

多射频多信道 Ad Hoc 网络跨层功率分配

赵传信^{1,3}, 王汝传^{1,2}, 黄海平², 孙力娟²

(1. 苏州大学计算机科学技术学院, 江苏 苏州 215006;

2. 南京邮电大学计算机学院, 江苏 南京 210003;

3. 安徽师范大学数学计算机学院, 安徽 芜湖 241000)

摘要: 为了提高多射频多信道 Ad Hoc 网络容量, 降低网络间无线干扰, 提出从跨层优化综合考虑信道与功率联合分配问题, 将信道与功率分配问题转化为混合整数非线性规划模型, 针对模型设计两阶段子问题求解迭代算法。算法在第一阶段采用启发式算法分配信道, 在第二阶段采用分布式算法进行功率分配。仿真实验结果表明, 信道与功率联合分配相对于固定信道下功率分配具有更好的效果, 联合优化两阶段迭代算法可有效提高网络整体效用, 同时降低节点间相互干扰。

关键词: 多射频多信道; 功率分配; 混合整数非线性规划

中图分类号: TP 393.04

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2011.04.36

Cross-layer power allocation for multi-radio multi-channel Ad Hoc network

ZHAO Chuan-xin^{1,3}, WANG Ru-chuan^{1,2}, HUANG Hai-ping², SUN Li-juan²

(1. College of Computer Science and Technology, Soochow University, Suzhou 215006, China;

2. College of Computer, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China;

3. College of Mathematics and Computer Sciences, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China)

Abstract: To enhance the capacity of multi-radio multi-channel Ad Hoc networks and decrease radio interference, an iterative algorithm is put forward to solve the two-stage sub-problem in designing the model which translates channel assignment and power allocation into the mixed integer nonlinear optimization from the view of cross layer design. At the first stage a heuristic algorithm is applied to assign channel while a distributed algorithm is applied to allocate power at the second stage. Simulation results indicate that compared with the classic fixed channel power allocation algorithm, the new algorithm can improve the network utility whereas decrease the radio interference significantly.

Keywords: multi-radio multi-channel; power allocation; mixed integer nonlinear optimization

0 引言

无线自组织网络(Ad Hoc)是由一组带有射频接口的节点组成的多跳无线网络。由于无线通信之间的相干性, 采用单信道的无线网络无法从根本上解决干扰问题, 多信道采用正交技术使单信道下不能并行通信的链路可以同时进行, 提高了网络容量。虽然多信道技术的出现大大降低了网络节点间的干扰, 但干扰问题始终是限制无线网络的主要因素。随着射频接口成本降低, Ad Hoc 网络节点拥有多个射频接口成为可行, 这类网络称为无线多射频多信道(multi-radio multi-channel, MRMC)网络。有效分配信道,

减少相互之间的干扰是 MRMC 网络重要研究内容。多信道分配策略按空间覆盖可分为集中式信道分配和分布式信道分配, 集中信道分配在工业中已经得到应用(Meru Networks 和 Tropos^[1])。集中式信道分配可以采用启发式算法如禁忌搜索, 或者分支界定等确定性算法。分布式算法基于本地信息选取干扰最小的信道, 以提高信道利用率为目标^[2], 不需要全局信息, 但是无法获得全局最优。多信道分配策略按时间变化特性可分为静态信道分配, 动态信道分配和拟静态分配。静态分配策略在较长范围内链路信道分配保持稳定^[3], 动态分配根据网络流量和链路变化周期性对节点的信道进行分配^[4], 拟静态分配在较长时间段内

收稿日期: 2010-06-24; 修回日期: 2010-10-29。

基金项目: 国家自然科学基金(60973139, 60903181, 60773041, 61003039, 61003236); 江苏省科技支撑计划(工业)项目(BE2010197, BE2010198); 国家和江苏省博士后基金(20090451240, 20090451241, 20100471353, 20100471355, 20100471356); 江苏省高校科技创新计划项目(CX09B-153Z, CX10B-196Z, CX10B-197Z, CX10B-198Z, CX10B-199Z, CX10B-200Z); 江苏省六大高峰人才项目(2008118)资助课题

作者简介: 赵传信(1977-), 男, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为无线网络优化算法、Ad Hoc 网络。E-mail: zcxonline@126.com

进行信道分配^[5]。单纯信道分配难以取得理想效果,近年来 MRMC 网络中结合信道分配的跨层优化受到重视,已有研究成果如将信道分配和路由^[6]、信道分配和拓扑控制^[7]、信道分配和拥塞控制^[8]联合跨层优化。跨层优化的目标是极大化网络的整体效用,提升网络吞吐量,降低链路间干扰。无线 Ad Hoc 网络中功率控制可以降低干扰,提升网络容量,单信道功率控制研究较多,文献[9]中首先提出了多信道 Ad Hoc 网络下的功率分配问题,但是没有考虑到信道分配。对 MRMC 网络中网络流变化的情况,信道固定分配是不适合的,为了有效降低干扰,需要考虑功率分配与信道分配联合优化问题。笔者针对功率分配与信道分配建立联合优化模型并提出求解算法,数值仿真结果显示功率与信道跨层联合优化可以取得较好效果。

1 问题的描述与建模

假设本文考虑静态 Ad Hoc 网络,网络中节点位置变化不大,网络流量是弹性流,信道分配采用拟静态信道分配,为简单起见,假设每个节点对都有且仅有一条链路,链路和节点对表示同样含义,射频接口简称接口。

1.1 基本网络模型

假设网络中有节点集 M ,每个节点装配有若干个同样的射频接口,网络中可用正交信道集 C ,每个射频接口同时只能分配一个信道。假设传输的数据流可以分开在各接口同时传输,发送节点的功率分配各接口上。由于不同信道上的干扰不相同,均分功率无法取得最好的效果。信道干扰模型采用物理干扰模型^[10],即信号干扰噪声比模型。无线网络中,网络中每个节点的接受功率因传输路径损失造成信号衰减,距离越长衰减越大,采用文献[11]中的信道模型表为。

$$p_R^y(t) = (1 + d_{xy})^{-\alpha} p_T^x(t) \quad (1)$$

式中, $p_R^y(t)$ 表示节点 y 处的接收功率; d_{xy} 表示两个节点之间的传输距离; p_T^x 表示发送节点的发射功率; α 表示路径衰减系数,根据环境不同可在 1.6~6 之间选择^[9]。

在无线网络环境中,接收端能否成功接收到发送端的报文,受接收端的信号接收功率与干扰功率的影响,两者的比值称为信噪比(signal to noise ratio, SNR)。若 SNR 大于某一设定值,则报文被成功接收。假设 l 代表某一节点对的链路,链路 l 的接收点信噪比表示为

$$\gamma_l(p_l) = \frac{p_l h_{ll}}{n_0 + \frac{1}{B} \sum_{l' \neq l} p_{l'} h_{l'l}} \quad (2)$$

式中, p_l 表示链路 l 的发射端电压功率; h_{ll} 表示链路 l 信道增益; $h_{l'l}$ 表示链路 l' 发射端对链路 l 接收端的信道增益; $\sum_{l' \neq l} p_{l'} h_{l'l}$ 表示链路 l 受到的总的干扰; n_0 表示信道噪声; B 表示带宽。

1.2 信道分配模型

设网络中发送节点、接收节点对形成一个链路,每个发送节点和接收节点装配有同样的射频接口,节点 m 射频接口数量表示为 I_m ,定义节点 m 第 k 个接口上 $|C| \times 1$ 信道分配

向量 \mathbf{X}_{mk} 表示信道和接口的绑定关系,第 c 个信道分给节点 m 第 k 个接口,则 \mathbf{X}_{mk} 的第 c 个元素为 1 否则为 0。每个节点同一个信道仅能分配在一个接口上,发送节点分配的信道总数不能低于接口数。为便于计算定义 $|C| \times 1$ 单位辅助向量 \mathbf{e}_c ,其中

$$\mathbf{e}_c[j] = \begin{cases} 1, & j = c \\ 0, & j \neq c \end{cases}$$

模型中节点每个接口有唯一的信道, $0 \leq \sum_{k=1}^{I_m} ((\mathbf{X}_{mk})^T \mathbf{e}_c) \leq 1, \forall m \in M, c \in C$ 。为简单起见,假设每个节点对同时只传输一个链路,设 $\forall (m, n) \in L, L$ 表示链路集合,要求 $\mathbf{X}_{mk} = \mathbf{X}_{nk}, \forall k$,即链路两端节点分配同样信道。

1.3 MRMC 功率分配的优化模型

传统的信道分配假设功率均分,在多射频同时工作时,要考虑功率分配问题,不同的功率分配导致在不同接口产生的干扰不同,假设节点 m 接口 k 分配的功率为 p_m^k ,受到节点功率的限制,接口分配的功率之和不超过主机的功率上限,分配的功率不低于下限的约束。设 p_m^{\max} 代表节点功率最大值,最小功率 $p_m^{\min} \geq 0$,主机功率分配向量 \mathbf{P}_m 可表示为

$$\mathbf{P}_m = \left\{ p_m : \sum_{k=1}^{I_m} p_m^k \leq p_m^{\max}, \text{ and } p_m^k \geq p_m^{\min} \right\} \quad (3)$$

链路的总效用可以表达为各接口的总和,假设模型采用的信道是正交的,不同信道不会产生干扰,任一链路中每个接口使用不同信道,则节点 m 的接收端的在 c 信道上获得的信噪比为

$$\gamma_m^c(\mathbf{p}_m) = \frac{\sum_{k=1}^{I_m} p_m^k ((\mathbf{X}_{mk})^T \mathbf{e}_c) h_{mm}^c}{n_0 + \sum_{m' \neq m} \sum_{k=1}^{I_{m'}} p_{m'}^k ((\mathbf{X}_{m'k})^T \mathbf{e}_c) h_{mm}^c} \quad (4)$$

式中, h_{mm}^c 为节点 m 在信道 c 上到接收端的增益; h_{mm}^c 为干扰节点 n 在信道 c 上到 m 接收端的增益; γ_m^c 为在信道 c 上的信噪比。式(2)中带宽 B 被吸收^[9],网络总的效用为所有接收节点的所有接口的效用之和,分配方案优劣可以采用网络效用评价,效用函数可有多种形式,本文采用经典高斯信道容量公式

$$u(\gamma(p)) = \log(1 + \gamma(p)) \quad (5)$$

u 表示网络效用,式(5)可以反映网络容量,建立如下的优化模型,其中功率满足限制,优化模型为

$$\begin{aligned} & \max \sum_{m \in M} \sum_{c \in C} u_m^c(\gamma_m^c(p)) \quad (6) \\ \text{s. t. } & \sum_{k=1}^{I_m} ((\mathbf{X}_{mk})^T \mathbf{e}_c) \leq 1, \forall m, c \\ & \sum_{k=1}^{I_m} p_m^k \leq p_m^{\max}, \forall m \\ & p_m^k \geq p_m^{\min}, \forall m, k \end{aligned}$$

全网所有链路的整体收益可以表示成式(6),通过优化变量 $\mathbf{P}_m, \mathbf{X}_{mk}, m \in M$ 使网络的整体效用最大化, \mathbf{X}_{mk} 是整型的变量而 \mathbf{P}_m 是连续的变量,这是混合整数非线性规划模

型。混合整数非线性规划模型比较难解,虽然可以通过转化利用分支界定求解,但是对于中型以上网络,需要优化的变量 \mathbf{X}_{mk} 会很大,时间复杂度过大不适合在实际网络中采用,因此近似的解法是有意义的选择。

2 联合信道功率分配的两阶段近似算法

式(6)是混合整数非线性规划模型,这个问题是比较难解的,目前尚无有效方法,因此近似解法是实际工作中的重要研究内容,如文献[12]无线网络中联合拥塞控制和信道分配就采用两阶段的优化方法,式(6)是信道分配和功率分配的混合优化,本文采用分治思想,将原问题分解为信道分配子算法和功率分配子算法,两个子算法按顺序迭代直到算法终止。

MRMC 网络信道分配是将信道分配给各射频接口,这是一个 NP 问题^[5]。由于网络拓扑较为恒定,信道可在较长时间段内进行一次分配^[13]。假设在信道分配前各节点信道之间的增益、功率分配可以收集,收集可由特定节点完成,如网络中的路由器或者簇头,通过这些节点进行信道分配。本文采用粒子群(particle swarm optimization, PSO)算法来设计启发式信道分配,PSO 算法具有算法简单效率高的优点,相对于禁忌搜索算法,PSO 算法解的质量不容易受到初始解的影响,PSO 算法可以求信道分配变量 \mathbf{X}_{mk} 。MRMC 网络中要求节点能有效的将功率分配在不同射频接口上,文献[9]提出 Ad Hoc 下的基于博弈论的分布式功率分配算法,但是该算法假设所有节点均占有同样的信道,这和 MRMC 网络中只有分配到同样信道的节点才会干扰不同,本文采用其中多信道功率分配算法并将其修改应用于 MRMC 网络功率分配作为第二阶段子算法。

2.1 PSO 算法的集中式信道分配算法

作为一种有效的进化计算技术,PSO 算法已经和遗传算法成为通用优化技术^[14-15]。PSO 算法能够在合理的时间内得到较优解。应用 PSO 算法需要解决信道分配编码、分配方案的评价和约束问题,这也是进化算法应用的关键。下面分别对这三个部分进行阐述。

(1) 粒子的编码。不失一般性假设,节点上的接口数目均为 s ,每个粒子位置设为 $M \times s$ 的二维数组,数组的元素为 x_{mk} ,表示节点 m 的 k 接口分配信道,不妨设粒子 \mathbf{X}_i 的编码表示为

$$\mathbf{X}_i = \begin{bmatrix} x_{i11}, x_{i12}, \dots, x_{i1s} \\ \dots, x_{imk}, \dots \\ x_{i|M|1}, x_{i|M|2}, \dots, x_{i|M|s} \end{bmatrix}$$

式中,元素 $x_{mk} \in \{c|c=0,1,2,\dots,|C|\}$, $|C|$ 表示系统可用的信道数目, $|M|$ 为节点数, $x_{mk}=0$ 表示不分信道。 $x_{mk} \neq x_{mk'}, \forall k \neq k', \forall m, x_{mk}$ 与式(6)的 \mathbf{X}_{mk} 关系是 $x_{mk} = c \Leftrightarrow \mathbf{X}_{mk}[c]=1$ 。

在 PSO 算法中,粒子有位置和速度两个属性,粒子位置表示分配的方案,粒子速度表示不同方案的之间的变化,粒子 i 在 t 时刻的位置、速度和局部最优用二维向量分别表示为 $\mathbf{X}_i(t)$ 、 $\mathbf{V}_i(t)$ 、 $\mathbf{P}_i(t)$,全局最优位置表示为 $G(t)$ 。

(2) 评价函数。网络效用可以用来衡量问题解的优劣,粒子对应的信道分配方案的适应度如式(7),其中变量 \mathbf{X}_{mk} 需满足约束 $\sum_{k=1}^{I_m} ((\mathbf{X}_{mk})^T \mathbf{e}_c) \leq 1, \forall m, c$,由于分配信道时假设功率已分配,分配不同的信道产生的干扰不同,通过恰当的分配降低干扰可以增大整体网络效用。

$$f = \sum_{m \in M} \sum_{c \in C} u_m^c(\gamma_m^c) \quad (7)$$

(3) 粒子的位置和速度更新计算。第 i 个粒子的速度更新公式如式(8),式中 w 为惯性权重, c_1 、 c_2 为加速常数,表示全局最优位置和个体最优位置的影响系数; r_1 、 r_2 为区间(0,1)上均匀分布的随机变量; $x_i(t)$ 表示位置; $p_i(t)$ 、 $g_j(t)$ 分别代表个体最优和全局最优。则计算出的速度可表示为

$$v_i(t+1) = wv_i(t) + c_1 r_1 (p_i(t) - x_i(t)) + c_2 r_2 (g_j(t) - x_i(t)) \quad (8)$$

PSO 算法最初用于连续空间的函数优化,而信道分配是整数分配问题,这里简单对位置采用取整函数 $trunc()$,位置更新可表示为

$$x_i(t+1) = trunc(x_i(t) + v_i(t+1)) \quad (9)$$

(4) 信道分配的约束,经过 PSO 算法迭代计算后的解可能存在违反约束的不可行解,这类解的出现导致搜索空间大,搜索速度降低。为了满足约束采用修正不可行解的方法,当计算出的位置 $\mathbf{X}_i(t)$ 违反 $\mathbf{X}_{mk} \neq \mathbf{X}_{mk'}, \forall k \neq k', \forall m$ 约束,对产生冲突的接口重新分配信道,直到没有同样的信道为止。

(5) PSO_CA 算法步骤,令 PSO 算法的总迭代次数为 Max_Step,给定算法参数,包括函数适应度需要计算的功率,PSO_CA 的运行过程如算法 1。

算法 1 集中式分配信道的 PSO 算法

```

PSO_CA()
{
    Initialize population;
    For(iter=0; iter<Max_Step; iter++)
    {
        Local_best( $\mathbf{X}$ );
        Global_best( $\mathbf{X}$ );
        UpdateVelocity( $\mathbf{V}$ ) by (8)
        UpdateLocation( $\mathbf{X}$ ) by (9)
        For( $i=1$ ;  $i \leq$  Population_Size;  $i++$ )
            Repaire  $\mathbf{X}_i$ 
    }
    Return Global best;
}
    
```

2.2 分布式功率分配算法

文献[9]中 Ad Hoc 多信道功率分配中节点类似 AP,任意节点的所有信道可以同时工作,而 Ad Hoc 中节点的射频接口数目往往比 AP 少的多,节点的接口也少于信道数。在 Ad Hoc 网络中的功率分配需要考虑 MRMC 下的情况。假设的功率分配在信道已分配的情况下进行,对任

意节点 m 的射频接口 k 上信道产生干扰是分配到同样的信道的接口。

经过 2.1 节的信道分配之后,接口上的信道干扰及增益均可计算出,文[9]采用博弈论对多信道下功率分配进行分析,其中原功率分配算法(primal asynchronous distributed pricing, PADP)具有算法收敛速度快,迭代周期短的优点,容易转化到 MRMC 网络中进行功率分配,设 \mathbf{p}_m 代表发射节点 m 的功率分配向量, \mathbf{p}_{-m} 代表其他发射节点的功率分配。节点 m 信道 c 的功率可表示为 $p_m^c = \sum_{k=1}^{I_m} p_m^k ((\mathbf{X}_{mk})^T \mathbf{e}_c)$,各节点每轮根据收到的其他节点的功率分配、干扰价格因子、信道增益选择最优的功率分配。设 Step 代表迭代步数,下面给出 MRMC 下的功率分配算法。

算法 2 分布式功率分配算法

Power_allocation(n, \dots)

```
{
  For(iter=0; iter<=Step; iter++) {
    Compute power allocation Vector
     $\mathbf{p}_m = \tau \omega_m (\mathbf{p}_{-m}, \boldsymbol{\pi}_{-m})$ ;
    Update interference price allocated
    channel,  $\boldsymbol{\pi}_m^c = C_m^c(\mathbf{p})$ ; }
  Inform the updated values to all nodes.
}
```

Power_allocation 算法类似文献[9]中 PADP 算法,不同的是 PADP 分配功率在所有信道上,Power_allocation 分配功率在射频接口上,其中 $\boldsymbol{\pi}_m^c$ 表示节点 m 在信道 c 的干扰价格因子,如果节点没有分配信道 c ,干扰价格因子为 0,否则需要在每轮功率分配后进行计算。 $C_m^c(\mathbf{p})$ 表示计算干扰函数。

各节点计算最优功率分配向量计算可表示为

$$W_m(\mathbf{p}_{-m}, \boldsymbol{\pi}_{-m}) =$$

$$\arg \max_{\mathbf{p}_m^c \in \mathbf{p}_m} \sum_{c \in C} (u_m(\gamma_m(\mathbf{p}_m, \mathbf{p}_{-m})) - p_m^c \sum_{n \neq m} \pi_n^c h_{nm}^c) \quad (10)$$

定义 1 干扰价格因子,干扰价格因子表示自己产生的效用对收到干扰的影响,这里定义为效用对总干扰的导数即

$$\pi_m^c(\mathbf{p}_m, \mathbf{p}_{-m}) = - \frac{\partial u_m^c(\gamma_m(\mathbf{p}_m, \mathbf{p}_{-m}))}{\partial I_m^c(\mathbf{p}_{-m}^c)} \quad (11)$$

$$I_m^c(\mathbf{p}_{-m}^c) = \sum_{m \neq n} \sum_{k=1}^{I_n} p_n^k ((\mathbf{X}_{nk})^T \mathbf{e}_c) h_{nm}^c。$$

定理 1 Power_allocation 算法中干扰价格因子的计算公式为

$$C_m^c(\mathbf{p}) = \frac{\theta_c}{(1 + \gamma_m^c(\mathbf{p}_m))} \frac{(\gamma_m^c(\mathbf{p}_m))^2}{\sum_{k=1}^{I_m} p_m^k ((\mathbf{X}_{mk})^T \mathbf{e}_c) h_{mm}^c} \quad (12)$$

证明 将信噪比式(4)代入干扰因子计算式(12),可得

$$C_m^c(\mathbf{p}) = - \frac{\partial u_m^c(\gamma_m^c(\mathbf{p}))}{\partial \gamma_m^c(\mathbf{p})} \frac{\partial \gamma_m^c(\mathbf{p})}{\partial I_m^c(\mathbf{p}_{-m}^c)} = \frac{\partial u_m^c(\gamma_m^c(\mathbf{p}))}{\partial \gamma_m^c(\mathbf{p})} \frac{(\gamma_m^c(\mathbf{p}))^2}{\sum_{k=1}^{I_m} p_m^k ((\mathbf{X}_{mk})^T \mathbf{e}_c) h_{mm}^c}$$

因为本文考虑的效用以最大速率为目标 $u_m^c = \theta_m \log(1 + \gamma_m^c(\mathbf{p}_m^c))$,将效用函数代入可得

$$C_m^c(\mathbf{p}) = \frac{\theta_c}{(1 + \gamma_m^c(\mathbf{p}_m))} \frac{(\gamma_m^c(\mathbf{p}_m))^2}{\sum_{k=1}^{I_m} p_m^k ((\mathbf{X}_{mk})^T \mathbf{e}_c) h_{mm}^c} \quad (13)$$

价格因子可以直接通过式(13)计算。

证毕

各节点在每轮计算功率分配和干扰价格因子,算法只需要收集有限的信息,包括信道增益以及其他邻居节点的干扰价格因子,信噪比和增益可以在接收端检测并返回给发射端节点,通过周期性的广播将信息发送给邻居节点。

经过 n 轮功率分配后,可以在网关节点收集信息后集中式信道分配,将两阶段子算法联合起来执行框架如算法 3。

算法 3 联合信道功率分配算法

- (1) Initialize $\mathbf{X}_{mk}, \mathbf{P}_m$;
- (2) Compute \mathbf{X}_{mk} by PSO_CA();
- (3) Every Node compute \mathbf{P}_m by Power_allocation();
- (4) if feasible then termination else goto (2)。

其中算法 3 第 2 部分采用集中式分配方案,第 3 部分采用分布式分配方案,算法通过循环执行直到取得合适的解,采用迭代次数限制的粒子群算法属于多项式复杂度,分布式功率分配算法由两重循环组成,也属于多项式复杂度,联合优化算法循环迭代次数可以由常数限制,显然联合信道功率分配算法也是多项式复杂度。

3 数值仿真与分析

为了验证模型与算法的正确性和有效性,利用数值仿真对算法的性能进行比较。节点随机分布在 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 平面上,每个节点具有 4 个射频接口,系统共有 6 个正交信道。假设 10 个节点均处于相互的邻居范围内。由于固定信道分配前并没有功率分配信息,信道分配具有一定的随机性,为了对比提出模型和算法的性能,选取两个算法作为比较对象:以固定信道分配后功率分配方案简称为固定信道优化(fixed channel power allocation, FIX_CPA);利用文献[2]提出了最小干扰的贪心法集中信道分配方案建立贪心法联合优化(greedy channel assignment power allocation, GREEDY_CAPA),将其用于本文提出的联合优化中的信道分配。最后是本文提出的联合优化简称粒子群联合优化(PSO channel assignment power allocation, PSO_CAPA)。

在仿真实验中性能比较参数有:(1)网络效用,计算网络中链路的效用的总和,反映整体网络的效用;(2)网络干扰,网络中各节点所受到噪声干扰。建立实验环境,所有节点均在邻居范围内,路径衰减系数取 $4^{[12]}$,信道增益参数 $h_{ij}^k = (1 + d_{ij})^{-4} \sigma_{ij}^k$,这里 σ_{ij}^k 是指一个单位均值指数分布随机变量,能够模拟频率选择性衰落交叉信道,高斯白噪声 $n_0 = 0.01$ 。信道分配的 PSO 算法中的参数 $\omega = 0.729, c1 = 2.05, c2 = 2.05$,种群大小取 20,粒子群算法的迭代次数 100。分布式算法中的 Step = 5,迭代周期为计算轮数,网络

效用及干扰均无量纲。

为了反映算法进化性能,首先选取一个场景统计网络效用的演化过程,对三种算法比较网络效用,如图 1 所示。

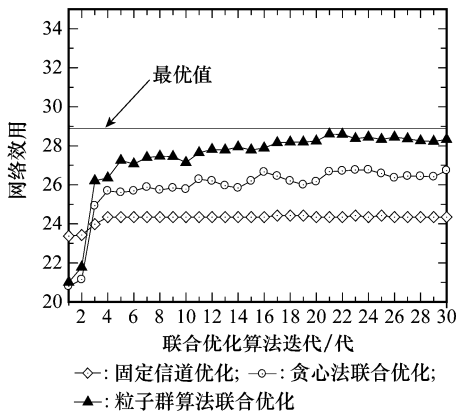


图 1 三种方案的网络效用演化

为了比较算法和最优解接近程度,采用 MATLAB 中混合非线性规划工具 BNB20 计算出最优解,图 1 的场景演化说明 PSO_PACA 算法可以较快的收敛,经过信道/射频的更新,网络效用逐步增加,经过 5 次信道/射频接口更新,网络效用基本稳定了达到最优值 98% 以上,已经比较接近最优值,说明本文提出的算法具有良好的寻优性。由于功率分配子算法是快速收敛的从而保证了联合优化算法的快速收敛,算法快速收敛可以降低广播报文的通信量,避免了大量增加网络负载。采用 PSO_CAPA 的联合优化网络效用明显高于另外两种方案。

进一步采用多个场景进行比较,图 2 反映 10 个不同场景下的网络进化后的网络效用比较,经过同样的迭代之后可以看出 PSO_CAPA 在所有场景均能取得最佳的网络效用,GREEDY_CAPA 可以得到近似最优,由于贪心法很难避免陷入局部最优,在测试场景中均没有超过 PSO_CAPA 的效用值,当然这两种方案中在所有测试场景下,网络效用都超过固定信道分配。在迭代过程中多次信道分配可以将干扰信道分配在不同信道减少干扰提高网络效用。

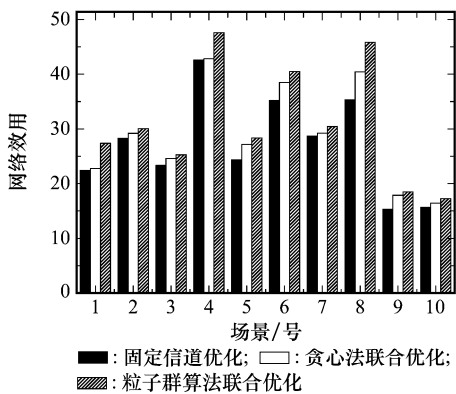


图 2 10 个随机场景的网络效用

为了比较不同网络配置参数对网络效用的影响,图 3 显示射频接口从 2 到 4 和信道数目从 2 到 6 的网络效用比较,每一个点代表同样配置下的 10 个场景平均网络效用,当射频接口数目增加时网络效用先升后降,因为在密集网络中干扰较大,功率过于分散导致信噪比降低而不能提升网络效用,在各种射频接口配置下,可用信道数目的增加,网络效用不断提升,但是增加幅度逐步变小,这是由于可用信道数增加有助于降低干扰。

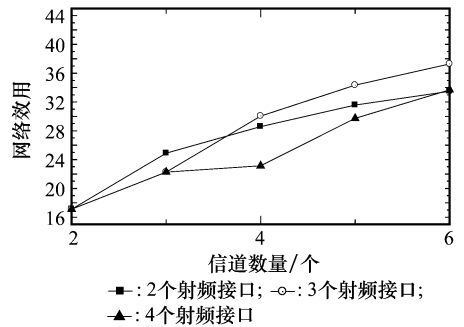


图 3 可用网络资源对网络效用的比较

功率分配的目的主要是为了抑制干扰,信道分配同样以减少干扰为目的,为了对三种算法比较对干扰抑制的性能,利用联合优化过程中网络干扰率分布来进行比较,比较场景中节点受到其他节点平均干扰率的变化过程,图 4 表示 FIX_CAPA、GREEDY_PACA 和 PSO_CAPA 在迭代过程中的干扰率变化。

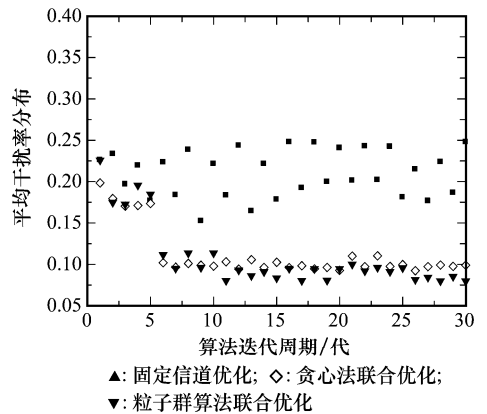


图 4 节点平均噪声分布图

从图 4 中可以看出信道固定分配干扰变化不大,联合优化随算法迭代干扰逐步降低,其中 PSO_CAPA 在经过几次迭代以后干扰降低最明显,显然由于 FIX_CAPA 没有分配信道,干扰量没有明显的变化。这和网络效用实验结果一致。

通过实验仿真表明联合信道分配和功率分配算法可以取得较好网络效用,对 MRMC 网络的功率分配经过多次信道分配可进一步降低干扰,优于固定分配信道方式。

4 结 论

无线多射频多信道 Ad Hoc 网络功率分配是非常复杂的,通过对 MRMC 网络信道与功率分配问题进行探讨,建立一个信道分配和功率分配混合非线性规划模型。该问题可以用传统分支界定集中求解。为了解决传统算法开销大,效率低的问题,给出混合整数非线性规划模型实际可行的近似解法,提出了集中信道分配与分布式功率控制的两阶段子问题解法,经过多轮迭代渐进最优解,该算法是多项式的复杂度。最后通过实验仿真选取固定分配信道与贪心分配信道的功率分配算法作为比较对象,从网络效用、干扰分布等方面进行比较,实验结果验证本文算法具有良好的表现。当然文中算法只考虑到单跳网络环境,下一步将考虑通过加入调度机制,将算法应用于多跳无线 Ad Hoc 网络环境。

参考文献:

- [1] Crichigno J, Wu M Y, Shu W. Protocols and architectures for channel assignment in wireless mesh networks [J]. *Ad Hoc Networks*, 2008, 6: 1051 - 1077.
- [2] Subramanian A P, Gupta H, Das S R, et al. Minimum interference channel assignment in multi radio wireless mesh networks [J]. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2008, 7(12): 1459 - 1473.
- [3] Alazemi H M K, Das A, Vijaykumar R, et al. Fixed channel assignment algorithm for multi-radio multi-channel mesh networks [J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2008, 8(6): 810 - 828.
- [4] Yu H, Mohapatra P, Liu X. Channel assignment and link scheduling in multi-radio multi-channel wireless mesh networks [J]. *Mobile Networks and Applications*, 2008, 13(1): 169 - 185.
- [5] Raniwala A, Gopalan K, Chiueh T. Centralized channel assignment and routing algorithms for multi-channel wireless mesh networks [J]. *Association for Computing Machinery Mobile Computing and Communication Review*, 2004, 8(4): 50 - 65.
- [6] Wang X, Garcia J J. Distributed joint channel assignment, routing and scheduling for wireless mesh networks [J]. *Computer Communications*, 2008, 31(7): 1436 - 1446.
- [7] Rad A H M, Wong V W S. Joint logical topology design, interface assignment, channel allocation, and routing for multi-channel wireless mesh networks [J]. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2007, 6(12): 4432 - 4440.
- [8] Rad A H M, Wong V W S. Joint optimal channel assignment and congestion control in multi-channel wireless mesh networks [C] // *Proc. of IEEE International Conference on Communications*, 2006: 1984 - 1989.
- [9] Huang J W, Berry R A, Honig M L. Distributed interference compensation for wireless networks [J]. *IEEE Journal Selected Areas Communication*, 2006, 24(5): 1074 - 1084.
- [10] Badia L, Erta A, Lenzini L, et al. A general interference aware framework for joint routing and link scheduling in wireless mesh networks [J]. *IEEE Network*, 2008, 22(1): 32 - 38.
- [11] Arpacioğlu O, Hass Z J. On the scalability and capacity of wireless networks with omni directional antennas [C] // *Proc. of the Information Processing in Sensor Networks*, 2004: 169 - 177.
- [12] Anastasios G, Theodoras S, Edward K. Congestion control and channel assignment in multi-radio wireless mesh networks [C] // *Proc. of 5th IEEE Communications Society Conference on Sensor Mesh and Ad Hoc Communications and Networks*, 2008: 350 - 358.
- [13] Rad A H M, Wong V W S. Cross-layer fair bandwidth sharing for multi-channel wireless mesh networks [J]. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2008, 7(9): 3436 - 3445.
- [14] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization [C] // *Proc. of IEEE International Conference on Neural Networks*, 1995: 1942 - 1948.
- [15] 沈林成, 霍霄华, 牛铁峰. 离散粒子群优化算法研究现状综述 [J]. *系统工程与电子技术*, 2008, 30(10): 1986 - 1990. (Shen L C, Huo X H, Niu Y F. Survey of discrete particle swarm optimization algorithm [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2008, 30(10): 1986 - 1990.)