

# 一种 MIMO-OFDM 系统天线和子载波分配算法

毕晓君, 王义新

(哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 在多输入多输出-正交频分复用(MIMO-OFDM)系统中,根据信道状况自适应地分配天线与子载波是使信道容量达到最大的关键技术。提出一种基于拥挤模型的差分进化算法,即拥挤差分进化算法(Crowding Differential Evolution Algorithm, CDE)用于解决 MIMO-OFDM 系统的自适应天线和子载波联合分配问题,利用该算法参数少、寻优能力强以及收敛速度快的特点,可快速确定最佳的天线和子载波联合分配方案,实现信道容量最大。

**关键词:** MIMO-OFDM; 天线和子载波联合分配; 差分进化算法; 拥挤模型

中图分类号: TN914

文献标识码: A

文章编号: 1003-3114(2011)01-34-4

## A New Algorithm for Antenna and Sub-carrier Allocation of MIMO-OFDM System

BI Xiao-jun, WANG Yi-xin

(College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin Heilongjiang 150001, China)

**Abstract:** In the MIMO-OFDM system, the allocation of combined antenna and sub-carrier according to the channel conditions is the key technology to maximize channel capacity. This paper presents a differential evolution algorithm based on crowding model, which is introduced to solve the problem of the allocation of combined antenna and sub-carrier in the MIMO-OFDM system. This algorithm has such characteristics as few parameters and fast convergence, so the best allocation of combined antenna and sub-carrier can be found accurately and quickly and the maximum channel capacity can be achieved by using this algorithm.

**Key words:** MIMO-OFDM; combined antenna and sub-carrier allocation; DE algorithm; crowding model

### 0 引言

MIMO-OFDM 系统是下一代移动通信的关键技术,能实现高速率传输和强可靠性。天线和子载波联合分配即 MIMO-OFDM 系统的调度器能够根据不同用户的无线信道衰落特性自适应地为每个用户选择天线和子载波来进行信息的传输,这样可以充分利用独立多用户环境中固有的分集增益,即多用户分集,系统的传输效率和频谱利用率将会显著提高<sup>[1]</sup>。目前研究 MIMO-OFDM 系统天线和子载波联合分配问题的文献较少<sup>[2]</sup>,其中效果最好的方法是基于遗传算法的天线和子载波分配算法<sup>[3]</sup>,与其他算法相比该算法能更快地确定分配方案,但遗传算法自身易于陷入局部最优的缺点使其仍不能保证每次都准确找到全局最优解。

通过对 MIMO-OFDM 系统天线和子载波联合分配问题的深入研究,发现信道容量和信道状况参数

的相关值是一个多模态函数,存在多个局部极值解,确定最佳分配方案的过程就是多模态函数的寻优过程,而差分进化算法是近年来刚刚提出的解决多模态函数优化问题效果最好的算法,为此提出了一种基于拥挤差分进化算法的天线和子载波联合分配算法,在最大信道容量准则下利用其良好的寻优能力解决 MIMO-OFDM 系统的自适应天线和子载波联合分配问题。

### 1 MIMO-OFDM 资源分配模型

在无线信道中,高速数据的多径传输往往会引起信道的频率选择性衰落。在频率选择性衰落信道中,由于不同的子信道受到不同的衰落而具有不同的传输能力,所以在多用户系统中,根据不同用户的无线信道衰落特性自适应地为每个用户选择天线和子载波来进行信息的传输,能够实现信道容量最大。

该文研究属 MIMO-OFDM 系统下行链路的资源分配问题。设系统中有  $K$  个用户,  $N_t$  根发射天线,  $N_r$  根接收天线,系统带宽被划分成  $N_c$  个子载波,其资源分配模块如图 1 所示。

收稿日期: 2010-10-18

作者简介: 毕晓君(1964-),女,教授,博士生导师。主要研究方向: 智能信号处理。

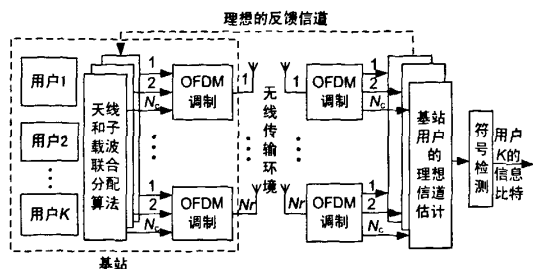


图1 MIMO-OFDM下行链路资源分配模块

基站通过信道估计得到所有天线在所有子载波上的瞬时信道衰落信息,并利用每个用户反馈的参数信息,根据给定的准则来为每个用户分配天线和子载波。

假设信道估计、优化分配在一个时隙内完成<sup>[4]</sup>,在时隙 $t$ 内,用户 $k=1,2,\dots,K$ ,子载波 $m=1,2,\dots,N_c$ ,定义 $N_r \times N_t$ 维的MIMO信道矩阵 $\mathbf{H}_m^k(t)$ :

$$\mathbf{H}_m^k(t) = \begin{bmatrix} h_{m,11}^k(t) & \cdots & h_{m,1N_t}^k(t) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{m,N_r1}^k(t) & \cdots & h_{m,N_rN_t}^k(t) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中, $h_{m,ij}^k(t)$ 为在子载波 $m$ 上基站天线 $j$ 到用户 $k$ 的天线 $i$ 之间的信道衰落系数, $\mathbf{H}_m^k(t)$ 的元素可以建模成独立同分布的复高斯随机变量,且变量均值为0,方差为1。

则在子载波 $m$ 上,用户 $k$ 收到的信号可以表示为:

$$\mathbf{y}_m^k(t) = \mathbf{H}_m^k(t) \mathbf{x}_m^k(t) + \mathbf{v}_m^k(t), \quad (2)$$

式中, $\mathbf{y}_m^k(t) \in \mathbb{C}^{N_r \times 1}$ 为用户 $k$ 的接收信号向量, $\mathbf{x}_m^k(t) \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$ 为发送信号向量。 $\mathbf{v}_m^k(t) \in \mathbb{C}^{N_r \times 1}$ 为用户 $k$ 接收端的加性白噪声,其元素是独立同分布的循环对称复高斯变量,且 $\mathbf{v}(t) \mathbf{v}^H(t) \sim \mathcal{CN}(0, N_0 \mathbf{I})$ , $\mathbf{I}$ 为单位矩阵。设定系统总带宽为 $B$ ,发射总功率为 $P_{\text{total}}$ ,且功率在所有发送天线和子载波上平均分配<sup>[1]</sup>。由于研究的所有过程都是在一个时隙内完成的,为简便起见,在以下分析中省略了时隙符号 $t$ 。

用户 $k$ 在天线 $n$ 上最大传输速率为:

$$R_{m,n}^k = \log_2 \left( 1 + \frac{P_{\text{total}}/N_t}{BN_0} \|\mathbf{H}_m^k\|_n^2 \right), \quad (3)$$

式中, $\|\mathbf{H}_m^k\|_n$ 表示矩阵 $\mathbf{H}_m^k$ 的第 $n$ 列, $\|\cdot\|$ 表示向量的Frobenius范数。

设集合 $\hat{k}_m = \{\hat{k}_{m,1}, \hat{k}_{m,2}, \dots, \hat{k}_{m,N_t}\}$ ,其第 $n$ 个元素 $\hat{k}_{m,n}$ 表示在子载波 $m$ 上第 $n$ 根发射天线选择的用户。定义集合 $\Omega = \{1, \dots, K\} \times \{1, \dots, K\} \times \dots \times \{1, \dots, K\}$ ,多用户信道矩阵为:

$$\mathbf{H}_m = [\mathbf{H}_{m,1}^k, \mathbf{H}_{m,2}^k, \dots, \mathbf{H}_{m,N_t}^k]。$$

最优天线和子载波分配算法,即寻找最优的 $\mathbf{H}_m$ ,使得在子载波 $m$ 内的最大容量:

$$C_m = \max_{\mathbf{H}_m \in \Omega} E[\log_2 \det(\mathbf{I} + \frac{P_{\text{total}}/N_t}{BN_0} \mathbf{H}_m \mathbf{H}_m^H)], \quad (4)$$

这样,对于 $N_c$ 个子载波的MIMO-OFDM系统其最大容量:

$$C = \frac{1}{N_c} \sum_{m=1}^{N_c} C_m. \quad (5)$$

为了确定最优的天线和子载波分配方案,对于每个子载波,在所有 $K$ 个用户中遍历寻找最佳的组合来达到最大容量 $C_m$ 需要进行 $K^N$ 次搜索,在 $N_c$ 个子载波上总共要进行 $N_c * K^N$ 次搜索。可见当用户数和子载波数较大时,寻优算法的复杂度将会非常大,为此引入智能优化算法解决此复杂分配问题。

## 2 拥挤差分进化算法

### 2.1 标准差分进化算法

差分进化算法<sup>[5]</sup>(Differential Evolution, DE)是1995年由Storn等人提出的一种群体智能优化算法,2005年被引入国内。DE算法其本质是一种基于运动补偿发生变异的遗传算法,它保留了基于种群的全局搜索策略,采用实数编码和基于差分的简单变异操作和一对一的竞争生存策略,降低了遗传操作的复杂性。

DE算法首先在问题的可行解空间内随机产生初始种群 $\mathbf{X}^1 = [\mathbf{x}_1^1, \mathbf{x}_2^1, \dots, \mathbf{x}_{NP}^1]$ ,其中 $NP$ 为种群规模,上标1表示第1代。个体 $\mathbf{x}_i^1 = [x_{i,1}^1, x_{i,2}^1, \dots, x_{i,D}^1]$ 用于表征问题解, $D$ 是优化问题的维数。算法的基本思想是:对当前种群进行基于运动补偿的变异操作,产生另一个新的种群;然后利用贪婪思想的选择操作对这2个种群进行一对一的选择,从而产生新一代种群<sup>[6]</sup>。具体而言,如果 $(\text{rand}(j) \leq CR) \text{ OR } j = \text{mbr}(i)$ 成立,其中 $\text{rand}(j)$ 为 $[0,1]$ 之间的均匀分布随机数; $CR$ 为范围在 $[0,1]$ 之间的变异概率; $\text{mbr}(i)$ 为 $\{1, 2, \dots, D\}$ 之间的随机量, $j$ 为可能发生变异的基因位。那么得到式(6),

$$\mathbf{x}_{i,j}^{t+1} = \mathbf{x}_{a,j}^t + F(\mathbf{x}_{b,j}^t - \mathbf{x}_{c,j}^t), \quad (6)$$

式中: $a, b, c \in \{1, 2, \dots, NP\}$ 互不相同且与 $i$ 不同。 $\mathbf{x}_{i,j}^{t+1}$ 为子代 $i$ 的 $j$ 基因位; $\mathbf{x}_{a,j}^t$ 为父代 $a$ 的 $j$ 基因位; $\mathbf{x}_{b,j}^t - \mathbf{x}_{c,j}^t$ 为父代 $b$ 与 $c$ 在 $j$ 基因位上的差分向量; $F$ 为缩放比例因子。然后比较子代 $\mathbf{x}_i^{t+1}$ 与父代 $\mathbf{x}_i^t$ 的适应值大小,如果子代有更好的适应值则取代之。

重复以上步骤,直至找到满足条件的解集。

DE 算法流程图如图 2 所示。

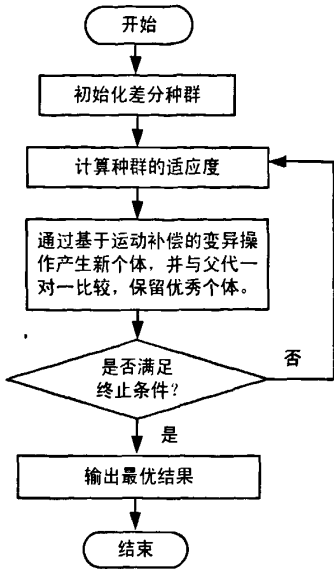


图 2 差分进化算法流程图

2.2 拥挤差分进化算法

DE 算法并不能独立解决多模态优化问题,需要引入合适的数学模型以保持种群多样性。De Jong 提出的拥挤模型<sup>[7]</sup>就是其中一个非常有效的数学模型,其通过替换相似父代的方法更新种群。对于每一子代,从父代中选择拥挤因子 (Crowding Factor, CF) 个个体组成子集,根据某种距离定义选择最近的一个,若子代适应值大于该个体则替换,否则维持种群不变。该文将拥挤模型引入差分进化算法,提出一种基于拥挤模型的差分进化算法 (Crowding Differential Evolution, CDE)。

CDE 算法相对标准的 DE 算法做出的唯一调整是关于父代如何被取代的调整。通常情况下,父代通过产生子代被取代;而在 CDE 算法中,子代取代的是在 CF 子集中最相似的个体 (如果它的适应度更高)。

CDE 算法在使用拥挤模型时,为了避免取代错误 (即子代与父代不相似,最终导致单一收敛),采用高 CF 值搜索,取 CF 值为种群规模,并设计外部种群保存最优解。

3 基于 CDE 算法的天线和子载波分配

MIMO-OFDM 系统中的天线和子载波联合分配问题具体步骤如下:

① 初始化: 初始化算法的各项参数,详见实验仿真部分参数选用;

② 编码: 采用二进制编码方式,将十进制整数的用户序号转换为二进制数,将每根发射天线上用户二进制的编码串接起来得到用户矢量的编码。用户序号的二进制数长度为  $GenotypeLength$ , 则用户矢量的二进制编码长度为  $GenotypeLength \times N_t$ ;

③ 计算适应度: 对于子载波  $m$ , 每根发射天线首先选择用户, 然后结合用户和接收天线的对应关系, 从而确定发射天线和接收天线的对应关系矩阵。查接收天线对发射天线的瞬间衰减矩阵, 把相应的衰减值代入发射天线和接收天线对应关系矩阵的相应位置。然后利用式 (5) 计算适应度值;

④ 差分算子操作: 根据式 (6) 进行基于运动补偿的变异操作产生子代, 并计算子代的适应度;

⑤ 父代和子代组成临时种群, 并根据欧氏距离建立 CF 个集合  $\{P_i, C_i\}$ , 各类内适应度最高的个体存活, 作为新一代种群;

⑥ 重复步骤 ④ ~ 步骤 ⑤, 直到满足终止条件。所有极值解中的最大值是系统的最大容量, 其对应的分配方案即最优的天线和子载波联合分配方案, 算法结束。

4 实验仿真与结果分析

为了验证拥挤差分进化算法应用于天线和子载波联合分配的效果, 进行了仿真实验, 并与文献 [3] 提出的遗传算法进行了对比。

所选用的参数经多次实验确定为: 种群规模为  $Popnum = 50$ , 外部种群规模 25, 比例缩放因子  $F = 0.4$ , 拥挤因子  $CF = 50$ , DE 变异概率  $CR = 0.3$ , GA 交叉概率  $P_c = 0.8$ , GA 变异概率  $P_m = 0.1$ 。

MIMO-OFDM 系统参数: 用户数  $K = 16$ , 系统带宽  $B = 5 \text{ MHz}$ , 子载波数  $N_c = 256$ , 发射天线根数  $N_t = 8$ , 接收天线根数  $N_r = 8$ , 接收天线对发射天线的瞬间衰减矩阵  $H$  满足高斯分布, 每个用户使用相同数目的接收天线, 用户和它所用接收天线的对应关系:

$$Q = [1 \ 2 \ 3; 2 \ 3 \ 6; 3 \ 4 \ 7; 1 \ 4 \ 7; 1 \ 2 \ 8; 2 \ 3 \ 6; 3 \ 4 \ 5; 1 \ 4 \ 7; 1 \ 2 \ 5; 2 \ 3 \ 6; 3 \ 4 \ 7; 1 \ 4 \ 5; 1 \ 2 \ 6; 2 \ 3 \ 7; 3 \ 4 \ 8; 1 \ 4 \ 6]。$$

为了验证算法的寻优能力, 这里分别在信噪比 (SNR) 为 10 dB 和 20 dB 2 种不同的信道条件下与目前用于解决天线和子载波分配问题效果最好的遗传算法进行了对比实验, 结果分别如图 3 和图 4 所示。从图 3 和图 4 可以看出, 该算法确定的天线和子载波分配方案在不同的信道环境下相对遗传算法都能获得更大的信道容量, 说明该算法在寻找最大信道

容量问题上具有更好的性能,且不受信道环境因素限制。

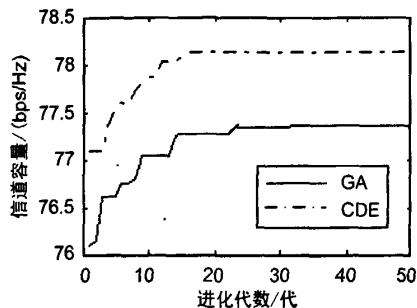


图3 SNR为10 dB时2种算法的信道容量对比

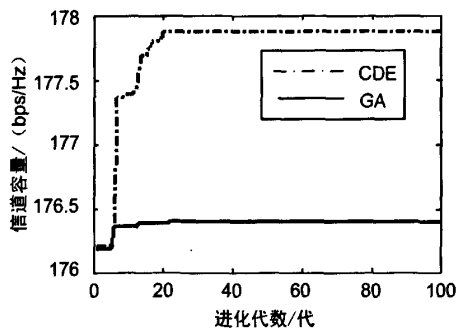


图4 SNR为20 dB时2种算法的信道容量对比

为了进一步验证算法性能,将算法在不同信噪比条件下得到的最大信道容量和通过穷举法得到的理论最大信道容量进行了对比,结果如图5所示。

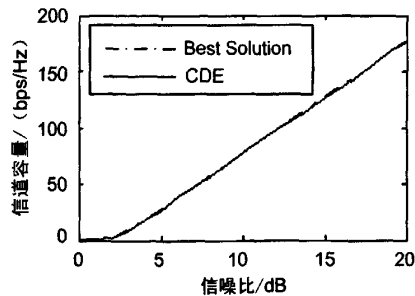


图5 该算法和最优方案得到的信道容量对比

从图5可以看出,算法确定的天线和子载波分配方案非常接近理论最大信道容量。

为验证算法在收敛速度方面的性能,对 $8 \times 8$ 天线和 $16 \times 16$ 天线这2种不同规模的实际问题分别应用2种算法进行了对比实验。2种算法分别进行100次天线和子载波分配,平均迭代次数和迭代时间的比较如表1所示。

表1 2种算法收敛速度的比较

天线对数	GA 迭代次数/次	DE 迭代次数/次	CGA 运行时间/s	CDE 运行时间/s
$8 \times 8$	45	20	0.61	0.28
$16 \times 16$	62	32	1.59	0.81

从表中可以看出,对于不同规模的实际问题, CDE算法无论在迭代次数还是运行时间上均小于GA算法,说明CDE算法比GA算法具有更快的收敛速度。

综合上述2方面的仿真结果说明,该文提出的算法能够准确找到天线和子载波的分配方案,并在收敛速度方面明显优于遗传算法。

## 5 结束语

该文提出了一种基于拥挤差分进化算法的MIMO-OFDM系统自适应天线和子载波联合分配算法,能够保证每次都得到最优天线和子载波分配方案,使系统获得最大的信道容量,同时又提升了收敛速度,更适合解决MIMO-OFDM系统的天线和子载波联合分配问题,在下一代移动通信系统MIMO-OFDM中具有一定的应用推广价值。

## 参考文献

- [1] 马月槐,蔡跃明,徐友云.一种多用户MIMO-OFDM系统中天线和子载波分配算法[J].信号处理,2008,1(24): 40-44.
- [2] WONG C Y, CHENG R S, LATAIEF K B. Multi-user OFDM with adaptive sub-carrier, bit, and power allocation[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1999, 7: 747-758.
- [3] 张军,张静,董建萍.基于遗传算法的多用户MIMO-OFDM系统的天线和子载波分配[J].上海师范大学学报,2009,5(38):484-488.
- [4] 马宁. MIMO-OFDM自适应资源分配和天线选择算法分析及仿真[D].北京:北京邮电大学,2009:23-30.
- [5] STORN R, PRICE K. Differential evolution—A simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces [R]. Berkeley: University of California, 2006.
- [6] 刘波,王凌.差分进化算法研究进展[J].控制与决策,2007,22(7):721-729.
- [7] THOMSEN R. Multimodal optimization using crowding-based differential evolution [C]//Proc of the Congress on Evolutionary Computation. Portland, 2004:1382-1389.

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果,又能免除您舟车劳顿的辛苦,学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲,结合实际工程案例,直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>