

OFDM 系统动态资源分配研究

卫 国, 唐志华

(中国科学技术大学电子工程与信息科学系, 安徽合肥 230027)

摘 要: OFDM(正交频分复用)系统中的动态资源分配能够有效地利用有限的系统功率和频谱资源, 提高系统性能, 被广泛研究. 本文重点讨论了单用户、多用户及多小区 OFDM 系统中的资源分配问题, 综述了现有的研究成果, 总结了热点研究方向, 为以后的研究奠定了基础.

关键词: OFDM 系统; 动态资源分配; 多小区

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2007) 6A-083-05

Survey on Dynamic Resource Allocation in OFDM Systems

WEI Guo, TANG Zhi-hua

(Department of Electronic Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230027, China)

Abstract: A lot of research effort has been spent on dynamic resource allocation in OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) system so as to exploit the limited system power and scarce frequency resource, and provide significant performance gains. This paper discusses the resource allocation issues in single user, multiuser as well as multicell OFDM systems. It gives a review of current research in order to investigate future research issues.

Key words: OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) system; dynamic resource allocation; multicell

1 引言

OFDM 是一种特殊的多载波传输方案, 将高速的串行数据流分解成若干并行的子数据流同时传输, 能够有效对抗符号间干扰和无线信道的频率选择性, 被认为是未来无线通信中的核心技术. OFDM 技术先后被欧洲数字音频广播(DAB)、欧洲数字视频广播(DVB)、IEEE802.11 无线局域网、IEEE802.16 无线城域网等系统采用. OFDM 系统可以通过灵活地选择适合的子载波进行传输, 实现动态资源分配, 有效地利用有限的系统功率和频谱资源, 提高系统性能. 子载波可以进行独立的调制和解调, 为资源分配提供了更细的粒度, 这也正是 OFDM 系统中的动态资源分配近年来被广泛研究的原因.

早期的 OFDM 系统动态资源分配研究从离散多音调制系统(DMT)系统延伸而来, 集中于单用户系统中的功率、速率动态分配, 形成速率最大化(rate maximization)、功率最小化(power minimization)和裕度最大化(margin maximization)三类问题, 文献[1~5]是研究此类问题的经典文献. OFDM 系统通过将不同的子载波分给不同的用户, 提供了一种新的多用户接入方式, 即 OFDMA(正交频分复用多址). 多用户 OFDM 系统利用不同用户信道衰落的独立性, 将子载波尽量分给信道状况好的用户, 以提高频谱利用率, 挖掘多用户分集^[6~11]. 针对一味追求频谱效率带来的用户之间公平性问题, 文献[6, 7]研究了保证用户

的 QoS 特性下的资源动态分配. OFDMA 保证了小区内用户间的正交性, 但如果两个相邻小区为使频谱复用系数尽可能地接近 1 而使用相同的频谱资源, 小区边缘干扰将很严重. 所以, 多小区 OFDM 系统中的资源分配不仅要完成小区内的动态分配, 更需要在各个小区之间进行资源的动态协调^[12~14].

近年来, OFDM 系统动态资源分配研究热点从先前的理论研究逐渐转向实际应用中面临的问题, 如研究带内信令开销, 反馈信道带噪, 反馈有限信道信息等对系统造成的影响等^[15, 16]. 将不同层面下资源分配的目标和相关因素结合起来考虑, 即所谓“跨层资源分配”, 是另一个新的研究热点^[7, 12, 19]. 研究的热点还包括 OFDM 和其他先进技术相结合的系统中的资源分配. 如 OFDM 和 MIMO 技术结合, 将资源分配的自由度扩展到空域, 充分利用 MIMO 信道的并行性和 OFDM 系统中信道的频率选择性得到更高的频谱效率. 协作通信和 OFDM 结合为 OFDM 系统的动态资源分配提出新的视角和挑战^[20, 21], 通过用户之间的协作, 实现资源和负载的平衡, 进一步扩大系统容量, 改善系统性能.

2 单用户系统中的资源分配

单用户系统中, 当子载波间隔大于相干带宽时, 不同的子载波经历不同的衰落, 即频率选择性. 为了利用这种频率选择性, 采用动态资源分配. 信息论中的注水

理论为动态资源分配提供了理论依据^[22]. 根据注水理论, 给定某一功率限制, 衰落越小的子载波上分得更多的功率. 然而注水理论的结果并不能直接使用在 OFDM 系统中: 首先, 注水理论假设带宽是无限细分的, 而 OFDM 系统有有限个离散子信道; 其次, 注水理论建立了功率和容量的连续关系式, 而实际 OFDM 系统中只有有限阶调制方式可利用. 为将注水理论应用于离散信道环境, 考虑一个带宽为 B , 子载波数为 N 的系统. 假设 $CNR_i = |H_i|^2/N_i$ 是第 i 个子载波上信道增益和噪声功率比, 第 i 个子载波上最大可加载的比特数 R_i 表示为^[23]:

$$R_i = \log_2(1 + P_i \cdot CNR_i / \Gamma) \quad (1)$$

其中 Γ 被称为“SNR gap”, 反映了达到某个速率理论需要的信噪比和实际实现时真正需要的信噪比之间的差异, 由目标 BER, 编码增益和系统性能裕度共同决定. 从式(1)可以看出对某个给定系统 (CNR_i 给定), 速率、功率、性能裕度是相互关联的三个变量, 限制其中的某两个, 优化第三个, 就形成了单用户 OFDM 系统中的三类加载问题.

(1) 速率最大化问题. 一般是预先定义一个可以被允许的最小性能裕度, 在总功率受限情况下, 通过分配功率, 使得系统速率达到最大, 数学表示如下:

$$\begin{aligned} \max \sum_{i=1}^N R_i \\ \text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^N P_i \leq P_{\text{budget}}, P_{e,i} \leq P_{\text{error}} \quad i=1, \dots, N \end{aligned} \quad (2)$$

其中: P_{budget} 是总限制功率, P_{error} 反映了 BER 要求. 文献[1]的 Hughes-Hartogs 算法是解决该问题的经典算法, 基于迭代的连续比特和功率分配. 每次迭代只分配 1 比特, 分给只需增加最少发射功率就能维持目标误比特率的子载波. 如果系统发送 1000 个比特, Hughes-Hartogs 算法就需要迭代 1000 次, 因此, 算法复杂度高, 实时性较差. 文献[2]从引入 Lagrange 算子的角度解决该约束优化问题, 提出了查表法和二分法等快速算法.

(2) 功率最小化问题. 在允许性能裕度下, 寻求使得系统速率达到某一要求下的最小功率, 数学表示如下:

$$\begin{aligned} \min \sum_{i=1}^N P_i \\ \text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^N R_i \leq R_{\text{target}}, P_{e,i} \leq P_{\text{error}} \\ i=1, \dots, N \end{aligned} \quad (3)$$

其中: R_{target} 是要达到的系统总数据速率.

(3) 裕度最大化问题. 在总功率受限情况下, 达到某一系统速率, 通

过分配功率使性能裕度最大, 数学表示如下:

$$\begin{aligned} \max \Gamma \\ \text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^N P_i \leq P_{\text{budget}}, \sum_{i=1}^N R_i = R_{\text{target}} \end{aligned} \quad (4)$$

很多文献指出功率最小化和裕度最大化问题是等价的, 文献[3]则把最小化功率问题直接定义为裕度最大化问题, 并且给出了两类问题达到最优的充分必要条件. Chow 算法^[4]和 Fisher 算法^[5]是解决该类问题的经典方法.

虽然单用户系统中的资源分配比较简单, 但研究这类算法为研究其他更复杂的问题提供了思路. 比如, 在多用户 OFDM 系统中, 固定子载波分配或进行过子载波分配后, 对每个用户来说, 都可以使用该算法进行功率比特分配.

3 多用户系统中的资源分配

多用户系统中的资源分配利用不同用户的信道衰落的独立性, 将子载波尽量分给信道状况好的用户, 可以提高频谱利用率, 充分利用多用户分集. 图 1 是一个典型的 K 用户下行 OFDM 系统分配框图, 基站端的资源分配模块根据各个用户反馈的信道信息进行资源分配, 并通过专门的信令信道将分配信息通告用户, 用户根据资源分配信息解出数据. 一般假设一个子载波最多只能分给一个用户, 文献[24]从分析多用户系统中的速率最大化问题入手, 应用数学知识对此合理性给出了严格的证明.

3.1 用户公平性

多用户系统中挖掘信道的频域选择性分集和多用户分集的同时, 用户之间的公平性也是一个不可忽略的重要问题. 比如, 当用户处于小区中不同位置时, 距离基站比较近的用户可能会独占所有的无线资源, 而距离基站比较远的用户则无法得到服务, QoS 得不到保证. 常见的公平性包括 max-min 公平性^[25]和比例公平性^[26]. 文献[6]考虑了用户速率满足 max-min 公平性要求的速率最大化问题(式(5))和功率最小化问题(式(6)):

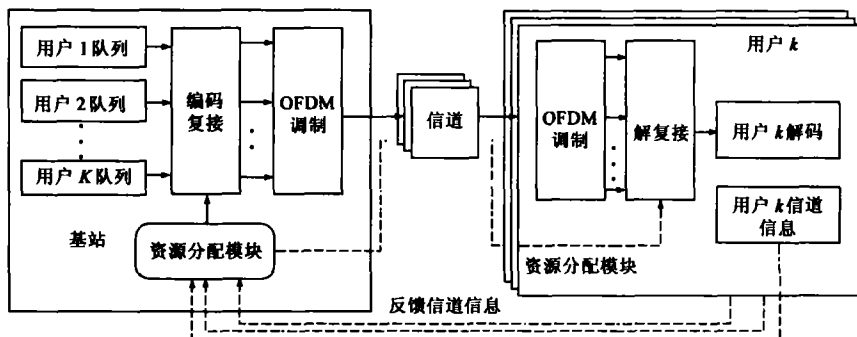


图 1 多用户下行 OFDM 系统分配框图

$$\max_{c_{k,n}, \rho_{k,n}} \min_k R_k = \max_{c_{k,n}, \rho_{k,n}} \min_k \sum_{n=1}^N c_{k,n} \cdot \rho_{k,n} \quad (5)$$

$$\text{s.t.} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N f_k(c_{k,n}) / \text{CNR}_{k,n} \cdot \rho_{k,n} \leq P_{\text{budget}}$$

$$\min_{c_{k,n}, \rho_{k,n}} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N f_k(c_{k,n}) / \text{CNR}_{k,n} \cdot \rho_{k,n} \quad (6)$$

$$\text{s.t.} R_k = \sum_{n=1}^N c_{k,n} \cdot \rho_{k,n} \quad \forall k$$

其中, $f_k(c)$ 表示用户 k 在满足 BER 等要求下, 采用 c 阶调制方式所需要的信噪比, $\text{CNR}_{k,n}$ 表示用户 k 在子载波 n 上的信道增益和噪声功率比, 指示变量 $\rho_{k,n}$ 在子载波 n 分配给用户 k 时为 1, 反之为 0. 式(5)的思想是最大化速率最小用户的速率, 式(6)则是在保证每个用户满足一定数据速率下, 最小化系统总功率.

与上述算法不同, 文献[7]提出一种基于效用函数最大化的资源分配算法. 效用函数的主要思想是将可用的资源(带宽、功率等)或性能指标(信道增益、数据速率、时延等)映射到相应的效用值或代价值上, 每个用户确定一个效用函数, 分配资源使得所有用户的效用函数和最大. 特别地, 当效用函数是用户速率的对数时, $U(r) = \ln r$, 算法是比例公平调度算法在所在信道环境下的扩展, 而当效用函数 $U(r) = -r^a/a$, $a > 0$, 且 $a \rightarrow \infty$ 时, 算法使得用户速率满足 max-min 公平性. 公平性的获得一般以系统性能的损失为代价, 选用不同的公平性准则, 体现了公平性和系统性能之间不同程度的折衷.

3.2 求解方法

多用户 OFDM 系统中的资源分配问题一般可以建模成带约束条件的优化问题, 分配的多维自由度(子载波、速率、功率等)所带来的约束条件的多样性和优化目标的不同是造成该类问题复杂的主要原因. 此类问题大多被证明为 NP-hard 问题, 得到最优解一般比较困难, 更多的研究集中在寻求次优或近似最优解上, 大致有以下几类方法:

(1)分步法. 主要思想是降低资源分配的自由度, 将原问题分成若干个简单的子问题, 通过子问题的求解, 得到原问题的次优解. 如文献[8]中首先假设每个子载波上调制方式一致, 根据每个用户速率要求算出需要的子载波数目, 第二步则是分配相应数目的子载波.

(2)凸优化法. 由于凸优化理论发展成熟, 凸优化问题具有很多好的性质, 如局部最优也是全局最优, 对偶问题和原问题解的差异为 0, KKT 条件是解最优的必要条件也是充分条件等, 所以将原问题转化为凸优化问题, 求解相对容易. 如文献[9]通过将变量的整数限制条件放松为实数, 然后引入新的变量, 将原问题转化

成凸优化问题, 利用 KKT 条件得到问题最优解, 对解进行处理, 得到满足原问题限制条件的解. 文献[10]则是介绍如何利用问题的凸性, 将原问题分成主问题和次问题两级, 主问题每给定一资源, 次问题就能算出在此资源下的最优分配, 主问题根据分配结果调整下次资源分配. 主次问题不断迭代, 逼近问题的最优解.

(3)启发式法. 启发式算法是人们面向具体问题的经验、规则启发出来的方法, 可能缺乏坚实的理论基础. 如文献[11]采用遗传算法来求解资源分配问题, 也能快速得到有效解.

根据所提问题, 也可将上述方法配合使用, 从而快速获得问题的有效解.

4 多小区系统中的资源分配

小区间干扰是蜂窝移动通信系统的一个固有问题, 未来无线通信系统希望频谱复用系数尽可能地接近 1, 这就对多小区系统中的资源分配提出了新的要求. 不同小区的用户可以使用相同的子载波, 但是会对其他小区用户造成干扰, 所以多小区 OFDM 系统中的资源分配不仅要完成小区内的动态分配, 更需要在小区之间进行资源的动态协调. 每个用户利用所有基站周期性发送的导频信号进行信道估计, 汇报给服务基站, 由服务基站传递给其他基站, 这样基站就能够确定基站之间的干扰.

在多小区环境中, 资源分配大致有以下三种方式:

(1)集中式. 集中式资源分配, 由一个中心控制器或各个基站协调完成, 并通过骨干网传递给各个基站, 分配结果对所有基站都是透明的. 如文献[12]研究了集中式的子载波、比特、功率联合分配. 在每个子载波上构造共信道用户集合(co-channel user set), 对付共信道干扰(co-channel interference), 通过发送参数的分配, 在基站功率受限情况下最大化整个系统的和吞吐量.

(2)半分布式. 资源分配由中心控制器和所有基站共同完成, 中心控制器对资源在小区间分配进行调控, 各个基站完成所在小区的具体分配. 如文献[13]中, 无线网络控制器(RNC)从超帧的层次决定基站(BTS)使用哪些信道, 基站则从帧的层次决定哪些信道分给哪个用户.

(3)分布式. 没有中心控制器, 资源的分配由各个基站单独完成. 如文献[14]应用非协作博弈(noncooperative game)理论研究了每个小区单用户的多小区系统子载波、比特、功率分配问题. 每个用户在所有子载波上按注水分配功率, 将其他用户的信号视为干扰, 且不考虑分配结果对其他用户造成的干扰.

一般而言, 集中式资源分配性能最好, 复杂度最高, 对系统要求也比较高; 半分布式次之; 分布式分配

方式算法最为简单,但是性能也最差,一般达不到最优。

5 热点方向

先前的研究基于很多理想假设,近年来,人们逐渐关注实际应用中面临的问题。如文献[15]分析了将分配的结果通知用户需要的带内信令的开销对动态资源分配的影响,指出动态资源分配并不是在任何场景下都要优于静态资源分配的。再如,传统资源分配的文章都假设基站能够获得理想信道信息,实际系统中,用户信道估计的不准确性、为减少反馈量而引入的有限反馈、反馈信息处理过程中的时延等,都会使得基站获知信道信息的准确程度受到影响,进而影响资源分配的性能。在 FDD 系统下行资源分配中,用户需要反馈所有子载波上的信道信息给基站,为了减少反馈量,文献[16]提出有限比特反馈,并分析了对系统性能的影响。文献[17]分析了资源分配时采用延时的信道信息所带来的性能损失。文献[18]则分析了在 MIMO/OFDM 系统中,反馈均值及协方差等部分信道信息下,最大化速率问题算法性能受多普勒效应的影响。

跨层资源分配是另一个研究的热点。资源分配在不同层面下有不同的优化目标和相关因素,如物理层主要考虑频谱效率、功率的消耗、数据的误码率等,链路层考虑缓冲队列长度、数据吞吐量等,网络层考虑路由、丢包率等,应用层则需要考虑业务本身的特性、QoS 要求等。传统的各层独立设计模型在移动无线环境中由于无线链路的多变性和移动设备资源受限而效率较低。据此,人们提出跨层资源分配,在资源分配过程中,某一层可以与任一其他层进行信息的交互,使系统具有更好的性能。如文献[19]根据应用层非实时(non-real-time)和实时(real-time)业务的不同 QoS 特性,提出一种保证 QoS 要求的帧结构:帧的前一部分以时隙为单位动态分配给实时用户保证时延边界;后半部分以子载波为单位分配给非实时用户,以最大化系统吞吐量并保证用户之间的公平性。

最后,OFDM 和其他先进技术相结合的系统中的资源分配,也是热点研究方向。MIMO 技术能在空间中产生多个独立的并行信道同时传输数据,在不增加系统带宽的情况下提高频谱利用率。因此,OFDM 和 MIMO 技术的有效结合已成为新一代移动通信的必然趋势。空间维分配自由度的引入,使得问题呈现非线性,非凸,组合特性,寻求低复杂度的算法显得尤为重要。如文献[27]中根据用户的空间相关性将用户分组,不同组的任意两个用户之间近似正交,同一子载波只能承载某一组中一个用户的信息,组间用户的干扰近似忽略,从而将多用户分配问题转化为单用户分配问题。协作

通信为 OFDM 系统的动态资源分配提供了新的视角^[20,21],系统中的每个用户终端可以有一个或多个合作伙伴,合作伙伴之间有责任在传输自己信息的同时,帮助其伙伴传输信息。通过用户终端之间的协作,可以实现用户间资源和负载的平衡,进一步扩大系统容量,改善系统性能。

6 结语

本文深入讨论了单用户,多用户及多小区 OFDM 系统中的动态资源分配。在全面和系统地归纳总结已有研究成果的基础上,指出一般的解决方法和面临的挑战,并对今后的热点研究方向进行了探讨,希望对以后的研究有一定的指导作用。

参考文献:

- [1] D H Hartogs. Ensemble modem structure for imperfect transmission media[P]. US Patents, 4833796, May 1989.
- [2] B S Krongold, K Ramchandran, D L Jones, et al. Computationally Efficient Optimal Power Allocation Algorithms for Multi-carrier Communication Systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2000, 48(1): 23 - 27.
- [3] J Campello. Optimal discrete bit loading for multicarrier modulation systems[A]. International Symposium on Information Theory[C]. Cambridge, MA, USA: IEEE, 1998. 193.
- [4] P S Chow, J M Cioffi, J A C Bingham, et al. A practical discrete multitone transceiver loading algorithm for data transmission over spectrally shaped channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 1995, 43(2): 773 - 775.
- [5] R F H Fischer, J B Huber. A new loading algorithm for discrete multitone transmission[A]. Proceedings of Global Telecommunications Conference[C]. London: IEEE, 1996. 724 - 728.
- [6] I Kim, H Lee, B Kim, Y Lee, et al. On the use of linear programming for dynamic subchannel and bit allocation in multiuser OFDM[A]. Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference[C]. San Antonio, Tex, USA: IEEE, 2001. 3648 - 3652.
- [7] Song G C, Li Y. Cross-layer optimization for OFDM wireless networks-part I: theoretical framework[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2005, 4(2): 614 - 624.
- [8] Li Zhen, Zhu Geqing, Wang Weihua, et al. Improved algorithm of multiuser dynamic subcarrier allocation in OFDM system[A]. Proceedings of ICCT[C]. Beijing, China: Beijing University of Posts and Telecommunication Press, 2003. 1144 - 1147.
- [9] Wong C Y, Cheng R S, Lataief K B, Murch R D, et al. Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit, and power allocation[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1999, 17(10): 1747 - 1758.
- [10] Palomar, D P Chiang. A tutorial on decomposition methods for

- network utility maximization[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(8): 1439 – 1451.
- [11] Yongxue Wang, Fangjiong Chen, Gang Wei, et al. Adaptive subcarrier and bit allocation for multiuser OFDM system based on genetic algorithm[A]. Proceedings of International Conference on Communications, Circuits and Systems [C]. Hong Kong, China: IEEE, 2005. 242 – 246.
- [12] Koutsopoulos I, Tassiulas L. Cross-layer adaptive techniques for throughput enhancement in wireless OFDM-based networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2006, 14(5): 1056 – 1066.
- [13] Guoqing Li, Hui Liu. Downlink dynamic resource allocation for multi-cell OFDMA system[A]. Proceedings of Vehicular Technology Conference [C]. Orlando, Florida, USA: IEEE, 2003. 1698 – 1702.
- [14] Z Han, Z Ji, K J Ray Liu, et al. Power minimization for multi-cell OFDM networks using distributed non-cooperative game approach[A]. Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference [C]. Dallas, USA: IEEE Communication Society, 2004. 3742 – 3747.
- [15] Gross J, Geerdes H F, Karl H, Wolisz A, et al. Performance analysis of dynamic OFDMA systems with inband signaling [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(3): 427 – 436.
- [16] Sanayei S, Nosratinia A, Aldhahir N, et al. Opportunistic dynamic subchannel allocation in multiuser OFDM networks with limited feedback [A]. IEEE Information Theory Workshop [C]. San Antonio, USA: IEEE, 2004. 182 – 186.
- [17] Zukang Shen. Multiuser OFDM Capacity Analysis with Partial Channel Information[R]. The University of Texas at Austin: Multiuser Wireless Communications Course Project, 2002.
- [18] R Cheraly, K B Letaief, D Zeghlache, et al. Adaptive Resource Allocation for Multiuser MIMO/OFDM Networks Based on Partial Channel State Information[A]. Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference [C]. Saint Louis, USA: IEEE Communication Society, 2005. 3922 – 3926.
- [19] Jia Tang, Xi Zhang. Cross-layer design of dynamic resource allocation with diverse QoS guarantees for MIMO-OFDM wireless networks[A]. Proceedings of the Sixth IEEE International Symposium on World of Wireless Mobile and Multimedia Networks [C]. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2005. 205 – 212.
- [20] Han Z, Himsoon T, Siri Wongpairat W P, Liu K J R, et al. Energy-efficient cooperative transmission over multiuser OFDM networks: who helps whom and how to cooperate [A]. Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference [C]. New Orleans, USA: 2005. 1030 – 1035.
- [21] Truman Chiu-Yam Ng, Wei Yu, et al. Joint Optimization of Relay Strategies and Resource Allocations in Cooperative Cellular Networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2007, 25(2): 328 – 339.
- [22] T Cover, J Thomas. Elements of Information Theory [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1991.
- [23] X Qiu, K Chawla. On the performance of adaptive modulation in cellular systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 1999, 47(6): 884 – 895.
- [24] Li G, Liu H. On the optimality of the OFDMA network [J]. IEEE Communications Letters, 2005, 9(5): 438 – 440.
- [25] D Bertsekas, R Gallager. Data Networks [M]. NJ: Prentice-Hall, 1987.
- [26] F Kelly. Charging and rate control for elastic traffic [J]. European Transactions on Telecommunications, 1997, 8(1): 33 – 37.
- [27] Ying Jun Zhang, K B Letaief. An efficient resource allocation scheme for spatial multiuser access in MIMO/OFDM systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2005, 53(1): 107 – 116.

作者简介:



卫 国 男, 1959 年生于安徽合肥, 中国科学技术大学电子工程与信息科学系教授. 研究方向为第四代移动通信系统和关键技术.
E-mail: wei@ustc.edu.cn



唐志华 女, 1982 年生于河南鹤壁. 博士研究生. 研究方向为未来移动通信无线资源分配及调度. E-mail: zhtang@mail.ustc.edu.cn