

一种能量延时优化的无线传感器网络信息分发策略

宋玉蓉 蒋国平

(南京邮电大学自动化学院 南京 210003)

摘要 研究无线传感网络中的信息分发问题,结合复杂动态网络信息传播模型理论,提出一种能量和延时优化的信息分发策略(energy and delay optimized information dissemination strategy, EDOIDS)。该算法无需节点定位信息和网络拓扑信息,立足信息传播逐步向外扩展的动力学特性,利用接收节点的接收端信号功率强度指示(RSSI)估计接收节点与发送节点的相对距离,建立节点转发优先级,确定 MAC 层转发时延。该算法在最大化覆盖新区域的同时能够有效降低碰撞,缩短整个系统的传播时延,同时,通过 MAC 层的监听机制以及复杂网络谣言传播理论,控制节点的转发权,抑制冗余,降低能耗。

关键词 无线传感器网络,复杂动态网络,信息分发,洪泛算法

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

Information Dissemination Strategy for Energy and Delay Optimization in Wireless Sensor Networks

SONG Yu-rong JIANG Guo-ping

(College of Automation, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract This paper addressed the information dissemination issue over wireless sensor networks. Based on the information propagation model of complex dynamic networks, an energy and delay optimized information dissemination strategy (EDOIDS) was proposed for wireless sensor networks, which didn't need the location information and topology information. By using the dynamics characteristic that the process of propagation grows outside with time from the source of information, and the received signals strength indication (RSSI), the algorithm evaluates the relative distances between senders and receivers, and decides forwarding priorities of nodes and time delay of MAC. The algorithm ensures the maximum coverage of new area, avoids effectively the collision of nodes and optimizes the delay of the whole network. Meanwhile, a joint of the listening mechanism of MAC with rumor spreading idea is used for controlling the forwarding priorities of nodes, restraining the redundant flooding packets and minimizing the energy consumption.

Keywords Wireless sensor networks, Complex dynamic networks, Information dissemination, Flooding algorithm

1 引言

针对盲目洪泛所表现出来的固有缺陷,提出了许多改进算法。这些算法的主要目标是在网络中找到节点的一个子集,只有位于此子集中的节点才可以转发洪泛包,以此来抑制网络中的冗余传输,同时尽可能地保证传播的最短时延。根据文献[1]的分类方法结合路由算法分类机制^[2],把这些改进算法进一步分为 3 类:一类是基于试探式(heuristic-based)的洪泛策略,这类策略根据一定的试探方案决定节点是否作为中继,决定洪泛收到的包,例如在文献[3]中提到的基于概率(probabilistic scheme)、基于计数(counter-based)的洪泛算法、Powell 等^[4]提出的概率数据传播算法。另一类是基于定位(location-based)的算法,这类算法需要借助诸如 GPS 等定位系统获知传感节点的位置信息,例如基于距离(distance-based)算法^[3]、辅助定位洪泛算法(Location-aided floo-

ding)^[5]、李方敏等^[6]提出的 PCF 算法。最后一类是基于拓扑(topology-based)的算法,这类算法利用网络的拓扑结构实施有效洪泛,例如基于源树(Source-tree based)^[7]和基于簇(cluster-based)^[8]的协议。第二类和第三类算法会导致系统开销过大,这对于本就资源受限的无线传感网络是不可取的。文献[9,10]分别提出基于距离的洪泛算法 CLF 和 EFS-C,由于其借助跨层设计^[11],接收节点无须借助诸如 GPS 等定位系统就可获知与发送节点的相对距离。CLF 和 EFS-C 两种算法能有效降低传输时延,但也存在不足,CLF 算法不能抑制冗余传输,EFS-C 算法在基于获知邻居信息来控制冗余的同时增加了控制开销,此外,这两种算法把节点处于监听时的能耗假定为 0,事实上,节点空闲监听会消耗接收数据所需能量的 50%~100%。例如,Stemm 和 Katz 研究显示空闲:接受:发送功率消耗比率为 1:1.05:1.4^[12],还有研究显示这组比率为 1:1.2:1.7^[13]。

到稿日期:2009-11-06 返修日期:2010-01-29 本文受国家教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-06-0510),国家自然科学基金项目(60874091),江苏省“六大人才高峰”高层次人才项目(SJ209006),南京邮电大学引进人才项目(NY209021)资助。

宋玉蓉(1971—),女,博士,副教授,CCF 会员,主要研究方向为复杂动态网络信息传播、信息安全, E-mail: songyr@njupt.edu.cn; 蒋国平(1966—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为混沌系统与复杂动态网络、网络信息安全、混沌通信。

本文将复杂网络传播动力学中信息传播的研究成果与无线传感网络的具体特征相结合,在分析无线传感网络信息传播模型的基础上,提出一种能量和延时优化的信息分发策略(EDOIDS)。本算法基于试探式(heuristic-based)洪泛策略,无需节点定位信息和网络拓扑信息,关注传播过程沿已获知信息的节点逐步向外扩展的动力学特性,利用接收节点接收包的信号强度来估计接收节点与发送节点的相对距离,通过划分节点转发优先级来确定 MAC 层的转发时延,在最大化覆盖新区域的同时有效降低碰撞,缩短整个系统的传播时延。同时 MAC 层的监听机制结合复杂网络谣言传播的动力学特征来控制节点的转发权,抑制冗余,降低能量消耗。

2 EDOIDS 系统模型

2.1 无线传感网络信息传播模型分析

假定一平面无线传感器网络, N 个传感器节点均匀分布在面积为 $L \times L$ 的二维网格区域, 每个传感节点的最大传输半径为 R_c , 即每一个传感节点仅能与位于其传输半径内的节点建立无线连接, 为简化分析我们假设每个节点装备全向天线, 具有相同的最大传输半径。分析信息传播过程中的动力学行为^[14], 传播过程沿已获知信息的节点逐步向外扩展。假定某时刻网络中节点的状态如图 1 所示, A, B 区域中节点都已获知信息, C, D 区域中的节点尚未获知信息。分析可知位于区域 A 中的节点对信息传播是没有贡献的, 我们称之为 Stiflers, 因为 A 中所有节点距 C, D 区域中的节点都已超过其通信距离 R_c 。能够对传播产生贡献的节点是位于 B 区域中的节点, 称之为 Spreaders, 而 B 区域中节点潜在传播对象是不大于节点通信距离 R_c 、当前未获得更新信息的 C 区域。C, D 区域中的节点称之为 Ignorants。

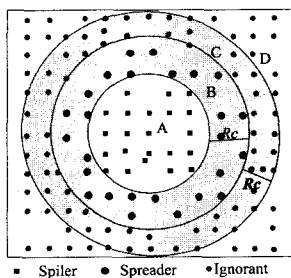


图 1 无线传感器网络信息传播模型

EDOIDS 基于上述信息传播模型分析, 从以下几个方面保证尽快传播更新以降低系统时延, 避免碰撞, 抑制冗余传输, 从而降低系统能耗:

传播实现最优覆盖, MAC 动态延时退避避免碰撞, 谣言传播策略抑制冗余传输。

2.2 基于 RSSI 定位估计实现最优覆盖

图 1 的 B 区域中节点欲转发洪泛包时, 应使每次参与洪泛传播的节点尽可能覆盖更多尚未获得更新的新区域, 即优先选择能够覆盖更多未知更新节点区域的节点广播更新实现最优覆盖。定义覆盖未知更新区域范围越大的节点, 其转发优先权就越高。最优覆盖可使系统传播延时尽可能小。从全局来看, 显然 B 区域中那些尽可能靠近 C 区域的节点其转发优先权应该最高。例如从图 2 看出, 对比 a, b, c 3 个节点转发洪泛更新, 显然 a 节点可覆盖更多新区域。因此, 如何确定 B 区域中最靠近 C 区域的节点是实现最优覆盖的关键。

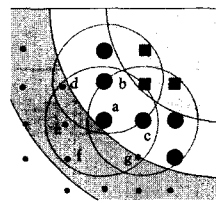


图 2 节点转发抑制

算法基于接收端信号功率强度指示(the received signal strength indication, RSSI)来估计接收端与发送端的相对距离, 认为与发送端距离越远靠近未知更新区域 C 的几率越大, 并以此距离量化节点转发优先权。鉴于 RSSI 受到环境的影响较大, 本算法假定此 WSN 所部署的区域环境相对平稳, 忽视 RSSI 受环境影响所导致的误差。

假设系统信道为加性高斯白噪声信道, 具有幂次为 k 的路径功率损失, 这意味着设备 j 接收到的信号功率强度与发送节点 i 的发送信号强度及 i 到 j 的距离有关, 即:

$$P_r(i, j) = P_t / G_0 d_{ij}^k \quad (1)$$

式中, G_0 为信道衰减因子, $P_r(i, j)$ 为接收功率, P_t 为发射功率, 设定所有设备的发射功率强度都是一样的, d_{ij} 是节点 i 到节点 j 的距离。这样根据接收端测得的信号强度 $P_r(i, j)$ 的值, 可以计算出 d_{ij} 。

$$d_{ij} = \sqrt[k]{P_t / P_r(i, j) G_0} \quad (2)$$

根据 d_{ij} 量化节点转发优先级:

$$prior_{trans} = \lceil (R_c - d_{ij}) / rank \rceil \quad (3)$$

式中, $rank$ 为量化间距, 距离越远优先级别越高, 最高优先级以 0 表示, 以后级别逐次加 1。

为简化分析, 暂时忽略细部特征, B 区域中节点依据式(3)确定自己所处的优先级, 如图 3 所示, 处在最外圈的节点优先级最高。

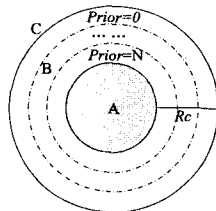


图 3 B 区域传输优先级划分

2.3 MAC 动态延时退避避免碰撞

若 B 中所有节点同时发送更新, 势必引起碰撞导致能量消耗和延时增加, 有效的方法是利用有效的 MAC 机制优先选择 B 区域中具有高优先级且不会彼此碰撞的节点首先传播更新。

通常 MAC 策略中有两个重要组件即监听机制和延时退避策略。本算法依赖从 2.2 节中获得的转发优先级信息, 确定当节点 j 转发一个来自节点 i 的更新包时, 需要延时等待的时间为:

$$\tau = c \cdot prior_{trans} + rand(0, c-1) \quad (4)$$

式中, c 是时间槽常量, 方程中第二项是为避免处于同一优先级内的待转发节点碰撞而设置的值, 即在 $[0, c-1]$ 之间的随机偏移时间。

图 4 说明本算法中 MAC 机制的动态延时等待策略, 处在 B 区域中的节点依据式(2)确定优先级后, 优先级为 0 的节点将在一个时间槽时段内等待 $[0, c-1]$ 之间的一个随机偏移

时间开始转发,处于其它优先级的节点依次类推发送时段。特别注意的是其它节点在等待转发洪泛的同时也对侦听或收到的数据包进行包头分析,依据分析结果对收到相同 ID 包的次数 $count$ 做统计,看是否为继续转发做准备,详细叙述见下一节。

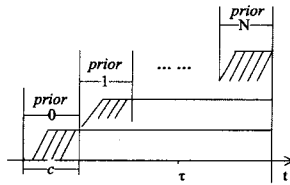


图4 动态延时 MAC 机制

这种 MAC 机制保证:(1)距离源节点 i 越远的节点能够尽可能快地转发洪泛包,将新消息尽可能快地覆盖到更多的区域。(2)碰撞仅可能在具有同样优先级的节点之间发生,这可以有效降低碰撞的发生,避免重传而增加传播时延。(3)节点在发送前的监听时段内可能由于多次监听到同一 ID 包,从而抑制本节点继续转发广播。

2.4 谣言传播策略抑制冗余传输

为避免冗余传输,不是位于 B 区域中的每个节点都需要转发更新。如图 2 所示 a, b, c 3 个节点可转发洪泛更新,当 a 节点转发洪泛后,可覆盖 d, e, f, g 4 个节点,此后若 b (覆盖 d 节点)和 c 节点再转发洪泛(覆盖 g 节点),则不能覆盖任何新节点,它们的转发除了增加系统冗余,对信息覆盖是没有贡献的。因此, b 和 c 应取消转发。我们结合 MAC 层的监听机制与路由层的谣言算法抑制 b 和 c 转发洪泛。

借用谣言传播理论^[15-17],将网络中的节点分为 3 类: Ignorants(没有听过谣言的人,即还未收到洪泛消息的节点), Spreaders(谣言传播者,即洪泛消息的节点)和 Stiflers(听到谣言但并不传播谣言的人)。为更好地描述算法思想,我们扩充一类节点 Pseudo-spreaders(潜在的传播者,有可能洪泛消息,也有可能取消洪泛)。特别地,本算法中的 Stiflers 指当一个节点在一定时间内多次听到相同的消息 ID,则该节点认为其邻居节点也已经获此消息,那么此时节点认为这是一个过时的消息,再广播此消息对消息散布意义不大,所以即使从未广播过此消息,它也不会再转发洪泛消息。我们定义接收或监听到同样消息 ID 的消息次数为 $count$; 次数上限为 $C_threshold$ 。这 4 类节点状态转变如图 5 所示。

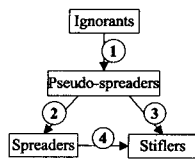


图5 节点状态转变

① Ignorants 从 Spreaders 获得更新后即成为 Pseudo-spreaders;

② 当 $\tau=0$ 且 $count < C_threshold$, 节点成为 Spreaders;

③ 当 $\tau > 0$ 且 $count \geq C_threshold$, 节点将成为 Stiflers;

④ Spreaders 在转发一次洪泛消息后成为 Stiflers。

实际应用中,需要为 $C_threshold$ 确定一个合适的值,如果该值过大,则依然会有很多冗余消息占用信道,浪费资源,但若设置过小,则可能会导致消息不能覆盖整个网络。经分

析及试验仿真可以确定该值和节点分布密度及节点最大通信半径有关,且与以上两个参量呈反比,即 $C_threshold \propto \frac{1}{\rho R_c}$ 。

此外,节点成为 Stiflers 后即转入休眠状态,以节约能耗。

3 算法描述

本算法主要包括发送(转发)过程和接收/监听两个过程,算法描述如下:

```
//发送过程
If(count < C_threshold && \tau == 0)
    broadcasting(packetID);
    sleeping;
Else
    Listening and Waiting;
End
//接收/监听过程
Checking PacketID;
if PacketID is new
    count = 1;
    receiving PacketID;
    computing  $d_{ij}$  according to Eq. (2);
     $prior_{trans} = \lceil (Rc - d_{ij}) / rank \rceil$ ;
    set delay time  $\tau = c \cdot prior_{trans} + rand(0, c - 1)$ 
else
    count = count + 1;
    dropping PacketID;
    if(count >= C_threshold)
        sleeping;
    else
        listening and waiting;
    end
end
```

算法分析:

(1) 控制开销分析

算法无需知道网络拓扑,也无需知道定位信息、邻居信息等,每节点仅需一张表维护所收到包的 ID 信息,以及每个包监听或收到的次数统计和等待延时信息。需要距离估计、量化优先级和设定转发延时时间等少量计算开销。

(2) 延时控制

根据接收节点所接收到的包的信号强度来估计接收节点与发送节点的欧氏距离,基于此距离估计优先选择与发送节点最远的接收节点以最低的延时尽快转发广播包,以保证广播包尽可能快地覆盖更多新区域,达到延时最优的目的。同时区分优先级的延时设置保证碰撞仅发生在具有同样优先级的节点之间,以避免和降低碰撞的发生,降低重传时延。

(3) 冗余包的抑制

MAC 机制中延时等待监听机制和 Rumor 算法的共同作用是控制转发消息的节点来达到抑制冗余包的目的。

4 仿真及结果分析

考虑一个面积为 100×100 的矩形平面监测区域。假设节点随机均匀地以一定密度 ρ 分布在监测区域中。不失一般性,我们假定在每个 1×1 单位面积内最多有一个传感节点。显然在 100×100 区域中最多布设 10000 个节点,定义此情形

下节点相对密度为1。设每个节点具有相同的最大通信半径 R_c 。通常代码更新或信息分发的广播源来自 Sink, 假定它位于矩形区域中的顶角节点。

基于算法比较的公平性, 在现有的洪泛协议中, 我们主要选择同类算法进行比较, 将本文提出的算法与 BF, CF 和 EFS-C^[10] 在能量消耗和延时估计两方面进行比较。算法主要考证节点相对密度和节点通信半径对延时和能耗的影响, 故仿真中设定如下两种情况:

(1) 节点相对密度 ρ 的变化。在如上面积区域内, 节点均匀随机分布, 节点相对密度在 $[0.1, 1.0]$ 内变化, 变化增量为 0.1, 节点通信半径 $R_c = 6$ 。对 CF 算法和本文所提出的算法涉及到的 $C_threshold$, 令 $C_threshold = 11 - 10\rho$, 以保证信息覆盖率。

(2) 节点通信半径 R_c 的变化。在如上面积区域内, 节点均匀随机分布, 节点相对密度 $\rho = 0.8$, 节点通信半径在 $[2, 10]$ 内变化。变化增量为 1。同样对 CF 算法和本文所提出的算法涉及到的 $C_threshold$, 令 $C_threshold = 11 - R_c$, 以保证信息覆盖率。

4.1 平均能量消耗

平均能量消耗是指在一次洪泛传播中网络所消耗的总能量与网络中节点总数的比值。

算法考虑监听时同样消耗能量, 设定能量模型为发送: 接收: 侦听: 休眠, 能量消耗比值为 $1:0.6:0.5:0$ 。忽略节点休眠时的能量消耗。仿真得到 4 种算法平均能量消耗随相对密度变化的比较曲线(见图 6)和平均能量消耗随节点通信半径变化的比较曲线(见图 7)。

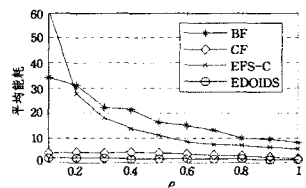


图 6 平均能耗随节点相对密度变化对比

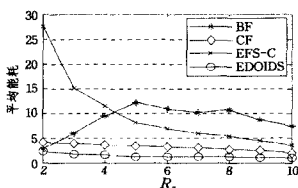


图 7 平均能耗随节点通信半径变化对比

BF 算法最大的问题是信息内爆导致大部分能量浪费在冗余包的传输上, EFS-C 并没有对抑制冗余提供好的措施, 导致较高的能量消耗。CF 算法和 EDWARDS 算法通过监听收到同样包的次数有选择地决定是否转发洪泛包, 从而有效抑制冗余传输, 降低能耗。

4.2 延时分析

泛洪延时(flooding delay)是指在一次泛洪传播过程中, 从源节点发送一个泛洪包开始, 到网络中最后一个节点收到泛洪包的时间, 即网络经历一次泛洪传播需要的时间。泛洪延时用来衡量泛洪算法的网络延时性能, 仿真得到 4 种算法延时随相对密度变化的比较曲线(见图 8)和延时随节点通信半径变化的比较曲线(见图 9)。

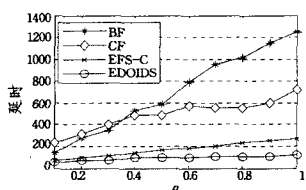


图 8 延时随节点相对密度变化对比

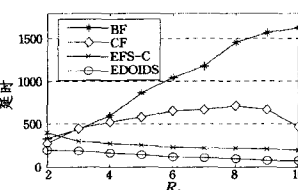


图 9 延时随节点通信半径变化对比

由图 8 和图 9 可知在节点密度和通信半径增加的情况下, BF 算法和 CF 算法都会导致同一时刻内包冲突与信道冲突加剧, 导致延时增加。EFS-C 算法和 EDWARDS 基于距离估计设置不同的转发延时, 碰撞仅可能在具有同样优先级的节点之间发生, 处于同样距离范围的节点随节点密度增加也会增加, 这在一定程度上会增加碰撞几率, 使得延时增加。但随着 R_c 增加, 节点传播会涉及更多的新区域, 有效的碰撞机制控制使得延时反而随 R_c 的增加而下降。可以看出 EDWARDS 所表现出来的性能最好。

事实上, MAC 机制和冗余控制是相辅相成的, 只考虑避免碰撞而忽视抑制冗余的 EFS-C 算法, 可使得延时降低但能耗不能得到改善。反之, 只考虑抑制冗余而忽视避免碰撞如 CF 算法可使能耗降低但延时必然增加。

结束语 本文提出了一种能量和延时优化的信息分发策略, 该策略设计了一种新的试探式洪泛算法, 无需节点定位信息和网络拓扑信息, 从信息传播过程沿已获知信息的节点逐步向外扩展的动力学特性出发, 利用接收节点接收到包的信号强度来估计接收节点与发送节点的相对距离, 建立节点转发优先级实现传播最优覆盖; 建立 MAC 动态延时退避机制有效避免了碰撞, 缩短了整个系统传播时延。此外结合复杂网络谣言传播的动力学特征, 在节点 MAC 层延时等待时监听信道并计数听到广播包, 在发送延时到达前, 监听到的次数超过规定值则取消转发, 达到了抑制冗余传输的目的。分析和仿真显示, 与同类算法相比, EDWARDS 能有效抑制冗余传输, 降低能耗, 具有低的网络时延, 很好地解决了低能耗和低时延的一致性问题。同时, 该算法控制开销低, 实现简单, 可用于多种信息分发、代码更新等应用中。

参考文献

- [1] Yi Y, Gerla M, Kwon T J. Efficient flooding in ad hoc networks: A comparative performance study [C] // IEEE International Conference on Communications (ICC' 03). Ottawa, Canada, 2003: 1059-1063
- [2] Akkaya K, Younis M. A survey on routing protocols for wireless sensor networks [J]. Ad Hoc Networks, 2005, 3(3): 325-349
- [3] Ni S Y, Tseng Y C, Chen Y S, et al. The broadcast storm problem in a mobile ad hoc network [C] // Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking. 1999: 151-162
- [4] Powell O, Leone P, Rolim J. Energy optimal data propagation in wireless sensor networks [J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2007, 67(3): 302-317
- [5] Sabbineni H, Chakrabarty K. Location-aided flooding: An energy-efficient data dissemination protocol for wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Computers, 2005, 54(1): 36-46
- [6] 李方敏, 刘新华, 旷海兰. 无线传感器网络中一种高效低延时的泛洪算法研究 [J]. 通信学报, 2007, 28(8): 46-53
- [7] Ogier R, Templin F, Lewis M. RFC 3684. Topology dissemination based on reverse-path forwarding (tbrpf) [S]. IETF, 2004
- [8] Younis M, Youssef M, Arisha K. Energy-aware routing in cluster-based sensor networks [C] // Proceedings of the 10th IEEE International Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunications Systems (MASCOTS' 02). Fort Worth, Texas USA, 2002: 129-136

BPEL 采用 XML Schema 编写,从形式上它定义了用于组成复杂业务流程交互的基础和结构化活动,指定了业务流程怎样使用 Web 服务达到其目的,以及由业务流程提供的 Web 服务。BPEL 是一种以 XML 来描述企业内部流程的语言,使原本建立在不同产品上的商业流程也能像 Web 服务一样可以跨平台互通。我们可以根据 XML 语言层次化特性,层次化地构建 BPEL 语言所描述的 Web 服务组合。构建方法将另外撰文论述。

4.3 模型实例

《服务的业务流程执行语言》即规范中定义了一个名为 Purchase Order^[7]的流程服务案例,利用本文所述的建模算法,对这个例子进行建模,得到模型如图 11 所示。

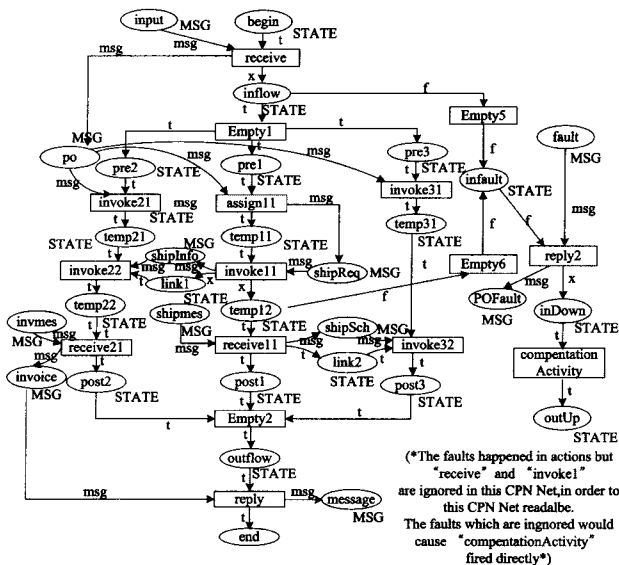


图 11 PurchaseOrder 的 CP-net(子网展开后的)

结束语 本文在总结前人所作工作的基础上,描述了基于赋时有色 Petri 网的 Web 组合服务建模方法。这种方法从

执行环境、时间等方面更好地描述了 BPEL 流程,可以在此基础上进一步分析和验证 BPEL 流程。本文创新点在于使用赋时有色 Petri 网更为准确地模拟了 BPEL 流程,考虑了时间等环境因素。未来的研究方向在于对 BPEL 模型从数据流和控制流两个方面进行分析验证。

参考文献

- [1] Stahl C. A Petri Net Semantics for BPEL[R]. Technical Report 188, Humboldt-Universität zu Berlin, Institut für Informatik, 2005
- [2] Forster H, Uchitel S, Magee J, et al. Model-based verification of Web service composition[C]//Proceedings of 18th IEEE International Conference on Automated Software Engineering. Montreal, Canada; IEEE Computer Society, October 2003;152-161
- [3] Fu X, Bultan T, Su J. Analysis of interacting BPEL web services [C]// Proceedings of 13th International Conference on World Wide Web. New York, USA; ACM Press, 2004; 621-630
- [4] Kang Hui, Yang Xiuli, Yuan Sinniao. Modeling and Verification of Web Services Composition based on CPN[C]//2007 IFIP International Conference on Network and Parallel Computing Workshops(NPC 2007). Lialian, China, September 2007
- [5] Ouyang C, Verbeek E, van der Aalst W, et al. Formal semantics and analysis of control flow in WS-BPEL[J]. Science of Computer Programming, 2007, 67(2/3): 162-198
- [6] <http://wiki.daimi.au.dk/cpntools/cpntools.wiki>. 2009
- [7] OASIS Standard, Web Services Business Process Execution Language Version 2.0[S]. <http://docs.oasis-open.org/wsbpel/2.0/OS/wsbpel-v2.0-OS.pdf>, 2008-5-22
- [8] http://wiki.daimi.au.dk/cpntools-help/simulator_functions.wiki?cmd=get&anchor=Simulator+functions. 2008-11-24

(上接第 126 页)

- [9] Ghiassi-Farrokhfal Y, Pakravan M R. Cross-layer flooding for sensor networks without location information [C]// IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems Conference. Washington, DC. USA, 2005;110-114
- [10] Wang X, Yin J, Zhang Q, et al. A cross-layer approach for efficient flooding in wireless sensor networks [C] // 2005 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. New Orleans, LA USA, 2005;1812-1817
- [11] Srivastava V, Motani M. Cross-layer design: A survey and the road ahead [J]. IEEE Communications Magazine, 2005, 43(12): 112-119
- [12] Stemm M, Katz R H. Measuring and reducing energy consumption of network interfaces in hand-held devices [J]. IEICE Transactions on Communications, 1997, 80(8): 1125-1131
- [13] Chen B, Jamieson K, Balakrishnan H, et al. Span: An energy-efficient

- coordinated algorithm for topology maintenance in ad hoc wireless networks [J]. Wireless Networks, 2002, 8(5): 481-494
- [14] De P, Liu Y, Das S K. An epidemic theoretic framework for evaluating broadcast protocols in wireless sensor networks [C]// IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems(MASS 2007). Pisa, Italy, 2007; 1-9
- [15] Daley D J, Kendall D G. Epidemics and rumours [J]. Nature, 1964, 204(4963): 1118
- [16] Moreno Y, Nekovee M, Pacheco A F. Dynamics of rumor spreading in complex networks [J]. Physical Review E, 2004, 69(6): 66130
- [17] Lu F, Chia L T, Tay K L, et al. Nbgossip: An energy-efficient gossip algorithm for wireless sensor networks [J]. Journal of Computer Science and Technology, 2008, 23(3): 426-437