

混合蜂窝和端到端网络中的分布式功率控制算法

彭涛 卢前溪 王文博

(北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室 北京 100876)

摘要: 该文针对蜂窝模式和端到端模式混合网络,提出了一种端到端分布式功率控制方法。该算法以最大化系统频谱效率为目标,以凸优化工具为基础,提出了分布式功率控制的具体算法。在算法设计中考虑了混合网络中不同通信模式之间的有害干扰,提出了有效的干扰避免方法,从而提高了系统吞吐量。仿真结果对算法的收敛性和性能进行了验证。

关键词: 无线通信;混合系统;功率控制;博弈论

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)11-2560-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.01632

Distributed Power Control Algorithm in Hybrid Cellular and Peer-to-Peer Systems

Peng Tao Lu Qian-xi Wang Wen-bo

(Wireless Signal Processing and Network Lab, Key Laboratory of Universal Wireless Communication, Beijing University of Posts & Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: A distributed power control algorithm in hybrid cellular and Peer-to-Peer (P2P) network is proposed. In the objective of overall system spectrum efficiency maximization, a distributed power control scheme of P2P transmission in the hybrid system model is devised based on the tools of convex optimization. The algorithm considers the harmful interference between cellular sub-system and P2P sub-system, and provides effective interference avoidance mechanism, thus improves the total system throughput. Simulation results prove the convergence and performance of the proposed scheme.

Key words: Wireless communication; Hybrid system; Power control; Game theory

1 引言

在传统的蜂窝网络中,数据通常通过中心控制节点,例如基站(Base Station, BS)进行相互通信,即使源节点和目标节点彼此距离很近。这种集中式通信方式的主要优点是容易进行资源控制和干扰控制,但明显的缺点是资源利用效率低下。最近的一些研究工作针对该问题提出了一种解决方案,即采用一种混合的蜂窝模式和端到端(Peer to Peer, P2P)模式的网络结构:(1)蜂窝模式:用户设备(User Equipment, UE)通过BS与另一个UE进行沟通;(2)P2P模式:源UE和目的UE之间直接通信。网络中的UE可以通过蜂窝模式或者P2P模式进行相互通信。研究表明,通过在传统的蜂窝网络中加入P2P通信模式,可以提高数据速率,降低发射功率,提高网络容量,更好地平衡负载,并扩大覆盖范

围^[1-3]。

对于功率分配,传统的蜂窝网络^[3,4]和分布式网络^[5]均有涉及,下一代移动通信的自组织网络技术更是将发送功率优化作为其重要的技术目标之一^[6],而混合网络结构中的无线资源管理算法研究,需要在避免两种通信模式之间有害干扰的前提下最大化系统总性能。相比于已有的研究,本文的主要贡献可以总结为如下几方面:(1)在新型混合网络模型中考虑无线资源管理算法问题,综合考虑了不同通信模式间的干扰;(2)以最大化混合网络的总频谱效率(蜂窝和P2P链路之和)为目标,解决优化问题;(3)应用Potential博弈模型,凸优化工具分析问题,提出分布式算法设计方案;(4)仿真结果说明,所提方案可以实现混合网络中两个模式间的干扰避免,实现完善的资源共享。

2 系统模型

OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)的接入模式作为一种高速数据接入的模式,被许多系统所采用。因此,假设该混合网

2009-12-22 收到, 2010-04-30 改回

诺基亚大学合作项目和国家重点基础研究发展计划项目(2009CB320400)资助课题

通信作者: 彭涛 pengtao@bupt.edu.cn

络中的 UE, 包括蜂窝模式和 P2P 模式, 均采用相同参数的 OFDMA 接入方式, 以便于资源的充分利用。另外, 本文只考虑在蜂窝系统上行(UL-Uplink)方向上的混合资源共享。

对于蜂窝和 P2P 两种模式对资源的共享方式, 本文考虑存在资源重用, 即一个时频资源可能同时被蜂窝 UE 和 P2PUE 使用, 以发掘系统的最大潜能。这也就要求提出的 P2P 功控方式可以有效控制系统间干扰。同时, 如上所述, 这种功控方式必须是分布式的, 以有效降低集中式算法可能产生的信令量和计算复杂度。

3 问题描述

考虑一个如上所述的混合网络的上行链路, 如图 1 所示。假设系统中有 K 个单跳 P2P 通信对和 N 个正交的可用信道, P2P 通信对发送端与接收端在图中分别表示为 TxUE 和 RxUE。对于每个正交信道, 本文只考虑一个蜂窝模式用户, 在图中表示为 CeUE。蜂窝模式用户和 P2P 用户 k 在信道 n 上的信道增益分别表示为 g_C^n 和 g_D^{nk} , 其发送功率也相应地表示为 P_C^n 和 P_D^{nk} 。另外, 蜂窝网用户到 P2P 用户之间的干扰链路增益可以表示为 h_{CD}^{nk} , h_{DC}^{nk} 则表示相反方向上的链路增益。本文考虑对 P2P 用户相互间的干扰采用基于图论的建模方式, 即不考虑同时接入成功的 P2P 用户之间的干扰。

定义 P2P 用户的功率预算约束为 P_D^{\max} , 以及蜂窝模式用户和 P2P 用户在信道 n 上可以达到的数据速率为 c_C^n 和 c_D^{nk} ,

$$\left. \begin{aligned} c_C^n &= \ln \left[1 + \frac{P_C^n g_C^n}{\Gamma \left(\sigma^2 + \sum_{k=1}^K P_D^{nk} h_{DC}^{nk} \right)} \right] \\ c_D^{nk} &= \ln \left[1 + \frac{P_D^{nk} g_D^{nk}}{\Gamma \left(\sigma^2 + P_C^n h_{CD}^{nk} \right)} \right] \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中 Γ 为信噪比间隙, 是接收误码率(BER)的函数,

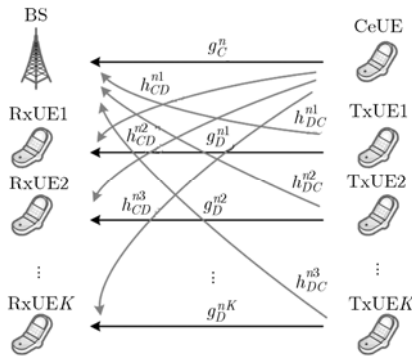


图 1 混合网络上行链路系统模型

例如在瑞利衰落信道中, $\Gamma = (0.2/\text{BER}-1)/1.5$ 。利用式(1), 可以将优化问题表示为如下形式:

$$\left. \begin{aligned} \max_{P_D} O(P_D) &= \sum_{n=1}^N \left(c_C^n + \sum_{k=1}^K c_D^{nk} \right) \\ \text{s.t.} \quad \sum_{n=1}^N P_D^{nk} &\leq P_D^{\max}, \forall k \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中, 优化目标表示为 $O(P_D)$, 并且 $P_D^k = (P_D^{nk})_{n=1}^N$ 和 $P_D = (P_D^k)_{k=1}^K$ 。注意优化目标中考虑了蜂窝用户的吞吐量, 而不是单方面优化 P2P 用户吞吐量, 这体现了前面所述的以最大化混合网络的总吞吐量为目标。这也反映在后面的算法设计中, 即要求蜂窝网 BS 对 P2P 用户有一定的信息反馈。

进一步分析式(2), 可以发现由于各个 P2P 用户的 P_D^n 变量之间没有耦合, 该问题描述符合博弈论中的 Potential Game 模型^[7], 即

$$\begin{aligned} O(\dot{P}_D^k, P_D^{-k}) - O(\ddot{P}_D^k, P_D^{-k}) \\ = O_k(\dot{P}_D^k, P_D^{-k}) - O_k(\ddot{P}_D^k, P_D^{-k}) \end{aligned} \quad (3)$$

其中 \dot{P}_D^k 和 \ddot{P}_D^k 为 P_D^k 的不同取值, $P_D^{-k} = (P_D^j)_{j \neq k}$, $O_k(\bullet) = \sum_{n=1}^N c_C^n + c_D^{nk}$ 。即原集中式问题式(2)可以由各个用户分布式的解决如下优化问题等效实现:

$$\left. \begin{aligned} \max_{P_D^k} O_k(P_D^k) &= \sum_{n=1}^N (c_C^n + c_D^{nk}) \\ \text{s.t.} \quad \sum_{n=1}^N P_D^{nk} &\leq P_D^{\max} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

因此, 由于 Potential Game 模型的分布性和收敛性, 本文将应用到本文中解决相关问题^[7-9]。

4 问题分析

首先, 需要分析上述问题的凸性(目标函数为优化变量的凸函数)。显然, 由于干扰项 $\sum_{k=1}^K P_D^{nk} h_{DC}^{nk}$ 的存在, 造成 c_C^n 和 c_D^{nk} 相互耦合, 上述优化问题的凸性并不能得到保证。下面, 将推导保证上述优化问题凸性的充分条件。求取 $O_k(P_D^k)$ 对于 P_D^{nk} 的 2 阶导数

$$\begin{aligned} \nabla_{P_D^{nk}}^2 O_k(\bullet) &= - \frac{1}{\left(P_D^{nk} + \frac{1}{\Gamma H_{DC}^{nk}} + \frac{P_C^n g_C^n}{h_{DC}^{nk}} \right)^2} \\ &+ \frac{1}{\left(P_D^{nk} + \frac{1}{\Gamma H_{DC}^{nk}} \right)^2} - \frac{1}{\left(P_D^{nk} + \frac{1}{\Gamma G_D^{nk}} \right)^2} \end{aligned} \quad (5)$$

其中 H_{DC}^{nk} 和 G_D^{nk} 定义如下,

$$\left. \begin{aligned} G_D^{nk} &= \frac{g_D^{nk}}{\sigma^2 + P_C^n h_{CD}^{nk}} \\ H_{DC}^{nk} &= \frac{h_{DC}^{nk}}{\sigma^2 + \sum_{j \neq k} P_D^{nj} h_{DC}^{nj}} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

显然,这表征的是P2P通信链路和到BS的干扰链路的链路状况。由式(4)可知,由于第1项固定为负值,若 $G_D^{nk} \geq H_{DC}^{nk}$,则 $O_k(\mathbf{P}_D^k)$ 对于 P_D^{nk} 的2阶导数固定为负值,即 $O_k(\mathbf{P}_D^k)$ 为 P_D^{nk} 的凹函数。并且由于 $O_k(\mathbf{P}_D^k)$ 对于所有信道 n 上的 P_D^{nk} 采用的是加法映射,由文献[10]可知,若对于 $\forall n$ 均满足 $G_D^{nk} \geq H_{DC}^{nk}$,则 $O_k(\mathbf{P}_D^k)$ 为 \mathbf{P}_D^k 的凹函数。这意味着问题式(4)可以用凸优化的方法求得最优解。事实上,经仿真验证,该条件以很大概率得到满足,具体可以参考第5节的结果。因此,本文应用凸优化的相关工具对原问题进行分析求解。

假设对于 $\forall n$ 均满足 $G_D^{nk} \geq H_{DC}^{nk}$,采用拉格朗日对偶方法对问题式(4)进行分析。首先,建立其拉格朗日函数如下:

$$L_k = \sum_{n=1}^N (c_C^n + c_D^{nk}) - \alpha_k \left(\sum_{n=1}^N P_D^{nk} - P_D^{\max} \right) \quad (7)$$

其中 α_k 均为拉各朗日因子,由最优化理论^[10]可知,对于凸优化来说,KKT条件是全局最优解的充要条件。因此,可以利用KKT条件得到凸性假设下问题式(4)的最优解,

$$\left. \begin{aligned} 0 \leq P_D^{nk} \quad \perp \quad \alpha_k + I_n h_{DC}^{nk} - \frac{1}{P_D^{nk} + 1/G_D^{nk}} \geq 0 \\ 0 \leq \alpha_k \quad \perp \quad \sum_{n=1}^N P_D^{nk} - P_D^{\max} \geq 0 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

其中 \perp 表示左右两式相互正交, I_n 定义如下:

$$I_n = \frac{1}{\sigma^2 + \sum_{k=1}^K P_D^{nk} h_{DC}^{nk}} - \frac{1}{\sigma^2 + P_C^n g_C^n + \sum_{k=1}^K P_D^{nk} h_{DC}^{nk}} \quad (9)$$

由式(8),式(9)可知,最优功率分配可以表示如下:

$$P_D^{nk} = \left[\frac{1}{\alpha_k + I_n h_{DC}^{nk}} - \frac{1}{G_D^{nk}} \right]^+ \quad (10)$$

其中 $[x]^+ = \max(x, 0)$ 。但是,可以发现 I_n 中包含 P_D^{nk} ,说明式(10)并不是 P_D^{nk} 的闭式解。由此,本文根据对于该问题的凸分析设计如下算法。

5 算法设计

基于前文中对问题式(4)的拉格朗日对偶分析,本文提出以下迭代算法,得到最优的拉格朗日乘子和蜂窝网BS端接收干扰表征量 I_n ,并由此得到相应的P2P用户功率分配方案。

- (1)初始化: 决定 P_D^{nk} , α_k 和 J_n^k 的初始值;
- (2)迭代更新: 在每个时隙 $t \in \{1, 2, \dots\}$ 上
- (3)在蜂窝网BS端:
 - (a)BS测量接收到的干扰 $\sum_{k=1}^K P_D^{nk}(t) h_{DC}^{nk}, \forall n$;
 - (b)根据 D_{BS} 决定 $J_n^k(t)$ 的修正值 $\Delta J_n^k, \forall n$;

(c)将 $\Delta J_n^k, \forall n$ 反馈给P2P用户 k ;

(4)在P2P用户端($\forall k$):

- (a)根据收到的 $\Delta J_n^k, J_n^k(t+1) \leftarrow J_n^k(t) + \Delta J_n^k$;
- (b)并根据规则 D_{P2P} 决定 $\alpha_k(t+1)$;
- (c)根据式(11)决定 $P_D^{nk}(t+1)$,

$$P_D^{nk}(t+1) = \left[\frac{1}{\alpha_k(t+1) + J_n^k(t+1)} - \frac{1}{G_D^{nk}} \right]^+$$

可以发现在上述算法步骤中, J_n^k 是以修正量的形式返回到P2P用户端,以减少所需信令开销,它的具体定义下面将具体描述。拉格朗日系数 α_k ,由于是由P2P用户自行决定,没有信令开销。在上述框架下,还需要对算法规则 D_{BS} 和 D_{P2P} 进行定义。

在蜂窝网BS端: 在每个时隙上,BS对干扰值 $R_n = \sum_{k=1}^K P_D^{nk}(t) h_{DC}^{nk}$ 进行测量,假设 J_n^k 的初始值BS和P2P用户都知道,则修正值的大小决定了对 I_n 的更新。本文中对 I_n 的更新规则 D_{BS} 定义如下:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{J}_n^k &\leftarrow \left[\frac{1}{\sigma^2 + R_n} - \frac{1}{\sigma^2 + P_C^n g_C^n + R_n} \right] h_{DC}^{nk} \\ \Delta J_n^k &\leftarrow a \times \text{sgn}[\tilde{J}_n^k - J_n^k(t)] \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

其中 $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数, a 为更新步长。

在P2P用户端: D_{P2P} 定义了P2P用户根据收到的 ΔJ_n^k 和功率约束的满足情况,即 $\alpha_k(t)$ 对功率值 $P_D^{nk}(t)$ 的调整规则。具体定义如下:

$$\left. \begin{aligned} P_D^{nk}(t) &\leftarrow \sum_{n=1}^N P_D^{nk}(t) \\ \alpha_k(t+1) &\leftarrow \left[\alpha_k(t) + b(P_D^{nk}(t) - P_D^{\max}) \right]^+ \\ P_D^{nk}(t+1) &\leftarrow \left[\frac{1}{\alpha_k(t+1) + J_n^k(t+1)} - \frac{1}{G_D^{nk}} \right]^+ \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

即使用导数下降法来对拉格朗日系数 $\alpha_k(t)$ 进行更新,其中 b 是所使用的更新步长。

6 仿真结果与分析

本文使用3GPP LTE的网络结构对所提算法的性能进行验证^[11],具体的系统参数如表1所示。假设每个蜂窝模式用户只占用一个资源块(Resource Block) LTE系统中无线资源的基本单位,占据180 kHz带宽和0.5 ms时间,在系统中共放置了6个蜂窝网用户,对于P2P链路,为了保证各个链路之间的隔离度,本文采用栅格状的排列方式,各个链路之间以链路中间点为标志,间距100 m放置。每个链路以链路中间点为圆心,方向角随机设置(在0到 2π 之间均匀分布),具体可参见图2。传播损耗模型包含路径损耗和快衰损耗。

对于资源分配方式,蜂窝子系统中每个蜂窝模

表 1 混合网络仿真场景参数设置

参数	取值
小区大小	300 m×300 m
P2P 链路长度	20 m
P2P 链路之间的距离	100 m
载波频率	2 GHz
系统带宽	1.25 MHz
子载波间隔	15 kHz
资源块中的子载波数	12
总资源块个数	6
时隙间隔	1 ms
路损模型	128.1+37.6lg(R)
快衰模型	TU 信道模型
噪声功率谱密度	-174 dBm/Hz
噪声系数	5 dB

表 2 凸性条件满足概率(%)

功率 (mW)	链路长度(m)		
	20 m	30 m	40 m
0.1	99.7	99.1	98.2
0.01	98.7	96.4	93.7
0.001	96.3	91.5	86.3
0.0001	94.8	88.8	82.3
0.00001	94.6	88.3	82.2

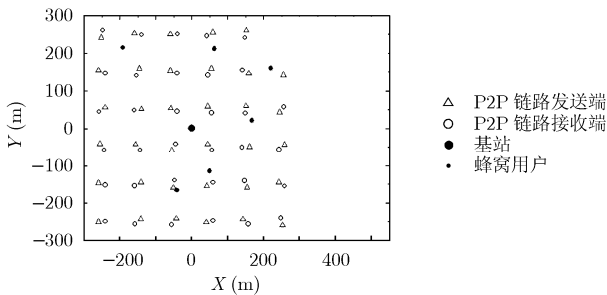


图 2 混合网络仿真场景

式用户占用一个 RB，采用分数倍功控方的方式^[12](具体参数取值为 $\alpha=1, P_0=-100$ dB)。P2P 用户则尝试重用所有 RB，即对所有 RB 上的功率分配值进行优化。仿真中 $\Gamma=1$ 以忽略其对结果的影响。

首先，在这样的网络环境下验证凸性条件 $G_D^{mk} \geq H_{DC}^{mk}$ 满足的概率，结果如表 2 所示。表 2 验证了不同的 P2P 功率预算(0.00001 mW 到 0.1 mW)和不同的 P2P 链路长度(20 m, 30 m 或 40 m)下的概率，结果证明该凸性条件以很大概率得到满足，说明本文的凸优化分析框架和所提出的算法在实际条

件下具有性能保证，实现了次优性能。

其次，在单一的网络拓扑下对所提算法的链路性能进行分析。本文将 P_D^{mk} 的收敛性能表示在图 3 中。可以看到，图 3 中功率分配 P_D^{mk} 在 200 次以内达到收敛。其中需要特别指出的是，图 3 中选取的 P2P 链路是图 2 中标注为 Link 1 的 P2P 链路。该链路附近存在一个蜂窝网用户，该蜂窝网用户使用的是第 6 个 RB。这造成了在该 RB 上 P2P Link 1 受到的干扰非常大，即式(10)中 G_D^{mk} 很小。因此，P2P Link 1 不会在该 RB 上分配功率，以提高功率利用的效率。另一方面，这也可以看成 P2P 通信对蜂窝通信干扰灵活避免的一种机制。

之后，对多个随机网络拓扑下所提算法的系统平均性能进行分析。对优化问题式(4)的系统约束 P_D^{\max} 进行调整，得到不同 P_D^{\max} 值下的系统平均性能。如图 4 所示，结合两个子系统的吞吐量性能，即本文优化问题的目标，系统总吞吐量随着 P_D^{\max} 的上升不断上升。这是由于 D2D 链路短距离通信的优势，使得其性能提升大于蜂窝链路的性能损失。将本文所提算法与平均功率分配的算法在图 4 进行比较，可以看到所提算法性能始终优于平均分配算法，频谱效率提升的绝对值为 2~7 bit/(s·Hz)。将该吞吐量提升用蜂窝网吞吐量进行归一化，得到算法性能提升的百分比如图 5 所示。可以看到这种提升随着 P_D^{\max} 的上升而逐渐减小，从 42% 降至 1%。这可以

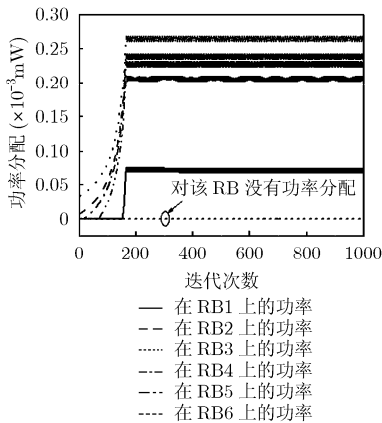


图 3 P2P Link 1 各个 RB 上的功率分配收敛情况

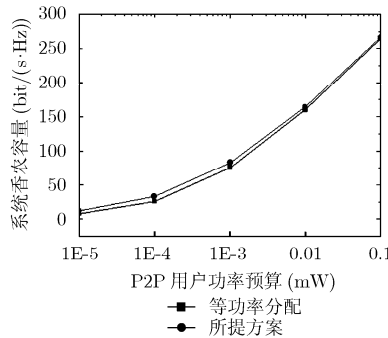


图 4 所提算法吞吐量提升绝对值

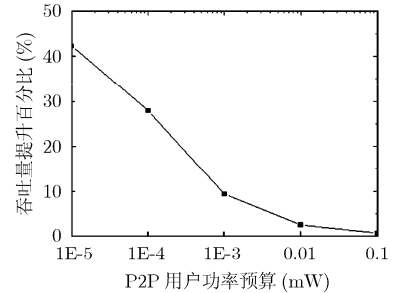


图 5 所提算法吞吐量提升百分比

解释为该算法的优势主要在于考虑了 P2P 与蜂窝网模式共存情况下的系统, 若 P2P 发送功率过大, 蜂窝网的吞吐量共享可以忽略, 则该算法带来的增益也相对减小了。

7 结论

本文考虑了蜂窝模式和 P2P 模式混合网络结构下的 P2P 用户功控问题, 以 potential game 模型为基础提出了一种分布式的功控算法。仿真结果说明, 该算法能有效避免蜂窝网和端到端网络之间的有害干扰, 从而提升了系统总吞吐量。该算法为混合型网络中的功率控制、干扰协调提出了一种有效的解决方案。

参 考 文 献

- [1] 3GPP TSG-RAN. Opportunity driven multiple access, 3GPP Technical Report, 3G TR 25.924, V1.0.0[S]. 1999.
 - [2] Lin Y D and Hsu Y C. Multihop cellular: a new architecture for wireless communications[C]. INFOCOM 2000, Israel: IEEE Press, 2000: 1273-1282.
 - [3] Oteri O, Wong I C, and Mccoy W. Optimal resource allocation in uplink SC-FDMA systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(5): 2161-2165.
 - [4] 仲崇显, 李春国, 杨绿溪, 基于非合作博弈论的多小区 OFDMA 系统动态资源分配算法研究[J]. *电子与信息学报*, 2009, 31(8): 1935-1940.
Zhong Chong-xian, Li Chun-guo, and Yang Lu-xi. Dynamic resource allocation algorithm for multi-cell OFDMA systems based on noncooperative game theory[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(8): 1935-1940.
 - [5] Akyildiz I, Lee Won-yeol, and Chowdhury K. Spectrum management in cognitive radio ad hoc networks[J]. *IEEE Network*, 2009, 23(4): 6-12.
 - [6] NEC Corporation. NEC's approach towards energy-efficient radio access networks. <http://www.nec.com/global/solutions/nsp/mwc2010/pdf/greenradio.pdf>. 2010.2.
 - [7] Scutari G, Barbarossa S, and Palomar D P. Potential games: a framework for vector power control problems with coupled constraints[C]. ICASSP 2006, Toulouse: IEEE Press, 2006: 14-19.
 - [8] Nie N and Comaniciu C. Adaptive channel allocation spectrum etiquette for cognitive radio networks[C]. DySPAN 2005, Baltimore: IEEE Press, 2006: 269-278.
 - [9] Xing Yiping, Mathur C N, and Haleem M A, *et al.* Dynamic spectrum access with QoS and interference temperature constraints[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2007, 6(4): 423-433.
 - [10] Boyd S and Vandenberghe L. *Convex Optimization*[M]. Cambridge: Cambridge Univ. Press, New York, 2004: 267-288.
 - [11] 3GPP TSG-RAN, Physical layer aspects for evolved UTRA, 3GPP Technical Report, 3G TR 25.814, V7.1.0[S], Sep. 2006.
 - [12] 3GPP TSG-RAN, Physical layer procedures, 3GPP Technical Report, 3G TR 36.213, V8.3.0[S], May 2008.
- 彭 涛: 男, 1977 年生, 讲师, 博士生, 研究方向为下一代宽带无线通信系统、认知无线网络、混合架构无线网络、软件无线电技术等。
- 卢前溪: 男, 1984 年生, 博士生, 研究方向为认知无线网络、混合架构无线网络等。
- 王文博: 男, 1965 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为下一代宽带无线通信系统、认知无线网络、异构无线网络等。