

蜂窝网终端直接通信匹配和调度算法

郑武, 罗荣华

(金陵科技学院网络与通信工程学院, 江苏 南京 211169)

摘要: 终端直接通信(D2D)技术可以在现有的蜂窝网络架构基础上提高覆盖、频谱利用率和功耗效率。考虑了基于正交频分复用多址(OFDMA)的蜂窝网络中D2D通信的公平资源调度问题, 基于比例公平准则将蜂窝用户和D2D用户对的相对可达速率和最大化作为目标函数, 提出了一种实用的比例公平调度(PFS)实现算法。仿真结果表明, PFS算法能同时很好地保证蜂窝用户和D2D用户的公平性和吞吐量性能。

关键词: 终端直接通信; 资源复用; 比例公平; 相对可达速率

中图分类号: TM915

文献标识码: A

文章编号: 1672-755X(2018)01-0001-05

Matching and Scheduling Algorithms of Device-to-Device Communication in Cellular Network

ZHENG Wu, LUO Rong-hua

(Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China)

Abstract: Device-to-device(D2D) communication can improve coverage, spectrum efficiency and power dissipation efficiency based on the current cellular network architecture. The fair resource scheduling for D2D communication in the orthogonal-frequency-division-multiplexing-address(OFDMA)-based cellular network is studied in this paper. Based on the proportional fairness criteria the optimization objective is formulated to maximize the sum of the relative achievable rate of both cellular users and D2D pairs. A practical proportional fairness scheduling (PFS) algorithm is proposed. The simulation results show that PFS algorithm can guarantee the excellent performance of both throughput and fairness.

Key words: device-to-device communication; resource reuse; proportional fairness; relative achievable rate

终端直接通信(Device-to-Device Communication, D2D)技术是指相距较近的终端可不借助于基站而直接进行通信。由于短距离传输在空间上有更好的频率复用, 可大大提高网络容量, 削减经过基站和核心网络转发的业务流量, 对运营商而言具有更低的部署成本和运营成本^[1]。然而, D2D用户因共享蜂窝用户的频谱资源, 造成小区内的干扰, 因此需要为蜂窝用户和D2D用户设计资源调度算法, 进行干扰控制以达到保护蜂窝用户并提高系统总性能的目的。

近年来, 已有较多文献对D2D通信的干扰控制和资源调度问题展开研究。D2D用户通信会因为距离更近、信道条件更好而分配到更多的资源, 从而对蜂窝用户造成不公平^[2]。文献[3]采用最大和速率准则来设置最优功率, 进而判定蜂窝终端与D2D对是否复用同一资源。文献[4]指出在没有完全信道状态信

收稿日期: 2017-12-18

基金项目: 金陵科技学院博士科研启动基金(jit-b-201529)

作者简介: 郑武(1972—), 男, 山东济南人, 高级工程师, 博士, 主要从事移动通信网络架构、无线资源管理等研究。

息的情况下,根据功率和中断概率限制来获得最大化的各态历经和速率。文献[5]研究了集中式和分布式的功率控制算法,旨在限制 D2D 通信造成的干扰以保证蜂窝终端的覆盖概率,同时在同一资源上复用尽可能多的 D2D 链路。上述文献以提供最大吞吐量为资源调度目标,往往会造成某些用户长期占用资源,而使得其他用户丧失服务机会,因此各用户间服务的公平性是一个必须考虑的指标,以提高各用户的平均满意度。文献[6]采用分数频率复用以降低蜂窝终端与 D2D 对之间的相互干扰,同时引入比例公平来分配资源。现有的 D2D 公平性研究着重于静态的或准动态的方式,通过预先资源的划分和分配来实施蜂窝用户与 D2D 用户的调度。本文主要研究在动态方式下,依据实时信道状态信息解决多个蜂窝用户与多对 D2D 用户的公平资源调度问题。

1 场景和系统模型

本文考虑基于正交频分复用多址(OFDMA)的无线蜂窝网络的单小区场景,基站位于小区中心,在其覆盖范围内为 N 个活动蜂窝用户和 M 对 D2D 用户提供服务,用户集合分别记为 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_i, \dots, C_N\}$ 和 $D = \{D_1, D_2, \dots, D_j, \dots, D_M\}$ 。为了提高蜂窝系统的频谱效率,D2D 对可被调度以复用蜂窝用户的上行链路资源。假设基站具有所有链路的信道状态信息,基站视信道状态和服务质量等因素调度蜂窝用户和 D2D 用户使用链路资源。

假设第 i 蜂窝用户与第 j 对 D2D 用户复用同一子信道,则两者复用资源的系统模型如图 1 所示,其中第 i 蜂窝用户与基站之间的信道增益为 $g_{i,B}$,第 j 对 D2D 用户之间的信道增益为 g_j ;对于干扰信道,第 j 对 D2D 用户发射端到基站和第 i 蜂窝用户到第 j 对 D2D 用户接收端的信道增益分别为 $h_{j,B}$ 和 $h_{i,j}$ 。在集中式调度的情形下,D2D 对需将其信道状况报告给基站。令 p_i 和 p_j 分别表示第 i 蜂窝用户和第 j 对 D2D 用户发射端的发射功率,由于复用资源的蜂窝用户端和 D2D 用户对占据同一子信道,具有相同的加性高斯白噪声的功率,记为 σ^2 ,可得第 i 蜂窝用户和第 j 对 D2D 用户在各自接收端处的信干噪比分别为

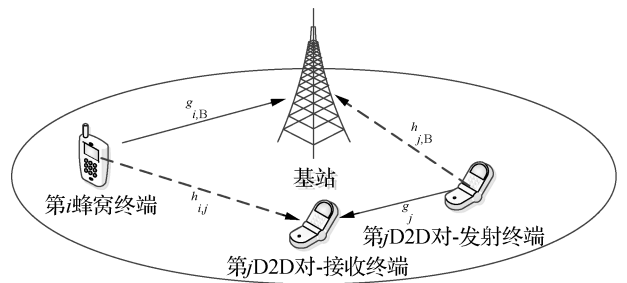


图 1 D2D 用户复用蜂窝用户上行链路资源的系统模型

由此可以进一步得到在归一化带宽下,蜂窝用户和 D2D 用户的可达速率 R_i 和 R_j 分别为

$$\gamma_i = \frac{p_i \cdot |g_{i,B}|^2}{\sigma^2 + p_j \cdot |h_{j,B}|^2} \quad (1a)$$

$$\gamma_j = \frac{p_j \cdot |g_j|^2}{\sigma^2 + p_i \cdot |h_{i,j}|^2} \quad (1b)$$

由此可以进一步得到在归一化带宽下,蜂窝用户和 D2D 用户的可达速率 R_i 和 R_j 分别为

$$R_i = \log_2(1 + \gamma_i) = \log_2 \left(1 + \frac{p_i \cdot |g_{i,B}|^2}{\sigma^2 + p_j \cdot |h_{j,B}|^2} \right) \quad (2a)$$

$$R_j = \log_2(1 + \gamma_j) = \log_2 \left(1 + \frac{p_j \cdot |g_j|^2}{\sigma^2 + p_i \cdot |h_{i,j}|^2} \right) \quad (2b)$$

2 蜂窝用户与 D2D 对的公平资源复用

2.1 公平性指标和优化目标

系统吞吐量是大多数无线系统中调度策略首先要考虑的指标。由于无线资源的稀缺性,应尽可能地挖掘一个给定的网络能达到的系统吞吐量。系统公平性是为了保证资源调度策略对所有用户都提供差距不大的服务,也是无线系统必须考虑的关键指标。经典的比例公平调度研究的是一个单基站多用户的蜂窝网络,假设有 N 个用户,每个用户有无限多积压的数据包需要从基站处接收。令 $R_i(t)$ 表示用户 i 在第 t 时隙的可达速率; $T_i(t-1)$ 表示截至第 $t-1$ 时隙时用户 i 从基站得到调度的平均速率,即

$$T_i(t-1) = \frac{\sum_{\tau=1}^{t-1} \hat{R}_i(\tau)}{(t-1)} \quad (3)$$

式中,若用户 i 在第 t 时隙被基站调度,则 $\hat{R}_i(t) = R_i(t)$; 否则 $\hat{R}_i(t) = 0$ 。令 $\frac{R_i(t)}{T_i(t-1)}$ 为用户 i 在第 t 时隙内的相对可达速率。比例公平调度准则选择具有最大相对可达速率的用户 i^* 进行传输^[7],即

$$i^* = \arg \max_i \frac{R_i(t)}{T_i(t-1)} \quad (4)$$

与此类似,对于 D2D 对的比例公平调度就是选择具有最大的相对可达速率的用户 j^* 进行传输,即 $j^* = \arg \max_j \frac{R_j(t)}{T_j(t-1)}$,式中 $R_j(t)$ 表示第 j 对 D2D 在第 t 时隙的可达速率; $T_j(t-1)$ 表示截至第 $t-1$ 时隙时,

第 j 对 D2D 的平均速率。令 $\alpha_i(t) = \frac{1}{T_i(t-1)}$, $\beta_j(t) = \frac{1}{T_j(t-1)}$,将时隙 t 省略,则第 i 蜂窝用户与第 j 对 D2D 用户复用情况下的相对可达速率的和为

$$R(p_i, p_j) = \alpha_i \cdot R_i + \beta_j \cdot R_j = \alpha_i \cdot \log_2 \left(1 + \frac{p_i \cdot |g_{i,B}|^2}{\sigma^2 + p_j \cdot |h_{j,B}|^2} \right) + \beta_j \cdot \log_2 \left(1 + \frac{p_j \cdot |g_j|^2}{\sigma^2 + p_i \cdot |h_{i,j}|^2} \right) \quad (5)$$

由此可得蜂窝用户与 D2D 用户在一对一复用情况下的优化目标为

$$R(p_i^*, p_j^*) = \max R(p_i, p_j) \quad (6)$$

$$\text{Subject to} \quad p_i \leq p_{i,\max}, C_i \in \mathcal{C} \quad (6a)$$

$$p_j \leq p_{j,\max}, D_j \in \mathcal{D} \quad (6b)$$

$$\gamma_i \geq \gamma_{i,\min}, C_i \in \mathcal{C} \quad (6c)$$

$$\gamma_j \geq \gamma_{j,\min}, D_j \in \mathcal{D} \quad (6d)$$

式(6a)和(6b)表示终端的最大发射功率受限,最大发射功率分别是 $p_{i,\max}$ 和 $p_{j,\max}$; 式(6c)和(6d)表示保证对应某业务所要求的最小传输速率,为此信号传输需满足一定的信干噪比要求,令 $\gamma_{i,\min}$ 和 $\gamma_{j,\min}$ 分别表示所需的最小信干噪比。这实质上是发射功率 p_i 和 p_j 的优化问题。本文所提出的 PFS 算法可采用分步的方法求解此问题。步骤 1:根据式(6a)~(6d)限定计算复用资源情况下的可行域,即计算在可行域中是否存在 p_i 和 p_j 满足上述条件。若存在,则进入步骤 2;若不存在,则不可复用。步骤 2:寻求复用资源情况下的最优的功率组合 (p_i^*, p_j^*) ,以使得 $R(p_i^*, p_j^*) = \max R(p_i, p_j)$ 。

2.2 复用资源可行域的确定

当 D2D 对与蜂窝终端复用资源时,由式(6a)和(6b)的最大发射功率受限、(6c)和(6d)的 QoS 保证速率限制条件出发,所获得的蜂窝用户 p_i 和 D2D 用户发射端 p_j 的取值范围就构成了复用资源的可行域。当第 i 蜂窝终端与第 j 对 D2D 使用正交资源传输信息,则相互没有干扰;此时根据式(1a)和(1b),可以得到蜂窝终端和 D2D 对的最小发射功率分别为

$$p_{i,\min} = \frac{\gamma_{i,\min} \cdot \sigma^2}{|g_{i,B}|^2} \quad (7a)$$

$$p_{j,\min} = \frac{\gamma_{j,\min} \cdot \sigma^2}{|g_j|^2} \quad (7b)$$

将式(7a)和(7b)代入式(6c)和(6d),可以得到两个超平面,若两个超平面在第一象限有交点,再加上式(6a)和(6b)的最大发射功率限制,则交点应落入由 $p_i = p_{i,\max}$ 、 $p_j = p_{j,\max}$ 以及两坐标轴所围成的矩形区域,即可行域的功率设置应满足

$$0 < \frac{(|g_j|^2 \cdot \gamma_{i,\min} + |h_{j,B}|^2 \cdot \gamma_{i,\min} \cdot \gamma_{j,\min}) \cdot \sigma^2}{|g_{i,B}|^2 \cdot |g_j|^2 - |h_{j,B}|^2 \cdot |h_{i,j}|^2 \cdot \gamma_{i,\min} \cdot \gamma_{j,\min}} < p_{i,\max} \quad (8a)$$

$$0 < \frac{(|g_{i,B}|^2 \cdot \gamma_{j,\min} + |h_{i,j}|^2 \cdot \gamma_{i,\min} \cdot \gamma_{j,\min}) \cdot \sigma^2}{|g_{i,B}|^2 \cdot |g_j|^2 - |h_{j,B}|^2 \cdot |h_{i,j}|^2 \cdot \gamma_{i,\min} \cdot \gamma_{j,\min}} < p_{j,\max} \quad (8b)$$

2.3 蜂窝与 D2D 终端的最优功率设置

在可行域中寻找最优的功率设置 p_i^* 和 p_j^* , 使得 $R(p_i^*, p_j^*) = \max R(p_i, p_j)$ 。为获得相对速率和最大化, 可证明无需进行复杂的最优化算法, 只要计算有限的几个点上的蜂窝终端和 D2D 对的发射功率, 通过比较这几个点的数值, 就可以得到最优功率设置。

定理 1: 在复用同一资源的情形下, 最优发射功率满足条件 $p_i = p_{i, \max}$ 或 $p_j = p_{j, \max}$ [8]。

定理 2: 在满足 $p_j = p_{j, \max}$ 或 $p_i = p_{i, \max}$ 的前提下, 函数 $R(p_i, p_j)$ 为凸函数 [9]。

根据上述两个定理, 可得只需将若干个功率组合代入式(6)计算, 比较并选择具有最大优化目标值的功率组合就是 (p_i^*, p_j^*) , 有

$$(p_i^*, p_j^*) = \begin{cases} \{(p_{i, \max}, p_1), (p_{i, \max}, p_2)\}, & \text{if } \frac{p_{i, \max} \cdot |g_{i, B}|^2}{\sigma^2 + p_{j, \max} \cdot |h_{j, B}|^2} \leq \gamma_{i, \min} \text{ and } \frac{p_{j, \max} \cdot |g_j|^2}{\sigma^2 + p_{i, \max} \cdot |h_{i, j}|^2} > \gamma_{j, \min}, \\ \{(p_3, p_{j, \max}), (p_4, p_{j, \max})\}, & \text{if } \frac{p_{i, \max} \cdot |g_{i, B}|^2}{\sigma^2 + p_{j, \max} \cdot |h_{j, B}|^2} > \gamma_{i, \min} \text{ and } \frac{p_{j, \max} \cdot |g_j|^2}{\sigma^2 + p_{i, \max} \cdot |h_{i, j}|^2} \leq \gamma_{j, \min}, \\ \{(p_{i, \max}, p_1), (p_{i, \max}, p_{j, \max}), (p_4, p_{j, \max})\}, & \\ & \text{if } \frac{p_{i, \max} \cdot |g_{i, B}|^2}{\sigma^2 + p_{j, \max} \cdot |h_{j, B}|^2} > \gamma_{i, \min} \text{ and } \frac{p_{j, \max} \cdot |g_j|^2}{\sigma^2 + p_{i, \max} \cdot |h_{i, j}|^2} > \gamma_{j, \min} \end{cases} \quad (9)$$

其中 $p_1 = \frac{\gamma_{j, \min} \cdot (\sigma^2 + p_{i, \max} \cdot |h_{i, j}|^2)}{|g_j|^2}$, $p_2 = \frac{p_{i, \max} \cdot |g_{i, B}|^2 - \gamma_{i, \min} \cdot \sigma^2}{\gamma_{i, \min} \cdot |h_{j, B}|^2}$, $p_3 = \frac{p_{j, \max} \cdot |g_j|^2 - \gamma_{j, \min} \cdot \sigma^2}{\gamma_{j, \min} \cdot |h_{i, j}|^2}$, $p_4 = \frac{\gamma_{i, \min} \cdot (p_{j, \max} \cdot |h_{j, B}|^2 + \sigma^2)}{|g_{i, B}|^2}$, 至此可得 \mathcal{C} 中的各个蜂窝终端与 \mathcal{D} 中的各个 D2D 对在复用资源的前提下, 且满足式(6a)~(6d)限制条件下的最优功率设置。

3 仿真实验及性能分析

3.1 仿真环境设置与分析

假设小区中蜂窝终端的数目 $N=10$, D2D 对的数目为 $M=7$, 采用 10 MHz 带宽, 每次调度 1 个蜂窝-D2D 终端复用或独立的蜂窝终端, 总共进行了 1 000 个时刻的调度, 路径损耗采用 3GPP 中所定义的模式 [10], 仿真参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数设置

参数名称	参数值
小区半径	500 m
D2D 通信的最大距离	200 m
载波频率(f_c)	2 GHz
上行链路带宽	10 MHz
终端最大发射功率	23 dBm
路损模型	$PL_{\text{LOS}} = 40 \log_{10}(d) + 7.56 - 17.3 \log_{10}(h'_1) - 17.3 \log_{10}(h'_2) + 2.7 \log_{10}(f_c)$ $PL_{\text{NLOS}} = (44.9 - 6.55 \log_{10}(h_1)) \cdot \log_{10}(d) + 5.83 \log_{10}(h_1) + 9.78 + 34.97 \log_{10}(f_c)$ 其中 LOS 发生的概率可以表示为 $P_{\text{LOS}} = \min\left(\frac{18}{d}, 1\right) \cdot (1 - e^{-\frac{d}{36}}) + e^{-\frac{d}{36}}$ 1) 蜂窝通信场景: $h_1 = 10$ m, $h'_1 = 9$ m 和 $h'_2 = 0.5$ m 2) D2D 通信场景: $h_1 = 1.5$ m, $h'_1 = 0.5$ m 和 $h'_2 = 0.5$ m
阴影衰落	标准差为 7 dB 的对数正态分布
多径衰落	瑞利分布

蜂窝用户和 D2D 用户的位置通过随机撒点获得, 在验证算法时与文献[3]采用的 max C/I 算法以及追求公平性的 Round Robin(RR)算法做了对比。

3.2 仿真结果与分析

通过实现 500 次的用户分布, 每个分布包含 1000 个调度时隙, 得到了蜂窝用户和 D2D 用户关于平均

吞吐量的累计概率密度(CDF)曲线,如图 2 所示。当采用 max C/I 算法时,大于 80%的蜂窝用户和近 80%的 D2D 用户对不能得到有效的调度,丧失了服务的公平性;而 RR 算法则追求绝对的公平,而忽略了对于信道状态信息的利用。PFS 算法都可达到两者的均衡,随着每个时隙可调度用户数目的增加,PFS 算法会有更好的性能表现。

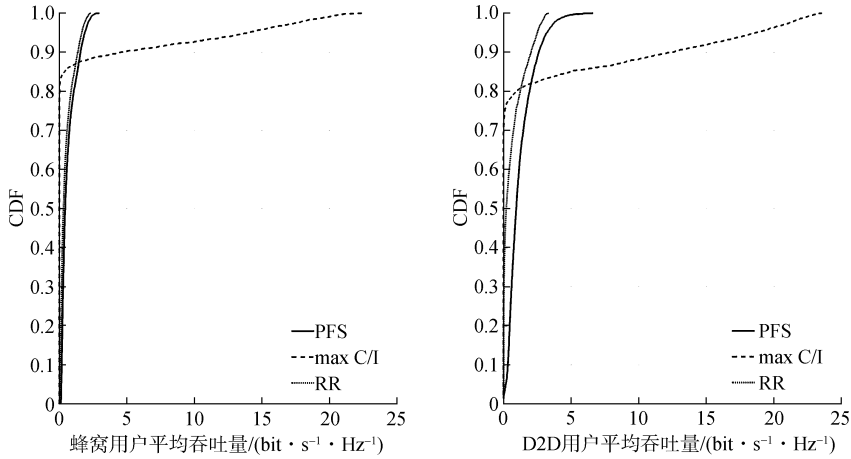


图 2 PFS、max C/I 和 RR 算法的平均吞吐量的 CDF 比较

4 结 语

本文研究了蜂窝网络中可复用同一信道资源的蜂窝用户与 D2D 用户对的调度问题。为了兼顾系统的吞吐量和公平性,本文基于比例公平调度准则,提出了 PFS 算法并分解为可行域的确定、求解最优功率组合两个步骤来实现。本文证明了最优功率组合只会在有限的几个点上产生,使得求解的过程大为简化。仿真结果也证实了 PFS 算法能同时很好地保证蜂窝用户和 D2D 用户的公平性和吞吐量性能。

参考文献:

- [1] Schulz P, Matthe M, Klessig H, et al. Latency critical IoT applications in 5G: perspective on the design of radio interface and network architecture [J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(2): 70 - 78
- [2] Yu C, Tirkkonen O, Doppler K, et al. Power optimization of device-to-device communication underlying cellular communication [C]. IEEE International Conference on Communications, 2009: 1 - 5
- [3] Feng D, Lu L, Wu Y, et al. Device-to-device communications underlying cellular networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(8): 3541 - 3551
- [4] Wang L, Tang H, Wu H, et al. Resource allocation for D2D communications underlay in rayleigh fading channels [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(2): 1159 - 1170
- [5] Lee N, Lin X, Andrews J G, et al. Power control for D2D underlaid cellular networks: modeling, algorithms and analysis [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(1): 1 - 13
- [6] Shah S T, Gu J, Hasan S F, et al. SC-FDMA-based resource allocation and power control scheme for D2D communication using LTE-A uplink resource [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2015(1): 1 - 15
- [7] Blough D M, Resta G, Santi P. Interference-aware proportional fairness for multi-rate wireless networks [C]. IEEE INFOCOM 2014-IEEE Conference on Computer Communications, 2014: 2733 - 2741
- [8] Gjendemsjo A, Gesbert D, Oien G E, et al. Optimal power allocation and scheduling for two-cell capacity maximization [C]. International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks, 2006: 1 - 6
- [9] Zheng W, Hu J, Fu Y H, et al. Cellular-D2D resource reuse algorithms based on proportional fairness [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2017: 170
- [10] 3GPP TR. 36.843, Study on LTE device to device proximity services, radio aspects [EB/OL]. (2014 - 03 - 27) [2017 - 12 - 09]. <http://www.3gpp.org>