

文章编号:1007-5321(2015)03-0112-05

DOI:10.13190/j.jbupt.2015.03.019

蜂窝网络下设备到设备通信中的联合资源优化

曲桦¹, 庄雄¹, 赵季红², 唐睿¹

(1. 西安交通大学 电子与信息工程学院, 西安 710049; 2. 西安邮电大学 通信与信息工程学院, 西安 710061)

摘要: 在蜂窝与设备到设备通信混合网络下,把设备到设备通信的系统吞吐量作为优化目标,同时考虑设备到设备链路和蜂窝链路的服务质量,提出了一种联合功率控制和信道分配的优化方案. 在该方案中,信道分配部分采用粒子群优化算法,并在功率控制部分的帮助下为设备到设备链路分配最优的复用信道;功率控制部分针对信道分配部分给定的信道分配,通过优化链路发射功率来最大化系统吞吐量. 仿真结果表明,所提联合优化方案权衡了系统吞吐量和接入链路数性能之间的折中关系,在保证所有接入链路服务质量的前提下提升了系统整体性能.

关键词: 设备间通信; 资源分配; 粒子群优化; 系统吞吐量; 接入链路数

中图分类号: TN929.53

文献标志码: A

Joint Resource Allocation for Device-to-Device Communication Underlying Cellular Networks

QU Hua¹, ZHUANG Xiong¹, ZHAO Ji-hong², TANG Rui¹

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

2. School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710061, China)

Abstract: For hybrid cellular network with underlaid device-to-device (D2D) communications, a joint power control and channel assignment optimization scheme was proposed for D2D communications. The system throughput of D2D communications was explicitly set as the optimization target together with the consideration for individual quality of service (QoS) requirement of both D2D links and cellular links. In this scheme, the power control part was dedicated to maximize system throughput under given channel assignment from channel assignment part, and channel assignment part adopts particle swarm optimization algorithm to obtain the optimal channel assignment for D2D links with help of power control part. It is shown that the proposed scheme will leverage the tradeoff between system throughput and the number of admitted D2D links, and meanwhile improves the aggregate throughput on condition that the QoS requirements of all admitted links are guaranteed.

Key words: device-to-device communication; resource allocation; particle swarm optimization; system throughput; the number of admitted links

随着近距离多媒体业务不断涌现,设备到设备(D2D, device-to-device)通信正受到越来越多的关注^[1]. D2D通信通过复用蜂窝网络的频谱可以有效

地提高频带利用率,降低终端的发射功率、通信时延,分流基站负载给多样化的近距离多媒体业务创造可能.

收稿日期: 2014-09-16

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2014AA01A701)

作者简介: 曲桦(1961—),男,教授,博士生导师, E-mail: gh@mail.xjtu.edu.cn.

然而,由于频带复用,D2D通信给蜂窝网络带来了同频干扰. 目前已有研究在关注该问题,Yu等^[2]提出了一种联合频带复用模式选择和功率控制算法来优化系统吞吐量,Feng等^[3]提出了一种联合接纳控制、信道分配和功率控制的方案来优化上述相同目标. 由于文献[2-3]均限定单信道仅能被单链路复用,频谱效率不高. 因此,Zhang等^[4]允许单信道被多链路复用,通过信道分配来优化系统吞吐量.

笔者针对单信道能同时被多链路复用的场景,联合功率控制和信道分配来优化D2D通信的整体吞吐量,同时保证蜂窝和D2D两类链路的服务质量(QoS, quality of service). 和上述文献相比,所提算法权衡了系统吞吐量和接入链路数性能的折中,同时保证了蜂窝和D2D两类链路的QoS. 仿真结果表明,所提算法的性能和已有文献算法相比有明显的优势.

1 系统模型与问题构建

1.1 系统模型

考虑包含蜂窝和D2D 2类通信链路的单小区场景,D2D链路复用蜂窝链路上行信道资源,且假设单信道允许被多链路复用,但单链路仅能使用单信道. 针对1个满负载的小区,蜂窝链路和D2D链路的集合分别定义为 $C = \{1, 2, \dots, N\}$ 和 $D = \{1, 2, \dots, M\}$,其中 N 和 M 分别为2类链路的数量.

不失一般性,考虑第 i 条信道,定义复用该信道的D2D链路的集合为 S_i ,且假设 $S_i \neq \emptyset, j \in S_i$. 将链路的最低QoS需求抽象为其接收端的信干噪比(SINR, signal to interference plus noise ratio)门限,并在式(1)和式(2)中分别定义了第 i 条蜂窝链路和第 j 条D2D链路接收端的SINR值.

$$\gamma_i^C = G_i^C p_i^C / \left(\sum_{k \in S_i} G_{B,k}^{CD} p_{k,i}^D + \sigma_i^C \right) \quad (1)$$

$$\gamma_{j,i}^D = G_j^D p_{j,i}^D / \left(G_{j,i}^{DC} p_i^C + \sum_{l \in S_i, l \neq j} G_{j,l}^{DD} p_{l,i}^D + \sigma_j^D \right) \quad (2)$$

其中: G_i^C 和 $G_{B,k}^{CD}$ 为第 i 条蜂窝链路和第 k 条D2D链路到基站的路径增益; G_j^D 为第 j 条D2D链路的路径增益; $G_{j,i}^{DC}$ 为第 i 条蜂窝链路到第 j 条D2D链路的路径增益; $G_{j,l}^{DD}$ 为第 l 条D2D链路到第 j 条D2D链路的路径增益; σ_i^C 和 σ_j^D 为背景噪声; p_i^C 和 $p_{j,i}^D$ 为发射功率,且 p_i^C 为固定值, $p_{j,i}^D$ 的上限值为 $p_{j,i}^{D,\max}$. 此外, $\gamma_{i,i}^D = 0, \forall i \notin S_i$. 假设系统带宽为1,采用香农公式可

得2类链路的吞吐量为

$$\begin{aligned} R_i^C &= \text{lb}(1 + \gamma_i^C) \\ R_{j,i}^D &= \text{lb}(1 + \gamma_{j,i}^D) \end{aligned} \quad (3)$$

另外,2类链路的SINR门限分别定义为 Γ_i^C 和 Γ_j^D . 为了体现所提算法权衡了系统吞吐量和接入链路数性能的折中,式(4)将获得的接入链路数定义为 β ,其中 $|\cdot|$ 表示计算相应集合中元素的个数, $\mathbf{X} = (x_{m,n}^D)_{M \times N}$ 为一个D2D链路的信道分配矩阵,若第 n 条信道被分配给了第 m 条D2D链路,则 $x_{m,n}^D = 1$,否则 $x_{m,n}^D = 0$.

$$\beta = \left| \left\{ k \in D \mid \sum_{r \in C} x_{k,r}^D \gamma_{k,r}^D \geq \Gamma_k^D, \sum_{r \in C} x_{k,r}^D \leq 1 \right\} \right| \quad (4)$$

1.2 问题构建

优化目标是在保证小区内两类链路最低QoS需求和D2D链路发送端的发射功率不超过上限值的条件下来最大化D2D通信的系统吞吐量,可以构建优化问题为

$$\max_{p_{m,n}^D, x_{m,n}^D} \alpha = \sum_{n \in C} \sum_{m \in D} R_{m,n}^D \quad (1)$$

$$\text{s.t.} : 0 \leq p_{m,n}^D \leq p_m^{D,\max}, \forall m \in D, \forall n \in C \quad (2)$$

$$x_{m,n}^D = \{0, 1\}, \sum_{n \in C} x_{m,n}^D \leq 1, \forall m \in D \quad (3)$$

$$\gamma_n^C \geq \Gamma_n^C, \forall n \in C \quad (4)$$

$$\sum_{n \in C} x_{m,n}^D \gamma_{m,n}^D \geq \Gamma_m^D \sum_{n \in C} x_{m,n}^D, \forall m \in D \quad (5)$$

其中:约束条件②表示了D2D链路的发射功率范围,约束条件③表示单链路仅能使用单信道,约束条件④和⑤分别是为了保证蜂窝链路和接入D2D链路的QoS而设定的SINR门限.

2 联合优化算法

式(5)构造的优化问题是一种混合整数非线性规划问题,其复杂度为NP-hard. 因此,提出将上述优化问题分解为功率控制和信道分配2个子部分. 其中,采用粒子群优化(PSO, particle swarm optimization)算法来优化信道分配,而计算每个粒子适应度值时则借助功率控制和逐步移除. 因此,实现了2种无线资源的联合优化.

2.1 功率控制部分

功率控制部分针对信道分配部分给定的粒子,也即在信道分配变量 $x_{m,n}^D, \forall m \in D, n \in C$ 确定的情

况下通过优化 D2D 链路的发射功率来最大化 D2D 通信的系统吞吐量。由于不同信道之间的正交性,多信道下的功率控制问题可以分解成多个单信道下的功率控制子问题。不失一般性,考虑第 i 条信道,复用该信道的 D2D 链路的集合 $S_i = \{k \in D \mid x_{k,i}^D = 1\}$, 则式(5)描述的优化问题可以简化为

$$\max_{p_j^D} \alpha = \sum_{m \in S_i} R_j^D \quad (1)$$

$$\text{s. t. } 0 \leq p_j^D \leq p_j^{D, \max}, \forall j \in S_i \quad (2) \quad (6)$$

$$\gamma^C \geq \Gamma^C \quad (3)$$

$$\gamma_j^D \geq \Gamma_j^D, \forall j \in S_i \quad (4)$$

在求解式(6)描述的问题之前,需判断其约束集是否为空,也就是检测当前系统中所有链路的最低 QoS 需求是否能得到同时满足,若不能,则需移除部分链路来保证可行性,具体过程如下。

1) 计算矩阵 $D(\Gamma_{S_i}^D)Z$ 的最大特征值。其中, $D(\Gamma_{S_i}^D)$ 是一个对角矩阵,它的第 j 个对角元素为 S_i 中第 j 条 D2D 链路的 SINR 门限; Z 是一个归一化的路径增益矩阵,当 $m \neq n$ 时, $Z_{m,n} = G_{m,n}^{DD}/G_m^D$, 否则 $Z_{m,n} = 0$ 。若 $D(\Gamma_{S_i}^D)Z$ 的最大特征值小于 1, 转至步骤 2), 否则需移除。

2) 根据 Perron - Frobenious 定理,可以通过式(7)得到 S_i 中所有 D2D 链路的最优发射功率矢量。若此功率矢量能满足式(6)约束条件②和③,系统可行;否则系统仍是不可行的,需移除。

$$p_j^{D*} = \{(\mathbf{E} - D(\Gamma_{S_i}^D)Z)^{-1}D(\Gamma_{S_i}^D)\boldsymbol{\eta}\}_{|j} \quad (7)$$

其中: \mathbf{E} 为单位矩阵, $\boldsymbol{\eta}$ 为噪声矢量。若系统的可行性不能得到保证,只能让系统尽可能接入多的 D2D 链路,但是移除最少链路的问题的复杂度是 NP-complete。因此,设计了逐步移除的机制:根据 S_i 中各链路对当前系统的影响来逐条移除直至系统的可行性能得到保证。上述影响可通过式(8)计算得到的移除测度来评价。移除测度越大的链路越先被移除。

$$\theta_j^D = \Gamma_j^D \left(\sum_{\substack{k \in S_i \\ k \neq j}} Z_{j,k}^{DD} p_k^{D*} + \eta_j^D \right) + \sum_{\substack{k \in S_i \\ l \neq j}} \Gamma_l^D Z_{l,j}^{DD} p_j^{D*} \quad (8)$$

在经过上述可行性检测和逐步移除后,系统的可行性得到了保证,优化问题(如式(6)所述)并不是凸问题。但由于 D2D 链路一般均有较高的 QoS 需求,目标函数 $\ln(1 + \gamma_{j,i}^D)$ 可以合理地近似为 $\ln(\gamma_{j,i}^D)$ 。然后,对自变量作对数变化将原问题转化

为凸问题。最后,借助障碍法来求解。此外,上述功率控制优化过程总的时间复杂度为 $O(NM^3)$ 。

2.2 信道分配部分

信道分配部分基于功率控制部分反馈的结果,采用粒子群优化(PSO, particle swarm optimization)算法来优化 D2D 链路的信道分配。PSO 算法是一种具有较优性能和较低复杂度的随机进化算法,并且广泛用于资源分配。该部分 PSO 算法应用的具体过程可描述如下。

1) 定义编码方式和适应度函数

信道分配部分的优化变量是信道。PSO 中每个粒子包括 3 个组成部分:位置、速度和适应度值。针对第 s 个粒子,采用整数编码,其位置编码形式如式(9)所示,其中 $y_s^j \in C, \forall j \in D$ 为分配给第 j 条 D2D 链路的信道标识;速度编码形式如式(10)所示,其中 $v_s^j \in [0, N], \forall j \in D$ 为第 j 条 D2D 链路的位置更新速度。适应度值是功率控制部分在该粒子对应的信道分配下的优化结果,表示为 F_s 。

$$\mathbf{Y}_s = (y_s^1, y_s^2, \dots, y_s^M) \quad (9)$$

$$\mathbf{V}_s = (v_s^1, v_s^2, \dots, v_s^M) \quad (10)$$

2) 初始化粒子群

随机产生初始粒子群 $N_{\text{PSO}}(2M+1)$ (N_{PSO} 为粒子群中设定的粒子个数)的矩阵,矩阵的前 M 列代表粒子的位置矢量,第 $M+1 \sim 2M$ 列代表粒子的速度矢量,最后 1 列代表适应度值。

3) 位置、速度更新策略

通过对粒子群的各个粒子进行位置、速度的更新从而进入下代粒子群。在 PSO 中,各个粒子在解空间中搜索时需考虑 2 个因素:个体最优位置和全局最优位置。粒子的速度和位置更新公式分别为

$$\mathbf{V}_s^{t+1} = w\mathbf{V}_s^t + c_1\delta(\mathbf{P}_s^t - \mathbf{Y}_s^t) + c_2\varepsilon(\mathbf{P}_g^t - \mathbf{Y}_s^t) \quad (11)$$

$$\mathbf{Y}_s^{t+1} = \mathbf{Y}_s^t + \mathbf{V}_s^{t+1} \quad (12)$$

其中:上标 t 和 $t+1$ 代表迭代次数, w 为保持原来速度的系数, \mathbf{P}_s^t 和 \mathbf{P}_g^t 分别为第 s 个粒子在第 t 次迭代时的个体最优位置矢量和全局最优位置矢量, c_1 为粒子跟踪个体最优值的权重, c_2 为粒子跟踪群体最优值的权重, δ 和 ε 为 $[0, 1]$ 区间内均匀分布的随机数。

4) 解码策略和收敛性检查

由于标准 PSO 适用于求解连续解空间问题,可以将传递给功率控制部分粒子由连续非整型变量转化为离散整型变量为

$$\mathbf{Y}_s = \text{round}((y_s^1, y_s^2, \dots, y_s^M)) \quad (13)$$

其中 round 函数使得非整数解码为最相近的整数值。由于 PSO 收敛速度较快,可以预先定义最大迭代次数 T 来判断是否已收敛。此外,PSO 算法的时间复杂度为 $O(TN_{\text{PSO}} \ln N_{\text{PSO}})$,因此所提联合算法总的时间复杂度为 $O(NM^3 TN_{\text{PSO}} \ln N_{\text{PSO}})$ 。

3 仿真结果

下面通过 Matlab 仿真分析评估了所提算法的性能。基本的仿真参数如表 1 所示。PSO 相关的参数为 $N_{\text{PSO}} = 50, w = 0.79, c_1 = 2, c_2 = 2, T = 50$ 。此外,链路路损模型如文献[1]所示。

表 1 系统参数

参数	值
小区形状、半径/m	圆形、200
天线类型	全向
蜂窝链路发射功率/mW	200
D2D 链路发射功率上限/mW	200
噪声频谱密度/(dBm·Hz ⁻¹)	-174
信道带宽/kHz	180
噪声系数/dB	BS:5, UE:9
用户分布	均匀分布

通过提出 1 000 次拓扑的平均对比了 5 种算法:①Yu 等^[2]提出的功率控制算法联合随机信道分配算法(算法 1);②Zhang 等^[4]提出的信道分配算法联合固定功率控制算法(算法 2);③随机信道分配联合固定功率控制算法(算法 3);④Feng 等^[3]提出的联合信道分配和功率控制算法(算法 4);⑤本文方案,其中随机信道分配算法为 D2D 链路分配随机的信道,固定功率控制算法将链路的发射功率设成固定值。

图 1 所示为 $\Gamma_j^D = 12$ dB 时,所有算法随着 D2D 链路数变化时系统吞吐量和接入链路数性能的变化曲线。由图 1 可知,随着 D2D 链路数的增加,各算法因利用了多用户分集增益,整体性能均呈上升趋势。图 2 所示为 D2D 链路数为 10 时,所有算法随着 Γ_j^D 变化时系统吞吐量和接入链路数性能的变化曲线。由图 2 可以看出,所有算法在 Γ_j^D 增加时接入链路数都减少了。这是因为链路 QoS 需求的增加导致了链路移除概率的增加。但是,各算法获得的系统吞吐量性能并不是单调变化的。这是因为功率控制部分逐步移除带来的增益和损失是相互制约的。

此外,和算法 4 相比,其他各算法均获得了更高

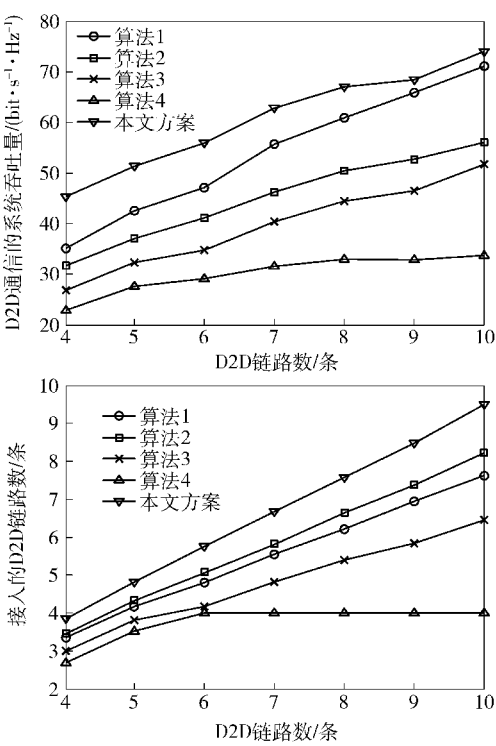


图 1 小区内 D2D 链路数变化时性能对比

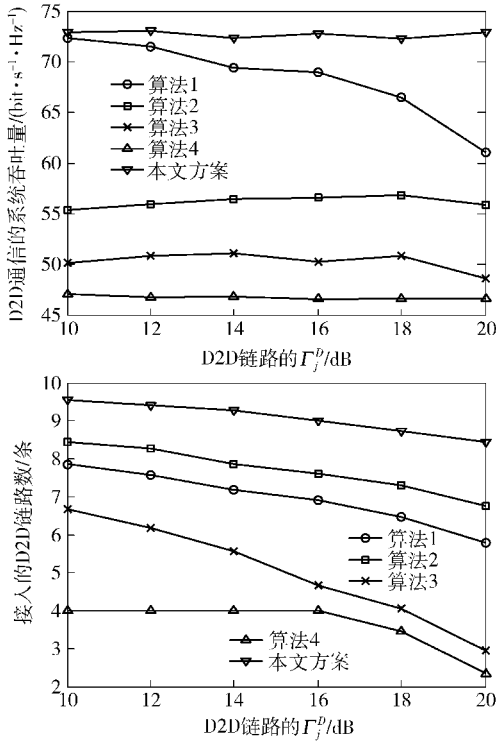


图 2 D2D 链路 Γ_j^D 变化时性能对比

的整体性能。这是因为算法 4 限制了单信道仅能被单链路复用,频谱资源利用率低。由图 1 和图 2 还可知,与算法 1、算法 3 相比,本文方案因充分地利

用了功率控制和信道分配联合优化带来的增益而获得了更优的整体性能.

最后,基于各个算法的优化过程,得到了如表 2 所示的复杂度对比结果. 笔者所提的联合算法虽然复杂度略高,但获得的整体性能明显优于其他算法,在性能和复杂度上实现了较优的折中.

表 2 时间复杂度对比

方案	时间复杂度
算法 1	$O(NM^3)$
算法 2	$O(NM^2/2)$
算法 3	$O(NM)$
算法 4	$O((N+M)NM^2)$
本文方案	$O(NM^3TN_{\text{PSO}}\ln N_{\text{PSO}})$

4 结束语

在单信道允许被多链路复用的场景下,提出了一种联合功率控制和信道分配优化方案,在保证接入链路数最大的前提下来优化 D2D 通信的系统吞吐量,同时保证了蜂窝和 D2D 2 类链路的 QoS. 仿真表明,笔者所提的联合优化方案权衡了系统吞吐

量和接入链路数性能之间的折中,同时在保证链路 QoS 的前提下提升了整体性能.

参考文献:

[1] Tang Rui, Zhao Jihong, Qu Hua. Distributed power control for energy conservation in hybrid cellular network with device-to-device communication[J]. Communications, China, 2014, 11(3): 27-39.

[2] Yu Chiahao, Tirkkonen O, Doppler K, et al. Power optimization of device-to-device communication underlaying cellular communication [C] // Communications, 2009 (ICC'09). IEEE International Conference on. [S. l.]: IEEE, 2009: 1-5.

[3] Feng Daquan, Lu Lu, Yuan Wuyi, et al. Device-to-device communications underlaying cellular networks[J]. Communications, IEEE Transactions on, 2013, 61(8): 3541-3551.

[4] Zhang Rongqing, Cheng Xiang, Yang Liuqing, et al. Interference-aware graph based resource sharing for device-to-device communications underlaying cellular networks [C] // Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2013 IEEE. [S. l.]: IEEE, 2013: 140-145.

(上接第 102 页)

[2] Manley E D, Deogun J S, Xu Lisong, et al. All-optical network coding[J]. Optical Communications and Networking, IEEE/OSA Journal of, 2010, 2(4): 175-191.

[3] 刘焕淋, 秦亮, 谢芸徽. 多速率分层光组播的波长带宽优化分配[J]. 北京邮电大学学报, 2013, 36(2): 60-63.

Liu Huanlin, Qin Liang, Xie Yunhui. Optimization of wavelength bandwidth allocation in multi-rate layered multicast[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2013, 36(2): 60-63.

[4] Qu Zhijian, Ji Yuefeng, Bai Lin, et al. Key module for a novel all-optical network coding scheme[J]. Chinese Optics Letters, 2010, 8(8): 753-756.

[5] 曹张华, 吉晓东, 刘敏. 变信息率线性网络编码的构

造[J]. 重庆邮电大学学报, 2014, 26(1): 62-67.

Cao Zhanghua, Ji Xiaodong, Liu Min. Construction of variable rate linear network coding [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2014, 26(1): 62-67.

[6] Wang Wei, Li Yu, Zhu Guangxi, et al. Coding-driven scheduling for frame-based multicast switches[C] //2011 International Symposium on Network Coding (NetCod). Beijing: [s. n.], 2011: 1-4.

[7] 曲志坚, 纪越峰. 基于网络编码的波长冲突解决方法[J]. 中国科技论文在线, 2011, 6(1): 15-19.

Qu Zhijian, Ji Yuefeng. Wavelengths conflict resolution based on network coding[J]. Journal of China Science and Technology Papers Online, 2011, 6(1): 15-19.