基于网络情景意识的认知无线网络知识库构建研究

邵　飞[1]，周　琦[2]，李文刚[1]

(1. 西安电子科技大学通信工程学院　西安　710071;　2. 中国电子系统工程公司研究所　北京 丰台区　100141)

【摘要】如何实现认知能力是认知无线网络实现的关键。采用网络情景意识知识库和案例推理相结合来实现认知能力目前得到了广泛的研究。该文着重对无固定设施的无线网络如自组织网如何构建网络情景意识知识库进行研究。结合某自组织网络，从网络情景意识和网络的协议重配置能力两个方面，提出采用NSGA-Ⅱ的多目标优化算法和模糊判决相结合的方法来生成认知无线网络的知识库。仿真结果表明：随着信道质量和网络业务负载的变化，采用学习机制对网络采取跨层重配置以后，网络传输平均时延大约可以减小为网络最差性能的50%以上，网络呼叫成功率可达100%，网络吞吐量可以提高20%左右。

关　键　词　Ad hoc;　认知无线网络;　模糊判决;　网络情景意识;　NSGA-Ⅱ

中图分类号　TN 915　　**文献标识码**　A　　doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2009.06.008

Construction of Database in Cognitive Wireless Network Based on Network Situation-Aware

SHAO Fei[1], ZHOU Qi [2], and Li Wen-gang[1]

(1. School of Telecommunications Engineering, Xidian University　Shaanxi　710071;

2. Institute of China Electronic System Engineering Corporation　Fengtai Beijing　100039)

Abstract　How to realize the cognitive capability is a key point to realize the cognitive wireless network. At present the method that combines network situation-aware database with case based reasoning (CBR) is received much attention. The construction of database in cognitive wireless network based on network situation-aware is deeply investigated in unfixed establishment network such as Ad hoc. The combination of NSGA-Ⅱand fuzzy decision is applied to constructing the Database in Cognitive Wireless Network from the aspect of network situation-aware and protocol configuration. Simulation result shows that: when adopting the mechanism of reconfiguration, the average time delay of the network will decrease to 50% above that of worst performance; the ratio of calling success will increase to 100%, and the throughput of the network will increase to 20%.

Key words　Ad hoc;　cognitive wireless network;　fuzzy – decision;　network situation-aware;　NSGA-Ⅱ

认知无线网络的研究目前正逐渐成为一个热点，国内外学者开展了大量的相关研究。目前大量的文献主要集中于欧洲B3G项目提出的利用认知网络来选择有效无线电接入方式(radio access technology，RAT)的问题[1-2]。这些研究集中于有固定设施支持的无线接入网络，而对无固定设施的无线网络如Ad hoc等研究其认知能力则比较少。目前主要是DARPA支持的SAPIENT(situation-aware protocols in edge network technologies)计划[3]，它侧重无线网络与网络情景意识的结合，目标是提出一种新一代的认知协议结构。这种结构能够感知到用户的需求和网络的情况，自动生成一种协议来实现对网络的修补，从而实现对环境的自适应。文献[4]给出了一种通过在现有协议体系结构中增加“垫片”，即ARQ协议来实现协议调整的例子。它虽然指出了网络情景意识的重要地位，但是没有给出一个具体的认知流程。文献[5]给出了一种认知网络在WLAN接入点的应用：利用在不同时间和地点网络的业务量统计信息来实现接入点的最佳信道接入。

如何实现认知能力是认知无线网络实现的关键。目前国内外对于认知无线网络的研究还处于初始阶段，特别是还没有一个统一、公认的认知无线网络结构和实现方法。文献[6]提出了基于认知层的认知网络结构，并给出了认知网络认知功能的一种实现方法：通过涌现式学习(NSGA-Ⅱ)来构建知识库和案例推理(CBR)相结合的方式来实现认知能力。主要机理是通过对环境的建模，抽象出网络可能经历的典型网络情景，然后利用涌现式学习(NSGA-Ⅱ

收稿日期：2009 – 04 – 24；修回日期：2009 – 10 – 13
基金项目：“973”项目(2009CB320403)；国家自然科学基金(60832008, 60832006)
作者简介：邵　飞(1980 –)，男，博士生，主要从事认知无线电方面的研究.

等)得到相应的网络情景意识知识库；同时在实际的网络中，当相似的场景“再现”时，网络就可以采取相似的措施(CBR)。

1　网络情景意识及其度量

1.1　网络情景意识的概念

网络情景意识实际上就是利用各种网络测量工具而得到的网络状态和用户需求的集合。网络具有情景意识的好处在于：基于对网络情景意识的感知，对网络协议采取合理的重配置，网络可以实现对外界环境的自适应。

本文以某“特殊”自组织网作为认知无线网络的研究平台。该网络的“特殊”之处在于：(1) 具有外界环境感知能力；(2) 具有全网性能评估能力；(3)具有灵活的重配置能力。

1.2　网络情景意识的度量指标

对于不同的应用场景及不同的网络，网络情景意识的度量指标是不相同的。本文基于某自组织网络进行认知无线网络的研究，具体来说该网络经常要面对业务负载的剧烈变化和物理信道质量严重恶化的情况。在该自组织网络中，描述这些特征的指标为：信道质量矩阵(channel quality matrix，CQM)、业务负载(traffic load，TL)的大小。信道质量矩阵分别用各种质量信道占总信道数的百分比来表示。如果CQM=(A%, B%, C%)，则它表示误码率为10^{-4}的信道数占总信道数的A%；误码率为10^{-3}的信道占总信道数的B%；误码率为10^{-2}的信道占总信道数的C%。业务负载TL的大小用业务类型的长度和业务频率(某一时间段内)的乘积来表示，即Load=Length×Frequency。其中，Length为业务长度、Frequency为业务频率。典型的指标为：CQM={80%, 10%, 10%; 50%, 30%, 20%; 20%, 20%, 60%}，Frequency={10,20,30}，Length={100,1000,10000}。基于上述设置，当业务频率为10时，整个网络情景可以有如下9种指标，分别为：

(Length_Frequency_CQM)={100_10_80_10_10, 1000_10_80_10_10,10000_10_80_10_10,100_10_50_30_20,1000_10_50_30_20,10000_10_50_30_20,100_10_20_20_60,1 000_10_20_20_60, 10000_10_20_20_60}

描述整个网络性能的指标主要有以下3个：呼叫建立成功率($Ratio_{call_success}$)、业务传输平均时延(Delay)、吞吐量(Throughput)。$Ratio_{call_success}$表示网络中任何节点发起呼叫时成功的概率。$Ratio_{call_success}$={永不阻塞，10%阻塞，20%阻塞}，分别表示发起成功的概率为100%，90%，80%。Delay因不同的业务对时延要求也不同。Throughput一般定为某一场景下网络的最高吞吐量。

该自组织网络跨层重配置能力主要体现在对网络层、MAC层和链路层协议参数的调整。网络层采用IP协议，主要的调整参数为包数据单元PDU的长度$Length_{PDU}$。本文中$Length_{PDU}$的取值区间为10～100次，步进值为20。MAC层采用CSMA协议，主要参数为呼叫建链的最大次数Call_Number，它表示每个节点在传送一次业务之前最大可以进行的呼叫次数。本文中Call_Number的取值区间为1～10次，步进值为1。链路层采用连续重传ARQ协议，主要参数有两个：(1) ARQ协议中每次发送数据包的总个数Packet_number，它表示每次发射最多发送的数据包数。本文中Packet_number的取值区间为5～60次，步进值为20；(2) ARQ协议中ACK的个数Ack_number，它表示每次进行ACK应答时的重传次数。本文中Ack_number的取值区间为1～10次，步进值为1。网络其他各层采用的协议，本文将在后面仿真中进行详细的说明。

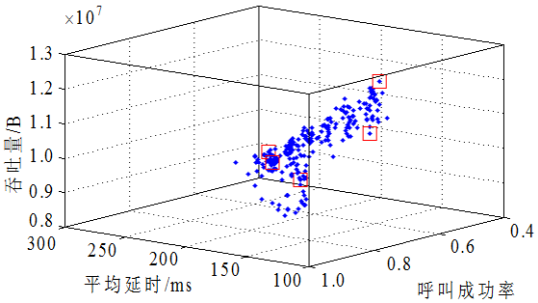
2　基于模糊判决的网络参数选择

知识库的建立本质上就是找到不同情景下网络的最优配置参数，从而使网络性能最优或者满足QoS的需求。前面已提到体现该网络性能的典型指标有吞吐量、呼叫建立成功率、业务传输平均时延。为了保证较高的呼叫成功率，需要各个节点的呼叫次数尽可能的少，从而减少节点间发生碰撞的机会。而这会造成业务平均传输时延的增大以及网络吞吐量的下降。另一方面，为了减少业务传输平均时延，需要各个节点尽可能快地发送数据，从而需要增大呼叫次数，而这却会造成呼叫成功率的下降。从上面分析可以看出，这是一个典型的多目标优化的问题。与单目标优化问题不同的是，多目标优化问题的解是一组最优解的集合，也称为Pareto解集。对于多目标优化问题如何找到合适的解，本文采用模糊判决的方法，从NSGA-Ⅱ优化得到Pareto解集中选择一组参数作为网络最优参数配置[7]。

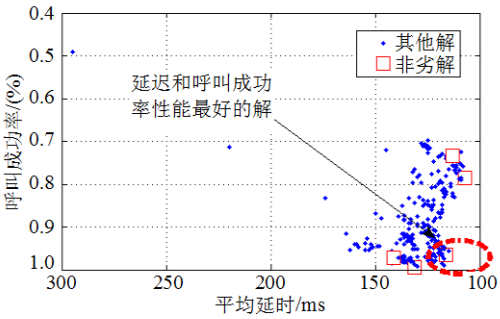
主要步骤如下：

(1) 首先采用多目标遗传算法，搜索得到在某一场景下的一组Pareto解集。NSGA-Ⅱ是比较经典的多目标遗传算法，为了保证解的收敛性，算法参数详细设置可以参考文献[7]。

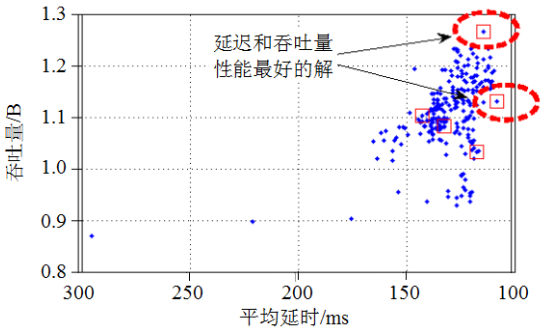
图1表示当网络场景为10 000_10_80_10_10时，对网络性能进行NSGA-Ⅱ优化而得到Pareto解集中的前5组非劣解(用矩形表示)和其他解(用*表示)的分布情况。从图1a的三维图可以发现：前5组解分别处于整个Pareto解区间的最边缘处。从图1b、图1c、图1d的二维图中可以发现：这5组解分别表示在某两个性能指标上是最佳的。



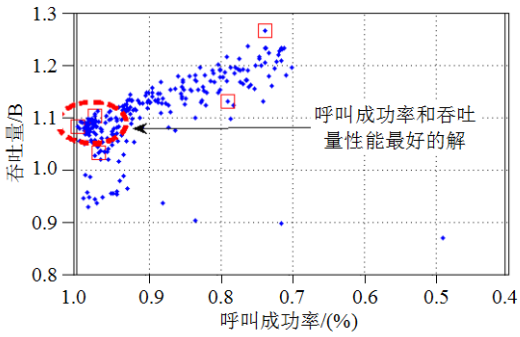
a. Pareto解集的三维图分布(时延、呼叫成功率，吞吐量)



b. Pareto解集的二维图分布(时延、呼叫成功率)



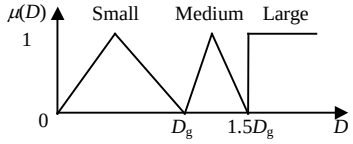
c. Pareto解集的二维图分布(时延、吞吐量)



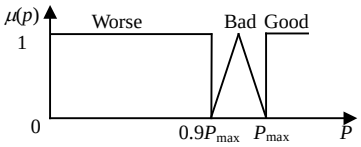
d. Pareto解集的二维图分布(呼叫成功率、吞吐量)

图1 场景为10000_10_80_10_10时的前5组非劣解与其他解的分布情况

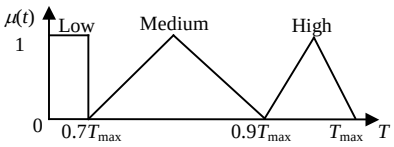
(2) 对网络性能采用模糊评判的方法，找到一个在某一Qos需求下的网络状态划分，并将对应的输入参数联合作为当前场景下的最佳参数。



a. 业务时延隶属度函数



b. 呼叫成功率隶属度函数



c. 吞吐量隶属度函数

图2 隶属度函数

在网络优化中，输入模糊变量为：呼叫建立成功率($\mathrm{Ratio}_{\mathrm{call_success}}$)，业务传输平均时延(Delay)，吞吐量(Throughput)。输出模糊变量为网络信用度C，信用度越高，表示网络优化得越好，对应的参数就越好。模糊变量隶属度函数如图2所示，其中D_g是用户提出的业务传输时延要求，P_{max}为可选的呼叫建立成功率，T_{max}为最大可传输吞吐量。业务传输时延要求Delay被划分为3个模糊语言变量：{Small，Medium，Large}，如图2a所示，Delay越小越能接近或者满足用户需求，当Delay小于D_g时就认为传输时延很小，当Delay大于D_g时认为传输时延较大，当Delay大于1.5倍的D_g时认为时延很大。如图2b所示，呼叫建立成功率 $\mathrm{Ratio}_{\mathrm{call_success}}$ 被划分为3个模糊语言变量：{Worse，Bad，Good}，呼叫建立成功率 $\mathrm{Ratio}_{\mathrm{call_success}}$ 越大越好，当 $\mathrm{Ratio}_{\mathrm{call_success}}$ 小于0.9倍P_{max}时认为呼叫建立成功率很差，当 $\mathrm{Ratio}_{\mathrm{call_success}}$ 在0.9～1倍P_{max}之间时认为呼叫建立成功率中等，当 $\mathrm{Ratio}_{\mathrm{call_success}}$ 大于等于P_{max}时认为呼叫成功率很好。用 Throughput 表示系统的吞吐量特性，如图2c所示，Throughput 被划分为3个模糊语言变量：{Low，Medium，High}，当 Throughput 小于0.7倍T_{max}时认为最大可传输吞吐量很低，当 Throughput 在[0.7,0.9]倍 T_{max} 时认为最大可传输吞吐量中等，当 Throughput 大于0.9倍T_{max}时认为最大可传输吞吐量很高。根据用户需求不同分别将C划分为7个模糊集：{1,2,3,4,5,6,7}。

将 $Delay_{sum}$ 按其大小分为3级，分别组成3个模糊语言变量：{1=Large，2=Medium，3=Small}。同理 $Ratio_{call_success}$ 划分为:{1=Worse，2=Bad，3= Good}。Throughput 被划分为：{1=Low，2=Medium，3=High}。模糊算法的目的是比较每组输入变量对应的信用度，而信任度C被划分成1～7个模糊集。综合权衡3个输入变量的信用度，选出了如表1所示的模糊控制规则。表1的规则为：IF ($Throughput_{sum}$ is 3) AND ($Calling_{sum}$ is 3) AND ($Delay_{sum}$ is 3) THEN (C is 7)。

表1　模糊控制规则

模糊分数	1	2	3	2	3	4	3	4	5	2	3	4	3	4	5	4	5	6	3	4	5	4	5	6	5	6	7
业务传输平均时延	1	1	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2	3	3	3
呼叫建立成功率	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3
吞吐量	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3

下面举例说明如何根据得到的网络性能来进行模糊评判。当网络场景为100_10_80_10_10时，假设QoS需求为{D_g=120 ms，P_{max}=1，T_{max}=12×10^6}时，对 Pareto 解集中的某一组解{业务传输时延 $Delay_{sum}$ =53、呼叫建立成功率 $Calling_{sum}$ =0.87、吞吐量 $Throughput_{sum}$ =133 700}进行模糊判决以后，则各项网络性能的模糊度为($u(D)$=2，$u(P)$=1，$u(T)$=3)，整个网络的性能模糊得分为C=4。

3　仿真结果及其分析

该自组织网络采用典型的平面式网络结构。网络各层分别采用{网络层为IP协议、MAC层为CSMA协议，链路层采用连续重传ARQ协议，物理层采用自适应速率控制协议}。节点数为32个，假设共有32个呼叫信道和128个业务信道，且网络中各节点为静态节点。业务在各个节点上均匀分布，业务的到达时间服从泊松分布。网络仿真采用Opnet软件来实现。模糊判决及NSGA-Ⅱ算法采用VC++6.0来实现。整个仿真采用VC++和Opnet联合仿真来实现。下面分别从3个方面来分析构建的知识库，即知识库中的案例集，如何从案例集中提炼出的知识，以及构建这样的知识库对网络性能潜在的提升效果。

(1) 知识库中的案例集。

当一个认知系统刚刚运行的时候，得到的往往都只是一个个单独的事件(也称案例集)。案例集一般包括以下3个元素：网络情景、QoS需求、网络跨层参数设置。根据文中第三部分给出的案例集生成方法，采用Opnet和VC++联合仿真以后的。初步结果如表2所示。表2中前3行(案例组Ⅰ)表示当网络的业务量和工作信道条件固定时，不同的QoS需求特别是对呼通率有严格的要求时，最优的网络跨层参数。表中第一行数据表示当网络场景为(Length_Frequency_CQM)=1000_10_80_10_10时，且呼叫建立成功率 $Ratio_{call_success}$ =100%。业务传输平均时延 Delay 为最小，吞吐量 Throughput 为最大时，网络的跨层最优配置参数为：包数据单元PDU的长度 $Length_{PDU}$ =40，呼叫建链的最大次数 Call_Number =9，ARQ协议中每次发送数据包的总个数Packet_number=25，ARQ协议中ACK的个数Ack_number=9。表中第4～6行(案例组Ⅱ)表示当业务负载减轻时，QoS需求同上所述，最优的网络参数设置。表中7～9行(案例组Ⅲ)表示当网络业务负载加重时，最优的网络参数设置。表中10～12行(案例组Ⅳ)表示当网络信道质量变差时，最优的网络参数设置。表中13～15行(案例组Ⅴ)表示当网络信道质量更差时，最优的网络参数设置。

表2　认知网络知识库

网络情景意识								采取措施			
网络性能需求			应用层(业务量的大小)		物理层(信道类型)			网络层	MAC层	链路层(选择性ARQ重传)	
业务传输平均时延/ms	呼叫建立成功率	吞吐量/B	业务长度	业务频率	好	中	差	数据包大小	重复呼叫最大次数	每次发送数据包个数	ACK包数
语音最小时延	无拥塞	最好	1000	10	80	10	10	40	9	25	9
语音最小时延	10%拥塞	最好	1000	10	80	10	10	50	3	35	7
语音最小时延	20%拥塞	最好	1000	10	80	10	10	59	2	20	5
语音最小时延	无拥塞	最好	100	10	80	10	10	20	8	23	7
语音最小时延	10%拥塞	最好	100	10	80	10	10	39	9	31	7
语音最小时延	20%拥塞	最好	100	10	80	10	10	50	1	30	4
语音最小时延	无拥塞	最好	10000	10	80	10	10	30	9	40	9
语音最小时延	10%拥塞	最好	10000	10	80	10	10	40	6	25	2
语音最小时延	20%拥塞	最好	10000	10	80	10	10	36	2	35	4
语音最小时延	无拥塞	最好	10000	10	50	30	20	40	9	50	9
语音最小时延	10%拥塞	最好	10000	10	50	30	20	30	5	51	3
语音最小时延	20%拥塞	最好	10000	10	50	30	20	50	2	20	8
语音最小时延	无拥塞	最好	10000	10	20	20	60	43	9	44	7
语音最小时延	10%拥塞	最好	10000	10	20	20	60	38	3	35	1
语音最小时延	20%拥塞	最好	10000	10	20	20	60	29	2	55	9

(2) 根据上述案例集提炼得到的网络知识

分别对案例组(Ⅰ Ⅱ)的3个案例进行比较后，发现一个共同的现象：当信道质量较好与业务负载较小时，减小包数据单元PDU的长度 $Length_{PDU}$ 以及增大ARQ协议中ACK的个数 Ack_number 都可以提高网络的性能。

知识 1:

IF (CQM IS Better)AND (Traffic Load IS Small), THEN (Decreasing $Length_{PDU}$, Increasing Ack_number)

分别对案例组(Ⅲ Ⅳ)的3个案例进行比较后，发现当信道质量中等，且业务负载很大时，要使网络的性能最优，需要增大呼叫建链的最大次数 Call_Number ，且增大ARQ协议中ACK的个数 Ack_number 。

知识 2:

IF (CQM IS Good)AND (Traffic Load IS Large), THEN (Increasing Call_Number , Increasing Ack_number)

分别对案例组Ⅴ的3个案例进行比较后，发现：当信道质量非常差，且业务负载很大时，要使网络的性能最优，需要增大包数据单元PDU的长度 $Length_{PDU}$ 以及减小ARQ协议中一次发送数据包的总个数 Packet_number 。

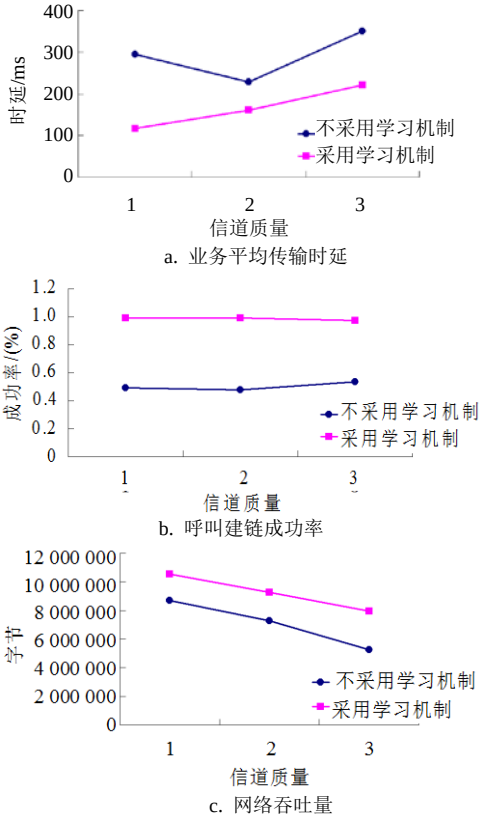
知识 3:

IF (CQM IS Bad)AND (Traffic Load IS Large), THEN (Increasing $Length_{PDU}$, Decreasing Packet_number)

(3) 构建这样的知识库对网络性能的潜在提升，是认知无线网络的意义所在。

图3表示当网络业务量固定时(10 000_10)，随着信道质量的变化，网络3项性能指标的变化。横坐标中1,2,3分别表示信道质量情况为80_10_10，50_30_20,20_20_60，纵坐标表示网络性能指标。图3a说明采用学习机制以后的网络平均时延可以减小为不采用学习机制的30%～50%；图3b说明采用学习机制的网络呼叫成功率是不采用学习机制的2倍，即提高100%；图3c说明采用学习机制的网络吞吐量相比不采用学习机制的网络吞吐量提高了20%。

图4表示当信道质量固定时(20_20_60)，随着网络业务负载的变化，网络3项性能指标的变化。横坐标中1,2,3表示网络业务量为100_10，1000_10，10 000_ 10。纵坐标表示网络性能指标。图4a说明采用学习机制以后，对于轻业务负载，网络时延性能的提高不是特别明显；随着网络负载业务负载的增大，网络平均时延可以减小为不采用学习机制时的40%~60%；图4b说明较小业务负载情况下，网络呼叫成功率的提高不是特别明显。重业务负载时，网络呼叫成功率可以减小为不采用学习机制的1/2；图4c说明较小业务负载下，网络吞吐量基本没有什么改变；随着业务负载的增大，网络吞吐量提高20%。

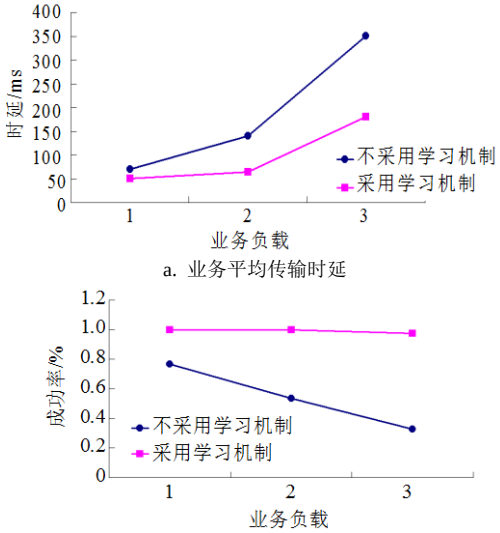


a. 业务平均传输时延

b. 呼叫建链成功率

c. 网络吞吐量

图3 网络性能VS信道质量



a. 业务平均传输时延

b. 呼叫建链成功率

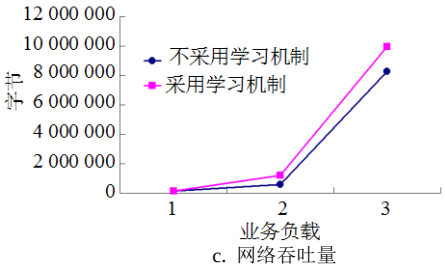


图4　网络性能VS网络业务负载

综合图3和图4可以发现：随着信道质量和网络业务负载的变化，采用学习机制对网络采取跨层重配置以后，网络平均时延大约可以减小为最差性能的50%以上，网络呼叫成功率可以提高100%左右，网络吞吐量可以提高20%左右。

4　结　论

本文着重对无固定设施的无线网络如自组织网如何构建网络情景意识知识库进行研究。在给出了某自组织网络中网络情景意识的各项度量指标基础上，本文提出采用NSGA-Ⅱ算法来生成Pareto解集。同时，还设计了一种模糊判决机制，并利用其对Pareto解集进行模糊判决生成了最优的一组网络参数配置。最后通过对多个网络场景的最优配置的分析，得到了一些共性的知识，并给出构建知识库对网络性能潜在的提升效果。

特别感谢中电30所的刘坚、吴茜、邹盛唐工程师等，他们为仿真实验编写了大量的程序代码。

参　考　文　献

[1] DEMESTICHAS P, DIMITRAKOUPULOS G, STRASSNER J, et al. Introducing reconfigurability and cognitive networks concepts in the wireless world[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2006, 1(2): 32-39.

[2] 贺新颖, 曾志民, 郭彩丽. 基于概率密度估计的认知无线电动态频谱接入算法[J]. 北京邮电大学学报, 2009, 32(1): 11-16.
HE Xin-ying, ZENG Zhi-min, GUO Cai-li. A dynamic spectrum access algorithm based on probability density estimation in cognitive radio[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2009, 32(1): 11-16.

[3] Darpa. Situation aware protocols in edge network[DB/OL]. [2009-08-21]. http://www.darpa.mil/ipto/programs/sapient/sapient.asp.

[4]赵知劲, 郑仕链, 尚俊娜, 等. 认知无线电技术[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 219-228.
ZHAO Zhi-jing, ZHENG Shi-lian, SHANG Jun-na. Cognitive radio technology [M]. Beijing: Science Press, 2008: 219-228.

[5] MANOJ B S, RAO R R, ZORZI M, et al. On the use of higher information for cognitive networking[C]//2007 IEEE Global Telecommunications Conference, Washington, DC: IEEE, 2007: 3568-3573.

[6] 邵　飞, 汪李峰, 伍　春. 基于认知层的认知网络结构及其认知方法[J]. 北京工业大学学报, 2009, 35(9): 1181-1187.
SHAO Fei, WANG Li-feng, WU Chun. Architecture of cognitive network based on cognitive layer and corresponding cognitive method[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2009, 35(9): 1181-1187.

[7] BALDO N, ZORZI M. Cognitive network access using Fuzzy Decision Making[C]//2007 IEEE International Conference on Communications. Glasgow, Britain: IEEE, 2007: 6504-6510.

编　辑　张　俊