

基于细胞适应机制的自组网多路径路由协议

公维冰, 阳小龙, 张敏, 隆克平

(北京科技大学 计算机与通信工程学院, 北京 100083)

摘要: 针对一些 ARAS(adaptive response by attractor selection)模型的噪声影响不明确和活跃度不能准确确定状态转换时机的缺点, 提出了一个改进的 ARAS 模型。此模型利用被重新推导的吸引子明确了噪声对模型的随机影响。通过提出一个与当前路径状态和最好路径状态的差成反比的活跃度公式, 经 Matlab 验证, 改进模型可提高负载平衡的准确度。在一个基于 AODV 的多路径路由中, 通过使用 ARAS 改进模型选择路由路径, 提出一种基于细胞适应机制的多路径路由协议(MPAM), 并在 OPNET 中验证了方法的有效性。

关键词: ARAS; 多路径路由; AODV; 细胞适应机制

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)06-0056-08

Multi-path routing protocol based on adaptation mechanism of cell in ad hoc networks

GONG Wei-bing, YANG Xiao-long, ZHANG Min, LONG Ke-ping

(School of Computer & Communication Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: In view of existing ARAS (adaptive response by attractor selection) models' shortcomings that was noise item produces an effect ambiguously and activity couldn't determine the opportunity of state changing correctly, an improved ARAS model was proposed. The model specifies the stochastic effect of the noise on the system by an attractor with a noise item. Through putting forward an activity formula inversely proportional to the partial difference between current path status and best path status, it was validated by Matlab with the improved model could increase the accuracy of load balancing in a simple case. A multi-path routing by ARAS mechanism (MPAM) based on AODV is proposed, which selects routing path with the improved ARAS model. Furthermore, the improved model is validated to be able to reduce the average network delay by OPNET.

Key words: ARAS; multi-path; AODV; adaptation mechanism of cell

1 引言

当前, 生物模型在网络中的应用研究越来越广泛, 受蚁群觅食启发的蚁群算法已经被大量研究^[1,2], 源自大雁^[3]、萤火虫^[4]等生物同步现象的同步模型逐渐出现在网络同步研究中, 很多用于生物系统的数学模型^[5,6]也被应用到网络中, 用于优化网络拥塞控制、流控制等。ARAS(adaptive response by

attractor selection)是一种模拟大肠杆菌细胞对环境适应反应的数学模型, 当细胞活性降低时, 细胞内新陈代谢变得不稳定且易受环境干扰, 导致细胞状态发生变化, 受此启发, 通过在双吸引子模型中添加随机干扰项能使模型合理反映细胞状态适应过程。在模型中, 如果环境变化使细胞活跃度降低, 细胞状态受随机项影响, 在 2 个或多个吸引子之间变动, 当某个吸引子提高活跃度,

收稿日期: 2013-05-02; 修回日期: 2014-03-21

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(2012CB315905); 国家自然科学基金资助项目(61100184, 61172048); 国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(2013 AA01A209)

Foundation Items: The National Basic Research Program of China (973 Program)(2012CB315905); The National Natural Science Foundation of China (61100184, 61172048); The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program)(2013 AA01A209)

摆脱随机项影响时, 细胞状态便趋于稳定, 以此适应新环境。自组网是一种由网络节点组成的分布式网络, 每个节点既是源节点也是路由节点, 在路由中每个节点都面临复杂多变的网络环境, 如果数据传输过程能模拟细胞环境适应过程, 像负载平衡、网络拥塞、服务质量等问题便可进一步得到优化。

自组网路由协议研究已经很成熟, 按照路由建立时机大体上分为3种: 先应式路由、后应式路由和混合式路由。先应式路由主要以表驱动为主的路由, 在传输开始前利用最短路径算法获得预先的路由表, 如FSR^[7]、OLSR^[8]等; 后应式路由则主要以按需路由为特点, 为了适应复杂多变的网络环境, 按照数据传输的需要建立路由, 不需要时删除路由, 如AODV^[9]、DSR^[10]等; 混合路由则采用前2种方法的混合, 试图克服前2种方法的缺点, 取长补短, 更好地优化网络性能, 如ZRP^[11]、ZHLS^[12]等。按照路径数目可分为单路径路由和多路径路由, 多路径路由大都以改进单路径路由为主要出发点, 并且以其在传输可靠性^[13]、平衡网络负载^[14]和网络安全性^[15]方面的优势已经被大量研究。显而易见, 在路径故障时, 多路径路由比单路径路由在保持数据传输连续性上更有优势。当数据源节点有多条传输路径到目的节点时, 源节点可选择负载较小的路径传输数据以平衡网络负载, 而在单路径路由中无法做到这一点。数据源节点还可把一条数据按照某种编码方式把数据分成多条子数据分别在多条路径上传输, 当它们都到达目的节点时, 再按照对应的解码方式把数据解码, 这比单路径路由更加安全。然而这些优势都依赖于一个恰当的路径选择方法, 否则, 多路径路由反而降低网络的传输性能。

通过改进ARAS模型, 笔者提出了一个基于细胞适应机制的路径选择方法。在这个改进的ARAS模型中, 通过推导该模型的一个带有噪声项的吸引子, 具体明确了噪声对模型的随机影响。其次提出一种与当前路径状态和最好路径状态的偏差成反比的活跃度计算方法, 使其更加准确和快速地反映网络环境状况。在一个有10个数据源节点和5个邻居节点的数值实例中, 通过Matlab验证了改进模型的负载平衡有效性。然后通过修改AODV协议得到多路径路由协议, 并使用改进模型作为多路径路由的路径选择策略, 由此提出一种基于细胞适应机

制的多路径路由协议(MPAM, multi-path routing protocol based on adaptation mechanism of cell), 最后通过网络仿真平台OPNET验证方法有效性。

2 相关工作

关于ARAS模型在网络中的应用研究已经有一些进展, 文献[16]通过双吸引子系统模拟大肠杆菌细胞基因芯片中的开关切换, 文献[17]改进文献[16]中的吸引子模型, 用吸引子表示细胞状态, 利用在细胞中安装反应代谢活动的人工芯片测试细胞自适应选择。当外界环境良好时, 细胞处在单吸引子模型情形, 代谢活跃, 当外界环境恶劣时, 细胞处在多吸引子模型情形, 活跃度降低, 受噪声影响明显, 使其在多个吸引子之间做随机选择, 直到找到使细胞活跃度提高的吸引子。Kenji等人^[18]把双吸引子适应模型^[17]扩展到多吸引子情况, 使源节点和目的节点之间的数据传输能够在覆盖网上按照网络参数的变化进行自适应的路径选择。文献[18]把一对源节点和目的节点之间的多条路径划分成一条主路径和多条备份路径, 并将其对应到多吸引子模型吸引子的一个大分量和多个小分量上。因为吸引子是完全受活跃度的影响而发生变化, 所以源节点和目的节点对之间的数据传输率就可以随着活跃度变化。又由于活跃度就是用来表达源节点和目的节点之间的数据传输在变化的网络环境中的适应状况的, 于是源节点和目的节点对之间的路径传输被期望可以适应变化的网络环境。但是文献[18]只是验证了源节点和目的节点之间路径传输率随着活跃度的变化关系, 并没有在网络场景中进行实验。文献[19]提出按照一个与路径传输状态成正比的概率随机选择主路由, 并详细讨论了阈值变化和路径随机化选择对路径震荡的影响。然而其反在只有一对源节点和目的节点的场景中进行了仿真实验, 而且仿真结果显示网络平均延迟和路径的变化次数并不优于贪婪路径选择方法。文献[20]为了避免网络路由故障问题, 通过记录每次的数据传输情况到路径的每个节点上, 使数据每到达一个节点都根据状态来选择路由下一跳, 但当通过节点的路由增多时, 节点需要为每个目的节点记录一遍所有邻居的状态, 庞大的存储量会严重影响节点执行效率, 为此文献[21]考虑在网络中引入地理位置信息, 以减少下一跳选择时候选节点的数目。

3 ARAS 模型和改进

3.1 ARAS 模型描述

文献[17]使用双吸引子模型模拟细胞对外界环境的适应,细胞通过感知环境变化自主调整自身的新陈代谢状况,模型如下

$$\begin{cases} \frac{dm_1}{dt} = \frac{S(A)}{1+m_1^2} - D(A)m_1 + \eta_1 \\ \frac{dm_2}{dt} = \frac{S(A)}{1+m_2^2} - D(A)m_2 + \eta_2 \end{cases} \quad (1)$$

其中, m_1 、 m_2 表示细胞的 mRNA 浓度。由于 mRNA 和蛋白质是基本对应的,因此它们也可以表示蛋白质的浓度。方程右端表示细胞 mRNA 浓度的变化率,影响 mRNA 浓度变化主要有 2 个方面因素:一个是蛋白质的代谢水平,主要包括蛋白质的合成速度 $S(A)$ 和分解速度 $D(A)$;另一个是环境噪声 η_i ,主要指影响细胞代谢的各种内在和外在此因素。 A 表示细胞的活跃度,影响蛋白质的代谢水平。细胞的增殖速度体现细胞的活跃度,活跃度越大,mRNA 的合成和分解速度越快,表示细胞代谢越旺盛。细胞活跃时, $S(A)$ 和 $D(A)$ 变大,噪声项可以忽略不计,细胞不活跃时, $S(A)$ 和 $D(A)$ 减小,噪声项增加细胞吸引子选择的随机性。

可验证,如果 $D(A) \neq 0$,当 $\frac{S(A)}{D(A)} > 2$ 且 $m \neq 0$ 时,

系统存在形式如 $(m, \frac{1}{m})$ 和 $(\frac{1}{m}, m)$ 的 2 个吸引子。

当环境变化时,如果细胞保持活跃,则细胞状态仍然适应环境,吸引子不变,细胞继续保持原来状态;否则细胞活跃度下降,代谢合成和分解速度下降,噪声项在吸引子中的比重加大,影响细胞状态随机变化,使得细胞有机会重新选择吸引子,如果细胞选中的吸引子不能改善细胞活跃度,则细胞状态继续保持随机变化,如果细胞选择的吸引子使细胞活跃度增大,并且通过合成和分解速度的增大使噪声项对吸引子大小的影响可忽略,那么细胞摆脱噪声的随机性影响,重新保持状态适应环境。

3.2 改进的 ARAS 多维模型

在多路径路由研究中,如何选择更加合理的路径是大多要首先考虑的问题,路径选择策略是一个主要研究点。受细胞环境适应过程启发,通过 ARAS 模型实现路径选择的方法已经有了一些研究,文

献[18,19]建议了 MARAS 方法尝试克服多路径中的贪婪路由效应。本文针对此方法提出一种改进的 ARAS 模型,在该模型中详细描述了源节点适应网络环境和细胞适应生存环境的相似点,而且推导得到一个新的吸引子,该吸引子克服了以前文献无法具体确定噪声如何随机的影响状态选择的缺点。本文同时提出一种新的活跃度计算方法,使模型更准确地把握状态转换的时机,反应环境变化,模型具体如下

$$\begin{cases} \frac{dm_1}{dt} = \frac{S(A)}{1+\hat{m}^2 - m_1^2} - D(A)m_1 + \eta_1 \\ \frac{dm_2}{dt} = \frac{S(A)}{1+\hat{m}^2 - m_2^2} - D(A)m_2 + \eta_2 \\ \vdots \\ \frac{dm_n}{dt} = \frac{S(A)}{1+\hat{m}^2 - m_n^2} - D(A)m_n + \eta_n \end{cases} \quad (2)$$

其中, m_i 表示路径 i 的状态值,反应路径数据传输性能; \hat{m} 表示当前路由路径的状态值; A 表示源节点的活跃度,用来表达源节点的数据传输对变化的网络环境的适应程度; η_i 表示路径 i 在网络中受到的噪声,包括所有影响路径数据传输的节点内部和外部因素。假设影响路径的噪声相同, $\eta_i = \eta_j, i \neq j, 1 \leq i, j \leq n$, 当 $\frac{dm_i}{dt} = 0$ 时,若 $m = m_k, i \neq k, 1 \leq i \leq n$, 可得带噪声项的吸引子

$$m_i = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(\sqrt{\left(\frac{S(A) + 2\eta}{D(A)} \right)^2 + 4} - \frac{S(A)}{D(A)} \right), & i \neq k \\ \frac{S(A) + \eta}{D(A)}, & i = k \end{cases} \quad (3)$$

经验证,如果 $S(A) \neq 0, D(A) \neq 0$, 当 $m_i = m_k$ 时, $\frac{D(A)^2 - 2S(A)^2}{2S(A)} = \eta$ 。则当 $S(A) \neq 0, D(A) \neq 0$ 时, 方程存在多吸引子的充要条件是 $\frac{D(A)^2 - 2S(A)^2}{2S(A)} \neq \eta$ 。

细胞为了适应生存环境,不得不根据环境的变化不断改变自身的新陈代谢状态。如果把源节点比作细胞,网络环境比作细胞的生存环境,那么当路由路径的状态发生变化时,源节点可以根据路径的状态变化,不断地改变传输数据的路径,如细胞适

应环境般适应网络环境的变化。当源节点当前正在使用的路径变差时，借鉴细胞不适应环境时通过活跃度转换状态的过程，建立源节点活跃度用于刻画网络适应情况。在网络中，由于分组到达时间的不确定性和分组到达的不可拒绝性，往往不可避免地发生路径聚集效应，引发网络拥塞，而细胞状态选择的随机性会在一定程度上改善不平衡。所以，当源节点状态较差时，为了在路径选择上增加随机性，采用状态概率 $P_i = \frac{m_i}{\sum_{j=1}^n m_j}$ 选择路由路径，如果节点当前路径的状态良好，则选择后继续保持当前路径传输的概率就大，反之则小。据此，根据细胞适应环境过程，改进源节点路径选择过程如图 1 所示。

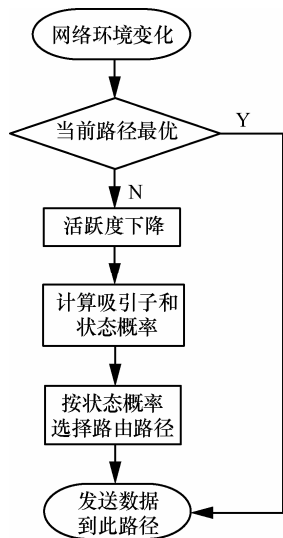


图 1 源节点路径选择过程

细胞代谢速度与细胞活性成正比关系，同样源节点活跃度与代谢合成和分解函数也成正比关系。当用路径状态概率重选路径时，活跃度越大，当前路径再次被选中的概率越大，活跃度越小，其他候选路径被选中的概率增加，当活跃度足够小时，噪声开始影响选择概率，路径选择随机化加强。当取代谢合成分解函数 $S(A) = A(0.005A^4 + 1.2)$ ， $D(A) = 2A$ ，噪声项 $\eta = \text{rand}(0,1)$ ，5 条保留路径时，状态概率随活跃度变化关系如图 2 所示，其中 P_k 表示当前数据传输路径状态概率， P_i 表示其他保留路径状态概率。

活跃度是反映细胞环境适应程度的度量，细胞活跃度越大说明细胞越适应环境，细胞状态越稳定。在多路径路由中，为了让活跃度更好地反映源节点的传输状态，取活跃度

$$A = \frac{\gamma}{\alpha |m_i - m_k|^\theta + \beta} \quad (4)$$

其中， m_i 表示在一对源节点和目的节点之间正在数据传输的路径的状态； m_k 表示在这对源和目的地之间的所有路由路径中最好的路径状态； α 、 β 、 γ 、 θ 为正常数。这里 β 和 γ 用来指明活跃度 A 的边界，而 α 和 θ 用来指明活跃度在此边界内的变化率。通过式(4)可以看出，活跃度 A 与源和目的地之间正在被用于数据传输的路径的状态成正比。当前数据传输路径的状态越差，源节点活跃度 A 越小；当前路径状态越接近最大，源节点活跃度 A 越大。当前数据传输路径状态达到最大时，即 $m_i = m_k$ ，源节点活跃度达到最大值 $A = \frac{\gamma}{\beta}$ 。当取 $\alpha = 1/1000$ ， $\beta = 1$ ， $\gamma = 10$ ， $\theta = 6$ ，偏差为 $|m_i - m_k|$ 时，活跃

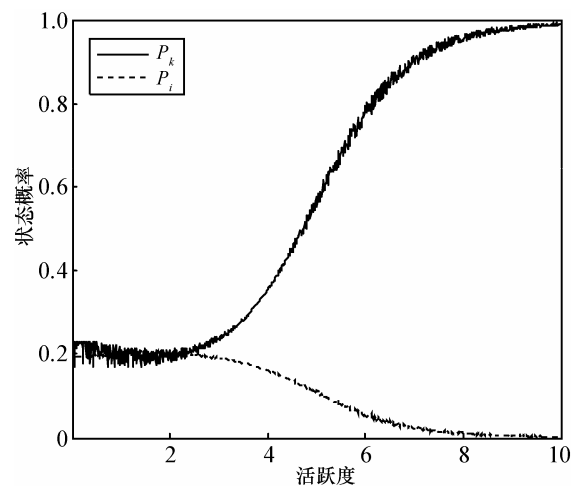


图 2 状态概率随活跃度变化关系

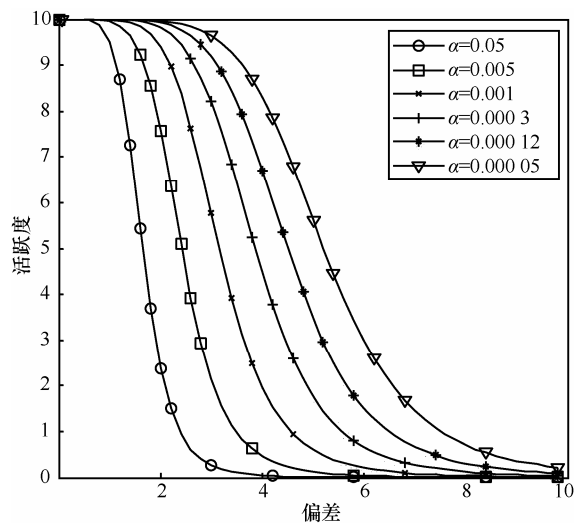


图 3 活跃度随参数 α 变化

度变化如图 3 所示。根据 $\beta=1, \gamma=10, A(Activity)$ 的取值范围是 $[0,10]$ 。基本上可以通过调整 α 和 θ 的值获得最适合网络环境变化的活跃度 A 的度量公式。例如可以通过扩展高活跃度区域的范围延长当前路径的数据传输时间。从图 3 可以看出当 $\theta=6$ 时, α 的取值越小, 高活跃度的范围就越大。

3.3 改进的 ARAS 模型负载平衡数值验证

本文通过重新计算模型吸引子, 使噪声对路径选择的随机影响更加明确, 以此更加方便地设定随机度和观察其对模型的影响。通过提出一个与当前正在数据传输路径的状态和最好路径状态之间的差成反比的新的活跃度计算方法, 源节点可以更加及时地做出路径选择。为验证改进效果, Matlab 模拟节点选择过程。假定 10 个源节点共享 5 个邻居节点, 开始时每个源节点都从相同的 2 个邻居节点中选取下一跳, 而且每个邻居节点的初始状态值都被设置为 10。状态值越大, 邻居节点的负载越小。在 10 个时间步内, 做 10 次选择后邻居节点的负载变化情况如图 4 所示, A, η, S, D, P_i, P_k 取法如前文所述, 可以看出改进模型使邻居节点的负载顺利达到一致(如图 4(a)所示), 所有源节点活跃度(如图 4(b)所示)最后升高到比较高的水平, 总体路径选择概率(如图 4(c)所示)趋于稳定, 源节点总体状态差(如图 4(d)所示)总体趋小。

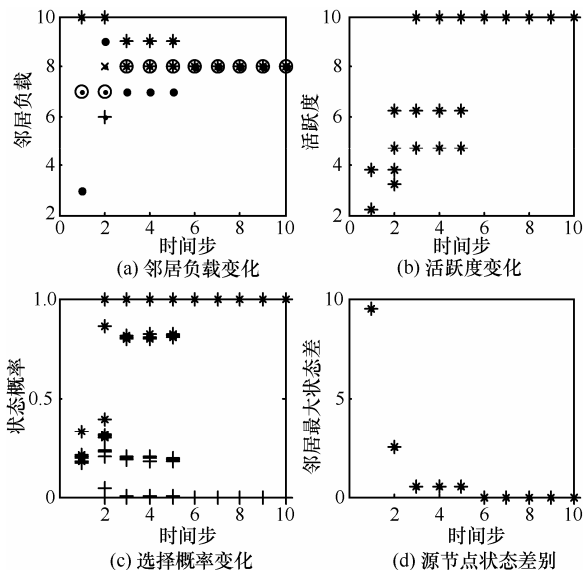


图 4 负载平衡演示

为验证改进模型的负载平衡准确度, 本文针对以上负载平衡过程重复实验 1 000 次, 并对比直接使用状态值作为活跃度的 MARAS 方法, 负载平衡

次数统计情况如图 5 所示。可以看出, 改进方法负载平衡准确度超过 95%, 而 MARAS 方法在 30%左右。

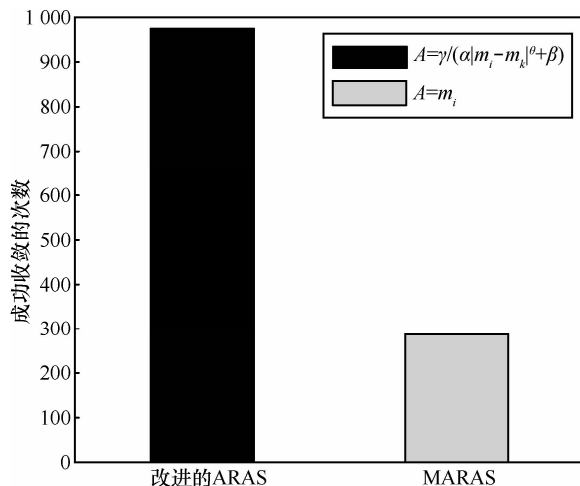


图 5 负载平衡次数统计比较

经以上验证, 在多个源节点共享多个邻居节点时, 改进的 ARAS 模型可以更加准确地确定路径选择的时机, 适时调整状态, 快速达到网络负载平衡。但在实际网络中, 数据分组到达时间、数据分组大小等都有所不同, 环境复杂多变, 为了能更好地体现方法的有效性, 本文在 OPNET 中 AODV 路由协议的基础上, 借鉴细胞适应环境的状态, 实现多路径路由协议, 在源节点选择路由路径时采用改进的 ARAS 方法, 使其借助多路径路由达到改善网络性能目的。

4 基于细胞适应机制的 AODV 多路径路由

细胞有对周围环境的变化做出反应的能力, 面对不同的环境一般表现出不同的状态; 源节点在适应网络环境时, 往往会遇到各种各样的情况, 可借鉴细胞的 3 种状态(休眠状态、健康状态和病弱状态)来模拟源节点在多路径路由中的适应情况, 它们分别对应源节点没有路径传输数据、有足够路径传输数据和没有足够路径传输数据的情况。源节点没有传输路径时, 便如细胞休眠般不再传输数据, 处在不断请求路由的阶段; 当源节点处在健康状态时, 其主要任务是在这些路径上用改进的 ARAS 方法更有效率地传输数据; 当源节点处在病弱状态时, 源节点需要边发送路由请求边利用已有路径传输数据, 处在不完全故障状态。AODV 是当前最流行的自组网路由协议之一, 它通过在每个节点上为每个目的地建立距离矢量来实现路由转发, 通过修改 AODV 协议创建基于细胞适应机制的 AODV 多

路径路由协议。利用多次发送路由请求的方式在源节点上建立多条不相交路径，并根据改进的 ARAS 过程实现路径选择，这里称其为 MPAM(multi-path by ARAS mechanism)。

4.1 休眠状态

源节点处在休眠状态时，没有路径传输数据，主要任务是发送路由请求建立路由和缓存到达的数据分组。在 AODV 中，源节点通过发送路由请求建立到目的地的路由，路由请求每到达一个节点便建立或者更新到源节点的路由，当到达目的节点的时候，目的节点便沿着路由请求建立的到源方向的路由发送路由回复，当源节点接收到路由回复，便完成路由发现，开始数据传输。当建立不相交多路径路由时，如果源节点已经建立到目的地的路由，则继续发送路由请求再次建立路由，在路由请求转发过程中，每个中间节点检查是否已经建立了源节点和目的地之间的路由，如果是则丢掉请求分组，直到有请求分组到达目的地。源节点通过建立列表存储所有的路由矢量，列表每一项存储建立路由所需要的参数，如下一跳、跳数、序列号、端口信息等。在路由回复过程中，在每个中间节点上创建与源节点和目的地相关的标记，使源节点到目的地的其他路径不经过此点，并且在路由请求过程中，路由请求只有到达目的地才发送路由回复，放弃中间路由回复，以实现路径不相交。路由建立后，源节点摆脱休眠状态，开始数据传输。

4.2 健康状态

多路径路由完成后，源节点处在健康状态，主要任务是根据路径状态使用改进的 ARAS 方法适应地选择路由。路径状态通过数据回复分组获得，当数据到达目的节点时，目的节点读取数据延迟，并写入创建的数据确认分组发送给源节点，中间节点也可以在数据确认分组添加自身环境信息，如缓冲队列大小、处理速度等，源节点根据确认分组获得路径的状态。每隔一段时间，源节点会依次使用所有的保留路由发送数据，获知其状态，以此重新决定用于数据传输的路径。

4.3 病弱状态

若出现新的目的地或者发生路由故障，源节点将从休眠状态或者健康状态进入病弱状态，主要任务是边发送数据边发送路由请求。如果存在多条路径，源节点仍然保持使用改进的 ARAS 方法选择路径传输数据。AODV 产生路由故障的原因有 2 种：路由项超时和 HELLO 超时。如果在一定时间内路

由项没有被使用，路由项超时发生，路由项被设置不可靠，如果一定时间后路由项仍然没有被更新，则此路由项即被删除。AODV 协议中，每个节点通过定时向所有的邻居发送 HELLO 分组来确认自己的存在，如果 HELLO 发送超过期限，则其邻居就认为此节点发生故障，设定到此节点的路由项不可靠，并检查路由表是否存在经过此节点路由项，如果存在则发送路由错误消息给所有的前驱节点，直到到达源节点。多路径路由中，当源节点接收到路由错误消息时，如果错误消息来自正在使用的路径，则将该路径设置不可靠并在保留列表中查找可用路径，如果存在可用路径则使用此路径更新路由表项，否则发送路由请求建立路由。当发生路由超时，一般发生局部路由请求。局部路由请求采用请求建立到数据分组源节点路由的方式，同样只有到达目的地才发送路由回复，并且检查节点标记确定是否转发分组。为了避免大量数据分组聚集到此节点，发生故障节点立即发送路由错误分组给源节点，源节点接收到错误分组后决定转换路由或发送路由请求。当完成足够的路径发现后，源节点从病弱状态进入健康状态。

5 网络仿真分析

5.1 仿真环境

为了考察在复杂网络环境下 MPAM 路由的有效性，使用 C++/OPNET 作为仿真平台。多路径路由通过改进 OPNET 中的 AODV 单路径路由得到。仿真场景设置在 100 m×100 m 的区域中，并均匀分布 24 个自组织节点。这些自组织节点分成数据源节点和目的节点 2 种，仿真开始后数据源节点便向目的节点按照指数分布到达率发送数据。其他场景参数如表 1 所示。

表 1 仿真场景参数

参数	值
节点数	24
区域大小	100 m×100 m
通信半径/m	35
AODV-仅目的地回复标志	Enabled
AODV-路由超时阈值/s	50
AODV 最大允许 Hello 分组丢失数	4
数据报转发率/(packet·s ⁻¹)	25.27
分组到达时间分布/s	Exponential(0.5)
仿真时间/min	30

5.2 仿真结果

仿真采用网络延迟作为衡量路径状态标准， $m_i = e^{-delay_i}$ ，旨在减少网络的整体延迟，验证 MPAM 方法的可行性。路径状态采用线性插值方法输入 MPAM 方法，路径的最好状态是 1，MPAM 方法的最好状态是 10。源节点周期性收集状态平均值 $state_avg$ ，通过线性插值的方法得到正规化的路径状态 $\bar{m}_i = 10 + (m_i - 1) \frac{10 - 5}{1 - state_avg}$ 。据此 MPAM 方法可以用于多路径的适应选择。

在仿真中，源节点采用每隔 5 个数据分组即做一次路径选择，每 50 个分组计算一次路径状态平均值，仿真结果如图 6 所示。根据实验环境参数设置，仿真实现 MPAM 与其他 2 种方法的对比，分别是贪婪路由(GREEDY)和正规化状态直接作为活跃度的方法(MARAS)。通过考虑通过降低节点转发率模拟网络性能下降的情况，当网络节点数据报转发率(DFR)分别为 25、27 时，仿真结果显示 MPAM 方法可以更好地降低整个网络的延迟(如图 6(a)和图 6(c)所示)，从样本平均(如图 6(b)和图 6(d)所示)角度更直观地观察到这种优势。在网络环境比较复杂的情况下，比如取较短的活跃路由由超时时间、更小的允许 HELLO 分组损失和更低的数据报转发率时，传输路径的故障率就会增加，同样路由协议本身的路由维护机制会显著增加路由发现的次数，网络负担的加重和路由性能的下降使 IM-ARAS 路径选择算法的优势很难体现，最后导致网络延迟结果比较随机。

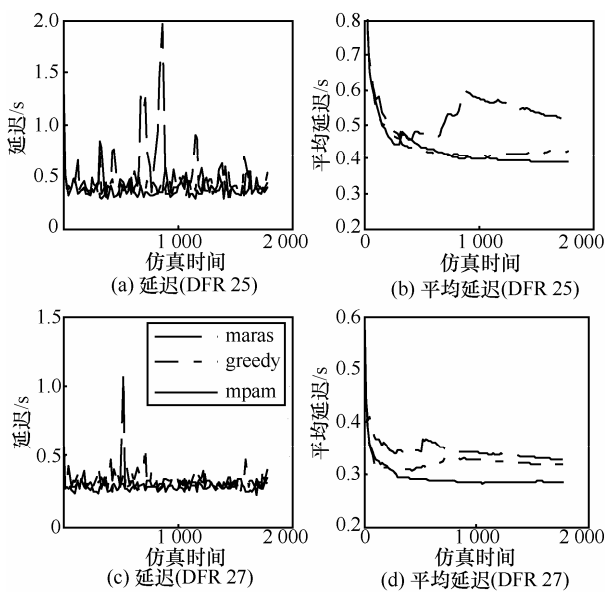


图 6 网络仿真延迟比较

经过实验，很多路径参数都受此影响。这里采用延迟作为评价路径状态的标准，其他的路径参数，如路径跳数、路径可靠性、路径负载和路径安全性等，都可成为评价好坏的标准，这主要取决于网络的性能偏好。

6 结束语

本文通过改进 ARAS 模型吸引子和活跃度计算方法，使随机度对模型的影响更加具体和更容易设置。经 Matlab 数值验证，可以在 10 个时间步内以超过 95%的准确度达到负载平衡。在 AODV 路由协议的基础上实现多路径路由，借鉴细胞环境适应机制，利用改进的 ARAS 模型，构建了基于细胞适应机制的多路径路由协议。协议经过 OPNET 仿真实现，与贪婪路由和 MARAS 路由对比路由延迟性能，结果显示 MPAM 路由有更好的效果。

参考文献:

- [1] 孙彦景, 方卫, 刘卫东. 基于蚁群优化的无线多媒体传感器网络区分服务路由[J]. 通信学报, 2012, 33(Z2): 9-14.
SUN Y J, FANG W, LIU W D. Differentiated service and ant colony optimization based routing produced for wireless multimedia sensor networks[J]. Journal on Communications, 2012, 33(Z2): 9-14.
- [2] 盛国军, 温涛, 郭权. 基于改进蚁群算法的可信服务发现[J]. 通信学报, 2013, 34(10): 37-48.
SHENG G J, WEN T, GUO Q. Trustworthy service discovery based on a modified ant colony algorithm[J]. Journal on Communications, 2013, 34(10): 237-48.
- [3] ANTONIOU P, PITSILLIDES A, BLACKWELL T, et al. Congestion control in wireless sensor networks based on bird flocking behavior[J]. Computer Networks, 2013, 57(5): 1167-1191.
- [4] TYRRELL A, AUER G, BETTSTETTER C. Fireflies as role models for synchronization in ad hoc networks[A]. The 1st IEEE/ACM International Conference on Bio-Inspired Models of Network, Information and Computing Systems (IEEE/ACM BIONETICS 2006)[C]. Cavalese, Italy, 2006. 1-7.
- [5] HASEGAWA G, MURATA M. TCP Symbiosis: congestion control mechanisms of TCP based on Lotka-Volterra competition model[A]. Proceedings of Inter-Perf 2006[C]. Pisa, Italy, 2006.
- [6] ANTONIOU P, PITSILLIDES A. A bio-inspired approach for streaming applications in wireless sensor networks based on the Lotka-Volterra competition model[J]. Computer Communications, 2010, 33(17): 2039-2047.
- [7] PEI G, GERLA M, CHEN T W. Fish-eye state routing in mobile ad hoc networks[A]. ICDCS Workshop on Wireless Networks and Mobile Computing[C]. Taiwan, China, 2000.D71-D78.
- [8] CLAUSEN T, JACQUET P. Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)[S]. RFC 3626, Internet Engineering Task Force, 2003.
- [9] PERKINS C E, BELDING-ROYER E M, DAS S R. Ad Hoc On-demand Distance Vector (AODV) Routing[S]. RFC Experimental 3561, Internet Engineering Task Force, 2003.
- [10] JOHNSON D B, MALTZ D A, HU Y C. The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks (DSR)[S]. Tech Rep, IETF MANET Working Group, 2007.

- [11] PATHAK S K, UPADHYAY R, BHATT U R. An efficient query packets forward algorithm in IRP protocol[A]. 2014 International Conference on Issues and Challenges in Intelligent Computing Techniques(ICICT)[C]. Ghaziabad, India, 2014.592-595.
- [12] JOA-NG M, LU I T. A peer-to-peer zone-based two-level link state routing for mobile ad-hoc networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1999, 17 (8): 1415-1425.
- [13] YANG O, HEINZELMAN W. Sleeping multipath routing: a trade-off between reliability and lifetime in wireless sensor networks[A]. Proc of IEEE GLOBECOM[C]. Houston, TX, USA, 2011.1-5.
- [14] VENKATASUBRAMANIAN S, GOPALAND N P. Multi-path QoS routing protocol for load balancing in MANET[J]. Journal of Networking & Parallel Computing, 2013, 1(3):18-27.
- [15] OTHMAN J B, MOKDAD L. Enhancing data security in ad hoc networks based on multipath routing[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2010, 70(3):309-316.
- [16] GARDNER T S, CANTOR C R, COLLINS J J. Construction of a genetic toggle switch in *escherichia coli*[J]. Nature, 2000, 403: 339-342.
- [17] KASHIWAGI A, URABE I, KANEKO K, *et al.* Adaptive response of a gene network to environmental changes by fitness-induced attractor selection[J]. PLoS ONE, 2006, 1(1): e49.
- [18] LEIBNITZ K, WAKAMIYA N, MURATA M. Biologically inspired self-adaptive multi-path routing in overlay networks[J]. Commun ACM, 2006, 49(3): 62-67.
- [19] LEIBNITZ K, WAKAMIYA N, MURATA M. Resilient multi-path routing based on a biological attractor selection scheme[A]. The Second International Workshop on Biologically Inspired Approaches to Advanced Information Technology (BioAdit 2006)[C]. Osaka, Japan, 2006.
- [20] LEIBNITZ K, WAKAMIYA N, MURATA M. A bio-inspired robust routing protocol for mobile ad hoc networks[A]. Proceedings of the 16th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN)[C]. Honolulu, Hawaii, USA, 2007.321-326.
- [21] LEIBNITZ K, WAKAMIYA N, MURATA M. Self-adaptive ad-hoc/sensor network routing with attractor selection[A]. Proc of IEEE GLOBECOM[C]. San Francisco, CA, 2006.1-5.

作者简介:



公维冰 (1983-), 男, 山东新泰人, 北京科技大学博士生, 主要研究方向为计算机网络路由技术。



阳小龙 (1970-), 男, 四川邻水人, 博士, 北京科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为互联网理论与技术、网络完全、光交换与光互联。

张敏 (1972-), 女, 重庆人, 北京科技大学副教授, 主要研究方向为互联网理论与技术、IP 网络安全等。

隆克平 (1968-), 男, 四川通江人, 博士, 北京科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为互联网理论与技术、光互联网络体系结构和关键技术、宽带无线接入技术、电信增值业务等。

(上接第 55 页)

- WANG L, CHEN S H, SU J S, *et al.* GPU-based regular expression match engine for deep packet inspection[J]. Journal of Application Research of Computers, 2010, 27(11): 4324-4327.
- [15] 王梓坤. 随机过程论[M].北京: 科学出版社, 1965.
- WANG Z K. The Theory of Stochastic process[M]. Beijing: Science Press, 1965.
- [16] GEBALI F. Analysis of Computer and Communication Networks[M]. Victoria: Springer Science, 2008.123.
- [17] 侯振挺, 郭青峰. 齐次可列马尔可夫过程[M].北京: 科学出版社, 1978.
- HOU Z T, GUO Q F. Countable and Homogeneous Markov Chain[M]. Beijing: Science Press, 1978.
- [18] XIE A G, BEEREL P A. Efficient state classification of finite state markov chains[A]. DAC98[C]. San Francisco, 1998.
- [19] 关治, 陈景良. 数值计算方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- GUAN Z, CHEN J L. Numerical Computing Analysis[M]. Beijing: Tsinghua Press, 2002.
- [20] DAVID K, WARD C. Numerical Analysis[M]. Beijing: China Machine Press, 2005.

作者简介:



陈曙晖 (1974-), 男, 湖南长沙人, 博士, 国防科学技术大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为计算机网络与网络安全。

徐成成 (1989-), 男, 湖北襄阳人, 国防科学技术大学硕士生, 主要研究方向为信息安全、字符串匹配。