基于动态膜计算系统的自组织网络广播算法*

刘沙沙[1,2]，窦全胜[1,3]，伏开磊[1,2]

(1. 山东工商学院 计算机科学与技术学院 计算机科学与技术系，山东 烟台 264005；2. 山东师范大学 信息科学与工程学院 计算机科学系，济南 250014；3. 中国科学院计算技术研究所，北京 100080)

摘　要： 应用仿生学原理设计了一种新型的广播算法——基于动态膜计算系统的广播算法，提出了动态膜计算系统，并给出了解决自组织网络中广播问题的规则集。系统中节点转播信息的优先权通过节点间距离及邻居个数确定，适合不同密度的网络；并根据信息数与门限值的比较，取消部分节点的转播权，从而提高了可达率和转播节省率。仿真测试验证了此系统用于广播是可行的、高效的，为设计无线自组织网络中的广播算法提供了新思路。

关键词： 动态膜计算系统；动态规则集；自组织网络；广播算法；时间性能

中图分类号： TP301.6　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 1001-3695(2012)05-1821-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.05.058

Dynamic membrane computing systems based on self-organizing network broadcasting algorithm

LIU Sha-sha[1,2], DOU Quan-sheng[1,3], FU Kai-lei[1,2]

(1. *Dept. of Computer Science & Technology, College of Computer Science & Technology, Shandong Institute of Business & Technology, Yantai Shandong* 264005, *China*; 2. *Dept. of Computer Science, College of Information Science & Engineering, Shandong Normal University, Jinan* 250014, *China*; 3. *Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100080, *China*)

Abstract: This paper first designed broadcasting algorithm by the principle of bionics, then presented dynamic membrane computing systems, and gave the rule sets which could work out the problem of the network broadcasting. In this system, it determined the priority of the information on node by the distance between nodes and the number of neighbors, so it was suitable for various network density. According to comparation of the number of information and the threshold value, it canceled the right of broadcast information of node, so as to improve reachability and save more rebroadcasts. Experiment results show that this system is feasible and efficient, and it provides new ideas for devising broadcasting algorithm for wireless network.

Key words: dynamic membrane computing systems; dynamic rule sets; self-organizing network; broadcasting algorithm; time capability

无线自组织网络是一种新型的动态网络，是一种没有中心节点、无固定基础设施的多跳临时自治网络系统。每个主机承担路由功能，并可以自由移动。主机在建立以及维护路由、分配与管理资源时都是通过广播实现的，从而广播算法的效率对网络性能有极大的影响。目前，许多学者对广播进行了研究，基于最小连通支配集建立虚拟骨干广播网的广播策略被认为是一种比较有效的广播算法，但已有文献证明构造最小连通支配集是 NP 难问题。然而最简单高效的广播算法是泛洪算法，可达率高、延时少、可靠性高、占内存空间少，但容易产生广播风暴。为了解决这个问题，周伯生等人[1]提出了一种基于竞争机制的广播算法，每个节点分配一个合适的等待时间，通过竞争，取消部分节点的转播权，从而减少转发节点，提高转播率，避免广播风暴，但部分节点可能接收不到信息，降低了可达率。此后，其他学者又提出了基于概率的算法、基于位置的算法、基于计数器的算法、基于距离的算法、基于邻居知识的算法等，这些算法存在可达率低或计算开销大等问题。

罗马尼亚科学家 Păun[2] 于 1998 年提出了膜计算，膜计算系统也称为 P 系统[3,4]。自膜计算提出以来，就受到众多学者的广泛关注。目前，Păun 等人[5]运用进化算法求解 P 系统中的广播问题，给出了进化计算与膜计算相结合的新应用，同时首次给出了 P 系统模拟树型网络广播的可行规则集。Lefticaru 等人[6]提出了 P 系统模拟会话的可行规则集。这些研究都充分说明了 P 系统具有很好的分布式结构[7]、并行信息处理[8]和易于通信的能力[9,10]。因此，本文提出了基于膜计算系统的广播算法。

1　膜计算系统的预备知识

自组织网络的拓扑结构一般记为无向图 $G=(V,E)$。其中：$V=\{v_1,v_2,\cdots,v_n\}$ 表示节点集合，$(u,v)\in E$ 表示节点间连接情况。在基于 P 系统的广播模型中，一个细胞膜表示一个节点，多个细胞自由放置在同一环境中，细胞和环境均可以包含对象，各细胞之间、细胞与环境之间采用转运规则进行通信。

收稿日期： 2011-08-28；**修回日期：** 2011-10-14　**基金项目：** 国家自然科学基金资助项目(60970088,60775035)；国家“973”计划资助项目(2007CB311004)；国家科技支撑计划资助项目(2006BAC08B06)

作者简介： 刘沙沙(1984-)，女，山东济宁人，硕士研究生，CCF 学生会员，主要研究方向为人工智能、膜计算(lss_jn@163.com)；窦全胜(1971-)，男，副教授，博士，主要研究方向为智能科学、群体智能、数据挖掘等；伏开磊(1987-)，男，硕士研究生，主要研究方向为人工智能、脉冲神经膜系统.

P 系统在初始化时,为每一个细胞膜都存储了邻居节点的 id 号及其邻居个数,表示了节点之间连接的情况。膜计算系统的广播算法是在基于竞争机制的广播算法基础上,设置一个特定的门限值,通过比较信息个数与门限值的大小,决定节点的转播权。这在一定程度上避免了部分节点接收不到信息的情况,从而提高了可达率。

一般地,膜计算系统可表示为六元组 $\Pi=(\mu,M,V,T,I,(\mathcal{R},\rho))$。其中:

a)μ 是系统结构,用来定义包含 m 个膜的膜结构。各个膜及其所围的区域用标号集 H 表示,$H=\{S_1,S_2,\cdots,S_m\}$,也可以看成每个细胞膜的 id 号,每个细胞膜的 id 号都是唯一的,其中 m 称为 Π 的度。

b)$M=\{M_{S_1}\cup M_{S_2}\cup\cdots\cup M_{S_i}(1\leqslant i\leqslant m)\}$ 是格局,用来定义对应区域中对象的多重集。其中 m 表示细胞膜的个数,即给定的拓扑结构中节点的个数。

c)V 是字母表,是有限非空的抽象符号的集合,用来定义对象的定义域。针对广播算法来讲,$V=\{t,O,C',P',S_i(1\leqslant i\leqslant m)\}$。其中:$t$ 表示细胞膜的等待时间;O 表示要广播的信息;C'、P'表示催化剂;S_i 表示细胞膜的 id 号。

d)T 是协议集的有限集合,表示每个细胞膜所具备的能力。针对广播算法讲,$T=\{B\}$。其中 B 表示细胞膜具有广播功能。设计成一个集合,是为了在以后的研究中可以扩充细胞膜的功能。

e)I 表示输入集的有限集合,$I=\{N_{s_s},N_{s_i},D_{s_i,s_j}(1\leqslant i,j,s\leqslant m)\}$。其中:$N_{S_i}$表示此邻居节点的邻居个数;$N_{S_s}$表示此节点的邻居个数;$D_{S_i,S_j}$表示节点 S_i 与 S_j 之间的距离,距离由卫星定位系统(GPS)提供。

f)$(\mathcal{R},\rho)$是每个膜中的进化规则集及同一细胞膜中规则间的优先关系。其中:进化规则集 $\mathcal{R}=\{\mathcal{R}_{S_1}\cup\mathcal{R}_{S_2}\cup\cdots\cup\mathcal{R}_{S_i}(1\leqslant i\leqslant m)\}$ 中$\mathcal{R}_{S_i}$是二元组(u,v),通常写成 $u\rightarrow v$;u 是 V^* 中的字符串;$v=v'$,$v=v'\delta$,$v=\lambda$,v'是集合$\{a_{\text{here}},a_{\text{out}},a_{\text{in}_j}\mid a\in M,1\leqslant j\leqslant m\}$上的字符串,$\delta$、$\lambda$ 是不属于 V 的特殊字符。当某规则包含 δ 时,执行该规则后细胞膜就被溶解;当某规则包含 λ 时,如 $u\rightarrow\lambda$,表示细胞膜中仅消耗了一个 u。u 的长度称为规则 $u\rightarrow v$ 的半径。$\mathcal{R}$是进化规则的有限集,每一个 $\mathcal{R}_{S_i}$是与膜结构μ 中的区域 S_i 相关联的。$\rho=\{\rho_{s_1}\cup\rho_{s_2}\cup\cdots\cup\rho_{s_i}(1\leqslant u\leqslant m)\}$ 是 $\mathcal{R}_{S_i}$ 中的偏序关系,称为优先关系,表示规则 $\mathcal{R}_{S_i}$执行的优先级。

2 基于动态膜计算系统的自组织网络广播算法

2.1 动态膜计算系统的提出

P 系统的功能非常强大,但目前存在如下两个问题:

a)能够实现对象与对象之间的转变,但是当实现一个函数时,需要写出所有的符合条件的规则。例如当实现函数 $F(x)$时,对于任意的一个 $x_i\in X$,均存在一条类似 $x_i\rightarrow F(x_i)$的规则。这种规则的条数就是集合 X 的元素个数,使得整个规则集很繁琐,不方便书写;并且占用了大量内存。当 X 是无限集合时,P 系统无法实现。

b)在 P 系统中,当运行完一条规则之后触发另一条规则时,是通过催化剂以及抑制剂实现的,这样会存在两个问题:

(a)系统中存在多余的催化剂和抑制剂,使得一些规则无法重用;并且对这些催化剂和抑制剂的处理,以及何时处理,都需要考虑多方面的因素,使得 P 系统不够灵活;P 系统中每条规则都一一列出,占用大量内存,并且不是所有规则都会运行,对于某些确定的细胞膜,有可能记录了大量的冗余规则,从而浪费了内存资源。

(b)被触发的规则是由前一条规则的结果确定,当前一条规则的结果集合是无限集合时,P 系统无法实现;被触发的规则与前一条规则中的输入对象相关,当输入对象未知的情况下,无法实现对 P 系统中规则集的设计。

对此,本文对 P 系统进行了扩展,提出了动态膜计算系统(dynamic membrane computing systems,DP)。此系统中的规则称为动态规则,定义如下:设 X、Y 是非空集合,F 是对应法则。若对 X 中的每个 x,按对应法则 F,使 Y 中存在唯一的一个元素 y 与之对应,记做 $x\rightarrow F(x)$。当 Y 是对象的集合时,$x\rightarrow F(x)$称为动态产生对象的规则,即细胞膜中存在一个 x 按照对应法则 F 产生一个对应的对象 y;当 Y 是规则的集合时,$x\rightarrow F(x)$称为动态产生规则的规则,即细胞膜中存在一个 x 按照对应法则 F 产生一条对应的规则 y。

DP 系统的提出使得规则集更简约、灵活,并且整个系统具有很好的自适应性;同时扩充了 P 系统的功能,能够通过动态输入产生期望的规则,以及动态计算产生预期的对象;并且 DP 系统的功能更强大,弥补了 P 系统在某些方面不能实现的缺陷。

2.2 基于动态膜计算系统的广播算法的设计

DP 系统由三部分构成:膜的层次结构、表示对象的多重集和进化规则,重点是进化规则的设计。因此,针对基于 DP 系统的广播算法,为每个细胞膜中的规则集进行定义时,需考虑三个评价广播算法的性能指标:可达率、转播节省率和平均延迟。针对这三个性能指标,本文考虑如下:

a)可达率。基于竞争机制的算法是当节点监听时,发现有信息传播,则不再转发;DP 广播算法是通过设置门限值,只有当节点接收到的信息数超过门限值时,此节点才失去转播权,从而提高了可达率。

b)转播节省率。当节点收到信息时,只要发现邻居个数等于 1,取消节点的转播权;当节点收到的信息数超过门限值时,也取消节点的转播权。通过这两种情况减少了转播节点数。

c)平均延迟。根据节点间距离和邻居个数计算节点的转播优先级。距离发送节点远,并且邻居个数多的节点的转播优先级高,从而使得信息在网络中传播速度快、平均延迟小。

基于 DP 系统的广播算法(dynamic membrane computing systems based self-organizing network broadcasting algorithm,DP-BA)的规则集定义如下:

$$
\begin{aligned}
&\{r_1:t\rightarrow\lambda\\
&r_2:O^nB^m\rightarrow O(n\geqslant\max)\\
&r_3:O^nB^{n-1}\rightarrow O(n\geqslant 2)\\
&r_4:B\rightarrow C'\mid P'\\
&r_5:N_{S_i},D_{S_i,S_s}\cdots N_{S_j},D_{S_j,S_s}\rightarrow F(N_{S_i},D_{S_i,S_s},\cdots,N_{S_j},D_{S_j,S_s})\\
&r_{\text{id}}:S_j\rightarrow S_i(OB)_{S_i}\mid C'\\
&r_6:P'\rightarrow\lambda\mid C'\\
&r_7:N_{S_s}\rightarrow T(N_{S_s})\\
&r_8:C'\rightarrow\lambda\\
&\rho:r_1>r_2>r_3>r_4\\
&\rho:r_{\text{id}}>r_8\}
\end{aligned}
$$

a)规则 $r_2:O^nB^n\rightarrow O(n\geqslant\max)$中,max 是节点接收到信息

数的门限值。只有当 M_i 中有 n 个 O、n 个 B 时,这条规则才会被触发。以下规则类似,不再重复。

b)规则 $r_3: O^n B^{n-1} \to O(n \geqslant 2)$ 和 $r_4: B \to C' \mid P'$ 实现了当细胞膜第一次收到信息且被指定为转发节点时才转发信息,否则丢弃。即只有第一次被指定为转发节点时,触发规则 r_4 产生一个催化剂 C',进而转发信息;否则就执行规则 r_3,屏蔽信号 B,不再转发信息。

c)规则 $r_5: N_{s_i}, D_{s_i,s_s}, \cdots, N_{s_j}, D_{s_j,s_s} \to F(N_{s_i}, D_{s_i,s_S}, \cdots, N_{s_j}, D_{s_j,s_s})$ 中,$F(N_{s_i}, D_{s_i,s_S}, \cdots, N_{s_j}, D_{s_j,s_s})$ 是规则的有限集合,规则 r_5 表示输入 $N_{s_i}, D_{s_i,s_s}, \cdots, N_{s_j}, D_{s_j,s_s}$,产生 $\rho: r_{s_p} > \cdots > r_{s_q}(1 \leqslant p, q \leqslant m)$ 当且仅当 $\alpha N_{s_p} + \beta D_{s_p,s_S} \geqslant \cdots \geqslant \alpha N_{s_q} + \beta D_{s_q,s_S}$,其中 α、β 表示 N、D 占的比例关系,并且 $\alpha + \beta = 1$。

d)规则 $r_{\mathrm{id}}: S_i \to S_i(OB)_{s_i} \mid C'$,其中 $S_i \in \mu$ 是每个膜中邻居节点的 id 号,规则 r_3 中 C'是催化剂,只有 C'存在时,这条规则才有可能触发。规则 r_{id} 与 M_{id} 中记录的邻居 id 相关,即 M_{id} 中存在一个邻居 id 就产生一个相应的规则。

e)规则 $r_7: N_{s_s} \to T(N_{s_s})$ 中,$T(N_{s_s})$ 是对象的有限集合。其中:N_{s_s} 表示节点本身的邻居个数;规则 r_7 表示输入 N_{s_s},产生 $y \in \{P', \lambda\}$,当且仅当 $N_{s_s} = 1$ 时,产生 $y = \lambda$;否则产生 $y = P'$。

f)$\rho: r_1 > r_2$ 表示规则 r_1 比规则 r_2 的优先级高。

在 DP 系统中,通常是极大并行的使用规则,即凡是能使用的所有规则都必须使用;一个对象只能被一个规则使用,该规则按优先关系选择(如果优先关系 P_{s_i} 为空集,则非确定性选择规则)。需要强调的是,任何能被规则使用的对象必须选择一个规则,按该规则进化。也就是说,只有当所有对象都进化了或者消耗完了,系统的进化才会停止。

下面用一个简单的例子进一步说明基于 DP 系统的广播算法的基本概念和广播过程。给定一个网状的拓扑结构如图 1 所示,根据拓扑结构自动产生每个细胞膜的多元组,每个细胞膜中的等待时间设置成 0,即每个膜中 t 的个数是 0。N、D 之间比例系数 $\alpha = 0.8$,$\beta = 1 - \alpha$,门限值 $\max = N_{s_s}$。其中,$M = M_{s_1} \cup M_{s_2} \cup M_{s_3} \cup M_{s_4} \cup M_{s_5} \cup M_{s_6}$,$M_{s_i} = \{v, i, T\}$ $(1 \leqslant i \leqslant 6)$ 分别为 V^*、I^*、T^* 的子集,V^*、I^*、T^* 分别表示 V、I、T 的字符组成的任意字符串的集合。因此系统初始化如下:$M_{s_1} = \{O \cup S_2 \cup S_5, N_{s_2} \cup D_{s_1,s_2} \cup N_{s_5} \cup D_{s_1,s_3} \cup N_{s_1}, B\}$ 表示节点 S_1 中存储着邻居 S_2、S_5 的 id 号,以及它们的邻居个数分别为 N_{s_1}、N_{s_2}、N_{s_5};还存储着 S_2、S_5 到 S_1 的距离分别为 D_{s_1,s_2}、D_{s_1,s_5};节点 S_1 接收到信息 O,并且具有广播能力 B,即 S_1 是广播源点。可以分别写出其他细胞膜的初始状态如下:

$$M_{s_2} = \{S_1 \cup S_3, N_{s_1} \cup D_{s_2,s_1} \cup N_{s_3} \cup D_{s_2,s_3} \cup N_{s_4} \cup D_{s_2,s_4} \cup N_{s_2}, \phi\}$$
$$M_{s_3} = \{S_2 \cup S_4, N_{s_2} \cup D_{s_3,s_2} \cup N_{s_4} \cup D_{s_3,s_4} \cup N_{s_3}, \phi\}$$
$$M_{s_4} = \{S_2 \cup S_3 \cup S_5, N_{s_2} \cup D_{s_4,s_2} \cup N_{s_3} \cup D_{s_4,s_3} \cup N_{s_5} \cup D_{s_4,s_3} \cup N_{s_4}, \phi\}$$
$$M_{s_5} = \{S_1 \cup S_4, N_{s_1} \cup D_{s_5,s_1} \cup N_{s_4} \cup D_{s_5,s_4} \cup N_{s_5}, \phi\}$$
$$M_{s_6} = \{S_1, N_{s_1} \cup D_{s_6,s_1} \cup N_{s_6}, \phi\}$$
$$\mathcal{R} = \mathcal{R}_{s_1} \cup \mathcal{R}_{s_2} \cup \mathcal{R}_{s_3} \cup \mathcal{R}_{s_4} \cup \mathcal{R}_{s_5} \cup \mathcal{R}_{s_6}$$

其中:

$$\mathcal{R}_{s_1} = \{r_1: t \to \lambda$$
$$r_2: O^n B^n \to O(n \geqslant \max)$$
$$r_3: O^n B^{n-1} \to O(n \geqslant 2)$$
$$r_4: B \to C' \mid P'$$
$$r_5: N_{s_2}, D_{s_2}, N_{s_5}, D_{s_5} \to F(N_{s_2}, D_{s_2}, N_{s_5}, D_{s_5})$$
$$r_{s_2}: S_2 \to S_2(OB)_{s_2} \mid C'$$
$$r_{s_5}: S_5 \to S_5(OB)_{s_5} \mid C'$$
$$r_6: P' \to \lambda \mid C'$$
$$r_7: N_{s_1} \to T(N_{s_1})$$
$$r_8: C' \to \lambda$$
$$\rho: r_1 > r_2 > r_3 > r_4$$
$$\rho: r_{\mathrm{id}} > r_8\}$$

$\mathcal{R}_{s_2}$、$\mathcal{R}_{s_3}$、$\mathcal{R}_{s_4}$、$\mathcal{R}_{s_5}$ 与 $\mathcal{R}_{s_1}$ 类似,不再一一列举。它们的不同之处是判断优先级规则与判断转播节点规则中的参数不同。判断优先级规则中的参数与节点邻居信息相关,即 $\mathcal{R}_{s_1}$ 中的 r_5、r_{id}、r_7 不同,因为 M_{s_1} 中记录了邻居 S_2、S_5 以及它们之间的邻居信息,所以 $\mathcal{R}_{s_1}$ 中相应地产生 r_{s_2}、r_{s_5} 两个规则。根据节点 S_1 中存储的 N_{s_2}、D_{s_2}、N_{s_5}、D_{s_5},触发规则 r_5,从而得到有关 r_{s_2}、r_{s_5} 的优先关系的规则。规则 r_7 根据节点 S_1 的邻居个数判断转播权,当邻居个数为 1 时,r_7 触发后得到 λ,从而取消了节点 S_1 的转播权;否则得到 P',触发规则 r_4,赋予节点 S_1 的转播权。$\mathcal{R}_{s_2}$、$\mathcal{R}_{s_3}$、$\mathcal{R}_{s_4}$,$\mathcal{R}_{s_5}$,$\mathcal{R}_{s_6}$ 依此类推。系统初始化后,系统的运行过程如表 1 所示。

表 1　DPBA 例子的运行过程

时间步	M_{S_1}	M_{S_2}	M_{S_3}	M_{S_4}	M_{S_5}	M_{S_6}	注释
C_0	S_2S_5OBP'	$S_1S_3S_4P'$	S_2S_4P'	$S_2S_3S_5P'$	S_1S_4P'	S_1	初始格局中每个细胞膜中的 $r_5/7$ 被触发,每个细胞膜中都产生了一条规则,M_{S_1} 中生成的规则 $\rho: r_{s_2} > r_{s_5} > r_{s_6}$,其他细胞膜中不再一一列举
C_1	$S_2S_5OP'C'$	$S_1S_3S_4P'$	S_2S_4P'	$S_2S_3S_5P'$	S_1S_4P'	S_1	细胞膜 M_{S_1} 中触发规则 r_4
C_2	S_2S_5OC'	$S_1S_3S_4OBP'$	S_2S_4P'	$S_2S_3S_5P'$	S_1S_4P'	S_1	细胞膜 M_{S_1} 中触发规则 r_{s_2},将信息发送给节点 M_{S_2}
…	…	…	…	…	…	…	…
C_5	S_2S_5O	$S_1S_3S_4OC'$	$S_2S_4P'OB$	$S_2S_3S_5P'OC'$	S_1S_4O	S_1O	节点 S_2 转播信息给节点 S_3,取消了转播权
C_6	$S_2S_5O^2B$	$S_1S_3S_4OC'$	$S_2S_4P'O^2BC'$	$S_2S_3S_5O^2BC'$	S_1S_4O	S_1O	取消节点 $S_1S_3S_4$ 的转播权
C_7	S_2S_5O	$S_1S_3S_4O$	S_2S_4O	$S_2S_3S_5O$	S_1S_4O	S_1O	系统运行结束

表 1 中时间步 C_0 表示系统的初始状态。由于 M 中的 i 是输入部分,在系统运行过程中没有变化,在表中就没有写出。从表 1 中的运行结果可以看出,当系统运行结束后,每个节点都接收到了信息,并且在转播的过程中由于接收到多个信息,取消了节点 S_3、S_4 的转播权。S_6 收到信息之后,通过动态计算得知节点 S_6 只有一个邻居,取消了 S_6 的转播权,从而提高了转播节省率。门限值 max 选择很重要,门限值过大,会造成部分节点转播信息,降低转播节省率;门限值过小,会造成部分节点接收不到信息,降低了可达率。系统中 t 的设置也会影响转播节省率,此例子中节点密度小,没设置 t,当总节点数较多,密度较大时,通过设置合适的 t 可以提高转播节省率。

3　性能分析与仿真测试

3.1　性能分析

基于动态膜计算系统的自组织网络广播算法适合于任何密度的网络,通过设置合适的 α、β,可实现任何密度网络的广播。当网络密度大时,$\alpha > \beta$,即首先选择邻居节点多的节点进行转发信息,增加并行转播信息的节点个数。此时基于动态膜计算系统的广播算法的性能与基于竞争的广播算法的性能接近。当网络密度小时,$\alpha < \beta$,即首先选择距离发送节点远的节点进行转发,从而减少平均延时,提高了广播性能。同时通过设置门限值,改变节点的转播权,当收到的信息个数超过门限值时取消节点的转播权,避免了部分节点接收不到信息的情

况,从而提高了可达率。从理论上讲,基于动态膜计算系统的广播算法是可行的。

3.2 仿真测试

评价广播算法的性能指标有可达率、转播节省率和平均延迟。其中:可达率为接收到信息的节点数与网络总节点数的比值;转播节省率可以表示为$(r-b)/r$,r 为接收到广播信息的节点数,b 为转播信息的节点数;平均延迟为从源节点到其他各节点延迟的平均值。使用仿真软件 PSIM,网络节点数从 50 ~ 10 000,即在 PSIM 中的细胞膜个数从 50 增加到 10000。PSIM 中最大对象集的数量设置为 3,仿真周期设置为 100。由于此系统所有的细胞膜都是输出细胞膜,因此定义每个细胞膜只有一个内部状态。测试的目的是对基于 DP 系统的广播算法 DPBA 与简单泛洪算法(simple flooding,SF)和竞争广播算法(competitive broadcasting algorithm,CB)进行性能比较。DPBA 算法中的门限值以及 α、β 根据网络节点密度不同设置成不同的值,当节点密度大时,门限值 β 的值越大;否则,门限值 β 的值越小。等待时间 t 与 CB 中的等待时间设置一致。

图 2 比较了 DPBA 算法与泛洪算法和竞争广播算法在均匀网络中的性能。从图 2 中可以看出,SF 的可达率在均匀网络中基本接近 1.0(如果网络不是均匀网络,可达率不一定接近 1.0),相比 CB,DPBA 算法的可达率更接近 SF 算法的可达率。因为节点接收的信息个数大于门限值时才取消转播权,从而可以避免部分节点接收不到信息的弊端,所以 DPBA 的可达率高于 CB 的可达率,这与实验相符。图 2 中柱形图的高度表示转播节省率,可知 DPBA 与 CB 的转播节省率相近。虽然 DPBA 中使用门限值取消节点的转播权,看似降低了转播节省率,但是门限值的设置合适时,不会降低转播节省率。同时 DPBA 还采用当接收节点只有一个邻居时取消转播权,避免了冗余转播节点。

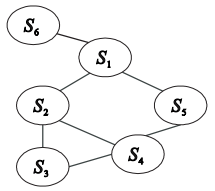

图1 基于DP系统的广播实例

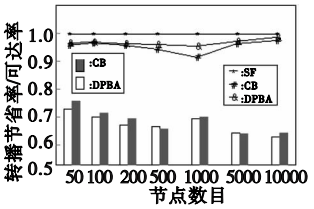

图2 三种算法在转播节省率、可达率性能上的比较

随节点数的增加,在平均延迟性能上,DPBA 与 CB、SF 的比较如图 3 所示。由图 3 可知,当网络节点动态增加时,三种算法的平均延迟都有所下降,总体上,这些算法能够适应网络的动态变化。这是因为主机的移动不会影响转播信息,当主机接收到信息到转播信息,可能位置变了,使得符合转播条件的节点增多,即并行广播的节点增加了,从而略微减少了平均延迟。

图 4 表示网络总节点数为 1 000,所占总面积分别为 5 × 5、10 × 10、18 × 18、25 × 25、30 × 30 时算法的可达率。当网络密度很大时,节点的可达率没有太大影响;当网络密度很小时,即面积超过 18 × 18 时,节点的可达率很低,这是由于一些节点远离了其他节点而接收不到信息,这是任何一种算法都无法避免的。从上述实验可得:在可达率性能上,DPBA 算法更接近 SF 算法;在其他性能上,DPBA 算法与 CB 算法接近,因此 DPBA 是可行的、高效的广播算法。

4 结束语

本文运用仿生学原理设计了一种新型的广播算法。首先提出动态膜计算系统,此系统对 P 系统的功能进行了扩展,使其能够动态产生规则,以及通过计算函数值动态产生对象,并对 P 系统中无法实现的部分进行了改进。在此模型中通过设置门限值来决定节点的转播权,根据节点之间距离与节点邻居个数来计算转发节点的优先级,并给出了适合无线自组织网络中广播的规则集。最后仿真测试表明:在可达率性能上,相比 CB,DPBA 可达率更接近 SF;在转播节省率和平均延迟性能上,DPBA 的性能接近 CB。因此,DPBA 是可行的、高效的广播算法,DP 系统易于通信,从而为解决自组织网络中的问题提供了新思路。鉴于本文的研究目的,没有详细说明门限值的设置问题。但是门限值的设置会影响到广播性能,网络密度不同时,门限值的设置也应不同,在将来的研究中可以使用遗传算法动态给出门限值,惩罚函数可以由未接收到信息的节点数与冗余转播节点数构成。

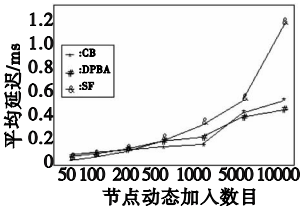

图3 DPBA与CB、SF的平均延迟性能比较

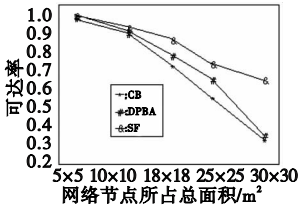

图4 DPBA与CB、SF的可达率比较

参考文献:

[1] 周伯生,吴介一,费翔. 一种适合于无线网络的竞争广播算法[J]. 电子学报,2003,31(2):280-283.

[2] PĂUN G. Computing with membranes[J]. Journal of Computer and System Sciences, 2000,61(1):108-143.

[3] PĂUN G, ROZENBERG G, SALOMAA A. The Oxford handbook of membrane computing[M]. New York:Oxford University Press,2010.

[4] GHEORGHE M, IPATE F, LEFTICARU R, *et al*. An integrated approach to P systems formal verification[C]//Proc of the 11th International Conference on Membrane Computing. Berlin:Springer-Verlag, 2010:225-238.

[5] PĂUN G, PAUN R. Membrane computing and economics: numerical P systems[J]. Fundamenta Informaticae, 2006, 73(1-2):213-227.

[6] LEFTICARU R,IPATE F,GHEORGHE M. Tuning P systems for solving the broadcasting problem[C]//Proc of the 10th Workshop on Membrane Computing. 2009:354-370.

[7] 张葛祥,潘林强. 自然计算的新分支——膜计算[J]. 计算机学报, 2010,33(2):208-214.

[8] PEREZ-JIMENEZ M J. A computational complexity theory in membrane computing[C]//Proc of the 10th International Workshop on Membrance Computing. 2010:125-148.

[9] LIU Chun-xiu, ZHANG Ge-xiang, LIU Hong-wen, *et al*. An improved membrane algorithm for solving time-frequency atom decomposition[C]//Proc of the 10th International Workshop on Membrane Computing. 2010:371-384.

[10] ZHANG Ge-xiang,LIU Chun-xiu,GHEORGHE M,*et al*. Solving satisfiability problems with membrane algorithm[C]//Proc of the 4th International Conference on Bio-Inspired Computing: Theories and Applications. 2009:29-36.