

# 基于反向链路状态的动态优化信道分配

程 江, 朱世华, 党安红

(西安交通大学信息与通信工程系, 陕西西安 710049)

**摘 要:** 本文提出了一种基于反向链路载干比的信道分配优化模型. 这种模型较原有的兼容矩阵模型更接近实际系统, 并且能够应用于分析干扰自适应信道分配方案. 本文在提出这种模型的同时, 对比了该模型和原有模型在描述信道分配问题的精度和能力上的优劣. 此外, 本文还提出了使用改进遗传算法求解该模型下信道分配问题的方法. 分析和实验均说明本文提出的模型对实际环境进行了更精确的描述, 通过使用这种模型求解信道分配问题能够更好地利用信道资源.

**关键词:** 组合优化; 优化模型; 信道分配; 蜂窝系统; 移动通信

**中图分类号:** TN914.4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112(2001)10-1405-04

## Uplink Status Based Dynamically Optimized Channel Assignment

CHENG Jiang, ZHU Shi-hua, DANG An-hong

(Dept. of Information and Communication Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shanxi 710049, China)

**Abstract:** In this paper, a new model of channel assignment based on the carrier to interference ratio (CIR) of the uplinks in cellular mobile networks is presented. Compared with the classical compatibility matrix model, the new model is more accurate and is adequate for analyzing the interference adaptive channel assignment scheme. For comparison purpose, an improved genetic algorithm developed from the genetic algorithm and Tabu search for solving the channel assignment problem (CAP) is also proposed. Both analysis and simulation show that the new model can describe practical systems more precisely, and can lead to more efficient resource utilization when employed to solve CAP.

**Key words:** combinatorial optimization; optimization model; channel assignment; cellular system; mobile communications

### 1 引言

随着移动通信规模的不断发展, 系统能够提供的频谱资源已经不能满足用户的要求, 于是频谱资源的复用成为必然. 在使用固定信道分配(Fixed Channel Assignment, FCA)<sup>[1]</sup>的窄带蜂窝系统中, 求解满足载干比门限的最佳信道配置的问题称为信道分配问题(Channel Assignment Problem, CAP). 通过载干比门限定义小区簇(使得每个小区簇能够复用全部信道)的大小, 并在地理上重复这种配置形式的方法是 FCA 最经典的信道规划方法. 但是这种方法在实际环境下并不能得到适当的解, 因为实际环境下不同的地理位置可能有不同的电磁环境. 为此, 根据图形上色问题的求解提出了一种更通用的兼容矩阵模型<sup>[2]</sup>, 该模型定义了兼容矩阵  $C = \{c_{ij}\}$ , 这个  $n \times n$  的对称矩阵( $n$  是小区总数)的任意项  $c_{ij}$  确定了小区  $i$  和小区  $j$  之间能够同时使用的信道的最小间隔. 当信道总数和各个小区的信道需求确定后, 在兼容矩阵的前提下, CAP 被描述为一个 NP-hard 的组合优化问题<sup>[2]</sup>.

兼容矩阵模型的缺点是不能够准确地反映干扰的情况:

(1) 忽略了几个干扰源的干扰累计效应; (2) 没有考虑移动台

在服务小区中不同位置的影响. 于是, Capone<sup>[3]</sup>提出新模型将小区划分成更小的子区, 不同的子区到各个基站的信号传播特性不同. 通过子区平均接收水平矩阵  $A = \{a_{ij}\}$  来描述各基站到各个子区的传播特性. 这样, 在分配信道时就可以考虑来自不同子区的同道干扰的累计作用. 相对于前面的兼容矩阵模型, 这种模型能够更细致地反映实际环境中的情况.

从本质上讲, 上述两种模型都是针对长期传播特性相似的覆盖区域的, 区别仅在于所选择的区域大小不同. 而实际中, 由于信号传播特性的时变和用户的移动, 接收信号是不断变化的. 使用动态信道分配(Dynamic Channel Assignment, DCA)<sup>[1]</sup>时, 这种变化更加明显. 为了求解实际情况下信道分配的最优解, 本文建立了一种基于移动台的信道分配模型. 这种模型基于移动台接收各个小区基站信号的状态, 考虑满足连接质量的载干比门限, 建立求解具有最大容量的优化模型.

本文首先讨论信道分配问题中的基本限制和目标, 并提出基于移动台的信道分配模型; 其次将所提出的模型与兼容矩阵模型及子区模型进行对比; 最后提出了求解本模型的方法. 文中还结合遗传算法(Genetic Algorithm, GA)和禁忌搜索

(Tabu Search, TS) 的增强遗传算法 (Improved Genetic Algorithm, IGA) 来求解信道分配问题. 数值计算表明这种算法较单纯的 GA 和 TS 能得到更佳信道分配解.

## 2 基于载干比的信道分配模型

信道分配问题涉及基站、移动台和信道. 这三者之间的关系确定了信道分配的限制问题. 下面在假定系统中存在  $M$  个激活的移动台,  $K$  个基站,  $N$  个信道的基础上, 讨论移动台和基站、移动台和信道、基站和信道之间的限制关系.

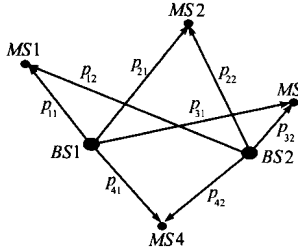


图1 本模型下蜂窝系统示意

第一种关系是移动台和小区的归属关系. 假设移动台选择小区的规则为  $j = f_p(i)$ , 即按照系统规定的原则为移动台  $i$  选择小区 (基站)  $j$  作为服务小区. 接入小区的选择原则可能各异, 通常与移动台的接收功率情况有关. 本文假设移动台选择具有最强信号的小区为服务小区.  $P = \{p_{ij}\}$  为  $M \times K$  的接收功率矩阵, 其中  $p_{ij}$  表示用户  $i$  接收基站  $j$  的信号强度, 如图1所示. 假设上下行路径对称, 则  $P$  同样可以用于上行链路.

这样可以建立移动台和小区的  $M \times K$  关系矩阵  $A = \{a_{ij}\}$ , 矩阵的项为

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{移动台 } i \text{ 接入小区 } j \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

第二种关系为移动台和信道之间的分配关系. 为每个移动台分配的信道可以使用一个  $M \times N$  的服务矩阵  $S = \{s_{ik}\}$ , 其中的项

$$s_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{信道 } k \text{ 分配给移动台 } i \text{ 时} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

基于上述定义, 可以计算每个用户的接收载干比

$$(C/I)_{ik} = \frac{p_{ih}}{\sum_{m=1, m \neq i}^M p_{mk} \cdot s_{mk}} \quad (3)$$

其中  $h = f_p(i)$ ,  $n = f_p(m)$ . 此外, 若满足上述分配, 将信道  $k$  分配给移动台  $i$  使用, 必须有  $(C/I)_{ik} \geq \Gamma$ , 其中  $\Gamma$  是系统设置的载干比门限. 这样可以得到由信道归属矩阵  $B = \{b_{jk}\}$  描述的信道和基站的归属关系, 其中

$$b_{jk} = \begin{cases} 1, & \text{当 } (C/I)_{ik} \geq \Gamma, \text{ 且 } f_p(i) = j \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

通常, 系统对同小区的同道使用有限制. 为避免可能出现的较大干扰, 即使载干比要求满足, 一般也不允许同道在本小区复用. 这样就要求下面的限制条件成立

$$s_j + s_{i'} \leq 1 \quad \forall i, i' \in \tilde{S}; j = 1, \dots, N \quad (5)$$

$$\tilde{S} = \{i, i' \mid a_j + a_{i'} = 2\}$$

$$\text{其中 } i \neq i'; i, i' = 1, \dots, M; j = 1, \dots, K; \quad (6)$$

在上述基于载干比的信道分配模型下, 可以将 CAP 问题及其约束条件描述如式(7)和式(8):

$$\min f(B) = \min(M - \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^M b_{ij}) \quad (7)$$

$$s_j + s_{i'} \leq 1 \quad \forall i, i' \in \tilde{S}; j = 1, \dots, N \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N s_{ij} \leq M, s_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j$$

从以上优化方程可见, 式(7)是使被阻塞的呼叫数最小 (即没有分配到信道的激活用户数最小), 而能否为用户分配信道的判断准则则取决于是否存在信道满足载干比要求. 约束条件(8)限制了同道的本小区复用, 且要求最大分配信道数不得超过呼叫总数. 载干比要求则在隐含  $B$  与  $S$  的关系中.

## 3 与其他模型的比较

本文的模型是针对移动台的实时状态的, 这种方法适用于动态信道分配的优化. 但进行适当简化就可以应用于固定信道分配的求解. 首先通过一个具有两两相邻的 3 小区, 2 个信道和 4 个用户的系统示例来比较本模型和前述两种模型的性能差别. 设某段时间内的接收强度矩阵

$$P = \begin{bmatrix} 80 & 3 & 5 \\ 4 & 100 & 6 \\ 4 & 6 & 100 \\ 80 & 5 & 3 \end{bmatrix}, \text{ 对应的 CIR 门限为 } 20. \text{ 根据接入原则,}$$

四个用户的服务小区应分别为 [1 2 3 1]. 根据 CIR 门限和本文提出的优化模型可知: 用户 1 使用的信道可以在小区 2 中复用 (即用户 1 和 2 可以复用信道). 同样, 用户 3 和 4 可以复用信道. 这样可以得到两种可行解, 即服务矩阵  $S = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}^T$  或  $S = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$ , 而其他形式的解都不是最优解. 例如  $S = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T$  时, 用户 1 和用户 4 的连接 CIR 都低于门限要求.

下面对比兼容矩阵模型. 由于兼容矩阵是一种针对信道和小区关系的模型, 并没有考虑移动台的实际连接质量. 因此, 兼容矩阵不唯一, 可能有下面两种情形. 第一, 兼容矩阵模

$$\text{型尽量将信道的复用分隔开. 取兼容矩阵 } C = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

这种情况下的分配将不会发生干扰, 但同时也导致每小区只有 1 个信道可用, 且信道不能在邻区复用. 这样总会有 50% 的呼叫被阻塞. 这与实际情况下的最优分配相距甚远. 第二, 放宽信道复用的限制, 允许信道在邻区复用. 即

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

于是, 可能的分配有 8 种. 但从前面的分析已知, 实际只有 2 种分配是能够保证连接质量的. 因此使用这种模型分配信道将导致多数分配方案无法保证连接质量 (实际中将产生掉话). 所以应用兼容矩阵求解信道分配问题时, 总按最差情况, 也就是使用第一种情况的限制条件进行分配.

如果采用 Capone 的子区模型, 将各个移动台分割在不同的子区, 似乎可以达到与本文模型相同的效果. 但却必须是把小区分割成很细的子区之后, 才可能达到本文的模型相同的效果. 而且当子区划分确定后, 也无法再适应不同时刻子区中

接收质量的变化. 这就是说本文模型可以在模型规模不大于正在呼叫的移动台的总数情况下, 获得较前述两种方法更好的优化结果. 之所以说不大于, 是因为可以将具有相同或相近的接收质量移动台合并求解, 减小求解的规模.

对一般情形, 由于子区模型与兼容矩阵模型并没有本质上的区别, 下面的分析只对比兼容矩阵模型. 前面的例子中已经看到, 兼容矩阵模型缺乏跟踪同道干扰变化的能力, 因而可能导致一定的掉话. 同时为了保证分配有效, 总是将同道复用的条件限制在干扰最大的情况, 这又使得系统容量不能达到最优. 下面将定量分析本模型可能获得的性能改善.

首先分析同道干扰随无线环境的实时变化. 假设  $F_n(n)$  是有  $n$  个同道干扰源被激活的概率, 相应的条件同道干扰概率为  $F(I_c|n) = P[(p_s/p_n) < \gamma]$ . 其中  $p_s$  是有用信号的瞬时功率,  $p_n$  合成干扰的瞬时功率,  $\gamma$  是信干比门限. 则

$$F(I_c) = \sum_n F(I_c|n)F_n(n) \quad (9)$$

同时考虑瑞利分布的多径衰落和对数正态分布的阴影衰落. 并假设各干扰源功率均值为  $p_{oi} = p_0$ . 由文献[4]知, 多个干扰源合成的干扰可近似为对数正态分布, 且概率密度函数

$$f_n(p_n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_p p_n} e^{-\frac{(\ln p_n - m_n)^2}{2\sigma_n^2}}, \text{ 其中, } p_u = \ln p_n, \xi_n = e^{m_n}, \sigma_n^2$$

分别是干扰功率, 均值和方差. 于是,

$$F(I_c|n) = \int_0^\infty dp_{0s} \int_0^\infty dp_n \int_0^\infty \frac{1}{2\pi\sigma_s\sigma_p p_0 p_n} e^{-p_s/p_{0s}} \cdot e^{-\frac{(\ln p_n - m_n)^2}{2\sigma_n^2} - \frac{(\ln p_{0s} - m_s)^2}{2\sigma_s^2}} dp_d \quad (10)$$

积分后得到

$$F(I_c|n) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^\infty e^{-w^2} f(w) dw \quad (11)$$

$$\text{式中: } f(w) = 1 - e^{-e^{m_n + \ln \gamma - m_s - \sqrt{2(\sigma_s^2 + \sigma_n^2)}w}}$$

可见, 在一定的干扰信干比门限条件下, 这个由于无线环境的变化造成的同道干扰, 是兼容矩阵模型无法克服的. 而只要运算足够快, 本文提出的模型则可以实时优化求解避免由于这个原因造成的掉话.

下面, 讨论由于兼容矩阵模型按照信道复用的最差情况进行复用规划造成的容量损失. 图 2 说明了最差情况和平均情况的差距. 全向小区的几种典型复用模式下, 由于基于最大干扰假设设计兼容矩阵造成的容量降低, 如表 1 所示. 从中可以看出由于兼容矩阵模型采用最差假设造成的容量降低是很明显的. 通过本文提出的模型则有可能获得接近最优的容量.

表 1 全向小区反向链路干扰距离和容量比较

每簇小区数	最差情况下基站到干扰移动台的距离 ( $d_{IW}$ )	平均情况下基站到干扰移动台的距离 ( $d_{IA}$ )	最差情况和平均情况的容量比 ( $d_W/d_{IA}$ )
3	2R	3R	4/9
7	$\sqrt{13}R$	$\sqrt{21}R$	13/21
12	5R	6R	25/36
21	$2\sqrt{13}R$	$3\sqrt{7}R$	52/63

#### 4 本模型的应用

如前所述, 本文提出的模型在数学表达上与子区模型基

本一致. 这使得本模型和兼容矩阵模型及子区模型一样是 NP hard 的组合优化问题<sup>[2,3]</sup>. 从规模上讲, 本模型的规模可能较兼容矩阵模型大. 但是在获得同样精度的情况下, 较子区模型的规模小, 所以本模型规模的增大还是值得的.

如果采用割平面法和分支定界法求解本模型, 运算量将随问题规模上升而指数提高. 为此, 本文采用渐进寻优的近似算法来求解 CAP. 目前常用的几种渐进算法包括 Hopfield 神经网络、模拟退火、遗传算法和禁忌搜索算法<sup>[3]</sup>等, 它们都有自己的优缺点. Hopfield 神经网络法和 GA 收敛较快, 但容易陷入局部最优. 模拟退火法和 TS 能收敛到全局最优解, 但收敛性与初始点的选择有关且收敛速度很慢.

近来, 组合优化问题的研究者提出了用 TS 改进 GA 的算法 IGA (Improved GA)<sup>[5]</sup>, 把 TS 独有的记忆功能引入到 GA 搜索过程之中, 构造了新的重组策略, 并把 TS 作为 GA 的变异算子. IGA 综合了 GA 具有多出发点 and TS 有记忆功能及爬山能力强特点, 能较快收敛到全局最优. 本文采用 IGA 求解 CAP. 求解过程可以用流程 1 的类 Pascal 语言描述.

Procedure CAP IGASEARCH (M, N, K, POPU\_NUM, P);

X := INIZ (M, N, K, POPU\_NUM, P);

Counter := 0;

While counter < TGMAX do

Begin

X := ga\_reproduce (X);

If rand() < CROSS\_PROB

begin

X := ga\_cross (X);

End;

End;

If rand < MUTURE\_PROB

Begin

X := ts\_mature (X);

End;

End;

X<sub>opt</sub> := X [ 1];

Fit<sub>opt</sub> := fitness\_eval (X [ 1], P);

For SamN = 2: POPU\_NUM do

Begin

Fit := fitness\_eval (X [ SamN ], P);

If Fit > Fit<sub>opt</sub>

Begin

Fit<sub>opt</sub> := Fit;

X<sub>opt</sub> := X [ SamN];

End;

End;

Return X<sub>opt</sub>;

End;

流程 1 IGA 求解 CAP 的流程示意

流程中 INIZ() 为初始化过程, ga\_reproduce(), ga\_cross() 分别为复制和交换过程, ts\_mature() 为使用 TS 算法进行突

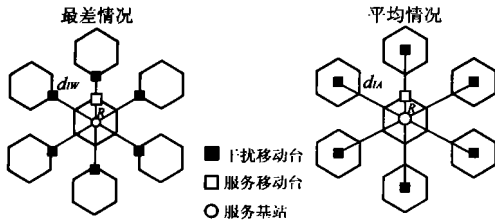


图 2 反向链路同道干扰示意

处理的流程. 使用适应度函数对样本进行评价的过程由  $fitness\_eval()$  完成. 本文对于样本的评价采用的适应度函数定义为

$$fitness(B) = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^N b_{ij} \quad (12)$$

这样, 具有最大适应度的结果就是能够为最多移动台提供服务的解.

本文对 6 小区, 240 个用户, 160 个信道的系统进行了数值计算. 求解中选择的样本数为 20, GA 迭代次数为 40, TS 迭代次数为 30, 且禁忌表长度为 15. 并假设用户在系统中均匀分布, CIR 门限要求为 18dB, 于是得到表 2~ 表 4 的结果. 其中表 2 为各个小区的用户数 (即信道需求) 列表, 表 3 为 IGA 的

表 2 各小区的用户数

小区号	1	2	3	4	5	6
用户数	39	39	43	37	39	43

表 3 IGA 的求解结果

小区号	分配给该小区的信道
1	40, 123, 120, 108, 121, 78, 70, 59, 150, 71, 151, 126, 152, 1, 42, 119, 107, 108, 160, 119, 29, 3, 83, 81, 58
2	160, 117, 38, 106, 119, 110, 1, 81, 111, 82, 42, 122, 151, 27, 158, 79, 118, 67, 80, 148, 29, 120, 28, 80, 4, 99, 3, 21, 77, 26, 145, 56, 1, 19, 110, 111, 60, 82, 43, 152, 43, 83, 112,
3	78, 118, 158, 159, 38, 27, 39, 28, 80, 39, 80, 81, 99, 2, 121, 138, 123, 3, 150, 30, 149, 41, 139
4	58, 80, 38, 107, 41, 124, 109, 2, 123, 147, 119, 118, 68, 120, 39, 159, 29, 149, 1, 120, 40, 69, 100, 2, 152, 3, 83, 40, 95, 147, 41, 81, 121, 42, 125, 61, 111, 78, 146, 28, 79, 26,
5	39, 159, 68, 3, 160, 149, 148, 119, 120, 82, 2, 151, 31, 101, 2, 84, 72, 30, 149, 109, 121, 77, 157, 146, 158, 118, 84, 69, 82, 150, 20, 85,
6	42, 110, 111, 27, 2, 159, 148, 28, 41, 158, 38, 119, 29, 147, 160, 30, 122, 83, 32, 120, 43, 112

表 4 IGA, GA 和 TS 的求解结果适应度比较

求解算法	IGA	GA	TS
最优解适应度	216	138	133

求解结果. 表 4 则是 IGA 算法和单纯的 50 代 GA 算法和 40 代 TS 算法得到的解的适应度的比较. 表 4 的结果说明使用 IGA 方法的求解组合优化问题可以得到较单独的 GA 或 TS 方法更好的准最优解. 同时, 这种算法的求解速度也是可以接受

的, 在主频 133M 的 Pentium 机器上, 使用 MATLAB 语言求解上述问题的时间为 1263 秒. 当机器运算能力进一步提高, 并采用如 C 等速度更高的编译语言时, 有可能实时得到优化结果.

## 5 结论

通过上面的讨论, 看到针对基于载干比的信道分配模型是一种着眼于移动台的模型. 这种模型在有限提高求解问题规模的前提下更细致地描述了系统的状态. 因此较兼容矩阵模型和子区模型更可能获得合理高效的分配结果.

对于这种模型的求解, 本文借鉴了 IGA 算法, 将 TS 和 GA 算法结合使用. 文中实验表明 IGA 能够得到更好的近似解, 且求解速度较 TS 算法快.

## 参考文献:

- [1] Zhang M, Yum T S. Comparisons of channel assignment strategies in cellular mobile telephone systems [J]. IEEE Trans. Veh. Technol., 1989, 38(4): 211-215.
- [2] Giortzis A I, Turner L F. Application of mathematical programming to the fixed channel assignment problem in mobile radio networks [J]. IEE Proc. Commun., 1997, 144(4): 257-264.
- [3] Capone A, Trubian M. Channel assignment problem in cellular systems: a new model and a tabu search algorithm [J]. IEEE Trans. Veh. Technol., 1999, 48(4): 100-108.
- [4] Prasad R, Kegel A. Improved assessment of interference limits in cellular radio performance [J]. IEEE Trans. Veh. Technol., 1991, 40(2): 412-419.
- [5] 李大卫, 王梦光. 一种改进的混合遗传算法 [J]. 信息与控制, 1997, 26(6): 449-454.

## 作者简介:



程江男, 1972年9月生于山西省长治市. 西安交通大学博士研究生, 现主要从事移动通信系统中信道分配和资源管理等方面的研究.



朱世华男, 1950年1月生于上海市. 西安交通大学教授、博导, 1987年获英国 ESSEX 大学电子系统工程博士学位. 现从事移动通信, 数字传输和交换等方面的研究.