

多频带混合场景下终端直通通信用户最优用户密度与功率分配研究

胡春静 刘子扬* 彭博 彭涛 王文博

(北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室 北京 100876)

摘要: 该文分析了蜂窝与终端直通(Device-to-Device, D2D)混合网络中多频带资源的场景下 D2D 用户最佳密度和功率分配问题。在混合网络中包含一个或者多个蜂窝网络, D2D 用户复用蜂窝系统上行频谱资源。通过采用随机几何理论, 上述问题可以建模成一个以最大化 D2D 网络容量为目标并以蜂窝用户和 D2D 用户的中断概率为约束条件的优化问题。由于上述优化问题非凸, 因此分成两步解决原问题: 首先证明当 D2D 用户密度确定的时候原问题对于功率分配是凸问题, 并通过拉格朗日对偶方法得到了最优功率分配方案; 随后证明中断约束条件将 D2D 用户密度的定义域分成有限个子区间, 在每个子区间上可以通过求导的方式得到 D2D 传输容量局部最优解, 基于上述两个结论, 文中设计了一种子区间最优值搜索算法。通过仿真验证了算法的有效性, 并且反映出 D2D 传输容量主要由中断约束条件和来自蜂窝网络的干扰决定。

关键词: 终端直通通信; 网络容量; (M)PPP 模型; 多频带

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)05-1171-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.01023

Study on Optimal Density and Power Allocation for Device to Device Communication under Heterogeneous Networks with Multi-bands

Hu Chun-jing Liu Zi-yang Peng Bo Peng Tao Wang Wen-bo

(Key Laboratory of Universal Wireless Communications, Ministry of Education, Beijing University of Posts & Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: This paper analyzes the optimal density and power allocation for the D2D (Device-to-Device) communication in heterogeneous networks on multi-bands with target of maximizing the D2D transmission capacity. The heterogeneous networks contain one or several cellular systems, and the D2D communication shares uplink resources with them. By utilizing stochastic geometry, it is formed as a sum capacity optimization problem for the D2D network with constraints that guarantee outage probabilities of both cellular and the D2D transmissions. Since the original problem is non-convex, the proof work is divided into two steps: first, it is proved that the power allocation problem is convex when the D2D density is fixed, which can be solved by Lagrangian method; and then that the feasible region for the D2D user density is divided into finite sub-intervals by the outage constraints and the local maximum D2D transmission capacity can be obtained by the derivative method. A sub-interval linear searching algorithm based on the above conclusions is proposed. The simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed algorithm and show that the optimal parameters of the D2D transmission is mainly affected by the outage constraints and the interference from cellular systems.

Key words: Device-to-Device (D2D) communication; Network capacity; (M)PPP model; Multi-bands

1 引言

终端直通(Device-to-Device, D2D)通信^[1]是一种通过终端设备之间的直连链路传输数据的认知无线电技术, 它与蜂窝网络共存并且共享频谱资源^[2-4]。D2D 通信在提高网络吞吐, 节约用户设备能量以及提高瞬时数据速率方面具有显著优势, 最

近几年得到了越来越多的关注, 随着 3GPP 关于 LTE-Advanced 标准化的进一步发展, D2D 技术已经进入无线通信技术标准化进程中^[5]。

传输容量是混合系统研究的基本问题。过去对于频谱共享环境的研究已得出一些结论^[6-8]。文献[9]分析了蜂窝与移动 Ad hoc 网络共享上行频谱时的传输容量关系。文献[10]分析了认知无线网络中次级系统的容量, 在研究中, 作者将网络容量定义为在满足主系统和次级系统中断概率约束条件下, 单位面积内成功传输的空间密度。文献[11]推导了无线 Ad hoc 网络的传输容量并考虑了双向数据传输

2013-07-11 收到, 2013-12-20 改回

国家科技重大专项(2012ZX03003011, 2012ZX03003007), 国家重点基础研究发展计划(2012CB316005)和国家自然科学基金-广东联合基金(U1035001)资助课题

*通信作者: 刘子扬 liuziyang243@gmail.com

的情况。

然而在之前的研究中,次用户只在单频带上共享主系统的频谱,并且以固定功率发送数据。由于 D2D 通信更加灵活,它可以通过载波聚合的方式提高传输速率^[12]。另外, D2D 终端可以通过调整各条频带上的发送功率来进一步提高吞吐和降低干扰。因此 D2D 用户和主系统在多个频带上共存的混合网络场景更加复杂,并且在载波聚合技术逐步推广的趋势下将 D2D 通信扩展到多频带共享场景^[12-15]是很有意义的。

本文将研究带有和功率约束下的 D2D 通信与蜂窝网络共享多频带的情况。假设 D2D 通信可以利用至少一条频带并且可以调整发送功率以获得最大容量。为了保护授权频带中蜂窝用户和 D2D 通信本身的 QoS, D2D 用户造成的干扰不能使蜂窝和 D2D 传输在每条频带上超出一定的中断概率限制。因此上述问题就成为一个 D2D 总容量的优化问题。

由于这是一个非凸问题,本文将它分解为两步来解决。(1)证明在 D2D 用户密度确定的情况下原问题的功率分配是凸问题;(2)利用拉格朗日对偶法算出最优功率分配。然后,本文证明了 D2D 用户密度被约束条件分成有限多个区间,并且可以通过求导的方式得到每个子区间上的局部最优解。基于前面的结论,本文提出一种子区间最优值搜索算法,算法通过在 D2D 用户密度的每个子区间上求导得到局部最优解,经过比较后得到全局最优解。从分析中可看出 D2D 通信传输容量主要由中断概率约束条件和来自蜂窝系统的干扰决定。

2 场景描述和系统模型

2.1 场景描述

基本场景包括蜂窝系统和 D2D 系统。主网络部署了多条独立频带, D2D 通信复用蜂窝系统的上行频谱。带宽定义为 $w_i, i=1,2,\dots,N$, 其中 N 表示存在 N 个可用频带。通过 OFDM 技术,蜂窝上行频谱的每个频带被分为 M 个频域平坦衰落的子信道,并且 D2D 用户可以复用所有的子信道的频谱资源。

假设 D2D 通信可同时使用多条频带发送数据, D2D 发送端在每条频带的输出功率需小于 P_{\max} , 定义 D2D 发送端的发送功率向量为 $\mathbf{P}=(p_1, p_2, \dots, p_N)$, $0 \leq p_i \leq p_{\max}$, 另外, D2D 的总发送功率小于功率限 P_0 。

2.2 网络模型

采用随机几何理论对蜂窝与 D2D 混合网络建模如图 1 所示。在图中存在两种系统,蜂窝系统和 D2D 通信系统,分别用 S_0 和 S_1 表示,系统集合记为 $\Phi=\{S_0, S_1\}$ 。为了便于后续的推导,对上述两个系统做出如下假设:

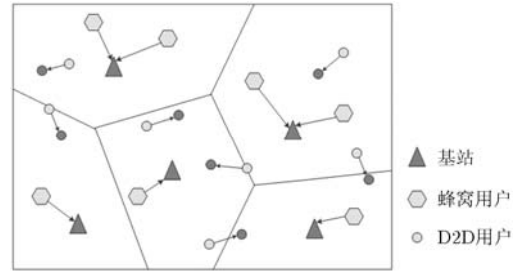


图 1 蜂窝和 D2D 混合网络模型

假设 1 设 2 维平面上 D2D 用户对的密度为 λ_0 , 它们在 2 维平面上服从泊松点过程 Π_0 , D2D 发送端与接收端的距离为 R_0 。

假设 2 蜂窝系统的用户在每条频带上形成泊松点过程, 记为 $\Pi_i^i, i=1,2,\dots,N$ 。由于工作在不同频带的蜂窝系统不同,第 i 个频带的蜂窝用户发送功率^[9]定义为 $P_i, i=1,2,\dots,N$, 相应的蜂窝用户密度为 $\lambda_i, i=1,2,\dots,N$, 蜂窝用户到基站的距离记为 R_i (该距离表示典型接收机到目标基站的距离)。

当采用随机几何对混合网络进行建模时,为了使网络中干扰可以量化计算,往往近似假设蜂窝用户的发送功率是相同的,上述假设在计算网络层面上宏观干扰的时候能够逼近实际情况^[16]。当 D2D 用户复用蜂窝系统频带资源时,不但蜂窝用户的发送节点会对 D2D 用户的接收端产生干扰,而且复用相同频谱资源的 D2D 通信对之间也存在相互干扰。

2.3 信道模型

为了估计接收机处的中断概率,往往需要选择典型接收机进行分析,由于典型接收机是在所有同类用户中以相同概率选择出来的,因此根据 Palm 定理,典型接收机的中断概率具有普适性^[16]。

在后续分析中,信道模型由路损和瑞利衰落 δ_{ji} 两部分构成,功率时延分布服从均值为 1 的指数衰减。因此在某个频带上,系统 j 的第 i 个发射机在典型接收机的接收功率定义为 $P_j \delta_{ji} |X_{ji}|^{-\alpha}$, 其中 P_j 是系统 j 中第 i 个发射机的发送功率, α 是路损因子, X_{ji} 是发射机 i 到典型接收机的距离。

3 D2D 用户在多频带上可获得的传输容量

3.1 D2D 用户在单频带的成功传输概率

由于接收端在一个频带上既受到共存系统的干扰,同时受到同一系统的干扰,因此系统 n 的接收端在第 k 条频带的信干噪比(Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR)可以表示为

$$\text{SINR}_k^n = \frac{P_k^n \delta_{k0} R_{k,n}^{-\alpha}}{\sum_{j \in \Phi} \sum_{X_{jn} \in \Pi_j} P_k^j \delta_{ji} |X_{ji}|^{-\alpha} + N_0} \quad (1)$$

其中 δ_{k0} 是发送端到接收端信道衰落因子, N_0 是热噪声功率密度, $R_{k,n}$ 是系统 S_n 在第 k 条频带的发送端到接收端的距离。考虑到混合网络是一个噪声受限的环境,因此热噪声可以忽略。根据文献[14],系

统 n 在第 k 条频带的成功传输概率为

$$P(\text{SIR}_k^n \geq v_k^n) = \exp\left\{-\varsigma_{k,n} \sum_{j \in \Phi} r_{jn}^k \lambda_k^j\right\} \quad (2)$$

其中 v_k^n 是系统 S_n 的接收机最低解调门限值，

$$r_{jn}^k = \left(\frac{P_k^j}{P_k^n}\right)^{2/\alpha}, \quad C_\alpha = \frac{2\pi}{\alpha} \Gamma\left(\frac{2}{\alpha}\right) \Gamma\left(1 - \frac{2}{\alpha}\right), \quad \text{伽马函数}^{[17]}$$

的表达式为 $\Gamma(x) = \int_0^\infty y^{x-1} e^{-y} dy$, $\varsigma_{k,n} = C_\alpha R_{k,n}^2 (v_k^n)^{2/\alpha}$ 。系统 n 在第 k 条频带的中断概率为

$$P_{n,k}^0(\lambda_k^n, \lambda_k^j) = 1 - P(\text{SIR}_k^n \geq v_k^n) \quad (3)$$

3.2 D2D 用户在多频带上可获得的传输容量

根据文献[15]的定义，成功传输的容量被定义为中断概率与用户密度的乘积，据此本节定义在多频带情况下 D2D 传输容量如下所示：

定义 1 在与蜂窝系统共享多频带下，D2D 网络的传输容量为

$$f(\lambda_0, \mathbf{P}) = \sum_{\substack{i=1 \\ p_i \neq 0}}^N w_i \lambda_0 e^{-\varsigma_0 \left(\lambda_0 + \left(\frac{P_i}{p_i}\right)^\alpha \lambda_i\right)} \quad (4)$$

其中 $\mathbf{P} = (p_1, p_2, \dots, p_N)$ 是功率分配向量； λ_0 是 D2D 的用户密度值。为了保证蜂窝用户和 D2D 传输的质量，定义中断概率约束如下：

$$\begin{aligned} 1 - e^{-\varsigma_i \left(\lambda_i + \left(\frac{P_i}{p_i}\right)^\alpha \lambda_0\right)} &\leq \theta_1 \\ 1 - e^{-\varsigma_0 \left(\lambda_0 + \left(\frac{P_i}{p_i}\right)^\alpha \lambda_i\right)} &\leq \theta_0 \end{aligned}$$

θ_0 是 D2D 用户在单频带链路上的最大中断概率值， θ_1 是蜂窝用户在其工作频段上的中断保护值。

3.3 D2D 用户在多频带上可获得的传输容量最大值

D2D 网络设计的主要目标是在满足所有约束条件的基础上最大化 D2D 传输容量，这样上述问题可以建模为如下优化问题：

$$\begin{aligned} \max f(\lambda_0, p_i) &= \sum_{i=1}^N w_i \lambda_0 e^{-\varsigma_0 \left(\lambda_0 + \left(\frac{P_i}{p_i}\right)^\alpha \lambda_i\right)} \\ \text{s.t. } 1 - e^{-\varsigma_i \left(\lambda_i + \left(\frac{P_i}{p_i}\right)^\alpha \lambda_0\right)} &\leq \theta_0 \\ 1 - e^{-\varsigma_0 \left(\lambda_0 + \left(\frac{P_i}{p_i}\right)^\alpha \lambda_i\right)} &\leq \theta_1 \\ 0 \leq p_i \leq p_{\max}, \quad i=1, 2, \dots, N, \quad \sum_{i=1}^N p_i &\leq P_0 \end{aligned} \quad (5)$$

根据前 3 个约束条件，本文可以得出第 i 个频带上 D2D 发送功率的上、下限值分别为

$$p_{i,\text{inf}} = P_i \left(\frac{-\ln(1-\theta_0)}{\varsigma_0 \lambda_i} - \frac{\lambda_0}{\lambda_i} \right)^{-\frac{\alpha}{2}}$$

和

$$p_{i,\text{sup}} = \min \left\{ P_i \left(\frac{-\ln(1-\theta_1)}{\varsigma_i \lambda_0} - \frac{\lambda_i}{\lambda_0} \right)^{-\frac{\alpha}{2}}, p_{\max} \right\}$$

由于原始问题是非凸的^[14]，不能直接求解。本文将这个问题的求解过程分解为两步：首先在 D2D 用户密度确定的情况下对功率分配进行优化，然后，证明 D2D 用户密度被划分成有限个子区间，只需要在各个子区间上解决局部优化问题就可以得到最优解。当 D2D 用户密度确定的时候，D2D 用户在每个频带上分配的最优功率如下：

定理 1 当 D2D 用户密度确定的时候，D2D 在第 i 个频带上的最佳功率分配为

$$p_i = \begin{cases} p_{i,\text{inf}}, & v \leq h_{i,\text{min}} \\ x_i^*, & h_{i,\text{min}} < v < h_{i,\text{max}} \\ p_{i,\text{sup}}, & v \geq h_{i,\text{max}} \end{cases} \quad (6)$$

其中 v 是拉格朗日乘子， $[h_{i,\text{min}}, h_{i,\text{max}}]$ 是 $h(x_i^*) = \frac{2A_i B_i}{\alpha} e^{-B_i x_i^*} - \frac{2}{\alpha} x_i^* - 1 - \frac{2}{\alpha}$ 的值域， x_i^* 是 $h(x_i^*)=0$ 的解。

为了解决原问题，本节首先将最后的约束条件放松为等式约束，然后讨论放松约束条件对原问题解的影响。当 D2D 密度固定时，可以证明式(5)是关于 p_i 的凸函数，具体过程为：

首先对原问题中的单项式进行变形处理，得到

$$w_i \lambda_0 e^{-\varsigma_0 \left(\lambda_0 + \left(\frac{P_i}{p_i}\right)^\alpha \lambda_i\right)} = w_i \lambda_0 e^{-\varsigma_0 \left(\frac{P_i}{p_i}\right)^\alpha \lambda_i} \quad (7)$$

令 $A_i = w_i \lambda_0 e^{-\varsigma_0 \lambda_0}$ 和 $B_i = \varsigma_0 P_i^{2/\alpha} \lambda_i$ ，式(7)可写为

$$g_i = A_i e^{-B_i p_i^{-\frac{2}{\alpha}}}$$

对 p_i 求二阶导数，可得

$$g_i'' = \frac{2A_i B_i e^{-B_i p_i^{-\frac{2}{\alpha}}}}{\alpha^2} p_i^{-\frac{2(2+\alpha)}{\alpha}} (-2B_i + (2+\alpha)p_i^{\frac{2}{\alpha}})$$

可明显看出， $-2B_i + (2+\alpha)p_i^{\frac{2}{\alpha}}$ 是关于 p_i 的单调递增函数，因此如果取 p_i 的下限值时二阶导数大于零，则对于 p_i 的整个定义域，二阶导数均大于零。 p_i 可取的范围是 $p_{i,\text{inf}} \leq p_i \leq p_{i,\text{sup}}$ ，将 p_i 下限值代入可得

$$\begin{aligned} &-2B_i + (2+\alpha)p_{i,\text{inf}}^{\frac{2}{\alpha}} \\ &= -2\varsigma_0 P_i^{2/\alpha} \lambda_i + (2+\alpha)P_i^{2/\alpha} \left\{ \left(\frac{-\ln(1-\theta_0)}{\varsigma_0 \lambda_i} - \frac{\lambda_0}{\lambda_i} \right)^{-\frac{\alpha}{2}} \right\}^{\frac{2}{\alpha}} \\ &= -\varsigma_0 P_i^{2/\alpha} \lambda_i \left\{ 2 + \frac{2+\alpha}{\ln(1-\theta_0) + \varsigma_0 \lambda_0} \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

对于 $p_{i,\text{inf}} > 0$, $-1 < \ln(1-\theta_0) + \varsigma_0\lambda_0 < 0$, $2 + \frac{2+\alpha}{\ln(1-\theta_0) + \varsigma_0\lambda_0} < 0$. 因此不等式(9)成立。

$$-2B_i + (2+\alpha)p_{i,\text{inf}}^{2/\alpha} > 0 \quad (9)$$

由于 $-2B_i + (2+\alpha)p_i^{2/\alpha}$ 的单调递增性, 因此原问题的二阶导数恒大于零, 所以原问题关于 p_i 是凸函数。在证明当 D2D 用户密度一定前提下原问题的凸性后, 下一步利用拉格朗日对偶方法解决 D2D 用户发送功率优化问题。将原问题写为式(10)所示的标准形:

$$\left. \begin{aligned} \min \quad & -\sum_{i=1}^N u_i A_i e^{-B_i p_i^{2/\alpha}} \\ \text{s.t.} \quad & u_i (p_i - p_{i,\text{inf}}) \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, N \\ & u_i (p_i - p_{i,\text{sup}}) \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, N \\ & \sum_{i=1}^N u_i p_i = P_0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

其中 u_i 是一个二进制整数, 其定义为

$$u_i = \begin{cases} 0, & x_{i,\text{sup}} \leq x_{i,\text{inf}} \\ 1, & \text{其它} \end{cases} \quad (11)$$

u_i 的值由 D2D 用户密度所决定, 当 λ_0 确定时, u_i 的值也随之确定。设 $x_i = p_i$, 则构造拉格朗日函数如下:

$$\begin{aligned} L(x^*, k, l, v) = & -\sum_{i=1}^N u_i A_i e^{-B_i x_i^{2/\alpha}} - \sum_{i=1}^N k_i u_i (x_i^* - p_{i,\text{inf}}) \\ & + \sum_{i=1}^N l_i u_i (x_i^* - p_{i,\text{sup}}) + v \left(\sum_{i=1}^N u_i x_i^* - P_0 \right) \end{aligned}$$

根据 KKT 条件, 当 $u_i = 1$ 的时候, 本文可以得出的算式为

$$k_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (12a)$$

$$l_i \geq 0, \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (12b)$$

$$x_i^* - p_{i,\text{inf}} \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (12c)$$

$$x_i^* - p_{i,\text{sup}} \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (12d)$$

$$k_i (x_i^* - p_{i,\text{inf}}) = 0, \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (12e)$$

$$l_i (x_i^* - p_{i,\text{sup}}) = 0, \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (12f)$$

$$-\frac{2A_i B_i}{\alpha} e^{-B_i x_i^{2/\alpha}} x_i^{*-1-\frac{2}{\alpha}} - k_i + l_i + v = 0, \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (12g)$$

$$\sum_{i=1}^N x_i^* = P_0 \quad (12h)$$

对式(12g)式进行变形得到

$$k_i = -\frac{2A_i B_i}{\alpha} e^{-B_i x_i^{2/\alpha}} x_i^{*-1-\frac{2}{\alpha}} + l_i + v \quad (13)$$

同时根据式(12f)可以得到

$$l_i x_i^* = l_i p_{i,\text{sup}} \quad (14)$$

将式(13)和式(14)代入到式(12e)中得到

$$\begin{aligned} & \left(v - \frac{2A_i B_i}{\alpha} e^{-B_i x_i^{2/\alpha}} x_i^{*-1-\frac{2}{\alpha}} \right) (x_i^* - x_{i,\text{inf}}) \\ & + l_i (x_{i,\text{sup}} - x_{i,\text{inf}}) = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

令 $h(x_i^*) = \frac{2A_i B_i}{\alpha} e^{-B_i x_i^{2/\alpha}} x_i^{*-1-\frac{2}{\alpha}}$, 由于 $h(x_i^*)$ 是一个连续函数并且定义域是一个紧闭集, 则 $h(x_i^*)$ 在 $[x_{i,\text{inf}}, x_{i,\text{sup}}]$ 上必有确界, 根据 Weierstrass 定理, 其值域为 $[h_{\min}, h_{\max}]$ 。

当 $v \leq h_{\min}$ 的时候有 $x_i^* = x_{i,\text{inf}}$, $l_i = 0$ 。

当 $h_{\min} < v \leq h_{\max}$ 时, $l_i = 0$, 且有 $v - \frac{2A_i B_i}{\alpha} e^{-B_i x_i^{2/\alpha}} x_i^{*-1-\frac{2}{\alpha}} = 0$ 。根据泰勒级数得到

$$e^{-B_i x_i^{2/\alpha}} \approx 1 - B_i x_i^{2/\alpha} \quad (16)$$

代入式(15)中可以得到

$$v - \frac{2A_i B_i}{\alpha} \left(1 - B_i x_i^{2/\alpha} \right) x_i^{*-1-\frac{2}{\alpha}} = 0 \quad (17)$$

当参数值确定的时候可以得到 x_i^* 的数值解, 记为 x_i^* 。

当 $v > h_{\max}$ 的时候, 有 $x_i^* = x_{i,\text{sup}}$, 并且满足

$$v - \frac{2A_i B_i}{\alpha} e^{-B_i x_{i,\text{sup}}^{2/\alpha}} x_{i,\text{sup}}^{-1-\frac{2}{\alpha}} + l = 0。$$

将结果代入到式(12h) $\sum_{i=1}^N x_i^* = P_0$ 中可以得到 v 的数值解, 从而相应的得到 x_i^* 的值。

注 1 分析原问题时, 本文首先将功率分配的不等式约束松弛为等式约束, 然后分析这种松弛的影响, 根据式(10)的约束条件 1 和约束条件 2, D2D 用户的总功率上界为

$$P_{0,\text{sup}} = \sum_{i=1}^N p_{i,\text{sup}} \quad (18)$$

因此如果 D2D 用户的总功率超过上界, 则总功率等于上界, 即等式约束中的数值应该由 $P_{0,\text{sup}}$ 替代。

当得到在 D2D 用户密度确定条件下的最佳功率分配结果后, 本文进一步证明 D2D 用户密度被分割成有限个子区间, 并可以通过在每个子区间上求解优化问题得到最终最优解。根据原问题的约束条件 1 和约束条件 2 可以看出, 随着 D2D 用户密度的增长, 网络中的干扰在不断增加, 当在某个频带上 D2D 用户无法保证蜂窝用户或者自身的传输中断约束要求时, D2D 用户只能放弃使用这些频带, 此时有 $p_{i,\text{inf}} = p_{i,\text{sup}}$, 即

$$P_i \left(\frac{-\ln(1-\theta_0)}{\varsigma_0 \lambda_i} - \frac{\lambda_0}{\lambda_i} \right)^{-\frac{\alpha}{2}} = P_i \left(\frac{-\ln(1-\theta_1)}{\varsigma_i \lambda_0} - \frac{\lambda_i}{\lambda_0} \right)^{\frac{\alpha}{2}} \quad (19)$$

令 $l_0 = \frac{-\ln(1-\theta_0)}{s_0}$, $l_i = \frac{-\ln(1-\theta_i)}{s_i}$, 将它们代

入式(19)中可以得到

$$\left(\frac{l_0 - \lambda_0}{\lambda_i - \lambda_0}\right) \left(\frac{l_i - \lambda_i}{\lambda_0 - \lambda_i}\right) = 1 \quad (20)$$

通过式(20)进行整理可以得到

$$-\lambda_0 l_i = l_0 \lambda_i - l_0 l_i$$

设上述方程的解用 b_i 表示, 则 $b_i = \frac{l_0}{l_i}(l_i - \lambda_i)$,

$i = 1, 2, \dots, N$ 。将这些解按照取值从小到大的顺序重新进行排列, 得到新的序列表示为 $b_j, j=1, 2, \dots, N$, 则 D2D 用户密度由这些间断点分成有限 N 个区间, 每当 D2D 用户密度 λ_0 超过一个 b_j 的时候, 就意味着 D2D 用户需要放弃使用一个频带进行传输。因此在区间 $b_j < \lambda_0 \leq b_{j+1}$ 上, D2D 用户的传输容量和可以表示为

$$C_j = \sum_{i=j}^N c_i, \quad j = 1, 2, \dots, N-1 \quad (21)$$

根据定理 1, 可以得到当 D2D 用户 λ_0 确定的时候在每个频带上分配的最优功率, 即得到 $p_{i,\text{opt}}$ 与 λ_0 的对应关系, 为了简化推导, 本文采用如下表示方式: $p_{i,\text{opt}} = f(\lambda_0)$, 代入到频带 i 的容量表达式中可以得到

$$c_i = w_i \lambda_0 e^{-s_0 \left[\lambda_0 + \left(\frac{P_i}{f(\lambda_0)} \right)^\alpha \lambda_i \right]}, \quad b_j < \lambda_0 \leq b_{j+1} \quad (22)$$

因此 D2D 用户的传输和容量可以表示为与用户密度 λ_0 的函数, 并且由于用户和容量在区间 $b_j < \lambda_0 \leq b_{j+1}$ 上关于 λ_0 是连续可导的, 因此可以通过对 λ_0 求导的方式得到极值点为

$$\frac{dC_j}{d\lambda_0} = 0$$

其中每个用户密度子区间的右端点值是一个临界值点, 通过在子区间上对临界值点对应的 D2D 传输容量进行比较, 就可以得到一个子区间上的局部最优值。当得到 N 个区间上的局部最优值点后, 可以通过比较选取最大的容量作为最大容量, 并且其对应的 D2D 用户密度和功率分配参量即为最优参数值。根据上述分析, 分段局部最优值搜索算法可总结为表 1。

表 1 分段局部最优值搜索算法

- (1) $b_i = \frac{l_0}{l_i}(l_i - \lambda_i)$
- (2) 对 b_j 进行升序排列, 得到 b_j
- (3) $B = \{\lambda\}$
- (4) $B \leftarrow B \cup \lambda_i, \forall \lambda_i < b_N$
- (5) 对 B 进行升序排列, K 为 B 中元素的数目
- (6) **for** $k = 1 \rightarrow K$ **do**
- (7) **for** $i = 1 \rightarrow N$ **do**
- (8) **if** $B_k > b_j$ **then**
- (9) $c_i = 0$
- (10) **else**
- (11) c_i 为将参数代入式(22)的结果
- (12) **end if**
- (13) **end for**
- (14) $C_k = \sum c_i$
- (15) $(\lambda_0^k, P_k) = \arg \max_{[B_{k-1}, B_k]} C_k$
- (16) $\Omega \leftarrow \Omega \cup \{(C_{k,\text{max}}, \lambda_0^k, P_k)\}$
- (17) **end for**
- (18) 从 Ω 中返回 $(\lambda_{0,\text{opt}}, P_{\text{opt}})$ 和最大容量 C_{max}

4 仿真

本节对理论分析部分提出的算法进行仿真和分析, 在仿真场景中假设有 5 个可用频带, 每个频带上都存在蜂窝用户, 这些蜂窝用户的参数各不相同。D2D 通信链路距离设置为 10 m, 接收机解调门限为 0 dB, D2D 用户的发送总功率约束为 150 mW, 仿真主要参数设置如表 2。

在仿真中 D2D 用户密度的可行域被算法分成了 5 个子区间, 每个区间上都存在着一个单独的极值点, 并且所有区间的有边界值也是临界值点, 图中共展示了在局部搜索算法中一共得到了 9 个临界值点并列出了这些临界值点对应在每个频带上的容量, 如果子区间上某个频带上 D2D 用户无法通过功率控制达到中断率的要求, 则会放弃使用这个频带。图 2 和图 3 中分别给出了对应的 D2D 用户在 5 个频带的和容量变化情况。

表 2 多频带 D2D 通信仿真主要参数设置

| 参数 | 频带 1 | 频带 2 | 频带 3 | 频带 4 | 频带 5 | D2D |
|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| 路损因子 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| 平均链路距离(m) | 70 | 50 | 30 | 20 | 10 | 10 |
| 节点密度(m^{-2}) | 2×10^{-7} | 2×10^{-7} | 3×10^{-7} | 1×10^{-6} | 1×10^{-7} | - |
| 系统带宽 MHz) | 10 | 20 | 20 | 30 | 30 | - |
| 发送功率(mW) | 200 | 500 | 800 | 300 | 300 | $P_{\text{max}}=50$ |

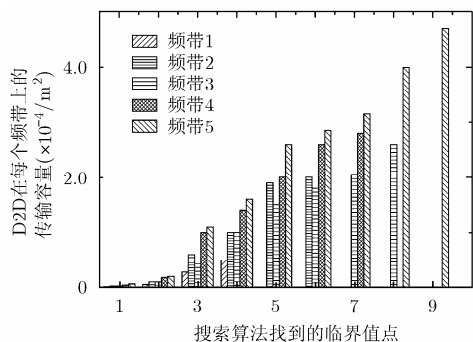


图 2 D2D 用户密度子区间内的各个频带上容量示意图

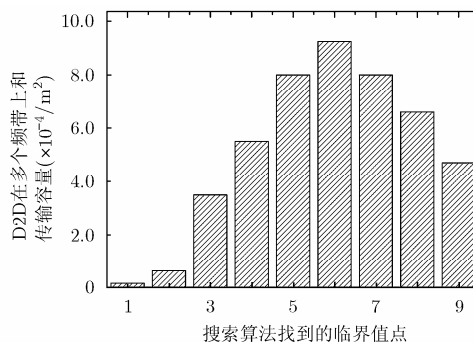


图 3 D2D 用户密度子区间内的和容量示意图

通过图 2 和图 3 可以看出通过放弃使用一些频带, 可以更好地保证蜂窝用户和 D2D 用户的传输质量。以频带 1 为例, 由于工作在频带 1 上的蜂窝用户的平均链路长度较高并且发送功率较低, 因此这些用户对于来自 D2D 用户的干扰非常敏感, 所以这个频带被 D2D 用户很快放弃使用。由于不用再考虑保证频带 1 上的蜂窝用户的通信质量, 因此 D2D 用户可以在其它频带上继续增加数量从而获得比之前更高的网络容量。随着放弃一些频带的使用, D2D 通信可以通过进一步增加用户数目来继续提升网络容量, 而随着放弃更多的频带使用, 更高的用户密度无法弥补由于进行通信的频带数目减少造成的 D2D 通信容量下降, 因为 D2D 用户密度的上升本身也会增加相互之间的干扰, 因此只有合理选取使用的频带和发送功率, 才能达到 D2D 用户在多个频带上的和容量最大。

5 结论

本文分析了蜂窝与 D2D 混合网络中多频带资源的场景下通过调整 D2D 用户最佳密度和功率分配使 D2D 传输容量最大化的问题。由于上述优化问题非凸, 因此文中提出分成两步解决原问题: 首先证明当 D2D 用户密度确定的时候原问题对于功率分配是凸问题, 并通过拉格朗日对偶方法得到了最优功率分配方案; 随后证明中断约束条件将 D2D 用户密度的定义域分成有限个子区间, 在每个子区间上可以通过求导的方式得到 D2D 传输容量局部最优解, 基于上述两个结论, 文中设计了一种子区间最优值搜索算法, 算法通过在 D2D 用户密度的每个子区间上求导得到局部最优解然后比较得到全局最优解, 仿真结果验证了算法的有效性。通过仿真反映出在 D2D 通信与蜂窝用户组成的混合网络中, D2D 系统适当放弃使用一些干扰严重的频带可以提高 D2D 用户的数量并提高 D2D 系统传输容量。

参考文献

- [1] Doppler K, Rinne M, Wijting C, *et al.* Device-to-Device communication as an underlay to LTE-advanced networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2009, 47(12): 42-49.
- [2] Fodor G, Dahlman E, Mildh G, *et al.* Design aspects of network assisted Device-to-Device communications[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2012, 50(3): 170-177.
- [3] Pei Y and Liang Y C. Resource allocation for device-to-device communications overlaying two-way cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(7): 3611-3621.
- [4] Farrar D, Heyl L, and Sander B. Systems and methods for providing Device-to-Device handshaking through a power supply signal[P]. European, EP2444874, 2012-4-25.
- [5] Lei L, Zhong Z, Lin C, *et al.* Operator controlled Device-to-Device communications in LTE-advanced networks[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2012, 19(3): 96-104.
- [6] Weber S P, Yang X, Andrews J G, *et al.* Transmission capacity of wireless ad hoc networks with outage constraints[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2005, 51(12): 4091-4102.
- [7] Golrezaei N, Molisch A F, and Dimakis A G. Base-station assisted Device-to-Device communications for high-throughput wireless video networks[C]. *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC 2012)*, Ottawa, 2012: 7077-7081.
- [8] Chen R, Liao X, Zhu S, *et al.* Capacity analysis of Device-to-Device resource reusing modes for cellular networks[C]. *Proceedings of the IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (ComNetSat 2012)*, Bali, 2012: 64-68.
- [9] Huang K, Lau V K N, and Chen Y. Spectrum sharing between cellular and mobile ad hoc networks: transmission-capacity trade-off[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2009, 27(7): 1256-1267.
- [10] Lee J, Lim S, Andrews J G, *et al.* Achievable transmission

- capacity of secondary system in cognitive radio networks[C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC 2010), Cape Town, South Africa, 2010: 1–5.
- [11] Vaze R, Truong K T, Weber S, *et al.* Two-way transmission capacity of wireless Ad-hoc networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(6): 1966–1975.
- [12] Wang Y, Pedersen K I, Sørensen T B, *et al.* Carrier load balancing and packet scheduling for multi-carrier systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(5): 1780–1789.
- [13] Liu Z, Peng T, Lu Q, *et al.* Transmission capacity of D2D communication under heterogeneous networks with Dual Bands[C]. Proceedings of the 7th International ICST Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CROWNCOM 2012), Stockholm, Sweden, 2012: 169–174.
- [14] Liu Z, Chen H, Peng T, *et al.* Optimal density and power allocation of D2D communication under heterogeneous networks on multi-bands with outage constraints[C]. Proceedings of the International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC 2013), San Diego, US, 2013: 1179–1183.
- [15] Liu Z, Peng T, Chen H, *et al.* Optimal D2D user allocation over multi-bands under heterogeneous networks[C]. Proceedings of the Global Communication Conference (GLOBECOM 2012), Anaheim, US, 2012: 1339–1344.
- [16] Haenggi M. Stochastic Geometry for Wireless Networks[M]. New York: Cambridge University Press, 2012: 93–103.
- [17] Kingman J F C. Poisson Processes[M]. New York: Oxford University Press, 1992: 53–63.
- 胡春静：女，1969年生，副教授，研究方向为移动通信与信号处理和无线应用。
- 刘子扬：男，1985年生，博士，研究方向为宽带认知无线电通信系统设计和蜂窝与D2D混合网络研究。
- 彭博：女，1989年生，硕士生，研究方向为认知无线电通信技术和蜂窝与终端直通混合网络。