.5 MB 的存储增加量通常可以接受; 而且上述思路也符合业内较常见的用适度的存储代价换取通信性能提升的思路。

3.3.2 标签冲突分析 对于 EAEBL 算法的标签冲突, 有如下引理:

引理 2 EAEBL 算法能够建立双向 LSP 且能够降低标签冲突概率。

证明 根据 EAEBL 算法的原理, 从源 LSR 至目的 LSR, 每个 LSR 都会用标签请求消息(携带有源、目的节点地址)为下一跳节点分配标签且知道出端端口号, 因此它能够建立指向目的节点的正向标签表项, 包含目的节点地址、标签、出口端口号等字段; 另一方面, 每个节点都能够从上一跳节点发来的路径消息得到标签、源节点地址且知晓入口, 因此也能建立指向源节点的反向标签表项。由于每个节点在分配标签时, 对于自己和其它节点用过的标签都不选择, 因此相对于只遴选己用标签的现有算法, EAEBL 能够降低标签冲突发生的概率。

证毕

3.3.3 建路用时分析

引理 3 在上文所述 5 种双向 LSP 生成算法中, EAEBL 算法建路用时最少。

证明 假设在 MPLS-TP 网络中, 节点数目为 n, 在每条链路上传输的平均时延分别为 t_{LP} 和 t_{LR}; 在每个节点上的处理时延分别为 t_{NP} 和 t_{NR}; 定义建立双向 LSP 的建路用时 T 为从源 LSR 发出标签请求消息到最后一个控制消息到达其目的节点所经历的时间。由图 1 和图 2 可知, 在本文所述 5 种双向 LSP 生成算法中控制消息皆为串行, 因此计算建路用时 T 为

$$T = \sum_{i=1}^c \left(\sum_{j=1}^{l_i} t_{i,j} + \sum_{k=1}^{e_i} t_{i,k} \right) \quad (10)$$

其中, c 为控制消息数, l_i 和 e_i 分别为第 i 个控制消息经过的链路数和节点数, t_{i,j} 和 t_{i,k} 分别为第 i 个控制消息在第 j 条链路和第 k 个节点的时延。于是可得 5 种算法的建路用时为

$$T_{\text{分建}} = 6(t_{LP} + t_{LR}) + 8(t_{NP} + t_{NR}) \quad (11)$$

$$T_{\text{ULS}} = 3(t_{LP} + t_{LR} + t_{LRC}) + 4(t_{NP} + t_{NR} + t_{NRC}) \quad (12)$$

$$T_{\text{GMPLS}} = 3(t_{LP'} + t_{LR}) + 4(t_{NP'} + t_{NR}) \quad (13)$$

$$T_{\text{NLDM}} = 3(t_{LP} + t_{LR}) + 4(t_{NP} + t_{NR}) \quad (14)$$

$$T_{\text{EAEBL}} = 3t_{LP''} + 4t_{NP''} \quad (15)$$

脚标中的 RC, P', P'' 分别表示 ResvConf 消息、加 Label 字段的标签请求消息以及加 Label 和 Srcaddr 字段的标签请求消息。不难看出:

$$t_{LP} < t_{LP'} < t_{LP''} < t_{LP} + t_{NP} \quad (16)$$

$$t_{LR} < t_{LR'} < t_{LR''} < t_{LR} + t_{NR} \quad (17)$$

于是可得

$$T_{\text{EAEBL}} < T_{\text{NLDM}} < T_{\text{GMPLS}} < T_{\text{ULS}} < T_{\text{分建}} \quad (18)$$

即 EAEBL 算法的建路用时最少。

证毕

4 仿真分析

为定量验证 EAEBL 算法的性能, 采用 OPNET 仿真平台^[13,14], 选择 ULS, GMPLS, MPLS 和 NLDM 4 种算法作为比较对象, 比较分析它们的控制开销、建路用时、有标签冲突时建路用时、数据分组平均时延和源 LSR 数据分组等待时间 5 种性能。

4.1 仿真统计量

在仿真中采用了如下 5 个统计量:

(1) 平均控制开销 \bar{C} : 表示节点发出的, 用于建立双向 LSP 的控制消息的比特数, 由式(19)计算:

$$\bar{C} = \frac{1}{n_p} \sum_{i=1}^{n_p} C_i \quad (19)$$

其中 n_p, C_i 分别为 LSP 数和第 i 条 LSP 的控制开销。

(2) 平均建路用时 \bar{T} : 表示建立双向 LSP 平均消耗的时间为

$$\bar{T} = \frac{1}{n_p} \sum_{i=1}^{n_p} T_i \quad (20)$$

其中 T_i 为第 i 条 LSP 的建路用时。

(3) 标签冲突次数 N_c: 表示在建立双向 LSP 的过程中发生标签冲突的次数。

(4) 源 LSR 数据分组平均等待时间 \bar{W} : 表示数据分组在源 LSR 处平均等待的时间为

$$\bar{W} = \frac{1}{n_D} \sum_{i=1}^{n_D} (ts_i - ta_i) \quad (21)$$

其中, n_p 为到达源 LSR 的第 1 个数据分组的数量, ts_i 和 ta_i 分别表示第 i 个源 LSR 收到和发送第 1 个数据分组的时刻值。

(5) 数据分组平均时延 \bar{D} : 数据分组平均时延指数据分组从源节点通过网络传送到目的节点所用的平均时间为

$$\bar{D} = \frac{1}{n_d} \sum_{i=1}^{n_d} (t_{di} - t_{si}) \quad (22)$$

其中 n_d 为数据分组数, t_{si}, t_{di} 为分别为第 i 个数据分组被源节点发出和目的节点接收的时刻。

4.2 仿真设置

为便于比较, 选择美国 NSFNET Backbone Network^[15,16]作为网络环境并参照文献[12]设置仿真条件和参数, 主要参数具体如表 1 所示:

表 1 主要仿真参数设置

仿真参数	数值
节点数	14
链路数	21
链路带宽	1 Gbps
LSP 数	10~90
数据分组大小	1 kB
数据分组产生规律	泊松过程
数据分组产生间隔	1 s
仿真时间	200 s
标签空间	4 kb
LSP 源、宿节点选择	随机选择

4.3 仿真结果及分析

(1)平均控制开销: 平均控制开销的仿真结果如图 3 所示。由图可知, EAEBL 算法的平均控制开销在不同 LSP 数目情况下都是最低的, 稳定在 2 kb 左右, 比其它 4 种算法至少低 50%; 这是因为 EAEBL 算法仅需将标签请求消息单程传送一次便完成了双向 LSP 的建立, 节点收发控制消息的次数明显降低。同时, 此结果也验证了引理 1 的正确性。

(2)平均建路用时: 图 4 的仿真结果显示 EAEBL 算法在不同 LSP 数目情况下的平均建路用时均低于其它 4 种算法, 在数值上至少低 50%, 其原因在于 EAEBL 算法采用的是正向、单程建路的方式, 省去了反向传递消息的过程; 这也定量验证了引理 2 的正确性。NLDM 和 GMPLS 算法的曲线

几乎重合的原因在于它们都执行 1 个来回的控制消息传递, GMPLS 算法的路径消息虽然多 1 个长 20 bit 的标签, 但在链路带宽较大(≥ 100 Mbps)的情况下增加的时延小于 1 ms, 因此差别不算明显。

(3)标签冲突次数: 从图 5 的标签冲突次数仿真结果可以看出, EAEBL 算法在不同 LSP 数目场景中的标签冲突次数均为最小, 平均冲突次数比其它 4 种算法至少降低 12.5% ($=5/40$)。EAEBL 算法取得此效果的主要原因在于它的“2 维避重”新机制能够让节点在避开自己使用的标签的同时也避开邻居节点所用的标签, 从而减小了标签冲突的概率。

(4)源 LSR 数据分组平均等待时间: 从图 6 可看出, EAEBL 算法的源 LSR 数据分组平均等待时间在不同 LSP 数目情况下均趋于 0, 明显低于其它 4 种算法; 这是因为 EAEBL 算法的“且建且用”新机制让源 LSR 发送标签请求消息后立即发送数据分组, 二者在时间上的间隔仅为路由节点执行若干条指令的时间, 目前计算机主频通常在 GHz 以上而且是多核运行, 因此该时间间隔小于 1 ms, 所以在图上 EAEBL 算法的曲线贴近 x 轴。

(5)数据分组平均时延: 图 7 显示运行 EAEBL 算法时数据分组的平均时延在路径数为 10~90 的不同场景中均为最低, 至少比其它算法低 2.11%; 这说明“且建且用”新机制发挥了作用, 通过缩短数据分组在源 LSR 的等待时间促使数据分组更快地传送, 从而降低了其端到端时延。

5 结束语

双向 LSP 因建路效率相对较高而在 MPLS-TP 网络中具有重要应用价值。为了消除现有双向 LSP 生成算法在控制开销和用时以及数据分组等待时间方面的冗余, 本文提出了一种单程正向建路的双向 LSP 生成新算法, 在不影响建路效果的前提下将建路过程精简至 0.5 个控制消息来回, 从而使控制开销、建路用时、源 LSR 数据分组等待时间和数据分组时延降低了 2.11% 以上, 双向 LSP 的生成变得更

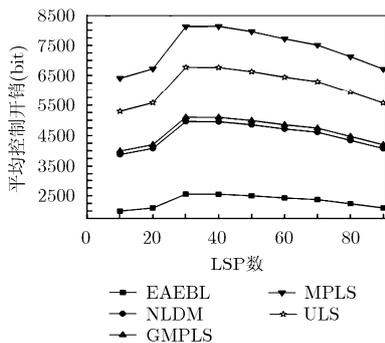


图 3 平均控制开销比较

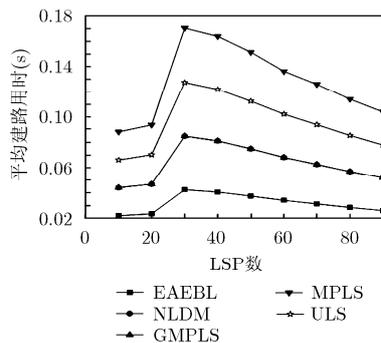


图 4 平均建路用时比较

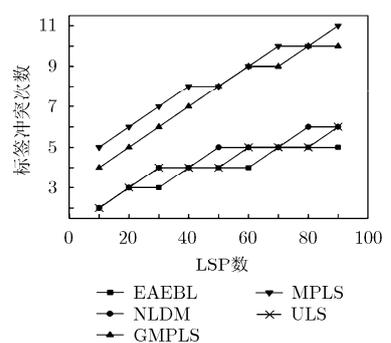


图 5 标签冲突次数比较

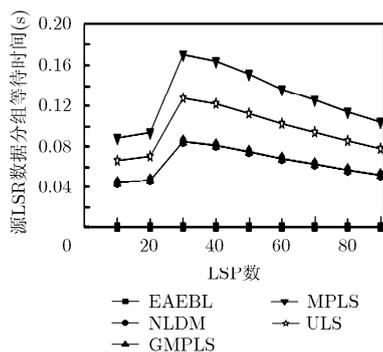


图6 源 LSR 数据分组平均等待时间比较

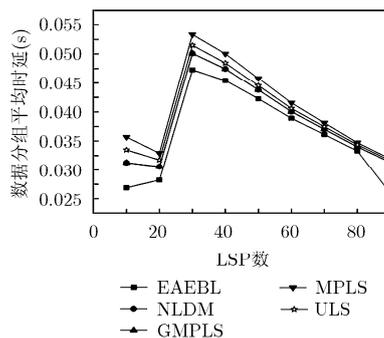


图7 数据分组平均时延比较

加高效和快速。在未来研究中,将基于本文算法着力提升双向 LSP 的传输性能。

参考文献

- [1] KOMPPELLA K, ANDERSSON L, and FARREL A. Allocating and retiring special-purpose MPLS labels[S]. IETF RFC7274, 2014.
 - [2] FRANCOIS F, WANG N, MOESSNER, K, *et al.* Leveraging MPLS backup paths for distributed energy-aware traffic engineering[J]. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 2014, 11(2): 235-249.
 - [3] NIVEN-JENKINS B, BRUNGARD D, BETTS M, *et al.* Requirements of an MPLS transport profile[S]. IETF RFC5654, 2009.
 - [4] KOIKE Y. MPLS transport profile (MPLS-TP): overview and status[C]. Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC), California, America, 2013: 1-45.
 - [5] MANNIE E. Generalized multi-protocol label switching (GMPLS) architecture[S]. IETF RFC3945, 2004.
 - [6] RAMON C, RAUL M, RICARDO M, *et al.* SDN orchestration of openflow and GMPLS flexi-grid networks with a stateful hierarchical PCE[J]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 2015, 7(1): A106-A117.
 - [7] BERGER L. Generalized multi-protocol label switching (GMPLS) signaling resource reservation protocol-traffic engineering (RSVP-TE) extensions[S]. RFC3473, 2003.
 - [8] TAKACS A, BERGER L, CAVIGLIA D, *et al.* GMPLS asymmetric bandwidth bidirectional label switched paths (LSPs)[S]. IETF RFC6387, 2011.
 - [9] 欧阳春波. 一种双向标记交换路径的实现方法[P].中国发明专利, ZL 200510067973.8, 2005.
OUYANG C. A method to setup a bidirectional label switching path[P]. Chinese Patent, ZL200510067973.8, 2005.
 - [10] OKI E, MATSURRA N, SHIOMOTO K, *et al.* Bidirectional path setup scheme using on upstream label set in optical GMPLS networks[J]. *IEICE Transactions on Communications*, 2004, 87(6): 1569-1576.
 - [11] BERGER L. GMPLS signaling procedure for egress control[S]. IETF RFC4003, 2005.
 - [12] DU Z, LU Y, and JI Y. Efficient label distribution mechanism for bidirectional paths in MPLS-TP networks[J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, 10(2): 1-4.
 - [13] Riverbed modeler[EB/OL]. <http://www.riverbed.com/products/performance-management-control/network-performance-management/network-simulation.html>, 2015.
 - [14] SLLAMEA A M. Modeling and simulating MPLS networks [C]. The 2014 International Symposium on Networks, Computers and Communications, Hammamet, Tunisia, 2014: 1-6.
 - [15] SEVERANCE C. Doug van houweling: Building the NSFNet[J]. *Computer*, 2014, 47(4): 7-9.
 - [16] About NSFNET[EB/OL]. <http://www.nsfnet-legacy.-org/about.php>, 2007.
- 金鑫: 男, 1985年生, 硕士, 工程师, 研究方向为 MPLS-TP 网络数据传输技术、网络信息安全技术与协议仿真。
- 文安: 男, 1965年生, 博士, 国家千人计划专家, 研究方向为电网保护控制与通信。
- 黄维芳: 女, 1986年生, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护通信。
- 刘年: 男, 1986年生, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护通信。
- 魏承志: 男, 1984年生, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护通信。
- 张剑波: 男, 1989年生, 硕士生, 研究方向为 MPLS-TP 网络通信协议。
- 任智: 男, 1971年生, 博士后, 教授, 硕士生导师, 研究方向为宽带通信网络理论与技术。