

移动IPv6路由优化模型的性能分析和适应性策略*

肖文曙^{1,2}, 张玉军¹⁺, 李忠诚¹

¹(中国科学院 计算技术研究所,北京 100080)

²(中国科学院 研究生院,北京 100049)

Performance Analysis and Adaptive Scheme of Route Optimization in Mobile IPv6

XIAO Wen-Shu^{1,2}, ZHANG Yu-Jun¹⁺, LI Zhong-Cheng¹

¹(Institute of Computing Technology, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

²(Graduate University, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-10-62600725, Fax: +86-10-62533449, E-mail: zhmj@ict.ac.cn

Xiao WS, Zhang YJ, Li ZC. Performance analysis and adaptive scheme of route optimization in mobile IPv6. *Journal of Software*, 2007,18(10):2564–2571. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/2564.htm>

Abstract: In mobile IPv6, a route optimization (RO) protocol is proposed to solve the triangle routing (TR) problem, which allows packets to be routed along an “optimal” path. However, RO introduces additional control messages which may cause high signaling costs, and thus RO is not always optimal. The main idea of this paper is to make a performance comparison between TR and RO under diverse network conditions, and find a more effective routing scheme. Several key parameters are introduced into the mathematical analysis such as the packet arrival rate, the mobility rate and the distance, and the total cost function is founded to capture the trade off between network resources consumed by signaling and data routing. Based on the analysis, a new scheme (packet-to-mobility route optimization, PMRRO) is proposed to minimize the total cost. In PMRRO, the route between the MN (mobile node) and the CN (correspondent node) is chosen adaptively according to the value of key parameters such as PMR (packet-to-mobility). Simulation results indicate that the PMRRO scheme has better performance than RO or TR, and it is useful to improve the efficiency of mobility management.

Key words: MIPv6; route optimization; cost; PMR (packet-to-mobility)

摘要: 移动IPv6中为解决三角路由(triangle routing,简称TR)问题,采用路由优化(route optimization,简称RO)作为缺省方案.但是,路由优化在减小路由开销的同时引入了新的信令开销,因此,并非在任何情况下路由优化都优于三角路由.目的是对比在不同网络条件下路由优化和三角路由的开销,提出更有效的适应性路由优化策略.采用数学模型进行分析,引入数据到达率、移动切换率及MN(mobile node)和HA(hone Agent),CN(correspondent node)的位置关系等关键参数,得到分别采用RO和TR的总开销的表达式;引入数据到达率和移动率比值(packet-to-mobility,简称PMR)、节点间距离的关系来权衡数据和信令开销,得到总开销随相关参数变化的数值结果;基于这些分析提出了PMRRO(packet-to-mobility route optimization)适应性路由优化策略:以总开销的最小化为目标,以PMR阈值作为指标,通过适应性调整来决策MN和CN之间的路由选择.模拟验证表明,该策略有比单纯采用TR和RO更好的性能,

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.90604014 (国家自然科学基金)

Received 2006-04-18; Accepted 2006-08-17

是为移动管理减少开销、提高效率提出的可行方案。

关键词: MIPv6;路由优化;开销;PMR

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

移动IPv6(MIPv6)^[1]使得IPv6网络中的终端在不同位置接入网络时,保持正在进行的连接不间断。移动节点(mobile node,简称MN)发生切换时,完成家乡注册后,它和通信节点(correspondent node,简称CN)通过移动节点的家乡代理(home Agent,简称HA)进行通信,称为三角路由。三角路由方式增加了路由的开销,同时,家乡代理成为传输性能瓶颈。路由优化是为了解决三角路由问题提出的方案。移动节点通过向通信节点注册(称为一般注册)其当前位置,使得MN和CN之间的通信按网络提供的最佳路由方式进行。但是,路由优化的方案并不是在任何情况下都要优于三角路由。路由优化需要增加向通信节点进行的一般注册的绑定更新(binding update,简称BU)及绑定确认消息(binding acknowledgement,简称BA)的开销,同时,它的操作是在家乡注册之后进行的,必然加大移动切换的延迟,增加数据包丢失率。移动IPv6中规定,路由优化中在一般注册过程之前还必须进行MN和CN之间的认证协商(称为RR(return routability)过程),这无疑更加大了开销。因此,移动IPv6下采用三角路由还是路由优化应通过比较两者在具体条件下的性能来选择。本文通过建模分析两者所花费的网络开销,提出以开销作为最优化目标,分析数据到达率、移动率及节点相对位置等参数对开销的影响,提出了适应性策略PMRRO(packet-to-mobility route optimization)。

文章第1节介绍基本概念和相关的研究。第2节建模分析相关参数对路由优化和三角路由两种方案的总的开销的影响。第3节阐述适应性策略PMRRO。第4节进行总结。

1 研究背景

在IP网络中,IP地址不仅用于网络层路由,同时也是上层传输协议辨认节点的标识的一部分。如果节点移动发生IP地址改变,将导致上层连接中断。移动IP被设计用来解决这个问题。每个移动节点维护两个地址,移动节点的转交地址(care-of address,简称CoA)随着节点所在接入网而变动,用于路由;移动节点的家乡地址(home address,简称HoA)用于上层协议标识该节点。在移动IPv6中,发生切换改变位置并配置新的CoA地址后,首先进行家乡注册。即在HA上将CoA与HoA进行绑定。此后,CN和MN之间就可以采用三角路由进行通信。通信需要通过HA,这增大了传输开销和延迟,并增大了HA的负载。在移动IPv6中,采用了路由优化的方法,MN通过向CN注册其当前所在的位置,使得CN和MN之间的通信可以按照最佳路由方式进行。路由优化的过程如图1所示。

路由优化在试图减少数据传输开销的同时,引入了新的信令开销。如图1所示,在家乡注册完成后,在一般注册之前,CN必须验证移动节点的身份。MIPv6标准中采用RR过程来实现,过程包括home-address test,即MN发向HA并由HA转发到CN的HOTI,CN经HA返回MN的HOT;care-of-address test,即MN直接向CN发送COTI,CN回复COT。RR过程完成后,MN向CN进行注册,包括MN向CN发送的绑定更新消息BU和CN发回的绑定确认BA,这些都是路由优化需要增加的开销。因此,路由优化相比三角路由增加的信令开销与减少的数据传输开销之间存在权衡的问题。在某些条件下路由优化更优,但在某些条件下则相反。移动率和数据到达率是影响开销的重要因素,MN和HA,CN之间距离的关系也是重要的因素。在下文性能分析中我们将详细阐述这些因素的作用。

已有的移动IP和移动IPv6的研究主要集中在移动切换的性能、家乡位置登记的开销等方面,对于路由优化的问题研究较少,一般采用标准中建议的方式。移动IP缺省使用三角路由方式,而移动IPv6缺省使用路由优化方式。

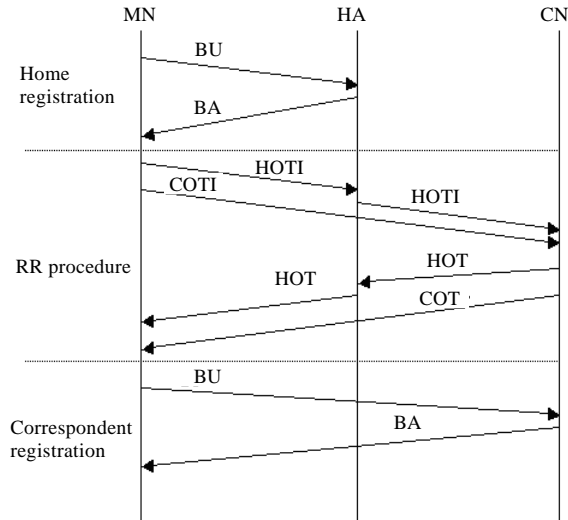


Fig.1 MIPv6 route optimization process

图1 MIPv6路由优化过程

针对标准中的路由优化方案与三角路由的优劣问题,文献[2]从延迟和丢包的角度,以丢包引起的TCP性能恶化为度量进行了分析.该文通过实验认为,当MN和HA的距离小于MN和CN之间的距离时,三角路由方式有更小的丢包,从而有更优的TCP性能.文中通过TCP性能作为判断IP层性能的标准存在一定的片面性.文献[3]提出了一种在移动IP中的新的路由优化策略.因为移动IP中外地代理(FA)的存在,当移动切换时,可以通过新的FA向旧的FA发送绑定信息,数据包通过原路径到达旧的FA后,再通过新旧FA之间的路径发给新FA.作者的策略是在这条次优的路由和MN与CN之间的直接路由中进行选择.在移动IPv6中不存在FA,因此这种方案不能应用到MIPv6的路由优化之上.文献[4]以切换延时作为性能度量,比较了MIP使用三角路由和MIPv6使用路由优化的情况,作者分析得出MIP的TR和MIPv6的RO性能比值与MN-CN距离和MN-HA距离比值的关系.性能分析中,该文假设IP网络分成完全相等的若干正方形,CN和HA固定不动,MN处于某一正方形 a 内,每次切换以 $1/4$ 的概率改变为与到 a 相邻的4个正方形中的任意一个.这种位置模型的约束过于严格,并且文中仅进行分析而并没有提出自己的策略.文献[5-7]讨论了层次化移动IPv6中的路由优化问题.在层次化移动IPv6中,由于使用了区域代理MAP(mobility anchor point),路由优化的路径为MN-MAP-CN,并非真正的最佳路由.这些研究提出各自的策略来提高性能,如文献[5]通过环境参数决定采用HMIPv6还是基本MIPv6管理策略,该文提出的策略实现两者之间的动态选择,但没有将实现选择引入的开销计算在内,并且这些策略不是针对基本移动IPv6中的路由优化展开的,并不适用于MIPv6.

可见,在已有的研究中,学者们从不同的角度比较了路由优化方案和三角路由方案的优劣,但是,这些工作要么是通过实验来得到直观的结论,缺乏理论的分析 and 证明;要么采用的分析模型约束过于严格,不符合实际情况,并且是仅作分析而并没有提出自己的路由优化策略;要么是对MIP,层次化MIPv6进行,对MIPv6缺乏针对性的研究.

2 性能模型分析

在这一节中,通过建立数学模型来分析路由优化和三角路由的性能.将两者对网络带来的开销作为优化目标,开销主要是传输消息带来的网络负载.传输消息(无论是信令消息如BU,还是数据消息)引起的网络开销可以有不同的衡量方法.可以将这些开销用处理消息所需的延迟来衡量^[8],如路径传送开销用链路延迟(每跳的延迟)乘以路径长度(跳数)来表示.在本文中既考虑传输消息的距离的延时,同时也考虑消息负载对网络带宽的占用,参照文献[9],将传输消息的开销用传输的消息数量与传输的距离(跳数)乘积来表示.

MN 上的流量状态及其本身的运动状态是决定其所引起的网络开销的重要因素.如同 PC 网络中将 CMR (call-to-mobility)作为衡量指标的常用方式,很多 IP 网络移动管理的研究者引入类似的分析.在我们的移动环境中,用 PMR 代表数据包到达率和移动率的比值作为关键指标.直观地,PMR 小时,移动率相对数据包到达率要大,绑定更新的费用占主导,此时,降低绑定更新的费用更为重要;PMR 大时,数据包到达率相对移动率要大,数据传输开销占主导,此时,降低数据传输的开销更为重要.所以,当 PMR 小时,适宜采用三角路由方式,消除一般注册的绑定更新;而当 PMR 大时,适宜采用路由优化的方式,使数据传输的路径缩短,并消除 HA 对数据包的处理,减少数据传输的开销.

MN 与 HA,CN 相对距离也是影响开销的因素.当 MN 在家乡网络附近,或通信节点在 MN 家乡网络附近,或者 HA 刚好是 MN 与 CN 之间的最佳路由中的一跳时,路由优化传输的开销并不会比三角路由显著减少.

如图 2 所示,CN₁和MN₁之间采用路由优化开销比三角路由有较大减小,但是对于CN₁和MN₂,CN₂与MN₁以及CN₁与MN₃则并非如此.图示两点间的长度并非是节点的物理距离,代表两个网络节点间的路由距离,一般用跳数来衡量.

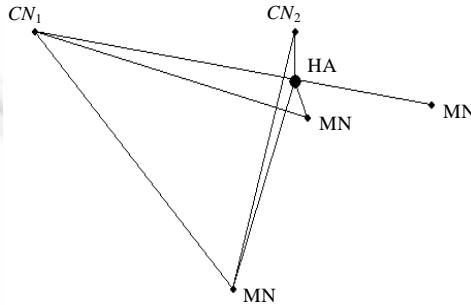


Fig.2 The triangle among MN,HA,CN
图 2 MN 与 HA,CN 之间的三角关系图

下面进行建模分析.对于家乡注册,无论是采用三角路由还是路由优化都需要进行,即家乡注册的开销对于两者是相同的,因此,分析模型中不将家乡注册开销计算在内.

表 1 列出分析模型中需要用到的参数.

Table 1 Parameter list
表 1 参数列表

λ	Average mobility rate, viz. the number of handover per unit time
μ	Average packet arrival rate
C_{RR}	The cost of RR procedure
C_{CU}	The cost of correspondent registration
C_{RO}	The total signaling and data transmitting costs per unit time under RO
C_{TR}	The total signaling and data transmitting costs per unit time under TR
P_{x-y}	The cost of transmitting a signaling packet (BU,BA,HOTI,...) between nodes x and y
C_{x-y}	The cost of transmitting a data packet
L_s	The mean length of a signaling packet (BU,BA,HOTI,...)
L_p	The mean length of a data packet
D_{x-y}	The distance between nodes x and y, weighed by hop

对于路由优化,单位时间内数据包传输的开销为 μC_{CN-MN} .单位时间内向该通信节点进行位置更新(包括RR过程和一般注册)的开销为 $\lambda(C_{RR}+C_{CU})$,其中对于RR过程,包括COTI从MN到CN,COT从CN到MN直接传输的开销,HOTI从MN到HA再到CN和HOT由CN到HA再到MN的传输的开销;对于一般注册,包括BU,BUAK信令的传输开销.采用路由优化策略下,单位时间内信令和数据传输引起的网络开销,可以表示为

$$C_{RO}=\lambda(C_{RR}+C_{CU})+\mu C_{CN-MN}=\lambda(2P_{MN-CN}+2P_{MN-HA}+P_{HA-CN}+2P_{MN-CN})+\mu C_{CN-MN} \quad (1)$$

对于三角路由,单位时间内一般注册的开销为 0,单位时间内数据包传输的开销为 $\mu(C_{CN-HA}+C_{HA-MN})$.所以

在采用三角路由策略下,单位时间内信令和数据传输引起的网络开销为

$$C_{TR} = \mu(C_{CN-HA} + C_{HA-MN}) \tag{2}$$

链路上一个包(包括数据包也包括信令包)在两点间传输开销可表示为与两点间的距离与消息长度的乘积,单位为bytes*hops.即 $C_{x-y} = L_p D_{x-y}; P_{x-y} = L_s D_{x-y}$.所以,

$$C_{RO} = \lambda[4L_s D_{MN-CN} + 2L_s(D_{MN-HA} + D_{MN-CN})] + \mu[L_p D_{MN-CN}] \tag{3}$$

$$C_{TR} = \mu L_p (D_{HA-CN} + D_{MN-HA}) \tag{4}$$

易得

$$\frac{C_{TR}}{C_{RO}} = \frac{\mu L_p [(D_{HA-CN} + D_{MN-HA})]}{\lambda L_s [4D_{MN-CN} + 2(D_{MN-HA} + D_{HA-CN})] + \mu L_p D_{MN-CN}} \tag{5}$$

对于数据包的长度,文献[10]取 200bytes.BU,BA,HOT,HOTI,COT,COTI的长度约 100bytes(IPv6 header 40bytes+routing header 24bytes+mobility header 12bytes+the others≈100bytes).因此我们得到 $L_p/L_s=2:1$;取 3 组 $D_{CN-HA}, D_{MN-HA}, D_{MN-CN}$,值:6,5,3;10,10,15;5,5,10;得到 C_{TR}/C_{RO} 随 μ/λ 变化的关系如图 3 所示.

对于 $D_{CN-HA}, D_{MN-HA}, D_{MN-CN}$ 的第 1 组和第 3 组取值,当 μ/λ 小于一定值时, $C_{TR}/C_{RO} < 1$, C_{TR} 优于 C_{RO} ;在 μ/λ 大于一定值时则相反.这首先表明TR与RO方式的优劣是随环境参数变化而不同的. μ/λ 增大,代表数据到达率相对移动率增大,数据包路由的开销相对移动切换引起的信令开销占主导,此时, C_{TR} 相对 C_{RO} 需要更多的开销,因此, C_{TR}/C_{RO} 也增大, C_{RO} 相比 C_{TR} 的优势越来越明显.之所以第 1 组取值下增长很快,是因为此时MN和CN的距离(3 跳)远小于MN到HA和HA到CN的距离之和(11 跳),此时采用RO路由节省的开销十分显著.而之所以第 3 组取值情况下 C_{TR}/C_{RO} 始终小于 1,是因为 $D_{MN-HA} + D_{CN-HA}$ 与 D_{MN-CN} 相等,即两者数据的传输开销基本相等,而 C_{RO} 还需额外的信令开销,所以 C_{TR} 始终优于 C_{RO} .

MN与HA,CN三者位置关系多变,但是MN,CN,HA三者间的路由距离满足三角形边约束,即两边之和大于第 3 边.所以,MN和CN之间的距离不大于MN和HA距离与HA和CN距离之和.这个约束合理地表达了三角路由的涵义.图 4 是 C_{TR}/C_{RO} 随 $(D_{MN-HA} + D_{CN-HA})/D_{MN-CN}$ 变化的图示.图中横坐标为MN-HA-CN的距离与MN-CN的距离的比值,显然,这个比值大于 1,图中显示了该比值大于 1 小于 2 的情况.实际上,该比值可以取得大于 2 的值,没有在图中表示出来,但我们可以看到变化的趋势. μ, λ 取 3 组值:10,10;5,1;40,2.

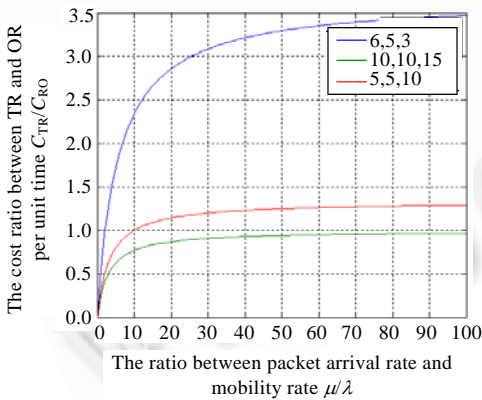


Fig.3 Effect of the μ/λ for C_{TR}/C_{RO}

图 3 C_{TR}/C_{RO} 与 μ/λ 的关系

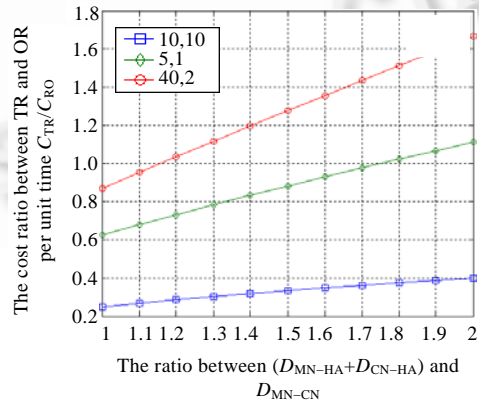


Fig.4 Effect of the $(D_{MN-HA} + D_{CN-HA})/D_{MN-CN}$ for C_{TR}/C_{RO}

图 4 C_{TR}/C_{RO} 与 $(D_{MN-HA} + D_{CN-HA})/D_{MN-CN}$ 的关系

由图 4 可见,对于 μ, λ 的第 2 组和第 3 组取值, $(D_{MN-HA} + D_{CN-HA})/D_{MN-CN}$ 小于某值时 $C_{TR}/C_{RO} < 1$, C_{TR} 优于 C_{RO} ,这是由于当 $(D_{MN-HA} + D_{CN-HA})/D_{MN-CN}$ 越小(趋于 1), $D_{MN-HA} + D_{CN-HA}$ 趋向于与 D_{MN-CN} 相等,即两者数据的传输开销趋向于相等,而 C_{RO} 还需额外的信令开销;当 $(D_{MN-HA} + D_{CN-HA})/D_{MN-CN}$ 大于某值时 $C_{TR}/C_{RO} > 1$, C_{RO} 优于 C_{TR} ,这是由于当 $(D_{MN-HA} + D_{CN-HA})/D_{MN-CN}$ 越大,采用路由优化的传输开销优势就越来越明显.对于第 1 组取值,之所以

一直是 $C_{TR}/C_{RO} < 1$, 是因为此时数据到达率相对较小, 而移动切换率相对较大, 在这种情况下, 节省的数据包路由开销不足以抵消移动切换引起的信令开销。

3 PMRRO 策略

通过前面的模型分析, 可以看到采用不同策略的开销在不同条件下的情况. 当 $C_{RO} > C_{TR}$ 时, 采用路由优化方式更优, 如果 $C_{RO} < C_{TR}$, 则不如采用三角路由方式. 我们提出的 PMRRO 适应性策略是以最小化总开销为目标, 根据 MN 和 CN 所处的位置关系, 通过寻找关键指标 PMR 的阈值 ϕ 作为该 MN 和该 CN 之间三角路由与 RO 选择的基础. 令 $C_{RO} = C_{TR}$, 代入式 (5), 得到 μ/λ 的表示, 即为阈值 ϕ .

$$\phi = \frac{[4D_{MN-CN} + 2(D_{MN-HA} + D_{HA-CN})]}{2(D_{HA-CN} + D_{MN-HA} - D_{MN-CN})} \quad (6)$$

通过 IP 包头中的 time-to-live (TTL) 字段获得数据包传输的跳数. MN 可以自己获得 $D_{MN-HA}, D_{MN-CN}, D_{CN-HA}$ 由 HA 反映给 MN (TTL 通常被设为 32, 因此, D 的范围可以认为是 $[0, 32]^{[11]}$), 从而可以计算出 ϕ 值. 当 $\mu/\lambda > \phi$ 时, 数据传输的开销占主导, 此时, 将选择路由优化, 反之选择三角路由.

策略主要进行如下操作:

(1) 当 MN 和某 CN 通信初始时, 选择缺省的路由优化方式进行, 设置两个存储值 M 和 S_{sum} , M 为累计的移动次数, S_{sum} 为累计的从 CN 到 MN 的数据包到达数, 初始时, $M=0, S_{sum}=0$;

(2) 在每次移动切换时将计数值 M 加 1 并进行流量统计, 统计在切换前的子网 i 范围内移动时在 T_i 从 CN 到 MN 的数据到达数, 记为 S_i , 并累计到 $S_{sum} = S_{sum} + S_i$;

(3) 计算 $\mu/\lambda = (S_{sum}/T_{sum}) / (M/T_{sum}) = S_{sum}/M$, 通过 TTL 字段获得 $D_{CN-HA}, D_{MN-HA}, D_{MN-CN}$, 计算

$$\phi = [4D_{MN-CN} + 2(D_{MN-HA} + D_{CN-HA})] / [2(D_{CN-HA} + D_{MN-HA} - D_{MN-CN})];$$

(4) 比较 μ/λ 与 ϕ . $\mu/\lambda \geq \phi$, MN 和 CN 之间将选择路由优化; $\mu/\lambda < \phi$ 选择三角路由, 如果选择的是三角路由方式, MN 向 CN 发送 BU_o , CN 向 MN 发回确认, 以取消 CN 上对 CoA 的绑定.

对于 PMRRO 方式, 开销可以表示为

$$C_{PMRRO} = P_{TR} C_{TR} + P_{RO} C_{RO} + P_{TR} \lambda C_{CU} \quad (7)$$

P_{TR} 表示选择三角路由方式的概率, 即 $\mu/\lambda < \phi$ 的概率, P_{RO} 表示选择路由优化方式的概率, 即 $\mu/\lambda \geq \phi$ 的概率. 表达式最后一部分表示的是: 如果选择的是三角路由方式, MN 需要向 CN 发送一个 BU_o 以及 CN 回复确认, 以通知 CN 向 HA 发送数据, 其 lifetime 为 0, care-of address 设置为家乡地址.

因为在每次节点移动切换前后, MN 和 CN 以及 HA 间的相对距离变化不大, μ/λ 计算的是累计数据包达到数与累计切换数的比值, 因此, ϕ 与 μ/λ 值相对都比较稳定, 所以 TR 和 RO 之间的切换不会非常频繁. 并且因为原本的 MIPv6 协议中, 当 MN 试图向 CN 发送 BU 以期望采用路由优化, 而对于不支持 MIPv6 的 CN 会直接忽略 BU, 在这种情况下, MN 将放弃路由优化而采用三角路由与 CN 通信. 可见, TR 和 RO 的选择在标准协议中就存在, 我们的策略不会给网络带来新的安全隐患.

通过模拟 M 个 MN 进行 N 次切换来观察 PMRRO 策略和 TR 及 RO 的比较. 为减小复杂度, 考虑 MN 和同一个 CN 通信的情况. 两次切换间隔内 PMR 不变, 切换时 PMR 发生改变. 通过公式 (6) 计算得到 PMR 的阈值 ϕ . 将 MN_i (i 取值为 1 到 M 的正整数) 在其运动过程中的 N 个 PMR 重新排序, 序列标记为

$$\phi^i = (\phi_1^i, \phi_2^i, \dots, \phi_{s(i)}^i, \phi_{s(i)+1}^i, \phi_{s(i)+2}^i, \dots, \phi_N^i).$$

该序列元素满足: $i \leq s(i)$ 时, $\phi_j < \phi$; $s(i) < j < N$ 时, $\phi_j > \phi$.

计算每个 MN 在 N 次运动中分别采用 TR 方案、RO 方案以及 PMRRO 方案的开销:

$S_{TR}^i, S_{RO}^i, S_{PMRRO}^i$ 分别表示 MN_i 在整个运动中的开销. t_j^i 表示 MN_i 在子网 j 的驻留时间.

$$S_{TR}^i = \sum_{j=1}^N t_j^i C_{TR}^i(j) = \sum_{j=1}^N \phi_j^i [L_p (D_{HA-CN} + D_{MN-HA})] \quad (8)$$

$$S_{RO}^i = \sum_{j=1}^N t_j^i C_{RO}^i(j) = \sum_{j=1}^N \{ [4L_s D_{MN-CN} + 2L_s (D_{MN-HA} + D_{HA-CN})] + \phi_j^i [L_p D_{MN-CN}] \} \tag{9}$$

$$S_{PMRRO}^i = \sum_{j=1}^{s(i)} [t_j^i C_{TR}^i(j) + C_{CU}] + \sum_{j=s(i)+1}^N t_j^i C_{RO}^i(j) \tag{10}$$

式(10)展开同样可以消去 t_j^i 因子,呈现为 ϕ 的表达式,由于式子较长,这里不再列出.

从上面 3 个式子可以看到,若不考虑 BU_o 及其确认消息的开销,则

$$S_{PMRRO}^i - S_{TR}^i = \sum_{j=s(i)+1}^N [C_{RO}^i(j) - C_{TR}^i(j)] < 0, \text{ 因为对于 } s(i) < j < N \text{ 的情况, } C_{RO}^i(j) < C_{TR}^i(j) \tag{11}$$

$$S_{PMRRO}^i - S_{RO}^i = \sum_{j=1}^{s(i)} [t_j^i C_{TR}^i(j) - C_{RO}^i(j)] < 0, \text{ 因为对于 } 1 < j < s(i) \text{ 的情况, } C_{TR}^i(j) < C_{RO}^i(j) \tag{12}$$

所以,在不考虑 BU_o 及其确认消息的情况下,PMRRO 必定优于 RO 或 TR. 由于引入了新开销, C_{PMRRO} 不一定最优,但由于引入的开销小, C_{PMRRO} 在大多数情况下最优. 通过随机采样 μ, λ 值进行验证, M 取 10, $L_p/L_s=2:1, D_{CN-HA}, D_{MN-HA}, D_{MN-CN}$ 取 10 组满足三角关系的值,例如 6,5,3;10,10,15;5,5,10. 得到 10 组 PMR 序列 $\phi^1, \phi^2, \dots, \phi^{10}$, 相应的 $MN_1, MN_2, \dots, MN_{10}$ 分别采用 TR 方案、RO 方案以及 PMRRO 方案的开销,得到如图 5 所示的结果. 可以看到,在某些 MN 的运动中,RO 的开销小于 TR,某些则相反. x 轴的 4 处交点表示某 MN 的运动过程中,由于各种因素的综合作用,采用 TR 和采用 RO 带来的开销相近. 在这种情况下,使用 PMRRO 策略自然也和该开销值相近. RO 优于 TR 的比例大于 TR 优于 RO 的比例,这也是移动 IPv6 采用 RO 的原因. 而在绝大多数情况下,我们所使用的策略 PMRRO 优于 TR 和 RO. 之所以存在很少的场合 PMRRO 不是最优,是因为 PMRRO 在为均衡数据传输开销和信令开销做出贡献的同时也引入了少量的额外开销 (BU_o 及其确认消息). 但总的情况表明, PMRRO 与 RO 和 TR 相比,减少了网络开销,具有优势.

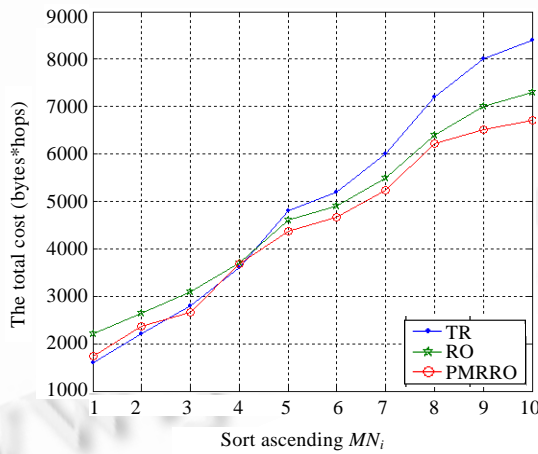


Fig.5 The cost comparisons among TR,RO,PMRRO

图 5 TR,RO,PMRRO 方案开销比较

4 总 结

路由优化方案是移动管理中为减少网络开销,提高性能提出的重要方案. 本文指出路由优化方式并非在任何条件下都作到了“优化”. 这是因为路由优化在试图减少数据传输开销的同时增大了信令开销. 移动节点的数据到达率、移动切换率、移动节点和家乡代理、通信节点之间的距离关系等都是影响两者开销的重要因素. 本文通过建模分析,得到三角路由和路由优化方案开销的表达式、与两者开销的比值随移动节点数据到达率与移动切换率比值变化的关系图,以及开销的比值随节点间距离关系变化的关系图. 本文还提出了适应性的路由

优化策略 PMRRO,根据 MN 所处的相对 HA,CN 的位置,通过 PMR 阈值来进行路由优化决策,并分析比较了 PMRRO 相对单纯采用三角路由或路由优化的优势.

References:

- [1] Johnson D, Perkins C, Arkko J. Mobility support in IPv6. RFC3775, 2004.
- [2] Pramil AD, Antoine S, Aghvami AH. TCP performance enhancement over mobile IPv6: Innovative fragmentation avoidance and adaptive routing techniques. IEE Proc. on Communications, 2004,151(4):337-346.
- [3] Lee YJ, Akyildiz IF. A new scheme for reducing link and signaling costs in mobile IP. IEEE Trans. on Computers, 2003,52A(6): 706-712.
- [4] Galli S, Morera R, McAuley A. An analytical approach to the performance evaluation of mobility protocols: The handoff delay case. In: Proc. of the Vehicular Technology Conf. Milan: IEEE Communications Society, 2004. 2389-2393. <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/9530/30273/01390703.pdf>
- [5] Hwang SH, Lee BK, Han YH, Hwang CS. An adaptive hierarchical mobile IPv6 with route optimization. In: Proc. of the Vehicular Technology Conf. 2003. 1502-1506. <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/8574/27150/01207071.pdf>
- [6] Pack SH, Kwon TY, Choi YH. Adaptive local route optimization in hierarchical mobile IPv6 networks. In: Proc. of the Wireless Communications and Networking Conf. New Orleans: IEEE Communications Society, 2005. 1421-1426. <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/9744/30730/01424724.pdf>
- [7] Peng XH, Zhang HK, Zhang SD. Analysis of hierarchical management cost of mobile IPv6 and adaptive optimization. Acta Electronica Sinica, 2004,32(10):1690-1693 (in Chinese with English abstract).
- [8] Ho JSM, Akyildiz IF. Local anchor scheme for reducing signaling costs in personal communications networks. IEEE/ACM Trans. on Networking, 1996,4(5):709-725.
- [9] Lo S, Lee G, Chen W, Liu J. Architecture for mobility and QoS support in All-IP wireless networks. IEEE Journal on Selected Area on Communications (JSAC), 2004,22(4):691-705.
- [10] Lai WK, Chiu JC. Improving handoff performance in wireless overlay networks by switching between two-layer IPv6 and one-layer IPv6 addressing. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005,23(11):2129-2137.
- [11] Stevens WR. TCP/IP Illustrated, Vol. 1. The Protocols. Addison Wesley, 1994.

附中文参考文献:

- [7] 彭雪海,张宏科,张思东.移动 IPv6 分层管理费用的分析与自适应优化.电子学报,2004,32(10):1690-1693.



肖文曙(1980-),女,湖南涟源人,博士,主要研究领域为下一代互联网,无线移动网络安全.



李忠诚(1962-),男,博士,研究员,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为计算机网络,可信计算.



张玉军(1976-),男,博士,副研究员,CCF 高级会员,主要研究领域为下一代互联网,移动计算.