

文章编号:1000-582X(2011)10-109-06

Ad Hoc 网络模糊逻辑组播算法

王庆文^a, 史浩山^a, 戚 茜^b

(西北工业大学 a. 电子信息学院; b. 航海学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 为了提高 Ad Hoc 网络组播的效率, 提出了 FLMA: 一种新的 Ad Hoc 网络模糊逻辑组播算法。FLMA 采用模糊逻辑, 以适应 Ad Hoc 网络拓扑动态变化带来的信息不精确性。以重播分组新增覆盖节点的数量相对度和节点的剩余能量相对度为模糊控制系统的输入变量, 以节点重播分组的延迟时间为模糊控制系统的输出变量, 优化节点重播分组的优先权。从而减少了分组在网络中的重复传输, 降低了节点间的竞争和碰撞, 均衡了网络中节点的能量消耗。仿真实验结果表明: 相比 BCAST 算法, FLMA 延长了网络生命周期, 降低了平均端到端延迟和节点平均丢包率, 提高了网络的吞吐率。

关键词: 组播; Ad Hoc 网络; 模糊逻辑; 生命周期

中图分类号: TN929

文献标志码: A

A fuzzy logic multicasting algorithm for ad hoc networks

WANG Qing-wen^a, Shi Hao-shan^a, Qi Qian^b

(a. Department of Electronic Engineering; b. Department of Marine, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shanxi P. R. China)

Abstract: To increase the multicasting efficiency of Ad hoc networks, a fuzzy logic multicasting algorithm (FLMA) is proposed. FLMA adopts the fuzzy logic to tolerate the imprecise information caused by dynamic network topology. The two input variables of the fuzzy logic system are the relative degree of the additional coverage node number and the relative degree of the residual energy. The deferring time of rebroadcast is the output variable of the fuzzy logic system, which is used to optimize the priority of the nodes to rebroadcast. FLMA reduces the redundant retransmission and the chance of the contention and collision, while balances the energy consumption of the nodes. Simulation results reveal that the FLMA achieves better performance than BCAST in terms of the network lifetime, average end-to-end delay, the average number of drops per node and the throughput.

Key words: multicasting; Ad Hoc network; fuzzy logic; network lifetime

自组织网络(Ad Hoc)是由一组带有无线收发装置移动节点组成的多跳的临时性自治系统^[1]。Ad Hoc 网络具有带宽受限、动态拓扑、多跳路由和能量受限^[2-4]等特点。在 Ad hoc 网络的应用中, 当多个接收者需要同时接收数据时, 使用组播技术进

行数据传输是很有效的方式^[5]。组播算法可以分为两类: 基于树的和基于网格的^[6-8]。基于树的组播算法有 LAM、MAODV 和 PUMA^[9]; 基于网格的组播算法有 ODMRP 和 FGMP。近年来, 研究者对 Ad Hoc 网络的组播算法进行了广泛的研究。文献^[10]

收稿日期: 2010-12-20

基金项目: 教育部博士点基金资助项目(20050699037); 国家自然科学基金资助项目(60472074)

作者简介: 王庆文(1982-), 男, 西北工业大学博士研究生, 主要从事 Ad Hoc 网络方面的研究, (Tel)13572071908; (E-mail)wqw013890@163.com。

提出了分布式的能量均衡的组播算法,该算法减少了能量消耗,但是它应用的条件是节点处在静止状态,并不适用于网络拓扑动态变化的 Ad Hoc 网络。文献[11]提出了基于拥塞控制的组播算法,该算法提高了吞吐量,但是并没有考虑节点的能量消耗。文献[12]提出了基于蚁群优化的组播算法,提高了发包率,降低了路由开销,但是带了较大的延迟。文献[13]提出了基于移动预测的组播算法,提高了发包率和数据转发效率,但是节点需要携带地理位置信息消耗了大量的能量。文献[14]提出了利用两跳邻居信息确定转发节点的组播算法,虽然保证了分组传输率,但是处理分组的延迟时间较大。

由于 Ad Hoc 网络无线信道的不稳定性和节点的移动性,导致网络拓扑的动态变化^[15],因而节点获得的局部信息并不精确。上述研究采用的精确的组播模型,不能适应 Ad Hoc 网络,而采用模糊逻辑对于信息不精确的问题有很好的鲁棒性和适应性。提出了一种新的 Ad Hoc 网络模糊逻辑组播算法 (FLMA)。以节点重播分组新增覆盖节点数量相对度和剩余能量相对度为模糊控制输入变量,解模糊获得重播分组的延迟时间,优化重播分组的优先权。仿真实验表明,FLMA 提高了网络生命周期和吞吐率,降低了平均端对端延迟和平均丢包次数,提高了 Ad Hoc 网络组播效率。

1 FLMA 设计

FLMA 重播分组的延迟时间模糊控制包括 3 个步骤:新增覆盖节点数量相对度和节点剩余能量相对度的模糊化,模糊推理和解模糊。

1.1 新增覆盖节点数量相对度的模糊化

移动自组织网络可用有向图 $G(V, E)$ 表示,其中 $V = \{V_1, V_2, \dots, V_n\}$ 表示节点集合; $E = \{(i, j) | d(i, j) \leq r\}$ 代表节点之间的链路集合,其中 $d(i, j)$ 代表节点 V_i 还节点 V_j 之间的距离, r 代表节点的传输半径。

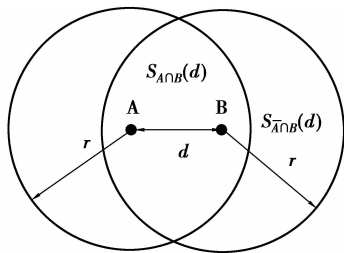


图 1 2 节点通信范围

假设节点在面积 $W \times H$ 长方形区域内随机移

动, N 为这个区域随机移动的节点数目,则每个节点的平均邻居数量为

$$N_{av} = \frac{\pi r^2}{W \times H} N - 1, \quad (1)$$

由图 1 所示,节点 B 在接收节点 A 的发送分组,2 个节点的传输半径为 r ,节点之间的距离为 d ,其中 $0 < d \leq r$ 。节点 B 接收到来自节点 A 的分组后,平均新增覆盖节点个数为

$$N_{\bar{A} \cap B} = \frac{S_{\bar{A} \cap B}(d)}{\pi r^2} \times N_{av}. \quad (2)$$

由公式(2)可得新增覆盖面积为

$$S_{\bar{A} \cap B}(d) = \frac{N_{\bar{A} \cap B} \times \pi r^2}{N_{av}}. \quad (3)$$

由上面的分析可知,节点重播分组,新增覆盖节点数量越多,节点新增覆盖通信面积也就越大。当接收节点几乎不能到达新的邻居节点时,转播分组只能白白的浪费网络带宽,消耗网络的能量。因此,根据节点重播分组时,新增覆盖节点数目设置转播分组的延迟时间,让新增覆盖节点数量多的节点,优先转发分组。一方面,可以减少冗余、竞争和冲突,抑制冗余大的节点转播分组。另一方面可以快速将分组信息覆盖整个网络,从而提高信息覆盖网络所有节点的速度,提高数据分发的比率。

令 V_A 与 V_B 分别表示节点 A 和节点 B 的邻居集,节点 A 在发送分组时,查询自己的邻居列表,获得邻居节点重播分组新增覆盖节点数量的最大值

$$\text{Num}(V_{\bar{A}}) = \max\{\text{Num}(V_{\bar{A} \cap U})\}, \quad (4)$$

其中 $U \in V_A$, 函数 $\text{Num}(X)$ 为集合 X 中元素的个数。 $V_{\bar{A} \cap U}$ 表示 A 的邻居节点 U 接收到 A 发送的分组后,新增覆盖的邻居集,可以用下面的公式得到

$$V_{\bar{A} \cap U} = V_U - V_A \cap V_U. \quad (5)$$

节点 A 发送分组时,将 $\text{Num}(V_{\bar{A}})$ 和邻居列表添加到分组头中,将分组发送给邻居节点。

节点 B 接收到节点 A 发送的分组后,将自己新增覆盖节点数量值 $\text{Num}(V_{\bar{A} \cap B})$ 和节点 A 的邻居节点新增覆盖邻居数量最大值 $\text{Num}(V_{\bar{A}})$ 的比值作为新增覆盖节点数量相对度,可由下面公式表示

$$NR_{\bar{A} \cap B} = \frac{\text{Num}(V_{\bar{A} \cap B})}{\text{Num}(V_{\bar{A}})}, \quad (6)$$

$NR_{\bar{A} \cap B}$ 可用模糊集合表示,5 个模糊集 ‘VS’, ‘RS’, ‘M’, ‘RB’, ‘VB’ 分别新增覆盖节点数量相对度“很少”、“较少”、“中等”、“较多”、“很多”,其隶属函数如图 2 所示。

1.2 节点剩余能量相对度的模糊化

FLMA 应用能量模型和维护一跳邻居信息获得节点的局部能量状况。

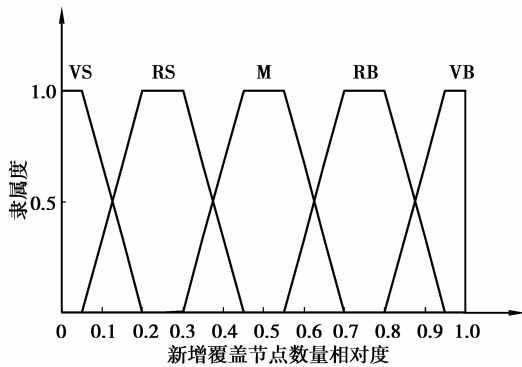


图 2 新增覆盖节点数量相对度隶属度函数

FLMA 采用能量模型计算公式为

$$E = P \times T, \quad (7)$$

其中: P 代表处理分组的功率; T 处理分组的时间, 处理 1 个包所需要的时间为

$$T = 8 \times P_{size}/B, \quad (8)$$

其中 P_{size} 表示分组的大小, B 代表网络的带宽。

由公式(8)可得, 发送和接收 1 个数据分组的能量消耗为

$$E_{TX} = P_{TX} \times 8 \times P_{size}/B, \quad (9)$$

$$E_{RX} = P_{RX} \times 8 \times P_{size}/B, \quad (10)$$

其中 P_{TX}, P_{RX} 分别代表发送和接收时的功率。

1 个节点在网络总能量消耗为

$$E_{CON} = n \times E_{TX} + m \times E_{RX} + E_{SL} + E_{ID}, \quad (11)$$

其中: n 为发送分组的个数; m 为接收分组的个数; E_{SL} 代表节点处于睡眠状态的能量消耗; E_{ID} 表示节点处于侦听状态的能量消耗。

节点接收到数据分组后, 通过能量模型获取自己的剩余能量

$$E_{CURRENT} = E_{INITIAL} - E_{CON}, \quad (12)$$

其中: $E_{INITIAL}$ 代表节点的初始能量; E_{CON} 代表节点的能量消耗。

当节点 A 发送或转发数据分组时, 查询自己的邻居列表, 获取自己邻居节点的最大能量值。设 $N(A)$ 表示节点 A 的邻居节点(不含 A), 节点 A 的邻居节点最大能量值为

$$E_{MAX}(A) = \max\{E_{CURRENT}(U)\}, \quad (13)$$

其中: $U \in V_A$; $E_{CURRENT}(U)$ 代表节点 U 的剩余能量。则节点 B 接收到来自节点 A 的分组后, 比较 $E_{CURRENT}(B)$ 和 $E_{MAX}(A)$ 。如果 $E_{CURRENT}(B) > E_{MAX}(A)$ 则 $E_{MAX}(A) = E_{CURRENT}(B)$ 。如果 $E_{MAX}(A) > 0$, 节点 B 用下面公式计算剩余能量的相对度

$$ER(B) = \frac{E_{CURRENT}(B)}{E_{MAX}(A)}. \quad (14)$$

$ER(B)$ 可用 5 个模糊集 ‘VL’, ‘RL’, ‘M’, ‘RH’, ‘VH’ 表示, 分别代表剩余能量相对度 “很小”、“较小”、“中等”、“较大”、“很大”, 其隶属函数如图 3 所示。

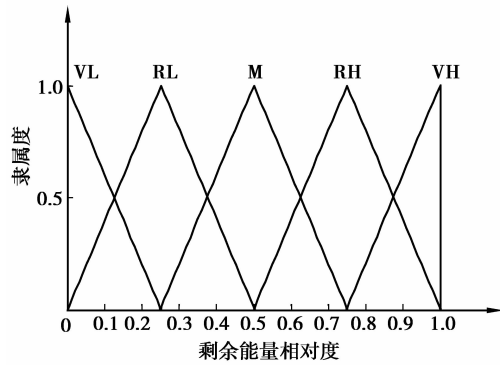


图 3 剩余能量相对度隶属度函数

1.3 模糊推理和解模糊

FLMA 将 $NR_{\bar{A} \cap B}$ 和 $ER(B)$ 作为模糊控制输入变量, 将节点转发分组的延迟时间 T_{delay} 作为模糊控制输出变量。 T_{delay} 可以用 5 个模糊集 ‘VD’, ‘RD’, ‘M’, ‘RG’, ‘VG’ 表示, 分别代表延迟 “很低”、“较低”、“中等”、“较高”、“很高”, 其隶属函数如图 4 所示。

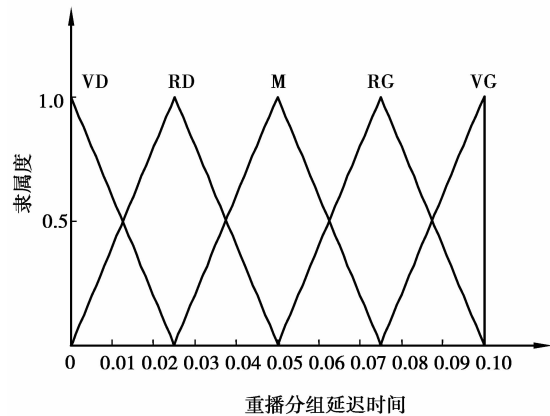


图 4 延迟时间隶属度函数

按照实际经验, 模糊规则设计的标准为: “增加覆盖节点数量相对度大, 剩余能量相对度多, 延迟时间相对少”; “增加覆盖邻居数量相对度少, 剩余能量相对度少, 延迟时间相对长”。根据模糊规则的设计标准, 采用经验归纳法, 建立模糊规则如表 1 所示。

考虑到 Ad Hoc 网络网络拓扑动态变化和计算的复杂度, 采用最简单的最大隶属度法解模糊, 获得节点转发分组的延迟时间 T_{delay} 。为了避免延迟时

间相近的节点重播分组时产生竞争冲突,在解模糊获得 T_{delay} 后,实际重播分组的延迟时间为

$$T_{\text{real}} = T_{\text{delay}} + \sigma \times \text{Rand}[0,1], \quad (15)$$

其中: σ 是一个常数; $\text{Rand}[0,1]$ 表示 0 到 1 之间均匀分布的随机数。

这样就可以使重播分组时,新增覆盖节点数量相对多并且剩余能量相对多的节点优先重播分组。一方面,可以减少转播冗余和竞争冲突发生的概率;另一方面,均衡了网络中的能量消耗,延长网络的生命周期,从而提高了组播的性能。

表 1 模糊规则

模糊集	VB	RB	M	RS	VS
VH	VD	VD	VD	RD	RD
RH	VD	RD	RD	RD	M
M	RD	RD	M	M	RG
RL	M	M	RG	VG	VG
VL	M	RG	RG	VG	VG

2 FLMA 实现

FLMA 通过周期性的发送 hello 消息,维护一跳邻居信息。在 hello 消息中,携带当前节点的剩余能量值、失效时间和一跳邻居列表。邻居信息包括节点 ID、剩余能量、一跳邻居集和失效时间。节点接收到 hello 分组或组播分组后,更新邻居信息。如果失效时间到了,没有收到来自邻居节点的信息或者邻居节点的剩余能量为 0,则将这个邻居从当前节点的邻居集删除。

节点 A 发送组播分组前,通过一跳邻居信息,计算出邻居节点中重播分组新增邻居数量的最大值 $\text{Num}(V_{\bar{A}})$ 和最大邻居节点剩余能量值 $E_{\text{MAX}}(A)$ 并将这 2 个字段连同邻居列表添加到组播分组头中,节点 B 接收到来自 A 的分组后,处理分组关键步骤如下:

步骤 1: 如果节点 B 的剩余能量 $E_{\text{CURRENT}}(B) = 0$, 转步骤 7。如果节点 B 属于组播分组的节点,应用层接收分组,否则转步骤 2。

步骤 2: 如果接收到的分组是重复分组或者分组的 TTL 值为 0 或者节点 B 重播分组新增覆盖节点数量 $\text{Num}(V_{\bar{A} \cap B}) = 0$, 转步骤 7。否则,转步骤 3。

步骤 3: 如果节点 A 已经在节点 B 的邻居列表中,更新邻居节点信息。如果节点 A 不在节点 B 的邻居列表中,就将节点 A 添加到节点 B 的邻居列

表中。

步骤 4: 节点 B 通过来自 A 节点广播分组信息和自身的信息,获取重播分组的新增覆盖节点数量相对度 $NR_{\bar{A} \cap B}$ 和剩余能量相对度 $ER(B)$ 。

步骤 5: 模糊化 $NR_{\bar{A} \cap B}$ 和 $ER(B)$, 通过模糊规则,最大隶属度法,解模糊获得重播分组的延迟时间 T_{delay} 。

步骤 6: 根据步骤公式 (15) 获得的延迟时间 T_{real} , 重播分组。

步骤 7: 丢弃分组。

FLMA 转播示例如图 5 所示,节点 S 广播分组,并将分组的唯一标识(源节点 ID,广播 ID)添加到分组头中。节点 A、B、C 的新增覆盖节点数量较少,剩余能量较小,因而解模糊获得的重播分组的延迟较大,节点 A、B、C 根据延迟时间,设置延迟时间并缓存接收到的广播分组。节点 D 剩余能量大且新增覆盖节点数量多,因而节点 D 优先重播分组。由于节点 G、E 和 F 在 D 的传输范围内,节点 D 重播分组并没有影响分组的到达率。节点 A、B 和 C 在延迟时间内,会收到来自节点 D 的重播分组,这个分组与先前收到的来自节点 S 的广播分组重复,因而节点 A、B 和 C 将分组丢弃,减少了广播冗余、竞争和冲突。节点 A、B 和 C 转发分组的次数减少,能量消耗也就相应的减少,从而延长了网络的生命周期。

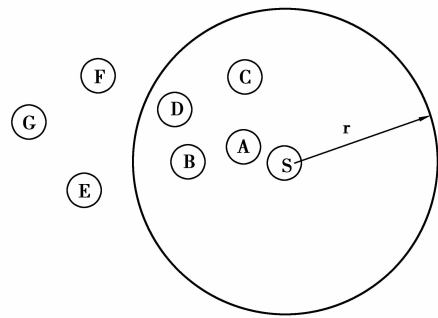


图 5 FLMA 示例

3 仿真实验

3.1 仿真环境

仿真环境是带有 CMU 无线扩展的 NS-2 (version 2.27), 仿真场景为 $1\,500\text{ m} \times 1\,500\text{ m}$, 节点的传输半径为 250 m , 信道容量为 2 Mbit/s , 仿真时间为 200 s , 节点的最大移动速度为 50 m/s , 暂停时间为 100 s . 节点的初始能量为 200 J , 发送功率、接收功率和空闲功率分别为 1.6 、 1.2 和 1.15 W . σ 取

0.002。仿真协议:1)FLMA;2)BCAST^[14]。数据流采用恒定比特流(CBR),数据源(s)的个数为 8 和 4 两种情况,接收节点的个数为 20。仿真实验结果均为 10 次实验的平均值。

3.2 仿真结果

图 6 表明,FLMA 的网络生命周期高于 BCAST 协议。原因是 FLMA 转发分组时,尽可能避免剩余能量小的节点转发分组,平衡了节点的能量消耗,因而延长了网络生命周期。源节点个数多时,网络的生命周期相对小,原因是节点处理分组的个数增加,因而缩短了节点的生存时间。

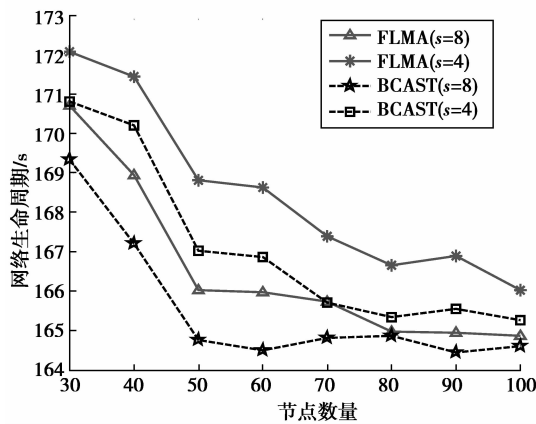


图 6 网络生命周期

图 7 表明,FLMA 的延迟性能好于 BCAST。原因是 FLMA 使重播分组新增覆盖节点数量多的节点优先转播,减少了网络拥塞,降低冲突概率,从而能快速覆盖整个网络。源节点数量多时,延迟增大,原因是网络负载增加,拥塞程度增加。

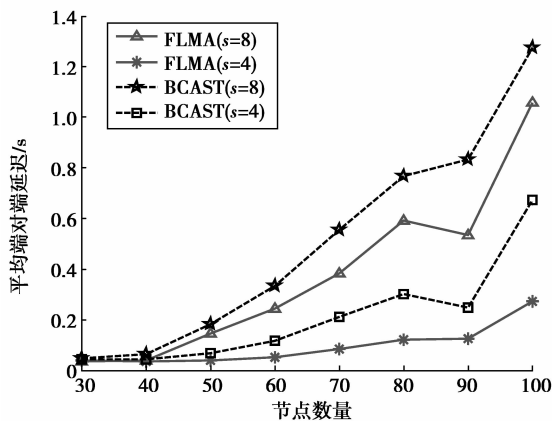


图 7 平均端对端延迟

图 8 表明,FLMA 的平均节点丢包次数好于 BCAST。原因是 FLMA 让重播分组新增覆盖节点数量多的节点优先重播分组,抑制了新增覆盖节点

数量少的节点重播分组冗余分组的传播,减少了每个节点重复接收相同分组的个数和发生冲突的概率。

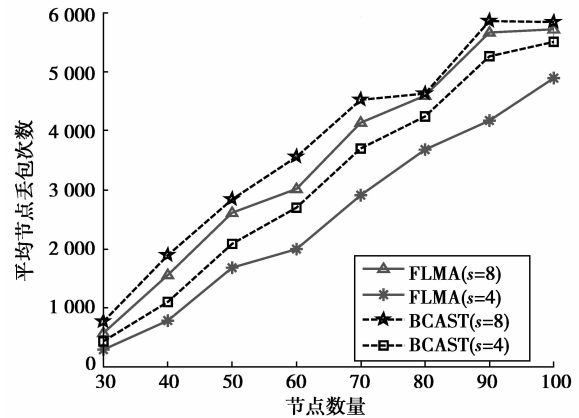


图 8 平均节点丢包次数

图 9 表明,FLMA 的吞吐率好于 BCAST。原因是 FLMA 延长了网络生命周期,增加了接收分组的时间,减少了节点平均丢包率和平均端对端延迟,因而提高了应用层接收分组数量。

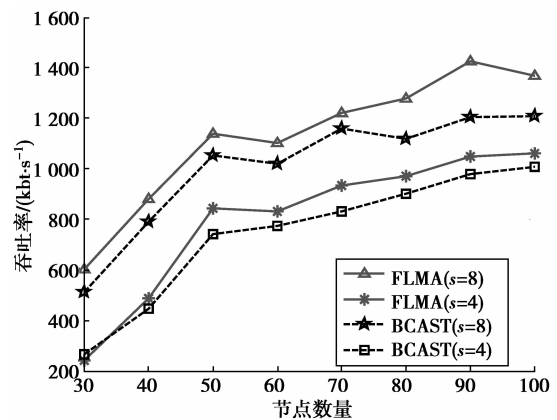


图 9 吞吐率

4 结论

提出了一种新的 Ad Hoc 网络模糊逻辑组播算法(FLMA)。FLMA 采用模糊逻辑获得重播分组的延迟时间,让新增覆盖节点数量相对多并且剩余能量相对大的节点优先重播分组,抑制新增覆盖节点数量相对少并且剩余能量相对小的节点转播分组,从而提高了组播效率。NS-2 仿真实验表明,FLMA 的网络生命周期、平均端对端延迟、平均丢包次数和吞吐率四种指标均明显优于 BCAST,有效地改善 Ad Hoc 网络的组播性能。下一步的工作是

将地理位置信息引入到 FLMA 中,进一步提高算法的性能。

参考文献:

- [1] HANASHI A M, SIDDIQUE A, AWAN I, et al. Performance evaluation of dynamic probabilistic broadcasting for flooding in mobile ad hoc networks [J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2009, 17 (2): 364-375.
- [2] GENC Z, OZKASAP O. EraMobile: Epidemic-Based Reliable and Adaptive Multicast for MANETs [C]// *Proceedings of the 2007 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*. Kowloon: IEEE, 2007:4395-4400.
- [3] RAJU G V, REDDY T B, MURTHY C S R. On supporting robust voice multicasting over Ad hoc wireless networks [C]// *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Communications*. Glasgow: IEEE, 2007:1636-1641.
- [4] 朱斌, 曾孝平, 廖红云, 等. 能量高效与移动预测的路由算法分析 [J]. *重庆大学学报*, 2010, 33 (10): 88-93.
ZHU BIN, ZENG XIAO-PING, LIAO HONG-YUN, et al. On-demand routing algorithm based on load balancing and mobility prediction in wireless mobile Ad hoc network [J]. *Journal of Chongqing University*, 2010, 33 (10): 88-93.
- [5] WANG J, QIN Z, ZHANG J X. Degree and resource-constrained routing algorithm for application layer multicast in ad hoc networks [C] // *Proceedings of the 2010 Sixth International Conference on Networked Computing and Advanced Information Management (NCM)*. Seoul: IEEE, 2010:595-599.
- [6] XIANG X J, WANG X, YANG Y Y. Stateless multicasting in mobile ad hoc networks [J]. *Computers*, 2010, 59 (8): 1076-1090.
- [7] LUO Y H, WANG J X, GUI W H. A distributed algorithm for refining energy-efficiency of multicast trees in wireless Ad hoc networks [C] // *Proceedings of the 2010 International Conference on Communications and Mobile Computing (CMC)*. Shenzhen: IEEE, 2010:203-208.
- [8] HE Y F, LEE I, GUAN L. Optimized video multicasting over wireless Ad hoc networks using distributed algorithm [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2009, 19 (6): 796-807.
- [9] VAISHAMPAYAN R, GARCIA-LUNA-ACEVES J. Efficient and robust multicast routing in mobile ad hoc networks [C] // *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems*. Fort Lauderdale: IEEE, 2004:304-313.
- [10] LUO Y H, WANG J X, GUI W H. A distributed algorithm for building energy-efficient group-shared multicast tree in Ad hoc networks [C] // *Proceedings of the 2010 Second International Conference on Networks Security Wireless Communications and Trusted Computing (NSWCTC)*. Wuhan: IEEE, 2010: 341-344.
- [11] PENG J, SIKDAR B, CHENG L. Multicasting with localized control in wireless Ad hoc networks [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2009, 8 (1): 52-64.
- [12] MANGAI S, TAMILARASI A, VENKATESH C. Dynamic core multicast routing protocol implementation using ANT colony optimization in ad hoc wireless networks [C] // *Proceedings of the 2008 International Conference on Computing, Communication and Networking*. St. Thomas: IEEE Press, 2008:1-5.
- [13] YU Y, ZHANG Q, SIDAN D. Mobility-aware multicast over mobile ad hoc networks [C] // *Proceedings of the ISECS International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management*. Sanya: IEEE, 2009:119-122.
- [14] KUNZ T. Multicasting in mobile ad-hoc networks: achieving high packet delivery ratios [C] // *Proceedings of the 2003 conference of the Centre for Advanced Studies on Collaborative research*. Toronto, Ontario, Canada: IBM Press, 2003:156-170.
- [15] ALAHDAL T, SUBRAMANIAM S, OTHMAN M, et al. An adaptive reliable multicast protocol in ad hoc networks [C] // *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Telecommunications and Malaysia International Conference on Communications*. Penang: IEEE, 2007:68-74.

(编辑 侯湘)