

基于未来负载预测的无线异构网络 自适应负载均衡算法

潘 甦^{1,2}, 张 磊¹, 刘胜美¹

(1. 南京邮电大学通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003;

2. 东南大学移动通信国家重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘 要: 为避免由于网络负载抖动而造成的频繁网络选择, 本文为无线异构网络提出了一种预测网络未来负载的自适应负载均衡算法。通过马尔可夫链预测负载状态空间的概率, 将预测到的概率通过负载趋势函数映射为趋势值, 利用趋势值进行网络选择和自适应触发门限的调整。仿真结果表明, 该算法能有效降低接入阻塞率及均衡切换次数。

关键词: 无线异构网络; 未来负载预测; 负载趋势函数; 网络选择; 自适应门限

中图分类号: TN 929.5

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1001-506X.2015.06.24

Adaptive load balancing algorithm based on future load predicting

PAN Su^{1,2}, ZHANG Lei¹, LIU Sheng-mei¹

(1. College of Telecommunications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and

Telecommunications, Nanjing 210003, China; 2. National Mobile Communications

Research Lab, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In order to avoid the frequent network selection caused by the load fluctuation of networks, an adaptive load balancing algorithm with the future load predicting is proposed in heterogeneous wireless networks. The probabilities of networks' future load states are predicted by the Markov-chain, then the predicted probabilities are mapped into load trend values by the load trend function. The trend values are used for the network selection and the adaptive adjustment of the trigger threshold. The simulation results show that the proposed algorithm can reduce the access blocking probability and the times of the vertical handover.

Keywords: wireless heterogeneous networks; future load predicting; load trend function; network selection; adaptive threshold

0 引 言

随着宽带无线接入和移动通信技术的不断发展, 未来的无线网络将会是由多种不同的无线接入技术共同组成的能够满足用户的多种业务和服务质量需求的异构网络^[1]。网络的异构融合将成为未来通信网的一个重要特征, 它能够实现网络间的负载均衡, 有效提升系统性能以及无线资源的利用率。

无线异构网络负载均衡主要通过垂直切换的方式来实现^[2-3], 网络在满足一定触发条件时, 如系统的负载不均衡程度达到了门限值, 将一定数量的业务切换到负载较轻的

网络中, 从而实现系统负载均衡。目前已有很多研究负载均衡的算法^[3-9], 研究集中在两个方面: 一是网络间负载比较准则; 二是均衡切换的触发条件。对于网络间负载的比较准则, 文献[4]提出了基于模糊逻辑的网络选择算法来实现负载均衡, 通过将业务类型、可用带宽等作为模糊输入, 输出合适的目标切换网络, 实现负载均衡; 文献[3]提出了支持服务质量(quality of service, QoS)的负载均衡算法, 考虑影响 QoS 性能的系统带宽、丢包率、延迟等参数, 分别给这些参数赋予权值并构造目标函数, 选择函数值最大的网络作为均衡目标网络。文献[5]研究了一种混合动态负载均衡算法, 网络可以从相邻的轻载小区借用空闲信道, 同时

收稿日期: 2014-08-27; 修回日期: 2014-10-29; 网络优先出版日期: 2014-11-06。

网络优先出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2422.TN.20141106.1240.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金(61271235); 江苏省科技支撑计划(EE2011190); 东南大学国家移动通信重点实验室开放基金(2011D07)资助课题

也可以在重叠区域将负载转移到轻载的小区中。文献[6]提出了基于熵权值和灰度关联分析的负载均衡算法,通过每个网络的接收信号强度、可用资源和阻塞率构建判断矩阵,用灰度关联矩阵反映接入网的性能,最后采用熵权值获得每个指标的权重并联合关联矩阵对各异构网络的性能排序,从而选择最优的目标均衡网络。文献[7-9]主要研究了均衡切换的触发条件,在文献[7]所提的算法中,每当有新呼叫发起都会计算效用函数,以使得系统负载增加最小的网络接入新呼叫,因此系统开销较大;文献[8]提出了设定迟滞定时器的强制切换负载均衡算法,网络负载达到设定门限且超过等待时间之后,若网络依然过载才通过强制切换均衡负载。文献[9]提出了自适应调整负载均衡门限的算法,利用重叠区域网络的负载最大差值与反应当前系统负载状况的指标进行比较,若两网络负载差值大于指标值则触发均衡算法,这样的自适应门限算法在轻载条件下可以减少不必要的均衡操作。然而,总体而言,这些算法在负载比较准则和切换触发条件这两个问题的解决上都存在不足:对于网络间负载比较准则,上述算法用网络当前负载值或当前负载加上其他属性作为负载均衡的准则或指标,而没有考虑网络未来负载的变化趋势,所以这样的均衡切换在网络未来负载抖动严重时会导致频繁切换;对于均衡切换的触发条件,不设触发门限的均衡每当有新呼叫发起都会计算效用函数^[7],大大增加了系统负担,而设定迟滞定时器的触发算法不能根据网络情况及时进行负载均衡。

本文针对上述问题提出了一种预测网络未来负载的自适应负载均衡算法,通过预测网络负载处于某种状态的概率,计算出网络负载趋势值,将趋势值作为网络选择的准则,从而实现网络负载均衡,减少不必要的切换。

本文首先描述了网络系统模型以及提出负载预测算法;然后在预测负载的基础上提出基于负载预测的网络选择负载均衡策略以及自适应门限的调整算法;最后给出仿真结果以及对比分析。

1 异构网络中基于未来负载预测的自适应负载均衡算法

1.1 异构网络模型

未来一段时间内,覆盖范围广的3G、4G等蜂窝网络和覆盖范围短的无线局域网(wireless local area network, WLAN)将是主流,因此本文考虑由蜂窝网和WLAN组成的无线异构网络。如图1所示,用户以移动模型^[10]在系统内做随机运动,同时不断有新用户发起呼叫以及老用户断开连接。

假设系统中有 M 个异构网络,每个网络都支持 N 种不同的业务。在异构网络中,对负载需要一个统一的定义。对于FDMA、TDMA、CDMA以及OFDM等不同的接入系统,负载都可以用业务在无线信道上的速率 R_b ^[11]来表示,则 k 网络 l 业务的单个呼叫负载 $load_{k,l}=R_b(l)$, $R_b(l)$ 为用

户要求有质量保证的业务 l 的比特速率,如话音业务为16 kbps,视频业务为384 kbps。则 k 网络 l 业务的所有负载为

$$Load_{k,l} = load_{k,l} \times a_l^k \quad (1)$$

式中, $l=(1,2,3,\dots,N)$; $k=(1,2,3,\dots,M)$; a_l^k 为 k 网络中保持的 l 业务呼叫数量。

则网络 k 在 s 时刻的负载表达式为

$$Load_k(s) = \sum_{l=1}^N Load_{k,l} \quad (2)$$

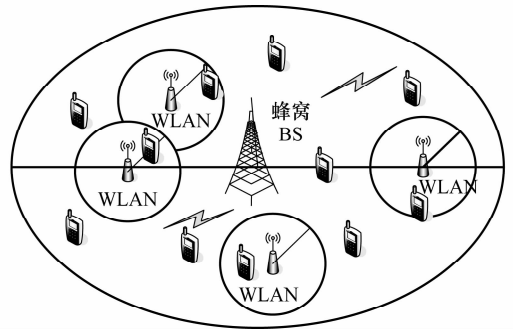


图1 异构网络模型

1.2 负载预测算法

在第1.1节无线异构网络模型的基础上,本文提出了通过预测网络未来负载进行网络选择及触发门限自适应调整的负载均衡算法。为预测网络负载,首先,将网络负载分为不同的状态空间;其次,通过马尔可夫转移函数计算出网络未来负载处于各个状态空间的概率;最后,结合预测结果选择网络以达到网络间的负载均衡,同时自适应调整均衡触发门限。

基于式(2)网络负载的表达式,将负载在 s 时刻划分为轻载、平衡、重载和过度重载4种状态,用状态空间 $T=\{1, 2, 3, 4\}$ 表示。其中状态1代表轻载,状态2代表平衡,状态3代表重载,状态4代表过度重载。

为了划分网络负载的状态空间,设定相应的划分门限。设网络 k 的最大负载容量为 $C_{\max,k}$,定义 $thd_{k,1}$ 、 $thd_{k,2}$ 、 $thd_{k,3}$ 、 $thd_{k,4}$ 分别为网络处于轻载、平衡、重载和过度重载的门限值。各门限按网络最大负载的一定比例取值,比例大小不影响算法本身,不失一般性,令 $thd_{k,1}=0.3 C_{\max,k}$, $thd_{k,2}=0.6 C_{\max,k}$, $thd_{k,3}=0.8 C_{\max,k}$, $thd_{k,4}=C_{\max,k}$ 。若负载小于轻载门限,即 $Load_k(s) \leq thd_{k,1}$,则网络 k 在 s 时刻处于轻载状态;若 $thd_{k,1} < Load_k(s) \leq thd_{k,2}$,网络 k 在 s 时刻处于平衡状态;若 $thd_{k,2} < Load_k(s) \leq thd_{k,3}$,网络 k 在 s 时刻处于重载状态;若 $thd_{k,3} < Load_k(s) \leq thd_{k,4}$,则网络 k 在 s 时刻处于过度重载状态。

基于以上状态空间划分,任意时刻网络负载都处于上述4种状态之一。而下一时刻网络处于任一状态的概率只与当前时刻状态有关,所以网络负载状态的变化可以用马尔可夫链描述。为了计算网络负载状态转移概率,首先确定业务呼叫的到达和离去所服从的分布模型,通过计算转

移概率预测网络负载状态,以便进行网络选择及触发门限调整。假设有 n 个终端,对于 k 网络的 l 业务,各终端对业务 l 发起呼叫的概率为 p_l ,不发起的概率为 $1-p_l$ 。因此,业务 l 的 a_l^k 个呼叫发起的概率为

$$P_l^k(X = a_l^k) = \binom{n}{a_l^k} p_l^{a_l^k} (1-p_l)^{n-a_l^k}, a_l^k = 0, 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

若对于业务 l 每个呼叫离去的概率为 q_l ,不离去的概率为 $1-q_l$,则业务 l 的 b_l^k 个呼叫离去概率为

$$Q_l^k(X = b_l^k) = \binom{n}{b_l^k} q_l^{b_l^k} (1-q_l)^{n-b_l^k}, b_l^k = 0, 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

当 n 很大, p_l, q_l 很小时有以下近似式

$$P_l^k(x = a_l^k) = \binom{n}{a_l^k} p_l^{a_l^k} (1-p_l)^{n-a_l^k} \approx \frac{\lambda_l^{a_l^k} e^{-\lambda_l}}{a_l^k!}, \lambda_l = np_l \quad (5)$$

$$Q_l^k(x = b_l^k) = \binom{n}{b_l^k} q_l^{b_l^k} (1-q_l)^{n-b_l^k} \approx \frac{\mu_l^{b_l^k} e^{-\mu_l}}{b_l^k!}, \mu_l = nq_l \quad (6)$$

式中, $\frac{\lambda_l^{a_l^k} e^{-\lambda_l}}{a_l^k!}, \frac{\mu_l^{b_l^k} e^{-\mu_l}}{b_l^k!}$ 是泊松分布的概率密度函数。

由于泊松分布过程同时也是平稳增量过程,所以由下式可计算出 k 网络的业务 l 在 t 时间内增加 a_l^k 个呼叫的概率

$$P_l^k\{X(t+s) - X(s) = a_l^k\} = e^{-\lambda_l t} \frac{(\lambda_l t)^{a_l^k}}{a_l^k!} \quad (7)$$

同样,可计算出 k 网络的业务 l 在 t 时间内减少 b_l^k 个呼叫的概率

$$Q_l^k\{X(s) - X(s+t) = b_l^k\} = e^{-\mu_l t} \frac{(\mu_l t)^{b_l^k}}{b_l^k!} \quad (8)$$

式中, a_l^k 和 b_l^k 分别为网络 k 的 l 业务在 t 时间段里增加和减少的呼叫数。则新呼叫所增加的负载为

$$load_k(a_l^k, N) = \sum_{l=1}^N load_{k,l} \times a_l^k$$

减少的负载为

$$load_k(b_l^k, N) = \sum_{l=1}^N load_{k,l} \times b_l^k$$

由增加和减少的负载可以计算网络 k 负载的变化为

$$\begin{cases} p_{i1}^k = P(-Load_k(s) \leq \Delta load_k \leq thd_{k,1} - Load_k(s) | X_s = i) \\ p_{i2}^k = P(thd_{k,1} - Load_k(s) \leq \Delta load_k \leq thd_{k,2} - Load_k(s) | X_s = i) \\ p_{i3}^k = P(thd_{k,2} - Load_k(s) \leq \Delta load_k \leq thd_{k,3} - Load_k(s) | X_s = i) \\ p_{i4}^k = P(thd_{k,3} - Load_k(s) \leq \Delta load_k \leq thd_{k,4} - Load_k(s) | X_s = i) \end{cases} \quad (12)$$

式中, $i \in \{1, 2, 3, 4\}$ 分别表示网络处于轻载、平衡、重载和过度重载状态。

将式(7)、式(8)计算得到的 k 网络 l 业务在 t 时间段里呼叫数增加 a_l^k 个和减少 b_l^k 个的概率代入式(12),可求出各

$$\Delta load_k = load_k(a_l^k, N) - load_k(b_l^k, N)$$

定义 $p_{i,j}^k$ 为 k 网络从 s 时刻状态 i 到 $s+1$ 时刻状态 j 的一步转移概率,即

$$p_{i,j}^k = p^k\{X_{s+1} = j | X_s = i\} \quad (9)$$

由式(9)可以计算出网络负载状态的一步转移概率。设 s 时刻,网络 k 处于以上 4 种状态的概率为 $\mathbf{P}_k(s) = [P_{k,1}(s), P_{k,2}(s), P_{k,3}(s), P_{k,4}(s)]$,则在 $s+1$ 时刻,处于 T 中各个状态的概率为

$$\mathbf{P}_k(s+1) = \mathbf{P}_k(s) \cdot \mathbf{P}_{i,j}^k(s) \quad (10)$$

式中, $\mathbf{P}_{i,j}^k(s)$ 为一步转移矩阵

$$\mathbf{P}_{i,j}^k(s) = \begin{bmatrix} p_{11}^k & p_{12}^k & p_{13}^k & p_{14}^k \\ p_{21}^k & p_{22}^k & p_{23}^k & p_{24}^k \\ p_{31}^k & p_{32}^k & p_{33}^k & p_{34}^k \\ p_{41}^k & p_{42}^k & p_{43}^k & p_{44}^k \end{bmatrix} \quad (11)$$

图 2 为网络 k 的负载状态转移图,在 s 和 $s+1$ 时刻有 4 个状态空间,从某一状态可以转移到其他 4 种状态之一, j 代表了下一时刻要转移的状态, $j \in \{1, 2, 3, 4\}$ 。

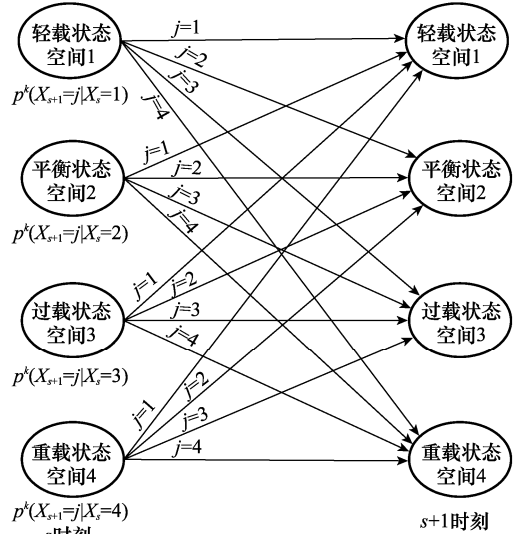


图 2 网络 k 的负载状态转移图

在 s 时刻网络 k 的负载为 $Load_k(s)$,根据负载的变化可计算状态转移概率,若网络处于状态 i ,则下一时刻处于状态 1、2、3、4 的转移概率为

状态转移概率 $p_{i,j}^k$,将计算得到的 $p_{i,j}^k$ 代入式(11),求得转移矩阵 $\mathbf{P}_{i,j}^k(s)$,再由式(10)计算出 $s+1$ 时刻网络负载处于状态空间 T 中各个状态的概率 $\mathbf{P}_k(s+1)$ 。

通过本节提出的负载预测算法计算下一时刻网络负载

处于各个状态的概率,达到预测网络负载状态的目的,将预测的网络负载状态作为网络选择策略的输入,即通过一定的策略使呼叫接入未来负载较轻的网络中。

2 基于负载预测的网络选择及门限调整策略

通过第1节负载预测算法预测网络未来负载之后,网络选择策略可以根据预测结果进行相应的负载均衡控制。在网络重叠区域,当多个网络满足呼叫的 QoS 需求时,网络选择策略会考虑让该呼叫选择下一时刻网络负载趋势值最小的网络接入,即网络轻载趋势最大的网络接入,从而可以均衡各异构网络间的负载,并避免频繁切换现象。

2.1 网络负载趋势函数

本文定义了网络负载趋势函数,它能量化下一时刻网络处于轻载、平衡、重载、过载的趋势大小。根据网络当前趋势值,以及负载预测算法预测到的网络负载处于4种状态的概率,计算出下一时刻的负载趋势值,定义如下:

$$E_k(s+1) = E_k(s) + \frac{P_{k,4}(s+1) \times P_{k,3}(s+1)}{P_{k,1}(s+1) \times P_{k,2}(s+1)} \quad (13)$$

式中, $E_k(s)$ 为 k 网络在 s 时刻负载趋势值;该式中分子 $P_{k,4}(s+1) \times P_{k,3}(s+1)$ 表示网络下一时刻是重载的概率;分母 $P_{k,1}(s+1) \times P_{k,2}(s+1)$ 表示下一时刻是轻载的概率;重载概率与轻载概率的比值 $P_{k,4}(s+1)P_{k,3}(s+1)/P_{k,1}(s+1)P_{k,2}(s+1)$ 反映了网络未来负载的趋势,值越大表明负载比较重的趋势就越明显。当有新呼叫到达时,网络选择策略选择下一时刻趋势值最小的网络接入,从而可以避免接入到未来负载较重的网络中去。由于负载趋势函数为非减函数,所以每隔一段时间对趋势值进行复位。

2.2 网络选择触发门限自适应调整

用来实现负载均衡的网络选择策略并非一直执行,而是需要设定一个适当的触发门限,以控制均衡带来的开销。本文提出的自适应触发门限可以根据预测到的负载趋势值综合考虑其他网络未来负载状况,从而对自身触发门限进行动态自适应调整。如该网络下一时刻负载趋势值小于所有网络负载趋势值的平均值,即全局平均负载趋势值,说明该网络相比其他网络负载轻的趋势更明显,可提高本网络下一时刻的负载触发门限,以减少下一时刻由该网络向相邻网络转移负载进行切换的次数,从而在保证系统性能的同时减少了切换均衡开销;若该网络下一时刻负载趋势值大于全局平均负载趋势值,说明该网络相比其他网络负载重的趋势更明显,可降低本网络下一时刻的触发门限,以尽早将自身负载向其他负载较轻的网络转移,保证网络性能以及网络间负载均衡。

为此,定义全局平均负载趋势值为同一时刻系统中所有网络负载趋势值的平均,用 avg_E_{s+1} 来表示,则有

$$avg_E_{s+1} = \frac{\sum_{k=1}^M E_k(s+1)}{M} \quad (14)$$

在系统初始化阶段,网络 k 的负载均衡触发门限设为初始值 $thd_{k,0}$,随后通过预测未来负载算法计算出各个网络下一时刻的趋势值,以及根据式(14)计算全局平均负载趋势值。

若某网络的未来趋势值小于 $\epsilon \times avg_E_{s+1}$,则表明该网络下一时刻相对其他网络负载较轻,下一时刻触发门限 $thd_{k,0}$ 适当提高 Δ ,以减少由该网络向相邻其他网络转移负载的切换次数;相反,若某网络的未来趋势值大于 $\frac{1}{\epsilon} \times avg_E_{s+1}$,则表明该网络下一时刻负载较其他大部分网络重,为保证其更容易达到触发门限以向其他趋势值小的网络转移自身的负载,相应降低 Δ 步长的触发门限。其中, $\epsilon < 1$ 保证趋势值大于或小于全局平均负载趋势值一定的范围; $\Delta = 0.02C_{k,max}$ 为网络进行一次门限调整的步长,步长不宜太大或太小,本文设定为网络容量的 $1/50$ 。

自适应门限调整如下:

(1) 初始时,对于网络 k 的初始触发门限 $thd_{k,0}$ 本文设为固定值 $0.4C_{k,max}$ 。

(2) 在 $s+1$ 时刻,网络 k 的负载趋势值为 $E_k(s+1)$,同时由式(14)计算出全局平均负载趋势值为 avg_E_{s+1} 。

(3) 若 $E_k(s+1) < \epsilon \times avg_E_{s+1}$,则说明此网络下一时刻相对其他网络负载轻,触发负载均衡策略的门限值(即 $thd_{k,0}$)可以相应地提高一个步长 Δ ,减少从自身网络转移负载的切换次数;相反,若 $E_k(s+1) \geq \frac{1}{\epsilon} \times avg_E_{s+1}$,则说明此网络下一时刻相对其他网络负载重,为了保证尽早转移自身负载以实现均衡,门限值相应地降低一个步长 Δ 。

2.3 网络选择控制策略

网络 k 每隔一个时间周期检查自身的负载,若其负载超过触发门限 $thd_{k,0}$,则触发负载预测算法对该网络未来负载状态进行概率预测,从而计算出下一时刻该网络的负载趋势值。基于负载预测的网络选择流程如图3所示。

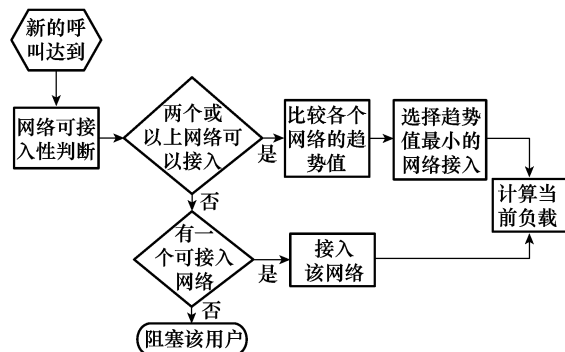


图3 基于负载预测的网络选择流程图

从图3可知,当有新的呼叫或切换请求时,进行网络可接入性判断,若系统只有一个网络可以接入则接入该网络;若系统有两个或以上网络可以接入时,网络选择策略会比较各个网络的趋势值,选择趋势值最小的网络作为目标网络接入。同时,根据负载趋势值来提高或降低触发负载预测

的均衡算法门限,从而保证负载均衡的同时控制均衡开销,减少不必要的均衡。

3 仿真与结果分析

系统仿真模型如图 4 所示,在通用移动通信系统(universal mobile telecommunications system, UMTS)和 WLAN 的覆盖范围内,对于 l 业务不断有新呼叫按到达率 λ_l 发起呼叫,同时系统中 l 业务的呼叫按离开率 μ_l 离开系统。系统参数如表 1 所示。

| 表 1 仿真网络参数表 | | |
|-------------|-------------|-------|
| 系统参数 | 参数说明 | 参数值 |
| R_1 | 蜂窝小区覆盖范围/m | 2 000 |
| R_2 | WLAN 覆盖范围/m | 200 |
| R_3 | 初始移动节点数/个 | 10 |

用户的呼叫发起位置均匀分布在网络覆盖面上,运动方向在 $0\sim 2\pi$ 之间服从均匀分布,每隔一段时间移动台速度也发生改变,速度的改变服从如下分布:

$$pdf(v) = \begin{cases} \frac{v}{\sigma_v^2} \exp(-\frac{v^2 + \bar{v}^2}{2\sigma_v^2}), & v > 0 \\ 0, & v \leq 0 \end{cases} \quad (15)$$

式中, $\bar{v}=4.3$ km/h; $\sigma_v=3.6$ km/h。

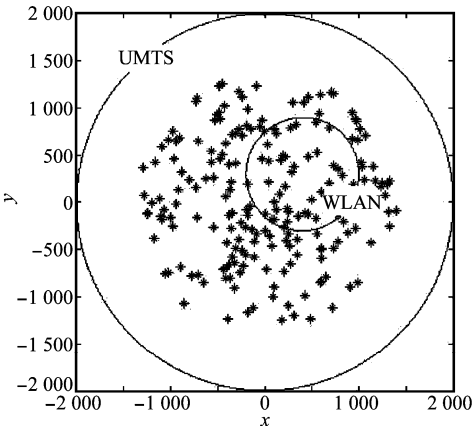


图 4 系统仿真模型

目前,多数研究采用多属性^[12-14]的负载均衡算法,即考虑网络价格和负载水平等属性,它们都以网络当前的属性值作为均衡标准。

本文提出用于预测未来负载的负载趋势值也可以作为属性之一,用于多属性决策。为了清楚显示本文所提出的算法在负载均衡上的优势,在仿真中设计了一个只考虑负载趋势值和价格的简单多属性决策代价函数,当然也可以使用复杂的多属性方法,如 TOPSIS 法、AHP 算法^[15-17]等。

这里只考虑价格因素以及预测的网络趋势值,定义的代价函数为

$$F_k = \alpha C_k + \beta E_k(s+1) \quad (16)$$

式中, α 、 β 分别为网络价格和负载趋势值的权重因子,可根据实际情况调节; C_k 为 k 网络的价格; $E_k(s+1)$ 为 k 网络负

载趋势值。

若没有进行负载均衡,即式(16)中的 $\beta=0$ 。如图 5 所示,随着系统中用户不断增加,由于 WLAN 价格便宜,在达到业务需求的条件下用户优先接入 WLAN。可以看出 WLAN 的负载增加比较迅速,最终处于接近满负载的状态;而 UMTS 的负载仅达到 50%,处于平衡状态。如果没有执行负载均衡,网络之间负载出现了失衡。

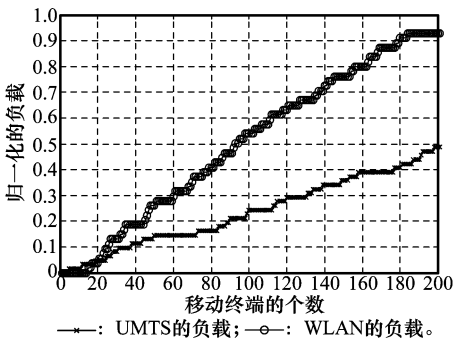
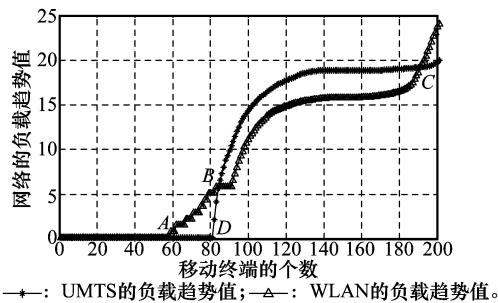
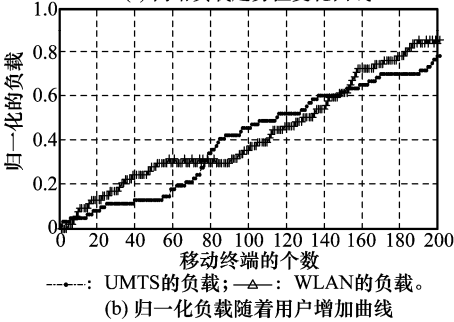


图 5 没有执行负载均衡算法

在相同场景下,执行预测未来负载的自适应均衡算法,其结果如图 6 所示。图 6(a)为网络负载趋势值曲线;图 6(b)为根据趋势值进行网络选择的负载变化图。



(a) 网络负载趋势值变化曲线



(b) 归一化负载随着用户增加曲线

图 6 执行预测负载的自适应负载均衡算法

从图 6(a)可以看出,起初两个网络的负载都比较轻,未触发负载均衡算法,所以新加入网络的用户按照网络价格优先的原则接入合适网络。当移动用户数增加到一定数量时,在点 A 处 WLAN 网络负载先达到触发门限,开始预测网络未来负载状况,从点 A 到点 B 看到 WLAN 的趋势值大于 UMTS 趋势值,由于负载趋势值的权值大于价格的权值,所以接入控制会优先选择代价值小的 UMTS 网络接

入,从而在重叠区域尽管 WLAN 价格便宜,增加的呼叫也会选择轻载趋势大的 UMTS 网络接入,从图 6(b)中对应区域看出 UMTS 的负载明显增加。当 UMTS 的负载增加到触发门限后,即对应图 6(a)中的 D 点,UMTS 的负载趋势值也根据预测的结果增大,从点 B 到点 C ,UMTS 的趋势值大于 WLAN 的趋势值,此时图 6(b)中 WLAN 负载的增长比 UMTS 迅速。由图 6(b)可以看出,随着用户数的增加,UMTS 和 WLAN 的负载在逐渐增加,WLAN 负载最终达到 85%,UMTS 负载最终达到 78%。与图 5 比较可知,预测未来负载的负载均衡算法使得网络间负载达到了有效均衡。

为了比较预测未来负载的自适应负载均衡算法与现有的迟滞定时器算法性能的差异,设定如下一种场景:以图 4 系统模型为基础,在 $t=6\text{ s}$ 、 7 s 、 8 s 3 个时刻,系统中的用户数量激增,接着用户数量又恢复正常。因此,在 $t=6\text{ s}$ 时,WLAN 和 UMTS 网络负载都达到了触发负载均衡算法的门限。两种算法在此情况下的仿真结果比较如图 7 所示。

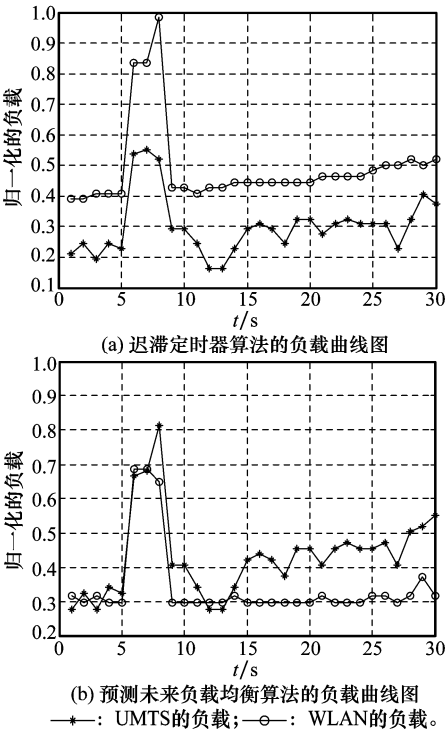


图 7 两种负载均衡算法性能比较

由图 7(a)可以看出,由于用户数的激增, $t=6\text{ s}$ 时 WLAN 和 UMTS 的负载达到触发门限(初始触发门限为 $thd_{k,0}$),执行迟滞定时器的负载均衡算法。由于迟滞定时器需要等待 2 s,在这 2 s 内不执行均衡切换的操作,而在这个时间段中系统的用户数还在激增,所以在这 2 s 内,WLAN 的负载急剧增加到了极限,即归一化的负载为 1,而 UMTS 的价格比 WLAN 高,所以负载增加没有 WLAN 快,因此网络间的负载出现了失衡,WLAN 负载饱和意味着用户的 QoS 急剧变坏。相同的场景,图 7(b)的仿真结果

说明,当网络负载达到均衡触发门限的时候,网络就执行预测未来负载的自适应均衡算法,避免了用户都接入到价格便宜但负载比较重的 WLAN 网络中,从而有效均衡了网络间的负载,提高了系统中用户的 QoS。

为了比较预测未来负载的负载均衡算法对呼叫阻塞率的改善,在不同的到达率下,比较无负载均衡算法、迟滞定时器负载均衡算法和预测未来负载的自适应均衡算法呼叫阻塞率,该仿真场景中到达率大于离开率。图 8 为呼叫阻塞率随到达率变化的曲线图。

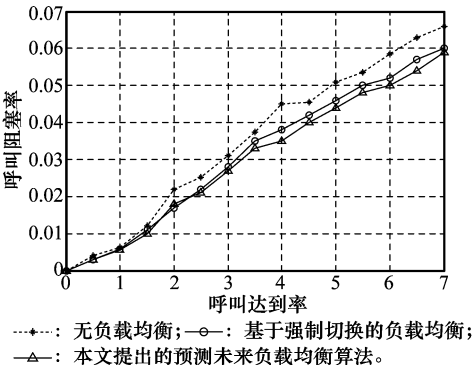


图 8 呼叫阻塞率随到达率的变化

由图 8 可见,随着呼叫到达率增大,系统的呼叫阻塞率也在增大,无负载均衡情况下呼叫阻塞率最大,基于迟滞定时器的强制切换负载均衡算法呼叫阻塞率其次,本文提出的预测未来负载状况的自适应负载均衡算法呼叫阻塞率最小。

图 9 为预测网络未来负载的自适应负载均衡算法和现有迟滞定时器强制切换的负载均衡算法在均衡切换次数上的比较。从图中可以看出,预测网络未来负载的自适应负载均衡算法在大部分仿真时间内所发生的均衡切换次数比强制切换负载均衡算法发生的切换次数要少。所以,预测网络未来负载的自适应负载均衡算法能适应网络未来的负载抖动,有效地减少了系统均衡切换的次数。

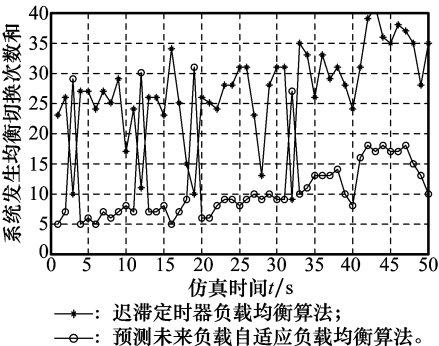


图 9 系统发生均衡切换次数的比较

4 结束语

本文主要研究了一种无线异构网络中基于网络未来负载预测的自适应负载均衡算法,该算法将网络负载划分为

轻载、平衡、重载和过载 4 种状态,由呼叫模型服从的分布计算出网络状态转移矩阵,进而通过马尔可夫链确定网络未来负载处于各个状态空间的概率。通过本文提出的负载趋势函数量化成网络负载趋势值,由负载趋势值作为均衡指标进行网络选择、切换控制,同时利用趋势值自适应调整触发网络选择策略的门限。达到了有效避免负载分布不均衡,进一步降低呼叫阻塞率,减少频繁切换,提高无线资源利用率等目的。

参考文献:

- [1] Damjanovic A, Montojo J, Wei Y B, et al. A survey on 3GPP heterogeneous networks[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2011, 18(3):10-21.
- [2] Kunarak S, Suleesathira R. Predictive RSS with fuzzy logic based vertical handoff algorithm in heterogeneous wireless networks[C]//*Proc. of the International Symposium on Communications and Information Technologies*, 2010: 1235-1240.
- [3] Alam M, Choong S H, Seung M, et al. A load balancing algorithm with QoS support over heterogeneous wireless networks[C]//*Proc. of the Network Operations and Management Symposium*, 2012:1-4.
- [4] Sheng J, Yang Z, Tang L R, et al. A novel load balancing algorithm based on utility functions and fuzzy logic in heterogeneous wireless networks[C]//*Proc. of the International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, 2012:414-418.
- [5] Chen Y Y, Qi B, Luo Y T, et al. A hybrid dynamic load balancing algorithm in heterogeneous wireless packet networks[C]//*Proc. of the International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, 2012:2052-2056.
- [6] Sheng J, Qi B, Dong X J, et al. Entropy weight and grey relation analysis based load balancing algorithm in heterogeneous wireless networks[C]//*Proc. of the International Conference on Networking and Mobile Computing*, 2012:1-4.
- [7] Lee S, Sriram K, Golmie N, et al. Vertical handoff decision algorithms for providing optimized performance in heterogeneous wireless networks[J]. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2009, 58(2):865-881.
- [8] Zhou X T. The research of load balance control strategy and algorithm in heterogeneous wireless networks[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2011. (周晓团. 异构无线网络负载均衡控制策略与算法研究[D]. 南京:南京邮电大学, 2011.)
- [9] Zhang Y J, Zhang K, Chi C, et al. An adaptive threshold load balancing scheme for the end-to-end reconfigurable system[J]. *Wireless Personal Communication*, 2008, 46(1): 47-65.
- [10] Plamen I. User mobility modeling in cellular communications networks[D]. Austria: Vienna University of Technology, 1999.
- [11] Quoc-thinh N, Nazim A, Yacine G. Novel approach for load balancing in heterogeneous wireless packet networks[C]//*Proc. of the Network Operations and Management Symposium Workshops*, 2008: 26-31.
- [12] Lian R R, Tian H, Fei W C, et al. QoS-aware load balancing algorithm for joint group call admission control in heterogeneous networks[C]//*Proc. of the IEEE Vehicular Technology Conference*, 2012: 1-5.
- [13] Chai R, Dong X Y, Ma J, et al. An optimal IASA load balancing scheme in heterogeneous wireless networks[C]//*Proc. of the International Conference on Communications and Networking in China*, 2011: 714-719.
- [14] Jeounglak H, JiYeon K, Jin-up K, et al. Dynamic load balancing architecture in heterogeneous wireless network environment[C]//*Proc. of the International Symposium on Communications and Information Technology*, 2009: 248-253.
- [15] Bernardon D P, Sperandio M, Garcia V J, et al. AHP decision-making algorithm to allocate remotely controlled switches in distribution networks[J]. *IEEE Trans. on Power Delivery*, 2011, 26(3):1884-1892.
- [16] Fan C Y, Li Q S, Wang C H, et al. Topsis based on grey correlation method and it's application[C]//*Proc. of the IEEE International Conference on Grey Systems and Intelligent Services*, 2013:23-25.
- [17] Goyette R, Karmouch A. Using AHP/ TOPSIS with cost and robustness criteria for virtual network node assignment[C]//*Proc. of the IEEE International Conference on Communications*, 2012:5885-5889.

作者简介:

潘 甦(1969-),男,教授,博士,主要研究方向为无线通信与移动互联网技术。

E-mail:supan@njupt.edu.cn

张 磊(1990-),男,硕士研究生,主要研究方向为移动通信与无线技术。E-mail:zhanglei7655823@126.com

刘胜美(1977-),女,副教授,博士,主要研究方向为异构无线网络移动性管理、资源管理、运动预测。

E-mail:smliu@njupt.edu.cn