

CBLA:多信道无线网状网络负载感知的分簇式信道分配

王 晶,管雪涛,杨 春,张 杨,程 旭

(北京大学微处理器研发中心,北京 100871)

摘 要: 多信道技术能够显著提升无线网状网络的容量,合理高效的信道分配方案是多信道网状网络的核心问题.本文提出了一种分布式的信道分配方法 CBLA(Cluster-Based Load-Aware),结合了静态信道分配简单和动态信道分配灵活的特点;借助簇结构降低了问题的规模;根据统计开销小的局部信息监测链路负载;自适应的动态分配有效减轻了链路负载;采用了一种新的结合跳步数、信道分布情况和簇信息的选路指标.实验结果表明 CBLA 有效降低了数据包的平均延迟,并显著提升了网络吞吐量.

关键词: 无线网状网络;多信道;信道分配;分簇;负载感知

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 03-0546-06

CBLA: Cluster-Based Load-Aware Channel Assignment for Multi-Channel Wireless Mesh Networks

WANG Jing, GUAN Xue-tao, YANG Chun, ZHANG Yang, CHENG Xu

(Micro Processor Research and Development Center, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The capacity of wireless mesh networks can be significantly improved by multi-channel communications; channel assignment is an important issue in multi-channel Mesh network. We propose a novel distributed channel assignment algorithm CBLA(Cluster-Based Load-Aware), which takes advantage of both static and dynamic channel assignment approaches. CBLA uses clustering to reduce the complexity of channel assignment problem, estimates the traffic load by low-overhead statistic information of local packets. Adaptive dynamic channel assignment results in a better link load equilibrium. We also introduce a new routing metric, which combines hop count, channel diversity and cluster information together. A detailed performance evaluation shows that CBLA significantly improves aggregated throughput and reduces average packet delay.

Key words: wireless mesh networks; multi-channel; channel assignment; clustering; load-aware

1 引言

无线网状网络是一种新型的无线网络结构,它具有较高的可靠性、较大的伸缩性和较低的投资成本,是一种解决无线接入“最后一公里”瓶颈问题的新方案.各类用户对于无线网状网络接入技术的共同需求是更高的带宽、更低的延迟、更大的网络容量.

由于无线通信“共享介质”以及无线传输时变的特征,实际应用过程中多用户冲突和多跳传输等问题会大幅降低网络吞吐量,因此单信道的无线协议限制了无线网状网络的容量.构建多信道网状网络能够解决无线多跳网络扩展性差的问题,并能显著提升网络容量.

但实际网络中可用信道数目有限,因此需要有效的

信道分配方法,根据网络负载合理分配和使用信道.信道分配是多信道网状网络的核心问题,本文提出了一种分簇式的负载感知信道分配算法 CBLA. CBLA 是一种面向多接口多信道无线网状网络的混合信道分配方法,与已有方法的不同之处在于:(1)提出了一种自适应的信道分配方法:结合静态信道分配划分的网络连通情况,通过直接切换信道或者启用链路不重合路径的方式,实现了簇内和簇间动态信道分配,维护了网络的连通性,并在局部范围内解决网络干扰和丢包问题;(2)引入了一种根据局部收发包统计信息评估链路负载的机制;(3)设计了一种新的选路标准,结合了路径跳步数、信道分布情况和簇结构信息,提供了吞吐量高、延迟小的路由路径.

本文的组织结构如下:第 2 章介绍了相关研究工作,第 3 章对 CBLA 方法进行了详细描述,第 4 章给出了实验结果和分析,最后在第 5 章进行了总结。

2 相关工作

多信道分配策略可分为静态、动态和混合信道分配^[1]。静态分配^[2]让每个节点的接口都固定在一组公共信道上,其优点是简单、扩展性好,但信道利用率低。动态分配弥补了静态分配信道利用率低的缺点:SS-CH^[3]的节点依据信道跳变表切换信道,通过交换和更新跳变表,避免发生碰撞;MMAC^[4]在每个传输周期开始时协商选定通信节点对及信道。动态分配的缺点是需要复杂的时间同步和协调机制,因此扩展性差,不适用于大规模的网络。Kyasanur^[5]提出了混合信道分配方法,既能保留静态方法简单、可扩展性好的特点,又能支持动态方法灵活、适应性强的特性。混合信道分配的挑战在于信道分配的权衡和切换的协调等带来了设计和实现的复杂性。

分簇式的信道分配方法能够减少共享相同信道的节点数目,增加信道复用率,同时简化了节点间复杂的协调机制,降低了信道依赖问题发生的频率。Liu^[6]的方法在分簇的网络中能够根据专用节点监测的信道使用情况在簇内部动态分配信道,但固定的簇间通信链路可能成为网络通信瓶颈。CCA^[7]方法在簇内和簇间都可以根据网络负载情况动态分配信道,代价是往往会增加路径长度;CCA 根据链路层 ACK 来评估网络负载,适用的数据流类型有限。现有的分簇式混合信道分配方法在检测链路负载和动态信道切换方面均有不足之处,本文提出了自适应的动态信道分配方法,在簇内和簇间都能够自适应的分配信道,并尽可能不增加路由路径长度,所采用的链路负载检测方法实现开销小,不依赖专用监控节点,不受限于网络数据流的类型。

3 CBLA 整体设计

CBLA 信道分配方法假设每个节点至少配有两个无线接口,其过程包括:(1)分簇过程;(2)静态信道分配和建立记录簇之间连通情况的 NICA (Neighbor Clusters Information Array) 过程;(3)链路负载监测过程;(4)均衡网络负载的动态信道切换过程。

3.1 分布式的分簇过程

当前研究中已经提出了许多分簇算法^[8],本文选择的基于节点 ID 的分布式分簇算法^[9]通过节点之间分布的协作将网络分成若干个簇,具有较小的重构开销。为了避免由于簇半径过小而无法消除干扰影响,以及由于簇半径过大而无法降低复杂度等问题,CBLA 结合干扰距离和传输距离的比例选择簇半径,使每一个簇

对应一个干扰域。

3.2 静态信道分配及 NICA 建立

静态信道分配阶段包括簇内信道分配和簇间信道分配两步。簇内信道分配为每个簇分配一个同邻居簇不干扰或干扰最小的簇内固定信道,簇的成员之间在簇内固定信道上通信。

CBLA 在簇间采用统一信道分配方法:为簇间链路分配统一的公共信道,使得静态信道分配的网络和分簇后单信道的网络具有相同的网络拓扑,更好的保持网络的连通性。静态信道分配后,簇内成员节点的一个接口在簇内固定信道上通信,另一个接口处于空闲状态;边界网关节点的一个接口用于簇内通信,另一个接口在簇间公共信道上同邻居簇的边界网关节点通信,维护网络的连通性。假设静态分配后,网络如图 1:

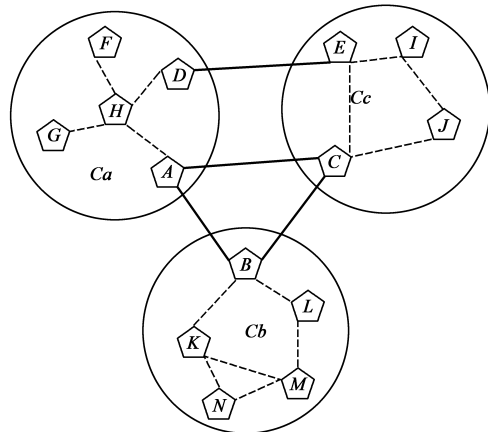


图1 静态信道分配的网络示意图

静态信道分配后每个簇的簇头节点都维护了一个邻居簇信息矩阵 NICA,记录了相邻簇和边界网关节点的对应关系,图 1 所示的网络中 3 个簇所对应的 NICA 如图 2 所示。簇头节点可以在矩阵中查找同某个相邻簇连接的所有边界网关节点,或者某个边界网关节点连接的所有相邻的簇。当 NICA 中某个邻居簇对应的列向量不为零时,簇同该邻居连通。动态信道分配时,可以依据 NICA 信息,判断直接切换当前链路信道是否会导致某个列向量为零,影响网络的连通性或引发网络分离问题。

	<i>c</i>	<i>b</i>
<i>A</i>	1	1
<i>D</i>	1	0

(a)

	<i>a</i>	<i>c</i>
<i>B</i>	1	1

(b)

	<i>a</i>	<i>b</i>
<i>C</i>	1	1
<i>E</i>	1	0

(c)

图2 邻居簇信息矩阵

3.3 链路丢包率监测

随着网络中数据流的变化,最初的静态信道分配可能会引起信道使用的不均衡、信道的使用量过高或

邻近链路干扰等问题,导致链路丢包.丢包率反映了当前链路是否满足数据流的带宽需求,因此采用链路的丢包率作为衡量信道负载的指标,双向链路的丢包率表示为:

$$P = 1 - (1 - P_f) \times (1 - P_r)$$

其中 P_f 和 P_r 分别代表链路正向和反向路径的丢包率.为了检测链路丢包率,节点需要收集信道负载信息.发送链路质量探测包的方式需要针对每个邻居节点发包并接收应答,将加重网络负载、增大网络开销.记录链路层 ACK 的方式^[2]无法对广播或组播的数据流进行监控.CBLA 中每个节点根据下一跳节点和发送信道对发送数据包计数,根据前一跳节点和接收信道对接收数据包计数.节点定期同一跳步邻居交换 Hello 消息,根据 Hello 消息中的收发包统计计算丢包率. Hello 消息格式如表 1 所示:

表 1 Hello 消息格式

节点 ID	信道	发送数据包数	接收数据包数
A	6	356	1290
A	11	104	0
B	5	0	7398
...

3.4 动态信道切换

若网络中节点检测到当前链路上丢包率 P 大于给定阈值 P_{loss} ,则进入动态信道切换阶段.首先选择切换接口,节点的接口根据切换特性分为:空闲、锁定和可变三种状态.空闲接口连接的所有链路都是不活跃的,可以随意切换信道.锁定接口不能切换信道,否则将影响网络中数据流的传输或网络连通性.为保证簇内节点能够及时接收到簇头节点的指示,用于簇内固定信道通信的接口状态为锁定状态.边界网关节点上用于维护簇之间连通性的接口为可变状态,在网络负载较重时可以根据网络连通情况切换信道.空闲接口和可变接口上有活跃链路时进入锁定状态.

静态信道分配维持了与单信道分簇网络相同的连通性,给动态切换带来了更高的灵活性,因此动态切换时节点首先尝试是否可以在不引起信道依赖问题和不破坏网络连通性的情况下,直接切换当前链路的信道.节点首先根据算法 1 选择用于切换的接口:若有空闲接口,则用空闲接口直接切换路信道;否则,若节点的可变接口改变信道后,不会影响当前网络中数据流的传输,即节点不在某条数据流的路由路径上,或不影响网络连通性,即不会导致 NICA 矩阵中某个原来不为零的列向量变为零,则直接切换可变接口的信道.

节点根据接口选择的结果,执行算法 2 的动态信道

分配过程.若链路两端的节点 u 和 v 都有接口可直接切换信道,则可以通过信道选择算法为链路分配其干扰范围内负载最轻的信道;若仅有一个节点 v 可以切换信道,则从另一个节点 u 当前使用的信道中选择,为避免引发信道切换的抖动等问题,限定 u 选择信道使用率低于给定阈值 η 的信道.若上述两种情况均无法满足,则寻找与当前链路不重合的新路径,继续完成数据包的收发.

算法 1:选择接口

```

 $u, v$ : 丢包率超过阈值的链路  $L$  的两个端点
 $F(n)/A(n)/S(n)$ : 节点  $n$  的空闲/可变/可以切换信道的接口
 $C_{\text{set-}n}$ : 节点  $n$  所在的簇  $C_n$  的邻居簇集合(不包括  $v$  所在簇)
 $GW(C_i, C_j)$ : 连接簇  $C_i$  和  $C_j$  的边界网关节点集合
for  $n$  in  $\{u, v\}$  {
   $S(n) = \phi$ ;
  if ( $F(n) \neq \phi$ )
     $S(n) = F(n)$ ;
  else
    if ( $(n = \text{gateway}) \&\& (A(n) \text{ unused})$ ) {
       $C_u = \{C_i | C_i \in C_{\text{set-}n} \&\& GW(C_n, C_i) = \{N\}\}$ 
      if ( $C_u = \phi$ )
         $S(n) = A(n)$ 
    }

```

算法 2:动态信道分配

```

 $K(u)$ : 节点  $u$  所使用的信道;  $g(c)$ : 信道  $c$  的使用率
if ( $S(v) \neq \phi$ ) && ( $S(u) \neq \phi$ )
  Select least-loaded channel for link  $L$ 
else
  if ( $S(v) \neq \phi$ ) && ( $S(u) = \phi$ ) {
     $uc = \{c | (c \in K(u)) \&\& (g(c) < \eta)\}$ 
    if ( $uc \neq \phi$ )
      find least-loaded channel from  $uc$ 
    else goto label;
  } else
    label: find disjoint path of  $L$ 

```

信道选择过程由簇头节点完成:每个簇头维护一个信道分级表,记录在簇的监听范围内信道的干扰和使用情况.簇头节点通过交换分级表,选定某条链路上新的通信信道.

3.5 路由选择

多信道网络中,采用传统的基于跳步数的路由选路指标已经不能充分发挥多信道的优势.CDM^[6]是一种综合了路径跳步数、信道分布以及未来信道改变的多信道无线网状网络路由选路指标:

$$\text{CDM} = \alpha \times \text{MLC} + \beta \times \text{HC} - \gamma \text{VCM}$$

$$1 < \alpha < 0, 1 < \beta < 0, 1 < \gamma < 0$$

其中 MLC(Maximum interfered-Link Count)代表干扰范围内最大干扰链路数,表明了路径上当前信道分布情况; HC(Hop Count)代表在网络拓扑给定的情况下静态计算的路径跳步数; VCM(Variable Channel Metric)代表路径上可能增加的信道数目,反映了路径的信道切换能力. 本文基于 CDM,提出了 CBLA 选路标准.

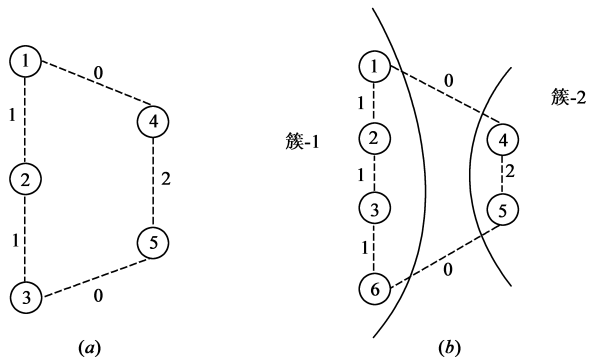


图3 路径示意图

CBLA 增加了静态分配的比重,如图 3(a),节点 2、4、5 有空闲接口,节点 1 寻找到达节点 3 的路径. 两条可能的路径为: A:1-2-3 和 B:1-4-5-3, 两条路径的信道干扰情况 MLC 相似, 尽管 VCM 越大, 网络吞吐量可提升的空间越大, 但实际环境中跳步数少的路径通常占用的网络资源较少, 因此限定 $\gamma < \beta$.

CBLA 尽量选择簇内路径: 图 3(b)中节点 2、3 有空闲接口, 节点 1 到 6 有两条路径, C:1-4-5-6 和 D:1-2-3-6. 其中 C 具有更小的 CDM 值, 但 D 可以在簇内固定信道上完成簇的内部通信, 将信道依赖等问题有效限制在簇的内部, 避免了簇之间的相互影响. 因此 CBLA 为选路指标增加因子 ICC(Intra Cluster Channel), 当路径上某一段的起点和终点来自同一个簇, 但使用了非簇内信道时 ICC 为 1, 否则为 0.

CBLA 选路指标如下:

$$CBLA = \alpha \times MLC + \beta \times HC - \gamma \times VCM + \lambda ICC$$

$$0 < \alpha < 1, \quad 0 < \gamma < \beta < 1, \quad 0 < \lambda < 1$$

4 实验及分析

本文在 NS-2^[10] 模拟器中添加多信道和多接口的支持, 实验中节点间传输距离为 250m, 干扰距离为 550m, 可用信道数为 12 个, 数据传输速率为 1Mbit/s, 物理层采用 DSSS 机制. 65 个节点随机放置在 2000 × 2000 平方米的区域内. 每个节点配置 2 个无线接口. 使用 CBR 数据流, 数据包大小为 1024B, 评测了如下两种数据流模式的性能: (1) 多跳步端到端数据流: 随机选 8 个数据流, 包含超过 5 步的长路径和少于 4 步的短路径. (2) 多跳步网关数据流: 随机选择 8 个节点, 从 3 个网关节点发送或接收数据.

4.1 吞吐量对比和分析

网络容量使用网络吞吐量表示^[11], 网络的饱和汇聚吞吐量定义为随着网络负载的增加, 系统吞吐量能够达到的极限值, 代表了系统在稳定状态所能支持的最大负载.

我们对比了端到端和网关 2 种数据流模式下四种网络的饱和汇聚吞吐量: (1) 单信道网络 SiCh; (2) 采用 Hyacinth^[12] 静态信道分配方法的多接口多信道网络; (3) Liu^[6] 提出的簇内动态簇间静态信道分配算法; (4) CBLA 负载感知信道分配算法.

实验结果如图 4 和图 5 所示. 在两种数据流模式下, CBLA 方法的网络吞吐量是单信道网络的 4.1 倍, 是静态多信道网络吞吐量的 2.2 倍. 由于在动态切换和选路指标上均有所改进, CBLA 相比于 Liu 的方法将网络吞吐量提高了 0.25 倍, 并增加了数据流传输路径的稳定性, 减小了簇之间的相互影响和吞吐量的抖动, 给用户提供了更好的带宽质量.

由于不同的网络情况和不同的数据流分布模式下, 网络的饱和吞吐量各不相同. 其中网关模式下数据流的分布更集中, 导致数据流之间的干扰情况更严重, 因此网络的饱和吞吐量偏低.

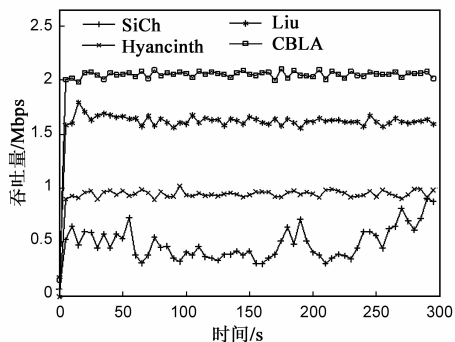


图4 端到端数据流模式网络的吞吐量

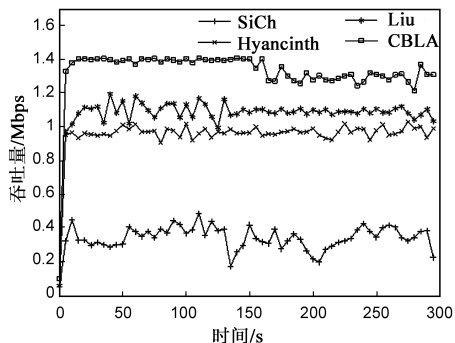


图5 网关数据流模式网络的吞吐量

4.2 网络延迟评测

延迟是网络中的数据包从离开源节点到到达目的节点所需时间, 减小网络延迟对提高网络中用户体验有着重要的作用. 端到端和网关两种数据流模式下数据包的平均延迟评测结果如图 6 所示, 相比于单信道网络, 多信道能

够有效降低网络延迟.分簇的多信道管理能够进一步降低数据包平均延迟.而 CBLA 方法实现了最优的性能,在单信道基础上将数据包平均延迟降低约 70%,在 Liu 的方法基础上将数据包平均延迟降低约 35%.

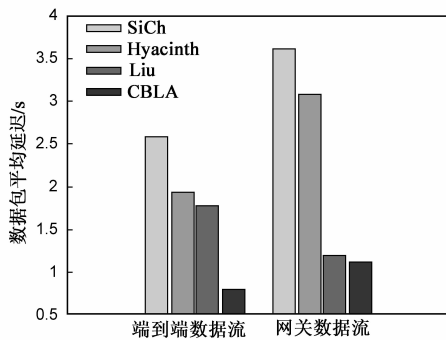


图6 数据包平均延迟

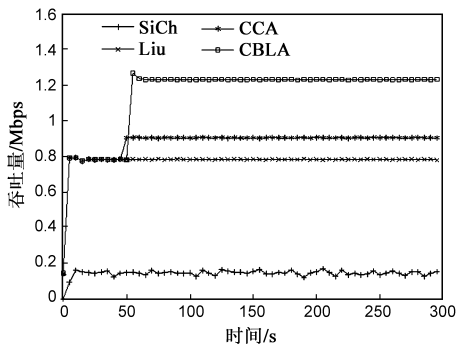


图7 动态信道切换

4.3 自适应动态切换评测

为了观察动态信道分配的效果,我们对比了四种网络的数据流负载逐渐增加过程中,网络吞吐量的变化:(1)单信道网络 SiCh.(2)Liu^[6]提出的簇内动态、簇间静态信道分配方法(3)CCA^[7]动态信道分配方法(4)CBLA 负载感知信道分配方法.图 7 的结果表明,Liu 的方法采用了多信道方案,并且可以对簇内信道进行动态切换,可以有效缓解簇内链路的负载.但当簇间出现链路丢包时 CBLA 和 CCA 可以切换簇间信道,进一步提升了网络吞吐量.在切换簇间链路过程中,CCA 启用不重合的路径,虽然增加了路径的长度,但跳步数多而吞吐量高的路径能够比跳步数少但吞吐量低的路径提供更高的网络容量.CBLA 也可以如 CCA 方法一样启用不重合路径,但 CBLA 方法会首先尝试直接切换簇间链路的信道,保证簇内通信不受影响,并由剩余网关节点完成簇间通信,在不破坏连通性的情况下,提供了最好的性能,因此 CBLA 方法吞吐量最高.

5 结论

本文提出了一种分簇式、负载感知的混合信道分配方法 CBLA. CBLA 首先将网络分成若干簇,并分别进

行簇内和簇间静态信道分配.数据传输过程中,邻居节点之间通过定期交换自身发送接收的数据包统计信息,评估链路负载.根据链路负载,采用直接切换信道或者启用链路不重合路径的方式,实现了自适应的簇内和簇间的动态信道分配,在局部范围内解决了网络干扰和丢包问题,并维护了网络的连通性.采用结合跳步数、信道使用情况和簇信息的选路指标,充分发挥了多信道和簇结构的特点.实验结果显示,CBLA 利用簇结构实现了简单有效的分布式混合信道分配方法,合理地利用了无线网状网络中的多个信道,有效地解决了无线多跳网络扩展性差的问题,并且显著地提升了网络容量.

参考文献:

- [1] 束永安,洪佩琳,覃振权.无线网状网中基于干扰模型的多信道分配策略[J].电子学报,2008,36(2):1256-1260.
SHU Yong-an, HONG Pei-lin, QIN Zhen-quan. Multi-channel allocation strategy based on interference model in wireless mesh networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(2): 1256-1260. (in Chinese)
- [2] D Richard, P Jitendra, Z Brian. Routing in multi-radio, multi-hop wireless mesh networks[A]. Proceedings of International Conference on Mobile Computing and Networking [C]. Philadelphia, PA, USA: ACM Press, 2004. 114-128.
- [3] B Paramvir, C Ranveer, D John. SSCH: slotted seeded channel hopping for capacity improvement in IEEE 802.11 ad-hoc wireless networks[A]. Proceedings of International Conference on Mobile Computing and Networking [C]. Philadelphia, PA, USA: ACM Press, 2004. 216-230.
- [4] S Jungmin, H V Nitin. Multi-channel mac for ad hoc networks: handling multi-channel hidden terminals using a single transceiver[A]. Proceedings of International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing [C]. Roppongi Hills, Tokyo, Japan: ACM Press, 2004. 222-233.
- [5] P Kyananur, J So, C Chereddi, N H Vaidya. Multichannel mesh networks: Challenges and protocols[J]. IEEE Wireless Communications, 2006, 13(2): 30-36.
- [6] C Liu, Z Liu, Y Liu, H Zhao, T Zhao, W Yan. A clustering-based channel assignment algorithm and routing metric for multi-channel wireless mesh networks[A]. Proceedings of International Symposium Parallel and Distributed Processing and Applications [C]. Niagara Falls, Canada: IEEE, 2007. 832-843.
- [7] S A Makram, M Gunes, A Kchiche, M Krebs. Dynamic channel assignment for wireless mesh networks using clustering[A]. Proceedings of the Seventh International Conference on Networking [C]. Washington, DC, USA: IEEE, 2008. 539-544.
- [8] A D Amis, R Prakash, T H P Vuong, D T Huynh. Max-min d-cluster formation in wireless ad hoc networks[A]. Proceedings

of INFOCOM[C]. Tel-Aviv, Israel: IEEE, 2000. 32 – 41.

[9] G Mario, T Jack Tzu-Chieh. Multicluster, mobile, multimedia radio network[J]. Wireless Networks, 1995, 1(3): 255 – 265.

[10] The ns-2 network simulator [OL]. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>, 1995.

[11] P Gupta, P R Kumar. The capacity of wireless networks[J].

IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(2): 388 – 404.

[12] R Ashish, G Kartik, C Tzi-cker. Centralized channel assignment and routing algorithms for multi-channel wireless mesh networks[J]. ACM Mobile Computing and Communications Review, 2004, 8(2): 50 – 65.

作者简介:



王 晶 女, 1982年8月出生于黑龙江省哈尔滨市. 北京大学信息科学技术学院博士研究生. 主要研究方向为计算机网络、操作系统和系统软件. E-mail: wangjing@mprc.pku.edu.cn



管雪涛 男, 1974年9月出生于山东省青岛. 北京大学信息科学技术学院讲师. 主要研究方向为操作系统, 系统软件和嵌入式系统. E-mail: guanxuetao@mprc.pku.edu.cn