# 基于噪声模型下D2D蜂窝系统的多用户合作功率控制分配方案

杨大禹[1] 李敬兆[1] 任 萍[2]
(安徽理工大学电气与信息工程学院 淮南 232001)[1]
(安徽理工大学计算机科学与工程学院 淮南 232001)[2]

**摘 要** 为了减轻D2D用户在通信过程中的相互干扰,提高整个蜂窝系统的吞吐量,根据D2D用户数目、信道状况和系统吞吐量的限制需求,分析干扰噪声模型约束下多用户发射功率的控制问题。通过引入玻尔兹曼常数等参数对干扰模型进行条件约束,最终得到基于效用下系统的平均发射功率和最大和速率,进而给出基于反向迭代组合算法的多用户合作博弈功率控制分配方案。仿真结果表明,该算法满足了多用户共享蜂窝网络频谱资源下的功率分配需求,终端用户发射功率经过多次反向迭代后达到纳什均衡,系统的吞吐量显著提高,频谱资源达到了较好的均衡收益。

**关键词** D2D,资源分配,功率控制,博弈算法,噪声温度,协同传输
**中图法分类号** TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.07.018

## Multi-user Cooperative Power Control Allocation Scheme for D2D Cellular System Based on Noise Model

YANG Da-yu[1] LI Jing-zhao[1] REN Ping[2]
(College of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)[1]
(College of Computer Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)[2]

**Abstract** In order to alleviate the interference between the D2D users and improve throughput of the whole cellular system during the process of communication, according to the number of D2D users, channel conditions and the limitation of the system throughput requirements, the problem of multi-user transmission power control under the interference noise model constraint was analyzed. The interference model was constrained by introducing the Boltzmann's constant and other parameters, and the utility-based of system average transmit power and maximum sum rate was got finally. What's more, the power control allocation scheme of multi-user cooperation game based on the reverse iteration combining algorithm was put forward. Simulation results show that the algorithm satisfies the power allocation requirements under the multi-user shared cellular network spectrum resource, when the transmit power of end-user reaches the Nash equilibrium after several reverse iterations, the throughput of system is improved significantly, and the spectrum resource achieves a well-balanced earnings.

**Keywords** D2D, Resource allocation, Power control, Game algorithm, Noise temperature, Cooperative transmission

## 1 引言

终端直通D2D(Device to Device)混合通信网络使得蜂窝网络的无线资源得到了进一步优化,由于设备之间是短距离直接通信,信道质量高,因此能够实现较高速率的数据传输、较低的时延和功耗。近年来,随着工业自动化和无线通信网络的进一步发展,D2D通信网络中通信资源的分配以及功率控制问题得到了更多的关注,并且伴随着移动终端通信服务的不断发展,人们对服务质量(Qos)的需求日益增加,对数据传输速率的要求也越来越高。但是,移动通信网络频谱资源是有限的,因此在满足通信过程中高效率、低延迟等要求的前提下,需要考虑终端设备在网络频谱带宽资源分配以及功率控制方面的问题。终端直通D2D(Device-to-Device)通信概念的提出,使得通信数据不需要通过基站中继来实现转发,而是在基站控制下允许两个相互临近的移动设备间建立直接的本地链路[1]。为了解决无线通信系统频谱资源匮乏的问题,第三代合作伙伴计划(3GPP)致力于长期演进(LTE)在有限的无线频谱资源下实现更高的数据率传输。终端直通一般采用3种通信方式进行传输:蜂窝模式、专用信道模式、复用信道模式。终端直通传输对提高系统的传输数据信息吞吐量、节约能耗以及合理分配通信资源有着十分重要的意义[2]。其中专用信道模式和复用信道模式下的短距离直接通信的信道质

到稿日期:2016-05-31 返修日期:2016-12-05 本文受国家自然科学基金(61170060),安徽省学术和技术带头人学术科研活动(2015D046),安徽省高等学校优秀拔尖人才资助项目(gxbjZD2016044)资助。
杨大禹(1990—),男,博士生,主要研究方向为无线传感器网络、下一代通信技术;李敬兆(1964—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为物联网、嵌入式系统,E-mail:jzhli@aust.edu.cn;任 萍(1982—),女,博士生,主要研究方向为数据融合、自然语言处理。

量高，能够实现较高的数据传输、较低的时延和较低的功耗。

虽然终端直通传输是一种新颖的通信传输方式，但是它仍存有一些不足：在复用相同频谱资源从而节约蜂窝网络的无线资源的同时，当用户数量增加，彼此之间的干扰也会随之上升，网络容量优化和功率分配问题也随之产生，从而导致整个系统的功耗随之增加。因此，为了实现每个 D2D 用户能够得到合理的资源分配，在系统设计的过程中应当考虑各单元间的信息协同传输，从而提高整体效率。文献[2]利用增广拉格朗日函数对 SINR 门限条件进行优选，针对单输入多输出 SIMO 和多输入多输出 MIMO 场景，提出了蜂窝模式和复用信道模式下的分布式能量控制策略；文献[3]针对 D2D 通信混合通信网络，提出了一种基于线性规划和二分图匹配模型的共享资源优化算法——hnRoM，通过线性规划的方法将资源优化问题转换为用户配对优化和时间资源分配问题；文献[4]提出了 D2D 簇的概念，通过利用图着色理论对 D2D 资源进行分簇，从而提高整个蜂窝网络的系统容量；文献[5]将蜂窝通信系统中的上行资源分配问题建模为二值整数规划问题，利用 Canonical 对偶理论，提出 Barrier 算法来解决对偶问题，进而得到资源分配策略。基于上述研究工作，终端直通在网络通信节能、资源利用等方面得到了很大的提升。

考虑到 D2D 协同传输系统的效用和频谱资源的有限性，终端用户之间存在相互博弈的关系，因此在对复用频谱资源下的用户功率控制分配问题进行研究时，需要以高效的系统性能为主要设计目标，以协同传输和降低能耗为最终结果。在保证用户正常通信的前提下，以干扰模型和功率控制分配为参考依据，得出对称性合作博弈下的用户功率分配策略存在性，进而得到复用信道模式下的 D2D 功率分配方案。

本文第 2 节对 D2D 蜂窝通信系统模型进行介绍，并对 D2D 的主要通信方式进行总结；第 3 节提出多用户共存的系统模型，包括 D2D 用户在空间域和频域的分布模型，总结出复用信道模式下的噪声干扰模型，对干扰噪声相关评估，并在第 3 节末尾建立通信系统能耗模型，提出基于合作博弈下的反向迭代组合算法；第 4 节给出对比算法下的仿真分析；最后总结全文。

## 2　D2D 蜂窝通信系统模型

图 1 示出了单蜂窝小区场景。

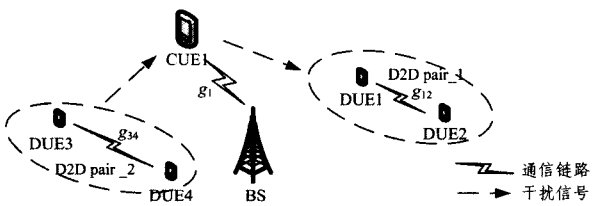



图 1　D2D 蜂窝通信系统模型

该小区内有一个蜂窝用户 CUE1 和两对 D2D 用户组(D2D pair_1 和 D2D pair_2)同时在工作，假设信道服从平坦衰落，且只考虑上行通信方式。因为蜂窝用户之间的信道是正交的，所以不存在干扰。由于 D2D 用户处于不同的工作模式状态，因此干扰的复杂性也随着 D2D 用户的数目和通信距离的增加而不断提升。为了方便分析，只考虑一个蜂窝用户 CUE1 和一对 D2D 用户(DUE1 和 DUE2)。其中，$g_1$ 是蜂窝用户 CUE1 和基站 BS 之间的信道参数，$g_{12}$，$g_{34}$ 分别是 DUE1，DUE2 和 DUE3，DUE4 之间的信道参数。

通过分析 D2D 用户的频谱资源需求、信道需求、功率发射需求和工作模式选择需求[6]，结合蜂窝系统提供的频谱资源，分析 D2D 上行空闲信道、下行空闲信道以及总空闲信道、预估需求信道的均比，可以得出上行通信方式下的 D2D 的 3 种工作模式，如表 1 所列。

表 1　D2D 3 种通信工作模式

| 通信方式 | 通信距离 | 频谱利用率 | 干扰 | 信道质量 |
|---|---|---|---|---|
| 蜂窝模式 | 较远 | 较低 | 较低 | 低 |
| 专用信道模式 | 较近 | 低 | 无 | 较高 |
| 复用信道模式 | 适中 | 高 | 高 | 高 |

(1)蜂窝模式：主要适用于距离相对较远的用户。该通信模式与传统的蜂窝通信模式一样，即通过基站的中继来实现终端用户之间的信息传输。

(2)专用信道模式：在该通信模式下，用户之间直接通信，不需要基站中继传输。D2D 用户和蜂窝用户使用不同的频率，且各自占用信道资源的一部分，通信过程中不存在干扰。

(3)复用信道模式：在该模式下，D2D 用户两两直接通信，与专用信道模式的区别在于，基站通过对信道资源的合理分配和功率的控制，使得终端用户复用蜂窝用户信道，彼此之间会产生一定的干扰。

## 3　多用户共存系统模型

### 3.1　D2D 多用户共存模型

#### 3.1.1　空间域的分布模型

在单蜂窝小区上行传输的场景中，蜂窝用户和终端用户空间域的分布模型如图 2 所示，接收端用户接收发送端用户传来的数据信号，同时接收蜂窝用户的干扰信号，基站也会接收来自发送端用户的干扰信号，可以令 $h_{cr}$ 表示蜂窝用户和接收端用户之间的增益，$h_{cb}$ 表示蜂窝用户和基站之间的增益，$h_{tb}$ 表示发送端用户和基站之间的增益，$h_{tr}$ 表示发送端和接收端用户之间的增益。

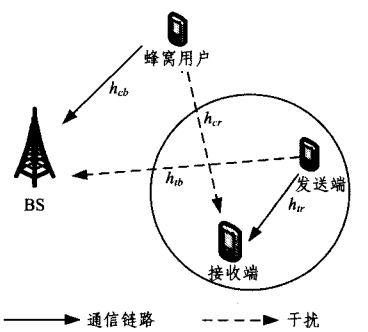



图 2　空间域分布模型

在空间域分布模型中，主要考虑上行通信链路资源和发送端用户的功率控制及链路资源分配问题，并且还需要考虑复用资源下的基站累计干扰问题，通过引入文献[7]中提出的接收信号模型进行相关模型的建立，其中 $M$ 对 D2D 用户共

享上行链路通信资源，接收端信号可表示为：

$$y=\sqrt{x_0 r_0^{-a} P_{cue}}\cdot h_{cb}\cdot s_{cue}+\sum_{i=1}^{M}\sqrt{x_i r_i^{-a} P_{di}}\cdot h_{0i}\cdot S_{Di}+n_0$$

3.1.2 频域的分布模型

如图 3 所示，在频域的分布模型中，D2D 终端用户所占用的总带宽为 $W$，单位为 Hz，不同的终端用户所占用的带宽可以分成 $n$ 个子带，大小分别为 $b_1,b_2,\cdots,b_n$，即 $\sum_{i=1}^{n}b_i=W$。其中，当复用信道工作模式下终端用户和蜂窝用户的频率相同时，可通过研究终端用户和蜂窝用户通信过程中所占用的带宽资源得到相应的频域模型。

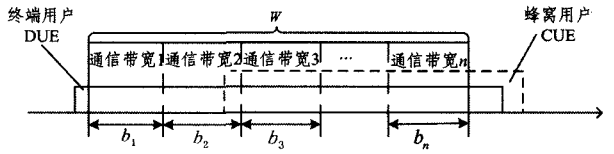



图 3 频域分布模型

### 3.2 D2D 多用户共存下的干扰噪声模型

本节对上行通信过程中 D2D 多用户共存下的干扰噪声模型进行研究，令系统有 $K$ 个子信道，$N$ 组用户，每一组用户包括发送端和接收端，且用户彼此之间存在干扰。

$K$ 个子信道下的用户干扰可表示为：

$$I_n^{(K)}=[I_n^{(1)},I_n^{(2)},\cdots,I_n^{(k)}]=\sum_{i=1,i\neq n}^{N}p_i^{(k)}g_{in}^{(k)} \tag{1}$$

终端用户接收到的干扰主要包括加性高斯白噪声(AWGN)和来自蜂窝用户的干扰信号，其中高斯脉冲的一般表现形式为：

$$p(t)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\exp\left(-\frac{(t-\mu)^2}{(2\sigma)^2}\right) \tag{2}$$

其中，$\mu$ 表示高斯随机数，$\sigma$ 表示标准差。如图 4 所示，当 $\mu=0$，$\sigma=0.1$ 时，标准化后的高斯脉冲[8]可表示为：

$$p(t)=\frac{10}{\sqrt{2\pi}}\exp(-25t^2) \tag{3}$$

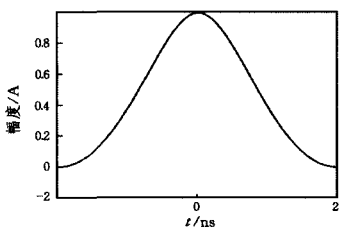
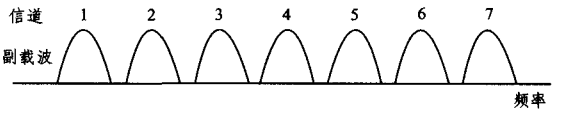


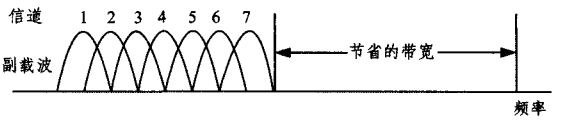

图 4 标准化后的高斯脉冲

3.2.1 OFDM-CDMA 通信系统

正交频分多路复用技术(OFDM)是基于 IEEE 802.11n 通信协议系统通过多载波调制技术实现的，其基本思想是在一定频率下，利用紧密间隔的正交副载波传输数据。正交频分多路复用技术经常应用于一些有限的信道场景，如多径衰落下的用户频率选择问题，从而有效降低信息传递过程中码间串扰(ISI)和信息传递过程中的占空比[9]。图 5(a)示出了频分多路复用技术(FDM)，每一个副载波的频域互不重叠，为了减少副载波之间的相互干扰，它们之间需要保留足够的频率间隔，因此会造成频域资源利用率降低。但对于正交频分多路复用技术而言，由于副载波之间的重叠，在节省带宽的同时提高了频谱的利用率，如图 5(b)所示。




(a)频分多路复用技术 FDM




(b)正交频分多路复用技术 OFDM

图 5

正交频分复用技术 OFDM 系统模型如图 6 所示。首先，在发送端，信道被分成若干个正交子信道，输入的串行高速数据流同时被转化为并行格式；然后，每个载波中的并行数据可通过传统调制方法，如 QPSK 和 QAM 进行调制，从而降低子信道之间的码间干扰。当所需的频谱资源用完时，在保护间隔周期(也被称为循环前缀(CP))，通过快速傅里叶逆变换(IFFT)形成 OFDM 码元。在接收端接收到载波信号时，通过 FFT 获得并串转换之后，每一个载波被解调后输出[10]。

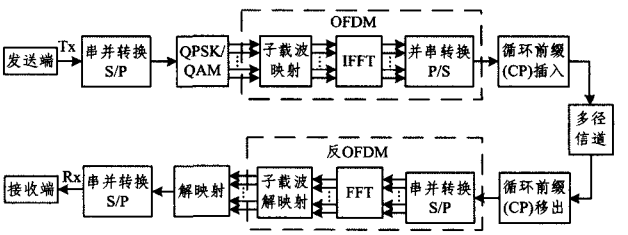



图 6 OFDM 系统模型

3.2.2 干扰噪声评估

干扰噪声比($I/N$)表示终端用户接收到干扰噪声功率和接收机噪声基底的功率比值，通常应用于干扰噪声模型评估方法中。射频干扰主要来自于相同频段传输不同信号的干扰、相邻频段传输泄露所造成的干扰以及非通信源干扰，如微波炉、电子开关等引起的干扰。它是多种独立辐射的组合，因此在 SINR 的估计过程中，必须考虑射频干扰的影响[11]。

干扰噪声模型最初由美国联邦通信委员会(FCC)在研究无线超宽带传输限制问题时提出，并基于 IEEE 802.11n 协议得出了最大干扰噪声 $I_{MAX}$ 的简化模型和计算方法，单位为 dBm，可以表示为：

$$I_{th}=I/N+N \tag{4}$$

在接收机的中频(IF)输出维持在一个可以接受的性能标准条件下，$I/N$ 表示所允许最大平均值或最大值的干扰噪声比，单位为 dB，$N$ 表示接收机固有噪声，单位为 dBm。

$$N=10\log K+10\log T+10\log B+NF \tag{5}$$

其中，$K$ 表示玻尔兹曼常数，一般为 $1.38\times10^{-20}$，单位为 mW/K/Hz；$T$ 表示系统噪声温度，单位为 K；$B$ 表示接收机中频带宽，单位为 Hz；$NF$ 为噪声系数，单位为 dB。

表 2 列举了在一定带宽下[12]，不同工作频率下 D2D 用户的最大可接受干扰，可以得出：工作带宽越大的蜂窝通信系统具有越高的抗干扰容错能力。

表 2　IEEE 802.11n 下 D2D 用户的最大可接受干扰

| IEEE 802.11n 工作频率 /GHz | IEEE 802.11n 工作带宽 /MHz | $I_{th}$ /dBm |
|---|---|---|
| 2.417－2.437 | 20 | －105.62 |
| 5.170－5.190 | 20 | －105.62 |
| 5.160－5.200 | 40 | －102.61 |

### 3.3　D2D 多用户共存下干扰噪声模型

在 3.1 节中提出了 D2D 多用户共存的空间域和频域分布模型，令 $J_n^{(l)}$ 为用户复用相同资源的博弈链路的集合：

$$J_n^{(l)}=P_l g_l \tag{6}$$

根据 Shannon 信道容量公式，$n$ 个 D2D 终端用户下的系统传输速率为[13]：

$$R_n=\Delta f\log_2\left(1+\frac{|h_{dd}|^2P_n}{\sigma_{awgn}^2+\sum_{l=1}^{N}J_n^{(l)}}\right) \tag{7}$$

其中，$\sigma_{awgn}^2$ 为加性高斯白噪声功率。每个 D2D 用户的所占子带宽积累在一起便成为了整个 D2D 蜂窝网络下的运行总带宽，整个系统的和速率为：

$$\begin{aligned}C_{total}&=\max_{P_n}\sum_{n=1}^{N}\Delta f_n\log_2\left(1+\log_2\left(1+\frac{|h_{dd}|}{\sigma_{awgn}^2+\sum_{l=1}^{N}J_n^{(l)}}\right)\right)\\&=\max_{P_n}\sum_{n=1}^{N}\Delta f_nR_n\end{aligned} \tag{8}$$

约束条件为：

$$\sum_{l=1}^{N}\sum_{n=1}^{N}I_l^{(n)}\leqslant I_{th} \tag{9}$$

$$P_n\geqslant 0,\forall n=1,2,\cdots,N \tag{10}$$

因为 $\log_2(*)$ 是凹函数，其在坐标轴内单调递增，并且凹函数的和仍然是凹函数，为了求解凹函数的最大值问题，可以将其转化为一个求解负的凹函数最小值问题。显然，该问题转化为对凹函数的凸优化。在上述情况下，可以通过引用拉格朗日乘子 $\nu$ 和拉格朗日乘子 $\lambda_n$ 集合分别对不等式(9)和不等式(10)进行约束。

根据 KKT 条件[14]，可以得到：

$$-\frac{1}{\frac{\sigma_{awgn}^2+\sum_{l=1}^{N}J_n^{(l)}}{|h_{dd}|^2}+P_n^*}-\lambda_n+\nu\sum_{l=1}^{N}\frac{\partial I_l^{(n)}}{\partial P_n^*}=0 \tag{11}$$

其中，$\forall n=1,2,\cdots,N,P_n^*\geqslant 0,\lambda_n\geqslant 0,\lambda_nP_n^*=0$。

由式(11)可以得到：

$$\lambda_n=\nu\sum_{l=1}^{N}\frac{\partial I_l^{(n)}}{\partial P_n^*}-\frac{1}{\frac{\sigma_{awgn}^2+\sum_{l=1}^{N}J_n^{(l)}}{|h_{dd}|^2}+P_n^*} \tag{12}$$

为了便于在约束条件(9)下求解式(12)，令松弛变量 $\lambda_n=0$，可得：

$$\nu P_n^*\sum_{l=1}^{N}\frac{\partial I_l^{(n)}}{P_n^*}-\frac{P_n^*}{\frac{\sigma_{awgn}^2+\sum_{l=1}^{N}J_n^{(l)}}{|h_{dd}|^2}+P_n^*}=0 \tag{13}$$

$$\frac{1}{\left(\frac{\sigma_{awgn}^2+\sum_{l=1}^{N}J_n^{(l)}}{|h_{dd}|^2}+P_n^*\right)\frac{\partial I_l^n}{P_n^*}}\leqslant\nu \tag{14}$$

令 $\frac{\partial I_l^{(n)}}{\partial P_n^*}$ 为 $K_l^{(n)}$，且

$$K_l^{(n)}=|h_{cd}|^2\int_{d_{nl}-\Delta f/2}^{d_{nl}+\Delta f/2}\exp(-(2\pi f\sigma)^2)\mathrm{d}f \tag{15}$$

从式(14)可以得到，如果

$$\nu<\frac{1}{\left(\frac{\sigma_{awgn}^2+\sum_{l=1}^{N}J_n^{(l)}}{|h_{dd}|^2}\right)\sum_{l=1}^{N}K_l^{(n)}}$$

则，$P_n^*>0$。从式(13)可以得到：

$$P_n^*=\frac{1}{\nu\sum_{l=1}^{N}K_l^{(n)}}-\frac{\sigma_{awgn}^2+\sum_{l=1}^{N}J_n^{(l)}}{|h_{dd}|^2} \tag{16}$$

同时，当

$$\nu\geqslant\frac{1}{\left(\frac{\sigma_{awgn}^2+\sum_{l=1}^{N}J_n^{(l)}}{|h_{dd}|^2}\right)\sum_{l=1}^{N}K_l^{(n)}} \tag{17}$$

多 D2D 用户的功率分配可表示为：

$$P_n^*=\max\left\{0,\frac{1}{\left(\frac{\sigma_{awgn}^2+\sum_{l=1}^{N}}{|h_{dd}|^2}\right)\sum_{l=1}^{N}K_l^{(n)}}\right\} \tag{18}$$

将式(18)代入式(9)，可以得到：

$$\sum_{l=n}^{N}\sum_{n=1}^{N}K_l^{(n)}\max\left\{0,\frac{1}{\left(\frac{\sigma_{awgn}^2+\sum_{l=1}^{N}}{|h_{dd}|^2}\right)\sum_{l=1}^{N}K_l^{(n)}}\right\}\leqslant I_{th} \tag{19}$$

由式(19)可以得到，当不等式左右两边相等时，噪声干扰 $I_{th}$ 取得最小值，故得到噪声干扰的最小门限 $I_{\min}$ 为：

$$\sum_{l=n}^{N}\sum_{n=1}^{N}K_l^{(n)}\max\left\{0,\frac{1}{\left(\frac{\sigma_{awgn}^2+\sum_{l=1}^{N}}{|h_{dd}|^2}\right)\sum_{l=1}^{N}K_l^{(n)}}\right\}=I_{\min} \tag{20}$$

其中，D2D 的用户平均发射功率 $P_{eq}$ 可表示为：

$$P_{eq}=\frac{I_{th}}{\sum_{l=1}^{N}\sum_{n=1}^{N}K_l^{(n)}} \tag{21}$$

因此，整个系统的最大和速率可表示为：

$$C_{eq}=\sum_{n=1}^{N}\Delta f\log_2\left(1+\frac{|h_{dd}|^2P_{eq}}{\sigma_{awgn}^2+\sum_{l=1}^{N}J_n^{(l)}}\right) \tag{22}$$

综上所述，结合 3.2 节中的干扰噪声模型，最终推导出基于效用下的整个系统的发射功率(式(21))和系统最大和速率(式(22))。

### 3.4　D2D 通信系统能效模型建立

如图 7 所示，在上行周期中的单个蜂窝网络中，用户分为蜂窝用户和终端用户，该场景下，$n$ 个终端用户 UEn 成对出现，其信息传递主要是蜂窝用户与终端用户之间的传输。D2D 用户通常是以一组的方式出现，每一组包括信息的发送端和接收端。在上行资源的分配过程中，一个蜂窝用户 UEn-2 和两对 D2D 用户(UEn-4 和 UEn-3，UEn 和 UEn-1)共同复用相同的频谱资源，其中 UEn-1，UEn-3 为发送端，接收来自 UEn，UEn-4 的信息并传送给基站 BS，其中 UEn 和 UEn-4 是接收端。为了满足通信质量要求，UEn-4 和 UEn-3，UEn 和 UEn-1 之间的通信距离都要小于 D2D 通信中的最大间隔距离，且通信过程中存在干扰。

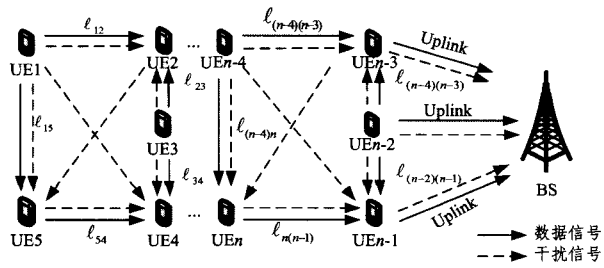



图 7 上行周期过程中单个 LTE 蜂窝网络的多用户 D2D 通信系统

令 D2D 系统模型集合 $G=(U,L,D,P,\xi)$，其中，$UE_n=\{UE_1,UE_2,\cdots,UE_n\}\in U$ 是终端用户 UE 的集合；$L_{nm}=\{\ell_{12},\ell_{23},\cdots,\ell_{nm}\}\in L$ 表示博弈链路集合；$D_{UE_n}=\{d_{UE_1},d_{UE_2},\cdots,d_{UE_n}\}\in D$ 代表资源分配策略集；$P_{UE_n}=\{p_{UE_1},p_{UE_2},\cdots,p_{UE_n}\}\in P$ 表示用户发射功率的选择策略集；$P_{UF_n}=\{p_{UE_1},p_{UE_2},\cdots,p_{UE_n}\}\in P$，$\xi:P\to R^{UL}$ 是每个用户分配到功率的策略集，其中 $\xi(p)=\{\xi_1(p),\xi_2(p),\cdots,\xi_n(p)\}$ 为用户在功率控制决策下的代价函数。

因为终端设备通信过程中的通信链路不一样，故有：

$$\ell_{12}\neq\ell_{23}\neq\cdots\neq\ell_{nm},n\in(1,2,\cdots,n),m\in(2,3,\cdots,n-1)$$

从博弈论中的对称结构理论可以得出，当对于任意终端用户 UE 序列集有：$\eta=\psi\to\psi,\forall i,\xi_i(UE_1,UE_2,\cdots,UE_n)=\xi_{\eta^{-1}(i)}(UE_{\eta(1)},UE_{\eta(2)},\cdots,UE_{\eta(n)})$ 成立时，称 $n$ 个蜂窝用户合作博弈具有对称结构。

如果对于任意终端用户 UE 序列集有：$\eta=\psi\to\psi,\forall i,\xi_i(UE_1,UE_2,\cdots,UE_n)=\xi_1(UE_{\eta(1)},UE_{\eta(2)},\cdots,UE_{\eta(n)})$ 成立时，则称 $n$ 个蜂窝用户合作博弈具有超对称性。为了考虑一般性，这里只讨论具有对称性合作博弈的 $n$ 个蜂窝用户。

令 $n$ 个蜂窝用户具有 $m$ 个功率分配策略，其相关函数可以用一个 $m\times m$ 的矩阵来表示[15]，而其参与的合作谈判的支付配置策略集合可表示为 $T=(T_1,T_2,\cdots,T_m)$，可以得到：

$$\forall i\in(1,2,\cdots,m),T_i=\begin{bmatrix}t_{11i} & t_{12i} & \cdots & t_{1mi}\\ t_{21i} & t_{22i} & \cdots & t_{2mi}\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ t_{m1i} & t_{m2i} & \cdots & t_{mmi}\end{bmatrix} \tag{23}$$

特别地，当 $n=3$ 且 3 个用户之间具有 2 个不同策略时，有：

$$T=\left(\begin{pmatrix}t_{111} & t_{121}\\ t_{211} & t_{221}\end{pmatrix},\begin{pmatrix}t_{112} & t_{122}\\ t_{212} & t_{222}\end{pmatrix}\right) \tag{24}$$

则用户 $i$ 和用户 $j$ 在路径 $\ell_{ij}$ 的功率分配策略可以表示为 $\lambda_i$，而所有路径下的混合策略可以表示为 $\Gamma_i$：

$$\Gamma_i=\{\lambda_i\in R^m:\lambda_{i1}=\{\lambda_{i1},\lambda_{i2},\cdots,\lambda_{im}\}\} \tag{25}$$

其中，$\lambda_{ij}\geqslant 0,\sum_{j=1}^{m}\lambda_{ij}=1$。

**定理 1** 对于对称合作博弈，如果 $\lambda\in\Gamma_{OE}$，则对于任意 $s\in SP(\lambda)$，有 $E(\theta^s,\lambda^{n-1})=E(\lambda,\lambda^{n-1})$ 为常数；如果 $\lambda\in\text{int }\Gamma$，当且仅当 $E(\theta^s,\lambda^{n-1})=E(\lambda,\lambda^{n-1})$ 为常数时，有 $\lambda\in\Gamma_{OE}$。

证明：这里利用反证法证明。如果 $\lambda\in\Gamma_{OE}$，对于所有 $s$，有 $E(\theta^s,\lambda^{n-1})\leqslant E(\lambda,\lambda^{n-1})$，如果存在 $s\in SP(\lambda)$ 使得 $E(\theta^s,\lambda^{n-1})<E(\lambda,\lambda^{n-1})$，则有：

$$\sum_{s\in SP(\lambda)}\lambda_iE(\theta^s,\lambda^{n-1})<\sum_{s\in SP(\lambda)}\lambda_iE(\lambda,\lambda^{n-1})$$

而 $\sum_{s\in SP(\lambda)}\lambda_iE(\theta^s,\lambda^{n-1})=E(\lambda,\lambda^{n-1})$，$\sum_{s\in SP(\lambda)}\lambda_iE(\lambda,\lambda^{n-1})=E(\lambda,\lambda^{n-1})$。

可见，不可能存在 $E(\lambda,\lambda^{n-1})=E(\lambda,\lambda^{n-1})$。同样，如果 $\lambda\in\text{int }\Gamma$，对于任意 $s\in SP(\lambda)$，$E(\theta^s,\lambda^{n-1})=E(\lambda,\lambda^{n-1})$，则有：

$$\sum_{s\in SP(\beta)}\beta_iE(\theta^s,\lambda^{n-1})=\sum_{s\in SP(\beta)}\beta_iE(\lambda,\lambda^{n-1})$$

而 $\sum_{s\in SP(\beta)}\beta_iE(\theta^s,\lambda^{n-1})=E(\lambda,\lambda^{n-1})$，$\sum_{s\in SP(\beta)}\beta_iE(\lambda,\lambda^{n-1})=E(\lambda,\lambda^{n-1})$。故，常数 $E(\beta,\lambda^{n-1})=E(\lambda,\lambda^{n-1})$ 成立，$\lambda\in\Gamma_{OE}$。

### 3.5 反向迭代组合算法描述

组合竞拍(Combinatorial Auctions，CAs)是一种非常适用于解决资源分配问题的方法，用户作为竞拍者(bidder)可对不同的系统资源提出要求并付出相应的代价，主动参与资源竞拍。在蜂窝网络中，由于系统的吞吐量不仅取决于终端用户的数目，还与终端用户的发射功率有关，因此采用反向迭代组合算法能实现功率分配，其流程如下：

步骤 1 令终端用户发射控制功率为 $P_{rc(n)}$，平均发射功率初始值为 $P_{eq}$，用户初始值为 $n=1,m=2$。

步骤 2 接收端用户 $m$ 接收发送端用户 $n$ 发射的功率信号。

步骤 3 构建功率分配策略集 $T$，根据式(21)计算平均发射功率 $P_{eq}$。

步骤 4 比较接收端用户接收到的功率信息 $P_{rc(m)}$ 和平均发射功率 $P_{eq}$。

步骤 5 若 $P_{rc(n)}<P_{eq}$，则 $n=n+1,m=m+1$ 满足，返回步骤 2。

步骤 6 搜索功率分配策略集 $T$ 中满足功率分配的策略，对终端用户进行发射功率控制。

## 4 仿真分析

为了衡量本文功率控制分配方案的有效性，在单蜂窝小区场景下设计相关算法的对比实验。D2D 用户随机分布在小区中，用户数目为 90，上行频谱资源被均分到 $N=20$ 的子信道中，通过分析系统吞吐量和能耗进行有效性验证，其中接收端功率如文献[16]所示，发送端功率为本文的功率分配方案的发射功率，部分仿真参数如表 3 所列。

表 3 仿真参数

| 仿真参数 | 参数取值 |
|---|---|
| 小区半径/m | 1000 |
| 载波频率/GHz | 1.5 |
| 系统带宽/MHz | 10 |
| 系统噪声温度/K | 293 |
| 阴影衰落标准差/dB | 6 |
| 高斯脉冲形成因子/s | $0.2\times10^{-9}$ |

如图 8 所示，可以得到在相同用户对数下，本文提出的基于噪声模型下的反向迭代组合算法比文献[16]提出的遗传算法(GA)和 Random 算法的系统吞吐量高。这是因为随着 D2D 用户数目的增加，噪声干扰问题也会逐渐体现出来，随机分配算法没有考虑噪声干扰，系统吞吐量会相应地受到影响。文献[17]提出的 GA 算法分析了各用户之间的接受 SINR 公平性下的功率分配，但并没有考虑频谱资源分配问题，随着距离的增加，GA 算法下的部分 D2D 用户发射功率达到最大值。仿真结果表明，本文提出的算法的系统吞吐量约是 GA 算法的 1.07 倍，且系统频谱资源得到了均衡分配。

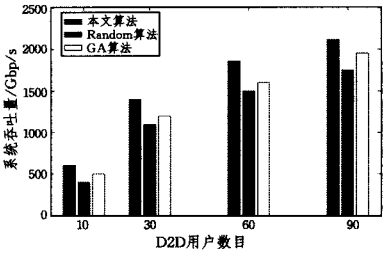



图 8　3 种算法的系统吞吐量比较

在系统能耗分析方面，如图 9 所示，GA 算法和 Random 算法下的系统能耗明显高于本文所提算法，这是因为 D2D 用户之间的通信距离增加，GA 算法下的频谱资源不能得到很好的分配，超出了 SINR 阈值下的终端用户控制功率分配，失去了均衡的意义。

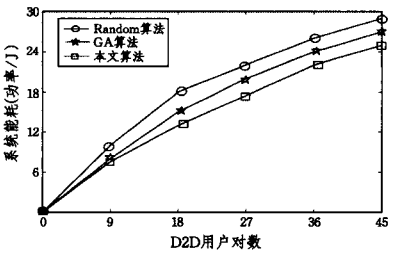



图 9　3 种算法的系统能耗比较

**结束语**　在上行通信过程中，用户的功率控制分配影响着系统的整体性能，本文通过分析干扰噪声对蜂窝系统中多对 D2D 用户的功率控制影响，推导出噪声干扰模型下用户的平均发射功率和系统最大和速率。同时基于博弈论的角度提出多用户合作功率控制分配策略，并证明其对称性合作博弈的存在性，再以反向迭代组合的方式进行功率策略的迭代优选，从而得到最终合作功率控制分配方案。在保证所有用户建立通信的前提下，随着用户间距离的增加，该算法能够有效地实现功率控制分配，提高系统的吞吐量，降低能耗。

## 参 考 文 献


[1] EU Z A, TAN H P, SEAH W K G. Design and performance analysis of MAC schemes for Wireless Sensor Networks Powered by Ambient Energy Harvesting[J]. Ad Hoc Networks, 2011, 9(3): 300-323.

[2] FODOR G, REIDER N. A Distributed Power Control Scheme for Cellular Network Assisted D2D Communications[J]. Global Telecommunications Conference, 2012, 58(11): 1-6.

[3] QIAN C, QIAN L P, WU H, et al. System Throughput Optimization for Hybrid Device-to-Device Cellular Networks[J]. Computer Science, 2016, 43(1): 145-148. (in Chinese)
钱程，钱丽萍，武航，等. 混合 D2D 蜂窝网络的系统吞吐量优化[J]. 计算机科学，2016，43(1)：145-148.

[4] HE D Q, WANG B, JI W J, et al. D2D clustering resource allocation scheme based on graph-coloring underlaying LTE networks [J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications(Nature Science Edition), 2015, 35(6): 44-50. (in Chinese)
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.

[5] CHENG Y S, ZHU J, LIN X K. Uplink resource allocation in Device-to-Device enabled cellular networks[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2014, 36(12): 2822-2827. (in Chinese)
程永生，朱江，林孝康. 引入 D2D 通信的蜂窝网上行资源分配算法[J]. 电子与信息学报，2014，36(12)：2822-2827.

[6] YU C H, DOPPLER K, RIBEIRO C B, et al. Resource Sharing Optimization for Device-to-Device Communication Under laying Cellular Networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(8): 2752-2763.

[7] CAI Y, LIU X, SHAO S X, et al. Performance research of multi-pair D2D communication underlying the cellular networks[J]. Computer Engineering and Application, 2015, 51(9): 93-97. (in Chinese)
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.

[8] RUDZINSKI A. Normalized Gaussian approach to statistical modeling of OFDM signals[J]. Journal of Telecommunications & Information Technology, 2014, 61(1): 682-690.

[9] TIWARI E, VARADE S. Transmit Beamforming for Performance Enhancement of IEEE 802. 16e Mobile WiMAX[J]. International Journal of Soft Computing & Engineering, 2013, 2(6).

[10] LI Z, LIANG Q, WANG W, et al. Capacity optimization of ultra-wide band system under the coexistence with IEEE 802. 11n[C]// International Symposium on Communications and Information Technologies. IEEE, 2011: 553-557.

[11] HONG S L, LI Y M, JIN M, et al. Blind SINR estimation for OFDM system in the presence of radio frequency interference [J]. Journal on Communications, 2014, 35(6): 126-131. (in Chinese)
洪顺利，李有明，金明，等. 射频干扰环境下 OFDM 系统的盲信号干扰噪声比估计[J]. 通信学报，2014，35(6)：126-131.

[12] CHEN X J, QIANG S. Spectrum analysis of ultra-wide band signal based on Gaussian pulse[C]// Mobile Congress(GMC), 2010 Global. IEEE, 2010: 1-4.

[13] COVER T M, THOMAS J A. Elements of information theory [J]. Journal of the American Statistical Association, 2008, 103(481): 429-429.

[14] BOYD, VANDENBERGHE, FAYBUSOVICH. Convex Optimization[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2013, 51(11): 1859-1859.

[15] HUANG W J, LIU T H, XU W S, et al. Stable strategy analysis of Nash and evolutionary equilibrium based on N-person cooperative games[J]. Computer Engineering and Application, 2010, 46(17): 11-14. (in Chinese)
黄武军，刘天虎，许维胜，等. N 人合作博弈的 Nash 及演化均衡稳定策略分析[J]. 计算机工程与应用，2010，46(17)：11-14.

[16] WANG F, XU C, SONG L, et al. Energy-efficient radio resource and power allocation for device-to-device communication underlaying cellular networks[C]// International Conference on Wireless Communications & Signal Processing. 2012: 1-6.

[17] XIAO H L, WANG P, NIE Z P, et al. Power allocation Scheme based on genetic algorithm for multi-base station cooperative communication[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2014(1): 26-30. (in Chinese)
肖海林，王鹏，聂在平，等. 基于遗传算法的多基站协作通信功率分配方案[J]. 电子科技大学学报，2014(1)：26-30.