

无线自组网中最大化网络寿命的速率调整问题

王青山^{①②} 许胤龙^① 徐晨光^① 张纯鹏^①

^①(中国科学技术大学计算机科学技术系省部共建高性能计算与应用重点实验室 合肥 230027)

^②(合肥工业大学理学院 合肥 230009)

摘要: 该文针对发送速率可以调整的无线自组网,研究了最大化网络寿命的速率调整问题。将该问题模型化为混合整数非线性规划问题,通过分支限界法可以求出最优解。该文还提出了一个基于贪心策略的分布式最大化网络寿命速率调整算法 MNLRAA,其基本思想是根据网络中节点的流量和剩余能量,尽可能为每条链路选择较低传输速率发送分组来节能。模拟实验结果表明,同所有节点使用最高传输速率的经典技术相比, MNLRAA 可延长网络寿命 20%以上。

关键词: 无线自组网; IEEE 802.11; 网络寿命; 速率调整

中图分类号: TN915.04

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)02-0477-05

Rate Adaptation for Network Lifetime Maximization in Wireless Ad hoc Networks

Wang Qing-shan^{①②} Xu Yin-long^① Xu Chen-guang^① Zhang Chun-peng^①

^①(Anhui Province-MOST Co-Key Laboratory of High Performance Computing and Its Applications, Department of Computer Science and Technology, USTC, Hefei 230027, China)

^②(School of Sciences, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: According to wireless Ad hoc networks being able to adjust transmission rate, this paper studies the rate adaptation for network lifetime maximization. The problem is formulated as a mixed integer nonlinear programming, which can be solved using branch and bound methods. Further, a greedy distributed Maximizing Network Lifetime Rate Adaptation Algorithm (MNLRAA) is present. MNLRAA tries to select the lower transmission rates for each link based on the traffic and the remaining energy at nodes so as to reduce energy consumption. The simulation results show that MNLRAA can improve more than 20% the network lifetime than the classic technique that all nodes transmit packet with the highest rate.

Key words: Wireless Ad hoc networks; IEEE 802.11; Network lifetime; Rate adaptation

1 引言

无线自组网是一种不依赖任何固定设施的多跳自治网络。无线自组网中的节点通常用电池来供应能量,然而电池技术不可能像通信和计算技术那样得到迅速发展,因此均衡整个网络能量消耗,延长网络寿命是非常重要的。近年来,IEEE 802.11a, IEEE 802.11b 协议在物理层支持多速率传输,例如 IEEE 802.11a 支持从 6Mbps 到 54Mbps 八种传输速率。但是最初的 IEEE 802.11 协议只提供一种传输速率 2Mbps。目前,对于多速率传输的研究内容主要包括两个方面:当信道的条件能保证信噪比足够大时,尽量选择较高的速率来提高网络的吞吐量^[1-3]。ARF(Auto Rate Fallback)^[4]是第一个实现多速率的商用的 MAC 机制。基于 ARF,若传输连续成功,则发送端提高传输速率,否则降低传输速率。

传输速率越高, BER(Bit Error Rate)越大,因此需要更高的传输功率来保证 BER 达到一个可以接收的数值^[2],可以通过降低传输速率来节省能量,例如 Qiao 等^[4]使用传输功率控制和速率调整建立一个离线最优速率-功率组合表格,通过查找该表格来决定每个包的传输速率。

已经有很多工作考虑如何延长网络寿命的问题^[5,6]。Chang 和 Tassiulas^[5]第 1 次将网络寿命定义为直到网络中第 1 个节点能量耗尽的时刻为止网络所经历的时间,设计算法根据节点的剩余能量为每个通信请求选择多路径路由,并为每条路径分配流量来延长网络寿命。

本文研究的问题是对于给定的一个随机的网络拓扑结构及其上每条链路流量,在保证发送成功率的前提下,设计速率调整算法来最大化网络寿命。首先将它模型化为混合整数非线性规划问题,可以通过分支限界法求出最优解。然后针对无线自组网的分布式特性,提出了一个基于贪心策略的最大化网络寿命的分布式速率调整算法

2006-11-23 收到, 2007-06-04 改回

国家自然科学基金重点基金项目(60533020), 合肥工业大学科学研究发展基金(061005F)和合肥工业大学博士专项基金资助课题

MNLRAA(Maximizing Network Lifetime Rate Adaptation 量, 通过选择较低传输速率来减小发送分组时能量消耗, 实

将一个无线自组网抽象成一个加权无向图 $G = (V, E, R)$, 其中 V 是网络中节点集合, E 是链路的集合。任给 $i, j \in V$, $R(i, j) = R_{ij}$ 为节点 i 使用最大传输功率 P_{\max} 发送分组时, 为了使得节点 j 能够对接收到的分组正确解码, 节点 i 所能使用最高传输速率。本文中假定任给 $i, j \in V$, $R_{ij} = R_{ji}$ 。设每个节点所能使用的传输速率为一个离散整数集合 R_{set} , 为了保证一定的误码率, 每种速率 r 下接收信号都对应一个最低解码功率 $P_{\text{th}}(r)$, 如表 1 所示。假设路径损耗模型如下:

$$P_r(i, j) = k \frac{P_t(i, j)}{d^c(i, j)} \quad (1)$$

其中 c 和 k 分别是路径损耗参数和系统常量, $d(i, j)$ 是节点 i 和节点 j 之间的距离, $P_t(i, j)$ 和 $P_r(i, j)$ 分别是发送节点 i 的传输功率和接收节点 j 的接收功率。

表 1 IEEE 802.11a 最低解码功率

传输速率(r)	最低解码功率 $P_{\text{th}}(r)$
6 Mbps	-82 dBm
9 Mbps	-81 dBm
12 Mbps	-79 dBm
18 Mbps	-77 dBm
24 Mbps	-74 dBm
36 Mbps	-70 dBm
48 Mbps	-66 dBm
54 Mbps	-65 dBm

基于 IEEE 802.11, 节点 i 向邻居节点 j 发送一个数据要经过 4 次握手(RTS-CTS-Data-Ack)。其中, RTS、CTS 和 Ack 使用基本传输速率 R_{base} 进行发送, 如 IEEE 802.11a 协议使用 6Mbps, 节点 i 使用速率调整算法选择的传输速率 r 发送 Data。则接收单个数据包, 节点 i 的能量消耗和节点 j 的能量消耗分别是:

$$P_i^i(i, j, r) = \frac{P_{\text{th}}(R_{\text{base}})d^c(i, j)}{k} \cdot T_{\text{RTS}} + \frac{P_{\text{th}}(r)d^c(i, j)}{k} \left(T_{\text{PHY}_{\text{hdr}}} + \frac{L}{r} \right) \quad (2)$$

$$P_j^j(i, j, r) = \frac{P_{\text{th}}(R_{\text{base}})d^c(i, j)}{k} \cdot T_{\text{CTS}} + \frac{P_{\text{th}}(R_{\text{base}})d^c(i, j)}{k} T_{\text{Ack}} \quad (3)$$

其中 $T_{\text{RTS}}, T_{\text{CTS}}, T_{\text{Ack}}$ 分别是 RTS、CTS 和 Ack 传输时间, $T_{\text{PHY}_{\text{hdr}}}$ 是数据分组物理层头部对应传输时间, L 是数据分组 MAC 层长度。根据文献[7], 节点在接收分组时功率消耗和空闲时功率消耗同传输分组时功率消耗相比很小。为了简单起见, 本文只考虑传输分组时功率消耗。

因为无线自组网中信道是所有节点共享的, 因此距离相近的两个流是不能同时传输的, 本文采用 K. Jain 等^[8]提出的流冲突模型构造一个冲突图。假设链路 (i, j) 上的传输速率为 r_{ij} , 发送节点 i 的感知半径和接收节点 j 的干扰半径分别设为 $D_i'(r_{ij}, d(i, j))$ 和 $D_j''(r_{ij}, d(i, j))$ 。 $D_i'(r_{ij}, d(i, j))$ 的计算公式如下:

$$D_i'(r_{ij}, d(i, j)) = \left(\frac{P_{\text{th}}(r_{ij})}{P_{\text{csth}}} \right)^{\frac{1}{c}} d(i, j) \quad (4)$$

其中 P_{csth} 是感知阈值。本文假设 $D_j''(r_{ij}, d(i, j)) = D_i'(r_{ij}, d(i, j))$ 。

如链路 (i, j) 和 (p, q) 冲突当且仅当下面两个条件之一成立:

- (1) 节点 i 或者节点 j 在节点 p 的感知半径内或在节点 q 的干扰半径内;
 - (2) 节点 p 或者节点 q 在节点 i 的感知半径内或在节点 j 的干扰半径内。
- 可以根据上面冲突的定义构造冲突图。网络中的一条流对应冲突图中一个节点, 当两条流相互冲突时, 在冲突图上有相应的一条边。冲突图上一个团的所有节点对应的流互相冲突, 这些流的信道时间占用比例之和小于等于 1。

3 问题的模型化

本文研究的问题是对于给定的网络拓扑结构及其上每条链路的流量, 设计速率调整算法来最大化网络寿命。假设链路 (i, j) 上的流量是 q_{ij} , $N_{\text{out}}(i)$ 表示节点 i 的部分邻居集合且从节点 i 到该集合中节点的流量大于零, $N_{\text{in}}(i)$ 表示节点 i 的部分邻居集合且从该集合中节点到节点 i 的流量大于零, 节点 i 的剩余能量记为 E_i , T 表示网络寿命, 研究问题的目标函数为

$$\text{Maximize } T \quad (5)$$

约束条件如下:

- (1) 传输速率约束。传输速率是属于某个离散整数集合, 即

$$r_{ij} \in R_{\text{set}}, \quad 1 \leq i, j \leq |V| \quad (6)$$

其中 r_{ij} 表示链路 (i, j) 传输速率。

- (2) 电池能量约束。

$$\sum_{j \in N_{\text{out}}(i)} P_i^i(i, j, r_{ij}) q_{ij} T / L + \sum_{j \in N_{\text{in}}(i)} P_j^j(j, i, r_{ji}) \cdot q_{ji} T / L \leq E_i, \quad 1 \leq i \leq |V| \quad (7)$$

- (3) IEEE802.11 协议下链路共享信道约束。同一个极大团中节点占用信道时间比例和小于等于 1, 即

$$\sum_{(i, j) \in C} \frac{q_{ij}}{L} (T_{\text{RTS}} + T_{\text{CTS}} + T_{\text{Ack}} + T_{\text{DIFS}} + 3T_{\text{SIFS}} + L/r_{ij} + T_{\text{PHY}_{\text{hdr}}} \leq 1), \quad C \in \{\text{冲突图上极大团集合}\} \quad (8)$$

其中 $T_{\text{DIFS}}, T_{\text{SIFS}}$ 分别是载波空闲 DIFS 和短帧间隔 SIFS 的长度。

由式(5)–(8)构成了研究问题的优化模型, 模型中独立变量为 T , $r_{ij} (1 \leq i, j \leq |V|)$, 其中 T 是连续变量, r_{ij} 是整型变量。由于式(7)是非线性约束, 此优化问题是一个混合整数非线性规划问题。假设当所有发送节点都使用最高传输速

率时, 每条链路的流量需求能够得到满足, 因此可以通过分支限界法求出最优解。由于无线自组网的分布式特性, 上面求最优解的算法在无线自组网中不实用。

4 最大化网络寿命速率调整算法

下面给出一种分布式最大化网络寿命速率调整算法 MNLRAA。MNLRAA 将整个网络寿命最大化问题分解为每个节点最大干扰范围内网络寿命最大化子问题。首先定义一个函数

$$f(i, j, r_{\text{cur}}, r_{\text{next}}) = q_{ij}((P'_i(i, j, r_{\text{cur}}) + P'_j(i, j, r_{\text{cur}})) - (P'_i(i, j, r_{\text{next}}) + P'_j(i, j, r_{\text{next}}))) \quad (9)$$

其中 $r_{\text{cur}}, r_{\text{next}}$ 分别表示链路 (i, j) 的当前速率和下一个更低档次速率, 这个函数表示链路 (i, j) 降低一个档次速率节省的能量。

根据前面对节点能量消耗的分析可以得出节点 i 预测其寿命 T_i 的计算公式如下:

$$T_i = \frac{E_i}{\sum_{j \in N_{\text{out}}(i)} P'_i(i, j, r_{ij})q_{ij} / L + \sum_{j \in N_{\text{in}}(i)} P'_i(j, i, r_{ji})q_{ji} / L} \quad (10)$$

MNLRAA 依次包括链路信息交换、速率选择和速率调整 3 个过程。针对节点 i , MNLRAA 速率调整具体介绍如下:

(1) 链路信息交换过程 每个节点将和自己相关联的流量非零的链路信息以及自己的剩余能量放在 pk1 包中, 以最低传输速率向邻居广播。其中链路信息包括发送节点 ID, 接收节点 ID, 发送节点的坐标, 接收节点的坐标和流量大小。通过局部的广播, 节点能收集到自己最大干扰范围内流量非零链路信息, 得出构造局部冲突图和第(A)步在计算节点预测寿命时需要的一些数据。

(2) 速率选择过程 将节点 i 最大干扰范围所有链路的传输速率初始化为该条链路所允许的最高传输速率, 具体包括:

(A) 根据链路传输速率和第(1)步所得到的数据, 由式(10)计算节点 i 最大干扰范围内每个节点的预测寿命;

(B) 从最小预测寿命节点的输出链路中, 选择传输速率没有达到最低值的链路组成一个链路集合 L_{set} 。如果该集合为空转(C), 否则计算该链路集合中每条链路对应式(9)的函数值, 如果链路的函数值为负数, 则从 L_{set} 中删去该链路。

(a) 从 L_{set} 中选择函数值最大的链路, 将该链路传输速率降低一个档次, 根据链路传输速率和第(1)步所得到的数据构造节点 i 的局部冲突图。

(b) 如果此时的速率设置满足不等式(8), 即节点 i 局部冲突图上构成一个极大团的所有流的信道时间占用比例之和小于等于 1 的条件, 转(A), 否则将该链路传输速率提高一个档次并且从 L_{set} 中删去该链路, 转(a);

(C) 速率选择过程结束。

(3) 速率调整过程 节点 i 根据速率选择结果和其保存的最大干扰范围内节点的传输速率, 向需要调整速率的节点发出 pk2 包。收到 pk2 包的节点根据不等式(8)判断该速率设置是否使得自己局部冲突图上构成一个极大团的所有流的

信道时间占用比例之和小于等于 1。它将返回一个包含判断结果的 pk3 包。节点 i 收到所有的 pk3 包后, 如果发现这些发出 pk3 包的节点都同意本次速率选择方案, 则向需要速率调整的节点发出速率选择确认包 pk4, 收到 pk4 包的节点调整以自己作为发送节点链路的传输速率。否则, 记录本次的速率选择方案, 以后不再选择该方案, 转(2)重新执行速率选择过程。

其中, 第(B)步从 L_{set} 中删去函数值为负数的链路, 因为对于 IEEE 802.11a, 当传输速率由 9Mbps 降为 6Mbps 时, 函数值为负数, 表示此时降低速率并不能节省能量消耗。对于节点 i , 如果速率选择结果得到了最大干扰范围内所有需要调整速率节点的同意, 节点 i 的速率调整过程结束, 否则从可行速率选择方案中去掉本次速率选择方案, 而可行速率选择方案集合是有限的, 所以 MNLRAA 是收敛的。

5 模拟实验结果和分析

我们用 C++ 开发了一个模拟器来比较 MNLRAA、最优算法和经典技术(所有节点均以最高速率发送分组)^[9]在网格拓扑结构和随机拓扑结构中的性能。性能评价的标准是网络寿命增益、分组平均能量消耗和端到端延迟, 其中网络寿命增益定义为 MNLRAA 及最优算法的网络寿命相对经典技术的网络寿命增加的百分比。在模拟实验中, 通过改变网络流量研究网络性能。模拟实验中选择 IEEE 802.11a 作为 MAC 层协议, RTS, CTS, Ack 和 DATA 帧的结构根据 IEEE 802.11a 确定, 具体参数见表 2。每个数据包的数据负载大小均为 512byte。MNLRAA 中 4 个消息包 pk1、pk2、pk3 和 pk4 的长度分别是 62、64、64 和 50byte, 如包 pk4 中两个字节表示速率选择确认结果, 其它为头部信息。其它具体实验参数见表 2。

表 2 模拟实验参数

$P_{\text{max}} = 13\text{dBm}$	$T_{\text{CTS}} = 25\mu\text{s}$
$P_{\text{csth}} = -95\text{dBm}$	$T_{\text{Ack}} = 25\mu\text{s}$
$T_{\text{PHY}_{\text{hdr}}} = 19\mu\text{s}$	$\text{DIFS} + 3 \cdot \text{SIFS} = 70\mu\text{s}$
$T_{\text{RTS}} = 25\mu\text{s}$	

实验 1 图 1 是一个 12 个节点的网格拓扑结构, 相邻节点之间的距离是 140m, 节点的初始能量是 60J, 网络中 7 条链路的流量非空。实验中设置不同的值 q 来分析传统方法, 最优算法和 MNLRAA 的性能, 其中链路(5, 6)的流量是 4 q 分组/秒, 其它链路的流量是 q 分组/秒。在该实验中, 有实验结果如图 2。从图中可以看出: (1) 当流量小于 280 分组/秒时, MNLRAA 和最优算法在网络寿命和分组平均能量消耗上分别比经典技术有较大的提高和降低; (2) 随着网络流量负载的增加, MNLRAA 和最优算法的网络寿命较经典技术

提高的程度逐渐变小,因为网络流量的增加会导致节点信道访问时间的增加,这样就使得节点降低速率的空间变小,如当流量等于 280 分组/秒时,所有的链路都以最高的速率发送数据;(3)当流量是 220 分组/秒时,MNLRAA 的网络寿命增益比最优算法的网络寿命增益减少了 4%左右。进一步分析,通过比较两者设置的速率向量可以知道:MNLRAA 根据贪心策略将链路(5, 6)的传输速率多降低了一个档次,而最优算法将链路(5, 1)、(5, 4)、(5, 9)和(6, 10)的传输速率多降低了一个档次,均匀节点 5 和 6 能量消耗,从而更加延长了网络寿命。

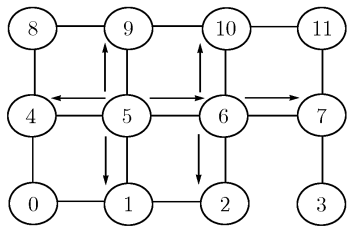


图1 网络拓扑结构

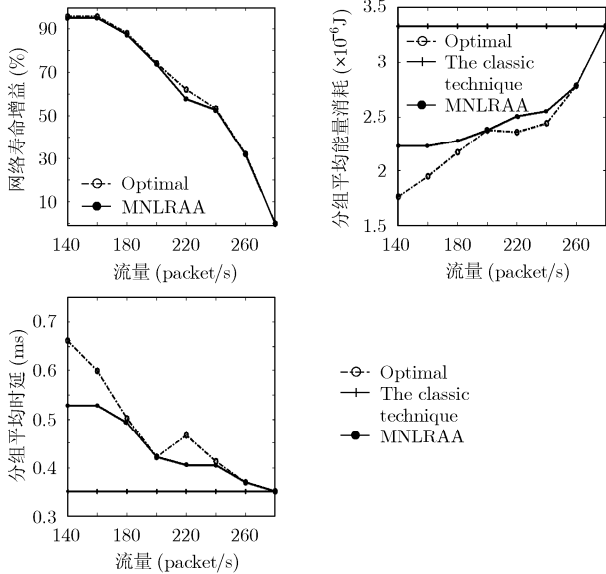


图2 网络拓扑结构下网络性能比较

实验2 将60个节点随机地分布在900m×900m的区域里,节点的初始能量都是60J,网络中有4条多跳流。每条多跳流的流量相等,流量从100分组/s到400分组/s。实验结果如图3,所有实验结果取50个随机产生的拓扑结构的平均值。从图3可以看出,MNLRAA的网络寿命接近最优算法,它们较经典技术都有较大的提高,但是随着流量的增加,网络寿命增加的程度逐渐降低,因为流量的增加会导致节点需要更多的信道访问时间,由于节点共享同一个信道,这样就使得节点逐渐提高自己的传输速率。同时图3显示了最优算法和MNLRAA的延迟比经典技术有一定程度的增加。这

是因为最优算法和MNLRAA都尽量使用较低的传输速率发送分组,一方面会增加分组的传输延迟;另外一方面可能增加了局部信道竞争程度,导致分组的队列延迟增大,因此分组的端到端延迟增加了。MNLRAA的端到端延迟比经典技术平均增加8%,但是MNLRAA的网络寿命较经典技术平均提高了21%。

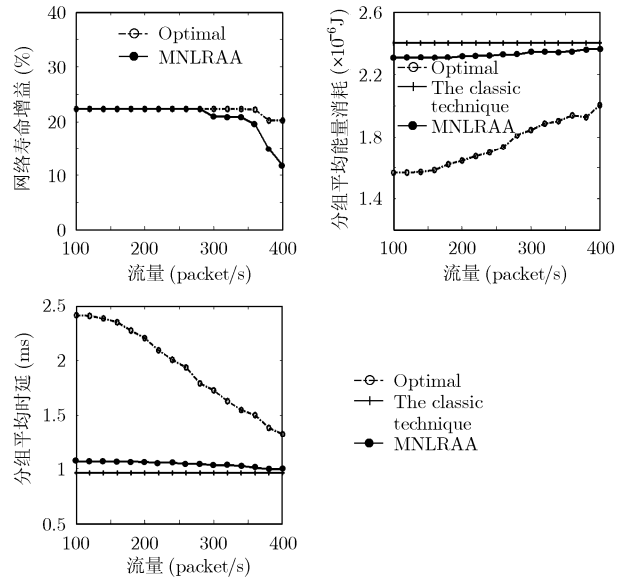
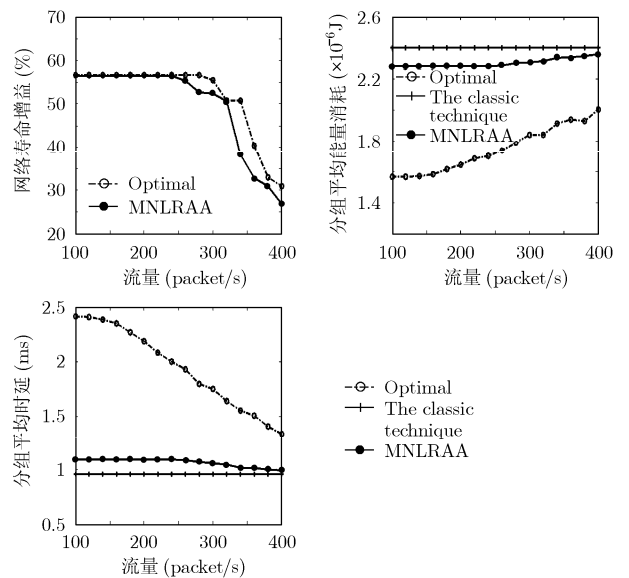


图3 随机拓扑结构(节点初始能量相同)下网络性能比较

实验3 与实验2不同的是,本实验随机地产生每个节点的初始能量,能量的取值范围是(0,120J)。图4给出了3



种算法的网络性能比较。与实验2结果类似,MNLRAA和最优算法的网络寿命性能优于经典技术,同时分组平均能量消耗小于经典技术。进一步,可以通过图3和图4的比较看

出在节点初始能量随机产生的情况下, MNLRAA 的网络寿命提高的程度更大。

6 结束语

本文研究如下问题: 对于给定的网络拓扑结构及其上每条链路的流量需求, 最大化网络寿命的速率调整问题。本文首先将它模型化为混合整数非线性规划问题, 然后提出了一个基于贪心策略的分布式最大化网络寿命速率调整算法 MNLRAA。实验结果表明, MNLRAA 在网络寿命上接近最优算法, 而且相对经典技术有较大提高。

参考文献

- [1] Kamerman A. WaveLAN II: A high-performance wireless LAN for the unlicensed band. *Bell Labs Technical Journal*, 1997, 2(3): 118-133.
- [2] Holland G and Vaidya N H. A rate-adaptive MAC protocol for multi-hop wireless networks. Proc. of ACM MobiCom, Rome, Italy, 2001: 236-250.
- [3] Ji Z and Yang Y. Exploiting medium access diversity in rate adaptive wireless LANS. Proc. of ACM MOBICOM, Philadelphia, USA, 2004: 345-359.
- [4] Qiao D, Choi S and Jain A, *et al.* Miser: An optimal low-energy transmission strategy for IEEE 802.11a/h. Proc. of ACM MobiCom, San Diego, USA, 2003: 161-175.
- [5] Chang J H and Tassiulas L. Routing for maximum system lifetime in wireless ad-hoc networks. Proc. of the 37th Annu. Allerton Conf. on Communication, Control, and Computing, Monticello, IL, 1999: 22-31.
- [6] Kim D, Garcia-Luna-Aceves J J, and Obraczka K, *et al.* Routing mechanisms for mobile ad hoc networks based on the energy drain rate. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2003, 2(2): 161-173.
- [7] Feeney L M and Nilsson M. Investigating the energy consumption of a wireless interface in an ad hoc networking environment. Proc. of IEEE INFOCOM, Anchorage, USA, 2001: 1548-1557.
- [8] Jain K, Padhye J, and Padmanabhan V N, *et al.* Impact of interference on multi-hop wireless networks performance. Proc. of ACM MOBICOM, San Diego, USA, 2003: 66-80.
- [9] Yu Y, Krishnamachari B, and Prasanna V. Energy latency tradeoffs for data gathering in wireless sensor networks. Proc. of IEEE INFOCOM, Hong Kong, China, 2004: 244-255.

王青山: 男, 1975年生, 讲师, 博士生, 研究方向为路由算法和协议。

许胤龙: 男, 1962年生, 教授, 博士生导师, 国家高性能计算中心(合肥)常务副主任, 研究方向为并行算法、网络路由算法和协议、网络编码。

徐晨光: 男, 1982年生, 硕士生, 研究方向为组播路由算法。

张纯鹏: 男, 1980年生, 博士生, 研究方向为MAC层协议。