

60 GHz 毫米波无线网络中基于归一化分阶效用函数功率控制算法

张芳* 邹卫霞 杜光龙 周正
(北京邮电大学信息与通信工程学院 北京 100876)

摘要: 由于基于 SINR(Signal-to-Interference plus Noise Ratio)硬判决的分布式功率控制算法往往导致不收敛, 所以该文将非合作博弈论应用在 60 GHz 毫米波系统的功率方案中。结合 60 GHz 毫米波系统多 SINR 门限值的特点, 该文设计了一种新的基于归一化效用函数的功率控制算法。文中证明了纳什均衡点的存在性和唯一性。通过数值仿真分析验证了该算法简单易行, 并能以低发射功率获得较高传输速率。同时, 该文分析了不同平滑因子和代价因子对仿真结果的影响。

关键词: 60 GHz 毫米波通信; 非合作博弈论; 功率控制; 归一化分阶效用函数

中图分类号: TN928

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)02-0291-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01085

Power Control Based on Unitary Step Utility Function in Millimeter Wave WPANs

Zhang Fang Zou Wei-xia Du Guang-long Zhou Zheng

(Wireless Network Lab, Beijing University of Posts and Telecommunication, Beijing 100876, China)

Abstract: Distributed power control algorithms for systems with hard SINR (Signal-to-Interference plus Noise Satio) constraints may diverge when infeasibility arises. Non-cooperative game-theoretic approach is applied to model the power control of the transmitters in 60 GHz millimeter wave communication systems. Combining with the feature of 60 GHz wireless network, a new Unitary Step Utility-based Transmit Power Control (USUTPC) is proposed to improve the performance. A detailed analysis for the existence and uniqueness of Nash equilibrium for the above non-cooperative game is presented. The simulation results denote that the USUTPC is quiet simple and reasonable. Meanwhile, the influence of different smooth parameter and price factor on simulation result is analyzed.

Key words: 60 GHz millimeter wave; Non-cooperation game theory; Power control; Unitary step utility function

1 引言

近年来, 工作于 60 GHz 频段的毫米波通信技术的迅速发展推动了实现 Gbps 传输速率的无线个域网和无线局域网标准制定与发展^[1-8]。相比于 ISM (Industrial, Scientific, Medical) 和用于 Wi-Fi (Wireless Fidelity) 技术的 UNIU(Unlicensed National Information Used)免许可频段而言, 60 GHz 拥有 10 倍以上可用带宽。以此同时, CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor)工艺发展也有力促进了 60 GHz 毫米波通信系列标准的发展, 例如 ECMA TC48, IEEE 802.11 3c, Wireless HD 和 IEEE 802.11 ad。

60 GHz 无线通信面向高速率、高设备密度室内短距离场景, 主要包括 3 类典型场景: 室内办公室

场景, 室内会议场景, 室内家居场景。在上述应用中, 室内办公室场景下无线高清视频流的传输将是一种通用用户模型。该用户模型中通常包含 7-10 个独立办公隔间, 每个隔间有两个或者 3 个相邻的隔间, 每个隔间内需提供从电脑至显示器无压缩或轻度压缩视频连接, 以及电脑和外置硬盘之间无线数据连接。大多数国家的频谱宽度是 7 GHz(欧洲是 9 GHz), 在此频段范围内只有 3 个可用信道, 随着通信环境越来越密集, 相邻网络之间的干扰难以避免。因此, 有效的干扰抑制机制对整个 60 GHz 系统的性能提高起着非常重要的作用。

本文主要研究 60 GHz 室内办公室环境的干扰模型以及功率控制问题。功率控制首先可降低设备功耗, 提高资源利用率并延长电池使用寿命。文献[9]提出了一种为数据传输用户提供发射功率因子的功率控制算法, 该算法的功率更新过程比较复杂, 难于实现。本文在研究文献[10-12]基于认知无线电(Cognitive Radio, CR)的功率控制算法基础上提出了一种适合于 60 GHz 毫米波系统的归一化反正切

2012-08-24 收到, 2012-11-02 改回

国家自然科学基金(61171104), 中央高校基本科研业务费专项资金(G470415)和北京邮电大学优秀博士创新研究基金(CX201122)资助课题

*通信作者: 张芳 byrzhangfang@126.com

分阶效用函数功率控制算法, 解决了 60 GHz 毫米波网络设备高密度、高干扰的问题。

本文的创新之处在于设计了一种新的基于归一化反正切函数的效用函数, 并非传统的基于物理意义定义的效用函数, 降低了运算的复杂度, 使在工程实现上变得简单易行。结合 60 GHz 毫米波系统中不同的 SINR 门限值对应不同传输速率的特点, 将效用函数的设计成分段函数形式, 使用户在不降低传输速率的同时能够有效地降低发射功率。为了使用户获得的 SINR 值满足 SINR 门限值要求的同时加快收敛速度, 将代价函数设计成分段二次函数形式。

2 基于博弈论的功率控制算法

2.1 效用函数定义

目前, 主流的基于博弈论的功率控制算法都是基于由 Goodman 等人^[9]提出的非合作博弈功率控制 NPG(Non-cooperative Power control Game)。在无线数据通信系统中, 用户传输 L bit 数据帧的信息, 通过信道编码, 数据帧长度变为 M bit(注意: $L < M$), 假设传输速率为 R bps, 第 k 个用户通过发射功率 P_t 接入无线信道, 用户 k 在接收端的信干噪比 SINR 为 γ_k , 接收端收到的正确传输帧 FSR(Frame Success Rate)的概率为 $f(\gamma_k)$, 这里 $f(\gamma_k)$ 取决于数据传输特性, 比如编码调制方式、交织、电磁波传输特性以及收发机构。

由于每成功传输一个数据帧 M bit, 实际上仅仅传输了 L bit 的有效信息, 因此, 效用函数可以用式(1)来表示:

$$u_k = \frac{LR_k f(\gamma_k)}{Mp_k} \quad (1)$$

在大多数情况下, $f(\gamma_k)$ 是递增并且和 sigmoid 曲线相似。比如: 当调制方式是 BPSK(Binary Phase Shift Keying)时, $f(\gamma_k)$ 的表达式是 $(1 - Q(\sqrt{2\gamma_k}))$, 这里 $Q(\cdot)$ 是互补累积分布函数。文献[9]证明了 NPG 存在唯一的纳什均衡点。由于其纳什均衡点并不是最优解, 因此文献[13]在其基础上提出了代价函数机制。文献[13]证明自适应代价函数机制在改善公平性和稳健性上很有帮助。因此, 第 k 个用户的净效用函数可以表示为

$$u_k^n(p_k) = u_k(p_k) - c_k(p_k, P_{-k}) \quad (2)$$

这里, $u_k(p_k)$ 如式(1)中定义, $c_k(p_k, P_{-k})$ 表示第 k 个用户的代价函数, $u_k^n(p_k)$ 表示第 k 个用户的净收益函数。因此, 第 k 个用户的功率控制算法可以表示如下:

$$\max_{p_k \geq 0} u_k^n(p_k) \quad (3)$$

2.2 归一化分解效用函数定义

目前, 大多数非合作博弈的效用函数形式如式(1)所示, 是基于物理意义定义的。在 60 GHz 毫米波通信系统中, 用户终端可以采用多种无线方式接入无线信道, 很显然如果采用式(1)中定义的效用函数要受到调制方式的限制。本文采用以 SINR 为参变量的归一化效用函数。这里所谓的归一化效用函数就是以 1 为量纲定义的效用函数。本文提出了一种以反正切函数形式来表示的归一化函数, 表示为

$$u_k = 2/\pi \times \arctan(b\gamma_k/\tau_k) \quad (4)$$

其中, b/τ 被称为平稳参数, 它决定了该效用函数趋向 1 的平稳程度, τ 是表 1 中所示的 SINR 门限值为固定值, 所以本文将 b 称为平稳参数。 γ_k 是第 k 个用户的信干噪比, 它是一个关于功率 p_k 的函数, 可以表示为

表 1 MCS 和 SINR 门限值^[14]

MCS 编码方式	MCS1	MCS2	MCS3
调制方式	QPSK	QPSK	16QAM
编码率	1/2	2/3	2/3
SINR 门限值(dB)	5.5	13	18
数据速率(Gbps)	0.952	1.904	3.807

$$\gamma_k = \frac{p_k h_{kk}}{\sum_{j \neq k} p_j h_{jk} + \sigma^2} \quad (5)$$

其中 h_{kk} 表示第 k 个用户的路径增益, σ^2 表示背景噪声功率。

为了获得最优发射功率向量, 本文引入了代价函数机制, 则效用函数可以表示为

$$u_k^n(p_k, P_{-k}) = 2/\pi \times \arctan\left(\frac{b\gamma_k}{\tau_k}\right) - \lambda(\gamma_k - \tau_k)^2 \quad (6)$$

这里, λ 表示代价因子, 是个常数, P_{-k} 表示除了第 k 个用户外其他所有用户终端发射功率矢量。

结合 60 GHz 毫米波的 3 个 SINR 门限值, 可以将效用函数具体表示如下:

$$u_k^n(p_k, P_{-k}) = \begin{cases} 0, & \gamma_k \in [0, 10^{0.55}) \\ 2/\pi \times \arctan\left(\frac{b\gamma_k}{10^{0.55}}\right) - \lambda(\gamma_k - 10^{0.55})^2, & \gamma_k \in [10^{0.55}, 10^{1.3}) \\ 2/\pi \times \arctan\left(\frac{b\gamma_k}{10^{1.3}}\right) - \lambda(\gamma_k - 10^{1.3})^2, & \gamma_k \in [10^{1.3}, 10^{1.8}) \\ 2/\pi \times \arctan\left(\frac{b\gamma_k}{10^{1.8}}\right) - \lambda(\gamma_k - 10^{1.8})^2, & \gamma_k \in [10^{1.8}, +\infty] \end{cases} \quad (7)$$

2.3 纳什均衡

在 NPG 模型中, 应用最广泛的解就是纳什平衡。纳什平衡是由每个博弈方的一个策略组成的某个策略组合, 其中任意一个博弈方的策略都是其他博弈策略组合的最优解, 任何博弈方单独改变策略都会导致收益会受损。下面, 本小节分析本文设计的博弈模型的纳什平衡。

$$\frac{\partial^2 u_k^n}{\partial p_k \partial p_j} = \frac{\partial}{\partial p_j} \left(\frac{\partial u_k^n}{\partial p_k} \right), \quad k \neq j \quad (8)$$

$$\frac{\partial u_k^n}{\partial p_k} = \left[\frac{2/\pi \times (b/\tau_k)}{(b\gamma_k/\tau_k)^2 + 1} - 2\lambda(\gamma_k - \tau_k) \right] \times \frac{\partial \gamma_k}{\partial p_k} \quad (9)$$

因为

$$\frac{\partial \gamma_k}{\partial p_k} = \frac{h_{kk}}{\sum_{j \neq k} p_j h_{jk} + \sigma^2}, \quad \frac{\partial^2 \gamma_k}{\partial p_k \partial p_j} = \frac{1}{p_k} \times \frac{\partial \gamma_k}{\partial p_j} \quad (10)$$

将式(9)、式(10)代入式(8)中, 可以推得

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u_k^n}{\partial p_k \partial p_j} &= \frac{\partial}{\partial p_j} \left[\left(\frac{2/\pi \times (b/\tau_k)}{(b\gamma_k/\tau_k)^2 + 1} - 2\lambda(\gamma_k - \tau_k) \right) \times \frac{\partial \gamma_k}{\partial p_k} \right] \\ &= \left(\frac{2/\pi \times b\tau_k (\tau_k^2 - b^2 \gamma_k^2)}{(b\gamma_k)^2 + \tau_k^2} - 4\lambda\gamma_k + 2\lambda\tau_k \right) \\ &\quad \times \frac{1}{p_k} \times \frac{\partial \gamma_k}{\partial p_j} \end{aligned} \quad (11)$$

又因为

$$\gamma_k \geq \tau_k, \quad \frac{\partial \gamma_k}{\partial p_j} = - \frac{p_k h_{kk} h_{jk}}{\left(\sum_{j \neq k} p_j h_{jk} + \sigma^2 \right)^2} < 0 \quad (12)$$

所以, 可得

$$\frac{\partial^2 u_k^n}{\partial p_k \partial p_j} \geq 0, \quad k \neq j, \quad \text{如果 } b \geq 1 \quad (13)$$

由此可知, 只要满足 $b \geq 1$, 式(7)所表示的效用函数满足超模博弈的条件, 因此该效用函数存在纳什均衡, 并且其纳什均衡点是唯一的。

2.4 功率更新

本文所定义的效用函数功率更新迭代如下, 来计算基于反正切函数的归一化分阶效用函数的纳什平衡:

(1) 当 $k=0$ 时, 设定初始发射功率矢量 $\mathbf{p}(k) = 10$ dBm, 并设定计算精度值 ε ;

(2) 令 $k=k+1$, 通过等式

$$\gamma_i(k) = \frac{p_i(k) h_{ii}}{\sum_{j \neq i} p_j(k-1) h_{ij} + \sigma^2} \quad (14)$$

代入效用函数式(7)中, 并且令其微分等于零, 即

$$\frac{\partial u_i^c}{\partial p_i(k)} = 0 \quad (15)$$

(3) 对所有激活链路 i 进行判定, 如果它们都能满足设定的精度限制条件:

$$|p_i(k) - p_i(k-1)| < \varepsilon \quad (16)$$

则算法结束, 所求的功率矢量 $\mathbf{p}(k)$ 即为最佳功率组合; 否则返回步骤(2)继续执行。

由前面的推导证明过程可知, 该算法最后必将收敛于纳什均衡点, 且均衡点唯一。

3 平稳参数 b 和代价因子 λ 的选择

本小节采用文献[14]定义的仿真参数和仿真模型, 这里天线阵元数 $M = 4 \times 4$, 仿真参数如表 2。本文中所有的实验均采用 $K=2M$, 采用 IEEE 802.15.3c 中的码本的 2 维天线阵模型。接下来对归一化效用函数的平稳参数 b 和代价因子 λ 分别取不同值做了仿真。本文所有仿真图纵坐标互补累计分布函数 (Complementary Cumulative Distribution Function, CCDF), 表示超过横坐标某一数值的概率。

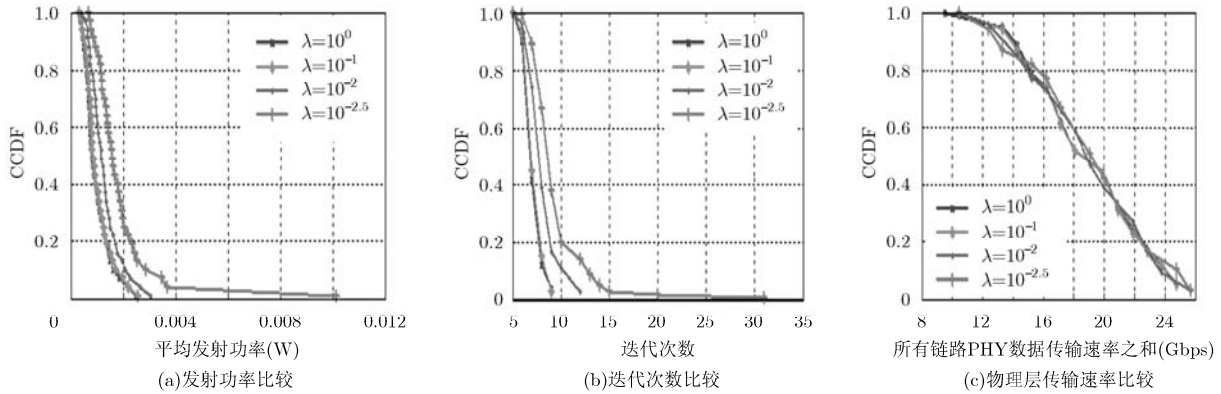
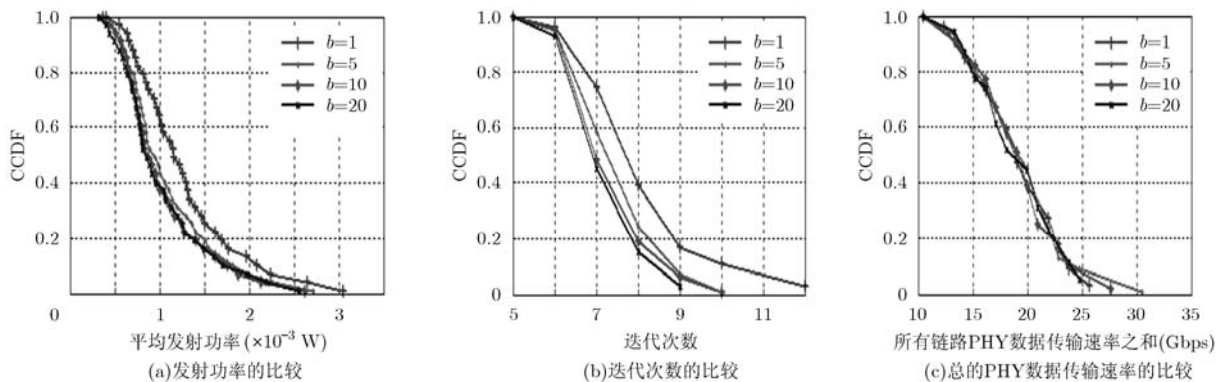
表 2 基本仿真参数

仿真场景	9-隔间(见文献[14])
载波频率 f_0	60 GHz
带宽 BW	1.7 GHz
天线阵最大发射功率 P_t	10 dBm
噪声因子 NF	7 dB
补偿损失 L_{IM}	5 dB
反射损耗因子 L_{RL}	2 dB
穿透损耗因子 X_k	2 dB
天线阵元数 N_a	$2 \times 2 / 4 \times 4 / 8 \times 8$
频率复用 FR	1

首先令平稳参数 b 为定值 1 (如前面推导知 $b \geq 1$) 然后对代价因子 λ 取 $10^0, 10^{-1}, 10^{-2}, 10^{-2.5}$ 加以仿真, 如图 1(a)~图 1(c) 所示。

从图 1(a), 图 1(b) 可以看出, 当固定平稳参数 b 时, 代价因子 λ 越大, 发射功率和迭代次数越小, 然而只要满足 $b \geq 1$ 就对物理层传输速率没有太大影响。同时, 我们发现代价因子取值为 10^{-1} 还是 10^{-2} 对各个性能指标影响差别不大, 因此没有必要设置一个较大的代价因子。但是, 我们需要注意到, 如果代价因子太小, 定义的效用函数可能不收敛。因此综合分析图 1(a)~图 1(c), 代价因子 λ 等于 10^{-2} 的时候最佳。

另外, 本小节还分析了在代价因子 λ 等于 10^{-2} 的前提下, 取不同的平稳参数 b 时, 归一化分段反正切函数不同的性能表现。仿真时, 分别令 $b=1, 5, 10, 20$ 。仿真图形如图 2(a)~图 2(c) 所示。

图1 $b=1$ 时不同 λ 取值性能比较图2 $\lambda = 10^{-2}$ 时不同 b 取值性能比较

由图 2(a)和图 2(b)可以看出, 如果固定代价因子 λ , 平稳参数 b 取值越大, 发射功率和迭代次数越小。然而代价因子 $\lambda = 10^{-2}$ 时, b 取值为 10 或者为 20 时仿真性能差异不大。又根据前面关于纳什均衡的推导, 满足 $b \geq 1$ 是效用函数存在唯一纳什均衡点的前提条件, 因此, 平稳参数 b 为 10 时最佳。

4 性能仿真与分析

一般来讲, 功率控制主要有以下几个性能参数: PHY 数据传输速率、平均发射功率和迭代次数, 这些性能影响着整个网络的吞吐量。以下仿真结果都是取最佳平稳参数 $b=10$ 和 $\lambda = 10^{-2}$ 时所获得。为了更加直观的观察新算法的性能, 将新算法和文献 [10](图 3 中的参考算法)进行性能比较。注意, 为了更好地分析新算法的性能, 仿真过程中也将文献 [10] 进行分段处理。

由图 3(a)可以看出, 如果不对发射终端进行功率控制, 用户的 SINR 呈泊松分布, 而采用归一化分段效用函数的功率控制算法后, 用户的 SINR 主要分布在 3 个门限值的右侧。同时也可以看出, 基于反正切函数的归一化算法的 SINR 分布比参考算法的 SINR 分布更加靠近表 1 中的 3 个 SINR 门限

值。接下来, 分析不同天线阵元数下两种算法的 PHY 数据传输速率、发射功率和迭代次数对比, 如图 3(b)~图 3(d)所示。从图 3(b)可以看出, 加入功率控制算法后, 系统总的 PHY 数据传输速率都有提升, 且天线阵元数越多, 性能提升越明显, 新算法提升更为明显。在没有进行功率控制时, 发射功率保持 0.01 W 不变, 从图 3(c)可以看出, 加入功率控制算法后, 发射功率保持在 10^{-3} W 数量级, 大大降低了能耗, 并且随着天线阵元数增加, 波束宽度变窄, 终端的平均发射功率更低, 大约降低 9/10, 对比与参考算法, 发射功率也有一定程度的降低。从图 3(d)可以看出, 新算法的平均迭代次数为 6, 最高迭代次数为 10; 参考算法的平均迭代次数为 8, 最高迭代次数大于 13, 可见新算法收敛性更好。并且随着天线阵元数增多, 算法收敛越快, 迭代次数越少。从图 3(b)~图 3(d)可以看出, 加入本文提出的功率控制算法后, 系统整体性能有着明显提升。

5 结束语

为了降低运算复杂度, 本文提出了计算较为简单的归一化分段效用函数, 并且也引进了分段代价函数机制。本文论证带有代价函数的归一化分段效

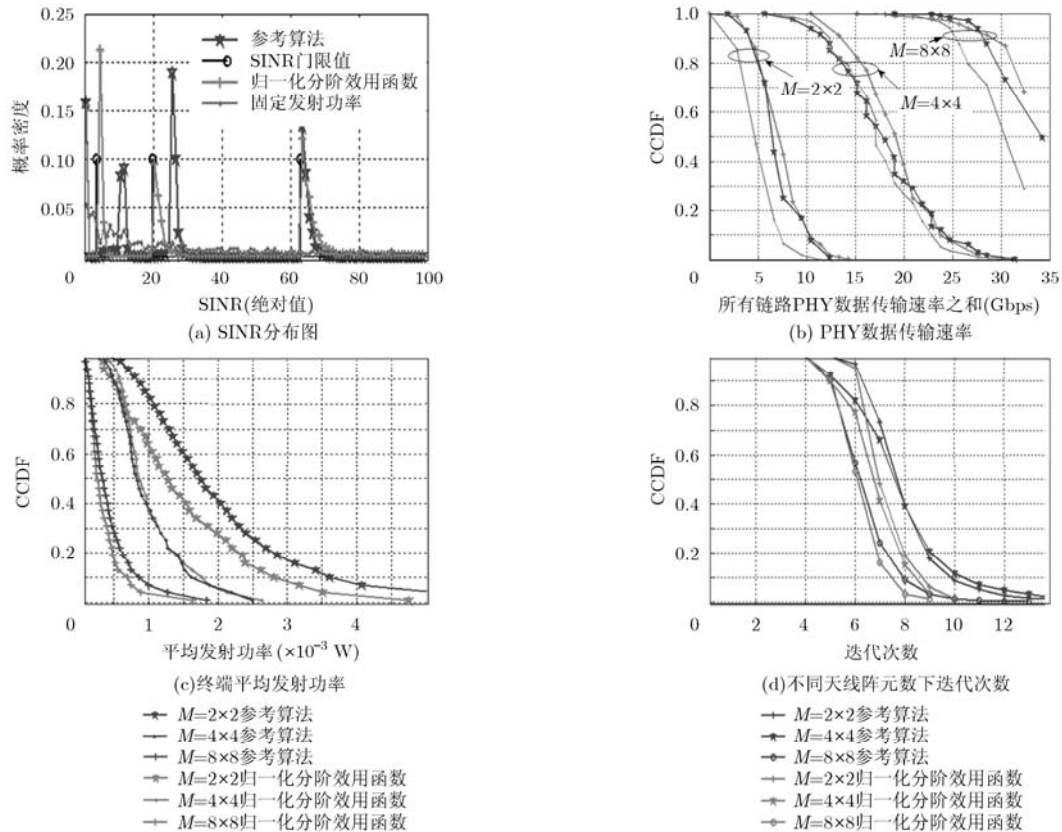


图3 系统性能曲线对比图

用函数的博弈过程存在唯一的纳什均衡点。通过仿真表明, 本文提出的博弈功率控制算法简单可行, 并通过仿真和分析找到了该效用函数中合适的代价因子和平稳参数。由于在定义归一化分段效用函数时平稳参数的取值范围太大, 理论上保证的用户信干噪比还不够, 而且没有考虑到用户单位比特传输所消耗的能量, 所以今后工作主要是继续优化效用函数, 带来更高的质量保证。同时, 在尽可能降低用户发射功率的前提下, 兼顾各种因素的平衡, 实现系统资源的最优化分配。

参 考 文 献

- [1] Park M, Cordeiro C, Perahia E, *et al.* Millimeter-wave multi-gigabit WLAN: challenges and feasibility[C]. Proceedings of IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Cannes, France, Sept. 2008: 1-5.
- [2] Xu H and Liu K. Research on wireless communication networks in the 60 GHz frequency band[C]. Proceedings of 2010 International Conference on Internet Technology and Applications, Wuhan, Aug. 2010: 1-4 (in Chinese).
- [3] Kim Won-jung, Song Tae-won, and Pack Sang-heon. Rate adaptation for directional multicast in IEEE 802.11ad networks[C]. Proceedings of Consumer Electronics(ICCE), Berlin, Sept. 2012: 364-365.
- [4] Cui Zhi-fang, Zou Wei-xia, Bin Li, *et al.* An efficient resource management scheme for 60 GHz wireless networks[C]. Proceedings of 2011 International Conference on Computational Problem-Solving (ICCP), Carnegie Mellon University, Oct. 2011: 692-697.
- [5] ECMA TC48. High rate short range wireless communications [OL]. <http://www.ecma-international.org/memento/TC48-M.htm>.
- [6] IEEE 802.15.3c-2009. IEEE standard for information technology — Telecommunications and information exchange between system — Local and metropolitan area networks specific requirements, Part 15.3: wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for high rate wireless personal area networks (WPANs)[S]. 2009.
- [7] Wireless HD 1.0. <http://www.wirelesshd.org/>[OL].
- [8] IEEE 802.11. Very high throughput in 60 GHz TaskGroup ad(TGad)[OL]. http://www.ieee802.org/11/Reports/tgad_update.htm.
- [9] Goodman D and Mandayam N. Power control for wireless data[J]. *IEEE Personal Communications*, 2000, 7(4): 48-54.

- [10] Lin Yu-qing, Wang Xia, and Zhu Qi. Power control based on unitary utility function in cognitive radio system[J]. *Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science)*, 2011, 31(1): 39-44.
- [11] Lee Hui-kyu, Bok Jun-yeong, Jo Byung-gak, *et al.*. Indoor WPAN communication system using 2-dimensional array antenna in 60 GHz frequency band[C]. Proceedings of Computing, Communications and Applications Conference (ComComAp)[C]. TBD, Hong Kong, China, 2012: 158-161.
- [12] Li Hong-yan, Fu hong-liang, Guan Ai-hong, *et al.*. Game theoretic power control algorithm in cognitive radio networks[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science)*, 2010, 22(6): 756-760.
- [13] Tian Shen. Power control game based on new pricing function for cognitibe radio[C]. Proceedings of Computer Science and Service System (CSSS), Nanjing, China, June 2011: 2408-2411.
- [14] Park Min-young and Gopalakrishnan P. Analysis on spatial reuse and interference in 60 GHz wireless networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2009, 27(8): 1443-1452.
- 张 芳: 女, 1988 年生, 硕士, 研究方向为毫米波无线通信及功率控制算法研究.
- 邹卫霞: 女, 1972 年生, 副教授, 研究方向为短距离无线通信及其电磁兼容、物联网.
- 杜光龙: 男, 1988 年生, 博士, 研究方向为短距离无线通信.
- 周 正: 男, 1945 年生, 教授, 研究方向为无线通信新技术.