

# Study on the Downlink Transmission Rate for Massive MIMO-D2D Cellular Networks

Ce Li, Dianwu Yue

College of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian Liaoning  
Email: 1003132558@qq.com, dwyue@hotmail.com

Received: Aug. 6<sup>th</sup>, 2017; accepted: Aug. 20<sup>th</sup>, 2017; published: Aug. 28<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

In order to adapt to the development of the fifth generation mobile communication technology (5G), this paper investigates the downlink transmission rate for D2D underlying large-scale MIMO cellular networks. In particular, based on analytical expressions of coverage probabilities of both D2D users and downlink cellular users, the transmission rate of cellular users are analyzed for three user distributed scenarios. The results show that in order to ensure the cellular communication, the number of D2D users should be strictly controlled, and the number of antennas can be increased in order to compensate for the interference efficiently. The transmission rate with the D2D users can be improved by making use of On-Off power control method for D2D users and optimizing the access transmission probability.

## Keywords

Massive MIMO, D2D Communication, 5G, Cellular Network, Power Control

---

# 大规模MIMO-D2D蜂窝网络中的下行传输速率研究

李 策, 岳殿武

大连海事大学信息科学技术学院, 辽宁 大连  
Email: 1003132558@qq.com, dwyue@hotmail.com

收稿日期: 2017年8月6日; 录用日期: 2017年8月20日; 发布日期: 2017年8月28日

---

## 摘 要

为了顺应第五代移动通信技术(5G)的发展, 本文探讨了大规模MIMO与D2D通信混合蜂窝网络中的下行

链路频谱效率问题。特别, 针对三种用户分布场景, 利用D2D用户和蜂窝用户覆盖率解析表达式分析了蜂窝用户传输速率变化情况。结果表明, 为确保蜂窝通信, 应严格控制D2D用户接入数目, 同时增加天线数, 以有效弥补干扰。此外, 通过对D2D用户引入On-Off功率控制方法, 并优化接入传输概率, 本文实现了对D2D用户的频谱效率的提升。

## 关键词

大规模MIMO, D2D通信, 5G, 蜂窝网络, 功率控制

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

大规模 MIMO 系统是指基站配置数十根甚至数百根以上天线, 比传统 MIMO 系统中的 4 根或 8 根天线增加一个数量级以上[1] [2]。利用基站大规模天线阵列所提供的空间自由度, 移动蜂窝系统可在相同的时频资源下能够同时服务更多的用户, 并且能够提供更高的频谱效率和能量效率[3]。鉴于此, 大规模 MIMO 成为无线通信领域面向 5G 最为热点技术之一。由于未来 5G 将是基于多种先进技术由各种不同规模网络混合而成的异构网络, 因此在尽力发展大规模 MIMO 技术同时, 也需要探讨大规模 MIMO 技术与其它先进技术融合问题。

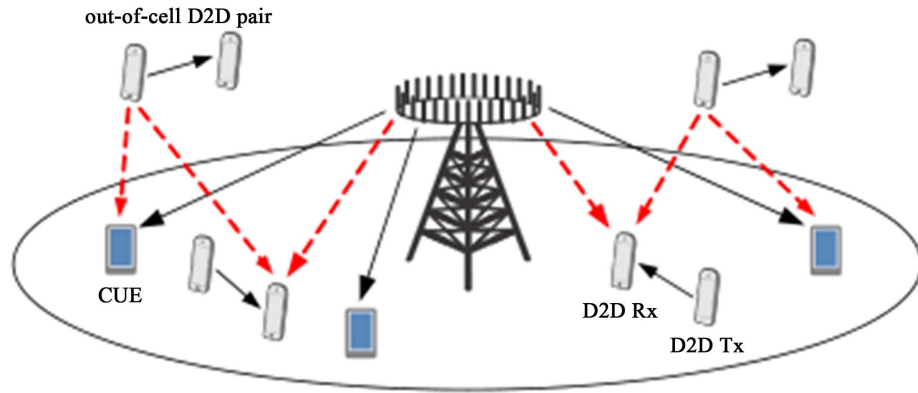
D2D 通信也是目前面向 5G 的热点技术之一。它是一种在蜂窝系统的控制下, 允许终端用户通过共享小区资源进行直接通信的新技术。在蜂窝网络引入 D2D 通信, 具有减轻基站负担, 减小通信时延, 提高频谱效率能量效率等优势[4]。迄今关于蜂窝网络 D2D 通信研究已有大量成果涌现。特别, 文献[5]提出 D2D 在 LTE 网络系统下的通信可能性, 并讨论了在蜂窝网络中引入 D2D 通信的影响。D2D 用户在复用蜂窝资源时会产生干扰, 但可以通过预编码、功率控制以及多天线等技术进行有效的控制。文献[6]研究了大规模 MIMO 与 D2D 混合网络中上行链路频谱效率问题。该文指出蜂窝用户确实受到 D2D 用户的干扰, 但可以将 D2D 干扰信号个数按一定比例向天线数收缩, 增加天线数, 可弥补干扰, 提高系统的频谱效率。文献[7]考虑了大规模 MIMO 与 D2D 混合网络中下行链路, 提出了一种采用 Null-space 预编码来抑制蜂窝用户与 D2D 用户之间干扰的方法。文献[8]基于随机几何研究了一种功率控制方法, 在保证一定通信质量的前提下, 对大规模 MIMO 与 D2D 混合系统实现能量效率最大化。

D2D 通信应用到大规模 MIMO 蜂窝系统中是当今无线通信领域重要课题。为此, 在文献[9]基础上, 本文对大规模 MIMO 与 D2D 混合网络中的下行链路频谱效率问题进行进一步探讨。

## 2. 联合系统模型

考虑一个单小区大规模 MIMO 与 D2D 通信联合的蜂窝网络, 其下行链路系统模型如图 1 所示[9]。

假定小区半径为  $R$ , 基站位于小区中心, 并配置大规模天线, 天线数量为  $M$ , 服务蜂窝用户数为  $K$ , 蜂窝用户数要小于天线数  $1 < K < M$ 。假定 D2D 用户复用蜂窝用户下行链路的频谱资源, D2D 发射端用户服从泊松点过程 (PPP), 密度为  $\lambda_d$ , 其代表单位面积的平均 D2D 用户数。蜂窝用户在小区内服从均匀分布, D2D 接收端距离配对的发送端距离为  $d$ , 其中 D2D 用户、蜂窝用户都配置单天线。 $R_{k,j}$  表示第  $j$  个 D2D 发射端用户到第  $k$  个 D2D 接收端用户之间的距离, 对于一个特定的 D2D 用户标记为 0, 即  $R_{0,0}$



**Figure 1.** Downlink system model  
**图 1.** 下行链路系统模型

表示一组特定的配对 D2D 用户之间的距离。 $R_{0,BS}$  表示特定 D2D 接收端用户到基站 BS 的距离。 $D_{0,k}$  表示第  $k$  个 D2D 接收端到蜂窝用户的距离。 $\mathbf{h}_j \in \mathbb{C}^{M \times 1}, j \in \{0, \dots, K-1\}$  表示第  $j$  个蜂窝用户到基站(BS)的信道增益矩阵,  $\mathbf{h}_j \sim CN(\mathbf{0}, \mathbf{I})$ 。 $\mathbf{V} = [\mathbf{v}_0, \dots, \mathbf{v}_{K-1}] \in \mathbb{C}^{M \times K}$  表示基站侧归一化 ZF 预编码矩阵。 $\mathbf{f}_{0,BS} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$  表示基站到 D2D 接收端的信道增益矩阵,  $\mathbf{f}_{0,BS} \sim CN(\mathbf{0}, \mathbf{I})$ 。 $\mathbf{g}_{k,j} \in \mathbb{C}$  表示第  $j$  个 D2D 发送端到第  $k$  个 D2D 接收端用户的信道增益矩阵  $\mathbf{g}_{k,j} \sim CN(\mathbf{0}, \mathbf{I})$ 。 $\mathbf{e}_{0,k} \in \mathbb{C}$  表示第  $k$  个 D2D 发送端到蜂窝用户的信道增益矩阵,  $\mathbf{e}_{0,k} \sim CN(\mathbf{0}, \mathbf{I})$ 。考虑路径损耗衰落模型为  $A_i d^{-\alpha_i}, i \in \{c, d\}$ ,  $c$  表示用户到基站的路径损耗,  $d$  表示任意两个用户直接的路径损耗; 而  $A_i, \alpha_i$  分别表示路径损耗系数和路径损耗指数。 $r_j \in \mathbb{C}, \mathbf{s} \in \mathbb{C}^{K \times 1}$  分别表示 D2D 发射端和基站的发送信号, 其中  $\mathbb{E}[|r_j|^2] \leq P_{d,max}, \mathbb{E}[\|\mathbf{s}\|^2] \leq P_{c,max} = P_c$ 。 $n_i$  为加性高斯白噪声, 噪声功率为  $N_0$ 。

则 D2D 接收端所接收的信号可表示为

$$y_{d,0} = \sqrt{A_{0,d} R_{0,0}^{-\alpha_d/2}} \mathbf{g}_{0,0} r_0 + \sqrt{A_{0,c} R_{0,BS}^{-\alpha_c/2}} \mathbf{f}_{0,BS}^H \mathbf{V} \mathbf{s} + \sqrt{A_{0,d}} \sum_{j=0} R_{0,j}^{-\alpha_d/2} \mathbf{g}_{0,j} r_j + n_d \quad (1)$$

通过公式(1), 可以得到信干噪比为[9]

$$SINR_d = \frac{P_0 R_{0,0}^{-\alpha_d} |\mathbf{g}_{0,0}|^2}{I_{BS,0} + I_{d,0} + \frac{N_0}{A_d}} \quad (2)$$

其中,  $I_{d,0} = \sum_{j=0} P_j R_{0,j}^{-\alpha_d} |\mathbf{g}_{0,j}|^2$ ,  $I_{BS,0} = \frac{A_{0,c} P_c}{A_{0,d} K} R_{0,BS}^{-\alpha_c} \|\mathbf{f}_{0,BS}^H \mathbf{V}\|^2$ 。

对于蜂窝用户接收信号表示为

$$y_{c,0} = \sqrt{A_c D_{0,BS}^{-\alpha_c/2}} \mathbf{h}_0^H \mathbf{V} \mathbf{s} + \sqrt{A_d} \sum_j D_{0,j}^{-\alpha_d/2} \mathbf{e}_{0,j} r_j + n_c \quad (3)$$

通过公式(3), 其信干噪比表示为[9]

$$SINR_{c,0} = \frac{|\mathbf{h}_0^H \mathbf{v}_0|^2}{\frac{A_{0,d}}{\zeta} D_{0,BS}^{\alpha_c} \left( I_{d,c} + \frac{N_0}{A_{0,d}} \right)} \quad (4)$$

其中,  $I_{d,c} = \sum_j P_j R_{0,j}^{-\alpha_d} |\mathbf{e}_{0,j}|^2$ ,  $\zeta = A_c \frac{P_c}{K}$ 。

### 3. 系统性能分析

#### 3.1. 性能指标

定义下行链路蜂窝用户和 D2D 用户的传输速率和覆盖率如下[9]:

$$\begin{aligned}\bar{R}_t &= \sup_{\beta_t \geq 0} \log(1 + \beta_t) P'_{\text{cov}}(\beta_t) \\ P'_{\text{cov}}(\beta_t) &= \Pr\{SINR_t \geq \beta_t\}\end{aligned}\quad (6)$$

公式(5)中,  $\bar{R}_t$ ,  $t \in \{c, d\}$  表示蜂窝用户和 D2D 用户的传输速率。公式(6)中,  $P'_{\text{cov}}(\beta_t)$  表示用户 SINR 高于特定门限  $\beta_t$  的覆盖率[10], 覆盖率可被定义为 SINR 的互补累积分布函数。通过上式可以看出, 当计算出覆盖率后很容易计算得到用户的成功传输速率。且求得的传输速率是一定限定条件下的传输速率, 则更具实际意义。

系统平均总速率(ASR)定义为蜂窝用户和 D2D 用户平均总速率之和, 即

$$ASR = ASR_c + ASR_d \quad (7)$$

其中  $ASR_c = K\bar{R}_c$ ,  $ASR_d = \pi R^2 \tilde{\lambda}_d \bar{R}_d$ 。这里

$$\tilde{\lambda}_d = \lambda_d P_t, \quad P_t = \Pr\left\{\left|\mathbf{g}_{0,0}\right|^2 R_{0,0}^{-\alpha_d} > G_0\right\} \quad (8)$$

$P_t$  表示 D2D 用户接入传输概率。从中我们可以看到, 对于求  $ASR_d$  来说, 选择一个合适的门限  $G_0$  (或者说  $P_t$ ) 具有非常重要的作用。所以我们需要考虑对  $P_t$  优化, 最大化  $ASR_d$ , 这方面的讨论在 3.4 节给出。

#### 3.2. 蜂窝用户覆盖率

根据下行链路基站采用 ZF 预编码处理的特点, 特别是  $2\left|\mathbf{h}_0^H \mathbf{v}_0\right|^2 \sim \chi_{2(M-K+1)}^2$ , 就可以得到蜂窝用户在 D2D 用户不进行功率控制下(即所有 D2D 用户发送功率等于最大发送功率)的覆盖率表达式[9]:

$$\begin{aligned}P_{\text{cov}}^c(\beta_c) &= \Pr\{SINR_c \geq \beta_c\} \\ &= \mathbb{E}_{D_{0,BS}} \left[ e^{-s \frac{N_0}{A_d}} \sum_{k=0}^{M-K} \frac{s^k}{k!} \sum_{i=0}^k \binom{k}{i} \left(\frac{N_0}{A_d}\right)^{k-i} (-1)^i \frac{d^i}{ds^i} \exp\left(-\frac{\pi \lambda_d (s P_{d,\max})^{\frac{2}{\alpha_d}}}{\sin c\left(\frac{2}{\alpha_d}\right)}\right) \right]\end{aligned}\quad (9)$$

公式(9)中,  $s = \frac{A_d}{\zeta} D_{0,BS}^{\alpha_c} \beta_c$ ,  $\frac{d^i}{ds^i}$  表示第  $i$  阶导数。特别, 在大规模 MIMO 系统天线数无穷大的情况下, 即  $M \rightarrow \infty$ , 此时  $(M-K) \rightarrow \infty$ , 蜂窝用户覆盖率趋于 1。即[9]

$$\begin{aligned}\lim_{(M-K) \rightarrow \infty} P_{\text{cov}}^c(\beta_c) &= \lim_{(M-K) \rightarrow \infty} \Pr\left\{\left|\mathbf{h}_0^H \mathbf{v}_0\right|^2 \geq \frac{A_{0,d}}{\zeta} D_{0,BS}^{\alpha_c} \left(I_{d,c} + \frac{N_0}{A_{0,d}}\right) \beta_c\right\} \\ &= \lim_{(M-K) \rightarrow \infty} P_{\text{cov}}^c(\beta_c) = 1\end{aligned}\quad (10)$$

从公式(9), 看出蜂窝用户覆盖率跟蜂窝用户数, D2D 用户密度  $\lambda_d$  等因素有关, 且受天线数  $M$  影响大。为此, 我们可以分析如下三种蜂窝用户与 D2D 用户共存的应用场景:

**场景一:** 大型演唱会场景, 观赏者相当于蜂窝用户, 保卫人员之间进行 D2D 通信交流。此时  $\frac{K}{\pi R^2 \lambda_d} \rightarrow \infty$  ( $K \gg \pi R^2 \lambda_d$ )。

**场景二:** 车联网的通信场景。既要保证车载 D2D 通信链路的建立实现, 又要保证蜂窝通信, 并且二者需求用户数都较大。此时  $\frac{K}{\pi R^2 \lambda_d} \rightarrow a$  (常数) ( $K, \pi R^2 \lambda_d$  两者都较大)。

**场景三:** 本地业务场景, 如大型音乐会等, 通过本地服务中心借助 D2D 的邻近特性及数据直通特性在音乐会期间向用户推送音乐资料, 排演计划, 而所需的蜂窝通信较少。此时  $\frac{K}{\pi R^2 \lambda_d} \rightarrow 0$  ( $K \ll \pi R^2 \lambda_d$ )。

### 3.3. D2D 用户覆盖率

根据  $|\mathbf{g}_{0,0}|^2 \sim \exp(1)$ ,  $2\|\mathbf{f}_{0,BS}^H \mathbf{V}\|^2 \sim \chi_{2K}^2$  [11], Campbell Mecke 定理和 Probability Generating Functional (PGFL) [12], 可求得 D2D 用户覆盖率表示为[13]:

$$\begin{aligned} P_{\text{cov}}^d(\beta_d) &= \Pr\{SINR_d \geq \beta_d\} = \Pr\left\{|\mathbf{g}_{0,0}|^2 \geq \frac{\beta_d}{P_0 R_{0,0}^{-\alpha_d}} \left(I_{BS,0} + I_{d,0} + \frac{N_0}{A_d}\right)\right\} \\ &= \mathbb{E}_{I_{BS,0} I_{d,0}} \left[ \exp\left(-\frac{\beta_d}{P_0 R_{0,0}^{-\alpha_d}} \left(I_{BS,0} + I_{d,0} + \frac{N_0}{A_d}\right)\right) \right] \\ &= \mathcal{L}_{I_{BS,0}} \left( \frac{\beta_d}{P_0 R_{0,0}^{-\alpha_d}} I_{BS,0} \right) \mathcal{L}_{I_{d,0}} \left( \frac{\beta_d}{P_0 R_{0,0}^{-\alpha_d}} I_{d,0} \right) \exp\left(-\frac{\beta_d}{\bar{\gamma}_d}\right) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\mathcal{L}_{I_{BS,0}} \left( \frac{\beta_d}{P_0 R_{0,0}^{-\alpha_d}} I_{BS,0} \right) = \frac{(\kappa \beta_d)^{\frac{2}{\alpha_c}}}{R^2} \left[ y^{\kappa + \frac{2}{\alpha_c} - 1} (1-y)^{\frac{2}{\alpha_c}} - \left(K + \frac{2}{\alpha_c} - 1\right) \mathbf{B}\left(y; K + \frac{2}{\alpha_c} - 1, 1 - \frac{2}{\alpha_c}\right) \right] \quad (12)$$

$$\mathcal{L}_{I_{d,0}} \left( \frac{\beta_d}{P_0 R_{0,0}^{-\alpha_d}} I_{d,0} \right) = \exp\left(-\frac{\pi \tilde{\lambda}_d R_{0,0}^2 \beta_d^{\frac{2}{\alpha_d}}}{\sin c\left(\frac{2}{\alpha_d}\right)}\right) \mathbb{E}\left[\left(P_j\right)^{\frac{2}{\alpha_d}} P_0^{-\frac{2}{\alpha_d}}\right] \quad (13)$$

公式(11)、(12)和(13)中,  $\kappa = \frac{\zeta}{P_0 A_d R_{0,0}^{-\alpha_d}}$ ,  $y = \frac{1}{\kappa \beta_d R^{-\alpha_c} + 1}$ ,  $\bar{\gamma}_d = \frac{A_d R_{0,0}^{-\alpha_d} P_0}{N_0}$  为 D2D 用户的平均 SNR,

$\mathbf{B}(x; a, b)$  为不完全 Beta 函数,  $\mathbf{B}(x; a, b) = \int_0^x t^{a-1} (1-t)^{b-1} dt$ 。

### 3.4. D2D On-Off 功率控制

通过采用开关(On-Off)功率控制方法对复用上行链路资源的 D2D 用户进行处理, 文献[14]显示了 D2D 用户的传输速率可以得到有效提高。为此, 本文将此方法推广应用于下行链路, 并与不进行功率控制的情形对比, 从而分析其所带来的影响。

**没有功率控制的情形:** 当不进行功率控制时, 所有 D2D 用户的发送功率等于最大发送功率, 即  $P_j = P_0 = P_{d,\max}$ 。令  $P_i = 1$ , 则此时 D2D 用户的平均总速率表达式为

$$\begin{aligned} ASR_d(\beta_d) &= \pi R^2 \lambda_d \log(1 + \beta_d) \mathbf{P}\{SINR_d \geq \beta_d\} \\ &= \pi \lambda_d \log(1 + \beta_d) (\kappa \beta_d)^{\frac{2}{\alpha_c}} \left[ y^{\kappa + \frac{2}{\alpha_c} - 1} (1-y)^{\frac{2}{\alpha_c}} - \left(K + \frac{2}{\alpha_c} - 1\right) \right. \\ &\quad \left. \times \mathbf{B}\left(y; K + \frac{2}{\alpha_c} - 1, 1 - \frac{2}{\alpha_c}\right) \right] \times \exp\left(-\frac{\pi \lambda_d R_{0,0}^2 \beta_d^{\frac{2}{\alpha_d}}}{\sin c\left(\frac{2}{\alpha_d}\right)}\right) \exp\left(-\frac{\beta_d}{\bar{\gamma}_d}\right) \end{aligned} \quad (14)$$

具有功率控制的情形: 对 D2D 用户进行 On-Off 功率控制, D2D 用户的发送功率为

$$P_j = P_0 = \begin{cases} P_{d,\max} & P_t \\ 0 & 1 - P_t \end{cases}, \quad P_t = P\left(|g_{0,0}|^2 R_{0,0}^{-\alpha_d} > G_0\right) \quad (15)$$

此时传输速率表达式为

$$ASR_d(\beta_d) = \pi R^2 \lambda_d P_t \log(1 + \beta_d) \exp\left(-\frac{\pi \lambda_d P_t R_{0,0}^2 \beta_d^{\frac{2}{\alpha_d}}}{\sin c\left(\frac{2}{\alpha_d}\right)}\right) * a_1 \beta_d^{\frac{2}{\alpha_d}} * \exp\left(-\frac{\beta_d}{\bar{\gamma}_d}\right) \quad (16)$$

$$\text{其中 } a_1 = \frac{\kappa^{\frac{2}{\alpha_c}}}{R^2} \left[ y^{\kappa + \frac{2}{\alpha_c} - 1} (1 - y)^{\frac{2}{\alpha_c}} - \left(K + \frac{2}{\alpha_c} - 1\right) \mathbf{B}\left(y; K + \frac{2}{\alpha_c} - 1, 1 - \frac{2}{\alpha_c}\right) \right].$$

通过优化  $P_t$ , 可以实现最大化 D2D 用户平均总速率:

$$\begin{aligned} \max \quad & ASR_d(\beta_d) \\ \text{s.t.} \quad & 0 < P_t \leq 1 \end{aligned} \quad (17)$$

对  $ASR_d$  关于  $P_t$  求导求得极值点:

$$1 - \frac{\pi \lambda_d R_{0,0}^2 \beta_d^{\frac{2}{\alpha_d}}}{\sin c\left(\frac{2}{\alpha_d}\right)} P_t = 0 \quad (18)$$

这样优化的 D2D 用户接入传输概率  $P_t^*$  应为  $\min\left\{\frac{\sin c\left(\frac{2}{\alpha_d}\right)}{\pi \lambda_d R_{0,0}^2 \beta_d^{\frac{2}{\alpha_d}}}, 1\right\}$ 。则通过 On-Off 功率控制后的优化

$ASR_d^*$  可表示为

$$ASR_d^*(\beta_d) = \begin{cases} \pi R^2 \lambda_d \log(1 + \beta_d) \exp\left(-\frac{\pi \lambda_d R_{0,0}^2 \beta_d^{\frac{2}{\alpha_d}}}{\sin c\left(\frac{2}{\alpha_d}\right)}\right) \cdot a_1 \beta_d^{\frac{2}{\alpha_d}} \cdot \exp\left(-\frac{\beta_d}{\bar{\gamma}_d}\right) & \beta_d < \tilde{\beta}_d \\ \sin c\left(\frac{2}{\alpha_d}\right) \frac{R^2}{R_{0,0}^2} \log(1 + \beta_d) \exp(-1) \cdot a_1 \cdot \exp\left(-\frac{\beta_d}{\bar{\gamma}_d}\right) & \beta_d > \tilde{\beta}_d \end{cases} \quad (19)$$

$$\text{其中 } \tilde{\beta}_d = \left(\frac{\sin c\left(\frac{2}{\alpha_d}\right)}{\pi \lambda_d R_{0,0}^2}\right)^{\frac{\alpha_d}{2}}.$$

最后值得一提的是, 当  $\beta_d < \tilde{\beta}_d$  此时所有 D2D 用户都处于激活状态  $P_t^* = 1$ ,  $ASR_d^*$  与没有功率控制的情况表现一样; 而  $\beta_d > \tilde{\beta}_d$  时, D2D 用户成功传输的概率为  $P_t^* = \frac{\sin c\left(\frac{2}{\alpha_d}\right)}{\pi \lambda_d R_{0,0}^2 \beta_d^{\frac{2}{\alpha_d}}}$ , 此时  $ASR_d^*$  得到最大化。

#### 4. 性能仿真及分析

本章对第三章分析结果进行数值仿真。仿真参数设定  $R = 500 \text{ m}$ ,  $\alpha_c = 3$ ,  $\alpha_d = 3.67$ ,  $A_c = 30.55 \text{ dB}$ ,  $A_d = 30.84 \text{ dB}$ ,  $N_0 = -101 \text{ dB} \cdot \text{m}$ ,  $R_{0,0} = 35 \text{ m}$ ,  $P_{c,\max} = 30 \text{ dB} \cdot \text{m}$ ,  $P_{d,\max} = 6 \text{ dBm}$ 。

图 2 为系统 ASR 随 D2D 用户密度变化情况。当蜂窝用户数  $K = 5$ , 天线数  $M = 5$  时, 从图 2 可以发现, 系统 ASR 随 D2D 用户密度增加是先增加后减小。确切地说, ASR 随 D2D 用户密度在大约  $\lambda_d = 10^{-4}$  之后减小。原因是 D2D 用户密度过大带来干扰增强, 降低了蜂窝用户和 D2D 用户的覆盖率 ( $\lambda_d \rightarrow \infty$ ,  $P_{\text{cov}}^d \rightarrow 0$ ), 从而影响了蜂窝用户和 D2D 用户的 ASR, 这种干扰带来的系统 ASR 损失不能因为 D2D 用户数的增大而得到弥补。当  $K = 15$ ,  $M = 80$  时, 相比于  $K = 5$ ,  $M = 5$  情况, 在 D2D 密度较小时, 如密度介于  $10^{-6}$  和  $10^{-5}$  之间, 系统 ASR 存在先降低后增加的趋势。其原因是在 D2D 密度较小时, 蜂窝用户数较大, 系统 ASR 的贡献主要来源于蜂窝用户, 而随着 D2D 用户密度小幅度增加, 此时对蜂窝用户干扰显著, 系统 ASR 先出现下降趋势, 但随着 D2D 用户密度逐渐增大, 对系统 ASR 的贡献变为 D2D 用户, 系统 ASR 则开始随 D2D 用户密度增大而增加。当  $K = 5$ ,  $M = 80$  时, 相比于  $K = 5$ ,  $M = 5$  情况, 可以看出大规模 MIMO 带来的增益在 D2D 用户密度较低时显著, 而在 D2D 用户密度较高时, 增益被干扰抵消。因此就混合系统来说, 应该严格控制 D2D 用户的接入数目。

在蜂窝网络下加入 D2D 通信势必会对蜂窝用户传输速率造成影响。图 3 为在三种用户分布场景下蜂窝用户传输速率随基站天线数变化情况。对于第一种场景 ( $K \ll \pi R^2 \lambda_d$ ), 从图 3 可以看出, 天线数  $M = 80$  之前蜂窝用户传输速率最好, 此时因为蜂窝用户较少, 天线数相比于蜂窝用户数较多 ( $M \gg K$ ), 所带来的增益可以很大程度弥补 D2D 用户数目多而带来的干扰。对于第三种场景 ( $K \gg \pi R^2 \lambda_d$ ), 从图 3 可以明显看出, 在天线数  $M = 80$  之后, 蜂窝用户传输速率增益显著, 且在三种场景中最高。原因是天线数逐渐增多带来增益变大, 同时 D2D 用户密度小带来的干扰也很小。对于第二种场景, 仿真了  $K = 50$  时

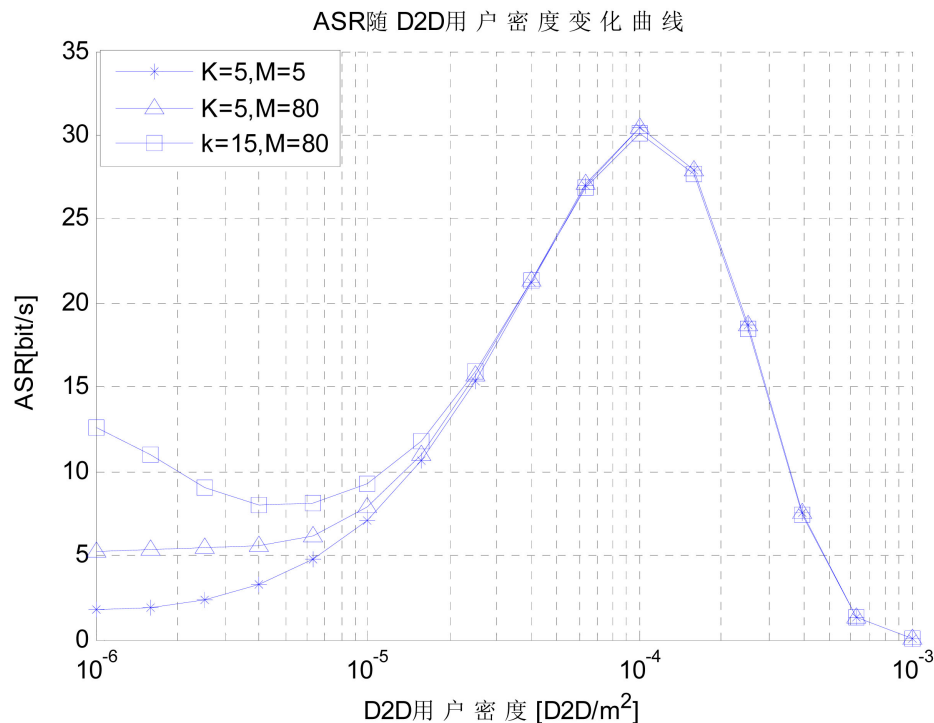


Figure 2. ASR versus density of D2D users for different  $M$  and  $K$   
图 2. ASR 在不同  $M$  和  $K$  情况随 D2D 用户密度变化情况



$\pi R^2 \lambda_d \approx 50$  ( $\frac{K}{\pi R^2 \lambda_d} \rightarrow 1$ )情况。从图3可以发现, 蜂窝用户传输速率最差, 在  $M = 100$  之前, 天线数增大对于蜂窝用户的传输速率的提升被 D2D 用户密度过大带来的干扰抵消, 但随  $M$  不断增大, 增益大于干扰, 蜂窝用户传输速率也会有较小提升。对比这三种场景可以看出, 为了不影响蜂窝用户的传输同样应该严格控制 D2D 用户接入数。

图4为 D2D 用户 ASR 随信干噪比门限变化情况。在没有进行功率控制时, 通信质量要求低 ( $\beta_d$  较小) 高密度 D2D 用户下的  $ASR_d$  比低密度情况高, 但随着通信质量要求变高 ( $\beta_d$  较大), 高密度  $ASR_d$  相比

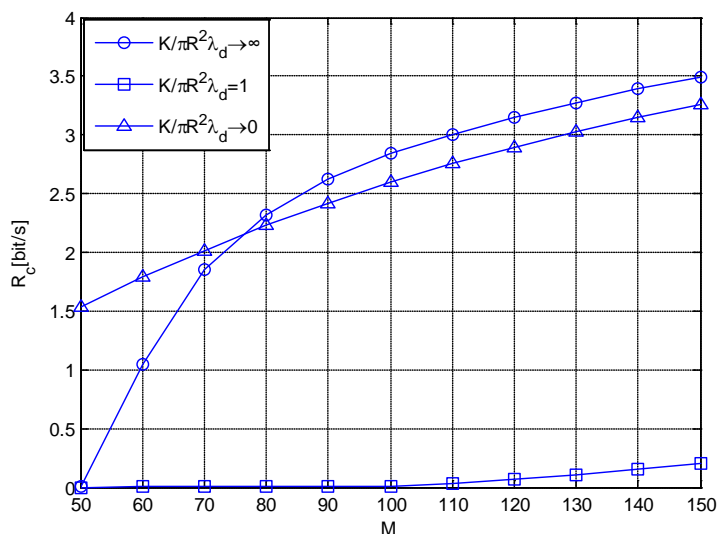


Figure 3.  $\bar{R}_c$  versus the number of BS antennas for different scenarios

图3.  $\bar{R}_c$  在不同用户场景下随天线数变化情况

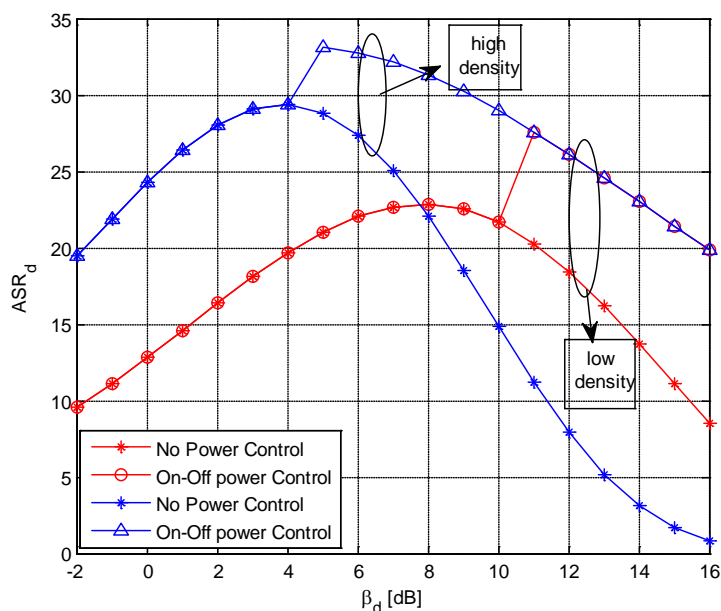


Figure 4.  $ASR_d$  versus SINR threshold of D2D users without and with On-Off power control for different densities

图4.  $ASR_d$  随 D2D 用户信干噪比门限在不同用户密度采用和不采用 On-Off 功率控制变化情况



低密度变低, 且降低显著。这是因为通信质量要求高的情况下, 系统能够允许 D2D 用户接入数目变小。可以看出优化 D2D 用户接入传输概率从而调整接入系统 D2D 用户数量很有必要。在进行 On-Off 功率控制后, 密度较低的  $\lambda_d = 2 \times 10^{-5}$  情况下, 在  $\beta_d < 11$  dB, 进行 On-Off 功率控制相比于没有功率控制在  $ASR_d$

上一致, 此时  $P_i^* = \min \left\{ \frac{\sin c \left( \frac{2}{\alpha_d} \right)}{\pi \lambda_d R_{0,0}^2 \beta_d^{\frac{\alpha_d}{2}}}, 1 \right\} = 1$ 。然而当  $\beta_d \geq 11$  dB 时, On-Off 功率控制会比没有功率控制在

$ASR_d$  上得到明显提升, 如在  $\beta_d = 12$  dB 时,  $ASR_d$  提升 44.4%。在 D2D 用户密度较高的  $\lambda_d = 5 \times 10^{-5}$  情况下, 同样地, 在  $\beta_d < 5$  dB,  $ASR_d$  保持一致, 而在  $\beta_d \geq 5$  dB 时  $ASR_d$  得到提升。值得注意的是, 在两种不

同 D2D 用户密度情况下, 都采用 On-Off 功率控制在  $P_i^* = \min \left\{ \frac{\sin c \left( \frac{2}{\alpha_d} \right)}{\pi \lambda_d R_{0,0}^2 \beta_d^{\frac{\alpha_d}{2}}}, 1 \right\} = \frac{\sin c \left( \frac{2}{\alpha_d} \right)}{\pi \lambda_d R_{0,0}^2 \beta_d^{\frac{\alpha_d}{2}}}$  时带来的  $ASR_d$

提升是一样的, 这是因为 On-Off 功率控制后的  $ASR_d$  独立于  $\lambda_d$ 。

## 5. 结束语

本文探讨了单小区大规模 MIMO 与 D2D 通信联合的蜂窝网络下行传输系统。基于理想 CSI 情况, 深入分析了系统 ASR 随 D2D 用户密度、蜂窝用户数以及天线数变化情况。特别, 对于三种用户分布场景, 考虑了用户数分布对于蜂窝用户传输速率的影响; 同时也考虑了 D2D 用户采用 On-Off 功率控制给 D2D 用户的 ASR 带来的影响。仿真分析表明, 在 D2D 用户密度较低, 大规模 MIMO 与 D2D 通信能较好的共存, 同时增加天线数, 能够带来系统性能的提升; D2D 用户利用 On-Off 功率控制可实现 D2D 用户的 ASR 的最大化提升。

本文的下行传输系统分析采用了理想 CSI 情况下较为简单的单小区模型。因此, 在以后研究工作中可以考虑非理想 CSI 情况, 并将系统模型拓展到复杂的多小区情景, 同时拟对 D2D 用户进行不同方面的优化和资源分配以实现更好的绿色通信。

## 基金项目

国家自然科学基金项目资助(61301228); 高等学校博士学科点专项科研基金项目资助(20132125110006); 中央高校基本科研业务费专项资金项目资助(3132016347)。

## 参考文献 (References)

- [1] Marzetta, T.L. (2010) Noncooperative Cellular Wireless with Unlimited Numbers of BS Antennas. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, **9**, 3590-3600. <https://doi.org/10.1109/TWC.2010.092810.091092>
- [2] Rusek, F., Persson, D. and Lau, B.K. (2013) Scaling up MIMO: Opportunities and Challenges with Very Large Arrays. *IEEE Signal Processing Magazine*, **30**, 40-60. <https://doi.org/10.1109/MSP.2011.2178495>
- [3] Ngo, H.Q., Larsson, E.G. and Marzetta, T.L. (2013) Energy and Spectral Efficiency of Very Large Multiuser MIMO Systems. *IEEE Transactions on Communications*, **61**, 1436-1449. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2013.020413.110848>
- [4] Janis, P., Yu, C.H., Doppler, K., et al. (2009) Device-to-Device Communication Underlying Cellular Communications Systems. *International Journal of Communications, Network & System Sciences*, **2**, 169-178. <https://doi.org/10.4236/ijcns.2009.23019>
- [5] Doppler, K., Rinne, M., Wijting, C., et al. (2009) Device-to-Device Communication as an Underlay to LTE-Advanced Networks. *IEEE Communications Magazine*, **47**, 42-49. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2009.5350367>

- [6] Lin, X., Heath Jr., R.W. and Andrews, J.G. (2015) The Interplay Between Massive MIMO and Underlaid D2D Networking. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, **14**, 3337-3351. <https://doi.org/10.1109/TWC.2015.2404435>
- [7] 尹充, 王莹, 林文轩, 王寻. D2D-MIMO 系统中基于下行预编码的干扰抑制策略[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(10): 2314-2319.
- [8] Yang, Y., Zhang, Y., Shi, K. and Li, J. (2016) Optimal Power Control for Energy Efficiency of Device-to-Device Communication Underlying Cellular Networks. 2016 *IEEE 14th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 1028-1031. <https://doi.org/10.1109/INDIN.2016.7819314>
- [9] Shalmashi, S., Björnson, E., Kountouris, M., Sung, K.W. and Debbah, M. (2015) Energy Efficiency and Sum Rate When Massive MIMO Meets Device-to-Device Communication. 2015 *IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW)*, 627-632. <https://doi.org/10.1109/ICCW.2015.7247251>
- [10] Andrews, J.G., Baccelli, F. and Ganti, R.K. (2011) A Tractable Approach to Coverage and Rate in Cellular Networks. *IEEE Transactions on Communications*, **59**, 3122-3134. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2011.100411.100541>
- [11] Dhillon, H.S., Kountouris, M. and Andrews, J.G. (2013) Downlink MIMO HetNets: Modelling, Ordering Results and Performance Analysis. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, **12**, 5208-5222. <https://doi.org/10.1109/TWC.2013.090513.130142>
- [12] Stoyan, D., Kendall, W. and Mecke, J. (1995) *Stochastic Geometry and Its Applications*. Wiley, New York.
- [13] Shalmashi, S., Björnson, E., Kountouris, M., Sung, K.W. and Debbah, M. (2016) Energy Efficiency and Sum Rate Tradeoffs for Massive MIMO Systems with Underlaid Device-to-Device Communications. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, Online, 29 July 2016.
- [14] Lee, N., Lin, X., Andrews, J.G. and Heath Jr., R.W. (2015) Power Control for D2D Underlaid Cellular Networks: Modeling, Algorithms and Analysis. *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*, **33**, 1-12. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2014.2369612>

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [ja@hanspub.org](mailto:ja@hanspub.org)