

基于排队论的 D2D 蜂窝异构网络的性能分析

辛建芳^{1,2} 朱琦¹ 梁广俊^{1,2} 章天骄¹

(1. 南京邮电大学通信与信息工程学院, 江苏南京 210003; 2. 安徽工程大学电气工程学院, 安徽芜湖 241000)

摘要: 本文对在蜂窝网络中的具有业务缓存功能的 D2D 通信进行性能分析, 与满业务模型不同本文建立动态数据到达的 D2D 通信模型。针对 D2D 用户的业务数据随机到达的特性, 建立一种动态干扰下 D2D 用户数据发送状态的 M/G/1 排队模型, 并考虑到来自蜂窝用户的干扰和信道衰落的影响。本文采用自适应调制编码技术将 D2D 的信干噪比划分区间来确定发送速率, 为了分析 D2D 用户缓存中的数据排队状态, 本文用嵌入马氏链分析并求解它的稳态分布, 由稳态分布推导得到平均吞吐量、平均时延等参数的表达式。仿真结果验证了理论分析的正确性和合理性。

关键词: Device-to-Device 通信; M/G/1 模型; 蜂窝异构网络; 嵌入式马尔可夫链

中图分类号: TN92 文献标识码: A DOI: 10.16798/j.issn.1003-0530.2018.04.002

Performance Analysis Based on Queuing Theory for D2D Underlying Cellular Networks

XIN Jian-fang^{1,2} ZHU Qi¹ LIANG Guang-jun^{1,2} ZHANG Tian-jiao¹

(1. College of Telecommunications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210003, China; 2. School of Electrical Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu, Anhui 241000, China)

Abstract: In this paper, we focused on the performance analysis of the buffer-aided D2D communication in cellular networks. Different from the previous studies of full traffic model, we profiled a tractable transmission model for D2D communication with dynamic data arrival. Considering the effect of the interference from cellular user and the channel fading, The D2D user data transmission process with a dynamic interference model was depicted by M/G/1 queuing model. Adaptive modulation and coding was used to divide signal-to-interference and noise ratio values regions which corresponded to a fixed data rate. In order to analyze the situation of data packets queuing up in the D2D user buffer, this paper formulated it as a Embedded Markov chain and computed its steady-state distribution. We adopt the adaptive transmission rate to make queuing analysis which need predict the SINR in certain intervals and use a dynamic traffic model. Finally, the expressions of performance metrics in terms of average queue length, mean throughput, average packet delay and packet dropping probability were obtained. Simulation results show the validity and rationality of the theoretical analysis.

Key words: Device-to-Device (D2D) communication; M/G/1 queuing model; cellular heterogeneous networks; embedded Markov chain

1 引言

蜂窝系统中的终端间直接通信技术 (Device-to-Device, D2D) 允许移动终端在蜂窝系统的控制下使

用蜂窝系统的授权频段进行点对点通信^[1], 能够提供更高频谱和能量效率的通信方式, 无论在通信方式还是网络结构上都具有极大的灵活性和可扩展性, 很快就获得了学术界和工业界的重视。D2D 与

蜂窝用户共享频谱可以提高频谱利用率,但也不可避免地在 D2D 链路和蜂窝链路之间引入了干扰,若 D2D 对蜂窝通信链路的干扰过大,会影响原网络性能;若蜂窝通信对 D2D 链路的干扰过大,会使 D2D 数据传输掉话率增加,D2D 通信质量无法保证。

当 D2D 通信复用蜂窝用户的频谱资源时,文献[2-4]中讨论了如何对干扰进行分析,一般而言,联合资源分配和动态功率控制算法可以用来消除 D2D 用户对蜂窝用户造成的干扰[5-7],文献[7]提出了一种联合模式选择和资源分配的方法来使系统吞吐量最大化,同时确保 D2D 和蜂窝用户的服务质量(QoS)。在文献[8]中在结合考虑 D2D 用户和蜂窝用户的服务质量和公平性的基础上,最大化所有用户的效用函数之和来解决共信道干扰。在现有的讨论蜂窝用户对 D2D 用户干扰的文章中,文献[9]提出基于距离的资源分配策略,基站为 D2D 用户选择距离较远的蜂窝用户共享信道资源,有效降低 D2D 用户的掉话率,文献[10]在[9]的基础上考虑到了多用户的差异,提出了一种干扰已知的资源分配方法,D2D 用户在蜂窝用户上行通信时感知频谱环境,基站利用 D2D 用户感知到的信息为蜂窝用户和 D2D 分配资源。随后人们将研究重点放在多用户与多小区的复杂场景下的资源分配问题,文献[11-12]在单小区和多小区场景下提出了综合考虑距离和信道因素的资源分配策略,从而提高 D2D 用户的吞吐量。然而文献[9-12]考虑的用户是始终有数据发送的工作状态,没有考虑实际通信系统中用户的业务是随机到达,并不是总有数据等待发送。

排队理论已在认知无线电得到广泛应用,文献[14]分析认知用户的响应延时,构建抢占优先级的排队模型,但是假设条件是理想感知结果,但在实际系统中,受信道衰落和随机噪声的影响,认知用户的频谱状态可能出现漏检错误,文献[15]针对认知用户的非理想感知结果,提出了相互干扰的排队模型。目前还鲜有论文将排队理论应用于 D2D 蜂窝异构网络干扰分析。文献[13]在有限状态马尔可夫模型和泊松业务到达的假设条件下,为 D2D 用户系统构建了一个包含信道和队列状态的二维马尔可夫系统模型,并计算得到稳定状态概率,但论文没有考虑小区中存在蜂窝用户的情况。

本文针对 D2D 用户复用蜂窝用户上行信道的场景,考虑 D2D 的传输性能受蜂窝用户与 D2D 接收端的距离的影响,结合考虑有限动态业务到达模

型,提出了一种基于排队论的蜂窝异构网络中的 D2D 通信性能的分析方法,对 D2D 接收端的干扰区域进行划分,由蜂窝用户落入干扰区域的概率进行统计分析,通过 M/G/1 排队模型对 D2D 用户的数据状态进行描述,利用嵌入式马尔可夫链分析 D2D 用户缓冲区中等待发送的数据数量的转移概率,进而由稳态分布推导获得平均队长、平均吞吐量、平均延时和丢包率的表达式。最后通过系统仿真,能够理论分析计算的正确性,证明了建立的分析模型的合理性。

本文的内容安排如下,第2部分给出了系统模型;第3部分基于嵌入马尔可夫链推导了平均队长、平均吞吐量、平均延时和丢包率的闭合式;第4部分是性能仿真及分析;第5部分是对本文的总结。

2 系统模型

如图1所示,假设在单小区场景下, N 个蜂窝用户占用 N 个正交信道,记其集合为 $\mathbf{C} = \{1, 2, \dots, N\}$,共有 M 个 D2D 用户对,集合为 $\mathbf{D} = \{1, 2, \dots, M\}$,蜂窝用户和 D2D 用户在小区内都服从均匀分布,假设 $N > M$,一对 D2D 用户只复用一个蜂窝用户的上行信道,为降低系统开销,D2D 用户随机选择复用的信道,任意 D2D 接收端只受到与其共享信道的蜂窝用户的干扰。本文只考虑大尺度衰落,路径损耗模型可表示为 $P(d) = P \cdot d^{-\alpha}$ [16],其中 P 表示发射功率, $P(d)$ 表示在离发射端 d 处测量的接收功率, α 是路损因子。当参考距离设定为宏蜂窝的近地参考距离,不考虑发射频率,天线高度,传输环境等因素对路径损耗的影响时,接收功率 $P(d)$ 与距离成正比。可以得到 D2D 接收端 SINR 为:

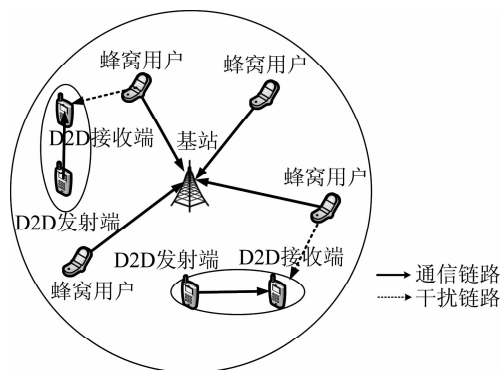


图1 系统模型示意图

Fig. 1 System model of D2D communications underlaying cellular network

$$\text{SINR}_i = \frac{P_d |r_d|^{-\alpha}}{N_0 + P_c |r_{c,d}|^{-\alpha}} \quad (1)$$

其中 P_c 是蜂窝用户的发射功率, P_d 是 D2D 发射端的发射功率, N_0 是噪声功率, r_d 表示 D2D 接收端与发射端间的链路距离, $r_{c,d}$ 表示蜂窝用户到与之共享行道的 D2D 接收端的距离, α 是路损因子, D2D 接收端受到的干扰信号功率表示为 $P_c |r_{c,d}|^{-\alpha}$ 。

如图 2 所示, 考虑在单个宏蜂窝小区内, 以一个 D2D 接收端为中心划分为三个环形区域, 以半径 r , R 划分, 假设最大半径仍然在宏蜂窝小区覆盖范围内, R 为蜂窝用户对 D2D 用户的最大干扰距离, 即当蜂窝用户与 D2D 接收端的距离大于 R 时, 蜂窝用户对 D2D 用户的干扰可以忽略。当蜂窝用户落入距离 D2D 接收端较近的环境时, 对 D2D 链路的干扰较大, SINR 较小, 则选择相应的数据传输速率较低。该文采用自适应调制编码 (AMC) 技术来实现传输速率的变化, 根据文献 [13], 我们将整个 SINR 值划分为 3 个连续的不相重叠的区间, 根据 SINR 区间选择相应的数据传输速率, 记为 γ_k , $k=1, 2, 3$, 假设 $\gamma_1 < \gamma_2 < \gamma_3$ 。假设宏蜂窝用户落入每个环境的概率服从均匀分布, 即:

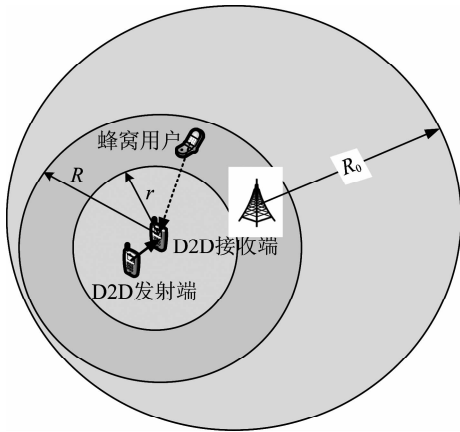


图 2 系统干扰模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the interference model

$$p(\gamma_1) = P(r_{c,d} \leq r) = \frac{r^2}{R_0^2} \quad (2)$$

$$p(\gamma_2) = P(r < r_{c,d} \leq R) = \frac{R^2 - r^2}{R_0^2} \quad (3)$$

$$p(\gamma_3) = P(r_{c,d} \geq R) = 1 - \frac{R^2}{R_0^2} \quad (4)$$

其中, 蜂窝用户落于三个环境的概率为 $p(\gamma_k)$, R_0 是宏基站的覆盖范围。

3 M/G/1 排队模型的稳态分析

该文将 D2D 发送端的数据到达和发送模拟为一个单服务单队列的 M/G/1 排队模型。假设一个 D2D 发送端对应一个队列, D2D 发送端都配置了一个数据缓冲区, 容量为 L_{\max} , 到达 D2D 发射端的数据寄存在缓冲区等待传输, 当队列长度达到 L_{\max} 时, 后续进入的数据包就被丢弃。发送端的数据到达服从均值为 λ 的泊松分布, 传输时隙间隔为 ΔT , 假设在每个时隙内 SINR 不变, 即在 ΔT 时间内传输速率不变, 则每个时隙到达的均值 $\lambda \Delta T$, 队列的服务速率就是发送速率, 与其瞬时 SINR 有关。令事件 A_{t_n} 为在时隙 t_n 新到达的数据包且只能在 t_{n+1} 开始时发出, 在 ΔT 的时间区间内, 事件 A_{t_n} 发生的次数服从参数为 $\lambda \Delta T > 0$ 的泊松分布:

$$P(A_{t_n} = a) = \begin{cases} e^{-\lambda \Delta T} \cdot \frac{(\lambda \Delta T)^a}{a!}, & \text{if } a \geq 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

其中 a 为 t_n 时隙到达的数据包个数。

在时隙 t_n , 当 D2D 的缓冲区中数据包的比特数小于传输能力时, 缓冲区中的数据能够全部发送, 新到达的数据包排在队尾等待 t_{n+1} 时刻开始发送, 否则, 当 D2D 的缓冲区中数据多于一个时隙能够传输比特数时, 发送后剩余的比特数加上新到的比特数为 t_{n+1} 时隙开始时的瞬时队长。瞬时队长的表达式可写为:

$$Q_{t_{n+1}} = \min \left(L_{\max}, \max \left(Q_{t_n} - \left\lfloor \frac{\gamma_{t_n} \Delta T}{B} \right\rfloor, 0 \right) + A_{t_n} \right) \quad (6)$$

式中, Q_{t_n} 表示在时隙 t_n 开始时的队长, γ_{t_n} 表示时隙 t_n 由 AMC 确定的传输速率, 以 kbs 为单位, $\frac{\gamma_{t_n} \Delta T}{B}$ 表示在 t_n 时隙的持续时间发送的数据包数。

在 M/G/1 排队系统中, 本文采用嵌入式马尔可夫链来分析 D2D 节点缓冲区中等待传输的数据包状态, 对任意 $n \geq 0$, 用 X_n 表示队列中的数据包的数, 其状态空间为 $L \in \{0, 1, \dots, L_{\max}\}$, 缓冲区的容量为 L_{\max} , 该嵌入马尔可夫链有 $L_{\max} + 1$ 个状态, D2D 节点队长的状态转移图如图 3 所示, 其中 $p_{i,j}$ 为状态转移概率, 图 3 为 D2D 接收端队列的状态转移示意图, D2D 链路的队列长度从时隙 t_n 的 i 状态转移到 t_{n+1} 的 j 状态的转移概率可以表示为:

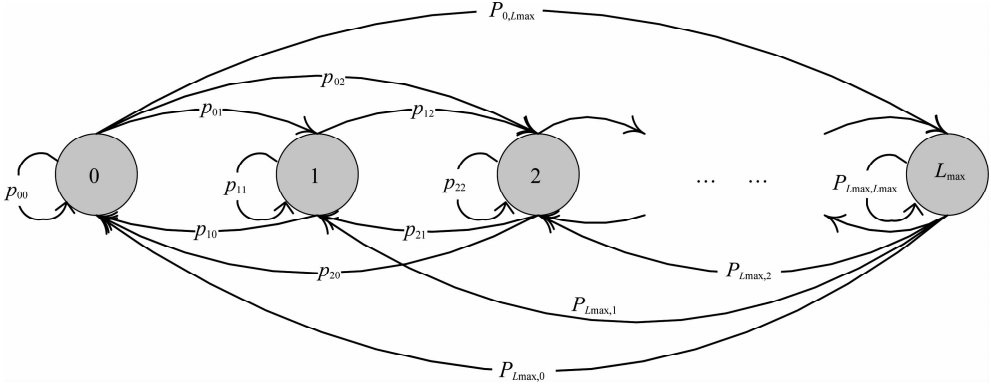


图3 D2D队列的状态转移示意图

Fig. 3 State transition diagram of D2D queue

$$P(Q_{t_{n+1}} = j | Q_{t_n} = i) = \begin{cases} P(A_{t_n} = j) & \text{if } i = 0 \\ P\left(A_{t_n} = j - i + \left\lfloor \frac{\gamma_{t_n} \Delta T}{B} \right\rfloor\right) & \text{if } 0 < i \leq \left\lfloor \frac{\gamma_{t_n} \Delta T}{B} \right\rfloor \\ 0 & \text{if } i > j + \left\lfloor \frac{\gamma_{t_n} \Delta T}{B} \right\rfloor \end{cases} \quad (7)$$

初始状态下,队列中数据包的个数可以为0,1,2,⋯,L_max,由于假设发送速率不再是随机变量,而是受 SINR 影响的由 AMC 确定的三种速率,从时隙 t_n 到时隙 t_{n+1} 的 ΔT 持续时间内,在三种发送速率下队长状态从 i 转移到 j 的状态转移概率 p_{i,j} 可以表示为:

$$p_{i,j} = \sum_{k=1}^3 p(\gamma_k) P(Q_{t_{n+1}} = j | Q_{t_n} = i) \quad (8)$$

当 0 ≤ i ≤ ⌊γ₁ΔT/B⌋ 时,包含两种情况,当 i = 0 即初始队列为空时,p_{i,j} 是在时隙 ΔT 内泊松到达 j 个数据包的概率,当初始队列中的数据包包个数少于最小传输速率可发送的个数时,p_{i,j} 是 1-p(γ₁) 的发送概率与新到达 j 个数据包的概率的乘积。

$$p_{i,j} = \begin{cases} p(\gamma_2) e^{-\lambda \Delta T} \frac{(\lambda \Delta T)^j}{j!} + p(\gamma_3) e^{-\lambda \Delta T} \frac{(\lambda \Delta T)^j}{j!}, & j < i - \left\lfloor \frac{\gamma_1 \Delta T}{B} \right\rfloor \\ p(\gamma_1) e^{-\lambda \Delta T} \frac{(\lambda \Delta T)^{\left(\left\lfloor \frac{\gamma_1 \Delta T}{B} \right\rfloor + (j-i)\right)}}{\left(\left\lfloor \frac{\gamma_1 \Delta T}{B} \right\rfloor + (j-i)\right)!} + p(\gamma_2) e^{-\lambda \Delta T} \frac{(\lambda \Delta T)^j}{j!} + p(\gamma_3) e^{-\lambda \Delta T} \frac{(\lambda \Delta T)^j}{j!}, & j \geq i - \left\lfloor \frac{\gamma_1 \Delta T}{B} \right\rfloor \end{cases} \quad (10)$$

当 ⌊γ₂ΔT/B⌋ < i ≤ ⌊γ₃ΔT/B⌋ 时,同理可得

$$p_{i,j} = \begin{cases} e^{-\lambda \Delta T} \frac{(\lambda \Delta T)^i}{i!}, & i = 0 \\ (1 - p(\gamma_1)) e^{-\lambda \Delta T} \frac{(\lambda \Delta T)^i}{i!}, & 0 < i \leq \left\lfloor \frac{\gamma_1 \Delta T}{B} \right\rfloor \end{cases} \quad (9)$$

当 ⌊γ₁ΔT/B⌋ < i ≤ ⌊γ₂ΔT/B⌋ 时,如果 j < i - ⌊γ₁ΔT/B⌋,以速率 γ₁ 不能实现状态的转移,而以速率 γ₂ 和 γ₃ 能将队列中的数据包包清空。如果 j ≥ i - ⌊γ₁ΔT/B⌋,以速率 γ₁ 发送数据,需要新到达的数据包个数为 A = j - i + ⌊γ₁ΔT/B⌋,而以速率 γ₂ 和 γ₃ 发送,需要新到达数据包 A = j。

$$p_{ij} = \begin{cases} p(\gamma_3) e^{-\lambda \Delta T} \frac{(\lambda \Delta T)^i}{j!}, & j < i - \left\lfloor \frac{\gamma_2 \Delta T}{B} \right\rfloor \\ p(\gamma_2) e^{-\lambda \Delta T} \frac{(\lambda \Delta T)^{\left(\left\lfloor \frac{\gamma_2 \Delta T}{B} \right\rfloor + (j-i)\right)}}{\left(\left\lfloor \frac{\gamma_2 \Delta T}{B} \right\rfloor + (j-i)\right)!} + p(\gamma_3) e^{-\lambda \Delta T} \frac{(\lambda \Delta T)^i}{j!}, & i - \left\lfloor \frac{\gamma_2 \Delta T}{B} \right\rfloor \leq j < i - \left\lfloor \frac{\gamma_1 \Delta T}{B} \right\rfloor \\ p(\gamma_1) e^{-\lambda \Delta T} \frac{(\lambda \Delta T)^{\left(\left\lfloor \frac{\gamma_1 \Delta T}{B} \right\rfloor + (j-i)\right)}}{\left(\left\lfloor \frac{\gamma_1 \Delta T}{B} \right\rfloor + (j-i)\right)!} + p(\gamma_2) e^{-\lambda \Delta T} \frac{(\lambda \Delta T)^{\left(\left\lfloor \frac{\gamma_2 \Delta T}{B} \right\rfloor + (j-i)\right)}}{\left(\left\lfloor \frac{\gamma_2 \Delta T}{B} \right\rfloor + (j-i)\right)!} + p(\gamma_3) e^{-\lambda \Delta T} \frac{(\lambda \Delta T)^i}{j!}, & j \geq i - \left\lfloor \frac{\gamma_1 \Delta T}{B} \right\rfloor \end{cases} \quad (11)$$

当 $i > \left\lfloor \frac{\gamma_3 \Delta T}{B} \right\rfloor$ 时:

$$p_{ij} = \begin{cases} 0, & j < i - \left\lfloor \frac{\gamma_3 \Delta T}{B} \right\rfloor \\ p(\gamma_3) e^{-\lambda \Delta T} \frac{(\lambda \Delta T)^{\left(\left\lfloor \frac{\gamma_3 \Delta T}{B} \right\rfloor + (j-i)\right)}}{\left(\left\lfloor \frac{\gamma_3 \Delta T}{B} \right\rfloor + (j-i)\right)!}, & i - \left\lfloor \frac{\gamma_3 \Delta T}{B} \right\rfloor \leq j < i - \left\lfloor \frac{\gamma_2 \Delta T}{B} \right\rfloor \\ e^{-\lambda \Delta T} \sum_{k=1}^3 p(\gamma_k) \frac{(\lambda \Delta T)^{\left(\left\lfloor \frac{\gamma_k \Delta T}{B} \right\rfloor + (j-i)\right)}}{\left(\left\lfloor \frac{\gamma_k \Delta T}{B} \right\rfloor + (j-i)\right)!}, & i - \left\lfloor \frac{\gamma_2 \Delta T}{B} \right\rfloor \leq j < i - \left\lfloor \frac{\gamma_1 \Delta T}{B} \right\rfloor \\ e^{-\lambda \Delta T} \sum_{k=1}^3 p(\gamma_k) \frac{(\lambda \Delta T)^{\left(\left\lfloor \frac{\gamma_k \Delta T}{B} \right\rfloor + (j-i)\right)}}{\left(\left\lfloor \frac{\gamma_k \Delta T}{B} \right\rfloor + (j-i)\right)!}, & j \geq i - \left\lfloor \frac{\gamma_1 \Delta T}{B} \right\rfloor \end{cases} \quad (12)$$

利用公式(9)~(12)可以得到 D2D 数据队列 转移矩阵 $p_{i,j}$ 如式(13)所示:

$$p_{i,j} = \begin{bmatrix} p_{0,0} & p_{0,1} & p_{0,2} & \cdots & \cdots & \cdots & p_{0,L_{\max}} \\ p_{1,0} & p_{1,1} & p_{1,2} & \cdots & \cdots & \cdots & p_{1,L_{\max}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ P_{\left\lfloor \frac{\gamma_3 \Delta T}{B} \right\rfloor,0} & P_{\left\lfloor \frac{\gamma_3 \Delta T}{B} \right\rfloor,1} & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & P_{\left\lfloor \frac{\gamma_3 \Delta T}{B} \right\rfloor+1,1} & P_{\left\lfloor \frac{\gamma_3 \Delta T}{B} \right\rfloor+1,2} & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & p_{L_{\max}-1,L_{\max}} \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & \ddots & \ddots & p_{L_{\max},L_{\max}} \end{bmatrix} \quad (13)$$

假设系统的稳态分布为 $\pi = (\pi(0), \pi(1), \dots, \pi(L_{\max}))$ 状态转移概率矩阵为 $\mathbf{P} = [p_{i,j}]_{i,j=0,1,2,\dots,L_{\max}}$, 根据概率之和归一化, 稳定状态概率分布可由下列矩阵方程组求得^[18]:

$$\pi \mathbf{P} = \pi, \sum_{l=0}^{L_{\max}} \pi(l) = 1 \quad (14)$$

其中 π 也可看作 \mathbf{P} 的左特征值为 1 的特征向量。

根据上述过程求出系统的稳态概率矩阵 π 后, D2D 链路的平均队长表示为各状态的队长 l 与该状态稳态概率的乘积之和:

$$\overline{\text{Queue}} = \sum_{l=0}^{L_{\max}} l \pi(l) \quad (15)$$

D2D 链路的平均吞吐量表示为:

$$\overline{\text{Throughput}} = \sum_{k=1}^3 P(\gamma_k) \left\{ \sum_{l=1}^{\lfloor \frac{\gamma_k \Delta T}{B} \rfloor} l \pi(l) + \sum_{l=\lfloor \frac{\gamma_k \Delta T}{B} \rfloor + 1}^{L_{\max}} \left\lfloor \frac{\gamma_k \Delta T}{B} \right\rfloor \pi(l) \right\} \quad (16)$$

其中 $\left\{ \sum_{l=1}^{\lfloor \frac{\gamma_k \Delta T}{B} \rfloor} l \pi(l) + \sum_{l=\lfloor \frac{\gamma_k \Delta T}{B} \rfloor + 1}^{L_{\max}} \left\lfloor \frac{\gamma_k \Delta T}{B} \right\rfloor \pi(l) \right\}$ 表示以 γ_k

发送数据包时的吞吐量,分成两种情况:当队列中数据包数 $l \leq \lfloor \frac{\gamma_k \Delta T}{B} \rfloor$ 时,即队列中的数据包数比以 γ_k 可以发送的数量还少时,单位时间内发送的个数就是队长 l 与队列中有 l 个数据包时的稳态概率的乘积;当队列中数据包数 $l > \lfloor \frac{\gamma_k \Delta T}{B} \rfloor$ 时,单位时间内发送的个数就是传输的最大能力 $\lfloor \frac{\gamma_k \Delta T}{B} \rfloor$ 与队列中有 l 个数据包时的稳态概率的乘积。当队列为空时,吞吐量为 0。

平均时延是数据包在发送前在队列中的等待时间,由 little 定理^[19]可以得到:

$$\overline{\text{Delay}} = \frac{\overline{\text{Queue}}}{\overline{\text{Throughput}}} = \frac{\sum_{l=0}^{L_{\max}} l \pi(l)}{\sum_{k=1}^3 P(\gamma_k) \left\{ \sum_{l=1}^{\lfloor \frac{\gamma_k \Delta T}{B} \rfloor} l \pi(l) + \sum_{l=\lfloor \frac{\gamma_k \Delta T}{B} \rfloor + 1}^{L_{\max}} \left\lfloor \frac{\gamma_k \Delta T}{B} \right\rfloor \pi(l) \right\}} \quad (17)$$

其中 $\overline{\text{Queue}}$ 是队列中的平均数据包个数, $\overline{\text{Throughput}}$ 是数据包进入排队系统的有效到达率。

定义 B_{t_n} 为 D2D 链路在 $Q(t_n) = l$ 时丢失的数据包数,因为 $L_{\max} + b = A_{t_n} + \max\left(0, l - \frac{\gamma_k \Delta T}{B}\right)$, 其中 b 表示在 t_n 时隙丢掉的数据包个数,平均丢包率可以写成

$$P_{\text{drop}} = \frac{\text{Average packets dropped in a times lot}}{\text{Average packets arrived in a times lot}} = \frac{\sum_{l=0}^{L_{\max}} \sum_{b=0}^{\infty} b P(B_{t_n} = b) \pi(l)}{\lambda \Delta T} \quad (18)$$

其中:

$$p(B_{t_n} = b) = p\left(A_{t_n} = L_{\max} + b - \max\left(0, l - \frac{\gamma_k \Delta T}{B}\right)\right)$$

4 仿真结果和分析

为了验证基于 M/G/1 排队模型所推导出的性能参数的准确性,该文采用 MATLAB 进行仿真分析,仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数表

Tab. 1 Simulation parameters

仿真参数	参数描述
载波频率(f)	2 GHz
时隙长度(ΔT)	1 ms
路损因子(α)	3, 3.5, 4
高斯白噪声功率(N_0)	-104 dBm
数据包长度(B)	100 bits
队列缓冲区容量(L_{\max})	10 kpackets
D2D 干扰区域最大半径(R)	50 m
D2D 发射端到接收端距离(r_d)	10 m

图 4 为不同 λ 的情况下, α 分别为 3、3.5 和 4 时的平均队长的理论值和仿真值,从图中可以看出,由公式(15)得到的理论值和仿真值曲线基本吻合,随着 λ 的增长,平均队长增加,当 λ 达到 10 时,平均队长趋于平稳,而路损因子 α 越大,曲线越陡峭,更快达到饱和。

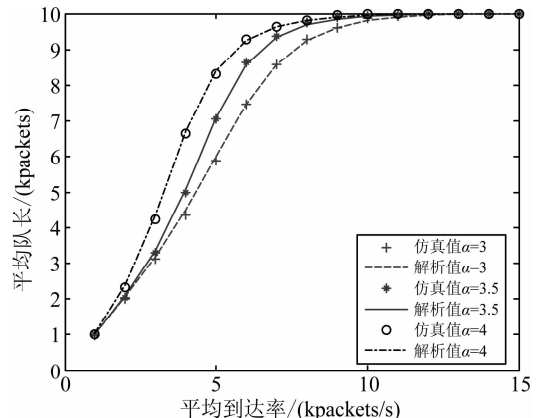


图 4 不同到达速率情况下, α 对 D2D 平均队长的影响(α 取值 3, 3.5, 4)

Fig. 4 The D2D mean queue length versus packet arrival rate under different α ($\alpha=3, 3.5, 4$)

图 5 为平均吞吐量与到达率 λ 和衰落因子 α 的关系图,从图 5 中可以看出平均吞吐量的增大是以 10 为门限,当 λ 在门限以下时,平均吞吐量增幅明显,当 λ 在门限以上时,平均吞吐量增长速度缓慢;这是由于 λ 在门限以下时,D2D 链路的平均到达率低于发送率,缓冲区的数据包基本都可以在一个时隙被传输,所以吞吐量随着 λ 的增加迅速增加;当 λ 高于门限时,链路的平均到达率高于发送率,吞吐量受传输能力的限制,增长趋势也就趋于平稳,超过缓冲区容量的数据包都会被丢弃。此外图 5 中随着路损因子 α 的增大,吞吐量越小,系统的平均性能呈现逐渐降低的趋势,D2D 接收到的 SINR 值减小,发送速率降低,导致更多数据包滞留在缓冲区,平均吞吐量减小。另外由公式(16)得到的理论值和仿真值曲线基本吻合,仿真结果证实了理论的正确性。

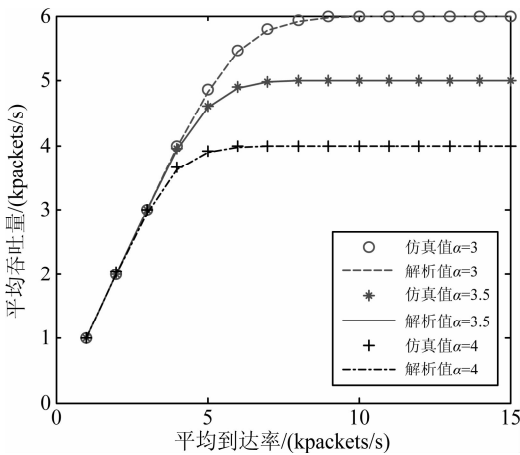


图 5 不同到达速率情况下, α 对 D2D 平均吞吐量的影响(α 取值 3,3.5,4)

Fig.5 The D2D mean throughput versus packet arrival rate under different α ($\alpha=3,3.5,4$)

图 6 为平均延时与发送速率 λ 和衰落因子 α 的关系图,同平均队长和平均吞吐量一样,随着到达速率的增加,平均延时缓慢增加,当 λ 达到平均发送速率以后,根据 little 定理,平均延时也迅速到达最大值并保持平稳,这是因为当一次到达的数据包个数较多时,队列中的数据包不能在一个时隙内发送,因为缓冲区容量有限,延时不会继续增大。路损因子越大,发送速率降低,更多数据包等待发送,平均延时更长。另外由公式(17)得到的理论值和仿真值曲线基本相符,验证了理论推导的正确性。

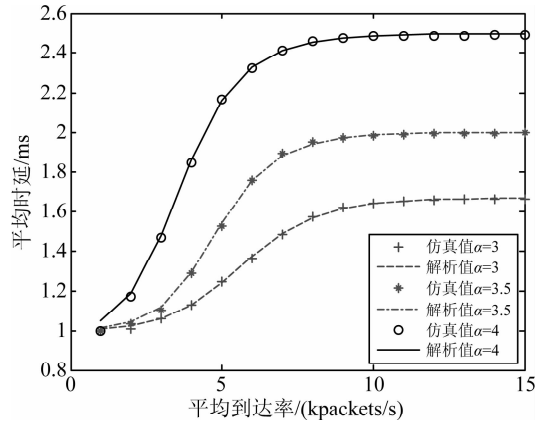


图 6 不同到达速率情况下, α 对 D2D 平均队长的影响(α 取值 3,3.5,4)

Fig.6 The D2D mean delay versus packet arrival rate under different α ($\alpha=3,3.5,4$)

图 7 为丢包率与发送速率 λ 和衰落因子 α 的关系图,从图中看出, λ 越大,缓冲区中等待发送的数据包越多,由于容量有限,当数据包个数超过传输能力后,继续到达的数据包就会使丢包率持续上升,而 α 增大,发送速率减小,等待发送时间延长,丢包率越大。另外由公式(18)得到的理论值和仿真值曲线基本吻合,证明了理论的正确性。

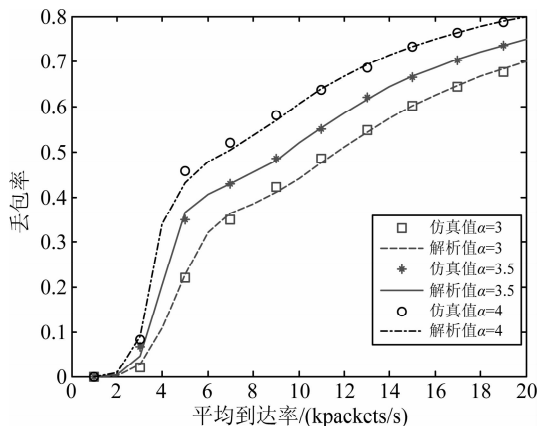


图 7 不同到达速率情况下, α 对 D2D 平均队长的影响(α 取值 3,3.5,4)

Fig.7 The D2D dropping probability versus packet arrival rate under different α ($\alpha=3,3.5,4$)

图 8 将本文提出的具有有限缓存容量的排队模型与不考虑缓存容量限制的模型下,时延性能进行比较,在衰落因子取值为 3,3.5,4 下,比较在平均到达率变化时 $L_{max}=10$ 和 $L_{max}=\infty$ 的平均时延曲线。从

图中可以看出,设置有限缓存的模型随着衰落因子的增大,信道性能变差,使用较高速率发送数据的概率降低,更多数据包等待发送,平均延时更长。在设置 $L_{\max} = 10$ 下, $\alpha = 4$ 时,平均时延稳定在 2.4 ms。而不考虑有限缓存容量的模型下, $\alpha = 4$ 时,平均时延达到了 22 ms,显然不符合无线通信的时延要求,证明了本文采用随机到达过程和有限缓存的排队模型分析 D2D 通信性能更符合实际场景,能更准确的分析实际性能参数。

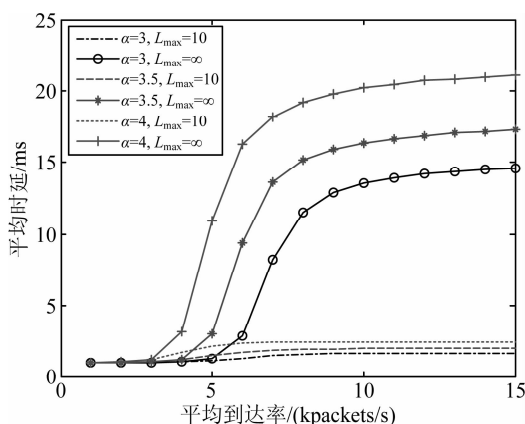


图8 平均到达率变化时 $L_{\max} = 10$ 和 $L_{\max} = \infty$ 的平均时延曲线

Fig. 8 The D2D mean delay versus packet arrival rate under $L_{\max} = 10$ and $L_{\max} = \infty$

5 结论

本文将排队论应用于蜂窝异构网络中 D2D 通信系统中,针对蜂窝用户对 D2D 用户的干扰,通过理论分析和推导得到了 D2D 用户在干扰场景下的动态业务模型,结合蜂窝用户对 D2D 用户干扰距离变化对传输速率的影响,建立了描述 D2D 用户在多速率下的排队模型,在此基础上对 M/G/1 排队模型进行分析,利用嵌入式马尔可夫链缓存区中数据包状态的转移概率矩阵,并进一步得到平均队列长度、平均吞吐量等性能指标。通过系统仿真,验证了理论分析计算的正确性,证明了建立的分析模型的合理性,与无限缓存容量的模型相比,本文采用随机到达过程和有限缓存的排队模型分析 D2D 通信性能更符合实际场景,能更准确的分析实际性能参数。

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, 2010, 47(12): 42-49.
- [2] Asadi A, Wang Q, Mancuso V. A Survey on Device-to-Device Communication in Cellular Networks [J]. Communications Surveys & Tutorials IEEE, 2014, 16(4): 1801-1819.
- [3] Mach P, Becvar Z, Vanek T. In-Band Device-to-Device Communication in OFDMA Cellular Networks: A Survey and Challenges [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(4): 1885-1922.
- [4] Liu J, Kato N, Ma J, et al. Device-to-Device Communication in LTE-Advanced Networks: A Survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 17(4): 1923-1940.
- [5] Gao C, Tang J, Sheng X, et al. Enabling Green Wireless Networking With Device-to-Device Links: A Joint Optimization Approach [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(4): 2770-2779.
- [6] Ali M, Qaisar S, Naeem M, et al. Energy Efficient Resource Allocation in D2D-Assisted Heterogeneous Networks with Relays [J]. IEEE Access, 2016, 4: 4902-4911.
- [7] Yu G, Xu L, Feng D, et al. Joint Mode Selection and Resource Allocation for Device-to-Device Communications [J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(11): 3814-3824.
- [8] Li X, Ma L, Xu Y, et al. Joint power control and proportional fair scheduling for D2D communication underlaying cellular networks [C] // IEEE, International Conference on Signal Processing. IEEE, 2017.
- [9] Duong Q, Shin Y, Shin O S. Resource allocation scheme for device-to-device communications underlaying cellular networks [C] // International Conference on Computing, Management and Telecommunications. IEEE, 2013: 66-69.
- [10] Janis P, Koivunen V, Ribeiro C, et al. Interference-Aware Resource Allocation for Device-to-Device Radio Underlaying Cellular Networks [C] // Vehicular Technology Conference, 2009. Vtc Spring 2009. IEEE. IEEE, 2009: 1-5.

- [11] Xu S, Wang H, Chen T, et al. Effective Interference Cancellation Scheme for Device-to-Device Communication Underlying Cellular Networks[C]// Vehicular Technology Conference Fall. IEEE, 2010:1-5.
- [12] Xu S, Wang H, Chen T. Effective Interference Cancellation Mechanisms for D2D Communication in Multi-Cell Cellular Networks [C] // Vehicular Technology Conference. IEEE, 2012:1-5.
- [13] Lei L, Zhang Y, Shen X, et al. Performance Analysis of Device-to-Device Communications with Dynamic Interference Using Stochastic Petri Nets[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(12):6121-6141.
- [14] Zhang Y, Jiang T, Zhang L, et al. Analysis on the transmission delay of priority-based secondary users in cognitive radio networks [C] // International Conference on Wireless Communications & Signal Processing. IEEE, 2013:1-6.
- [15] 金顺福,葛世英,霍占强. 概率反馈动态频谱分配策略及性能分析[J]. 通信学报,2015,36(7):10-17.
Jin F S, Ge S Y, Hou Z Q. Dynamic spectrum allocation strategy with probabilistic feedback mechanism and performance analysis[J]. Journal on Communications,2015, 36(7):10-17. (in Chinese)
- [16] Zheng Q, Zheng K, Sun L, et al. Dynamic Performance Analysis of Uplink Transmission in Cluster-Based Heterogeneous Vehicular Networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(12):5584-5595.
- [17] Liu Q, Zhou S, Giannakis G B. Queuing with adaptive modulation and coding over wireless links: cross-Layer analysis and design [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005, 4(3):1142-1153.

- [18] John Odentantz. Markov Chains: Gibbs Fields, Monte Carlo Simulation, and Queues[J]. Technometrics, 1999, 42(4):438-439.
- [19] Wan M, Ciardo G, Miner A S. Approximate steady-state analysis of large Markov models based on the structure of their decision diagram encoding [M]. Elsevier Science Publishers B. V. 2011.

作者简介



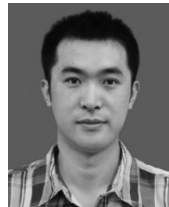
辛建芳 女,1981年生,山西大同人。南京邮电大学博士生,安徽工程大学讲师,主要研究方向为蜂窝异构网络、D2D通信。

E-mail:xinjfang@163.com



朱琦(通信作者) 女,1965年生,江苏苏州人。南京邮电大学教授,博士生导师,研究方向为移动通信与无线技术。

E-mail:zhuqi@njupt.edu.cn



梁广俊 男,1982年生,安徽芜湖人。南京邮电大学博士生,主要研究方向为无线通信网络中的资源分配与优化、中继通信。

E-mail:lianggj@126.com



章天骄 男,1990年生,江苏常州人。南京邮电大学博士生,研究方向为Ad-Hoc网、MAC层协议优化。

E-mail:490058098@qq.com