

基于 AODV 且考虑重传的节省能量路由协议

鲍彦茹,舒炎泰,陈海明

天津大学 计算机科学与技术学院,天津 300072

(baoyanru@tju.edu.cn)

摘 要:提出了一种节省能量的按需路由算法 REAODV。该算法在选择路由时,将不可靠链路上进行可靠数据传输所消耗的总能量(包括重传所消耗的能量)作为选路指标,并且采用跨层优化功率控制技术分配链路上各节点发送功率,达到能量花费最小。通过仿真,将该算法与标准 AODV 进行了性能对比。

关键词:Ad Hoc 网络;按需路由;节省能量路由;动态功率控制

中图分类号:TP393.04 **文献标识码:**A

Retransmission-aware energy efficient routing protocol based on AODV

BAO Yan-ru, SHU Yan-tai, CHEN Hai-ming

(School of Computer Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: For unreliable ad hoc networks, a new energy efficient routing algorithm based on Ad hoc On Demand Distance Vector (AODV) called Retransmission-aware Energy-efficient AODV protocol (REAODV) was presented. According to the total energy consumption (including the retransmission energy cost), REAODV chose routings. Moreover, dynamic power control realized by cross-layer optimization was used to reduce the energy cost. Extensive simulations were conducted to evaluate the performance of the new routing algorithm compared to the AODV.

Key words: Ad hoc networks; on-demand routing; energy efficient routing; dynamic power control

0 引言

在 Ad Hoc 网络中,随着节点的移动,网络拓扑在不断变化。如何迅速准确的选择到达目的节点的路由,是 Ad Hoc 网络的一个重要和核心的问题。传统的 Ad Hoc 路由算法主要考虑了如何减少传输延迟和提高带宽的利用率。由于移动节点一般都采用电池供电,所提供能量有限,部分节点由于能量的耗尽而停止工作会极大地损害整个 Ad Hoc 网络的性能,因此,Ad Hoc 网络中能量有效的路由协议的研究已经成为一个新的研究热点。本文提出了一种能量有效的按需路由算法 REAODV。该算法以链路上的能量花费作为选路标准。其创新之处在于:该算法基于 AODV,既考虑了初次传输的能量花费,又考虑了由不可靠无线传输所引起的重传能量花费;并且采用了一种动态功率控制技术为各节点分配发送功率,从而实现能量的节省;该动态功率控制技术采用了跨层优化来实现。

1 能量有效路由

目前,国内外已经提出一些能量有效的路由算法^[1-10]。根据寻路过程中采用的选路标准不同,能量有效路由算法可分为三类。第一类是最小化功率花费路由算法。该类算法以传输功率作为选择路由的标准,选取可选路径中总的传输功率最小的路径。如 MTPR^[1]就属于该类算法。MTPR 以节点的传输功率作为链路花费,其目标函数可表示为:

$$\text{Minimize } e_j, \forall \text{ packets } j$$
$$e_j = \sum_{i=1}^{k-1} T(n_i, n_{i+1}) \quad (1)$$

其中, $T(a, b)$ 表示节点 a 向节点 b 发送一个数据包的能量花费。该目标函数可以采用典型的最短路径算法(如 Dijkstra 或 Bellman-Ford 算法)加以实现。PARO 算法^[8]也属于该类算法。PARO 以迭代方式,不断增加源和目的节点间中转节点,来减少路径上的总能量花费。但是,最小化功率花费路由算法的一个严重的缺陷是:网络中各节点能量花费不均衡,数据包总是沿能量花费最小的路径传输,由于该路径上某个节点能量耗尽而造成该路径中断,缩短了网络的生命期。

第二类为最大化网络生命期的能量有效路由算法。这类算法主要考虑了网络中节点的剩余能量,选择路由时避免使用剩余能量不足的节点。从而均衡了网络中各节点的能量花费,增加了网络连通时间,延长了整个网络的生命期,有效克服了第一类算法的缺点。MBCR^[1]和 MMBCR^[1]均属于这一类算法。MBCR 算法在所有可选路径中选择剩余电池能量最大的路径。其目标函数定义为:

$$\text{Minimize } \left\{ \sum_{n_i \in p} \frac{1}{R_i} \right\}, \forall \text{ path } p \quad (2)$$

其中, R_i 代表路径 p 中节点 n_i 的剩余能量。MMBCR 算法则将路径中剩余能量最少的节点作为关键节点,在可选路径中选择关键节点能量最大的路径。其目标函数为:

$$\text{Maximize } \left\{ \min_{n_i \in p} \{R_i\} \right\}, \forall \text{ path } p \quad (3)$$

国内研究人员提出的 SDDRP^[10]算法,通过引入能量水平标识来区分各条路径的能量花费,并依据该标识选择合适的路径传输数据包,以达到均衡各节点的能量花费、延长网络

收稿日期:2006-07-27;修订日期:2006-09-28 基金项目:国家自然科学基金资助项目(90604013;60472078)

作者简介:鲍彦茹(1976-),女,河北石家庄人,博士研究生,主要研究方向:移动自组网络、算法设计与分析;舒炎泰(1942-),男,江西于都人,教授,博士生导师,主要研究方向:计算机网络性能评价、CIMS、计算机实时控制;陈海明(1981-),男,浙江宁波人,硕士研究生,主要研究方向:无线局域网。

生命期的目的。

第二类路由算法以均衡各节点的能量花费为目的,所选的路由并不一定是能量花费小的路径。针对上述两类算法,研究人员提出了第三类能量有效路由算法,即混合能量路由算法。CMMBCR^[3]是一个典型的混合路由算法。当网络中节点有充足的剩余能量时,选择能量花费最小的路径;当网络中节点的能量值低于某一阈值时,则采用最大化网络生命期的策略。国内提出的 JPBDSR^[9]也是一种对能量花费和电池能量联合感知的路由算法。

2 网络模型

本文对网络模型做如下假设:

- 1) 节点静止或者移动速度很慢,算法中不考虑节点的移动性;
- 2) 假设每个节点的发射功率可调,并设节点 i 的最大发射功率为 P_i ,而节点 i 向节点 j 传输数据的实际发送功率用为 $p(i, j)$;
- 3) 假设无线信道是双向且对称的,即节点 i 向节点 j 发送数据所需的最小功率 $p(i, j)$,等于节点 j 向节点 i 的最小功率 $p(j, i)$;
- 4) 假设节点 i 和节点 j 之间的包错误率 $\varepsilon_{ij}(p)$ 仅依赖于节点 i 向节点 j 的实际发送功率 $p(i, j)$ 。

因此,无线网络模型可以用一个有向图 $G = (V, E)$ 来表示,其中 V 表示网络中的节点集合, E 表示网络中节点间的链路集合,网络中的有向链路 (i, j) 属于 E 当且仅当节点 j 能直接收到节点 i 以最大功率 P_i 所发送的信号。

为方便起见,在计算节点的能量花费时,本文假设网络中各节点不具有睡眠模式,即只有发送、接受和空闲模式,且假设节点的发送功率等于空闲功率,于是网络中节点的能量花费计算公式为:

$$\begin{cases} E_{\text{total}} = P_{\text{transmit}} \times T_{\text{transmit}} + P_{\text{receive}} \times T'_{\text{receive}} \\ T'_{\text{receive}} = T_{\text{receive}} + T_{\text{idle}} \end{cases} \quad (4)$$

3 REAODV 算法

3.1 目标函数

由于无线信道的不可靠性,现无线网络数据链路层协议中大都提供了保证数据可靠传输的重传机制,如在 IEEE 802.11 中定义了长的数据包可重传 4 次,短的数据包可重传 7 次。重传机制势必引起能量花费的增加,但现有能量有效路由算法在计算能量花费时往往忽略了这部分花费。

假设无线网络模型 $G = (V, E)$ 中,在源节点 $s = v_1$ 和目的节点 $d = v_n$ 之间存在一条简单路 $L = v_1 v_2 \cdots v_n$ 。当该路径上某节点 v_i 向下一跳节点 v_j 以功率 $p(v_i, v_j)$ 发送数据时,链路 (v_i, v_j) 上的包错误率为 $\varepsilon_{v_i, v_j}(p)$ 。为实现数据包的可靠传输,链路 (v_i, v_j) 上所进行的传输次数服从概率为 $\varepsilon_{v_i, v_j}(p)$ 的几何分布。用随机变量 X_{v_i, v_j} 表示链路 (v_i, v_j) 上的传输次数,则:

$$P\{X_{v_i, v_j} = k\} = (1 - \varepsilon_{v_i, v_j}(p)) (\varepsilon_{v_i, v_j}(p))^{k-1} \quad (5)$$

链路 (v_i, v_j) 上的平均传输次数为:

$$\begin{aligned} E(N(v_i, v_j)) &= \sum_{k=1}^{\infty} k \cdot \Pr(X(v_i, v_j) = k) \\ &= \sum_{k=1}^{\infty} k \cdot (\varepsilon_{v_i, v_j}(p))^{k-1} \cdot (1 - \varepsilon_{v_i, v_j}(p)) \\ &= \frac{1}{1 - \varepsilon_{v_i, v_j}(p)} \end{aligned} \quad (6)$$

链路 (v_i, v_j) 上节点 v_i 的能量花费为:

$$\begin{aligned} C_{(v_i, v_j)} &= E(N(v_i, v_j)) \cdot p(v_i, v_j) \\ &= \frac{1}{1 - \varepsilon_{v_i, v_j}(p)} \cdot p(v_i, v_j) \end{aligned} \quad (7)$$

所以,整个路径 L 上的能量花费为:

$$R(L) = \sum_{v_i \in L, s \rightarrow d, v_i \neq d} C(v_i, v_j) \quad (8)$$

算法最终的目标函数为:

$$\text{Minimize } R(L), \forall \text{ path } L \quad (9)$$

3.2 算法实现

REAODV 算法包括 3 个阶段:路由请求、路由回复和数据传输。

3.2.1 路由请求

当源节点 s 有数据要传输到目的节点 d ,并且其没有到达目的节点的路由时,源节点 s 会生成并发送 RREQ 路由请求包来发起路由请求过程。REAODV 算法在 RREQ 请求包中添加了 *totalTxPower* 字段,用来记录 RREQ 传输所经路径上各节点所需最小能量的累加和,如图 1 所示。

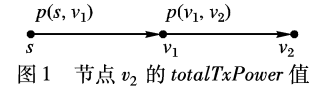


图 1 节点 v_2 的 *totalTxPower* 值

图 1 中 $p(s, v_1)$ 表示源节点 s 发送数据到节点 v_1 所需最小功率, $p(v_1, v_2)$ 表示节点 v_1 发送数据到 v_2 所需最小功率。源节点 s 的 RREQ 经节点 v_1 到达节点 v_2 ,则此时 RREQ 中 *totalTxPower* 值等于 $p(s, v_1)$ 与 $p(v_1, v_2)$ 之和。

源节点 s 总是以最大功率 P 发送 RREQ 包。当中间节点 v 收到 RREQ 时,其物理层利用跨层机制将接收到的信号及噪音的强度值上传到网络层,从而 REAODV 根据这些信息计算出链路 (s, v) 的特征值和信号的衰减值,并由此求得使公式 (7) 最小的最优发送功率 $\text{bestTxPower} = p^*(s, v)$ 。节点 v 将 *bestTxPower* 累加到请求包的 *totalTxPower* 中,并以最大发送功率将 RREQ 继续转发出去。

同时,收到 RREQ 的节点 v ,建立从节点 v 到源节点 s 的反向路由。REAODV 算法在路由表中添加了 *bestTxPower* 和 *totalTxPower* 两个字段,分别保存该路由到下一跳节点的最佳发送功率和到该路由目的节点的全部功率花费。节点 v 将求得的 *bestTxPower* 和 *totalTxPower* 值分别记入其到 s 的路由表中相应字段。

请求包 RREQ 在传播过程中可能到达某中间节点 u ,而该节点已经存在到目的节点的路由。此时节点 u 将生成新的特殊 RREQ 包,该请求包通过置 R 位为 1 来标识。新的 RREQ 中 *totalTxPower* 值等于旧的 RREQ 中 *totalTxPower* 与节点 u 到目的节点 d 的路由表中 *totalTxPower* 之和。而且 R 置位的 RREQ 不再以广播的方式转播,而是沿着由 u 到 d 的已知路由传播,而且其 *totalTxPower* 值在传播过程中也保持不变,从而节省了路由请求过程中通信和计算的花费。

3.2.2 路由回复

目的节点 d 收到第一个 RREQ 后,启动一个延时函数,在延时期间内对收到的所有 RREQ 进行缓存。当延时函数过期时,目的节点从缓存中找到 *totalTxPower* 值最小的 RREQ 包,并对该包回复 RREP 包。

REAODV 算法在 RREP 包中也添加了 *bestTxPower* 和 *totalTxPower* 两个字段。当某节点 v 收到来自另一节点 u 的 RREP 包时,节点 v 就可以建立到目的节点 d 的路由,该路由

的下一跳节点是 u , 且到 u 的最佳发送功率为 RREP 中的 $bestTxPower$, 到目的节点 d 的全部功率花费 $totalTxPower$ 等于所接收到的 RREP 中 $totalTxPower$ 与 $bestTxPower$ 之和。

在路由请求阶段, 中间节点 v 已经建立了到源节点 s 的反向路由。此时, 节点 v 使用该路由信息更新 RREP 中 $bestTxPower$, 并沿该路由的下一跳节点将 RREP 转发出去。当源节点收到该 RREP 包时, 就建立了由源 s 到目的 d 的路由。

3.2.3 数据传输

源节点 s 建立了到目的节点 d 的路由后, 就开始发送数据包。无论是源节点还是中间节点, 在发送数据包时, 都要将路由表中的 $bestTxPower$ 值传到物理层, 并用该值来动态调整数据包的发送功率, 这是通过跨层机制来实现的。 $bestTxPower$ 值是保证可靠传输情况下的最佳发送功率, 从而 REAOVD 算法实现了节省能量的目的。

4 性能分析

4.1 仿真环境

本文使用 RedHat Linux 9.0 环境下的 Qualnet 3.7^[11] 作为仿真平台。该平台提供了标准 AODV 路由协议的仿真模块, 在该平台上本文实现了 REAOVD, 从而对两者进行了性能比较。表 1 给出了仿真环境的参数配置。

表 1 仿真中使用的参数列表

参数	取值
PROPAGATION-PATHLOSS-MODEL	TWO-RAY
PHY-NOISE-FACTOR	10
PHY-MODEL	PHY802.11b with 2Mbps data rate
PHY802.11b-TX-POWER	15 dBm
PHY802.11b-RX-SENSITIVITY	-89 dBm
PHY-RX-MODEL	BER based PHY802.11b model
MAC-PROTOCOL	MAC802.11
SIMULATION-TIME	1000 s
TERRAIN-DIMENSIONS	1000 × 1000 m ²

本文在随机网络中设置了 CBR 流来测试算法性能, 每个流每秒发送一个 512Byte 的数据包, 从仿真开始的第 10s 发出第一个数据包, 并一直持续到仿真结束。在 [20, 100] 之间选取了 10 个不同的节点数进行仿真, 并且通过改变 SEED 值得到了多组数据。

4.2 结果及分析

本文选用标准 AODV 作为 REAOVD 的比较对象, 对两者的能量花费和延迟做了对比。

首先考虑了随机场景中只有单个 CBR 业务的情况, 如图 2、3 所示。图 2 显示了在单业务流下 AODV 和 REAOVD 能量花费的不同, 图 3 比较了两者的延迟。正如预期的结果, REAOVD 通过增加路由中节点的跳数, 明显的减少了发送数据包的能量花费。平均发送功率减少了 48%。但由于路由跳数的增加, 所以延迟势必增加, 从图 3 中可以看出平均延迟增加了 2.5ms。

图 4 和图 5 展示了多业务流情况下的仿真结果。图 4 对多业务流下 AODV 和 REAOVD 的能量花费做了比较, 图 5 则对比了两者的延迟。在多业务流情况下, 可以得出与单业务流相似的结果。REAOVD 的平均能量花费减少了 39%, 但由于跳数增加, 相互干扰的节点数也随之增多, 所以平均延迟增加了 27ms。

仿真结果显示, REAOVD 以可容忍延迟为代价, 有效节

省了能量花费, 延长了网络生命期。

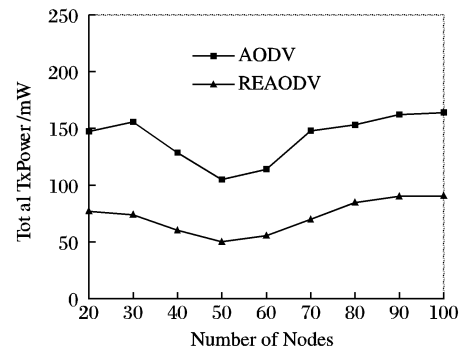


图 2 单业务流下的能量对比

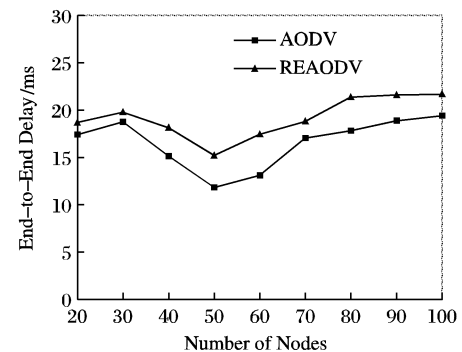


图 3 单业务流下的延迟对比

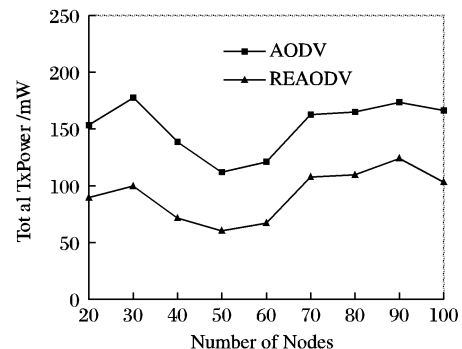


图 4 多业务流下的能量对比

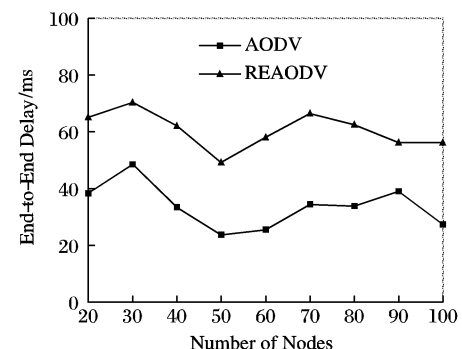


图 5 多业务流下的延迟对比

5 结语

本文提出的 REAOVD 算法以链路上的总能量花费 (包括初次传输花费以及重传花费) 作为选路标准, 并且采用跨层的动态功率控制技术为各节点分配发送功率, 从而实现了能量的节省。

进一步的研究工作主要包括: 研究链路错误率受发送功率外的其他因素影响情况下的最小能量花费路由算法; 研究考虑了节点移动性情况下的能量有效路由; 研究 Ad Hoc 网络中的能量有效的组播和广播路由算法。 (下转第 34 页)

据通过上面信道先到达 D , 节点 D 的物理层便会把带有这些数据信息的分组通过网络编码的方式广播出去, 于是在节点 E 处, E 发现自己的通过无线信道直连的节点都已经有了这些节点 A 发送的数据, 于是便不再在以后把这些数据加入到异或运算中去。但是, 当上方的信道失效后 (如图 9 中叉符号所示), E 就会发现从 C 来的分组中含有的原始信息对自己的一些通过无线信道直连的节点来说是陌生的, 于是会将它们编码后广播出去, 并使这些数据最后到达 D 。可以看到, 信道的失效, 并没有破坏这次广播会议。

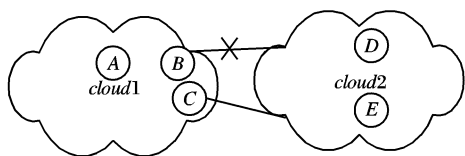


图9 通过引入网络编码可以利用网络间的多条无线链路提高鲁棒性

另外, 在上述设计的基础上, 还可以通过引入反压机制和分层编码技术^[5], 进一步的提高网络吞吐率。由于整个无线网络的拓扑随机性和信道不稳定性, 常常不同节点收发数据的速度会出现差异。另外, 通过无线信道直连的节点数量较多的节点与通过无线信道直连的节点数量较少的节点, 在一定时间内收发数据的速率也会有差异。所以, 在某些节点中, 可能会出现 $Buffer_1 \sim Buffer_n$ 中某些空间频繁被清空而其他一些空间则长期存储了大量的标识, 这时就应该向那些长期存储了大量标识的空间所对应的节点发送出反压信令。由于收到了反压信令, 一些节点就需要开始按照特定的算法减少发送次数, 这样, 这些节点就需要放弃一些发送机会。当这种情况出现时, 放弃了发送机会的节点就应该广播一个空余带宽信令, 并在这个信令中加入自己的节点编号。当一个节点收到了空余带宽信令, 如果它自己并没有放弃过发送机会, 即没有空余带宽, 或者自己的节点序号已经在空余带宽信令所带的序号序列中, 则不理睬这个信令。如果该节点自己也有空余带宽, 且自己的节点序号不在空余带宽信令所带的节点序号序列中, 则把自己的节点序号加在空余带宽信令所带的节点序号序列末尾, 并广播出去。当空余带宽信令的序号序列最后稳定下来的时候, 每个序号序列中的序号就组成了一条由空余带宽所构成的路径, 而所有的路径一起则构成了一个由空余带宽组成的网络, 而这个网络中的节点, 都已经通过信令知道了这个空余带宽网络, 于是可以在这个空余带宽网络

上进行一个新的基于网络编码的多信源间信息交换过程。只要这个交换过程中所交换的信息与之前的交换过程中交换的信息在处理上是相互独立互不干扰的, 则两个信息交换过程可以在同一个无线网络中同时运行。通过这样的过程, 实质上在无线网络中实现了分层网络编码^[5]。分层网络编码所提供的多余带宽, 既可以用于传输额外的数据, 又可以使用多描述编码^[7]来提高有富余带宽的节点之间传输的图像、声音等信息的质量。

5 结语

本文把无线网络中的多源间信息交换问题专门分离出来作为一种新的应用进行分析。因为在多源间信息交换的过程中, 网络编码显示出了与传统路由机制相比突出的优势, 而原有的以两点间信息交换为基础的网络编码应用设计不能很好地解决多源间信息交换中的种种问题。本文分析了网络编码技术在无线网络中的多源间信息交换中的引入, 对网络的吞吐率和鲁棒性等性能的改善, 并提出了一种分布式方案来在实际网络中实现网络编码的这些优势。

致谢: 感谢我的导师涂晓东副教授在整个网络编码相关问题的研究工作中给我的细心指导和无私关怀。

参考文献:

- [1] WU YN, CHOU PA, KUNG SY. Minimum-energy multicast in mobile ad hoc networks using network coding[J]. IEEE Transactions on Communications, 2005, 53(11): 1906–1918.
- [2] LUN DS, MEDARD M, HO T, et al. Network coding with a cost criterion[A]. Proceeding Int'l Symposium Information Theory and its Applications (ISITA2004) [C]. 2004.
- [3] WU Y, CHOU PA, KUNG SY. Information exchange in wireless networks with network coding and physical-layer broadcast[R]. Microsoft Technical Report, MSR-TR-2004-78, 2004.
- [4] WU Y, CHOU PA, ZHANG Q, et al. Network planning in wireless ad hoc networks: a cross-Layer approach[J]. IEEE Journal on Selected Areas on Communications, 2005, 23(1): 136–150.
- [5] SUNDARAM N, RAMANATHAN P, BANERJEE S. Multirate Media Streaming Using Network Coding[DB/OL]. http://www.ece.wisc.edu/~wander/papers/rate_sp_05.pdf, 2006–05–10.
- [6] LI SYR, YEUNG RW, CAI N. Linear network coding[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 49(2): 371–381.
- [7] HSIA YF, CHANG CY, LIAO JR. Multiple-description coding for robust image watermarking[A]. ICIP'04[C]. 2004.
- [8] WAN P-J, CALINESCU G, LI X-Y, FRIEDER O. Minimum-energy Broadcast in Static Ad Hoc Wireless Networks[J]. ACM Wireless Networks, 2002, 8(6): 607–617.
- [9] BANERJEE S, MISRA A. Minimum Energy Paths for Reliable Communication in Multi-Hop Wireless Networks[A]. Proceedings of ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing[C]. 2002.
- [10] GOMEZ J, CAMPBELL A, NAGHSHINEH M, et al. PARO: Supporting Dynamic Power Controlled Routing in Wireless Ad Hoc Networks[J]. ACM/Kluwer Journal on Wireless Networks (WINET), 2003, 9(5).
- [11] 许力, 王敏强, 郑宝玉. 一种新的基于 DSR 的移动自组网节能路由策略[J]. 计算机工程, 2004, 30(11).
- [12] 王敏强, 郑宝玉. 一种新的应用于 Ad Hoc 网络的能量感知路由协议[J]. 南京邮电学院学报, 2005, 25(2): 13–17.
- [13] Qualnet user's manual, version 3.7[S]. Scalable Network Technologies, 2004.

(上接第 24 页)

参考文献:

- [1] SINGH S, WOO M, RAGHAVENDRA CS. Power-aware Routing in Mobile Ad Hoc Networks[A]. Proceedings of ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking[C]. 1998. 181–190.
- [2] MALEKI M, DANTU K, PEDRAM M. Power-aware Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks[A]. Proceedings of International Symposium on Low Power Electronics and Design[C]. 2002.
- [3] TOH CK. Maximum Battery Life Routing to Support Ubiquitous Mobile Computing in Wireless Ad Hoc Networks[J]. IEEE Communication Magazine, 2001, 39(6): 138–147.
- [4] CHANG JH, TASSIULAS L. Routing for Maximum System Lifetime in Wireless Ad-hoc Networks[A]. Proceedings of Allerton Conference on Communication, Control, and Computing[C]. 1999.
- [5] JONES CE, SIVALINGAM KM, AGRAWAL P, et al. A Survey of Energy Efficient Network Protocols for Wireless Networks[J]. Wireless Networks, 2001, 7(4): 343–358.