

基于最大加权队列的终端到终端通信时延感知跨层设计算法

于升升*, 葛万成, 郭爱煌

(同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804)

(* 通信作者电子邮箱 shengshengyu21@163.com)

摘要: 基于李雅普诺夫 (Lyapunov) 优化理论的最大加权队列 (MWQ) 控制策略是一种可以获得队列稳定性和最优时延性能的跨层控制方法。针对终端到终端 (D2D) 通信业务具有实时性和时延感知低时延的要求, MWQ 算法综合考虑物理层的信道状态信息 (CSI) 和 MAC 层的队列状态信息 (QSI), 以最大系统吞吐量为目标函数, 动态地控制 D2D 节点的功率。提出了基于 D2D 通信的 MWQ 算法, 将 MWQ 算法与固定功率分配算法、基于 CSI 算法、基于 QSI 算法等已有算法进行比较。仿真结果表明, MWQ 算法在数据包平均到达率高于 10 Mb/s 时, 能减少约 0.5 s 的平均时延; 在平均时延相同时, 能减少约 26 dB 的功率。该算法具有使 D2D 通信保持低时延的良好性能, 为实现低时延的 D2D 通信提供了一定的参考。

关键词: 移动通信; 终端到终端通信; 时延感知的跨层设计; 最大加权队列

中图分类号: TP393.03 **文献标志码:** A

Delay-aware algorithm of cross-layer design for device-to-device communication based on max-weighted queue

YU Shengsheng*, GE Wancheng, GUO Aihuang

(School of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Max Weighted Queue (MWQ) control policy based on the theory of Lyapunov optimization is a cross-layer control policy that achieves queue stability and optimal delay performance. For the real-time and delay-sensitive demand in Device-to-Device (D2D) communication services, the MWQ algorithm, in which the Channel State Information (CSI) of PHY layer and the Queue State Information (QSI) of MAC layer are collectively considered, makes the maximum system throughput as the objective function and controls the power of D2D nodes dynamic. In this paper, a novel MWQ algorithm in the D2D communication was proposed. Compared to the algorithm with fixed power, the CSI-based algorithm and the QSI-based algorithm, the MWQ algorithm can decrease the average delay about 0.5 s when the average packets arrival rate exceeds 10 Mb/s and require less 26 dB power while having the same average delay. So the MWQ algorithm can achieve a good performance and have a reference to obtain low latency in D2D communication.

Key words: mobile communication; Device-to-Device (D2D) communication; delay-aware cross-layer design; Max Weighted Queue (MWQ)

0 引言

未来移动互联网、物联网和应急通信等应用对通信的高速率、低时延性、环保节能都有很高的要求, 而终端到终端 (Device-to-Device, D2D) 通信是面向 5G 移动通信系统中解决这些需求的关键技术之一。D2D 即终端直通技术, 是一种移动终端在蜂窝网辅助下或是无蜂窝网覆盖时直接进行通信的技术, 该技术能够增加蜂窝通信系统频谱效率, 降低通信的时延, 提高通信的速率, 降低终端发射功率, 减小电池消耗, 延长手机续航时间。未来的一些应用如交互式游戏、视频流和虚拟现实等应用, 都具有实时性和时延感知的特点, 对低时延性提出了苛刻的要求, 所以研究 D2D 通信的低时延性算法具有很大的理论和现实意义^[1]。关于低时延的移动通信技术, 目前大部分研究都是优化物理层的参数, 如系统的吞吐量、信干噪比、最小均方误差等, 这些控制策略的结果只适应了物理层

的信道状态信息 (Channel State Information, CSI)。实际上从物理层的角度解决问题已经陷入技术瓶颈, 不能满足移动通信系统更高的低时延要求, 且对于具有高优先级的队列从物理层是不能满足其对低时延的要求。延迟感知的跨层设计是一个很好的解决方法, 该跨层设计不仅考虑物理层的 CSI, 同时也考虑媒体访问控制 (Media Access Control, MAC) 层的队列状态信息 (Queue State Information, QSI), 解决了高优先级的队列低时延问题, 提高了整个系统的低时延性能^[2]。

时延感知的跨层设计算法是国内外关于低时延移动通信的研究热点, 目前国外研究进展比较大, 而国内处于正在研究当中, 从目前的研究来看, 时延感知的跨层设计算法具有很好的性能, 然而并没有应用到 D2D 通信中。有很多方法来处理时延感知的资源分配, 大偏差是一种把时延受限转换成等速率受限的方法, 李雅普诺夫 (Lyapunov) 偏移方法是把时延受限问题转换成队列稳定性的方法, 马尔可夫决策过程 (Markov

收稿日期: 2014-12-15; 修回日期: 2015-01-15。 基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (61331009)。

作者简介: 于升升 (1989 -), 男, 陕西渭南人, 硕士研究生, 主要研究方向: D2D 通信; 葛万成 (1964 -), 男, 湖北襄阳人, 教授, 博士, 主要研究方向: 移动通信、信号与信息处理; 郭爱煌 (1964 -), 男, 江西宜春人, 教授, 博士, 主要研究方向: 宽带无线通信、移动通信。

Decision Processes, MDP)是通过建立贝尔曼方程,从随机优化的角度解决时延受限的方法^[3]。最大加权队列(Max-Weighted Queue, MWQ)算法是一种利用 Lyapunov 偏移理论建立最优吞吐量的控制算法。文献[4]证明 MWQ 算法在队列动态变化时可以最大化负向 Lyapunov 偏移并且以最优的时延性能达到队列的稳定性;然而文献[4]方法并不适用于大规模网络,且最优解没有封闭解的形式。文献[5]提出了一种时变无线 Ad Hoc 网络中 MWQ 算法,该算法针对自组织网络,从现有的研究情况看,该算法性能较好,对研究时延感知的 D2D 有一定的作用。

本文提出一种基于 D2D 通信的 CSI、QSI 的 MWQ 算法,该算法建立关于物理层(PHY)的 CSI、MAC 层的 QSI 和自变量功率的目标函数,以最大系统吞吐量为策略,在系统的稳定区域内利用粒子群智能算法求解满足优化问题的最优解,从而以最优的功率值动态地控制 D2D 节点,使 D2D 链路具有最好的时延性能。

1 Lyapunov 偏移理论

Lyapunov 偏移理论在控制学科有着重要的应用,它是证明队列系统的稳定性并设计稳定性控制算法的非常有用的数学工具,它的基本思想是直接通过 Lyapunov 函数(能量函数)及能量变化率函数判定系统的稳定性及趋向于稳定性的速度。文献[6]首次利用 Lyapunov 偏移理论设计了一个用来控制多跳数据无线网络稳定性的通用算法,然后提出了最大加权匹配(maximum weighted matching)的概念,从此 Lyapunov 偏移理论被用到了队列网络的动态控制领域,也被扩展成了 Lyapunov 优化理论。移动通信系统的最小时延性能可以视为系统的稳定状态,故可以利用 Lyapunov 偏移理论及其优化理论实现系统的最优时延性能^[7]。

1.1 Lyapunov 偏移理论

本文采用的 Lyapunov 函数为 $L(Q(t)) = Q(t)^2/2$ ^[8]。Lyapunov 函数代表了系统的能量函数,可以通过 Lyapunov 函数的变化来判定系统是否趋于稳定。可以看出,当网络中的队列为空时, $L(Q(t)) = 0$; $Q(t)$ 很大时, $L(Q(t))$ 也很大。

基于 Lyapunov 函数,定义 1 个时隙内的 Lyapunov 偏移为:

$$\Delta(Q(t)) \triangleq E[L(Q(t+1)) - L(Q(t)) | Q(t)] \quad (1)$$

定理 1 对整个时间 t 内,若存在正数 B, ξ 满足以下条件

$$\Delta(Q(t)) \leq B - \xi \sum_{n \in N, c \in C} Q_n^{(c)}(t) \quad (2)$$

则系统稳定。

推论 1 取 $\sum_{n \in N, c \in C} Q_n^{(c)}(t) \geq (B + \delta)/\xi$, 则 Lyapunov 负向偏移满足 $\Delta(Q(t)) \leq -\delta (\forall \delta > 0)$ 。

Lyapunov 负向偏移可以使队列系统最终趋于稳定性,而通过设计算法可以使 Lyapunov 负向偏移的上界值具有不同的值,从而使队列系统具有趋于稳定性的不同性能^[3]。

1.2 Lyapunov 优化理论

Lyapunov 优化理论是从 Lyapunov 偏移理论扩展而来,不仅可以使队列系统趋于稳定性,而且可以优化其他性能参数(如最小时延)并满足额外的限制条件。

设 $\mathbf{x}(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_K(t))$ 表示动态控制队列累积比特数 $Q(t)$ 的控制向量, $g: \mathbf{R}^K \rightarrow \mathbf{R}$ 为标量的凹函数,

$\bar{x}(T) \triangleq \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T E[\mathbf{x}(t)]$, $\bar{g} \triangleq \limsup_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E[g(\mathbf{x}(t))]$, g^* 代表 g 的期望最优值,假定优化的目标为使 $Q(t)$ 状态稳定且同时最大化 $g(\mathbf{x}(t))$, 得到 Lyapunov 优化理论的定理。

定理 2 对整个时间 t 和 $Q(t)$, 如果存在正数 V, ξ, B 满足以下条件:

$$\begin{aligned} \Delta(Q(t)) - VE[g(\mathbf{x}(t)) | Q(t)] &\leq \\ B - \xi \sum_{n \in N, c \in C} Q_n^{(c)}(t) - Vg^* \end{aligned} \quad (3)$$

则有:

$$\limsup_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \sum_{n \in N, c \in C} E[Q_n^{(c)}(t)] \leq [B + V(\bar{g} - g^*)]/\xi \quad (4)$$

$$\liminf_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T g(\bar{\mathbf{x}}(t)) \geq g^* - B/V \quad (5)$$

该定理在 Lyapunov 优化理论中有很重要的作用, MWQ 算法是由定理 2 发展而来的吞吐量最优控制策略,将时延受限的问题转换成队列的稳定性来解决,目标函数是最大化平均加权总系统吞吐量,约束条件是平均时延、平均功率、平均数据包的处理率,具有使 $\Delta(Q(t)) - VE[g(\mathbf{x}(t)) | Q(t)]$ 的上界值最小且使系统的吞吐量最大、时延性能低(即 $g(\mathbf{x}(t))$)的特点^[3]。

2 系统模型的建立

2.1 网络拓扑图的确定

研究 D2D 网络的低时延性,图 1 中给出了 D2D 网络拓扑图为独立(stand-alone)的 D2D 网络情况,不考虑基站参与的情况。图 1 中 DT(Device Transmit)表示 D2D 发送端,DR(Device Receive)表示 D2D 接收端,共 n 个 D2D 发送端, m 个 D2D 接收端, $h_{n,m}$ 表示第 n 个 D2D 发送端与第 m 个 D2D 接收端直接的信道状态^[9]。

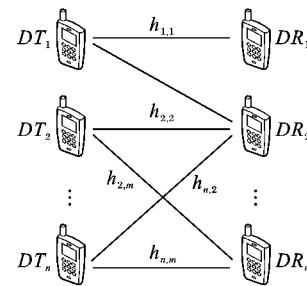


图 1 D2D 网络拓扑图

2.2 CSI 模型的建立

图 2 中为 D2D 场景的信道模型,既考虑了信道的多径效应,又考虑了信道的多普勒效应。D2D 接收端信号由 D2D 传输端信号的 N 条时间时延的多径信号组成,其中 N 由信道的功率时延分布(Power Delay Profile, PDP)定义,而簇 n 即为 N 条路径中的一条路径,每条路径由 M 条子路径组成。多普勒效应由路径的到达角(Angle of Arrival, AoA)/发送角(Angle of Departure, AoD)决定。

$$\begin{aligned} V_{n,m} = [& \|V_{rx}\| \cos(\theta_{n,m,AoA} - \theta_{V_{rx}}) + \\ & \|V_{tx}\| \cos(\theta_{n,m,AoD} - \theta_{V_{tx}})] / \lambda_0 \end{aligned} \quad (6)$$

$$h_{n,m}(t) = \sqrt{\frac{P_n \sigma_{SF}}{M}} \sum_{m=1}^M \left(\sqrt{G_{RX-UE}(\theta_{n,m,AoA})} \times \right.$$

$$\exp(jkd_u \sin(\theta_{n,m,AoA})) \times \sqrt{G_{TX-UE}(\theta_{n,m,AoD})} \times \exp(j[kd_s \sin(\theta_{n,m,AoD}) + \Phi_{n,m}]) \times \exp(jktV_{n,m}) \quad (7)$$

式中: V_{tx} 、 V_{rx} 分别为发送端、接收端的速度, $\theta_{V_{tx}}$ 、 $\theta_{V_{rx}}$ 分别为发送端、接收端速度的方向, N 为路径数, M 为每条路径的子路径数, P_n 为第 n 条路径的功率, σ_{SF} 是阴影衰落,

$G_{TX-UE}(\theta_{n,m,AoD})$ 、 $G_{RX-UE}(\theta_{n,m,AoA})$ 分别为发送端天线每个阵列的增益、接收端天线每个阵列的增益, d_s 、 d_u 分别表示发送端、接收端每个天线阵列之间的距离, $k = 2\pi/\lambda$, λ 为载波波长, λ_0 为载波中心频率, $\Phi_{n,m}$ 为第 n 条路径的第 m 条子路径的相位, $\theta_{n,m,AoA}$ 、 $\theta_{n,m,AoD}$ 分别为第 n 条路径的第 m 条子路径的到达角、发送角^[10]。

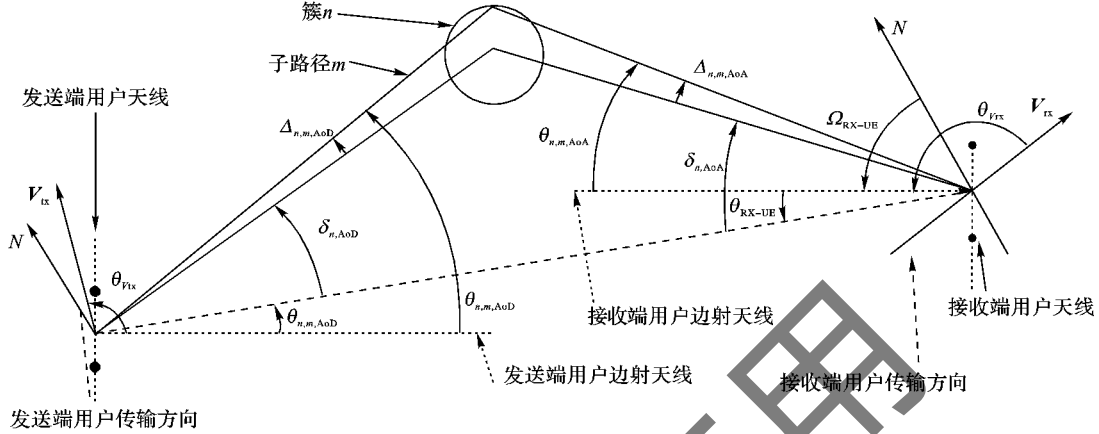


图2 D2D信道状态信息模型

2.3 QSI模型的建立

每个节点的数据包以随机的方式到达,并根据节点上不同链路的传输率形成不同累积量的队列,过程说明如图3所示。

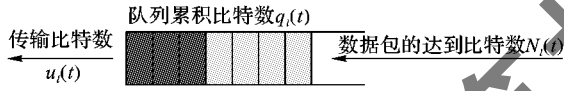


图3 队列状态信息(QSI)模型

图3中 $q_i(t)$ 、 $N_i(t)$ 、 $u_i(t)$ 分别表示时间 t 第 i 条链路的队列累积比特数、数据包的到达比特数以及数据包的传输率 (b/s), 其中数据包的到达数 $N_i(t)$ 是一个泊松强度为 λ_i 的泊松过程^[11]。

$$q_i(t) = \max\{q_i(t - \tau) - u_i(t), 0\} + N_i(t); 0 \leq t \leq T \quad (8)$$

QSI模型由式(8)决定,式(8)中 T 为持续时间,由 $n = T/\tau$ 个时隙组成,在每一个时隙 τ 内 $q_i(t)$ 和 $h_i(t)$ 保持不变。由利特尔法则 (Little's Law)^[12] 可知,第 i 条链路的平均时延为 $\bar{T}_i = \bar{q}_i/\lambda_i$ 。

3 MWQ的设计

3.1 MWQ方程的建立

MWQ方程是由式(3)~(5)推导而来的优化问题,并且该凸优化问题具有封闭形式的最优解。

$$\max_{p(t) \in P} L(p(t); h(t), q(t)) = \sum_{i=1}^L q_i(t) \hat{u}_i(p(t); h(t), q(t)) - V \sum_{i=1}^L p_i(t) \quad (9)$$

$$\text{s. t. } P = \{p: 0 \leq p \leq 2^{L_{\max}}/h_0^2\} \quad (10)$$

$$q_i(t) = \max\{q_i(t - \tau) - u_i(t), 0\} + N_i(t) \quad (11)$$

$$h_{n,m}(t) = \sqrt{\frac{P_n \sigma_{SF}}{M}} \sum_{m=1}^M \left(\sqrt{G_{RX-UE}(\theta_{n,m,AoA})} \times \exp(jkd_u \sin(\theta_{n,m,AoA})) \times \sqrt{G_{TX-UE}(\theta_{n,m,AoD})} \times \exp(j[kd_s \sin(\theta_{n,m,AoD}) + \Phi_{n,m}]) \times \exp(jktV_{n,m}) \right) \quad (12)$$

$$\exp(j[kd_s \sin(\theta_{n,m,AoD}) + \Phi_{n,m}]) \times \exp(jktV_{n,m}) \quad (12)$$

式(9)中, V 是拉格朗日乘子,可以控制 D2D 网络中平均时延和平均功率的平衡, $\hat{u}_i(p(t); h(t), q(t))$ 是最优速率分配,是先对 q_i 进行降序排列如 $q_{\pi(1)} \geq q_{\pi(2)} \geq \dots \geq q_{\pi(L)}$, 则对应的功率分配为 $p = [p_1, p_2, \dots, p_L]$, 从而计算公式为:

$$\hat{u}_{\pi(1)} = \text{lb} \left(1 + |h_{\pi(1)}|^2 p_{\pi(1)} \right) \quad (13)$$

$$\hat{u}_{\pi(k)} = \text{lb} \left(1 + \sum_{i=1}^k |h_{\pi(i)}|^2 p_{\pi(i)} \right) - \text{lb} \left(1 + \sum_{i=1}^{k-1} |h_{\pi(i)}|^2 p_{\pi(i)} \right); 2 \leq k \leq L \quad (14)$$

由式(9)~(14)可知, MWQ 优化问题是由参数 CSI $h(t) = \{h_1(t), h_2(t), \dots, h_L(t)\}$ 和 QSI $q(t) = \{q_1(t), q_2(t), \dots, q_L(t)\}$ 组成,而 MWQ 优化问题的最优解 $p^*(h(t), q(t))$ 和 $u^*(h(t), q(t))$ 也是由参数 CSI 和 QSI ($h(t), q(t)$) 决定的,从而体现了该算法的跨层设计。

3.2 MWQ方程的求解

MWQ 方程求解为单变量单目标函数的优化问题,粒子群智能算法具有优化效率高、参数设置少和收敛速度快的优点,可以求解多变量单目标的优化问题,所以采用粒子群智能算法来求解式(9)~(12)的最优解,然而它的缺点为有时候会陷入局部最优而错失全局最优,所以需要采用粒子群智能算法求解的最优解和吞吐量理论最优解进行比较,来判定求解算法的性能。式(9)的吞吐量理论最优解为

$$\frac{\partial}{\partial p_i} L(p(t); h(t), q(t)) = 0 \quad (15)$$

时的解 $p^*(h(t), q(t))$ 。

4 仿真结果

基于前面提出的系统模型,对图1中点对点的 D2D 拓扑进行仿真, CSI 模型参数如表 1^[13], QSI 模型参数取 $\tau =$

10 ms, $T = 500$ ms。

表1 CSI模型仿真参数

参数	值
路径数 N	1
每条路径的子路径数 M	2
载波中心频率	2.0×10^9 Hz
σ_{SF}	7 dB
$G_{TX-UE}(\theta_{n,m,AoD}), G_{RX-UE}(\theta_{n,m,AoA})$	67.5°
d_s, d_u	$\lambda/2$
$\theta_{1,1,AoA}, \theta_{1,1,AoD}$	67.5°
$\theta_{1,2,AoA}, \theta_{1,2,AoD}$	22.5°
$\theta_{V_{TX}}, \theta_{V_{RX}}$	67.5°
$ V_{TX} , V_{RX} $	30 m/s
P_n	22.8 dB

图4表明,当数据包到达率低于10 Mb/s时,MWQ算法和其他几种算法性能相当;当数据包到达率高于10 Mb/s时,MWQ算法在时延性能方面明显优于基于CSI算法、基于QSI算法和固定功率分配算法,能减少约0.5 s的平均时延。

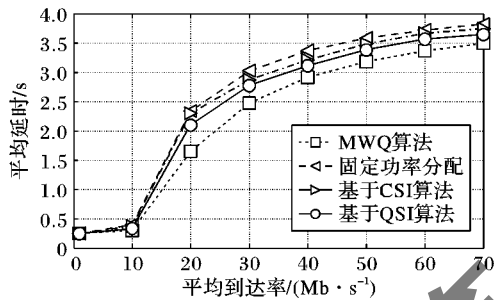


图4 平均到达率与平均时延关系

图5表明,不同拐点代表了不同的 V 值, V 值越小,平均功率越大,平均时延越小,由图可知,为了维持同样的平均时延为1.57 s,固定功率需要比MWQ多分配26 dB,而MWQ算法和理论计算的吞吐量最优功率分配相比仅仅多10 dB,故MWQ算法具有好的时延性能。

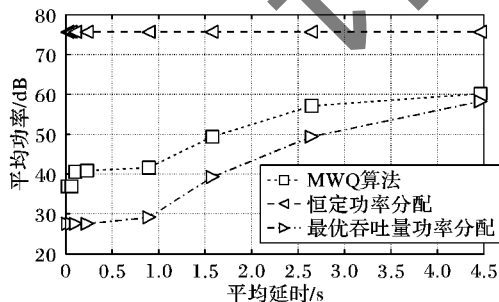


图5 平均时延与平均功率关系

5 结语

提出了一种基于MWQ的D2D通信时延感知算法,该算法采用跨层设计的方法,综合考虑物理层的CSI和MAC的QSI,利用Lyapunov偏移理论建立以最大系统吞吐量为目标的优化方程,在系统的稳定区域内动态地控制D2D节点的功率,使D2D链路的平均时延最低。仿真结果表明,与传统的算法相比,MWQ算法具有使D2D通信保持低时延的优良性能,且能降低约26 dB的功率。未来5G通信对时延性能提出

苛刻的要求,该算法还需要提高在平均时延很低的情况下收敛到理论吞吐量最优值的性能。

参考文献:

- [1] WANG J, GONG Z, FU J, *et al.* A survey on device-to-device communication[J]. Journal of Guilin University of Electronic Technology, 2014, 34(2): 114 - 119. (王俊义, 巩志帅, 符杰林, 等. D2D通信技术综述[J]. 桂林电子科技大学学报, 2014, 34(2): 114 - 119.)
- [2] WANG W, LAU V K N. Delay-aware cross-layer design for device-to-device communications in future cellular systems[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(6): 133 - 139.
- [3] CUI Y, LAU V K N. A survey on delay-aware resource control for wireless systems-large deviation theory, stochastic lyapunov drift and distributed stochastic learning[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2012, 58(3): 1677 - 1701.
- [4] GEORGIADIS L, NEELEY M J, TASSIULAS L. Resource allocation and cross-layer control in wireless networks[M]. Hanover: Now Publishers, 2006: 1 - 102.
- [5] CHEN J, LAU V K N. Delay analysis of max-weight queue algorithm for time-varying wireless Ad Hoc networks - control theoretical approach[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(1): 99 - 108.
- [6] TASSIULAS L, EPHREMIDES A. Stability properties of constrained queueing systems and scheduling for maximum throughput in multi-hop radio networks[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1992, 37(12): 1936 - 1949.
- [7] ZHANG J, JI J, SI J, *et al.* The stability analysis of dynamic system in the modern control[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2009, 7(22): 249 - 250. (张姣姣, 吉建娇, 司晶新, 等. 现代控制中动态系统的稳定性分析[J]. 科技创新导报, 2009, 7(22): 249 - 250.)
- [8] ANDREWS M, KUMARAN K, RAMANAN K, *et al.* Scheduling in a queueing system with asynchronously varying service rates[J]. Probability in the Engineering and Informational Sciences, 2004, 18: 191 - 217.
- [9] ASADI A, WANG Q, MANCUSO V. A survey on device-to-device communication in cellular networks[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2014, 16(4): 1801 - 1809.
- [10] NURMELA V, JÄMSÄ T, KYÖSTI P, *et al.* Channel modelling for device-to-device scenarios[EB/OL]. [2014 - 06 - 20]. https://www.metis2020.com/wp-content/uploads/publications/COST_IC1004_2013_Nurmela_etal_ChannelModellingForD2DScenarios.pdf.
- [11] HUANG H, LAU V K N, KOH C H, *et al.* Delay-power tradeoff of Max Queue-Weighted (MWQ) power control for wireless systems with limited renewable energy storage[C]// Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE, 2012: 4084 - 4088.
- [12] LITTLE J D C. A proof for the queuing formula: $L = \lambda w$ [J]. Operations Research, 1961, 9(3): 383 - 387.
- [13] IEEE C802.20-04: Channel models for IEEE 802.20 MBWA system simulations - Rev 08[S/OL]. [2014 - 06 - 20]. <http://www.ieee802.org/20/Contribs/C802.20-03-92.pdf>.