

# 基于改进樽海鞘群算法的 D2D 通信系统能量效率研究<sup>①</sup>

黄 哲<sup>②</sup> 杨永立 杨丹阳 毛 凯

(武汉科技大学信息科学与工程学院 武汉 430000)

**摘要** 针对 D2D 通信系统中复用模式下存在同频干扰、资源利用不充分等问题,本文综合考虑资源分配和功率控制建立 D2D 通信系统模型,从信道资源利用的角度分析系统能量效率,提出一种基于改进樽海鞘群优化算法的资源分配策略,将资源分配方案矩阵和功率控制方案矩阵作为樽海鞘的位置,将用户最低速率需求和最大发送功率作为位置更新的约束条件,采用自适应权重法更新追随者的位置,在保证用户最低速率需求的前提下最大化系统能量效率。仿真结果表明,相比于标准樽海鞘群算法、粒子群算法和遗传算法,本文所提算法有较高的收敛速度和搜索精度,能有效提高系统能量效率。

**关键词** D2D 通信; 资源分配; 功率控制; 能量效率; 樽海鞘群算法(SSA)

## 0 引言

随着物联网、大数据、云计算等互联网技术的快速发展以及移动终端数量的剧烈增长,传统蜂窝网络所提供的传输速率、系统容量以及本地服务难以满足现在的用户需求。D2D(device-to-device)通信技术是在一定的距离范围内用户设备直接进行通信、不需要通过基站转发的通信模式<sup>[1]</sup>。在蜂窝网络中引入 D2D 通信技术,用户设备间可以通过复用蜂窝资源的一个直通链路彼此传输数据,这样可以提高频谱利用率,扩大通信系统容量,提升通信系统性能,D2D 技术已成为 5G 关键技术之一<sup>[2]</sup>。但是,D2D 通信模式下 D2D 用户通过复用蜂窝用户频谱资源进行通信,会带来严重的同频干扰,如果不能有效抑制同频干扰,可能会降低频谱利用率,降低通信系统性能,严重影响通信服务质量。

目前大量研究表明,良好的资源分配和功率控制策略可以有效地抑制同频干扰、提高频谱效率和降低系统能耗<sup>[3]</sup>,由于功率控制是一个非线性目标

优化问题,现在越来越多的研究者将博弈论、贪婪算法等智能算法应用到资源分配和功率控制优化问题中。文献[4]考虑上行链路和下行链路,提出了基于博弈论算法的 D2D 资源分配方案。文献[5]提出了一种贪婪的启发式资源分配算法,有效抑制了同频干扰。文献[6]以系统性能为目标,提出了最小化通信网络设备总传输功率的优化策略,在保证用户服务质量的同时,将干扰控制到一定范围内。文献[7]设计了一个新的分布式功率控制迭代算法,逐步分配目标信噪比和传输功率。文献[4-7]只是单独考虑了资源分配或者功率控制,没有将二者联合考虑。文献[8]首先进行蜂窝用户和 D2D 用户的资源分配,然后在速率约束条件下,基于贪婪算法最大化总速率,对用户设备的发射功率进行了优化。文献[9]联合资源分配和功率控制,先为每个 D2D 用户寻找可复用的蜂窝用户频谱资源,再调节用户发射功率,使得 D2D 用户采用不低于门限值的最低发射功率,文献[8-9]所提分布式优化方案在一定程度上制约了系统性能,且算法复杂度较高。现有的 D2D 通信研究中,很少有将资源分配和功率控制联

① 国家重点研发计划(2017YFC0805100)资助项目。

② 男,1994 年生,硕士生;研究方向:无线通信;联系人,E-mail: 1776198181@qq.com  
(收稿日期:2019-10-10)

合考虑,部分文献中采用了分布式优化方案,割裂了资源分配和功率控制的联系,运用的经典智能算法在解决该优化问题时存在一定的缺陷,且大部分文献是以最大化用户速率和最大化系统吞吐量为研究目标,对于系统能量效率方面的研究比较少。

本文联合资源分配和功率控制优化问题,从信道资源使用的角度分析D2D系统能量效率,提出了一种基于樽海鞘群算法(Salp swarm algorithm, SSA)的资源分配策略,在保证用户最低速率需求的前提下最大化系统能量效率。

## 1 系统模型与能量效率

### 1.1 系统模型

考虑引入D2D通信的单小区蜂窝通信系统,采用正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)技术,保证小区内蜂窝链路之间不存在干扰。由于基站功率比较高,复用下行链路会对用户造成很大干扰,因此考虑小区内D2D用户复用上行链路资源,系统模型如图1所示。所有通信用户随机分布在小区里,基站位于小区中心,有 $N$ 个蜂窝用户(cellular user, CU),记为集合 $C = \{CU_1, CU_2, \dots, CU_N\}$ ,有 $M$ 个D2D用户对(D2D user pair, DP),记为集合 $D = \{DP_1, DP_2, \dots, DP_M\}$ ,一个D2D用户对包含一个发送端和一个接收端,考虑系统满负荷的情况,即上行链路信道数等于蜂窝用户数,每个蜂窝用户占用一个信道,各信道

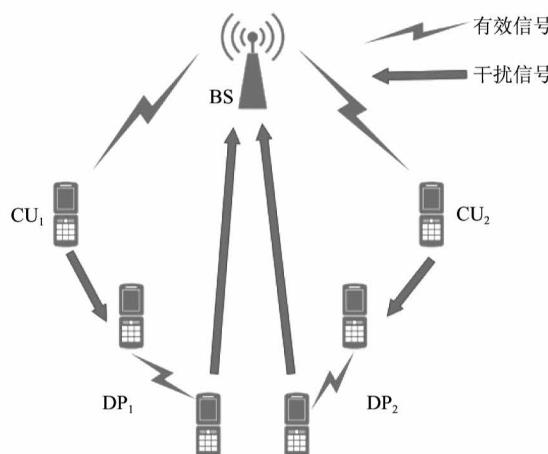


图1 D2D通信系统模型

服从瑞利衰落。基站知晓用户的信道状态和服务质量(quality of service, QoS)要求,规定一个D2D用户对能复用多个蜂窝用户的信道资源,一个蜂窝用户的信道资源至多能被一个D2D用户对复用。

### 1.2 系统能量效率

传统蜂窝网络中,能量效率定义为单位能量传输的数据比特数,公式如下:

$$ee = \frac{R}{P} \quad (1)$$

其中 $ee$ 为用户能量效率, $R$ 为用户传输速率, $P$ 为用户发射功率。

传统蜂窝网络中,每个蜂窝用户在基站控制下被唯一分配一个信道资源,通信网络中用户设备与信道资源是一一对应关系,因此系统能量效率可以定义为各用户能量效率之和,公式如下:

$$U = \sum ee_i = \sum \frac{R_i}{P_i} \quad (2)$$

在蜂窝网络中引入D2D通信技术后,D2D用户可以复用蜂窝用户的信道资源,因此通信网络中用户设备与信道资源的关系有2种:(1)信道资源仅被蜂窝用户占用;(2)D2D用户与蜂窝用户共享同一信道资源。此时用户设备与信道资源不再是一一对应关系。

在已有D2D通信系统能量效率研究中,文献[10,11]定义为各用户设备能量效率之和 $U = \sum ee_i = \sum \frac{R_i}{P_i}$ ,文献[12]定义系统能量效率为系

统吞吐量与总能耗的比值 $U = \frac{\sum R_i}{\sum P_i}$ ,上述文献仍

沿用传统蜂窝网络能量效率定义,仅从用户设备的角度计算能效,没有考虑D2D用户和蜂窝用户共享同一信道资源时用户设备与信道资源关系的改变,不能准确反映D2D通信系统的能量效率。

本文从信道资源使用的角度分析D2D通信系统的能量效率。

(1)当某一信道资源仅被蜂窝用户占用时,用户设备与信道资源是一一对应的,用户设备能量效率可以视为信道资源能量效率,公式如下:

$$ee_i = \frac{R_c}{P_c} \quad (3)$$

式中,  $ee_c$  为该信道资源能量效率,  $R_c$  为该信道上的传输速率,  $P_c$  为该信道上的传输功率。

(2) 当某一信道资源被 D2D 用户和蜂窝用户共享时, 该信道资源的能量效率为 D2D 用户和蜂窝用户的传输速率之和与传输功率之和的比值, 公式如下:

$$ee_p = \frac{R_c + R_d}{P_c + P_d} \quad (4)$$

式中,  $ee_p$  为该信道资源能量效率,  $R_c, P_c$  分别为该信道上蜂窝用户的传输速率和传输功率,  $R_d, P_d$  分别为该信道上 D2D 用户的传输速率和传输功率。

基于上述分析, D2D 通信系统的系统能量效率可以视为各信道资源能量效率之和, 公式如下:

$$EE = \sum_{n=1}^N \frac{R_n + \sum_{m=1}^M q_{m,n} R_{m,n}}{P_n + \sum_{m=1}^M q_{m,n} P_{m,n}} \quad (5)$$

式中,  $EE$  表示系统能量效率,  $R_n, P_n$  分别表示  $CU_n$  的传输速率和传输功率,  $R_{m,n}, P_{m,n}$  分别表示  $DP_m$  复用  $CU_n$  信道资源时的传输速率和传输功率,  $q_{m,n}$  表示信道状态指示变量, 当  $DP_m$  复用  $CU_n$  信道资源时,  $q_{m,n} = 1$ ; 否则,  $q_{m,n} = 0$ 。

根据香农公式, 系统中  $CU_n$  的传输速率  $R_n$  为

$$R_n = \log \left( 1 + \frac{P_n G_n}{\sum_{m=1}^M q_{m,n} P_{m,n} G_m^D + N_0} \right) \quad (6)$$

式中,  $G_n$  表示  $CU_n$  到基站的信道增益,  $G_m^D$  表示  $DP_m$  发送端到  $CU_n$  的信道增益,  $N_0$  表示信道高斯白噪声的噪声功率。

系统中,  $DP_m$  的传输速率  $R_{m,n}$  为

$$R_{m,n} = \log \left( 1 + \frac{P_{m,n} G_m}{P_n G_n^C + N_0} \right) \quad (7)$$

式中,  $G_m$  表示  $DP_m$  到基站的信道增益,  $G_n^C$  表示  $CU_n$  到  $DP_m$  接收端的信道增益。

本文的优化目标是在保证蜂窝用户和 D2D 用户 QoS 的前提下最大化系统能量效率, 同时减少用户间干扰, 该优化问题可表述为

$$\max EE \quad (8)$$

$$q_{m,n} \in \{0, 1\}, \forall m \in M, \forall n \in N \quad (9)$$

$$\sum_{m=1}^M q_{m,n} \leq 1, \forall n \in N \quad (10)$$

$$R_n \geq R_n^{\min}, \forall n \in N \quad (11)$$

$$R_{m,n} \geq R_{m,n}^{\min}, \forall m \in M, \forall n \in N \quad (12)$$

$$P_n \leq P_n^{\max}, \forall n \in N \quad (13)$$

$$P_{m,n} \leq P_{m,n}^{\max}, \forall m \in M, \forall n \in N \quad (14)$$

式中,  $R_n^{\min}, R_{m,n}^{\min}$  分别表示  $CU_n$  和  $DP_m$  的最小传输速率,  $P_n^{\max}, P_{m,n}^{\max}$  分别表示  $CU_n$  和  $DP_m$  的最大传输速率。约束条件式(9)、(10)表示一个蜂窝用户的信道资源只能被一个 D2D 用户对复用, 一个 D2D 用户对可以复用多个蜂窝用户的信道资源; 式(11)、(12)分别表示  $CU_n$  和  $DP_m$  的 QoS 需求, 即最低传输速率需求; 式(13)、(14)表示  $CU_n$  和  $DP_m$  的传输功率不能超过指定的最大传输功率。

令  $\mathbf{Q} = \{q_{m,n}\}_{M \times N}$  为  $M \times N$  维矩阵,  $\mathbf{Q}$  表示该系统中所有 D2D 用户对的信道资源分配方案; 令  $\mathbf{P} = \{P_{m,n}\}_{M \times N}$  为  $M \times N$  维矩阵,  $\mathbf{P}$  表示该系统中所有 D2D 用户对的功率控制方案。

## 2 樽海鞘群算法

### 2.1 标准樽海鞘群算法

樽海鞘是一种海洋生物, 其身体结构和运动行为与水母十分相似。樽海鞘的群体行为与其他种群群体行为不同, 它们通常是首尾相连形成链状结构, 也被称为樽海鞘链, 如图 2 所示。研究人员把樽海鞘链分为领导者和追随者两部分, 领导者位于樽海鞘链的首端, 它对环境和食物源有着最优的判断, 其余的樽海鞘就是追随者, 追随者依次跟随前一个樽海鞘, 该移动方式有助于樽海鞘群快速协调移动和觅食。

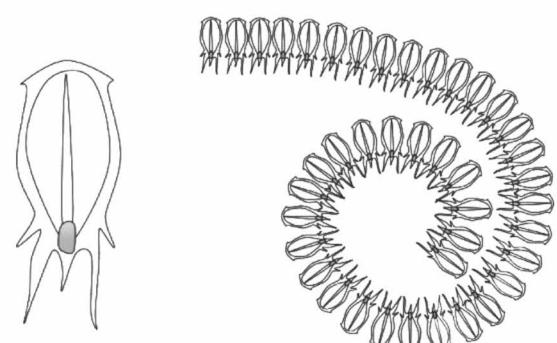


图 2 樽海鞘和樽海鞘链<sup>[13]</sup>

文献[13]在2017年建立了樽海鞘链的数学模型,提出了樽海鞘群算法用来解决一系列优化问题。设樽海鞘种群规模为 $J$ ,空间维度或者变量数为 $I$ ,食物源随机分布在 $J \times I$ 维的搜索空间中,所有樽海鞘的位置记为矩阵 $\mathbf{X}$ ,食物源的位置记为 $\mathbf{F}$ 。 $ub = ub_1, ub_2, \dots, ub_I$ ,  $lb = [lb_1, lb_2, \dots, lb_I]$ ,分别表示各维度位置变化范围的上限和下限。

领导者在搜索空间中搜索食物源,并根据食物源更新位置,引导整个种群移动,其更新方式为

$$x_i^j = \begin{cases} F_i + c_1((ub_i - lb_i)c_2 + lb_i) & c_3 \geq 0.5 \\ F_i - c_1((ub_i - lb_i)c_2 + lb_i) & c_3 < 0.5 \end{cases} \quad (15)$$

式中, $j = 1$ , $x_i^j$ 表示第 $j$ 只樽海鞘(领导者)在第 $i$ 维空间的位置, $F_i$ 表示食物源在第 $i$ 维空间的位置, $ub_i, lb_i$ 表示第 $i$ 维空间的位置的上限和下限,系数 $c_1, c_2$ 和 $c_3$ 是在 $[0, 1]$ 范围内的随机数。

其中系数 $c_1$ 是SSA算法的收敛因子,在迭代过程中它能够平衡算法的全局搜索和局部开发,其定义如下:

$$c_1 = 2e^{-(\frac{l}{L})^2} \quad (16)$$

式中, $l$ 为当前迭代次数, $L$ 为最大迭代次数。 $c_1$ 在迭代过程中自适应减小,迭代前期, $c_1$ 的值比较大,SSA算法进行全局搜索;迭代后期, $c_1$ 的值比较小,SSA算法进行局部开发。

追随者的运动方式符合牛顿运动定律,其更新方式为

$$x_i^j = \frac{1}{2}at^2 + v_0t + x_i^{j-1} \quad (17)$$

式中, $j \geq 2$ , $x_i^j$ 表示第 $j$ 只樽海鞘(追随者)在第 $i$ 维空间的位置, $t$ 表示时间, $v_0$ 表示初始速度, $a$ 表示加速度。

由于在算法优化过程中时间是用迭代次数来表示的,迭代次数的间隔为1,因此 $t = 1$ ,迭代开始时樽海鞘的初速度为0,故 $v_0 = 0$ 。考虑到 $a = (v_{end} - v_0)/t$ , $v_{end} = (x_i^{j-1} - x_i^j)/t$ ,因此式(17)可以表示为

$$x_i^j = \frac{1}{2}(x_i^j + x_i^{j-1}) \quad (18)$$

综合式(15)和式(18)就建立了SSA算法的数学模型,在求解优化问题时,首先根据种群位置的上

下限随机初始化樽海鞘位置,然后计算每只樽海鞘的适应度值,找出最优樽海鞘位置并将其分配给食物源,樽海鞘领导者根据式(15)更新位置,追随者根据式(18)顺次更新位置,追随者的顺次跟随运动方式能够降低SSA算法陷入局部最优的可能性。

## 2.2 改进的樽海鞘群算法

由式(18)可以看出,追随者位置更新中第 $j$ 只樽海鞘单向接受第 $j-1$ 只樽海鞘的位置信息,并以二者的中点位置更新自身位置 $x_i^j$ ,该更新方式没有评价 $x_i^j$ 与 $x_i^{j-1}$ 位置的优劣就盲目追随,在一定程度上限制了SSA算法的搜索效果。

本文针对标准樽海鞘算法的不足做出改进,采用一种自适应权重法更新追随者的位置,定义为自适应樽海鞘群算法(adaptive Salp swarm algorithm,ASSA),ASSA算法在追随者位置更新时,首先计算第 $j$ 只樽海鞘和第 $j-1$ 只樽海鞘的适应度值,评价位置 $x_i^j$ 与位置 $x_i^{j-1}$ 的优劣,然后按照以下方式更新第 $j$ 只樽海鞘的位置:

$$x_i^j = \begin{cases} x_i^j + w_l(x_i^j - x_i^{j-1}) & f(x_i^{j-1}) < f(x_i^j) \\ x_i^j + w_l(x_i^{j-1} - x_i^j) & f(x_i^{j-1}) \geq f(x_i^j) \end{cases} \quad (19)$$

式中, $w_l$ 为自适应权重, $w_l = w_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{L} \times l$ ,

其中 $w_{max}$ 为初始权重值, $w_{min}$ 为最终权重值, $l$ 为当前迭代次数, $L$ 为最大迭代次数。本文权重取经典值 $[0.2, 0.8]$ ,即 $w_{max} = 0.8$ , $w_{min} = 0.2$ 。迭代前期, $w_l$ 的取值较大,可快速协调樽海鞘群向食物源区域移动;迭代后期, $w_l$ 的取值较小,可加深樽海鞘群在食物源区域的搜索。

为验证ASSA算法的性能,引入SSA算法、粒子群算法(particle swarm optimization,PSO)和遗传算法(genetic algorithm,GA)设计对比实验。表1为测试函数,实验参数设置:种群规模为30,最大迭代次数为200,每个对比实验运行20次,运行结果见表2。从平均值、标准差可以看出,相比于其他几个算法,ASSA算法优化效果最好。相比于SSA算法,ASSA算法的性能有很大提升。

本文的优化目标是优化2个矩阵变量 $\mathbf{Q}$ 和 $\mathbf{P}$ ,使D2D通信系统的能量效率最大化,其中资源分配

矩阵  $\mathbf{Q}$  是离散变量, 功率控制矩阵  $\mathbf{P}$  是连续变量, 连续的 ASSA 算法不能直接用于求解本文优化问题。因此对 ASSA 算法中樽海鞘位置更新方式做出修改, 樽海鞘的位置由  $\mathbf{Q}$  和  $\mathbf{P}$  构成, 在迭代过程中,  $\mathbf{Q}$  是根据约束条件式(9)、(10)随机分配信道资源的资源分配矩阵,  $\mathbf{P}$  是对应  $\mathbf{Q}$  的功率控制矩阵。

表 1 测试函数

函数	维度	范围	极值
$f_1(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2$	20	[ -100,100 ]	0
$f_2(x) = \sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^i x_j)^2$	20	[ -100,100 ]	0
$f_3(x) = \sum_{i=1}^n i x_i^4 + \text{random}[0,1)$	20	[ -1.28,1.28 ]	0

表 2 算法优化结果对比

函数	算法	平均值	标准差
$f_1$	ASSA	0.0000	0.0000
	SSA	0.0240	0.0388
	PSO	0.2148	0.2663
	GA	0.3485	0.3714
$f_2$	ASSA	0.2272	1.0000
	SSA	0.5394	0.3095
	PSO	0.2858	0.0867
	GA	0.4172	0.0764
$f_3$	ASSA	0.0028	0.0070
	SSA	0.0138	0.0140
	PSO	0.0817	0.0635
	GA	0.3625	0.1503

领导者位置更新方式为

$$\mathbf{Q}^j = \mathbf{Q}_b \quad (20)$$

$$\mathbf{P}^j = \begin{cases} \mathbf{P}_b + c_1((\mathbf{P}_u - \mathbf{P}_l)c_2 + \mathbf{P}_l) & c_3 \geq 0.5 \\ \mathbf{P}_b - c_1((\mathbf{P}_u - \mathbf{P}_l)c_2 + \mathbf{P}_l) & c_3 < 0.5 \end{cases} \quad (21)$$

式中,  $j = 1, \mathbf{Q}^j$  和  $\mathbf{P}^j$  为第  $j$  只樽海鞘(领导者)的位置,  $\mathbf{Q}_b$  和  $\mathbf{P}_b$  为迭代过程中当前最优资源分配矩阵和功率控制矩阵,  $\mathbf{P}_u$  和  $\mathbf{P}_l$  为功率控制矩阵的上限和下限。

追随者的位置更新方式为

$$\mathbf{Q}^j = \begin{cases} \mathbf{Q}^j & f(\mathbf{Q}^j, \mathbf{P}^j) \geq f(\mathbf{Q}^{j-1}, \mathbf{P}^{j-1}) \\ \mathbf{Q}^{j-1} & f(\mathbf{Q}^j, \mathbf{P}^j) < f(\mathbf{Q}^{j-1}, \mathbf{P}^{j-1}) \end{cases} \quad (22)$$

$$\mathbf{P}^j = \begin{cases} \mathbf{P}^j + w_l(\mathbf{P}^j - \mathbf{P}^{j-1}) & f(\mathbf{Q}^j, \mathbf{P}^j) \geq f(\mathbf{Q}^{j-1}, \mathbf{P}^{j-1}) \\ \mathbf{P}^j + w_l(\mathbf{P}^{j-1} - \mathbf{P}^j) & f(\mathbf{Q}^j, \mathbf{P}^j) < f(\mathbf{Q}^{j-1}, \mathbf{P}^{j-1}) \end{cases} \quad (23)$$

式中,  $j \geq 2, \mathbf{Q}^j$  和  $\mathbf{P}^j$  为第  $j$  只樽海鞘(追随者)的位置,  $f(\mathbf{Q}^j, \mathbf{P}^j)$  表示第  $j$  只樽海鞘的适应度值。

根据本文的 D2D 通信系统能量效率和约束条件, 适应度函数为

$$f(q_{m,n}, P_{m,n}) = EE - \mu y \quad (24)$$

$$y = \sum_{n=1}^N (\max(0, R_n^{\min} - R_n)) + \sum_{m=1}^M \max(0, R_{m,n}^{\min} - R_{m,n}) \quad (25)$$

式中,  $\mu$  为惩罚因子,  $\mu > 0$ , 根据式(25)删除不满足用户最低需求的方案。

结合本文 D2D 通信系统, ASSA 算法流程如图 3 所示, 输出的食物源最优位置表示使 D2D 通信系统能量效率最大的资源分配和功率控制方案。

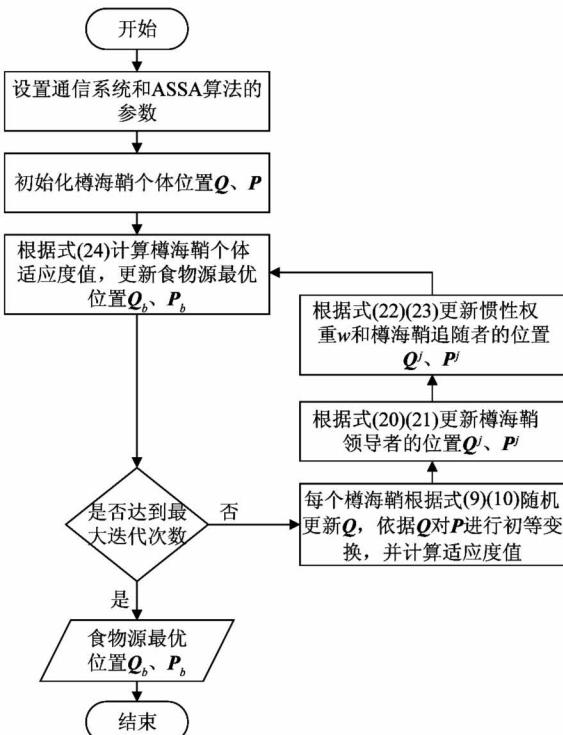


图 3 樽海鞘群算法流程

### 3 系统仿真与分析

设计仿真系统半径为500 m的圆形小区,基站位于小区中央,所有用户随机分布在小区里,D2D对接收端与发射端距离小于100 m,其他参数设置如表3所示。文献[14]提出了一种基于粒子群优化的D2D通信系统能效最大化策略,将本文所提算法与标准樽海鞘群算法、粒子群算法、遗传算法进行仿真对比,仿真运行100次取平均值。

表3 仿真参数

参数	数值
载波频率(GHz)	2
系统带宽(MHz)	10
资源块带宽(kHz)	180
种群规模(只)	30
迭代次数(次)	200
蜂窝用户数量	10
D2D对用户数量	2~10
用户最大发射功率(mW)	250
设备电路功耗(mW)	50
噪声功率谱密度(dBm/Hz)	-174

图4是本文所提ASSA算法、SSA算法、PSO算法和GA算法的平均适应度收敛曲线,设置用户最低速率为2 bit/s/Hz。可以看出本文ASSA算法相对于SSA算法、PSO算法和GA算法能有效提升D2D通信系统的能量效率。虽然PSO算法的收敛

速度略快,但是容易陷入局部最优,难以使系统能量效率最大化。相对于SSA算法,ASSA算法收敛速度更快,搜索精度更高。

图5是不同最低速率情况下本文ASSA算法与SSA算法、PSO算法、GA算法的系统能量效率仿真对比。可以看出,随着用户最低速率的增加,系统能量效率逐渐减低,相比于PSO算法和SSA算法,ASSA算法在不同用户最低速率条件下均能使系统能量效率更高。事实上,随着用户最低速率的增加,用户设备的发送功率逐渐增加,而速率的变化率低于发送功率的变化率,故能量效率降低。

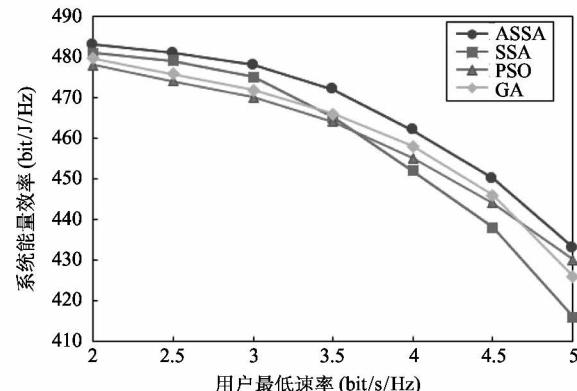


图5 不同最低速率时系统能量效率

图6是不同D2D用户对数情况下本文ASSA算法与SSA算法、PSO算法、GA算法的系统能量效率仿真对比图。用户最低速率为2 bit/s/Hz时,可以看出,随着D2D用户对数的增加,系统能量效率逐

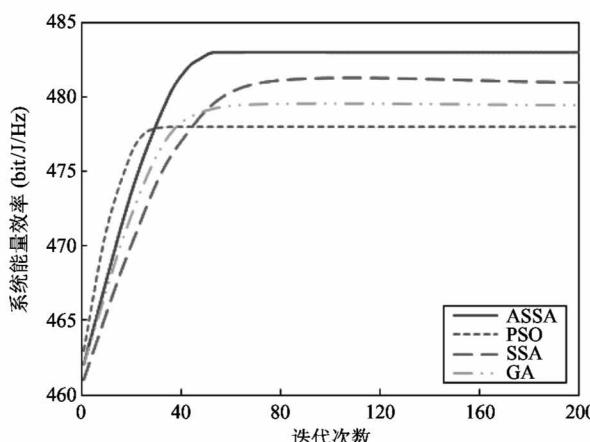


图4 平均适应度收敛曲线

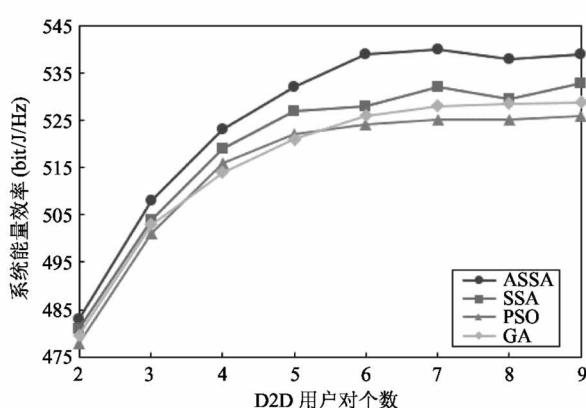


图6 不同D2D用户对数时系统能量效率

渐提升,当 D2D 用户对数达到一定数量后,部分 D2D 用户对复用蜂窝用户信道时不满足系统的约束条件,该分配方案会被删除,因此系统能量效率会基本保持稳定。

把某个复用信道上的蜂窝用户和 D2D 对用户看成一个 D2D 基本单元,图 7 是不同 D2D 用户间距情况下 D2D 基本单元的能量效率仿真对比,用户最低速率为 2 bit/s/Hz。可以看出,随着 D2D 用户间距的增加,D2D 基本单元能量效率逐渐降低,从而会导致系统能量效率的降低,因为路径损耗随着 D2D 用户间距的增加而增加。

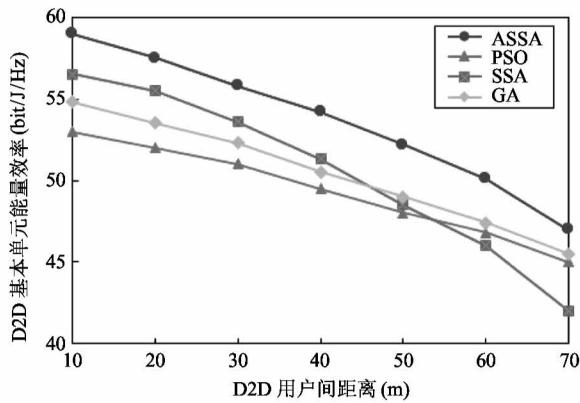


图 7 不同 D2D 用户间距时 D2D 基本单元能量效率

## 4 结 论

本文响应绿色通信理论,针对 D2D 通信系统中复用模型下的干扰问题和资源利用不充分问题,在现有文献研究的基础上,综合考虑资源分配和功率控制,从信道资源利用的角度分析了系统能量效率,提出了基于改进樽海鞘群优化算法的资源分配策略。从最低用户速率、D2D 用户对数和 D2D 用户间距 3 个方面研究了系统能量效率,仿真表明所提算法有较快的收敛速度和较强的局部搜索能力,在不影响用户最低速率需求的前提下,能有效减少同频干扰,提高频谱利用率,提高系统能量效率。本文系统模型仅考虑单小区内的设备通信,未来可以在此基础上考虑多小区 D2D 通信系统的研究,使 D2D 技术得到更广泛的应用。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Lei L, Zhong Z, Lin C, et al. Operator controlled device-to-device communications in LTE-advanced networks [ J ]. *Wireless Communications IEEE*, 2012, 19(3):96-104
- [ 2 ] Shen X M. Device-to-device communication in 5G cellular networks [ J ]. *IEEE Network*, 2015, 29(2):2-3
- [ 3 ] 钱志鸿, 王雪. 面向 5G 通信网的 D2D 技术综述 [ J ]. *通信学报*, 2016(7):1-14
- [ 4 ] Li Y, Jin D, Yuan J, et al. Coalitional games for resource allocation in the device-to-device uplink underlaying cellular networks [ J ]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 13(7):3965-3977
- [ 5 ] Feng D Q, Lu L, Yi Y W, et al. Device-to-device communications underlaying cellular networks [ J ]. *IEEE Transactions on Communications*, 2013, 61(8):3541-3551
- [ 6 ] Lin M, Ouyang J, Zhu W P. Joint beamforming and power control for device-to-device communications underlaying cellular networks [ J ]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2015, 34(1):138-150
- [ 7 ] Zhu X, Wen S, Cao G, et al. QoS-based resource allocation scheme for device-to-device (D2D) radio underlaying cellular networks [ C ] // The 19th International Conference on Telecommunications (ICT), Jounieh, Lebanon, 2012:1-6
- [ 8 ] Yu C H, Tirkkonen O, Doppler K, et al. Power optimization of device-to-device communication underlaying cellular communication [ C ] // IEEE International Conference on Communications, Dresden, Germany, 2009: 3696-3700
- [ 9 ] Jaheon G U, Bae S J, Hasan S F, et al. A combined power control and resource allocation scheme for D2D communication underlaying an LTE-advanced system [ J ]. *IEICE Transactions on Communications*, 2013, 96(10):2683-2692
- [ 10 ] Qiu X Y, Liao X W, Dong K, et al. Energy efficiency analysis in device-to-device communication underlaying cellular networks [ C ] // IEEE 10th Consumer Communications and Networking Conference, Las Vegas, USA, 2013: 793-796
- [ 11 ] Jiang Y, Liu Q, Zheng F, et al. Energy-efficient joint resource allocation and power control for D2D communications [ J ]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*,

- 2016, 65(8) : 6119-6127
- [12] Xu H, Xu W, Yang Z, et al. Energy-efficient resource allocation in D2D underlaid cellular uplinks [J]. *IEEE Communications Letters*, 2017, 21(3) : 560-563
- [13] Mirjalili S, Gandomi A H, Mirjalili S Z, et al. Salp

swarm algorithm: abio-inspired optimizer for engineering design problems [J]. *Advances in Engineering Software*, 2017, 114(6) : 163-191

- [14] 李小文, 刘文康. D2D 通信中基于粒子群优化的能效最大化策略[J]. 电讯技术, 2017, 57(10) : 1171-1176

## Research on energy efficiency of D2D communication system based on Salp swarm algorithm

Huang Zhe, Yang Yongli, Yang Danyang, Mao Kai

(School of Information Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430000)

### Abstract

In view of co-channel interference and resource under utilization in device-to-device (D2D) communication system, this paper takes into account resource allocation and power control to establish D2D communication system model, and analyzes system energy efficiency from the perspective of channel resource utilization. This paper aims to put forward a novel resource allocation strategy based on improved Salp swarm optimization algorithm. With the resource allocation matrix and the power control matrix as the position of the Salps, users' minimum rate demand and maximum transmission power are taken as the constraints of position update. The adaptive weight method is applied for position update to maximize the energy efficiency of the system on the premise of ensuring users' minimum rate demand. The simulation results show that compared with the standard Salp swarm algorithm, the particle swarm optimization algorithm and the genetic algorithm, the algorithm proposed in this paper has higher convergence speed and search accuracy, and is able to effectively improve the system energy efficiency.

**Key words:** device-to-device (D2D) communication, resource allocation, power control, energy efficiency, Salp swarm algorithm (SSA)