

DOI: 10.7652/xjtuxb201402013

采用时延限制和资源预测的异构无线网络选择策略

李建东, 姜建, 刘鑫一

(西安电子科技大学综合业务网理论及关键技术国家重点实验室, 710071, 西安)

摘要: 针对异构无线网络中不同业务的时延限制和网络资源不确定性的问题,提出了一种联合时延限制和资源预测的网络选择(JDPNS)策略。该策略首先预测下一时隙信道资源的空闲概率和占用概率,如果空闲概率大于占用概率,则认为信道资源可以使用,如果空闲概率小于占用概率,则认为信道资源被占用,可以避免盲目接入造成的资源浪费和网络负载不均衡,然后以基于有效容量的信息传输速率作为目标函数,以用户的功率控制作为约束条件,在保障用户服务质量的前提下,采用凸优化理论得到最大化的网络传输速率,最后用户根据预测结果和传输速率两方面因素,选择具有充足带宽资源和最大传输速率的网络进行接入。仿真实验表明:在不同信道衰落条件下,JDPNS策略与注水策略相比,传输速率提高了 1 倍;JDPNS 策略的传输速率更接近已知网络资源空闲情况的速率上界。

关键词: 异构无线系统;网络选择;时延限制;有效容量;资源预测

中图分类号: TN929 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)02-0074-06

A Network Selection Policy under Delay Constraint and Resource Prediction in Integrated Wireless Systems

LI Jiandong, JIANG Jian, LIU Xinyi

(State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A joint delay constraint and resource prediction policy for network selection (JDPNS) is proposed to manage the problems caused by delay constraint of different services and resource uncertainty in integrated wireless systems. The probabilities of free and occupation are evaluated which can avoid resource wasting and load unbalancing. When the probability of free is larger than the probability of occupation, the channel resource can be used to transmit. While the probability of free is smaller than the probability of occupation, the channel resource is occupied. Then the transmission rate based on the concept of effective capacity is formulated as an objective function with the constraint of power control. The optimal transmission rate which can provide quality-of-service guarantees is obtained by applying the convex theory. Finally, the user accesses the proper network according to both the prediction result and the transmission rate. Simulation results and comparisons with the water-filling policy show that the JDPNS policy gets about twice the transmission rate in different fading channels, and that the transmission rate achieved by the JDPNS policy is closer to the available upper-bound rate.

Keywords: integrated wireless systems; network selection; delay constraint; effective capacity; resource prediction

为了满足无线网络中日益增多的用户数量及其业务需求,多小区多接入点共同覆盖下的异构无线网络应运而生^[1],并且成为无线电网络系统的主要特征。在以往的选择策略中,通常采用信息论香农容量的概念作为衡量选择策略好坏的标准^[2],但是香农容量并没有反映网络的时延特性和用户不同业务的时延限制。文献[3]提出了有效容量的概念,通过有效容量将时延特性引入到传输速率中,因此可以更方便地分析无线网络传输时的统计服务质量(QoS)特性。

由于无线网络资源的使用具有实时性和不确定性,因此在进行网络选择之前,如何准确预测所有可接入网络的资源占用情况,就成为我们首先要解决的主要问题。文献[4]通过定价机制和凸优化理论进行资源分配,文献[5]通过加权 QoS 指标实现资源的动态分配,但是都没有考虑时延对于网络资源选择的影响。以往的一些异构无线选择策略仅考虑了负载均衡^[6]、能量损耗^[7]以及用户冲突碰撞^[8]等对网络吞吐量的影响,而对于网络资源的不确定性没有进行研究和分析。

本文提出了一种联合时延限制和资源预测的网络选择(JDPNS)策略。首先通过预测模型获得各网络的资源占用情况,解决资源不确定性的问题,避免用户盲目接入网络造成的网络负载不均衡。其次根据有效容量的概念,将时延特性引入到传输速率中,根据用户不同业务的时延需求分配不同的网络资源,在保障用户 QoS 的前提下,提高资源利用率和网络吞吐量。最后用户根据预测结果和传输速率两方面因素进行网络选择。

1 异构无线网络系统模型

异构无线网络系统是由多种异构网络元素共同构成的,包括宏小区、微小区、微微小区和家庭基站等,相互之间通过传输功率、覆盖范围、骨干网和传输特性的不同加以区分。异构无线网络系统模型如图1所示,在宏小区覆盖范围内,分布了两个微小区(长期演进系统(LTE)和通用移动通信系统(UMTS)),LTE小区的接入基站为演进型节点基站(eNodeB),UMTS小区的接入基站为节点基站(NodeB)。在微小区内部,微微小区设置在通信热点地区,家庭基站由用户在室内区域随机构建。

构建异构无线网络场景的目的是:微微小区可以更好地保证热点地区的通信质量;家庭基站可以使用户更方便实时地接入网络。假设网络中存在

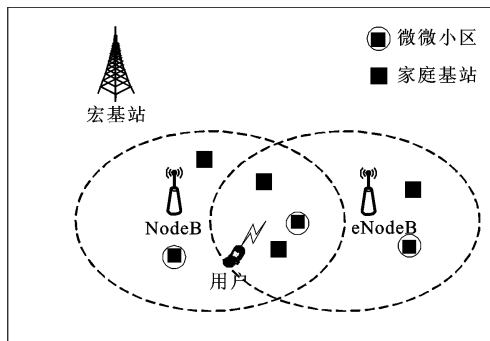


图1 异构无线网络系统模型

N 个用户,多种网络共存可以使用户有选择地(速率或者 QoS)接入最恰当的网络进行数据传输。

2 联合时延限制和资源预测的网络选择策略

2.1 时延限制对网络选择的影响

无线接入网络技术的发展和用户业务量的不断增多,使得不同的数据业务可以根据所需求的 QoS 不同而接入不同的网络,从而实现在保证用户 QoS 的基础上最大化网络的吞吐量。定义参数 θ 为时延因子^[9],基于时延因子的有效容量 $\alpha(\theta)$ 可表示为

$$\alpha(\theta) = -\frac{1}{\theta} \ln(E(\exp(-\theta R(t)))) \quad (1)$$

式中: $E(\cdot)$ 为期望函数; $R(t)$ 表示瞬时信道传输速率。瞬时传输速率 $R(t)$ 表示为

$$R(t) = B \ln(1 + o(\theta, \gamma(t)) \gamma(t)) \quad (2)$$

式中: $\gamma(t)$ 表示瞬时接收的信噪比,均值为 $\bar{\gamma}$ 。 $\gamma(t)$ 的概率密度函数表示为

$$p(\gamma) = \frac{\gamma^{m-1}}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\bar{\gamma}} \right) \exp \left(-\frac{m}{\bar{\gamma}} \gamma \right), \gamma \geq 0 \quad (3)$$

式中: $\Gamma(\cdot)$ 表示 Gamma 函数; m 表示 Nakagami- m 分布的信道衰落参数。

$o(\theta, \gamma(t))$ 表示功率分配准则,定义为时延因子 θ 和 $\gamma(t)$ 的函数。由于信道的传输功率为 $G(t) = o(\theta, \gamma(t)) G_{\max}$, 式中 $G_{\max}$ 表示最大传输功率,因此可以得到平均功率限制条件

$$\int_0^{\infty} o(\theta, \gamma(t)) p(\gamma) d\gamma \leq 1, \quad \forall \theta > 0 \quad (4)$$

通过上面的分析,带有功率限制条件的最大化有效容量函数及其 Lagrange 最优解^[10]表示为

$$\alpha_{\text{opt}}(\theta) = \max \left(-\frac{1}{\theta} \ln(E(\exp(-\theta R(t)))) \right) = \max \left(-\frac{1}{\theta} \ln \left(\int_0^{\infty} \exp(-\theta B \ln(1 + o(\theta, \gamma) \gamma)) p(\gamma) d\gamma \right) \right)$$

$$\text{s. t. } \int_0^{\infty} o(\theta, \gamma) p(\gamma) d\gamma \leq 1 \quad (5)$$

$$o_{\text{opt}}(\theta, \gamma(t)) =$$

$$\begin{cases} \left[\left(\frac{\partial B \gamma(t)}{\lambda \ln 2} \right)^{\left(\frac{\partial B}{\ln 2} + 1 \right)^{-1}} - 1 \right] / \gamma(t), & \gamma(t) \geq \frac{\lambda \ln 2}{\partial B} \\ 0, & \gamma(t) < \frac{\lambda \ln 2}{\partial B} \end{cases} \quad (6)$$

将式(6)带入式(2)中,最大化的瞬时信道传输速率 $R_{\text{max}}(t)$ 可以表示为

$$R_{\text{max}}(t) = \int_{\frac{\lambda \ln 2}{\partial B}}^{\infty} B \ln \left(1 + \left(\frac{\partial B \gamma}{\lambda \ln 2} \right)^{\left(\frac{\partial B}{\ln 2} + 1 \right)^{-1}} - 1 \right) / \gamma \gamma p(\gamma) d\gamma \quad (7)$$

通过分析时延限制对于用户传输速率的影响,最优的网络选择策略为用户选择接入既满足其 QoS 需求又具有最大传输速率的网络。从上面的分析可以看出,最佳的接入网络为具有最优功率控制策略的网络。

2.2 网络可用资源预测机制

由于无线网络资源的使用具有实时性和不确定性,用户在进行网络选择时,只能获得过去时隙的网络资源使用情况,而不知道下一时隙网络资源的使用情况,因此在进行网络选择之前需要准确地估计网络资源的占用情况。

采用 ON-OFF 模型来表示网络信道资源的可用情况,OFF 表示信道资源空闲,ON 表示信道资源被占用。 S_0 表示信道在 OFF 状态的驻留时间, S_1 表示信道在 ON 状态的驻留时间, $P_{S_0}(t)$ 表示信道在 OFF 状态下驻留时间的概率密度函数, $P_{S_1}(t)$ 表示信道在 ON 状态下驻留时间的概率密度函数。信道在 OFF 状态的平均概率密度函数可以表示为

$$\overline{P_{S_0}} = \frac{\int_0^{\infty} t P_{S_0}(t) dt}{\int_0^{\infty} t P_{S_0}(t) dt + \int_0^{\infty} t P_{S_1}(t) dt} = \frac{\overline{S_0}}{\overline{S_0} + \overline{S_1}} \quad (8)$$

式中: $\overline{S_0}$ 表示信道在 OFF 状态下的平均驻留时间; $\overline{S_1}$ 表示信道在 ON 状态下的平均驻留时间。

信道在 ON 状态的平均概率密度函数可以表示为

$$\overline{P_{S_1}} = \frac{\int_0^{\infty} t P_{S_1}(t) dt}{\int_0^{\infty} t P_{S_0}(t) dt + \int_0^{\infty} t P_{S_1}(t) dt} = \frac{\overline{S_1}}{\overline{S_0} + \overline{S_1}} \quad (9)$$

令 $S_{\text{ON-OFF}}$ 表示信道从 ON 到 OFF 状态的变化点。从 $S_{\text{ON-OFF}}$ 时刻开始,信道在 OFF 状态持续 N 个时隙, s 表示用户准备进行网络接入的时间点,每个时隙的持续时长为 τ ,信道状态变化情况如图 2 所示。

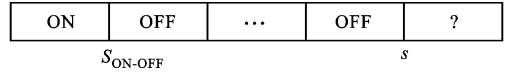


图 2 信道从 ON 到 OFF 状态变化示意图

图 2 中,下一时隙信道处于 ON 状态的概率 $A_{S_1}(s)$ 表示为

$$A_{S_1}(s) = P(T(s - S_{\text{ON-OFF}})) = \int_0^{s - S_{\text{ON-OFF}}} P_{S_0}(t) dt \quad (10)$$

式中: $T(s - S_{\text{ON-OFF}})$ 表示 OFF 状态的持续时长为 $s - S_{\text{ON-OFF}}$ 。

下一时隙信道仍然处于 OFF 状态的概率 $A_{S_0}(s)$ 表示为

$$A_{S_0}(s) = 1 - A_{S_1}(s) = 1 - \int_0^{s - S_{\text{ON-OFF}}} P_{S_0}(t) dt \quad (11)$$

令 $S_{\text{OFF-ON}}$ 表示信道从 OFF 到 ON 状态的变化点,信道状态变化情况如图 3 所示。

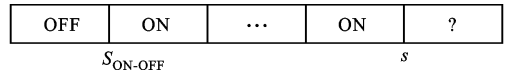


图 3 信道从 OFF 到 ON 状态变化示意图

图 3 中,用户在 s 时刻接入网络后,下一时隙信道处于 OFF 状态的概率 $A_{S_0}(s)$ 为

$$A_{S_0}(s) = P(T(s - S_{\text{OFF-ON}})) = \int_0^{s - S_{\text{OFF-ON}}} P_{S_1}(t) dt \quad (12)$$

式中: $T(s - S_{\text{OFF-ON}})$ 表示 ON 状态的持续时长为 $s - S_{\text{OFF-ON}}$ 。

下一时隙信道仍然处于 ON 状态的概率 $A_{S_1}(s)$ 表示为

$$A_{S_1}(s) = 1 - A_{S_0}(s) = 1 - \int_0^{s - S_{\text{OFF-ON}}} P_{S_1}(t) dt \quad (13)$$

通过上面的分析,用户可以预先估计下一时隙网络信道资源的使用情况,确保用户可以准确地接入具有充足可用资源的网络。

2.3 JDPNS 的策略流程

由于异构无线网络中存在时延限制,因此用户可以根据业务所需求的 QoS 不同来选择恰当的网

络,从而在保障用户 QoS 的基础上最大化网络的吞吐量,提高网络资源的利用率。例如:实时业务(包括语音和视频通信)需要较低的时延以保证通信过程的流畅;非实时业务(包括数据传输服务),需要较高的吞吐量以保证数据传输速率;其他业务(例如网页浏览等)既不需要实时业务的高时延保障,也不需要非实时业务的高吞吐量。因此,用户在具有充足可用资源的网络之间进行选择时,总是根据时延限制下的用户传输速率选择具有最优传输速率的网络进行接入。

由于网络存在资源不确定性,使得用户在接入网络时并不能保证接入的网络具有充足的可用资源,因此通过资源预测机制估计网络中的资源占用情况,可以提高网络选择的有效性,避免接入网络不恰当造成的 QoS 下降以及重复网络选择造成的资源浪费。

通过上面的分析,JDPNS 策略流程描述如下。

(1)根据本时隙的网络信道占用情况,预测下一时隙网络中的信道占用率,估计下一时隙的可用资源情况。

(2)如果只有一个网络满足用户所需的资源,则用户直接接入。

(3)如果网络 j 和 j' 存在足够的可用资源,若 $R_j^{\max} > R_{j'}^{\max}$,则用户接入网络 j ;若 $R_j^{\max} < R_{j'}^{\max}$,则用户接入网络 j' ;若 $R_j^{\max} = R_{j'}^{\max}$,则用户以相同的概率接入网络 j 和 j' 。

(4)如果不存在具有足够可用资源的网络,则用户等待下一时隙,返回步骤 1。

在策略执行中,用户首先估计下一时隙网络资源的使用情况。如果只有单一网络满足其所需的可用资源,则用户直接接入;如果存在多个满足所需资源的网络时,用户总是选择接入在时延限制下具有最优传输速率的网络。当用户在 M' 个网络中的最优传输速率相同时,用户以 $R_j / \sum_{m=1}^{M'} R_m = 1/M'$ 的概率接入网络 j 。

假设异构无线网络中的网络数为 M ,用户数为 N ,网络 j 中的信道数为 K_j ,网络中的总信道数为 $K = \sum_{j=1}^M K_j$,策略循环复杂度表示为 $O(NK)$ 。最大化网络总信息传输速率可以表示为

$$\max \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N R_{i,j} = \max \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N B_{i,j} \log(1 + o_{i,j}^{\text{opt}}(\theta_i, \gamma_j(t)) \gamma_j(t))$$

$$\text{s. t. } 0 \leq B_{i,j} \leq \sum_{k_j=1}^{K_j} (1 - \kappa_{k_j}) B'_j \quad (14)$$

式中: $B_{i,j}$ 表示用户 i 在网络 j 中需求的信道带宽; B'_j 表示网络 j 中的单位信道带宽; B_j 表示网络 j 的总信道带宽; R_j 表示接入网络 j 所获得的传输速率; $\mathbf{P}^j = [\kappa_{1_j}, \kappa_{2_j}, \dots, \kappa_{K_j}]$, $j \in [1, M]$ 表示网络 j 中的预测信道状态,当信道 k 的状态概率 $A_{S_1}(s) > A_{S_0}(s)$,即 $\kappa_{k_j} = 1$ 时,表示信道被占用,反之 $\kappa_{k_j} = 0$ 表示该信道可用;约束 $0 \leq B_{i,j} \leq \sum_{k_j=1}^{K_j} (1 - \kappa_{k_j}) B'_j$ 表示用户接入的信道带宽应小于预测的可用总带宽。

本文提出的 JDPNS 策略既考虑了时延对于用户业务传输的影响,保证用户传输 QoS 的前提下提升网络的吞吐量,又根据预测机制来获得网络带宽信息,使得网络资源的使用更具可靠性,避免了盲目接入所带来的 QoS 下降以及资源浪费。

3 仿真与结果分析

UMTS 和 LTE 的带宽分别为 5 MHz 和 20 MHz,将网络带宽平均划分为多个子频带(信道),网络中可用信道数多,代表网络中的带宽资源较多。重叠区域的 2 个微微小区和 1 个家庭基站使用 UMTS 和 LTE 的资源,网络中的用户数为 50,无线衰落信道服从 Nakagami- m 的平坦衰落^[11]。 $m=1/2$ 时信道是单边高斯衰落信道,此时无线信道处于最差的衰落状态; $m=1$ 表示高斯信道模型; $m>1$ 表示近似莱斯对数正态分布的衰落信道; $m=+\infty$ 说明信道处于加性高斯白噪声状态。

图 4 给出了不同的时延因子和信道衰落参数对网络传输速率的影响。信噪比的均值为 $\bar{\gamma}=10$ dB^[9]。从图 4 可以看出,在相同的信道衰落条件下,由于注水策略对信道条件好的网络分配多的用户,对信道条件差的网络分配较少的用户,因此造成部分网络用户拥塞,而其他网络资源浪费。本文提出的 JDPNS 策略由于综合考虑了时延 QoS 对于整体速率和用户需求的影响,因此提高了网络资源利用率,网络传输速率优于注水策略。

θ 较小时,表示网络只提供较低的 QoS 保障,大部分对于时延要求不敏感的业务可以通过网络传输,此时网络传输速率较高; θ 较大时,网络提供较高的 QoS 保障,仅实时业务可以进行传输,网络传输速率变小。无论 θ 如何变化,本文提出的 JDPNS 策略仍优于注水策略。

由于 JDPNS 策略的信道条件服从 Nakagami- m

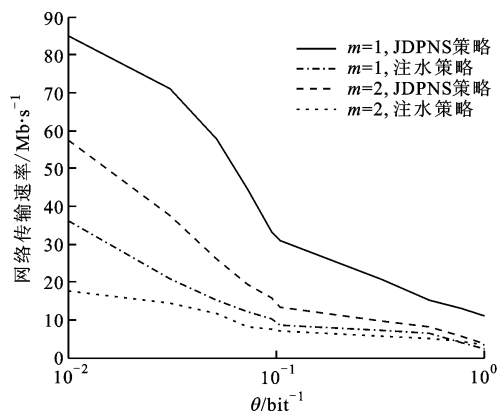


图4 时延因子和信道衰落参数对传输速率的影响

的平坦衰落,因此根据选取 m 的不同,可以适用于各种信道条件。从图4中也可以看出,在不同的信道衰落条件下,本文提出的 JDPNS 策略都具有优越性。

假设信道在 OFF 状态下的驻留时间服从对数正态分布^[12],则概率密度函数 $P_{S_0}(t)$ 可以表示为

$$P_{S_0}(t) = \frac{1}{t(2\pi\sigma^2)^{1/2}} \exp\left(-\frac{(\ln(t) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (15)$$

式中: μ 和 σ 分别表示概率密度分布的均值和方差。

图5给出了当用户的驻留时间服从对数正态分布时的网络传输速率。当可用信道数较少时,网络满负载,因此传输速率较小;可用信道数较多时,网络空闲,所有用户可以被服务,传输速率达到上界;可用信道数中等时,由于 JDPNS 策略使用了预测机制,可以很好地获得网络资源的使用情况,根据不同网络的空闲情况分配资源,因此传输速率更接近理论速率上界,避免网络资源的浪费。

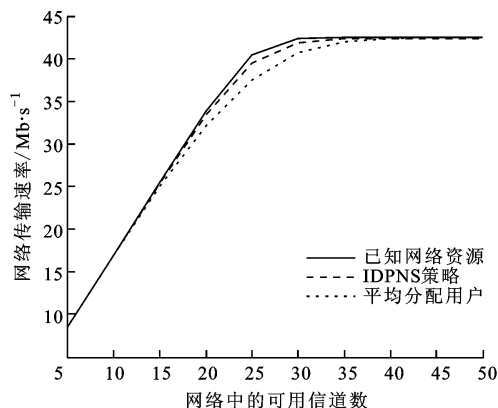


图5 基于对数正态分布预测的网络选择策略
($m=1, \theta=0.07$)

若信道在 OFF 状态下的驻留时间服从帕累托分布^[12],则概率密度函数 $P_{S_0}(t)$ 可以表示为

$$P_{S_0}(t) = \begin{cases} 0, & t < t_{\min} \\ \frac{\alpha t_{\min}^\alpha}{t^{\alpha+1}}, & t > t_{\min} \end{cases} \quad (16)$$

式中: α 为正的参数。

图6给出了 $m=1, \theta=0.07$ 时当用户的驻留时间服从帕累托分布时的网络传输速率。从图中可以看出, JDPNS 策略可以更好地利用网络资源,获得的传输速率优于不使用预测的策略,但是由于存在错误预测概率,因此未达到理论上界。

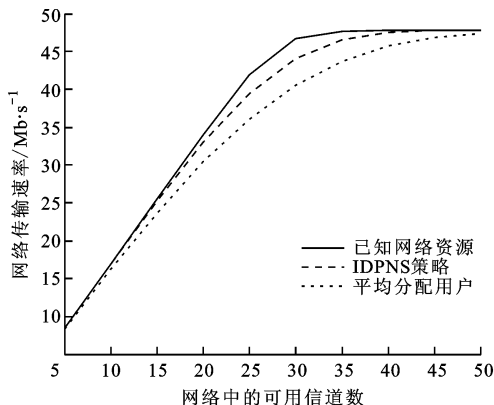


图6 基于帕累托分布预测的网络选择策略

图5和图6也可以看出,用户的驻留时间服从不同分布时,本文提出的 JDPNS 策略都优于不使用预测的策略,因此 JDPNS 策略可以很好地估计网络资源空闲情况,服务尽可能多的用户,从而提高资源利用率,并且普遍适用于不同的业务类型和衰落信道模型。

4 结 论

在异构无线网络环境下,本文提出了一种联合时延限制和资源预测的网络选择策略,综合考虑了不同业务的时延 QoS 特性、功率控制和网络资源的不确定性。用户首先根据预测机制来估计网络资源的空闲情况,然后根据不同业务的 QoS 特性,获得满足 QoS 需求的最大传输速率,最后根据预测结果和传输速率两方面因素选择网络进行接入。理论分析和实验仿真表明,在不同信道衰落条件下,本文提出的 JDPNS 策略的性能均优于注水策略,在满足用户 QoS 的前提下提高了网络总的传输速率。

参考文献:

- [1] 宋婧, 丛犁, 葛建华, 等. 双层网络中一种协作博弈的动态资源分配方法 [J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(10): 89-94.
- SONG Jing, CONG Li, GE Jianhua, et al. A dynamic resource allocation approach using cooperative game theory for two-tier networks [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(12): 89-94.

- [2] CHOI Y H, KIM H, HAN S W, et al. Joint resource allocation for parallel multi-radio access in heterogeneous wireless networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(11): 3324-3329.
- [3] WU D, NEGI R. Effective capacity: a wireless link model for support of quality of service [J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2003, 2(4): 630-643.
- [4] 陈俊杰, 倪宏, 孙鹏. 采用定价机制的多媒体系统多资源分配算法 [J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(6): 98-103.
CHEN Junjie, NI Hong, SUN Peng. Pricing mechanism based multi resource allocation for multimedia system [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(6): 98-103.
- [5] 林军, 倪宏, 孙鹏, 等. 一种采用神经网络 PID 控制的自适应资源分配方法 [J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(4): 112-117.
LIN Jun, NI Hong, SUN Peng, et al. Adaptive resource allocation based on neural network PID control [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(4): 112-117.
- [6] WANG Chong Gang, SOHRABY K, JANA R, et al. Network selection for secondary users in cognitive radio systems [C]//Proceedings of International Conference on Computer Communications. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 10-15.
- [7] JOE I, KIM W T, HONG S. A network selection algorithm considering power consumption in hybrid wireless networks [C]//Proceedings of 16th International Conference on Computer Communications and Networks. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 13-16.
- [8] WANG Chong Gang, SOHRABY K, JANA R, et al. Network selection in cognitive radio systems [C]//Proceedings of Global Telecommunications Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 1-6.
- [9] TANG Jia, ZHANG Xi. Quality-of-service driven power and rate adaptation over wireless links [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(8): 3058-3068.
- [10] BOYD S, VANDENBERGHE L. Convex optimization [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004.
- [11] SIMON M K, ALOUINI M S. Digital communication over fading channels: a unified approach to performance analysis [M]. 2nd ed. New York, USA: Wiley, 2005.

- [12] ZHANG Xi, SU He. Opportunistic spectrum sharing schemes for CDMA-based uplink MAC in cognitive radio networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011, 29(4): 716-730.

【本刊相关文献链接】

- 吕政, 余志军, 刘海涛. 协作通信中联合信道-网络编码的性能分析与资源分配. 2012, 46(4): 83-87. [doi: 10.7652/xjtuxb201204014]
- 卢冀, 肖嵩, 吴成柯. 无线网络中应用机会式网络编码的广播重传方法. 2011, 45(2): 68-72. [doi: 10.7652/xjtuxb201102014]
- 王毅, 张德运, 陈海荣. 无线传感器网络汇聚节点动态功耗管理方法. 2008, 42(2): 138-142. [doi: 10.7652/xjtuxb200802003]
- 王超, 邓科, 庄丽莉, 等. 协作认知网络中鲁棒的分布式波束形成. 2013, 47(12): 84-89. [doi: 10.7652/xjtuxb201312015]
- 李晓艳, 张海林, 郭超平, 等. 一种异步的认知无线网络跳频算法. 2012, 46(12): 30-35. [doi: 10.7652/xjtuxb201212006]
- 宋婧, 丛犁, 葛建华, 等. 双层网络中一种协作博弈的动态资源分配方法. 2012, 46(10): 89-94. [doi: 10.7652/xjtuxb201210016]
- 王磊, 陈志刚. 衰落信道中的分布式差分空时编码传输方案. 西安交通大学学报, 2012, 46(4): 77-82. [doi: 10.7652/xjtuxb201204013]
- 张文健, 田茂, 何浩, 等. 分层网络下行中断概率的闭式表达. 2011, 45(12): 59-63. [doi: 10.7652/xjtuxb201112011]
- 张正浩, 裴昌幸, 陈南, 等. 宽带认知无线网络分布式协作压缩频谱感知算法. 2011, 45(4): 67-71. [doi: 10.7652/xjtuxb201104012]
- 崔华力, 钱德沛, 张兴军, 等. 用于无线多跳网络视频流传输的优先级机会网络编码. 2013, 47(12): 13-18. [doi: 10.7652/xjtuxb201312003]
- 叶娜, 赵银亮, 边根庆, 等. 模式无关的社交网络用户识别算法. 2013, 47(12): 19-25. [doi: 10.7652/xjtuxb201312004]
- 李强, 秦涛, 管晓宏, 等. 对称性的起因: 非业务性网络流量新特性的挖掘与探索. 2013, 47(8): 19-25. [doi: 10.7652/xjtuxb201308004]
- 高翔, 祝跃飞, 刘胜利. 应用三角模糊矩阵博弈的网络安全评估研究. 2013, 47(8): 49-53. [doi: 10.7652/xjtuxb201308009]
- 杜友田, 辛刚, 郑庆华. 融合异构信息的网络视频在线半监督分类方法. 2013, 47(7): 96-101. [doi: 10.7652/xjtuxb201307018]
- 汪志伟, 曹建福, 郑辑光. 一种面向分簇无线传感器网络的多信道跨层协议. 2013, 47(6): 61-67. [doi: 10.7652/xjtuxb201306011]

(编辑 刘杨)