

认知网络中的拥塞规避多径路由算法

王传臣,张润彤,李丹丹,曹 峰

(北京交通大学信息系统研究所,北京 100044)

摘 要: 链路拥塞导致的数据包传输延时或者数据包丢弃使得网络无法保证业务的 QoS,而目前普遍使用的链路状态路由算法不具有拥塞响应机制.本文针对以上问题,提出了一种能够快速规避拥塞的多径路由算法,该算法通过改进蚂蚁算法,在拥塞发生时采用双向蚂蚁寻路的方法,提高了新路径搜索的速度;使用新的寻路准则使其更满足认知网络的 QoS 需求.使用 OPNET 仿真比较,表明该算法在控制网络丢包率、时延、剩余带宽方面均具有较好的性能.

关键词: 认知网络; 蚂蚁算法; 多径路由; 拥塞规避

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 08-1858-06

Multiple-Path Routing Algorithm with Congestion Avoidance in Cognitive Networks

WANG Chuan-chen, ZHANG Run-tong, LI Dan-dan, CAO Feng

(*Institute of Information Systems, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*)

Abstract: The delay and loss of data packets, which caused by the links congestion, will lower down the users' QoS. While the present link state routing algorithms don't possess congestion avoidance mechanism. This paper proposes an ant-based multiple-path routing algorithm with congestion avoidance, in order to solve the above problems. It improves the ant colony algorithm, and adopts double-way ant-exploration method to speed up the exploration of optimal routes. The new searching routings guidance better satisfies the demands of QoS. Simulation contrast with OPNET shows that the algorithm is valid and effective at controlling packet loss ratio, delay and residual bandwidth.

Key words: cognitive networks; ant colony algorithm; multiple-path routing; congestion avoidance

1 引言

认知网络^[1](Cognitive Network)能够感知外部环境,通过对外部环境的理解与学习,实时调整通信网络内部配置,智能地适应外部环境的变化.它具有认知循环特性,能够觉察目前的网络环境,并根据这些环境进行计划、决策与执行,这样的网络能在动态自适应的过程中不断的学习,为以后的调整和判决积累经验;认知网络具有预见性,其自适应是先应式的,而不是反应式的,也即动态调整是发生在问题出现之前,而不是之后;认知网络是以端到端 QoS(Quality of Service)性能的改善为目标,着眼于整个网络而不是其中的某些元素.正因为以上的独特性质,认知网络已经成为国内外研究的热点^[2~4],它的这些特点有利于为用户提供更适合的 QoS 保障.

为了使认知网络更好的支持多媒体通信, QoS 路由是一种至关重要的机制^[5],尤其是多径路由机制得到了广泛关注.开放最短路径优先算法(open shortest path first, OSPF)是满足 QoS 的路由的典型代表,它是现有网络普遍采用的一种路由协议,它采用的路由算法是链路状态路由算法(link state routing, LS).但是 LS 不是多径路由算法,并且不具有拥塞规避机制,当一条链路即将或者已经发生拥塞时,只有简单的丢弃数据包,即使网络中其他链路还是空闲的,这使得网络资源无法得到充分的利用.

蚂蚁算法^[6~8]不需要进行大量的概率计算和建立复杂的数学模型,容易实现,已经越来越多的被人们用于解决组合优化和通信网络方面的问题,在路由中的研究也非常广泛.文献[9]通过改进蚂蚁算法,提出了具有拥塞规避机制的路由算法(LB).LB 算法能够快速搜

索具有一个目标约束(如最小带宽等)的 QoS 路由,通过仿真比较证明其性能要优于 LS 算法.但是其拥塞规避机制是反应式不是先应式的,并且其缓解拥塞的速度不高;另外,没有涉及多约束的 QoS 路由,不能充分利用认知网络的特性.此后对于蚂蚁路由算法的研究都没有很好的解决链路拥塞问题^[10,11].

本文通过改进已有的路由算法,提出了一种基于蚂蚁算法的 QoS 多径路由算法,命名为 AMP (Ant Multiple-Path).该算法通过改进蚁群算法探索多径路由,并且充分利用认知网络自学习和自适应的特点,引入自适应的拥塞规避策略,能够很好的避免和缓解网络拥塞,满足 QoS 要求,充分利用网络资源.

2 现有的蚂蚁路由算法简介

将蚂蚁算法应用到网络的路由搜索中就是蚂蚁路由算法.LB 算法将网络中的每个节点的路由表用一张概率表替换^[10],表中用 p_{dn} 表示每个节点到达可能的目标节点 d 选择相邻节点 n 的概率,概率即为蚂蚁算法中信息素的强度.以此表中概率值的更新来模拟蚂蚁寻路遗留信息素的行为,即利用蚂蚁算法来更新路由表.

LB 算法通过应用蚂蚁的泛滥技术以及式(1)和式(2)来实现符合约束条件的最优路径的探索,而对于如何规避拥塞,则依赖于前一目标实现的效果,新路径探索得越快,也就越容易分散流量,实现拥塞的规避.

信息素表中概率增大计算公式为:

$$p_{n+1}^i = \begin{cases} \frac{\Delta p}{1 - \Delta p} p_n^i, p_n^i \leq 1 - \Delta p \\ \frac{1 - \Delta p}{\Delta p} (p_n^i - 1) + 1, p_n^i \geq 1 - \Delta p \end{cases} \quad (1)$$

概率减小计算公式为:

$$p_{n+1}^i = \begin{cases} \frac{1 - \Delta p}{\Delta p} p_n^i, p_n^i \leq \Delta p \\ \frac{\Delta p}{1 - \Delta p} (p_n^i - 1), p_n^i \geq 1 - \Delta p \end{cases} \quad (2)$$

其中, p_n^i 和 p_{n+1}^i 分别表示更新前后选择节点 i 的概率; Δp 为参数, $\Delta p \in [0.5, 1]$, 其取值取决于所要求的寻路准则.

当寻路准则是寻找最短路径,或者是寻找最大带宽路径时,使用下面的公式:

$$\Delta p \propto \frac{1}{f(h_{op})} \frac{\alpha B_{path}^\beta}{B_{max}} \quad (3)$$

其中, h_{op} 表示蚂蚁从源节点到当前节点所经历的跳数; $f(h_{op})$ 是 h_{op} 的一个增函数; B_{path} 是蚂蚁所经历路径的带宽,即所经历的所有链路的最小带宽; B_{max} 是当前节点的所有相邻链路的最大带宽; α 和 β 两个系数用于分别表示距离和带宽对 Δp 的相对重要性.

通过仿真实验表明^[9], LB 算法在不同的网络负载下,在数据包传输时延和网络丢包率性能上,比现有的链路状态路由算法(LS)具有明显的优越性.但是它只能实现单目标路径的搜索(如最短距离路径、最大带宽路径、最小时延路径),并且它对拥塞的规避依赖概率更新公式,是一种反应式而非先应式的拥塞规避策略,效果依赖于新路径探索的速度.

3 基于改进蚂蚁算法的多径路由算法

由于 OSPF 是目前网络普遍应用的路由协议,而 LB 算法对 OSPF 所使用的 LS 算法进行了改进,并且证明其有明显的优越性,所以本文在 LB 算法的基础上,提出适合在认知网络中应用的 AMP 算法.

3.1 网络模型描述

计算机网络可表示为有向图 $G(V, E)$ ^[12], 其中 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 为节点的集合,代表实际网络中的路由器集合; $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ 为边的集合,对应实际网络中任意两相邻节点间通信链路的集合.为了描述方便,这里只考虑图 G 为无向图的情况.

为便于比较本文的网络结构参考文献[12]的网络结构,如图1所示.

图1中,每条边上标注的是该条链路的时延、带宽和代价,分别用 De_{ij} 、 Be_{ij} 和 Ce_{ij} 表示.如边 $e_{0,8}$ 的时延、带宽和代价分别为 $De_{0,8} = 10$ (单位:ms)、 $Be_{0,8} = 1$ (单位:kb) 和 $Ce_{0,8} = 2$.

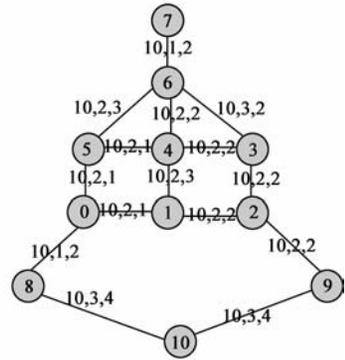


图1 网络模型示意图

3.2 AMP 算法的思路

$PT(V_s, t)$ 表示从源节点 V_s 至目标节点 t 的 K 条路径,它满足给定的 QoS 约束:

(1) 时延约束,包括从源节点 V_s 到目标节点 t 路径上所有节点和链路的时延,如式(4)所示:

$$de(PT(V_s, t)) = de(V_s) + \dots + de(t) + de(e(V_s, V_m)) + \dots + de(e(V_n, t)) \leq \Delta \quad (4)$$

(2) 带宽约束:

$$bw(PT(V_s, t)) = \min\{bw(e(V_s, V_m), \dots, e(V_n, t))\} \geq B \quad (5)$$

其中, Δ , B 分别为给定的时延、带宽约束.定义同时满足以上两个条件的链路为带宽约束时延受限的路径.

这里将时延作为一个重要的度量指标的原因有两个:首先,时延在很大程度上可反映出所经过的节点数、链路的传输能力和节点的处理速度;其次,时延的大小也能有效反映节点的拥塞程度,而 AMP 算法就是

解决链路拥塞问题的。

AMP 算法的目标是找到一条从源节点 V_s 到目的节点 t 的路径,满足如下特征:

特征 1: 路径 P 上每条链路的瓶颈带宽不小于 B ,

$$\min\{bd(J)\} \geq B, (J \in P) \quad (6)$$

特征 2: 路径 P 的链路节点时延之和不大干 Δ ,

$$\sum_{J \in P, V \in P} de(J) + de(V) \leq \Delta \quad (7)$$

在满足以上两个条件的前提下,使路径 P 的费用最小,即:

$$cost(P) = \min\left\{\sum_{J \in P} cost(J)\right\} \quad (8)$$

下面我们重点分析 LB 算法,并在此基础上提出 AMP 算法:

第一, LB 算法对于目标的控制是依赖于 Δp 实现的,并体现算法的寻路准则。但是,认知网络的 QoS 需求不是单一的,是一个多目标决策。比如为了保证多媒体的传输质量,通常希望端到端的延迟最小、丢失率最小、瓶颈带宽最大等,而单个目标的实现通常会导致一个目标变坏(如强调服务质量指标,可能会使网络的使用费用增大)。于是,本文使用式(8)来替换式(3),使得最优路径满足时延和带宽两个约束,保证用户的 QoS 满足最大化。

这样就将多约束的 QoS 问题转化为费用(也叫代价)最小的问题,并且在路径集中按照路径费用的大小排队,选择一条或多条最优路径作为传输路径,其余作为备选路径。

第二,在拥塞规避策略方面, LB 算法采用的是从目的节点发送拥塞应答蚂蚁重新探索新路径的方法。拥塞应答蚂蚁以探测蚂蚁一样的方式更新所经节点的信息素表,当其到达拥塞节点,表明存在一条新的非拥塞的路径。可见这种拥塞规避策略是反应式的,效果依赖于新路径探索的速度。

因为原路径经过的节点,保留着前次成功寻路的有用结果:包括网络使用状态和多媒体参数等;另外,认知网络的自学习和自适应特性使得它可以预测到拥塞的发生。所以本文设计的 AMP 算法,充分利用这些有用信息,加快算法收敛。

3.3 算法步骤

每一只蚂蚁代表一个数据包,包含一些简单信息,主要负责路径的探寻工作,结构如表 1 所示。其中, source-ID 和 dest-ID 是源节点和目标节点的 IP 地址; ant-ID 是蚂蚁的标号; TTL(time to live)是该数据包的最大生存周期,以避免由于不可预知的情况导致该数据包在网络内的无限制循环; DestTab 是目标节点序列集合; tabu 用来记录蚂蚁已经遍历过的节点,避免进入死循环; QoS 参数用来评价路径的优劣。

表 1 探测蚂蚁的数据包结构

Source -ID	Dest -ID	TTL	DestTab	tabu	ant-ID	QoS 参数
---------------	-------------	-----	---------	------	--------	-----------

3.3.1 蚂蚁泛滥

为了防止蚂蚁总数无限制的增长,一个源节点发送的蚂蚁以及由它复制得到的所有蚂蚁都有一个相同的标识号,这些具有相同标识号的蚂蚁称为同一批蚂蚁。一个源节点发送蚂蚁时,将向它所有的相邻节点发送蚂蚁。相邻节点收到蚂蚁后根据所给的 QoS 参数判断路径的优劣,在同一编号的蚂蚁中选择最优者,并在所有的链路上复制该蚂蚁,但收到该蚂蚁的链路除外。节点每次收到蚂蚁时都与先前收到的相同标号的蚂蚁比较,将较优者复制,另外的死亡。这样每个节点都能够收到蚂蚁,并且到达同一节点的多只蚂蚁必然是较优的、沿不同路径到达的。

表 2 为网络中某一节点 k 的信息素表的具体形式。

表 2 网络路由中节点 k 的信息素表

目标节点	邻居节点			
	a_1	a_2	\dots	a_m
d_1	p_{11}	p_{12}	\dots	p_{1m}
\dots	\dots	\dots	\dots	\dots
d_n	p_{n1}	p_{n2}	\dots	p_{nm}

其中 $d_i (i = 1, \dots, n)$ 表示从 k 点能够到达的目标节点; $a_j (j = 1, \dots, m)$ 表示 k 点的邻居节点; p_{ij} 表示信息素的强度,即蚂蚁由 k 点到达目标节点 d_i 时选择邻居节点 a_j 的概率。表 2 中的每一行满足:

$$\sum_{j \in L_{nei}} p_{jd_i} = 1 \quad (9)$$

其中 $L_{nei} = \{neighbors(k)\}$ 表示蚂蚁可以选择的当前节点 k 的邻居节点。

3.3.2 信息素更新策略及寻路准则

当蚂蚁经过某一节点之后,采用式(1)和式(2)更新概率表。

AMP 算法采用式(8)作为寻路准则,将达到目的节点的蚂蚁按照 QoS 性能的优劣即根据式(8)排队,形成最优路径集。

3.3.3 拥塞规避

对链路拥塞状态的判断,采用同 RED^[14] (Random Early Detection) 相同的方法,就是计算队列的平均长度,并与上限和下限阈值比较。在计算队列长度时要考虑到流量的突发特性。

通过分析我们发现,由目标节点发送蚂蚁探索新路径的探索速度较低,如果能够从拥塞节点本身出发也开始同时探索,当这两只探索蚂蚁相遇时就是一条新的可行路径,显然,新路径的探索速度大大提高。其原理可以如图 2 所示。

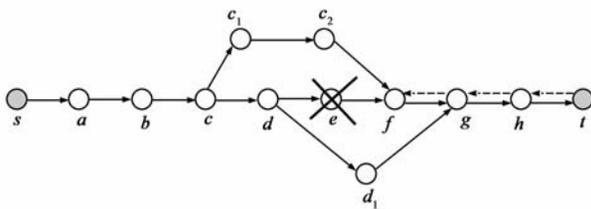


图2 链路拥塞规避示意图

图2中,从源节点 s 到目的节点 t 的最优路径为 $\{s, a, b, c, d, e, f, g, h, t\}$ (为叙述清晰,略去网络中其他节点)。当链路 $\{d, e, f\}$ 发生拥塞时,根据蚂蚁路径表中的信息,首先是在节点 d 处开始寻找,找到路径 $\{d, d_1, g, h, t\}$ 。此时来自目的节点 t 的蚂蚁若与其相遇在该路径上的某一点,则新路径寻找完毕。其次,若 d 点没有其他路径可选,则蚂蚁退回 c 点,找到路径 $\{c, c_1, c_2, f, g, h, t\}$,此时若在该路径上的某一点会与来自目的节点 t 的蚂蚁相遇(图中用虚线表示),如 g 点或者 f 点,则新路径寻找完毕。依此类推,最坏的情况是蚂蚁退回到源节点 s ,则此时算法退化成双向寻路蚁群算法。但其搜索效率显然仍然高于单纯从源节点或从目的节点出发的寻路。因为每只蚂蚁都保留其由源节点到目的节点的最优路径,这样在蚂蚁回退规避拥塞时会大大减少计算量,提高搜索速度。我们称此种拥塞规避方法为双向寻路拥塞规避方法。

当认知网络预测到某一节点即将发生拥塞时,发生如下三个动作(对于已经发生拥塞的节点也适用):

- ①从该拥塞节点的上一节点发出新路径探测蚂蚁,探索新的最优路径;
- ②从路径集中选择其他路径(记为路径 S) 传输数据包;
- ③向目标节点发送拥塞告知蚂蚁,此时利用路径 S 。目标节点收到该蚂蚁后,开始发出应答蚂蚁,该蚂蚁跟寻路蚂蚁一样搜索路径、更新信息素。

当拥塞应答蚂蚁和新的探路蚂蚁相遇在网络中的某一节点时,新路径探索完毕,数据包开始在该新路径上传输。拥塞解除后,切换到原路径。

4 算法仿真分析

本节应用 OPNET 仿真平台对 LB 算法和 AMP 算法的性能进行仿真比较,本文所用的网络拓扑结构及其参数设置参照文[9],如图3所示,其结构与图1一致。

图3中各条链路的带宽已在图中标出,链路的传输时延如图1所示都是 10ms 。在节点10处有一个数据源,目的地址是节点7。

所使用的数据源是负指数分布开/关数据源,在数据发送期间,将以恒定速率发送数据包。仿真时,节点10处的数据源的发送速率从 2Mb/s 开始,以 500kb/s 为

步长渐增,且数据源的发送和停止的持续时间的平均值为 100m/s 。各链路判断网络拥塞的上线阈值为 0.6 ,下线阈值为 0.3 。通过不断增加数据源的发送速率,使网络负载加大并发生拥塞,比较在不同的网络负载下 LB 和 AMP 算法的性能。

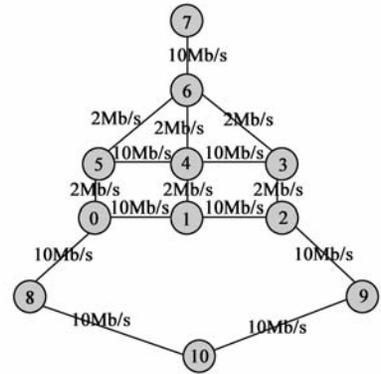


图3 仿真网络拓扑结构图

4.1 网络丢包率

环境变量中的丢包率的仿真结果图如4所示,仿真时间为 0.5 小时。

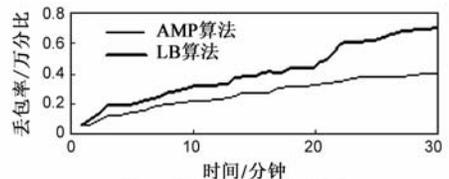


图4 环境丢包率比较图

从图4中的两条曲线的比较中可以看出,AMP算法由于充分利用认知网络的特性,预测网络拥塞状态,在拥塞发生之前就分散流量;另外,在拥塞发生时应用双向、快速的拥塞规避机制,使得网络丢包率大大降低,尤其在网络负载较大的情况下效果更为明显。

4.2 网络时延

图5为两种算法数据包传输平均时延比较图。由于AMP算法改进了LB算法的拥塞规避机制,使得当发生网络拥塞时能够更快的探索出新的路径,降低了数据包传输的平均时延。

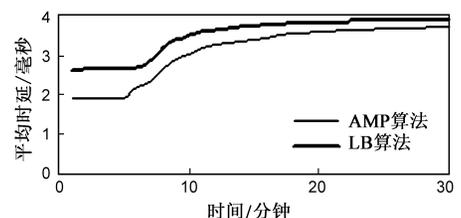


图5 两种算法数据包平均时延比较图

图6是两种算法时延比较图,该图用来比较两种算法的时延和网络时延的拟合程度。图7为网络环境的时延变化曲线。

由图6中两曲线与图7的曲线比较可以看出,图6

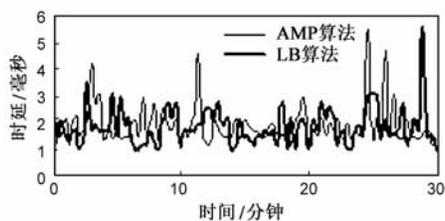


图6 时延比较图

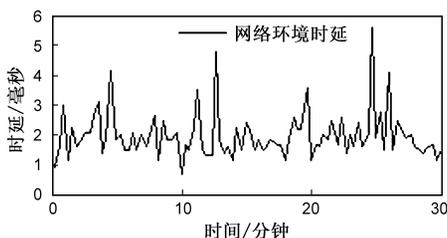


图7 网络环境时延变化图

中 AMP 算法的时延与图 7 中曲线拟合度更好.就多径路由的学习能力和自适应性而言,AMP 算法显然具有更好的性能.但是本文提出的多径路由就应用方式上而言,若多条路径组成的路由集来传输数据,那么要求各条路径的传输延迟更加接近才能更好地保证接收方的质量,而图 6 中 LB 算法曲线的各数据流平均时延比较接近,能够更好得保证传输的平滑性.因此,AMP 算法虽然比现有的多径路由在适应网络变化上具有优越性,但是在时延的稳定性控制方面,仍需要进一步改进.

4.3 剩余带宽

为更好地凸显出带宽变化,本次仿真时间为 1 小时,仿真结果如图 8 所示.

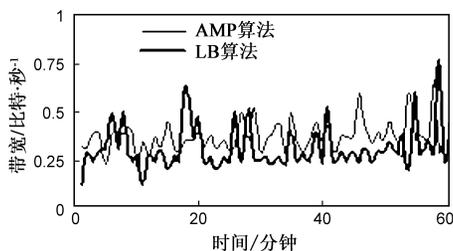


图8 剩余带宽比较图

通过图 8 的比较可以看出,AMP 算法使得在同样的网络环境下,剩余带宽一直保持在一个相对较稳定的范围之内.本文提出的基于蚂蚁算法寻路机制,发现多条独立有效的路由,并构成有效路由集,并且能按 QoS 要求进行分优先级传输,这种方法能够更加均衡的利用网络资源,避免出现某些链路非常繁忙甚至发生拥塞而另有一些链路闲置的状态.在保证最优利用网络资源的同时,兼顾了公平性的原则.

5 结论

本文结合认知网络的特性,分析了已有的多径路

由算法,以及基于蚂蚁算法的路由算法.对 LS 算法不具有拥塞规避、不满足 QoS 约束的问题,提出了一个能够快速规避拥塞,并且很好的满足网络 QoS 要求的多径路由算法.该算法模拟自然界中的蚂蚁寻路机制,将其应用到网络寻路中来,迅速探索建立符合加性约束条件的多条路径,并构成最优路径集.

在规避拥塞方面采用从拥塞节点和目的节点同时发出探路蚂蚁搜索路径的方法,能够快速探索一条新的路径,将流量分散,达到解除拥塞状态的目的.在算法复杂度方面,AMP 所利用的均是节点中已有的信息,在一定程度上增加了存储量,但是算法复杂度和 LB 相当.通过仿真比较,结果表明 AMP 算法在数据包传输时延、网络丢包率、剩余带宽性能上比 LB 算法具有明显的优越性,但是,在对时延稳定性的控制上仍需进一步改进,这也是本文以后的研究方向.

参考文献

- [1] Thomas R W, DaSilva L A, Mackenzie A B. Cognitive networks[A]. Proc of IEEE DySPAN 2005[C]. Maryland, USA, 2005. 352 - 360.
- [2] Sakellari, Georgia. The cognitive packet network: A survey[J]. Computer Journal, 2010, 53(3): 268 - 279.
- [3] Hey Laurence A. Reduced complexity algorithm for cognitive packet network routers[J]. Computer Communications, 2008, 31(16): 3822 - 3830.
- [4] Sarkar Dilip. Transport layer protocols for cognitive networks [A]. IEEE Conference on Computer Communications Workshops[C]. San Diego, CA, United states, 2010. 1 - 6.
- [5] 牛志升, 段翔. MPLS 网络中保证服务质量的多径路由选择策略[J]. 电子学报, 2001, 29(12): 1638 - 1641.
Niu Zhisheng, Duan Xiang. A OoS - Guaranteed multipath routing policy for MPLS networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(12): 1638 - 1641. (in Chinese)
- [6] 黄国锐, 曹先彬, 王煦法. 基于信息素扩散的蚁群算法[J]. 电子学报, 2004, 32(5): 865 - 868.
Huang Guorui, Cao Xianbin, Wang Xufa. An ant colony optimization algorithm based on pheromone diffusion[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(5): 865 - 868. (in Chinese)
- [7] 苏兆品, 蒋建国, 梁昌勇, 张国富, 夏娜. 蚁群算法的几乎处处强收敛性分析[J]. 电子学报, 2009, 37(8): 1646 - 1650.
Su Zhaopin, Jiang Jianguo, Liang Changyong, Zhang Guofu, Xia Na. An almost everywhere strong convergence proof for a class of ant colony algorithms[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(8): 1646 - 1650. (in Chinese)
- [8] 马卫, 朱庆保. 求解函数优化问题的快速连续蚁群算法[J]. 电子学报, 2008, 36(11): 2120 - 2124.
MA Wei, ZHU Qing-bao. Fast continuous ant colony optimization

tion algorithm for solving function optimization problems[J].

Acta Electronica Sinica, 2008, 36(11): 2120 – 2124. (in Chinese)

- [9] 林国辉, 马正新, 王永前, 曹志刚. 基于蚂蚁算法的拥塞规避路由算法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2003, 43(1): 1 – 4.

Lin Guo-hui, Ma Zheng-xin, Wang Yong-qian, Cao Zhi-gang. Ant-based routing algorithm with congestion avoidance[J]. J Tsinghua Univ(Sci & Tech), 2003, 43(1): 1 – 4. (in Chinese)

- [10] 章洋, 范植华, 何晓新, 徐帆江, 王宇心. 移动自组网络中多径路由的匿名安全[J]. 电子学报, 2005, 33(11): 2022 – 2030.

Zhang Yang, Fan Zhihua, HE Xiaoxin, XU Fanjiang, WANG Yu-Xin. Anonymous secure multipath routing in mobile Ad-Hoc networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(11): 2022

– 2030. (in Chinese)

- [11] Strobbe M, Verstraete V. Implementation and evaluation of AntNet, a distributed shortest-path algorithm[J]. IEEE, 2005, 17(20): 320 – 325.

- [12] 刘彦鹏, 吴明光, 钱积新. 一种基于蚁群算法的分布式多播路由算法[J]. 电路与系统学报, 2008, 13(5): 112 – 116.

Liu Yan-peng, Wu Ming-guang, Qian Ji-xin. A novel distributed multicast routing algorithm base on ant colony algorithm[J]. Journal of Circuits and Systems, 2008, 13(5): 112 – 116. (in Chinese)

- [13] Bonabeau E, Theraulaz G. Swarm smarts[J]. Scientific American, 2000, 6(2): 74 – 79.

- [14] Floyd S, Jacobson V. Random early detection gateways for congestion avoidance [J]. IEEE/ACM Trans Networking, 1993, 1(2): 397 – 413.

作者简介



王传臣 男, 1965 年出生, 博士研究生, 研究方向为互联网中的流媒体业务的 QoS 技术.

E-mail: wcc@phei.com.cn



李丹丹 女, 1982 年出生, 博士研究生, 研究方向为认知网络的 QoS 技术.



张润彤 男, 1963 年出生, 博士, 教授、博士生导师, 目前研究方向包括下一代互联网的流量工程、移动通讯技术与应用.



曹峰 男, 1967 年生, 博士研究生, 研究方向为 QoS 的多径路由技术.