



5G 移动网络中终端直连方式下用户发送功率自适应优化方法

王宇鹏, 戴欣, 李凯丽

(沈阳航空航天大学电子信息工程学院, 辽宁 沈阳 110136)

摘要:作为对传统移动通信网络的有效补充,终端直连(device to device, D2D)的概念被引入未来 5G 移动通信网络中。为了解决 D2D 方式中无基站中转的通信问题及非基站控制用户无序发送所带来的复杂干扰环境及覆盖盲区情况下发送资源的自适应优化分配问题,提出了一种基于博弈理论与模糊逻辑理论的发送功率自适应分配算法,用以充分利用系统的功率与频谱资源,同时降低功率分配对其他用户产生的干扰影响。通过对计算机仿真结果的分析,提出的算法相对于传统的平均功率分配算法及分布式注水算法有一定的性能提高。

关键词:5G 移动网络;博弈论;模糊逻辑;功率分配

中图分类号:TN915

文献标识码:A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017028

Adaptive transmission power allocation algorithm in device to device manner of 5G mobile networks

WANG Yupeng, DAI Xin, LI Kaili

College of Electrical and Information Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China

Abstract: As a strong supplementary technique to the traditional mobile communication networks, the concept of device to device was introduced into the future 5G mobile communication networks. To solve the problems of base station-free transmission manner and the complex interference environment induced by the non-coordinated user data transmission, an adaptive transmission power allocation algorithm based on game theory and fuzzy logic was proposed, to utilize the system power and frequency in a more efficient way while minimizing the interference to other users. Through the simulation results, the proposed algorithm outperformed the conventional equal power allocation and distributed water-filling algorithms in the aspect of user received data rates.

Key words: 5G mobile network, game theory, fuzzy logic, power allocation

1 引言

移动通信系统在由 4G 向 5G 演进的过程中,一方面侧重于传统移动通信网络性能指标(如网络容量、频谱效

率、移动性支持等)的提高;另一方面侧重于提供更加丰富的通信模式及服务模式,以满足用户不断变化的通信需求及终端用户体验的提升需求。作为 5G 系统关键技术之一的终端设备直连(device to device, D2D)通信在提高系统

收稿日期:2016-12-21;修回日期:2017-01-09

基金项目:辽宁省教育厅科技研究项目(No.L2014067);辽宁省科技厅联合封闭基金资助项目(No.2015020097);沈阳航空航天大学校博士科研启动基金资助项目(No.16YB04)

Foundation Items: Research Foundation of Liaoning Provincial Education Department(No.L2014067), Research Foundation of Liaoning Provincial Science and Technology Department (No.2015020097), The Doctoral Startup Research Foundation of Shenyang Aerospace University (No.16YB04)



性能、提升用户体验及扩展移动通信系统应用方面具有广泛的前景,受到学术界及业界的广泛关注。

D2D 这一创新性通信方式的引入给传统移动通信网络中的资源分配带来了一系列新的问题。如参考文献[1]中指出了 D2D 方式将给系统中的传统用户带来额外的干扰,应对 D2D 用户予以区分,从而使用不同的资源分配策略。参考文献[2]与参考文献[3]中讨论了协同传输中干扰消除及服务质量、自适应等相关问题。此外,D2D 通信过程中数据不经过基站中转,并且在一些场景下终端用户可以在基站覆盖范围外直接进行通信,因此传统移动网络中常用的集中式或中心式资源分配方法,如参考文献[4]与参考文献[5]中所述基于中心控制节点的注水方法并不适用于 D2D 的通信场景,而需要终端用户采用分布式、自主式的分配方法。在参考文献[6]中描述了一种基于非合作博弈模型的分布式注水算法,通过使用一个简化的代价常数来构造用户各自的效用模型及降低用户间的信息交互需求,但这一简化也带来了一定的信道适应性问题。与此同时,模糊逻辑理论也被应用到移动网络资源相关控制策略中,如参考文献[7-9]中的算法描述了如何使用模糊逻辑来优化水平和垂直切换的性能。另外,参考文献[10-12]讲述了如何使用模糊逻辑来进行接入控制。但是,参考文献[7-12]中的方法只解决了简单的二进制判断问题,例如切换与否、接入与否等,并未应用到如资源分配等复杂的参数求解计算问题当中。

为了满足 D2D 方式下无基站中转的数据传输特点,降低功率分配算法对交互信息的依赖性,提高算法自身的自适应性,本文提出了一种基于博弈论和模糊逻辑的自适应功率分配方法,以满足 D2D 方式特殊的传输特点及复杂多变的传输信道情况。

2 D2D 模式下功率优化问题建模

D2D 方式作为对传统移动通信网络的有力补充,可以使用户在进入系统覆盖盲区或者遭遇由大型灾难、电力中断所引起的系统瘫痪情况下,依然获得高速稳定的通信服务。目前 3GPP 标准化组织已完成了针对 D2D 应用场景及工作模式等的相关学习预研工作,并完成了相应的技术报告^[13,14]。针对参考文献[14]中所列 D2D 的典型应用场景,本文主要围绕基站弱覆盖或无覆盖情况下的用户功率分配优化相关问题展开研究,考虑用户在获得系统 D2D 服务授权并获取 D2D 通信资源如频点、带宽等相关配置信息

后,如何在系统覆盖盲区利用传输功率的优化配置来获取高速稳定的通信服务。图 1 展示了本文所考虑的场景,D2D 用户在获取系统相关配置信息后,由于用户移动、建筑物遮挡、系统失败等原因进入系统覆盖盲区,为了保持通信从而由传统基站中转方式转入 D2D 方式进行通信。由于用户无法接收到基站发送的资源分配 RRC 指令,因此用户需根据自身通信状况对发送功率进行自主优化以寻找资源使用效率与用户干扰之间的最佳折中。

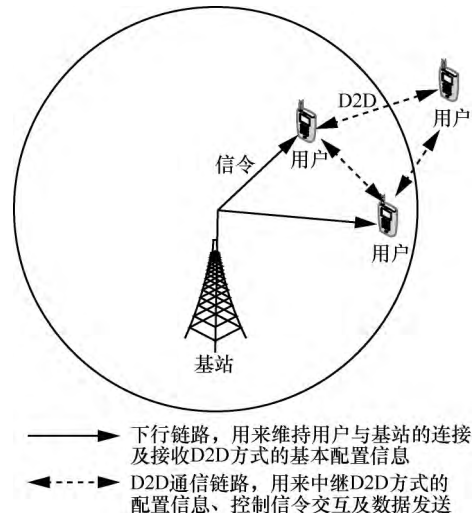


图 1 终端直连(D2D)方式通信场景

同时,为了考虑通信过程中无中心控制节点的应用限制,本文将博弈论的概念引入所设计计算方法当中。可按如下方式构筑一个非合作博弈实例:

$$G = [N, \{P^n \times A^n\}, \{u_n\}] \quad (1)$$

其中, $N = \{1, 2, \dots, N\}$ 是这个博弈的参与者,即 D2D 用户, $\{P^n \times A^n\}$ 是每一个 D2D 用户的策略空间, u_n 是用户 n 的效用函数。然后,关于发送功率分配的非合作博弈实例可以写为:

$$\max_{p^n \in P^n} u_n(p^n, P^{-n}, A^n), \quad n \in N \quad (2)$$

如果给定发送功率集合 P ,那么第 n 个用户在第 m 个资源块上的接收信干噪比可以被计算为:

$$\gamma_{m,n}(P) = \frac{G_{m,n} P_{m,n}}{\sum_{l=1, l \neq n}^N G_{m,n}^l P_{m,l} + \sigma^2} \quad (3)$$

其中, $G_{m,n}$ 与 $G_{m,n}^l$ 分别代表有效信道增益及干扰信道增益,其中包括快速衰落信道、路径损耗、阴影衰落损耗和天线增益,其可以通过 D2D 方式下同步及路由查找等辅助流程获得; σ^2 代表加性高斯白噪声功率。由式(3)可以

计算用户 n 在资源块 m 上的传输速率为:

$$R_m^n(\mathbf{P}) = \frac{B}{M} \log \left(1 + \frac{\gamma_{m,n}(\mathbf{P})}{\Gamma} \right) \quad (4)$$

其中, B 表示系统的带宽; M 表示系统的资源块个数; Γ 为误码率相关修正系数^[15]。

$$\Gamma = -\ln(5BER)/1.5 \quad (5)$$

本文可以使用资源块分配指示函数 $a_{m,n}$ 按式(6)进一步计算用户 n 的数据传输速率。

$$R_n(\mathbf{P}, \mathbf{A}^n) = \sum_{m=1}^M a_{m,n} R_m^n(\mathbf{P}) \quad (6)$$

其中, $a_{m,n}=1$ 代表资源块 m 被分配给用户 n , 否则 $a_{m,n}=0$ 。

3 基于博弈论与模糊逻辑的下行发送功率自优化算法

由式(1)~式(6)可以发现, 上述优化问题旨在基于 D2D 用户传输功率限制的基础上最大化其自身的传输效率, 同时降低其发送信号对其他用户所产生的干扰, 基于这种思想, 本文提出了式(7)所示的用户效用函数 u_n 为:

$$u_n(\mathbf{P}, \mathbf{A}^n) = \sum_{n \in U_n} \frac{u_n R_n(\mathbf{P}, \mathbf{A}^n)}{B_n} - \sum_{k=1, k \neq n}^N c_k^n \cdot \mathbf{P} \quad (7)$$

其中, u_n 代表用户的服务等级系数; B_n 表示用户 n 所分配的带宽。由式(7)可知, $\sum_{n \in U_n} \frac{u_n R_n(\mathbf{P}, \mathbf{A}^n)}{B_n}$ 代表用户 n 自身的传输效率, $\sum_{k=1, k \neq n}^N c_k^n \cdot \mathbf{P}$ 代表由于用户 n 发送信号可

能给其他用户所带来的影响, 用代价系数 c_k^n 来表示这种影响的大小, 并且该值为非负值, c_k^n 越大意味着用户 k 对用户 n 的发送功率变化越敏感。

根据博弈论及最佳响应原理可知, 式(2)中所述优化问题的解可以通过寻找该博弈的纳什均衡获得, 其可以通过拉格朗日方法和 KKT (Karush-Kuhn-Tucker) 条件进行计算。那么, 在用户 n 的第 m 个资源块上的最佳响应为:

$$P_{m,n}^* = \left[\frac{\mu_n}{(c_k^n + \lambda_n^*) \ln 2} - \frac{\Gamma \left(\sum_{l=1, l \neq n}^N G_{m,n}^l P_{m,l} + \sigma^2 \right)}{G_{m,n}} \right]^+ \quad (8)$$

$$\lambda_n^* \left(\sum_{m=1}^M P_{m,n}^* - P_{\max,n} \right) = 0, \quad \lambda_n^* \geq 0$$

在通常的基于中心节点的注水方法中, 用户向中心控制节点上报有用信号路径增益及干扰路径增益, 中心控制节点根据用户上报结果将变量 c_k^n 所代表的干扰影响考虑到其集中式优化目标函数中。然而在 D2D 模式下, 由于中心控制节点的缺失, 造成传统集中式注水算法无法适用于 D2D 特殊的应用场景。

为了避免上述算法中的不利因素, 参考文献[6]中提出使用一个简化的常数 c 对用户间干扰影响进行近似, 以避免用户间频繁的信息交互。但是这种简化的常数 c 并不能适应快速变化的干扰环境并且仍然依赖多次信道测量来支持。为了解决以上问题, 本文在此应用模糊逻辑来获得合适的代价系数 c_k^n , 使 D2D 用户仅依靠自身发送功率变化所引起的传输效率变化来自主地猜测 c_k^n 的变化趋势, 从而获得最佳的 c_k^n 设置。

在模糊逻辑理论中, 语言变量是一项非常重要的概念。例如本文中所考虑功率分配问题中的发送功率就是一个语言变量, 它可以取高、中、低 3 个不同的语言值。如此的语言变量被嵌入模糊控制器的规则库中并且允许通过控制经验来表示。一个简单的模糊控制器主要由 3 部分组成: 负责将测量值/观察值转化为模糊变量的模糊器、推理规则库及根据模糊控制结果产生控制命令的解模糊器。更加复杂的控制器可能同时包含预测能力和时间延迟补偿。模糊器用来将测量结果和控制规则相关联, 每一个测量结果需要被转换为可以被规则所使用的相应表示。规则库负责指示由经验知识启发出的控制行动。在规则被处理后, 解模糊器将采取由所有相关控制规则结合而得到的控制行动来产生一个新的控制设定。

图 2 展示了本文中所使用的模糊逻辑推理系统的基本结构, 其主要由输入、推理规则库、输出和成员函数构成。在本模糊推理系统中, 使用了单位频率发送功率变化值 (W/Hz) 和单位频率功率传输效率 (bit/(s·W·Hz)) 作为输入变量, 并且两个变量都被分为 {增加, 不变, 降低} 3 个水平。相似地, 输出变量 c_k^n 可取 {增加, 不变, 降低} 3 个不同的输出值。在本文中, 模糊规则库由表 1 中所示 9 个模糊控制规则组成。另外, 在模糊逻辑推理系统中使用了中心面积解模糊方法。

在由图 2 所示的模糊逻辑推理系统根据用户发送功率及传输效率的变化计算相应的 c_k^n 后, 可以基于式 (8) 使用二进制搜索方法找到最佳的系数 λ_n^* , 从而获得用户在当前传输环境下的最佳功率分配 $P_{m,n}^*$ 。

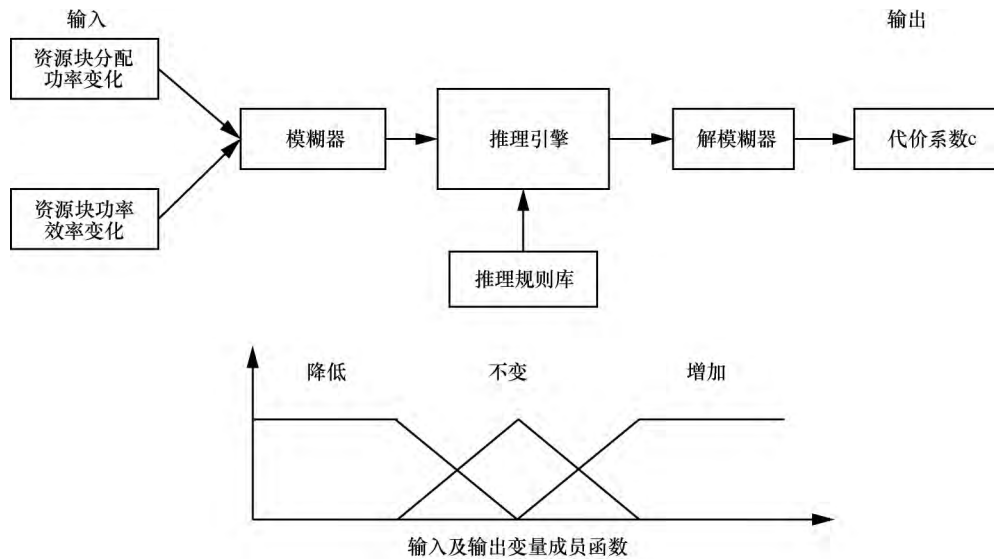


图2 本算法中所应用的模糊推理系统结构

表1 推理规则库

功率变化	功率传输效率变化	代价系数
增加	增加	降低
增加	不变	增加
增加	降低	增加
不变	增加	不变
不变	不变	增加
不变	降低	增加
降低	增加	增加
降低	不变	增加
降低	降低	降低

扰所致。本文主要考虑系统覆盖盲区情况下 D2D 用户发送功率的自主分配问题, 干扰主要来自其他 D2D 用户间的信息传输。为验证不同干扰情况下算法的性能, 因此继续沿用这一概念进行用户区分, 将用户平均接收速率在系统整体用户速率累计分布函数 5% 及以下的用户定义为强干扰用户, 从强干扰用户速率及系统整体平均速率两个方面对算法性能展开分析。

表2 详细仿真参数

参数	数值
载频/GHz	2
带宽/MHz	10
用户发送功率/dBm	23
D2D 用户数/个	30
用户位置分布	随机均匀分布
用户数据模型	全缓冲模型
信道模型	SCM 信道模型(城市高扩展情景 1)
天线增益	0 dBi, 全向天线
信道估计错误	无

4 自适应功率分配算法性能验证

4.1 仿真环境设置

比较了本文所提出的自适应功率分配算法、平均功率分配算法和分布式注水算法的性能。为了避免用户由于不分配传输功率而造成的传输数据损失, 从而影响系统的公平性, 使用了功率动态分配比例系数 α , 将总传输功率中的 $1-\alpha$ 平均分配到用户所获得每个资源块, 而将余下的部分使用本文所提出的方法进行动态功率分配, 每个资源块上分配的功率为两部分功率之和。在本仿真中, 选取 0.1、0.5、1 共 3 个不同的 α 值, 来检验不同的功率动态分配比例系数 α 对系统性能的影响。表 2 展示了详细的相关仿真参数设置^[16,17]。

在传统移动通信系统中, 一般将平均接收速率在系统整体用户速率累计分布函数 5% 及以下的用户定义为小区边缘用户, 其较低的接收速率主要由系统间较强的小区干

4.2 验证结果

图 3 和图 4 展示了平均功率分配算法、分布式注水算法和本文中所提出的自适应功率分配算法的用户平均接收速率的累积分布函数 (cumulative distribution function, CDF) 曲线。为便于比较, 选取了图 3 及图 4 中所示 CDF 曲线值为 5% 所对应的速率作为强干扰用户速率, 将不同参数取值与分配方法情况下的强干扰用户速率与系统平均速率记录在表 3 中进行比较。

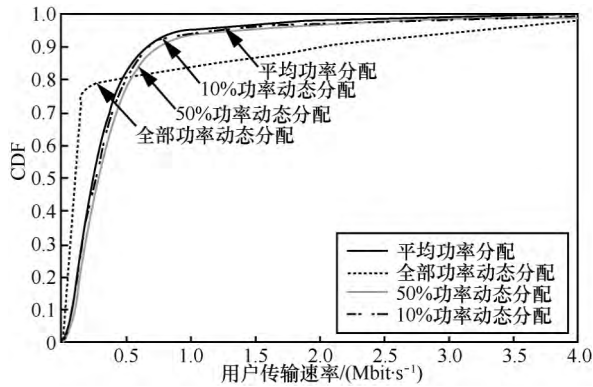


图 3 本文算法在不同功率动态分配比例系数情况下与平均功率分配算法的用户接收平均速率性能比较

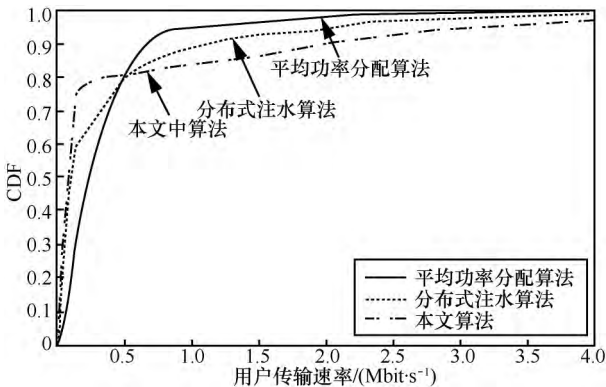


图 4 3 种功率分配算法用户接收平均速率性能比较 (功率全部重新分配情况)

从仿真结果上可以发现,参数的取值可以用来平衡 D2D 方式下受强干扰用户和其他用户之间的性能。当所有的发送功率都被用来动态分配时(例如 $\alpha=1$),大多数的发送功率将会被分配到信道条件较好及所受干扰较小的 D2D 用户,但是这种分配方法会给遭受强干扰的 D2D 用户带来很大的性能损失,从而引起系统公平性问题,因为遭受强干扰的 D2D 用户几乎分配不到发送功率。与分布式注水算法相比,本文的算法在功率全部动态分配情况下系统平均和受强干扰 D2D 用户的接收速率分别提高 36.2% 和 5.3%。在使用本文算法的情况下,当 α 减小时,小区用户平均接收速率降低但是受强干扰的 D2D 用户接收速率

增加。

5 结束语

本文提出了一种适用于未来 5G 移动通信网络 D2D 方式的用户发送功率自适应分配算法,通过信息论和模糊逻辑理论的优势来实现分布式自适应功率分配及交互信息的最小化。本文方法解决了现存集中式和分布式注水法在 D2D 方式下的适用性问题,并且将用户干扰考虑到发送功率分配的流程之中。从仿真结果中可以观察到,本文方法为系统带来了相对于传统平均功率算法及分布式注水方法超过 30% 的增益,并且不同用户间信道差异引起的公平性问题可以通过动态功率分配比例进行调节。

参考文献:

[1] 凌亚,张勇,庄园. 基于分区和干扰限制区域的多小区 D2D 资源分配策略[J]. 广东通信技术, 2016(2):37-41.
LING Y, ZHANG Y, ZHUANG Y. Cell splitting and interference limitation area based multi-cell D2D resource assignment strategy [J]. Guangdong Communication Technology, 2016(2): 37-41.
[2] 李国友,周亚建,原泉,等. 利用干扰消除的协同中继传输方案[J]. 应用科学学报, 2013, 31(2): 111-115.
LI G Y, ZHOU Y J, YUAN Q, et al. Cooperative relay transmission scheme based on interference cancellation[J]. Journal of Applied Sciences, 2013, 31(2): 111-115.
[3] 李国彦,张有光,廖芒. 一种基于 QoS 的自适应混合协同传输方法及性能分析[J]. 航空学报, 2012(9): 1688-1696.
LI G Y, ZHANG Y G, LIAO M. Method and performance of QoS-based adaptive hybrid cooperative transmission [J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2012(9): 1688-1696.
[4] LOZANO A, TULINO A M, VERDU S. Mercury/waterfilling for fixed wireless OFDM systems[C]// 2006 IEEE Symposium on Radio & Wireless, Oct 17-19, 2006, San Diego, CA, USA. New Jersey: IEEE Press, 2006: 211-214.
[5] LOZANO A, TULINO A M, VERDU S. Optimum power allocation for multi-user OFDM with arbitrary signal constellations[J]. IEEE Transactions on Communications, 2008, 56(5): 828-837.

表 3 用户接收速率比较

	平均速率/(kbit·s ⁻¹)	相对于平均功率分配增益	5%速率/(kbit·s ⁻¹)	相对于平均功率分配增益
平均功率分配	350.88	—	60.53	—
$\alpha=1$	557.84	58.9%	27.59	-54.5%
$\alpha=1$ (分布式注水)	430.45	22.7%	24.38	-59.8%
$\alpha=0.5$	435.23	24.0%	70.85	17.0%
$\alpha=0.1$	410.52	17.0%	74.37	22.9%

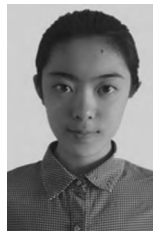


- [6] KWON H, LI B G. Distributed resource allocation through non-cooperative game approach in multi-cell OFDMA systems[C]// 2006 IEEE ICC, Jun 11–15, 2006, Istanbul, Turkey. New Jersey: IEEE Press, 2006: 4345-4350.
- [7] LOBINGER A, STEFANSKI S, JANSEN T, et al. Load balancing in downlink LTE self-optimizing networks[C]// 2010 IEEE 71st Vehicular Technology Conference, May 16–19, 2010, Taipei, China. New Jersey: IEEE Press, 2010: 1-5.
- [8] KWAN R, ARNOTT R, PATERSON R, et al. On mobility load balancing for LTE systems[C]// 2010 IEEE 71st Vehicular Technology Conference, May 16–19, 2010, Taipei, China. New Jersey: IEEE Press, 2010: 1-5.
- [9] MUNOZ P, BARCO R, BANDERA I, et al. Optimization of a fuzzy logic controller for handover-based load balancing[C]// 2011 IEEE 72nd Vehicular Technology Conference (VTC Spring), May 15–18, 2011, Budapest, Hungary. New Jersey: IEEE Press, 2011: 1-5.
- [10] FALOWO O E, CHAN H A. Fuzzy logic based call admission control for next generation wireless networks [C]// 2006 3rd International Symposium on Wireless Communication Systems, Sept 6–8, Valencia, Spain. New Jersey: IEEE Press, 2006: 574-578.
- [11] YE J, SHEN X, MARK J W. Call admission control in wideband CDMA cellular networks by using fuzzy logic [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2005, 4(2): 129-141.
- [12] IKEBATA T, MINO G, BAROLLI L, et al. Evaluation of a fuzzy-based CAC scheme for different priorities in wireless cellular networks[C]//2010 International Conference on Broadband, Wireless Computing, Communication and Applications, Nov 4–6, 2010, Fukuoka, Japan. New Jersey: IEEE Press, 2010: 616-621.
- [13] 3GPP. Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); further advancements for E-UTRA physical layer aspects: TS 36.814, V9.0.0[S]. 2010.
- [14] 3GPP. Study on LTE device to device proximity services; radio aspects: TR 36.843 V12.0.1[S]. 2014.
- [15] GOLDSMITH A J, CHUA S G. Variable-rate variable-power MQAM for fading channels [J]. IEEE Transactions on Communication, 1997, 45(10): 1218-1230.
- [16] 3GPP. Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA) and evolved universal terrestrial radio access network (EUTRAN); overall description: TS 36.300, V8.4.0[S]. 2008.
- [17] 3GPP. Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); physical layer procedures: TS 36.213, V10.1.0[S]. 2011.

[作者简介]



王宇鹏(1981–),男,博士,沈阳航空航天大学电子信息工程学院副教授,主要研究方向为移动通信网络、物联网、多天线技术和无线资源分配等。



戴欣(1992–),女,沈阳航空航天大学电子信息工程学院硕士生,主要研究方向为无线与移动通信技术等。



李凯丽(1991–),女,沈阳航空航天大学电子信息工程学院硕士生,主要研究方向为无线与移动通信技术等。