

相继干扰抵消的无线网络基于遗传算法的容量估计*

吕绍和¹, 李雯², 沈虎¹, 王晓东¹

¹(国防科学技术大学 计算机学院, 湖南 长沙 410073)

²(解放军理工大学 信息管理中心, 江苏 南京 210014)

通讯作者: 吕绍和, E-mail: chi.shaohe@gmail.com

摘要: 相继干扰抵消(SIC)是一种有效对抗干扰的多包接收技术. 在支持 SIC 的无线网络中, 研究了最大容量即最大化并发传输数目的问题. 给出了刻画 SIC 顺序检测特性的干扰模型, 并据此提出判断链路集是否可并发的有效算法. 由于最大容量问题为 NP-hard 的, 而寻找最大并发链路集是全局优化的问题. 研究了基于遗传算法的近似机制. 详细讨论了遗传算法的设计并探讨了关键参数的设置, 算法性能通过大量仿真实验得到了验证.

关键词: 网络容量; 并发传输; 相继干扰抵消; 遗传算法; 近似算法

中文引用格式: 吕绍和, 李雯, 沈虎, 王晓东. 相继干扰抵消的无线网络基于遗传算法的容量估计. 软件学报, 2015, 26(Suppl. (2)): 71-77. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/15017.htm>

英文引用格式: Lü SH, Li W, Shen H, Wang XD. Capacity estimation by genetic algorithm in wireless networks with successive interference cancellation. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2015, 26(Suppl. (2)): 71-77 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/15017.htm>

Capacity Estimation by Genetic Algorithm in Wireless Networks with Successive Interference Cancellation

LÜ Shao-He¹, LI Wen², SHEN Hu¹, WANG Xiao-Dong¹

¹(School of Computer Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

²(Information Management Center, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210014, China)

Abstract: Successive interference cancellation (SIC) is an effective multipacket reception scheme to combat interference at the physical layer. This paper studies the problem of maximizing the number of successful simultaneous transmissions (i.e., transmission capacity) in a wireless network with SIC at the physical layer. First, an interference model based on the physical interference model is proposed to characterize the sequential detection nature of SIC. Then, an algorithm is presented to evaluate whether or not a link set is feasible. Next, recognizing capacity maximization is a NP-hard problem, a novel approximation solution based on the genetic algorithm (GA) is provided. Finally, the design and parameter setting of the GA solution are discussed, and the performance is validated by various simulations.

Key words: network capacity; concurrent transmission; successive interference cancellation; genetic algorithm; approximation algorithm

现代无线通信系统的容量受限于干扰. 由于无线通信的广播特性, 到达接收节点的是由所有相邻传输信号叠加而成的混合信号. 接收节点尝试着对其中的一个传输信号进行解码, 而将其他传输信号视为干扰与噪声. 一旦多路传输重叠, 冲突就产生, 导致接收失败.

相继干扰抵消(successive interference cancellation, 简称 SIC)^[1]是一种有效对抗干扰的多包接收技术(multiple packet reception, 简称 MPR). 它工作于物理层. 支持 SIC 的接收节点使用迭代方式尝试检测多路传输信号. 在每一次迭代检测中, 最强的信号被解码, 而其他信号被视为干扰. 如果信号干扰噪声比(signal to interference

* 基金项目: 国家自然科学基金(61202484)

收稿时间: 2014-05-02; 定稿时间: 2014-08-22

and noise ratio,简称 SINR)不低于给定阈值,则该信号被解码然后从接收的混合信号中移除.在随后的迭代检测中,下一个最强的信号被解码,这个迭代过程持续到所有的信号均被解码或者迭代失败.这种将冲突信号逐一解码的过程称为顺序检测(sequential detection).多包接收技术是无线通信物理层的重要进展.由于并非所有冲突信号均可解码,避免有害冲突就必不可少.因此,为确保 MPR 方法的可行性,需要细致协调网络中各链路的信号传输.

本文研究了相继干扰抵消的无线网络的最大容量(capacity maximization)问题,即从网络的所有链路中,选取一个最大的可并发的链路子集.该子集所含链路的数目称为网络的传输容量(transmission capacity).传输容量是网络性能的重要衡量指标^[5].同时,最大容量问题是无线网络许多其他领域的子问题.例如,在很多链路调度方案^[2-10]中,调度算法的主要任务是为每个时间槽生成合适的最大可行链路集.

然而,最大容量问题是经典的 NP-hard 问题.目前虽已有大量近似算法的研究,然而它们大都寻求局部最优解或近似最优解.本文研究了基于遗传算法的高效近似算法.遗传算法模仿生物遗传学和自然选择机理,通过人工方式构造出优化的搜索结构,具有很强的搜索全局优化的能力.

本文的贡献包括:(1) 给出了面向 SIC 的干扰模型,以刻画 SIC 的顺序检测特性及多份干扰信号的累积效应,并据此提出判断链路集是否可并发的有效算法.(2) 研究了基于遗传算法的近似方法.详细描述了遗传算法的染色体、适应度函数与遗传算子的设计,并通过实验探讨了关键参数的设置.基于 NS-2 网络仿真的结果指出,遗传算法能够得到非常好的近似结果,它通常不低于最优解的 80%.

1 相关研究工作

最大容量问题是无线网络研究中的经典问题.目前,广泛使用的干扰模型包括非累积干扰模型(protocol model)^[2]和累积干扰模型(physical model)^[3].Gupta 和 Kumar 讨论了两类模型中随机网络与任意网络的容量^[3].他们指出,在不支持 MPR 的无线网络中,单个链路所能占用的网络容量随网络规模的扩大而降低.文献^[5]证明了基于累积干扰模型求解任意网络的容量是 NP-hard 的.有效的近似算法分别在文献^[5-7]给出.文献^[6]在固定传输功率的情况下研究了相关的近似算法;文献^[5]则通过为每个活跃链路选择不同传输功率以达到全网的吞吐量最大.最近,文献^[4]研究了一种近似网络容量最优的分布式调度算法.

支持 MPR 的网络协议设计最近得到大量关注.两类干扰模型均被扩展以处理 MPR 的影响.例如,非累积干扰模型在一个干扰区域内允许多个活跃链路^[9],而累积干扰模型则允许在极低的 SINR 阈值下接收报文^[10].然而,这些扩展着眼于 MPR 的普遍特征,不能捕捉 SIC 独有的顺序检测特性.文献^[1]指出,SIC 可成倍提高网络容量.文献^[10]研究了支持 SIC 的多用户 MIMO 网络中的拓扑控制.文献^[2]研究了 SIC 无线网络的链路调度.文献^[11]研究了 SIC 无线网络的最大容量问题,并给出了一种近似算法.但该近似算法为启发式方法,缺少全局寻优的能力.

2 最大容量问题

考虑一个含 N 个静态节点和 n 条链路的单信道无线网络.链路标记为 $L_i(i=1,2,\dots,n)$ 或 L_{SR} ,其发射节点为 S 且接收节点为 R .假定:(i) SIC 中信号的移除是无误差的;(ii) 每一个节点配有一个全向天线,工作于半双工模式且在同一时刻不能发送多个报文.

2.1 干扰模型

基本的累积干扰模型.为容忍干扰与环境噪声,信号的 SINR 需大于给定阈值才能保证成功接收.令 N_0 表示噪声功率, P_{ij} 表示在链路 L_i 的接收节点 R_i 处,来自链路 L_j 的发射节点 S_j 的信号功率.假设共有 $(J+1)$ 条链路并发,即 $L_0, L_1, \dots, L_J (J \leq n-1)$.对于链路 $L_k (0 \leq k \leq J)$, 如果

$$\frac{P_{kk}}{N_0 + \sum_{0 \leq j \leq J, j \neq k} P_{kj}} \geq \beta_{kk} \quad (1)$$

则解码成功.其中, β_{ij} 为节点 R_i 解码来自节点 S_j 的信号所需的最低 SINR.由于不同链路在传输速率与功率等方面的差异,当 $j \neq k$ 时, $\beta_{ij} \neq \beta_{ik}$ 是可能的.

SIC 的顺序检测特性.考虑两条链路 L_1 和 L_2 .当在 R_1 处时,来自 S_2 的信号功率足够强,以至于在来自 S_1 的信号干扰下, L_2 的信号仍能被 R_1 检测.然后,通过移除 L_2 的信号, R_1 可完成对 L_1 的信号的解码.此时,称 L_1 依赖于 L_2 且 L_2 为 L_1 的相关链路.所满足的条件是

$$\frac{P_{12}}{N_0 + P_{11}} \geq \beta \quad (2)$$

我们的干扰模型.考虑 L_d 的接收.设共有 J ($J \leq n-1$) 条与 L_d 并发链路,其中, D ($D \leq J$) 条是 L_d 的相关链路.不失一般性,所有链路按照在 R_d 的接收功率排序为 $L_{i_1}, L_{i_2}, \dots, L_{i_{J+1}}$.假设 $i_k = d$, 则 $P_{i_k i_1} \geq P_{i_k i_2} \geq \dots \geq P_{i_k i_{J+1}}$, 相关链路的集合为 $\{L_{i_1}, L_{i_2}, \dots, L_{i_D}\}$. 为了成功检测到 L_d 的信号,要求

$$\left. \begin{aligned} \frac{P_{i_k i_x}}{N_0 + \sum_{(x+1) \leq j \leq J+1} P_{i_k i_j}} &\geq \beta_{i_k i_x}, \forall x \in D \\ \frac{P_{i_k i_k}}{N_0 + \sum_{(D+1) \leq j \leq J+1, j \neq k} P_{i_k i_j}} &\geq \beta_{i_k i_k} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

2.2 链路集可行性判断

对网络的最大容量问题,关键是寻找一个链路集,其中所有链路可并发,并且包含的链路数量尽可能地多.因此,对任何链路集,首先必须判断它是否可并发.若链路集 LS 可并发,则称 LS 为可行链路集(feasible link set),也称 LS 是可行的.

算法1. 链路集 LS 的可行性判断算法.

```

1  Foreach  $LS$  中的链路  $L_{SR}$ 
2    获得  $L_{SR}$  的所有相关链路;
3    Foreach 相关链路  $L'$ 
4      根据公式(3)判断  $L'$  的信号能否被  $R$  解码;
5      If 公式(3)不满足
6        Then return FALSE;
7    Endfor;
8    根据公式(3)判断  $L_{SR}$  的信号能否被  $R$  解码;
9    If 公式(3)不满足
10     Then return FALSE;
11 Endfor;
12  $SEN \leftarrow NULL$ ;
13  $REC \leftarrow NULL$ ;
14 Foreach  $LS$  中的链路  $L_{SR}$ 
15   If ( $S \in SEN$  or  $S \in REC$ )
16     Then return FALSE;
17    $SEN \leftarrow SEN \cup \{S\}$ ;
18   If ( $R \in SEN$ )
19     Then return FALSE;
20    $REC \leftarrow REC \cup \{S\}$ ;
21 Endfor;
22 return TRUE;

```

算法1给出了判断链路集 LS 可行性的算法.该算法的1~11行逐一检查每条链路的解码能否成功.对 LS 的每一条链路 L_{SR} ,首先得到它的所有相关链路,然后逐一判断相关链路的信号是否可在 R 处解码.如果所有相关

链路均可解码,再判断链路 L_{SR} 的信号在所有相关链路被移除后是否可解码.若存在至少一条链路不可成功解码,则链路集 LS 就是不可行的.算法 1 的第 2 部分,即第 14~21 行,检查半双工的限制.一方面,任何两条链路的发送节点不能相同.另一方面,一条链路的发送节点也不能与另一链路的接收节点相同.但是,由于 SIC 可消解冲突,两条链路的接收节点相同,并不违反半双工的限制.

2.3 最大容量问题

本文以 TDMA(time division multiple access)为背景,研究最大容量问题.TDMA 将时间划分为等长的时间槽(time slot),每个时间槽可用以完成一个报文的传输.最大容量问题需要寻找一个链路集满足:(i) 链路集为可行集;(ii) 不存在另一个集合,它可满足(i)但所含链路的数目更大.

同时满足(i)与(ii)的链路集称为最大可行链路集(maximum feasible link set),该集合的基数称为网络的传输容量.网络可能有多个不同的最大可行链路集,但其传输容量固定.

定理 1. 在支持 SIC 的无线网络中,基于累积干扰模型的最大容量问题为 NP-hard.

证明:对于任意链路 L_i 以及每一个 $j \neq i$,令阈值 $\beta_j \rightarrow \infty$.那么, L_i 除了需要的信号,不能解码其他任何信号.该问题自然退化成无 SIC 的最大容量问题,这已在文献[6]中证实为 NP-hard 问题.因此,作为更普遍的情况,我们的问题也是 NP-hard 的.证毕. \square

3 遗传算法求解

遗传算法(genetic algorithm,简称 GA)是一种全局随机优化技术.它的基本思想是,将优化问题的可行解都表示为染色体.然后,借用生物遗传学的观点,通过自然选择、遗传、变异等使染色体不断进化并实现适应性的提高.最后,适应性最高的染色体,对应于问题的最优解或近似最优解.遗传算法具有很强的全局寻优能力.由于可以将搜索扩展到全部解空间上,它的性能往往要比局部优化算法要好.最大容量问题是典型的全局优化问题.现有的研究工作集中于极大可行链路集的构造,容易陷入局部优化.

3.1 基本思想

遗传算法将问题的可能解表示为染色体,然后对算法所产生的每个染色体进行评价,并基于适应值来选择染色体,使适应性好的染色体在进化过程中有更多的繁殖机会.

生物的进化以集体为主体.与此相对应,遗传算法的运算对象是由 N 个染色体所组成的集合,称为群体(或种群).与生物的自然进化过程相类似,遗传算法的运算过程也是一个反复迭代的过程,第 t 代群体记做 $P(t)$,经过一代遗传和进化后,得到第 $t+1$ 代群体,它们也是由多个染色体组成的集合,记做 $P(t+1)$.这个群体不断地经过遗传和进化操作,并且每次都按照优胜劣汰的规则将适应度高的染色体更多地遗传到下一代,这样最终在群体中将会得到一个优良的染色体 X ,它所对应的表现型 X 将达到或接近于问题的最优解 X^* .

算法的停止条件通常有如下两种:① 完成了预先给定的进化次数则停止;② 种群中的最优染色体在连续若干代没有改进或平均适应度在连续若干代基本没有改进时停止.本文综合以上思想,设定的停止条件为:若连续 3 代的最佳适应度没有基本改进,则算法停止;否则,当进化次数达到 Mg 时,算法停止.

3.2 详细描述

遗传算法的设计,主要包括染色体编码、适应度函数、遗传算子及运行参数等方面.下面针对网络容量问题,逐一讨论各部分的设计.

(1) 染色体编码

使用固定长度的二进制符号串来表示染色体,每一位是由二值符号集 $\{0,1\}$ 所组成.不妨设网络中链路数目为 n ,则染色体长度为 n .每个位(bit)的值对应链路的状态,1 表示该链路被选中,0 表示该链路不被选择.例如,设网络包括 18 条链路,则染色体长度为 18.形如 $X=100111001000101101$,就表示,链路集包含第 1、4、5、6、9、13、15、16、18 共 9 条链路.初始群体中各个染色体用均匀分布的随机数来生成.

(2) 适应度评价

适应度决定染色体遗传到下一代群体中的几率.由于最大容量问题的目标是寻找最大的可并发链路集,因此,适应度函数就是描述链路集的并发程度的函数.如果链路集不能并发,那么并发程度为 0;否则,链路集包含的链路数目越多,并发程度越高.因此,适应度评价的指标分为两层.第 1 层次,当前所有被选中的链路是否可以并发.若不能并发,则适应度设置为 0.第 2 层次,在可以并发时,被选中的链路的数目,定义为适应度.给定染色体为 X ,定义适应度函数 $F(X)$ 如下:

$$F(X) = F_1(X) \cdot F_2(X) \quad (4)$$

$$F_1(X) = \begin{cases} 0, & X \text{ 对应的链路集不可并发} \\ 1, & X \text{ 对应的链路集可并发} \end{cases} \quad (5)$$

$$F_2(X) = |X|_1 \quad (6)$$

$F_1(X)$ 的值根据算法 1 来确定.将 X 对应的链路集,利用算法 1 判断它是否可行.若算法 1 返回 TRUE,则 $F_1(X)$ 置为 1;否则,置为 0.对二进制串 X ,它的 1 阶范数 $F_2(X)$ 就是 X 的非 0 位的数量.

(3) 遗传算子

最常用的遗传算子包括选择算子、交叉算子和变异算子等.

- 选择(selectin):根据各个染色体的适应度,按照一定的规则或方法,从第 t 代群体 $P(t)$ 中选出一些优良的染色体遗传到下一代群体 $P(t+1)$ 中.

对 $P(t)$ 的每一个染色体 X ,被选中的概率定义为

$$p(X) = \frac{F(X)}{\sum_{y \in P(t)} F(y)} \quad (6)$$

若染色体 X 被选中, X 将可能继续进行交叉与变异的操作.若 X 从未被选中,则将被丢弃,不会用于生成下一代种群.当种群大小为 N 时,选择操作需要重复 N 次,每次选择一条染色体.因此,当选中概率较高时,一个染色体可能被多次选择.选择操作的实现最常用的是轮盘赌方法.

- 交叉(crossover):对所有选中的染色体,随机搭配成对.对每一对染色体,在每一位上,都以概率 P_C 决定是否交换.交叉操作如图 1 所示.

- 变异(mutation):对已被选中的每一个染色体,以变异概率 P_M 决定是否改变某一位或某些位的值.例如,对 001010,若第 3 位发生变异,则得到新的串 000010.

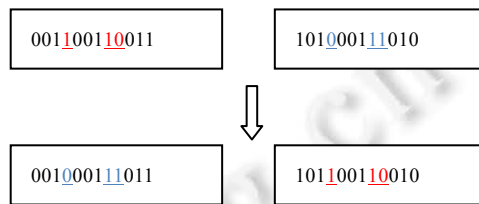


Fig.1 Illustration of the crossover operation in a genetic algorithm

图1 遗传算法的交叉算子示意图

(4) 运行参数

遗传算法主要有 4 个运行参数.

N :群体大小,即群体中所含染色体的数量,一般取为 20~100.

Mg :遗传运算的终止进化代数,一般取为 100~500.

P_C :交叉概率,一般取为 0.4~0.99.

P_M :变异概率,一般取为 0.0001~0.1.

需要说明的是,这里给出的取值范围是多次实验后的经验值,它们对遗传算法的求解结果和求解效率都有影响,但目前尚无合理选择它们的理论依据.下一节将通过多次实验来验证参数取值的不同选择.

4 性能评价

通过网络仿真器(Network Simulator 2,简称 NS-2)^[12]的仿真实验评价了近似方案的性能.表 1 总结了仿真过程中参数和协议的设置^[2].表 1 中的传输范围是指无其他并发传输的干扰时链路的最大通信距离.在规则平面区域内,随机方式部署 100 个节点.每个节点在其邻居节点的集合中随机选择一个节点作为目标节点,形成有效的链路.每一个数据点都是 100 次运行结果取平均值获得.

Table 1 Simulation setting

表 1 仿真参数

参数	值	参数/协议	值/机制
节点数目	100	报文大小	1 500 Bytes
传输范围	250m	传播模型	Two-Way ground
传输速率	2Mbps	MAC 协议	TDMA
SINR 阈值	10	路由协议	Shortest path
区域边长	150m~450m	部署方式	随机

首先,考察不同遗传算法参数的取值.网络为 $200\text{m}\times 200\text{m}$ 的方形区域.随机选择 30 条链路,应用遗传算法 GA,获得该网络的近似容量.重复 100 次,计算平均值.图 2 给出了不同参数设置下获得的结果.在图 2(a)中,群体大小变化范围为 30~60,其余参数取值见表 2;而在图 2(b)和图 2(c)中,交叉概率与变异概率分别变化.各参数的默认取值为:群体大小 $N=50$;进化数量 $Mg=150$;交叉概率 $P_c=0.5$;变异概率 $P_m=0.01$.

实验结果表明,当群体过小时,搜寻优化解的能力下降,所得到的网络容量近似值较低.但当群体达到 50 之后,继续扩大群体规模,并不能显著提高性能.此时,规模扩大带来的计算量开销,往往已经抵消了所获得的性能收益.当交叉概率或变异概率过小时,算法容易早熟,失去了寻优能力;过大时,系统的稳定性下降,算法终止时所获得的结果可能也不理想.综合起来,表 2 给出了比较合理的参数设置.必须指出的是,遗传算法的参数设置必须依据具体问题而定,针对一个问题有效的设置在问题背景改变后需要调整.

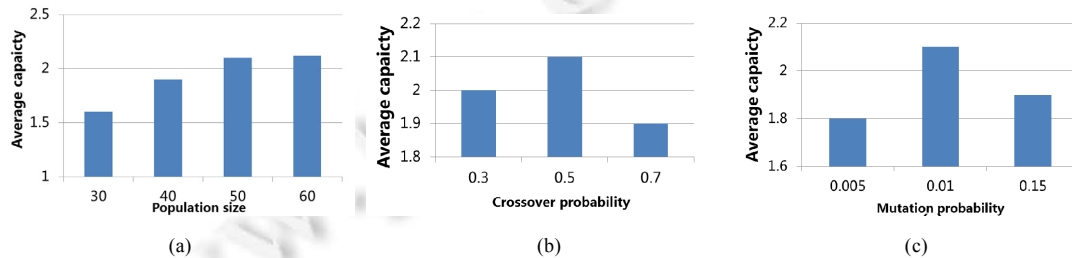


Fig.2 Network capacity computed by the genetic algorithm with different parameters

图2 不同参数条件下基于遗传算法的容量计算结果

其次,考察不同网络规模下遗传算法的性能.作为比较,网络的最大容量也同时给出.该值通过遍历所有可能的链路集而得到,计算量很大,只能在网络规模较小时使用.网络规模为 30 条链路.在不同大小的空间上部署 100 个节点,并随机选择 30 条链路.图 3(a)给出了该网络的平均容量.遗传算法的结果非常接近于优化解,通常在最优解的 80%以上.在前期工作^[11]中,我们设计了一些启发式的近似算法,但将它们近似解与最优值比较,相差往往达到 30%.遗传算法的全局寻优能力在此得到了很好的体现和利用.

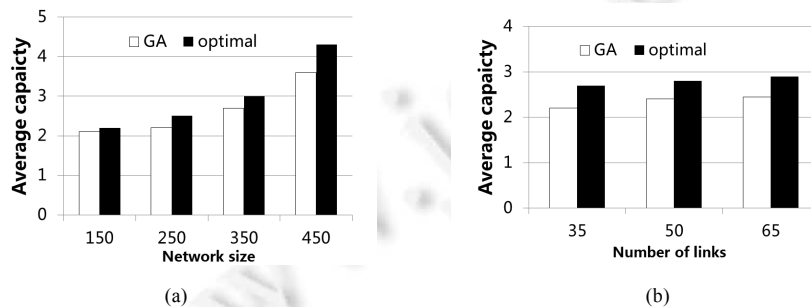


Fig.3 Average capacity in a network with different size

图3 不同大小的网络容量

最后,在 $200\text{m}\times 200\text{m}$ 的方形网络中,改变链路数目,考察网络容量的变化.图 3(b)给出了相应的实验结果.由

于网络规模的限制,链路之间的干扰非常严重.选择更多的链路,并不能找到更大规模的并发.因此,随着链路数目的增大,网络容量的增长幅度很小.遗传算法的性能得到进一步的验证,它获得了与最优值非常相近的结果,且随着链路数目的增大,其结果也体现出增大的趋势.

5 结 论

针对支持 SIC 的无线网络,研究了最大容量的问题.探讨了刻画 SIC 顺序检测特性的干扰模型,并据此提出判断链路集是否可并发的有效算法.由于最大容量问题是 NP-hard 问题,研究了基于遗传算法的求解.详细讨论了遗传算法的设计及关键参数的设置.仿真实验结果表明,遗传算法的结果在最优解的 80%以上.

References:

- [1] Lü S, Zhuang W, Xu M, Wang X, Liu C, Zhou X. Understanding the scheduling performance in wireless networks with successive interference cancellation. *IEEE Trans. on Mob. Comput.*, 2013,12(8):1625–1639.
- [2] Lü S, Zhuang W, Wang X, Zhou X, Scheduling in wireless ad hoc networks with successive interference cancellation. In: *Proc. of the IEEE INFOCOM 2011*. IEEE, 2011. 1287–1295.
- [3] Gupta P, Kumar PR. The capacity of wireless networks. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2000,46(2):388–404.
- [4] Dinitz M. Distributed algorithms for approximating wireless network capacity. In: *Proc. of the IEEE INFOCOM 2010*. IEEE, 2010. 1397–1405.
- [5] Andrews M, Dinitz M. Maximizing capacity in arbitrary wireless networks in the SINR model: Complexity and game theory. In: *Proc. of the IEEE INFOCOM 2009*. IEEE, 2009. 1332–1340.
- [6] Goussevskaia O, Oswald YA, Wattenhofer R. Complexity in geometric SINR. In: *Proc. of the ACM MobiHoc 2007*. ACM, 2007. 100–109.
- [7] Goussevskaia O, Wattenhofer R, Halldórsson MM, Welzl E. Capacity of arbitrary wireless networks. In: *Proc. of the IEEE INFOCOM 2009*. IEEE, 2009. 1872–1880.
- [8] Zhao Q, Tong L. A dynamic queue protocol for multi-access wireless networks with multipacket reception. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2004,3(6):2221–2231.
- [9] Celik GD, Zussman G, Khan WF, Modiano E. MAC for networks with multipacket reception capability and spatially distributed nodes. In: *Proc. of the IEEE INFOCOM 2008*. IEEE, 2008. 1436–1444.
- [10] Gelal E, Pelechrinis K, Kim TS, Broustis I, Krishnamurthy SV, Rao B. Topology control for effective interference cancellation in multi-user MIMO networks. In: *Proc. of the IEEE INFOCOM 2010*. IEEE, 2010. 2357–2365.
- [11] Lü S, Zhuang W, Xu M, Wang X, Liu C, Zhou X. Maximizing capacity in the sinr model in wireless networks with successive interference cancellation. In: *Proc. of the IEEE ICC 2011*. IEEE, 2011. 1–6.
- [12] NS-2. Network simulator version 2. 2010. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>



吕绍和(1982—),男,湖南永州人,博士,助理研究员,CCF 会员,主要研究领域为无线网络,社交网络,机器学习.



沈虎(1986—),男,博士生,主要研究领域为无线网络.



李莹(1981—),女,工程师,主要研究领域为无线网络.



王晓东(1974—),男,博士,研究员,CCF 高级会员,主要研究领域为无线网络,移动计算,社交网络.