

移动 Ad Hoc 网络中提高路由稳定性的 动态备份多径路由

杨文静^{1,2}, 杨新宇¹, 董翅勇¹

(1. 西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安; 2. 西安通信学院指挥信息系统系, 710106, 西安)

摘要: 为了解决移动 Ad Hoc 网络中备份路径过期问题,提出了一种新的动态备份多径路由(DBR)协议.该协议采用洪泛方式建立主路径,使主路径为源节点和目的节点间跳数最小的路径,并利用周期性发送的 HELLO 包为主路径上的链路按需构建局部备份路径. DBR 协议有效地利用周期性发送的 HELLO 包,降低了备份路径建立过程中的控制负载.利用 HELLO 包所交互的当前邻居节点信息构建生存时间尽可能长的备份路径,解决了备份路径的过期问题.理论分析表明,该协议适用于节点密度较大的移动环境.仿真实验表明,该协议在移动性强的环境下具有较好的性能.

关键词: 移动 Ad Hoc 网络;备份路由;可用性;稳定性

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)12-0016-06

Dynamic Backup Multipath Routing for Improving Route Stability in Mobile Ad Hoc Networks

YANG Wenjing^{1,2}, YANG Xinyu¹, DONG Chiyong¹

(1. School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Department of Command Information System, Xi'an Communication Institute, Xi'an 710106, China)

Abstract: In mobile Ad Hoc networks, for the expiration of backup route, a dynamic backup routing (DBR) protocol is proposed. The primary path with smallest hop count between source and destination is discovered by flooding, and the local backup paths are set up for each link in the primary path with periodic HELLO packets. There is less backup path expiration since the backup path with longest lifetime is selected for each link. Furthermore, less control overhead is introduced since periodic HELLO packets are made good use of during backup path construction. The theoretical analysis shows DBR protocol better adapts to higher node-density mobile environment, and simulation results also indicate the good performance in high-mobility environment.

Keywords: mobile Ad Hoc networks; backup routing; availability; stability

移动 Ad Hoc 网络(MANETs)广泛地应用在军事领域和灾后救援中.但是,由于节点的移动性、无线信号易受电磁干扰和地形等因素的影响,导致通信链路生存时间短而引起重路由.频繁的重路由增加了网络的控制负载和端到端传输延迟,降低了包传递率^[1].备份多径路由是提高路由稳定性的一种有效方式,但是在移动环境下,当主路径失效时备份路径可

能也已失效.备份路径过期的问题严重影响了备份路由的使用性能,因此提高备份路径的可用性是提高备份路由性能的关键因素.

近年来,研究者在提高备份路径的可用性方面做了大量的工作,主要包括以下几方面.①减少路径间的耦合性,降低路径间的相互影响.如基于位置的多径路由(PMRP)协议^[2]和备份源路由(BSR)协议^[3].

但是,当主路径失效时,失效链路的上游节点需向它的上游节点发送控制包通知其使用备份路径,增加了延迟。②减少备份路径长度,延长路径生存时间。路径的生存时间与路径长度成反比,带有缓存的多径路由(CHAMP)协议^[4]建立的备份路径与主路径是最短(等长)的。③增加备份路径的数量,提高备份路径的可用率。如稳定按需多径路由(SMORT)协议^[5],提出了局部备份路径的概念,并且增加局部备份路径的数量来提高备份路径的可用性。但是,该协议构建多条备份路径时也引入了较高的控制负载。④预测路径的生存时间,提高备份路径的生存时间。如基于链径生存时间的备份路由(LBR)协议^[6]根据文献^[7]所提出的链径生存时间的计算方法,保证了局部备份路径比主路径上的相应链径生存时间长。但是,该方法需要获得节点的地理位置信息,要求节点具备 GPS 定位系统,以及网络中提供地理位置服务^[8]。⑤利用监听机制动态获得备份路径。带有备份路由(AODV-BR)协议^[9]基于 AODV^[10]方式,节点监听控制包,而适应性备份路由(AODV-ABR)协议^[11]监听控制包和数据包建立备份路径。监听模式能获得最新的备份路由,但是它建立在混杂接收模式下,消耗了移动节点稀缺的能量资源。

为了提高备份多径路由的可用性,本文提出了一种动态备份路由 DBR 协议。主路径采用洪泛方式建立源节点和目的节点间距离最短(跳数最小)的路径。备份路径采用动态按需方式建立,以周期发送的 HELLO 包获得最新的备份路径,并在构建局部备份路径时选择使备份路径生存时间长的节点作为备份路径的中间节点。通过以上两种方式大大提高了备份路径的可用性。利用 HELLO 包建立 DBR 协议的备份路径,并且只在主路径链路失效时构建局部备份路径,有效地降低了备份路径建立的控制负载。

1 网络模型及其定义

网络中节点类型相同,并且服从独立均匀分布。每个节点具有唯一的信道及相同的无线传输半径 R ,当两节点间距离小于 R 时,节点相互连通,并且假设感知半径与传输半径相等。

基于以上假设,网络可以看作是图 $G=(VE)$, V 表示所有的节点集, E 表示所有的边集。源节点 v_s 和目的节点 v_d 间的路径表示为节点序列 $\Pi=(v_s, \dots, v_i, \dots, v_d)$, 其中 $v_i \in V$ 。节点 v_s 和 v_d 间存在多条路径,主路径采用洪泛方式建立源节点和目的节点间距离最短(跳数最小)的路径,表示为 $\Pi_p=(v_s, v_1, \dots,$

$v_d)$ 。定义节点 v_i 的邻居节点集为 S_i , 则节点 v_{i-1} 和 v_i 的公共节点域为 $C_i=S_{i-1} \cap S_i$ 。如图 1 所示, v_{i-1} 和 v_i 是主路径上的两个相邻节点,公共节点域为 $C_i=\{m_1, m_2\}$ 。

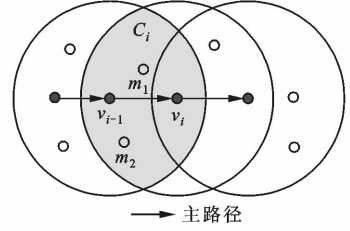


图 1 公共节点域 C_i

主路径上两个相邻节点 v_{i-1} 和 v_i 存在局部备份路径 $B^{i-1,i}=(v_{i-1}, u_j, v_i)$ 。定义主路径上所有备份路径集为 $P_b=\{B^{i-1,i} | v_i \in P_p\}$ 。备份路由定义为 (P_p, P_b) , 它包含一条主路径和主路径上所有链路的局部备份路径,如图 2 所示。源节点 S 和目的节点 D 间的主路径为 (S, a, b, c, D) , 链路 (a, b) 的局部备份路径为 (a, f, b) 。

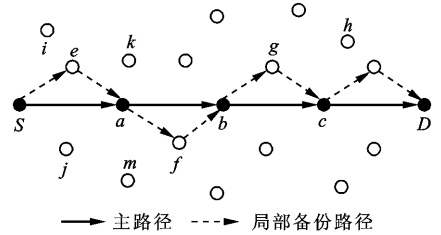


图 2 主路径和局部备份路径

2 协议描述

DBR 协议主要包括路由发现和路由维护两部分。路由发现阶段以洪泛方式建立主路径,该路径为源节点和目的节点间距离最短的路径。路由维护阶段包括备份路径的建立和路由缩短两部分。当主路径上链路失效时,通过节点间周期性交换的 HELLO 包动态构建局部备份路径。局部备份路径建立过程中采用了预测机制,尽可能选择使得路径生存时间长的节点作为局部备份路径的中间节点。使用局部备份路径进行路由维护,保证数据包继续传输。若局部备份路径替代了主路径上的失效链路后使路径长度增加,则定期采用路径缩短技术定期缩短主路径,从而避免路径过长和环路。

2.1 路由发现

源节点 S 向目的节点 D 发送数据时,如果没有到节点 D 的有效路由,则缓存数据包并启动路由发

现过程. DBR 协议的路由发现过程是构建主路径的过程.

源节点 S 向目的节点 D 洪泛路由请求包 (RREQ). 中间节点收到 RREQ 包后, 建立到源节点 S 的反向路由. 一段时间后, 目的节点 D 接收到来自源节点 S 的多个 RREQ 包, 根据该包所附带的全路由信息选择跳数最小的 RREQ 包, 沿着反向路由向 S 返回路由应答包 RREP. 如果 D 接收到多个跳数最小的 RREQ 包, 则选择最先到达的包.

RREP 包采用单播方式发送, 中间节点转发 RREP 过程中, 建立到目的节点 D 的正向路由. 节点收到 RREP 包后建立到目的节点的正向路由, 并插入路由表.

2.2 路由维护

节点通过周期性广播的 HELLO 包来获得链路状况. 当主路径上的节点 N_i 发现到下一跳节点 N_{i+1} 的链路中断, 则开始进行路由维护. 路由维护包括备份路径的建立和路由缩短.

(1) 节点周期性广播 HELLO 包向邻居节点报告其存在. 当主路径上的节点发送 HELLO 包时, 其公共节点域内的邻居节点收到 HELLO 包后, 可作为备份路径的中间节点构建两跳局部备份路径. 如图 3 所示, 主路径的邻居节点 e, f, g, h, i, j, k, l 收到主路径节点的 HELLO 包后, 就可以构建局部备份路径.

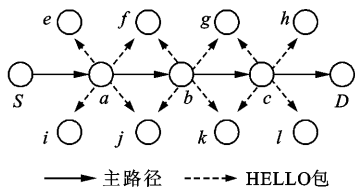


图3 备份路径的建立

当节点 N_i 发现到 N_{i+1} 的链路中断时, N_i 广播一个一跳备份路由请求包 (BRREQ), 其邻居节点 M 收到该包后, 检查本节点是否有到达节点 N_{i+1} 的链路, 若有, 则广播一个备份路由应答 (BRREP), 表明可以用局部备份路径 (N_i, M, N_{i+1}) 来替代已经断掉的主路径 (N_i, N_{i+1}).

当主路径中断时, 需从公共节点域内选择一个节点作为局部备份路径上的中间节点. 此时, 可能有多个公共节点收到 BRREQ 包, 并且都具有到节点 N_{i+1} 的路径, 需要选择一个最优的公共节点作为备份路径的中间节点. 为此, 我们通过节点间的距离估计链路生存时间, 并选择能使局部备份路径生存时间长的节点作为中间节点. 下面, 详细描述该算法过程.

假定节点能通过接收信号强度获取到邻居节点的距离, 如图 4 所示, 在 $t - \Delta t$ 时刻, 节点 A 与节点 B 之间的距离为 $d_{t-\Delta t}$. 在 t 时刻, 节点 B 运动到 B' 处, 节点 A 与节点 B 的距离为 d_t . 假设 AB' 与 AB 夹角为 θ ($0 \leq \theta < 2\pi$), 则可以根据三角公式计算出 BB' 的距离 $l_{\Delta t}$. 由于节点从位置 B 移动到位置 B' 的时间为 Δt , 则节点 B 移动的平均速度为 $\bar{v} = l_{\Delta t} / \Delta t$. B'' 为 BB' 的延长线与以 A 为圆心、以传输距离 R 为半径的圆的交点, 据此可以根据三角公式计算出 $B'B''$ 的距离 l . 这样就可以得出 t 时刻后, 节点 B 移出节点 A 传输范围的时间为 $T_{\theta} = l / \bar{v}$.

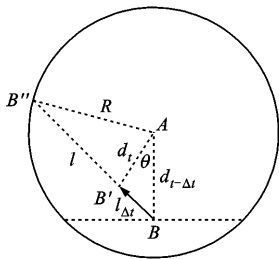


图4 链路生存时间估计

图 4 中所示的 θ 为一个随机变量, 假定服从 $[0, 2\pi]$ 的均匀分布, 这样就可以得出节点 B 移出节点 A 传输范围的时间分布, 进而求得期望值 T_{AB} 如下, 作为链路 AB 的生存时间

$$T_{AB} = 2 \int_0^{\pi} \frac{1}{2\pi} T_{\theta} d\theta \quad (1)$$

其中

$$T_{\theta} = \frac{l}{\bar{v}} \Delta t = \frac{((2d_{t-\Delta t} \cos \angle ABB'' + ((2d_{t-\Delta t} \cos \angle ABB'')^2 - 4(d_{t-\Delta t}^2 - R^2))^{1/2}) / 2 - 1) \Delta t}{\cos \angle ABB''} = \frac{2d_{t-\Delta t}^2 - 2d_t d_{t-\Delta t} \cos \theta}{2d_{t-\Delta t} (d_t^2 + d_{t-\Delta t}^2 - 2d_t d_{t-\Delta t} \cos \theta)^{1/2}} \quad (2)$$

通过式 (1)~式 (3), 可以计算出通过公共邻居节点 M 的局部备份路径生存时间为

$$T_{N_i M N_{i+1}} = \min(T_{N_i M}, T_{M N_{i+1}}) \quad (4)$$

节点 M 在延迟 $\alpha / T_{N_i M N_{i+1}}$ (α 为伸缩因子) 后, 广播一个备份路由应答包 (BRREP), 表示经过该节点可以建立备份路径. 对于生存时间长的备份路径, 节点将先发送 BRREP 包, 从而优先建立备份路径. 如果节点接收到其他公共节点发送 BRREP 包后, 则将取消发送自己的 BRREP 包. 这样一方面保证了生存时间最长的备份路径得以利用, 另一方面减轻了公共邻居

节点发送 BRREP 包的冲突。

如图 2 所示,主路径为 (S, a, b, c, D) , 当链路 (b, c) 失效、公共节点 g 收到节点 b 广播的 BRREQ 包后, 节点 g 确认是否有到节点 c 的链路, 如果有, 则在退避一段时间后向节点 b 和节点 c 发送 BRREP 包, 建立链路 (b, c) 的备份路径 (b, g, c) 。节点 e, j 均是节点 S 和 a 的公共节点, 从而 e, j 均要发送 BRREP 包来建立备份路径, 但是通过节点 e 建立的备份路径生存时间较长, 在延迟 α/T_{Ssa} 后, 节点 e 发送 BRREP 包, 节点 j 接收到 e 所发送的 BRREP 后则沉默, 从而减少了 BRREP 包在网络中发送, 减轻了局部拥塞, 并建立了更稳定的备份路径。

(2) 在路由维护的过程中, 用两跳局部备份路径替代主路径上的失效链路, 使路径不断增长, 且易出现环路, 需要考虑缩短路由。源节点定期向目的节点发送路由探测包 RPRB, 路由探测包内带有源节点、目的节点、下一跳、上一跳、发送节点、序列号(用于区别第 1, 2, 3, ... 次探测)、探测包经过的跳数。路由探测包采用一跳广播的方式发送。

如图 5 所示, 当节点 a 向节点 b 发送 RPRB 包时, 被主路径上的其他节点探听到, 如被节点 e 探听到, e 先将此 RPRB 包缓存起来, 当 e 再次收到经过 b, c 的 RPRB 包时, 通过判断两次收到的 RPRB 包经过的跳数, 发现可以缩短路由。此时节点 e 通知节点 a 修改路由表, 同时修改本地路由表, 这样就将主路径进行了缩短。

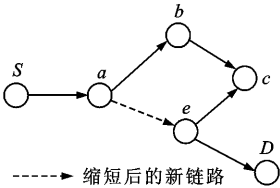


图 5 路由缩短示意图

3 备份路径建立的可能性分析

DBR 协议为主路径上的每一条链路建立局部备份路径, 则公共节点域 C_i 内必须存在公共节点才能为链路 (v_{i-1}, v_i) 建立备份路径, 见图 6。主路径上的相邻两节点之外至少还有一个公共节点, 即公共节点数 $|C_i| \geq 3$ 。

假设网络中的节点均匀分布, 节点具有相同的传输半径 R , 网络中节点的密度为 ρ , 节点的度为 λ , 公共节点域 C_i 的节点数表示为 $|C_i|$ 。当主路径上相邻两节点间的距离为 R 时, 公共节点域 C_i 最小, 即公共节

点数 $|C_i|$ 也最小。

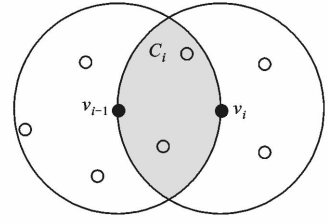


图 6 公共节点域 C_i 面积最小的情况

公共节点域的最小面积为

$$C_i = 4 \int_{R/2}^R (R^2 - x^2)^{1/2} = \left(\frac{2}{3}\pi - 1 \right) R^2 \quad (5)$$

公共节点数为

$$|C_i| = \rho C_i = \frac{\lambda}{\pi R^2} 4 \int_{R/2}^R (R^2 - x^2)^{1/2} = \frac{\lambda}{\rho} \left(\frac{2}{3}\pi - 1 \right) \geq 3 \quad (6)$$

$$\lambda \geq \frac{3\pi}{(2\pi/3 - 1)} \quad (7)$$

计算得出 $\lambda \geq 8.616$, 取整为 9。即为了保证主路径上每一条链路能建立备份路径, 当节点的度大于 9 时可为主路径的每一条链路建立备份路径。

4 仿真实验

4.1 仿真场景和参数

仿真实验在 $1000 \text{ m} \times 1000 \text{ m}$ 二维平面区域中进行, 网络中随机分布 80 个移动节点。MAC 层协议采用 802.11 DCF, 传输半径 R 为 200 m, 无线数据传输率为 1 Mb/s。源节点以恒定比特流 (CBR) 发送数据, CBR 数目为 10, 源节点每秒发送 5 个数据包, 数据包大小为 1024 b。根据我们在文献[12]中的分析, 本文 HELLO 包发送频率为 1 包/s 时, 在限制网络控制负载增加和建立备份路径的信息准确性方面取得较好的折中效果。每对业务流随机选择源和目的节点, 并在仿真过程中保持不变。采用随机移动模型 Random Waypoint^[13], 节点的暂停时间为 0 s, 最小移动速度为 0 m/s, 节点的最大移动速度从 5 m/s 递增到 25 m/s, 依次递增 5 m/s, 通过变化节点的最大移动速度来研究 DBR 协议随着网络拓扑变化的性能。所有实验持续 300 s 的仿真时间。

为验证 DBR 的性能, 我们采用了如下性能指标。

(1) 包传递率: 目的节点收到数据包个数与源节点发送数据包个数。

(2) 端到端延迟: 目的节点收到数据包时刻与源节点收到上层数据包时刻的时间差。

(3)归一化控制负载:网络中节点发送的所有控制包(包括 RREQ、RREP、RERR 和 HELLO 包)的数量与目的端接收到的数据包数量的比值。

(4)路由请求次数:在业务传输过程中单位时间内路由请求的平均次数。

4.2 仿真实验

如图7所示,DBR协议的包传递率在3个协议中最高,当节点最大移动速度为5 m/s时达到97%,随着节点移动速度增大略有下降,当节点最大移动速度为25 m/s时达到93.6%。DBR协议的包传递率比AODV协议高出6%左右,比AODV-BR协议高出3%左右。DBR协议的动态备份路由提高了备份路径的可用性,减少了主路径失效的丢包,而AODV-BR协议只在应答RREP包的过程中建立备份路径,并不能较好地解决备份路径的过期问题。因此,DBR利用了有效的局部备份路径协议提高了路由的稳定性,在包传递率方面表现出较好的性能。

如图8所示,DBR协议的端到端延迟远小于AODV协议和AODV-BR协议。当节点最大移动速度到达25 m/s时,DBR协议的端到端延迟为0.49 s,AODV-BR协议的端到端延迟为1.28 s,而AODV协议的端到端延迟增加到3.32 s。因为在DBR协议中,当路由失效时,数据包可通过动态建立的备份路径继续传输,大大减少了重新进行路由发现的次数,由此降低了等待路由发现的延迟。AODV协议没有备份路径,AODV-BR协议的备份路径是在路由发现过程中建立的,并不能动态更新,所以当节点移动速度较低时,这两个协议可能需要多次进行路由发现,增大数据包等待重传的传输延迟。

如图9所示,与AODV协议和AODV-BR协议相比,DBR协议的归一化控制负载有较大改进。DBR协议在路由失效时,可以动态建立生存时间较长的局部备份路径,有效减少了由于路由失效而重新路由的过程。AODV协议没有备份路径,当路由失效时直接进行重新路由过程。AODV-BR协议的备份路径仅是在路由发现时建立,当主路径失效时,无法保证相应的备份路径一定可用。从仿真的实验结果可以看出,DBR协议所建立的动态备份路径提高了路由协议的稳定性,减少了重新路由次数,由此降低了网络的归一化控制负载。

如图10所示,3个协议的路由请求次数均随着节点移动速度的增加而增多。AODV协议和AODV-BR协议的路由请求次数很接近,而DBR协议的路由请求次数远低于二者。这是由于AODV协议在发现

路由失效后立即通知源节点重新进行路由发现,AODV-BR并不能避免备份路径的过期问题,而DBR协议能动态建立具有较长生存时间的备份路径,提高了备份路径的可用性,由此大大减少了重新进行路由发现的次数。

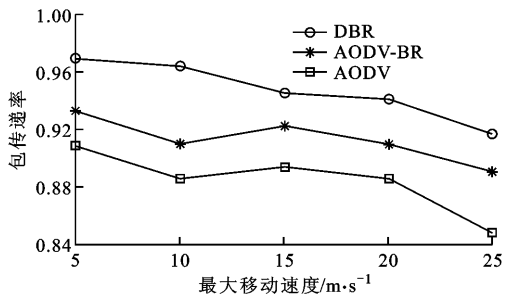


图7 包传递率随节点最大移动速度的变化

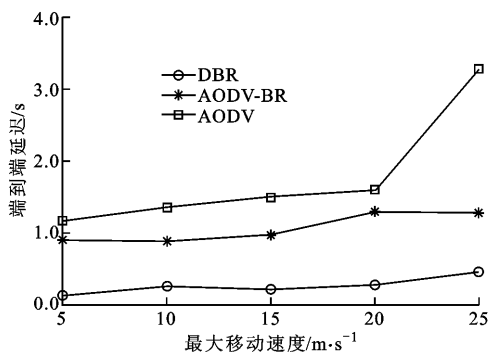


图8 端到端延迟随节点最大移动速度的变化

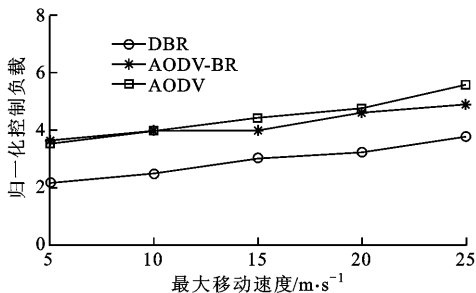


图9 归一化控制负载随节点最大移动速度的变化

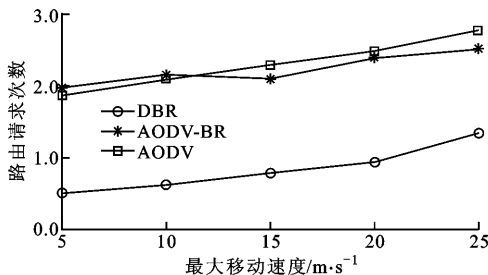


图10 路由请求次数随节点最大移动速度的变化

5 总 结

本文提出了一种动态备份多径路由协议 DBR,以提高备份路由的可用性.该协议利用节点周期发送的 HELLO 包为主路径上的链路构建局部备份路径,并根据链路生存时间尽可能保证局部备份路径的生存时间更长.利用周期性更新的 HELLO 包使节点能掌握最新的邻居节点状态,同时选择了链路生存时间长的路径构建局部备份路径,有效解决了备份路径的过期问题.理论分析表明,DBR 协议适用于节点密度较高的网络环境.仿真实验结果表明,DBR 协议提高了备份路径的可用性,适用于网络拓扑变化频繁的环境,并且在包传递率、端到端延迟、控制负载等方面有着较好的性能.

参考文献:

- [1] CAI Junxia, WU Wei. Degraded link-disjoint multipath routing in ad hoc networks [C]//4th International Symposium on Wireless Pervasive Computing. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009:1-5.
- [2] TAO Jinjing, SHEN Hang, BAI Guangwei. Position-based multipath routing protocol for multimedia streaming in mobile ad hoc networks [C]//4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008:1-4.
- [3] GUO Song, YANG Oliver, SHU Yantai. Improving source routing reliability in mobile ad hoc networks [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2005, 16(4):362-373.
- [4] VALERA A C, SEAH W K G, RAO S V. Improving protocol robustness in ad hoc networks through cooperative packet caching and shortest multipath routing [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2005, 4(5): 443-457.
- [5] REDDEPPA R L, RAGHAVAN S V. SMORT: scalable multipath on-demand routing for mobile ad hoc networks [J]. Ad Hoc Networks, 2007, 5(2):162-168.
- [6] YANG Wenjing, YANG Xinyu, YANG Shusen. A stable backup routing protocol based on link lifetime in mobile ad hoc networks [C]//Third International Conference on Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009:202-207.

- [7] AL-AKAIDI M, ALCHAITA M. Link stability and mobility in ad hoc wireless networks [J]. IET Communications, 2007, 1(2):173-178.
- [8] LI Jinyang, JANNOTTI J, DE COUTO D S J, et al. A scalable location service for geographic ad hoc routing [C]//Proceedings of the Sixth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York, USA: ACM, 2000:120-130.
- [9] LEE S J, GERLA M. AODV-BR: backup routing in ad hoc networks [C]//2000 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2000:1311-1316.
- [10] PERKINS C E, ROYER E M. Ad hoc on demand distance vector (AODV) routing[EB/OL]. [2010-02-12]. <http://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt>.
- [11] LAI Wei Kuang, HSIAO Sheng-Yu, LIN Yuh-Chung. Adaptive backup routing for ad-hoc networks [J]. Computer Communications Archive, 2007, 30(2): 453-464.
- [12] YANG Xinyu, YANG Wenjing, YANG Shusen. Link change rate for mobile wireless networks [C]//5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 2956-2959, 5557.
- [13] YOON Jungkeun, LIU Mingyan, NOBLE B. Random waypoint considered harmful [C]//22nd Annual Joint Conference on the IEEE Computer and Communications Societies. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003: 1312-1321.

[本刊相关文献链接]

利用统计特征的网络应用协议识别方法. 西安交通大学学报,2009,43(2):43-47.

一种高效的冗余编码 Mesh 流媒体覆盖网. 西安交通大学学报,2009,43(10):56-60.

一种支持大规模应用层组播的混合拓扑覆盖网络. 西安交通大学学报,2010,44(2):11-14.

一种适于主-从模式网络计算的事件驱动架构. 西安交通大学学报,2010,44(2):39-43.

面向移动节点不确定性特征的自组网路由协议. 西安交通大学学报,2010,44(6):46-50.

内容寻址网络的 P2P 语义 Web 服务组合系统架构. 西安交通大学学报,2010,44(2):6-10.

(编辑 杜秀杰 武红江)