

# 分布式多业务系统信道分配算法

李湘洋<sup>1,2</sup> 赵杭生<sup>2</sup> 赵小龙<sup>3</sup> 张 阳<sup>1,2</sup>

(解放军理工大学通信工程学院 南京 210007)<sup>1</sup> (南京电讯技术研究所 南京 210007)<sup>2</sup>

(中国人民解放军 61541 部队 北京 100094)<sup>3</sup>

**摘 要** 信道决策是认知无线电中的关键技术之一,近年来得到了广泛的研究。集中式算法是最常用的算法形式,但在认知无线网络这种分布式系统中,集中式算法不易实现。基于 Gale 和 Shapley 的大学入学匹配理论,针对认知无线电信道的决策场景以及分布式组网特性,将多用户、多业务系统的信道分配问题建模为多对一匹配博弈,提出一种基于效用矩阵的分布式多用户多业务信道匹配算法。仿真表明,该算法收敛时间短,获得的效用与最优集中式算法接近,远优于随机接入算法。

**关键词** 认知无线电,多对一匹配,信道分配,匹配算法

中图分类号 TN925 文献标识码 A

## Distributed Channel Allocation Algorithm for Multi-services Systems

LI Xiang-yang<sup>1,2</sup> ZHAO Hang-sheng<sup>2</sup> ZHAO Xiao-long<sup>3</sup> ZHANG Yang<sup>1,2</sup>

(Institute of Communications Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)<sup>1</sup>

(Nanjing Telecommunication Technology Institute, Nanjing 210007, China)<sup>2</sup>

(Unit 61541 of PLA, Beijing 100094, China)<sup>3</sup>

**Abstract** As one of the key issues for cognitive radio, channel allocation has been widely studied in recent years. The centralized decision algorithms are common, but it is uneasy to implement centralized algorithms for distributed cognitive radio systems. Based on the college admission matching theory proposed by D. Gale and L. Shapley and characteristics of distributed systems, the channel association of multi-services systems was formulated as a many-to-one matching game. And a distributed channel allocation algorithm based on utility matrix was proposed. Simulations show that the convergence time of the proposed algorithm is short and the utility of stable matching state approximates the optimal centralized algorithm in Rayleigh fading, far better than that of the random access algorithm.

**Keywords** Cognitive radio, Many-to-one matching, Channel allocation, Matching algorithm

## 1 引言

近年来,关于无线通信系统中的信道资源分配最优化问题的方法层出不穷,比如集中式优化和博弈论。但认知无线电系统一般都是分布式的,系统中没有集中控制中心,故在信道分配中更适合采用分布式信道决策方法。

随机信道分配是实现分布式信道决策最简单的方法。这种决策算法的收敛时间非常短,然而,随着用户数量以及用户业务量的增加,随机分配的收益将会远差于最佳集中式策略,这一点将在本文的仿真分析中进行讨论。在分布式系统的资源配置问题中使用匹配理论<sup>[1-3]</sup>能够克服随机分配效率低和集中式分配不易实现的缺点。作为诺贝尔获奖理论,匹配理论为两个集合元素的匹配问题提供了数学复杂度低、容易操作且效果突出的解决方案。近几年,将匹配理论用于无线网

络资源分配中得到了越来越多的研究<sup>[4-11]</sup>。文献<sup>[8]</sup>利用多对一匹配算法解决了蜂窝网络中小蜂窝基站、微蜂窝基站和用户之间的匹配问题,仿真表明算法收敛时间短,效用优于已有算法。文献<sup>[9]</sup>将下行小蜂窝的用户分配问题建模为一对多匹配,效用函数考虑了可用性能、传输速率以及蜂窝边缘用户的公平性,算法能够达到稳定匹配,且性能优越。在认知无线网络信道分配方面,文献<sup>[10]</sup>利用一对一匹配算法实现了单业务用户的信道分布式匹配,仿真分析表明,算法收敛时间短,效用与系统性能上限很接近。前期的工作中已利用一种改进的稳定婚姻匹配算法解决了混合认知无线网络单业务信道分配问题<sup>[11]</sup>,获得了良好的匹配结果。认知无线电系统中信道分配的研究多集中于用户与信道进行一对一匹配,能够实现系统中用户有单个信道需求的信道匹配问题,用户具有多业务需求的信道分配问题还有待解决。

本文受国家自然科学基金面上项目:频谱服务架构及其关键技术研究(61471395),国家自然科学基金项目:认知 Ad Hoc 网络中动态拓扑管理与路由技术研究(61301161),江苏省自然科学基金:基于时空关联特性的频谱地图构建研究(BK20141070)资助。

李湘洋(1990—),男,硕士生,主要研究方向为频谱资源管理、认知无线电,E-mail: esplan@163.com;赵杭生(1962—),男,博士,研究员,主要研究方向为频谱资源管理;赵小龙(1988—),男,硕士,研究实习员,主要研究方向为通信对抗;张 阳(1990—),男,硕士生,主要研究方向为频谱资源管理。

针对多用户多业务系统的用频场景,可以将文献[10]中的一对一匹配算法进行改进与扩展,从而获得稳定的匹配结果,但一对一匹配算法在解决多用户用频场景的信道分配问题时,收敛时间较长。为了克服这个缺点,本文提出了一种针对系统中单个用户有一个或多个业务进行传输的情况下的分布式信道决策算法,其在没有控制中心的系统中能够实现分布式信道分配。仿真表明了瑞利信道条件下,算法收敛时间短,稳定匹配的系统总效用很接近于最佳集中式分配结果,远优于随机接入算法。

## 2 系统模型

文献[12]对频谱接入的各个模型做了总结,其中的后两种模型是本文的关注点,即本文不明确地定义网络中的主用户和次用户,用户拥有相同的优先级,共同竞争空闲信道资源。

假定系统中存在  $N$  个用户,每个用户有一定数量的业务需要传输,每项业务需要一个信道,即每个用户需要接入一定数量的信道。假设每个用户的业务量为  $q_i (i=1,2,3,\dots,N)$ 。系统中共有  $M$  个信道供用户接入。每个用户都包含  $M$  个信道的效用函数,它们表示各个用户在每个信道上的传输的效用。用  $u_{i,j}$  来表示用户  $i$  利用信道  $j (j=1,2,3,\dots,M)$  进行传输的效用,并定义效用矩阵  $U=(u_{i,j})$ 。假设  $u_{i,j}$  是独立同分布的连续随机变量,且拥有连续的概率分布。因此,在任意给定的时间点,效用矩阵  $U$  中的各个效用值几乎能够确定是互不相同的,在接下来的分析和仿真中都这样假设。本文的方法适用于任意一种效用函数。而效用函数的一个简单例子就是用户在信道上的遍历性容量。本文以瑞利信道的信道容量作为效用函数来讨论算法的性能,故效用矩阵中的效用值可用下式进行计算:

$$u_{i,j} = C = B \log_2(1 + \text{SNR} \cdot X) = B \log_2(1 + \frac{P}{\sigma^2} \cdot X) \quad (1)$$

其中,  $P$  为用户的发送功率;  $X$  为服从卡方分布的随机变量(自由度为  $M$ ),即  $X \sim \chi^2(M)$ ;  $M$  为系统中总信道数;  $B$  为归一化带宽,本文中  $B$  值取  $1\text{Hz}$ 。

本文假设每个用户能够检测  $N$  个信道上的所有活动,在用户做出决策之前,系统状态保持不变。

## 3 多对一匹配

### 3.1 大学入学问题

大学入学问题是入学新生与大学之间的双向选择问题。每名大学生只能选择一所大学就读,而每所大学能够根据自己的招生名额选择多名大学生进行录取。

假设某一批次的  $a$  名大学生将被分配到  $b$  所大学就读,  $p_n$  为第  $n$  个学校的招生名额。学生的集合为  $S$ ,大学的集合为  $C$ 。每名大学生对于各所学校都有一个满意程度排名,学校对于每名大学生也有满意程度排名,怎样安排入学过程能够使大学生和学校构成的整体满意度最高即为大学入学问题。

### 3.2 多对一匹配定义

根据文献[1],以大学入学问题为例,给出多对一匹配的定义。

定义1 匹配  $\mu$  是满足下列条件的集合  $C \cup S$  到集合  $C \cup S$  的映射函数:

- 1) 对于学生  $s_n, |\mu(s_n)|=1$ ,且如果  $\mu(s_n) \notin c_m$ ,则  $\mu(s_n)=s_n$ ;
- 2) 对于大学  $c_m, |\mu(c_m)|=p_m$ ,且如果匹配中  $\mu(c_m)$  的学生数量  $r_m$  小于  $p_m$ ,那么  $\mu(c_m)$  中包含  $(p_m-r_m)$  个  $c_m$ ;
- 3) 当且仅当  $\mu(s_n)=c_m$  时,  $s_n$  包含于  $\mu(c_m)$  中。

其中,  $\mu(s_n)$  表示与  $s_n$  相匹配的元素,  $|\mu(s_n)|$  表示与  $s_n$  相匹配的元素数量;  $\mu(c_m)$  表示与  $c_m$  相匹配的元素集合,  $|\mu(c_m)|$  表示与  $c_m$  相匹配的元素数量。

由定义可知,匹配  $\mu$  是匹配双方集合  $C$  与集合  $S$  的并集到自身的映射函数。若一方集合中的元素的匹配对象为另一方集合的元素,例如,  $\mu(s_n)=c_m$ ,表示元素  $s_n$  匹配成功,学生  $s_n$  在匹配  $\mu$  中被大学  $c_m$  录取;若一方集合中的元素的匹配对象为自身,例如,  $\mu(s_n)=s_n$ ,则表示元素  $s_n$  未获得成功匹配;若集合  $C$  中某元素  $c_m$  的匹配对象既有学生又有自身,则表示该所大学在匹配  $\mu$  中未招收到足够的学生,例如,  $\mu(c_2)=\{s_1, s_3, c_2, c_2\}$ ,表示拥有4个招生名额的大学  $c_2$  在匹配  $\mu$  中只招收到了2名学生  $s_1$  和  $s_3$ ,还有2个名额空缺。可以用图来表示匹配函数,举例如表1所列。

表1 多对一匹配举例

	$c_1$	$c_2$	$(s_4)$
$\mu_1$	$s_1, s_3, c_1$	$s_2$	$s_4$

表1表示在匹配  $\mu_1$  中,大学  $c_1$  有3个招生名额,但只招收到了2名学生  $s_1$  和  $s_3$ ;大学  $c_2$  有1个招生名额,招到了学生  $s_2$ ;学生  $s_4$  在匹配  $\mu_1$  中并未获得匹配对象,无法入学。

参照文献[13],对于大学入学稳定匹配,给出下列定义。

定义2 在大学入学匹配  $\mu$  中,若  $\mu(s_n)=c_m$ ,则称  $(c_m, s_n)$  为  $\mu$  匹配主体对;特别地,若  $\mu(s_n)=s_n$ ,则  $(s_n, s_n)$  为  $\mu$  匹配主体对;若  $\mu(c_m)=c_m$ ,则  $(c_m, c_m)$  为  $\mu$  匹配主体对。

定义3 对于大学入学双边匹配  $\mu$ ,若主体对  $(c_m, s_n)$  满足下列4种情况之一:

- 1)  $\exists c_m, c_l \in C, s_n, s_k \in S, s_k \in \mu(c_m), s_n \in \mu(c_l)$ , 满足  $u_{m,n} < u_{m,k}$  且  $t_{m,n} < t_{l,n}$ ;
- 2)  $\exists c_m \in C, s_n, s_k \in S, s_k \in \mu(c_m), \mu(s_n)=s_n$ , 满足  $u_{m,n} < u_{m,k}$ ;
- 3)  $\exists c_m, c_l \in C, s_n \in S, s_k \in \mu(c_m), \mu(c_m)=c_m$ , 满足  $t_{m,n} < t_{l,n}$ ;
- 4)  $\exists c_m \in C, s_n \in S, \mu(s_n)=s_n, \mu(c_m)=c_m$ 。

则称主体对  $(c_m, s_n)$  为  $\mu$  阻碍稳定对。

定义中的  $u_{m,n} < u_{m,k}, t_{m,n} < t_{l,n}$  表示匹配双方的偏好关系,  $u_{m,n} < u_{m,k}$  表示相对于  $s_n, c_m$  更偏好  $s_k$ ;  $t_{m,n} < t_{l,n}$  表示相对于  $c_m, s_n$  更偏好  $c_l$ 。

定义4 对于大学入学双边匹配  $\mu$ ,若不存在  $\mu$  阻碍稳定对,则称  $\mu$  为稳定匹配,即  $\mu$  为具有稳定性的匹配,否则称  $\mu$  为不稳定匹配。

### 3.3 延迟接受算法

文献[14]根据大学新生入学的场景,提出了经典的延迟接受算法。

每名大学生剔除那些在任何情况下都不愿意去的学校,按照自己的偏好对剩下的学校进行一个排名。方便起见,假设大学生和学校之间没有关系,那么,即使对于一个大学生来说,某两所学校或者多所学校之间没有什么差别,他还是要按照某一顺序给学校排名。每所大学同样按照自己的偏好给申请者

排名,首先排除那些在任何情况下(这意味着即使招生名额不满)都不愿意接收的学生;通过学校的录取名额、学生和学校各自的排列名单,将申请者分配到学校。算法流程如下:

首先,所有的学生都向自己首选的大学提出申请。一个有  $p_n$  个招生名额的大学,将排在前面的  $p_n$  名学生放进自己的候补名单,而拒绝其他申请者。如果给这个学校提出申请的学生人数不满  $p_n$  人,这个学校将所有申请者都列入候补名单。被这个学校拒绝的申请者向自己的第二选择学校提出申请,再次,每个学校都从新申请者和自己的候补名单中选出  $p_n$  个申请者,将这些学生建立一个新的候补名单,同样,拒绝掉其他申请者。重复上述过程,当每个申请者要么在某个候补名单上,要么被所有自己愿意去又被允许申请的学校拒绝时,算法流程结束。之后,每个学校都接受各自候补名单上的所有申请者。

#### 4 分布式信道分配算法

对于多用户多业务场景中的信道分配问题,本文将构建为一对多匹配博弈,显然,信道分配问题中的用户相当于大学入学问题中的大学,信道相当于学生。用户与信道根据效用矩阵中元素的大小决定用户与信道的偏好信息,效用值越大的用户(信道)在相应的偏好列表中排名越靠前。

延迟接受算法能够获得良好的匹配效果,但文献[14]中的延迟接受算法由学生对学校进行优先选择,而在分布式信道分配场景中,信道并没有办法主动选取用户,故本文将文献[14]中的算法进行改进,即由用户首先选择信道,以适应分布式信道分配场景。算法流程如图1所示。

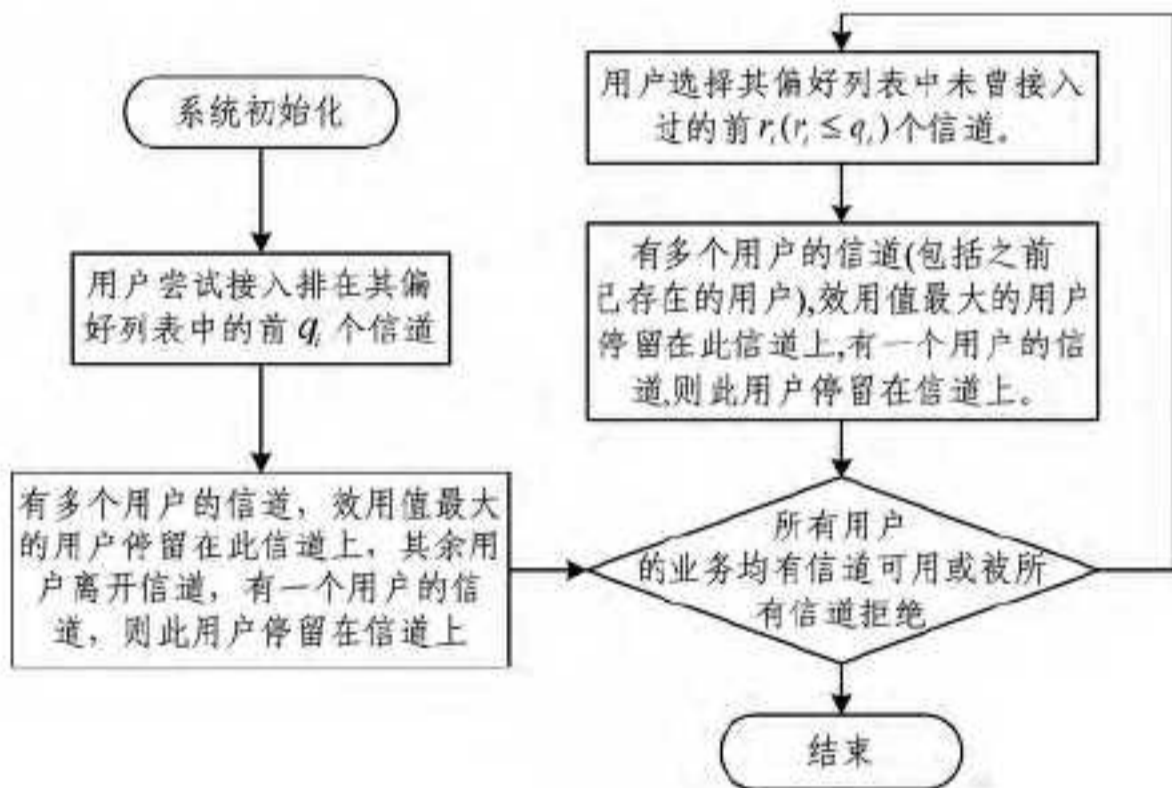


图1 算法流程

假设存在公共控制信道,用户的信道占用声明和相互之间的协商都在公共控制信道上进行。

如图1所示,算法的各个执行步骤如下:

步骤0 用户集  $U$  根据频谱感知、信道估计等技术获取在各个信道上的传输效用  $u_{i,j}$ 。

步骤1 用户对信道进行选取,尝试接入排在其偏好列表前  $q_i$  个信道。有多个用户的信道,效用值最大的用户停留在此信道上,其余用户离开信道,有一个用户的信道,则此用户停留在信道上。

步骤2 若用户  $i$  还有  $r_i (r_i \leq q_i)$  个业务没有信道可用,则用户选择其偏好列表中未曾接入过的前  $r_i$  个信道。有多个用户的信道(包括信道上已存在的用户),效用值最大的用户停留在此信道上,其余用户离开信道,有一个用户的信道,

则此用户停留在信道上。

重复执行步骤2,直到满足步骤  $n$  的条件。

步骤  $n$  所有用户的业务均有信道可用或被所有信道拒绝时,算法结束,获得信道分配结果。

根据算法流程,当用户的总需求量大于信道数时,势必有用户的需求得不到满足,根据算法流程,效用值相对较小的用户的某些业务将不会得到满足。如果效用值较小的用户业务比较重要且时效性很强,需要得到信道进行传输,可对其进行特殊处理。处理的方式是在匹配前将此用户对各个信道的效用值均乘以一个大于1的常数  $c$ ,得到虚拟的效用值,  $c$  的大小视业务的优先程度进行设置。由于在匹配前,效用由相对较大的虚拟效用值所替代,因此提高了此用户的接入概率,虽然系统整体的总实际效用降低了,但保证了有优先业务需求的用户在总信道数量不足的情况下能够在算法收敛后接入信道进行业务传输。

当用户的总需求量等于信道时,用户的所有需求都能够得到满足,能够获得良好的匹配结果。信道总数大于用户业务总需求量时,用户的业务需求也都能够得到满足,且用户能够选择到效用值较大的信道,未被选取的信道均为效用值较小的信道。

文献[14]中证明了无论是由学生优先选择学校还是由学校优先选择学生,使用延迟接受算法均能够达到唯一的稳定匹配,且这种稳定匹配是“入学最优”匹配。故本文算法也能够获得唯一的信道\_用户稳定匹配结果,但这种稳定匹配却不是全局最优的。大学入学算法中双方的偏好只是单纯的排序,并没有量化;而在本文的多业务信道分配场景中将偏好利用效用矩阵进行量化,虽然能够获得唯一的稳定匹配和较高的系统总效用,但不能保证稳定匹配所获得的总效用为系统最佳效用。如表2所列,在基于效用矩阵的多对一匹配算中,阻碍稳定对的出现有可能提升系统的总效用。

表2 效用矩阵

	业务数量 $q$	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6
User1	4	15	12	13	10	9	14
User2	2	2	11	7	1	16	4

如表3、表4所列,稳定匹配系统总效用为71,最优分配系统总效用为79。很明显,相对于最优分配中配对的 CH4, User1 更偏好于 CH2,相对于最优分配中配对的 User2, CH2 更偏好于 User1。故 User2-CH2 为定义中第一类阻碍稳定对,但这一阻碍稳定对的存在却提升了系统总效用,这是由于 User2 与 CH4 匹配相比于与 CH2 匹配降低了大量效用,而 User1 与 CH4 匹配却降低了很少的效用,故系统在存在 User2-CH2 这一阻碍稳定对后总效用提高了。

表3 稳定匹配结果

	业务数量 $q$	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6
User1	4	15	12	13	-	-	14
User2	2	-	-	-	1	16	-

表4 最优分配结果

	业务数量 $q$	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6
User1	4	15	-	13	10	-	14
User2	2	-	11	-	-	16	-

关于算法所达的稳定匹配状态的效用值与系统效用上限

之间的关系,在前期的工作中已经证明,一对一稳定匹配状态的系统总效用值至少为系统效用上限的一半<sup>[11]</sup>。多对一稳定匹配状态的效用值依旧至少为系统效用上限的一半,将多对一匹配中的效用矩阵按照用户的业务数量进行扩充,然后再利用文献<sup>[11]</sup>中的方法进行证明。

## 5 仿真分析

上文展示了稳定匹配的系统总效用可能小于非稳定匹配,最差情况大于任一非稳定匹配的一半。但无线网络环境是不断变化的,我们更关心稳定匹配的期望效用,故本文采用 $10^5$ 次蒙特卡洛仿真对用户数量与系统期望的总效用值之间的关系进行讨论。用户数量范围为 $1\sim 10$ ,信道总量为用户数量的3倍,各用户业务数量随机产生,但总数量保持为用户总量的3倍,即业务数量与信道数量保持一致,效用矩阵的元素由式(1)确定。为了进行对比,在仿真中展示了利用集中式最优分配得到的效用和随机分配的效用。

最优集中式分配<sup>[15]</sup>:系统中存在一个中心控制节点,这个节点首先获取到系统的效用矩阵,按照上文的方式将效用矩阵根据业务数量进行扩充,然后根据扩充后的效用矩阵利用匈牙利算法<sup>[16]</sup>进行最优分配,最优分配方案的效用为此系统的效用上限,最后中心控制节点再将分配方案发送给各个用户,用户按照最优分配方案接入相应信道进行传输。

随机分配:每个用户随机选择 $q_i$ 个空闲的信道。如果同一个信道上只有一个用户,那么该用户停留在此信道上。如果同一个信道上有多用户,那么随机选取一个用户保留,其余用户被信道拒绝,离开该信道,继续随机选取信道。重复上述过程,直到每个用户的每个业务都有信道可用或被所有信道拒绝。

如图2所示,随着用户数量的增加,3种算法的系统总效用均增大,最优分配与本文提出的稳定匹配算法的系统总效用的增大趋势大于随机分配,这是由于随着用户数量的增加,高效用信道用户对出现的概率增大,进而稳定匹配与随机分配能够选取到高效用的信道,但随机分配由于不考虑效用值,因此系统总效用较小。由仿真可知,在不同用户数量的情况下,稳定匹配的效用与最优分配很接近,远大于随机分配。

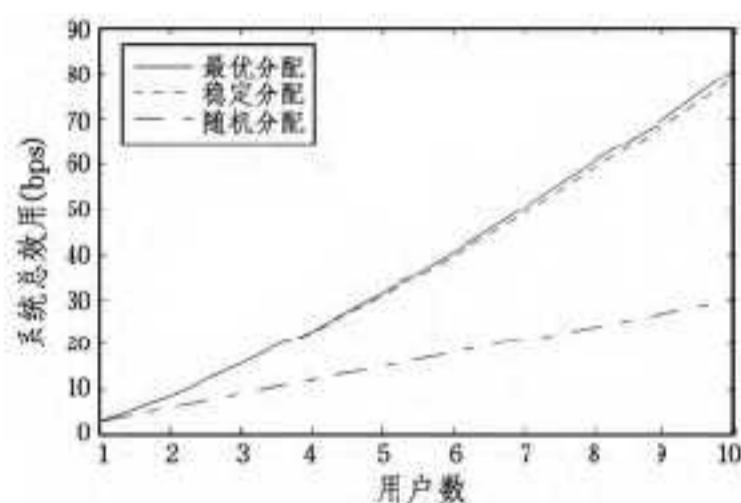


图2 用户数与总效用的关系

本文对不同用户数量下的算法收敛时间也进行了仿真。为了对比,对一对一匹配算法解决多业务信道分配时的收敛时间进行了仿真。解决多业务匹配算法,可利用文献<sup>[10]</sup>中的一对一匹配算法,将用户的各个业务均作为一个独立的匹配对象与用户进行一对一匹配。保持效用仿真的参数不变,采用 $10^5$ 次蒙特卡洛仿真得到的仿真结果如图3所示,从图中能够看出,随着用户数的增加,两种算法的收敛时间逐渐增加,与用户数大致呈线性关系,且相比于一对一匹配算法,多对一算法的收敛时间更短。

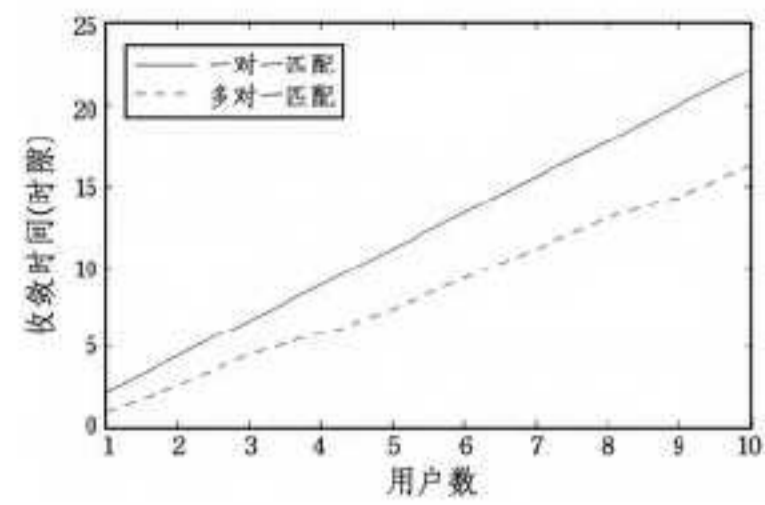


图3 两种分布式算法的收敛时间对比

接下来讨论当信道需求量一定时,3种算法下,信道总数于系统总效用和收敛时间的关系。采用 $10^5$ 次蒙特卡洛仿真,参数如下:用户数为5,信道需求分别为5,2,3,4,1,信道数范围为 $10\sim 30$ 。如图4所示,由于系统总的信道需求量为15,当信道数小于15时,无法满足所有用户的需求,此时会有一些数量的业务无信道可用,系统总效用较小,稳定匹配的总效用与最优分配很接近,近似为随机分配的2倍。当信道数大于等于15时,各个用户的需求都得到了满足,此时会有多余的信道没有参与传输。在最优分配和稳定匹配中,由于两种算法都考虑了效用值大小,能够选取到效用值大的信道进行传输,摒弃效用值小的信道,所以,随着信道数量的增大,可选择的高质量信道数量变大,故随着总信道数的增加,这两种算法获得的系统总效用增加。随机分配并未考虑到效用值的大小,而是单纯进行随机分配,故随着总信道数的增加,当所有用户的需求均被满足后,随机分配对应的系统效用仍近似为一条直线。

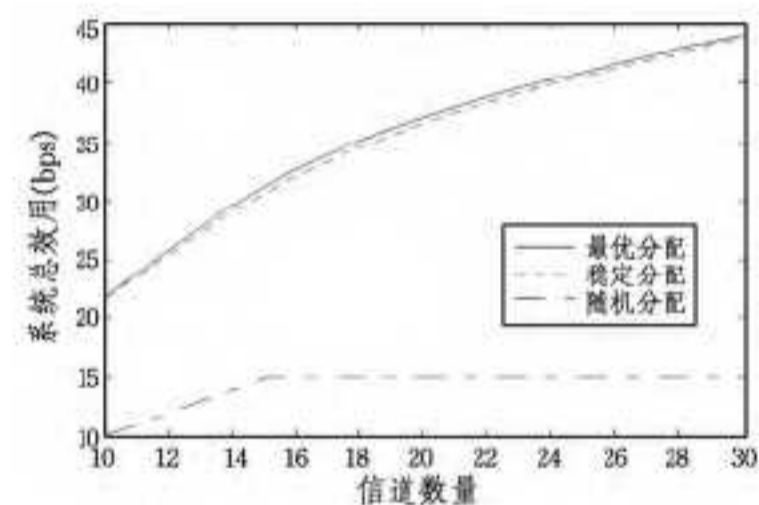


图4 信道总数与3种分配方式的效用关系

保持上述仿真参数不变,对算法收敛时间进行仿真,结果如图5所示。用户信道总需求量为15,当信道总数低于15时,由于用户需求大于信道总量,用户在信道上发生冲突的概率很大,故为解决冲突,收敛时间较长,当信道总数大于15时,用户信道需求小于信道总数,随着可选择的信道数量增加,用户间发生冲突的概率减小,故收敛时间减小。

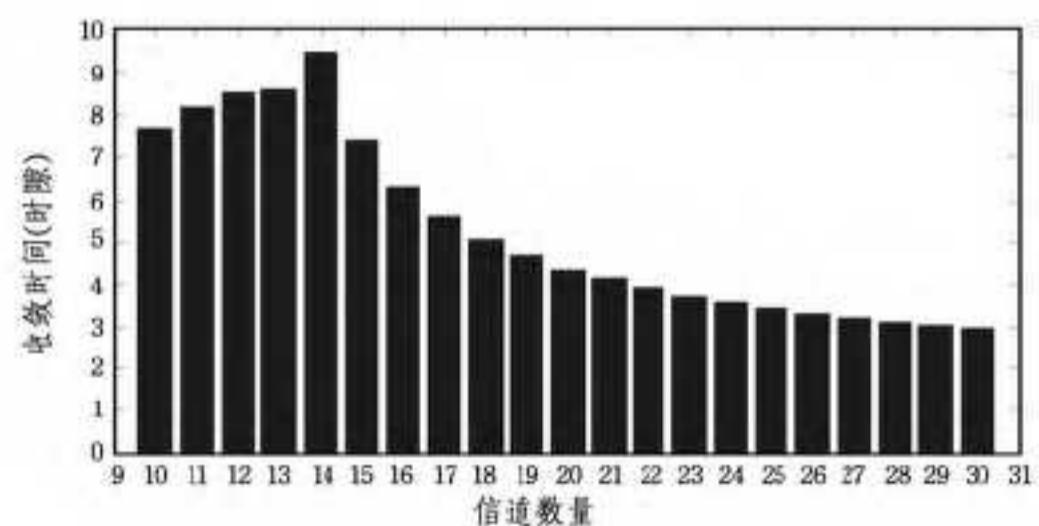


图5 信道数量与多对一匹配算法收敛时间的关系

综合上述仿真结果,分布式多用户多业务匹配算法的收敛时间短,效用值与系统上限接近,远优于随机分配算法。

结束语 本文将多用户多业务系统的信道分配问题建模为多对一匹配博弈,提出了一种分布式信道分配算法,仿真表

(下转第294页)

总体上看,EALB通过平衡节点之间的负载延缓了节点死亡的速率,有效地延长了网络生存期。

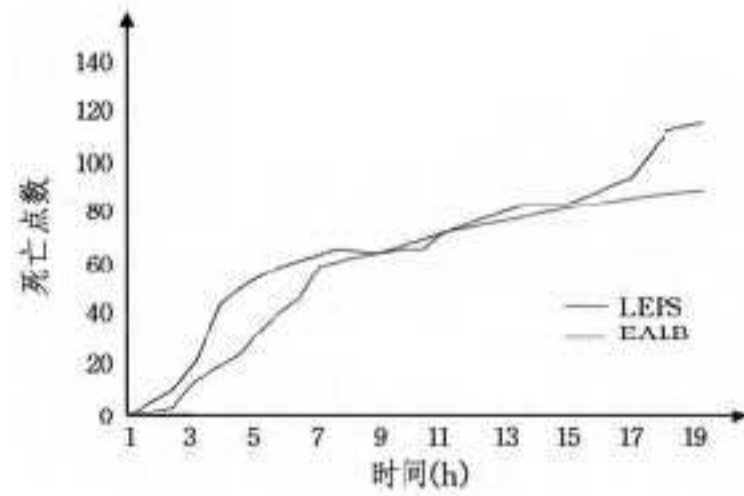


图 13 网络生存期对比图

**结束语** 本文从冗余数据包发送、数据收集速率和成功率、节点负载平衡度以及网络生存期 5 个性能指标入手,对 EALB、LEPS 进行对比和分析。实验数据显示,在拓扑建立阶段,EALB 减少了无效冗余广播包的发送,节省了节点能量;在路由选择维护阶段,EALB 比 LEPS 具有更高的数据收集速率和成功率,并且有效地平衡了同层节点之间的数据转发数量,保证了同层节点间的负载均衡。相对 LEPS 有了节能和负载均衡的优势,EALB 也自然降低了节点能量消耗的速率,有效地延长了网络生存期。

### 参考文献

[1] Gedik B, Liu Ling. Protecting Location Privacy with Personalized k-Anonymity: Architecture and Algorithms [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2008, 7(1): 1-18

[2] Gruteser M, Grunwald D. Anonymous usage of location based services through spatial and temporal cloaking [C] // ACM/USENIX MobiSys. 2003

[3] Culler D, Estrin D, Srivastava M. Overview of Sensor Networks [J]. IEEE Computer Society, 2004, 37(8): 41-49

[4] Tan H P, Lee W K G, Zhi A E. Impact of Power Control in Wireless Sensor Networks Powered by Ambient Energy Harvesting (WSN-HEAP) for Railroad Health Monitoring [C] // Advanced Information Networking and Applications Workshops. 2009

[5] Wei Cao, Ge Xu, Gao Yan-qing. Using Wireless Sensor Networking (WSN) to Manage Micro-Climate in Greenhouse [J]. Manufacturing Enterprise Solutions Association, 2008, 17(3): 6360641

[6] Matusik J, Scholtzova E, Tunega D. Influence of Synthesis Conditions on the Formation of a Icaolinite-Methand Complex and Simulations of ITS Vibrational Spectra [J]. Clays and Clay Minerals, 2012, 60(3): 227

[7] Campo Y, Llibre E, J F. WSNHM: Energy-efficient Wireless Sensor Network for home monitoring [C] // 2009 5th International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP). 2009

[8] Tang Ming, Wu Qian-hong, Zhang Guo-ping. A New Scheme of LBS Privacy Protection [C] // Proceedings of the 5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. 2009: 1-6

(上接第 275 页)

明,算法收敛时间很短,算法性能接近于系统上限。本文算法能够适用于其他类型效用函数,也适用于信道总数与信道需求总量不同的场景中,且能够保证系统的总效用并兼顾个别用户的优先级,具有良好的实用性。但对于时效性要求较强,对总效用没有严苛要求的系统,收敛速度依旧不理想,对于此种场景的信道分配算法需要进一步的研究。

### 参考文献

[1] Roth A, Sotomayor M A O. Two-Sided Matching: A Study in Game-Theoretic Modeling and Analysis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1992: 125-129

[2] Manlove D F. Algorithmics of Matching Under Preferences [M]. Singapore: World Scientific, 2013

[3] Irving R W, Leather P, Gusfield D. An efficient algorithm for the optimal stable marriage [J]. Journal of the ACM, 1987, 34(3): 532-543

[4] Jorswieck E A. Stable matchings for resource allocation in wireless networks [C] // Proc. of the 17th International Conference on Digital Signal Processing (DSP). Corfu, Greece, IEEE, 2011: 1-8

[5] Naparstek O, Leshem A, Jorswieck E A. Distributed medium access control for energy efficient transmission in cognitive radios [DB/OL]. (2014-06-01) [2015-11-15]. <http://arXiv preprint arXiv:1401.1671>

[6] Pantisano F, Bennis M, Saad W, et al. Matching with externalities for context-aware user-cell association in small cell networks [C] // Global Communications Conference (GLOBECOM). Atlanta, GA, Dec. 2013: 4483-4488

[7] Semiari O, Saad W, Valentin S, et al. Matching theory for priority-based cell association in the downlink of wireless small cell networks [C] // IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). Florence, 2014: 444-448

[8] El-Hajj A M, Dawy Z, Saad W. A stable matching game for joint uplink/downlink resource allocation in OFDMA wireless networks [C] // 2012 IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2012: 5354-5359

[9] Semiari O, Saad W, Valentin S, et al. Matching theory for priority-based cell association in the downlink of wireless small cell networks [C] // IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). Florence, 2014: 444-448

[10] Yaffe Y, Leshem A, Zehavi E. Stable matching for channel access control in cognitive radio systems [C] // Cognitive Information Processing (CIP 2010). Elba, 2010: 470-475

[11] 李湘洋, 赵杭生, 曹龙. 混合共享认知无线网络信道分配算法 [J/OL]. 计算机工程与应用, (2015-11-09) [2015-12-09]. <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20151109.0905.008.html>

[12] Zhao Q, Sadler B. A survey of dynamic spectrum access [J]. IEEE Signal Processing Mag., 2007, 24(3): 79-89

[13] Roth A E, Sotomayor M. The college admissions problem revisited [J]. Econometrica, 1989, 57(3): 559-570

[14] Gale D, Shapley L. College admissions and the stability of marriage [J]. American Mathematical Monthly, 1962, 69(1): 9-15

[15] 柳毅, 佟明安. 匈牙利算法在多目标分配中的应用 [J]. 火力与指挥控制, 2002, 27(4): 34-37

[16] Papadimitriou C, Steiglitz K. Combinatorial Optimization: Algorithms and Complexity [M]. USA: Dover, 1998: 133-137