

# 基于多种群遗传算法的 D2D 通信终端数量的优化<sup>\*</sup>

李旭杰<sup>1</sup> 陈星<sup>1</sup> 孙颖<sup>1</sup> 李臣明<sup>1</sup> 花思洋<sup>2</sup>

(1. 河海大学 南京 211100; 2. 钛能科技股份有限公司 南京 211800)

**摘要:** 端到端的直连通信(device-to-device, D2D)能有效提高网络容量。针对 D2D 通信所能容纳的终端数量问题,提出一种基于多种群遗传算法的容量优化方法。由于传统蜂窝网移动终端对 D2D 用户的干扰,以及复用同一频率的 D2D 终端之间的同频干扰,严重影响了可接入 D2D 终端的数量。本文提出的基于多种群遗传算法能快速调整资源分配方案,有效减少同频干扰,显著提高网络所能容纳的终端数量。仿真结果表明,相比于标准遗传算法和随机分配算法,基于多种群遗传算法的资源分配方案能通过快速分配合理信道资源降低系统中总的干扰,有效提高终端的接入数量,显著提升了系统的总吞吐量。

**关键词:** D2D 用户数量;多种群遗传算法;资源分配方案

**中图分类号:** TN929.5 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.50

## Optimization of quantity of D2D communication terminals based on multi-population genetic algorithm

Li Xujie<sup>1</sup> Chen Xing<sup>1</sup> Sun Ying<sup>1</sup> Li Chenming<sup>1</sup> Hua Siyang<sup>2</sup>

(1. Hohai University, Nanjing 211100, China; 2. Talent Science & Technology Co., Ltd., Nanjing 211800, China)

**Abstract:** Device-to-Device (D2D) communications can effectively improve the network capacity. A capacity optimization method based on multi-population genetic algorithm (MPGA) is proposed, which deals with the number of terminals that can be accommodated in D2D communications. As the traditional cellular network mobile terminals have interference on the D2D users, and the D2D terminals which reuse the same frequency introduce interference each other, it affects the number of accessible D2D terminals. The MPGA based scheme proposed in this paper can adjust the resource allocation scheme quickly, effectively reduce interference under the same frequency, and improve the number of terminals which can be accommodated in the network. The simulation results show that the resource allocation scheme based on MPGA can allocate the reasonable channel resources quickly to reduce the total interference in the system. Besides, it can also improve the number of accessible terminals and the network throughput simultaneously.

**Keywords:** quantity of D2D communication terminals; multi-population genetic algorithm; resource allocation

## 0 引言

随着通信技术的快速发展,目前已经进入了一个智能互联的时代,层出不穷的业务类型及需求对无线数据的需求日渐增加。而稀缺的频谱资源需要通过合理分配来提高频谱利用率<sup>[1]</sup>。传统的蜂窝网络已经不能满足用户需求, D2D(device-to-device, D2D)技术作为 5G 通信应运而生,其能有效提高频带利用率,显著提升网络容量。与此同时, D2D 技术的引入所带来的干扰问题也严重影响了系统所能容纳的终端数量,因此对有效提高容纳终端数量问题的

算法研究至关重要。

目前,大量文献对系统的传输容量和系统吞吐量进行了分析研究<sup>[2-9]</sup>。文献[3]通过对 D2D 移动终端(D2D user equipment, DUE)的功率控制,结合资源分配,使得 D2D 对总的吞吐量最大。文献[4]研究了 D2D 链路的分布区域等参数与系统中断概率的关系,通过仿真论证了通过多个 D2D 链路引入到合理的分布区域可以有效提高总的信道容量。文献[5-7]基于蜂窝和 D2D 终端的服务质量要求,利用图论着色的思想进行资源分配,提升系统容量。文献[8]中,作者利用干扰限制区域,通过控制 D2D 发射功率,

收稿日期:2017-03

<sup>\*</sup> 基金项目:国家十二五科技支撑项目(2015BAB07B03)、国家自然科学基金(61301110)资助

进行资源分配,提高信道容量。为进一步提高优化效果,进行了多目标优化。文献[9]中,提出一种基于干扰分析的呼叫控制接入方案,降低新的呼叫阻塞概率,提高网络容量。文献[10]中,提出一种联合功率控制和模式选择算法,在满足所有用户通信质量的条件下,有效降低了发射功率。文献[11]则是联合模式选择和资源分配的方式,通过引入D2D中继模式,最大化系统总的传输速率。文献[12]联合呼叫接入控制和功率控制机制,可以提高满足服务质量的D2D用户对数量。文献[13]联合了信道分配、模式选择和功率控制,最大化小区上行链路的容量。但上述研究所涉及的算法复杂度较高,因此最近有不少学者利用标准遗传算法来降低算法复杂度,提高收敛速度<sup>[2]</sup>。文献[14]中,作者通过标准遗传算法实现了DUE和蜂窝网络终端(cellular user equipment, CUE)一对一组合下资源分配方案的优化,增加了总的系统吞吐量。文献[15]中,作者采用标准遗传算法减小了CUE总的发射功率,降低了蜂窝终端的能耗,但文献中考虑的蜂窝用户数量大于等于D2D用户数量,这种模式频谱利用率较低。然而,大量的D2D终端复用同一子信道资源,势必引入累积干扰。干扰管理和抑制成为了研究热点<sup>[16-17]</sup>。因此本文基于D2D终端密集分布的场景,提出一种基于多种群遗传算法的D2D通信的资源优化方案,快速进行资源分配,降低系统总的干扰,有效提高系统所能容纳的终端数量。

本文结构如下:第2部分分析了系统模型和信道模型。第3部分提出了一种基于多种群遗传算法的资源分配方法,优化小区中可接入终端的数量。第4部分验证了所提算法的性能。最后部分是对本文所做工作的总结。

## 1 系统模型

在一个D2D通信系统的小区中,通信终端包括蜂窝网络终端和D2D移动终端,一对DUE包括D2D发射移动终端(D2D transmission user equipment, DTUE)和D2D接收移动终端(D2D receiving user equipment, DRUE)。把接入的D2D终端数量记为 $M$ ,CUE终端数量记为 $N$ , $N$ 个CUE和 $M$ 对DUE共享所有的信道资源。所有终端用户的集合用 $S$ 表示, $S$ 定义为 $(1, \dots, N, N+1, \dots, N+M)$ 。图1为 $M$ 个D2D用户和 $N$ 个CUE用户正常通信的模型简图,其中 $N$ 个CUE和 $M$ 个DTUE均匀分布在一个半径为 $R$ 的小区中,DRUE分布在以其对应的DTUE为圆心、 $L$ 为半径的圆内。图中相同颜色的终端代表它们使用的是相同的子信道资源。

在蜂窝网络下的D2D通信系统中,CUE沿用传统蜂窝网所采用的功率控制方式。考虑到系统复杂性,D2D发射终端采用固定的发射功率,记作 $P_T$ 。假设发射终端和接收终端之间的信道模型采用自由空间衰减模型,即 $P_r/P_t=1/r^{\alpha}$ 。其中 $P_r$ 为接收终端接收到的功率, $P_t$ 为发送终端的发射功率, $r$ 为发射终端和接收终端之间的距离,路径

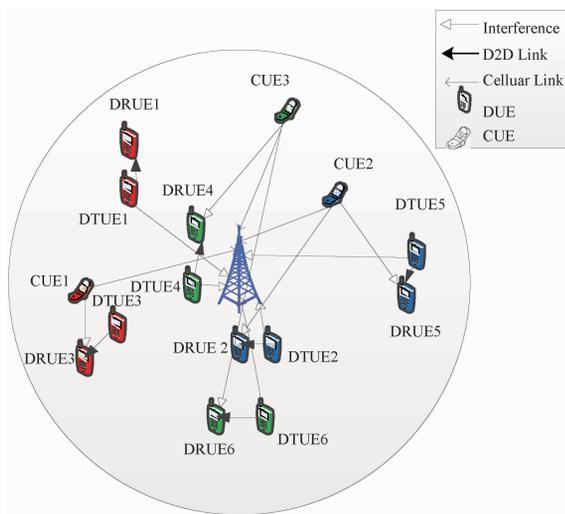


图1 小区中终端通信模型

损耗因子用 $\alpha$ 表示。

## 2 基于多种群遗传算法的终端数量优化算法

本文中,假设小区有 $N$ 个子信道,每个蜂窝用户分配一个相应的子信道,蜂窝用户分配的频谱资源彼此正交,不产生干扰,接入小区中的D2D终端共享所有子信道。因为D2D终端共享CUE的频谱资源,每接入一个新的D2D终端,其都会对小区中当前使用同频率的终端产生干扰。因此,需要不断快速调整资源的分配方案。考虑到多种群遗传算法在寻优速度上的优势,通过对新接入D2D终端的快速资源分配优化,从而使网络能容纳尽可能多的终端数量。

首先,对D2D通信的资源分配方案进行编码。假设 $N$ 个CUE默认使用对应的 $N$ 个子信道,即第 $i$ 个CUE使用第 $i$ 个子信道( $i=1, \dots, N$ )。假设系统中接入了 $M$ 个D2D终端,则分配方案编码为 $M$ 维的行向量,向量的每个元素代表复用的信道序号,取值为 $1, \dots, N$ 。例如 $N=3, M=6$ 时,编码 $(1, 2, 1, 3, 2, 3)$ 表示第1个和第3个DUE用户复用第1个CUE,第2个和第5个DUE用户复用第2个CUE,第3个和第6个DUE用户复用第3个CUE。

如果有新的一个D2D终端进入小区的时候,染色体长度将增加一位,重新分配信道资源,并保证所有终端能够正常通信。

在D2D通信中,CUE $i$ 和DUE $j$ 信噪比可以分别表示为:

$$SINR_c = \frac{P_i/r_i^{\alpha}}{\sum_{k \in \mathcal{R}_i} P_T/d_{k,j}^{\alpha} + N_0} \quad (1)$$

$$SINR_d = \frac{P_T/d_j^{\alpha}}{P_m/d_{m,j}^{\alpha} + \sum_{\substack{k \in \mathcal{R}_i \\ k \neq j}} P_T/d_{k,j}^{\alpha} + N_0} \quad (2)$$

式中: $P_i$ 为第 $i$ 个CUE的发射功率, $r_i$ 为第 $i$ 个CUE和基站之间的距离, $P_T$ 为DTUE的发射功率,第 $k$ 个DTUE和

基站之间的距离用  $d_{k,i}$  表示,  $N_0$  为噪声功率,  $d_j$  为第  $j$  个 DTUE 和其对应的 DRUE 之间的距离,  $P_m$  表示第  $m$  个 CUE 的发射功率,  $d_{m,j}$  表示第  $m$  个 CUE 到基站的距离,  $\mathfrak{R}_i$  和  $\mathfrak{R}_m$  分别为使用第  $i$  个和  $m$  个子信道的终端集。

为保证蜂窝用户和 D2D 用户的正常通信,需要满足如下约束条件:

$$SINR_{c_i} \geq SINR_c \quad (3)$$

$$SINR_{d_i} \geq SINR_d \quad (4)$$

$$0 < p_i \leq p_{\max} \quad (5)$$

$$0 < p_r \leq p_{\max} \quad (6)$$

其中  $SINR_c$  和  $SINR_d$  分别为蜂窝用户和 D2D 用户的信干噪比门限。式(3)和(4)表示为保证通信质量,CUE 和 DUE 的信干噪比必须大于门限值;式(5)和(6)表示 CUE 和 DUE 的发射功率不能超过其允许的最大发射功率  $p_{\max}$ 。

CUE 和 DUE 的信道容量公式分别为:

$$C_{c_i} = B \log_2(1 + SINR_{c_i}) \quad (7)$$

$$C_{d_i} = B \log_2(1 + SINR_{d_i}) \quad (8)$$

根据上面的(7)和(8)式,就可以得到总的信道容量。

$$C(U_s) = \sum_{i=1}^N C_{c_i} + \sum_{j=1}^M C_{d_j} \quad (9)$$

多种群遗传算法通过引入多个种群同时进行优化搜索,不同的种群赋给不同的控制参数,从而实现全局搜索,并且移民算子的引入使得各种群相互联系,最优解由多种群协同进化得来。通过人工算子保存各种群每个进化代中的最优个体,当最优个体在一定进化代数内收敛,算法迭代终止。详细算法如下:

#### 1) 种群的初始化以及编码

首先,将资源分配方案进行染色体编码,编码方式为  $G = (g_1, \dots, g_j, \dots, g_M)$ ,每个染色体共有  $M$  个基因位, $M$  为接入小区中的终端数量,随着终端的不断接入,染色体基因位数逐渐增大。每个基因位  $g_j$  的取值为  $1, \dots, N$ ;随机产生一定规模的染色体作为初始种群。

#### 2) 适应度函数选择

适应度函数设为网络中存在的干扰,如式(10)所示。包括 D2D 发射终端对基站的干扰,CUE 对 D2D 接收终端的干扰,以及复用同一 CUE 的子信道资源下的 D2D 终端之间的同频干扰。

$$SUM_{gr} = CUE_{gr} + DUE_{gr} \quad (10)$$

式中:  $CUE_{gr}$  为小区中蜂窝用户受到的总干扰,  $DUE_{gr}$  为小区中 D2D 用户受到的总的干扰。

$$CUE_{gr} = \sum_{k \in \mathfrak{R}_i} P_T / d_{k,i}^{\alpha} \quad (11)$$

$$DUE_{gr} = P_m / d_{m,j}^{\alpha} + \sum_{\substack{k \in \mathfrak{R}_i \\ k \in m}} P_T / d_{k,j}^{\alpha} \quad (12)$$

当满足蜂窝用户和 D2D 用户的服务质量时,通过合理的资源分配方式,有效降低通信系统中的总干扰,从而提高可接入的终端数量。

#### 3) 种群繁殖过程:

##### (1) 选择

本文中,摒弃常用的轮盘赌的选择方式,因为轮盘赌方式可能因个体适应度相差不大而导致种群竞争力不足,而采用基于种群的按个体适应度大小排序的选择算法代替轮盘赌的方法,排在前面的个体复制两份。

##### (2) 交叉

交叉是为了能产生更优的个体,得到更好的解集。我们通过交换染色体的部分组合,遗传父代的优良基因,从而产生新的优秀个体。设定交叉概率为  $P_c$ ,不同种群取不同概率值,在  $[0.7, 0.9]$  概率内随机产生交叉概率。

##### (3) 变异

变异就是在种群中按照变异概率  $P_m$  任选若干基因位改变其位值。在本文中,基因位的取值为  $1 \dots N$ ,所以基因变异后的值为其值的补集,如  $i$  的补集为  $N + 1 - i$ 。不同种群变异的概率值不同,在  $[0.001, 0.05]$  区间内随机产生变异概率。

##### (4) 修正过程和移民算子的引入

网络中每个终端的 QoS 都需得到满足,其信噪比需高于其门限值,才能正常通信。但在种群繁殖的进程中,种群中的染色体基因的变化会使当前信道状态不一定能满足条件,因此,为了修正染色体对应的信道分配方案,采用重复上述过程的方式来使得染色体满足约束条件。同时多种群遗传算法引入了移民算子,通过寻找各种群在进化过程中的最优个体,将其引入目标种群,替换目标种群的最劣个体,使得多种群遗传算法可以快速收敛。

##### (5) 精华种群的引入

精华种群和其他种群相互独立,首先,选择出每一个种群中性能最优的个体,将其保存到精华种群。精华种群保存的个体不采用交叉变异等步骤,从而个体能够保存最优分配方案,而不会发生最优个体的遗失。

(6) 迭代终止条件:重复繁殖过程直到满足迭代终止条件即最优个体最少保持代数,选定种群中适应度函数值最优的个体作为资源分配。

## 3 仿真分析

本文以 3 个 CUE 为例,每个 CUE 占据一个单独的子信道,当有 DUE 对接入小区,基于多种群遗传算法进行快速的资源分配,实时调整复用每个子信道下的 D2D 终端集,快速有效地提升可接入终端数量。本文采用蒙特卡洛仿真方式进行 200 次重复实验,评估本文提出的多种群遗传算法在终端优化方面的性能。仿真参数如下:路径损失因子  $\alpha$  为 4,子信道带宽为 10 MHz, DUE 的发射功率为 0.001 W, DUE 允许的最大通信距离  $L$  为 20 m, CUE 的最大发射功率的 2 W,最优个体最少保持代数设为 15,而噪声功率  $N_0$  为  $-105$  dBm。

图 2 中比较了 DUE 对数量为 10、信干噪比门限为

4.6 dB时 4 种不同优化算法下得到的通信系统的总干扰情况。从图中可以看出,多种群遗传算法在第 7 代时收敛,而遗传算法明显收敛速度较慢。在寻找最优分配方案从而使干扰最小的目标上,性能优于随机算法和标准遗传算法,并且接近穷举算法的寻优结果。因此多种群遗传算法可以快速优化资源分配算法有效降低通信系统中的总干扰。

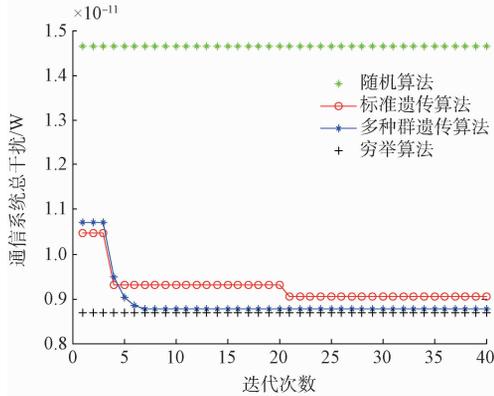


图 2 不同算法优化下的通信系统中的总干扰( $M=10$ )

图 3 给出了不同信噪比阈值下,小区中可接入的平均终端的数量变化。从图中可以看出信噪比阈值越大,即终端服务质量要求越高时,可接入终端数量会随之降低。在信噪比阈值相同时,因为基于多种群遗传算法可以快速有效的寻找到最优的资源分配方案,从而可以接入更多的终端数量。

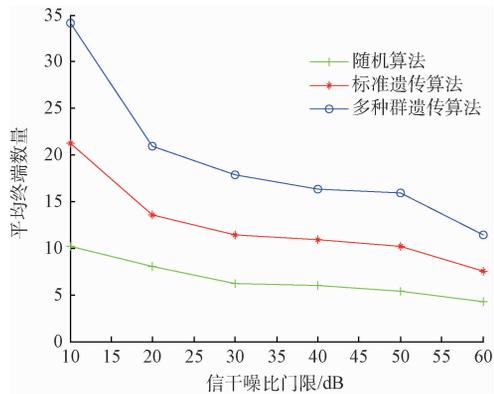


图 3 不同信干噪比门限下的平均终端数量

图 4 为不同信干噪比下的信道容量。可以看出,随着信干噪比阈值的增加,系统的信道容量也随之下落,也再次验证了基于多种群遗传算法在系统性能改善上的优越性。

## 4 结 论

本文针对小区中 D2D 用户密集分布且频谱资源有限的场景,提出一种基于多种群遗传算法的快速资源分配优化方案。该方案通过不断降低当前通信系统中的总干扰,从而让更多 D2D 用户能达到基本服务质量要求,增加 D2D

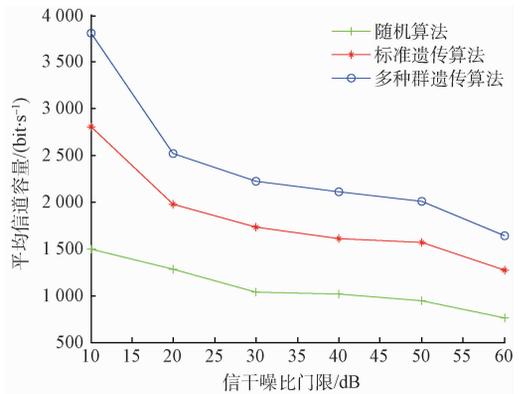


图 4 不同信干噪比下的平均信道容量

终端成功接入网络的概率。仿真结果表明,多种群遗传算法与标准遗传算法相比,能够快速进行资源分配,有效降低系统中的干扰,显著提高终端接入数量,从而提升小区中总的系统容量。

## 参考文献

- [1] 穆欣,郁进明,刘微. 约束性遗传算法的 OFDMA 毫米波蜂窝动态频谱分配[J]. 电子测量技术, 2017, 40(1):186-188.
- [2] 余发山,康洪. 基于 GA 优化 BP 神经网络的液压钻机故障诊断[J]. 电子测量技术, 2016, 39(2): 134-137.
- [3] YU C H, DOPPLER K, RIBEIRO C B, et al. Resource sharing optimization for device-to-device communication underlying cellular networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(8):2752-2763.
- [4] 蔡艳,刘旭,邵世祥,等. 基于蜂窝网络的多对 D2D 通信性能研究[J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(9):93-97.
- [5] 张家波,陈美铃,余攀. 一种基于双层干扰图着色的资源分配算法[J]. 重庆邮电大学学报:自然科学版, 2015, 27(1):12-19.
- [6] CAI X, ZHENG J, ZHANG Y. A Graph-coloring based resource allocation algorithm for D2D communication in cellular networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(8): 3844-3850.
- [7] 何朵奇,王斌,季文君,等. LTE 网络下基于图着色理论的 D2D 分簇资源分配方案[J]. 南京邮电大学学报:自然科学版, 2015, 35(6):44-50.
- [8] SUN J, ZHANG T, LIANG X, et al. Uplink resource allocation in interference limited area for D2D-based underlying cellular networks [C]. The IEEE Vehicular Technology Conference, 2016:1-6.

- [9] LI X, ZHANG H, ZHANG W, et al. A call admission control scheme on the uplink of D2D communications underlying cellular networks [J]. Intelligent Automation & Soft Computing, 2016:1-8.
- [10] NAGHIPOUR E, RASTI M. A distributed joint power control and mode selection scheme for D2D communication underlying LTE-A networks[C]. The IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2016:1-6.
- [11] HOANG T D, LONG B L, LE-NGOC T. Joint mode selection and resource allocation for relay-based D2D communications[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(2):398-401.
- [12] LI X, ZHANG W, ZHANG H, et al. A combining call admission control and power control scheme for D2D communications underlying cellular networks[J]. China Commucation, 2016, 13(10):137-145.
- [13] MIN W, HUI G, XIN S, et al. Joint channel allocation, mode selection and power control in D2D-enabled femtocells [ C ]. The IEEE Military Communications Conference, 2016:454-459.
- [14] YANG C, XU X, HANJ, et al. GA based user matching with optimal power allocation in D2D underlying network [ C ]. The IEEE Vehicular Technology Conference, 2015:1-5.
- [15] YANG C, XU X, HAN J, et al. Energy efficiency-based device-to-device uplink resource allocation with multiple resource reusing [J]. Electronics Letters, 2015, 51(3):293-294.
- [16] 石雷, 刘正丽, 韩江洪, 等. 基于干扰管理的高吞吐无线多跳网络基站选址算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(3):389-399.
- [17] 孔舒亚, 吴彦鸿, 俞道滨. 一种新的 SAR 窄带干扰抑制方法[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(1):44-48.

## 作者简介

**李旭杰**, 博士, 副教授, 研究方向为无线通信网络性能分析。

Email:lixujie@hhu.edu.cn

**陈星**, 硕士研究生, 研究方向为智能优化算法在 D2D 通信系统中的应用。

E-mail:1274784887@qq.com

**孙颖**, 硕士研究生, 研究方向为无线通信网络架构及性能分析

E-mail:sunying2016@hhu.edu.cn

**李臣明**, 博士, 副教授, 研究方向为无线通信网络建模。

E-mail:lcm@hhu.edu.cn

**花思洋**, 硕士, 高级工程师, 研究方向为有线通信与无线网络。

E-mail:hsypower@163.com