基于 ISAP 的 D2D 资源分配优化算法研究*

张晓明，李敬兆，高之翔，杨大禹
（安徽理工大学 电气与信息工程学院，安徽 淮南 232001）

摘　要：D2D 通信通过复用蜂窝系统频谱资源，实现一定范围内终端设备点到点的直接通信。频谱资源的复用缓解了资源匮乏的问题，但必然会产生同频干扰而影响蜂窝系统的性能。为了提高资源利用率且降低干扰，通过运用 ISAP 算法来完成合理的资源分配，从而实现 D2D 对与频谱资源之间的一对多的复用关系。同时，在满足各用户不同 QoS 需求的前提下，可将干扰有效抑制在合理的范围。最后通过仿真实验可知，该算法既能提高系统的吞吐量，也能保证蜂窝系统的通信性能不受影响。

关键词：D2D 通信；QoS 需求；资源分配；吞吐量
中图分类号：TP929.5；TP301.6　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1001-3695(2017)09-2741-03
doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2017.09.039

Research on optimization algorithm of resource allocation for D2D based on ISAP

Zhang Xiaoming, Li Jingzhao, Gao Zhixiang, Yang Dayu
(*School of electrical & Information Engineering, Anhui University of Science & Technology, huainan Anhui* 232001, *China*)

Abstract: By reusing cellular spectrum resource, D2D communication could communicate directly by point-to-point in a certain range. Reusing resource alleviated the problem of resource scarcity, but it caused same-frequency interference and impacts the performance of cellular system. In order to improve the utilization of resource and reduce the interference, this paper proposed an algorithm based on ISAP which could complete the resource allocation reasonably. It made one D2D pair reuse multiple resource. Meanwhile, Under the premise of meeting the different QoS requirements, the interference would be limited efficiently. Finally, the simulation experiment shows the algorithm can improve the system throughput, and guarantee the performance of the cellular system.

Key words: D2D communication; QoS requirements; resource allocation; throughput

Device-to-Device (D2D)通信由于具有终端设备的发射功率低、生命周期长、传输速率高、数据传输模式多样以及频谱资源利用率高等诸多优势，使其逐渐成为无线通信领域的研究热点。现有的蜂窝系统不支持点到点的直接通信，若终端间需要通信，则需经过有线骨干网或中心控制节点的路由和转发[1]，这是与 D2D 通信的主要区别所在。D2D 通信的工作模式有三种，即蜂窝模式、正交模式和非正交模式[2]。蜂窝模式与蜂窝通信原理类似，是以基站(BS)作为中继完成数据传输的；正交模式下的 D2D 通信不存在资源(RB)复用的情况，系统单独为它分配 RB 以完成数据传输；而在非正交模式下时，D2D 则需与蜂窝共享 RB，故存在同频干扰问题，但却有助于提高系统各方面性能。本文将讨论第三种工作模式下的通信情况。

将 D2D 通信引入到蜂窝中，需统筹考虑吞吐量的提升和链路间同频干扰的抑制。对此问题的研究，文献[3]采用减轻 D2D 通信对整个系统的权重影响，来降低其产生的干扰，但此方法付出的代价却是降低 D2D 吞吐量。文献[4]是基于干扰感知的无线资源分配方法，降低了干扰，但缺点在于一个系统资源只可以被一个 D2D 对使用，D2D 吞吐量不高。文献[1]采用多播模式进行数据分发，提高了 D2D 通信的吞吐量，却没有考虑同频干扰问题。文献[5]分析的是整个蜂窝通信系统中只有一个 D2D 对的资源复用，而忽视了多 D2D 对的情况，考虑同频干扰问题不充分。为此，本文提出一种基于改进的最短增广路(improved shortest augmenting path, ISAP)的 D2D 资源分配优化算法来优化系统吞吐量和同频干扰的问题。该算法的作用是动态调整 D2D 终端在各 RB 上的匹配路径，达到提高资源利用率的目的。本文在单蜂窝系统中进行仿真，用随机分配算法与本文所提算法作相关参数的比对，结果显示，本算法可兼顾 D2D 吞吐量的提升与蜂窝系统性能的保持，也就意味着在蜂窝系统性能不受影响的条件下，提高了整个通信系统的吞吐量。

1　蜂窝系统下的 D2D 通信

1.1　系统框架的构建

在对蜂窝系统的资源分配进行优化时，一般会根据实际需要来选择不同的优化目标，如通信链路选择、终端间的干扰和频带宽度等。本文选择的优化目标是终端间的干扰与通信链路选择相结合，通过对干扰的抑制和链路最大化匹配，达到优化资源分配和提升 D2D 吞吐量的目的。在整个通信系统内，D2D 终端产生的干扰只能影响到上行链路中的 BS，但对下行链路的影响范围则包括众多的蜂窝终端，结果难以控制[6]。同时下行链路 RB 利用率要高于上行链路，故本文考虑的是 D2D 通信发生在蜂窝系统上行链路中。图 1 描述了蜂窝系统上行链路的通信情况，图中一个 D2D 对复用蜂窝用户 UE_1、

收稿日期：2016-06-14；**修回日期：**2016-08-17　**基金项目：**国家自然科学基金资助项目(61170060)；安徽省学术和技术带头人学术科研活动资助项目(2015D046)；安徽省高等学校优秀拔尖人才资助项目(gxbjZD2016044)

作者简介：张晓明(1992-)，男，硕士研究生，主要研究方向为移动通信、无线传感器网络；李敬兆(1964-)，男，教授，博导，博士，主要研究方向为物联网、嵌入式系统(ljz_aust@126.com)；高之翔(1991-)，男，硕士研究生，主要研究方向为嵌入式 linux 开发；杨大禹(1990-)，男，博士研究生，主要研究方向为无线传感器网络、下一代通信技术.

UE_2 的 RB。UE_1 与 UE_2 上行链路的数据传输在 BS 处会受到由发送端 D2D UE_1 产生的干扰，而蜂窝用户 UE_1、UE_2 产生的干扰会影响到与其共享 RB 的接收端 D2D UE_2。

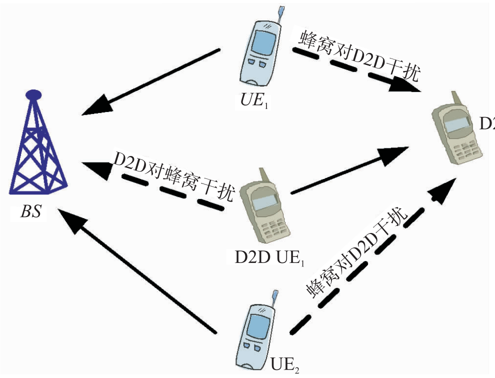

图1　蜂窝上行频段的通信情况

1.2　信干噪比与发射功率

假定单蜂窝中存在 N 个 D2D 对和 M 个 RB，分别以集合 $X=\{1,2,\cdots,N\}$ 和 $Y=\{1,2,\cdots,M\}$ 表示。根据图 1 可知，D2D 接收端的信干噪比（SINR）为

$$\gamma_{Dd}^{l}=\frac{P_D^d G_D}{N_0+\sum_c R_c^{Dd} P_C^c G_{CD}} \tag{1}$$

蜂窝用户接收到的上行链路在 BS 处的 SINR 为

$$\gamma_{Bc}^{l}=\frac{P_C^c G_{CB}}{N_0+\sum_c R_c^{Dd} P_D^d G_{DB}} \tag{2}$$

其中：$1\leqslant c\leqslant M$，$1\leqslant d\leqslant N$；P_D^d 为 D2D 终端的发射功率；P_C 为蜂窝用户的发射功率；G_D 为 D2D 终端之间的信道增益；G_{CB} 为蜂窝用户到 BS 的信道增益；R_c^{Dd} 取值为 0 和 1，1 表示 D2D 终端使用 RB，反之则是不使用；G_{CD}、G_{DB} 分别为蜂窝到 D2D 和 D2D 到 BS 的干扰链路的信道增益，N_0 为噪声功率。为保证通信的有效性，需同时考虑 D2D 接收端的 Sinr 和蜂窝接收到的上行链路在 BS 处的 Sinr 的约束，二者分别不得小于各自的阈值 $\gamma_{\mathrm{DD\_T}}$ 和 $\gamma_{\mathrm{BS\_T}}$，即 $\gamma_{Dd}^{l}\geqslant\gamma_{\mathrm{DD\_T}}$ 且 $\gamma_{BC}^{l}\geqslant\gamma_{\mathrm{BS\_T}}$，结合式（1）（2）可得

$$\begin{cases} P_D^d\geqslant\dfrac{\gamma_{\mathrm{DD\_T}}(N_0+\sum_c R_c^{Dd}P_C^c G_{CD})}{G_D} \\ P_D^d\leqslant\dfrac{\dfrac{P_C^c G_{CB}}{\gamma_{\mathrm{BS\_T}}}-N_0}{\sum_c R_c^{Dd} G_{DB}} \end{cases} \tag{3}$$

此时便可得到如式（4）所示的 D2D 发射功率范围，同时若 D2D 接收端的 SINR 过高，则可适当降低其发射功率以节能。

$$P_D^d\in\left[\frac{\gamma_{\mathrm{DD\_T}}(N_0+\sum_c R_c^{Dd}P_C^c G_{CD})}{G_D},\frac{\dfrac{P_C^c G_{CB}}{\gamma_{\mathrm{BS\_T}}}-N_0}{\sum_c R_c^{Dd} G_{DB}}\right] \tag{4}$$

本文假设 BS 可以根据当前的通信情况来估测共享资源的链路状态以及系统内各用户的 QoS 需求。D2D 对与 RB 的匹配如图 2 所示。在整个数据传输过程中，D2D 对复用蜂窝资源，而当其数量逐渐增多时，每个 D2D 对为了可以得到更多的通信资源，会尽可能与空闲的 RB 匹配，如果系统内 RB 数量有限，则会存在 D2D 对与 RB 的多对一的复用情况。

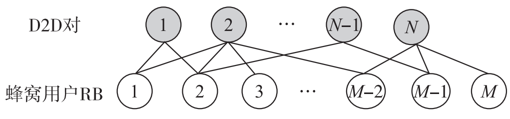

图2　D2D对与RB的匹配

2　基于 ISAP 的 D2D 资源分配优化算法

在蜂窝上行链路中，由式（1）（2）可以看出，欲使 D2D 对可以最大限度地复用 RB，则必须确保 SINR 有效的同时，也要保证资源调度的公平性，让每一个 D2D 对在通信时分配到等量的 RB 的概率相同。运用图论中最短增广路的思想，将 D2D 对复用 RB 的匹配路径记为边集 E，则 N 个 D2D 对、M 个蜂窝用户 RB 和边集 E 组成集合 $G=\{X,Y,E\}$，集合 G 可以表示 D2D 对与蜂窝用户 RB 的匹配情况。在此，ISAP 方法就是在已有的匹配路径之外拓展其他的路径，作为已有路径的增广路径，根据 SINR 值对增广的路径进行筛选，即 SINR 在一定阈值范围内时，该路径才支持 D2D 对与 RB 的复用，既实现 D2D 对与 RB 的最大化匹配，也达到抑制干扰的目的。

本算法针对系统内所有的 RB，在每个 RB 上寻找可以与之匹配的 D2D 对。通信过程中，系统会动态调整 D2D 对与 RB 的匹配路径，同时得出蜂窝上行链路接收到的 SINR 与 D2D 接收端的 SINR，根据 Sinr 的值来判断 D2D 对是否可以复用该 RB。以一个 N 行 M 列的矩阵 $\boldsymbol{S}$ 来表示 D2D 对与 RB 的匹配情况，以对边集 E 进行具体地说明。表 1 是 D2D 对复用 RB 的匹配实例，表中的值即为矩阵 $\boldsymbol{S}$ 的值，其中“1”表示复用，“0”表示不复用，并且表格中一行可以有多个“1”，而一列最多有两个“1”，因为当多个 D2D 对同时使用一个 RB 时，蜂窝链路对 D2D 的干扰增益将会增大，从而使 D2D 难以正常通信，甚至导致通信性能恶化，为了避免这一情况，规定最多只有两对 D2D 用户可以同时使用该 RB。

表 1　D2D 对与 RB 的匹配实例

D2D 对	蜂窝 UE					
	UE_1	UE_2	UE_3	…	UE_M-1	UE_M
D2D_1	0	1	1		0	0
D2D_2	0	0	0		1	1
D2D_3	1	1	1		0	0
⋮						
D2D_N-1	0	0	0		1	0
D2D_N	0	0	0		0	1

为了在蜂窝的性能不受影响的前提下最大化系统的吞吐量，本文建立吞吐量的数学模型为

$$\max\sum_{c=1}^{M}\sum_{d=1}^{N}[\log_2(1+\gamma_{Bc}^{l})+R_c^{Dd}\log_2(1+\gamma_{Dd}^{l})] \tag{5}$$

$$\text{s. t.}\quad \sum_{c=1}^{M}R_c^{Dd}\leqslant M,\ \forall\, d\in X \tag{6}$$

$$\sum_{d=1}^{N}R_c^{Dd}\leqslant 2,\ \forall\, c\in Y \tag{7}$$

其中：式（6）表示每个 D2D 对在同一时刻允许使用多个 RB；式（7）表示在同一时刻使用一个 RB 的 D2D 对的数量不超过两个。

根据上述的数学模型，要实现提高系统吞吐量的目的，即在不影响蜂窝系统性能的前提下提升 D2D 系统的吞吐量，就要实现 D2D 对复用 RB 的最优化匹配。实现该算法的具体步骤如下：

a）完成算法仿真的初始化配置，初始化的对象参数包括 D2D 终端和蜂窝用户的发射功率及其可承受的 SINR 门限值等，并对匹配矩阵进行初始化，此时 D2D 对尚未与 BS 建立匹配，即此时匹配矩阵是零矩阵。

b）BS 根据 D2D 对的数量和各用户的 QoS 需求，将 RB 转换成列表 $\mathrm{RB}_{\mathrm{list}}=(\mathrm{RB}_1,\mathrm{RB}_2,\cdots,\mathrm{RB}_M)$。

c）针对系统内存在的每一个 RB，在遍历所有的 D2D 对后，寻找可以与其匹配的 RB。

d）对于某一 RB，分别计算蜂窝上行链路接收的和 D2D 接收端的 SINR 值，若满足阈值要求，并且复用该 RB 的 D2D 对数小于 2 对，则该 D2D 对可以复用该 RB，并实时更新匹配矩阵。

e）根据上一步求得的 SINR 计算此时最大的吞吐量。

f) 更新一次匹配矩阵后,返回步骤 b)。

算法实现

```
begin
  初始化发射功率、SINR 门限以及匹配矩阵
  将 RB 转换成列表 RB_list = (RB_1, RB_2, …, RB_M)
  D2D 对的数量为 n = N,蜂窝数为 m = M
  U^(c) = Σ_{a=1}^{N} u_d^(c)    c ∈ [1, M]
  if γ^l_Dd ≥ γ_DD_T && γ^l_BC ≥ γ_BS_T && U^(c) ≤ 2
      [R_c^Dd]_dc = 1
      u_d^(c) = 1
  else [R_c^Dd]_dc = 0
      u_d^(c) = 0
  end if
  S = [R_c^Dd]_{N×M}
  while U^(c) > 2
   m = m - 1
  end while
end
```

3　仿真分析

使用 MATLAB 对系统进行仿真。首先给出仿真所需的相关参数,如表 2 所示。为了更具目的性,仿真是在单蜂窝小区中完成。作为对蜂窝通信的一种补充,向其中引入 D2D 通信时,既不能影响到原有系统的性能,也应给系统带来有效的增益。因此,这里分别给出两个参数的仿真结果,即 D2D 的吞吐量和蜂窝终端的 SINR,其结果是在 50 次实验的基础上所得。

表 2　系统仿真参数

参数	数值
仿真时间	10 000 TTI(10 s)
小区半径	500 m
系统带宽	5 MHz
蜂窝用户数	10
D2D 对数	0,2,4,6,8,10
RB 数	10
终端与基站路损模型	$128.1+37.6\times\lg(d_B[\mathrm{km}])$
终端间路损模型	$40\times\lg(d_{DE}[\mathrm{m}])$
蜂窝链路最小 SINR(γ_{BS_T})	20 dB
D2D 链路最小 SINR(γ_{DD_T})	0.5 dB
噪声指数	5 dB

注:$d_B\in[0,0.05\ \mathrm{km}]$,$d_{DE}\in[0,50\ \mathrm{m}]$

图 3 为 D2D 系统的吞吐量图。由图 3 中曲线可知,随着 D2D 对数的增加,其吞吐量也明显升高,在保持蜂窝系统性能的条件下提高了整个系统的吞吐量。但 D2D 对数越多,加上 SINR 阈值的约束,系统内 RB 的复用情况就逐渐趋于饱和,故其升高的趋势逐渐变缓。同时,从图中与随机分配算法的比较可以看出,本文算法在提升蜂窝用户 RB 的利用率上有极大的优势,从而使 D2D 的吞吐量相对更高。

图 4 为蜂窝终端的接收 SINR 的累积分布函数图(CDF)。为保证蜂窝系统业务质量,其上行链路的接收 SINR 应大于-10dB,故以 SINR 值低于-10dB 的比例作为衡量蜂窝系统优劣的指标。由图中可知,采用随机分配时,SINR 值在-10 dB 以下的比例已然占到 30% 左右,此时的蜂窝系统实际上已无法正常运行,其通信丢包率和误码率将大幅升高。而使用本文所提算法时,该比例只占 3% 左右,可保证蜂窝系统运行不受影响。

4　结束语

D2D 通信是蜂窝通信的一种辅助通信方式,二者通过共享资源的方式来提高系统的吞吐量,但也存在同频干扰问题。本文提出一种基于 ISAP 的 D2D 资源分配优化算法,一方面保证蜂窝系统性能,另一方面使 RB 的利用率最大化。本算法优化资源分配方式为,先根据 ISAP 算法拓展 D2D 对与 RB 的匹配路径,后选取 SINR 在一定阈值内的 D2D 对复用与之匹配的 RB。单蜂窝环境下的仿真结果显示,本算法完全符合要求,并比随机分配算法有更多的优势。虽然当 D2D 对数较多时,加上 SINR 阈值的限制,吞吐量将逐渐趋于饱和而上升缓慢,但并未影响到蜂窝系统的性能。现实是,单个 D2D 对与多个蜂窝用户共享 RB 的情况与实际更接近,却更为复杂,因此,下一步研究方向将是复杂环境下的 D2D 资源分配。

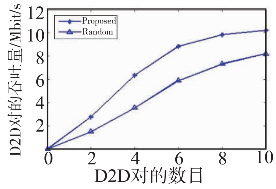

图3　D2D对的吞吐量

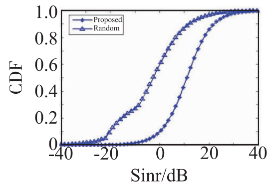

图4　蜂窝终端的接收SINR

参考文献:

[1] 周斌,胡宏林. 提高蜂窝网络中数据分发效率的 D2D 协作转发算法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(3): 704-709.

[2] 杨莲新,陈华梁,吴丹,等. D2D 通信中的基于联盟形成博弈的能量有效的无限资源共享机制[J]. 信号处理, 2014, 30(11): 1309-1314.

[3] 王斌,孟琬婷,王兆丰,等. 蜂窝控制下的 D2D 通信的无线资源分配研究[J]. 南京邮电大学学报: 自然科学版, 2015,35(3): 39-46.

[4] Janis P, Koivunen V, Ribeiro C, *et al*. Interference-aware resource allocation for D2D radio underlaying cellular networks[C]//Proc of Vehicular Technology Conference. [S. l.]: IEEE Press, 2009: 1-5.

[5] Doppler K, Yu C H, Ribeiro C, *et al*. Mode selection for device-to-device communication underlaying an LTE-advanced network[C]//Proc of IEEE Wireless Communication and Networking Conference. 2010: 1-6.

[6] 荣涛,吴斌,糜正琨,等. 一种 LTE 网络 D2D 通信资源共享算法[J]. 南京邮电大学学报, 2013, 33(3): 85-90.

[7] 黄俊伟,刘晓江. 基于 Kuhn-munkres 最优匹配的 D2D 资源分配算法[J]. 计算机应用研究, 2015, 32(3): 827-829.

[8] 兰冰,李兵兵,刘佳,等. 高密度 D2D 用户的潜在博弈资源分配算法[J]. 华南理工大学学报, 2015, 43(1): 41-52.

[9] 员陈军,王晓湘,王冬宇. 基于用户分组的 D2D 通信资源分配方案[J]. 成都信息工程学院学报, 2012, 27(6): 594-598.

[10] 程永生,朱江,林孝康. 引入 D2D 通信的蜂窝上行资源分配算法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(12): 2822-2827.

[11] 王俊义,巩志帅,符杰林,等. 基于多跳 D2D 转发的簇内数据共享方案[J]. 计算机科学, 2015, 42(8): 124-127.

[12] Lee N, Lin Xingqin. Power control for D2D underlaid cellular networks: modeling, algorithms, and analysis[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(1): 1-12.

[13] Peng Tao, Lu Qianxi, Wang Haiming, *et al*. Interference avoidance mechanisms in the hybrid cellular and device-to-device system[C]//Proc of the 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Tokyo: [s. n.], 2009: 617-621.

[14] 李方健. D2D 通信系统中的最优中继选择及功率分配策略研究[J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2014, 26(5): 605-610.

[15] Gu J, Bae S J, Choi B, *et al*. Dynamic power control mechanism for interference coordination of device-to-device communication in cellular networks[C]//Proc of the 3rd International Conference on Ubiquitous Future Network. [S. l.]: IEEE Press, 2011: 71-75.