

基于接收方信道质量的 Ad Hoc 网络多信道 MAC 协议

陆 阳^{1,2}, 盛 锋¹, 官骏鸣¹, 方 梅¹

LU Yang^{1,2}, SHENG Feng¹, GUAN Jun-ming¹, FANG Mei¹

1. 合肥工业大学 计算机与信息学院, 合肥 230009

2. 安全关键工业测控技术教育部工程研究中心, 合肥 230009

1. College of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China

2. Engineering Research Center of Safety Critical Industry Measure and Control Technology of Ministry of Education, Hefei 230009, China

E-mail: shengfeng73@126.com

LU Yang, SHENG Feng, GUAN Jun-ming, et al. Multi-channel MAC protocol based on channel quality of receiver for Ad Hoc networks. *Computer Engineering and Applications*, 2009, 45(20): 129-132.

Abstract: A new metric "CQ" for measuring channel quality was presented after analyzing multi-channel MAC protocol currently. Furthermore, in order to resolve "bottleneck" issues on control channel and fairness in channel assignment which are common phenomena in multi-channel MAC protocols, a multi-channel MAC protocol with channel quality of receiver was developed. In addition, the simulation shows that the new approach can improve the network throughput and reduce the end to end average delay with less overhead.

Key words: Ad Hoc networks; multi-channel; Medium Access Control (MAC) protocol; channel quality

摘 要: 在分析当前 Ad Hoc 网络多信道 MAC 协议的基础上, 提出了一个衡量信道质量的度量参数 CQ (Channel Quality) 作为信道选择的依据。并提出了一个基于接收方信道质量的多信道 MAC 协议 MMCQ (Multi-channel MAC protocol with Channel Quality of receiver), 以解决多信道 MAC 协议常见的控制信道瓶颈和信道分配公平性问题。仿真表明: 该协议在降低控制信道开销的前提下, 能显著增加网络的平均吞吐量, 并降低端到端平均时延。

关键词: Ad Hoc 网络; 多信道; 介质访问控制协议; 信道质量

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2009.20.039 文章编号: 1002-8331(2009)20-0129-04 文献标识码: A 中图分类号: TN913

1 引言

当前的 Ad Hoc 网络中节点一般采用 CSMA/CA 技术实现信道接入^[1]。采用单信道的 Ad Hoc 网络无法根本解决多跳环境下的“隐藏终端和暴露终端问题”^[2-3], 同时节点的密度增加将加剧节点间的竞争和冲突, 导致信道的利用率下降。使用多信道有以下优点: (1) 减小网络中数据包的平均传输时延^[4]; (2) 允许邻居范围内的多个节点使用不同的信道通信, 能够有效地提高系统通信容量^[5]。

在 MAC 层实现多信道协议, 具有对其以上各层完全透明、实现简单, 无需修改上层协议等优点, 故多信道 MAC 协议是当前国内外 Ad Hoc 网络多信道技术研究的热点之一^[6-11]。现有的多信道 MAC 协议主要分为以下几类: (1) 基于专一控制信道和频率划分的多信道 MAC 协议^[6-8]; (2) 基于时隙划分的多信道 MAC 协议^[9]; (3) 基于跳频的多信道 MAC 协议^[10]。DCA (Dy-

namic Channel Assignment) 协议是基于专一控制信道的多信道 MAC 协议的典型代表, 它使用控制信道进行信道预约和协商。当发送方需要发送数据时, 首先发送含空闲信道列表 (Free Channel List, FCL) 的 RTS 帧与接收方进行信道协商, 然后接收方根据此 FCL 和自己维护的信道使用列表做出信道选择, 并将信道协商结果通过 CTS 帧告知发送方^[6]。FCL 中包含所有的可选信道及相关信息, 虽可为接收方的信道选择提供参考, 但控制信道会因为传输未选信道集合而消耗相当的带宽。这是因为备选信道集合越大, 额外开销也越大。研究表明, 使用 3 个信道 DCA 协议的网络吞吐量通常是 802.11 DCF 协议的两倍左右, 但当负载较重而帧较小时, 网络吞吐量会因为控制信道的瓶颈效应而迅速达到饱和, 导致性能提升明显减小^[6]。DPC (Dynamic Private Channel) 协议针对 DCA 协议的控制信道瓶颈问题, 对信道预约接入方式进行了改进, 通过每次在控

基金项目: 安徽省自然科学基金 (the Natural Science Foundation of Anhui Province of China under Grant No.070412049); 安徽省“十一五”重点科技攻关项目 (the 11th Five Years Key Programs for Science and Technology Development of Anhui Province No.07010302187)。

作者简介: 陆阳 (1967-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为无线自组织网络, 分布式控制; 盛锋 (1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为 ad hoc 网络 MAC 协议, 路由协议; 官骏鸣 (1979-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为多射频多信道 ad hoc 网络, 传感器网络路由协议; 方梅 (1983-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为 ad hoc 网络 MAC 协议。

收稿日期: 2008-04-24 **修回日期:** 2008-07-24

制信道上交互较少的协商信息并采用简化的竞争接入方法来减少对控制信道的开销,但这容易导致网络中的某几对节点长期占用大量信道资源,造成信道分配不公平^[7]。基于时隙划分的 MMAC(Multi-channel MAC)协议在网络中所有空闲信道用完的情况下,选择一个当前使用次数最少的信道分配给信道预约方,然后节点再通过竞争机制接入信道,这比预约成功后直接接入信道的方法更能保证网络的公平性^[8],但基于时隙划分和跳频的多信道 MAC 协议需要节点间严格的时钟同步机制,这在移动性强、网络拓扑易变的 MANET 中是较难实现的^[11]。

上述多信道 MAC 协议解决方案都在一定程度上提高了 Ad Hoc 网络的性能,但存在控制信道瓶颈、协议开销、信道分配公平性等问题,且算法的具体实施较为复杂。本文提出一种基于接收方信道质量的多信道 MAC 协议 MMCQ(Multi-channel MAC protocol with Channel Quality of receiver)。协议中,接收方无需与发送方协商信道,而是通过在控制信道上主动监听各信道使用情况来构造表征信道综合质量的参数 CQ(Channel Quality),以此作为信道选择的依据,这就有效缓解了 DCA 协议控制信道传输瓶颈问题,从而在减小协议开销同时,均衡信道负载,提升网络的整体性能。

2 MMCQ 协议

2.1 MMCQ 协议的前提假设

(1)每个节点至少有 $M(M \geq 2)$ 个半双工收发器。其中 1 个作为控制收发器,固定在控制信道上;另外 $M-1$ 个收发器作为数据收发器,可以在不同的数据信道上切换。因此可以认为,每个节点都具有 1 个控制信道, $N-1$ 个数据信道($N \geq M$),其中 $N-1$ 个数据信道互为正交且带宽相等。

(2)节点在控制信道上监听的同时可在数据信道上收发数据。为便于说明,文中假设每个节点有 2 个半双工收发器,其中 1 个作为控制收发器,另 1 个作为数据收发器。

2.2 MMCQ 协议的信道预约机制

图 1 表明了节点 A-B、C-D 之间信道预约和接入过程,其中 $CR_CTS(n)$ 和 $CR_RES(n)$ 表示节点预约编号为 n 的信道。

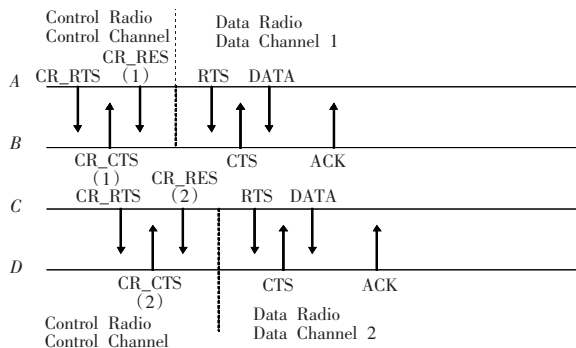


图 1 MMCQ 协议的信道预约和接入过程

当前信道分配状况如图 2 所示,当节点 A 有数据需要向节点 B 发送时,A 将在控制信道上发送一个信道预约请求 CR_RTS (Channel Reserve with Request To Send)帧给 B,B 收到 CR_RTS 后,选择一个质量最高的信道,并将该信道 ID 捎带在信道预约回复帧 CR_CTS (Channel Reserve with Clear To Send)中回复给 A,关于信道质量的计算将在 2.3 节中描述。由于接收方 B 单方面做出信道分配决策,故 CR_RTS 帧中无需捎带有关发送方的信道协商信息,这样可以有效减轻收发双方

协商信道所造成的控制信道开销过大的问题^[9]。但对发送方 A 而言,接收方 B 所选信道可能是存在冲突的,为此协议要求信道预约之后仍需竞争接入。同时,A 在收到 B 回复的 CR_CTS 后,发送信道预约确认帧 CR_RES (Channel Reserve with Reserve)给 B,为便于统计信道上的流量, CR_RES 帧中捎带了 A 稍后将在数据信道上发送的 DATA 帧的大小。A 的邻居节点通过监听 CR_RES 帧得知节点 A 所选择的信道,因此在下一次做出信道选择决策时,所有作为接收方的邻居节点(图 2 中为节点 C、E)将考虑 A 已经使用的信道,并尽量避免使用相冲突的信道,网络信道分配状态将进行自适应调整,如从图 2 转换为图 3 的信道分配状态。

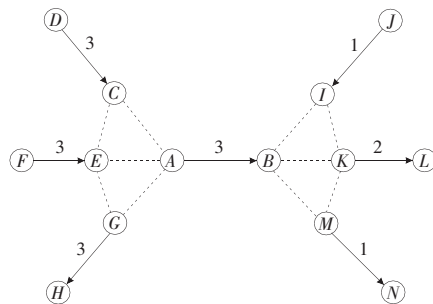


图 2 自适应调整前的信道分配状态

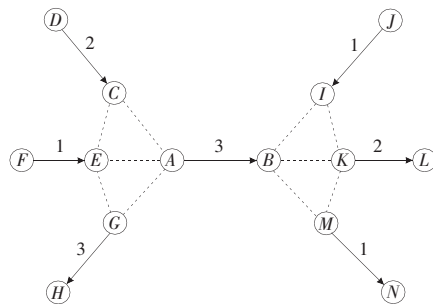


图 3 自适应调整后的信道分配状态

图 3 中,节点 G 作为发送方,不会受到节点 A 所选择的信道的影 响,依然保持在 3 号信道。因为 G 是 A 的暴露终端,故 $G \rightarrow H$ 与 $A \rightarrow B$ 使用同一信道通信不会存在相互干扰问题。所有发送方在预约信道之后,就转入竞争接入阶段,竞争接入机制与 802.11 DCF 协议基本相同。区别在于所有的竞争接入都是在先前协商好的相应数据信道上进行,这就能够充分减少冲突和竞争,提高局部区域内并行传输的能力,并随着网络拓扑结构的变化实现信道优化分配与均衡负载。

2.3 MMCQ 协议的信道选择

在 MMCQ 协议中,收到信道预约请求 CR_RTS 帧的节点,将根据其所维护的信道质量列表来选择质量最高的信道作为其数据信道,并通过回复 CR_CTS 帧通知信道预约方切换到相同的数据信道。为便于计算信道质量,协议建立了以下数据结构。

(1)邻居使用信道列表(Neighbour Using Channel List, NUCL)

节点通过在控制信道上监听表示信道预约成功确认的 CR_RES 帧,利用其所携带节点 ID 号和信道编号 ch_id 来建立、维护邻居使用信道列表。若节点长时间(仿真中取 5 s)没有收到来自某个邻居的 CR_RES 帧,则标记该表项过期。NUCL 的数据结构如图 4 所示。

邻居节点 node_id	使用的信道编号 ch_id	生存期 life_time
--------------	---------------	---------------

图 4 邻居使用信道列表

(2) 信道流量列表(Channel Throughput List, CTL)

节点通过在控制信道上监听 CR_RES 帧, 并根据其携带的后续数据帧大小的信息来统计最近 t 秒内该信道上的流量。值得注意的是, 该统计的前提是假设信道预约成功就一定能够发送数据(实验表明, MMCQ 在预约信道成功之后的冲突概率很小)。因此, CTL 是对最近 t 秒内信道上流量的估计, 其数据结构如图 5 所示。

信道编号 ch_id	该信道最近 t 秒的流量 ch_throughput
------------	------------------------------

图 5 信道流量列表

(3) 信道质量列表(Channel Quality List, CQL)

首先, 根据 NUCL 计算信道 i 的使用个数百分比(Channel Using Number Percentage, CUNP)。

$$CUNP_i = \frac{\text{邻居使用信道列表中信道编号为 } i \text{ 的邻居节点个数}}{\text{节点的邻居个数}}$$

然后, 根据 CTL 来计算信道 i 的流量占节点所在局部区域(仿真中为 1 跳范围)总流量的比例(Channel Throughput Percentage, CTP), 其中 M 代表网络中最大的信道编号。

$$CTP_i = \frac{\text{信道 } i \text{ 最近 } t \text{ 秒的流量}}{\sum_{j=0}^M \text{信道 } j \text{ 最近 } t \text{ 秒的流量}}$$

MMCQ 协议采用完全基于接收方的信道选择机制, 接收方收到信道预约请求 CR_RTS 帧后, 通过查找其 CQL(数据结构如图 6 所示), 选择一个信道质量最高的信道作为收发双方使用的数据信道, 并将该信道 ID 捎带在 CR_CTS 中回复给发送方。协议认为, 信道质量可以从下面两个方面来考虑:

信道编号 ch_id	信道质量 CQ_id
------------	------------

图 6 信道质量列表

(1) 使用信道 i 且为发送方的邻居节点个数。这里之所以不考虑作为接收方的邻居节点个数, 是因为发送方通常对信道的干扰较大, 而接收方对信道的干扰相对较小^[12]。图 2 中, 尽管 I 是 B 的邻居节点, 但 $A \rightarrow B$ 的传输对 $J \rightarrow I$ 的干扰较小。参数 $CUNP_i$ 反映了当前邻居范围内信道 i 使用情况, 使用该信道的邻居节点数越少, $CUNP_i$ 的值就越小, 在信道 i 上传输数据受到干扰的可能性也就越小。

(2) 使用信道 i 且为发送方的邻居节点的流量统计。参数 CTP_i 反映了在邻居范围内信道 i 在过去 t 秒中的历史流量情况, 信道 i 的流量越小, CTP_i 的值就越小。为使业务能够均匀分布在各信道上, 协议优先选择 CTP 值较小的信道。

将上面两个参数按照一定的比例系数加权, 可以得到反映信道 i 当前和历史状况的信道质量参数 CQ_i , CQ_i 越大表明信道 i 的信道质量越好, 从而为合理的信道选择提供依据。

$$CQ_i = \frac{1}{\alpha \times CUNP_i + (1 - \alpha) CTP_i}$$

3 协议仿真与分析

3.1 仿真场景的设置

为验证本算法的性能, 在网络仿真器 NS2 上对 MMCQ 协议、DCA 协议、802.11 DCF 协议进行了性能比较, 其中 MMCQ

协议和 DCA 协议均采用 2 个收发器(1 个控制收发器, 1 个数据收发器), 3 个信道(1 个控制信道, 2 个数据信道), 控制信道绑定在控制收发器上, 而数据收发器可在 2 个数据信道间进行切换。仿真参数如下: 控制信道和数据信道的数据率均为 2 Mbit/s, 最大传输距离为 250 m, 载波监听范围为 500 m, 信号衰减服从双波模型, 链路层的缓存为 64 个包, 信道切换时延忽略不计。

仿真场景中, 50 个节点随机分布在 500 m×500 m 的矩形区域内, 且每次仿真随机选择 20 对源-目的节点传输数据, 通信源是 CBR 流。采用 Radom way point 运动模型, 最大运动速度为 2 m/s。这里分别通过增加 CBR 数据包发送速率和大小来增加网络负载, 其中数据包发送速率分为 1、3、6、10、40、70、100、300、600、1 000 Packet/s; 数据包大小为 256、512、1 024 Byte。考察以不同方式逐步增加网络负载情况下的 MAC 协议性能。每次仿真运行时间为 200 s。为更加真实地反映协议的性能, 仿真中数据均为 5 次不同种子条件下所得到的平均值。

3.2 性能评价参数

(1) 网络平均吞吐量: 定义为整个网络单位时间内交付到目的节点的数据分组总量, 反映了整个网络承受负载的能力以及网络传输的可靠性。

$$\text{网络的平均吞吐量(KBs)} = \frac{\text{目的节点接收包的总字节数(Byte)}}{\text{网络仿真时间(s)} \times 1024}$$

(2) 端到端平均时延: 定义为一个数据包成功到达目的节点所需时间的平均值。包括路由查找时延、数据包在接口队列中的等待时延、传输时延以及 MAC 层重传时延。它是反映网络性能的一个重要指标。

$$\text{平均端到端时延(s)} =$$

$$\frac{\sum (\text{目的节点接收数据包的时间} - \text{源节点发送此数据包的时间})}{\text{发送数据包的个数}}$$

3.3 仿真结果及分析

3.3.1 α 取值仿真分析

α 的取值说明了 CUNP 与 CTP 在信道质量参数 CQ 中所占的权重。 α 取值越大, 信道选择越倾向于信道当前的使用状况; 反之, 则越倾向于信道流量负载的均衡。图 7 显示了取不同 α 值条件下的 MMCQ 协议的平均吞吐量, 仿真中固定包大小为 512 Byte, 随着网络负载不断加大, MMCQ 协议的吞吐量逐渐达到饱和。可以看出, 当 α 取值 0.6 时, MMCQ 协议的平均吞吐量在发包速率约为 100 Packet/s 时达到峰值。

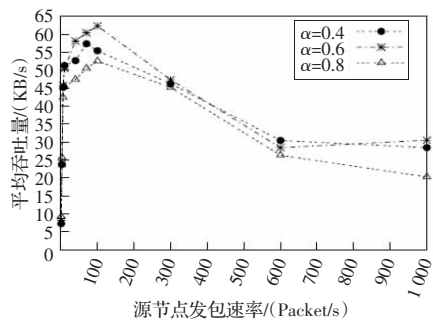


图 7 α 取不同值时的平均吞吐量比较

3.3.2 平均吞吐量的比较与分析

图 8~图 10 比较了 MMCQ 协议与 DCA 协议、802.11 DCF 协议的平均吞吐量。可以看出, MMCQ 协议的网络平均吞吐量高于 DCA 协议, 更优于传统的 802.11 DCF 协议。观察包大小

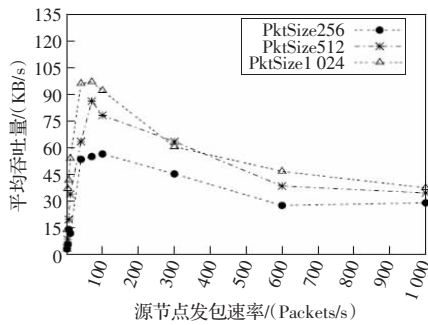


图8 MMCQ协议的平均吞吐量

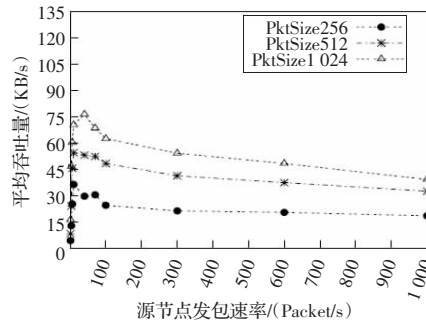


图9 DCA协议的平均吞吐量

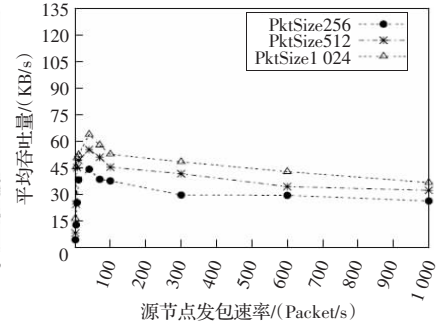


图10 802.11协议的平均吞吐量

分别为 256、512、1 024 Byte 的最大吞吐量,MMCQ 协议比 DCA 协议高出了约 20、30、25 KB/s,比 802.11 协议高出了约 15、30、35 KB/s。

注意到数据包大小对 3 个协议的吞吐量都有着不同程度的影响。这是因为包越小,为达到相同吞吐量所发送的包就越多,进行信道预约和协商的开销也就越大。从图中可以发现,DCA 协议的平均吞吐量受包的大小影响最大,当包大小为 256 Byte 时,DCA 协议的最大平均吞吐量迅速减小,甚至略小于 802.11 DCF 协议,这就证实了前文对使用 DCA 协议会出现控制信道瓶颈效应的分析。MMCQ 协议采用完全基于接收方的信道预约机制,减少了信道预约与协商的开销,缓解了多信道 MAC 协议中常见的控制信道瓶颈问题。并通过构造表征信道质量的参数 CQ ,使信道分配状态根据网络拓扑的变动进行自适应的调整,故 MMCQ 协议最大平均吞吐量要明显优于 DCA 协议和 802.11 协议。同时 MMCQ 协议对包大小的敏感程度相对 DCA 协议也比较小。

3.3.3 端到端平均时延比较与分析

图 11 比较了 MMCQ 协议与 DCA 协议、802.11 DCF 协议的端到端平均时延,其中包大小固定为 512 Byte。可以看出,MMCQ 协议和 DCA 协议的端到端平均时延要小于 802.11 DCF 协议。同时,当网络负载较小(图 11 中表现为源节点发包速率小于 300 Packet/s)时,MMCQ 协议要比 DCA 协议的端到端平均时延略大一些,这是因为,MMCQ 协议将信道协商与信道接入过程分开完成,而 DCA 协议通过在信道预约接入过程中捎带了信道协商的信息,其过程比 MMCQ 协议要略微简化。但随着网络负载的不断加大,DCA 协议控制信道的瓶颈逐渐显现,故在较高网络负载的情况下(图 11 中表现为当源节点发包速率大于 400 Packet/s),MMCQ 协议的端到端平均时延要小于 DCA 协议。

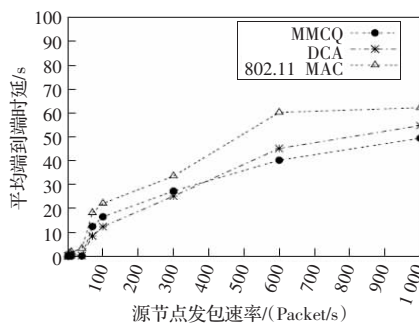


图11 平均端到端时延的比较

4 结论

在充分研究当前 Ad Hoc 网络多信道 MAC 协议的基础

上,对多信道 MAC 协议中存在的问题进行了分析,提出了一种基于接收方信道质量的多信道 MAC 协议 MMCQ,协议通过降低信道预约开销来缓解多信道协议中常见的控制信道瓶颈问题,并且通过构造表征信道质量的参数 CQ 来完成信道公平分配与均衡负载。仿真结果比较表明,该协议能够显著提高 Ad Hoc 网络的平均吞吐量,减少端到端传输时延。

参考文献:

- [1] Li J, Haas Z J, Sheng M. Capacity evaluation of multi-channel multi-hop ad hoc networks[C]//2002 IEEE Intl Conf on Personal Wireless Communications, Ithaca, USA, 2002: 211-214.
- [2] 于宏毅. 无线移动自组织网[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2005: 11-12.
- [3] IEEE Standard 802.11. IEEE Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications[S]. June 1999.
- [4] Jain N, Das S, Nasipuri A. A multi-channel CSMA MAC protocol with receiver-based channel selection for multihop wireless networks[C]//Proceedings of the 9th Int Conf on Computer Communications and Networks (IC3N), Phoenix, USA, 2001: 432-439.
- [5] Bahl P, Adya A, Padhye J, et al. Reconsidering wireless systems with multiple radios[J]. Computer Communication Review, 2004, 34(5): 39-46.
- [6] Wu S L, Lin C Y, Tseng Y C, et al. A new multi-channel mac protocol with on-demand channel assignment for multihop mobile ad hoc networks[C]//International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms and Networks, Texas, USA, 2000: 232-236.
- [7] Hung W C, Law K L E, Leon-Garcia A. A dynamic multi-channel MAC for Ad Hoc LAN[C]//Proceedings of 21st Biennial Symposium on Communications, Kingston, Ontario, Canada, 2002: 377-381.
- [8] Wu Shih-Lin, Tseng Yu-Chee, Lin Chih-Yu, et al. A multi-channel MAC protocol with power control for multi-hop mobile Ad Hoc networks[J]. The Computer Journal, 2002, 45(1): 101-110.
- [9] So Jungmin, Vaidya Nitin. Multi-channel MAC for ad hoc networks handling multi-channel hidden terminals using a single transceiver[C]//ACMMobiHoc'04, Tokyo, Japan, 2004: 222-233.
- [10] Bahl P, Chandra R, Dunagan J. SSCH: Slotted seeded channel hopping for capacity improvement in IEEE 802.11 Ad-Hoc wireless networks[C]//Proceedings of ACM Mobicom, Pennsylvania, USA, 2004: 216-230.
- [11] Mo J, So H W, Walrand J. Comparison of multi-channel MAC protocols[C]//The 8th ACM/IEEE International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems, Montreal, Canada, 2005: 209-218.
- [12] Karn P. MACA-A new channel access method for packet radio[C]//Proceedings of the 9th ARR L/CRR L Amateur Radio Computer Networking Conference, Ontario, Canada, 1990: 134-140.