

## 蜂窝系统中机会 D2D 接入的安全传输方案

陈亚军<sup>1</sup>, 季新生<sup>1,2,3</sup>, 黄开枝<sup>1</sup>, 杨静<sup>1</sup>, 易鸣<sup>1</sup>

(1. 国家数字交换系统工程技术研究中心, 河南 郑州 450002; 2. 东南大学移动通信重点实验室, 江苏 南京 211189;  
3. 移动互联网安全技术国家工程实验室, 北京 100876)

**摘要:** 由于终端资源受限, 蜂窝上行链路传输的安全性难以保证。考虑到 D2D (device-to-device) 蜂窝系统中同频干扰能够带来安全增益, 提出一种机会 D2D 接入的安全传输方案。该方案分别利用无线信道的方向性和增益刻画复用资源的 D2D 用户对蜂窝用户和其他 D2D 用户的干扰大小, 为保证两者通信的可靠性, 首先, 选择满足干扰受限条件的 D2D 用户接入网络进行通信, 而接入网络的 D2D 用户可看作蜂窝用户的友好干扰者为其带来安全增益。其次, 采用泊松点过程 (PPP, Poisson point process) 对系统中的各节点进行建模, 分别利用安全中断概率 (SOP, secrecy outage probability) 和连通中断概率 (COP, connection outage probability) 表征蜂窝用户通信的安全性和 D2D 用户通信的可靠性, 并分析了干扰门限对两者通信性能的影响。然后, 在保证蜂窝用户 SOP 性能需求的前提下, 提出一种在满足蜂窝用户安全性的条件下, 最小化 D2D 用户 COP 的优化模型, 并利用联合搜索方法得到最佳干扰门限值。最后, 仿真证明了所提方案的有效性。

**关键词:** D2D 通信; 泊松点过程; 安全中断概率; 连通中断概率; 联合搜索方法

**中图分类号:** TN92

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2018016

## Secure opportunistic access control in D2D-enabled cellular network

CHEN Yajun<sup>1</sup>, JI Xinsheng<sup>1,2,3</sup>, HUANG Kaizhi<sup>1</sup>, YANG Jing<sup>1</sup>, YI Ming<sup>1</sup>

1. National Digital Switching System Engineering and Technological Research Center, Zhengzhou 450002, China  
2. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 211189, China  
3. National Engineering Lab for Mobile Networking Security, Beijing 100876, China

**Abstract:** The mutual interference between cellular links and D2D links can bring the secrecy gain to cellular users in D2D-enabled cellular networks. To make full use of them, a cooperative secrecy transmission scheme was proposed based on wireless channels. The channel direction information and gains depict the interference from D2D links to cellular links and other D2D links in the proposed scheme. Firstly, only the D2D users which meet the limited interference conditions were accessed to cellular networks to ensure their reliable communications. It was assumed that legitimate users and eavesdroppers were independent two-dimensional homogeneous Poisson point processes (PPP) distribution. Then the security outage probability (SOP) was derived for cellular users and the connection outage probability (COP) for D2D users, and the impacts of interference thresholds were discussed on their performances. Next, an optimization model was given to minimize D2D users' COP while ensuring the secrecy performance requirements of cellular users, thus achieving the optimal performance. Finally, simulation results verify the validity of the proposed scheme.

**Key words:** D2D communication, Poisson point process, secrecy outage probability, connection outage probability, joint search method

收稿日期: 2017-04-27; 修回日期: 2017-11-19

通信作者: 陈亚军, chenyajun\_cool@126.com

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (“863” 计划) 基金资助项目 (No.SS2015AA011306); 国家自然科学基金资助项目 (No.61379006, No.61521003, No.61501516); 东南大学移动国家重点实验室开放研究基金资助项目 (No.2013D09)

**Foundation Items:** The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No.SS2015AA011306), The National Natural Science Foundation of China (No.61379006, No.61521003, No.61501516), The Open Research Fund of National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University (No.2013D09)

## 1 引言

D2D 通信不经过基站中转而直接在距离较近的用户间建立链路进行数据传输, 具有较高的小区容量、频谱效率等特点, 是未来蜂窝系统的关键技术之一<sup>[1,2]</sup>。与传统无线网络一样, 该系统由于无线传播的开放性面临着被窃听、被篡改等安全威胁问题。Alam 等<sup>[3]</sup>对 D2D 蜂窝系统存在的安全威胁问题进行了全面分析和总结。Zhu 等<sup>[4]</sup>在理论上证明了直通链路的 D2D 通信模式的安全性能优于传统经基站中继的蜂窝通信模式。Chu 等<sup>[5]</sup>对 D2D MISO (multiple-input-single-output) 蜂窝系统的下行链路设计了 2 种不同的波束赋形向量以优化蜂窝用户安全速率。文献[6,7]利用下行链路中基站多天线的优势, 采用人工噪声的方法同时保证蜂窝用户 (CU, cellular user) 和 D2D 用户的安全通信。Ma 等<sup>[8]</sup>针对 D2D 蜂窝系统的下行链路, 利用泊松点过程分别对基站、合法用户和窃听者 (Eve, eavesdropper) 的分布进行建模, 并理论分析了两者通信的可靠性及 CU 的安全性。

而蜂窝上行链路由于终端设备天线数目、功率等资源受限, 上行链路的安全问题一直成为无线通信的安全瓶颈。在 D2D 蜂窝系统中, 若 D2D 用户采用 underlay 模式, 即和 CU 复用相同的无线资源, 相互间存在干扰。在传统通信场景中, 此干扰被认为是影响用户正常通信的有害因素, 但在物理层安全问题中, 此干扰因素会同时增加潜在 Eve 获取合法用户信息的难度。通过合理的调度算法, 此干扰因素若对 Eve 的影响大于对 CU 链路的影响, 则会带来一定的安全增益。对于该系统中的蜂窝上行链路, 如何通过有效的方法将有“害”的干扰转化为有“利”因素, 提高安全性能是目前研究的热点问题。针对此问题, 文献[9~15]为充分利用干扰带来的安全增益, 分别从不同角度提出了相应的设计方案。但由于 Eve 在实际系统中通常处于被动窃听状态, 发送端很难获取其位置信息, 因此, 文献[9~14]仅考虑无线信道的小尺度衰落, 而忽略了大尺度衰落的影响。为提高频谱复用效率, 文献[14,15]考虑了多个 D2D 用户复用相同资源的情况, 但此时 D2D 用户会对 CU 和其他 D2D 用户造成严重干扰而影响两者通信的可靠性, 为满足两者通信的可靠性, 在接入网络之前需考虑对两者的干扰受限, 而上述文献考虑欠缺。另外, 文献[5~13]仅在降低合法

用户干扰的前提下考虑干扰带来的安全增益, 一般假设复用资源的 D2D 用户与 CU 的距离较远, 而 Eve 的位置随机分布。若其在合法 CU 附近时, 上述方案很难抵抗 Eve 窃听合法 CU 的有用信息, 因此, 所带来的安全增益性能受限。

针对上述问题, 为最大化同频干扰带来的安全增益, 本文研究了更为一般的场景, 即多个 D2D 用户同时复用同一个 CU 资源的场景。考虑到多天线系统中, 复用资源的用户即使因距离较近而产生的信道大尺度衰落干扰较为严重, 但若小尺度衰落引起的方向性 (矢量性) 近似正交, 则实际造成的干扰却相对较小。若 CU 附近的 D2D 用户到基站的信道落在 CU 到基站的信道零空间内, 则两者通过共享无线资源可有效增加 CU 附近的 Eve 窃听的难度。本文从多天线系统的实际出发, 同时考虑了信道的大尺度衰落和小尺度衰落的影响, 提出一种机会 D2D 接入的安全传输方案。该方案要求复用同一无线资源的 D2D 用户满足 2 个条件: 1) D2D 用户到基站的信道尽量在 CU 到基站的信道零空间内, 从而保证复用资源的 D2D 用户对 CU 的干扰受限; 2) 不同 D2D 用户对发送端到其他用户对接收端的信道增益尽量小, 从而使 D2D 用户间的干扰受限。由于上述 2 个条件同时考虑了 CU 和 D2D 用户的干扰受限, 从而保证了两者通信的可靠性。另外, 该方案中在复用相同资源的 D2D 用户带来干扰的同时增加了 Eve 窃听蜂窝链路信号的难度, 而根据上述 2 个条件的接入选择机制使干扰对 CU 的影响较小, 因此, 接入网络的 D2D 用户作为 CU 的友好干扰者可为 CU 带来一定的安全增益。其次, 利用随机几何中 PPP 模型对蜂窝系统中的节点进行建模, 分别给出了 CU 的安全中断概率 (SOP) 和 D2D 用户的连通中断概率 (COP), 并分析了干扰门限值对两者通信性能的影响。然后, 在满足干扰受限的条件下, 为进一步提高系统性能, 提出一种在保证 CU 安全通信的前提下, 最小化 D2D 用户 COP 的优化模型, 并利用联合搜索方法得到最佳干扰门限值。最后, 仿真验证了本文所提方案的有效性。

命名规则及符号说明如下。B 代表基站, CU 代表蜂窝用户,  $DD_n$  代表第  $n$  个 D2D 用户, 其中,  $T_n$  和  $D_n$  是第  $n$  个 D2D 用户  $DD_n$  的发送端和接收端。窃听器用 Eve 表示,  $E_k$  代表第  $k$  个窃听器。 $N_i \{i \in (b, c, d, e)\}$  分别表示基站、CU、D2D 用户和

Eve 的配置天线数目。  $\Phi_w \{w \in \{c, d, e\}\}$  表示小区内 CU、D2D 用户和 Eve 的集合。  $|\cdot|$  和  $\|\cdot\|^2$  分别表示模长和 Frobenius 范数。  $(\cdot)^H$  表示矩阵共轭转置，  $\mathbb{E}\{\cdot\}$  表示随机变量的期望，  $\mathbb{P}\{\cdot\}$  表示输入事件的概率，  $\mathcal{L}_f(s)$  为  $f$  的拉普拉斯变换，  $\text{Card}(\cdot)$  表示输入集合元素的个数。

## 2 系统模型与问题描述

### 2.1 系统模型

本文考虑 D2D 蜂窝上行链路的通信场景，如图 1 所示，包括基站 B、蜂窝用户 CU、D2D 用户对  $DD_n (n=1, 2, \dots, N)$  和 Eve。每个  $DD_n$  包括一个发送端  $T_n$  和一个接收端  $D_n$ 。假设 CU 和 Eve 分别服从密度为  $\lambda_c$  和  $\lambda_e$  的均匀 PPP 分布，记为  $\Phi_c$ 、 $\Phi_e$ 。D2D 用户对发送端  $\Phi_d$  也服从密度为  $\lambda_d$  的 PPP 分布，而其相应的接收端与发送端的距离固定且等方向分布<sup>[8]</sup>。所考虑的上行链路基站为 CU 分配相互正交的资源，CU 相互间无干扰且终端发射功率较低，造成的有害干扰较小，在实际场景中更有研究价值<sup>[9~15]</sup>。假设 CU 和 D2D 用户配置单天线，即  $N_c = N_d = 1$ ，B 和 Eve 同时配置多天线即  $N_b > 1$ ， $N_e > 1$ 。在实际场景中 D2D 通信距离较短，其安全性较容易保证，因此，本文假设 Eve 仅窃听蜂窝链路的合法信息且各 Eve 间非联合窃听<sup>[8~12, 15]</sup>。

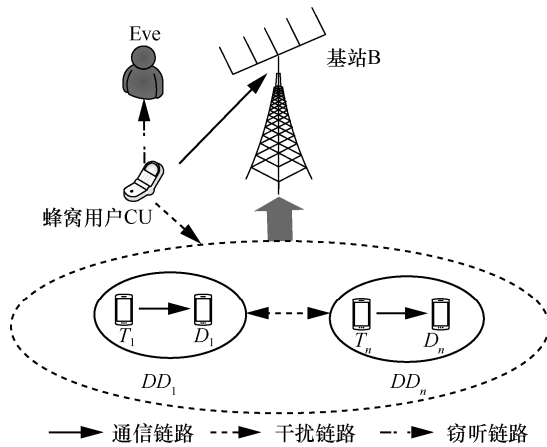


图 1 系统模型

本文所有无线信道模型同时考虑大尺度衰落和小尺度衰落，大尺度衰落模型为标准路径损耗模型，即  $l(d_{ij}) = r_{ij}^{-\kappa}$ ，其中， $r_{ij}$  表示节点  $i$  和  $j$  之间的距离， $\kappa$  是衰落系数。在不同的场景下， $\kappa$  取值不同，一般要求  $\kappa > 2$ 。小尺度衰落采用独立准静态瑞利衰落模型。

Eve 分别采用最大比合并 (MRC, maximal ratio combining) 接收信号，则 D2D 的接收端  $D_n$  和 Eve 的  $E_k$  的信干噪比 (SINR, signal to interference plus noise ratio) 可分别表示为

$$\text{SINR}_{D_n} = \frac{P_D r_{D_n}^{-\kappa} |\mathbf{h}_{T_n D_n}|^2}{I_{D_n} + \sigma^2} \quad (1)$$

$$\text{SINR}_{E_k} = \frac{P_C r_{CE_k}^{-\kappa} |\mathbf{h}_{CE_k}|^2}{I_{E_k} + \sigma^2} \quad (2)$$

其中， $\mathbf{h}_{T_n D_n}$ 、 $\mathbf{h}_{T_j D_n}$ 、 $\mathbf{h}_{CD_n}$ 、 $\mathbf{h}_{CE_k}$ 、 $\mathbf{h}_{T_n E_k}$  分别表示  $T_n \rightarrow D_n$ 、 $T_j \rightarrow D_n$ 、 $C \rightarrow D_n$ 、 $C \rightarrow E_k$ 、 $T_n \rightarrow E_k$  间信道的小尺度衰落。  $P_C$  和  $P_D$  分别表示 CU 和 D2D 用户的发送功率， $\sigma^2$  表示高斯白噪声功率。 $I_{D_n} = P_C r_{CD_n}^{-\kappa} |\mathbf{h}_{CD_n}|^2 + \sum_{j \in \Phi_d, j \neq n} P_D r_{T_j D_n}^{-\kappa} |\mathbf{h}_{T_j D_n}|^2$ ， $I_{E_k} = \sum_{n \in \Phi_d} P_D r_{T_n E_k}^{-\kappa} \|\mathbf{h}_{T_n E_k}\|^2$ 。在实际场景中，由于用户间因相互复用资源带来的干扰远大于自然噪声的影响，即  $I_{D_n} \gg \sigma^2$ ， $I_{E_k} \gg \sigma^2$ ，因此，本文忽略自然噪声的影响，即假设  $\sigma^2 \approx 0$ ，此时，SINR 等价于信干比 (SIR, signal to interference ratio)。

### 2.2 问题描述

在上述介绍的系统模型中，允许多个 D2D 用户同时共享一个 CU 的无线资源，因此 D2D 用户与 CU、D2D 用户间都存在同频干扰，从而对两者通信的可靠性或安全性都会带来影响。而通信的可靠性和安全性可利用连通中断概率 (COP, connection outage probability) 和安全中断概率 (SOP, secrecy outage probability) 表示<sup>[16,17]</sup>。其中，COP 表示合法信道的容量小于预设门限值的概率，而 SOP 是指窃听信道的容量大于预设门限值的概率。而在实际通信系统中，合法通信链路和窃听链路的接收 SINR 决定其信道容量，同文献<sup>[8,16,17]</sup>，COP 和 SOP 可利用 SINR 表示为

$$p^{\text{cop}} = \mathbb{P}\{\text{SINR} \leq \alpha\} \quad (3)$$

$$p^{\text{sop}} = \mathbb{P}\{\text{SINR}_e \geq \beta\} \quad (4)$$

其中， $p^{\text{cop}}$  和  $p^{\text{sop}}$  分别表示合法用户的 COP 和 SOP； $\text{SINR}$  和  $\text{SINR}_e$  分别表示合法接收端和 Eve 的接收 SINR； $\alpha$ 、 $\beta$  表示相应的预设门限值。

复用资源而产生的干扰将降低用户通信的可靠性，但从物理层安全的角度出发，此干扰同时会对 Eve 带来一定的影响，若通过有效的资源复用方

案使其对 Eve 的影响大于对 CU 的影响,则会为 CU 带来安全增益。基于上述分析,首先,本文在保证两者通信可靠性的基础上,为最大化干扰因素带来的安全增益,提出一种机会 D2D 接入的安全传输方案。该方案不仅保证了同时复用资源的 CU 用户和 D2D 用户的通信可靠性,而且复用资源的 D2D 用户作为 CU 的友好干扰者同时降低了 Eve 窃听蜂窝链路的信号质量,但所提的安全传输方案保证了干扰对 CU 造成的影响相对较小,从而为 CU 带来了安全增益。其次,推导了典型蜂窝链路的 SOP 和典型 D2D 链路的 COP;然后,在保证 CU 安全通信的前提下,建立一种最小化 D2D 用户 COP 的优化模型。最后,根据此优化模型利用联合搜索方法得到最优门限值,进一步提高了系统性能。

### 3 蜂窝系统中机会 D2D 接入的安全传输方案

由于 D2D 用户与 CU 复用资源带来的干扰会降低两者通信的可靠性,因此,在 D2D 用户接入网络之前需首先保证两者通信的可靠性。在实际系统中,两者通信性能主要由同频干扰决定,而无线信道是决定影响干扰强度的主要因素。因此,本节基于无线信道的特征提出一种用户协作的安全传输方案,其通信流程主要包括 3 个步骤,如图 2 所示。本文与文献[16]的区别在于必须考虑 D2D 用户的通信需求且假设 CU 也服从 PPP 分布,此假设更符合实际场景的部署。

1) 在第一个时隙,各个 D2D 接收端发送导频信息,由于无线通信中传输媒介的广播特性,则每个 D2D 发送端都可以收到各个 D2D 接收端发送的导频信号,并估计出与各个 D2D 接收端之间的信道状态信息(CSI, channel state information)。然后,利用无线信道的互易性(D2D 发送端到各个接收端的信道

与各个 D2D 接收端到发送端的信道相同),D2D 的每个发送端即可获得其与各个接收端之间的信道增益。现以  $T_n$  为例进行说明,为满足其他复用相同资源的 D2D 用户通信的可靠性,第  $n$  个 D2D 的发送端  $T_n$  到其他 D2D 接收端  $D_j (n \neq j)$  的信道增益需满足

$$\mathfrak{R}_{T_n} = \left\{ h_{T_n, D_j} \left| \left| \hat{h}_{T_n, D_j} \right|^2 \leq \delta_1, n, j \in \Phi_d, j \neq n \right. \right\} \quad (5)$$

其中,满足式(5)的 D2D 用户集合记为  $\Phi_d^1$ 。  $0 < \delta_1 < 1$  是 D2D 用户间复用资源的干扰受限门限值,实际场景中  $\delta_1$  需限定在一定范围内,否则, D2D 用户间因复用资源而带来的干扰将影响其正常通信。

2) 在第二个时隙,所有 D2D 发送端在向基站上报式(5)确定的 D2D 用户集合  $\Phi_d^1$  的同时也发送导频信息,因此,基站通过 D2D 发送端发送的导频信号可估计得到基站与 D2D 用户发送端间的 CSI。现以  $T_j$  为例进行说明,假设  $T_j$  到基站 B 的归一化信道估计值为  $\hat{h}_{T_j, B}$ 。另外,在该时隙内蜂窝用户 CU 也发送导频信号,从而基站通过 CU 发送的导频信号得到两者间的信道估计值  $\hat{h}_{CB}$ ;然后,根据信道方向的性质,为减小  $T_j$  对 CU 的干扰,所选择复用资源的  $T_j$  到 B 的归一化信道应尽量处于 CU 到 B 信道的零空间  $\hat{h}_{CB_\perp}^H$  内,其中,  $\hat{h}_{CB_\perp}^H \hat{h}_{CB} = 0, \hat{h}_{CB} = \frac{h_{CB}}{\|h_{CB}\|}$ 。即

$$\mathfrak{R}_C = \left\{ h_{T_j, B} \mid \gamma_j \leq \delta_2, j \in \Phi_d \right\} \quad (6)$$

满足式(6)的 D2D 用户集合记为  $\Phi_d^2$ 。其中,  $\gamma_j = \left| \hat{h}_{T_j, B}^H \hat{h}_{CB} \right|^2$ ,  $0 < \delta_2 < 1$  是判定门限,  $\delta_2$  根据 CU 不同的通信需求而设置不同的值。

3) 基站决策。基站根据 D2D 发送端  $T_n$  上报的集合  $\Phi_d^1$  和式(6)确定的集合  $\Phi_d^2$ , 则可得到同时与蜂

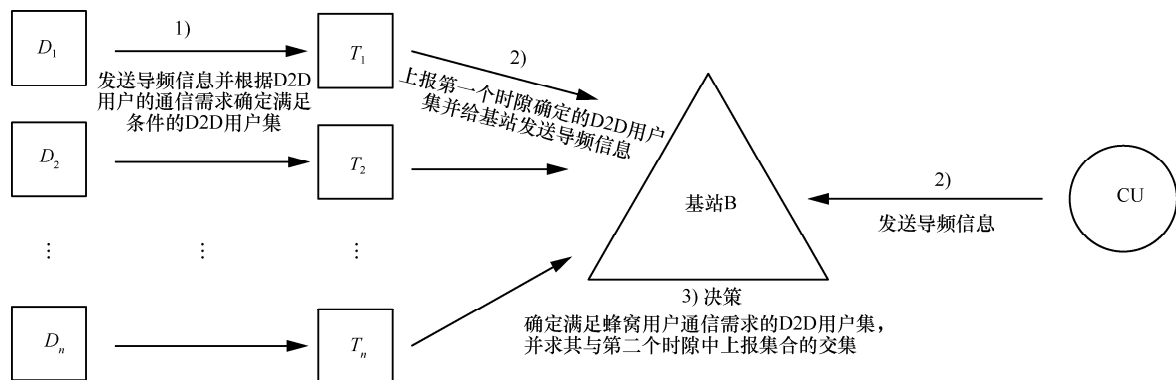


图 2 蜂窝系统中机会 D2D 接入的安全传输方案

窝用户 CU、 $T_n$  复用资源的 D2D 用户集合  $\Phi_d^s$ ，即  $\Phi_d^s = \Phi_d^1 \cap \Phi_d^2$ ，并通过信令通知满足复用资源条件的蜂窝用户和 D2D 用户。

本文所提方案与传统的通信流程相比，主要的不同点在于上述流程的第 1) 步。因为即使在传统干扰最小化的资源共享机制中，仍需利用所提方案的第 2) 步考虑 D2D 用户对蜂窝用户的干扰，然后基站进行决策，即第 3) 步。因此，与传统的资源共享机制相比，所提方案主要额外考虑了第 1) 步 D2D 用户间干扰受限的条件。因此，在实际系统中所提方案带来的通信负荷在承受范围之内。另外，本文不再赘述与传统蜂窝系统相同的通信流程。

为方便分析所提方案的性能，假设 D2D 用户  $T_j$  满足式(5)的概率为  $Prob_1$ ，即  $Prob_1 = \mathbb{P}\{T_j \in \Phi_d^1\}$ 。而  $|\hat{\mathbf{h}}_{T_n D_j}|^2$  服从指数分布，即  $|\hat{\mathbf{h}}_{T_n D_j}|^2 \sim \exp(1)$ ，则  $Prob_1 = 1 - \exp(-\delta_1)$ 。D2D 用户  $T_j$  满足式(6)的概率记为  $Prob_2$ ，即  $Prob_2 = \mathbb{P}\{T_j \in \Phi_d^2\}$ ，根据文献[18]可知， $\gamma_n$  服从  $\text{beta}(1, N_b - 1)$  分布即  $\gamma_n \sim \text{beta}(1, N_b - 1)$  且  $\gamma_n$  的概率密度函数为  $f_{\gamma_n}(x) = (N_b - 1)(1 - x)^{N_b - 2}$ ，则  $Prob_2 = \mathbb{P}(\gamma_n \leq \delta_2) = \int_0^{\delta_2} (N_b - 1)(1 - x)^{N_b - 2} dx = 1 - (1 - \delta_2)^{N_b - 1}$ 。假设  $T_j \in \Phi_d^s$  的概率记为  $Prob_D$ ，则

$$\begin{aligned} Prob_D &= \mathbb{P}(T_j \in \Phi_d^s) \\ &= \mathbb{P}(T_j \in \Phi_d^1 \cap T_j \in \Phi_d^2) \\ &= (1 - (1 - \delta_2)^{N_b - 1})(1 - \exp(-\delta_1)), \quad j \neq n \quad (7) \end{aligned}$$

根据 PPP 分布的性质<sup>[19]</sup>，满足式(5)和式(6)所确定的与 CU 复用资源的 D2D 集合仍为 PPP 分布，其分布密度为

$$\lambda_d^s = (1 - (1 - \delta_2)^{N_b - 1})(1 - \exp(-\delta_1))\lambda_d \quad (8)$$

基于上述提出的协作传输方案，第 4 节在考虑典型蜂窝链路和 D2D 链路的条件下，推导 CU 的 SOP 和 D2D 用户的 COP，分别用来表征 CU 的通信安全性和 D2D 用户的通信可靠性。在实际蜂窝系统中，CU 的优先级高于 D2D 用户，因此，在基站允许 D2D 用户接入网络之前，需优先保证 CU 安全通信性能。在此基础上，提出一种最小化 D2D 用户 COP 的优化模型，从而得到使系统性能最优的干扰门限值  $\delta_1$ 、 $\delta_2$ 。

## 4 性能分析及复杂度分析

### 4.1 CU 的 SOP

考虑典型的蜂窝链路，即包括位置在  $x$  的服务基站和位置在原点的典型蜂窝用户 CU。为方便表示，假设位置为  $x_e$  的第  $k$  个 Eve 与典型 CU 的距离  $r = r_{CE_k}$ 。在上述方案的第 2 步中，Eve 可根据 CU 广播的导频信息估计得到其与 CU 的 CSI。考虑最差的情况即 Eve 能够获取完美 CSI，则 Eve 可通过调整接收权值向量获取最大的 SIR。假设 Eve 利用接收性能最佳的最小均方差 (MMSE, minimum mean square error) 方法接收<sup>[20]</sup>，此时，SIR 可表示为

$$SIR_{E_k} = P_C \mathbf{h}_{CE_k}^H (R_D)^{-1} \mathbf{h}_{CE_k} r^{-\kappa} \quad (9)$$

其中， $R_D \triangleq \sum_{T_n \in \Phi_d^s} P_D r_{T_n E_k}^{-\kappa} \mathbf{h}_{T_n E_k} \mathbf{h}_{T_n E_k}^H$ 。根据式(4)中 SOP 定义，CU 的 SOP 可表示为

$$\begin{aligned} p_c^{\text{sop}} &= \mathbb{P}\left(\max_{k \in \Phi_e} SIR_{E_k} \geq \beta_e\right) \\ &= 1 - \mathbb{P}\left(\bigcap_{k \in \Phi_e} SIR_{E_k} < \beta_e\right) \\ &= 1 - \mathbb{E}_{\Phi_d^s, \Phi_e} \left\{ \mathbf{I}\left(\bigcap_{k \in \Phi_e} SIR_{E_k} < \beta_e\right) \right\} \\ &= 1 - \mathbb{E}_{\Phi_d^s, \Phi_e} \left\{ \prod_{k \in \Phi_e} \mathbf{I}(SIR_{E_k} < \beta_e) \right\} \\ &= 1 - \mathbb{E}_{\Phi_e} \left\{ \mathbb{E}_{\Phi_d^s} \left\{ \prod_{k \in \Phi_e} \left( \mathbf{I}(SIR_{E_k} < \beta_e | \Phi_d^s, \Phi_e) \right) \right\} \right\} \\ &= 1 - \mathbb{E}_{\Phi_e} \left\{ \prod_{k \in \Phi_e} \left( \mathbb{P}(SIR_{E_k} < \beta_e | \Phi_d^s, \Phi_e) \right) \right\} \quad (10) \end{aligned}$$

由文献[16]可知， $SIR_{E_k}$  的概率分布为

$$\begin{aligned} &\mathbb{P}(SIR_{E_k} < \beta_e | \Phi_d^s, \Phi_e) \\ &= 1 - \sum_{i=0}^{N_e - 1} \frac{\left( \lambda_d^s \Delta \left( \frac{\beta_e}{\eta} \right)^\rho r^2 \right)^i}{i!} \exp\left(-\lambda_d^s \Delta \left( \frac{\beta_e}{\eta} \right)^\rho r^2\right) \quad (11) \end{aligned}$$

其中， $\rho = \frac{\kappa}{2}$ ， $\Delta = \rho \pi \Gamma(\rho) \Gamma(1 - \rho)$ ， $\eta = \frac{P_C}{P_D}$ 。将式(11)

代入式(10)并利用 PPP 的生成函数 (PGFL, probability generating functional) 可得

$$p_c^{\text{sop}} = 1 - \exp\left\{-2\pi\lambda_e \left( \sum_{i=0}^{N_e - 1} \int_0^\infty \frac{(Qr^2)^i}{i!} \exp(-Qr^2) r dr \right)\right\} \quad (12)$$

其中,  $Q \triangleq \lambda_d^s \Delta \left( \frac{\beta_e}{\eta} \right)^\rho$ 。利用文献[16]可得

$$p_c^{\text{SOP}} = 1 - \exp\left(-\pi\lambda_e \frac{N_e \eta^\rho}{\lambda_d^s \Delta \beta_e^\rho}\right) \quad (13)$$

在  $\delta_1$  固定的条件下, 随着  $\beta_e$  的变化, CU 用户的 SOP 在不同  $\delta_2$  下的理论结果和蒙特卡洛实验结果如图 3 所示, 其他仿真参数具体见第 5 节, 其中,  $\delta_1 = 0.2$ 。由图 3 可以看出: 蒙特卡洛实验的结果与理论分析结果完全吻合, 说明理论分析和所提方案的有效性。

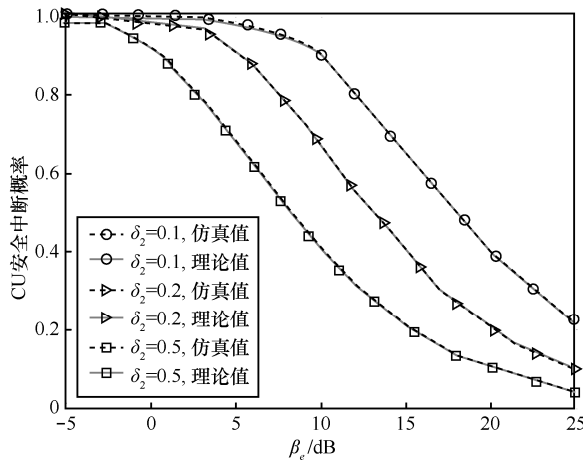


图 3 在不同干扰门限  $\delta_2$  的条件下, 蜂窝用户 SOP 与  $\beta_e$  的关系

### 4.2 D2D 的 COP

根据式(3)中 COP 的定义, D2D 用户的 COP 可表示为

$$\begin{aligned} p_d^{\text{COP}} &= \mathbb{P}\{\text{SINR}_{D_n} \leq \beta_d\} \\ &= \mathbb{P}\left\{\left|h_{T_n D_n}\right|^2 \leq P_D^{-1} r_D^\kappa \beta_d I_{D_n}\right\} \\ &= 1 - \mathcal{L}_{I_{D_n}}(s) \end{aligned} \quad (14)$$

其中,  $s = P_D^{-1} r_D^\kappa \beta_d$ ,  $I_{D_n} = P_C r_{CD_n}^{-\kappa} \left|h_{CD_n}\right|^2 + \sum_{j \in \Phi_j^c, j \neq n} P_D r_{T_j D_n}^{-\kappa} \left|h_{T_j D_n}\right|^2$ ,  $\mathcal{L}_{I_{D_n}}(s)$  为  $I_{D_n}$  的拉普拉斯变换即  $\mathcal{L}_{I_{D_n}}(s) = \mathbb{E}(-s I_{D_n})$ 。为方便表示, 定义  $I_{D_n}^c = P_C r_{CD_n}^{-\kappa} \left|h_{CD_n}\right|^2$ ,  $I_{D_n}^o = \sum_{j \in \Phi_j^c, j \neq n} P_D r_{T_j D_n}^{-\kappa} \left|h_{T_j D_n}\right|^2$ , 根据拉普拉斯变换的性质可得  $\mathcal{L}_{I_{D_n}}(s) = \mathcal{L}_{I_{D_n}^c}(s) \cdot \mathcal{L}_{I_{D_n}^o}(s)$ 。另外, 由文献[21]中的 Slivnyak-Mecke 定理得  $\mathcal{L}_{I_{D_n}^o}(s) = \mathcal{L}_{I_{D_n}^d}(s)$ , 其中,  $I_{D_n}^d = \sum_{j \in \Phi_j^c} P_D r_{T_j D_n}^{-\kappa} \left|h_{T_j D_n}\right|^2$ 。由文献[8]可得

$$\mathcal{L}_{I_{D_n}^o}(s) = \mathcal{L}_{I_{D_n}^d}(s) = \exp\left(-\frac{\pi\lambda_d^s P_D^\rho s^\rho}{\sin c\rho}\right) \quad (15)$$

其中,  $\Gamma(1+x)\Gamma(1-x) = \frac{\pi x}{\sin \pi x} = \frac{1}{\sin c x}$ 。

接下来, 计算  $\mathcal{L}_{I_{D_n}}(s)$ , 首先, 定义  $\psi = \mathcal{L}_{I_{D_n}}(s) = \mathbb{E}\left[\exp\left(-s\left(P_C r_{CD_n}^{-\kappa} \left|h_{CD_n}\right|^2\right)\right)\right]$ 。假设  $r = r_{CD_n}$ , 其概率密度函数<sup>[22]</sup>为  $f_x(r) = 2\pi\lambda_c r \exp(-\pi\lambda_c r^2)$ 。则  $\psi$  可表示为

$$\begin{aligned} \psi &= \mathbb{E}\left[\mathbb{E}_{\left|h_{CD_n}\right|^2}\left[\exp\left(-s P_C r^{-\kappa} \left|h_{CD_n}\right|^2\right)\right]\right] \\ &\stackrel{(a)}{=} \int_0^\infty 2\pi\lambda_c r \exp(-\pi\lambda_c r^2) \frac{1}{1 + s P_C r^{-\kappa}} dr \\ &= \int_0^\infty \frac{\exp(-x)}{1 + b x^{-\rho}} dx \end{aligned} \quad (16)$$

其中,  $x = \pi\lambda_c r^2$ ,  $b = s P_C (\pi\lambda_c)^\rho$ 。假设随机变量  $h \sim \exp(1)$ , 则根据指数分布的性质很容易得到  $\mathbb{E}_h[\exp(-hA)] = \frac{1}{A+1}$ , 而  $\left|h_{CD_n}\right|^2 \sim \exp(1)$ , 式(16)中的步骤(a)很容易得到。因此, 将式(15)和式(16)代入式(14),  $p_d^{\text{COP}}$  可表示为

$$p_d^{\text{COP}} = 1 - \int_0^\infty \frac{\exp(-x)}{1 + b x^{-\rho}} dx \cdot \exp\left(-\frac{\pi\lambda_d^s r_D^2 \beta_d^\rho}{\sin c\rho}\right) \quad (17)$$

在  $\delta_1$  固定的条件下, 随着  $\beta_d$  的变化, D2D 用户的 COP 在不同  $\delta_2$  下的理论结果和蒙特卡洛实验结果如图 4 所示, 其他仿真参数具体如第 5 节所示, 其中,  $\delta_1 = 0.2$ 。由图 4 可以看出, 蒙特卡洛实验的结果与理论分析结果完全吻合, 说明了理论分析和所提方案的有效性。

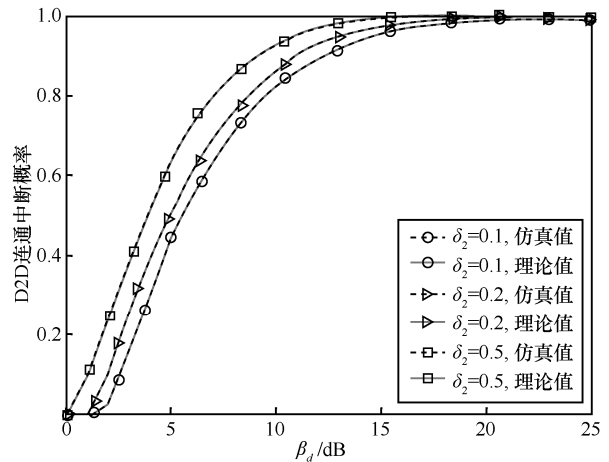


图 4 在不同干扰门限  $\delta_2$  的条件下, 蜂窝用户 SOP 与  $\beta_d$  的关系

### 4.3 性能优化

在第 4.1 节和第 4.2 节中, CU 的 SOP 和 D2D 用户的 COP 都是在  $\delta_1$ 、 $\delta_2$  固定的条件下进行推导的。为进一步提高系统性能, 在满足 CU 安全性能的条件下, 本节提出了一种在满足蜂窝用户安全性的条件下, 最小化 D2D 用户 COP 的优化模型。

由式(13)和式(17)可以看出, CU 的 SOP 随着复用资源的 D2D 用户分布密度  $\lambda_d^s$  的增加而减小, 但 D2D 用户的 COP 却随着  $\lambda_d^s$  的增加而增大。这是因为  $\lambda_d^s$  越大, 可复用资源的 D2D 用户越多, 相互间的同频干扰越严重, 则 D2D 用户的通信可靠性越低, 其 COP 越大; 干扰对 CU 和 Eve 都会造成影响, 但相比于窃听者, 由于复用资源的 D2D 用户到基站 B 的信道近似在 CU 到 B 的信道零空间内, 对 CU 的影响较小, 能够带来安全增益即 CU 的 SOP 随着  $\lambda_d^s$  的增加而减小。图 5 在  $\beta_e = 15$  dB,  $\beta_d = 10$  dB 的条件下, 分别仿真验证了 CU 的 SOP、D2D 用户的 COP 与  $\delta_1$ 、 $\delta_2$  的关系, CU 的 SOP 随着  $\delta_1$ 、 $\delta_2$  的增大而减小, 而 D2D 用户的 COP 却逐渐增大, 与上述分析吻合, 其他具体仿真参数见第 5 节。

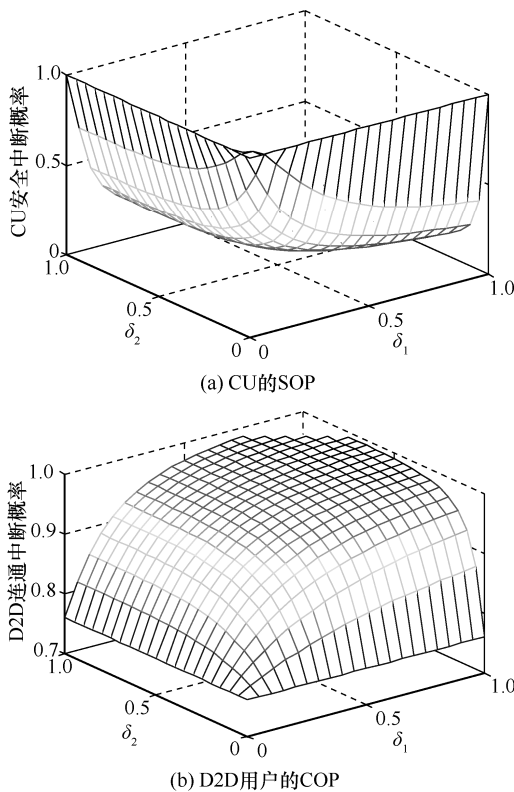


图5 CU 的 SOP 和 D2D 用户的 COP 与  $\delta_1$ 、 $\delta_2$  的关系

根据上述分析,  $\lambda_d^s$  直接影响 CU 的安全性和 D2D 用户的可靠性, 而  $\lambda_d^s$  由  $\delta_1$ 、 $\delta_2$  的大小决定。因此  $\delta_1$ 、 $\delta_2$  的取值对 CU 和 D2D 用户两者来说存在一定的折中关系, 这是因为若  $\delta_1$ 、 $\delta_2$  取值较大, 满足式(5)和式(6)的可复用资源的 D2D 用户越多, 带来的同频干扰越严重, 为 CU 带来较高的安全增益, 但却严重降低了 D2D 用户通信的可靠性; 若  $\delta_1$ 、 $\delta_2$  取值较小则相反。因此, 在系统设计时如何选择使系统性能最优的干扰门限值变得尤为重要。

而在实际蜂窝网络中, CU 的优先级高于 D2D 用户, 因此, 在允许 D2D 复用资源接入网络之前需首先保证 CU 的安全通信需求即在本文中假设 CU 的 SOP 小于预设门限值  $\varepsilon$ 。在系统设计时, 希望在满足 CU 安全通信需求的条件下尽量提高 D2D 用户通信的可靠性, 也就是说在保证 CU 的 SOP 小于预设门限值  $\varepsilon$  的条件下使 D2D 用户的 COP 尽量小。根据上述分析,  $\delta_1$ 、 $\delta_2$  的优化模型为

$$\begin{aligned} & \min_{\{\delta_1, \delta_2\}} P_d^{\text{cop}} \\ & \text{s.t. C1: } P_c^{\text{sop}} \leq \varepsilon \\ & \text{C2: } \delta_1 \in (0, \delta_1^{\text{up}}], \delta_2 \in (0, \delta_2^{\text{up}}] \end{aligned} \quad (18)$$

其中, 为满足两者通信的可靠性, 假设干扰门限上限值分别为  $\delta_1^{\text{up}}$ 、 $\delta_2^{\text{up}}$ 。可以看出, 由式(18)很难求解得到最优门限值  $\delta_1^*$ 、 $\delta_2^*$  的闭式计算式, 但在系统参数固定的条件下, 利用联合搜索的数值方法<sup>[23]</sup>却很容易得到使  $p_d^{\text{cop}}$  最小的  $\delta_1^*$ 、 $\delta_2^*$ 。假设满足式(18)约束条件 C1 的  $\delta_1$ 、 $\delta_2$  的集合为  $(\tilde{\delta}_1, \tilde{\delta}_2)$ , 则使  $p_d^{\text{cop}}$  最小的  $\delta_1^*$ 、 $\delta_2^*$  应满足

$$(\delta_1^*, \delta_2^*) = \min_{\tilde{\delta}_1, \tilde{\delta}_2} p_d^{\text{cop}}(\tilde{\delta}_1, \tilde{\delta}_2) \quad (19)$$

根据上述分析,  $\delta_1^*$ 、 $\delta_2^*$  的联合搜索方法如算法 1 所示, 其中  $\Delta\delta_1$  和  $\Delta\delta_2$  分别是门限值  $\delta_1$ 、 $\delta_2$  的搜索步长。

**算法 1** 最优门限值  $\delta_1^*$ 、 $\delta_2^*$  的联合搜索方法

**输入**  $\kappa$ 、 $\lambda_c$ 、 $\lambda_d$ 、 $\lambda_e$ 、 $P_c$ 、 $P_d$ 、 $N_b$ 、 $N_e$ 、 $\delta_1^{\text{up}}$ 、 $\delta_2^{\text{up}}$ 、 $\beta_d$ 、 $\beta_e$ 、 $\Delta\delta_1$ 、 $\Delta\delta_2$ 、 $\varepsilon$

**输出**  $\delta_1^*$ 、 $\delta_2^*$

**步骤 1** 初始化:  $M = \frac{\delta_1^{\text{up}}}{\Delta\delta_1}$ 、 $N = \frac{\delta_2^{\text{up}}}{\Delta\delta_2}$ , 并假设

$P_d^{\text{comp}} = 1$ 。

**步骤 2** 计算  $P_c^{\text{sop}}$  并得到满足约束条件  $P_c^{\text{sop}} \leq \varepsilon$  的干扰门限值集合  $(\tilde{\delta}_1, \tilde{\delta}_2)$ 。

for  $m = 1 : M$

for  $n = 1 : N$

利用式(13)计算  $P_c^{\text{sop}}(m, n)$  的值;

if  $P_c^{\text{sop}}(m, n) \leq \varepsilon$

更新  $(\tilde{\delta}_1, \tilde{\delta}_2)$ ，即将  $m\Delta\delta_1$  添加到集合  $\tilde{\delta}_1$  中，将  $n\Delta\delta_2$  添加到集合  $\tilde{\delta}_2$  中;

end if

end for

end for

**步骤 3** 计算满足步骤 2 的集合  $\tilde{\delta}_1$  或  $\tilde{\delta}_2$  的元素个数即  $L = \text{Card}(\tilde{\delta}_1) = \text{Card}(\tilde{\delta}_2)$ 。

**步骤 4** 计算  $P_d^{\text{cop}}$  并搜索得到使  $P_d^{\text{cop}}$  最小的  $\delta_1^*$ 、 $\delta_2^*$ 。

for  $l = 1 : L$

将步骤 2 中确定集合的第  $l$  个元素  $\delta_{1l}$ 、 $\delta_{2l}$  代入式(17)计算  $P_d^{\text{cop}}$ ，其中， $\delta_{1l} \in \tilde{\delta}_1$ ， $\delta_{2l} \in \tilde{\delta}_2$

if  $P_d^{\text{cop}} < P_d^{\text{temp}}$

更新  $P_d^{\text{temp}}$ ，即  $P_d^{\text{temp}} = P_d^{\text{cop}}$ ;

更新  $\delta_1^*$ 、 $\delta_2^*$ ，即  $\delta_1^* = \delta_{1l}$ ， $\delta_2^* = \delta_{2l}$ ;

end if

end for

**步骤 5** 返回  $\delta_1^*$ 、 $\delta_2^*$  (此时，得到了使 D2D 的 COP 最小的最优门限值  $\delta_1^*$ 、 $\delta_2^*$ )。

#### 4.4 复杂度分析

本节简要对比分析了本文所提方案和文献[15]方案的复杂度。假设小区内存在  $M$  个 CU 用户和  $N$  个 D2D 用户对，本文方案的复杂度为  $O(M+N+N^2)$ ，其中，步骤 1 的复杂度为  $O(N^2)$ ，步骤 2 的复杂度为  $O(M+N)$ ；而文献[15]方案的复杂度为  $O(M+N)$ 。另外，因为传统方案也需信道估计、决策等步骤，在实际通信过程中，与基于干扰最小化的传统方案相比，本文方案无额外的信令交互。通过上述分析可以看出，本文方案复杂度虽有所增加，但并不明显，而基站侧具有丰富的资源和超强的计算能力，因此，本文所提方案带来的资源消耗和时间复杂度均在系统承受范围之内。

## 5 仿真分析

本节利用蒙特卡洛实验证明本文所提算法的有效性。假设 CU、D2D 用户和 Eve 服从 PPP 分布，其中，主要仿真参数如表 1 所示，仿真结果均通过表 1 的联合搜索方法得到最优门限值的条件。

表 1 主要仿真参数

参数	取值
信道衰落系数	$\kappa = 3$
CU 的发射功率/dBm	$P_C = 20$
D2D 的发射功率/dBm	$P_D = 10$
CU 的分布密度	$\lambda_c = 0.01$
D2D 用户的分布密度	$\lambda_d = 0.1$
Eve 的分布密度	$\lambda_e = 0.01$
基站 B 的天线数目	$N_b = 5$
Eve 的天线数目	$N_e = 3$
干扰门限值上界	$\delta_1^{\text{up}} = \delta_2^{\text{up}} = 1$
D2D 用户对间的距离/m	$r_D = 1$
Eve 的 SIR 门限值/dB	$\beta_e = 15$
$\delta_1$ 、 $\delta_2$ 的搜索步长	$\Delta\delta_1 = \Delta\delta_2 = 0.05$
蒙特卡洛实验次数	$M = 10\ 000$

图 6 表示 D2D 用户 SIR 门限值  $\beta_d$  相同的条件下，不同方案下 D2D 用户的 COP 与 CU 的 SOP 的关系。其中， $\beta_d = 3$  dB，全部复用方案是指不考虑两者干扰受限条件即所有 D2D 用户同时复用同一个 CU 的资源，与文献[8]的下行复用方案类似。由图 6 可以看出，当 CU 的安全性能要求很高（即  $\varepsilon$  很小）时，即使所有 D2D 用户复用相同的资源所带来的安全增益仍不能满足其安全需求，为避免因复用资源影响 CU 的通信可靠性，基站不选择 D2D 用户与 CU 共享资源，此时，D2D 用户无法正常通信即其 COP 为 1。但随着 CU 安全性能需求的降低，利用 D2D 用户与 CU 复用资源带来的干扰能够满足 CU 的安全性能需求，而此时全部复用的方案由于全部 D2D 复用相同的资源，因此，其 COP 保持恒定不变。而文献[15]的方案和本文方案在考虑 CU 安全通信的需求下同时兼顾了合法用户通信的可靠性。具体地，文献[15]仅考虑了 D2D 用户对 CU 的干扰受限，而本文同时考虑 D2D 用户对 CU、其他 D2D 用户的干扰受限，因此，在满足 CU 安全性能需求的条件下，本文所提方案的 D2D 用户的 COP 小于这 2 种方案。

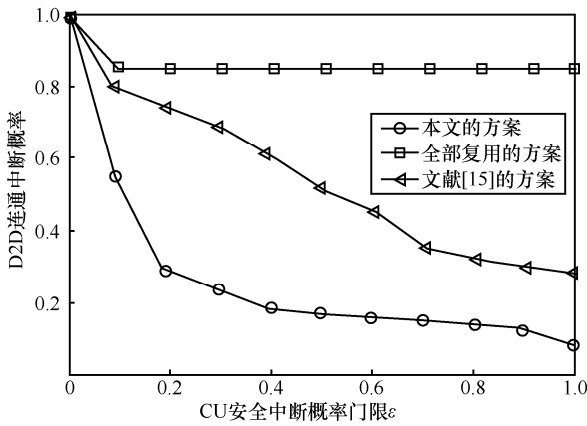


图 6 D2D 用户的 COP 与 CU 的 SOP 门限值的关系

另外，当 CU 安全性能需求固定（即  $\varepsilon=0.5$ ）时，D2D 用户的 COP 与 D2D 分布密度  $\lambda_d$  的关系如图 7 所示。由图 7 可以看出，随着 D2D 分布密度  $\lambda_d$  的增加，D2D 用户的 COP 越大。这是因为  $\lambda_d$  的增加造成相互间的干扰越严重，降低了通信的可靠性。但与其他方案相比，本文所提方案下 D2D 用户对蜂窝用户干扰受限的基础上，同时也考虑了 D2D 用户间的干扰受限问题，因此，能够保障 D2D 用户的通信可靠性。

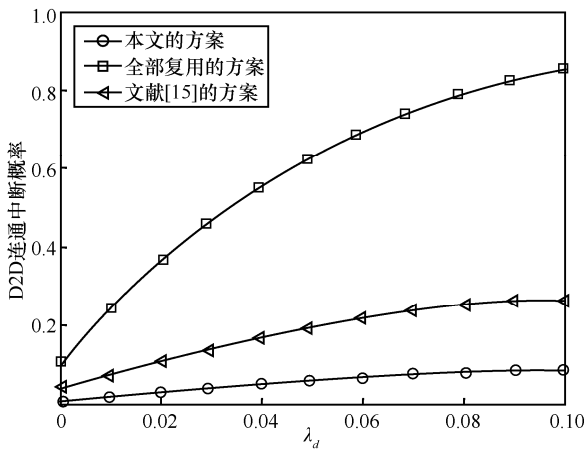


图 7 D2D 用户的 COP 与 D2D 分布密度关系 ( $\varepsilon=0.5$ )

图 8 表示在 CU 不同安全性能需求的条件下，D2D 用户的 COP 与  $\beta_d$  的关系。由图 8 可以看出，在  $\beta_d$  相同条件下， $\varepsilon$  越小，对应的 D2D 用户 COP 越高，即 D2D 通信的可靠性随着 CU 安全性能的提高而降低。这是因为当 CU 安全性能需求越高时，即  $\varepsilon$  越小，此时，需要更多 D2D 用户与 CU 共享相同的资源提供干扰来降低 Eve 窃听信息的能力，但由于共享相同资源的 D2D 用户增加，D2D 用户间

带来的干扰越严重，造成 D2D 用户通信的可靠性较低即 COP 越大。

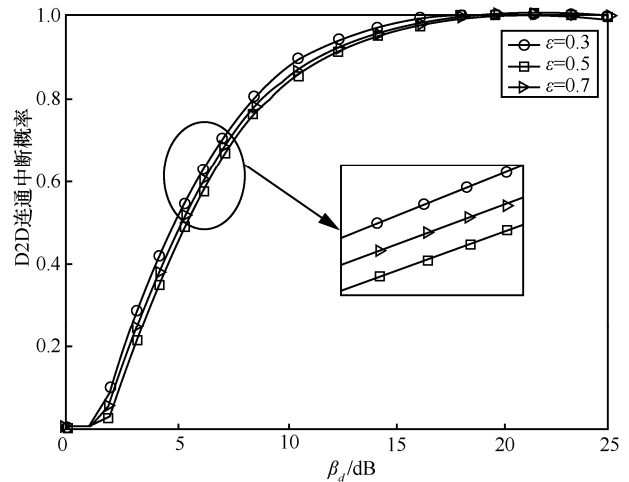


图 8 CU 安全性能不同时，D2D 用户的 COP 与  $\beta_d$  的关系

表 2 给出了在 CU 不同安全性能需求的条件下，最优门限值  $\delta_1^*$ 、 $\delta_2^*$  与  $\beta_e$  的关系。从表 2 可以看出，在 CU 安全需求确定的条件下，即  $\varepsilon$  固定时， $\delta_1^*$ 、 $\delta_2^*$  与  $\beta_e$  呈负相关，这是因为若 CU 安全性能需求确定的话， $\beta_e$  越大，CU 的 SOP 越小，则需要较少 D2D 用户就能满足 CU 的安全需求，因此， $\delta_1^*$ 、 $\delta_2^*$  取值应较小。此时，满足干扰受限的 D2D 用户较少，从而 D2D 用户的 COP 相对较小。另外，随着 CU 安全性能需求的降低，即  $\varepsilon$  增加， $\delta_1^*$ 、 $\delta_2^*$  也逐渐减小。

表 2 当 CU 安全性能不同时，最优门限值  $\delta_1^*$ 、 $\delta_2^*$  与  $\beta_e$  的关系

$\beta_e$	$\delta_1^*$			$\delta_2^*$		
	$\varepsilon=0.3$	$\varepsilon=0.5$	$\varepsilon=0.7$	$\varepsilon=0.3$	$\varepsilon=0.5$	$\varepsilon=0.7$
0	1	1	0.35	1	1	0.95
1	1	1	0.25	1	1	0.95
2	1	0.80	0.20	1	0.95	0.95
3	1	0.40	0.20	1	0.95	0.95
4	1	0.30	0.15	1	0.90	0.90
5	1	0.25	0.15	1	0.90	0.90
6	1	0.20	0.10	1	0.90	0.85
7	0.45	0.15	0.10	0.95	0.90	0.85
8	0.35	0.15	0.10	0.90	0.90	0.85
9	0.25	0.10	0.10	0.90	0.75	0.75
10	0.20	0.10	0.05	0.90	0.75	0.65

同样地，CU 安全性能需求的降低，意味着较少的 D2D 用户带来的安全增益就能满足其需求，从而  $\delta_1^*$ 、 $\delta_2^*$  越来越小，因此，D2D 用户的 COP 随着安全需求的降低而逐渐减小，如图 9 所示。

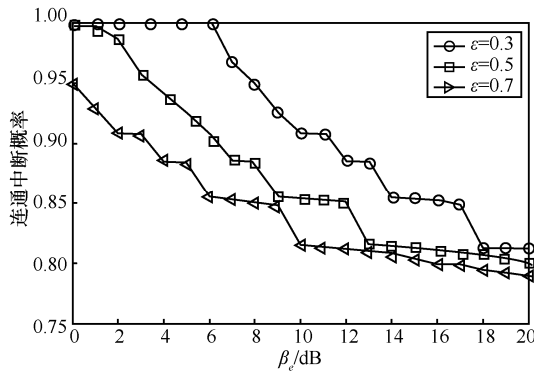


图 9 CU 安全性能不同时，D2D 用户的 COP 与  $\beta_e$  的关系

为说明所提联合搜索方法的有效性，图 10 给出了在不同条件下搜索方法的时间复杂度。本实验在联想 Y480 的笔记本电脑上利用 Matlab 2010b 版本完成，其中，配置信息包括 4 GB 内存，Inter Core i5-3210M 处理器，32 位操作系统。由图 10 可以看出，搜索时间随着 CU 安全中断概率门限值  $\epsilon$  或干扰门限上限值  $\delta_1^{up}$ 、 $\delta_2^{up}$  的增加而增加，这是因为  $\epsilon$  或  $\delta_1^{up}$ 、 $\delta_2^{up}$  的增加扩大了搜索空间，复杂度有所上升，但运行时间基本保持  $10^{-3}$  的数量级左右，增加的时间复杂度在承受范围之内。

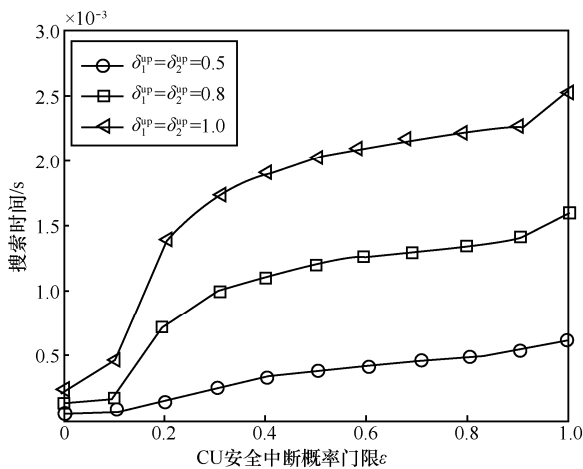


图 10 联合搜索方法的搜索时间与 CU SOP 门限值的关系

## 6 结束语

由于蜂窝上行链路资源受限，为充分利用 D2D 蜂窝系统中同频干扰带来的安全增益，首先，

提出一种机会 D2D 接入的安全传输方案。该方案不仅保证两者通信的可靠性，而且复用相同资源的 D2D 用户作为 CU 的友好干扰者同时增加 Eve 窃听蜂窝链路信号的难度，从而提高 CU 的安全性。然后，分别推导了 CU 的 SOP 和 D2D 用户的 COP，并分析了干扰门限对系统性能的影响。基于此，为使系统性能最佳，提出一种优化干扰门限的优化模型，该模型在保证 CU 安全通信的前提下，以最小化 D2D 用户 COP。最后，仿真证明了所提方案的有效性。

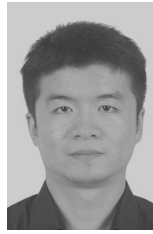
## 参考文献：

- [1] AGIWAL M, ROY A, SAXENA N. Next generation 5G wireless networks: a comprehensive survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(3): 1617-1655.
- [2] DING G, WANG J, WU Q, et al. Cellular-base-station-assisted device-to-device communications in TV white space[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(1): 107-121.
- [3] ALAM M, DU Y, RODRIGUEZ J, et al. Secure device-to-device communication in LTE-A[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(4): 66-73.
- [4] ZHU D H, SWINDLEHURST A L, FAKOORIAN S A A, et al. Device-to-device communications: the physical layer security advantage[C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP).2014: 1606-1610.
- [5] CHU Z, CUMANAN K, XU M, et al. Robust secrecy rate optimizations for multiuser multiple-input-single-output channel with device-to-device communications[J]. IET Communications, 2015, 9(3): 396-403.
- [6] 康小磊, 季新生, 黄开枝. 基于人工噪声辅助的 D2D 异构蜂窝安全通信方法[J]. 通信学报, 2015, 36(10): 149-156.
- [7] KANG X L, JI X S, HUANG K Z. Secure D2D underlaying cellular communication based on artificial noise assisted[J]. Journal on Communications, 2015, 36(10): 149-156.
- [8] KANG X L, JI X S, HUANG K Z, et al. Secure D2D communication underlaying cellular networks: artificial noise assisted[C]//IEEE International Conference on Vehicular Technology (VTC). 2017: 1-5.
- [9] MA C, LIU J Q, TIAN X H, et al. Interference exploitation in D2D-enabled cellular networks: a secrecy perspective[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(1): 229-242.
- [10] YUE J T, MA C, YU H, et al. Secrecy-based channel assignment for device-to-device communication: an auction approach[C]//IEEE International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP).2013: 1-6.
- [11] ZHANG R, CHENG X, YANG L. Cooperation via spectrum sharing for physical layer security in device-to-device communications underlaying cellular networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(8): 5651- 5663.
- [12] WANG L, WU H Q, SONG M, et al. Secrecy-oriented resource sharing for cellular device-to-device underlay[C]//IEEE International Conference on Global Communications Conference (GLOBECOM).

2015: 1-5.

- [12] SUN L, DU Q H, REN P Y, et al. Two birds with one stone: towards secure and interference-free D2D transmissions via constellation rotation[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(10): 8767-8774.
- [13] 陈亚军, 季新生, 黄开枝, 等. 基于安全中断概率的 D2D 安全接入策略[J]. *通信学报*, 2016, 37(8): 86-94.  
CHEN Y J, JI X S, HUANG K Z, et al. Secrecy-outage- probability-based access strategy for device-to-device communications underlying cellular networks[J]. *Journal on Communications*, 2016, 37(8): 86-94.
- [14] ZHANG H, WANG T Y, SONG L Y, et al. Radio resource allocation for physical-layer security in D2D underlay communications[C]//*IEEE International Conference on Communications (ICC)*. 2014: 2319-2324.
- [15] KANG X L, JI X S, HUANG K Z, et al. Secure-oriented distributed access selection for D2D underlaying cellular networks[J]. *Electronics letters*, 2017, 53(1): 32-34.
- [16] WANG C, WANG H M, XIA X G, et al. Uncoordinated jammer selection for securing SIMOME wiretap channels: a stochastic geometry approach[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14(5): 2596-2612.
- [17] XU X, HE B, YANG W, et al. Secure transmission design for cognitive radio networks with poisson distributed eavesdroppers[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2016, 11(2): 373-387.
- [18] JUNE C R, BHASKAR D R. Transmit beamforming in multiple-antenna systems with finite rate feedback: a vq-based approach[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(3): 1101-1112.
- [19] STOYAN D, KENDALL W, MECKE J. *Stochastic geometry and its applications(2nd ed)[M]*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 1996.
- [20] ALI O B S, CQARDINAL C, GAGNON F. Performance of optimum combining in a Poisson field of interferers and rayleigh fading channels[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(8): 2461-2467.
- [21] HAENGGI M, GANTI R K. Interference in large wireless networks[J]. *Foundations and Trends in Networking*, 2008, 3(2):127-248.
- [22] HAENGGI M. On distances in uniformly random networks[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2005, 51(10): 3584-3586.
- [23] 陈宝林. 最优化理论与算法(第二版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.  
CHEN B L. *Optimization: theories and algorithms(2nd ed)[M]*. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.

### [作者简介]



陈亚军 (1988-), 男, 河南商丘人, 国家数字交换系统工程技术研究中心博士生, 主要研究方向为无线物理层安全、D2D 通信技术、无线定位技术等。



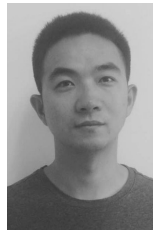
季新生 (1968-), 男, 江苏南通人, 国家数字交换系统工程技术中心教授、博士生导师, 主要研究方向为移动通信网络、拟态安全等。



黄开枝 (1973-), 女, 安徽滁州人, 国家数字交换系统工程技术中心教授、博士生导师, 主要研究方向为移动通信网络、物理层安全等。



杨静 (1991-), 女, 重庆人, 国家数字交换系统工程技术中心博士生, 主要研究方向为移动通信网络、物理层认证等。



易鸣 (1986-), 男, 湖北孝感人, 国家数字交换系统工程技术中心讲师, 主要研究方向为移动通信网络、物理层安全编码等。