

基于干扰对齐的设备到设备功率控制算法

王珍, 李莉, 王斌, 张道煦

(上海师范大学 信息与机电工程学院, 上海 200234)

摘要: 为了使蜂窝网络系统中设备到设备(D2D)用户的速率总和最大,提出了一种基于干扰对齐(IA)的功率控制算法.该算法通过IA技术使得所有的D2D用户能够同时占用可使用的子载波;同时,控制每一个D2D用户在子载波上的功率,使所有D2D用户在对蜂窝用户(CU)产生的干扰小于干扰阈值的前提下,其速率和达到最大.仿真结果表明:与传统的基于频分多址(FDMA)的功率控制算法相比,本算法在干扰阈值为10 dBm时,所得到的D2D用户的总速率和可提升约 $6 \text{ bit} \cdot \text{S}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$.

关键词: 功率控制;设备到设备;干扰对齐;速率和;FDMA

中图分类号: TN 929.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5137(2016)02-0166-06

0 引言

设备到设备(D2D)通信技术使得蜂窝网络中的邻近用户可以无需通过基站(BS)直接与彼此进行通信,提高了网络总体频谱效率,从而允许网络接纳更多的用户. D2D通信技术是一种处理蜂窝网络中的本地流量问题的有吸引力的方法.在蜂窝网络中引入D2D通信的最初动机是为了支持邻近区域用户之间通信,如:社交网络应用、媒体共享等.假设有邻近通信的机会,D2D通信也可能增加频谱效率,提高蜂窝覆盖率,减少端至端延迟,或降低手持机功耗等.然而,尽管有这些潜在的收益,如果设计不当,D2D通信会对现有的蜂窝网络产生干扰^[1].所以,由于D2D用户和蜂窝用户(CU)在相同频谱的共存,使得通信中干扰管理具有极大的挑战性^[2].具体而言,就是D2D信号变成干扰的新来源,使蜂窝链路受到D2D传输的跨层干扰,而D2D链接不仅会受到其他D2D用户传输造成的干扰,而且会受到来自蜂窝网络链路的跨层干扰.因此,为保证CU和D2D链接成功共存,干扰管理是必不可少的而且是极其重要的.功率控制是减轻无线网络中的干扰的有效方法,它在当前的无线系统中被广泛地应用.

文献[3]对确定的单小区模型提出了一种简单的功率控制方案,主要是调节D2D用户的输出功率来保护现有的蜂窝网络的通信质量.为了最大化蜂窝网络系统的速率和,文献[4]提出了一种功率分配与资源共享模式选择相结合的方法.文献[5]中针对只有一个D2D用户接入的蜂窝网络系统提出了一种动态的功率控制方案,其目标是通过减轻D2D用户对CU的干扰提高蜂窝系统网络的性能.文献[6]中提出了一种基于频分多址(FDMA)的功率控制方法来提高D2D通信系统的性能.上述文献主要是通过控制功率来达到提高CU系统的通信速率的目的.本文作者为了最大化D2D用户的速率和,抑制其他D2D用户对D2D用户的跨层干扰,提出了一种基于IA的功率控制算法,该算法首先使用IA技术使

收稿日期: 2016-01-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(61503251)

通信作者: 李莉,中国上海市徐汇区桂林路100号,上海师范大学信息与机电工程学院,邮编:200234, E-mail: lilyxuan@shnu.edu.cn

得所有的 D2D 对之间的干扰减小到最小;同时,控制每一对 D2D 用户的功率,使在不对 CU 产生额外干扰的前提下使 D2D 用户的速率和得到最大.

1 系统模型

研究场景的系统模型如图 1 所示,在蜂窝网络系统的某个小区中有 1 个基站(BS), L 个 D2D 用户和 K 个 CU,均处于工作状态. 每个 CU 的带宽为 W ,且每个 CU 节点为单天线;每个 D2D 用户的发射天线数目、接收天线数目分别为 M_t 根和 M_r 根;当蜂窝网络的空闲频带被划分为 D 个子载波频带时,可记每个子载波频带的带宽为 Δf ,频带划分图如图 2 所示. 并且规定当 D2D 用户对 CU 产生的干扰小于最大干扰阈值(I_{th}^k)时,D2D 用户可以使用蜂窝网络的空闲频带,并且 D2D 用户按多输入多输出——正交频分复用(MIMO-OFDM)通信体制进行通信.

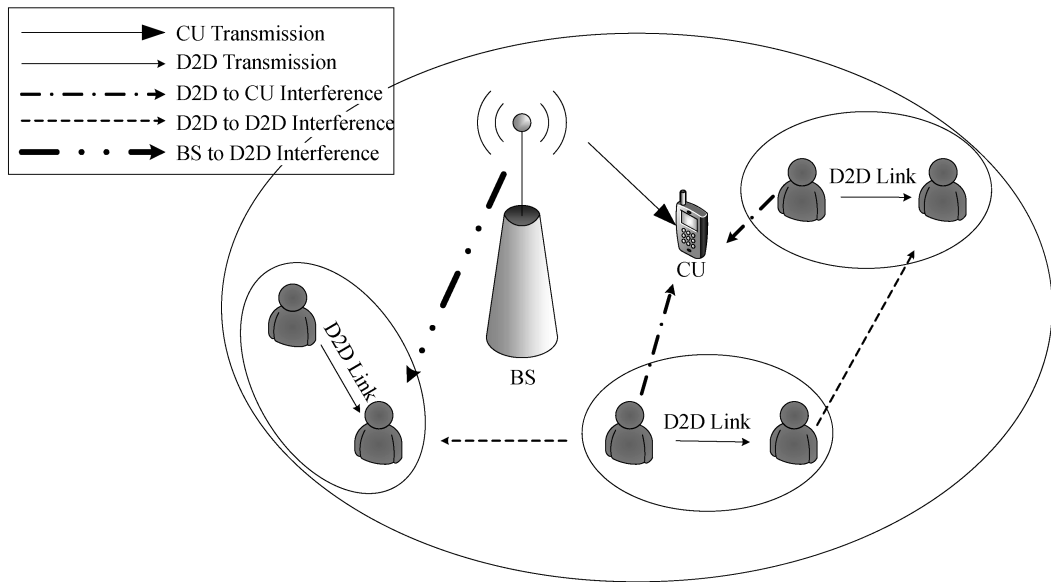


图 1 蜂窝网络某小区中蜂窝用户和 D2D 用户共存的系统模型

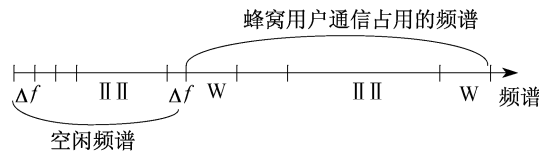


图 2 蜂窝网络频谱划分图

为了提高蜂窝网络系统的频谱利用率,运用 IA 技术使得不同的 D2D 用户可以同时占用蜂窝网络的空闲频谱. 由于多载波机制的频率正交性,IA 技术可以在每个子载波上独立运用,并可以作为发送端处线性预编码器和在接收端处干扰抑制解码器的一个组合. 所以,在第 $d(d = 1, 2, \dots, D)$ 个子载波上,长度为 n 的符号数据流 $\mathbf{X}_l^d \in C^{n \times 1}$ 在第 $l(l = 1, 2, \dots, L)$ 个 D2D 发送端发送之前,首先被 $\mathbf{V}_l^d \in C^{M_t \times n}$ 预编码,这是为了在第 l 个 D2D 用户的接收端使所需的数据在无干扰的子空间对齐,而从其他 D2D 用户发送端的干扰信号在干扰子空间被对齐^[7]. 在最佳信道状态信息(CSI)情况下,第 l 个 D2D 用户接收到第 d 个子载波上的频域信号可以表示为^[8]:

$$\mathbf{y}_l^d = \mathbf{U}_l^{dH} \mathbf{H}_l^d \mathbf{V}_l^d \mathbf{x}_l^d + \sum_{j=1, j \neq l}^L \mathbf{U}_l^{dH} \mathbf{H}_l^d \mathbf{V}_j^d \mathbf{x}_j^d + \mathbf{U}_l^{dH} \mathbf{z}_l^d, \tag{1}$$

其中上标 H 表示矩阵的共轭转置运算, $\mathbf{U}_l^d \in C^{M_R \times n}$ 为应用于第 l 个 D2D 接收端上的正交线性干扰抑制矩阵, $\mathbf{H}_{ij}^d \in C^{M_R \times M_T}$ 为第 j 个 D2D 用户发送端到第 l 个 D2D 用户接收端的信道频响; $\mathbf{z}_l^d \in C^{M_R \times 1}$ 是第 l 个 D2D 用户接收端中的加性高斯白噪声(AWGN)矩阵. 在第 l 个 D2D 用户接收端, 运用最佳 IA^[3], 满足:

$$\text{rank}(\mathbf{U}_l^{dH} \mathbf{H}_u^d \mathbf{V}_l^d) = n, \quad \forall l \text{ and } \forall d, \quad (2)$$

$$\mathbf{U}_l^{dH} \mathbf{H}_{ij}^d \mathbf{V}_j^d = 0, \quad \forall j \neq k \text{ and } \forall d. \quad (3)$$

式(2)中 $\text{rank}(\cdot)$ 表示求矩阵的秩. 当来自其他 D2D 用户的干扰都被消除后, 式(1)简化为:

$$\mathbf{y}_l^d = \mathbf{U}_l^{dH} \mathbf{H}_u^d \mathbf{V}_l^d \mathbf{x}_l^d + \mathbf{U}_l^{dH} \mathbf{z}_l^d. \quad (4)$$

则所有 D2D 对用户在第 d 个子载波上的速率和可以表示为:

$$\mathbf{R}^d = \sum_{l=1}^L \log_2 \left| \mathbf{I}_n + \frac{1}{\sigma_{AWGN}^2 + \sum_{k=1}^K J_{k,l}^d \mathbf{U}_l^{dH} \mathbf{H}_u^d \mathbf{V}_l^d \mathbf{S}_l^d \mathbf{V}_l^{dH} \mathbf{H}_u^{dH} \mathbf{U}_l^d} \right|, \quad (5)$$

其中 \mathbf{I}_n 为单位矩阵, σ_{AWGN}^2 加性高斯白噪声功率, $\mathbf{S}_l^d \in C^{n \times n}$ 为第 l 个 D2D 用户在第 d 个子载波上的输入协方差矩阵, $\sum_{k=1}^K J_{k,l}^d$ 为所有 CU 在第 d 个子载波上对第 l 个 D2D 用户的总干扰功率, 而 $J_{k,l}^d$ 为第 k 个 CU 对第 l 个 D2D 用户在第 d 个子载波上的干扰功率, 可以表示为:

$$J_{k,l}^d = \sum_{m=1}^{M_R} \left(\int_{E_d - W/2}^{E_d + W/2} |y_{k,l}^{d,m}|^2 \psi_k(e^{j\omega}) d\omega \right). \quad (6)$$

其中 E_d 表示第 d 个 D2D 用户的子载波频带中心和第 k 个 CU 频带中心之间的频谱间隔, $\psi_k(e^{j\omega}) d\omega$ 是第 k 个 CU 信号的功率谱密度(PSD), $y_{k,l}^{d,m}$ 表示在第 d 个子载波上第 l 个 D2D 用户接收端第 m 个天线和第 k 个 CU 信号之间的信道增益. 则对应的传输功率为:

$$P_l^d = \text{Tr}(\mathbf{S}_l^d). \quad (7)$$

其中 $\text{Tr}(\cdot)$ 表示求矩阵的迹; 而且, 在第 d 个子载波上由第 l 个 D2D 用户的发送端对第 k 个 CU 接受端产生的干扰 $I_{k,l}^d$ 可以表示为:

$$I_{k,l}^d = \text{Tr}(\Omega_k^d \mathbf{G}_{l,k}^d \mathbf{V}_l^d \mathbf{S}_l^d \mathbf{V}_l^{dH} \mathbf{G}_{l,k}^{dH}), \quad (8)$$

其中 $\mathbf{G}_{l,k}^d \in C^{n \times M_T}$ 为第 d 个子载波上第 l 个 D2D 发送端和第 k 个 CU 之间的信道增益, Ω_k^d 为第 d 个子载波对第 k 个 CU 的干扰因子, 可以表示为:

$$\Omega_k^d = \int_{E_d - W/2}^{E_d + W/2} \Phi^d(f) df, \quad (9)$$

其中 $\Phi^d(f)$ 是第 d 个子载波上的功率谱密度, 功率谱密度的大小取决于 D2D 通信系统使用的多载波调制技术, 考虑正交频分复用(OFDM)技术, 则 $\Phi^d(f)$ 表示为:

$$\Phi^d(f) = |G^d(f)|, \quad (10)$$

其中 $G^d(f)$ 是 D2D 系统所使用的脉冲波形的傅立叶变换. 假设是一个长度为 $T_s = D + C$ 的矩形脉冲, 其中 D 为子载波个数, C 为循环前缀长度, $|G^d(f)|^2$ 可以表示为:

$$|G^d(f)|^2 = T_s + 2 \sum_{r=1}^{T_s-1} (T_s - r) \cos(2\pi fr). \quad (11)$$

将式(11)的结果代入式(10), 式(9)即可求出干扰因子 Ω_k^d .

2 功率控制优化模型

本文作者提出的基于 IA 的功率控制算法的主要目标是在 D2D 用户对 CU 的干扰不大于干扰阈值,

且满足总的传输功率限制不大于功率限制的条件下,使 D2D 用户的总的吞吐量达到最大值.

D2D 用户的总吞吐量指标用 D2D 用户的速率和表示,则将所有 D2D 对用户在第 d 个子载波上的速率和式(5)简化为:

$$R^d = \sum_{l=1}^L \log_2 \left(1 + \frac{1}{\sigma} P_l^d x_l^d \right), \quad (12)$$

其中 x_l^d 可以表示为:

$$x_l^d \triangleq \mathbf{U}_l^{dH} \mathbf{H}_u^d \mathbf{V}_l^d \mathbf{V}_l^{dH} \mathbf{U}_l^d. \quad (13)$$

σ 为噪声干扰功率之和,

$$\sigma = \sigma_{AWGN}^2 + \sum_{k=1}^K J_{k,l}^d. \quad (14)$$

可以使用干扰对齐技术使所有的 D2D 用户同时利用蜂窝通信网络的空闲频谱资源. 此外, D2D 用户对 CU 的干扰的约束也应包括在 D2D 用户吞吐量优化问题之中. 因此, 记该问题为问题 P1, 如下所示:

$$P1: \max_{P_l^d} \sum_{d=1}^D \sum_{l=1}^L \log_2 \left(1 + \frac{1}{\sigma} P_l^d x_l^d \right) \quad (15a)$$

$$s. t. : \sum_{d=1}^D P_l^d \leq P_l \cdots \forall l, \quad (15b)$$

$$P_l^d \geq 0 \cdots \forall d \text{ 和 } \forall l, \quad (15c)$$

$$\sum_{d=1}^D \sum_{l=1}^L P_l^d \Omega_k^d \text{Tr}(\mathbf{G}_{l,k}^d \mathbf{V}_l^d \mathbf{V}_l^{dH} \mathbf{G}_{l,k}^{dH}) \leq I_{th}^k \cdots \forall k. \quad (15d)$$

式(15b)确保满足第 l 个 D2D 用户总的功率约束条件, 式(15c)是为了保证每个天线上为正的传输功率, 式(15d)是为了确保第 k 个 CU 受到 D2D 用户的总干扰不大于 I_{th}^k . 问题 P1 是一个凸优化问题, 可以计算出最优解.

3 仿真结果

为了验证所提出算法的有效性, 对该算法进行了仿真. 仿真考虑蜂窝网络系统的一个小区, 小区中包含 3 个 D2D 用户 ($L=3$), 且每个发送端和接收端配备两个天线 ($M_T = M_R = 2$), 1 个 CU 占用 10 MHz 的带宽; 传输符号长度 $n = 1$; 根据无线局域网标准 IEEE 802. 11a, 每一个子载波频带带宽 Δf 为 0. 3125 MHz, 共有 64 个子载波 ($D=64$). 噪声干扰功率之和 (σ) 的值假设为 -30 dBm. 所有的结果为超过 100 次迭代的平均, 其中信道是零均值单位方差独立同分布的高斯信道.

式(2)和(3)干扰对齐的条件可以通过预编码矩阵实现, 表示为:

$$\mathbf{V}_1^d = \text{eigh}(\mathbf{H}_{31}^d \mathbf{H}_{32}^d \mathbf{H}_{12}^{d-1} \mathbf{H}_{13}^d \mathbf{H}_{23}^{d-1} \mathbf{H}_{21}^d), \quad (16)$$

$$\mathbf{V}_2^d = (\mathbf{H}_{32}^{d-1} \mathbf{H}_{31}^d \mathbf{V}_1^n), \quad (17)$$

$$\mathbf{V}_3^d = (\mathbf{H}_{23}^{d-1} \mathbf{H}_{21}^d \mathbf{V}_1^n), \quad (18)$$

其中 eigh 表示计算矩阵的特征列向量组成的矩阵, 且第 l 个 D2D 用户的接收端的干扰抑制矩阵可以由下式得到:

$$\mathbf{U}_l^d = \text{null}(\mathbf{H}_l^d \mathbf{V}_l^d), \quad (19)$$

其中 $\text{null}(\mathbf{A})$ 表示矩阵 \mathbf{A} 的零空间的正交基作为列向量构成的矩阵.

如果 D2D 用户对数目超过了可行性条件, 用户单元可以聚成不相交的集群, 并在每个集群内应用 IA 技术^[9].

为了对性能进行比较,对以下算法进行了仿真:

(1) 基于 IA^[10]:通过问题 P1 找到最佳的功率控制方案,物理层使用 OFDM.

(2) 基于 FDMA:分配功率,物理层使用 OFDM.

Matlab 仿真软件中的 CVX 工具箱被用于仿真中,以获得最佳的控制方案^[11].

图3给出了两种算法的 D2D 用户速率总和相对于干扰阈值变化的仿真图,每个 D2D 用户所用的最大功率设定为 10 dBm.从图3可以看出,本文作者的基于干扰对齐的功率控制算法实现的总速率优于基于 FDMA 的功率控制算法实现的总速率,干扰阈值 $I_{th}^k = 10$ dBm 时,基于 IA 的功率控制算法的所得到的 D2D 用户的总速率和能够提升 $6 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 左右.

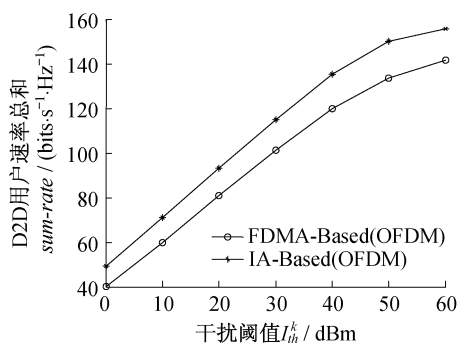


图3 D2D 用户速率总和相对于干扰阈值变化的仿真图

4 结 论

本文作者研究了 D2D 用户使用蜂窝网络空闲频谱资源时的功率控制问题.首先给出了蜂窝网络系统模型和信道模型,优化的目标是在满足 D2D 用户对 CU 产生的干扰小于干扰阈值的前提下,使 D2D 用户的速率和达到最大.为了解决这个问题,研究了一种基于 IA 的功率控制算法,并对该算法进行了详细的描述.通过仿真结果表明,所提出的算法提高了 D2D 用户的总速率.但是该算法没有考虑 CU 传输数据的速率,而且当子载波数目和 D2D 用户数不断增多时,该算法的计算复杂度越来越高,需要对算法进一步研究改进,降低其计算复杂度.

参考文献:

- [1] 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]. Wireless Communication IEEE Transactions, 2011, 10(2) : 413 - 418.
- [2] Fodor G, Dahlman E, Mildh G, et al. Design aspects of network assisted device-to-device communications [J]. Communications Magazine IEEE, 2012, 50(3) : 170 - 177.
- [3] Yu C H, Tirkkonen O, Doppler K, et al. On the performance of device-to-device underlay communication with simple power control [C] // IEEE. Vehicular Technology Conference. Barcelona: IEEE, 2009.
- [4] Yu C H, Doppler K, Ribeiro C, et al. Resource sharing optimization for device-to-device communication underlying cellular networks [J]. Wireless Communication IEEE Transaction. 2011, 10(8) : 2752 - 2763.
- [5] Gu J, Bae S J, Choi B G, et al. Dynamic power control mechanism for interference coordination of device-to-device communication in cellular networks [C] // IEEE. Ubiquitous and Future Networks. Dalian: IEEE, 2011.

- [6] Oruthota U, Tirkkonen O. L/Q Interference in Device-to-Device Underlay Communication with Uplink Power Control [C] // IEEE. Vehicular Technology Conference (VTC Spring). Glasgow : IEEE , 2015 .
- [7] Sboui L, Ghazzai H, Rezki Z, et al. Achievable rate of cognitive radio spectrum sharing MIMO channel with space alignment and interference temperature precoding [C] // IEEE. 2013 IEEE International Conference Communications (ICC). Budapest : IEEE , 2013 .
- [8] Mohammed El-Absi, Thomas Kaiser. Optimal Resource Allocation Based on Interference Alignment for OFDM and FBMC MIMO Cognitive Radio Systems [C] // IEEE. Networks and Communications (EuCNC). Bologna : IEEE , 2014 .
- [9] Chen S, Cheng R. Clustering for interference alignment in multiuser interference network [J]. Vehicular Technology, IEEE Transactions, 2014, 63 (6) : 2613 – 2624 .
- [10] Yang J W, LI L, Qiu H. Distributed interference alignment iterative algorithms in symmetric wireless network [J]. Journal of Shanghai Normal University (Natural Sciences), 2015. 44 (1) : 32 – 38 .
- [11] Grant M, Boyd S P. CVX : Matlab software for disciplined convex programming [EB/OL]. (2015 – 12 – 20) [2015 – 9 – 12] , <http://cvxr.com/cvx> .

Device to device power control algorithm based on interference alignment

WANG Zhen, LI Li, WANG Bin, ZHANG Daoxu

(College of Information, Mechanical and Electrical Engineering, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China)

Abstract: In this paper, we present a power control algorithm based on interference alignment (IA) for device to device (D2D) network. The algorithm provides the opportunity for all D2D Links to share the available subcarriers simultaneously using IA technique. Besides, it controls the power budget of each D2D pair in order to maximize the sum-rate of the system without inducing excessive interference to cellular users (CU). Simulations show that the proposed power control algorithm achieves a significant sum-rate increase up to $6 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ when the interference threshold is 10 dBm, which is compared with traditional power control algorithm based on frequency division multiple access (FDMA).

Key words: power control; D2D network; interference alignment; sum-rate; FDMA

(责任编辑:包震宇)