

# 面向移动节点不确定性特征的自组网路由协议

刘刚, 崔刚, 刘宏伟, 吴智博

(哈尔滨工业大学计算机科学与技术学院, 150001, 哈尔滨)

**摘要:** 为了在资源有限的移动 Ad Hoc 网络环境中提高网络能量效率、延长网络存活寿命, 提出了一种面向移动节点不确定性特征的自组网路由协议. 根据信息熵的相关理论, 从移动节点的邻居节点集合的取值空间和取值空间中各邻居节点集合成员的具体分布来度量节点的不确定性, 从统计和行为上对无线移动节点的动态特性进行刻画. 对路由表项进行了扩展, 增加了路由稳定性测度值域, 以适用节点记录其到达路由请求分组源节点的路由稳定性测度信息. 仿真结果表明, 所提协议能够有效提高移动 Ad Hoc 网络的分组递交成功率和端到端分组延迟等性能, 降低频繁路由重建和维护操作所产生的控制负载开销和能量消耗.

**关键词:** 移动 Ad Hoc 网络; 稳定路由; 不确定性; 信息熵

**中图分类号:** TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)06-0046-05

## A Kind of Routing Protocol Based on Uncertain Characters of Mobile Nodes for Mobile Ad Hoc Networks

LIU Gang, CUI Gang, LIU Hongwei, WU Zhibo

(School of Computer Science and Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** A kind of routing protocol based on uncertain characters of mobile nodes in mobile Ad Hoc networks is proposed to improve energy efficiency and to extend lifetime of the networks with limited resources. The relevant theory of information entropy is used to measure the uncertainty of a mobile node from its value space of the neighbor nodes set and from the member distribution of the neighbor nodes set in the value space. The dynamic characteristics of wireless mobile nodes are described from the statistics and behavior, and the routing table entries are extended. The routing stability measurement values are added to record the routing stability measurement information when the node reaches the source node of the routing request packet. Simulation results show that the protocol can remarkably improve the performances of mobile Ad Hoc networks such as packet delivery ratio and packet end-to-end delay, and reduce control load overhead and energy consumption generated by frequent route reconstruction and maintenance.

**Keywords:** mobile Ad Hoc networks; stable routing; uncertainty; information entropy

移动自组网是由一组自治的无线移动节点组成的自组织、无中心的多跳无线网络系统, 其中的网络节点可以自由移动、随时加入或离开当前网络, 因此网络拓扑结构及无线链路连接状态不断变化. 在这种动态的网络环境中, 稳定的路由能够减少传输过程中路由频繁重建和维护所产生的网络带宽和能量

消耗, 进而提高网络资源利用效率、延长网络存活寿命, 所以对于移动自组织网络具有现实的意义.

在当前的稳定路由选择方法中, 常见的有以下几种策略. ①针对某种形式化的网络节点运动模型来分析网络节点和无线链路的外在行为特征, 并以此作为路由的稳定性度量标准<sup>[1-2]</sup>, 这种方法的缺点

是适用范围具有较大的局限性。②将实时获取的无线移动节点间的物理位置关系、相对速度变化等信息作为路由稳定性度量的标准<sup>[3-5]</sup>,这种方法需要特殊的辅助设施(如GPS等)。③利用网络节点间相对位置变化所引发的某些动态特征来度量路由的稳定性,如:在基于信号稳定性的自适应路由协议SSA<sup>[6]</sup>中,以跨层操作的方式实现了信号稳定性表(SST),并将数据传输过程中信号强度的变化特性作为路由选择标准;在层次网络体系结构中群簇算法以及基于簇的路由协议中,通过分析网络拓扑结构的动态特性提出了MEACA算法<sup>[7]</sup>,来实现网络性能的优化;基于无线链路相关因子的路由稳定性计算方法<sup>[8]</sup>利用相邻无线链路连接状态变化的相关性来综合考虑完整路由的稳定性特征,但这些路由度量方法存在的一个主要问题是所选择的外部动态特性难以全面反映出路由的稳定性特征。

本文将邻居节点集合的变化过程作为具有不确定属性的信源,再根据信息熵的相关理论提出了一种移动节点稳定性量化度量标准,并将其应用于自组织网络环境中的路由建立过程中,以确保动态网络环境下的可靠数据传输。

## 1 稳定路由模型描述

### 1.1 路由稳定性测度的定义

如果每个网络节点都具有唯一可识别的标识,且具有相同的无线传播半径,则可将 $t$ 时刻的网络拓扑结构模型化为一个无向图 $G_t=(V, E_t)$ ,其中 $V$ 为网络节点集合, $E_t$ 为 $t$ 时刻网络中存在的无线链路集合。如果节点 $m$ 周期性地检测其当前相邻节点集合的组成成员,检测周期为 $\Delta t$ ,则在长度为 $T$ 的时间内,可以得到一个由不同检测时刻邻居节点集合构成的有序序列

$$S_T(\xi) = (\xi_{t_1}, \xi_{t_2}, \dots, \xi_{t_i}, \dots, \xi_{t_N}), N = T/\Delta t \quad (1)$$

式中: $\xi_{t_i}$  ( $1 \leq i \leq N$ )为 $t_i$ 时刻所检测到的邻居节点集合。若将节点 $m$ 在某一特定时刻所检测到的邻居节点集合看作一个随机变量 $\xi$ ,则 $S_T(\xi)$ 序列中所有组成成员不同的邻居节点集合即构成了 $T$ 时间内 $\xi$ 的取值空间,即有 $\xi_T = \{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k\}$  ( $1 \leq k \leq N$ ),且由式(1)可知 $\xi_{t_i} \in \xi_T$  ( $i=1, \dots, N$ ),并可由 $S_T(\xi)$ 序列得到 $\xi_T$ 中各样本元素的概率分布 $p(\xi_j)$  ( $1 \leq j \leq k$ )。序列 $S_T(\xi)$ 是节点间相对关系动态特征的直观反映,通过定量分析 $S_T(\xi)$ 序列及 $\xi_T$ 的不确定性特征,能够为稳定路由的建立和选择提供归一化的测

度标准。为了能够对 $S_T(\xi)$ 序列所反映出的不确定性进行度量,可将 $S_T(\xi)$ 转化为另外一种表示形式,即合并 $S_T(\xi)$ 序列中连续出现的相同邻居节点集合成员,并用该子序列的长度来表示,即

$$R_T(\xi) = (|\xi_{r_1}|, |\xi_{r_2}|, \dots, |\xi_{r_l}|) \sum_{i=1}^l |\xi_{r_i}| = N, k \leq l \leq N \quad (2)$$

式中: $r_i$ 为 $S_T(\xi)$ 序列合并后的第 $i$ 个子序列, $\xi_{r_i}$  ( $\xi_{r_i} \in \xi_T$ )为该子序列的邻居节点集合,而 $|\xi_{r_i}|$ 表示此子序列的长度。

因此,利用加权信息熵的形式可度量 $R_T(\xi)$ 序列所反映出的不确定性特征,即

$$H_w(R_T(\xi)) = \sum_{i=1}^l C_i(R_T(\xi)) \left( \frac{\xi_{r_i}}{N} \right) \lg \left( \frac{\xi_{r_i}}{N} \right) \quad (3)$$

式中:权值 $C_i(R_T(\xi))$ 为 $R_T(\xi)$ 序列中相邻子序列的邻居节点集合间的差异程度,定义为

$$C_i(R_T(\xi)) = \begin{cases} 1, & i=1 \\ 1 - \frac{\xi_{r_{i-1}} \cap \xi_{r_i}}{\xi_{r_{i-1}} \cup \xi_{r_i}}, & l \geq i > 1 \end{cases} \quad (4)$$

采取相同的方法,可计算集合 $\xi_T$ 的不确定性特征

$$H(\xi_T) = \sum_{j=1}^k p(\xi_j) \lg p(\xi_j) \quad (5)$$

根据以上定义,移动Ad Hoc网络中的某个移动节点 $m$ 的稳定性测度

$$M(m) = 1 - \frac{H_w(R_T(\xi))H(\xi_T)}{\lg N \lg N} \quad (6)$$

上述表达式所定义的移动节点稳定性测度 $M(m)$ 具有以下特性。

(1)由熵的性质可知, $H(\xi_T)$ 和 $H_w(R_T(\xi))$ 的取值区间均为 $[0, \lg N]$ ,因此 $M(m)$ 为一个 $[0, 1]$ 之间的实数,并且随着样本空间中元素数目的增加,或者样本空间中各元素的概率分布趋于平均,都将使得熵值(不确定性)增加,进而导致无线移动节点稳定性测度 $M(m)$ 减小,即稳定性降低。在最坏情况下,如果每次采样都得到一组成员各异的邻居节点集合,则 $M(m)$ 值将为0,拥有这样节点的路由显然无法进行数据传输。反之,若所有采样时刻都得到完全相同的邻居节点集合,则 $M(m)$ 达到最大值1,说明相邻节点间的关系极其稳定。

(2)在 $H_w(R_T(\xi))$ 的计算过程中,通过加权的方式将 $R_T(\xi)$ 序列中相邻子序列的邻居节点集合成员变化的差异程度引入到不确定性测度中,即相邻子序列的邻居节点集合成员变化越剧烈,其不确定性程度越大,则无线移动节点的稳定性越低。

(3)稳定性测度 $M(m)$ 可以从移动节点的邻居

节点集合的取值空间和取值空间中各邻居节点集合成员的具体分布来度量节点的不确定性,从而能够更加细粒度地从统计和行为 2 个方面对无线移动节点的动态特性进行刻画.

由上述分析可知,一条由源节点  $s$  到目的节点  $d$  的路由  $R(s,d)$ ,可以用路由中所有参与节点的稳定性测度之积来表示其稳定性测度,即

$$M_{R(s,d)} = \prod_{i \in R(s,d)} M(i)$$

(7)

式中: $M(i)$ 的取值区间为 $[0,1]$ ,所以路由稳定性测度的最大值为 1,且由 2 个因素共同确定,即路由长度及所有参与节点的稳定性程度.

1.2 基于稳定性度量的按需路由协议

本文以按需距离向量(AODV)路由协议<sup>[9]</sup>的基本思想与操作规程为基础,提出了一种基于路由稳定性度量的按需路由协议(BSORP).在 BSORP 中,对路由表项进行了扩展,即增加了路由稳定性测度值域  $M_R(T)$ ,用于节点记录其到达路由请求(RREQ)分组源节点的路由稳定性测度信息.

在寻路阶段,BSORP 协议通过泛洪 RREQ 分组来建立路由,分组由 $\langle D, N_{Req}, S, M_R(Q) \rangle$ 构成,其中  $D$ 、 $S$  分别为目的节点和源节点地址,  $N_{Req}$  为 RREQ 分组序列号,  $M_R(Q)$  记录由源节点到当前转发节点的路由稳定性测度.当节点初次接收到一个 RREQ 分组时,创建路由表项,并将  $M_R(Q)$  值拷贝到路由表的  $M_R(T)$  域中.之后,利用  $M_R(Q) = M_R(Q)M(i)$  来更新 RREQ 分组中的  $M_R(Q)$  值,并继续执行路由发现过程.

如果节点接收到了 RREQ 分组的不同拷贝,则比较  $M_R(Q)$  与  $M_R(T)$ .若  $M_R(Q) > M_R(T)$ ,则重定位路由表项中的上跳节点信息并更新  $M_R(T)$  值;若  $M_R(Q) = M_R(T)$ ,但此 RREQ 分组经由更少的转发节点到达本节点,则执行路由重定向操作,否则直接丢弃此分组.

当目的节点首次接收到 RREQ 分组时,先创建路由表项,并将  $M_R(Q)$  拷贝到该路由表项中的  $M_R(T)$  域中,然后应答一个路由应答(RREP)分组,其中包含  $M_R(P)$  域,用于将路由稳定性测度返回源节点.处理完首个到达的 RREQ 分组后,目的节点立即启动路由应答计时器.在路由应答计时器超时前,若接收到后继到达的 RREQ 分组,则利用路由表项中保存的  $M_R(T)$  信息作为比较基准.当新到达的 RREQ 分组能够提供一条更加稳定的路由时,根据此 RREQ 分组提供的信息更新路由表项中相关

条目以及  $M_R(T)$  信息,并初始化一个新的 RREP 分组应答此路由,否则丢弃此 RREQ 分组.当路由应答计时器超时后,不再对后续到达的 RREQ 分组进行应答.

在路由应答过程中,由于中间节点可能执行路由重定向操作,因此 RREP 分组中的  $M_R(P)$  值需要重新计算并返回源节点,计算方法与 RREQ 分组中的计算方式相同.

源节点接收到首个返回的 RREP 分组后,即可创建路由表项并将  $M_R(P)$  拷贝到  $M_R(T)$  域中,并利用此路由进行数据传输.当后继 RREP 分组再次到达源节点时,若路由更加稳定,则更新路由表中的相关条目,并利用新路由进行数据转发,否则直接丢弃 RREP 分组.

2 模拟仿真结果分析

2.1 模拟仿真环境设置

模拟仿真基于 NS2 网络模拟器,节点运动模型为 Random Walk Model,采用 IEEE802.11 中的分布式协调功能(DCF)作为 MAC 协议,网络节点在  $1\,800\text{ m} \times 9\,00\text{ m}$  的矩形区域内运动.仿真中的其他参数如表 1 所示.

表 1 模拟仿真参数设置

| 模拟参数                     | 数值  |
|--------------------------|-----|
| 模拟时间/s                   | 800 |
| 数据传输范围/m                 | 250 |
| 节点数                      | 50  |
| 节点最大暂停时间/s               | 50  |
| 数据包大小/B                  | 512 |
| 数据传输速率/包·s <sup>-1</sup> | 5   |

2.2 模拟仿真评估指标

仿真中对以下关键网络性能参数进行比较,以分析 2 种路由协议间的性能差异.

分组递交成功率:网络中固定比特率(CBR)数据流源节点所发送分组总数与 CBR 数据流目标节点最终成功接收分组的比率.

分组传输时延:CBR 数据流源节点应用层发出的数据分组到达目标节点应用层的平均传输时延.

路由协议控制负载比率:网络层路由协议控制分组数量占全部分组数量的比率.

2.3 模拟仿真结果分析

网络节点在不同的运动速度情况下,2 种路由

协议在分组递交成功率、分组传输时延方面的性能差异对比如图 1、图 2 所示。由图 1 可以看出,随着节点移动速度的增加,网络拓扑结构变化加快,2 种路由协议的分组递交成功率均呈现出下降趋势,但是由于 BSORP 路由协议选择稳定的网络节点参与数据传输,因此能够提高分组递交成功率,延缓分组递交成功率快速下降的趋势。由图 2 的模拟仿真结果可以看出,BSORP 协议降低了分组传输时延,其原因是采取了连乘的方式计算路由的稳定性,所以转发节点数量便成为路由测度的重要影响因素,即参与节点少的路由更有竞争优势。同时,通过选择稳定的节点参与路由,可显著减少链路中断而导致的分组传输时延快速增加。

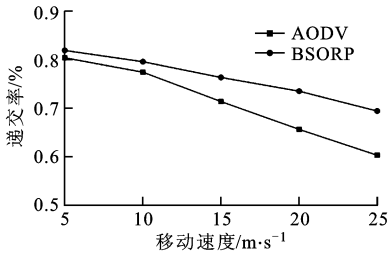


图 1 不同移动速度下的分组成功递交率

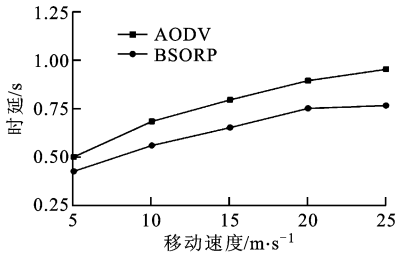


图 2 不同移动速度下的分组端到端时延

2 种路由协议的路由中断情况以及控制负载开销的差异对比如图 3、图 4 所示。频繁的链路中断将增加大量的路由维护和重建操作。在按需类路由协议中,路由是以泛洪的方式建立的,所以路由中断将导致控制负载迅速增加。由图 3 可以看出,选择稳定的网络节点来组建路由,可以减少路由中断。随着网络动态性加剧,根据节点稳定性特征来选择路由的优势更加显著。由图 4 可以看出,2 种路由协议在控制负载开销方面的差异证明了在动态的网络环境下,路由中断是路由协议负载显著增加的主要原因,通过减少路由中断,便可明显降低按需类路由协议的控制负载开销,进而提高网络带宽及能源利用率。

在不同节点密度情况下,2 种路由协议性能差异对比如图 5、图 6 所示。BSORP 协议允许网络节

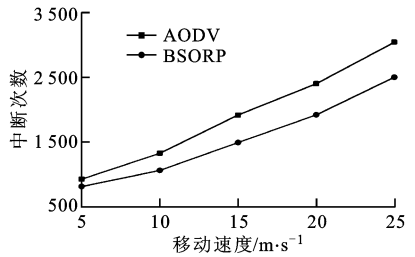


图 3 不同移动速度下的活动路由中断次数

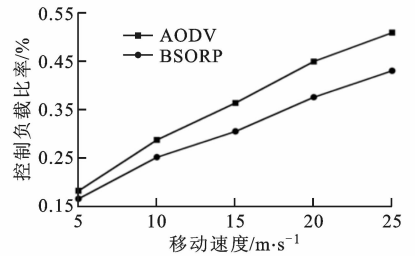


图 4 不同移动速度下的路由控制负载比率

点在转发完首个 RREQ 分组后继续执行路由由重定向操作,并且允许目的节点多次应答路由请求,以便寻找更优路径,因此网络中潜在的路由数量对其性能具有较大的影响。由图 5、图 6 可以看出,随着网络节点密度的增加,为 BSORP 协议提供了更多的路由优化机会,因此明显提高了数据在传输过程中的分组递交成功率,降低了分组转发时延。

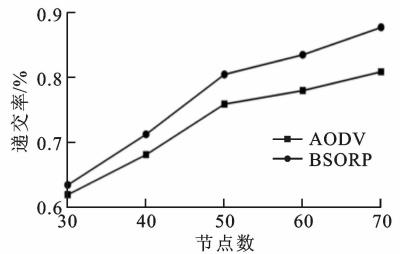


图 5 不同节点密度下的分组递交率

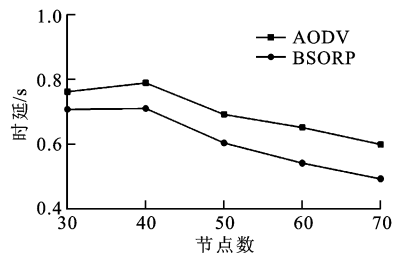


图 6 不同节点密度下的端到端时延

### 3 结束语

本文提出了一种根据邻居节点集合变化的不确

定性特征来度量节点稳定程度的路由计算方法,并且利用所提出方法改进了按需距离向量路由协议的路由建立方式,即通过选择稳定的网络节点来组建活动路由,从而提高了动态网络环境条件下的网络性能。仿真结果表明,本文所提出的方法能够有效提高路由协议的分组递交成功率,降低分组传输时延等关键网络性能。

#### 参考文献:

- [1] CAROFIGLIO C, CHIASSERINI C F, GARETTO M, et al. Route stability in MANETs under the random direction mobility model [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2009, 8(9): 1167-1179.
- [2] GARETTO M, LEONARDI E. Analysis of random mobility models with partial differential equations [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2007, 6(11): 1204-1217.
- [3] PRINCE S, STEPHEN B W. On the behavior of communication links of a node in a multi-hop mobile environment [C]//Proceedings of 5th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. New York, USA: ACM, 2004:145-156.
- [4] XU Sanlin, BLACKMORE K, JONEES H. Mobility assessment for MANETS requiring persistent links [C]//Proceedings of International Conference on Mobile System, Applications and Services. Seattle, WA, USA: USENIX Association, 2005:39-44.
- [5] SUMESH J P, ANAND V. Mobility aware path maintenance in ad hoc networks [C]//Proceedings of the 2009 ACM Symposium on Applied Computing. New York, USA: ACM, 2009:201-206.
- [6] ROHIT D, CYNTHIA D R, WANG K Y, et al. Signal stability based adaptive routing (SSA) for Ad Hoc mobile networks [J]. IEEE Personal Communications, 1997, 4(1): 36-45.
- [7] XU Y, WANG W Y. Topology stability analysis and its application in hierarchical mobile ad hoc networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(3): 1546-1560.
- [8] ZHANG Hui, DONG Yuning. A novel path stability computation model for wireless Ad Hoc networks [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2007, 14(12): 928-931.
- [9] PERKINS C E, ROYER E M. Ad hoc on-demand distance vector routing (AODV) [EB/OL]. [2009-03-22]. <http://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt>.

(编辑 刘杨 苗凌)

## 我校吴建南教授的研究成果获国家自然科学基金委员会采用

近日,国家自然科学基金委员会(以下简称基金委)向我校出具了“‘科学基金资助与管理绩效国际评估总体方案研究’研究成果采纳证明”,充分肯定了由我校公共政策与管理学院副院长、绩效管理研究中心主任吴建南教授主持、科技部国家科技评估中心等4家单位共同参与完成的2009年国家自然科学基金委主任基金项目“科学基金资助与管理绩效国际评估研究项目”(批准号:J0910011)的研究成果,指出由吴建南教授主持完成的总体评估方案已在科学基金资助与管理绩效国际评估工作中得到采纳应用。

2009年1月,基金委设立了国家自然科学基金委主任基金项目“科学基金资助与管理绩效国际评估研究项目”并公开招标,我校吴建南教授会同科技部国家科技评估中心、北京理工大学以及合肥工业大学等单位共同投标并获得资助。项目于同年3月17日正式启动,经过1年的紧张研究,课题组圆满完成了预期研究任务并顺利结题。吴建南教授承担的子课题“科学基金资助与管理绩效国际评估总体方案研究”系统比较了世界上主要国家科学资助机构绩效评估的实践做法以及资助与管理的活动规律,设计并论证了科学可行的国际评估总体方案,对于推动科学基金国际评估工作产生了重要作用。

(来源:西安交大科技在线 <http://www.xjtust.com>; 马亮 供稿)