

# 一种基于蜂窝网络的 D2D 通信资源分配算法

陆音 王慧茹 孙丹丹

(南京邮电大学江苏省无线通信重点实验室, 南京, 210003)

**摘要:** 设备直连(Device-to-device, D2D)通信用户通过复用蜂窝用户的频谱资源可提高频谱利用率和系统的整体通信容量,但复用蜂窝网络频谱资源会带来严重的干扰,影响整体通信质量。针对干扰问题,本文通过建立通信系统模型,研究系统的线性规划问题以及相应的最佳资源分配算法。考虑到最佳算法复杂度较高,本文提出一种启发式算法来分配通信资源,通过遍历 D2D 对用户与蜂窝用户之间的干扰矩阵找到最小干扰值,分配复用资源给相应的蜂窝用户和 D2D 对用户。在蜂窝用户都分配到通信资源之后,对 D2D 对用户进行专用通信资源分配。仿真结果表明,该算法在降低算法复杂度的基础上显著地减小了 D2D 对用户对蜂窝用户的干扰,能够最大程度地增加 D2D 对用户的数量。

**关键词:** 设备直连通信;蜂窝网络;资源分配;干扰抑制

**中图分类号:** TN929.5      **文献标志码:** A

## Resource Allocation Algorithm of D2D Communication Based on Cellular Network

Lu Yin, Wang Huiru, Sun Dandan

(Jiangsu Provincial Key Laboratory of Wireless Communications, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, 210003, China)

**Abstract:** As the demand of user's communication rate and data service is gradually increasing, the communication rate and spectrum resource of cellular network cannot meet the business requirements correspondingly. The equipment of direct communication (Device-to-device, D2D) can improve the coefficient of spectrum utilization and the overall communication capacity by reusing the spectrum resources of cellular users. However, reusing cellular network spectrum resources can cause serious interference and affect the overall quality of communication. In order to mitigate interference, the linear programming problem and the corresponding optimal algorithm of resource allocation are studied by establishing the communication system model. Considering the high complexity of the optimal algorithm, a heuristic algorithm to allocate the communication resource is proposed. By traversing the interference matrix between the D2D users and the cellular users to get the minimum value, the multiplexing resources are assigned to the corresponding D2D user and cellular user. After the cellular users are allocated to the communication resources, the D2D users are assigned the dedicated communication resources. Simulation results show that this algorithm can significantly reduce the interference of the D2D users to the cellular users and increase the number of D2D users to the maximum extent.

**Key words:** device-to-device communication; cellular network; resource allocation; interference suppression

## 引言

随着移动多媒体业务和相关应用的快速发展,高清视频、在线直播等多媒体业务呈爆发式增长,其大流量特性给运营商的核心网和频谱资源带来巨大压力,移动通信网络面临严峻的挑战<sup>[1]</sup>。在蜂窝网络中引入 D2D 通信技术不仅可以改善系统性能,还能进一步改善用户体验,因而受到广泛关注,但同时也带来了复杂的干扰问题。

D2D 技术无需基站转接而直接实现数据交换和服务提供,可有效地减轻蜂窝用户的网络负担,降低移动终端功耗,提升传输效率,提高网络基础设施的健壮性。文献[2]指出基于 D2D 技术的本地媒体业务利用 D2D 通信的短距离通信特点,可实现频谱资源的有效利用,获得资源空分复用的增益。然而,在蜂窝网络中引入 D2D 技术会带来 D2D 通信链路建立、资源调度、实时性、可靠性以及干扰抑制等问题。其中,干扰抑制问题是研究的难点和关键问题,文献[3-4]针对 D2D 干扰抑制展开了研究。干扰抑制研究一般包含以下几个方面工作:(1)模式选择;(2)资源分配;(3)功率控制;(4)中继选择。文献[5]研究了在跨小区、多小区存在 D2D 通信链路的情况下,借助中继来改善通信链路的质量。文献[6]针对 D2D 对用户与蜂窝用户复用信道资源的优先级提出一种启发式算法,动态地调整这两种用户复用信道资源的情况,有效地增加了允许 D2D 通信的用户对数,同时降低了其对蜂窝用户的干扰。文献[7]提出了基于系统最大吞吐量的贪婪算法,从 D2D 通信用户复用蜂窝用户上、下行资源两方面提出优化策略,把 D2D 对用户使用小区无线资源的分配问题总结为混合整数非线性规划问题。文献[8]提出了 D2D 对用户在下行链路的模式选择方案,降低了通信用户之间的干扰。文献[9-10]提出了联合模式选择和资源分配算法,该算法达到了通信系统的容量最大以及干扰最小的效果。文献[11]从 D2D 对用户和蜂窝用户发送功率方面进行算法研究,提出在不同通信模式下调节用户的发送功率来控制通信用户间干扰的方案。文献[12]针对最小化系统干扰同时保持目标系统总和速率提出了一种两阶段资源分配算法,首先使用加权二分匹配算法使干扰最小化并获得可行的初始解,然后用本地搜索技术来改进解决方案。文献[13-14]从用户所处小区的地理位置进行研究,根据用户之间的干扰情况建立通信受限区域,在不同的区域内实行不同的通信模式策略,使得系统的整体通信质量得到提高。文献[15]提出一种无线资源分配和功率控制方案,使用小区扇区化方法来减少 D2D 对复用上行链路蜂窝资源造成的干扰。文献[16]提出一种资源分配与功率控制相结合的方案,通过为 D2D 用户分配合理的复用资源,适当调整 D2D 用户的发射功率,以保证蜂窝链路干扰可控。在实际应用场景中,一个小区随机地分布着若干对 D2D 对用户。本文在文献[6]的基础上,提出一种启发式算法。在 D2D 对用户和蜂窝用户共存的通信系统中,蜂窝用户与 D2D 对用户按照干扰最小的规则分配复用资源。复用资源分配完成之后,给剩下的蜂窝用户分配通信资源,最后按照干扰最小的规则给 D2D 对用户分配通信资源。该算法与文献[6]所提算法相比,能够在保证用户通信质量的前提下,合理地为用户分配通信资源,将 D2D 对用户对蜂窝用户的干扰降至最低,同时使得 D2D 对用户通信数尽可能的多。

## 1 系统模型

为研究方便,本文仅考虑下行链路 D2D 对用户复用蜂窝用户通信资源的场景。假设小区中存在围绕基站均匀分布的  $M$  个蜂窝用户( $CU_1, CU_2, \dots, CU_m, \dots, CU_M$ )和  $N$  对 D2D 对用户( $D2D_1, D2D_2, \dots,$

$D2D_n, \dots, D2D_N$ ), 每个 D2D 对用户包含发射用户  $D_n$  和接收用户  $D_{n'}$ , 系统模型如图 1 所示。

在下行链路中, 基站会对 D2D 对用户的接收用户  $D_{n'}$  产生干扰, 蜂窝用户会受到与其复用相同通信资源的 D2D 对用户的通信干扰。假设该小区中存在  $K$  个通信信道资源,  $K, M, N$  三者满足  $N < M < K < N + M$ , 表示系统的通信资源数大于蜂窝用户数, 同时又小于 D2D 对用户数与蜂窝用户数两者之和; 也表明有一部分 D2D 对用户可以使用专用资源, 另一部分 D2D 对用户复用蜂窝用户资源。

在下行通信链路中, D2D 对用户接收端  $D_{n'}$  的信噪比 (Signal to interference plus noise ratio, SINR) 为<sup>[6]</sup>

$$\text{SINR}_{n,m} = \frac{\alpha_{n,m} P_{n,m} G_{n,n'}}{I_{\text{BS},n'} + N_0} \quad (1)$$

式中:  $\alpha_{n,m}$  表示第  $n$  对 D2D 对用户复用第  $m$  个蜂窝用户资源;  $P_{n,m}$  是第  $n$  个 D2D 对用户复用第  $m$  个蜂窝用户资源时发送端  $D_n$  的发射功率;  $G_{n,n'}$  是第  $n$  对 D2D 对用户之间的链路增益;  $I_{\text{BS},n'}$  是基站 BS 对 D2D 对用户  $D_{n'}$  的干扰,  $I_{\text{BS},n'} = P_{\text{BS},n'} G_{\text{BS},n'}$ ,  $P_{\text{BS},n'}$  是  $D_{n'}$  接收到的基站发射功率,  $G_{\text{BS},n'}$  是基站与  $D_{n'}$  之间的链路增益。因为是第  $n$  对 D2D 对用户复用蜂窝用户  $\text{CU}_m$  的链路资源,  $I_{\text{BS},n'}$  也可记为  $I_{m,n}$ 。  $N_0$  是  $D_{n'}$  的接收噪声功率。

蜂窝用户  $\text{CU}_m$  的 SINR 为

$$\text{SINR}_m = \frac{P_{\text{BS},m} G_{\text{BS},m}}{I_{n,m} + N_0} \quad (2)$$

式中:  $P_{\text{BS},m}$  是蜂窝用户  $\text{CU}_m$  接收到的基站发射功率;  $G_{\text{BS},m}$  是基站与蜂窝用户  $\text{CU}_m$  之间的链路增益;  $I_{n,m}$  是复用蜂窝用户  $\text{CU}_m$  通信资源的第  $n$  对 D2D 对发送端  $D_n$  对  $\text{CU}_m$  产生的干扰,  $I_{n,m} = P_{n,m} G_{n,m}$ , 其中  $P_{n,m}$  是蜂窝用户  $\text{CU}_m$  接收到的 D2D 对用户发送端  $D_n$  的干扰功率,  $G_{n,m}$  是  $D_n$  与  $\text{CU}_m$  间的链路增益,  $N_0$  是  $\text{CU}_m$  的接收噪声。

根据香农公式, 该系统的通信容量为

$$C_{\text{DL}} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \log_2 (1 + \text{SINR}_{n,m}^k) + \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \log_2 (1 + \text{SINR}_m^k) \quad (3)$$

式(3)表示蜂窝用户和 D2D 对用户通过共同复用通信资源, 蜂窝用户与 D2D 对用户分别占用系统的通信资源达到的整体容量。  $k$  代表单位通信资源值, 将所有的  $k$  进行求和乘以单位带宽就是系统的通信带宽。

## 2 问题描述

针对如何合理地分配通信资源, 使蜂窝用户与 D2D 对用户之间干扰降低的问题, 本文建立了系统优化模型。求系统的最大和容量, 本质上是求蜂窝用户与 D2D 对用户的最大 SINR 之和。假设用户之间的链路增益  $G$  以及接收的噪声功率  $N_0$  是固定值, 用户的发射功率可根据接收的干扰来确定, 将求最大系统容量问题进一步转变成求最小干扰问题。式(3)可优化为

$$\min_{\beta_{n,m}^k} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \beta_{n,m}^k I_{n,m}^k + \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K I_{m,n}^k$$

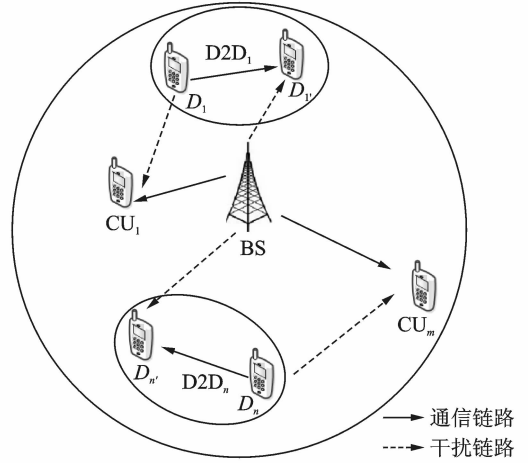


图 1 系统模型

Fig. 1 System model

$$\text{s. t.} \begin{cases} C_1: \beta_{n,m}^k = \{0,1\}, \forall n,m,k \\ C_2: \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \beta_{n,m}^k = 1, \forall k \\ C_3: \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \beta_{n,m}^k = 1, \forall m \\ C_4: \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \beta_{n,m}^k = 1, \forall n \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\beta_{n,m}^k$  表示第  $n$  对 D2D 对用户复用第  $m$  个蜂窝用户的通信资源,它们共同占用通信资源块  $k$ 。实际通信系统中,  $K, M, N$  三者满足  $N < M < K < N + M$ , 一部分 D2D 对用户复用蜂窝资源, 另一部分 D2D 对用户分得专用资源, 该情况下 D2D 对用户不会对蜂窝用户产生干扰, 也不会受到其他蜂窝用户的通信干扰。假设复用蜂窝资源的 D2D 对用户数为  $N'$ , 那么这部分用户将对蜂窝用户产生干扰以及受到基站的干扰, 可将式(4)进一步简化为

$$\min_{\beta_{n,m}^k} \sum_{n=1}^{N'} \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \beta_{n,m}^k I_{n,m}^k + \sum_{n=1}^{N'} \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K I_{m,n}^k$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} C_5: \beta_{n,m}^k = \{0,1\}, \forall n,m,k \\ C_6: \sum_{n=1}^{N'} \sum_{m=1}^M \beta_{n,m}^k = 1, \forall k \\ C_7: \sum_{n=1}^{N'} \sum_{k=1}^K \beta_{n,m}^k = 1, \forall m \\ C_8: \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \beta_{n,m}^k = 1, \forall n, 1 \leq n \leq N' \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $C_5$  表示一个 D2D 对用户只能分配一个蜂窝用户资源,  $C_6$  表示一个资源块  $k$  只能分配给一个 D2D 对用户或者一个蜂窝用户或者一个 D2D 对用户和一个蜂窝用户, 等式  $C_7$  表示任何一个蜂窝用户通信资源只能分配给一个 D2D 对用户, 等式  $C_8$  表示每个 D2D 对用户只能分配到一个通信资源块。

式(5)是一个非确定性多项式(Non-deterministic polynomial, NP)问题, 可通过穷举搜索法求得最优解。穷举搜索算法的复杂度达到  $O(K^2 \log K)$ , 在实际情况中算法复杂度呈指数上升且  $K$  的数值很大, 不利于通信系统整体性能提升。

### 3 资源分配算法

文献[16]提出一种资源分配与功率控制相结合的方案, 通过为 D2D 用户分配合理的复用资源, 在一定程度上降低了 D2D 引入的干扰, 通过适当调整 D2D 用户的发射功率, 在保证蜂窝链路干扰可控的前提下, 有效地提高了 D2D 用户的通信性能。但该方案仅考虑了 D2D 用户对分布较少的场景, 没有考虑 D2D 用户大规模分布的实际场景。

本文所提算法在保证系统通信容量最大化以及允许尽可能多地 D2D 对用户接入系统的前提下, 能合理分配用户通信资源, 使系统整体通信性能达到最优。该算法复杂度为  $O(N'^2 M)$ , 因为  $N' < N$ , 所以相比最佳算法可有效降低算法复杂度。在对通信资源进行分配时, 假设所有的通信资源块是一样的。为保证通信质量, 预设最大的可忽略干扰阈值: D2D 对用户为  $I_{th}^D$ , 蜂窝用户为  $I_{th}^C$ 。算法具体步骤如下。

(1) 计算所有的 D2D 对用户复用所有蜂窝用户资源的  $N \times M$  维干扰矩阵  $\mathbf{I}_{N \times M}$ , 以及基站对复用蜂窝用户通信资源的 D2D 对用户的干扰矩阵  $\mathbf{I}_{M \times N}$ 。

(2) 循环遍历干扰矩阵  $\mathbf{I}_{N \times M}$ , 找到该矩阵的最小干扰值  $\mathbf{I}_{n,m}^{\min}$ , 若满足  $\mathbf{I}_{n,m}^{\min} < I_{th}^C$ , 则找到矩阵  $\mathbf{I}_{M \times N}$  中的  $\mathbf{I}_{m,n}$ , 且需满足  $\mathbf{I}_{m,n} < I_{th}^D$ , 从资源块集合  $K$  中挑选一个资源块  $k$  给蜂窝用户  $CU_m$  和用户对  $D2D_n$  使用。

否则再次遍历矩阵  $\mathbf{I}_{N \times M}$ , 找到次最小值以及满足干扰关系的行列。

(3) 把资源块  $k$  从集合  $K$  中删除, 将干扰矩阵  $\mathbf{I}_{N \times M}$  中的第  $n$  行和第  $m$  列的干扰值全部设置为  $\infty$ , 表示第  $n$  对 D2D 对用户及第  $m$  个蜂窝用户不再参与资源分配。

(4) 循环执行步骤(2,3), 直到找不到满足关系式  $\mathbf{I}_{n,m}^{\min} < \mathbf{I}_{th}^c$  和  $\mathbf{I}_{m,n} < \mathbf{I}_{th}^d$  的  $\mathbf{I}_{n,m}^{\min}$  和  $\mathbf{I}_{m,n}$  时终止循环。

(5) 若未分配通信资源的蜂窝用户数不为 0, 则将集合  $K$  中的资源块分配给这些蜂窝用户, 直到未分配蜂窝用户数为 0, 再对 D2D 用户进行专用通信资源分配。

(6) 给 D2D 对用户分配专用通信资源, 只需找到干扰矩阵  $\mathbf{I}_{N \times M}$  中的最小值  $\mathbf{I}_{n^*,m^*}^{\min}$ , 然后直接给 D2D 对用户分配专用通信资源块  $k^*$ 。

(7) 将资源块  $k^*$  从集合  $K$  中删除, 把干扰矩阵  $\mathbf{I}_{N \times M}$  中的  $n^*$  行  $m^*$  列干扰值全部置为  $\infty$ , 表示第  $n^*$  对 D2D 对用户不再参与专用通信资源的分配。

(8) 循环执行步骤(6,7), 直到通信集合  $K$  为空集, 结束循环。

算法执行完毕, 所有的蜂窝用户都分配到通信资源, 部分 D2D 对用户分配到复用通信资源或专用通信资源, 复用相同通信资源对蜂窝用户造成干扰较大的 D2D 对用户不被允许接入通信系统。

## 4 仿真结果与分析

### 4.1 仿真参数

考虑单一小区中存在一个基站 BS, D2D 对用户和蜂窝用户均匀分布在小区中。每个蜂窝用户只可以占用 1 个通信资源块, 并且每 1 个 D2D 对用户只能复用 1 个蜂窝用户资源。1 个资源块只分配给 1 个 D2D 对用户, 或者 1 个蜂窝用户, 或者 1 个 D2D 对用户和 1 个蜂窝用户。使用 MATLAB 进行仿真, 每次随机生成数据, 求取平均值。仿真参数见表 1。  $d$  为 D2D 发射机与接收机之间的距离, 单位 km。

### 4.2 仿真结果分析

本文对所提的启发式算法、最佳算法和文献[7]的贪心算法以及随机算法进行了仿真, 仿真结果见图 2, 3。图 2 显示了不同算法下基站干扰阈值与系统允许通信的 D2D 对数之间的关系。可以看出, 随着基站干扰阈值逐渐增大, 允许通信的 D2D 对数也逐渐增加。当基站干扰阈值达到  $-90$  dBm 时, D2D 对数达到系统允许最大值。

对比 4 种算法的仿真结果, 可以看出本文所提的启发式算法比随机算法和贪心算法的 D2D 对接入数增加更快。当基站干扰阈值在  $-120$  dBm 时, 启发式算法最先达到 D2D 通信数的上限值, 比随机算法和贪心算法低了 30 dBm 左右。本文所提算法优先考虑给蜂窝用户分配通信资源, 然后使满足干扰关系的 D2D 对用户复用相应蜂窝用户的通信资源, 在复用资源分配完成之后, 给剩

表 1 系统仿真参数

Tab. 1 System simulation parameters

参数	数值
小区半径/m	500
系统总带宽/MHz	10
路径损耗模型/dB	$128.1 + 37.6 \lg d$
噪声功率谱密度/(dBm · Hz <sup>-1</sup> )	-174
D2D 对用户的 SINR 阈值/dB	-10
蜂窝用户的 SINR 阈值/dB	-7.2
D2D 对用户之间最大距离/m	50
仿真次数	10 000

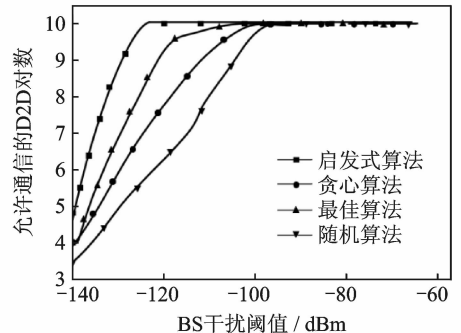


图 2 不同算法下允许通信的 D2D 对数

Fig. 2 Number of allowed D2D users in different algorithms

下的 D2D 对用户分配专用资源。贪心算法基于 D2D 对用户和蜂窝用户之间的竞争,先分配复用资源,之后分配专用资源。蜂窝用户是小区的主要用户,具有通信优先级,在通信资源有限的条件下就限制了接入系统的 D2D 对数。分配到通信资源的蜂窝用户和 D2D 对用户将不再参与遍历循环,但最佳算法仍会遍历这些数据,所以本文算法比最佳算法能较快达到接入 D2D 对的上限值,从而尽可能多地允许 D2D 对用户通信。

图 3 显示了不同算法下基站干扰阈值与平均每对 D2D 用户对用户造成干扰之间的关系。每对 D2D 用户对用户产生的干扰值随着基站干扰值的增大而增大。随着基站干扰值的增大, D2D 对用户的发射功率也在增大,从而造成的干扰也在增大。当基站的干扰阈值升高到  $-120$  dBm 时,启发式算法中每个 D2D 对用户产生的干扰不再增大。造成这种现象的原因是因为 D2D 对数在基站干扰阈值达到  $-120$  dBm 时达到最大,之后尽管基站干扰阈值进一步增加, D2D 对数却不再增加,所以造成的干扰值是固定的,也不再增加。当基站干扰阈值达到  $-90$  dBm 时,最佳算法的 D2D 对用户产生的干扰趋于稳定。在基站干扰阈值约为  $-85$  dBm 时,贪心算法的干扰值达到稳定状态。随机算法产生的干扰值一直在增大,因为随机算法是随机分配通信资源, D2D 对用户和蜂窝用户随机获取通信资源,这导致了 D2D 对用户对蜂窝用户产生的干扰无法达到一个稳定状态,干扰值一直在增加。图 3 说明本文所提的启发式算法造成的干扰明显比其他算法低。

## 5 结束语

本文首先建立了基于蜂窝网络的 D2D 通信模型,研究了通信系统资源最优化问题。在最佳算法的基础上提出一种启发式算法,最佳算法的复杂度较高,进行改进后降低了算法的复杂度,同时又提升了整体性能。本文算法将 D2D 对用户中对蜂窝用户产生干扰较大的用户进行了舍弃,从而将 D2D 用户对蜂窝用户的干扰降至最低,保证了算法的性能优于其他 3 种算法。仿真结果表明,该算法在最大程度上允许接入通信系统的 D2D 对数达到最多,同时显著降低了 D2D 对用户对蜂窝用户造成的干扰。在通信资源有限的条件下,该算法避免使用复杂度较高的算法,保证了用户服务质量和信道资源的充分利用,同时尽可能多地提高 D2D 接入数量。后续工作将对蜂窝用户和 D2D 对用户共存的异构系统进行上下行链路编码方式的研究,以期达到通信系统的通信公平性与系统和容量最大。

## 参考文献:

- [1] 周一青,潘振岗,翟国伟,等. 第五代移动通信系统 5G 标准化展望与关键技术研究[J]. 数据采集与处理, 2015, 30(4): 714-724.  
Zhou Yiqing, Pan Zhengang, Zhai Guowei, et al. Research on the standardization outlook and key technology of 5G mobile communication system [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2015, 30(4): 714-724.
- [2] 朱晨鸣,王强,李新,等. 5G: 2020 后的移动通信[M]. 北京:人民邮电出版社,2016:150-154.  
Zhu Chenming, Wang Qiang, Li Xin, et al. 5G: Mobile communications after 2020 [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2016:150-154.
- [3] Ghazanfar A S, Masood U, Mujahid M M, et al. Interference mitigation in D2D communication underlying LTE-A network[J]. IEEE Access, 2016, 4: 7967-7987.
- [4] Zhang Z, Hu R Q, Qian Y, et al. D2D communication underlay uplink cellular network with fractional frequency reuse

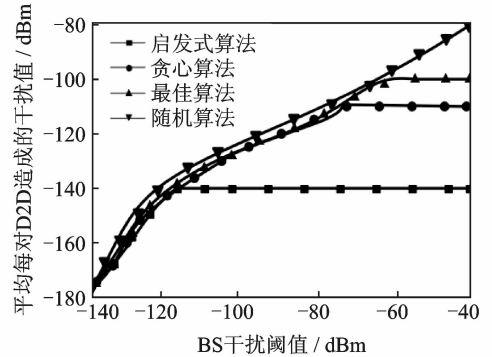


图 3 不同算法下平均每对 D2D 造成的干扰  
Fig. 3 Average disturbance caused by D2D in different algorithms

- [C]//2015 11th International Conference on the Design of Reliable Communication Networks (DRCN). [S. l.]: IEEE, 2015; 247-250.
- [5] Xu Shaoyi, Wang Haiming, Chen Tao. Effective interference cancellation mechanisms for D2D communication in multi-cell cellular networks [C] // Vehicular Technology Conference (VTC Spring). Yokohama, Japan; IEEE, 2012; 1-5.
- [6] Xu Y, Yin R, Han T, et al. Dynamic resource allocation for device-to-device communication underlying cellular networks [J]. *International Journal of Communication Systems*, 2012, 27(10): 2408-2425.
- [7] Zulhasnine M, Huang C, Srinivasan A. Efficient resource allocation for device-to-device communication underlying LTE network[J]. *Materials Chemistry & Physics*, 2010, 117(s2/3): 368-375.
- [8] Min H, Seo W, Lee J, et al. Reliability Improvement using receive mode selection in the device-to-device uplink period underlying cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(2): 413-418.
- [9] Yu G, Xu L, Feng D, et al. Joint mode selection and resource allocation for device-to-device communications[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2014, 62 (11): 3814-3824.
- [10] 姚骏, 黄清. 蜂窝网络中基于 D2D 位置的联合模式选择与资源分配方案[J]. *电信科学*, 2014(8): 79-83.  
Yao Jun, Huang Qing. The combination mode selection and resource allocation scheme based on D2D position in cellular network [J]. *Telecommunications Science*, 2014(8): 79-83.
- [11] Xiao X, Tao X, Lu J. A QoS-aware power optimization scheme in OFDMA systems with integrated device-to-device (D2D) communications [C] // Vehicular Technology Conference (VTC Fall). San Francisco, United States; IEEE, 2011:1-5.
- [12] Yeakub H, Faisal H, Sakhawat H, et al. Interference minimization in D2D communication underlying cellular networks [J]. *IEEE Access*, 2017, 5:22471-22484.
- [13] 鲍鹏程. D2D 通信系统的干扰协调与资源优化[D]. 杭州:浙江大学, 2014.  
Bao Pengcheng. Interference coordination and resource optimization of D2D communication system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [14] Nguyen H H, Hasegawa M, Hwang W J. Distributed resource allocation for D2D communications underlay cellular networks [J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20(5):942-945.
- [15] Ningombam D D, Shin S. Radio resource allocation and power control scheme to mitigate interference in device-to-device communications under-laying LTE-A uplink cellular networks [C] // 2017 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC). Chongqing, China; IEEE, 2017; 961-963.
- [16] 王蓉, 江帆, 许腾驹, 等. D2D 通信中一种资源分配与功率控制结合的方案[J]. *电讯技术*, 2016(3): 295-301.  
Wang Rong, Jiang Fan, Xu Tengju, et al. A scheme of combining resource allocation and power control in D2D communication [J]. *Telecommunication Technology*, 2016(3):295-301.

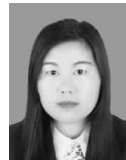
## 作者简介:



陆音 (1970-), 男, 副研究员, 博士, 研究方向: 无线通信、物联网技术与应用, E-mail: luyin@njupt.edu.cn.



王慧茹 (1994-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 无线通信。



孙丹丹 (1991-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 无线通信。

(编辑: 刘彦东)