



一种基于不完美信息博弈的多冲突域信道分配算法

戴昊峰¹, 何世彪¹, 谭 冕¹, 郑鹏宇², 张 晖^{1,3}

(1. 重庆通信学院 重庆 400035; 2. 61920 部队 成都 610505; 3. 重庆大学通信工程学院 重庆 400044)

摘 要: 无线网络中信道分配的好坏将极大地影响网络整体性能,为了解决和优化此问题,提出了一种基于不完美信息博弈的信道分配算法。假设网络场景为多跳 Ad Hoc 网络,因此对其采用多冲突域建模更符合实际。算法通过不断循环改变各用户无线电的信道试图接近纳什均衡点,仿真结果表明算法能够使信道分配策略接近纳什均衡信道分配,同时相比单冲突域情况在多冲突域中更能最大化信道使用率。

关键词: 无线 Ad Hoc 网络;信道分配;多冲突域;不完美信息博弈

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2014.05.016

A Multiple Collision Channel Assignment Based on Imperfect Game Theory

Dai Haofeng¹, He Shibiao¹, Tan Mian¹, Zheng Pengyu², Zhang Hui^{1,3}

(1. Chongqing Communication Institute, Chongqing 400035, China;

2. The Army of 61920, Chengdu 610505, China;

3. College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The channel allocation in wireless network will greatly affect the whole performance of the network. In order to solve this optimization problem, a kind of non cooperation channel allocation algorithm based on imperfect information was put forward. The network scene was assumed to be multihop Ad Hoc networks. So the multi-domain modeling conflict was more realistic. The algorithm constantly cyclically changed radio channel for each user to attempt to close to the Nash equilibrium point. The simulation results show that the algorithm can make the channel allocation strategy close to Nash equilibrium. At the same time, it can better maximize utilization.

Key words: wireless Ad Hoc network, channel assignment, multiple collision domain, imperfect game theory

1 引言

无线 Ad Hoc 网络采用分布式、自组织、无中心的架构,能够在任意通信环境下迅速展开使用,具备十分广泛的应用场景。但是在网络资源(主要是频谱资源)有限的情况下,如何高效、公平地配置网络资源,是 Ad Hoc 网络遇

到的一个关键的问题,也是目前尚未完全解决的问题^[1]。博弈论研究独立决策者的行为对其他决策者行为存在潜在影响,并能预测理性实体间经过复杂的策略交互后所能得到的结果(均衡),由此可见博弈原理对此类信道资源分配问题有着极高的借鉴性^[2,3]。对无线网络的博弈进行分析,可建模为单冲突域和多冲突域。在多跳 Ad Hoc 网络中,多冲

* 重庆市自然科学基金资助项目(No.cstc2012jjA40033)

突域的分析更切合实际的情况。在规范化的表述中,使用同一信道的无线电相互之间产生影响的作用范围称为一个冲突域,即某一个无线电使用一个信道,在该冲突域内,其他无线电同时使用此信道,将构成相互影响,而冲突域外无线电使用同样的信道,相互之间不产生影响^[4]。根据用户对网络信息的掌握情况,可分为完美信息博弈和不完美信息博弈。不完美信息是指用户并不完全知道每个信道上工作的无线电数目,但是仍需要知道某些信息,比如每个用户仅知道其无线电工作的信道上的无线电数目^[5]。实际情况中由于功能、成本等条件的限制,很多节点无法感知得到更多的信息,符合不完美信息的特征,故本文假设节点感知的信息不完美。一直以来,对于无线网络信道资源分配的研究热点都集中在单射频节点,通过修改 MAC 协议来实现信道之间的协调分配。随着无线射频收发器硬件相关技术的迅速发展,在无线网络节点上装备多个射频器前端已经成为广泛的选择^[6]。因此选择基于不完美信息博弈的多冲突域多无线电信道分配在 Ad Hoc 网络中具有可行性,在未来也有很大的发展前景,对它的研究有着重大的意义^[7]。

无线 Ad Hoc 网络的信道分配方案总体上可以分为中心式和分布式两类。中心式信道分配算法假设网络存在一个中心控制节点并拥有全局完美信息。而分布式信道分配算法的基本思想是网络中每个节点基于局部信息执行相同的信道分配算法来完成信道分配。由于 Ad Hoc 网络的特点,网络没有中心控制节点,因此本文主要对分布式算法进行研究。参考文献[7]提出了一种 Hyacinth 算法,算法通过感知网络中无线电接口干扰范围内的干扰情况,通过公共信道广播感知所得到的信息,并收集其他节点感知到的信息,综合计算这些信息后,最终选择干扰最小的信道分配给该接口来传输数据。但如果有新节点加入,会造成算法时间延长,效率变低。参考文献[8]提出了一种基于干扰冲突的贪婪信道分配策略,但链路评估时没有考虑网络负载,降低了网络的性能。参考文献[9]根据用户获取信息的不同和有无中心节点提出了3种算法对多无线电信道进行分配,3种算法从不同方向实现了自私节点向纳什均衡点的收敛,并通过理论证明和仿真结果验证了第3种不完美信息信道分配算法可以实现网络达到负载均衡,但该算法的所有网络场景均为单冲突域,无法适应多冲突域的网络场景。参考文献[10]改进了参考文献[9]的第3种算法,一是将算法初始阶段的随机信道分配改为连续信道分配,

缩短了算法收敛时间,二是加入了公平性判决使得信道分配更加公平,但是算法仍然假设网络场景为单冲突域。为此,本文提出了一种适合多冲突域的信道分配算法,用户通过感知自身无线电工作的信道上的无线电数目信息来不断选择信道以达到纳什均衡分配所需满足的条件(即使效用函数值最大),仿真结果表明随着时间的推移,循环次数的增加,算法可以达到纳什均衡点并能够较好地改善网络性能(与单冲突域情况对比)。

2 系统模型

时分复用(time division multiple access, TDMA)技术可以将不同的用户分配到相同频率而时隙不同的信道之上。本文假设使用 TDMA 技术,利用时间的正交性实现信道共享。定义可用正交信道集合为:

$$C=\{c_1, c_2, \dots, c_{|C|}\} \quad (1)$$

使用多无线电技术,一个无线网络节点可以同时与一个接入系统保持多个连接。多无线电 Ad Hoc 网络为每个网络节点配备多个无线电接口,通过 TDMA 调制方式调制到不同频段上并发传输,每个接口都具备完整的物理层和介质访问控制层,独立工作互不影响。文中将节点对和它们间的连接看成非合作博弈中的用户,假设用户是理性的,都希望最大化自身的传输速率或占用更多信道资源,它们之间的通信可以通过多跳路由后通信。定义用户集合为 $N, N=\{n_1, n_2, \dots, n_{|N|}\}$ 。网络拓扑及信道分配如图1所示,

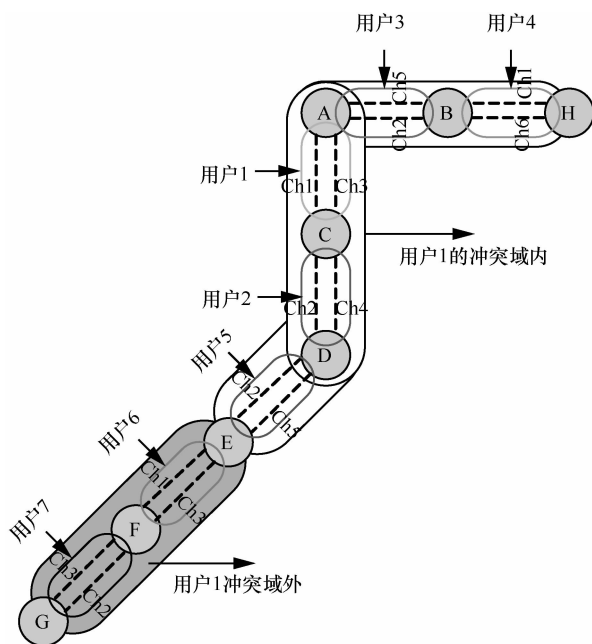


图1 网络拓扑及信道分配



假设每个节点配备 2 个无线电,两相邻节点间只有一跳的距离。

假设距离用户两跳及以内的用户为冲突域内用户,用户能够感知自身冲突域内用户的任何信息,如图 1 所示中,无底色区域为用户 1 的冲突域,它包含用户 2、3、4、5,即用户 1 在信道分配时可以感知到上述用户的完全信息。浅灰色区域为用户 1 的冲突域外,它包含用户 6 和用户 7,此时用户 6 的无线电使用信道 1 和 3 都不会对用户 1 产生干扰。

用户 i 的冲突域内用户 i 使用信道 $c \in C_i$ 的无线电数目表示为 k_{ic}^{col} ,相应的,用户 i 的冲突域内使用信道 $c \in C_i$ 的无线电数目为 k_i^{col} , C_i 为用户 i 使用的信道集合,有 $C_i \subset C$,那么该用户所占用的所有的无线电数目为 $k_i^{col} = \sum_{c \in C_i} k_{ic}^{col}$ 。基于以上假设,用户 i 的信道分配策略可以表示为: $s_i = \{k_{i1}^{col}, k_{i2}^{col}, \dots, k_{i|C|}^{col}\}$,其中, $0 \leq k_{ic}^{col} \leq k$, $n=1,2,\dots,|C|$ 。可以看出,策略向量就是占用每个信道的用户无线电数目,那么所有用户的策略矩阵 S 可以表示为:

$$S = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_{|N|} \end{bmatrix} \quad (2)$$

用 S_{-i} 表示除用户 i 外所有用户的策略集合。

用户 i 的用户收益,即用户所占信道带宽(用户传输速率)表示为 U_i (效用函数),由于用户位于不同的冲突域,假如用户 j 位于用户 i 的冲突域内,如果用户 j 的无线电占用的信道为用户 i 的无线电所占用的,那么它们可以平均共享该信道的带宽,假设信道的带宽不会因为无线电数目的增加而下降^[9],而对于用户 i 冲突域外的用户而言,使用相同信道将不会对用户 i 造成干扰。因此如果用户 i 的无线电占用信道 c ,那么用户 i 的无线电能获得的带宽为:

$$R_{ic}^{col} = \frac{k_{ic}^{col}}{k_i^{col}} \cdot R(k_c) \quad (3)$$

其中, $R(k_c)$ 为信道 c 的总带宽,由此很容易得到用户 i 总的带宽为 $k_i^{col} = \sum_{c \in C_i} k_{ic}^{col}$,即用户 i 的效用函数为 $U_i = R_i^{col}$ 。

3 多无线电信道分配策略的纳什均衡

本节研究在多冲突域条件下达到博弈的纳什均衡所需要的条件。首先引入纳什均衡^[2]的定义。

定义 1 (纳什均衡(Nash equilibrium, NE))策略 $s(s \in S)$ 是一个纳什均衡点当且仅当对于任意的一个用户 $i \in N$,

$\forall \hat{s}_i \in S_i$ 策略空间,都满足式(4):

$$U_i(s) \geq U_i(\hat{s}_i, s_{-i}) \quad (4)$$

即在一个已经达到纳什均衡的策略中,没有用户可以通过单方面改变用户的策略来改变用户的收益。然而,纳什均衡解可能存在两种情况,一种是可能存在多个纳什均衡解,二是纳什均衡解从系统模型来看不一定是最优的。由此引出了帕累托最优(Pareto-optimality)^[2]的概念。

定义 2 (帕累托最优)策略向量 S^{po} 是帕累托最优的,假如存在 S' 使得式(5)成立:

$$U_i(S^{po}) \geq U_i(S'), \forall i \in N \quad (5)$$

即假如一个策略集合是帕累托最优的,那么不存在其他策略集合使得至少有一个参与者的效用得到增加,而其他参与者的效用不会减少。

如果 $|N| \cdot k \leq |C|$,那么所有用户的每个无线电都可以采用不同的信道,显然这样的分配策略是纳什均衡的,因此本文接下来的假设都是 $|N| \cdot k > |C|$ 的情况。

引理 1 如果 S^* 是一个多无线电多信道分配博弈的纳什均衡策略,那么就有 $k_i = k, \forall i$ 成立。

证明 假如 S^* 是一个多无线电多信道分配博弈的纳什均衡策略且 $k_i < k$,即假如任意用户 i 有 $k=3$ 个无线电,但是用户 i 只使用了其中 2 个无线电,此时假如该用户将第 3 个无线电用于信道 $c \in C/C_i$ 上,那么此时用户的吞吐量的增量为 $\Delta = R_{ic}^{col} > 0$,与假设矛盾,故该引理成立。

引理 1 表明,一个理性用户会使用所有无线电来增加自身的效用。

根据参考文献[8,9]有以下定理成立,此定理有较强的适应性,无论是在单冲突域环境还是多冲突域环境中都能成立,接下来本文所提算法将紧密围绕这个定理展开。

现在考虑两个任意的信道 x 和 y ,不失一般性,假设在用户的冲突域中有更多的无线电占用信道,意味着 $k_x^{col} \geq k_y^{col}$,那么将它们的差值表示如式(6):

$$\delta_{xy}^{col} = k_x^{col} - k_y^{col} \quad (6)$$

定理 1 信道分配策略 S^* 是 NE 的,当且仅当满足以下两个条件:

- $\delta_{xy}^{col} \leq 1, \forall x, y \in C;$
- $k_{ix}^{col} \leq 1, \forall i \in N, x \in C。$

由参考文献[9]还可知假如信道 c 的带宽函数 $R(k_c)$ 独立于 $k_c, \forall c \in C$,那么 NE 信道分配策略 S^* 一定是帕累托最优的,也就是假如 $R(k_c)$ 的值不会随着 k_c 的变化而变化,那么得到的 NE 信道分配策略一定是最优的。因此本

文假设 $R(k_c)$ 是独立于 k_c 。

4 信道分配算法描述

基于完美信息的信道分配算法要求无线 Ad Hoc 网络中用户配备的无线电射频前端能感知冲突域内所有信道的情况,这对射频前端设备的各项要求都非常高,假如在条件有限时完美信息的信道分配算法就无法适应,因此本文假设用户获得的无线电信息不完美,即用户在信道分配前只知道自身无线电所在冲突域范围内使用的信道情况,以此来确定自身的信道策略使得信道分配策略接近纳什均衡,使用户自身效用函数尽量达到最大值。

算法首先进行一次随机信道分配,分配完成后进行算法循环次数判决,如图 2 所示,本循环流程中假设循环次数为 5 000 次,当循环次数少于 5 000 次时,算法进入下一步,生成一个随机排列的序列 W , W 的数据范围设定为 $\{0 \sim |W|\}$,然后取序列 W 的前 $|N|$ 个数记为 w_i (其中 $i=1,2,\dots,|N|$),对 w_i 进行判决,如果 w_i 中有值为零的数,那么记下使 $w_i=0$ 的 i 值,如果 w_i 中没有值为零的数,那么将所有的 w_i-1 再进行判决,直到出现零值。接着对决策出的 i 值进行判决,如果满足 $\max_{c \in C_i} (r_c^{i,col}) - \min_{c \in C_i} (r_c^{i,col}) > 1$, 进行流程图左边的步骤: 首先将 j 赋值 1, 然后判断是否满足 $j < k$, 满足条件往下继续, 进行 $r_a^{i,col}$ 和 m_i^{col} 的大小判断, 其中 m_i^{col} 表示用户 i 冲突域内的用户 i 占用信道的平均无线电数目, 即假如用户 i 此时信道策略为 $C_i = \{c_2, c_4, c_5\}$, 那么 $m_i^{col} = \frac{k_{c_2}^{i,col} + k_{c_4}^{i,col} + k_{c_5}^{i,col}}{|C_i|}$, 如果 $r_a^{i,col} > m_i^{col}$, 则将无线电 j 的信道从 a 变到 $c \in C_i$, 所选信道 c 的概率为 $1/|C_i|$, 完成后将 j 的值加 1 再返回, 判断此时 j 和 k 的大小后进行下一步; 如果不满足条件 $\max_{c \in C_i} (r_c^{i,col}) - \min_{c \in C_i} (r_c^{i,col}) > 1$, 则进行流程右边的步骤, 步骤过程同左边类似, 需要注意的是当 $r_a^{i,col} \geq m_i^{col}$ 时无线电 j 的信道改变概率为 ε , 如果改变, 那么改变为信道 c 的概率为 $1/|C_i|$ 。

5 仿真分析

为了验证上述算法特性, 本节设计了如下仿真场景。假设用户在一个圆周上依次相连, 相邻用户间距相同, 每条信道的吞吐量假设固定为 $R(k_c) = 54$ Mbit/s, 由前文可知其不随无线电数目的增加而下降。退避窗口值 $W=20$, $\varepsilon=4 \times 10^{-4}$, 编程语言为 MATLAB。

为了能够将算法的仿真结果同达到 NE 的信道分配

策略 S_{NE} 做出对比, 定义一个信道效率函数, 在给出效率函数之前首先介绍本文算法分配的一种最好和最差情况, 对于用户 1 的冲突域而言, 其最好的情况就是达到纳什均衡的信道分配 (即满足定理 1 的条件), 而最差的情况是存在 k 条信道, 每个用户都有一个无线电在使用这条信道, 而其余的信道上没有任何无线电。这里将最差的信道分配策略定义为 S_{UB} 。接下来定义平衡的概念。

定义 3 (平衡) 一个信道分配策略 S 的平衡 β 定义为: $\beta(S) = \sum_{c \in |C|} |k_c^{i,col} - m_i^{col}|$ 。其中 m_i^{col} 表示用户 i 冲突域内每个信道上平均的无线电数目, 记为 $m_i^{col} = \frac{|N_i| \cdot k}{|C|}$, $|N_i|$ 为用户 i 冲突域内用户数目。

根据上述介绍, 给出信道效率的定义。

定义 4 (信道效率) 信道分配策略 S 的效率 ϕ 定义为:

$$\phi(S) = \frac{\beta(S_{UB}) - \beta(S)}{\beta(S_{UB}) - \beta(S_{NE})}.$$

从定义可以看出对于任何的信道分配策略 S 都有 $0 \leq \phi(S) \leq 1$, 更多的有 $\phi(S_{NE})=1$ 和 $\phi(S_{UB})=1$ 。

图 3 表示算法效率随着算法循环次数增加的变化情况, 其中, 用户数目 $|N|=10$, 每个用户的无线电接口数目相同为 $k=3$, 正交信道数目为 $|C|=10$, 算法循环次数为 400 次。由于网络场景为多冲突域, 每个用户为一个冲突域, 因此有 10 个相交的冲突域, 那么有 10 张效率曲线图。从图中可知, 由于用户获取的信息不完美, 用户无法同时达到纳什均衡, 但是算法的效率基本集中在 0.9 的附近, 从而说明算法能够接近 NE 的信道分配。图中还有很多震荡趋势, 原因是算法为了防止伪纳什均衡情况^[9]的出现而采取的信道分配策略改变引起效率值的震荡, 即导致的震荡, 但其能够很快返回。

图 4 为某次循环后信道分配展示, 其中用户数目 $|N|=10$, 每个用户的无线电接口数目为 $k=3$, 正交信道数目为 $|C|=8$, 但是一个假设所有用户在同一冲突域内, 另外一个假设距离用户两跳及以内的用户为冲突域内用户, 即用户位于不同的冲突域中, 两种均假设为不完美信息。图 4 呈现了用户在单冲突域和多冲突域中用户收益的仿真对比, 可以看出, 尽管多冲突域中不能达到纳什均衡点, 但用户在多冲突域中仍然具有更高的信道使用率。

本节还考虑了每个用户所配备的无线电数目和总的提供的信道数目不同对用户收益的影响。图 5 表示在 $|N|=10$ 、 $|C|=8$ 的条件下, 用户配备的无线电数目从 2 到 7 的用户

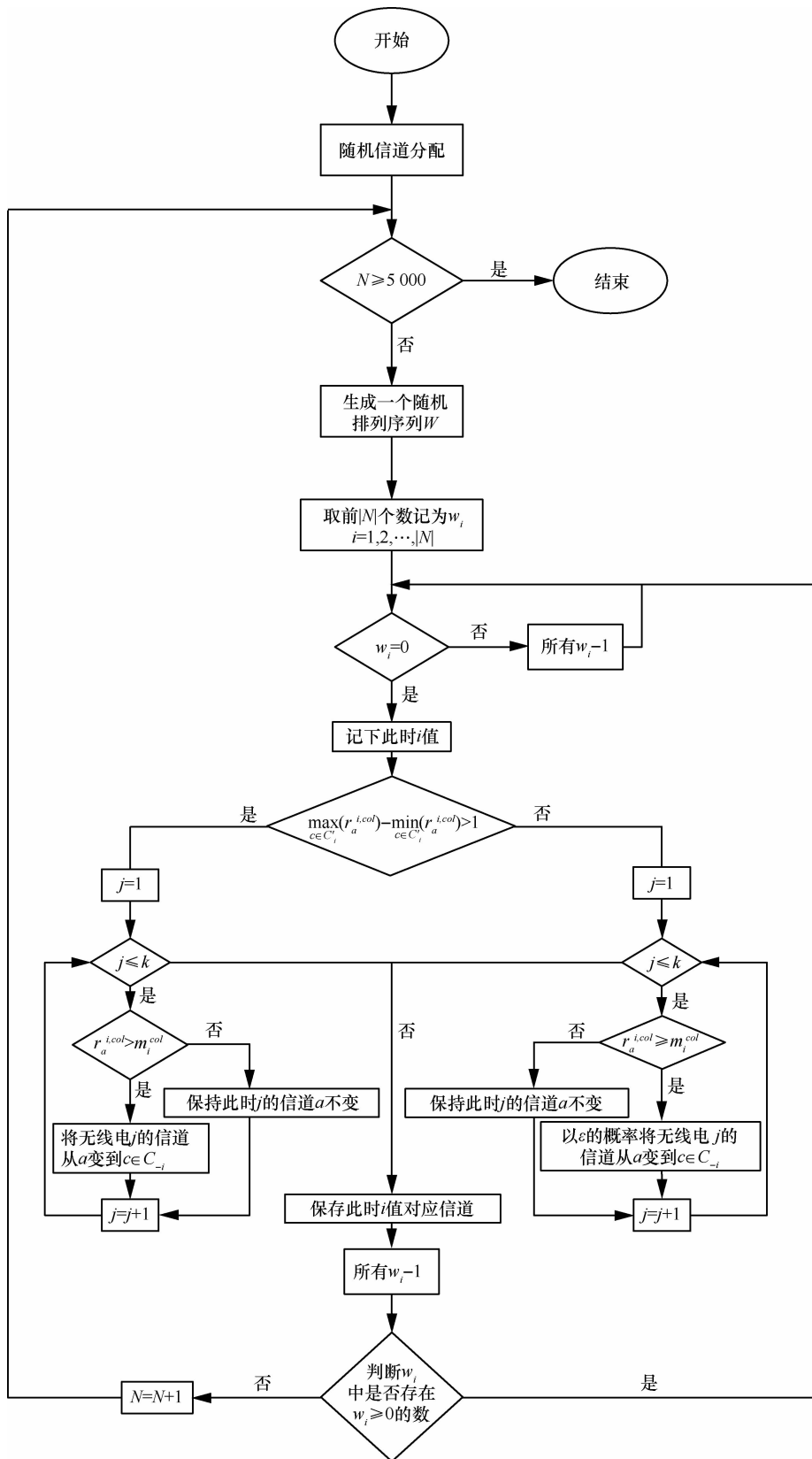
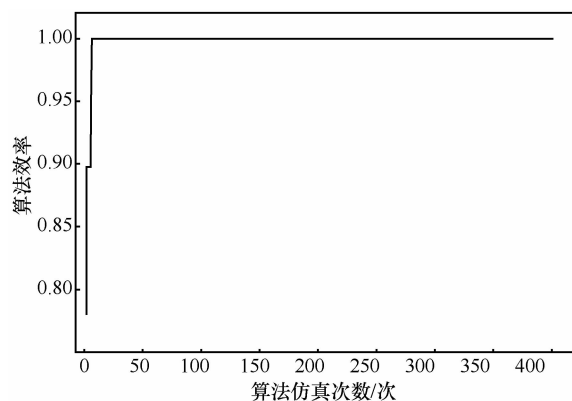
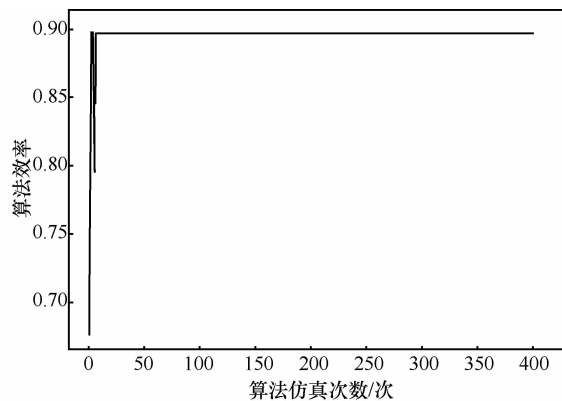


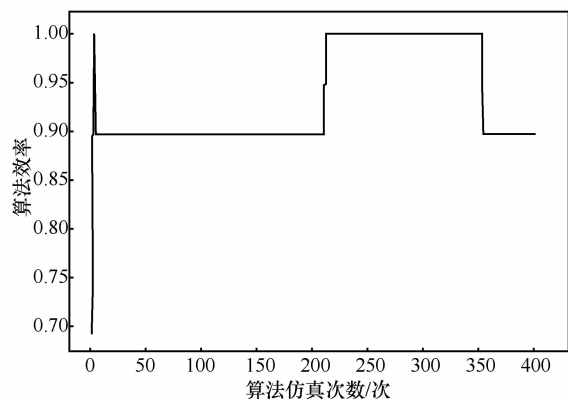
图2 算法循环次数判决流程



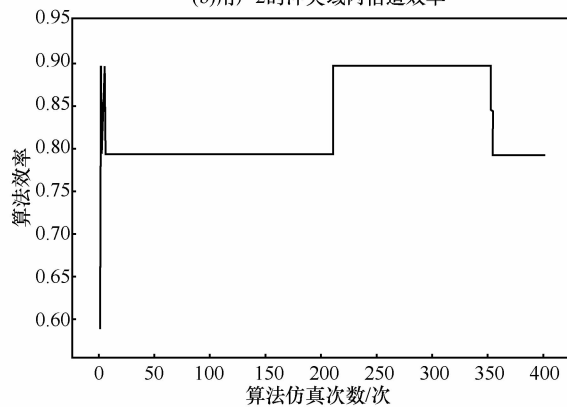
(a)用户1的冲突域内信道效率



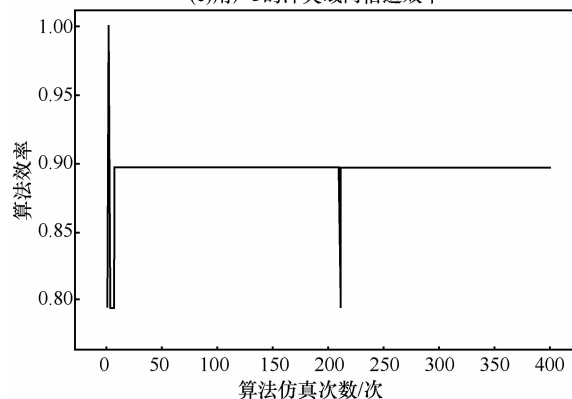
(b)用户2的冲突域内信道效率



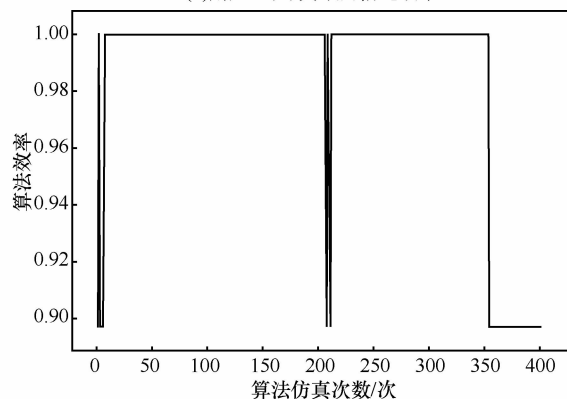
(c)用户3的冲突域内信道效率



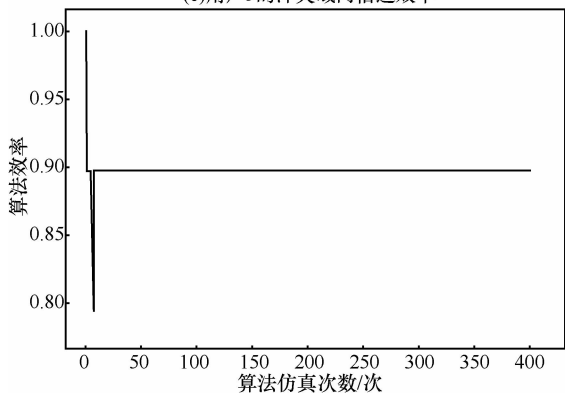
(d)用户4的冲突域内信道效率



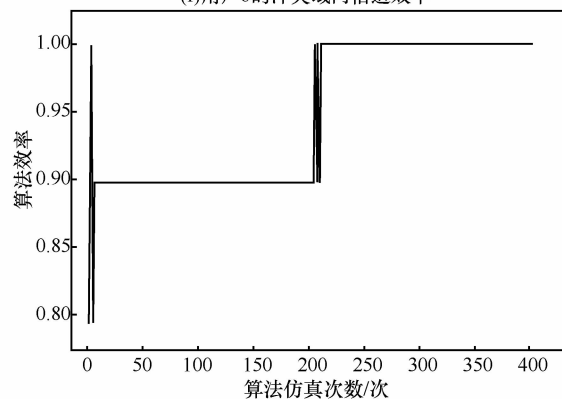
(e)用户5的冲突域内信道效率



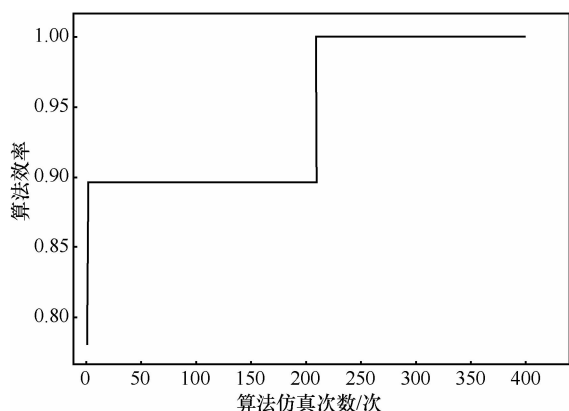
(f)用户6的冲突域内信道效率



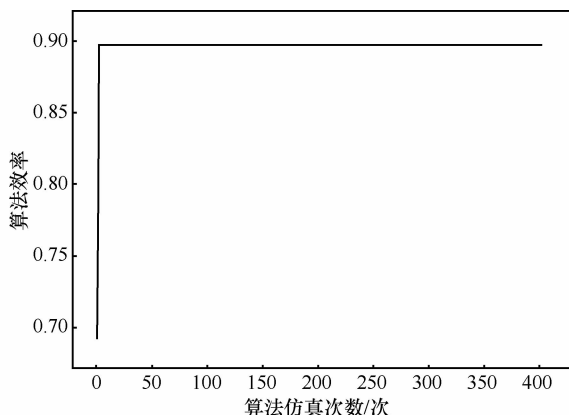
(g)用户7的冲突域内信道效率



(h)用户8的冲突域内信道效率



(i)用户9的冲突域内信道效率



(j)用户10的冲突域内信道效率

图3 各冲突域中算法的效率变化曲线

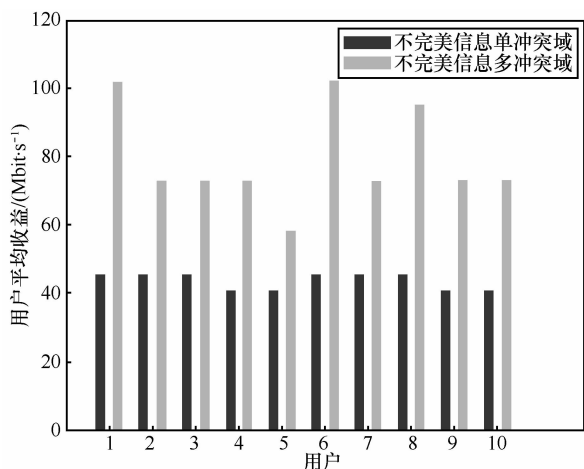


图4 用户在单多冲突域的平均收益对比

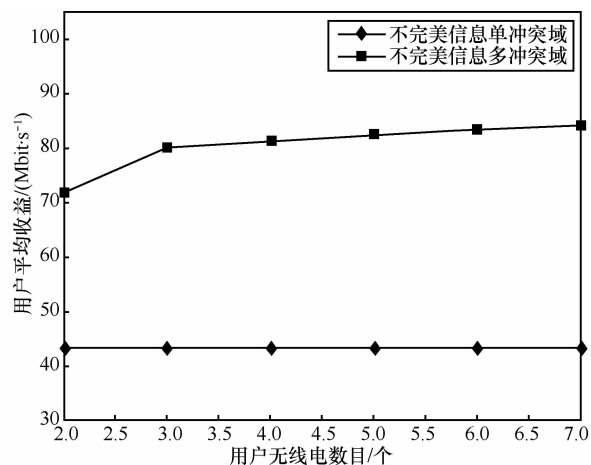


图5 不同无线电数目对算法的影响

平均收益变化情况。从图中可以看到,随着 k 值的增大,不完美信息多冲突域情况下用户平均收益逐渐增大,这是由于无线电数目的增多,用户可以了解到更多关于自身无线

电使用的信道情况,因此有更多的信息来帮助其决策,那么就接近纳什均衡点,造成平均收益的逐渐增大,但随着 k 值的递增,用户平均收益增加趋势逐渐平缓。这是由于此时越来越接近纳什均衡。而在不完美信息单冲突域中,随着 k 值的增大,用户的平均收益不变,这是由于虽然用户在单冲突域中的信息不完美,但随着循环次数的增加,用户可以逐渐完善信息达到纳什均衡点,只是需要的时间相比完美信息要更长,而在多冲突域中网络场景更复杂,各冲突域间相互影响,无法达到纳什均衡点,因此在单冲突域中平均收益不变化。

图6表示在 $|N|=10$ 、 $k=3$ 的条件下,用户的信道数目从8到13的用户平均收益。从图中可以看到,随着信道数目的增加,无论是在单冲突域情况还是多冲突域情况下,其用户的平均收益都逐渐增加,充分表明可以通过增加信道的数目来增大通信时用户的带宽(即平均收益)。

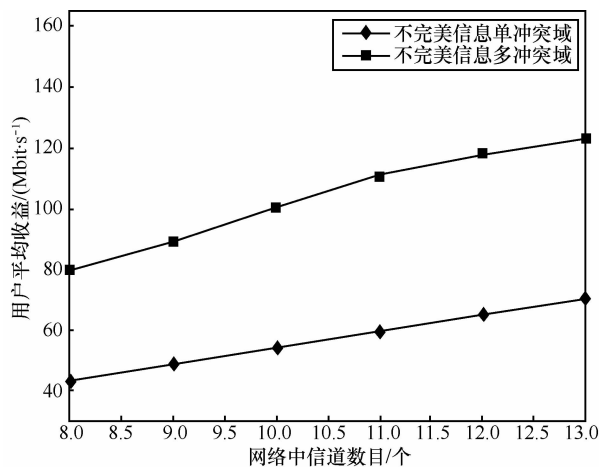


图6 不同信道数目对用户收益的影响

6 结束语

本文根据无线 Ad Hoc 网络分布式的特点,引入博弈论的方法,提出了一种适用于多冲突域情况的不完美信息的信道分配算法,通过实验仿真与单冲突域的情况做出对比,验证了本文的算法可以更好地最大化信道的使用率,接近纳什均衡点。但文中并没有用 NS 工具进行网络建模仿真,这样就无法考虑多冲突域环境下可能存在的隐藏/暴露终端等问题,因此下一步工作将考虑进行网络仿真,验证性能并能兼顾隐藏/暴露终端问题。

参考文献

- 1 陈林星,曾曦,曹毅. 移动 Ad Hoc 网络——自组织分组无线网络技术. 北京: 电子工业出版社, 2012
- 2 Srivastava V, Neel J O, MacKenzie A B, *et al.* Using game theory to analyze wireless Ad Hoc networks. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2005, 7(4): 46~56
- 3 DaSilva L A, Bogucka H, MacKenzie A B. Game theory in wireless networks. *IEEE Communications Magazine*, 2011, 49(8): 110~111
- 4 Yang D, Fang X, Xue G. Channel allocation in non-cooperative multi-radio multi-channel wireless networks. *Proceedings of 2012 IEEE INFOCOM*, Orlando, FL, 2012: 882~890
- 5 许力,陈志德,黄川. 博弈理论在无线网络中的应用. 北京: 科学出版社, 2012
- 6 Peng Y, Yu Y, Guo L, *et al.* An efficient joint channel assignment and QoS routing protocol for IEEE 802.11 multi-radio multi-channel wireless mesh networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 2013, 36(2): 843~857
- 7 Raniwala A, Chiueh T. Architecture and algorithms for an IEEE 802.11-based multi-channel wireless mesh network. *Proceedings of 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2005)*, New York, USA, 2005: 2223~2234
- 8 Subramanian A P, Gupta H, Das S R, *et al.* Minimum interference channel assignment in multi-radio wireless mesh networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2008, 7(12): 1459~1473
- 9 Felegyhazi M, Galaj M, Bidokhti S S, *et al.* Non-cooperative multi-radio channel allocation in wireless networks. *Proceedings of 26th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM 2007)*, Anchorage, AK, USA, 2007: 1442~1450
- 10 史佳佳, 刘宴兵. 多射频无线网络中多信道分配方法的研究. *计算机应用研究*, 2012, 29(6): 2290~2296
- 11 Tinirello I, Giarè L, Badalamenti R, *et al.* Utility-based resource allocations in multi-hop wireless networks. *Proceedings of the 5th International Conference on Network Games, Control and Optimization (NetGCooP)*, Paris, France, 2011: 1~7
- 12 郑鹏宇, 何世彪, 戴昊峰等. 一种基于博弈论的无线 mesh 网络信道分配算法. *电信科学*, 2013, 29(7): 59~65

[作者简介]



戴昊峰,男,重庆通信学院硕士生,主要研究方向为抗干扰通信、无线 Ad Hoc 网络的资源分配。



何世彪,男,博士后,重庆通信学院教授、博士生导师,主要研究方向为抗干扰通信、混沌通信、无线网络资源分配和应急通信的关键技术。



谭冕,男,重庆通信学院硕士生,主要研究方向为抗干扰通信、无线 mesh 网络的资源分配。



郑鹏宇,男,61920 部队助理工程师,主要研究方向为卫星通信综合组网的关键技术。



张晖,女,重庆大学硕士生,重庆通信学院讲师,主要研究方向为抗干扰通信、无线 mesh 网络的资源分配。

(收稿日期:2013-11-18)