

多射频无线网络中多信道分配方法的研究*

史佳佳, 刘宴兵

(重庆邮电大学 计算机科学与技术学院, 重庆 400065)

摘要: 针对多射频多信道无线网络信道分配中用户收益不均衡和网络资源利用率低的问题, 给出了一种基于博弈论的信道分配策略, 该策略在考虑信道分配有效性、公平性的同时, 基于不完美信息博弈, 给出了一种使网络负载更均衡的算法, 并通过实验仿真验证了算法的鲁棒性和有效性。

关键词: 无线网络; 信道分配; 多射频多信道; 博弈论

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2012)06-2290-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.06.077

Approach to multi-radio multi-channel assignment in wireless networks

SHI Jia-jia, LIU Yan-bing

(College of Computer Science & Technology, Chongqing University of Posts & Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: To solve the problems of unbalanced user gains and low network utilization, this paper proposed a channel allocation strategy based on game theory. This paper presented an algorithm which achieved a load-balancing channel allocation based on imperfect information game while considering the effectiveness and the fairness of channel allocation. Experimental results prove the effectiveness and robustness of the presented algorithm.

Key words: wireless networks; channel assignment; multi-radio multi-channel; game theory

随着无线网络技术的快速发展,为无线通信系统分配一定范围的无线资源(如频带、信道)成为研究的热点。由于无线资源的稀缺性,不同的用户通过多接入技术共享稀缺的无线资源。FDMA(频分多址技术)可使多个用户共享已知频带,在无线网络中被广泛采用^[1,2]。由于多信道无线通信系统的广泛使用,信道如何分配的问题对无线网络的设计至关重要。博弈论是分析博弈参与者竞争和协作机制的数学工具,是使用严谨的数学模型研究冲突对抗条件下最优决策问题的理论。在无线网中,博弈论还被用于计算机网络的设计,其中大多数是用来解决在竞争环境中的路由选择和资源分配问题^[3]。一直以来,无线网络的研究热点主要集中在已有的单射频节点的信道分配上,通过修改MAC协议来实现信道的协商、分配和节点竞争接入。随着无线射频收发器硬件成本的降低和相关技术的发展,在一个无线网络节点上装备多个射频器已经成为广泛的技术选择,所以采用多射频多信道(multi-radio multi-channel)节点的无线Mesh网络在未来有着很大的发展前景,对它的研究有重大的意义^[4]。

本文主要介绍有关信道分配的相关文献和多射频多信道无线网络系统模型,以及用博弈理论描述多射频中的信道分配问题。

1 相关工作

传统的进行固定信道分配的方法是基于图论的着色理论,文献[5]中信道分配问题为最小化网络干扰的问题,可以将此问题转换为对冲突图的点着色。不考虑射频数目的约束条件,

利用禁忌搜索技术将冲突图各顶点进行着色,然后整合使着色图满足单色边约束。由于整合过程可能会增加链路之间的干扰,且在整合过程中可能会出现涟漪效应,从而导致网络震荡,因此只适用于静止网络。固定信道分配(FCA)的优点是信道管理容易,信道间干扰易控制,在用户到达率高的情况下有很高的工作效率,但是当用户到达率低时,信道利用率很低。动态信道分配(DCA)算法克服了固定信道分配的这点不足^[6],在DCA方案中,所有的信道资源放置于中心存储区域,表示信道的完全共享。博弈方法解决认知无线网中动态信道分配的机制也被广泛应用^[7]。文献[8]在综合考虑信道分配和路由问题的基础上提出了一种优化无线Mesh网络吞吐量的算法。文献[9]在考虑公平性问题的基础上提出了三种算法来解决多信道分配问题,三种算法分别采用不同的可用信息来实现自私节点向纳什均衡点的收敛,该文通过理论证明和实验数据分析验证了第三种算法是一种可以实现网络负载均衡的有效信道分配策略,算法的收敛时间和效率函数都与用户的无线射频数目有很大关系,该文献提供了射频数目等于3的情况下各用户节点的收益情况。文献[10]在文献[9]的基础上提出一种新的解决无线网络中的多信道分配问题的算法,该算法是无线网络中的自私节点通过非合作方式对无线射频占用的信道进行分配,从而达到负载均衡,但是该文献中用户的收益函数只考虑了本用户是否占用信道,并未考虑本用户占用的信道可能被其他多个用户共享的实际情况。本文的算法是通过对比用户节点所占信道被共享的总用户数与信道被使用的平均值,来重新分配用户射频所占用的信道。为了更好地实现网络负

收稿日期: 2011-09-11; 修回日期: 2011-10-18 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60973160); 重庆市优秀成果转化资助项目(Kjzh10206)

作者简介: 史佳佳(1986-), 女, 河南焦作人, 硕士研究生, 主要研究方向为无线网络(kinki_babi@gmail.com); 刘宴兵(1971-), 男, 四川人, 教授, 博士(后), 主要研究方向为网络接入控制和网络安全。

载均衡,算法将进一步对比每个用户的收益与平均收益来再次分配用户所占用的信道,以更有效地提高信道分配的公平性和有效性。

2 系统模型

FDMA(frequency division multiple access)是数据通信中的一种技术,即不同的用户分配在时隙相同而频率不同的信道上。按照这种技术,把在频分多路传输系统中集中控制的频段根据要求分配给用户。与固定分配系统相比,频分多址使信道容量可根据要求动态地进行交换。通过 FDMA 技术,将可使用频段分为 M 个具有相同带宽的正交信道,用集合 C 表示正交信道, $C = \{c_1, c_2, \dots, c_M\}$ 。

假设每个用户设备均有两类独立无线射频传输器集合,分别由 T_s 和 R_s 表示。其中, T_s 集合是用户用来发送数据包的无线射频传输器集合, R_s 是用户用来接收数据包的无线射频传输器集合。图 1 清晰表示了链路中用户节点 T_s 和 R_s 集合,参数设置为 $|C| = 4, |U| = 2, k = 3$ 。

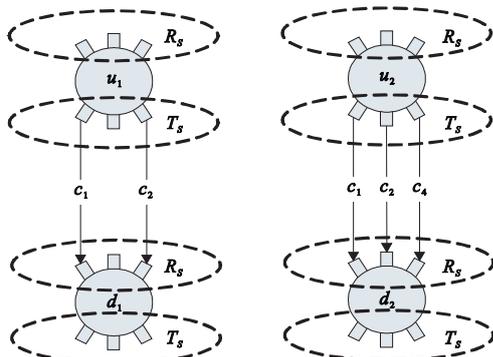


图1 链路中的无线射频传输器集合

同一链路中的两个通信用户传输数据时,发送数据的用户的 T_s 和接收数据的用户的 R_s 选择同一信道进行传输,因此可以只考虑发送者的行为,即只考虑 T_s ,忽略 R_s 。定义用户集合 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_{|U|}\}$,用 $k_{u_i,c}$ 表示用户 u_i 在信道 c 上使用的无线射频数目,由于一个用户在不同的无线射频中不能使用同一信道以避免干扰,因此对任意用户 u_i 有 $k_{u_i,c} \leq 1$ 。

用博弈理论解决信道分配问题时,用户 u_i 的策略为 $s_{u_i} = (k_{u_i,c_1}, k_{u_i,c_2}, \dots, k_{u_i,c_{|M|}})$ 。在图 1 所示的例子中,用户 u_1 和 u_2 的策略可以表示为 $s_{u_1} = (1, 1, 0, 0), s_{u_2} = (1, 1, 0, 1)$ 。所有用户的策略集合可用矩阵表示为 $S = (s_{u_1}, s_{u_2}, \dots, s_{u_{|U|}})^T$,除了用户 u_i 以外的其他用户策略可以用 S_{-u_i} 表示。用 B_c 表示在信道 c 上总的可利用带宽,由于 B_c 可由分配在信道上的用户平均共享,用 $B_{u_i,c}$ 表示用户 u_i 在信道 c 上的可利用带宽,公式为

$$B_{u_i,c} = B_c \times k_{u_i,c} / k_c \quad \forall u_i \in U, c \in C \quad (1)$$

根据式(1)可得:信道 c 被使用的总数 k_c 越大,则用户 u_i 在信道 c 上的可利用带宽用 $B_{u_i,c}$ 越小。每个用户 u_i 的效用函数用 W_{u_i} 表示,本文中用户的收益设定为用户的可利用带宽,那么,用户的收益函数为

$$W_{u_i} = \sum_{c \in C} B_{u_i,c} = \sum_{c \in C} B_c \times k_{u_i,c} / k_c \quad (2)$$

3 博弈描述及相关定理

由于无线网络中的用户节点是理性且自私的,每个用户节点将选择策略来最大化自己的收益,因此可以将多射频无线网络中的多信道分配问题转换为一种静态博弈问题。

首先引入纳什均衡的定义:对任意用户 u_i ,采用任何策略 s'_{u_i} ,总有 $W_{u_i}(s_{u_i}^*, S_{-u_i}^*) \geq W_{u_i}(s'_{u_i}, S_{-u_i}^*)$,那么此策略矩阵 S^* 为纳什均衡策略。即如果一个策略是纳什均衡策略,则对于任何一个用户在其他用户策略未改变的情况下改变其策略,其所获得的收益将不会增加。

根据文献[9,10]有如下两个定理,第 4 章信道分配的算法思想将紧扣这两个定理。

由于用户节点的自私性,用户将使用节点中所有的无线射频来最大化自己的收益,为使网络负载更加均衡,可使任意两个信道被无线射频使用数目的差值不超过 1。

定理 1 在 $|U| \times k > |C|$ 的情况下,信道分配策略 S^* 为纳什均衡策略,当且仅当满足以下两个条件:a)对任意的 $u_i \in U, c \in C$,总有 $k_{u_i,c} \leq 1$ 且 $k_{u_i} = k$;b)对任意的 $b, c \in C$,总有 $\delta_{b,c} \leq 1$,其中 $\delta_{b,c} = k_b - k_c$,表示使用信道 b 和信道 c 的无线射频数目的差值要小于等于 1。

公平性问题是分配无线网络资源时需要考虑的一个重要方面。根据定理 1,可以解决多无线射频多信道分配中信道利用率的问题,纳什均衡策略可以达到均衡的信道分配,但此信道分配策略可能有失公平性,定理 2 引入了公平性的考虑。

定理 2 信道分配策略 S^* 为公平性的纳什均衡策略,当且仅当对任意的 $u_i, u_j \in U$,满足 $\sum_{c \in C_{\min}} k_{u_i,c} = \sum_{c \in C_{\min}} k_{u_j,c}$,其中 C_{\min} 是指信道被分配使用的最小值,即对任意的 $u_i, u_j \in U$,用户 u_i 和用户 u_j 收益相等 $W_{u_i} = W_{u_j}$ 。

4 算法描述

基于完美信息的信道分配算法要求无线网络中所有节点全局合作,使所有用户了解所有信道的使用情况,由于无线网络中用户节点自私性的存在,实现全局合作非常困难。因此本文算法是基于不完美信息的信道分配策略 II-CA(imperfect information channel allocation),每个用户只了解本用户所有无线射频所占用的被使用情况。文献[8]所使用的随机信道分配方式可能会导致收敛时间的增加,因此本文算法将首先通过分布式方式连续不断地分配信道给用户的 k 个无线射频,此分配步骤使得所有信道中前 k 个信道 $c_j \in C, j = 1, 2, \dots, k$ 将被用户的无线射频全部使用^[10]。用户为了提高其收益,通过连续的分布式信道分配后,将其余未被占用的信道进行重新分配,由于每个用户只了解本用户所占用的信道使用情况,因此重新分配的原则是将用户 u_i 使用的信道 c_j 被共享的用户数(无线射频的数目) k_{c_j} 与 m_{u_i} 对比,其中 m_{u_i} 是用户 u_i 所占用的信道的平均用户数。当 $k_{c_j} > m_{u_i}$ 时,表示信道 c_j 被共享的用户数目过多,因此将分配空闲信道 $C \setminus c_j$ 给此用户的无线射频。为避免所有用户同时改变分配给射频的信道,本算法引入 IEEE 802.11 中的退避机制^[8],以加快算法的收敛速度。该机制的实现过程是:每个用户从集合 $\{1, 2, \dots, \omega\}$ 中随机选取一个值作为此用户的退避值,其中 ω 为退避机制中竞争窗口值;程序每循环一次,用户的退避值将减 1;当此用户的退避值为零时,将执行分配信道给此用户无线射频。由于本算法是基于不完美信息的信道分配策略,因此通过以上步骤,算法并不能确定实现的信道分配策略是否达到纳什均衡的信道分配策略,有可能出现类似于图 2 的情况,这种情况是经过上述步骤的信道分配后可能出现的一种伪纳什均衡的信道分配策略。图 2 情况下的参数值设为 $|C| = 8, |U| = 6$,由于算法是基于不完美

信息的博弈,用户只了解自己所占信道道的信道利用情况。因此在这种情况下,用户 u_1 至 u_6 均因为不了解其他信道的利用情况而认为此信道分配策略是纳什均衡的信道分配策略。为了克服此类问题的存在,本文算法为实现用户策略向纳什均衡节点收敛,将根据定理 2 对比 W_{u_i} 与 W_{avg} , 其中 $W_{u_i} = \sum_{c \in C} B_{u_i,c} = \sum_{c \in C} B_c \times k_{u_i,c} / k_c$, $W_{avg} = \sum_{c \in C} B_c / |U|$ 。若 $W_{u_i} < W_{avg}$, 则对用户 u_i 重新进行信道分配,将用户 u_i 的射频所占用的信道转移到未被该用户占用的信道上。

II-CA 算法的伪代码如下:

基于不完美信息的信道分配

1) 通过分布式方式分配信道,之后对比 k_{c_j} 和 m_i 将未被使用的信道进行重新分配

```

for a given user  $u_i \in U$  do
  for  $j = 1$  to  $k$  radios do
    move radio  $j$  to channel  $c_j$ 
  end for
end for
while ( ) do
  get the current channel allocation
  for a given user  $u_i \in U$  do
    if backoff counter is 0 then
      if  $(\max_{c \in C_{u_i}}(k_c) - \min_{c \in C_{u_i}}(k_c) > 1)$  then
        for  $j = 1$  to  $k$  radios do
          radio  $j$  uses channel  $c_j \in \{c_1, c_2, \dots, c_k\}$ 
          if  $k_{c_j} > m_{u_i}$  and  $k_{u_i, c_j} = 0$  then
            move the radio  $j$  from channel  $c_j$  to  $C \setminus c_j$  with uniform probability  $1/|C \setminus c_j|$ 
          end if
        end for
      else
        for  $j = 1$  to  $k$  radios do
          radio  $j$  uses channel  $c_j \in \{c_1, c_2, \dots, c_k\}$ 
          if  $k_{c_j} \geq m_i$  then
            move the radio  $j$  from channel  $c_j$  to  $C \setminus c_j$  with uniform probability
          end if
        end for
      end if
      reset the backoff counter to a new value from the set  $\{1, 2, \dots, \omega\}$ 
    else
      decrease the backoff counter value by one
    end if
  end for
end while

```

2) 通过对比 W_{u_i} 与 W_{avg} , 将分配给无线射频的信道重新进行分配

```

for a given user  $u_i \in U$  do
  if backoff counter is 0 then
    if  $W_{u_i} < W_{avg}$  then
      for  $j = 1$  to  $k$  radios do
        if  $k_{c_j} > k_{avg}$  then
          move the radio  $j$  to  $C \setminus c_j$  with uniform probability  $1/|C \setminus c_j|$ 
        end if
      end for
    end if
    reset the backoff counter to a new value from the set  $\{1, 2, \dots, \omega\}$ 
  else
    decrease the backoff counter value by one
  end if
end for

```

5 仿真分析

为了验证本文算法的有效性,引入信道分配策略的效率函数来表示经过信道分配后的策略接近纳什均衡分配策略的程度,效率函数为 $\alpha(S) = 1 - \beta(S_{II-CA后}) / \beta(S_{II-CA前})$, 其中 $\beta(S) =$

$\sum_{c \in C} |k_c - k_{avg}|$ 表示信道分配策略 S 与已达到纳什均衡的信道分配策略在每个信道上分配无线射频数目差距的总和,其中 $k_{avg} = |U| \times k / |C|$, 如果分配策略为纳什均衡分配策略,那么 $k_c = k_{avg}$, 即 $\beta(S) = 0$ 。根据效率函数式,如果分配后的信道分配策略接近纳什均衡分配策略,则算法效率 $\alpha(S)$ 接近于 1, 若算法 II-CA 进行信道分配前与分配后的 $\beta(S)$ 相等,则说明算法效率 $\alpha(S) = 0$ 。

本文的仿真在 Windows 系统下实现,编译环境是 VC 6.0, 编程语言为 C 语言,利用 C 语言的高效性计算出用户收益、收益方差、算法效率等实验数据,然后由 VC 调用 MATLAB 生成本文的实验仿真图。

在具体的仿真中,本文设置 $|U| = 10, \varepsilon = 10^{-4}, |C| = 8, B_c = 54$ Mbps。由于本文算法给出的是一种使网络负载更均衡的信道分配策略,各个用户收益的均衡性反映网络是否达到了负载均衡,因此在仿真实验部分主要展示本算法与已有算法在用户收益参数方面的对比,如图 3 所示是本文算法 II-CA 与文献[9]中的第三种算法 DNE-CA (distributed NE channel allocation) 在射频数目 $k = 4$ 时各用户收益值的对比,根据柱状图可以看出,本算法下的用户收益更均衡。

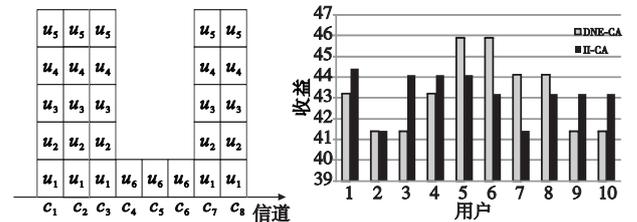


图2 伪纳什均衡的信道分配策略

图3 用户收益对比

为了更直观表达本算法在实现网络负载均衡方面的优势,图 4 显示了 II-CA 算法和 DNE-CA 算法所有用户收益的方差值对比,从图 4 可以看出 II-CA 算法在 $k = 2, 3, 4$ 时的方差值明显小于 DNE-CA 算法的方差值,在 $k = 5, 6$ 时方差值略小于 DNE-CA 算法,因此可以得出 II-CA 算法能使网络负载更加均衡。

算法的效率函数可以展现信道分配后的策略接近纳什均衡分配策略的程度。图 5 为 II-CA 算法的效率图,从图中可以看出,本文算法能在短时间内使得效率函数值接近为 1, 其中在 3.3 s 和 5.4 s 时效率值出现由 1 向其他值震荡的趋势,原因是算法为防止伪纳什均衡情况而采取的信道分配策略导致效率值的震荡。

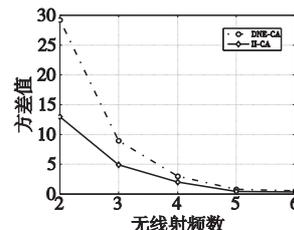


图4 II-CA算法和DNE-CA算法收益方差的对比

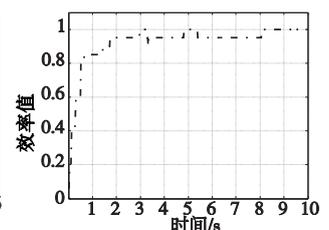


图5 II-CA算法效率

6 结束语

本文基于不完美信息博弈理论分析了多射频无线网络中的多信道分配存在的问题,给出了一种使网络负载更均衡的信道分配算法。通过实验仿真与现有算法的实验效果作了对比,验证了本文算法不但能使信道分配策略更加 (下转第 2296 页)

(上接第 2292 页)接近纳什均衡的多信道分配,提高了信道利用率,并且有效地保证了信道资源分配的公平性。本文的网络环境是单跳无线网络,并未考虑多跳无线网络的信道分配可能面临的情况,由于多跳无线网络链路中的各用户需要通过合作来最大化整条链路收益,因此下一步工作将考虑通过合作博弈优化多跳无线网络中的整条链路收益。

参考文献:

- [1] RAPPAPORT T S. Wireless communications: principles and practice [M]. [S. l.]: Prentice Hale, 2002: 4-6.
- [2] SCHWARTZ M. Mobile wireless communications [M]. [S. l.]: Cambridge University Press, 2005: 137-138.
- [3] NIYATO D, HOSSAIN E. Radio resource management games in wireless networks: an approach to bandwidth allocation and admission control for polling service in IEEE 802.16[J]. *Wireless Communications*, 2007, 14(1): 27-35.
- [4] 官骏鸣, 陆阳, 盛锋. 多射频多信道无线网络信道分配研究发展[J]. *计算机应用*, 2009, 29(5): 1233-1237.
- [5] SUBRAMANIAN A, 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. 2007: 481-490.
- [6] CHENG M M L, CHUANG J C I. Performance evaluation of distributed measurement-based dynamic channel assignment in local wireless communications[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1996, 14(4): 698-710.
- [7] NIE Nie, COMANICIU C. Adaptive channel allocation spectrum etiquette for cognitive radio networks[C]//Proc of the 1st IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Network. 2005: 269-278.
- [8] ALICHERRY M, BHATIA R, LI Li. Joint channel assignment and routing for throughput optimization in multi-radio wireless mesh networks[C]//Proc of the 11th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM, 2002: 58-72.
- [9] FELEGYHAZI M, CAGALJ M, BIDOKHTI S S, *et al.* Non-cooperative multi-radio channel allocation in wireless networks[C]//Proc of the 26th IEEE International Conference on Computer Communications. 2007: 1442-1450.
- [10] SHILA D M, CHENG Yu, ANJALI T. A game theoretic approach to multi-radio multi-channel assignment in wireless networks[C]//Proc of the 5th International Conference on Wireless Algorithms, Systems, and Applications. Berlin: Springer-Verlag, 2010: 203-208.