基于分段修复的区域路由协议

吴 静[1] 侯国照[2] 赵蕴龙[3]

(华北科技学院计算机系 燕郊 101601)[1] (中国人民解放军陆军航空兵学院基础部 北京 101123)[2]

(哈尔滨工程大学计算机科学与技术学院 哈尔滨 150001)[3]

摘 要 在自组网中,ZRP的域间路由维护策略使ZRP具有较多的丢包数目和较多的路由重发现次数。前者使ZRP的数据包投递率较低,从而使其可靠性较低;后者使ZRP的传输时延和路由开销较高。针对上述问题,提出一种基于分段修复的区域路由协议SRZRP(Segmented Repairment based Zone Routing Protocol)。在SRZRP中,每个节点通过维护一个基于域内拓扑结构的有向无环图来保存到达其域内每个节点的多条备份路由,尽量利用备份分段路由进行域间路由修复。理论分析表明,SRZRP具有较高的可靠性。仿真结果表明,SRZRP提高了数据包投递率,说明SRZRP提高了协议的可靠性;同时,SRZRP降低了平均端到端时延和路由开销。

关键词 通信技术,自组网,路由协议,ZRP,分段修复

中图法分类号 TN925 **文献标识码** A

Reliable Zone Routing Protocol in Ad-hoc Networks

WU Jing[1] HOU Guo-zhao[2] ZHAO Yun-long[3]

(Department of Computer Science, North China Institute of Science and Technology, Yanjiao 101601, China)[1]

(Department of Basic, Army Aviation Institution of PLA, Beijing 101123, China)[2]

(College of Computer Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)[3]

Abstract In Ad-hoc networks, interzone-route maintenance scheme of ZRP makes ZRP to have many lost packets' number and many route rediscovering times. The former makes ZRP's delivery ratio of data packets low, which makes ZRP's reliability low. The latter makes ZRP's transmission delay and routing overheads high. Aiming at the above problem, the segmented repairment based zone routing protocol SRZRP was proposed. In SRZRP, each node saved multiple backup routes to each node in its intrazone by maintaining an intrazone topology structure based directed acyclic graph, and an interzone route was repaired by using backup segment-routes as much as possible. The theoretical analysis shows that SRZRP takes higher reliability. The simulation result shows that SRZRP improves delivery ratio of data packets which shows that SRZRP improves the protocol's reliability, and SRZRP also reduces the transmission delay and routing overheads of the protocol.

Keywords Communication, Ad-hoc networks, Routing protocol, ZRP, Segmented repairment

在自组网中,区域路由协议ZRP(Zone Routing Protocol)是一种混合型路由协议,它是由Cornell大学的Z. J. Haas和M. R. Pearlman等开发的。ZRP巧妙地结合了主动路由协议和按需路由协议的优点,其性能依赖于区域半径这个关键参数[1]。区域半径指每个节点维护区域的大小,是每个节点到区域边界节点的跳数[1]。ZRP在域内采用主动路由,以维护到达域内所有节点的路由信息,同时利用该路由信息进行域内路由;在域间使用按需路由,结合节点在域内维护的路由信息和边界广播技术进行路由发现和维护[1]。在路由过程中,当路由断链时,节点可以选择通知源节点或进行局部修复的方式。

近年来,许多专家和学者对ZRP开展了进一步的研究,研究现状如下:文献[2]在负载均衡方面对ZRP进行了改进;文献[3]在ZRP的基础上,提出一种更灵活的IZR;文献[4]提出一种基于ZRP的安全可靠路由发现策略,它通过认证机制来改善路由的安全性;文献[5]以总体开销最小为目标,对ZRP的最优半径配置方法进行了研究;文献[6]对ZRP的缓存机制的优化策略进行了研究;文献[7]提出一种基于速度的自适应ZRP,即节点按照自身速度来调节区域半径的大小;文献[8]是在ZRP的基础上提出一种通过减少无用控制包数目来减轻网络负载和提高网络性能的EZRP路由协议;文献[9]提出一种自适应区域路由协议AZRP,即节点根据自己产生的路由开销和总开销的比值来调节区域半径的大小;文献[10]提出一种基于功耗考虑的有效性区域路由协议。

到稿日期:2011-03-10 返修日期:2011-07-02 本文受国家自然科学基金项目(61003235),中央高校基本科研业务费(2011B44)资助。

吴 静(1980—),女,博士,讲师,主要研究方向为移动自组网、无线传感器网络、无线MESH网络,E-mail:99061632@163.com;侯国照(1980—),男,硕士,讲师,主要研究方向为移动计算技术、移动自组网;赵蕴龙(1975—),男,博士,副教授,主要研究方向为计算机体系结构、计算机网络、移动计算、可信计算等。

在 ZRP 中，当路由的某段链路断开时，断开链路端点可以选择通知源节点或者进行局部修复的方式。但由于局部修复是使用断开链路的两个端点之间的最短路径来替代断开链路，容易产生绕远问题，在经过多次局部修复之后，需要通知源节点重新路由，因此选择通知源节点的方式。在 ZRP 中，每个节点维护到达其域内任意节点的路由。当节点发现域内路由断链时，它通知源节点重新进行路由；ZRP 的域间路由是一条由源节点、若干边界节点和目的节点构成的关键节点序列，这条域间路由是由若干个分段路由组成的。当节点发现域间路由断链时，它将丢弃数据包，并通知源节点重新发现路由。由上述分析可知，ZRP 的域间路由维护策略使 ZRP 具有较多的丢包数目和较多的路由重发现次数。前者使 ZRP 的数据包投递率较低，从而使 ZRP 的可靠性较低；后者使 ZRP 的传输时延和路由开销较高。经过对研究现状的分析，发现目前尚不存在上述问题的解决方案，故提出一种基于分段修复的区域路由协议 SRZRP(Segmented Repairment based Zone Routing Protocol)。

本文第 1 节对 SRZRP 进行了设计；第 2 节对 SRZRP 和 ZRP 的协议可靠性进行了理论比较分析；第 3 节对 SRZRP 和 ZRP 的性能进行了仿真比较分析；最后总结全文。

1 SRZRP 的设计

对 SRZRP 进行了设计，其中包括基本思想、关键技术和工作过程等 3 方面内容，具体描述如下。

1.1 SRZRP 的基本思想

SRZRP 的基本思想是：每个节点维护一个基于域内拓扑结构的有向无环图 DAG[11](Directed Acyclic Graph)，它保留节点到达其域内每个节点的多条备份路由。当节点发现域内路由断链时，它将通知源节点重新进行路由。SRZRP 的域间路由是分段进行的，每个分段路由都由分段首节点来提供，每个分段首节点均保存了多种分段路由方案。当节点发现域间路由断链时，尽量利用所属分段的首节点来保留到达分段尾节点的多条备份路由进行域间路由修复。当无可用分段路由时，再丢弃数据包，并通知源节点重新发现路由。SRZRP 的域间路由维护策略有利于丢包数目和路由重发现次数的降低；前者可以提高协议的数据包投递率，从而提高协议的可靠性；后者可以降低协议的传输时延和路由开销。

1.2 SRZRP 的关键技术

SRZRP 的关键技术是两项与域内 DAG 相关的新技术，即域内 DAG 的构建技术和在域内 DAG 中提取最短路由技术。这里涉及到几个概念，首先对它们进行系统的定义，然后描述两项关键技术。

1.2.1 相关概念的定义

结合域内拓扑图的实际情况对图论中的节点深度[12]、直接绝对前驱和直接绝对后继[12]、广度优先遍历[12]等一些已有的概念进行了更具体的定义，详细描述如下。

定义 1(节点的深度) 对于节点 i 维护的区域内部的任意节点 j 来说，节点 j 与节点 i 的最短距离(即最少跳数)就是节点 j 的深度，用 *depth* 表示。这里，将节点 i 的深度视为 0。

定义 2(直接绝对前驱和直接绝对后继) 若在域内节点 a 和 b 之间存在链接，并且 a 的深度小于 b 的深度，则称 a 是 b 的直接绝对前驱 pred，而 b 是 a 的直接绝对后继 succ。

定义 3(广度优先遍历) 在对节点 i 维护的域内拓扑图中的所有节点进行遍历的过程中，首先访问节点 i，接着依次访问节点 i 的所有邻节点 $w_1, w_2, \cdots, w_t$，然后再依次访问 $w_1, w_2, \cdots, w_t$ 的所有未曾访问的邻节点。依此类推，直至节点 i 维护的域内拓扑图中的所有节点都被访问到。这种遍历域内拓扑图的方式是按照由浅到深的深度层次进行遍历的，它尽可能先横向遍历，故称为广度优先遍历。

1.2.2 域内 DAG 的构建技术

本文采用广度优先遍历域内拓扑图的方法完成域内 DAG 的构建。在物理实现上，域内 DAG 由若干个具有一定数据结构的节点组成，其数据结构如图 1 所示。在具有上述数据结构的节点的基础上，任意一个节点 i 建立域内 DAG 的流程图，如图 2 所示。

记录序号	节点地址	直接绝对前驱集合	直接绝对后继集合	深度
no	Addr	predSet	succSet	depth

图 1 域内 DAG 中节点的数据结构

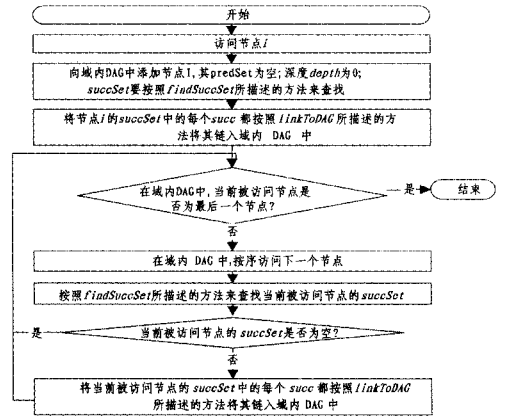

图 2 节点 i 构建其域内 DAG 的流程图

这里，涉及到在节点 i 维护的域内拓扑结构上查找节点 j 的 *succSet* 的方法 *findSuccSet* 和将节点 j 链入域内 DAG 的方法 *linkToDAG*。*findSuccSet* 的具体操作为：首先，在节点 i 的域内拓扑结构上找到节点 j 的邻节点集合 N，然后从 N 中删除在域内 DAG 中已经被访问的邻节点，删除操作全部完成后的 N 记为 N'，N' 即为节点 j 的 *succSet*。*linkToDAG* 的操作流程图如图 3 所示。

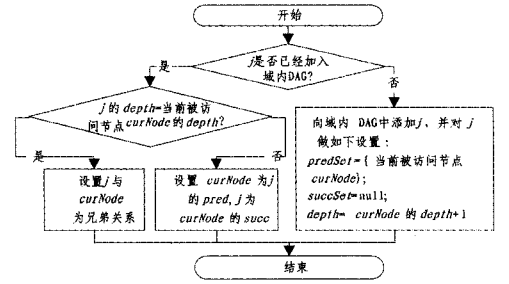

图 3 linkToDAG 的操作流程图

1.2.3 在域内 DAG 中提取最短路由技术

域内 DAG 保存了节点 i 到达其域内所有节点的多条备份路由，要从域内 DAG 中提取一条合适到达目标节点的路由需要遵循一定的方法。提出一种提取最短路由的方法，其具体过程描述如下：

第一步 将目标节点 *target* 作为当前被考察节点

checkedNode，链入一个空链表 *shortestRoute* 中；

第二步　在 *checkedNode* 的 *predSet* 中找出具有最小 *depth* 的一个 *pred*，将其链入链表 *shortestRoute* 中，并将 *checkedNode* 设置为 *pred*；

第三步　如果 *pred* 为节点 i，则完成提取操作，执行第四步，否则执行第二步；

第四步　逆转链表 *shortestRoute*，逆转后的 *shortestRoute* 即为所求的到达目标节点 *target* 的最短路由，全过程到此结束。

1.3 SRZRP 的工作过程

SRZRP 包括域内路由协议 SRIARP(Segmented Repairment based IARP)及域间路由协议 SRIERP(Segmented Repairment based IERP)，本节对它们各自的工作过程进行如下描述。

1.3.1 SRIARP 的工作过程

SRIARP 时刻维护到达区域内部每个节点的多条路由。由于域内路由是从域内 DAG 中提取的，因此域内路由维护实质上是对域内 DAG 的维护。当节点发现其域内拓扑结构发生变化时，就利用第 1.2.2 节描述的关键技术重新生成域内 DAG。

当节点需要发送数据包时，如果节点 S 发现目的节点 D 就在自身的局部区域内(即在域内 DAG 中)，则节点 S 利用第 1.2.3 节所描述的关键技术在域内 DAG 中快速提取一条到达目的节点 D 的较短路由，然后利用这条路由完成数据包的转发；否则，启动域间路由发现过程。

在路由过程中，当节点发现域内路由断链时，它将通知源节点重新进行路由。

1.3.2 SRIERP 的工作过程

SRIERP 的工作过程涉及到域间路由发现过程和域间路由维护过程，对它们分别描述如下。

(1)域间路由发现过程

SRIERP 与 IERP[13] 域间路由发现方法相同，也采用了边界广播技术[14]。只是在 SRIERP 的边界广播技术中，需要结合本地域内 DAG 信息和在域内 DAG 中快速提取较短路由技术来获取域内路由。

(2)域间路由维护过程

在路由过程中，当节点发现域间路由断链时，如果该节点是所属分段的首节点，则直接执行域间路由修复操作；否则，向所属分段的首节点发送 RRepair 路由修复消息，分段首节点收到 RRepair 消息后，执行域间路由修复操作。

分段首节点执行的域间路由修复操作为：尽量利用本地维护的到达分段尾节点的备份路由对域间路由进行修复。当分段首节点也不存在可用分段路由时，若分段首节点不是源节点，则它丢弃数据包，并向源节点发送 RERR 路由出错消息。源节点收到 RERR 消息后，重新进行路由发现。否则，分段首节点作为源节点重新进行路由发现。RRepair 和 RERR 消息的包格式由域间路由协议具体采用的按需路由决定。

2 协议可靠性的理论比较分析

路由可靠度是路由有效的分布函数，路由可靠度越高，协议可靠性就越高。反之，路由可靠度越低，协议可靠性就越低。本文通过对 ZRP 和 SRZRP 路由可靠度的比较分析来论证两种协议可靠性的关系。这里的路由可靠度包括域内路由可靠度和域间路由可靠度。首先分析路由与其构成链路的可靠度关系[15]，然后对处于同一场景的 ZRP 和 SRZRP 的域内路由可靠度和域间路由可靠度分别进行比较分析。

2.1 路由与其构成链路的可靠度关系

设一条从源节点到目的节点的路由 L 由 n 条链路构成，链路 $l_i(i=1,2,\cdots,n)$ 的生命期 $T_i(i=1,2,\cdots,n)$ 为彼此相互独立的且均值为 θ 的指数分布随机变量，则路由 L 的生命期 T_L 为

$$T_L=\min\{T_1,T_2,\cdots,T_n\} \tag{1}$$

显然，T_L 为服从指数分布的随机变量，其均值为 θ/n。

设所有链路的有效时间为 t，则在 $T_i>t$ 时链路 l_i 有效。由式(1)可知，在 $T_L>t$ 时路由 L 有效。$R_i(t)$ 表示 l_i 的可靠度，表示链路 l_i 有效的分布函数；$R_L(t)$ 表示路由 L 的可靠度，表示路由 L 有效的分布函数。$R_i(t)$ 和 $R_L(t)$ 分别表示为

$$\begin{aligned}R_i(t)&=P(T_i>t)=1-P(T_i\leqslant t)=1-(1-\mathrm{e}^{-\lambda t})\\&=\mathrm{e}^{-\lambda t}\ (0\leqslant t<\infty,\lambda=1/\theta)\end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}R_L(t)&=P(T_L>t)=P(\min\{T_1,T_2,\cdots,T_n\}>t)\\&=P((T_1>t)\cap(T_2>t)\cap\cdots\cap(T_n>t))\\&=P(T_1>t)\cap P(T_2>t)\cap\cdots\cap P(T_n>t)\\&=\prod_{i=1}^{n}P(T_i>t)=\prod_{i=1}^{n}R_i(t)\end{aligned} \tag{3}$$

2.2 域内路由可靠度的比较分析

在 ZRP 和 SRZRP 中，每个节点都时刻维护着到达其域内每个节点的路由，故 ZRP 和 SRZRP 的域内路由可靠度相同，于是可知，ZRP 和 SRZRP 的域内路由可靠性相同。

2.3 域间路由可靠度的比较分析

本节分别对 ZRP 和 SRZRP 的域间路由可靠度进行分析，并对二者进行比较。

2.3.1 ZRP 域间路由可靠度的分析

ZRP 构建的域间路由 L 由 k 个分段路由 $L_1,L_2,\cdots,L_k$ 组成，ZRP 的域间路由维护策略使 $L_i(i=1,2,\cdots,k)$ 只使用一种分段路由方案。ZRP 的域间路由可靠度 $R_{IERP}(t)$ 可以表示为

$$R_{IERP}(t)=\prod_{i=1}^{k}R_{L_i}(t)=\prod_{i=1}^{k}\prod_{j=1}^{h_i}R_{ij}(t)=\prod_{i=1}^{k}\mathrm{e}^{-h_i\lambda t}=\prod_{i=1}^{k}\mathrm{e}^{-\varphi_i t} \tag{4}$$

式中，$R_{L_i}(t)$ 表示 L_i 的可靠度，$R_{ij}(t)$ 表示 L_i 的第 j 段链路 l_{ij} 的可靠度，h_i 为 L_i 的跳数，$\varphi_i=h_i\lambda=h_i/\theta$。

2.3.2 SRZRP 域间路由可靠度的分析

SRZRP 构建的域间路由 L 由 k 个分段路由 $L_1,L_2,\cdots,L_k$ 组成，SRZRP 的域间路由维护策略使 $L_i(i=1,2,\cdots,k)$ 可以使用 m_i 种分段路由方案。SRZRP 的域间路由可靠度 $R_{SRIERP}(t)$ 可以表示为

$$\begin{aligned}R_{SRIERP}(t)&=\prod_{i=1}^{k}R_{L_i}(t)\\&=\prod_{i=1}^{k}(R_{L_{i1}}(t)+R_{L_{i2}}(t)+\cdots+R_{L_{im_i}}(t))\\&=\prod_{i=1}^{k}(\prod_{q=1}^{h_{i1}}R_{i1q}(t)+\prod_{q=1}^{h_{i2}}R_{i2q}(t)+\cdots+\prod_{q=1}^{h_{im_i}}R_{im_iq}(t))\\&=\prod_{i=1}^{k}(\mathrm{e}^{-h_{i1}\lambda t}+\mathrm{e}^{-h_{i2}\lambda t}+\cdots+\mathrm{e}^{-h_{im_i}\lambda t})\\&=\prod_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{m_i}\mathrm{e}^{-h_{ij}\lambda t}=\prod_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{m_i}\mathrm{e}^{-\varphi_{ij}t}\end{aligned} \tag{5}$$

式中，$R_{L_i}(t)$ 表示 L_i 的可靠度，$R_{L_{ij}}(t)$ 表示 L_i 的第 j 种分段

路由方案 L_{ij} 的路由可靠度，$R_{ijq}(t)$ 表示 L_{ij} 的第 q 段链路 l_{ijq} 的可靠度，h_{ij} 为 L_{ij} 的跳数，$\varphi_{ij}=h_{ij}\lambda=h_{ij}/\theta$。

2.3.3 ZRP 与 SRZRP 域间路由可靠度的比较

由式(4)和式(5)的域间路由可靠度计算可知，ZRP 的域间路由可靠度为 $R_{IERP}(t)=\prod_{i=1}^{k}e^{-\varphi_i t}$，SRZRP 的域间路由可靠度为 $R_{SRIERP}(t)=\prod_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{m_i}e^{-\varphi_{ij}t}$。下面比较 ZRP 和 SRZRP 的域间路由可靠度。

由于 ZRP 和 SRZRP 的域间路由发现过程相同，因此它们将路由分为相同的 k 个分段路由。对于同一个分段路由来说，ZRP 只使用一种方案 S，而 SRZRP 可以使用多种方案 $SSet$，并且 S 一定属于 $SSet$。所以，可以得出如下关系：$\varphi_i\in\{\varphi_{i1},\varphi_{i2},\cdots,\varphi_{im_i}\}$，则有 $e^{-\varphi_i t}\leqslant\sum_{j=1}^{m_i}e^{-\varphi_{ij}t}(i=1,2,\cdots,k)$，当 $m_i=1$ 时等号成立。由上式可进一步推出如下关系：$\prod_{i=1}^{k}e^{-\varphi_i t}\leqslant\prod_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{m_i}e^{-\varphi_{ij}t}$，当 $m_1,m_2,\cdots,m_k$ 都为 1 时，等号成立。由上述分析可知，$R_{IERP}(t)\leqslant R_{SRIERP}(t)$，即 SRZRP 比 ZRP 具有更高的域间路由可靠性。

综上所述，SRZRP 的域内路由可靠性与 ZRP 相同，而 SRZRP 的域间路由可靠性比 ZRP 的高，总体来说，SRZRP 比 ZRP 具有更高的可靠性。

3 协议性能的仿真比较分析

本文采用 OPNET10.0 仿真软件分析 ZRP 和 SRZRP 的数据包投递率、平均端到端时延和路由开销等性能指标，仿真所用参数如表 1 所列。在保持网络环境其它参数不变的情况下，通过改变节点最大速度这项参数，来分别评测数据包投递率、平均端到端时延和路由开销等性能指标，其仿真结果如图 4—图 6 所示。

表 1 仿真参数

参数	设定值
物理区域(m^2)	2000×2000
仿真时间(s)	900
传输范围(m)	300
移动模型	Random Way Point 模型
暂停时间(s)	10
最小速度(m/s)	0
最大速度(m/s)	1,5,10,15,20,25
区域半径(跳)	3
网络节点数目	50
数据源	10 CBR
包发送速率(包/s)	2
包大小(字节)	512
MAC 协议	IEEE 802.11

从图 4—图 6 可以看出，SRZRP 比 ZRP 表现出较高的数据包投递率、较低的平均端到端时延和较低的路由开销。这是因为：随着节点最大速度的增加，域内路由或者域间路由的断链机率也随之增加；对于域内路由来说，ZRP 和 SRZRP 的情况相同；对于域间路由来说，ZRP 必须丢弃数据包，并通知源节点重新发现路由，而 SRZRP 尽量利用分段首节点保留的备份分段路由进行域间路由修复，无可用分段路由时，才重演 ZRP 过程。由上述分析可知，SRZRP 的丢包数目和路由重发现次数较少，这使 SRZRP 具有较高的数据包投递率、较低的平均端到端时延和路由开销。

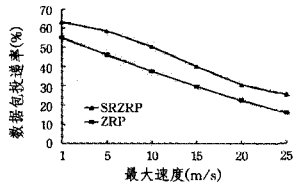

图 4 最大速度对数据包投递率的影响

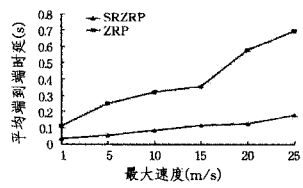

图 5 最大速度对平均端到端时延的影响

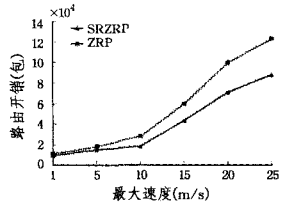

图 6 最大速度对路由开销的影响

仿真结果表明：第一，SRZRP 提高了数据包投递率，说明 SRZRP 提高了协议的可靠性；第二，SRZRP 降低了平均端到端时延；第三，SRZRP 降低了路由开销。以上 3 点说明 SRZRP 的性能要优于 ZRP。

结束语 ZRP 的域间路由维护策略使 ZRP 具有较多的丢包数目和较多的路由重发现次数，前者使 ZRP 的数据包投递率较低，从而使 ZRP 的可靠性较低，后者使 ZRP 的传输时延和路由开销较高，针对此问题提出一种基于分段修复的区域路由协议 SRZRP。在 SRZRP 中，每个节点通过维护一个基于域内拓扑结构的有向无环图 DAG 来保存到达其域内每个节点的多条备份路由，尽量利用备份分段路由进行域间路由修复。理论分析表明，SRZRP 具有较高的可靠性。仿真结果表明，SRZRP 提高了数据包投递率，说明 SRZRP 提高了协议的可靠性；同时，SRZRP 降低了平均端到端时延和路由开销。

参 考 文 献

[1] 于宏毅，等. 无线移动自组织网[M]. 北京：人民邮电出版社，2005：205-209

[2] Thongpook T. Load Balancing of Adaptive Zone Routing in Ad Hoc Networks[C]//Proceedings of 2004 IEEE Region 10 Conference. NJ USA：IEEE Press，2004：672-675

[3] Samar P，Pearlman M R，Haas Z J. Independent Zone Routing：An Adaptive Hybrid Routing Framework for Ad Hoc Wireless Networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking，2004，12(4)：595-608

[4] Kim K J，Chang T M. A ZRP-based Reliable Route Discovery Scheme in Ad-hoc Networks[C]//Proceedings of the International Conference on Security and Management. 2004：325-331

[5] 周长林，朱卫东，杨奎武. 无线自组网区域路由协议分析与最优半径配置[J]. 网络技术，2005，35(1)：25-26，49

[6] 王卓琳. 移动 Ad Hoc 网络中 ZRP 路由协议缓存机制优化策略的研究[D]. 杭州：浙江工业大学，2005

[7] Zhou J Y，Cheng Y L，Lu J L. Velocity Based Adaptive Zone Routing Protocol[C]//Proceedings of International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems. 2007：337-340

(下转第 131 页)

忽视到实现的转换，为此提出了将基于 Tropos 方法学的软件设计模型转换为一类基于 Malaca 元模型的平台代码，包括 JADE 平台、FIPA-OS 平台等。文献[19]介绍了基于自动工具支持的模型转换技术，亦即将基于 Tropos 的规划分解转换为基于 UML 表示的活动。

结束语 面向 Agent 软件工程的研究近年来取得了长足进步，但其实践与应用却不尽如人意，未能像人们所预期的那样，在解决复杂系统的开发以及在大范围的工业化应用中发挥作用。其原因之一在于，现有面向 Agent 软件工程的研究未能充分借鉴软件工程(尤其是 OO 软件工程)的成功技术和实践。MDA 可提高软件开发的效率和质量，将这一技术引入到面向 Agent 软件工程，可以充分发挥 Agent 技术潜力，更好地促进复杂系统的开发。

本文提出了一个集成 Agent 技术和 MDA 的模型驱动软件开发方法 ODAM+，以更好地支持复杂自适应系统的开发。该方法建立在我们已有的两项研究工作基础之上：基于组织抽象的面向 Agent 开发方法学 ODAM、自适应系统的开发和运行支撑环境 SADE。不同于已有的工作，上述两项研究均提供了核心机制、元模型和模型、语言设施对复杂自适应系统的环境以及自适应特征进行显式的描述和分析。ODAM+将基于组织抽象和 ODAM+方法学所建立起来的模型视为平台无关模型，将基于 SADE 平台的实现模型视为平台相关模型，通过建立这两个不同抽象层次元模型间的映射关系，实现从平台无关模型到平台相关模型以及最终代码框架的转换。

我们已经基于此方法成功进行了多个自适应系统应用案例的开发，充分展示了技术的可行性和有效性。进一步，通过重用一些有效的模式和经验，提高通过模型转换所生成代码的质量。此外，正在研究将基于 ODAM+的模型转换为其他平台的方法和技术，如 JADE、JACK 等一类应用较为广泛的平台，以扩大 MDA 技术在面向 Agent 软件工程的应用范围。

参 考 文 献

[1] Northrop L, et al. Ultra-large-scale Systems: The Software Challenge of the Future[M]. Software Engineering Institute, Carnegie Mellon University, USA, 2006

[2] 吕建，马晓星，陶先平，等. 网构软件的研究与进展[J]. 中国科学：E 辑信息科学，2006，36(10)：1037-1080

[3] Cheng B H, de Lemos R, Giese H, et al. Software engineering for self-adaptive systems: A research roadmap[C]// Proc. of Software Engineering for Self-Adaptive Systems, LNCS 5525. Springer, 2009: 1-13

[4] Salehie M, Tahvildari L. Self-adaptive Software: Landscape and Research Challenges[J]. ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems, 2009, 4(2): 1-40

[5] Luck M, Mcburney P, Preist C. Agent Technology: Enabling Next Generation Computing[EB/OL]. http://www.agentlink.org, 2005

[6] Winikoff M. Future Directions for Agent-based Software Engineering[J]. International Journal of Agent-Oriented Software Engineering, 2009, 3(4): 402-410

[7] 毛新军，王戟. 自适应多 Agent 系统的面向 Agent 软件开发方法学 ODAM[J]. 计算机研究与发展，2008，45(11)：1892-1901

[8] 毛新军，等. 自适应网构软件的集成开发环境 SADE[J]. 电子学报，2010，38(2A)：207-212

[9] Weyns D, Helleboogh A, Holvoet T. How to Get Multi-agent Systems Accepted in Industry? [J]. International Journal of Agent-Oriented Software Engineering, 2009, 3(4): 383-390

[10] Cernuzzi L, Zambonelli F. Dealing with Adaptive Multi-Agent Organizations in the Gaia Methodology [C] // Proc. of 5th AOSE. Springer, 2005: 217-228

[11] DeLoach S A, García-Ojeda J C. O-MaSE: A Customizable Approach to Designing and Building Complex, Adaptive Multiagent Systems[C]// LNCS 4957. Springer, 2008: 1-15

[12] Wang Li-ming, Li Ya-chong. A Systematic Methodology for Adaptive Systems in Open Environments [C] // PRIMA 2006, LNAI 4088. Springer, 2006: 117-128

[13] Anarosa A, Brandão F, et al. A Model Driven Approach to Develop Multi-agent Systems [J]. Monografias em Ciência da Computação, 2005, 9(5): 1-15

[14] Pavón J, Gómez-Sanz J J, Fuentes R. Model Driven Development of Multi-Agent Systems [C] // Proc. of ECMDA-FA, LNCS 4066. Springer, 2006: 284-298

[15] Jayatilleke G B, et al. A model driven component-based development framework for agents[J]. International Journal of Computer Systems Science & Engineering, 2005, 4(1): 273-282

[16] France R, Rumpe B. Model-driven Development of Complex Software: A Research Roadmap[C] // Proc. of Future of Software Engineering. 2007: 37-54

[17] Amor M, Fuentes L, Vallecillo A. Bridging the Gap Between Agent-Oriented Design and Implementation Using MDA[C] // Proc. of Agent-oriented Software Engineering, LNCS3382. Springer, 2005: 93-108

[18] De Maria B A, et al. Developing Multi-Agent Systems Based on MDA[C]// Proc. of the 17th Conference on Advanced Information Systems Engineering. 2005

[19] Perini, Susi A. Automating Model Transformations in Agent-Oriented Modeling[C]// Proc. of Agent Oriented Software Engineering. Springer, 2006: 167-178

(上接第 104 页)

[8] Koyama A, Arai J, Barolli L, et al. EZRP: an Enhanced Zone-based Routing Protocol for Ad-hoc Networks: Research Articles [J]. Concurrency and Computation: Practice & Experience, 2007, 19(8): 1157-1170

[9] 党琦. Ad Hoc 网络区域路由协议自适应算法的研究[D]. 南京：南京理工大学，2007

[10] 赵辉. 基于功耗考虑的有效性区域路由协议研究[D]. 西安：西安电子科技大学，2008

[11] 王朝瑞. 图论[M]. 北京：国防工业出版社，1985：146-148

[12] 严蔚敏，吴伟民. 数据结构(C 语言版)[M]. 北京：清华大学出版社，1997：156-193

[13] Zygmun J H, Peatlman M R, Samar P. The Interzone Routing Protocol(IERP) for Ad Hoc Networks[EB/OL]. IETF Internet Draft, draft-ietf-manet-zone-ierp-02. txt, 2002

[14] Zygmunt J H, Peatlman M R, Samar P. The Bordercasting Resolution Protocol(BRP) for Ad Hoc Networks[EB/OL]. IETF Internet Draft, draft-ietf-manet-zone-brp-02. txt, 2002

[15] 戴树森，费鹤良，等. 可靠性试验及其统计分析[M]. 北京：国防工业出版社，1983：168-170