

无线网状网射频链路的信道分配算法

马 莉¹, 朱光喜¹, 殷伯云²

(1 华中科技大学 电子与信息工程系, 武汉光电国家实验室宽带与智能网络中心研究部, 湖北 武汉 430074;

2 湖北省电力勘测设计院, 湖北 武汉 430022)

摘 要: 研究了无线网状网络节点的接口异构对网络容量的影响. 提出了一种新颖的以射频链路为信道分配对象的接口和信道联合分配的分布式贪婪最大算法. 该算法以队列长度为权的射频链路吞吐量之和最大为目标, 寻找自适应于网络拓扑和流量变化的分布式接口与信道联合分配方案. 算法分析指出本算法与非接口异构的 Dist. Greedy 算法的时间复杂度相当, NS2 仿真结果表明网络容量有明显提升.

关键词: 无线网状网; 射频链路; 自适应; ILP

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2010)09-0109-05

A New Algorithm for Improving Capacity of Wireless Mesh Network Based on Radio - Links

MA Li¹, ZHU Guang-xi¹, YIN Bo-yun²

(1 Department of Electronics and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology,

Wuhan National Laboratory of Optoelectronics, Wuhan 430074, China;

2 Hubei Electric Power Survey & Design Institute, Wuhan 430024, China)

Abstract: In this paper, we investigate the effect of heterogeneous interfaces for the capacity of distributed channel - assignment mesh network. We present a new distributed greedy algorithm of joint radio and channel assignment, which consider radio - links as the object of channel - assignment and the weight of radio - link as the queue length of correspondent links to get distributedly the maximal sum of radio - links throughput. It is an adaptive distributed algorithm. We find this algorithm has the same time - complex order as Dist. Greedy algorithm with homogeneous interfaces. The simulation result shows that this algorithm can improve the performance of the network efficiently.

Key words: wireless mesh network; radio - link; adaptive; ILP

1 引言

多信道无线网状网络(wireless mesh network, WMN)使用多个正交信道的接入模式, 节点可以利用多个射频接口在不同信道上同时传输, 提高了网络容量. 然而, 在实际的网络中, 各节点配置的接口的类型不同, 接口的接入信道子集不同, 接入信道的速率也可能不同.

在以前的多信道分配和调度的研究中, 考虑的节点接口都是同类的. 文献[1]研究了信道速率不同下的路由和信道分配问题, 其假定节点配置同类型接口. 文献[2]给出了异构无线网状网的最小干扰模型下的集中式算法, 其网络异构性体现在节点的接口个数不同, 但都是同类型的. 文献[3]给出了信道速率不同且节点接口同类型条件下的多信道多射频网络的调度算法. 文献[4]给出了无线网络中异构接

收稿日期: 2009-06-05; 修回日期: 2009-08-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(60496315, 60802009); 国家“八六三”计划项目(2008AA01Z204, 2009AA01Z205); 国际科技合作计划项目(2008DFA11630)

口的存在对网络容量影响的研究框架. 文献[5]考虑接口异构因素, 对于集中式调度不灵活的小范围网络, 网络性能有一定改善.

文中解决了由接口异构的节点组成的多信道 WMN 中, 如何分布式地实现接口与信道联合分配来提高吞吐量的问题. 这里的异构接口是指接口具有的接入信道子集和信道的速率不同等特性. 文中强调了接口同构与接口异构的网络之间的差异. 由图 1 可以看到, 在链路选择信道时, 由于没有考虑接口差异而产生链路吞吐量的损失. 图 1 中节点 X, Y 分别有 3 个接口, 接口接入的信道子集如图所示, 信道传输速率相同为 r . 假设节点 X 有数据包经链路 $X \leftrightarrow Y$ 发送到节点 Y . 如果选择接口对 (X_a, Y_b) 在信道 1 传输, 链路吞吐量为 r . 显然, 图 1 中最优的接口与信道分配为: 接口对 (X_a, Y_b) 分配信道 2, 接口对 (X_b, Y_a) 分配信道 3, 接口对 (X_c, Y_c) 分配信道 1, 链路吞吐量增加到 $3r$. 即使链路 $X \leftrightarrow Y$ 仅分配信道 1, 选择接口对 (X_c, Y_c) 进行数据传输, 也为链路实现多信道同时传输预留了可用的接口.

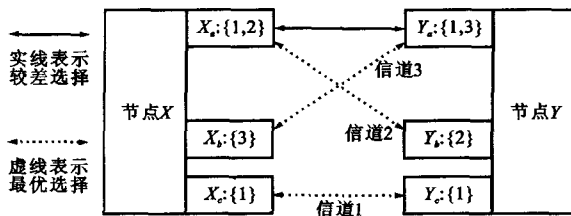


图 1 异构接口对数据流 $X \leftrightarrow Y$ 传输的影响

2 系统描述

文中研究的 WMN 体系结构如图 2 所示. 无线网状网^[6]中存在三类节点: mesh 客户端, mesh 路由器和 mesh 网关. 关注 mesh 路由器构成的无线骨干网中的接口和信道分配问题. 文中处理的节点, 即 mesh 路由器, 配置异构无线接口, 网络中信道的传输速率不同, 节点位置可移动, 节点流量和网络拓扑动态变化.

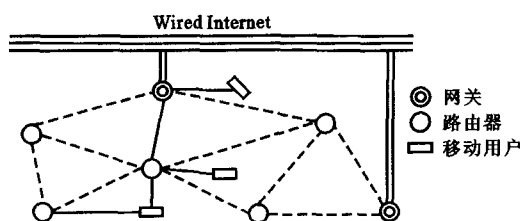


图 2 无线网状网结构示意图

文中用图 $G(\mu, \{l\}, I(l))$ 描述 WMN 骨干网, 包含 L 条直接链路, 其中 μ 为网络节点集, $\{l\}$ 为网

络链路集, $I(l)$ 为链路 l 的干扰链路集, $L = |\{l\}|$. $C(i)$ 表示节点 i 可接入信道子集, $C = \bigcup C(i)_{i \in \mu}$ 表示网络信道集, 是节点可接入信道子集的并集. 定义一个链路的两个端节点, 互称为 1-hop 邻居节点. $E(i)$ 是以节点 i 为端节点的链路集合. 若两条链路连接相同的端节点, 互称为 1-hop 邻居链路. 连接相同 1-hop 邻居链路的两条链路, 互称为 2-hop 邻居链路. $N^1(l) = E(s(l)) \cup E(d(l))$ 表示链路 l 的 1-hop 邻居链路集合. 链路 l 与其所有 1-hop 邻居链路 $N^1(l)$ 覆盖的物理区域, 称为链路 l 的 1-hop 邻域. $N^2(l) = \bigcup N^1(k)_{k \in N^1(l)}$ 表示链路 l 的 2-hop 邻居链路集合. 链路 l 与 $N^1(l) \cup N^2(l)$ 所覆盖的物理区域, 称为链路 l 的 2-hop 邻域. 由此, WMN 的 2-hop 干扰模型可定义为, 链路 l 与其 2-hop 邻域内的任一链路同信道同时传输, 相互干扰. 在此干扰模型中, 假设节点 i 的 1-hop 邻居节点都能侦听到节点 i 的传输. 文中的算法是基于 2-hop 干扰模型下提出的.

文中假设节点接口可在信道间快速切换. 假设系统是时隙系统, 存在一个全网的公共控制信道用以传递控制信息, 其余信道为数据信道. 节点在每个时隙之初竞争信道. 在 2-hop 干扰模型中, 如果为某链路 l 分配信道与接口, 只需知道其端节点的 1-hop 邻居节点信道和接口状态信息, 就可实现. 与此同时, 如果还能获得端节点的 1-hop 邻居链路的待发送队列长度, 那么在不增加网络开销情况下, 就能实现链路 l 的 1-hop 邻域内链路的信道与接口资源的公平分配. 文中改进了文献[3]对 RTS/CTS 消息的修改, 在 RTS/CTS 消息中携带 1-hop 邻居节点信道接口状态表和 1-hop 邻居链路待发送队列长度, 由链路 l 的接收节点获得这些信息, 并实现资源分配. 节点定期更新 1-hop 邻居节点信道接口状态表及链路队列长度. 假定节点采用改进的 IEEE802.11 协议 RTS/CTS/COMFIRM 三次握手机制来消除隐藏终端和暴露终端问题.

3 分布式射频链路的信道分配算法

3.1 射频链路的干扰约束条件

定义 1 射频链路: 如果链路 l 两端节点的接口分别为: 接口 X_a, Y_a , 他们的接入信道集的交集非空, 那么接口 X_a 和 Y_a 在交集信道上可以互传数据, 称作存在一条射频链路 $X_a \leftrightarrow Y_a$. 这样, 射频链路 $X_a \leftrightarrow Y_a$ 的可分配信道集就是接口 X_a 和 Y_a 接入信道集合的交集.

通过图1的分析得出,对链路所用接口的选择,可以转化为对链路上可用射频链路的选择,对链路的信道分配,也归结到链路上射频链路的信道分配.在2-hop干扰模型中,链路 l 的干扰链路集 $I(l)$,是链路 l 的2-hop邻域内邻居链路集.如果链路 l 与 $I(l)$ 中链路 k 在信道 c 上相互干扰,那么,在这两条链路上,至少分别存在一条射频链路同时占有信道 c .

$$I(l) = \{l' : \exists c \in C, \exists l' \in N^2(l), l_r \in R(l), l'_r \in R(l'), op(c, l_r) \cdot op(c, l'_r) = 1\} \quad (1)$$

式中, $R(l)$ 表示链路 l 的射频链路集, l_r 表示其中某射频链路, $C(l_r)$ 表示射频链路 l_r 可接入信道子集. $op(c, l_r) = 1$ 表示射频链路 l_r 可分配信道 c ,否则为0.为简便讨论,令 $I(l)$ 包含链路 l 自身.

如果链路 l 被分配信道 c ,那么信道一定分配到此链路的某一个射频链路上.否则,若 $I(l)$ 中的非干扰链路子集 $I'(l)$ 非空,一定是 $I'(l)$ 中的链路分配有信道 c ,此约束称为射频链路干扰约束,由不等式(2)表示. M^c 表示分配信道 c 的射频链路集合.

$$\sum_{k \in I(l)} \sum_{k_r \in R(k)} 1_{k_r \in M^c} \geq 1 \quad (2)$$

$I'(l) \neq \emptyset, op(c, k_r) = 1$

为射频链路分配信道时,其端节点连接的所有射频链路上分配的信道互不相同,此约束称为节点处的射频链路干扰约束.式(3)表示了在射频链路 l_r 的端节点 $s(l_r)$ 的干扰约束条件.

$$\sum_{k_r \in E(s(l_r))} \sum_{c \in C(s(k_r))} 1_{k_r \in M^c} = 1 \quad (3)$$

$op(c, k_r) = 1$

3.2 节点接口数对射频链路信道分配的约束条件

WMN中任一节点 i ,配置 $m(i)$ 个接口,至多分配 $m(i)$ 个信道,链路 l 的已分配信道的射频链路集合的度不大于端节点 $m(s(l))$ 和 $m(d(l))$,可由不等式(4)表示.

$$\sum_{l_r \in R(l)} \sum_{c \in C(l_r)} 1_{l_r \in M^c} \leq \min(m(s(l)), m(d(l))) \quad (4)$$

$op(c, l_r) = 1$

3.3 分布式射频链路的信道分配数学模型

文中选择的射频链路信道分配目标为,在待分配信道的链路 l 的1-hop邻域内,以队列长度为权值的射频链路吞吐量之和最大,由式(5)表示.

$$\max \sum_{k \in N^1(l)} q_l \sum_{k_r \in R(k)} \sum_{c \in C(k_r)} r_{k_r}^c 1_{k_r \in M^c} \quad (5)$$

式中, $r_{k_r}^c$ 表示射频链路 k_r 在信道 c 上的传输速率.提

出此目标的原则为:让队列长的链路分配到信道和接口的机会更大,以免链路阻塞;同时尽量使用速率快的信道,提高吞吐量.于是,分布式接口与信道联合分配问题可用整数线性规划(ILP)定义如下:

目标函数:

$$\max \sum_{k \in N^1(l)} q_k \sum_{k_r \in R(k)} \sum_{c \in C(k_r)} r_{k_r}^c 1_{k_r \in M^c}$$

约束条件:

$$\begin{aligned} & \sum_{\substack{h \in I(k) \\ I'(k) \neq \emptyset \\ k \in N^1(l)}} \sum_{\substack{h_r \in R(h) \\ op(c, h_r) = 1}} 1_{h_r \in M^c} \geq 1 \\ & \sum_{k_r \in R(k)} \sum_{\substack{c \in C(k_r) \\ op(c, k_r) = 1}} 1_{k_r \in M^c} \leq \min(m(s(k)), m(d(k))) \\ & \sum_{h_r \in E(s(k_r))} \sum_{\substack{c \in C(s(h_r)) \\ op(c, h_r) = 1}} 1_{h_r \in M^c} = 1 \\ & \sum_{h_r \in E(d(k_r))} \sum_{\substack{c \in C(d(h_r)) \\ op(c, h_r) = 1}} 1_{h_r \in M^c} = 1 \end{aligned}$$

3.4 分布式射频链路分配的 Hete-RCDG 贪婪最大算法

从3.3模型定义来看,这个ILP问题是NP难问题,采用Hete-RCDG贪婪最大算法得到此问题的次优解.算法基本思路为:(1)根据 $s(l)$ 和 $d(l)$ 的1-hop邻居节点的信道和接口信息,在满足上述约束不等式(3)、(4)条件下,得到 $s(l)$ 、 $d(l)$ 及其1-hop邻居节点的可用接口和信道;(2)从所有射频链路的 $q_k r_{k_r}$ 候选集合中,选出 $q_k r_{k_r}$ 值最大的射频链路,并去掉此射频链路的干扰射频链路,然后在候选集剩余的射频链路中,再选出 $q_k r_{k_r}$ 值次大的射频链路,并从集合中去掉对应的干扰射频链路,循环往复,直到候选集为空结束.

分布式射频链路信道分配的Hete-RCDG贪婪最大算法具体步骤如下:

Input:

$(x_{ij})_{i \in \{s(l), d(l)\}, j \geq 0}$: 节点状态向量,其中 x_{ij} (node_id, radio_id, radio_avail_ch_vec, radio_rate_vec, is_used)表示节点 i 及邻居节点的每个接口信息./*为方便起见,端节点是其自身的邻居节点*/

$(n_{ij})_{i \in \{s(l), d(l)\}, j \geq 0}$: 链路 l 及其 $N^1(l)$ 的队列向量,其中 n_{ij} (node_id, queue_len)表示端节点 i 与其邻居节点node_id之间链路的待发送队列长度queue_len./*从节点状态信息表得到*/

Output:

out $\{L_{ij}\}_{i \in \{s(l), d(l)\}, j \geq 0}$: 链路 l 及其 $N^1(l)$ 中已分配接口和信道的射频链路集,其中

L_{ij} (node_id_1, node_id_2, radio_id_1, radio_id_2,

```

radio_avail_ch_vec, qlen_rate)
begin
  Step1: 节点状态信息的更新.
  if  $\{x_{s(l)p} \cdot \text{node\_id}\} \cap \{x_{d(l)p} \cdot \text{node\_id}\}$ 
  then {根据交集中发送节点  $s(l)$  存储的邻居节点接口
  信息  $x_{s(l)p}$ , 修改接收节点  $d(l)$  相同邻居节点的接口信息
   $x_{d(l)p}$ } /* 邻居节点交集非空 */
  Step2: 获得  $s(l)$ 、 $d(l)$  和 1-hop 邻居节点可用接口和
  信道.
  for (每个节点 node_id) {计算节点已占用的信道向量
  ch, 根据此向量, 修改空闲接口的可用信道向量} /* 接口可
  用信道满足约束 3, 4 */
  if (端节点  $s(l)$  or  $d(l)$ ) {计算  $s(l)$  or  $d(l)$  各自邻居
  节点已占用的信道向量 ch, 修改对应端节点空闲接口的可
  用信道向量} /* 使得接口可用信道满足射频链路干扰约束
  2 */
  Step3: 初始化候选射频链路集  $\{l_{ij} \mid i \in \{s(l), d(l)\}, j \geq 0\}$ .
  Step4: 选出射频链路及其分配的信道.
  while ( $\{l_{ij}\}$  非空)
  {选出  $l_{ij} \cdot qr$  值最大的射频链路  $l_{ij}$ ; if ( $l_{ij}$  满足接口数约
  束 4)
  {加入到集合 outlink  $\{l_{ij}\}$  中; 根据约束 2, 去掉集合中  $l_{ij}$ 
  干扰射频链路}
  else {从集合中去掉  $l_{ij}$  和与其相同链路上的所有射频链
  路}
  End.

```

4 算法分析与仿真结果

4.1 算法复杂度分析

假设链路的 1-hop 邻域内的链路个数为 q , 每个射频链路的干扰射频链路集的度为 k , 所有射频链路的干扰射频链路集的度最大值、最小值和平均值分别为 $k_{\max}$ 、 $k_{\min}$ 和 $\bar{k}$. 定义节点配置的接口数, 称为节点的接口度 s . 所有节点配置的平均接口数, 称为节点的平均接口度 $\bar{s}$. 假设初始候选射频链路集中射频链路个数为 R , 最后一个射频链路被选出时的候选射频链路集中平均射频链路个数为 $\bar{k}_1$, 那么倒数第二个射频链路被选出时的候选集中平均射频链路个数为 $\bar{k}_1 \times \bar{k}_2$, 信道分配经过 p 次循环结束, 则循环次数 p 满足不等式(6), 由于链路的多个信道分配等同于链路上的多个射频链路的选择. 因此, 候选射频链路集的度最多为对应链路集的度的 $\bar{s}$ 倍, 则算法复杂度为: $O(R \log(R) / \log \bar{k}) = O(q \bar{C} \bar{s} \log(q \bar{C} \bar{s}) / \log \bar{k}) = O(q \log q)$, 与文献[7]中接口同构的分布式 Dist-Greedy 算法的算法复杂度相当.

$$\begin{aligned}
 R &= \bar{k}_1 \times \bar{k}_2 \times \cdots \times \bar{k}_p \\
 p \times \log k_{\min} &\leq \log(R) = \log(\bar{k}_1 \times \bar{k}_2 \times \cdots \times \bar{k}_p) \\
 &\leq p \times \log k_{\max} \\
 \frac{\log(R)}{\log k_{\max}} &\leq p \leq \frac{\log(R)}{\log k_{\min}} \quad (6)
 \end{aligned}$$

4.2 仿真结果

文中采用 NS2 仿真研究基于射频链路的接口和信道联合分配对 IEEE802.11 协议的 WMN 吞吐量的影响. 以网络吞吐量为评价指标, 对比算法为文献[7]集中式贪婪 Tabu-based 算法和接口同构分布式贪婪 Dist-Greedy 算法. 考虑 50 个节点随机分布在 $1000\text{m} \times 1000\text{m}$ 区域内, 节点传输范围是 250m, 干扰范围为 550m, 信道带宽 24Mb/s, 数据分组长为 1 KB. 每个节点配置 3 个射频接口, 1 个公共控制信道接口配置 IEEE 802.11b 协议, 2 个数据接口 A 和 B 配置 IEEE 802.11a 协议, 接口 A 使用 IEEE 802.11a 的 1~8 正交信道子集, 接口 B 使用 IEEE 802.11a 的 5~12 正交信道子集.

在多跳端到端数据流传输模式下仿真, 在此模式下, 随机选择 8 对源-目的对采用多跳路由通信, 路由采用最小跳数为标准静态计算得到, 并在仿真过程中保持不变. 每个链路都有相同的泊松分布数据流, 仿真结果如图 3 所示. 随着分组到达率增加, 文中算法的网络吞吐量增加由快到慢, 存在一个增幅拐点, 当分组到达率大到 6packet/second 后, 网络吞吐量不再随分组到达率增加, 保持不变. 文中算法与 Dist-Greedy 算法相比, 网络吞吐量明显提高, 收敛速度快; 与 Tube-Based 算法相比, 更能适应网络流量的变化. 当限制网络中可用信道为 802.11a 协议的 1~6 正交信道子集时, 每个网络节点仅单接口 A 工作, Hete-RCDG 算法与文献[7]分布式 Dist-Greedy 算法下网络吞吐量随分组到达率的变化曲线基本相同.

在多跳网关流量模式下仿真时, 随机选择 3 个节点作为网关, 15 个节点向离自己最近(跳数最小)的网关发送数据流, 路由的确定与上述多跳端到端模式相同. 仿真结果如图 4 所示, 文中算法与 Dist-Greedy 算法相比, 网络吞吐量提高显著, 该算法的网络饱和吞吐量与 Tube-Based 算法吻合^[8].

5 结束语

文中提出了一种队列长度为权值的射频链路吞吐量之和最大的分布式 Hete-RCDG 算法. 通过仿真实验表明, 文中算法与不考虑接口异构的分布式

Dist-Greedy 算法相比,网络吞吐量明显提高且收敛速度快,与集中式 Tube-Based 算法相比,更能适应网络流量的变化.将来的工作将集中在研究信道分配与功率分配结合对网络吞吐量和端到端时延的影响.

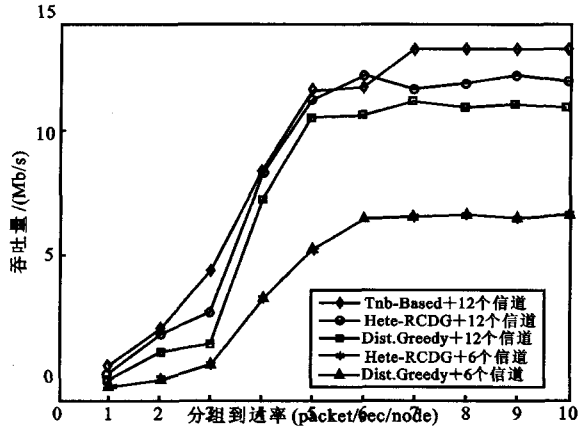


图 3 在多跳端到端数据流场景下吞吐量与分组到达率之间关系

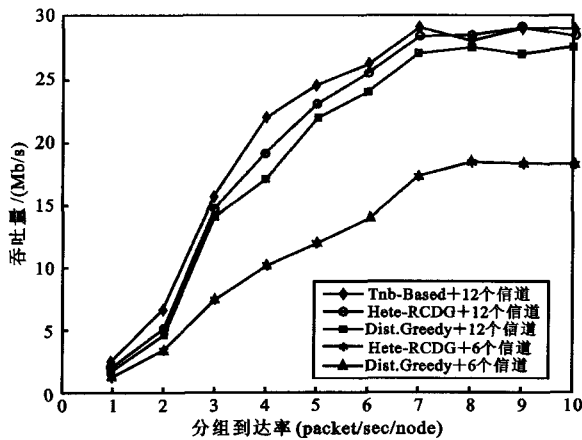


图 4 在多跳网关数据流场景下吞吐量与分组到达率之间关系

参考文献:

[1] Lin Xiaojun, Rosool S B. Constant-time distributed

scheduling policies for ad hoc wireless network [C]// Proc. of the 45th IEEE Conference on Decision and Control. San Diego, 2006:1258-1263.

[2] Ma Li, Zhu Guangxi, Yin Boyun. Optimization models of multi-channel assignment in multi-radio wireless mesh networks[C]// Proc. of the 4th International Conference on Wireless Communication, Networking and Mobile Computing. Singapore, 2008:1-5.

[3] 郑相全, 郭伟, 黄磊. 一种新的拓扑无关的按需分配多信道自组网 MAC 协议[J]. 计算机科学, 2005, 32(5):34-40.

[4] Vartika Bhandari, Nitin H Vaidya. Heterogeneous multi-channel wireless networks scheduling and routing issues [EB/OL]. [2009-11-10]. <http://users.crhc.illinois.edu/nhv/>.

[5] Vartika Bhandari, Nitin H Vaidya. Capacity of multi-channel wireless networks with random (c, f) assignment [C]// Proc. of the Eighth ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing. Chicago, 2007:521-530.

[6] 葛晓虎, 朱耀庭. 无线局域网帧数据流量研究[J]. 微电子学与计算机, 2008, 25(1):67-69.

[7] Subramanian A P, Gupta H, Das S R. Minimum interference channel assignment in multi-radio wireless mesh networks[C]//Proc. of the 4th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad hoc Communications and networks. San Diego, 2007:481-490.

[8] 邱保态, 余田. 基于网格梯度的边界点检测算法的研究[J]. 微电子学与计算机, 2008, 25(3):77-80.

作者简介:

马莉女, (1973-), 博士研究生, 讲师. 研究方向为宽带无线网络资源分配、认知无线电.

朱光喜男, (1945-), 教授, 博士生导师. 研究方向为宽带无线通信、多媒体系统、图像处理.

殷伯云男, (1973-), 硕士, 工程师. 研究方向为网络体系结构与协议设计、视频监控系统等.