

# 基于业务感知和策略选择的认知路由算法

顾成杰, 张顺颐, 孙雁飞

(南京邮电大学 信息技术研究所, 江苏 南京 210003)

**摘 要:** 提出了一种基于业务感知和策略选择的认知路由(cognitive network routing) 算法。该算法面向认知网络环境综合考虑了网络资源、业务流、策略选择等要素, 在获知网络中业务流的宏观特征和需求的前提下, 首先通过离线资源分配将网络资源按照业务流的固有分配特征预先配置给不同类型的业务流, 然后通过在线路径计算实时得出各个业务流的最优路径。仿真实验验证了认知路由算法的有效性, 对比于 MIRA、SWP 路由算法, CNR 算法可以提高网络资源利用率, 避免因资源不均衡产生的网络拥塞, 能够在业务流和资源 2 个层面优化网络性能。

**关键词:** 认知网络; 路由算法; 业务感知; 策略选择

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2011)11-0168-08

## Cognitive network routing algorithm based on service awareness and policy choice

GU Cheng-jie, ZHANG Shun-yi, SUN Yan-fei

(Institute of Information Network Technology, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** A cognitive network routing (CNR) algorithm based on service awareness and policy choice oriented to cognitive network was proposed. This algorithm takes network resource, flow, policy choice into account and obtains the flow characteristics and network resources condition in advance. CNR algorithm fulfills the distribution of resources through offline network allocation and gets the optimal path of each flow by online path computation. Simulation verified the effectiveness of cognitive network routing algorithm and showed that compared with the traditional routing algorithms, the cognitive network routing algorithm can improve the cognitive utilization of network resources, avoid network congestion caused by resources allocation and optimize network performance at different levels.

**Key words:** cognitive network; routing algorithm; service awareness; policy choice

### 1 引言

当前, 网络面临着“业务繁多、需求差异、动态时变、资源稀缺”的问题, 难以满足多业务动态传输的需要, 而且由于不具备自适应性和智能性不能根据环境的变化进行动态重配置, 所以难以为用

户提高端到端的 QoS 保证<sup>[1]</sup>。针对这些问题, 学术界提出在新一代网络中融入认知元素以提高网络的自治性和自适应性, 因此认知网络成为当前学术界研究的热点<sup>[2]</sup>。

认知网络的研究源自于认知无线电, Mitola 等人<sup>[3]</sup>于 1999 年提出了认知无线电(cognitive radio)的

收稿日期: 2011-06-27; 修回日期: 2011-11-05

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(2009AA01Z202, 2009AA01Z212); 国家自然科学基金资助项目(61003237); 江苏省重大科技支撑计划基金资助项目(BE2008134); 江苏省高技术研究计划基金资助项目(BG2007045)

**Foundation Items:** The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2009AA01Z202 2009AA01Z212); The National Natural Science Foundation of China (61003237); The Important Science and Technology Support Project of Jiangsu Province (BE2008134); The High Technology Research Plan of Jiangsu Province (BG2007045)

概念, 认知无线电通过检测空闲频谱, 为认知无线网络提供相应的频谱信息, 并根据环境的变化进行自适应调整。2003 年, Clark<sup>[4]</sup>提出在互联网中引入知识平面(knowledge plane), 使网络可以分析决策并调整自身运作。认知网络(CN, cognitive network)是 2005 年美国弗吉尼亚工学院的 W.Thomas 等人提出的<sup>[5]</sup>, 认知网络具有智能的认知过程, 能够感知网络自身的状态, 然后分析、决策并对网络做出自适应的规划和调整, 直到达到预期的端到端目标和网络整体性能的提高。目前, 在 IEEE 标准化学会中已采用了认知网络的概念, 深入进行异构无线接入网络融合架构的标准化工作。认知网络 QoS 是在认知网络环境下将智能的认知理念与传统的 QoS 技术相结合, 从而解决当前网络适应性差、全网效能低下等问题, 能够有效地提高网络资源利用率, 并为其承载的各类业务提供端到端的 QoS<sup>[6-9]</sup>。

路由技术是网络互联的核心, 也是认知网络需要研究的关键技术之一, 它对认知网络中保证用户端到端的 QoS 目标起着至关重要的作用。在认知网络路由技术研究方面, Gelebe 等人在文献[10]提出了认知分组网络(CPN, cognitive packet network)的概念, CPN 中使用一类具有特殊功能的智能分组来进行路由选择, 它们携带可执行代码, 并能够收集和携带路由状态信息。当智能分组到达网络中的某个节点时, 与节点交互网络环境信息, 进行路由强化学习, 实现路由的优化。Gabriella<sup>[11]</sup>提出了一种适于超宽带(UWB)网络的认知路由方案, 该方案通过定义效用函数来衡量路由选择的效果并进行路由转发。Sasitharan 等<sup>[12]</sup>受生物系统运行机制的启发, 将生物学的方法应用于认知网络的路由选择, 提出了与生存能力相适的路由算法, 当链路发生瞬时故障时, 路由算法根据一定的策略重新调整路由参数来重新配置网络资源, 保证网络的 QoS。文献[13]针对当前链路状态路由协议缺乏有效的拥塞避免机制, 提出使用蚁群算法来研究认知网络中的多径路由问题, 根据应用的 QoS 需求利用双向蚂蚁寻路加速路由优化速度, 有效解决了网络拥塞问题。

面向认知网络环境, 如何感知网络环境, 充分利用网络资源, 动态地根据网络环境调整路由策略, 获得端到端的优化目标是认知路由算法需要解决的问题<sup>[14]</sup>。本文设计了一种认知路由模型结构, 并在此基础上提出一种基于业务感知和策略选择的认知路由(CNR)算法, 该路由算法在获知网络中

业务流的宏观特征和需求的前提下, 通过离线资源分配和在线路径计算, 得到能够满足给定网络中各种业务流的带宽要求的最优路径, 从而提高链路利用率并实现负载均衡, 同时有效地减少了网络拥塞。

## 2 认知路由模型结构

### 2.1 认知路由节点

区别于传统网络只提供尽力而为的服务, 认知网络目标是要保证用户端到端的 QoS, 通过在节点中加入认知功能, 使网元可以动态自优化地自适应环境变化, 从而提高整体网络的性能。本文提出一种认知路由节点, 如图 1 所示。认知路由节点分为认知层和数据层。认知层包括业务感知模块、策略选择模块和路由决策模块; 而数据层负责对数据分组的封装和调度转发等。该认知路由节点可以收集网络资源使用情况、业务 QoS 需求、网络流量分布等信息, 并根据相应的策略选择实现对业务流的动态路由, 从而保证端到端 QoS。其中业务感知模块负责获取认知网络环境中各种业务流的信息, 并将业务流的需求映射为认知网络的端到端 QoS 需求, 策略选择模块可以根据策略库动态地选择相应的路由策略, 路由决策模块则负责路由的构建和更新。认知路由节点在计算数据分组路由时, 需要网络拓扑和链路可用带宽等网络负载的详细信息, 依据网络环境信息和业务需求, 并根据策略选择来进行网络资源的分配。

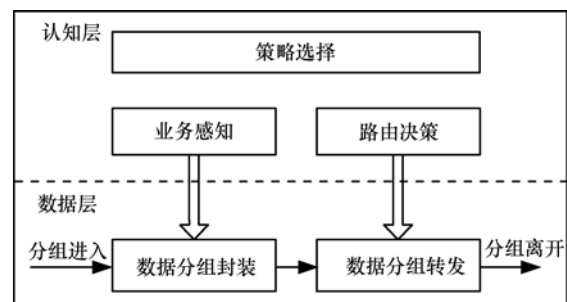


图 1 认知路由节点

整个认知网络中的路由器主要由边缘认知路由器和核心认知路由器构成, 如图 2 所示。其中边缘认知路由器部署有业务感知模块, 对网络中的业务进行识别, 并为 IP 分组打上不同的 DSCP 标记, 所有边缘认知路由器都能采集网络的状态信息并上传给核心认知路由器。核心认知路由器包含有数据处理模块、推理学习模块、决策模块和策略下发

模块，它将采集得到的信息进行处理、推理、学习并进行决策，边缘认知路由器根据核心认知路由器下发的策略对不同的业务进行区分并根据策略库中的知识执行自适应管理。

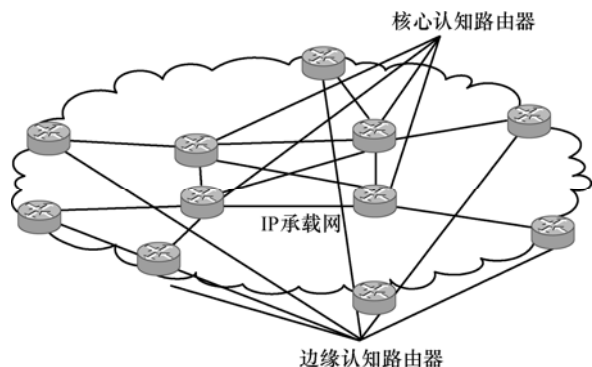


图 2 认知路由模型结构

### 2.2 业务感知

认知网络与认知无线电、认知无线网络在覆盖范围上不同。认知无线电覆盖无线链路，其范围主要涉及物理层和 MAC 层，认知无线网络覆盖无线网络，其范围涵盖整个协议栈，而认知网络覆盖包括核心网在内的整个通信网络。未来的通信网络是异构网络并存的大规模网络，具有链路性能的差异较大、异构网络环境的动态变化、无线链路的频谱干扰较难预测与控制等特点。传统的频谱分配采用的是“独占”的策略，即使主用户没有使用授权频谱，该频段也不能被其他用户使用，造成了频谱资源的巨大浪费。认知无线电通过对主用户的行为以及无线频谱资源的感知，可以检测到并合理利用“频谱空穴”，在不对主用户造成干扰的条件下实现频谱的高效利用。

近几年，不断涌现的 VoIP、P2P、流媒体等业务经常造成网络拥塞和 QoS 劣化。由于简单的扩容无法满足业务容量增长的需要，在这样的技术背景下，认知网络作为解决复杂性网络极具潜力的方法被引入 QoS 保证技术研究中。业务感知是认知网络环境下实施服务质量策略的基础。业务感知可以由边缘认知路由器根据业务流的特征、流标记以及流统计阈值来独立完成，也可以与业务管理服务器配合，从而保证系统具有强大的智能处理能力和业务灵活性。本文将经过边缘认知路由器得到的业务感知结果用一个四元组来表示(业务流类别、源地址、目的地址、带宽要求)。该四元组可以表示为网络流量特征矩阵  $P(C_k, S_k, D_k, B_k)$ ，其中通过业务感知将

业务流分为  $K$  类， $K = 1, 2, \dots, K$ ，业务流类型为  $C_k$ ； $S_k$ 、 $D_k$  分别为第  $k$  类业务流的源地址、目的地址， $B_k$  为第  $k$  类业务流的带宽要求。当前网络中业务流的种类、分布情况和带宽需求可以用网络流量特征矩阵  $P$  来表示。

传统 TCP 协议中 RTT(round trip time)的估计值在多于一个数据源同时传输时呈现出高度波动性，这种 RTT 波动会影响排队时延，由此引起拥塞窗口行为。为了支持认知网络能够及时进行业务感知，认知网络的传输层协议需要对 TCP 协议进行改进和增强，其中需要重新设计一个 RTT 估计函数来平滑地估计 RTT。本文通过指数加权 ARMA 模型来平滑 RTT 的估计值。在具体实现中，拥塞窗口每 2 个 RTT 改变一次，在一个 RTT 中更新，在另一个 RTT 中保持不变，估计值的计算也在第一个 RTT 中进行，以此交替反复进行。这样可以在往返时延 RTT 变化时逐步改变拥塞窗口，能够同步共享网络中的不同主机并且最终稳定拥塞窗口，以此来克服传统 TCP 协议中容易出现的拥塞窗口，波动性大的问题。本文设计的 RTT 的估计函数使用了先前估计的 RTT 值和实时测量的 RTT 值来计算新的 RTT 值：

$$PRTT_t = \mu(RTT_{rec}) + \lambda(PRRT_{t-\Delta t}) + \sum_{i=1}^p \varphi_i(RTT_{t-i\Delta t}) + \sum_{j=1}^q \delta_j(RTT_{t-j\Delta t}) \quad (1)$$

其中， $PRTT_t$  代表当前时间估计并且平滑后的 RTT 值， $RTT_{rec}$  代表先前估计的 RTT 值， $\Delta t$  为协议规定的测量 RTT 的时间间隔， $p$ 、 $q$  为模型的阶数， $\mu$ 、 $\lambda$ 、 $\varphi_i$ 、 $\delta_j$  为稳定参数，并且

$$\mu + \lambda + \sum_{i=1}^p \varphi_i + \sum_{j=1}^q \delta_j = 1。$$

### 2.3 策略选择

由于网络中分布着带宽需求不同的各种业务，为了有效地利用网络资源，需要对网络中业务流的带宽分配进行策略选择。策略选择是根据端到端 QoS 目标、网络中承载业务类型、网络流量状态等进行网络可用资源的分配策略的规划，在业务类型、流量状态、资源可用情况和路由策略之间建立相应的逻辑关系。为了有效地利用网络资源，使得业务流可以有效地分布在不同的链路中，需要选择链路容量与业务流带宽需求之比  $u_{ij}/b_k$  较大的链路，避开二者之比较小的链路。因此，针对每类业务流  $C_k$  引入每流每链路带宽值  $c_{ij}^k$  来控制网络中可

用带宽的分配：

$$c_{ij}^k = m \frac{u_{ij}}{b_k} + b \quad (2)$$

其中， $b_k$  为第  $k$  类业务流的带宽需求， $u_{ij}$  为链路容量， $m$  和  $b$  为相关系数。当链路容量小于某类业务流  $k$  的带宽需求时，该类业务流在链路  $(i, j)$  上的每流每链路带宽值  $c_{ij}^k = \infty$ ，从而避开那些带宽需求相对不足的链路。策略选择一方面通过调整每流每链路带宽值来决定某些资源是否分配给某些流，另一方面可以在线调整某些链路上某类业务流占用的可用带宽大小。

### 3 基于业务感知和策略选择的认知路由算法

为了提高网络整体资源利用率和网络的接入率，Szeto 等人在文献[15]中将多商品流问题引入网络资源优化分配中，根据多商品流的输出得到每链路分配给每个虚拟网络连接的带宽值。借鉴文献[15]的思想，为了提高网络中的链路利用率和实现负载均衡，本文将认知路由计算问题转化为多商品流的资源分配模型来处理，提出基于业务感知和策略选择的认知路由(CNR)算法。认知路由(CNR)算法主要分为离线资源分配和在线路径计算 2 个阶段。离线资源分配首先通过业务感知得到网络中业务流的分布宏观特征，然后通过计算多商品流的资源分配模型来得到每流每链路的带宽值。在线路径计算则把离线资源分配得到的每条链路针对每类业务流的可用带宽，采用约束最短路径算法，计算出满足当前业务流可用带宽的最优路径。认知路由算法流程描述如图 3 所示。

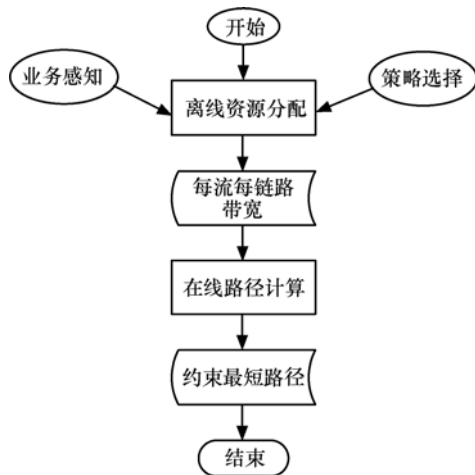


图 3 认知路由算法流程描述

### 3.1 离线资源分配

本文分别用  $V$  和  $E$  表示顶点和链路的集合，则认知网络  $G$  可以表示为  $G=(V, E)$ 。设网络中有  $K$  类不同种类的业务流，业务流  $k$  ( $1 \leq k \leq K$ ) 的带宽需求为  $b_k$ ，带宽需求向量为  $B^k$ ，网络中每条链路  $(i, j)$  的物理容量为  $u_{ij}$ ， $N$  为认知网络关联矩阵，业务流  $k$  在链路  $(i, j)$  上的带宽要求为  $x_{ij}^k$ ，业务流向量为  $X^k$ 。 $c_{ij}^k$  是考虑策略选择、业务流种类及当前网络状态等要素得到的每流每链路带宽值，本文通过引入每流每链路带宽值  $c_{ij}^k$  来控制网络中链路的可用带宽分配。为了实现各种业务流能够有效地分布在网络的不同链路上并且保证业务的端到端 QoS，认知路由的离线资源分配问题的目标函数可以描述为

$$\min \sum_{(i,j) \in E} \sum_{1 \leq k \leq K} c_{ij}^k x_{ij}^k \quad (3)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{1 \leq k \leq K} x_{ij}^k \leq u_{ij}, \quad \forall (i, j) \in E \quad (4)$$

$$NX^k = B^k, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (5)$$

认知路由计算问题的目标函数式(3)是认知网络中总的资源耗费最小，目标函数的输出  $x_{ij}^k$  为第  $k$  类业务流分布在链路  $(i, j)$  上的流量值。式(4)是链路容量约束条件，保证链路上的各种业务带宽小于链路最大容量。式(5)能够约束网络中的链路承受所有种类的业务流。

传统的网络资源分配方法没有考虑网络中业务流的种类不同、不同业务流对带宽需求及控制策略的不同，而认知路由算法的离线资源分配通过将业务类型、当前网络状态和策略选择等作为最优问题的输入条件，在业务类型、资源可用情况和路由策略之间通过每流每链路带宽值  $c_{ij}^k$  来建立逻辑关系。

### 3.2 在线路径计算

传统路由算法的链路带宽分配是不考虑业务流区分的，而认知路由算法中的每个业务流的可用带宽则是由其所属的初始每链路带宽决定的。网络中的认知路由器首先根据感知的业务流的类别，通过离线资源分配阶段计算每一条业务流的每流每链路预分配值  $x_{ij}^k$ ，然后在在线路径计算阶段中，将  $x_{ij}^k$  作为其链路可用带宽值进行计算，按照业务流到达的先后顺序基于约束最短路径算法进行在线计

算，从而得到最优路径。

认知网络  $G$  用  $G=(V, E)$  来表示，其中  $V$  和  $E$  表示顶点和链路的集合。假设当前业务流  $x$  的带宽需求为  $b_k$ ，对于  $G$  的每一条链路  $e$ ，假设每类业务流  $k$  的可用带宽  $x_k(e)$ 。在线路径计算阶段中，首先将离线资源分配阶段得到的每流每链路带宽  $x_{ij}^k$  作为输入条件，并令  $x_k(e) = x_{ij}^k$ 。为了保证特定优先级的业务流 QoS，为每一条链路保留一定的可用带宽值  $X(e)$ ，以免在分配每流每链路带宽时资源不足。最后采用约束最短路径算法，计算出满足当前业务流可用带宽的最优路径，同时并更新业务流  $k$  的可用带宽  $x_k(e)$ 。

### 3.3 算法复杂度分析

认知路由(CNR)算法可以根据网络现有的可用资源情况和业务流的 QoS 需求，在运行过程中对路径进行选择 and 动态调整，从而保证网络资源的有效利用，因此也是一种动态路由算法。学术界对传统网络下的动态路由算法问题进行了大量的工作，其中代表性的路由算法主要有最小跳(MHA, min-hop algorithm)算法、最宽最短路径(WSP, widest-shortest path)算法、最短最宽路径(SWP, shortest-widest path)算法<sup>[16]</sup>以及最小干扰路径(MIRA, minimum interference routing algorithm)算法<sup>[17]</sup>等。

认知路由算法包括离线资源分配和在线路径计算两部分。为了降低在线路径计算的复杂度，离线资源分配一般可以在专门的服务器中预先进行，使用启发式算法通过次梯度法求解，得到每流每链路初始带宽列表，而在线路径计算则放在各个认知路由器中进行。因此可以认为离线资源分配计算不占用认知路由的计算时间，认知路由的计算时间主要由在线路径计算部分确定。认知路由(CNR)算法中在线路径计算阶段采用广度优先搜索算法求解最短路由路径，因此 CNR 算法具有和广度优先搜索算法相同的时间复杂度。在最差情形下，广度优先搜索算法必须寻找所有到可能节点的所有路径，因此对于一个具有  $n$  个节点和  $m$  条边的网络，认知路由(CNR)算法的复杂度为  $O(n+m)$ ，为线性时间算法。对于相同规模的网络，由于 MIRA 的核心是基于“关键链路”的权值计算，“关键链路”可以通过最大流和最小割计算确定，计算最大流的 Ford-Fulkerson 标号算法每次在所用增广路中选择一条进行增广，由于每次增广最多需要对所有链路检查一遍，因此算法的复杂度为  $O(n^2\sqrt{m}+m^2)$ 。而 SWP 算法的复杂度为  $O(m\log n)$

或  $O(n^2)$ ，因为 SWP 算法在计算在线路径时至少要执行一次 Dijkstra 算法。因此认知路由(CNR)算法比传统 MIRA、SWP 算法的复杂度低。

## 4 实验结果与分析

为了测试认知路由(CNR)算法的有效性，仿真实验采用文献[15]的网络拓扑结构 MIRANet，如图 4 所示。MIRANet 网络拓扑结构中包括 15 个节点，并且每条链路都是双向链路，分别用粗线和细线来标识链路不同的带宽容量，LSP 连接请求的入口路由器节点在  $S_1 \sim S_4$  之间随机选择，出口路由器节点在  $D_1 \sim D_4$  之间随机选择。仿真使用了三类业务流，包含  $N_1$  个持久的 FTP 业务连接、 $N_2$  个突发而短暂的 HTTP 业务连接(每个连接包括 10 个会话)和  $N_3$  个非弹性的 UDP 业务源(指数服务模型，空闲和突发时间均为 1s，“ON”期间的业务速率为 40kbit/s)，业务流到达率服从 Poission 分布，优先级分别定义为高、中和低。其中 RTT 的估计函数中的  $p, q$  根据样本自相关系数和偏相关系数定阶，利用 ARMASA 工具箱中的 armasel()函数对 RTT 历史数据进行拟合，当  $p=5, q=3$  时，能够选取最佳的 ARMA 模型。 $\mu, \lambda, \varphi_i, \delta_j$  为稳定参数，这些参数的选择对于拥塞控制协议非常关键，本文从仿真实验中让其值从 0 到 1 遍历，在  $\mu=0.3, \lambda=0.4, \varphi_i=0.15, \delta_j=0.15$  时取得最佳值。本文将 CNR 算法与 MIRA、SWP 算法在不同负载环境下和网络业务类型动态变化环境下进行性能比较分析。

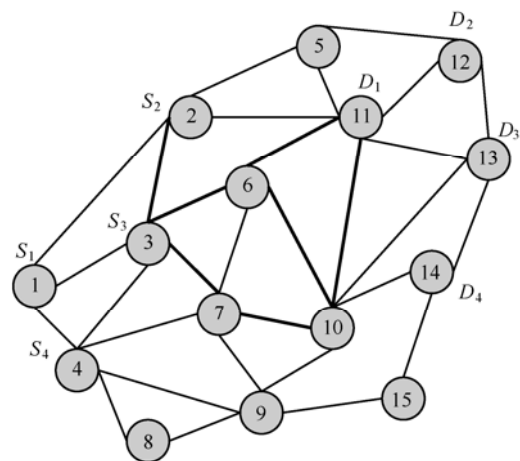


图 4 MIRANet 拓扑

### 4.1 轻负载环境下的仿真比较

假定  $N_1=50, N_2=0, N_3=0$ ，即加入 50 个持久的

FTP 业务连接，分别采用 CNR、MIRA 和 SWP 算法，采用吞吐量和分组丢失率来衡量 CNR 算法的有效性。从图 5 中可以看出，在低负载环境下，CNR 相对于 MIRA 和 SWP 算法网络性能有了明显优化。在 600s 时刻，采用 SWP、MIRA 和采用 CNR 算法的吞吐量分别对应于 3 257kbit/s、3 550kbit/s 和 4 150kbit/s。原因在于采用认知路由算法的网络能够感知网络状况，通过自适应调整对链路带宽分配，有效地提高了网络的吞吐量。

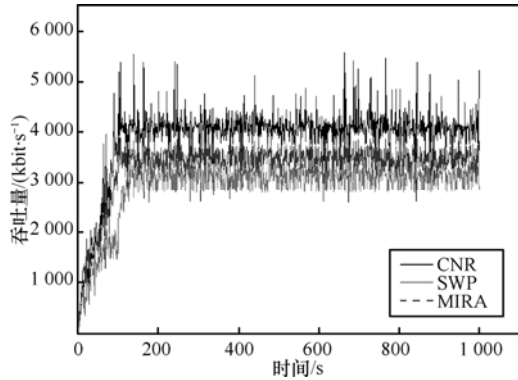


图 5 轻负载环境下网络吞吐量比较

同样在轻负载环境下，如图 6 中的 600s 时刻，采用 SWP、MIRA 算法和采用 CNR 算法的分组丢失率分别对应于 0.29%、0.25% 和 0.17%，相比于采用 SWP、MIRA 算法的网络，网络引入认知路由 CNR 算法后，网络的分组丢失率有一定程度的降低。原因在于 CNR 算法通过预留一定的可用带宽值  $X(e)$ ，可以保证特定业务流的 QoS 和以免在分配每流每链路带宽时资源不足。

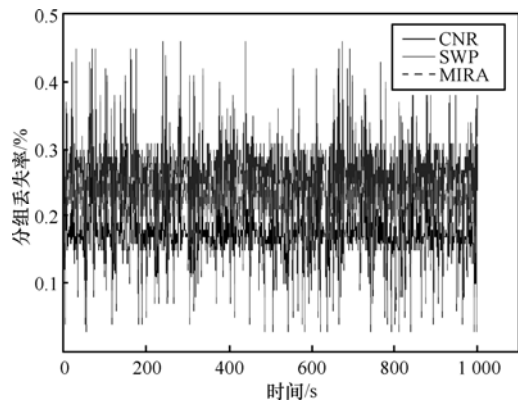


图 6 轻负载环境下网络分组丢失率比较

### 4.2 重负载环境下的仿真比较

为了比较 CNR 算法在重负载环境下的自适应能力，假定  $N_1=500$ 、 $N_2=0$ 、 $N_3=0$  进行仿真，即持久的

FTP 业务连接达到 500 个，分别采用 CNR、MIRA 和 SWP 算法，仿真结果如图 7 所示。在 600s 时刻，采用 SWP、MIRA 和采用 CNR 算法的吞吐量分别对应于 3 050kbit/s、3 450kbit/s 和 4 250kbit/s。实验结果可以看出，SWP 与 MIRA 算法对该状况的变化适应能力不足，吞吐量出现了较大的波动，甚至出现了振荡。而 CNR 算法则保持了较高的吞吐量，能稳定地趋近于吞吐量的期望值 4 200kbit/s，并且波动不大。

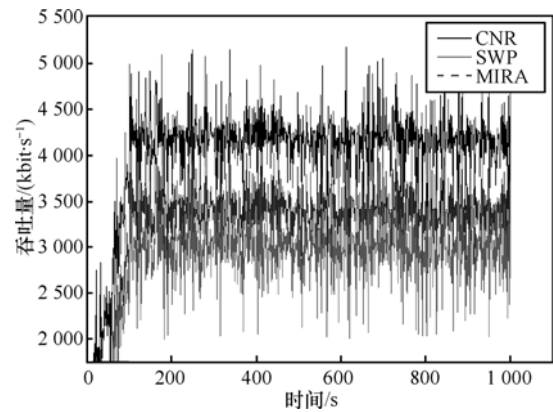


图 7 重负载环境下网络吞吐量比较

同样在图 8 中的 600s 时刻，采用 SWP、MIRA 算法和采用 CNR 算法的分组丢失率分别对应于 0.33%、0.28% 和 0.17%，相比于采用 SWP、MIRA 算法的网络，网络引入认知路由 CNR 算法后，分组丢失率也能继续保持稳定，并且维持在较低的值，可以说明 CNR 算法能有效地在重负载环境下自适应地解决由于负载增大带来的问题。

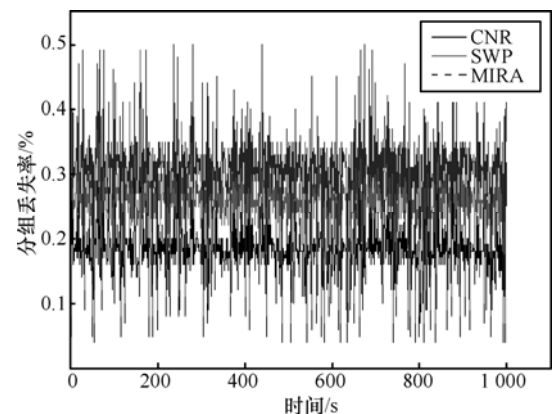


图 8 重负载环境下网络分组丢失率比较

通过在不同负载下的仿真实验说明，对比 MIRA、SWP 路由算法，应用本文所提出的认知路由(CNR)算法可以使网络的性能有所提高，CNR 算法能够根据网络上业务流的类型和网络拥塞情况

实时进行最优路由转发，提高网络吞吐量，同时降低分组丢失率。

### 4.3 网络业务类型动态变动环境下的仿真比较

为了更加精确地模拟真实网络环境，建立业务类型动态加入与退出下的仿真网络环境，并且将网络可以接纳的业务流数目作为评估路由算法性能的指标。其主要依据是在相同负载条件下，路由算法平衡网络资源的能力越强，网络资源利用率越高，网络能够同时接纳的业务流数量越大。当路由由计算不合理时，网络资源使用率低，必然导致较多的业务流请求被拒绝。因此，网络重载荷情况下接纳业务流的数量能够反映路由算法平衡网络资源的能力。实验选取 HTTP、FTP 和 UDP 3 种业务流，其中 HTTP、UDP 为扰动业务流。假定  $N_1=40$ 、 $N_2=30$ 、 $N_3=30$  进行仿真，仿真的过程中一直有 40 个 FTP 连接业务的存在，在 45s 时加入 30 次 HTTP 业务连接，55s 时结束 HTTP 业务连接，继而在 65s 时加入 UDP 业务，在 75s 时结束 UDP 业务。

网络业务类型动态变动环境下 3 种路由算法的实验结果如图 9 所示。从图中可以看出，在请求接入业务流数量在 50 个以下时，MIRA、SWP 和 CNR 3 种算法性能相似，但当请求接入业务流数量超过 50 个时，3 种算法有了一定的差异。其中 CNR 算法相比于 MIRA、SWP 算法能够接纳最多业务流，主要因为 MIRA 和 SWP 算法不能综合考虑网络中不同业务流对网络资源的需求，导致网络资源分配不均衡。仿真结果表明，CNR 算法相比于 MIRA、SWP 算法可以接纳较多的业务流，具有较好的网络资源利用率和负载均衡能力，能够适应网络业务类型动态变动带来的影响。

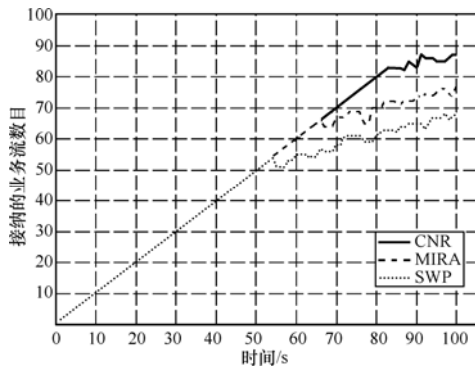


图 9 网络接纳 LSP 数目比较

### 4.4 原型系统验证

为了验证本文所提出的 CNR 算法在实际网络

环境中的有效性，在实验室下搭建小规模的认识网络系统。该系统包括 2 台核心认知路由器、4 台边缘认知路由器和 10 台以上认知终端组成。为了认知网络可扩展性的需要，系统中的每个认知路由器通过多网卡主机中配置基于 Click 转发平台的开源软路由 XORP(extensible open router platform)来实现。为了使所搭建认知网络原型系统更真实地反映现实网络的传输，实验中不仅提供关键业务流的传输，同时也提供了背景业务流(非关键业务)的传输。业务流传输的模拟利用一些开源的软件(如 QuikTime、FileZilla、BitTorrent 等)来进行设置。

峰值信噪比(PSNR, peak signal-to-noise ratio)表示信号最大可能功率和影响其表示精度的噪音功率的比值，是一种评价图像的客观标准。本文采用 PSNR 作为衡量 CNR 算法有效性指标之一，表示经过编码和网络传输后(可能经历分组丢失)重新合成的视频图像和未压缩的视频图像的峰值信噪比。

实验结果如图 10 所示，取 RTP 视频流传输的前 300 帧进行分析，可以明显看出在使用 CNR 算法的认知网络环境中进行 RTP 视频流传输时的 PSNR 比在未使用 CNR 算法的传统网络的要高，视频质量较高并且波动较小。图 11 是 RTP 视频流在 125 帧时的视频质量对比结果。

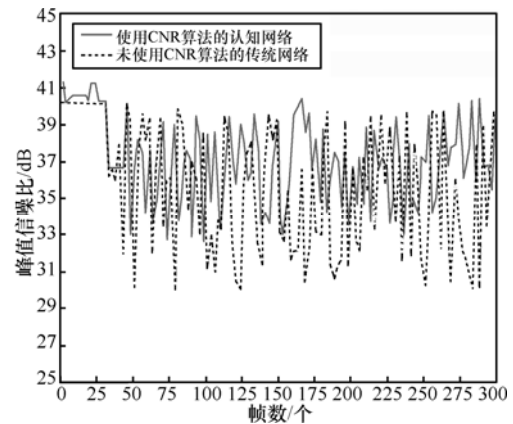


图 10 RTP 流媒体的峰值信噪比对比



图 11 RTP 视频流在 125 帧时的视频质量对比

## 5 结束语

随着网络业务的增多、网络规模的扩大，用户需求的差异化，不具备智能性和动态自适应性的传统路由理论与技术方法，将难以满足多业务动态传输的 QoS 需要。本文提出了一种基于业务感知和策略选择的认知路由算法(CNR)，CNR 算法综合考虑了网络资源、业务流、策略选择等要素，离线资源分配分配根据网络中业务流对网络中可用资源进行分配，在线路径计算则根据每流每链路带宽采用约束最短路径算法，将网络可用带宽分配给业务流，从而得到最优路径。与传统路由算法 MIRA、SWP 相比，实验结果表明 CNR 算法在不同网络负载环境下均具有较低的分组丢失率和较高的吞吐量，能够接纳较多的业务流，可以有效地提高网络整体效能及业务流的端到端 QoS。

### 参考文献：

- [1] SIFALAKIS M, MAVRIKIS M, MAISTROS G. Adding reasoning and cognition to the Internet[A]. Proceedings of the 3rd Hellenic Conference on Artificial Intelligence[C]. Samos, Greece, 2004.
- [2] RYAN W, DANIEL T, FRIEND H. Cognitive networks: adaptation and learning to achieve end-to-end performance objectives[J]. IEEE Communications Magazine, 2006, 44(12):51-57.
- [3] MITOLA J, MAGUIRE G Q. Cognitive radio: making software radios more personal[J]. IEEE Personal Communications, 1999, 69(8):13-18.
- [4] CLARK D D, PARTRIGE C, RAMMING J C, *et al.* A knowledge plane for the Internet[J]. Computer Communication Review, 2003, 33(4):3-10.
- [5] THOMAS R W, DASILVA L A, MACKENZIE A B. Cognitive networks[A]. 2005 1st IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks[C]. 2005. 352-360.
- [6] THOMAS R W, FRIEND D H, DASILVA L A, *et al.* Cognitive networks: adaptation and learning to achieve end-to-end performance objectives[J]. IEEE Communications Magazine, 2006, 44(12):51-57.
- [7] MAROJEVIC V, REVES X, GELONCH A. Cooperative resource management in cognitive radio[A]. IEEE International Conference on Communications[C]. 2007.5953-5954.
- [8] BALAMURALIDHAR P, PRASAD R. A context driven architecture for cognitive radio nodes[J]. Wireless Personal Communications, 2008, 45(3): 423-434.
- [9] CAROLINA F, MIHAEL M. Trends in the development of communication networks: cognitive networks[J]. Computer Networks, 2009, 53(9): 1354-1376.
- [10] GELENBE E, XU Z G, SEREF E. Cognitive packet networks[A]. Proceedings of 11th IEEE International Conference on Tools with

Artificial Intelligence[C]. 1999. 47-54.

- [11] GABRIELLA M, BENEDETTO D, NARDIS L D. Cognitive routing in UWB networks[A]. The IEEE 2006 International Conference on Ultra-Wideband[C]. 2006.381-386.
- [12] BALASUBRAMANIAM S, BOTVICH D. Policy-constrained bio-inspired processes for autonomic route management [J]. Computer Networks, 2009, 53(10):1666-1682.
- [13] LI D N, ZHANG R T, WANG R. A multiple-path routing algorithm with congestion avoidance based upon ant colony algorithm in cognitive networks[J]. Journal of Computational Information Systems, 2010, 6(8):2473-2482.
- [14] 李红艳,李建东,周丹.认知网络路由技术[J].中兴通信技术, 2010, 16(1): 50-52.  
LI H Y, LI J D, ZHOU D. Routing in cognitive network[J]. ZTE Communications, 2010, 16(1):50-52.
- [15] SZETO W, IRAQI Y, BOUTABA R. A multi-commodity flow based approach to virtual network resource allocation[A]. IEEE Global Telecommunications Conference[C]. 2003.3004-3008.
- [16] KOUSHIK K, KODIALAM M, LAKSHMA N. Minimum interference routing of bandwidth guaranteed tunnels with MPLS traffic engineering applications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000,18(12):2566-2579.
- [17] WANG Z, CROUCROF T. Quality-of-service routing for supporting multimedia applications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1996,14(7):1228-1234.

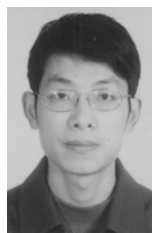
### 作者简介：



顾成杰（1985-），男，安徽合肥人，南京邮电大学博士生，主要研究方向为通信网与 IP 技术、认知网络。



张顺颐（1944-），男，江苏南京人，南京邮电大学教授、博士生导师，主要研究方向为计算机网络通信、通信网与 IP 技术。



孙雁飞（1976-），男，山东莱芜人，博士，南京邮电大学副教授、硕士生导师，主要研究方向为网络性能监测与优化、QoS 控制与管理、多媒体网络通信。