

基于二分图匹配的多业务流网络选择机制*

袁尧^{1,2+}, 张玉成¹, 董雯霞¹, 郑如松^{1,2}, 杨育波^{1,2}, 石晶林¹

¹(中国科学院 计算技术研究所 先进无线技术联合研究中心,北京 100190)

²(中国科学院 研究生院,北京 100049)

Multi-Flow Network Fairness Selection Scheme Based on Weighted Bigraph Model

YUAN Yao^{1,2+}, ZHANG Yu-Cheng¹, DONG Wen-Xia¹, ZHENG Ru-Song^{1,2}, YANG Yu-Bo^{1,2},
SHI Jing-Lin¹

¹(ICT & ASTRI Joint R&D Centre for Advanced Wireless Technologies, 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: yuanyao@ict.ac.cn

Yuan Y, Zhang YC, Dong WX, Zheng RS, Yang YB, Shi JL. Multi-Flow network fairness selection scheme based on weighted bigraph model. *Journal of Software*, 2010,21(6):1378-1390. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3519.htm>

Abstract: The existing methods are mostly concentrated on single flow network selection. In this paper, a multi-flow network selection model scheme based on bigraph is proposed. By calculating the satisfactions between flows and networks this scheme can distribute the flows with the most satisfaction on the condition of being fair. Analysis of the performance of the algorithm proves the correctness of Algorithm. Numerical results show that the proposed schemes achieve significant satisfaction and Fair coefficient.

Key words: network selection; bigraph; multi-flow; fairness

摘要: 对于多业务流的网络选择问题,提出了一种在网络侧进行的基于二分图匹配网络选择机制,根据业务流对于每个接入网络的满意度,网络侧实体进行统一的分配,在保证公平性的前提下使得分配结果的满意度最大.对算法的代价和性能进行了分析.实验结果表明,算法能够达到较大的网络整体满意度,并且具有较大的公平性系数.

关键词: 网络选择;二分图;多业务流;公平性

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

近几年来,无线通信技术取得了进展,包括 GSM(global system for mobile communications), UMTS (universal mobile telecommunications system), WLANs(wireless local area networks), 蓝牙, WiMAX(worldwide interoperability for microwave access)在内的多种无线接入网络已经或即将在全球部署.不同的接入技术适用的场景和能够提供的服务都有所不同,单独的一种接入技术难以满足日益增长的移动服务的需要,未来的4G移动系统将会在一个网络中融合多种接入技术来满足不同用户需求和 QoS 级别^[1,2].未来的多模移动终端也将能够

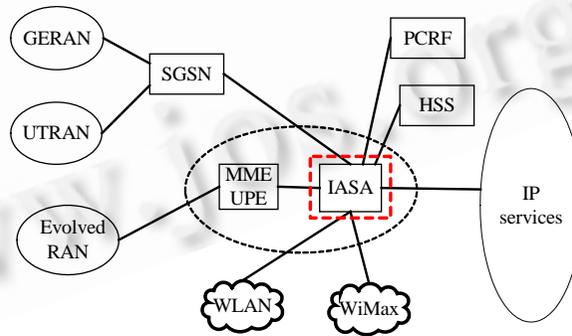
* Supported by the National Basic Research Program of China under Grant No.2007CB310702 (国家重点基础研究发展计划(973))

Received 2008-05-29; Revised 2008-08-28; Accepted 2008-10-28

同时支持多种空中接口,现在能够同时支持 UMTS 和 WLAN 两种网络的双模手机已经在一些地区投入使用.多模终端同时在不同的接入网络上传输业务流将成为可能.同时,考虑到降低终端的复杂性和节省功耗,需要在网络侧设置专门的功能实体,为不同的业务流设计网络选择机制,快速准确地定位承载业务流的最优网络,从而能够为用户提供最优的服务质量.网络选择问题已经成为下一代网络控制系统中的研究重点,3GPP,SAE,IEEE 802.21 等标准化组织均将接入网络的选择问题列为未来网络将要解决的问题之一^[3,4].

在网络选择问题的标准化和体系结构研究方面,文献[1]提出了一种 4G 网络架构,该架构能够为多模终端提供最优网络选择服务.3GPP SAE 标准中只是提出了问题而没有解决方法,IEEE802.21 将最优网络选择问题列为主要研究的 5 个方面之一,而 802.21 的标准仍在制订之中.在网络选择方法的研究方面,多集中在单业务流的 ABC(always best connected)问题.文献[5,6]定义了 ABC 问题的概念和体系结构.文献[7]提出了一种多约束动态网络选择方法,该模型将网络选择问题转化为背包问题解决,能够降低功率的消耗和提升用户的满意度.文献[2]提出了一种综合 AHP(analytic hierarch process)和 GRA(gray relational analysis)方法的网络选择机制,该机制利用 AHP 方法根据用户的喜好和服务的类型得出各 QoS 参数的权重,进而利用 GRA 方法对可选择的网络进行排序,最后得出承载业务流的最优网络.现有的网络选择问题的解决方法根据参数选择的不同主要分为以下几类:1) 以 RSS(radio signal strength)门限作为选择标准^[8];2) 综合考虑用户对于服务的要求和网络中特定参数的开销^[9];3) 考虑 3 种因素即 QoS 参数、权重参数和网络的优先级参数^[10].这些针对单业务流网络选择方法并不适用于解决多业务流的网络选择问题:首先,利用这些方法解决多业务流的网络选择问题,将会变成一个多次单业务流选择问题,这种算法复杂度高,又往往不能得出最优的解决方案;其次,终端侧进行的网络选择不利于解决多业务流网络分配中的公平性问题,不公平的网络分配会引起大多数业务流涌向同一个网络,以及潜在的服务质量的下降.应使不同重要程度的业务流所达到满意度有所区分,并且在带宽不够的情况下体现对于不同业务流的区分服务.

针对上述问题,本文提出了一种网络侧(Inter access system anchor,简称 IASA)基于二分图匹配的多业务流网络选择机制,综合考虑了 QoS 参数、权重参数和用户的优先级参数,利用 AHP 算法计算各个参数在系统中的权重,针对不同的参数分别计算业务流对网络的满意度,最后利用公平性多业务流网络选择算法(multi-flow network selection fairness,简称 MFNSF 算法)对业务流进行分配,从而在保证业务流公平分配的基础上,使整体业务流满意度最大.本系统的网络拓扑如图 1 所示.



IASA: Inter access system anchor

Fig.1 Multi-Flow network selection scheme network topology

图 1 多业务流网络选择机制的网络拓扑

本文第 1 节建立系统模型和提出系统目标.第 2 节介绍考虑公平性的多业务流网络选择算法(MFNSF 算法).第 3 节对算法性能进行仿真分析.第 4 节给出结论和下一步的工作.

1 系统模型及目标

1.1 二分图模型

多业务流网络选择的本质可由式(1)表示:

$$X \begin{matrix} \xrightarrow{R} \\ \xleftarrow{P} \end{matrix} Y \quad (1)$$

其中, X 表示需要选择接入网络的业务流集合, Y 表示可用的接入网络集合, R 表示不同业务流的需求, P 表示接入网络当前的状况. 为业务流选择网络, 即寻找一个将多个业务流分配到多个网络中的最优结果.

我们也可将上述问题转换为二分图最优匹配问题, 形式化表示如图 2、图 3 所示.

图 2 表示网络选择前业务流与可用网络之间的关系情况, 图 3 表示网络选择一种可能结果. 图中的边表示业务流与接入网络之间的匹配关系, 节点的度表示与之匹配的业务流(或节点)的个数.

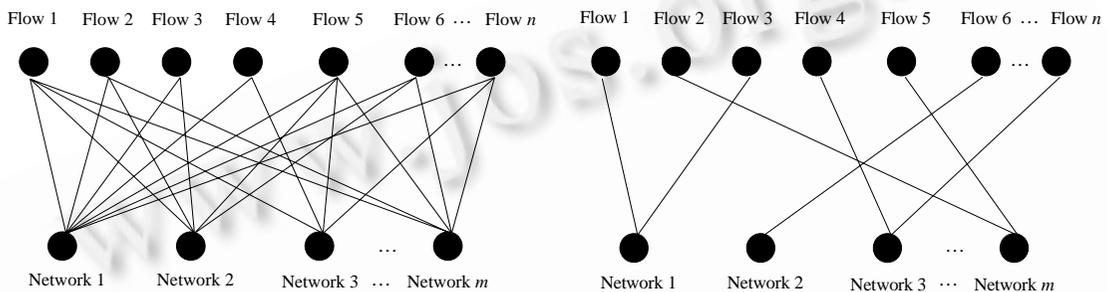


Fig.2 Before network selection

图 2 网络选择前

Fig.3 After network selection

图 3 网络选择后

1.1.1 节点定义

在图 2 中, 根据 ITU 对于 QoS 等级的划分^[11], 综合考虑了如用户喜好、网络情况和服务类型等其他因素, 我们选取了安全性(α), 功耗(β), QoS(q) (包括时延(δ), 丢包率(ε), 抖动(γ)), 费用(η), 带宽(bw)等 5 类参数来描述网络情况和业务流的需求, 前 4 类参数用来计算满意度, 带宽用来判断网络是否有能力承载业务流. 因素向量:

$$\vec{V} = (\alpha, \beta, q, \eta, bw) \quad (2)$$

其中,

$$\vec{q} = (\delta, \varepsilon, \gamma) \quad (2a)$$

下面对图 2、图 3 所示的二分图模型节点以及满意度进行定义.

定义 1(业务节点). 设集合 $\tilde{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}, n \in R$, 其中, 每个 x_i 表示一个业务流, 每个业务流需求 $\tilde{x}_i^R = (x_i^\alpha, x_i^\beta, x_i^q, x_i^\eta, x_i^{bw})$.

定义 2(网络节点). 设集合 $\tilde{Y} = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}, m \in R$, 其中, 每个节点向量 y_i 表示一个可用的接入网络, 网络状况 $\tilde{y}_i^P = (y_j^\alpha, y_j^\beta, y_j^q, y_j^\eta, y_j^{bw})$.

定义 3(满意度). 网络 j 满足业务流 i 需求的程度:

$$M_{ij} = \begin{cases} \text{Sat} \times \vec{W}, & x_i^{bw} \leq y_j^{bw} \\ 0, & x_i^{bw} > y_j^{bw} \end{cases} \quad (3)$$

其中, $\text{Sat} = (\text{Sat}_\alpha, \text{Sat}_\beta, \text{Sat}_q, \text{Sat}_\eta)$ 为各参数的满意度, 对于不同的参数有不同的计算方法. $\vec{W} = \{w_\alpha, w_\beta, w_q, w_\eta\}$ 为各参数的权重.

1.1.2 满意度计算

对于不同类型参数的满意度的计算方法可分为 3 种情况:

第 1 类, 区间型的参数, 业务节点对于这类参数的要求在一个区间(u_k, l_k)之内, 包括时延、抖动、丢包率. 网络

j 对于业务流 i 参数 k 的满意度可由公式(4)求出:

$$Sat_{ij}^k = \begin{cases} 1, & y_j^k > u_k \\ \frac{y_j^k - l_k}{u_k - l_k}, & l_k \leq y_j^k \leq u_k \\ 0, & y_j^k < l_k \end{cases} \quad (4)$$

第 2 类:门限值参数,业务节点对于某参数的要求必须大于某个门限值 t ,这类参数包括安全性,可由公式(5)求出:

$$Sat_j^k = \begin{cases} 1, & y_j^k \geq t \\ 0, & y_j^k < t \end{cases} \quad (5)$$

第 3 类:偏离越小越好,即网络能够提供的值与业务节点所要求的值 t 差距越小越好,这类参数包括功耗和费用,可由公式(6)求出:

$$Sat_j^k = \begin{cases} 1, & y_j^k < t \\ \frac{y_j^k}{p^t}, & y_j^k \geq t \end{cases} \quad (6)$$

求出各个参数的满意度后,确定各参数的权重,采用 AHP 算法(如图 4 所示).

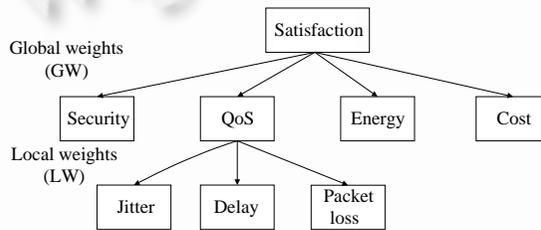


Fig.4 AHP algorithm

图 4 AHP 算法

图 4 中, $GW = \{w_\alpha, w_\beta, w_q, w_\eta\}$, $LW = \{w_\delta, w_\epsilon, w_\gamma\}$, 最终所有因素的权重为 $W = \{w_\alpha, w_\beta, w_q, w_\delta, w_q, w_\epsilon, w_q, w_\gamma, w_\eta\}$. 各个参数的权重见表 1、表 2.

Table 1 GW weight factors

表 1 GW 权重因素

	W_α	W_β	W_q	W_η	GW
Security	1	2	1/3	2	0.2
Energy	1/2	1	1/6	1	0.1
QoS	3	6	1	6	0.6
Cost	1/2	1	1/6	1	0.1

Table 2 LW weight factors

表 2 LW 权重因素

	W_δ	W_ϵ	W_γ
Conversation	0.45	0.1	0.45
Stream	0.7	0.1	0.2
Background	0.1	0.8	0.1

最后,利用公式(3)求出网络的整体满意度.

为业务流选择网络,只要依据一定的原则找出二分图 G 的一个子图 G_t ,使得 G_t 中的 \bar{X} 节点的度都 ≤ 1 ,即为网络选择的一种匹配结果.下面讨论本机制中网络选择的原则——公平性原则.

1.2 公平性考虑

为了计算系统的公平性,首先需要将网络满意度作如下的归一化处理:

$$M_{ij}^* = \frac{M_{ij} - M_i^{\min}}{M_i^{\max} - M_i^{\min}} \quad (7)$$

从公式(7)可以看出,业务流 i 最终选择网络的满意度 $M_i^* \in (0,1)$. 当 $M_i^* = 1$ 时,业务流被接入满意度最大的网

络; $M_i^* = 0$ 时, 业务流以最小的满意度被执行. 下面可由 M_i^* 和业务流的重要程度 v_i 定义得出系统的公平性指数.

定义 4. 公平性指数:

$$F = \frac{\left(\sum_i^n \frac{M_i^*}{v_i} \right)^2}{n \sum_i^n \left(\frac{M_i^*}{v_i} \right)^2} \quad (8)$$

其中, M_i^* 是第 i 个业务流的满意度, $v_i \in (0, 1)$ 是业务流的重要程度, 与业务流服务的类型和服务等待的时间有关. 一般来说, 实时性业务的重要程度高于非实时业务.

不难证明 $F \in (0, 1)$, F 越大, 系统的公平性越好, 特别是当

$$\frac{M_1^*}{v_1} = \frac{M_2^*}{v_2} = L = \frac{M_m^*}{v_m} = M^{\%} \quad (9)$$

时 $F=1$, 系统满足文献[12]定义的比例公平原则, $M^{\%}$ 称为系统的满意度比例公平参数. 因此, 设计算法时应使 F 值尽可能地接近 1. 在本文中, 我们规定 $F \in (0.9, 1)$ 的区间中, 算法满足公平性条件.

1.3 系统目标

由第 1.1 节的讨论和定义 4 可以得出, 本算法的目标问题为:

目标 1. Maximize $\sum_i^n M_i^*$, Subject to F 以及网络带宽的约束条件 $\sum_{i=1}^n x_{ij}^{bw} \leq y_j^{bw}$ 对于每一个 j . 其中, x_{ij}^{bw} 为业务流占用网络 j 的带宽.

由目标 1 可以看出, 系统的网络选择算法应从以下 3 个方面进行考虑: 一是避免发生冲突时, 每次都转移同一个业务节点到满意度更低的网络, 导致某一个业务节点 M_i 过低, 从而使 F 值过低; 二是初始设定 $M^{\%}$ 的值时, 应取 M_i^* 符合公式(7)定义的最大值, 以使 $\sum_i^n M_i^*$ 最大; 三是既要考虑一次网络选择之中的公平性, 又要考虑多次网络选择之中的公平性. 如果某个业务流在一次选择中被牺牲掉了, 其重要程度将会增加, 在下个时间片的选择过程中应使其获得较大的满意度.

2 多业务流网络选择公平性算法(MFNSF 算法)

2.1 MFNSF 算法

由第 1.3 节定义的系统目标可知, 系统分配的原则将会去寻找 $\text{Max } F$ 条件下的 $\text{Max } \sum_i^n M_i^*$, 由此得出 $M^{\%}$ 的计算公式为

$$M^{\%} = \frac{1}{\text{Max}_{i \in \{1, 2, \dots, n\}} v_i} \quad (10)$$

为了保证系统的公平性原则, 边的权重赋值为边上的归一化满意度/业务流重要程度与满意度公平比例参数的距离, 距离越近, 边上的权重越大.

$$\omega_j = 1 - |M_{ij}^* - M^{\%} v_i| \quad (11)$$

MFNSF 算法的基本思想是, 首先找出每个业务节点的权重最大的边, 为业务节点赋值:

$$L(x_i) = \text{MAX } \omega_j \quad (12)$$

这时可能出现两种情况: 1) 所有网络节点的带宽都能够满足业务节点的需求, 则当前的分配结果即为满足目标 1 定义的网络选择结果; 2) 出现网络节点不能满足业务节点的情况, 这时需要对分配结果进行调整, 调整的原则是, 在发生冲突的业务节点中寻找它们权重次优的网络, 并将权重下降最小的节点转移到其次优节点上去.

MFNSF 算法的具体流程是:

Step 1. 按照定义 1 和定义 2 来定义网络节点集合 Y 和业务节点集合 X .

Step 2. 分别计算每个业务节点对于网络的满意度,作为二分图 G 的边的权重 ω_{ij} .

Step 3. 若图中只有一个业务节点,选择具有 $\text{Max} \omega_{ij}$ 节点作为网络选择的结果.

Step 4. 若图中业务节点数大于 1,对业务 G_j 节点赋值 $L(x_i)=\text{Max} \omega_{ij}$,网络节点赋值 $L(y_j)=0, i, j=1, 2, \dots, t, t=\max(n, m)$.

Step 5. 求出边集 $E_i: \{(x_i, y_i) | l(x_i) + l(y_i) = w_{ij}\}$ 及 $G_i = \{X, Y_i, E_i\}$.

Step 6. 若能在 G_i 中找出一个的子图 G'_i , 满足 X 中每个 x_i 的度 $D(x_i)=1$ 并且 $y_j^{bw} > \sum_{k \in N_{G'_i}(y_j)} x_k^{bw}$, 其中, $y_j \in Y_i$,

$N_{G'_i}(y_j) \in X$ 是与 Y_i 中节点邻接的点的集合, 则 $G_i \leftarrow G'_i$ 即为所求的分配结果, 否则转下一步.

Step 7. 选取 G_i 中具有 $D(x_i)=1$ 的一子图 $G'_i, G_i \leftarrow G'_i$, 在 Y_i 集合中找出具有 $y_j^{bw} < \sum_{k \in N_{G'_i}(y_j)} x_k^{bw}$ 的点 y_j , 令

$A \leftarrow \{y_j\}, B \leftarrow \{N_{G'_i}(y_j)\}$, 若 $Y_i=A$, 转 Step 10.

Step 8. 按下式计算 a 值: $a = \min_{\substack{x_i \in B \\ y_j \in A}} \{l(x_i) + l(y_j) - \omega_{ij}\}$, if $l(x_i) + l(y_j) - \omega_{ij} < 0, a = +\infty$, 转 Step 10.

$$l'(x_i) = \begin{cases} l(x_i) - av_i, & x_i \in B \\ l(x_i), & \text{其他} \end{cases}, l'(y_j) = \begin{cases} l(y_j) - av_j, & x_i \in A \\ l(y_j), & \text{其他} \end{cases}$$

根据 l' 求出 E_r, G_r .

Step 9. 在集合 X 中找出 x_0 , 使得 $(E_r - E_i) \in N_{G_r}(x_0), E_r = E_r - (N_{G_r}(x_0) - (E_r - E_i)) = 2E_r - N_{G_r}(x_0) - E_i, l \leftarrow l', G_i \leftarrow G_r$,

转 Step 8.

Step 10. 找出一个 B 中具有 $\min v_i$ 的 $x_i, X' = X - \{x_i\}$, 重新求出 $G'_i, G_i \leftarrow G'_i$, 转 Step 6.

图 5 中, 业务流 1 和业务流 2 同时选择了网络 2, 而网络 2 的带宽并不能同时满足业务流 1 和业务流 2. 根据算法规则, 业务节点将发生转移, 如图 6 所示. 最终的分配结果是, 两个业务选择了最优网络, 两个业务选择了次优网络, 一个业务选择了第三优网络, 算法一共调整了 4 次.

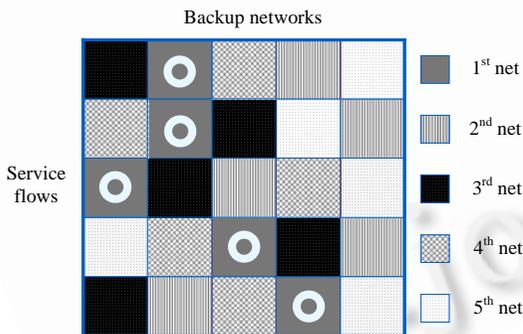


Fig.5 Before the algorithm

图 5 算法开始前

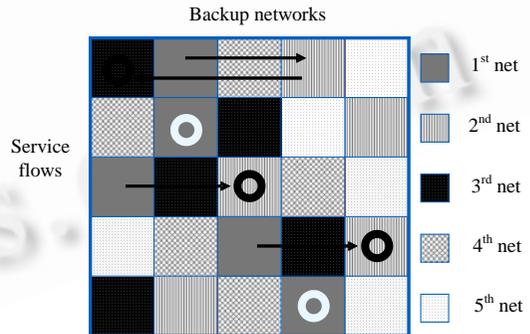


Fig.6 After the algorithm

图 6 算法结束后

2.2 算法的正确性和复杂度分析

由上述的算法过程可以看出, 当业务节点 i 由其第 k 个网络节点调整到第 $k+1$ 个网络节点时, 满意度的变化为

$$\omega_i(k+1) = \rho \omega_i(k) \tag{13}$$

命题 1. 公式(13)满足文献[13]定义的两个条件: (1) 有效性条件(所有的 ω_i 都大于 0); (2) 稳定性条件(所有的 ω_i 按照最大公平性指数收敛).

证明: 将公式(11)代入公式(13)可以得出:

$$1 - |M_i^*(k+1) - M^{\%}v_i| = \rho[1 - |M_i^*(k) - M^{\%}v_i|] \tag{14}$$

由公式(3)和公式(9)可以得出: $0 < M_i^* < 1, 0 < M^{\%}v_i = \frac{V_i}{V_{\max}} < 1$, 当 $M_i^*(k) > M^{\%}v_i, M_i^*(k+1) > M^{\%}v_i$ 时, 公式(13)变为如下形式:

$$1 - (M_i^*(k+1) - M^{\%}v_i) = \rho[1 - (M_i^*(k) - M^{\%}v_i)] \tag{15}$$

整理得到:

$$M_i^*(k+1) = (1 + M^{\%}v_i) - \rho(1 - M_i^*(k) + M^{\%}v_i) \tag{16}$$

由算法流程可知:

因为 $0 < M_i^*(k) < M_i^*(k+1) < 1$,

所以 $M_i^*(k) < (1 + M^{\%}v_i) - \rho(1 - M_i^*(k) + M^{\%}v_i) < 1$

$$0 < \frac{M^{\%}v_i}{1 - M_i^*(k) + M^{\%}v_i} < \rho < \frac{1 + M^{\%}v_i - M_i^*(k)}{1 - M_i^*(k) + M^{\%}v_i} = 1 \tag{17}$$

同理可证, 当以下条件满足时, 公式(18)成立:

- (1) $M_i^*(k) > M^{\%}v_i, M_i^*(k+1) < M^{\%}v_i$;
- (2) $M_i^*(k) < M^{\%}v_i, M_i^*(k+1) > M^{\%}v_i$;
- (3) $M_i^*(k) < M^{\%}v_i, M_i^*(k+1) < M^{\%}v_i$,

$$0 < \rho < 1 \tag{18}$$

综上所述, 当 $\omega_i(k) > 0$ 时, $0 < \rho < 1$, 公式(13)满足条件(1)和条件(2).

由文献[13]可知, 当公式(13)满足有效性和稳定性条件时, 算法具有正确性.

由表 3 的算法流程可知, MFNSF 算法在网络带宽不能满足多个业务流同时承载的情况下将会发生调整. 因此, 算法的复杂程度与网络性能和业务流需求有很大的关系. 在最理想的情况, 接入网络都具有很大的带宽, 各种业务都在其最优网络被接受. 此时, 算法的复杂度为 $O(1)$; 在最坏的情况下, 由于业务网络的带宽限制, 各个业务流将会被依次转移至最差网络, 此时, 算法退化为传统的多次单业务流选择问题, 其算法复杂度将达到 $O(M^N)$, 从而无法在实际部署中应用. 并且这个时候, 各个业务流都将在其较差的接入网络上运行, 造成整体的满意度下降. 因此, 应对算法进行一定的约束, 设定每次网络选择调整的次数门限值 K_{\max} . 当进行每次多业务流网络选择时, 系统将记录网络选择调整的次数, 当调整的次数达到门限值 K_{\max} 时, 算法将结束, 并在每个带宽能力不足的网络节点中阻塞掉满意度较低的业务, 以保证整体的满意度较高, 则算法的复杂度为 $O(K_{\max})$.

Table 3 Flow parameters

表 3 业务流参数

	Service flow 1	Service flow 2	Service flow 3
BW (Mb/s)	1	2	2
Jitter (ms)	6~9	8~10	15~30
Delay (ms)	15~45	20~45	50
Packet loss ratio (%)	0.07	0.07	0.07
Cost	1	1	0.7
Security	7	6	5

在实际的网络运行条件下, MFNSF 算法调整次数往往不会达到门限值, 从第 3.6 节图 12 的分析中可以看到, 在本文的仿真环境中, MFNSF 算法每次进行网络选择时的平均调整次数(即在进行一次网络选择过程中, 所有业务流由于带宽因素调整所选网络次数)的平均值在 1.5 次~2.5 次之间.

2.3 算法的正确性和复杂度分析

定义 5. MFNSF 算法的通信开销定义为, 某一时间段 t 内, 由新业务流到达导致业务节点发生变化而引起的网络重新选择信令开销 $Cost_1$, 与由移动终端移动出现有小区导致网络节点发生变化而引起的网络重新选择信令开销 $Cost_2$ 之和.

由于本算法的实施(包括业务流节点变化监测、网络节点变化监测以及计算过程)都是在网络侧进行的,因此,每次网络重新选择的通信开销仅仅包括网络侧将计算结果通知移动终端进行相应的变化而产生的信令。

设移动终端能够接收 n 种业务流,每种业务流的到达率服从泊松分布,为 $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$,则该移动终端总的业务到达率服从 $\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n$ 的泊松分布,在时间 t 内,有 K 个业务流到达的概率为

$$P(\lambda, t, k) = \frac{(\lambda t)^k e^{-\lambda t}}{k!} (\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n) \quad (19)$$

由此可以得出,业务节点变化而引起的网络重新选择信令开销为

$$Cost_1 = \sum_0^{\infty} k P_k \quad (20)$$

定义 t_2 为移动终端所有可用接入网络中最微小区内的驻留时间,假设 t 时间内移动终端只在最微小区内发生位置变化且微小区均近似为圆形,由文献[15]可知,驻留时间服从平均值为 $1/u_{mi}$ 的指数分布,其中,

$$u_{mi} = \frac{E[v]L}{\pi S} \quad (21)$$

其中, S, L 为微小区的面积和周长, $E[v]$ 为移动终端的平均速度。

由此我们可以得出, t_2 的密度分布函数为

$$f_{t_2}(t_2) = u_{mi} e^{-u_{mi} t_2} \quad (22)$$

当移动终端的小区驻留时间 $t_2 < t$ 时,在 t 时间间隔内将会发生网络重新选择.定义 P_u 为在 t 时间内至少发生一次由于网络节点变化而引起的网络重新选择的概率,则

$$P_u = P[t_2 < t] = \int_0^t u_{mi} e^{-u_{mi} t_2} dt_2 = 1 - e^{-u_{mi} t} \quad (23)$$

由于指数分布的无记忆特性,在 t 时间内发生 n 次网络节点的变化概率为 P_u^n ,由此得出:

$$Cost_2 = \sum_{i=1}^{\infty} i P_u^i = \frac{P_u}{(1 - P_u)^2} \quad (24)$$

由定义 5 可知, MFNSF 算法的通信开销为

$$Cost = Cost_1 + Cost_2 = \sum_0^{\infty} k P_k + \frac{P_u}{(1 - P_u)^2} \quad (25)$$

由公式(25)可以得出,算法的通信开销与移动终端的移动速度有很大的关系.当移动终端处于运动过程中,运动速度 $E[v]$ 增大时,由公式(21)可知,参数 u_{mi} 将会增大,导致公式(23)的网络重新选择概率 P_u 增大,算法的通信开销也随之增加.如果移动终端处于高速运动的过程中,算法的通信开销将会变得很大.因此,对于高速用户应使业务节点尽可能地连接在具有宏小区网络上,避免过于频繁的切换。

定义 6. MFNSF 算法的计算开销为每次网络重新选择时的算法复杂度,由第 2.2 节分析可知为 $O(K_{\max})$.

由于 MFNSF 算法计算过程在网络侧实施,移动终端不需要进行计算,因此计算开销为网络侧应用 MFNSF 算法需要调整的次数,即算法的时间复杂度。

3 实验结果及性能分析

3.1 仿真场景

本文的仿真场景对文献[2]中的场景进行了扩展,如图 7 所示.仿真区域由 1 个 WiMAX 网络、1 个 UMTS 网络和 5 个 WLAN 网络组成.我们首先考虑当多模终端从 A 区域进入 B 区域时,多模终端将会发现新增加了 3 个可用的接入网络 WLAN 2, WLAN 4 和 WLAN 5,这样 B 区域共有 7 个可用的接入网络.此时,终端将会通知 IASA 对其进行接入网络的重新选择.假设此时终端上同时运行了 3 种业务,分别为语音类型的业务、流媒体类型的视频业务和背景型的数据下载业务.各个业务流参数的需求见表 3,其重要程度分别为 1, 0.7 和 0.8.在某一时刻,各个网络所能提供的接入能力见表 4.这样,我们在 B 区域就构建了一个有 3 个业务节点、7 个网络节点组

成的二分图网络选择模型.

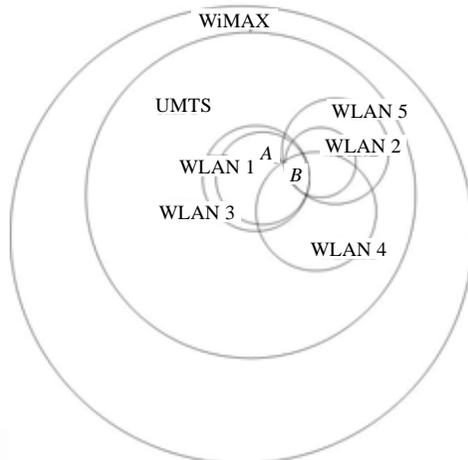


Fig.7 Network selection simulation scenario

图 7 网络选择仿真场景

Table 4 Network parameters

表 4 网络参数

	UMTS	WiMAX	WLAN 1	WLAN 2	WLAN 3	WLAN 4	WLAN 5
BW (Mb/s)	2	5	11	11	11	11	11
Jitter (ms)	6	8	10	9	9	10	11
Delay (ms)	19	30	45	40	39	42	35
Packet loss ratio (%)	0.01	0.06	0.04	0.03	0.05	0.08	0.05
Cost	0.9	0.5	0.2	0.2	0.3	0.2	0.1
Security	8	7	6.5	6	5	6	5

下面将分别对算法区分不同类型业务的能力、保证公平性的能力、对网络负载的影响情况以及算法所能取得的整体匹配度情况进行仿真分析.

3.2 区分业务类型及移动性对于性能的影响

在对多个业务流进行切换决策分配时,决策结果应该体现业务流类型和重要程度对它们获得的匹配度的影响.即使网络状况发生变化,对要求高的业务流,分配后它获得的匹配度也应该维持在相对较高的值上.这种区分业务类型的能力是保证公平性的需要,也是算法稳定性的体现.

下面我们来考察 MFNSF 算法区分服务的能力.在 B 区域内,假设业务流需求不变,改变网络的状况,对表 4 中时延、丢包率作微小调整,让其每次按照 2%~5% 的幅度随机变化,计算进行匹配后各个业务流获得的匹配度情况.进行了 10 次仿真,结果如图 8 所示.可以看到,当网络情况发生变化的时候,3 种业务的匹配度将会按照其重要程度一致地发生变化,业务流 1 的匹配度始终大于业务流 3,高出 0.03~0.1,而业务流 3 的匹配度始终大于业务流 2,高出 0.08~0.15.这表明,MFNSF 算法能够按照网络的实际情况和业务流的重要程度分配业务流.

由上面的分析可以看出,当网络情况发生变化的时候,MFNSF 算法为了保证区分业务的服务能力,终端上的各种业务的满意度都会随之发生变化.当移动终端高速运动时,业务流的满意度将会不断地变化,影响服务质量连续性.因此,对于高速终端,应尽可能地使用宏小区承载业务,以减少服务满意度的变化.

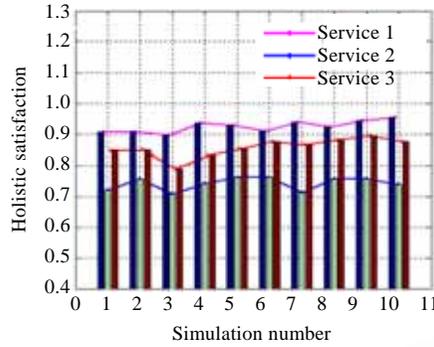


Fig.8 Differentiated services

图 8 区分服务

3.3 公平性保证

为了验证 MFNSF 算法保证公平性的能力,我们选择了与文献[14]的算法进行仿真比较.文献[14]的算法是为了解决传统的业务流切换问题而设计的.利用该算法解决此类问题的思路是,设计一个优先级队列,将业务流按照优先级大小依次放入队列中,从队列的头部开始进行网络选择.这种算法实施简单,但是并不能很好体现公平性,排在队列尾部的业务流将没有足够的机会获得满意的网络接入.

在如图 7 所示的场景中,我们假设业务流的需求不变,在网络情况变化的条件下比较两种算法的公平性指数.同样设置网络的时延、丢包率按照 2%~5%的幅度随机变化,共进行 100 次仿真.仿真结果如图 9 所示,其中,横坐标代表仿真次数,纵坐标表示每次分配所得到的系统公平性指数,计算方法由定义 4 给出.可以明显地看出, MFNSF 算法的公平性指数一直维持在 0.93~0.97 区间.由定义 4 可知,公平性指数为 1 表示完全公平,数值越大公平性越好.因此, MFNSF 算法存在着很好的公平性.而作为对比,传统算法的公平性指数不存在一定的规律,随着网络情况的变化而变化,在 0.3~0.95 之间随机波动.

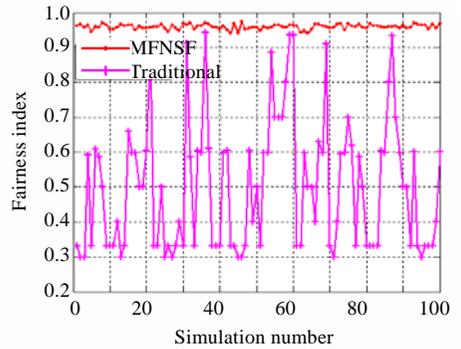


Fig.9 Fairness index

图 9 公平性指数

3.4 网络负载情况

这里,网络负载情况是指业务流经过切换和重新分配后,每个承载网络上接入的业务流数目情况.下面着重在 A 区域内考察 MFNSF 算法对网络负载均衡的影响情况.在如图 7 所示的场景中,A 区域存在着 1 个 UMTS,2 个 WLAN 和 1 个 WiMAX,4 个网络的接入能力指标见表 4 中 UMTS,WiMAX,WLAN 1 和 WLAN 3 等列所示.假设 A 区域中每次有 10 个业务流进行切换选择,由此我们在 A 区域构建了一个由 10 个业务节点、4 个网络节点组成的二分图模型.

我们假设在一段时间内有 100 个多模终端进入了 A 区域,每次都有 10 个业务流参与到网络的重新分配中,业务对带宽、时延等的需求每次按照 5%~10%的幅度随机变化.记录每次分配到 4 个网络中业务流的数目,最终的仿真结果如图 10(a)所示.图中横坐标表示进行业务流切换决策的次数,纵坐标表示某网络累计连接的业务流总数.从图中可以看出,随着切换次数的增加,每个网络中承载的业务流数目也在增加,但是数目增长的趋势一直很稳定,即算法每次都能将业务流均衡地分配到各网络上.

为了进行对比,我们也对文献[14]中的算法进行了仿真,结果如图 10(b)所示.可以看出,类似于文献[14]这种不是专门为多业务流切换决策设计的算法,其分配结果将会使业务流集中到某个状况较好的网络上.其他网络只承载较少的业务流,使得状况较好的网络负载增加过快.由此可以看出,使用 MFNSF 算法,在一段时间内可以

使某个区域内的接入网络达到负载均衡的效果,避免了某一网络的负载过大.

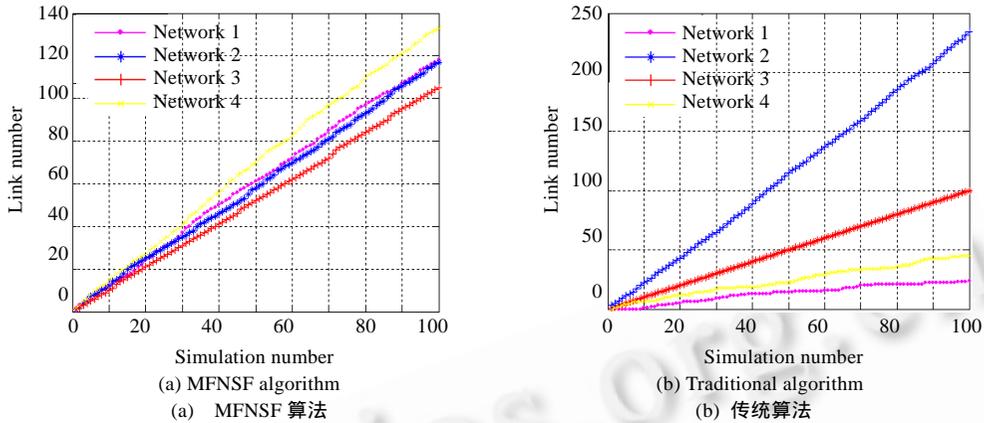


Fig.10 Network connection situation

图 10 网络连接情况

3.5 网络整体匹配度

仍然在 A 区域构建二分图模型,考察了最大匹配度情况、最小匹配度情况、不考虑公平性时的二分图匹配情况以及 MFNSF 算法.其中,最大匹配度情况是指不考虑网络带宽限制的情况下,业务流所能达到的最大匹配度;最小匹配度是指当每个业务流选择其匹配度最低的网络时,所达到的匹配度的平均值;不考虑公平性的算法是指在为二分图赋予权重时,不考虑业务流本身的重要程度,由此做出业务流切换选择的算法.

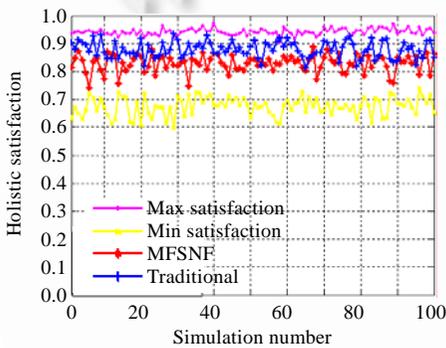


Fig.11 Average match degree

图 11 平均匹配度

我们仍然假设有 100 个终端,每个终端上运行 10 个业务流.业务流需求以及网络能力参数都在 2%~5%的幅度内随机变化,计算 4 种算法每次平均匹配度情况,仿真结果如图 11 所示.可以看出,最大匹配度在 0.95 左右波动,最小匹配度维持在 0.7 左右,MFNSF 算法的匹配度已经接近于最高匹配度,平均为 0.82 左右,稍稍低于不考虑公平性的二分图匹配算法.MFNSF 算法的公平性是以一定的匹配度作为代价的,但整体的平均匹配度仍在一个比较高的范围

之内.

3.6 算法的正确性和复杂度

图 12 显示了在图 11 的情况下,MFNSF 算法每次进行网络选择时的平均调整次数.即在进行一次网络选择过程中,所有业务流由于带宽因素调整所选网络次数的平均值.从命题 1 的证明可知,MFNSF 算法满足有效性和可靠性两个条件.由图 11 可知,每次网络选择的满意度大于 0;由图 12 可知,算法具有收敛性,但每次网络选择所要调整的的次数与业务流的需求和网络的实际情况有关.

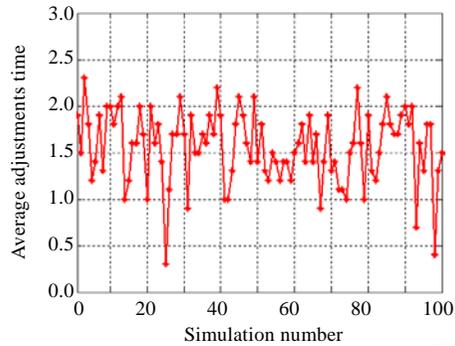


Fig.12 Average number of adjustments

图 12 平均调整次数

4 结 论

本文提出了一种解决多业务流网络选择问题的方法,该方法基于二分图匹配模型设计,综合了网络的承载能力和业务流的要求,兼顾了用户的满意度和公平性两个方面.并对算法进行了理论分析和仿真验证.仿真结果显示,该算法能够在保证系统公平性的前提下,取得较好的总体满意度.

References:

- [1] Chen YP, Yang YH. A new 4G architecture providing multimode terminals always best connected services. *IEEE Wireless Communication*, 2007.
- [2] Song Q, Jamalipour A. A network selection mechanism for next generation networks. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on ICC 2005. Vol.2, Communications*, 2005. 1418–1422. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1494578>
- [3] 3GPP TR 24.801 V0.5.1. Technical specification group core network and terminals. 2007.
- [4] <http://www.ieee802.org/21>
- [5] Gustafsson E, Jonsson A. Always best connected. *IEEE Wireless Communication*, 2003,10(1):49–55. [doi: 10.1109/MWC.2003.1182111]
- [6] Fodor G, Eriksson A, Tuoriniemi A. Providing quality of service in always best connected networks. *IEEE Communications Magazine*, 2003,41(7):154–163. [doi: 10.1109/MCOM.2003.1215652]
- [7] Xing B, Nalini V. Multi-Constraint dynamic access selection in always best connected networks. In: *Proc. of the MobiQuitous 2005*. 2005. 56–64. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1540987>
- [8] Tripathi ND, Reed JH, Vanlandingham HF. Adaptive handoff algorithm for cellular overlay systems using fuzzy logic. In: *Proc. of the IEEE 49th Vehicular Technology Conf. Vol.2*, 1999. 1413–1418. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=780580>
- [9] Park H, Yoon S, Kim T, Park J, Do M, Lee J. Vertical handoff procedure and algorithm between IEEE 802.11 WLAN and CDMA cellular network. In: *Proc. of the 7th CDMA Int'l Conf. on Mobile Communications*. 2003. 103–112.
- [10] Roveri A, Chiasserini C, Femminella M, Melodia T, Morabito G, Rossi M, Tinnirello I. The RAMON module: Architecture framework and performance results. In: Marsan MA, Corazza G, Listanti M, Roveri A, eds. *Proc. of the QoS-IP 2003. LNCS 2601*, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2003. 471–484.
- [11] ITU-T Y.1541. Network Performance Objectives for IP-Based Services. 2006 (in Chinese).
- [12] Jiang Y, Lin C, Wu J. Integrated performance evaluating criteria for network traffic control. In: *Proc. of the IEEE Symp. on Computers and Communications 2001. Tunisia: IEEE Communications Society Press*, 2001. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=935412>
- [13] Harada F, Nakamoto Y. Adaptive resource allocation control for fair QoS management. *IEEE Trans. on Computers*, 2007,56(3): 471–484.

- [14] Adamopoulou E, Demestichas K, Koutsorodi A, Theologou M. Intelligent access network selection in heterogeneous networks. In: Proc. of the 2nd Int'l Symp. on Simulation Results Wireless Communication Systems. 2005. 279–283. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1547704>
- [15] Wu XX, Mukherjee B, Bhargava B. A crossing-tier location update/paging scheme in hierarchical cellular networks. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2006,5(4):471–484.

附中文参考文献:

- [11] ITU-T Y.1541. IP 服务的网络性能目标.2006.



袁尧(1982 -),男,辽宁辽阳人,博士生,主要研究领域为下一代移动网络,网络服务质量保证.



张玉成(1981 -),男,博士生,主要研究领域为移动通信网络.



董雯霞(1983 -),女,硕士,主要研究领域为移动通信网络.



郑如松(1983 -),男,硕士,主要研究领域为宽带无线通信.



杨育波(1981 -),男,博士生,主要研究领域为宽带移动通信.



石晶林(1972 -),男,博士,研究员,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为下一代移动通信网络,宽带移动通信.