

LTE-A 上行终端直通中面向能效的资源分配方案

朱正仓¹, 赵季红^{1,2}, 唐睿¹, 曲桦^{1,2}, 王璐瑶², 曹照鑫¹

(1. 西安交通大学电子信息工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 西安交通大学软件学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 针对 LTE-A 上行蜂窝链路与终端直通链路间的同频干扰问题, 提出一种联合资源分配方案来最大化 D2D 链路总能效。上述问题可分解为功率控制和信道分配 2 个子问题。其中, 功率控制子问题可借助 Dinkelbach 法和拉格朗日对偶得到最优解; 信道分配子问题等价于集装箱问题, 属于 NP 难问题, 因此, 提出一种启发式算法, 实现算法性能与复杂度之间的折中。仿真结果表明所提联合资源分配方案优于单一资源优化方案, 此外, 其具有多项式复杂度且其性能接近理论最优解。

关键词: 高级长期演进; 终端直通; 能效; 资源分配; 集装箱问题

中图分类号: TN929.53

文献标识码: A

Energy-efficient resource allocation scheme for device-to-device communication underlying LTE-A uplink

ZHU Zheng-cang¹, ZHAO Ji-hong^{1,2}, TANG Rui¹, QU Hua^{1,2}, WANG Lu-yao², CAO Zhao-xin¹

(1. School Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Department of Software, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To cope with the co-channel interference between cellular links and device-to-device (D2D) links concurrently transmitting with the long term evolution-advanced (LTE-A) uplink spectrum, a joint resource allocation scheme was proposed to maximize the global energy efficiency of D2D links. The above problem can be decomposed into the power control subproblem and the channel assignment subproblem. Specifically, the power control subproblem can be optimally solved with the help of Dinkelbach method and Lagrange duality. Based on the above results, the channel assignment subproblem turns out to be the set packing problem which was generally NP-hard problem, Therefore, a heuristic algorithm was further devised to achieve a tradeoff between performance and complexity. Simulations show that the proposed joint resource allocation scheme outperforms the ones where only single resource variable is optimized, and it achieves the polynomial-time complexity at only minor performance loss when compared to the global optimum.

Key words: LTE-A, device-to-device communication, energy efficiency, resource allocation, set packing problem

1 引言

随着人们生活方式的改变, 高速近距离通信的需求呈现指数性增长, 终端直通 (D2D, device-to-device) 应运而生, 其被看作是下一代无线通信系统 5G 中的关键技术之一^[1]。D2D 带来了新的通信模式, 使数据链路在设备间直接建立, 而无需通过基站中

继。其能够有效利用邻近通信对之间良好的信道环境提高频带利用率, 降低基站负载, 增加用户传输速率、延长终端待机时间并缩短端到端时延。此外, 其还能激发新的应用场景, 包括无线多跳网络^[2]、基于 D2D 多播/广播的内容分发^[3]以及物联网^[4]。正因为上述优势, D2D 受到了 3GPP 等标准化组织的关注^[5], 特别是如何在当前高级长期演进 (LTE-A/4G,

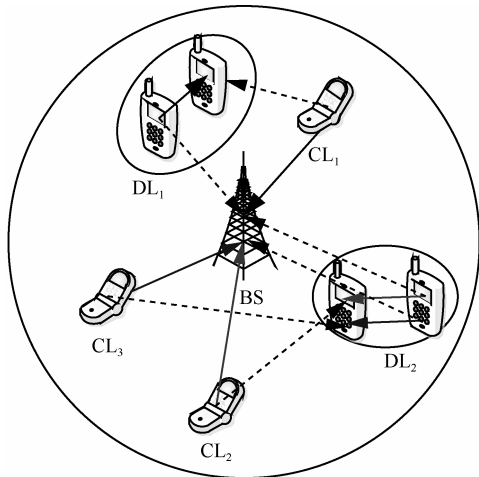
收稿日期: 2016-07-27; 修回日期: 2016-12-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61372092, No.61531013); 国家高技术研究发展计划 (“863” 计划) 基金资助项目 (No.2014AA01A707)

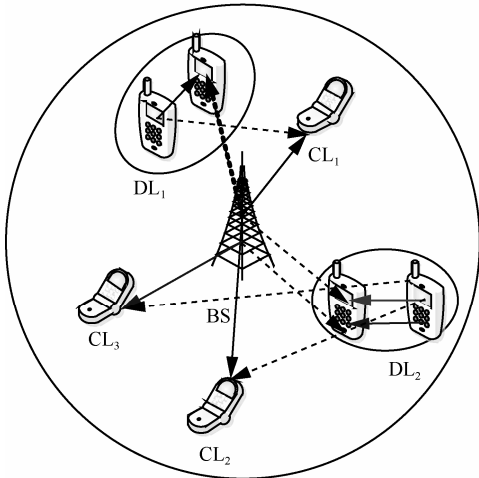
Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61372092, No.61531013), The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No.2014AA01A707)

long term evolution-advanced) 蜂窝通信网络中进行部署。

然而, 由于复用传统蜂窝网络的频带资源, D2D 链路 (DL, D2D link) 与蜂窝链路 (CL, cellular link) 之间会产生严重的同频干扰, 图 1 展示了 DL 分别复用蜂窝网络上行和下行频带资源时的干扰情形, 实线表示有用信号, 虚线表示干扰信号, 箭头表示信号传输方向。



(a) D2D链路复用蜂窝链路上行信道时干扰情形



(b) D2D链路复用蜂窝链路上行信道时干扰情形

图 1 混合蜂窝网络中的同频干扰情形

为了有效降低上述同频干扰, D2D 通信中无线资源分配方案的设计至关重要^[6-14]。文献[6]考虑了单条 CL 和单条 DL 的复用场景, 在固定发射功率的情况下分析了 DL 发射端到 CL 接收端的最小距离, 从而满足 CL 的中断概率约束。文献[7]考虑了多用户场景, 通过信道分配优化系统的整体吞吐量, 文献[8]同样考虑了上述问题, 并将其转化为二分图中的最大匹配, 继而借助 Kuhn-Munkres 算法得到最优

解, 而文献[7]通过贪婪算法在较低的复杂度下同样得到了较好的性能。文献[9]在文献[7,8]的基础上引入了功率控制, 保证了已有 CL 的服务质量 (QoS, quality of service) 需求。但是文献[6-9]都假设单条 DL 仅能复用单条 CL 的信道资源, 这极大限制了 DL 的传输速率, 因此, 文献[10,11]去除了上述约束, 其中, 文献[10]在 LTE-A 下行联合信道分配和功率控制最大化 DL 的整体吞吐量, 但是 LTE-A 下行使用的正交频分复用多址技术会产生高峰值平均功率比, 大幅度降低了发射端的能效, 故不利于在用户终端侧使用。除此之外, 蜂窝网络上行通信量远低于下行, 导致上行频带利用率严重不足。因此, LTE-A 上行更适于 D2D 通信的部署, 但是单载波频分复用多址技术要求分配给单用户的信道资源必须是连续的^[11]。在上述约束下, 文献[11]同样联合功率控制和信道分配最大化系统吞吐量, 但是其忽略了单用户发射功率在多个信道上的耦合性。此外, 文献[7-11]均将系统吞吐量作为优化目标, 这样会导致用户终端侧大量的能耗开销, 严重缩短其待机时长。为了实现系统吞吐量与能耗间的折中, 能效优化受到了越来越多的关注^[12-14], 其中, 文献[12,13]考虑了文献[6]相同的场景, 即系统中仅包括一条 CL 和一条 DL。文献[14]考虑了多用户场景, 提出了一种基于联盟博弈的信道分配机制, 但是在功率控制中忽略了能效优化。

综上所述, 已有文献[6-14]存在以下不足: 1) 单用户仅能复用单条 CL 的信道资源^[6-9,12,13]; 2) 仅考虑信道分配, 忽略了 CL 的 QoS 需求^[7,8]或没有充分联合发射功率和信道分配这 2 个优化变量^[11-14]; 3) 没有考虑 LTE-A 上行传输中的特殊性^[10,14]。针对上述不足, 本文考虑 D2D 通信复用 LTE-A 上行频带资源的场景, 最大化 DL 的整体能效并同时保证 CL 的最低 QoS 需求。但是, 上述问题为混合整数非线性规划, 同时涉及组合优化和分数规划, 考虑到信道分配变量与功率控制变量之间的层次关系, 本文将原问题分解为功率控制和信道分配 2 个子问题。其中, 功率控制子问题考虑单用户在任意信道集合上的能效优化问题, 属于分数规划^[15], 其可以转化为参数规划并借助 Dinkelbach 方法^[15]求解, Dinkelbach 方法中的每个子问题都为凸优化问题^[16], 可通过 Karush-Kuhn-Tucker 条件分析得到最优解。而在上述最优解的基础上, 信道分配子问题等价于集装箱问题 (SPP, set packing problem)^[17], 一般意义下为 NP 难

问题, 继而设计了一种多项式时间复杂度的启发式信道分配算法来满足实际部署的需求。仿真结果表明, 本文所提方案的能效性能优于文献[12~14], 且接近由分支定界法^[18,19]得到的理论最优解, 从而有效地实现了算法性能和复杂度之间的折中。

2 系统模型

假设小区间干扰已得到控制^[20], 本文考虑基于 LTE-A 的单个小区场景。记上行 CL 和 DL 的集合为 $C = \{1, 2, \dots, N\}$ 和 $D = \{1, 2, \dots, M\}$, 其中, N 和 M 分别代表各自集合内的总链路数目。假定 CL 的资源分配已经完成且信道数目等于 CL 数目。为了便于表示, 假定各个上行信道的标识与其上分配的 CL 标识相同。单条 DL 允许复用多个连续的上行信道资源来利用多用户分集, 提升其能效性能。为了避免强干扰以及繁重的信令开销^[21,22], 单个上行信道仅能被单条 DL 复用^[6~14]。对于第 i 条 DL 而言, 记其复用的信道集合为 S_i , 由于单用户所用信道的连续性约束, S_i 共有 $L = 1 + \sum_{k=0}^N (N-k) = 1 + \frac{N(N+1)}{2}$ 种不同的信道复用图样(CRP, channel reuse pattern), 并可以通过二元矩阵 $\mathbf{X}_{N \times L}$ 表示, $\mathbf{X}_{N \times L}$ 中每一列对应一种 CRP, 如果第 j 个信道包含在第 t 个 CRP 中, $x_{j,t} = 1$; 否则, $x_{j,t} = 0$ 。另外, 记 Z_N 为 $\mathbf{X}_{N \times L}$ 中包含的所有 CRP 集合。按照上述表示, 当 $N=3$ 时, $\mathbf{X}_{N \times L}$ 如式(1)所示, 而 $(Z_N)_{N=3} = \{\emptyset, \{1\}, \{2\}, \{3\}, \{1,2\}, \{2,3\}, \{1,2,3\}\}$ 。如图 1 所示, DL₁ 和 DL₂ 复用的 CRP 为 $S_1 = \{1\}$ 和 $S_2 = \{2,3\}$, 分别对应于式(1)中 $(\mathbf{X}_{N \times L})_{N=3}$ 的第 2 列和第 6 列。

$$(\mathbf{X}_{N \times L})_{N=3} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}_{3 \times 7} \quad (1)$$

本文采用链路的信干噪比 (SINR, signal to interference plus noise ratio) 简化用户的 QoS 感受, 如式(2)和式(3)所示, 第 j 个信道上第 i 条 DL 和第 j 个信道上 CL 的 SINR 分别定义为 $\gamma_{i,j}^D$ 和 γ_j^C 。

$$\gamma_{i,j}^D = \frac{P_{i,j}^D G_i^D}{P_j^C G_{i,j}^{DC} + \sigma_i^D}, \forall i \in D, j \in C \quad (2)$$

$$\gamma_j^C = \frac{P_j^C G_j^C}{P_{i,j}^D G_{j,i}^{CD} + \sigma_j^C}, \forall j \in C \quad (3)$$

其中, G_i^D 和 G_j^C 分别表示第 i 条 DL 和第 j 条 CL 链路中信号的路径增益, 而 $G_{i,j}^{DC}$ 和 $G_{j,i}^{CD}$ 分别表示从 CL 发射端到 DL 接收端以及从 DL 发射端到 CL 接收端(基站)的路径增益。 $P_{i,j}^D \geq 0$ 表示第 i 条 DL 在第 j 个信道上的发射功率, DL 发射端的总发射功率受 $P_{i,\max}^D$ 约束, 即 $\sum_{j \in S_i} P_{i,j}^D \leq P_{i,\max}^D$ 。 $P_j^C > 0$ 是 CL 发射端的固定发射功率, 假定系统干扰受限, 即当没有 DL 复用 CL 信道时, CL 的最低 QoS 需求能够得到满足 ($P_j^C \gg \frac{\theta_j^C \sigma_j^C}{G_j^C}, \forall j \in C$)。此外, σ_i^D 和 σ_j^C 分别表示上述 2 条链路接收端的背景噪声。如式(4)和式(5)所示, 本文借助香农公式得到上述 2 条链路在第 j 个信道上的归一化传输速率 $R_{i,j}^D$ 和 R_j^C , 基于此, 第 i 条 DL 的能效表示为式(6)。

$$R_{i,j}^D = \text{lb}(1 + \gamma_{i,j}^D), \forall i \in D, j \in C \quad (4)$$

$$R_j^C = \text{lb}(1 + \gamma_j^C), \forall j \in C \quad (5)$$

$$EE_{i,S_i}^D = \frac{\sum_{j \in S_i} R_{i,j}^D}{\varepsilon \sum_{j \in S_i} P_{i,j}^D + 2P_0} \quad (6)$$

其中, $\varepsilon > 1$ 是发射端发射机功率的倒数, 而 P_0 是一个固定值, 表示发射端和接收端电路功率消耗^[12~14], 由于单条 DL 中包含 2 个用户终端, 因此, 总电路功率开销为 $2P_0$ 。基于以上的假设和表示, 本文所要解决的联合信道分配和功率控制问题可以表示为问题 1。

$$\text{问题 1: maximize}_{S_i \in Z_N, P_{i,j}^D \geq 0} \sum_{i \in D} EE_{i,S_i}^D$$

$$\text{s.t.: } S_m \cap S_n = \emptyset, \forall m \neq n, S_m, S_n \in Z_N \quad (7)$$

$$\bigcup_{i \in D} S_i \subseteq C, S_i \in Z_N, \forall i \in D \quad (8)$$

$$\sum_{j \in S_i} P_{i,j}^D \leq P_{i,\max}^D, \forall i \in D \quad (9)$$

$$\gamma_j^C \geq \theta_j^C, \forall j \in C \quad (10)$$

其中, 式(7)和式(8)表示信道复用约束, 即分配给任意 DL 的信道组合是连续的, 且不同 DL 之间无复用资源, 式(9)表示 DL 发射端发射功率的上限约束, 式(10)则是保证 CL 链路的最低 SINR 需求。问题 1 涉及组合优化和分数规划, 其一般意义下属于 NP 难问题^[17]。

3 面向能效的联合资源分配方案

在问题 1 中, $P_{i,j}^D$ 与 S_i 相互独立, 可交换变量

的求和顺序：即 $\text{maximize}_{S_i \in Z_N, p_{i,j}^D \geq 0} \sum_{i \in D} EE_{i,S_i}^D = \text{maximize}_{S_i \in Z_N} \sum_{i \in D} \text{maximize}_{p_{i,j}^D \geq 0} EE_{i,S_i}^D$ ，其次，利用上述 2 类变量在约束条件中的独立性，问题 1 继而可以分解为问题 2 和问题 3。特别地，问题 2 是在任意给定的 S_i 下通过优化第 i 个 ($\forall i \in D$) DL 的发射功率 $p_{i,j}^D, \forall j \in S_i$ 最大化单条链路的能效 $EE_{i,S_i}^D(p_{i,j}^D)$ 。而在问题 2 最优解 $EE_{i,S_i}^{D*}(p_{i,j}^{D*}), \forall i \in D, S_i \in Z_N$ 基础上，问题 3 进一步优化 DL 间的信道分配 $S_i, \forall i \in D$ ，最大化所有 DL 的整体能效 $\sum_{i \in D} EE_{i,S_i}^{D*}$ 。本节后续将逐一对问题 2 和问题 3 进行分析求解。

$$\begin{aligned} \text{问题2: } & \text{maximize}_{p_{i,j}^D \geq 0} EE_{i,S_i}^D(p_{i,j}^D) \\ & \text{s.t.: 式(9)和式(10)} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \text{问题3: } & \text{maximize}_{S_i \in Z_N} \sum_{i \in D} EE_{i,S_i}^{D*} \\ & \text{s.t.: 式(7)和式(8)} \end{aligned} \quad (12)$$

3.1 功率控制部分

任意第 i 条链路在连续信道集合 S_i 上的能效优化问题 2 属于非线性分数规划，根据分数规划的性质^[15]，问题 2 与问题 4 相关联，问题 4 是一个关于参数 q 的优化问题，而问题 2 与问题 4 最优解之间的关联性可通过定理 1 描述。

$$\begin{aligned} \text{问题4: } & F(q) = \text{maximize}_{p_{i,j}^D, \forall j \in S_i} \sum_{j \in S_i} R_{i,j}^D - \\ & q \left(\varepsilon \sum_{j \in S_i} p_{i,j}^D + 2P_0 \right) \\ & \text{s.t.: 式(9)和式(10)} \end{aligned} \quad (13)$$

定理 1 $F(q)$ 是关于 q 的单调减函数，且如果 q^* 是问题 2 的最优目标值，即 $q^* = \text{maximize}_{p_{i,j}^D \geq 0} EE_{i,S_i}^D(p_{i,j}^D)$ ，当且仅当 $F(q^*) = 0$ ，而且，此时问题 4 自变量的最优值 $p_{i,j}^{D*}$ 即为问题 2 自变量的最优解。

该部分证明与文献[15]中定理的证明过程类似，此处从略。

根据定理 1，可以借助 Dinkelbach 法^[15]或者二分法得到问题 2 的最优解，后续借助 Dinkelbach 法优化单用户能效。类似于二分法，Dinkelbach 法是一个迭代的过程，不断更新 q 值，直到满足终止条件。其与二分法具有相同的收敛速度^[15]，但是无需设置参数变量 q 的上限。

Dinkelbach 方法求解问题 2 最优解的步骤如下。

初始化 取 $\delta > 0$ 为很小的正数，其决定

Dinkelbach 法的准确性；用 q 记录当前能效值，初始化 $q = 0$ 。

步骤 1 根据当前的 q 值，求解问题 4，记此时功率的最优值为 $p_{i,j}^{D+}$ 。

步骤 2 如果 $F(q) = \text{maximize}_{p_{i,j}^D} \sum_{j \in S_i} R_{i,j}^D(p_{i,j}^{D+}) - q \left(\varepsilon \sum_{j \in S_i} p_{i,j}^{D+} + 2P_0 \right) < \delta$ ，则算法结束，此时的 q 值和 $p_{i,j}^{D+}$ 即为问题 2 中的最优能效值以及相应的功率分布；否则，更新 $q = \frac{\sum_{j \in S_i} R_{i,j}^D(p_{i,j}^{D+})}{\varepsilon \sum_{j \in S_i} p_{i,j}^{D+} + 2P_0}$ ，返回步骤 1。

由 Dinkelbach 方法求解问题 2 的最优解，可知，接下来唯一遗留的问题是如何在任意给定的 $q \geq 0$ 值下，求解问题 4。对于给定的第 i 条 DL 和其 CRP $S_i \in Z_N$ 以及 $q \geq 0$ ，优化问题 4 的最优解可以归纳为定理 2。

定理 2 问题 4 是关于功率变量 $p_{i,j}^D, \forall j \in S_i$ 的凸问题，其最优解可以分为以下 2 种情形。

1) 如果 $\sum_{j \in S_i} \min \{ \max \{ V_{i,j}^D, 0 \}, U_{i,j}^D \} < p_{i,\max}^D$ 成立，其中， $V_{i,j}^D = \frac{1}{\ln 2 q \varepsilon} - \frac{p_j^C G_{i,j}^{DC} + \sigma_i^D}{G_i^D}$ ， $U_{i,j}^D = \min \left\{ \frac{p_j^C G_j^C - \sigma_j^C}{\theta_j^C}, \frac{G_{j,i}^{CD}}{G_{j,i}^D, p_{i,\max}^D} \right\}$ ，此时最优的功率分配为 $p_{i,j}^{D+} = \min \{ \max \{ V_{i,j}^D, 0 \}, U_{i,j}^D \}$ 。

2) 否则，最优的功率分配为

$$p_{i,j}^{D+} = \min \left\{ \max \left\{ \left(\frac{1}{[\ln 2(q\varepsilon + \lambda_i^{D*})]} - \frac{p_j^C G_{i,j}^{DC} + \sigma_i^D}{G_i^D} \right), 0 \right\}, U_{i,j}^D \right\}$$

且 $\sum_{j \in S_i} p_{i,j}^{D+} = p_{i,\max}^D$ ，其中， λ_i^{D*} 是与式(9)相关联的拉格朗日乘数 $\lambda_i^D \geq 0$ 的最优值。

证明详见附录 1。

由定理 2 可知，在情形 1) 下， $\lambda_i^{D*} = 0$ ；而在情形 2) 下，式(17)中得到的 $p_{i,j}^{D+}$ 与 $\sum_{j \in S_i} p_{i,j}^{D*} = p_{i,\max}^D$ 构成了 $|S_i| + 1$ 维的非线性方程，但是 $p_{i,j}^{D+}$ 是关于 λ_i^{D*} 的单调函数，因此，可以借助二分法简化求解过程。在二分法的每次迭代过程中，首先更新 λ_i^{D*} ，然后

根据定理 2 确定发射功率分布, 如果 $\sum_{j \in S_i} p_{i,j}^{D^*} = p_{i,\max}^D$, 则得到最优的发射功率分布以及与式(9)相关联的最优拉格朗日乘数, 否则, 相应地更新 $\lambda_i^{D^*}$ 并重复上述过程。

综上所述, 通过定理 2, 得到了 $F(q)$ 以及相应的发射功率分布 $p_{i,j}^{D^*}$, 继而可按照 Dinkelbach 法进行迭代, 直到找到最优的单链路能效性能 $q^* = \text{maximize}_{p_{i,j}^D \geq 0} EE_{i,S_i}^D(p_{i,j}^D)$ 。

3.2 信道分配部分

由 3.1 节单用户侧的功率控制得到了问题 3 中所有的 $EE_{i,S_i}^{D^*} = EE_{i,S_i}^D(p_{i,j}^{D^*}), \forall i \in D, S_i \in Z_N$, 为了求解 $S_i^*, \forall i \in D$, 首先对问题 3 的特性进行了分析, 结论如定理 3 所述。

定理 3 在给定 $EE_{i,S_i}^{D^*}, \forall i \in D, S_i \in Y$ 的情况下, 优化问题 3 属于优化理论中的 SPP。

证明详见附录 2。

在优化理论中, SPP 本质属于整数线性规划, 一般意义下为 NP 难问题, 可以借助分支界限法(BB branch-and-bound) 机制^[18,19]得到最优解, 但是上述过程需要较长的计算时间。如果用 β 表示当找到最优解时在遍历树上途经的节点数目, 则 BB 算法的复杂度为 $O(MLI_{\text{bis}} I_{\text{dim}} + \beta(ML)^3)$, 其中, I_{bis} 表示为 3.1 节二分法计算最优功率变量时所需的最大迭代次数, 而 I_{dim} 表示 3.1 节用 Dinkelbach 法求解单用户最优能效过程中所需的最大迭代次数, 则 $MLI_{\text{bis}} I_{\text{dim}}$ 表示得到问题 4 优化目标中权值向量 $[r]_{(M \times L) \times 1}$ 的复杂度, 而 $(ML)^3$ 表示利用单纯形法^[19]求解遍历树上任意节点处线性规划问题的平均复杂度。随着问题维度 ML 的增大, β 也会一定程度的增加, 而且会出现 $\beta \rightarrow \infty$ 的情况。然而在 LTE-A 通信系统的实际部署中, 资源分配需要在若干个时隙内(毫秒级)完成, 因此, BB 机制并不适用于本文所考虑的问题。本节提出一种多项式时间复杂度的启发式信道分配算法, 旨在大幅度降低复杂度同时保证较好的性能。

本节所提启发式信道分配算法逐个分配当前剩余信道, 在每次循环中, 首先, 借助 3.1 节功率控制部分确定当前可接入 DL 在可接入信道上对于总能效 $\sum_{i \in D} EE_{i,S_i}^D(p_{i,j}^D)$ 的贡献

$\beta_{i,k} = EE_{i,S_i \cup \{k\}}^D(p_{i,j}^D) - EE_{i,S_i}^{D^*}(p_{i,j}^D), \forall i \in A, k \in T_i$ 。然

后, 根据上述结果选择最大的(链路—信道)组合, 即 $(i^*, k^*) = \text{argmax}_{i \in A, k \in T_i} \beta_{i,k}$, 将信道 k^* 分配给 $DL i^*$ 。信道分配完成之后, 为了满足信道分配的连续性约束, 动态更新各个 DL 可接入的信道集合 $T_i = [\cup_{j \in S_i} W(j)] \cap H$, 其中, $W(j)$ 表示 $\{1, 2, \dots, N\}$ 中与第 j 个信道相邻的信道。最后, 当系统中无剩余信道时, 即 $H = \emptyset$, 算法结束, 否则进入下一次循环。本文所提启发式信道分配算法在最差情况下的算法复杂度为 $O(\{MN + \sum_{k=1}^{N-1} [1 + (M-1)k]\} I_{\text{bis}} I_{\text{dim}}) \approx O(MLI_{\text{bis}} I_{\text{dim}})$, 上述最差情况出现在所有信道按序逐个分配给同一个用户, 而其余 DL 在每次循环需要计算所有剩余信道上的测度值 $\beta_{i,k}$ 。

求解问题 3 的启发式信道分配算法步骤如下。

初始化 使用 $H = \{1, 2, \dots, N\}$ 表示未被分配的信道集合; S_i 表示已经分配给第 i 条 DL 的信道集合, 初始化 $S_i = \emptyset, \forall i \in D$; T_i 表示在连续性约束下第 i 条 DL 当前可接入的信道集合, 并初始化 $T_i = H = \{1, 2, \dots, N\}, \forall i \in D$ 。

步骤 1 对于 $T_i \neq \emptyset$ 的 DL, 即 $A = \{k \in D | T_k \neq \emptyset\}$ 中每条 DL, 借助 3.1 节功率控制部分对 T_i 中每个信道元素计算测度值 $\beta_{i,k} = EE_{i,S_i \cup \{k\}}^{D^*} - EE_{i,S_i}^{D^*}, \forall k \in T_i$ 。

步骤 2 在步骤 1 所有计算出的测度值中找到最大值, 即确定 $(i^*, k^*) = \text{argmax}_{i \in A, k \in T_i} \beta_{i,k}$, 将第 k^* 个信道分配给第 i^* 条 DL, 并更新 $S_{i^*} = S_{i^*} \cup \{k^*\}$, $H = H - \{k^*\}$, 如果测度值中出现多个相同的最大值, 则随机选择一个。

步骤 3 如果 $H = \emptyset$, 则算法结束; 否则更新 T_i : 如果 $S_i = \emptyset, T_i = H$, 否则 $T_i = [\cup_{j \in S_i} W(j)] \cap H$, 其中, $W(j)$ 表示 $\{1, 2, \dots, N\}$ 中与第 j 个信道相邻的信道, 返回步骤 1。

4 仿真与分析

仿真中考虑半径为 300 m 的圆形小区, 基站位于小区中心, 所有链路的发射端在圆形区域内随机分布, 而 DL 的接收端均匀分布在以其对应发射端为中心且半径为 5~20 m 的环形区域内。系统中 DL 数目 $M=5$, CL 数目 $N=10$, 背景噪声功率谱密度为 -174 dBm/Hz, DL 最大发射功率 $p_{i,\max}^D = 50$ mW, $\forall i \in D$, 发射端发射机功率效率的倒数 $\varepsilon = 1.5$ 。

仿真中将本文所提算法与以下 5 种算法进行比较。

算法 1 文献[9]的联合信道分配和功率控制算

法, 其中, 单个 DL 最多只能复用一条 CL 的信道, 在功率控制最优解的基础上, 信道分配等价于二分图中的最大匹配, 可以借助 Kuhn-Munkres 算法得到最优解, 区别于文献[9], 功率控制部分的优化目标由频带利用率调整为能效, 算法 1 的性能等价于文献[10,11]在多用户场景中的最优能效值。

算法 2 随机信道分配结合本文 3.1 节所提功率控制机制。

算法 3 将 DL 在任意信道上的发射功率值固

$$\text{定为 } U_{i,j}^D = \min \left\{ \frac{\left(\frac{P_j^C G_j^C}{\theta_j^C} - \sigma_j^C \right)}{G_{j,i}^{CD}, \frac{P_{i,\max}^D}{N}} \right\}, \text{ 而信道分配采用}$$

3.2 节中的启发式算法, 算法 3 类似于文献[14]中的机制, 仅考虑了信道分配的设计。

算法 4 采用本文所提联合机制优化 DL 的总频带利用率, 而不是总能效。

最优解 在本文 3.1 节功率控制的基础上, 利用 BB 机制求解问题 3, 得到理论最优的信道分配, 即本文所提算法的性能上限。

在图 2 中, 固定 $\theta_j^C = 10 \text{ dB}, \forall j \in C$, 电路功率消耗值 P_0 从 10 mW 增加到 110 mW, 步长为 10 mW; 在图 3 中, 电路功率消耗值 $P_0 = 60 \text{ mW}$, CL 最低 SINR 需求 $\theta_j^C, \forall j \in C$ 从 10 dB 增加到 20 dB, 步长为 1 dB。后续所有数据都是对网络拓扑进行 1 000 次平均后的结果。

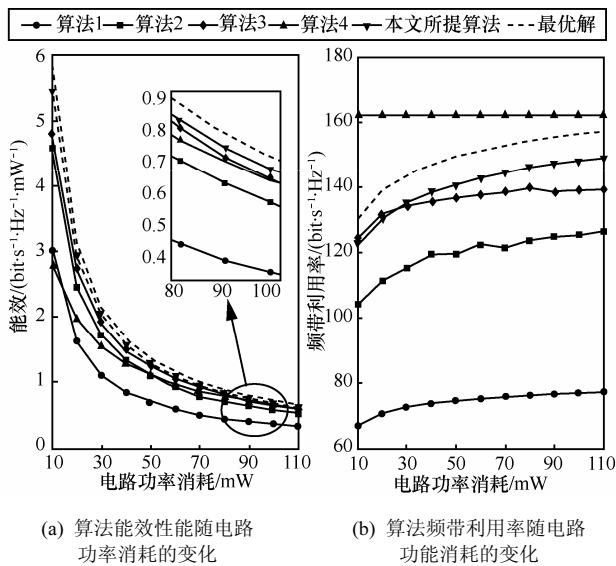


图 2 算法性能随着电路功率消耗值 P_0 的变化趋势

如图 2 所示, 随着电路功率消耗值 P_0 的增加, 电路功率消耗值在能效优化中所占的影响增加, 根据问题 1 的定义, 能效优化逐渐趋近于频带利用率优化。相比于算法 1, 本文所提算法容许单条 DL 复用多条 CL 的频带资源, 充分利用多用户多集合, 提高 85.68%的能效性能以及 88.98%的频带利用率性能。相比于算法 2 和算法 3 中仅优化单一资源变量的情况, 本文所提算法联合信道分配和功率控制, 分别提高了 18.17%和 5.328%的能效性能。另外, 由于算法 3 中的功率控制旨在最大化频带利用率, 因此, 随着 P_0 的增加, 本文所提算法与算法 3 在频带利用率上的差距不断减小。特别地, 当电路功率消耗值为 10 mW 时, 本算法的频带利用率为 122.9 bit·s⁻¹·Hz⁻¹, 当电路功率消耗值增加到 110 mW 时, 上述性能提升至 149.19 bit·s⁻¹·Hz⁻¹, 其非常接近于算法 3 的最优频带利用率 (162.29 bit·s⁻¹·Hz⁻¹)。此外, 相比于理论最优解, 本文所提算法仅仅损失了 5.665%的性能, 但保证了多项式时间复杂度, 其算法复杂度 $O(MLI_{\text{bis}} I_{\text{dim}})$ 远优于最优解的 $O(MLI_{\text{bis}} I_{\text{dim}} + \beta(ML)^3)$ 。因此, 本文所提算法有效实现了算法性能与复杂度之间的折中, 在实际部署中更具有优势。

如图 3 所示, 随着 CL SINR 门限值 (θ_j^C) 的增加, 所有算法的可行域减小, 故其优化性能都相应降低。而对于优化频带利用率的算法 4, 当 θ_j^C 从 10 dB 增加到 16 dB 的过程中, 虽然整体发射功率开销降低, 但其传输速率此时处于关于发射功率的对数区

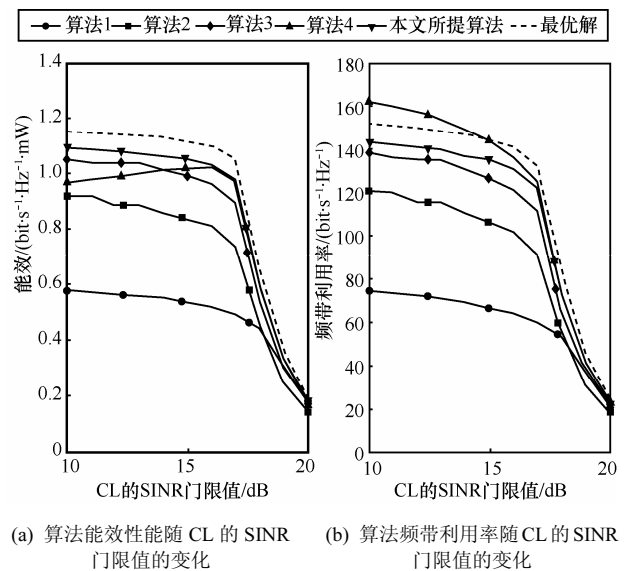


图 3 算法性能随着 CL SINR 门限值 (θ_j^C) 的变化趋势

域, 其对于发射功率的变化并不敏感, 因此, 其能效值还会在一定程度上增加, 但是, 当 θ_j^C 继续增加时, 传输速率进入关于发射功率的线性区域, 故其能效值会大幅度降低。此外, 根据定理 2, 当 θ_j^C 较大时, 能效优化中的最优解更倾向于在 $U_{i,j}^D$ 处取得, 此时的最优功率值与频带利用率优化的结果相同, 因此, 本文所提算法性能接近于算法 4。类似于图 3 中的仿真结果, 本文所提算法的能效性能优于算法 1~算法 3, 而且在保证多项式复杂度的同时, 相比于最优解算法仅损失了 6.824% 的性能, 但其更加符合实际部署的需求。

5 结束语

本文考虑 D2D 通信复用 LTE-A 上行频带资源的场景, 联合信道分配和功率控制最大化 DL 的总能效性能。由于原问题的分析较为复杂, 本文将其分解为功率控制和信道分配 2 个子问题, 特别地, 功率控制部分得到的最优解将反馈给信道分配部分, 协助信道分配问题的分析和求解, 体现了联合资源优化的思想。仿真结果显示了联合资源分配的优势并验证了所提算法的有效性。

附录 1 定理 2 的证明

如式(14)和式(15)所示, 通过求解问题 4 中优化目标关于 $p_{i,j}^D, \forall j \in S_i$ 的一阶和二阶偏导, 可知 $F(q)$ 是 $p_{i,j}^D, \forall j \in S_i$

的凹函数。另外, 式(10)等价于 $p_{i,j}^D \leq \frac{p_j^C G_j^C}{G_{j,i}^{CD}} - \sigma_j^C, \forall j \in S_i$,

故问题 2 中式(9)和式(10)都是关于 $p_{i,j}^D, \forall j \in S_i$ 的线性约束, 因此, 问题 4 是关于 $p_{i,j}^D, \forall j \in S_i$ 的凸优化问题^[16]。问题 4 的拉格朗日函数如式(16)所示, 对于任意给定拉格朗日乘数 $\lambda_i^D \geq 0$, 如式(17)所示, 通过分析 Karush-Kuhn-Tucker 条件得到最优功率分配。

$$\frac{\partial F(q, p_{i,j}^D)}{\partial p_{i,j}^D} = \frac{G_i^D}{\ln 2 (p_{i,j}^D G_i^D + p_j^C G_{i,j}^{DC} + \sigma_i^D)} - q\varepsilon \quad (14)$$

$$\frac{\partial^2 F(q, p_{i,j}^D)}{\partial (p_{i,j}^D)^2} = \frac{-(G_i^D)^2}{\ln 2 (p_{i,j}^D G_i^D + p_j^C G_{i,j}^{DC} + \sigma_i^D)^2} < 0 \quad (15)$$

$$L \triangleq \sum_{j \in S_i} R_{i,j}^D - q \left(\varepsilon \sum_{j \in S_i} p_{i,j}^D + 2P_0 \right) + \lambda_i^D \left(p_{i,\max}^D - \sum_{j \in S_i} p_{i,j}^D \right) \\ = \sum_{j \in S_i} [R_{i,j}^D - (q\varepsilon + \lambda_i^D) p_{i,j}^D] - 2qP_0 + \lambda_i^D p_{i,\max}^D \quad (16)$$

$$\frac{\partial L}{\partial p_{i,j}^D} \Big|_{p_{i,j}^D} = 0 \Rightarrow p_{i,j}^D(\lambda_i^D) \\ = \min \left\{ \max \left\{ \left[\frac{1}{\ln 2 (\lambda_i^D + q\varepsilon)} - \frac{p_j^C G_{i,j}^{DC} + \sigma_i^D}{G_i^D} \right], 0 \right\}, U_{i,j}^D \right\} \quad (17)$$

如果 $\sum_{j \in S_i} \min \{ \max \{ V_{i,j}^D, 0 \}, U_{i,j}^D \} < p_{i,\max}^D$, 问题 4 中的约束条件式(9)变为冗余, 因此, $\lambda_i^{D*} = 0$, 故由式(17)可得 $p_{i,j}^{D+} = \min \{ \max \{ V_{i,j}^D, 0 \}, U_{i,j}^D \}$; 否则, $p_{i,j}^{D+}$ 由式(17)给出, 且由互不松弛条件^[16]可以得到 $\sum_{j \in S_i} p_{i,j}^{D*} = p_{i,\max}^D$ 。

附录 2 定理 3 的证明

首先引入新的二元变量 $[y_i]_{L \times 1}, \forall i \in D$ 代替 $S_i, \forall i \in D$, 其为 $L \times 1$ 的列向量, 如果 S_i 对应于 $\mathbf{X}_{N \times L}$ 中的第 i 个 CRP, 则其第 i 个元素 $y_{ii} = 1$, 否则 $y_{ii} = 0$ 。另外, 记所有 $[y_i]_{L \times 1}, \forall i \in D$ 按列合并后的二元向量为 $[\mathbf{y}]_{(M \times L) \times 1}$, 即 $[\mathbf{y}]_{(M \times L) \times 1} = [y_1^T, y_2^T, \dots, y_M^T]^T$, 对应于 $[\mathbf{y}]_{(M \times L) \times 1}$, 记 $EE_{i,S_i}^{D*}, \forall i \in D, S_i \in Y$ 相应的列向量为 $[\mathbf{r}]_{(M \times L) \times 1}$ 。因此, 如式(15)所示, 问题 3 可等价地转化为关于 $[\mathbf{y}]_{(M \times L) \times 1}$ 的问题 5 为

$$\text{问题 5:} \quad \begin{aligned} & \text{maximize}_{\mathbf{y}} \mathbf{r}^T \mathbf{y} \\ & \text{s.t. } \mathbf{A} \mathbf{y} \leq \mathbf{e}_N \end{aligned} \quad (18)$$

$$\sum_{i=1}^L y_{ii} \leq 1, \forall i \in D \quad (19)$$

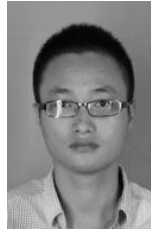
其中, 式(18)中的 $\mathbf{A} = [\mathbf{X}, \mathbf{X}, \dots, \mathbf{X}]_{N \times (M \times L)}$ 是 M 个 $\mathbf{X}_{N \times L}$ 按行合并后的二元矩阵, 而 \mathbf{e}_N 是全 1 的 N 维列向量, 因此, 该约束表示每个信道都唯一的分配给一个 CRP。另外, 式(19)约束单个 DL 仅能够分配到一个 CRP, 通过简单的数学变换, 可以将其等价的转化为 $\mathbf{B} \mathbf{y} = \mathbf{e}_M$, 其中, $\mathbf{B}_{M \times (M \times L)}$ 是一个特殊的 $M \times M$ 对角矩阵, 其对角元素为全 1 的 L 维行向量。故问题 5 可以简化为 $\text{maximize}_{\mathbf{y}} \mathbf{r}^T \mathbf{y}, \text{s.t. } \mathbf{C} \mathbf{y} \leq \mathbf{e}_{N+M}$, 其中, $\mathbf{C} = [\mathbf{A}; \mathbf{B}]_{(N+M) \times (M \times L)}$ 为二元矩阵 $\mathbf{A}_{N \times (M \times L)}$ 和 $\mathbf{B}_{M \times (M \times L)}$ 按行合并的结果, 而 \mathbf{e}_{N+M} 是全 1 的 $N+M$ 维列向量, 因此, 问题 5 为优化理论中经典的 SPP。由于问题 3 与问题 5 等价, 因此问题 3 同样为 SPP。

参考文献:

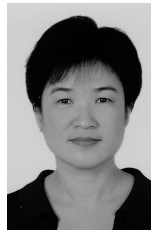
- [1] MARSCH P, SILVA I D, ELAYOUBI S E, et al. Preliminary views and initial considerations on 5G RAN architecture and functional designs[EB/OL]. <https://metis-ii.5g-ppp.eu/wp-content/uploads/5G-PPP-METIS-II-5G-RAN-Architecture-White-Paper.pdf>.
- [2] TANG R, ZHAO J H, QU H, et al. Joint mode selection and resource allocation for mobile relay-aided device-to-device communication[J]. *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, 2016, 10(3): 950-975.
- [3] 王元, 赵季红, 唐睿, 等. D2D 多播场景下面向节能的资源分配机制[J]. 西安电子科技大学(自然版), 2016, 43(2): 173-178.

- WANG Y, ZHAO J H, TANG R, et al. Energy-aware resource allocation for underlaid D2D multicast[J]. Journal of Xidian University, 2016, 43(2): 173-178.
- [4] SIMONE R, ALEXANDROS K ALEX G, et al. View on 5G architecture[EB/OL]. <https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2014/02/5G-PPP-5G-Architecture-WP-For-public-consultation.pdf>.
- [5] LIN X Q, ANDREWS J G, GHOSH A, et al. An overview of 3GPP device-to-device proximity services[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(4): 40-48.
- [6] WANG H F, CHU X Y. Distance-constrained resource sharing criteria for device-to-device communications underlying cellular networks[J]. Electronic Letters, 2012, 48(9): 528-530.
- [7] ZULHASNINE M, HUANG C, SRINIVASAN A. Efficient resource allocation for device-to-device communication underlying LTE network[C]//IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communication (WIMOB). 2010: 368-375.
- [8] HAN J, CUI Q M, YANG C C, et al. Bipartite matching to optimal resource allocation in device to device underlying cellular network[J]. Electronic Letters, 2014, 50(3): 212-214.
- [9] FENG D Q, LU L, WU Y Y, et al. Device-to-device communications underlying cellular networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(8): 3541-3551.
- [10] ZHU D H, WANG J H, SWINDLEHURST A L, et al. Downlink resource reuse for device-to-device communications underlying cellular networks[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2014, 21(5): 531-534.
- [11] WEN S, ZHU X Y, ZHANG X, et al. QoS-aware mode selection and resource allocation scheme for device-to-device (D2D) communication in cellular networks[C]//IEEE International Conference on Communications (ICC). Budapest, Hungary, 2013: 101-105.
- [12] WU Y, WANG J H, QIAN L P, et al. Optimal power control for energy efficient D2D communication and its distributed implementation[J]. IEEE Communication Letters, 2015, 19(5): 815-818.
- [13] FENG D Q, YU G D, XIONG C, et al. Mode switching for energy-efficient device-to-device communications in cellular networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(12): 6993-7003.
- [14] WU D, WANG J L, HU R Q, et al. Energy-efficient resource sharing for mobile device-to-device multimedia communications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(5): 2093-2103.
- [15] DINKRLBACH W. On nonlinear fractional programming[J]. Management Science, 1967, 13(7):492-498.
- [16] BOYD S, VANDENBERGHE L. Convex optimization[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [17] BOYD S, MATTINGLEY J. Branch and bound methods[R]. Stanford: Stanford University, 2007.
- [18] VANDERBEI R J. Linear programming: foundations and extensions[M]. New York: Springer, 2008.
- [19] VAZIRANI V V. Approximation algorithms[M], New York: Springer, 2001.
- [20] 杨阳, 廖学文, 高贞贞, 等. 多小区终端直通异构网络下利用图论的资源分配方案[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(10): 22-28.
- YANG Y, LIAO X W, GAO Z Z, et al. A resource allocation scheme using graph theory for D2D communication in multi-cell heterogeneous cellular networks[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(10): 22-28.
- [21] TANG R, ZHAO J H, QU H, et al. Joint optimization of channel allocation, link assignment and power control for device-to-device communication underlying cellular network[J]. China Communications, 2015, 12(12): 92-100.
- [22] LEE N, LIN X Q, 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.

作者简介:



朱正仓 (1987-), 男, 安徽安庆人, 西安交通大学硕士生, 主要研究方向为 D2D 通信、车联网。



赵季红 (1963-), 女, 陕西西安人, 博士, 西安交通大学教授、博士生导师, 主要研究方向为新一代无线移动互联网、泛在网/物联网、异构融合网络、网络虚拟化。



唐睿 (1987-), 男, 甘肃兰州人, 西安交通大学博士生, 主要研究方向为 D2D 通信、未来 5G 网络通信。



曲桦 (1961-), 男, 河南陕县人, 博士, 西安交通大学教授、博士生导师, 主要研究方向为移动互联网技术、泛在网技术与应用、网络的管理与控制技术、网络的异构和融合技术。

王璐瑶 (1990-), 女, 山东菏泽人, 西安交通大学硕士生, 主要研究方向为 D2D 通信和异构网。

曹照鑫 (1989-), 男, 重庆人, 西安交通大学博士生, 主要研究方向为毫米波通信和 D2D 通信。