

带有带宽感知的自适应转发节点集合建立机制^①

吴大鹏^② 武穆清 甄 岩 张晓静

(北京邮电大学宽带通信网实验室 北京 100876)

摘 要 研究了多点中继(MPR)集合建立机制对移动自组织网络(MANET)性能的影响,提出了一种基于可用带宽感知的集合建立方法,其特点是节点在MPR集合计算过程中自适应地为两跳邻居选择可用带宽较大的中继节点,降低节点拥塞程度,而算法的复杂度与原有算法的复杂度相同。仿真结果表明,虽然MPR集合平均元素数量和广播数据包数量略有增加,但是通过文中提出的转发节点集合建立方法,网络中的分组投递率以及端到端延迟性能得到了明显改善,此外该机制还能够根据网络当前状态实时调整,更加适应状态时变的网络特性。

关键词 移动 Ad Hoc 网络, 多点中继(MPR), 可用带宽, 竞争窗口

0 引 言

移动自组织网络(mobile Ad Hoc network, MANET)的路由协议、时间同步算法以及其它相关操作需要在全网范围内进行广播,广播策略将直接影响到MANET的性能。MANET中最直接的广播方法为简单泛洪,用这种方法,任何节点在接收到新的广播分组后均将其向传输范围内的邻居节点转发,同时丢弃已经接收过的广播分组。这种方法引入了大量不必要的分组重复转发,不仅会引发广播风暴现象^[1],还将浪费节点能量,使得网络出现拥塞。

高效的广播策略要求用尽可能少的重复广播来覆盖网络中的所有节点,诸多文献从不同角度给出了一系列算法,文献[2]将其概括为基于概率预测的泛洪策略、基于区域的优化泛洪策略以及基于邻居信息的优化泛洪策略等。其中基于邻居信息的优化泛洪策略利用节点周围多跳拓扑信息建立局部最优的覆盖节点集合,即连通支配集(connected dominating set, CDS)。以该集合中的元素作为广播分组转发节点能有效减少重广播次数,但是用局部拓扑信息分布式地构造最小连通支配集是 NP-C 问题,只能获得近似解^[3]。

研究人员将基于邻居信息的优化广播算法进一步划分为自裁减^[4,5]和邻居指派^[6,7]两种策略。在采用自裁减广播策略的网络中,节点根据邻居节点

的连接状况和优先级来决定本节点作为转发节点或非转发节点;在采用邻居指派广播策略的网络中,节点的转发状态由其邻居节点即时指定。上述两种策略均能构造具有局部生成特征的 CDS。Dai 等人^[4]的研究表明,通用的自裁减广播策略能在有效减少 CDS 规模的同时保证数据传输的可靠性,但由于具有较高的算法复杂度,使其无法适应动态性较强且对转发响应要求较高的应用场合。邻居节点指派策略能够随广播过程即时构建 CDS,文献[8]提出了基于贪婪策略的多点中继(multipoint relay, MPR)集合建立算法,广播源节点在其候选邻居节点中选择转发节点,以覆盖从源节点出发两跳范围内的所有节点。与传统的有线网络不同,MANET 的可用带宽资源受到多个方面因素的影响,其中主要包括信道利用情况、帧间碰撞以及节点回退过程,此外,节点捕获信道之后将采用最大传输速率发送数据,共享无线媒介的多个节点在时间域上交替使用有限的无线资源,节点可用带宽表现为在某段时间内该节点的转发能力,随网络环境动态改变,因此单纯采用节点度数作为选择标准,进而建立最小 MPR 集合的方式并不能够适应动态变化的网络环境。

本文提出了一种新的 MPR 节点集合选择方法,该方法综合考虑了节点度数以及可用带宽两个约束条件,实时自适应地为广播源节点选择转发能力较强的节点建立 MPR 集合,进而在多个节点之间有效

① 国家自然科学基金(60772109)资助项目。

② 男,1979年生,博士生;研究方向:无线多跳网络,互联网服务质量控制;联系人, E-mail: wudapengphd@gmail.com
(收稿日期:2008-05-22)

地交换网络状态信息以建立源节点到目的节点的路径。虽然,采用这种方式将会增加 MPR 集合中的元素数量,但是通过合理选择中继节点,分组丢弃率和平均端到端延迟都会得到有效的降低。

1 可用带宽估计方法

如前所述,可用带宽主要受信道利用情况、帧间碰撞以及节点回退过程这三个因素的影响。这部分分别采用信道监测机制和碰撞预测方法估计信道利用情况以及数据帧碰撞概率,结合所记录的回退过程历史数据,节点采用被动式方法估计可用带宽。

1.1 信道监测机制

根据虚拟载波监听机制,节点在竞争信道的过程中将其需要占用信道的时间放入控制帧中进行广播,监听到该信息的节点按照其中的占用时间字段设置网络分配向量(network allocation vector, NAV)以预留信道;另外,节点在各种帧间间隔内不能发送数据,因此监听到请求发送(RTS)的节点通过 NAV 信息能够获知信道不可用时间为

$$T_d = T_{RTS} + NAV_{RTS} + T_{DIFS} + T_{回退} \quad (1)$$

其中 DIFS 指 DCF interframe space,即 DCF 帧间间隔,而 DCF 指分布式协调功能(distributed coordination function)。

可见,采用虚拟载波监听机制来监听信道的节点,通过 NAV 信息能够获得 $T_{回退}$ 以外的全部信息,也就是说,通过累计 NAV 持续时间,节点可以获知特定时间段内信道利用情况。

无线链路具有非对称特性,相同链路上的两个节点对信道的监测结果并不相同,文中采用多个节点协同工作的方式来降低无线链路非对称性对估计结果的影响。节点将包含 NAV 持续时间(NAV duration)的字段加入到 Hello 消息中进行广播,带宽估计节点能够根据所收集信息计算信道利用情况。此种方法并没有在网络中引入新的控制包,只是将 Hello 包长度增加 32 位。

1.2 数据帧碰撞预测

分布式协调功能(DCF)允许兼容的物理层之间通过使用避免冲突的载波检测多路访问(carrier sense multiple access with collision avoidance, CSMA/CA)来自动访问媒介。若数据帧发生碰撞,则节点将竞争窗口(contention window, CW)加倍,直至到达最大竞争窗口 CW_{max} ,显然竞争窗口能够准确地反映节点处的碰撞情况。节点发送数据帧过程可按照

式

$$P(X = k) = \begin{cases} p_c^k(1 - p_c), & k \leq R_L \\ p_c^k, & k = R_L + 1 \\ 0, & k > R_L + 1 \end{cases} \quad (2)$$

表示,其中 p_c 为数据帧发生碰撞的概率, X 为碰撞次数, R_L 为协议中预先设定的最大重传次数,满足条件 $CW_{max} = 2^{R_L} \times CW_{min}$ 。

节点竞争窗口与碰撞概率之间的关系可以按照式

$$\begin{aligned} \overline{W}_c &= (1 - p_c) \times CW_{min} + p_c(1 - p_c) \times 2CW_{min} + \dots \\ &\quad + p_c^k(1 - p_c) \times 2^k CW_{min} + p_c^{R_L+1} \times 2^{R_L} CW_{min} \\ &= \frac{(1 - p_c)(2p_c)^{R_L+2} + 2^{R_L+1}(1 - 2p_c)p_c^{R_L+1}}{1 - 2p_c} \times CW_{min} \\ &\quad + \frac{1 - p_c}{1 - 2p_c} \times CW_{min} \end{aligned} \quad (3)$$

表示,其中 CW_{min} 为竞争窗口最小值,式(3)中 $(1 - p_c) \times (2p_c)^{R_L+2}$ 和 $2^{R_L+1} \times (1 - 2p_c) \times p_c^{R_L+1}$ 两项较小,在具体计算过程中将其忽略。节点可以直接利用本地监测的平均竞争窗口大小 $\overline{W}_c$ 以及 CW_{min} 预测碰撞概率 p_c ,公式如下:

$$p_c = \frac{\overline{W}_c - CW_{min}}{2 \times \overline{W}_c - CW_{min}} \quad (4)$$

数据帧平均重传次数可按式

$$\begin{aligned} n &= \sum_{k=1}^{\infty} k \times P(X = k) \\ &= \sum_{k=1}^{R_L} k \times P(X = k) \\ &= \sum_{k=1}^{R_L} k \times p_c^k(1 - p_c) + (R_L + 1) \times p_c^{R_L+1} \end{aligned} \quad (5)$$

计算。

需要重传的数据帧将被作为新的数据帧重新接入信道,因此,在带宽估计过程中需考虑重传数据帧的影响,若令 N_p 为监测时间段内业务所产生的数据帧数量,则信道上需要传输的数据帧数量为

$$N_s = N_p + p_c \times N_p \times n \quad (6)$$

通过上述过程,节点可以根据平均竞争窗口大小感知传输过程中链路上发生的碰撞情况,进而预测需要重传的数据帧数量。

1.3 可用带宽估计机制

节点接入信道过程中,若当前媒介状态为繁忙,则节点生成随机退避时间以推迟发送。回退时间由伪随机数产生,并且在回退过程中,节点也依然需要

调用载波监听机制判定信道状态,若信道处于繁忙状态,则挂起回退过程,可见节点回退状态带有较强的随机性,难以准确估计。本文选择对历史数据取均值的方式获得节点回退时间参数。

网络中各个节点均记录本节点在监测时间内的回退持续时间和回退次数,带宽估计节点收集其邻居节点广播的 Hello 包,并且从该包中获得 NAV 信息,得到监测时间段内信道处于繁忙状态的总时间。根据可用带宽定义,可以得到如下可用带宽的表达式:

$$B = \frac{T_M - \sum_{i=1}^{N_s} (NAV_i + T_{DIFS} + T_{RTS}) - T_{回退}}{T_M} \times C \quad (7)$$

其中 C 为链路数据速率, $T_{回退}$ 为监测时间段内回退时间。

2 转发节点集合选择机制

MANET 中的表驱动路由协议需要通过周期性地交换消息来维护节点本地的网络拓扑消息,其路由建立过程可以由节点根据本地维持的路由表直接完成,开销较小,因此,广播源节点需要通过有效地选取转发节点集合来降低控制开销对网络当前所承载数据的影响。虽然现有的多点中继(MPR)选择算法能够在较短的时间内找到相对较小的节点集合,但是由于其不考虑当前网络中节点的负载状态和可用带宽相关信息,所以当网络中的负载较大时,原有 MPR 集合中的某个节点可能出现拥塞,然而此时节点依然按照度数选取 MPR 集合元素,不能自适应地选择具有更强转发能力的节点对其进行替换,从而引起拥塞节点的缓冲区被迅速填满,大量数据包将被丢弃。

因此,本文提出一种能够根据可用带宽自适应调整 MPR 集合的方法,网络中各个节点均采用文中第一部分所提出的可用带宽估计机制估计本地可用带宽,并且假设不存在转发意愿(Willingness)为 NEVER 的节点。

具体算法步骤如下:

(1)初始化 MPR 集合和未覆盖节点集合 $M2$,即 $MPR = \emptyset, M2 = N2$, 其中 $N1$ 和 $N2$ 分别为一跳邻居节点集合和两跳邻居节点集合。

(2)搜索与广播节点只有单一路径相连接的两跳邻居节点 $y(y \in N2)$, 将对应的与其相连的一跳

邻居节点 $x(x \in N1)$ 加入到 MPR 集合中,并且将对应的两跳邻居从 $M2$ 中删除以更新该集合。

(3)按照文中提出的可用带宽估计机制,广播源节点为当前两跳节点集合中的每个元素计算瓶颈路径 $P(s, y)$, 其中 s 表示广播源节点, $y \in N2$, 比较所有节点的瓶颈路径,并确定最小瓶颈路径 P_{min} 。

(4)为最小瓶颈路径对应的两跳邻居节点 y 选择最大可用带宽路径,将其路径上的一跳邻居 x 加入到 MPR 集合中,更新 $M2$ 。

(5)考察当前 $M2$ 集合中是否存在节点 x 的邻居节点,若存在,则直接将其从 $M2$ 集合中删除。

(6)判断当前 $M2$ 集合是否为空,若为空,则完成 MPR 集合计算过程,否则重复步骤(3)-(5)。

此算法的伪代码如图 1 所示(假设网络中有 m 个一跳节点, n 个两跳节点)。

```

for i = 1 to n, then
    M2[i] = N2[i]
    //复制集合 N2 中元素至 M2 中 (n 次)
end for
for i = 1 to m, then // (m 次)
    for j = 1 to NI[i]的邻居数目, then
        把链路 (计算节点 → NI[i] → NI[i]的邻居) 加入路由表
        /*假设每个 N2 节点都有可能是邻居, 则平均加入
        次数为  $\frac{1}{n+1} \sum_{i=0}^n i = \frac{n}{2}$  (m × n/2 次) */
        统计 N2 中节点被加入的次数 C[1] ~ C[n]
        // (m × n/2 次)
    end for
end for
for i = 1 to n, then // (n 次)
    if C[i] = 1, then // (n 次)
        把路由表中相应 NI 节点加入 MPR // (O(n))
        删除 M2 中相应 N2 节点 // (O(n))
    end if
end for
while M2 ≠ ∅, then
    for i = 1 to n, then
        计算 P(s, y) // O(n²)
    end for
    确定最小瓶颈路径 P_min // O(n)
    增加相应一跳邻居 x 到 MPR, 更新 M2 // O(n)
    删除 M2 中 x 的所有邻居

```

图 1 算法伪码实现

假设总节点数 $N = n + m + 1$ 固定后一跳邻居数 m 目不变,在时间复杂度计算中当作常数处理,则算法的时间复杂度为:

$$n + m + \frac{m \cdot n}{2} + \frac{m \cdot n}{2} + 4 \cdot O(n) + O(n^2) + \frac{n}{2} = O(n^2) = O((N - m - 1)^2) = O(N^2) \quad (8)$$

对于图 2 所示拓扑结构,本文比较了原始 MPR 集合建立方法和基于带宽感知的 MPR 建立方法 (Bandwidth MPR, BMPR),图中的数字表示根据估计方法所获得的当前可用带宽信息。

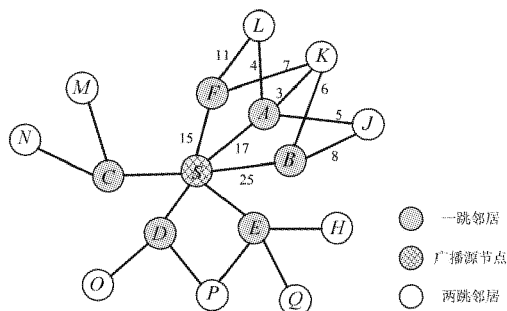


图 2 网络当前拓扑

显然,无论采用任何 MPR 集合建立方法,广播源节点 S 的一跳邻居节点和两跳邻居节点集合分别为 $N1 = \{A, B, C, D, E, F\}$, $N2 = \{H, J, K, L, M, N, O, P, Q\}$ 。

采用基于贪婪算法的 MPR 集合选择方法为 S 建立的 $MPR = \{C, D, E, A\}$ 。

按照文中所提出的 MPR 集合选择方法,源节点 S 首先将为独立节点选择相应的转发节点,此时 $MPR = \{C, D, E\}$,还没有被 MPR 中元素覆盖的两跳节点集合为 $M2 = \{L, K, J\}$ 。

经过计算可知当前节点 S 与 M2 集合中节点之间的路径情况:

$$P(S, L) \begin{cases} S \rightarrow A \rightarrow L: 4 \\ S \rightarrow F \rightarrow L: 11 \end{cases} \quad (9)$$

$$P(S, K) \begin{cases} S \rightarrow A \rightarrow K: 3 \\ S \rightarrow B \rightarrow K: 6 \\ S \rightarrow F \rightarrow K: 7 \end{cases} \quad (10)$$

$$P(S, J) \begin{cases} S \rightarrow A \rightarrow J: 5 \\ S \rightarrow B \rightarrow J: 8 \end{cases} \quad (11)$$

$P_{\min} = P(S, K) = 3$, 根据上述描述,节点 S 将选择到达节点 K 的最大带宽路径,即 $S \rightarrow F \rightarrow K$ 来转发控制消息,因此,其一跳邻居节点 F 将被源节点 S 添加到 MPR 集合当中,同时 F 节点还与 M2 集合中的 L 节点相连接,因此,当前的 M2 集合只剩元素 J。

依然按照上述原则,最终转发节点集合 $MPR = \{C, D, E, F, B\}$ 。

显然采用两种方法所得到的 MPR 集合并不相

同,当考虑可用带宽时,MPR 集合中的元素数量将有可能增加,这将使得控制开销增加,但是从整个网络的角度来考虑,基于带宽感知的 MPR 集合选择方法通过部分拓扑信息寻找空闲度较大的节点为其转发控制消息,进而在各个节点之间交换网络状态消息。这种方式避免了中间节点出现严重的拥塞以及由其引起的大量数据包丢弃。对于图 2 所示的网络情况来说,由于承载大量数据流,节点 A 和节点 K 之间的链路可用带宽严重下降,若此时按照原始 MPR 选择方法,还需要节点 A 为广播源节点转发控制消息,可见,节点 A 的缓存空间将被迅速填满,新到达的数据包将被丢弃。然而此时节点 F 和节点 B 的转发能力明显强于节点 A,因此,采用这种基于带宽的 MPR 选择方式将会使得节点的拥塞程度下降,能够合理地利用网络当前的可用带宽资源。

MPR 选择方法需要比较到达相同节点中不同路径的可用带宽,如算法步骤(3)所示。具有带宽感知能力的算法时间复杂度大于基于邻居节点度数算法时间复杂度、对于 Ad Hoc 网络来说,邻居节点数量有限,同时一跳邻居节点和两跳邻居节点数量并不固定,且网络拓扑随机变化,因此,难以从数量上准确地描述时间复杂度增加情况。

3 仿真结果

本文采用 OPNET 平台对所提出的基于带宽感知的集合建立方法对广播性能的影响以及相应的网络性能进行计算机仿真,具体参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数表

仿真参数	数值	仿真参数	数值
仿真场景	1000m × 1000m	节点数量	20 ~ 80
移动速度	0 ~ 10m/s	暂停时间	100s
数据包长度	1024bit	数据包间隔	0.01s
传输范围	250m	仿真时间	400s

图 3 和图 4 分别显示了网络中 MPR 节点数量以及重广播的数量,从结果中可知,采用基于带宽感知的 MPR 集合建立方法使得网络中负责为其它节点重广播消息的节点数量增加,同时整个网络广播消息的数量也随之增加,但是从整个网络来说,其增加程度并不明显,平均小于 10%,因此,可以认为基于带宽的 MPR 集合建立方法并没有在网络中引起较大的开销。

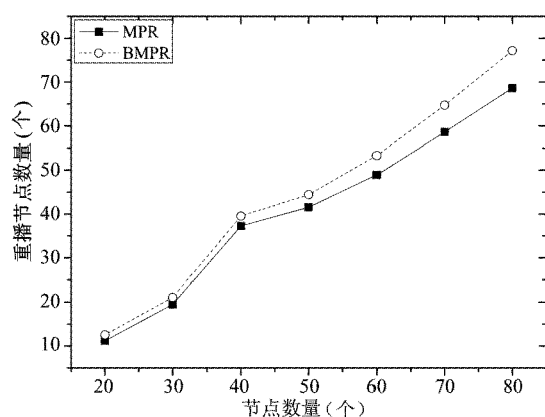


图3 重广播节点数量

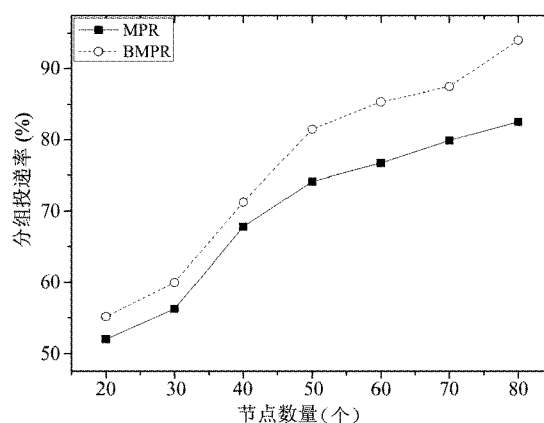


图5 分组投递率

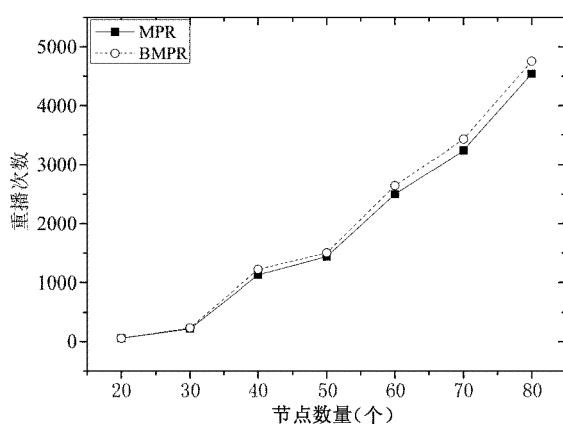


图4 重广播次数

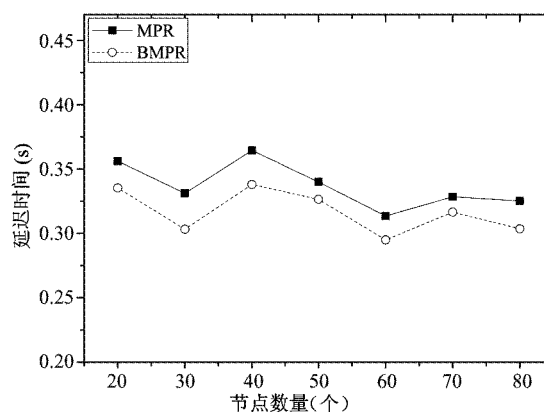


图6 数据包端到端延迟

采用基于带宽感知的 *MPR* 集合建立方法之后, 节点根据获得的可用带宽信息选择具有较强转发能力的节点为其广播网络状态消息, 有效地降低了由于节点处的拥塞对网络承载的数据流所造成的影响。图5和图6分别显示了网络的分组投递率和延迟性能。对于不同的节点密度来说, 如前所述, 采用带宽感知的 *MPR* 集合建立方法将增加网络中重广播节点数量以及重广播次数, 但是 *BMPR* 方法能够根据节点负载状态选择转发能力较强的节点建立 *MPR* 集合, 减少了由于数据包频繁碰撞所导致的重传, 将分组投递率提高 10% 左右, 在一定程度上补偿了该方法所引起的网络负载增加, 降低了数据包的平均端到端延迟。但是随着节点密度逐渐上升, 数据包需要更多的排队时间以及处理时间以接入信道, 导致对延迟的改善程度小于 10%。仿真结果表明, 总体网络负载有小幅上升, 在各种节点数量情况下, 上升幅度约 3% 左右。

4 结 论

Ad Hoc 网络的可用带宽有限, 多种应用需要在整个网络范围内广播控制消息, 因而有效地利用当前网络可用带宽资源, 避免控制消息泛洪所引起的广播风暴则成为 Ad Hoc 网络研究的热点。通过限制广播节点数量, 多点中继机制能够在保证覆盖性的同时降低网络中泛洪数据包的重广播次数, 由于没有考虑中继节点的转发能力, 该机制在网络负载发生改变时, 无法及时调整转发节点集合以合理利用带宽资源。

文中提出了一种基于带宽感知的集合建立方法, 该方法根据广播源节点到两跳邻居节点的路径带宽信息来选择多点中继集合中的元素。仿真结果表明, 虽然 *MPR* 集合中的元素数量以及广播数据包数量略有上升, 但是该机制能够有效地改善整个网络的分组投递率以及端到端延迟性能。

参考文献

- [1] Tseng Y, Ni S, Chen Y, et al. The broadcast storm problem

- in a mobile ad hoc network. *Wireless Network*, 2002, 8(2/3): 153-167
- [2] Ou L, Ahmet S Y, Nallasamy M. A survey of multipoint relay based broadcast schemes in wireless ad hoc networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2006, 8(4): 30-46
- [3] Lim H, Kim C. Flooding in wireless ad hoc networks. *Journal of Computer Communications*, 2001, 24(3-4): 353-363
- [4] Dai F, Wu J. Performance analysis of broadcast protocols in ad hoc networks based on self-pruning. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2004, 15(11): 1027-1040
- [5] Dai F, Wu J. Efficient broadcasting in ad hoc wireless networks using directional antennas. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2006, 17(4): 335-347
- [6] Wu J, Lou W, Dai F. Extended multipoint relays to determine connected dominating sets in MANETs. *IEEE Transactions on Computers*, 2006, 55(3): 334-347
- [7] Sheng M, Li J D, Shi Y. Relative degree adaptive flooding broadcast algorithm for ad hoc networks. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2005, 51(2): 216-222
- [8] Clausen T, Jacquet P. Optimized link state routing protocol (OLSR). California: Internet Engineering Task Force, 2003

An adaptive relay node set selecting mechanism based on available bandwidth estimating

Wu Dapeng, Wu Muqing, Zhen Yan, Zhang Xiaojing

(Broadband Communication Network Laboratory, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)

Abstract

The influence of the multipoint relay (MPR) set constructing mechanism on the performance of mobile Ad Hoc networks (MANET) is well studied in this paper. An adaptive relay node set selection mechanism is proposed based on the available bandwidth estimation. In the process of MPR selecting, each node adaptively selects the relay node with the largest bandwidth for its two-hop neighbors to reduce the network congestion. The complexity of the MPR selecting algorithm using the bandwidth information is the same with the original one. The simulations show that, although the average number of the relay set elements and the broadcast packets are increased slightly, the performance on packets delivery ratio and end-to-end delay are well improved by means of the adaptive relay node selection mechanism proposed in this paper. In addition, the mechanism has the adaptivity feature on the basis of the time-varying network state.

Key words: mobile Ad Hoc network, multipoint relay (MPR), available bandwidth, contention window