

# 一种跨层协助的 Ad hoc 无线网络广播策略<sup>\*</sup>

卢先领<sup>1,2</sup> 于继明<sup>1</sup> 周 灵<sup>1</sup> 孙亚民<sup>1</sup>

(南京理工大学计算机科学与技术学院 南京 210094)<sup>1</sup> (江南大学通信与控制工程学院 无锡 214112)<sup>2</sup>

**摘 要** 在 Ad hoc 无线网络中,对全网范围进行广播有着广泛的应用。而 Ad hoc 网络节点资源、网络资源严重受限,广播引起的广播风暴问题加剧了资源的消耗。本文提出一种跨层协助的广播策略,该策略利用一跳邻节点的信息和物理层、数据链路层的信息统一在 MAC 设置退避时间,并根据发送节点密度自适应调整退避的时间,减少转播冗余、冲突发生的概率和延迟,确保了广播的可达性。仿真结果也表明提高了广播的效率。

**关键词** Ad hoc 无线网络,跨层设计,泛洪广播,冗余广播

## A Cross Layer Assisted Broadcasting Strategy for Ad hoc Wireless Networks

LU Xian-Ling<sup>1,2</sup> YU Ji-Ming<sup>1</sup> ZHOU Ling<sup>1</sup> SUN Ya-Ming<sup>1</sup>

(School of Computer Science and Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094)<sup>1</sup>

(School of Communication and Control Engineering, Southern Yangtze University, Wuxi 214122)<sup>2</sup>

**Abstract** Broadcasting is a common operation in Ad hoc wireless networks with severe resource constraints. The problem of broadcasting storm aggravated the resource consumption in Ad hoc networks. We propose a cross layer assisted broadcasting strategy for Ad hoc networks which is made use of 1-hop neighbor knowledge to decide to rebroadcast, and information of physical layer and MAC layer to differentiate time of rebroadcast at MAC layer. The different time of rebroadcast is adjusted adaptively by the density of transmitter node. Analyses and simulations have shown that the strategy has fewer redundant rebroadcast, higher reachability and lower delay.

**Keywords** Ad hoc wireless network, Cross layer design, Flooding, Redundant rebroadcast

## 1 引言

随着 Internet、无线通信技术的发展,Ad hoc 无线网络技术越来越受到人们的重视。Ad hoc 无线网络是由众多的无线移动节点组成,这些节点不需要无线网络基础设施的支持,自发地以多跳的方式快速地建立通信联系,组织成为一个临时的网络。在 Ad hoc 无线网络中,节点间相互协作,采用分布式算法控制网络行为,共同完成用户的任务<sup>[1,2]</sup>。

广播是 Ad hoc 无线网络最有效的通信方式之一,它将信息从网络中源节点发送给网络中的每一个节点,可以实现 Ad hoc 无线网络的控制、时间同步、路由建立与维护、资源分配与管理等<sup>[3,4]</sup>。然而,广播会引起网络的拥塞、信道的竞争和数据冲突<sup>[3,4]</sup>,从而降低网络的性能,因而设计优化广播算法有着现实意义。

为了提高广播的效率,近来人们对 Ad hoc 无线网络中的广播技术进行了广泛的研究。Ad hoc 无线网络环境、无线信道多变,造成网络拓扑多变。此外,节点的移动性以及节点的加入和退出,加剧了网络拓扑的变化。因而,与其它的无线网络相比,对全网范围进行广播有着更广泛的应用。在 Ad hoc 无线网络中,最简单的广播策略是泛洪(Flooding),每个节点将其收到的广播分组转播给所有的邻居节点<sup>[3~6]</sup>。这种策略可以保证广播信息被传递到网络中的每个节点。但由于转发过多冗余分组,给网络带来突发的传输负荷,占用大量的网络资源,形成“广播风暴”问题。

文[3,4]对泛洪广播方法进行了改进,提出了基于概率、

基于计数、基于距离等的广播策略。基于概率的方法与泛洪的方法类似,只不过每个节点事先给出了转播的概率。基于计数的方式是节点收到新的广播分组后,该分组可能由于信道忙等原因而被阻塞。而该分组未发送之前,如果该节点收到超过门限 C 个同样的广播分组,则取消自己的再广播。基于距离的广播方法是设置门限距离 R,只有超过距离 R 的节点才可以转播分组。文[7]在文[3,4]的基础上进行了改进,根据网络的环境状况,自适应调节门限值,进一步提高了广播的效率。这些策略在网络节点密度较高的情况下,减少了冗余分组的转播,但是这些方法可能会丢弃一些非冗余的广播分组,无法保证广播分组的可达性。

为了高效地进行全网广播,减少冗余转播的次数,另一类广播策略是将广播分组的传输限定在源节点和转发节点形成的广播树中进行(网络中的其余节点与广播树相邻),这样广播问题就转化为寻找最小的广播树的问题。而构建最小广播树被证明是 NP-complete 问题<sup>[8]</sup>,不少学者通过启发式算法得到近似的最小广播树<sup>[9~12]</sup>。文[9]提出了“自我剪枝”(SP: self pruning Algorithm)和“支配剪枝”(DP: dominant pruning Algorithm)两种算法。自我剪枝算法是利用节点的一跳邻节点的信息来决定是否转播;节点 v 收到节点 u 的转发包后,查看自身的邻节点是否包含在节点 u 的邻节点中。如果是,则将分组直接抛弃,否则进行转播。这种方法减少了冗余转播,但相邻节点间的竞争较大。“支配剪枝”算法是基于构建最小转播节点子集的一种方法,发送节点利用节点的二跳邻节点的覆盖信息来选择进行转播的节点。文[10]在“支配剪枝”算

<sup>\*</sup> 本文受江南大学青年学术基金资助。卢先领 博士生,讲师,主要研究领域为无线自组织网络、传感器网络、计算机网络通信与优化;于继明 博士生,讲师;周 灵 博士生,讲师;孙亚民 教授,博士生导师,主要研究领域为计算机网络通信,网络算法与协议。

法的基础上提出了“整个支配剪枝(TDP)”算法和“部分支配剪枝(PDP)”算法,进一步减少了支配集的所需覆盖的范围,减少冗余数据的转播,提高了广播的效率。与此类似,文[11,12]也利用邻节点的信息减少转播冗余。这类方法虽然大大减少了转播冗余,增加了广播分组的可达性,但是被选择节点的状态难以控制(可能被选择的节点处于失效的状态),数据广播的延迟也较大,需要较大的计算消耗,增加了系统资源的消费。

现有的这些广播路由算法虽然减少了信道的竞争、数据冲突的发生,但是没有充分考虑网络中的各层信息的综合运用。本文提出了一种跨层协助的广播算法 CLBA(Cross layer broadcasting Algorithm),该算法通过提取物理层和 MAC 层的功率信息,为网络的广播提供决策依据,从而提高 Ad hoc 无线网络广播的效率。

本文主要的工作是:从快速加大广播的覆盖范围、减少信息的不必要的转播和减少转播的信道竞争为出发点,利用一跳邻节点的信息决定是否转播;利用物理层和数据链路层的信息,在 MAC 层统一设置退避时间,并根据发送节点的密度自适应调节网络层的退避时间,减少广播冲突和时延,确保广播的可达性,从而提高广播通信的效率。

## 2 跨层协作的广播策略

### 2.1 预备知识

Ad hoc 无线网络可看作一个简单连通的无向图  $G(V, E)$ ,其中  $V$  代表网络中的节点, $E$  代表连接两个节点的边, $G$  中任意两个节点之间至多只有一条边,且各节点是无自圈的,并满足  $E \subseteq V^2$ 。如果边  $(u, v) \in E$ ,则节点  $u$  与  $v$  可以互相通信。 $R$  是节点  $V$  的最大通信距离, $d(u, v)$  表示两节点之间的距离,则:

$$E = \{(u, v) \in V^2 \mid d(u, v) \leq R\}$$

**定义 1** 邻节点:若节点  $x, y$  是  $G$  中的节点, $x, y$  在分别在对方有效的通信范围之内且可以互相通信,即  $\langle x, y \mid x \in G, y \in G, \text{且} (x, y) \in E \rangle$ ,则称  $x, y$  互为邻节点,这里认为链路是双向的。

**定义 2**  $N(A)$  表示与节点  $A$  的相邻节点的集合,  $N(A) = \{v \mid (A, v) \in E\}$ 。

**定义 3** 节点的密度:为简单起见,我们用该节点的度(即该节点相邻节点数表示节点的密度)节点  $i$  的度记作:  $d_i(t)$ 。由于 Ad hoc 无线网络拓扑不断变化,因而节点的密度是时间的函数。

由于节点的移动性、节点可能在活动与休眠两种状态之间转化,因而网络的拓扑随着时间的变化不断变化,每个节点通过定期地发送“Hello”信息告知周围节点它的存在以及更新其邻居节点的信息,并通过连续接收到“Hello”信息的次数判断链路的状态和邻节点的连通性,从而得出节点的密度信息。在本文中我们假设网络是连通的,任意两个节点之间都有一条通路,网络中的广播分组都不会因为链路的问题而无法正确接收,节点在执行 CLBA 广播算法时已经建立一跳邻节点的信息表。

### 2.2 信号的衰减模型

节点发射的信号随着距离的增加不断衰减,文[13]给出了经验公式:

$$Pr(d) = Pt * K \left( \frac{\lambda_c}{4\pi d} \right)^\alpha \quad (1)$$

其中  $Pr$ :接收功率,  $Pt$ :发射功率,  $K$ :常数,  $\lambda_c$ :波长,  $d$ :发射节点与接收节点的距离。 $\alpha$ :根据环境的变化  $\alpha$  取 1~4 之间,一般情况下取 2。

从公式(1)中可知,只要发射功率和接收功率已知,可大概估算出两节点间的距离。

在 Ad hoc 无线网络中,不同的接收功率对应着不同的距离,节点接收到信号的功率越低,则表明其离发射节点越远。实验表明,离发送节点越远的接收节点,其进行再广播的所能额外覆盖的面积越大<sup>[3,14]</sup>。因此,根据节点离发送节点的远近设置不同的转播优先级,离发送节点越远的节点优先级越高,一方面可以快速将要广播的信息覆盖整个网络,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;另一方面,按照接收到信号的大小合理地设置不同转播延迟时间,可以减少节点间的信道接入冲突。节点在延迟时间段内,如果其所有邻节点也收到相同的分组,还可以放弃该分组的转播,减少冗余转播的数量。

我们将接收信号的功率分为 0~N 级,不同的接收功率区间对应着不同的等级,接收到的信号功率越低则等级越小。等级越小,表明离发送节点越远,其转播的优先级越高。0 级表示边界节点, N 级表示发送节点,边界节点的  $SINR = r$ , 边界以内的节点的  $SINR > r$ , 边界以外的节点的  $SINR < r$ ,  $r$  为  $SINR$  的临界值。根据节点接收功率大小设置不同的转播优先级,可以有效避免不同等级的节点间的广播冲突。如图 1 所示,节点 A 广播了分组 n, 只有其邻节点 B、C、D、E、F、G、H 收到该广播分组 n。节点 E、F、G、H 收到的数据信息的功率在同一区间内,因而它们的等级相同。同理,节点 C、D 的等级也相同。显然,节点 E、F、G、H 接收到分组 n 的信号功率低于节点 C、D 接收到分组 n 的信号功率,因此节点 E、F、G、H 具有较高的转播优先级,转播时延少于节点 C、D 的时延。同理,节点 C、D 的优先级高于节点 B。

根据信道的衰减模型,按照各节点接收信号的功率大小来决定节点的转播时延如下:

$$T = f(Pr) * CW * \lceil \log_2 [d_i(t) + 1] \rceil + Rand[0, \sim CW * \lceil \log_2 (d_i(t) + 1) \rceil - 1] \quad (2)$$

$Pr$ : 节点接收到的分组的功率,  $f(Pr)$  为接收功率  $Pr$  对应的等级;

$d_i(t)$  为发送节点的密度;

$CW$ : 一个时间片的时间;

$\lceil \log_2 [d_i(t) + 1] \rceil$ : 每个等级节点转播延迟时间片数。时间片数根据发送节点的密度来设置,节点的密度越高,则延迟时间片越多,  $\lceil \cdot \rceil$  为取整运算;  $Rand()$  为随机决定的退避时间片数;

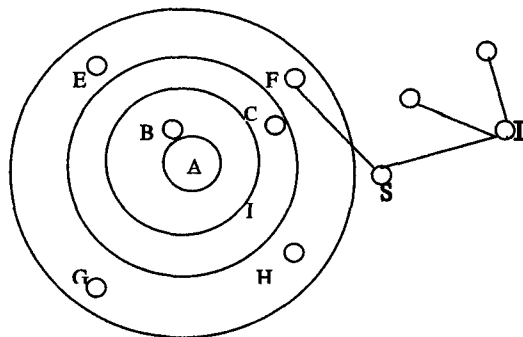


图 1 不同等级的节点

按照公式(2),不同等级的节点有着不同的转播延迟,避免了相互竞争信道的发生。为了避免相同等级节点间的互相竞争,相同等级的节点随机再选择若干时间片进行退避,大大减少了数据冲突的可能性。

### 2.3 跨层协作的广播的算法(CLBA)

信道不空闲时或广播产生的速率较大时,广播分组在路由层进行一次随机退避后在MAC层还要进行退避。文[15]证明了在MAC层统一进行退避能够进一步减少广播冲突的概率,因此我们的CLBA广播算法也需适当修改MAC层,网络层将退避时间和广播分组传给MAC层,统一在MAC层进行退避。在CLBA广播算法中,当一个节点接收到一个新的广播分组,退避的过程中可能会多次收到相同的广播分组。如果该节点的邻节点都已经接收到这个同样的广播分组,则取消该分组的转播。这样,既保证广播的可达性,又可减少冗余广播的数量。

该算法的具体流程如下:

- (1)如果是源节点,则向其所有的邻节点广播分组,并丢弃今后传来的重复分组。
- (2)对于非源节点,假设节点U从节点V收到分组m,
  - a)  $N(U) \subseteq N(V) \cup \{V\}$  则丢弃该分组,转g;
  - b)如果是第一次接收到该分组m,按照公式(2)确定退避时间,并将该分组和退避时间参数传给MAC层,在MAC层统一进行退避,同时记  $C(\mu, m) = N(V) \cup \{V\}$ ;
  - c)如果在退避的过程中收到相同的分组m,则丢弃分组m,更新  $C(\mu, m) = C(\mu, m) \cup N(V) \cup \{V\}$ ;
  - d)如果退避时间结束,  $N(U) \subseteq C(U, m)$  则通知MAC层丢弃该分组m,转g;
  - e)如果信道空闲,则转播该分组m;转g;
  - f)如果信道依旧忙,则根据第一次接收到分组m的信号大小重新设置退避时间,然后重复执行c、d、e、f;
  - g)如果再收到的重复分组m,将其丢弃。

### 3 CLBA 广播算法正确性证明

由2.1假设可知网络中无孤立节点,无信号的不可靠传输,因此下面的定理1确保上面的CLBA广播算法正确。

**定理1** 对于任一简单连通的无向图  $G(V, E)$ , 执行CLBA广播算法后,除源节点外,每个节点至少收到广播分组m一次。

我们采用反证法对CLBA广播算法的正确性进行证明。

**证明:**假设网络中有任一节点s没有收到源节点A的广播分组m,如图1所示,由前面的假设可知,如果节点s没有收到广播分组m,只能是节点F在执行CLBA广播算法时没有转播分组m。由图1可知,节点F收到节点A的广播分组m后,由于  $s \notin N(A), s \in N(F)$ , 所以  $N(F) \not\subseteq N(A) \cup \{A\}$ , 又因为  $C(F, m) = N(A) \cup \{A\}$ , 所以  $N(F) \not\subseteq C(F, m)$ , 因而节点F需转播分组m, 节点s一定可以收到分组m, 这与假设矛盾。所以网络中任意节点都可以收到广播分组。

### 4 仿真结果和分析

本文在OPNET上实现了flooding算法、基于距离的广播的算法(DBS)、SP算法和CLBA算法,仿真实验主要是对比这四种不同算法在相同的环境下,不同的网络规模和不同的分组到达间隔对广播性能的影响。仿真的节点是分布在二维平面内,其主要参数如表1。

表1 仿真参数

仿真范围	300m×300m	分组长度	64字节
节点传输距离R	100m	时间片	25微秒
无线带宽	1M bps	仿真时间	1000秒

广播性能包括可达性、平均时延、平均转播率。

可达性:接收到广播节点数/网络总节点数;

平均延迟:最后一个节点收到广播信息的时刻减去源节点开始广播信息的时刻/网络总节点数;

平均转播率:一次广播引起全网转播的次数/网络总节点数;该参数越小,说明冗余转播越小。

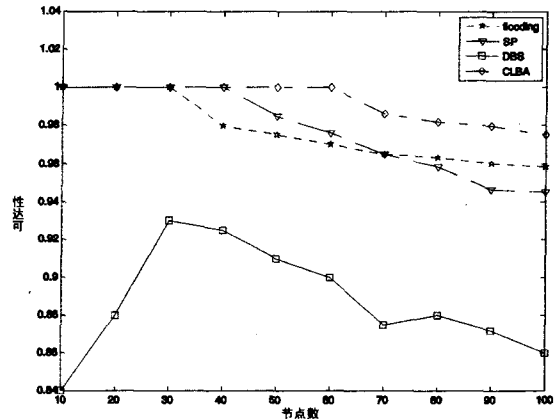


图2 节点数 vs 可达性

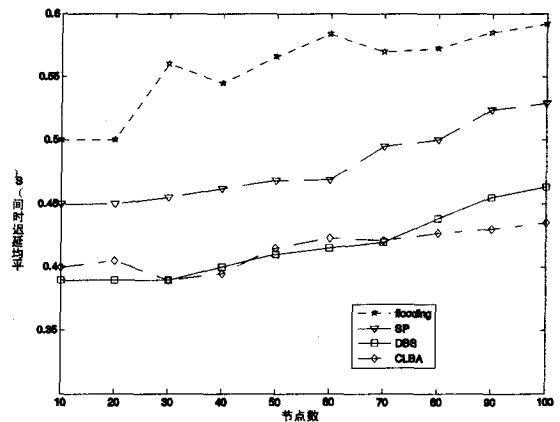


图3 节点数 vs 延迟时间

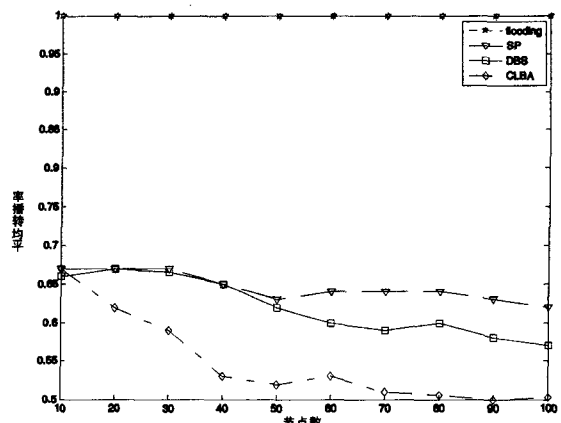


图4 节点数 vs 平均转播率

图2~图4显示了分组到达间隔为0.5s时(中等业务量)

不同的节点数对网络的可达性、平均延迟、平均转播率等指标的影响。随着节点数的增加,节点的邻节点也增加,网络中的冲突也增加,网络的可达性也降低,延迟增加,平均转播率减少。但是 CLBA 算法与其他的相比,由于其能根据接收到的信号大小确定各自的转播延迟,并根据节点的密度自适应调整转播延迟,因而数据冲突的几率较小,再加上它利用了节点邻节点的信息,故其可达性较高,且变化较小。CLBA 算法中离发送节点远的边界节点优先转播,从而能快速覆盖整个网络,所以平均延迟时间也较 flooding、SP 算法短。与基于距离的广播算法(DBS)相近,当随着网络规模进一步增大,其性能优于 DBS 算法。CLBA 算法利用了一跳邻节点的信息,当其所有邻节点收到广播分组后,取消该节点的转播,减少了平均转播率,因此平均转播率较其它算法低。

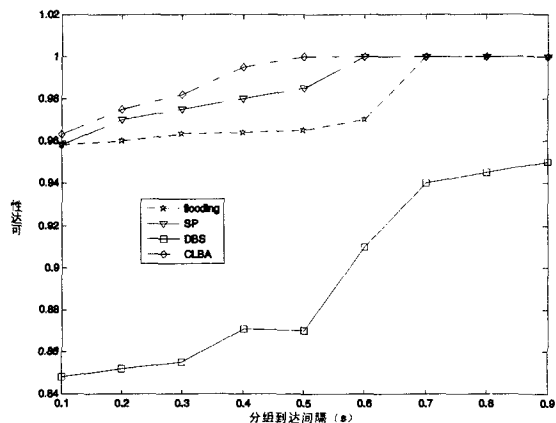


图5 分组到达间隔 vs 可达性

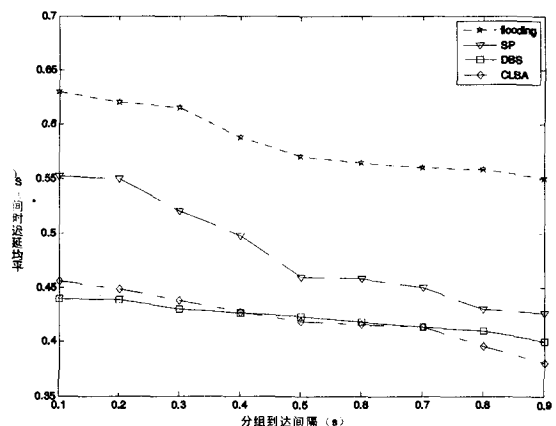


图6 分组到达间隔 vs 平均延迟时间

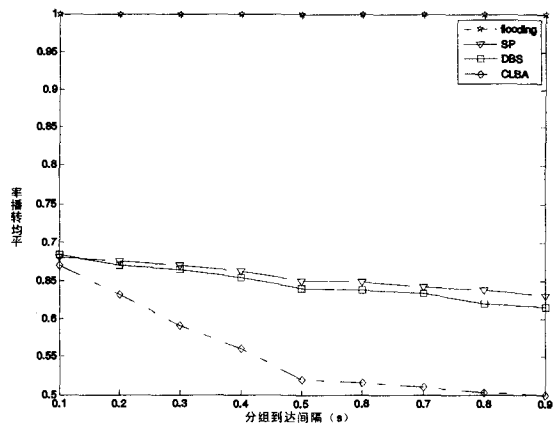


图7 分组到达间隔 vs 平均转播率

图5~图7显示了节点数为50时不同的分组到达间隔对网络的可达性、平均延迟、平均转播率等指标的影响。随着分组到达间隔的增加,网络的业务量下降,网络中的冲突也不断减少,可达性增加,平均延迟、平均转播率减少。CLBA 算法也明显优于其它算法。

**结论** 本文提出了一种跨层协助的广播策略,该策略主要有三个优点:(1)利用接收到的分组的信号功率确定转播的退避时间,赋予边界节点较高转播优先级,减少了冲突的概率,加快了广播数据信息的覆盖的速度;(2)利用发送节点的密度信息自适应调整转播退避时延,减少了广播的平均时延;(3)利用周围一跳邻节点的信息,减少冗余分组的转播,提高了可达性。仿真结果表明,该策略能够有效地改善 Ad hoc 无线网络的广播的性能。在今后的工作中,在退避时间的设置过程中考虑节点的位置信息,进一步减少退避的时延。

参考文献

- 1 Chlamtac I, Conti M, Liu J. Mobile Ad Hoc Networking: Imperatives and Challenges [J]. Ad Hoc Networks, 2003, 1(1): 13~64
- 2 Corson M S, Macker J P, Cirincione G H. Internet-based Mobile Ad Hoc Networking [J]. IEEE Internet Computing, July 1999, 3(4): 63~70
- 3 Ni S Y, Tseng Y C, Chen Y S, et al. The broadcast storm problem in a mobile ad hoc network [C]. In: Proc. MOBICOM, Seattle, Aug 1999. 151~162
- 4 Tseng Y C, Ni S Y, Chen Y S, et al. The broadcast storm problem in a mobile Ad Hoc network [J]. Wireless Networks, 2002, (8): 153~167
- 5 Ho C, Obraczka K, Tsudik G, et al. Flooding for reliable multicast in multi-hop ad hoc networks [C]. In: Proceedings of the International Workshop on Discrete Algorithms and Methods for Mobile Computing and Communication (DIALM), 1999. 64~71
- 6 Jetcheva J, Hu Y, Maltz D, et al. A simple protocol for multicast and broadcast in mobile ad hoc networks. Internet Draft: draft-ietf-manet-simple-mbcast-01.txt, July 2001
- 7 Lim H, Kim C. Flooding in wireless ad hoc networks. Computer Communications Journal, 2001, 24(3-4): 353~363
- 8 Tseng Y-C, Ni S-Y, Chen Y-S. Adaptive approaches to relieving broadcast storms in a wireless multihop mobile ad hoc network [J]. IEEE Trans on Computer, 2003, 52(5): 545~557
- 9 Lim H, Kim C. Flooding in wireless ad hoc networks [J]. Computer Communication, Feb. 2001. 24(3-4), 353~363
- 10 Lou Wei, Wu Jie. On Reducing Broadcast Redundancy in Ad Hoc Wireless Networks [C]. In: Proceedings of the 36th Hawaii International Conference on System Sciences, 2003
- 11 Peng W, Lu X. AHBP: An efficient broadcast protocol for mobile ad hoc networks [J]. Journal of Science and Technology, Beijing, China, 2002
- 12 Qayyum A, Viennot L, Laouti A. Multipoint relay: An efficient technique for flooding in mobile wireless networks: [research report]. RR-3898. INRIA, 2000
- 13 Stuber G L. Principles of Mobile Communications. Kluwer Academic Publishers, 1996
- 14 Cartigny J, Simplot D. Border node retransmission based probabilistic broadcast protocols in ad-hoc networks [C]. In: Ralph Sed Proc of the 36th Annual Hawaii Int'l Conf on System Sciences (HICSS 2003). New York: IEEE Press, 2003. 303~313
- 15 邹仕洪, 邬海涛, 程时瑞. 一种移动自组网中简单高效的广播算法 [J]. 软件学报, 2005, 16(6): 1104~1111