

采用随机几何工具的终端直通通信接入控制方法*

孙鹏¹, 陈永卫¹, 周年光¹, 伍晓平², 章理¹

(1. 国网湖南省电力有限公司信息通信分公司, 湖南长沙 410007;

2. 国网湖南省电力有限公司, 湖南长沙 410007)

摘要:针对现有具备终端直通(Device-to-Device, D2D)功能的蜂窝网络的干扰管理问题,提出一种新型的采用随机几何工具的D2D通信接入控制方法。利用随机过程理论以及随机几何工具建立模型分析邻近基站和D2D通信对蜂窝通信的影响,并推导蜂窝业务接入失败概率表达式。基于该表达式能够计算网络允许的最大D2D用户密度,辅助D2D通信接入控制实现干扰管理。仿真证明基于所提数值计算方法获得的估计结果与蒙特卡洛仿真结果相符,且通过合理限制D2D用户密度和D2D用户发射功率可满足指定的蜂窝业务接入失败概率要求。

关键词:终端直通通信;接入控制;随机几何;随机过程

中图分类号:TN919 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2019)03-025-06

Access control method for device-to-device communications based on stochastic geometry

SUN Peng¹, CHEN Yongwei¹, ZHOU Nianguang¹, WU Xiaoping², ZHANG Li¹

(1. Information and Communication Company, State Grid Hunan Electric Power Company Limited, Changsha 410007, China;

2. State Grid Hunan Electric Power Company Limited, Changsha 410007, China)

Abstract: In order to solve the problem of the interference management in D2D(device-to-device) underlaid cellular networks, a new design of stochastic geometry based access control for D2D communications was proposed. Based on the stochastic process theory and the stochastic geometry tool, the cellular services' access failure probability expression was derived to determine the impact from other-cell base stations and D2D communications on the cellular communication. Given the constraint of access failure probability, the maximum D2D transmitters density was calculated according to the expression. As a result, the base stations realized the access control for D2D users and guaranteed the access failure probability of cellular services. The calculated access failure probability of cellular services was validated by extensive simulations. The simulation results verify that the estimation result from the proposed numerical calculation is consistent with the Monte Carlo simulation result, and the cellular services' access failure probability requirement can be satisfied by limiting the density and the transmission power of D2D transmitters.

Keywords: device-to-device communication; access control; stochastic geometry; stochastic process

为满足蜂窝网络中小范围用户间的通信需要,终端直通(Device-to-Device, D2D)功能被引入蜂窝网络^[1]。具备D2D功能的蜂窝网络通过直达的物理链路来解决小范围的用户间通信需求,实现近距离通信,从而降低通信终端能耗,提升系统容量和频谱利用率等^[2-4]。但与此同时,D2D用户也会对蜂窝用户产生干扰造成蜂窝用户性能下降。

为了限制D2D用户对蜂窝用户的干扰,文献[5]和文献[6]由功率控制的角度出发来限制D2D用户的干扰。文献[5]中作者为了降低D2D用户对蜂窝用户的干扰,保护蜂窝通信质量,提出

了一种动态功率控制算法。文献[6]中作者按照蜂窝用户信干噪比(Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR)的受影响程度来选择合适的D2D发射功率进行通信。但是,上述文献都假定存在功率分配方案能满足网络中的所有蜂窝用户和D2D用户SINR需求,也就是说算法总存在一个可行解。然而在实际环境中,一旦D2D用户数超过某个值,功率控制算法大概率是无法满足所有用户SINR要求的,也就是说网络有最大D2D用户数的约束,一旦超过该约束蜂窝用户的通信将出现中断或接入失败。

D2D通信接入控制是嵌入D2D通信功能蜂

* 收稿日期:2017-09-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61671347);国家111创新引智基地资助项目(B08038)

作者简介:孙鹏(1987—),男,湖南长沙人,工程师,博士,E-mail:sunpeng_sgcc@163.com

蜂窝网络中实现干扰管理的重要手段之一,它通过限制 D2D 用户的接入数量来有效抑制蜂窝通信受到的 D2D 通信干扰,实现保护蜂窝业务通信质量的目的。在文献[7]中,作者提出了结合信道分配、接入控制以及功率分配的策略来降低 D2D 通信干扰,优化通信性能。在文献[8]中,作者研究了蜂窝用户与 D2D 用户间的相互干扰,并依靠蒙特卡洛仿真来探索网络允许的最大 D2D 用户数。但是上述的 D2D 通信接入控制方法均假设基站已知所有链路的实时信道状态信息(Channel State Information, CSI),在现实网络中这几乎是不可能的。因为实际网络中基于传统的导频信号和训练序列只能获得基站与用户间的信道状态信息,蜂窝用户与 D2D 用户间的信道状态信息是未知的。蜂窝用户与 D2D 用户间的信道状态信息需要额外的定期探测以及反馈来获得,这将带来巨大的信令开销和反馈时延。

为了绕开获得用户间实时 CSI 需要付出巨大代价的问题,本文用 CSI 的统计特征代替实时 CSI 进行干扰分析,并提出了利用随机几何工具的 D2D 通信接入控制方法^[9]。

1 系统模型

以具备 D2D 功能的正交频分多址蜂窝网络为例进行分析,网络中蜂窝通信下行资源被 D2D 用户复用。具备 D2D 功能的蜂窝网络由蜂窝层和 D2D 层两部分组成。基站和小区中的蜂窝用户构成蜂窝层,在整个网络中基站均匀分布,服从密度为 λ_B 的泊松点过程 $\Phi_B = \{x_i; i = 1, 2, \dots\}$,其中 $x_i \in \mathbb{R}^2$ 表示第 i 个基站的坐标^[10]。蜂窝用户均匀分布,其到达过程服从参数为 λ_C 的泊松过程,服务速率服从参数为 μ_C 的指数分布^[11]。小区中激活的蜂窝用户构成集合 $\Phi_C = \{y_i; i = 1, 2, \dots\}$,其中 $y_i \in \mathbb{R}^2$ 表示第 i 个蜂窝用户坐标。D2D 层由 D2D 发送用户和对应的 D2D 接收用户构成。D2D 用户均匀分布在网络中,建模为密度为 λ_D 的泊松点过程 $\Phi_D = \{z_i; i = 1, 2, \dots\}$,其中 $z_i \in \mathbb{R}^2$ 表示第 i 个 D2D 发送用户的坐标; D2D 接收用户分布在与其通信的 D2D 发送用户周围。

基站共有 N 个子信道数可进行分配,基站为蜂窝用户分配相互正交的子信道。D2D 用户复用蜂窝用户的下行资源进行通信,因此会带来相互干扰。其中 D2D 发送用户以频谱接入概率 $p_d \in [0, 1]$ 接入子信道^[12],占用同一个子信道的 D2D 发送用户构成密度为 $\omega = \lambda_D \cdot p_d$ 的泊松点过程 Ω_D 。无线传播环境既考虑大尺度衰落又考

虑小尺度衰落。大尺度衰落随通信距离变化,衰落因子为 a ;小尺度衰落采用瑞利衰落进行建模。

如图 1 所示为蜂窝用户受到相邻小区基站以及 D2D 用户干扰的示意图。图中 y_1 受到其他小区基站以及复用相同资源的 D2D 用户的干扰。将指定的子信道被基站使用的概率定义为激活因子 p_a ^[9],使用相同子信道的基站构成密度为 $p_a \cdot \lambda_B$ 的泊松点过程 $\Omega_B = \{x_i; i = 1, 2, \dots\}$,其中第 i 个基站的坐标表示为 $x_i \in \mathbb{R}^2$, p_a 在后文进行了详细推导。因此, y_1 受到的其他小区基站以及 D2D 用户干扰可表示为

$$I_{\Omega_B, y_1} + I_{\Omega_D, y_1} = \sum_{x_i \in \Omega_B \setminus x_1} P_B h_{x_i, y_1} |x_i - y_1|^{-a} + \sum_{z_i \in \Omega_D} P_D h_{z_i, y_1} |z_i - y_1|^{-a} \quad (1)$$

其中: I_{Ω_B, y_1} 表示相邻小区基站对 y_1 的干扰; I_{Ω_D, y_1} 表示 D2D 用户对 y_1 的干扰; $h_{A, B}$ 表示用户 A 到用户 B 的信道衰落, $h_{A, B}$ 服从参数为 1 的指数分布^[13]; $|A - B|$ 表示用户 A 、 B 之间的距离; P_B 是基站的发射功率, P_D 是 D2D 用户的发射功率。因此, y_1 的 SINR 可以表示为

$$SINR_{y_1} = \frac{P_B h_{x_1, y_1} |x_1 - y_1|^{-a}}{I_{\Omega_B, y_1} + I_{\Omega_D, y_1} + \sigma^2} \quad (2)$$

其中, $SINR_{y_1}$ 表示 y_1 的 SINR, σ^2 是噪声功率。

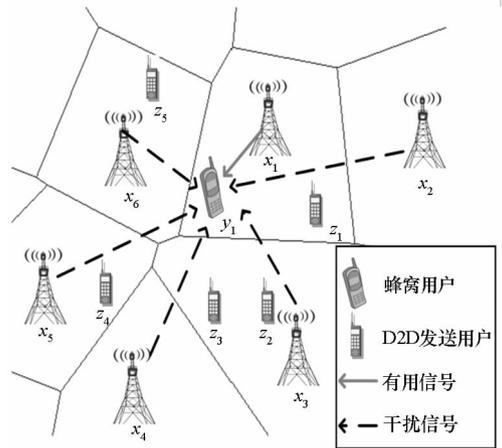


图 1 蜂窝用户受到的干扰

Fig. 1 Interferences received by the cellular user

2 利用随机几何工具的 D2D 通信接入控制

为了绕开获得用户间实时 CSI 需要付出巨大代价的难题,用 CSI 的统计特征代替实时 CSI 进行干扰分析,并提出利用随机几何工具的 D2D 通信接入控制方法^[9]。在提出的接入控制方法中,基站按照最大 D2D 发送用户密度来判别是否允许新到的 D2D 用户进行接入,从而控制 D2D 用户干扰满足蜂窝业务性能要求。如图 2 所示,当

网络允许的最大 D2D 发送用户密度为 $\lambda_{D, \max}$ 时, 基站 x_i 可以计算出小区中允许接入的最大 D2D 发送用户数 $K_{i, \max} = \lambda_{D, \max} S_{x_i}$, 其中 S_{x_i} 表示基站 x_i 的覆盖面积。当小区内 D2D 发送用户数小于 $K_{i, \max}$ 时, 新到的 D2D 发送用户将收到接入响应, 否则 D2D 发送用户将不会收到接入响应, 从而达到减少 D2D 用户接入、限制 D2D 通信干扰的目的。

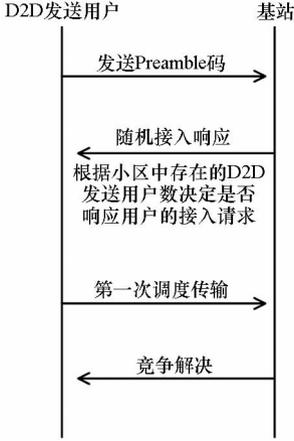


图2 D2D 通信接入控制

Fig. 2 Access control for D2D communications

2.1 蜂窝用户受到干扰的统计特征

利用随机几何工具分析蜂窝业务受到干扰的统计特征, 并研究蜂窝业务平均 SINR 的互补累加分布函数(覆盖概率)^[9]。利用该函数能够计算出蜂窝业务的接入失败概率, 从而为 D2D 通信接入控制提供理论依据。

根据 Slivnyak 定理, 蜂窝业务平均 SINR 的互补累加分布函数等于网络中某个蜂窝业务 SINR 的互补累加分布函数^[9, 12]。因此, 蜂窝业务 y_1 的互补累加分布函数等于蜂窝业务平均 SINR 的互补累加分布函数, 从而有

$$\begin{aligned} & C(\gamma, p_a \cdot \lambda_B, p_d \cdot \lambda_D) \\ &= \mathcal{P}(\text{SINR} > \gamma) \\ &= \mathcal{P}(\text{SINR}_{y_1} > \gamma) \\ &= \int_0^\infty e^{-s_1 \sigma^2} \mathcal{L}_{I_{\Omega_B, y_1}}(s_1) \mathcal{L}_{I_{\Omega_D, y_1}}(s_1) e^{-\lambda_B \pi r^2} 2\lambda_B \pi r dr \quad (3) \end{aligned}$$

其中, C 表示蜂窝业务平均 SINR 的互补累加分布函数, $\mathcal{P}(\text{SINR} > \gamma)$ 表示蜂窝业务平均 SINR 大于目标门限 γ 的概率, $\mathcal{P}(\text{SINR}_{y_1} > \gamma)$ 表示 y_1 的 SINR 大于目标门限 γ 的概率, $r = |x_1 - y_1|$ 表示蜂窝用户到最近基站间的距离, $s_1 = \gamma P_B^{-1} r^a$, I_{Ω_B, y_1} 和 I_{Ω_D, y_1} 的拉普拉斯变换表示为

$$\mathcal{L}_{I_{\Omega_B, y_1}}(\gamma P_B^{-1} r^a) = e^{-2\pi p_a \lambda_B r^2} \left[\int_1^\infty \left(\frac{x}{1+\gamma^{-1} x^a} \right)^{2x} dx \right] \quad (4)$$

$$\mathcal{L}_{I_{\Omega_D, y_1}}(\gamma P_B^{-1} r^a) = e^{-p_d \lambda_D \frac{2\pi^{2/a}}{\sin(2\pi/a)} (\gamma P_B^{-1} r^a P_D)^{2/a}} \quad (5)$$

证明: 当给定蜂窝用户 y_1 到基站的距离 $|x_1 - y_1| = x$ 的条件下, y_1 的 SINR 的互补累加分布函数可以表示为

$$\begin{aligned} & \mathcal{P}(\text{SINR}_{y_1} > \gamma \mid |x_1 - y_1| = x) \\ &= \mathcal{P}\left(\frac{P_B h_{x_1, y_1} \mid |x_1 - y_1|^{-a}}{I_{\Omega_B, y_1} + I_{\Omega_D, y_1} + \sigma^2} > \gamma \mid |x_1 - y_1| = x\right) \\ &= \mathcal{P}\left(h_{x_1, y_1} > \frac{\gamma x^a}{P_B} (I_{\Omega_B, y_1} + I_{\Omega_D, y_1} + \sigma^2)\right) \\ &= \mathbb{E}_{I_{\Omega_B, y_1}, I_{\Omega_D, y_1}} \left[e^{-\frac{\gamma x^a}{P_B} (I_{\Omega_B, y_1} + I_{\Omega_D, y_1} + \sigma^2)} \right] \\ &= e^{-s_2 \sigma^2} \mathcal{L}_{I_{\Omega_B, y_1}}(s_2) \mathcal{L}_{I_{\Omega_D, y_1}}(s_2) \quad (6) \end{aligned}$$

其中: $\mathbb{E}_{I_{\Omega_B, y_1}, I_{\Omega_D, y_1}}[\cdot]$ 表示以 I_{Ω_B, y_1} 和 I_{Ω_D, y_1} 为变量对括号内的函数取统计平均; $s_2 = \gamma P_B^{-1} x^a$; $\mathcal{L}_{I_{\Omega_D, y_1}}$ 是随机变量 I_{Ω_D, y_1} 的拉普拉斯变换, 它可以表示为

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{I_{\Omega_D, y_1}}(s_2) &= e^{-s_2 I_{\Omega_D, y_1}} \\ &= \mathbb{E}_{h_{z_i, y_1} \mid |z_i - y_1|} \left(e^{-s_2 \sum_{z_i \in \Omega_D} P_D h_{z_i, y_1} \mid |z_i - y_1|^{-a}} \right) \\ &= e^{-2\pi p_d \lambda_D \mathbb{E}_{h_{z_i, y_1}} \left[\int_0^\infty (1 - e^{-s_2 P_D h_{z_i, y_1} \mid |z_i - y_1|^{-a}}) u du \right]} \\ &= e^{-p_d \lambda_D \frac{2\pi^{2/a}}{\sin(2\pi/a)} (s_2 P_D)^{2/a}} \quad (7) \end{aligned}$$

$u = |z_i - y_1|$ 表示 D2D 发送用户到蜂窝用户的距离; $\mathcal{L}_{I_{\Omega_B, y_1}}$ 是随机变量 I_{Ω_B, y_1} 的拉普拉斯变换, 它可以表示为

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{I_{\Omega_B, y_1}}(s_2) &= e^{-s_2 I_{\Omega_B, y_1}} \\ &= \mathbb{E}_{h_{x_i, y_1} \mid |x_i - y_1|} \left(e^{-s_2 \sum_{x_i \in \Omega_B} P_B h_{x_i, y_1} \mid |x_i - y_1|^{-a}} \right) \\ &= \mathbb{E}_{|x_i - y_1|} \left[\prod_{x_i \in \Omega_B} \mathbb{E}_{h_{x_i, y_1}} \left(e^{-s_2 P_B h_{x_i, y_1} \mid |x_i - y_1|^{-a}} \right) \right] \\ &= e^{-2\pi p_a \lambda_B \int_{|x_1 - y_1|}^\infty \left(1 - \frac{1}{1 + s_2 P_B u^a} \right) v dv} \quad (8) \end{aligned}$$

其中, $v = |x_i - y_1|$ 表示邻近小区基站到蜂窝用户的距离。将 $s_2 = \gamma P_B^{-1} x^a$, $|x_1 - y_1| = x$ 代入式(8)可得

$$\begin{aligned} & \mathcal{L}_{I_{\Omega_B, y_1}}(\gamma P_B^{-1} x^a) \\ &= e^{-2\pi p_a \lambda_B \int_x^\infty \frac{\gamma}{\gamma + (v/x)^a} v dv} \\ &= e^{-2\pi p_a \lambda_B x^2 \left\{ \int_1^\infty [u/(1+\gamma^{-1} u^a)] du \right\}} \quad (9) \end{aligned}$$

接下来推导 $|x_1 - y_1|$ 的概率密度函数, 进而解除式(6)中 $|x_1 - y_1| = x$ 的条件。由于基站分布服从泊松点过程, 蜂窝用户接入就近的基站。因此, 基站与小区中蜂窝用户的距离 $|x_1 - y_1|$ 的互补累加分布函数为

$$\begin{aligned} \mathcal{P}(|x_1 - y_1| > r) &= \mathcal{P}(\text{无基站到用户距离小于 } r) \\ &= e^{-\lambda_B \pi r^2} \quad (10) \end{aligned}$$

从而, $|x_1 - y_1|$ 的累加分布函数为

$$\mathcal{P}(|x_1 - y_1| < r) = F_{x_1}(r) = 1 - e^{-\lambda_B r^2} \quad (11)$$

进一步, $|x_1 - y_1|$ 的概率密度函数可以表示为

$$f_{|x_1 - y_1|}(r) = \frac{dF_{x_1}(r)}{dr} = e^{-\lambda_B r^2} 2\pi\lambda_B r \quad (12)$$

根据全概率公式有

$$\begin{aligned} &\mathcal{P}(SINR_{y_1}^{(C)} > \gamma) \\ &= \int_0^\infty \mathcal{P}(SINR_{y_1}^{(C)} > \gamma | |x_1 - y_1| = r) \cdot f_{|x_1 - y_1|}(r) dr \end{aligned} \quad (13)$$

将式(6)、式(7)、式(9)、式(12)代入式(13)可获得式(3)。 □

在具备 D2D 功能的蜂窝网络里,干扰远远超过噪声,为了简化计算可忽略噪声。因此,互补累加分布函数简化为

$$\begin{aligned} &C(\gamma, p_a \cdot \lambda_B, p_d \cdot \lambda_D) \\ &= 1 \left/ \left[\frac{p_d \cdot \lambda_D \cdot k}{\lambda_B} \left(\gamma \frac{P_D}{P_B} \right)^{\frac{2}{a}} + 2p_a H_1(\gamma, a) + 1 \right] \right. \end{aligned} \quad (14)$$

其中, $k = \frac{2\pi/a}{\sin(2\pi/a)}$, $H_1(\gamma, a) = \int_1^\infty \left(\frac{x}{1 + \gamma^{-1}x^a} \right) dx$ 。

2.2 蜂窝业务接入失败概率估计

本节研究蜂窝业务接入失败概率的数值计算方法并推导特定要求下网络的最大 D2D 发送用户密度。 S 是样本空间中的一个完备事件, $S = [S_0, S_1, \dots, S_N]$ 表示网络状态集合, S_i 表示网络中存在 i 个蜂窝业务。蜂窝业务接入失败概率表示为

$$p_f = \sum_i \mathcal{P}(f \cap S_i) = \sum_i \mathcal{P}(f|S_i) \cdot p(S_i) \quad (15)$$

其中: p_f 表示蜂窝业务接入失败概率; f 指蜂窝业务接入失败事件; $\mathcal{P}(f|S_i)$ 表示在状态 S_i 时蜂窝业务的条件接入失败概率; $p(S_i)$ 表示状态 S_i 的稳态概率。为了进一步推导蜂窝业务接入失败概率数值计算方法,接下来分别计算蜂窝业务条件接入失败概率和稳态概率。

两种原因会引起蜂窝业务接入失败:资源不足——网络中所有子信道都已经分配给了通信的蜂窝业务;其他基站和 D2D 用户干扰——相邻小区基站和 D2D 发送用户干扰使得蜂窝用户接收端 SINR 不满足要求。

如图 3 所示,当小区中的蜂窝业务数达到 N 时,小区内无空闲资源,此时新到的蜂窝业务将由于资源不足而导致接入失败^[9]。条件接入失败概率表示为

$$\mathcal{P}(f|S_i) = 1 \quad i = N \quad (16)$$

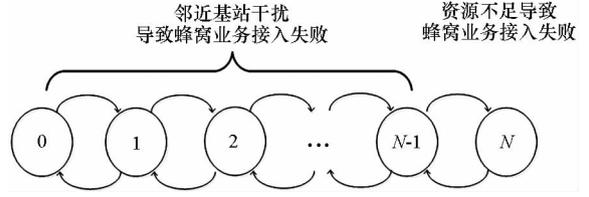


图 3 蜂窝业务接入失败原因

Fig. 3 Reason for cellular communication access failure

当小区中存在空闲子信道时,新到达的蜂窝业务接入失败是由其他小区基站干扰和 D2D 通信干扰造成的。即当其他小区基站干扰和 D2D 通信干扰造成蜂窝业务接收端 SINR 低于门限要求时,蜂窝业务将出现接入失败,此时有

$$\mathcal{P}(f|S_i) = \mathcal{P}(SINR < \gamma) \quad i < N \quad (17)$$

由于 D2D 用户干扰和其他小区基站干扰会造成蜂窝业务接入失败,网络中蜂窝业务的有效到达率可表示为

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_C \cdot C(\gamma, p_a \cdot \lambda_B, p_d \cdot \lambda_D) \quad (18)$$

其中, λ_{eff} 表示蜂窝业务的有效到达率, λ_C 表示蜂窝业务的到达率。小区的蜂窝业务数建模为 $M/M/N/0$ 排队问题,稳态概率表示为

$$p(S_n) = \frac{(\rho_{\text{eff}})^n}{n!} \left(\sum_{k=0}^N \frac{(\rho_{\text{eff}})^k}{k!} \right)^{-1} \quad (19)$$

其中, $\rho_{\text{eff}} = \lambda_{\text{eff}}/\mu$ 是蜂窝业务有效负载, μ 表示服务速率。

指定的子信道被基站使用的概率定义为激活因子 p_a 。在 n 个子信道中包含指定的子信道的概率为 $\frac{n}{N}$,则激活因子 p_a 可以表示为

$$\begin{aligned} p_a &= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^N np(S_n) \\ &= \frac{1}{N} [p(S_1) + 2p(S_2) + \dots + Np(S_N)] \\ &= \frac{\rho_{\text{eff}}}{N} \left[1 - \frac{(\rho_{\text{eff}})^N}{N!} p(S_0) \right] \end{aligned} \quad (20)$$

当信道数 N 很大时,上述结果进一步简化为

$$p_a \approx \begin{cases} \frac{\lambda_{\text{eff}}}{\mu N} & \frac{\lambda_{\text{eff}}}{\mu N} < 1 \\ 1 & \frac{\lambda_{\text{eff}}}{\mu N} \geq 1 \end{cases} \quad (21)$$

在仿真中通过对比估计曲线和仿真曲线可以验证近似结果的准确性。

由式(21)可知, p_a 受 λ_{eff} 、 μ 和 N 的影响,因此激活因子 p_a 可以表示为

$$p_a = f(\lambda_{\text{eff}}, \mu, N) \quad (22)$$

蜂窝业务平均 SINR 的互补累加分布函数可表示为

$$\begin{aligned}
& C(\gamma, p_a \cdot \lambda_B, p_d \cdot \lambda_D) \\
& = C(\gamma, f(\lambda_{\text{eff}}, \mu, N) \lambda_B, p_d \cdot \lambda_D) \\
& = \frac{1}{\frac{P_d \cdot \lambda_D}{\lambda_B k \left(\gamma \frac{P_D}{P_B} \right)^{\frac{2}{a}} + 2 \min \left(\frac{\lambda_{\text{eff}}}{\mu N}, 1 \right) H_1(\gamma, a) + 1}} \quad (23)
\end{aligned}$$

将式(23)代入式(18)可以得到等式

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{\lambda_C}{\frac{P_d \cdot \lambda_D}{\lambda_B k \left(\gamma \frac{P_D}{P_B} \right)^{\frac{2}{a}} + 2 \min \left(\frac{\lambda_{\text{eff}}}{\mu N}, 1 \right) H_1(\gamma, a) + 1}} \quad (24)$$

对于给定的 $\lambda_C, \lambda_B, \lambda_D, p_d, \gamma, N, \mu, a, P_D, P_B$, 可以通过求解式(24)计算出 λ_{eff} , 进而获得稳态概率。此外, 由蜂窝业务平均 SINR 的互补累加分布函数定义可知

$$\begin{aligned}
\mathcal{P}(\text{SINR} < \gamma) & = 1 - C(\gamma, p_a \cdot \lambda_B, p_d \cdot \lambda_D) \\
& = 1 - \frac{\lambda_{\text{eff}}}{\lambda_C} \quad (25)
\end{aligned}$$

从而条件接入失败概率可以表示为

$$\mathcal{P}(f|S_i) = 1 - \frac{\lambda_{\text{eff}}}{\lambda_C} \quad i < N \quad (26)$$

将式(16)、式(19)、式(26)代入式(15)中可以获得蜂窝业务接入失败概率为

$$\begin{aligned}
p_f & = \frac{\left(\frac{\lambda_{\text{eff}}}{\mu} \right)^N}{N!} \left(\sum_{k=0}^N \frac{\left(\frac{\lambda_{\text{eff}}}{\mu} \right)^k}{k!} \right)^{-1} + \\
& \left[1 - \frac{\left(\frac{\lambda_{\text{eff}}}{\mu} \right)^N}{N!} \left(\sum_{k=0}^N \frac{\left(\frac{\lambda_{\text{eff}}}{\mu} \right)^k}{k!} \right)^{-1} \right] \left(1 - \frac{\lambda_{\text{eff}}}{\lambda_C} \right) \quad (27)
\end{aligned}$$

对于给定的蜂窝业务接入失败概率要求 $p_{f,r}$, 根据式(27)可以获得需要的最小蜂窝业务有效到达率 $\lambda_{\text{eff}, \min}(p_{f,r})$ 。对于给定的蜂窝业务接入失败概率要求, 小区的最大 D2D 发送用户密度为

$$\lambda_{D, \max}(p_{f,r}) = \frac{\left(\frac{\lambda_C}{\lambda_{\text{eff}, \min}(p_{f,r})} - 2B - 1 \right)}{\left[p_d \lambda_B k \left(\gamma \frac{P_D}{P_B} \right)^{\frac{2}{a}} \right]} \quad (28)$$

其中, $\lambda_{D, \max}(p_{f,r})$ 表示当蜂窝业务接入失败概率等于 $p_{f,r}$ 时网络允许的最大 D2D 发送用户密度,

$$B = \min \left(\frac{\lambda_{\text{eff}, \min}(p_{f,r})}{\mu N}, 1 \right) H_1(\gamma, a).$$

3 仿真结果与分析

本节通过对比蒙特卡洛仿真曲线与本文估计曲线、文献[10]估计曲线、文献[11]估计曲线的差异来证明本文所提数值计算方法能够准确估计

蜂窝业务的接入失败概率。同时, 本节还将探讨 D2D 发射功率、D2D 发送用户密度对蜂窝业务接入失败概率的影响。仿真参数如表 1 所示, 后文中若未特别说明则所用的仿真参数默认为表 1 中的值。基站按照泊松点过程分布, 且密度为 λ_B 。蜂窝用户按照距离就近接入基站。蜂窝用户的到达过程服从参数为 λ_C 的泊松过程, 服务过程服从速率为 μ 的指数分布。D2D 发送用户按照泊松点过程分布, 且密度为 λ_D 。重复撒点 2000 次取平均值得到最终的仿真曲线。

表 1 仿真参数^[11]

Tab. 1 Parameters used in simulations^[11]

参数名称	参数值
总带宽 B	10 MHz
D2D 密度 λ_D	$15/500^2 \text{ m}^{-2}$
蜂窝业务服务速率 μ	$1/1100 \sim 1/300$
蜂窝业务到达率 λ_C	1/10
总信道数 N	50
基站密度 λ_B	$1/500^2 \text{ m}^{-2}$
D2D 发射功率 P_D	20 dBm
基站发射功率 P_B	46 dBm
蜂窝通信目标门限 γ	0 dB
D2D 用户频谱接入概率 p_d	0.1
衰落指数 a	3.5
噪声功率 σ^2	-143.97 dBm

图 4 描述了蜂窝业务接入失败概率和蜂窝业务负载之间的关系。由图中可以发现, 本文所提数值计算方法获得的估计曲线与仿真曲线最接近, 这证明: ①本文提出的利用 CSI 的统计特征代替实时 CSI 进行干扰分析的方法能够准确估计蜂窝业务受到的干扰; ②基于 CSI 的统计特征代替实时 CSI 进行干扰分析是准确、可行的。文献[11]的估计曲线仅考虑了资源不足的影响, 因此当负载低时无法准确估计蜂窝业务的接入失败概率。文献[10]的估计曲线忽略了资源不足的影响, 当蜂窝业务负载升高时其估计曲线与仿真曲线出现明显差异。本文所提方法兼顾了干扰和资源不足的影响, 无论负载如何变化都能进行准确的估计。

图 5 描述了当 $\lambda_C = 1/10, \mu = 1/150$ 时 D2D 发射功率和 D2D 发送用户密度对蜂窝业务接入失败概率的影响。由图中发现: 蜂窝业务接入失败概率随着 D2D 发送用户密度的下降而单调下降。这是因为随着网络中 D2D 发送用户数量减少, D2D 发

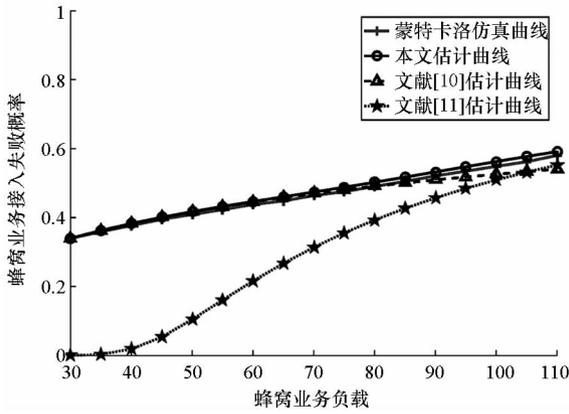


图 4 蜂窝业务接入失败概率与蜂窝业务负载的关系

Fig. 4 Cellular services' access failure probability versus traffic loads

送用户的同频干扰也会随之下降。同时随着 D2D 发射功率上升,单个 D2D 用户对蜂窝用户的干扰增大,这会造成蜂窝业务接入失败概率的上升。对于给定的蜂窝业务接入失败概率要求,比如要求小于 25% 时,若 D2D 发射功率为 5 dBm 则需要限制 D2D 发送用户密度小于 $0.000\ 04\ \text{m}^{-2}$; 若 D2D 发射功率为 10 dBm 则需要限制 D2D 发送用户密度小于 $0.000\ 023\ \text{m}^{-2}$ 。因此为了满足蜂窝业务接入失败概率要求,若要接入更多的 D2D 用户则需要降低 D2D 用户的发射功率。

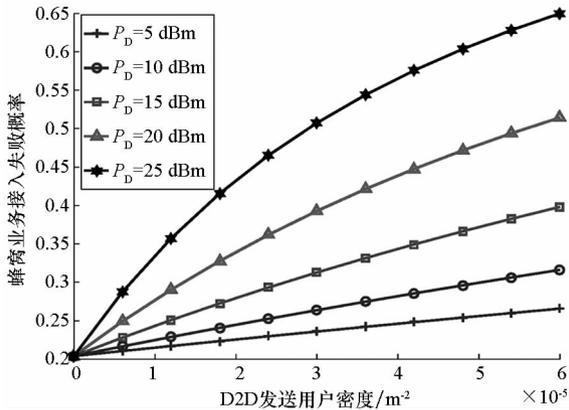


图 5 蜂窝业务接入失败概率与 D2D 发送用户密度关系

Fig. 5 Cellular services' access failure probability versus D2D transmitters density

4 结论

本文采用随机几何工具以及随机过程理论建立嵌入 D2D 功能和蜂窝网络模型,该模型兼顾了 D2D 用户干扰、相邻小区基站干扰和资源不足对蜂窝业务接入的影响。对于给定的蜂窝业务接入失败概率要求,利用所提模型能计算出网络的最大 D2D 发送用户密度,从而实现 D2D 通信的接

入控制。相比于基于用户间实时 CSI 的 D2D 通信接入控制方法,本文所提的方法具有反馈开销小、反馈时延少、复杂度低、易于实现的优点。

参考文献 (References)

- [1] Han L, Zou W X, Zhao G L, et al. Duplex mode selection for device-to-device communications underlying the cellular uplink [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Computer Communications, 2017: 157 - 162.
- [2] Asadi A, Wang Q, Mancuso V. A survey on device-to-device communication in cellular networks [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(4): 1801 - 1819.
- [3] Lin W, Ziolkowski R W, Baum T C, et al. 28 GHz compact omnidirectional circularly polarized antenna for device-to-device (D2D) communications in future 5G systems [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2017, 65(12): 6904 - 6914.
- [4] Tehrani M N, Uysal M, Yanikomeroglu H. Device-to-device communication in 5G cellular networks: challenges, solutions, and future directions [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(5): 86 - 92.
- [5] Gu J, Bae S J, Choi B G, et al. Dynamic power control mechanism for interference coordination of device-to-device communication in cellular networks [C]// Proceedings of International Conference on Ubiquitous and Future Networks, 2011: 71 - 75.
- [6] Yu C H, Tirkkonen O, Doppler K, et al. On the performance of device-to-device underlay communication with simple power control [C]// Proceedings of 69th Vehicular Technology Conference, 2009.
- [7] Feng D Q, Lu L, Yi Y W, et al. Device-to-device communications underlying cellular networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(8): 3541 - 3551.
- [8] Zhang W N, Zhang H L, Li W F, et al. A combining call admission control and power control scheme for D2D communications underlying cellular networks [J]. China Communications, 2016, 13(10): 137 - 145.
- [9] 孙鹏. 基于随机几何理论的嵌入 D2D 功能蜂窝网络干扰管理研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017. SUN Peng. Research on interference management in D2D-enabled cellular networks based on stochastic geometry [D]. Xi'an: Xidian University, 2017. (in Chinese)
- [10] Ye Q Y, Al-shalash M, Caramanis C, et al. Resource optimization in device-to-device cellular systems using time-frequency hopping [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(10): 5467 - 5480.
- [11] Fang Y G, Zhang Y. Call admission control schemes and performance analysis in wireless mobile networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2002, 51(2): 371 - 382.
- [12] Lin X Q, Andrews J G, Ghosh A. Spectrum sharing for device-to-device communication in cellular networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(12): 6727 - 6740.
- [13] 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.