

一种抑制停滞的蚁群路由算法

李原 马正新 曹志刚

(清华大学电子工程系微波与数字通信国家重点实验室 北京 100084)

摘要 蚁群路由算法(ACR)作为生物行为的模拟,在网络中得到了广泛的应用。然而,停滞现象严重影响了它的性能和自适应性。目前的大多数蚁群路由算法对减轻停滞现象的研究主要集中于信息素的处理,较少考虑停滞带来的网络负载失衡。本文提出了一种抑制停滞的蚁群路由算法(MS-ACR),该算法通过计算信息素变化量和改进概率更新函数来预防停滞现象。当停滞出现时,MS-ACR 算法使用抑制措施来缓解停滞现象,快速发现新的最优路径。仿真表明,该算法在负载平衡以及丢包等重要的网络性能上具有较为明显的优势。

关键词 服务质量,蚁群路由算法,停滞现象

An Ant Colony Routing Algorithm with Mitigating Stagnation

LI Yuan MA Zheng-Xin CAO Zhi-Gang

(State Key Laboratory on Microwave and Digital Communications, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract As the mimic of natural behavior, ant colony routing algorithm (ACR) has been widely used in the practical networks. However, stagnation phenomenon has a serious impact on its performance and adaptivity. At present, the existing approaches to alleviate stagnation mainly concentrate on the pheromone processing and seldom concern the load unbalance. This paper proposes an ant colony routing algorithm with mitigating stagnation (MS-ACR). With the improvements in computing variety of pheromone and updating probability, MS-ACR prevents stagnation phenomenon and when stagnation already appears, it adopts corresponding mitigating measurements to alleviate stagnation and finds the alternate optimal paths. Computer simulations and analysis indicate that, MS-ACR has advantage of load balance, and some vital routing performances like network packet loss ratio etc. over other algorithms compared.

Keywords QoS, ACR, Stagnation

蚁群算法源于自然界中的蚁群生物行为,被运用到多种最优化和控制问题的求解^[1,2],例如旅行商问题、数据挖掘等。将蚁群算法应用于网络路由问题,可以较好地满足 QoS 路由的统计时变、多对象等要求。与集中控制的路由算法相比,它具有较好的自适应性和扩展性、较小的资源占用和计算开销等特点。

蚁群路由算法在本质上是自组织的,类似于学习算法,在正反馈效应下,蚂蚁可以尽快地搜索到最优的路径。但同时,正反馈也产生了诸如停滞现象等新的问题,从而影响网络的自适应性,使得网络产生拥塞,网络效率下降。而 QoS 网络的目标就是要在尽量提高网络效率的同时,保证业务的 QoS,因此必须采取一定的措施来解决这些问题。

目前,针对蚁群算法的研究较少考虑到因为停滞现象而带来的网络中的负载失衡,大多数文献中提及减轻停滞现象的方法主要集中于对信息素的处理,如信息素启发式控制^[3]、信息素控制^[4,5]以及信息素分级放置^[6]等等。然而,这些方法主要用于停滞现象的预防,当停滞现象已经产生时,难以有效地缓解其对网络的负面影响。

为此,本文提出了一种抑制停滞的蚁群路由算法(MS-ACR),主要通过两种手段来配合减轻网络中的停滞现象:一是通过计算信息素变化量和改进概率更新函数来预防停滞现象,二是当停滞现象出现后的缓解措施。MS-ACR 使用停滞

控制蚂蚁来快速发现新的最优路径,同时采用蒸发来削弱以前信息素累积值对选路的影响。仿真表明,该方法在负载平衡以及丢包等重要的网络性能上具有较为明显的优势。

1 蚁群算法及停滞现象

自然界中,蚂蚁能够找到食物和蚁巢之间的最优路径。当其往返中,蚂蚁在路径上遗留一定量的信息素。在这种通信方式下,其后的蚂蚁选择某条路径的概率与该路径上遗留的信息素量的多少成比例关系。随着越来越多的蚂蚁选择某条路径并放置信息素,该条路径上的信息素密度不断增大,从而吸引了越来越多的蚂蚁到来,这种正反馈效应有助于很快搜索出最优的路径。

蚁群路由算法中的蚂蚁之间也使用基于信息素的非直接通信方式,网络中节点的路由表可以用概率表来代替。概率表包含了本节点为到达网络中其它各个目的节点而选择相邻下一跳节点的概率,蚂蚁根据概率表按照统计贪婪规则选出最优路径。

自然界中蚂蚁寻找到的路径大都是双向对称的,而在非对称的网络中,需要采用前向蚂蚁和后向蚂蚁^[1]来区分蚂蚁探测包的发送方向。前向蚂蚁的生成源节点为其分配随机的目的节点地址。在每个中间节点,前向蚂蚁根据该节点概率表中对应目的节点的端口概率选择下一跳节点。当某前向蚂

李原 博士生,研究方向为 QoS 网络;马正新 副教授,研究方向为网络理论、卫星通信、电力线通信等;曹志刚 教授,博士生导师,研究方向为卫星通信、宽带移动通信、通信理论等。

蚁到达目的节点时,目的节点生成后向蚂蚁,后向蚂蚁保存前向蚂蚁携带的跳数、节点等路径信息,并按照前向蚂蚁到来路径反向发送回源节点。当源节点接收到后向蚂蚁后,更新其概率表中的对应项。本文的研究针对非对称网络。

QoS 路由选择允许业务对多个网络度量参数提出要求,根据度量参数的组合方式通常可以将路由选择算法分为单混合度量参数路由算法和多度量参数路由算法^[7]。因为存在跳数等与出端口非唯一对应的 QoS 度量参数,目前,蚁群算法中极少使用多度量参数路由算法进行寻路。采用单混合参数法的蚁群算法的路由表对应的概率更新函数通常是信息素 τ 的启发式函数^[3],可表示为 $P(\tau, M_1, M_2, M_3, \dots)$, 其中, M_i 是 QoS 度量参数。启发式函数的应用一定程度上降低了蚁群算法的自适应性,而且其合成参数难以反映路径的特征。网络中路由表各项的概率更新函数的参数选择可与与路径信息素有关^[4]。当后向蚂蚁到来,根据其携带的信息素变化量 $\Delta\tau$ 对路由表中对应的概率进行更新,概率更新函数可以表示为 $P(\tau)$ 。

信息素变化量 $\Delta\tau$ 可由多度量参数的混合计算得到更新^[3~5,8,9],在一定程度上减轻停滞现象。例如文^[4]中, $\Delta\tau$ 是与跳数和与节点出端口拥塞程度有关的函数。本文后面假设概率更新函数仅与前向蚂蚁携带的信息素有关,对概率更新函数中 $\Delta\tau$ 提出多 QoS 度量参数要求。

停滞现象是蚁群算法的常见问题,是指当网络达到收敛时,若某条最优路径被绝大多数的蚂蚁选中,会导致更多的蚂蚁选择该条路径,这也进一步增加了该条路径被后续蚂蚁选中的概率。由此产生两方面问题:其一是当最优路径失效时,蚂蚁需要相对较长的时间来搜索到一条新的最优路径;其二,由于网络拓扑或业务特征的变化使得其他路径成为最优时,因为旧路径的信息过于强烈,几乎所有的后续蚂蚁都选择原路径,新路径很难被发现。网络中的停滞现象会导致路径出现拥塞,以及其它路径选中概率的急剧下降。

蚁群算法通常使用 3 类信息素的处理方法来减轻网络中的停滞现象,即信息素控制、信息素分级放置和前面提及的信息素启发式函数方法。信息素控制方法可减少以前经验的影响、鼓励新路径的探索,主要包括信息素蒸发、衰老、限制和平滑等。例如:在累积信息素的同时,对所有出口进行全局和局部的信息素蒸发操作^[9]。信息素分级放置为不同集合的蚂蚁设置特定的信息素放置规则,因此非最优路径可以得到较少的信息素分配,达到减轻停滞的目的。采用信息素启发式函数可以削弱蚁群算法在寻路过程中的统治地位,从而在一定程度上减轻停滞现象。

但是,这些减轻停滞现象的方法多是对停滞现象的被动预防,难以尽快地解决停滞下的网络拥塞等现象。而且这些方法大多同时作用于节点各个出端口,在某些情况下,虽然蒸发等操作带来的信息素衰减缩小了最优与非最优路径之间的信息素的差的绝对值,但是根据以前经验出发的蚂蚁带来的信息素的累积可能导致停滞现象的加重。为此,本文提出了基于停滞抑制的蚁群算法。

2 抑制停滞的蚁群路由算法

在确定概率更新函数的运算规则时,需要尽量遵循下面的关系:

(1) 当后向蚂蚁从目的节点 t 经端口 k 到达源节点 s 时,与其它非到来端口相比,源节点的路由表中与端口 k 对应的

源宿节点概率项 $P_{s,t}^k$ 发生相对的增长,且 $\Delta\tau$ 越大,该概率值变化的幅度就越大。这一原则是正反馈效应的体现,目前的蚁群路由算法的概率更新函数都满足这一关系。

(2) 为了鼓励新路径的发现,有效减轻停滞现象,对一个给定的信息素变化量 $\Delta\tau$,我们希望当采用概率更新函数发生概率增长时,其增量大小 Δp 与增长前概率 P_{old} 为反相关关系,而减小时的变化量与减少前的概率成为正相关。一些基于泛洪的算法^[8]为了保证泛洪蚂蚁的正确更新,不满足该关系。

根据这些规则,MS-ACR 算法的概率更新函数如式(1)所示。其中, $f_1(P, \Delta\tau)$ 对应概率增长函数, $f_2(P, \Delta\tau)$ 对应概率减少函数。在一定的 $\Delta\tau$ 下,概率增长函数对应的曲线与直线 $f_1(P) = P$ 在点 $(1, 1)$ 处相切,与纵轴交于 $(0, \Delta\tau/(1 + \Delta\tau))$ 。概率增加的幅度与 $\Delta\tau$ 的大小成正相关关系,概率变化范围为 $(0, 1/2]$ 。当到来的后向蚂蚁进行概率增大时,初始较小的概率比相对较大的概率获得更多的增量。对应一个目的节点的总概率经概率减少和概率增长后其和为 1,更新后的各概率项可被再次看作对应端口的概率。

$$\begin{cases} f_1(P_1, \Delta\tau) = \frac{\Delta\tau P_1^2 + (1 - \Delta\tau)P_1 + \Delta\tau}{1 + \Delta\tau} \\ f_2(P_2, \Delta\tau) = \frac{(1 + \Delta\tau)P_2 - \Delta\tau P_2^2}{1 + \Delta\tau} \end{cases} \quad (1)$$

确定概率更新函数的信息素变化量参数 $\Delta\tau$ 时,考虑到跳数在过去大量网络系统中的成功应用,同时为了兼顾带宽和延时等 QoS 要求,以及到来信息的新旧程度,MS-ACR 算法所确定的信息素变化量 $\Delta\tau$ 表达式如下:

$$\Delta\tau \propto \left(\frac{1}{f(Hop)} [f(B)]^\alpha \left[\frac{1}{f(Delay)} \right]^\beta \right)^{\frac{1}{\Delta\tau}} \quad (2)$$

其中, Hop , B 和 $Delay$ 分别是前向蚂蚁经历路径的跳数、可用带宽和延时, $f(Hop)$, $f(B)$ 和 $f(Delay)$ 则是它们对应的增函数。 $\alpha, \beta \in [0, 1]$, 其大小代表了 $\Delta\tau$ 中该 QoS 参数的作用程度。带宽和延时等 QoS 度量参数引入到信息素变化的度量中,可以在一定程度上预防停滞现象的发生。为反映待更新信息的陈旧程度,为每个前向蚂蚁设置随生成时间递增的唯一 ID,并在目的节点处写入到对应的后向蚂蚁携带的信息中。 ΔID 是路由表中源节点到目的节点的相邻两次概率更新所对应的蚂蚁 ID 之差。当蚂蚁经历的路径越短,可用带宽越大,并且延时越小,对应更新越陈旧时, $\Delta\tau$ 就会越大,选择该条路径的概率增长越快。

计算信息素变化量和改进概率更新函数只能预防蚁群算法的停滞现象,当停滞现象出现以后,还需要一定的措施来尽快减轻其对网络的负面影响。网络中的最优路径可能因为链路拥塞或者网络拓扑变化而失效。在非动态的网络中,网络的状态不会经常因为链路断开或者新路径的加入而发生变化,最优情况的转化主要表现在网络拥塞出现时。为此,本文采用了停滞控制的方法,用来尽快避免停滞现象带来的网络拥塞,同时快速地寻找替代的最优路径。其过程可以描述为:

对网络中的每个节点统计其各个出端口链路的可用带宽,并据此来判断各个出口链路的拥塞程度。令 $T_{k_{min}}$ 和 $T_{k_{max}}$ 分别为某个出口 k 对应链路的可用带宽 B^k 所设置的最小门限、最大门限, $P_{k_{max}}$ 是拥塞判断的最大概率值。当可用带宽小于最小门限时,认为出口链路拥塞;而大于最大门限时,认为不拥塞;若介于两者之间,以可用带宽为参数按照一定的函数判断拥塞的概率,如式(3)所示:

$$P_{congst}^k = \begin{cases} 1 & , B^k \leq T_{Min}^k \\ 0 & , B^k \geq T_{Max}^k \\ \frac{P_{Max}^k (T_{Max}^k - B^k)}{T_{Max}^k - T_{Min}^k} & T_{Min}^k < B^k < T_{Max}^k \end{cases} \quad (3)$$

如果当前节点 N_i 认为出口链路 k 拥塞, 则查询节点概率表。若通过出口 k 到达某个目的节点 N_j 的概率 P_{ij}^k 最大, 需要从其它非拥塞的出口链路向目的节点发出停滞抑制蚂蚁 (MS-Ant)。MS-Ant 按照前向蚂蚁的发送规则通过每个中间节点, 但是会主动避开中间节点的拥塞出口链路。即如果在中间节点的概率表中, 当前到达 N_j 的最优出口链路拥塞, MS-Ant 将从概率表中选择次优的非拥塞出口发出。 N_j 收到 MS-Ant, 会生成相应的后向蚂蚁。当 MS-Ant 的源节点 N_i 收到对应的后向蚂蚁时, 对其节点概率表中对应到达 N_j 的各出口概率进行 $(1-\rho)$ 比例的信息素蒸发衰减, 以削弱以前的经验值在选路中的影响, 加速最优路径的发现和促进拥塞路径信息素的消亡。然后根据式(1), 使用 MS-Ant 携带的路径信息素变化量对节点概率表中的对应概率项进行更新。图 1 列出了源节点 N_i 的 MS-Ant 的生成和处理过程伪代码实现。

```

At interface  $p_k$  of source node  $N_i$ , do
{
  calculate  $P_{congst}^k$  by  $B^k$  and (3);
  if( TRUE == Bernoulli(  $P_{congst}^k$  ) )
  {
    for( node  $N_j, i \neq j$  )
    {
      if(  $P_{ij}^k = Max(P_{ij}^k)$  )
        send MS-Ant to  $N_j$  from uncongested ports;
    }
  }
}

When backward ant return to  $N_i$  from port  $p_l$ , do
{
   $P_{ij} = (1 - \rho) P_{ij}$ ;
  refresh  $P_{ij}$  by equation (1);
}
    
```

图 1 源节点的 MS-Ant 生成和处理过程伪代码

此外, 为了进一步配合上述两种手段来减轻网络中的停滞现象, 本文还采用了一些其它的措施:

(1) 类似学习算法中的 ϵ 贪婪策略, 采用了一定比例的“噪声”蚂蚁探测包随机地选择出口, 以鼓励发现潜在的更好的路由。且当网络出现停滞时, 可以给系统以起始的推动力来退出这种冻结情况^[4]。

(2) 类似 MMAS 系统^[5], 为网络中各节点路由表的概率值设置最大和最小的界, 避免出现绝对统治性的路径。

另外, 通常在初始阶段, 网络为每个节点的路由表对应各个出口平均分配概率。因为蚂蚁搜索最优路径的成功是一定概率性的行为, 这样的平均难以反映出网络的状态, 可能造成网络较长时间不能得到收敛。所以本文使用最短路径算法得到网络的先验拓扑信息, 并据此按照一定等级为路由表中的各项分配概率值。

MS-ACR 中停滞抑制蚂蚁的使用, 以及概率更新函数和信息素变化量计算的改进可以应用于 TSP 等其它优化问题

中, 以减轻停滞现象, 实现整体性能的优化。配合停滞预防方法, 对 MS-ACR 算法的停滞控制措施进行简单的修改, 即当停滞控制蚂蚁到达目的节点, 立即为反向路径进行相应的信息素蒸发等处理和概率更新, 可以用于解决对称电路交换网中^[4]的路由和负载平衡问题。

3 仿真试验

仿真使用的 MCI 拓扑如图 2 所示。该结构在 QoS 路问题中大量被引用, 具有较好的网络连通性和仿真可靠性。其中 $R_0 \sim R_{17}$ 是核心路由器, 相邻的路由器通过带宽为 1Mb/s 的双向链路相连。 $S_0 \sim S_{17}$ 是子网, 作为业务源生成业务。

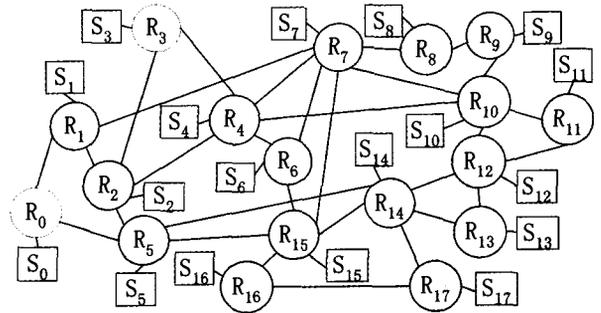


图 2 MCI 拓扑

网络负荷可用式(4)来计算。其中, C 是链路的容量; N_s 、 N_f 和 N_l 分别是网络中的子网数目、每个子网的平均业务流数目及网络中的链路数目; \bar{h} 是节点间平均距离(以跳数计), 对 MCI 拓扑, $\bar{h}=2.33$; \bar{l} 和 τ 分别代表包的长度和包内部到达间隔的均值。为了模拟网络中真实存在的业务长时相关性, 仿真中采用了叠加的独立同分布 ON/OFF 业务源。

$$\rho = \frac{\bar{l} N_s N_f \bar{h}}{\tau N_l C} \quad (4)$$

为了评价 MS-ACR 算法的网络资源利用状况和减轻停滞负面影响的效果, 本文从节点出口链路负载平衡、网络丢包率 P_{loss} 、平均端到端延时 D_{cong} 以及网络拥塞链路选中概率 $R_{congst_sel}^{link}$ 等方面将其与无信息素处理的 ACR、基于信息素蒸发的 ACR(PV-ACR)、基于信息素平滑的 ACR(PS-ACR) 算法进行比较, 这 3 种算法采用文[4]中提出的概率更新函数。

图 3 中比较了 MCI 网络中 ACR 算法和 MS-ACR 算法的路由器节点 R_3 与 R_2 和 R_4 之间的链路 $l_{3,2}$ 和 $l_{3,4}$ 在不同网络负荷下的链路利用率 R_{link_util} 。可以看出, MS-ACR 算法的 $l_{3,2}$ 的利用率低于无信息素控制的 ACR 算法, 而 $l_{3,4}$ 的利用率略高于 ACR 算法, 总的利用率低于 ACR 算法。说明, 由于采用了预防和控制停滞现象手段, MS-ACR 算法在路由器节点 R_3 的两条出口链路之间进行有效的负载均衡, 减轻了因为停滞而可能出现的链路拥塞现象。

网络丢包率 P_{loss} 定义为网络中丢失的包数目与接入网络中的包数目的比值, 用来衡量在一定的接入前提下网络中的传输失败状况。图 4 比较了几种算法在不同网络负荷下的 P_{loss} 曲线。可以看出, ACR 算法的 P_{loss} 相对于其他算法大。这是因为受蚁群算法的停滞现象的影响, 网络中的负载分配很不均衡, 而算法本身的正反馈效应进一步加重了优势链路因拥塞产生的丢包。PV-ACR 和 PS-ACR 算法通过采用信息素蒸发和平滑等信息素控制方法, 使 P_{loss} 相对有所下降。但是信息素控制是停滞的预防方法, 且作用于各个出口, 并不能很有效地改善停滞现象。而 MS-ACR 算法改进了概率更新

函数和信息素变化量计算方法,在更好地预防停滞现象的同时,还采用 MS-Ant 等抑制措施主动地减轻停滞,因此可以相对有效地避免网络拥塞和负载失衡,降低了网络丢包率。

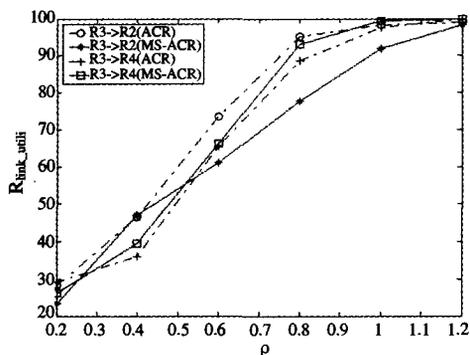


图3 不同网络负荷下的负载平衡

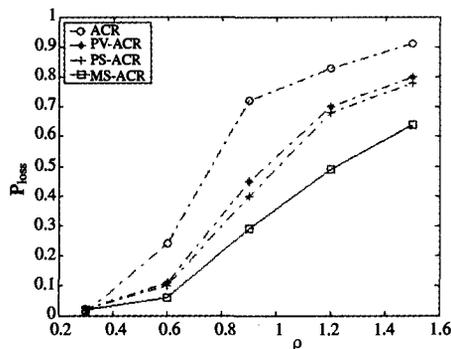


图4 不同网络负荷下的网络丢包率

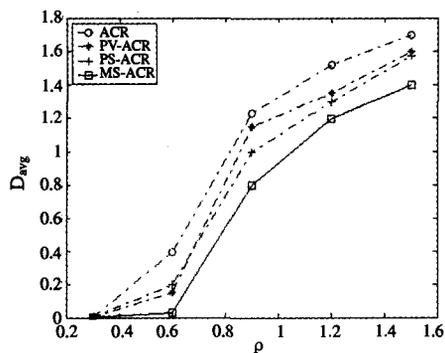


图5 不同网络负荷下的网络平均端到端延时

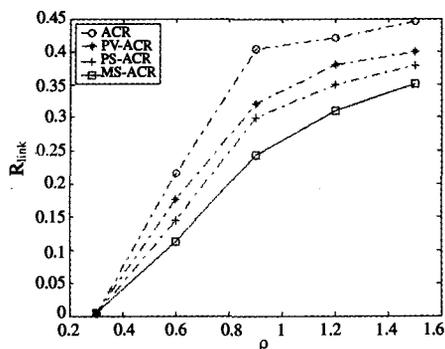


图6 不同网络负荷下的网络拥塞链路选择率

网络负荷的增加使得节点缓冲区排队长度增加,导致了网络中平均端到端延时 D_{avg} 的增长。同时,停滞现象造成了

网络中的负载失衡,使得业务在信息素最集中的优势路径上大量堆积, D_{avg} 大大增加。图5是不同网络负荷下的 D_{avg} 曲线。ACR算法因为缺乏对停滞的针对性措施, D_{avg} 随着网络负荷增长而快速增加。PV-ACR和PS-ACR算法可以一定程度上限制既有经验的影响,削弱最优路径的统治地位,因此对应的端到端性能优于无信息素处理的ACR算法。但由于负载分配具有一定的盲目性,当网络因为停滞而出现拥塞时,仍然难以有效地均衡网络中的负载。MS-ACR算法具有节点拥塞规避和网络负载平衡的机制,可以相对有效地缓解拥塞,均衡网络中的负载,保证网络的QoS性能,对应的 D_{avg} 最小。

为了进一步说明MS-ACR算法的拥塞处理和网络负载均衡能力,图6比较了几种算法的拥塞链路选择率 $R_{cong,sel}^{link}$, 定义为包选择的出端口对应链路拥塞的次数与总发送次数的比率。当网络负荷较轻时,随着负荷的增加,链路趋于拥塞,不同的机制对拥塞控制的影响也在加大。PV-ACR和PS-ACR算法对停滞的一定程度的预防能力使它们的拥塞链路选择率相对低于无信息素处理的ACR算法,而高于采用MS-ACR算法。

结束语 本文提出了一种抑制停滞的蚁群算法,在通过对信息素变化量计算和概率更新函数进行改进来预防停滞现象的同时,使用抑制停滞的方法确保当停滞现象出现后可以快速发现新的最优路径,并削弱以前信息素累积值对选路的影响。通过仿真试验,将算法与一些其它的基于信息素处理来预防停滞的蚁群算法进行了多方面的性能比较。结果表明,MS-ACR算法具有相对较低的网络丢包率和包平均端到端延时,可以较好地提高网络的吞吐能力,实现网络资源有效利用。另外,从拥塞链路选中概率和负载平衡等方面可以看出,MS-ACR可以相对有效地减轻停滞现象所带来的如网络拥塞等负面影响。

参考文献

- Caro G D, Dorigo M. AntNet: Distributed Stigmergetic Control for Communications Networks. *Journal of Intelligence Research*, 1998, 9: 317~365
- Kwang Mong Sim, Weng Hong Sun. Ant Colony Optimization for Routing and Load-Balancing: Survey and New Directions. *IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics*, 2003, 33 (5): 560~572
- Parpinelli R S, Lopes H S, Freitas A A. An Ant Colony Algorithm for Classification Rule Discovery. *Data Mining: a Heuristic Approach*, 2002. 191~208
- Schoonderwoerd R, Holland O, et al. Ant-like agents for load balancing in telecommunications networks. In: *Proceedings of 1st International Conference on Autonomous agents*, 1997. 209~216
- Stutzle T, Hoos H. MAX-MIN Ant System and Local Search for the Traveling Salesman Problem. In: *ICEC, 1997*. 309~314
- Caro G D, Dorigo M. AntNet: Distributed stigmergetic control for communications networks. *Intell Res*, 1998, 9: 317~365
- 朱慧玲, 杭大明, 马正新, 等. QoS路由选择: 问题与解决方法综述. *电子学报*, 2003(1): 109~116
- 林国辉, 马正新, 王勇前, 等. 基于蚂蚁算法的拥塞规避路由算法. *清华大学学报*, 2003, 43(1): 1~4
- Dorigo M. Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem. *IEEE Transaction on Evolutionary Computation*, 1997, 1: 53~66