

基于网络选择的视频通信带宽博弈算法

魏淑芝^{1,2}, 朱琦^{1,2}

(1. 南京邮电大学 江苏省无线通信重点实验室, 江苏 南京 210003;
2. 南京邮电大学 教育部宽带无线通信与传感网技术重点实验室, 江苏 南京 210003)

摘要: 针对异构无线网络的视频通信提出一种基于网络选择的带宽博弈算法 (BAG-NS)。该算法首先根据不同用户视频特性及当前网络状况, 采用层次分析法和熵值法确定网络评价参数的权重, 选择最佳网络; 其次构建了基于收益和代价的用户效用函数, 通过分布式迭代算法得到其纳什均衡解, 并证明了纳什均衡的存在性和唯一性。仿真结果表明, 该算法使不同特性的视频用户合理地分布在不同网络, 能兼顾用户公平性和网络拥塞控制, 增加网络资源利用率, 减小用户视频失真, 提高用户视频质量。

关键词: 视频通信; 异构网络; 网络选择; 带宽分配; 纳什均衡
中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A

Bandwidth allocation games based on network selection for video communication

WEI Shu-zhi^{1,2}, ZHU Qi^{1,2}

(1. Jiangsu Key Laboratory of Wireless Communications, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China;
2. Key Laboratory on Wideband Wireless Communications and Sensor Network Technology of Ministry of Education, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: A bandwidth allocation game based on network selection (BAG-NS) was proposed for video communication in heterogeneous wireless networks. Firstly, according to the video characteristics of different users and current network conditions, the algorithm calculated the weights of network factors and selected the optimum network by combining analytic hierarchy process and entropy theory. Secondly, the user's utility function with payoff and cost was designed, and a distributed iterative algorithm is used to obtain the Nash equilibrium. Then the existence and uniqueness of the Nash equilibrium are proved. Simulation results show that the proposed algorithm enables different users to reasonably distribute in different networks and takes users' fairness and network congestion control into consideration, which increases the utilization of network resources, reduces the users' video distortion, and improves the users' video quality.

Key words: video communication; heterogeneous networks; network selection; bandwidth allocation; Nash equilibrium

1 引言

随着通信网络技术和用户不断增长的
业务需求, 未来无线网络环境将是一个多种通信技
术并存互补的异构网络, 各个网络协作融合以满足

不同用户的不同业务需求。在未来的无线网络中,
视频通信业务将占据重要地位。如何在有限的网络
资源条件下, 考虑网络的异构性, 根据用户需求以
及网络当前状况为用户选择最合适的网络^[1,2], 并且进
行公平有效的带宽资源配置^[3], 为每个接入用户提供

收稿日期: 2013-12-28; 修回日期: 2014-03-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61171094); 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(2013CB329005); 国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(2014AA01A705); 江苏省自然科学基金重点研究专项基金资助项目(BK2011027)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61171094); The National Basic Research Program of China (973 Program) (2013CB329005); The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2014AA01A705); The Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK2011027)

高质量的视频通信服务，实现网络运营商和用户终端的双赢，是异构网络融合的关键技术之一。

目前，已有大量文献研究关于异构网络中带宽分配问题，近几年随着视频通信备受关注，异构网络中视频通信的带宽分配也成为热点，大部分的文献是基于博弈论方法以及从最优化效用函数方法进行研究。文献[4, 5]从非合作博弈的角度解决异构网络下带宽分配问题，但是都没有考虑到具体视频用户的不同业务特性和不同带宽需求。文献[6]基于讨价还价博弈模型，提出一种基于效用公平的带宽分配算法，解决用户效用公平问题。文献[7]考虑到视频用户的不同业务特性及带宽需求，基于率失真模型，解决单网络中多用户带宽分配的有效性和公平性问题。文献[8]基于价格机制提出一种单网络下多视频用户的带宽分配算法，该算法能有效约束自私的用户在带宽分配过程中向网络谎报真实所需带宽以获得更多的收益。但文献[7,8]中的带宽分配算法假设所有用户的占用带宽之和等于网络的可用带宽，并没有考虑到实际场景中可能会导致网络的拥塞。文献[9]通过最大化用户的效用函数，解决了异构网络下多用户带宽分配问题，该算法中的每个视频用户接入全部网络，每个用户在每个网络占用的带宽根据该网络的可用带宽与全部网络可用带宽的比值来确定，没有考虑到不同用户视频特性以及当前网络状况，选择合适的网络进行接入。文献[10]基于 Stackelberg 博弈模型提出一种满足网络和用户效用最大的资源分配方案。不同网络进行价格博弈，在网络价格确定的情况下用户进行非合作的带宽博弈，通过分布式迭代算法，获得用户最优的价格策略和最优带宽分配策略。在该算法中，同时考虑到用户效用和网络收益和拥塞问题，但是该算法只考虑了在异构网络覆盖区域内的 2 大类用户，没有具体考虑到在视频业务中每个用户不同的业务特性及其带宽需求。同时，在异构网络重叠覆盖区域内默认每个用户接入全部网络，而没有根据不同用户视频的特性以及当前网络状况进行网络选择。

针对以上问题，提出了基于网络选择的带宽博弈算法 (BAG-NS)，该算法首先根据不同用户视频特性以及当前网络状况进行网络选择，基于层次分析法和熵值法获得网络选择参数的权重，采用多属性决策为用户选择一个最合适的网络进行视频传输；其次在用户选择接入网络后，基于

非合作博弈模型构建了一种基于收益和代价的用户效用函数，采用分布式迭代算法得到用户效用函数的纳什均衡解，实现用户带宽的最终分配。BAG-NS 算法的网络选择机制考虑到不同用户带宽需求和视频特性，构建的效用函数兼顾用户公平性和网络拥塞控制，解决了异构网络视频通信的网络选择及其带宽分配问题，能够使具有不同带宽需求和视频特性的用户合理分布在不同的网络，更加公平有效地利用有限的网络带宽资源，从而使网络利用率更高，用户平均视频失真度更小，用户的平均视频质量更好。

2 系统模型

2.1 网络模型

BAG-NS 算法的网络模型如图 1 所示。在无线异构网络由多个网络覆盖的区域范围内，存在多个具有多模终端的用户。每个用户选择接入一个网络进行视频传输， R_i 为用户 i 接入网络后所获得的带宽，记 $R = (R_1, R_2, \dots, R_i, \dots)$ 为所有用户的带宽向量，假设 $R_{i\min}$ 和 $R_{i\max}$ 分别代表每个用户 i 传输视频所需的最小带宽和最大带宽。若 $R_i < R_{i\min}$ ，网络无法满足视频用户基本质量需求，则用户不选择接入该网络；若 $R_i > R_{i\max}$ ，超过了视频用户所需的最大带宽需求，则取 $R_i = R_{i\max}$ ，因此

$$R_{i\min} \leq R_i \leq R_{i\max} \quad (1)$$

假设最终接入网络 j 的用户数为 M ，网络 j 的可用带宽记为 C_j ，则

$$\sum_{i=1}^M R_i \leq C_j \quad (2)$$

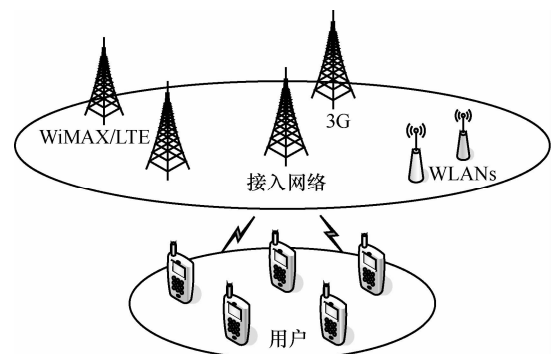


图 1 网络模型

2.2 视频 DR 模型

在有限的网络资源下为用户进行合理有效的

资源分配,使用户获得更高的视频质量。现已有大量的文献研究视频质量评价模型,传统的评价标准分为主观评价方法和客观评价方法。峰值信噪比(PSNR, peak signal to noise ratio)是目前最常用的评价标准之一,现有的大部分论文都广泛采用此评价标准^[6-9]

$$PSNR = 10 \lg \frac{255^2}{D} \quad (3)$$

其中, D 是视频流的失真,定义为均方误差(MSE, mean squared error)。在视频进行传输之前,需要在发送端对原始视频进行压缩编码以适应有限的网络传输带宽。视频的压缩编码会导致视频失真,造成视频质量下降。采用高码率,视频失真较小,视频质量较高;采用低码率,视频失真较大,视频质量较差。率失真模型用来描述编码的码率和失真的关系,在失真与码率之间找到折中点。不同的编码方式采用的模型不同,H.264 标准由于具有更高的编码效率以及高性能被广泛应用,因此文中采用基于 H.264 的率失真模型^[11]

$$D(R) = aR^{-b} \quad (4)$$

其中, R 是视频流的码率, a 和 b 是表征视频序列率失真模型的参数,由视频序列的内容特性决定,不同的视频序列其参数值不同,并且 $a > 0$, $b > 0$ 。

将式(4)代入式(3)可以得到用户 i 带宽为 R_i 时获得的视频质量

$$PSNR_i = 10 \lg \frac{255^2}{a_i} + \frac{10}{\ln 10} b_i \ln R_i \quad (5)$$

3 基于网络选择的带宽博弈算法

3.1 网络选择机制

BAG-NS 算法采用多属性决策的网络选择机制,在网络进行用户带宽分配之前根据不同用户视频特性及其带宽需求和网络当前状况,为视频用户选择一个合适的网络进行接入。影响用户选择接入网络的因素有很多,不同场景下每个因素对接入选择的影响度不同(即权重系数不同)。综合考虑用户的业务特性及其质量需求和网络的客观属性,结合主观决策和客观决策,采用层次分析法和熵值法确定网络选择评价参数的权重^[12]。

3.1.1 标准化评价参数

在 BAG-NS 算法中,考虑到用户视频业务特性

及其网络资源状况,使用以下 4 个参数作为网络选择的评价参数,分别是:用户的视频失真度(d)、用户未接入的网络可用带宽(e)、用户接入成本(f)以及用户接入后的网络负荷程度(g)。在网络未接入任何视频用户时,系统根据当前所有网络的可用带宽以及用户特性,给出当前网络状况下的视频质量门限值 $PSNR_{thr}$,用户只选择接入能满足其 $PSNR_{thr}$ 的网络。由于不同用户的视频特性,对于相同的视频质量 $PSNR_{thr}$,参数值 b_i 小的用户需要更多的带宽。因此考虑到用户接入网络后进行博弈获得的视频质量公平性,用户按照参数值 b_i 从小到大的顺序进行网络选择。假设视频用户 i 进行网络选择时,网络 j 已有 m 个视频用户接入,视频用户 i 根据系统给出的 $PSNR_{thr}$ 以及自身的视频参数 a_i 和 b_i ,计算相应的带宽需求 $R_{i,thr}$

$$R_{i,thr} = \exp \left(\frac{PSNR_{thr} - 10 \lg \frac{255^2}{a_i}}{\frac{10}{\ln 10} b_i} \right) \quad (6)$$

由式(3)可以得到用户 i 的视频失真度为

$$D_{i,j} = a_i R_{i,thr}^{-b_i} \quad (7)$$

对于用户 i ,网络 j 的可用带宽为

$$C_{i,j} = C_j - \sum_{\substack{i'=1 \\ i' \neq i}}^m R_{i',thr} \quad (8)$$

用户 i 选择接入网络 j 的网络负荷程度定义为

$$F_{i,j} = \begin{cases} \frac{C_j}{\sum_{i=1}^m R_{i,thr}}, & \sum_{i=1}^m R_{i,thr} < C_j \\ C_j - \sum_{i=1}^m R_{i,thr} \\ \infty, & \sum_{i=1}^m R_{i,thr} \geq C_j \end{cases} \quad (9)$$

由于用户 i 的接入使接入用户所需带宽之和大于网络可用带宽,则网络出现拥塞。

用 p_j 表示网络 j 每单位带宽的价格,则用户 i 选择接入网络 j 的接入成本为

$$P_{i,j} = p_j R_{i,thr} \quad (10)$$

用 $x_{k,j}$ ($k = d, e, f, g$) 表示测量到网络 j 的评价参数 k 的值,为了消除各个评价参数的量纲效应,需要对各个评价参数值进行标准化处理^[12],用 $r_{k,j}$ ($k = d, e, f, g$) 表示标准化后网络 j 的评价参数 k

的值。根据参数的特点可分为越大越好型和越小越好型，其标准化公式也不同。对于越大越好型参数其标准化处理为 $r_{k,j} = x_{k,j} / (x_k^{\max} + x_k^{\min})$ ，对于越小越好型参数其标准化处理为 $r_{k,j} = (x_k^{\max} + x_k^{\min} - x_{k,j}) / (x_k^{\max} + x_k^{\min})$ ，其中， x_k^{\max} 和 x_k^{\min} 分别是评价参数 k 的最大值和最小值。

3.1.2 层次分析法和熵值法确定权重

层次分析法是利用一种标度将主观判断进行量化，建立判决矩阵计算得到权重向量。判决矩阵 $Z = [z_{uv}]$ 是两两参数重要性之比的矩阵， z_{uv} 表示参数 u 比参数 v 的重要程度，并且满足 $z_{uv} > 0$, $z_{vu} = 1/z_{uv} (u \neq v), a_{uu} = 1$ 。 z_{uv} 的值采用 Saaty 标度方法^[13]进行确定，如表 1 所示。

u : v 重要程度	z_{uv}
一样重要	1
稍微重要	3
明显重要	5
特别重要	7
极端重要	9

注：2、4、6、8 表示上述相邻判断的中间值，倒数表示，若 u 比 v 为 z_{uv} ，则 v 比 u 为 $1/z_{uv}$ 。

判决矩阵的参数重要程度根据业务特性和用户质量需求而定，对于视频业务，用户对视频的失真 d 最敏感，失真是视频质量最直观的体现；其次是视频对于网络可用带宽 e 的要求较高，同时也要考虑到价格成本 f ；用户对于未出现堵塞的网络负荷 g 是可以容忍的，只有在接入用户占用带宽之和大于网络可用带宽，则网络出现堵塞。根据 Saaty 标度，确定评价参数的判决矩阵 Z ，如表 2 所示。表 2 中每一行代表该行参数与 4 列所在参数两两比较的重要程度，如第 1 行的 1 代表参数视频失真 d 与自己是一样重要，3 代表参数 d 比参数可用带宽 e 是稍微重要，5 代表参数 d 比参数接入成本 f 是明显重要，7 代表参数 d 比参数网络负荷 g 是特别重要；同样地，每一列元素则是 4 行所在参数比该列参数的重要程度，如第 1 列的 1/3 代表参数 e 比参数 d 是稍微不重要，1/5 代表参数 f 比参数 d 是明显不重要，1/7 代表参数 g 比参数 d 是特别不重要。

Z	d	e	f	g
d	1	3	5	7
e	1/3	1	3	5
f	1/5	1/3	1	3
g	1/7	1/5	1/3	1

由于判决矩阵是主观判断确定的，因此与理想判决矩阵之间存在偏差。理想判决矩阵的最大特征值是 n ，其中 n 是判决矩阵的阶数， $n=4$ ；而主观确定的判决矩阵其特征值一般不为 n ，所以得到的权重向量与理想的权重向量之间存在差异，这种差异通过一致性指标 CI 进行衡量。 CI 是利用最大特征值判断矩阵偏离一致性的程度，其计算如下

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \tag{11}$$

其中， λ_{\max} 是判决矩阵 Z 的最大特征值。 CI 越大，表示判决矩阵偏离一致性的程度越大； CI 越小，表示判决矩阵的一致性越好。为了判断矩阵 Z 是否具有满意一致性，需要引入平均随机一致性指标 RI ，如表 3 所示^[13]。判决矩阵的一致性指标 CI 与同阶次的平均随机一致性指标 RI 之比称为一致性比率 CR ，即

$$CR = \frac{CI}{RI} \tag{12}$$

n	RI
1	0
2	0
3	0.58
4	0.90
5	1.12
6	1.24
7	1.32
8	1.42
9	1.45

当 $CR < 0.10$ 时，则认为矩阵 Z 具有满意的一致性，否则需要重新调整矩阵 Z 直到具有满意的一致性。确定矩阵 Z 一致性检验后，根据式(13)计算每个评价参数的权重

$$\bar{w}_u = \sqrt[n]{\prod_v z_{uv}} \tag{13}$$

根据式(14)进行归一化

$$w_u^{AHP} = \frac{\bar{w}_u}{\sum_u \bar{w}_u} \quad (14)$$

得到利用层次分析法确定的权重向量 $w^{AHP} = [w_d^{AHP}, w_e^{AHP}, w_f^{AHP}, w_g^{AHP}]$ 。

网络选择中,不仅要考虑主观因素,也要考虑客观因素,综合考虑进行决策。熵值法是利用信息熵理论计算权重向量的客观赋权法。评价参数的信息量通过该参数在各网络的差异大小得到,参数的差异越大,含有的信息量越大,该参数对网络选择的影响越大,则对应的权重越大。利用信息熵计算权重,首先需要根据式(15)对3.1.1节中标准化后的评价参数 $r_{k,j}$ 进行规范化处理

$$s_{k,j} = \frac{r_{k,j}}{\sum_j r_{k,j}} \quad (15)$$

计算评价参数的信息熵

$$E_k = -K \sum_j s_{k,j} \ln s_{k,j} \quad (16)$$

其中, K 是常数,为简化计算 $K=1$ 。最后通过式(17)计算参数权重向量

$$w_k^{EW} = \frac{1-E_k}{\sum_k (1-E_k)} \quad (17)$$

则得到利用熵值法确定的权重向量 $w^{EW} = [w_d^{EW}, w_e^{EW}, w_f^{EW}, w_g^{EW}]$ 。

最后综合层次分析法和熵值法得到最终的实际权重为

$$w = \nu w^{AHP} + (1-\nu) w^{EW} \quad (18)$$

其中, ν 是大于0小于1的实数。

3.1.3 确定最优网络

通过式(19)加权求和得到网络 j 的隶属度,最后用户根据各个网络的隶属度大小,选择隶属度最大的网络作为接入网络

$$S_j = \sum_k w_k r_{k,j} \quad (19)$$

其中, S_j 是网络 j 的隶属度, w_k 是评价参数 k 的权重, $r_{k,j}$ 是标准化后网络 j 的评价参数 k 的值。

3.2 用户效用函数的构建

在 BAG-NS 算法中,用户选择接入网络以后该

网络的所有接入视频用户基于非合作博弈模型进行带宽博弈,视频用户的带宽在达到纳什均衡之前是一个动态变化的值。每个视频用户总是希望获得更多的带宽以获得更好的视频质量,这是用户的收益;同时用户需要向网络支付相应的费用,同时也要承担相应的网络负荷带来的开销,这2部分是用户的代价。因此,从用户和网络的角度考虑,构建了一种兼顾用户公平性和网络拥塞控制的用户效用函数,由用户收益和用户代价2部分组成。假设最终有 M 个视频用户接入网络 j ,网络 j 中的视频用户 i 的效用函数 $U_i(R_i)$ 可以表示为

$$U_i(R_i) = G_{i,j}(R_i) - P_{i,j}(R_i) - F_{i,j}(R_i) \quad (20)$$

其中, $G_{i,j}(R_i)$ 是用户 i 带宽策略为 R_i 的收益函数, $P_{i,j}(R_i)$ 是用户 i 需要支付给网络 j 的费用支出, $F_{i,j}(R_i)$ 是用户 i 在网络 j 中的网络负荷带来的开销。PSNR 是衡量视频质量的重要指标,PSNR 越大,视频失真越小,视频质量越好,因此可以用 PSNR 的函数表示 $G_{i,j}(R_i)$ 。根据微观经济学的边际效用递减理论,随着用户获得带宽的增加,用户每单位带宽获得 PSNR 的增量是递减的。因此有 $G_{i,j}''(R_i) < 0$,由式(5)可得

$$\begin{aligned} G_{i,j}(R_i) &= \ln(\text{PSNR}_i) \\ &= \ln(10 \lg \frac{255^2}{a_i} + \frac{10}{\ln 10} b_i \ln R_i) \end{aligned} \quad (21)$$

综合式(9)和式(10)可以得到 $U_i(R_i)$ 为

$$\begin{aligned} U_i(R_i) &= \ln \left(10 \lg \frac{255^2}{a_i} + \frac{10}{\ln 10} b_i \ln R_i \right) - \\ &P_j R_i - \frac{\omega C_j}{C_j - Q_j} \end{aligned} \quad (22)$$

其中, ω 是网络拥塞控制参数,其值的大小代表对网络负荷的有不同程度的控制。 $Q_j = \sum_{i=1}^M R_i$ 是网络 j 中所有接入视频用户占用的带宽之和。联合式(1)、式(2)、式(22)可以将网络 j 中视频用户基于非合作博弈的带宽分配问题可以表示为

$$\begin{aligned} \max_{R_i} \quad & U_i(R_i) \\ \text{s.t.} \quad & R_{i\min} \leq R_i \leq R_{i\max} \\ & \sum_{i=1}^M R_i < C_j \end{aligned} \quad (23)$$

3.3 均衡解的存在性和唯一性

由于网络带宽资源的限制，网络无法满足所有视频用户的最大带宽需求，因此在网络带宽非合作博弈中，每个独立自私的用户会尽量使自己的收益更大，付出的成本更小。通过视频用户的相互竞争，非合作博弈模型最终会达到纳什均衡。在纳什均衡点上，每个用户满足分配到的带宽，此时，纳什均衡解得到的带宽分配策略就是网络对用户最终的分配方式。但不是每个非合作博弈问题都存在纳什均衡解，即使存在纳什均衡解也不一定是唯一的。

定理 1^[14] 在 N 个人博弈 $G = \{A_1, A_2, \dots, A_N; u_1, u_2, \dots, u_N\}$ 中，如果所有的 $i = 1, 2, \dots, N$ 均有如下条件成立：

- 1) A_i 在欧氏空间是一个非空、闭的、有界的凸集；
- 2) u_i 是连续的拟凹函数。

则 $G = \{A_1, A_2, \dots, A_N; u_1, u_2, \dots, u_N\}$ 存在纳什均衡解。

证明 对于网络 j 中任意的视频用户 i 的带宽分配策略空间 $\{R_i\}$ ，有 $R_{i\min} \leq R_i \leq R_{i\max}$ ，因此 $\{R_i\}$ 满足条件 1)。用户效用函数 $U_i(R_i)$ 在其带宽策略空间上是连续的，对效用函数一阶求导

$$\frac{\partial U_i(R_i)}{\partial R_i} = \frac{10b_i}{\ln 10 R_i \left(10 \lg \frac{255^2}{a_i} + \frac{10}{\ln 10} b_i \ln R_i \right)} - p_j - \frac{\omega C_j}{(C_j - Q_j)^2} \quad (24)$$

对效用函数再次求导

$$\frac{\partial^2 U_i(R_i)}{\partial R_i^2} = - \frac{100b_i^2}{\left[\ln 10 R_i \left(10 \lg \frac{255^2}{a_i} + \frac{10}{\ln 10} b_i \ln R_i \right) \right]^2} - \frac{10b_i}{\ln 10 R_i^2 \left(10 \lg \frac{255^2}{a_i} + \frac{10}{\ln 10} b_i \ln R_i \right)} - \frac{2\omega C_j}{(C_j - Q_j)^3} \quad (25)$$

其中， $b_i > 0$ ， $\omega > 0$ ， $C_j > 0$ ，由式(1)、式(2)、式(5)可知， $\left(10 \lg \frac{255^2}{a_i} + \frac{10}{\ln 10} b_i \ln R_i \right) > 0$ ， $(C_j - Q_j) > 0$ ，因此

$$\frac{\partial^2 U_i(R_i)}{\partial R_i^2} < 0 \quad (26)$$

可知 $U_i(R_i)$ 是严格的凹函数，凹函数一定是拟凹函数，满足条件(2)，因此 BAG-NS 算法存在纳什均衡点。根据参考文献[15]，纳什均衡点的唯一性需要满足效用函数严格为凹。根据数学理论，纳什均衡点是函数的极值点，若函数在区间上严格为凹，则该极值点唯一，对应为极大值。

综上所述，BAG-NS 算法的非合作博弈模型存在唯一纳什均衡解。

3.4 用户带宽博弈问题求解

BAG-NS 算法采用了类似于文献[10]的分布式迭代算法进行求解。在视频用户选择接入网络以后，该网络内的每个视频用户进行非合作博弈，系统首先对每个接入网络的视频用户 i 分配传输视频所需最小带宽 $R_{i\min}$ ，其次，视频用户根据带宽变化率及带宽调整步长调整自身带宽策略，进行带宽迭代直到达到纳什均衡解。视频用户带宽的变化率是一个动态变化的值，用户带宽的变化率同其效用函数的梯度成正比，可以通过式(27)求得

$$\gamma_i = \frac{dR_i}{d\tau} = \frac{\partial U_i(R_i)}{\partial R_i} \quad (27)$$

其中， τ 是时间变量，任意视频用户的带宽策略空间都是有界闭合的，并且其效用函数在带宽策略空间上都是连续的。

视频用户带宽需求是动态变化的，直到用户带宽达到纳什均衡点。在此之前，用户需要根据带宽变化率以及带宽调整步长不断调整自身带宽策略，在当前时刻 τ 和下一时刻 $\tau+1$ 时间间隔内，用户 i 的带宽的迭代方程

$$R_i(\tau+1) = R_i(\tau) + \lambda_i \gamma_i \quad (28)$$

其中， $\lambda_i > 0$ 是视频用户带宽调整步长。视频用户效用函数的凹函数特性使得迭代算法能够收敛到非合作博弈的纳什均衡点。

基于网络选择的视频通信带宽博弈算法整个过程采用以下步骤。

- 1) 在用户进行网络选择阶段，对所有用户 i 。

① 视频用户 i 根据系统给出的 $PSNR_{thr}$ 以及自身的视频参数 α_i 和 β_i ，由式(6)得到相应的带宽需求 $R_{i,thr}$ ，由式(7)~式(10)计算网络 j 的评价参数 k 的值 $x_{k,j}$ ($k = d, e, f, g$)，并且进行标准化处理得到

$r_{k,j}(k=d,e,f,g)$ 。

② 根据判决矩阵 \mathbf{Z} ，根据式(11)和式(12)检验矩阵的满意一致性，然后由式(13)和式(14)得到由层次分析法确定的权重向量 \mathbf{w}^{AHP} ，根据式(15)~式(17)得到由熵值法确定的权重向量 \mathbf{w}^{EW} ，计算最终的实际权重为 $\mathbf{w} = \nu \mathbf{w}^{AHP} + (1-\nu) \mathbf{w}^{EW}$ 。

③ 根据加权求和得到网络 j 的隶属度 $S_j = \sum_k w_k r_{k,j}$ ，选择隶属度大的网络进行网络接入。

2) 在用户进行带宽博弈阶段，对接入网络 j 。

① 初始化所有接入网络 j 视频用户的带宽 $R_{i,\min}$ ，带宽调整步长 λ_i ，迭代停止条件 ε 。

② 所有接入的视频用户根据式(27)和式(28)调整自身带宽策略 $\mathbf{R}(\tau+1)$ 。

③ 判断 $|\mathbf{R}(\tau+1) - \mathbf{R}(\tau)| \leq \varepsilon$ ，若是，则用户达到纳什均衡，停止迭代；否则，则返回 2) 中步骤②继续迭代。

4 仿真结果及分析

4.1 仿真场景及参数设置

仿真场景假设在 2 个网络异构网络覆盖的范围内，每个视频用户选择接入其中一个网络进行视频业务的传输。算法采用 Matlab 仿真工具，为了验证 BAG-NS 算法的性能，将 BAG-NS 算法与文献[8]的算法进行比较，并且采用与其相同的 8 个视频用户，如表 4 所示。

表 4 8 个用户视频序列

视频序列	a_i	b_i	$R_{i,\min}$ (/kbit·s ⁻¹)	$R_{i,\max}$ (/kbit·s ⁻¹)
Foreman	12 570	1.301 0	57.179 3	813.265 3
Carphone	13 710	1.44 14	40.947 8	449.646 8
Akiyo	285 880	2.413 1	32.337 8	135.305 5
Coastguard	17 140	1.205 9	101.766 6	1 784.538 2
Slient	122 740	1.846 7	59.421 8	385.670 6
Mobile	115 930	1.394 2	214.707 8	2 556.943 3
Football	490 430	1.630 0	239.239 4	1 991.028 9
Flower	234 140	1.574 7	181.303 4	1 625.342 1

这 8 个不同的视频用户分别传输不同的视频序列，因此每个用户表征其视频内容和编码方式的参数 a_i 和 b_i 均不同，每个用户传输视频业务所需的最小带宽 $R_{i,\min}$ 和最大带宽 $R_{i,\max}$ 也不同。异构网络状

况是不断在变化的，为了体现 BAG-NS 算法在不同网络状况下的性能，设置了 6 种不同的网络场景，如表 5 所示。在不同的网络场景下，每个用户进行网络选择的 4 个参数都是在变化的，6 种场景下对应的 $PSNR_{thr}$ 值分别为 34 dB、37 dB、39 dB、40 dB、41 dB 和 42 dB。假设用户是价格的接受者，用户不考虑其选择结果对网络价格的影响。不同网络的价格不同，在网络带宽资源越少的情况下，网络单位带宽的价格越高，取 $p_j = 0.1/C_j$ 。网络拥塞控制参数 $\omega=0.01$ ，带宽调整步长 $\lambda_j=100$ ， $\nu = 0.5$ 。

表 5 6 种异构网络场景

场景	C_1 /(kbit·s ⁻¹)	C_2 /(kbit·s ⁻¹)	总带宽/(kbit·s ⁻¹)
1	950	1 050	2 000
2	1 200	1 800	3 000
3	2 500	1 500	4 000
4	2 000	3 000	5 000
5	3 500	2 500	6 000
6	3 000	4 000	7 000

为了比较 BAG-NS 算法和文献[8]算法的公平性，将算法的用户公平性定义为视频质量 $PSNR$ 的方差的倒数

$$Fairness = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{M} \sum_i (PSNR_i - \overline{PSNR})^2}} \quad (29)$$

其中， M 表示参与带宽非合作博弈的用户数，用 $PSNR_i$ 表示用户 i 的视频质量， \overline{PSNR} 为所有视频用户 $PSNR$ 的平均值。可以看出， $Fairness$ 的值越大，表示用户视频质量的方差越小，则带宽分配算法的用户公平性越好。

4.2 仿真结果比较和分析

仿真的对比算法采用文献[8]中算法，该算法通过最大化用户效用函数之和解决视频用户带宽分配问题。BAG-NS 算法采用与文献[8]算法相同的率失真模型。图 2 分析了 BAG-NS 算法在网络场景 4 下，网络 1 和网络 2 中的接入用户间分别进行带宽博弈并达到纳什均衡的迭代过程，证明了 BAG-NS 算法纳什均衡解的唯一存在。图 3~图 6 分别对 BAG-NS 算法从用户平均视频失真度、平均视频质量、网络利用率以及用户视频质量的公平性与文献[8]算法进行了比较。

图 2 给出网络 1 和网络 2 中的用户带宽在迭代过程的变化，迭代的速度与带宽调整步长有关。8

个用户完成网络选择后，网络 1 和网络 2 中的接入用户分别进行带宽博弈。对于相同的 PSNR，不同的用户需要不同的带宽。网络 2 中视频序列为 Akiyo 的用户最先达到其最大所需带宽 135 kbit/s，而网络 1 中是视频序列为 Silent 的用户最先收敛，2 个网络的视频用户最终都达到了纳什均衡。

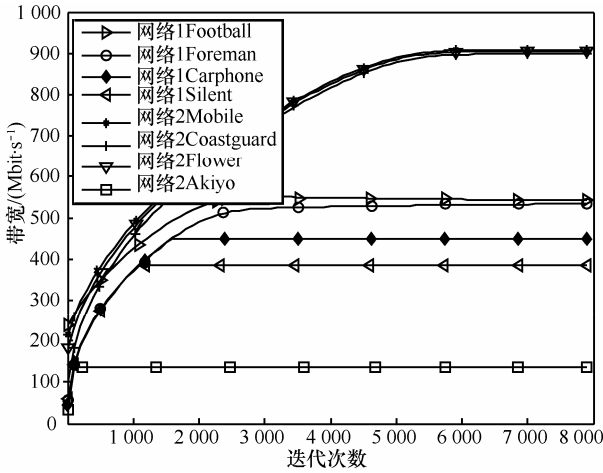


图 2 用户达到纳什均衡的带宽迭代过程

由图 3 和图 4 可以看出，在 6 种不同的网络场景下，随着网络可用带宽的增加，视频的平均失真度不断减小，平均 PSNR 不断增加，表明视频质量不断提高。可以看到 BAG-NS 算法的用户平均视频失真更小，用户平均视频质量更好。这是由于文献 [8] 算法用户分布的不合理和用户视频质量的不公平导致的。而 BAG-NS 算法在进行带宽分配之前考虑主观因素和客观因素，采用层次分析法和熵值法结合的网络选择机制，选择最适合的网络进行接入，使用户能合理分布在不同的网络中，更加有效地利用有限的网络带宽资源。

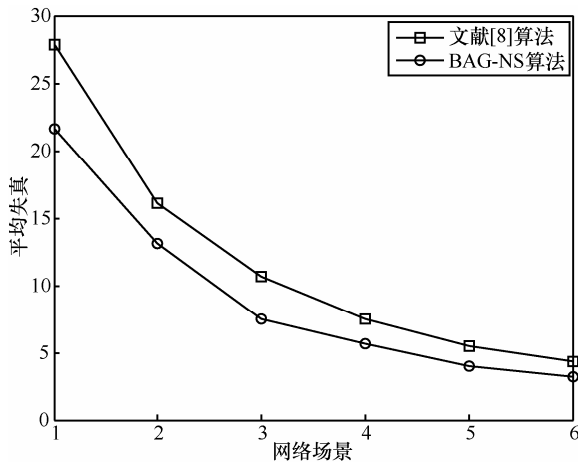


图 3 用户平均视频失真度比较

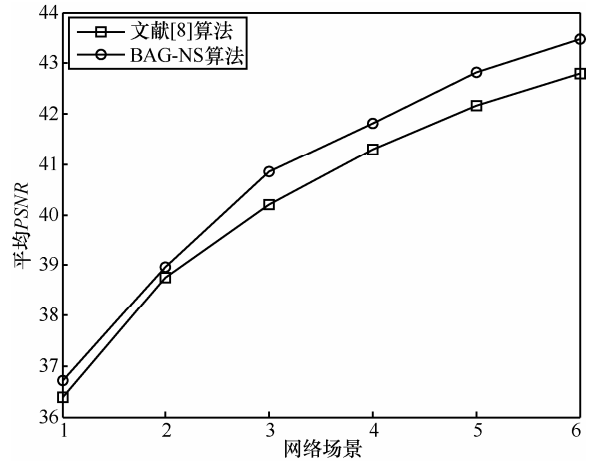


图 4 用户平均视频 PSNR 比较

由图 5 和图 6 可以看到，在 6 种不同的网络场景下，BAG-NS 算法的网络利用率和用户视频质量的公平性都优于文献 [8] 算法。这是由于文献 [8] 算法中没有考虑网络选择机制，导致了用户分布不合理，使网络资源利用率降低和用户公平性变差；

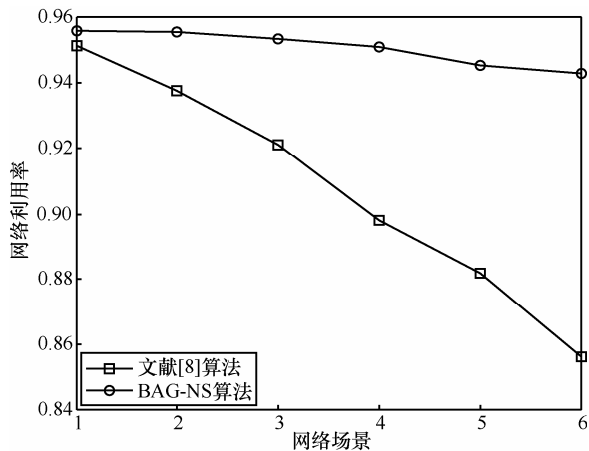


图 5 网络利用率比较

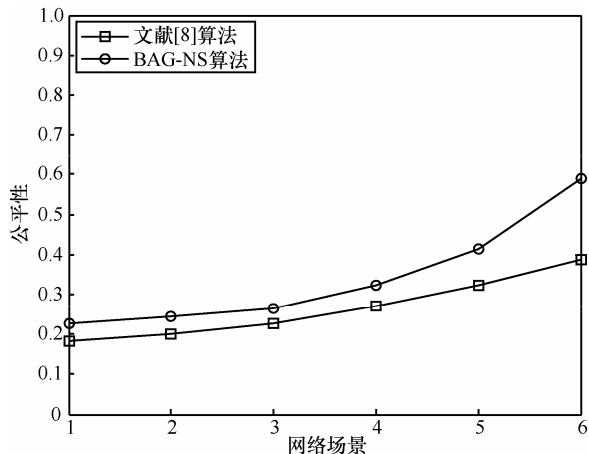


图 6 用户视频质量公平性比较

其次是接入网络后用户带宽策略的变化只与参数值 b_i 有关, 使公平性进一步变差。而 BAG-NS 算法中, 一方面, 由于网络选择机制使用户合理分布, 提高了网络资源利用率; 另一方面, 带宽分配算法中效用函数的构建考虑到公平性和网络拥塞控制, 使用户带宽策略的改变不仅与用户视频参数 a_i 和 b_i 有关, 同时与用户付出的带宽成本和网络拥塞程度有关, 使用户公平性更好。

5 结束语

本文提出了一种结合网络选择机制和非合作博弈的带宽分配算法(BAG-NS), 该算法首先根据视频用户特性和当前网络状况, 采用层次分析法和熵值法获得网络选择参数的权重, 最后进行多属性决策为视频用户选择接入网络。其次在视频用户选择网络后, 基于非合作博弈模型采用分布式迭代算法求得用户带宽博弈的纳什均衡解, 获得最终的带宽分配策略。最后将 BAG-NS 算法与文献[8]算法进行比较, 通过仿真结果得到 BAG-NS 算法能够更加有效地兼顾用户视频质量公平性和网络拥塞控制, 提高网络资源利用率, 有效减小用户视频失真, 提高用户视频质量。

参考文献:

- [1] WANG L, KUO G. Mathematical modeling for network selection in heterogeneous wireless networks—a tutorial[J]. IEEE Communication Surveys & Tutorials, 2013, 15(1): 271-292.
- [2] KHAN M S Z, ALAM S, KHAN M R H. A network selection mechanism for fourth generation communication networks[J]. Journal of Advances in Information Technology, 2010, 1(4): 189-196.
- [3] FU W, AGRAWAL D P. Multi-connection and rate allocation in heterogeneous wireless networks[A]. GLOBECOM Workshops (GC Wkshps)[C]. 2010.1157-1161.
- [4] NIYATO D, HOSSAIN E. A non-cooperative game-theoretic framework for radio resource management in 4G heterogeneous wireless access networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2008, 7(3): 332-345.
- [5] NIYATO D, HOSSAIN E. A game theoretic analysis of service competition and pricing in heterogeneous wireless access networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(12): 5150-5155.
- [6] PARK H, *et al.* Fairness strategies for wireless resource allocation among autonomous multimedia users[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2010, 20(2): 297-309.
- [7] CHEN Y, WANG B, LIU K J R. Multiuser rate allocation games for multimedia communications[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2009, 11(6): 1170-1181.
- [8] ZHANG Q, LIU G. Rate allocation games in multiuser multimedia communications[J]. IET communications, 2011, 5(3): 396-407.
- [9] CHEN H, DING X, WANG Z, *et al.* A rate allocation scheme for multi-user over heterogeneous wireless access networks[A]. Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2010-Fall)[C]. 2010 1-5.
- [10] 姜永, 陈山枝, 胡博. 异构无线网络中基于 Stackelberg 博弈的分布式定价和资源分配算法[J]. 通信学报, 2013, 34(1): 61-68.
JIANG Y, CHEN S Z, HU B. Stackelberg games-based distributed algorithm of pricing and resource allocation in heterogeneous wireless networks[J]. Journal on Communications, 2013, 34(1): 61-68.
- [11] KAMACI N, ALTUNBASAK Y, MERSEREAU R M. Frame bit allocation for the H. 264/AVC video coder via Cauchy-density-based rate and distortion models[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2005, 15(8): 994-1006.
- [12] 王康, 曾志民, 冯春燕, 张天魁. 一种多属性决策的异构网络选择算法[J]. 无线电工程, 2009, 39(1): 1-3.
WANG K, ZHENG Z M, FENG C Y, ZHANG T K. A heterogeneous network selection algorithm based on multi-attribute decision making method[J]. Radio Engineering of China, 2009, 39(1): 1-3.
- [13] SAATY R W. The analytic hierarchy process—what it is and how it is used[J]. Mathematical Modelling, 1987, 9(3): 161-176.
- [14] 佛登伯格, 梯诺尔著. 博弈论[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2002.
FUDENBERG D, TIROLE J. Game Theory[M]. Beijing: China Renmin University Press, 2002.
- [15] 李明欣, 陈山枝, 谢东亮等. 异构无线网络中基于非合作博弈论的资源分配和接入控制[J]. 软件学报, 2010, 21(8): 2037-2049.
LI M X, CHEN S Z, XIE D L, *et al.* Resource allocation and admission control based on non-cooperation game in heterogeneous wireless networks[J]. Journal of Software, 2010, 21(8): 2037-2049.

作者简介:



魏淑芝 (1989-), 女, 广东汕头人, 南京邮电大学硕士生, 主要研究方向为移动通信和异构网络视频通信资源分配。



朱琦 (1965-), 女, 江苏苏州人, 南京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为下一代通信技术、宽带无线接入、OFDM、编码技术、资源动态分配。

复合衰落信道下分布式 MIMO 系统中断概率及信道容量分析

彭文杰, 李岳衡, 薛团结, 居美艳, 黄平

(河海大学 计算机与信息学院, 江苏 南京 211100)

摘要: 针对分布式 MIMO 系统中断概率和信道容量这 2 大性能指标, 在复合衰落信道模型下, 当上行链路采用最大比发送—选择合并, 下行链路采用选择发送—最大比合并时, 利用 Lognormal 分布对复杂 Gamma-Lognormal 分布的近似, 推导得到当移动台位置给定时, 系统中断概率和信道容量的闭合表达式, 证明了系统性能指标与移动台分布之间存在密切的联系; 随后依照实际通信环境, 提出一种考虑存在小区热点的移动台非均匀分布模型, 然后推导得到考虑该分布模型后的系统平均中断概率和平均信道容量闭合表达式; 最后通过计算机仿真, 证明了所提近似处理的精确性以及各项理论分析的合理性。

关键词: 分布式 MIMO; 复合衰落信道; 中断概率; 信道容量; 移动台分布

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

Outage probability and capacity analysis of distributed MIMO systems over a composite fading channel

PENG Wen-jie, LI Yue-heng, XUE Tuan-jie, JU Mei-yan, HUANG Ping

(College of Computer and Information, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: The exact closed-form expressions about the outage probability and capacity of distributed MIMO systems over a composite fading channel are derived firstly by using Lognormal approximation to complicated Gamma-lognormal distribution when mobile station (MS) in the cell is fixed at some position and the so-called maximum ratio transmission/selected combining (MRT-SC) and selected transmission/maximum ratio combining (ST-MRC) schemes are adopted in uplink and downlink respectively. Then based on a newly proposed non-uniform MS cell distribution model, which is more consistent with the MS cell hotspot distribution in an actual communication environment, the average outage probability and capacity formulas synthesizing the MS cell position information are further derived. Finally, the accuracy of the approximation method and the rationality of the corresponding theoretical analysis about the system performance are proven and illustrated by computer simulations.

Key words: distributed MIMO; composite fading channel; outage probability; capacity; MS distribution

1 引言

为解决现代无线通信系统中广大用户对通信质量和传输速率越来越高的需求与有限带宽之间的矛盾, 分布式 MIMO 系统以其独特的技术架构而受到了越来越多科技工作者的关注。由于分布式 MIMO 系统充分利用了空间微分集与宏分集增益^[1], 能在不增加系统分配频段的前提下成倍提高系统容量的同时, 亦展现出可有效地提高各对收发链路

之间的可靠性、降低系统功耗以及提高无线信号覆盖能力等的巨大优势^[2], 故已被列为面向未来 B4G/5G 无线通信系统的备选方案之一^[3]。不过在分布式 MIMO 系统投入到未来实际应用之前, 从系统上层网络规划的角度而言, 设计者将面临着诸如天线端口选址、系统无线资源分配等诸多设计挑战; 而中断概率和信道容量作为涉及分布式 MIMO 系统上层网络规划的两项重要性能指标, 对整个系统参数的优化设计具有极其重要的指导价值, 因此开

收稿日期: 2014-03-17; 修回日期: 2014-11-09

基金项目: 江苏省教育厅高校科研成果产业化推进基金资助项目 (JHB2012-4)

Foundation Item: The College Industrialization Project of Jiangsu Province (JHB2012-4)