

基于 MPLS 的移动 IP 网络的移动性支持：平滑切换与路由优化

李云^{①②} 隆克平^① 陈前斌^① 邝育军^①

^①(重庆邮电学院光互联网及无线信息网络研究中心 重庆 400065)

^②(电子科技大学抗干扰国防重点实验室 成都 610054)

摘要 为了减小基于 MPLS 的移动 IP 网络的信令开销、切换时延和切换丢包,人们提出了一种称为 LSP 扩展的移动性管理机制。LSP 扩展存在两个问题:一是扩展的 LSP 可能存在环路;二是需要定义中止 LSP 扩展的准则。针对上述问题,该文首先给出了 LSP 扩展的环路消除技术,然后定义了中止扩展 LSP 的准则,即用户信息和信令信息代价函数;并理论分析了用户信息和信令信息代价函数的计算过程,讨论了如何通过该代价函数中止扩展 LSP。性能分析结果表明,根据该准则中止扩展 LSP 能在较大程度上减小 LSP 扩展机制的开销。

关键词 多协议标签交换, 移动 IP, LSP 扩展, 代价函数

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)07-1317-05

Mobility Support in MPLS-Based Mobile IP Networks: Smooth Handoff and Route Optimization

Li Yun^{①②} Long Ke-ping^① Chen Qian-bin^① Kuang Yu-jun^①

^①(Special Research Centre for Optical Internet & Wireless Information Networks, Chongqing University of Posts & Telecommunications, Chongqing 400065, China)

^②(National Defense Key Lab of Anti-interference Communication Technology, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract An LSP extension mechanism is proposed to decrease the signaling overhead and handoff delay and to eliminate the packet loss in MPLS based mobile IP networks. For the LSP extension mechanism, some loops may exist in extended LSP, and the criterion used for breaking down the extended LSP is not proposed. Aiming to these problems, this paper firstly gives a method to avoid forming loops in extended LSP. Then, a criterion, i.e. user information cost function and signal information cost function, are defined to breaking down the extended LSP, and the analysis is provided to calculate these cost functions. How to utilize the cost functions to break down the extended LSP is also discussed. The performance evaluation results denote that overhead of LSP extension mechanism can be decreased by breaking down the extended LSP according to the proposed criterion.

Key words Multiple protocol label switch, Mobile IP, Label Switch Path(LSP) extension, Cost function

1 引言

为了解决移动节点在互联网上的移动性问题, IETF 提出了移动 IP 协议(Mobile IP, MIP)^[1]。为减小 MIP 的信令开销和注册时延, 文献[2]提出了本地注册 (Regional Registration, RR) 机制; 为避免 MIP 的切换丢包, 文献[3]提出了平滑切换 (Smooth Handoff, SH) 机制。针对 MIP 的“三角路由”问题, 文献[3]提出了路由优化(Route Optimization, RO)机制。

多协议标签交换 (Multiple Protocol Label Switch, MPLS)^[4]无需执行复杂的基于目的 IP 地址的最长匹配算法, 因此, MPLS 可以提高分组的转发速度, 并具有良好的可扩展性。同时, MPLS 支持流量工程和服务质量保证(Quality of Service, QoS)。

MPLS 与 MIP 结合使网络同时具有 MPLS 和移动 IP 的优点。文献[5]首次将 MPLS 与 MIP 结合起来。文献[6]提出了分级移动 MPLS(Hierarchical Mobile MPLS, HMMPLS)机制。文献[7]实现了 MPLS 与移动 IP 结合时的平滑切换机制。文献[8]讨论了 MPLS 与移动 IP 结合的路由优化问题。文献[9]讨论了 MPLS 与移动 IP 结合并同时支持 InterServ^[10]和 DiffServ^[11]体系结构的问题。

为了减小 MPLS 与移动 IP 结合时的信令开销、切换时延和切换丢包。文献[12]给出了一种称为 LSP 扩展(LSP-E: LSP Extension)的新机制。LSP-E 存在如下两个问题: (1) 扩展的 LSP 可能存在环路; (2) 由于 LSP 不可能无限扩展下去, 因此, 当 LSP 扩展到一定长度后应该中止 LSP 的扩展, 并利用路由优化机制在与通信对端相连的 LER 和当前外地代理之间重新建立一条 LSP。

针对 LSP-E 存在的上述问题, 本文首先给出了 LSP-E 的环路消除技术, 然后定义了中止 LSP-E 的准则, 讨论了如何通过该准则中止扩展 LSP。

2004-11-29 收到, 2005-09-02 改回

国家 863 计划(2003AA121540), 国家自然科学基金(90304004), 重庆市教委项目(050310, KJ050503), 重庆市科委项目(8817)和人事部归国人员择优资助项目联合资助课题

2 LSP 扩展机制及其存在的问题

2.1 LSP 扩展机制

LSP 扩展机制的基本原理如图 1 所示。当移动节点由一个 FA(称其为旧的 FA, OFA) 移动到另一个 FA(称其为新的 FA, NFA) 时, NFA 向 OFA 发送绑定更新消息, OFA 在收到绑定更新消息后建立到 NFA 的扩展 LSP, 而新的 LSP 由切换前的 LSP 和扩展的 LSP 共同构成。这样, 发到移动节点的分组将通过 OFA 转发到 NFA, 再到移动节点。

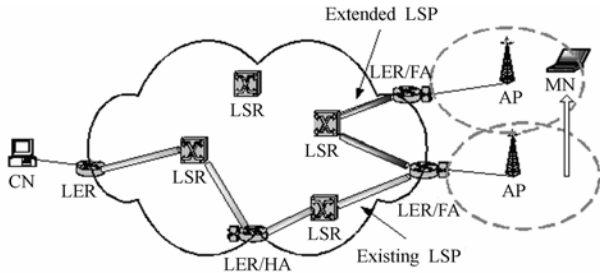


图 1 LSP 扩展机制原理图

Fig.1 The basic idea of LSP extension

图 2 给出了 LSP 扩展机制的消息序列图。当移动节点移动到一个新的 FA, 它首先通过代理广播消息获得一个新的转交地址, 然后向新的 FA 发送注册请求消息, 新的 FA 将注册请求转发到家乡代理, 并向旧的 FA 发送绑定更新消息。旧的 FA 在收到绑定更新消息后向新的 FA 发送标签请求消息, 新的 FA 在收到标签请求消息后向旧的 FA 返回标签映射消息, 从而建立旧的 FA 和新的 FA 之间的扩展 LSP。

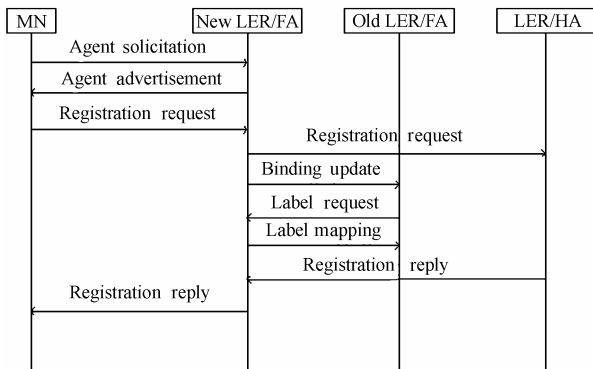


图 2 LSP 扩展机制的消息序列图

Fig.2 Message sequence chart for LSP extension

2.2 LSP 扩展机制存在的问题

LSP 扩展机制存在的一个问题是扩展的 LSP 可能存在环路, 图 3 给出了在扩展的 LSP 上存在环路的一个实例。在图 3 中, 移动节点由 LER/FA1 移动到 LER/FA2, 再到 LER/FA3。当移动节点由 LER/FA1 移动到 LER/FA2, LSP 扩展机制首先建立 LER/FA1 到 LER/FA2 的扩展 LSP, 即 LER/FA1→LSR→LER/FA2。当移动节点由 LER/FA2 移动到 LER/FA3, LSP 扩展机制再建立 LER/FA2 到 LER/FA3 的扩展 LSP, 即 LER/FA2→LSR→LER/FA3。并将两条扩展 LSP 的简单相加作为 LER/FA1 到 LER/FA3 的扩展 LSP, 即

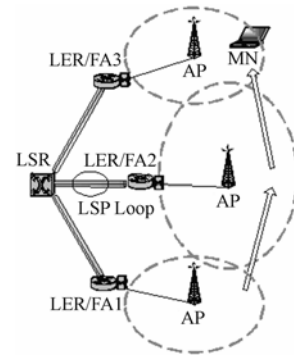


图 3 LSP 扩展形成环路的实例

Fig.3 An example for LSP loop formed by LSP extension

LER/FA1→LSR→LER/FA2→LSR→LER/FA3, 很显然, 在这条 LSP 中存在环路: LSR→LER/FA2→LSR。而环路的产生正是由于扩展 LSP 机制将两条(或多条)LSP 简单相加形成的。

另外, LSP 不可能无限制地扩展, 因为过度扩展 LSP 不仅不能减小网络开销, 甚至会增加网络开销。因此, 当 LSP 扩展到一定程度后, 我们应该中止扩展 LSP, 并利用路由优化技术重新建立 LER 和当前 FA 之间的 LSP。

3 环路消除及 LSP 扩展的中止

3.1 扩展 LSP 的环路消除技术

为了消除扩展 LSP 的环路, 我们对文献[12]给出的 LSP 扩展机制作如下修改: 假定移动节点决定从 FA1 开始采用 LSP 扩展机制, 则当移动节点移动到一个新的外地代理 FAx 时, 扩展的 LSP 总是从 FA1 开始建立, 即 FAx 总是将绑定更新消息发到 FA1, 再由 FA1 发送标签请求消息到 FAx, FAx 在收到标签请求消息后向 FA1 回送标签映射消息, 从而建立 FA1 到 FAx 的扩展 LSP。由于 LSP 的建立采用 LDP^[13] 协议, 而 LDP 协议本身具有环路检测能力, 因此, 利用 LDP 的环路检测能力, 我们便能避免在 FA1 和 FAx 间的 LSP 存在环路。

结合 3.2 节给出的 LSP 扩展的中止技术, 选取中止扩展 LSP 时移动节点连接的 FA 为新扩展 LSP 的 FA1。

为了说明修改后的 LDP 扩展机制的工作原理, 我们以图 3 为例。当移动节点由 LER/FA1 移动到 LER/FA2 再到 LER/FA3 后, 将由 LER/FA1 发送标签请求消息, 直接建立到 LER/FA3 的扩展 LSP, 而非先由 LER/FA2 发送标签请求消息到 LER/FA3, 建立到 LER/FA3 的 LSP 后, 再将 LER/FA1 到 LER/FA2 的 LSP 与 LER/FA2 到 LER/FA3 的 LSP 简单相加, 作为 LER/FA1 到 LER/FA3 之间的扩展 LSP。

当移动节点移动到一个新的 FA 时, 移动节点需要判定是否继续采用 LSP 扩展机制, 相应的判定准则和判定方法将在 3.2 节给出。

3.2 LSP 扩展的中止

LSP 扩展机制能减少信令开销, 但与路由优化机制相比, LSP 扩展机制建立的 LSP 更长, 从减小网络开销的角度, LSP

不能无限地扩展,当 LSP 扩展到一定程度后,我们应该中止扩展 LSP,利用路由优化技术重新建立通信对端相连的 LER 与当前 FA 之间的 LSP。本节中,我们将给出中止扩展 LSP 的准则,并讨论如何利用该准则中止扩展 LSP。

定义两个代价函数,即用户信息代价函数 $u(x(\alpha_i))$ 和信令信息代价函数 $s(\alpha_i)$,其中, $x(\alpha_i)$ 为通信对端到移动节点之间的路径上的链路总数, $\alpha_i \in \{\text{LSPe}, \text{RO}\}$, LSPe、RO 分别代表 LSP 扩展机制和路由优化机制。用户信息代价函数表示网络为了实现通信对端和移动节点之间的用户信息传送需要付出的代价,而信令信息代价函数是指当移动节点移动到一个新的外地代理时,由于建立新的 LSP 的需要,网络传送移动 IP 和 MPLS 的信令信息时需要付出的代价。总的代价函数 $f(\alpha_i)$ 表示为

$$f(\alpha_i) = u(x(\alpha_i)) + s(\alpha_i) \quad (1)$$

进一步,基于这一代价函数给出扩展 LSP 的中止准则如下:

$$E\{f(\text{RO})\} < E\{f(\text{LSPe})\} \quad (2)$$

即采用路由优化机制的网络总代价小于采用 LSP 扩展机制的网络总代价。

当移动节点处于某 FA 的覆盖区域时,用户信息代价函数与 $x(\alpha_i)$ 、移动节点在该区域的停留时间 T 以及单位时间内发送的信息量 I 有关,即

$$u(x(\alpha_i)) = v(x(\alpha_i), T, I) \quad (3)$$

为便于分析,假设 $u(x(\alpha_i))$ 是 $x(\alpha_i)$ 的线性函数,即

$$u(x(\alpha_i)) = AITx(\alpha_i) \quad (4)$$

其中, A 表示传送用户信息的路径上的平均链路代价系数。而单位时间内的用户信息量等于单位时间的分组数 C 乘以分组长度 L , 因此

$$u(x(\alpha_i)) = ALCTx(\alpha_i) \quad (5)$$

将式(5)代入式(1)得

$$f(\alpha_i) = ALCTx(\alpha_i) + s(\alpha_i) \quad (6)$$

下面,我们分别针对 LSP 扩展机制和路由优化机制分析信令信息代价函数。

由图 2 知, LSP 扩展机制的信令信息包括:移动节点和新的外地代理之间的信令信息,新的外地代理和家乡代理之间的信令信息,新的外地代理和旧的外地代理之间的信令信息。设移动节点同新的外地代理之间的路径包含的链路总数为 r_{MF} ,沿该路径需要传送的信令信息总量为 i_{MF} ;新的外地代理和家乡代理之间的路径包含的链路总数为 r_{NH} ,沿该路径需要传送的信令信息总量为 i_{NH} ;新的外地代理与旧的外地代理之间的路径包含的链路总数为 r_{NO} ,沿该路径需要传送的信令信息总量为 i_{NO} ;同样假设信令信息代价函数是信令信息传送路径包含的链路总数的线性函数,则

$$s(\text{LSPe}) = B_{MF}i_{MF}r_{MF} + B_{NH}i_{NH}r_{NH} + B_{NO}i_{NO}r_{NO} \quad (7)$$

其中 B_{MF} , B_{NH} , B_{NO} 分别表示沿移动节点与新的外地代理之间的路径、新的外地代理与家乡代理之间的路径、新的外地代理与旧的外地代理之间的路径上的平均链路代价系数。

为了计算路由优化机制的信令代价函数,我们给出如图 4 所示的路由优化机制的消息序列图。

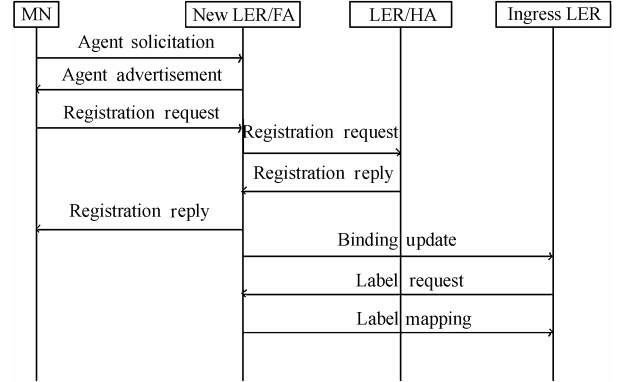


图 4 路由优化机制的消息序列图

Fig.4 Message sequence chart for route optimization

由图 4 知,路由优化机制的信令信息包括:移动节点与新的外地代理之间的信令的信息,新的外地代理与家乡代理之间的信令信息,新的外地代理与通信对端相连的入口 LER 之间信令信息。设移动节点与新的外地代理之间的路径包含的链路总数为 R_{MF} ,沿该路径需要传送的信令信息总量为 I_{MF} ;新的外地代理与家乡代理之间的路径包含的链路总数为 R_{NH} ,沿该路径需要传送的信令信息总量为 I_{NH} ;新的外地代理与通信对端相连的入口 LER 之间的路径包含的链路总数为 R_{NC} ,沿该路径需要传送的信令信息总量为 I_{NC} ;同样假设信令信息代价函数是信令信息传送路径包含的链路总数的线性函数,则

$$s(\text{RO}) = B_{MF}I_{MF}R_{MF} + B_{NH}I_{NH}R_{NH} + B_{NC}I_{NC}R_{NC} \quad (8)$$

其中 B_{NC} 表示的沿新的外地代理与通信对端相连的 LER 之间的路径上的平均链路代价系数。

由图 2 知,对 LSP 扩展机制,移动节点和新的外地代理之间的信令信息包括代理请求、代理广播、注册请求、注册应答,设其长度分别为 l_{as} , l_{aa} , l_{tr} , l_{ra} 。新的外地代理和家乡代理之间的信令信息包括注册请求、注册应答,设其长度分别为 L_{tr} , L_{ra} 。新的外地代理和旧的外地代理之间的信令信息包括绑定更新、标签请求和标签映射,设其长度分别为 l_{bu} , l_{lr} , l_{lm} 。则式(7)可改写为

$$\begin{aligned} s(\text{LSPe}) = & B_{MF}(l_{as} + l_{aa} + l_{tr} + l_{ra})r_{MF} \\ & + B_{NH}(L_{tr} + L_{ra})r_{NH} \\ & + B_{NO}(l_{bu} + l_{lr} + l_{lm})r_{NO} \end{aligned} \quad (9)$$

由图 4 知,对路由优化机制,移动节点与新的外地代理之间的信令信息包括代理请求、代理广播、注册请求和注册应答,长度与 LSP 扩展的对应消息的长度相同。新的外地代理与家乡代理之间的信令信息包括注册请求、注册应答,长

度与 LSP 扩展的对应消息的长度相同。新的外地代理与通信对端相连的 LER 之间信令信息包括绑定更新、标签请求和标签映射,长度与采用 LSP 扩展的对应消息的长度相同。则式(8)可改写为

$$s(\text{RO}) = B_{\text{MF}}(l_{\text{as}} + l_{\text{aa}} + l_{\text{tr}} + l_{\text{ra}})R_{\text{MF}} + B_{\text{NH}}(L_{\text{tr}} + L_{\text{ra}})R_{\text{NH}} + B_{\text{NC}}(l_{\text{bu}} + l_{\text{lr}} + l_{\text{lm}})R_{\text{NC}} \quad (10)$$

由式(6)和式(9)得:

$$f(\text{LSPe}) = \text{ALCTx}(\text{LSPe}) + B_{\text{MF}}(l_{\text{as}} + l_{\text{aa}} + l_{\text{tr}} + l_{\text{ra}})r_{\text{MF}} + B_{\text{NH}}(L_{\text{tr}} + L_{\text{ra}})r_{\text{NH}} + B_{\text{NO}}(l_{\text{bu}} + l_{\text{lr}} + l_{\text{lm}})r_{\text{NO}} \quad (11)$$

由式(6)和式(10)得:

$$f(\text{RO}) = \text{ALCTx}(\text{RO}) + B_{\text{MF}}(l_{\text{as}} + l_{\text{aa}} + l_{\text{tr}} + l_{\text{ra}})R_{\text{MF}} + B_{\text{NH}}(L_{\text{tr}} + L_{\text{ra}})R_{\text{NH}} + B_{\text{NC}}(l_{\text{bu}} + l_{\text{lr}} + l_{\text{lm}})R_{\text{NC}} \quad (12)$$

在式(11)中, $x(\text{LSPe})$ 由两部分组成,一是原有的 LSP, 设其长度为 x , 另一是扩展后的 LSP, 设其长度(以跳数为单位)为 y , 如图 5 所示。其中 x' 为采用路由优化机制建立的 LSP 的长度, 则 $x(\text{LSPe}) = x + y$, $x(\text{RO}) = x'$ 。

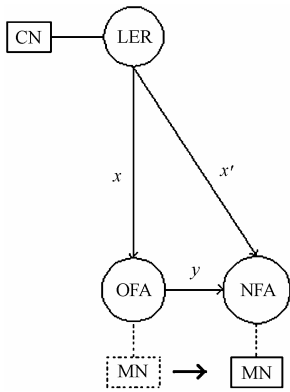


图5 LSP 扩展和路由优化的路径示意图

Fig.5 Paths of LSP extension and route optimization

由于 y 是移动节点在移动过程中扩展的 LSP 的长度, 与 x 和 x' 相比, 它通常短的多(如域内切换), 因此, 我们有 $x \approx x'$ 。利用 x 与 x' 近似相等, 以及 $r_{\text{MF}} = R_{\text{MF}}$, $r_{\text{NH}} = R_{\text{NH}}$, 将式(11), 式(12)代入式(2)并整理, 得:

$$y > \frac{B_{\text{NC}}x}{A\beta + B_{\text{NO}}} \quad (13)$$

其中 $\beta = \frac{E\{L\}E\{C\}E\{T\}}{l_{\text{bu}} + l_{\text{lr}} + l_{\text{lm}}}$, 这里我们假设 L , C , T 相互独立, 因此有 $E\{LCT\} = E\{L\}E\{C\}E\{T\}$ 。

这样, 节点根据扩展的 LSP 的长度, 利用式(13), 便可判定是否中止扩展 LSP, 如果不等式(13)满足, 则中止扩展 LSP, 采用路由优化机制重新建立移动节点和通信对端的 LSP, 否则, 继续进行 LSP 扩展。

4 性能分析

在本节, 我们用数值计算方法对带扩展 LSP 中止策略的 LSP 扩展机制进行性能评估, 并与原 LSP 扩展机制和基于

MPLS 的移动 IP 的路由优化机制进行比较。LSP 扩展机制和路由优化机制的平均总代价分别通过对式(11)和式(12)求均值得到。

为方便数值计算, 我们假设: (1) 移动节点在一次会话过程中进行了 N 次切换, 并且每次切换都使扩展 LSP 的长度(包含的链路总数)增加 1; (2) $B_{\text{MF}} = B_{\text{NH}} = B_{\text{NO}} = B_{\text{NC}} = 2A$; (3) 数据分组长度 L 服从均匀分布, 单位时间发送的分组数 C 和移动节点在一个 FA 的停留时间 T 均服从指数分布。 l_{bu} , l_{lr} , l_{lm} 的长度分别为 42, 115, 123 byte。

图 6 和图 7 分别给出了当 $E\{L\} = 160$ byte, $E\{C\} = 0.5$ 分组/秒, $E\{T\} = 120$ s, $x = 80$ 时 3 种机制在不同切换次数和不同链路代价系数下的总代价。 $n(n=1, 2, \dots, 20)$ 次切换的总代价为前 n 次切换的代价之和。

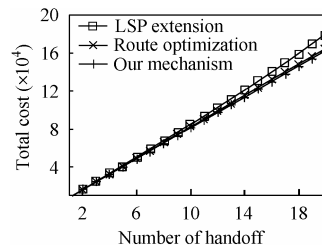


图6 总代价与切换次数的关系
Fig. 6 Total cost vs. number of handoff

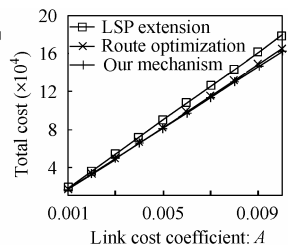


图7 总代价与平均链路代价系数 A 之间的关系
Fig. 7 Total cost vs. A

由图 6 可知, 在 3 种机制中, 带扩展 LSP 中止的 LSP 扩展机制的总代价是最小的, 同时, 随着切换次数的增加, 带扩展 LSP 中止的 LSP 扩展机制的优势越明显。原因在于切换的次数越多, 根据式(13)中止扩展 LSP 的次数愈多, 相对于原 LSP 扩展和路由优化机制, 总代价的减小越明显。

与图 6 的结果类似, 图 7 表明对不同的平均链路代价系数, 带扩展 LSP 中止的 LSP 扩展机制的总代价总是最小的。

图 8 给出了总代价与移动节点在某小区内收发的平均数据总量之间的关系, 图 8 表明, 对不同的平均数据收发总量, 带扩展 LSP 中止的 LSP 扩展机制的总代价也是最小的。

图 9 给出了单次切换代价(包括切换时传送信令信息的代价和切换后传送用户信息的代价)与切换次数的关系。由图 9 可知, 对每次切换, 带中止策略的 LSP 扩展机制的代价是最小的。而不带中止的 LSP 扩展机制的代价随着切换次数的增加而线性增加。由于我们在计算每次切换代价时采用相同的参数配置, 因此路由优化机制的代价跟切换次数无关。图 9 还清楚表明扩展 LSP 的中止分别发生在第 5, 第 10, 第 15 和第 20 次切换的时候, 相邻两次扩展中止的切换间隔相等, 这是因为性能分析时 $E\{L\}$, $E\{T\}$, x 等参数为定值, 即在每次切换时这些参数取相同的值, 这使得每次切换路由优化机制的代价相同, 而 LSP 扩展机制的代价随切换次数的增加线性增长, 因此, 发生相邻两次扩展中止的切换间隔相等。

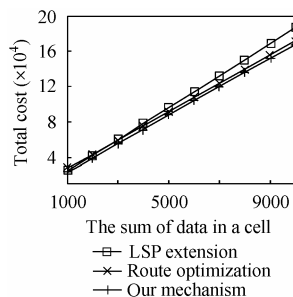


图8 总代价与移动节点在某小区内收发平均数据总量之间的关系

Fig. 8 Total cost vs. sum of data in a cell

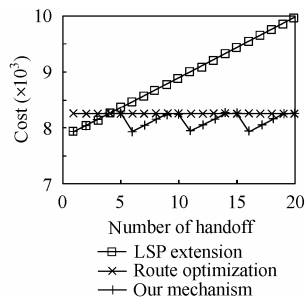


图9 单次切换代价与切换次数的关系

Fig. 9 Each bandoff cost vs. number of bandoff

5 结束语

LSP 扩展机制能有效减小 MPLS 与移动 IP 结合时的信令开销、切换时延和切换丢包,但其扩展的 LSP 可能存在环路。针对该问题,本文给出了 LSP 扩展的环路消除技术,以避免在扩展的 LSP 上出现环路。

LSP 不能无限扩展,因为过度扩展 LSP 不仅不能减小开销,还会增加分组的时延,因此,扩展的 LSP 应该在适当的时候中止。针对该问题,本文定义了中止扩展 LSP 的准则,讨论了如何利用该准则中止扩展 LSP。结果表明,根据该准则中止扩展 LSP 能减小 LSP 扩展机制的开销。

进一步的研究工作是分析带扩展 LSP 中止的 LSP 扩展机制的切换时延、切换丢包性能。

参 考 文 献

- [1] Perkins C. IP mobility support. IETF RFC 3344, 2002.
- [2] Gustafsson E, Jonsson A, Perkins C. Mobile IPv4 regional registration. IETF INTERNET DRAFT draft-ietf-mobileip-regtun-03.txt, 2003.
- [3] Perkins C, Johnson D B. Route optimization in mobile IP. IETF INTERNET DRAFT draft-ietf-mobileip-optim-09.txt, 2000.
- [4] Rosen E, Viswanathan A, Callon R. Multiprotocol label switching

architecture, IETF RFC3031, 2001.

- [5] Zhong R, Tham C. K, Foo C K, Ko C C. Integration of mobile IP and multi-protocol label switching. In Proc. IEEE ICC' 2001, Helsinki, Finland, 2001, vol.7: 2123–2127.
- [6] Yang T, Makrakis D. Hierarchical mobile MPLS: supporting delay sensitive applications over wireless internet. International Conferences on Info-Tech & Info-Net (ICII 2001), Beijing, China, 2001.
- [7] Xie Q Y, Nguyen H M, Tan P, Seah W K G. Handover supporting QoS in MPLS-based hierarchical mobile IPv6 networks. IEEE 58th Vehicular Technology Conference, Florida, USA, 2003, Vol.5: 3523–3526.
- [8] Choi J K, Lee Y K, Yang S H, *et al.*. Extension of LDP for mobile IP service through the MPLS network. IETF INTERNET DRAFT draft-choi-mobileip-ldpext-01.txt, 2001.
- [9] Kim H, Wong, K-S D, Chen W, Lau C L. Mobility-aware MPLS in IP-based wireless access networks. IEEE Global Telecommunications Conference, Texas, USA, 2001, vol.6: 3444–3448.
- [10] Braden R, Clark D, Shenker S. Integrated services architecture. IETF RFC1633, 1994.
- [11] Blake S, Black D, Carlson M, Davies E, *et al.*. An architecture for differentiated services. IETF RFC2475, 1998.
- [12] ITU Draft Recommendation Y.MIPoMPLS. Mobile IP services over MPLS. 2003.
- [13] Andersson L, Doolan P, Feldman N, *et al.*. LDP Specification. IETF RFC 3036, 2001.

李 云: 男, 1974 年生, 副教授, 博士, 研究方向为无线 Ad hoc 网络 QoS、互联网理论及技术. 已发表论文 40 余篇.

隆克平: 男, 1968 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为宽带通信网理论及技术、光互联网理论及技术. 已发表论文 120 余篇.

陈前斌: 男, 1967 年生, 教授, 博士, 研究方向为个人通信技术.