

基于主动过载预防的移动 IPv6 家乡代理负载均衡^{*}

张瀚文^{1,2+}, 张玉军¹, 马超^{1,2}, 李忠诚¹

¹(中国科学院 计算技术研究所 下一代互联网中心,北京 100190)

²(中国科学院 研究生院,北京 100049)

Load Balancing for Home Agents in MIPv6 Based on Active Overload Prevention

ZHANG Han-Wen^{1,2+}, ZHANG Yu-Jun¹, MA Chao^{1,2}, LI Zhong-Cheng¹

¹(Institute of Computing Technology, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

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

+ Corresponding author: E-mail: hwzhang@ict.ac.cn

Zhang HW, Zhang YJ, Ma C, Li ZC. Load balancing for home agents in MIPv6 based on active overload prevention. *Journal of Software*, 2009,20(9):2511–2519. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3361.htm>

Abstract: In order to enhance service availability and improve system performance, it is necessary to configure multiple HAs on the home link and efficiently balance load among these HAs. This paper proposes the Home Agent Load balancing method based on Active Overload Prevention (HALAOP). HALAOP actively selects optimal HA for each registration request to prevent HA's overload in advance, rather than just passively switching load between HAs like previous methods. HALAOP introduces a dynamic load evaluate algorithm to provide the basis for optimal load balancing decision. In addition, the load slicing mechanism is introduced to eliminate unnecessary additional overhead. The results of numeric analysis show that HALAOP can be more efficient in reducing probability of registration failure due to HA's overload and registration delay at lower additional cost than previous methods.

Key words: mobile IPv6; home agent; load balance; load evaluation; service availability

摘要: 在移动 IPv6 网络中,为确保移动节点的可寻址性,提升网络系统的服务可用性和系统性能,有必要在家乡链路部署多 HA,并有效平衡负载.提出了基于主动过载预防的多 HA 负载均衡方法.该方法通过主动地为移动注册请求动态选择最优 HA,预防 HA 过载,而不同于原有方案仅仅基于被动的负载迁移的思路.所提方法引入动态加权负载评估算法,为负载均衡的实施提供最佳决策依据,采用负载切片机制减小信令开销.通过理论分析证明了提出的方法比原有各方法能够更有效地减小由于 HA 过载造成的移动注册失败率、平均注册延时,同时引入的系统开销更小,更显著地提升 MIPv6 网络系统服务的可用性和系统性能.

关键词: 移动 IPv6;家乡代理;负载均衡;负载评估;服务可用性

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

在移动 IPv6(mobile IPv6,简称 MIPv6)^[1]网络中,家乡代理(home agent,简称 HA)是实现移动节点(mobile

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60803139 (国家自然科学基金), the National Sciences & Technology Supporting Program of China under Grant No.2008BAH37B07 (国家科技支撑计划)

Received 2007-09-06; Revised 2008-02-27; Accepted 2008-04-21

node,简称MN)可寻址性的最关键因素,主要承担两方面的功能:为MN维护其家乡地址和转交地址的对应关系;通过隧道方式为MN转发数据包.MIPv6支持“路由优化”方式,CN(correspondent node,简称CN)和MN可以直接通信,不再依赖于HA的转发.即使在这种方式下,HA的支持仍是必不可少的.家乡注册的有效性是路由优化注册过程的基础,没有HA的支持,路由优化的注册信息将不能够进行更新.

家乡链路单一HA部署是MIPv6网络服务能力的瓶颈所在.单一家乡代理的服务能力有限,随着MN数量及其通信强度的增加,大量的移动注册请求和需HA隧道转发的数据包将在HA排队等待,导致移动注册和数据转发延迟增大;当HA服务能力达到饱和甚至处于过载状态时,将无法再接收新到达的请求,造成移动注册失败,使得MN丧失可寻址性.

基于多HA部署提升MIPv6网络服务可用性和系统性的最关键问题在于多HA的负载均衡机制.本文主要研究MIPv6家乡链路多HA负载均衡方法,通过家乡链路多HA间的负载均衡,解决HA性能瓶颈问题,减小由于HA过载造成的移动注册失败率和平均注册延时,从而提升MIPv6网络系统性能和系统服务的可用性.

1 相关工作

目前已有一些研究关注MIPv6网络HA负载均衡,早期的静态方案^[2]难以适应MN状态的动态变化及其通信强度的突发性,更多的研究集中于动态方案,且都基于被动的负载迁移思想.

文献[3,5]基于MIPv6协议定义的动态家乡代理地址发现(dynamical home agent address discovery,简称DHAAD)机制实现多HA负载均衡.此类方案中,过重负载HA将要求其服务的部分MN通过DHAAD过程发现并重注册到当前最优(轻负载)HA,通过迁移过重负载HA所服务的MN实现系统负载平衡.然而,DHAAD机制并未给出最优HA的选择策略.最优HA的选择需基于有效的负载评估机制.另外,DHAAD过程需要MN的参与,使得这类方案对MN不透明.

文献[6,7]引入“virtual HA Reliability Protocol”解决系统负载均衡问题.家乡链路上唯一的活跃HA,执行独占服务(移动注册信息处理等)和常规服务(隧道数据包等),其余HA仅提供常规服务.某HA负载超过“负载阈值”时,被视为过载,迁移部分负载至当前负载最轻的HA.该方案中的负载转移策略基于包计数,以数据包到达率作为负载评估值,没有考虑到不同HA的性能差异.

文献[8]同样基于负载迁移均衡负载.MN的移动注册信息在家乡链路所有HA间同步备份,任意时刻仅一个HA为某MN提供服务,当某HA希望减少负载(由HA转移策略决定)时,迁移部分MN至另一HA(由HA选择策略决定).该方案提出了基于服务时间、基于包计数、基于队列阈值3种HA转移策略,以及随机、轮询、加入最短队列3种HA选择策略.基于服务时间的转移策略具有一定盲目性,只要定时器到期,无论HA是忙还是闲都要请求转移;基于包计数由于没有考虑到不同HA的性能差异,不能对负载分布作出正确判断.对于HA选择策略,随机、轮询方式没有考虑HA当前的负载情况.文献[9,10]基于文献[8]进行扩展,提出了一种双阈值转移策略.

综上,现有HA负载平衡动态方案存在以下一些共性问题:

- 1) 现有方案基于被动的负载迁移,没有通过有效地预防HA过载实现负载均衡.
- 2) 现有方案缺乏有效的HA负载评估机制作为负载均衡的决策依据.
- 3) 现有方案要求各HA的负载信息在全家乡链路内共享,引入了大量信令开销及信息实时同步的问题.
- 4) 现有方案对MN不透明,MN与家乡链路的交互,增大了处理延迟且带来较多的全局信令开销.

2 基于主动过载预防的HA负载均衡方法

本文基于以下设计思路提出了基于主动过载预防的MIPv6 HA负载均衡方法(multiple home agents load balancing method based on active overload prevention,简称HALAOP):

- 1) 基于主动的HA过载预防实现负载均衡,更有效地减小MN移动注册失败率和平均移动注册延时;
- 2) 提出动态加权负载评估算法,动态反映各HA当前的服务能力,为负载均衡机制提供最佳决策依据;

- 3) 单一 HA 映射使得负载均衡机制在家乡链路内部实现,对 MN 透明,仅引入家乡网络本地信令开销;
- 4) 提出负载切片机制解决负载信息更新报告的最佳时机,解决负载信息实时性和系统开销的权衡问题.

2.1 HALAOP系统结构

HALAOP 系统结构上基于 MIPv6 基本协议,仅对家乡链路进行扩展(如图 1 所示).

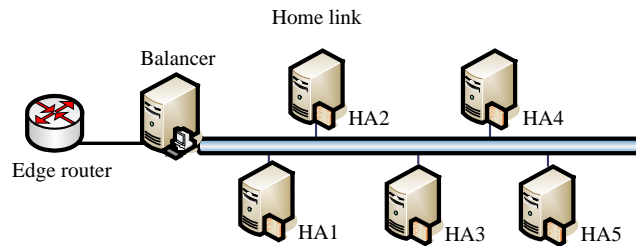


Fig.1 HALAOP architecture

图 1 HALAOP 系统结构

HALAOP 在家乡链路采用功能实体——平衡器(balancer)作为负载均衡的协调者,负责维护链路上各 HA 实时的负载状态,根据各 HA 负载状态动态地为进行移动注册请求的 MN 选择当前最优 HA.

HALAOP 利用平衡器实现家乡链路单一 HA 映像,链路上整个 HA 集群体现为一个单一的地址被用户访问,而具体服务的节点对用户而言是透明的,无须处理延时较大的 HA 发现过程.无论家乡链路部署多少个 HA,MN 上仅需要配置平衡器所拥有的全局地址.移动到外地网络的 MN 发往家乡链路的移动注册请求都以该地址为目的地址.注册请求首先到达平衡器,平衡器根据各 HA 负载状况,为发起请求的 MN 动态选择并将请求转发到当前最优 HA.

为实现最优 HA 的动态选择,平衡器利用家乡代理表(home agent table,简称 HAT)(图 2)维护各 HA 状态信息.表中的 *HA_address*、*HA_lifetime*、*registered_MN* 域分别记录各 HA 的地址、生命期和当前所注册的 MN(以 MN 的家乡地址 *HoA* 标识,*last_registered_time* 反映 MN 最近一次注册更新的时间,判断注册是否过期).*HA_load* 域维护 HA 的负载值,*HA_state* 域记录各 HA 当前状态,HALAOP 采用双阈值(Th_{min} , Th_{max})将 HA 状态划分为空闲、正常、过载 3 种状态.平衡器根据各 HA 的负载信息报告,实时更新 HAT.

HA_Address	HA_Lifetime	HA_Load	HA_State	Registered_MN	
				HoA	Last_Registered_Time

Fig.2 Definition of HAT

图 2 家乡代理表的定义

平衡器仅负责接收负载信息、维护 HAT 表、重定向移动注册请求等工作,不会成为新的系统性能瓶颈,而移动注册请求的处理以及为 MN 转发数据包是由各 HA 分摊的.平衡器作为逻辑实体可以在任意 HA 上实现,通过在某 HA 上备份 HAT 表可避免平衡器成为系统单点故障隐患.

HALAOP 基于以下算法(方法)实现多 HA 负载均衡:HA 动态加权负载评估算法(dynamic weight load evaluation,简称 DWLE),用于 HA 周期性评估自身负载;HA 负载信息更新方法,解决负载信息的报告问题;最优 HA 动态选择算法(best HA dynamic selection,简称 BHADS),用于平衡器为注册请求选择当前最优 HA;过载 HA 负载迁移方法,解决过载 HA 的负载迁移问题.

2.2 HA动态加权负载评估算法(DWLE)

DWLE 以间隔时间 T 周期性地对 HA 负载进行评估,计算能反映不同 HA 性能差异、HA 潜在通信量强度的归一化相对负载值 L_i (式(1)),为负载均衡提供最佳的决策依据.

$$L_i = \begin{cases} 1, & Q_i = m_i \parallel \lambda_i \geq \lambda_{\max-i} \parallel k_i \geq k_{\max-i} \\ w_1 \frac{Q_i}{m_i} + w_2 \frac{\lambda_i}{\lambda_{\max-i}} + w_3 \frac{k_i}{k_{\max-i}}, & \text{others} \end{cases} \quad (1)$$

$Q_i/m_i \in [0, 1]$ 为利用队列长度最大值 m_i 对当前队列长度 Q_i 进行归一化所得到的有效参数值,反映 HA_i 队列当前的饱和程度. $\lambda_i/\lambda_{\max-i} \in [0, 1], k_i/k_{\max-i} \in [0, 1]$ 分别为利用 HA_i 能力允许的最大消息到达率 $\lambda_{\max-i}$ 对最近一个 T 时间内计算获取的 HA_i 消息到达率 λ_i 进行归一化、利用 HA_i 能力允许的最大 MN 个数 $k_{\max-i}$ 对 HA_i 当前所服务 MN 个数进 k_i 行归一化得到的有效参数值,二者均能反映出 HA_i 当前潜在的通信量强度. w_j (其中 $j=1,2,3, \sum_{j=1}^3 w_j = 1$) 为有效参数加权值,通过调节 w_j 值,可以改变各有效参数对 L_i 的影响力度. $m_i, \lambda_{\max-i}, k_{\max-i}$ 作为系统参数,根据各 HA_i 的服务能力设定.当 $Q_i = m_i/\lambda_i \geq \lambda_{\max-i} \parallel k_i \geq k_{\max-i}$ 时,将 HA_i 状态置为“过载”,不再接收移动注册请求.

动态加权负载评估(DWLE)算法.

```

Procedure Dynamic_Weight_Load_Evaluate() // HAi 以间隔时间 T 周期性地计算 Li
{
    if ( Qi = mi/λi ≥ λmax-i || ki ≥ kmax-i )
    {
        state = “过载”; // 将 HAi 的状态设为过载
        Li = 1;
    }
    else 依据公式(1)计算 Li;
    if ( Li ≥ Thmax ) state = “过载”; // 当 Li 大于高阈值时,将 HAi 的状态设为过载
    else if ( Li ≤ Thmin ) state = “空闲”; // 当 Li 小于低阈值时,将 HAi 的状态设为空闲
    else state = “正常”;
    Update_Load_Info_Notify (); // 根据负载信息更新算法决定是否向平衡器更新负载信息
    if (state == “过载”) Load_Switch_Initiato (); // HAi 过载,进行负载迁移
}
    
```

2.3 HA负载信息更新方法

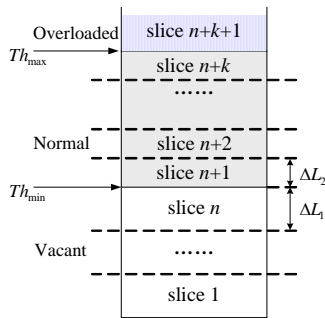


Fig.3 Load slicing scheme
图3 负载切片机制示意图

各 HA 通过 DWLE 算法周期性地对自身负载进行评估,若每次评估后,都向平衡器发送消息更新其负载状况,会带来大量的信令开销,尤其当前后两次评估所得 L_i 值变化很小时,不必要的信令开销造成系统资源的浪费.通过增大负载评估的时间间隔 T 可减少引入的信令开销,但是随着 T 的增大,平衡器所掌握的全局负载信息的实时性也随之降低,难以根据各 HA 当前真实的负载状况,对最优 HA 的选择作出正确判断.

为解决负载信息实时性和引入大量系统开销的权衡问题,HALAOP 中提出了负载切片(load slicing,简称 LS)机制,对是否进行负载信息更新报告进行判决.该机制将 L_i 值进行切片划分,当 L_i 值每跨过某一边界值,进入一个新的切片值时,才需向平衡器报告更新负载状况.LS 设定为不同的粒度,可以调节 HA 向平衡器发送状态报告的频率.不难发现, HA_i 处于过载状态时,无论 L_i 变化与

否,都不会影响到平衡器进行最优 HA 的选择,因此无需向平衡器报告; HA_i 处于空闲状态时, L_i 的变化对平衡器进行最优 HA 选择的影响,比 HA_i 处于正常状态时要小.因此,针对不同的状态,LS 的粒度设置也不同.图 3 为 HALAOP 负载切片机示意图,其中 $\Delta L_1 = Th_{\min}/n, \Delta L_2 = (Th_{\max} - Th_{\min})/k$ (n 和 k 的取值要保证 $\Delta L_1 > \Delta L_2$),通过调

节 n 和 k 值即可调节 HA 向平衡器发送状态报告的频率.

HA_i 通过带 HA 信息选项(home agent information option)的路由器宣告消息(router advertisement,简称 RA)^[1] 向平衡器报告其最新的负载信息.平衡器接收到 HA_i 发送的路由器宣告消息后,对 HAT 进行更新.

2.4 最优HA动态选择算法(BHADS)

HALAOP 利用平衡器实现家乡链路单一 HA 映像,链路上整个 HA 集群体现为单一地址被用户访问,具体服务的节点对用户透明.通过每次移动注册时主动进行最优 HA 选择预防 HA 过载.

最优 HA 动态选择(BHADS)算法.

```

Procedure BestHA_Dynamic_Select (BU) //运行于平衡器,输入 BU 为接收到的绑定更新消息
{
    HoA=BU 中 home address option 中的地址; //获取发送该 BU 消息的 MN 的家乡地址
    bool found=Search_In_HAT (HoA); //在 HAT 中查找是否存在 MN 相关的记录
    if (!found) //未查找到
    {
        Select_Best_HA (); //根据 HAT 记录,选择最低 HA_load 的 HA
        Transmit_BU (); //将 BU 转发到被选 HA
        Update_HAT (); //更新 HAT
    }
    else //查找到 MN 相关记录
    {
        bool timeout=IF_Timeout (); //根据 HAT 中 last_registed_time 判断记录是否过期
        if (timeout) //记录已过期
        {
            Select_Best_HA (); //根据 HAT 记录,选择最低 HA_load 的 HA
            Transmit_BU (); //将 BU 转发到被选 HA
            Update_HAT (); //更新 HAT,删除原项,添加新项
        }
        else //记录未过期
        {
            if (HA_state == “过载”) //当前 HA 已过载
            {
                Select_Best_HA (); //选择最低 HA_load 的 HA 作为新 HA
                Transmit_BU (); //将 BU 转发到新 HA
                Send_BU (); //代 MN 向原 HA 发送生命期为‘0’的 BU 注销绑定
                Update_HAT (); //更新 HAT,删除原项,添加新项
            }
            else Transmit_BU (); //当前 HA 未过载,将 BU 转发到当前 HA
        }
    }
}

```

2.5 过载HA的负载迁移方法

HALAOP 通过每次移动注册时主动进行最优 HA 选择预防 HA 过载,但是由于数据业务的突发性,当 MN 状态和通信量强度变化较大时,HA 过载难以绝对避免,因此,HALAOP 提供主动和被动两种方式实现过载 HA 的负载迁移.

被动方式,即由平衡器发起的负载迁移.如 DWLE 算法所述,当 HA_i 处于过载状态时,其当前所服务 MN 的移动注册请求到达后,平衡器会为该 MN 重新选择当前最优的 HA_j ,同时代 MN 向 HA_i 注销绑定.

主动方式,由过载 HA 主动发起.当 HA_i 通过负载评估,发现自身状态转变为“过载”时,可通过向平衡器发送负载迁移请求(load switch request,简称 LSR)消息,主动发起负载迁移过程;平衡器接收到 SLR 消息后,通过查找

HAT,选择当前最优 HA_j ,通过成功的负载迁移应答(Load switch answer,LSA_Success)消息回复给 HA_i ,若 HAT 表中所有 HA 都已处于“过载”状态,则不进行负载迁移,向 HA_i 回复 $LSA_Failure$; HA_i 选择部分 MN(如当前通信量强度最大的 MN),将其注册信息转移给 HA_j ,并在本地注销; HA_j 替代 HA_i 为新接收的 MN 提供常规的移动代理服务,并向平衡器发送负载迁移报告(load switch notify,简称 LSN)消息,告知被转移的 MN;平衡器根据 LSN 消息更新 HAT.

3 方案分析和评价

移动注册请求失败率和移动注册平均延时分别是衡量 MIPv6 系统服务可用性和系统性能的重要指标.本节通过建模分析,对 HALAOP 方案及原有多 HA 动态负载均衡方案的上述两指标进行量化分析比较,对负载均衡机制引入的系统开销进行分析比较.

3.1 分析模型

尽管原有各种动态方案提出了各自不同的具体策略,其基本思想都是基于被动的负载迁移,如图 4(a)所示.系统运行过程中,家乡链路各 HA 在某时刻(根据具体的 HA 转移策略而定),通过被动地迁移其所服务的部分 MN,使得系统消息到达在各 HA 间重分布,达到动态均衡负载的目的.从 MN 的角度看,MN 在首次接入系统时通过静态配置或 DHAAD 动态发现机制分配给某 HA,其后的每一次移动注册实际都是向其当前 HA 请求的,而不能主动地为每次注册选择当前最优 HA.只有当 MN 被动地检测到其当前 HA 已不可用时,才会通过 DHAAD 过程选择新的 HA.

HALAOP 方案(如图 4(b)所示)基于主动的过载预防,而不仅仅是被动的负载迁移,最大程度提升系统服务可用性和系统性能.掌握实时的全局负载信息的平衡器,主动地为每一注册请求选择当前最优的 HA,预防负载失衡.从 MN 的角度看,它的每一次移动注册都会由当前最优的 HA 执行.

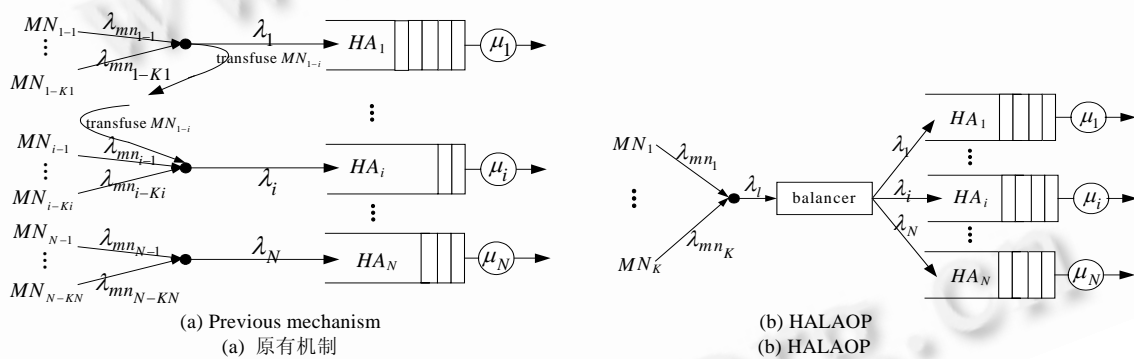


Fig.4 Analysis model
图 4 系统分析模型

家乡链路各 HA 可建模为状态空间有限的 M/D/1/m 排队系统.消息到达服从均值为 λ 的泊松分布.服务时间为常数分布,其服务率为 μ . HA 消息队列的最大长度为 m .采用嵌入式马尔可夫链方法进行分析.令 P_n 为系统中消息个数为 n 的稳态概率, X_n 为各再生点(第 n 个消息被处理完离开系统的时间点)上系统中队列的消息数量, π_n 为各再生点上系统中消息个数为 n 的概率.则 $\{X_n\}$ 是转移矩阵为 P (公式(2))的离散时间马尔可夫链.由平衡方程 $\pi = \pi P$,可以计算出 $\pi = \{\pi_n\}$,根据文献[11]的分析,可以获得 P_n (公式(3)).

$$P = \begin{bmatrix} a_0 & a_1 & a_2 & \dots & a_{m-2} & 1 - \sum_{i=0}^{m-2} a_i \\ a_0 & a_1 & a_2 & \dots & a_{m-2} & 1 - \sum_{i=0}^{m-2} a_i \\ 0 & a_0 & a_1 & \dots & a_{m-3} & 1 - \sum_{i=0}^{m-3} a_i \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_0 & 1 - a_0 \end{bmatrix}, \text{其中 } a_i = \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^i / i! e^{-\lambda/\mu} \quad (2)$$

$$\begin{cases} p_n = \pi_n / (\pi_0 + \rho), & 0 \leq n \leq m-1, \\ p_m = 1 - 1 / (\pi_0 + \rho), \end{cases} \text{其中, } \rho = \lambda / \mu \quad (3)$$

队列平均长度 q , 消息阻塞率 P_B , 消息在队列中的平均处理延迟 T_W 为

$$q = \sum_{i=0}^m i \times p_i, P_B = p_m = 1 - 1 / (\pi_0 + \rho), T_W = q / \lambda (1 - P_B) \quad (4)$$

3.2 移动注册请求失败率

移动注册请求失败率是衡量 MIPv6 系统服务可用性的重要指标. 现有动态方案中, 由于 HA 过载引起的移动注册请求失败率为 $P_{RF-P} = \Pr\{M's \text{ current HA overloaded}\}$. 而在 HALAOP 方案中, 只有当所有 HA 都处于过载状态时, 移动注册请求才会被阻塞, 即 $P_{RF-HALAOP} = \prod_{i=1}^N \Pr\{HA_i \text{ overloaded}\}$ (N 为家乡链路上 HA 个数). 根据系统分析模型, MN 移动注册请求的失败率见公式(5), 其中 $\rho_i = k \cdot \lambda_{MN} / \mu$, k 为 HA_i 当前所服务的 MN 的个数.

$$P_{RF-P} = P_B = 1 - 1 / (\pi_0 + \rho_i), P_{RF-HALAOP} = \prod_{i=1}^N P_{B-i} = \prod_{i=1}^N (1 - 1 / (\pi_0 + \rho_i)) \quad (5)$$

图 5 为原有方案和 HALAOP 方案的注册请求失败率随 HA_i 当前所服务的 MN 个数 $k(k \in [0, 200])$ 及家乡链路 HA 个数 $N(N \in [0, 10])$ 的变化情况. 其中, 各参数取值分别为

$\mu_i = 1000, m_i = 20, \lambda_{MN} = 20, \lambda_i = \sum_{j=1}^k \lambda_{MN_j} = k \cdot \lambda_{MN}$. HA

LAOP 方案和原有方案的移动注册失败率 $P_{RF-HALAOP}, P_{RF-P}$ 都为 k 的单增函数. $P_{RF-HALAOP}$ 始终小于 P_{RF-P} , 因为 HALAOP 中, 移动注册请求都由平衡器根据家乡链路全局的负载状况主动为其进行最优 HA 选择, 只有当所有 HA 都处于过载状态时, 移动注册请求才会失败; 而原有方案由于不能主动地为移动注册请求选择最优 HA, 只要 MN 的当前 HA 过载, 一定会导致其注册失败. 从图 5 还可以观察到, 家乡链路 HA 个数 N 越大, HALAOP 方案避免由于 HA 过载引起移动注册失败的优势越明显.

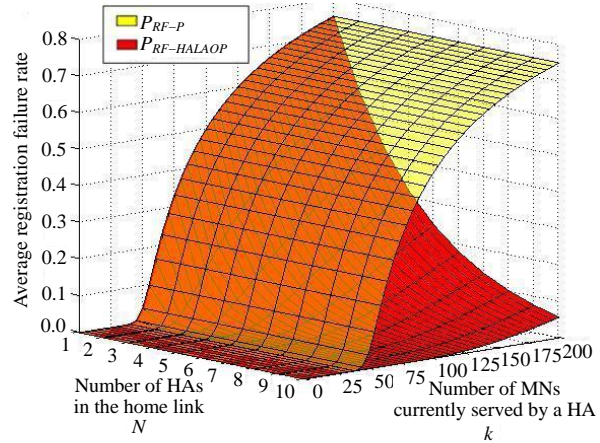


Fig.5 Average registration failure rate

图 5 移动注册请求失败率

3.3 移动注册平均延时

本节分析在考虑 HA 过载造成的移动注册失败的前提下, 一次成功注册的平均延时. MN 由于当前 HA 过载移动注册失败后, 基于指数回退算法经过多次重发移动注册请求超时才能检测到当前 HA 不可用, 通过 DHAAD 机制重新选择可用 HA^[1]. 注册失败到重新选择可用 HA 成功注册的这段时间称为 HA 过载造成的服务中断时间 T_{HALT} . T_{HALT} 由当前 HA 过载失效检测时间 T_{DEC} 、新可用 HA 选择时间 T_{DHAAD} 和移动注册的时间 T_{REG} 组成. 根据移动注册超时的指数退避算法 ($1s \sim 32s$), $T_{DEC} \in [3s, 63s]$. 忽略 DHAAD 消息在节点内部的生成和处理时间, $T_{DHAAD} = 2T_{PATH}$, T_{PATH} 为移动节点当前位置到家乡链路的总传输延时. 移动注册时间 $T_{REG} = T_{PATH} + T_W$ (T_W 见公式(4)). 原有方案中, HA 过载造成 MN 移动注册失败后, 服务中断时间主要由 MN 被动检测 HA 失效的时间决

定,且 $\geq 3s$,该延时远远大于 MIPv6 所期望的最大移动切换注册延迟,影响 MN 上层应用的服务质量(音频业务容忍的最大传输延时为 250ms),甚至造成 MN 当前通信的中断.HALAOP 由于在移动注册时主动选择最优 HA,能够避免由于 HA 过载引起的服务中断.在考虑到由于 HA 过载使得 MN 需选择可用 HA 进行重注册的前提下,原方案和 HALAOP 进行一次成功的移动注册的平均延时分别为

$$T_{RD-P} = T_{HALT} \times P_{RF-P} + T_{REG} \times (1 - P_{RF-P}) = (T_{DEC} + 2T_{PATH}) \times P_B + T_{PATH} + T_W, T_{RD-HALAOP} = T_{PATH} + T_W \quad (6)$$

图 6(a)为 HALAOP 方案和原有方案进行一次成功移动注册的平均延时 $T_{rd-HALAOP}, T_{rd-P}$ 随 HA 服务的 MN 个数 k 和服务率 μ 的变化情况($m_i=30, \lambda_{MN}=20$). $T_{RD-HALAOP}, T_{RD-P}$ 都为 k 的单增, μ 的单减函数,且 $T_{RD-HALAOP}$ 小于 T_{RD-P} . 图 6(b)为 μ 一定(1 000)时, $T_{RD-HALAOP}, T_{RD-P}$ 随 k 的变化情况. $T_{RD-HALAOP}$ 随 k 的变化不大,且始终小于 150ms. 当 $k < 50$, 即 $\rho < 1$ 时, T_{RD-P} 与 $T_{RD-HALAOP}$ 的差异较小,且小于 250ms; 当 $k > 50$ 时,随着 k 的增加, T_{RD-P} 急剧增加,因为当 $\rho > 1$ 时,原有方案 MN 移动注册失败率大,且随 k 的急剧增加而增加,注册失败到选择新 HA 重注册成功的延时较长,因此成功注册的平均延时及其增长率都较大.

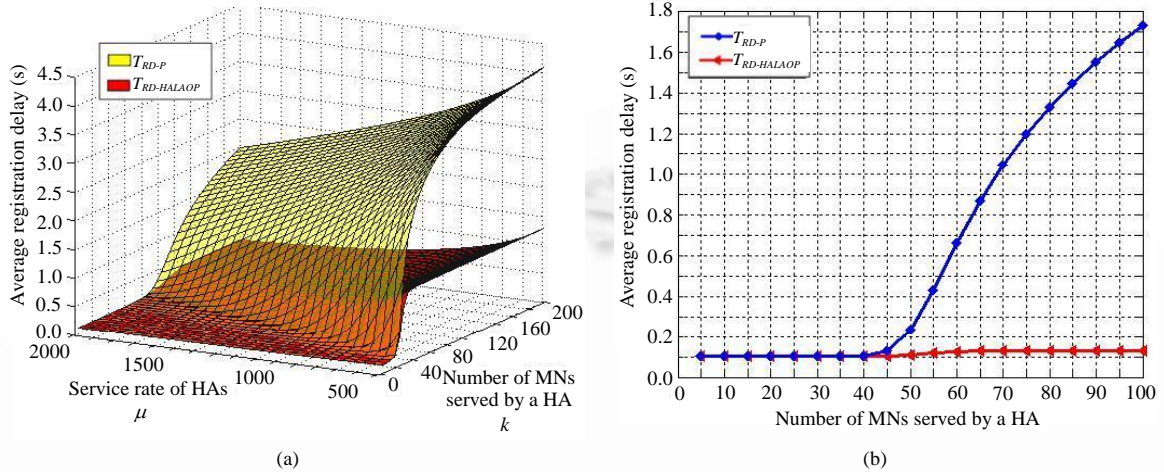


Fig.6 Average registration delay

图 6 成功的移动注册平均延时

3.4 引入的系统开销

原有的 MIPv6 动态 HA 负载均衡方案需要各 HA 的负载信息在全家乡链路内共享并实时更新,引入大量的信令开销,而且各 HA 所获知的全局负载信息难以实时同步.原有方案没有有效平衡负载信息实时性和引入的系统开销.另一方面,原有的方案需要 MN 与家乡链路交互,给整个系统特别是带宽有限的无线信道引入难以忽略的信令开销.例如,原有方案引入的信令开销 C_P 包括 MN 与家乡链路间的信令交互 C_{MN-HL} 及家乡链路内部的开销 C_{HL} (公式(7)).其中, λ_{MN-R} 为一个 MN 的移动注册请求发送率, $(N \times \lambda_{MN-R} \times P_{RF-P})$ 为单位时间内失败的移动注册请求平均个数. n_{RETR} 为移动注册请求失败后的重传次数, $(n_{RETR} \times 1 + 2)$ 即为移动注册失败后进行当前 HA 时效检测并通过 DHAAD 选择新可用 HA 所需的信令数. R_{SWI-P} 单位时间内家乡链路发生的负载迁移次数, n_{SWI-MN}, n_{SWI-HA} 分别为一次负载迁移过程中 MN 与家乡网络交互的信令数和家乡链路内各 HA 间交互的信令数. R_{NOT-P} 为单位时间内一个 HA 向通告其负载状态的消息数.

$$C_P = C_{MN-HL} + C_{HL}, C_{MN-HL} = (N \times \lambda_{MN-R} \times P_{RF-P}) \times (n_{RETR} \times 1 + 2) + R_{SWI-P} \times n_{SWI-MN} \quad (7)$$

$$C_{HL} = K \times R_{NOT-P} + R_{SWI-P} \times (n_{SWI-MN} + n_{SWI-HA})$$

HALAOP 引入的开销 C_{HALAOP} 仅为家乡链路本地信令开销(公式(8)).其中, $R_{NOT-HALAOP}$ 为单位时间内一个 HA 向平衡器通告其载状态的消息数, $R_{SWI-HALAOP}$ 为单位时间内进行负载迁移次数.

$$C_{HALAOP} = K \times R_{NOT-HALAOP} + R_{SWI-HALAOP} \times (3 + n_{SWI-HA}) \quad (8)$$

通过比较式(7)、式(8),明显地, C_P 比 C_{HALAOP} 多出了 MN 和家乡网络间的信令交互 C_{MN-HL} .即使在家乡链路

内部,HALAOP 引入的开销也比原方案少.因为,HALAOP 主动为每一注册请求选择最优 HA,负载迁移只有在 HA 过载难以绝对避免的情况下才会极少发生,因此, $R_{SWI-HALAOP} \ll R_{SWI-P}$;且由于 HALAOP 引入负载切片机制,避免不必要的负载信息报告,使得 $R_{NOT-HALAOP} \ll R_{NOT-P}$.

4 结 论

本文提出了基于主动过载预防的家乡代理负载均衡方法 HALAOP.该方法基于主动过载预防,在平衡器的作用下,通过单一 HA 映像,主动地为移动注册请求动态选择最优 HA,实现对 MN 透明的 HA 过载预防,有效平衡系统负载,大大降低了由于 HA 过载造成的移动注册失败率和平均注册延时,从而提升了系统服务可用性和系统性能.另外,HALAOP 引入了动态加权负载评估算法为负载均衡的实施提供最佳决策依据,采用负载切片机制减小信令开销.通过理论分析和比较,证明了本文所提出方法的有效性.

References:

- [1] Johnson D, Perkins C, Arkko J. Mobility support in IPv6. IETF RFC 3775, 2004.
- [2] Ghosh R, Varghese G. Fault-tolerant mobile IP. Technical Report, WUCS-98-11, Washington: Washington University, 1998.
- [3] Wakikawa R, Devarapalli V, Thubert P. Inter home agents protocol (HAHA). IETF draft-wakikawa-mip6-nemo-haha-00.txt, 2003.
- [4] Deng H, Huang XL, Zhang K, Niu ZS, Ojima M. A hybrid load balance mechanism for distributed home agents in mobile IPv6. In: Proc. of the 14th IEEE Int'l Symp. on Personal, Indoor and Mobile Radio Communication Proceedings (PIMRC). 2003. 2842-2846. http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=1259264
- [5] Deng H, Haley B, Duan XD, Zhang R, Zhang K. Load balance for distributed home agents in Mobile IPv6. IETF draft-deng-mip6-ha-loadbalance-02.txt, 2004.
- [6] Faizan J, Rewini HE, Khalil M. Efficient dynamic load balancing for multiple home agents in mobile IPv6 based networks. In: Proc. of IEEE Int'l Conf. on Pervasive Services (ICPS). 2005. 178-187. <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/login.jsp?url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F10064%2F32279%2F01506409.pdf&authDecision=-203>
- [7] Faizan J, Rewini HE, Khalil M. Introducing reliability and load balancing in mobile IPv6 based networks. Wireless Communications and Mobile Computing, 2006,8(4):483-500.
- [8] Jue JP, Ghosal D. Design and analysis of a replicated server architecture for supporting IP-host mobility. Cluster Computing Special Issue on Mobile Computing, 1998,1(2):249-260.
- [9] Vasilache A, Li J, Kameda H. Load balancing policies for multiple home agents mobile IP networks. In: Proc. of the 2nd IEEE Int'l Conf. on Web Information Systems Engineering (WISE). 2001. 178-185.
- [10] Vasilache A, Li J, Kameda H. Threshold-based load balancing for multiple HAs in mobile IP networks. Telecommunications Systems, 2003,22(1-4):11-31.
- [11] Gross D, Harris CM. Fundamentals of Queueing Theory. 3rd ed., New York: John Wiley & Sons, Inc., 1998.



张瀚文(1981—),女,四川成都人,博士生,主要研究领域为移动网络.



马超(1983—),男,硕士生,主要研究领域为移动互联网.



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网络.



李忠诚(1962—),男,博士,研究员,博士生导师,主要研究领域为计算机网络.