

# Ad hoc 网络 AODV 协议的形式化分析与仿真\*

## Formal Analysis and Simulation of AODV Protocol in Ad hoc Wireless Network

邵梅, 王玉斌, 马争先, 钟艳如

SHAO Mei, WANG Yu-bin, MA Zheng-xian, ZHONG Yan-ru

(桂林电子科技大学计算机科学与工程学院, 广西桂林 541004)

(School of Computer Science and Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi, 541004, China)

**摘要:** 基于形式化建模的思想, 分别建立源节点、中间节点和目的节点的有限状态机(FSM)模型, 描述 AODV 协议的路由行为及算法思想, 分析影响 AODV 协议性能的可能性因素后, 利用 NS2 对 AODV 协议进行仿真, 以指导对协议算法的改进及其下一步研究方向, 使其更好地适应 Ad hoc 网络特点。

**关键词:** Ad hoc 网络 AODV 协议 形式化分析 有限状态机模型 NS2

**中图分类号:** TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-7378(2010)04-0461-04

**Abstract:** AODV is a typical on-demand routing protocol. In this paper based on a formal analysis of AODV, the finite state machine (FSM) models of source node, intermediate node and destination node are established, which clearly and accurately describe the routing behavior and algorithm of AODV. The problems of initial routing delay such as not the optimal shortest path, etc are illustrated and some solutions to the problems are proposed. The simulation of AODV in NS2 with some network protocol performance indicators is realized. The results show that the network has low throughput of datagrams in its early stages, and AODV shows degraded performance with increased number of nodes. Thus, it shows the models can effectively analyze AODV protocol.

**Key words:** Ad hoc network, AODV, formal analysis, FSM, NS2

Ad hoc 网络又称为无线自组网络, 由于网络本身具有无线连接、动态拓扑和有限带宽等特点, 导致其路由协议的设计面临诸多挑战。IETF RFC2501<sup>[1]</sup>详细给出了无线 Ad hoc 网络的应用场合、特征和性能要求。目前, MANET WG 已经公布了一系列的有关 Ad hoc 路由协议的草案。按照路由发现策略的不同, 这些路由协议大致可以分为先验式(表驱动)、反应式(按需)以及混合式路由协议。按需路由协议(On-demand Routing Protocol)已被公认为一种较为适合 Ad Hoc 网络的路由协议。2003 年 7 月, IETF MANET WG 正式公布 AODV(Ad-hoc On-Demand Distance Vector)<sup>[2]</sup>协

议为自组网路由协议的 RFC 标准。AODV 协议作为一种典型的按需路由协议, 已经成为研究的焦点。但是, 目前对于该协议进行形式化分析的文献报道并不多见。形式化模型是协议分析和设计的核心技术之一, 是协议形式描述语言的基础。基于形式化模型, 可以实现网络协议的形式化规格, 从而为协议的形式化分析及协议实现等提供良好的基础<sup>[3]</sup>。

本文基于形式化建模的思想, 对 AODV 协议进行形式化分析, 直观、准确地描述路由协议的算法, 分析协议优缺点及影响协议性能的可能性因素, 并在形式化模型的基础上, 对其进行仿真, 以指导对协议算法的改进及其下一步研究方向, 使其更好地适应 Ad hoc 网络特点。

### 1 AODV 协议的形式化分析

使用有限状态机(Finite State Machine, FSM)对 AODV 协议进行形式化建模。有限状态机又称

收稿日期: 2010-08-16

修回日期: 2010-10-10

作者简介: 邵梅(1986-), 女, 硕士研究生, 主要从事无线网络研究。

\* 广西自然科学基金项目(桂科自 0991242)资助。

有限状态自动机,是表示有限个状态及其之间转移和动作行为的数学模型<sup>[3]</sup>。定义确定型有限状态机是一个五元组,  $M = (Q, \sum, \delta, q_0, F)$ , 其中:  $Q = \{q_0, q_1, \dots, q_n\}$  是有限状态集合;  $\sum = \{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_m\}$  是有限输入字符集合;  $\delta: Q \times \sum \rightarrow Q$  是状态转移函数;  $q_0 \in Q$  是初始状态;  $F \subseteq Q$  是终结状态集合。

AODV 协议借用了 DSR<sup>[4]</sup> 中路由发现和路由维护的基础程序, 及 DSDV<sup>[5]</sup> 的逐跳 (Hop-by-Hop) 路由、目的节点序列号和路由维护阶段的周期更新机制, 有 3 种类型的消息控制帧: 路由请求 RREQ, 路由应答 RREP 和路由错误 RERR, 2 个重要协议规程: 路由发现 (Path Discovery) 和路由请求 (Route Request)。

定义网络节点状态集  $N = \{S, I, R\}$ , 分别表示源节点、中间节点、目的节点状态集。根据 FSM 的定义, 分别建立 S、I、R 的 FSM 模型, 并以状态转移图的形式给出。

1.1 源节点 FSM 模型及分析

定义  $S = \{S_0, S_1, S_2, S_3, S_4\}$  表示源节点有限状态集,  $S_0 \in S$  表示源节点初始状态,  $F_S = \{S_0\}$  表示源节点终结状态。

源节点 FSM 模型如图 1 所示。源节点发送数据报文时, 先在路由表中查找路由, 有则按照路由发送信息 (DATA), 否则发起路由发现过程, 广播路由请求包 (!RREQ) 给自己所有的邻节点, 由状态  $S_0$  转到  $S_1$ , 等待应答, 若在规定时间内未接收到应答, 再次广播 RREQ, 超时 (T), 返回状态  $S_0$ , 若接收到应答 (?RREP), 转入状态  $S_2$ , 进行路由等信息的更新 (UP\_ROUTE) 后, 返回  $S_0$ , 并发送数据报文。源节点接收到本节点发送的数据报文 (?DATA) 时, 丢弃该报文 (DROP\_D), 返回  $S_0$ 。源节点收到路由错误报文 (?RERR) 时, 根据错误信息, 更新路由表, 返回  $S_0$ 。另外用于链路的维护的 HELLO 分组, 可以看作是一种特殊的 RREQ, 模型中没有显式给出。

因为 AODV 在路由发现过程中使用目的节点序列号机制, 每个节点维护一个本地“序列号”和一个“广播标识”ID, 再加上本节点 IP 地址, 就能唯一标识一次路由请求, 保证了路由信息的及时性, 并避免了循环路由的产生。

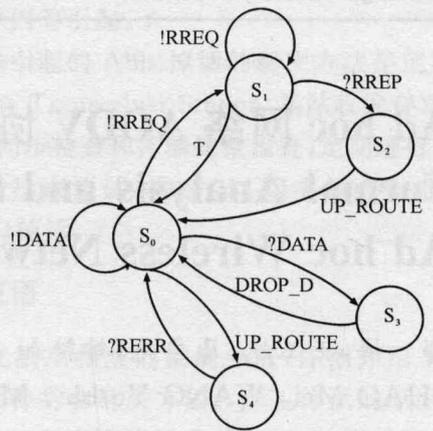


图 1 源节点 FSM 模型

由分析可知, 有效路由不存在时, 源节点首先进行路由查找, 广播 RREQ, 因此在网络建立初期, 会频繁发起路由请求, 从而导致初始路由延迟问题。同时 AODV 采用最短路径路由算法, 以跳数 (hops) 作为路由评价标准, 而没有考虑节点能量消耗、节点移动频繁、节点间距离等代价问题, 因此, 所查找到的最短路由未必是最优路径, 从而降低传输效率, 甚至导致网络拥塞、数据包丢失等情况。改进方法可以把按需路由和预先路由相结合。另外可以把节点能量, 节点活动频率, 节点负载大小等作为路径选择的标准, 如文献 [6] 中提出了一种基于链路状态加权的 AODV 改进路由协议。

1.2 中间节点 FSM 模型及分析

定义  $I = \{I_0, I_1, \dots, I_{10}\}$  表示中间节点有限状态集,  $I_0 \in I$  表示中间节点初始状态,  $F_I = \{I_0\}$  表示中间节点终结状态。

中间节点 FSM 模型如图 2 所示。处理和转发主要针对中间节点而言, 当中间节点接收到 RREQ (?RREQ), 状态由  $I_0$  转到  $I_1$ , 若该 RREQ 已被成功接收过, 则丢弃 (DROP\_Q), 转向状态  $I_0$ , 否则在路由表中查找目的节点路由, 查找失败, 转发 RREQ (FW\_Q), 状态由  $I_1$  转向  $I_0$ , 查找成功, 则向发送 RREQ 的节点返回 RREP (!RREP), 状态由  $I_2$  转到  $I_3$ , 然后根据 RREQ 中的置位标志, 决定是否向目的节点发送免费 RREP (!RREP\_FREE), 并更新路由表信息, 返回状态  $I_0$ , 当中间节点接收到 RREP (?RREP), 状态由  $I_0$  转向  $I_5$ , 更新本节点路由表信息后, 转发 RREP (FW\_P), 当中间节点接收到数据分组 (?DATA), 状态由  $I_0$  转向  $I_7$ , 首先判断该分组是否超过最多转发次数, 超过则丢弃 (DROP\_D), 转向状态  $I_0$ , 否则在路由表中查找目的节点路由 (CHECK\_R), 转向状态  $I_8$ , 查找成功时, 转发数

据分组(FW\_D), 返回状态  $I_0$ , 查找失败时, 说明链路中断, 如果链路处于本地修复中(IN\_REPAIR), 转向状态  $I_9$ , 修复成功(SUC\_REP), 返回状态  $I_8$ , 继续转发, 修复失败, 发送 RERR(! RERR), 如果链路未处于本地修复, 而有效路径的下一跳不可达, 中间节点直接发送 RERR(! RERR), 转向状态  $I_{10}$ , 更新路由信息后, 转向  $I_0$ 。

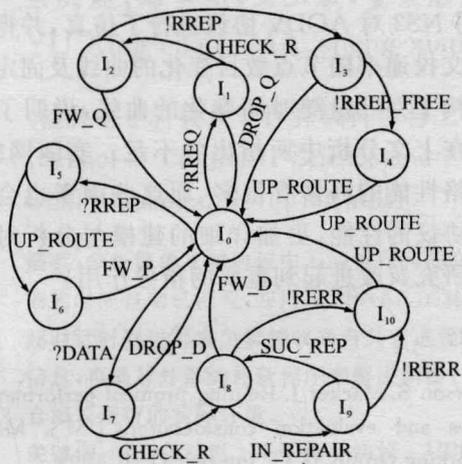


图2 中间节点 FSM 模型

另外, AODV 协议的路由维护过程体现在, 当源节点移动时, 重新发起一个路由发现过程, 查找到达目的节点的新路由, 当中间节点移动时, 其上游邻节点会检测到这种变化, 产生一个链路失效的通知, 无穷大计数 RREQ 分组, 并最终转发至源节点, 源节点决定重新发起路由发现过程或废弃该条路由。上文提到的 HELLO 分组, 也是进行路由维护的手段之一。

从状态图(图2)及其分析可知, 中间节点在接收3种消息和数据分组之后, 任务繁重, 容易造成网络流量负载过重。因此, 可以考虑加入自适应路由调整等机制, 以平衡网络中流量的分布, 如文献[7]中提出的一种基于 AODV 的满足 QoS 约束的自适应多径改进路由协议。另外, 对失效路由的修复, 会增加额外开销和延长端到端时延, 针对该问题, 可以考虑对发起链路修复的中间节点引入必要约束机制, 如修复次数约束、延时约束[8]等, 也有人提出一种局部修复算法[9]能够很好的改善网络多方面的性能。

### 1.3 目的节点 FSM 模型及分析

定义  $R = \{R_0, R_1, \dots, R_5\}$  表示目的节点有限状态集,  $R_0 \in R$  表示目的节点初始状态,  $F_R = \{R_0\}$  表示目的节点终结状态。

目的节点 FSM 模型如图3所示。目的节点接收数据分组(DATA), 状态由  $R_0$  转向  $R_1$ , 进行处理

(D\_PROC) 后, 返回  $R_0$ ; 如果接收到 RREQ(RREQ), 从状态  $R_0$  转向  $R_2$ , 向源节点发送路由应答 RREP(! RREP), 转向状态  $R_3$ , 更新路由信息(UP\_ROUTE)后, 转向状态  $R_0$ ; 如果接收到中间节点发送的免费 RREP(? RREP), 由状态  $R_0$  转向  $R_5$ , 更新路由表后, 返回状态  $R_0$ 。

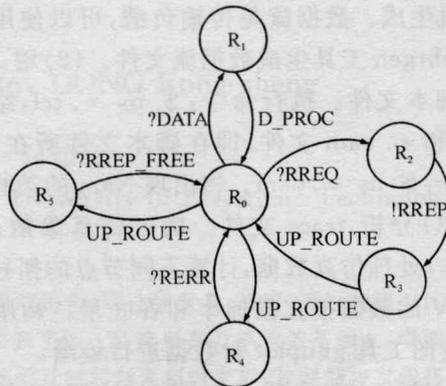


图3 目的节点 FSM 模型

由状态图(图3)可以看出, 在拓扑结构变化较快的网络, 目的节点的工作可能会集中于对路由进行更新, 接收的数据包也可能因为超时而丢弃, 大大降低了网络的吞吐量和有效数据的传输。要改善这种情况, 就需要结合前面的分析, 合理减少冗余控制报文的发送频率, 或增加本地节点接收控制报文的条件, 如当前节点的负荷[10], 控制报文的转发率等。

通过以上形式化分析, 能够清晰协议的算法和思想, 很明显, AODV 协议作为一种典型的按需路由协议, 在 Ad hoc 网络中的优势所在, 但是, 因为网络本身的特点, 也造成了该协议的诸多不足。通过形式化分析, 找出协议优缺, 对于指导协议的改进具有积极意义。下文通过用 NS2 对该协议仿真, 通过对性能参数变化曲线的分析了, 进一步说明了该协议所存在的优点和缺点及其影响因素。

## 2 AODV 协议仿真

基于 NS2 网络模拟器的 Otcl 编程层次对 AODV 协议进行网络仿真, 仿真模型综合拓扑模型、协议模型和流量模型, 如图4所示。

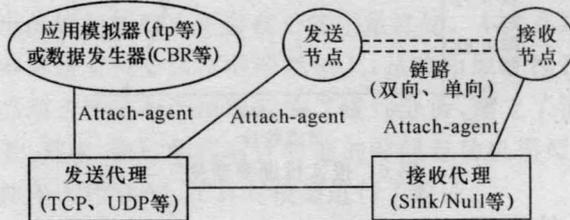


图4 仿真模型

仿真分为以下3个步骤:(1)编写 Otcl 脚本本文

件。建立脚本文件 \*.tcl,主要是配置模拟属性和配置移动节点,其中协议模型通过设置节点 ad-hocRouting 属性值为 AODV 实现,拓扑模型和流量模型通过生成场景文件和数据流文件建立。场景用来模拟一个虚拟的运动环境,可直接写入 tcl 程序,但是对于复杂场景,一般用 NS2 提供的 setdest 工具随机生成。数据流是传输负载,可以使用 NS2 提供的 cbrgen 工具生成数据流文件。(2)用 NS 命令执行脚本文件。执行命令: \$ ns \*.tcl,结果生成 \*.tr 和 \*.nam 文件,即在脚本文件所在目录,运行命令: \$ ns \*.nam。将出现 Nam 的动画演示窗口。(3)分析 trace 文件。确定仿真参数,编写 awk 脚本,处理仿真数据,计算不同节点的拓扑结构下 AODV 的数据报文投递率和吞吐量。利用 NS2 自带的绘图工具 gnuplot 对数据进行绘图。

图 5 显示 100 个节点在 670m×670m 的范围内,最大移动速度为 10m/s,最大链接数目为 10 的拓扑结构下,吞吐量由于受路由查找的影响,在初始阶段较低,随着仿真时间的延长,吞吐量开始大幅度增大,最后处于一种基本平衡状态,说明此时协议开销较小。

图 6 显示,在 670m×670m 的范围内,最大移动速度为 10m/s,最大链接数目为 10 的拓扑结构下,随着节点的增加,不同节点数量对数据报文投递率的影响基本呈下降趋势,超过 100 个节点后,下降速度明显加快。这说明 AODV 协议的性能受网络节点密度的影响很大。

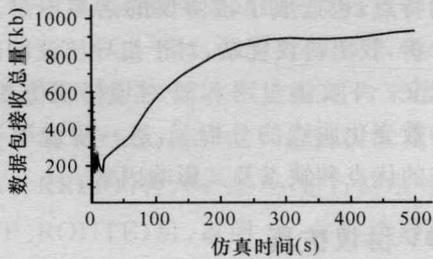


图 5 吞吐量变化

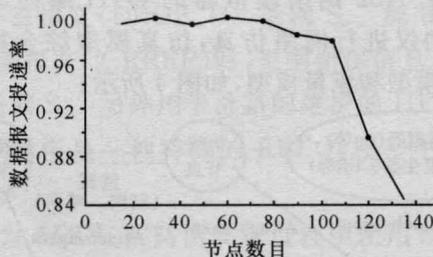


图 6 报文投递率变化

思路,一是针对协议进行仿真分析,二是对协议算法进行改进,本文的不同之处在于,首先建立了协议算法的 FSM 模型,形式化分析了协议的路由行为和算法思想,具有直观性、准确性和简洁性等特点,然后基于模型,进一步分析了影响协议性能的可能性因素,对于协议算法的改进具有指导作用。在形式化分析的基础上,综合网络协议的部分常用性能指标,利用 NS2 对 AODV 协议进行了仿真,并得出了数据报文投递率随节点数目变化的曲线及固定网络拓扑结构下吞吐量随时间变化的曲线,说明了协议确实存在上文分析中所指出的不足。实际网络中,影响网络性能的因素有很多,而这些因素也会影响到路由协议的性能,更加详细的建模与分析对路由协议的研究及改进起到重要的指导作用。

#### 参考文献:

- [1] Corson S, Macker J. Routing protocol performance issues and evaluation considerations [M]. MANET Working Group, IETF Internet Draft, 1999.
- [2] Perkins C, Belding Royer E, Das S. Ad-hoc On-demand distance vector (AODV) routing [M]. RFC Editor, 2003.
- [3] 古天龙,蔡国永. 网络协议的形式化分析与设计 [M]. 北京:电子工业出版社,2003:37-53.
- [4] Johnson David B, Maltz David A, Hu Yih-Chun. The dynamic source routing protocol for mobile Ad Hoc networks (DSR) [M]. MANET Working Group, IETF Internet Draft, 2004.
- [5] Perkins C E, Pravin Bhagwat. Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (DSDV) for mobile computers [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 1994, 24(4): 234-244.
- [6] 符云清,王松健,吴中福. 基于链路状态加权的无线 Mesh 网络路由协议 [J]. 计算机研究与发展, 2009, 46(1): 137-143.
- [7] 刘永强,严伟,代亚非. 一种满足 QoS 约束的自适应多径 Ad Hoc 网络路由协议 [J]. 计算机学报, 2006, 29(5): 681-689.
- [8] Wei Zhenxi, Zhang Hong, Wang Xiaoling. Design method based on routing tree for topology update in Ad Hoc network [J]. Journal of Electronic Science and Technology of China, 2006, 2(4): 106-109.
- [9] 肖百龙,郭伟,刘军,等. 移动自组网路由局部修复算法的研究 [J]. 计算机研究与发展, 2007, 44(8): 1383-1389.
- [10] 余旭涛,毕光国,王霄峻,等. Ad Hoc 网络按需路由协议的改进 [J]. 计算机学报, 2004, 27(6): 838-844.

### 3 结束语

(责任编辑:邓大玉)

目前,国内对于 AODV 协议的研究主要有两种