

一种在无线衰落信道上支持实时业务的分组调度算法

聂伯霖 李乐民

(电子科技大学宽带光纤传输与通信网技术教育部重点实验室 成都 610054)

摘要 无线分组调度算法能为蜂窝网络中的移动用户提供服务质量的保证。在此问题上,以前的研究工作中一个经典的假设是基站与用户之间的信道条件变化为一平稳随机过程。但在实际情况中,这样的平稳假设并非总是合理的。研究表明基于平稳假设的调度算法,如流行的 M-LWDF 和 EXP-rule 算法,在非平稳信道上的性能下降明显。在 CDMA 蜂窝通信系统中,为在时变衰落信道上支持实时数据业务,该文提出一种基于模糊逻辑控制的分组调度算法,简称 FROS。它能在保证用户 QoS 要求的同时,考虑到无线信道的快衰落特性而充分利用多用户分集(Multiuser diversity)所带来的增益,从而提高系统容量。系统级仿真证明, FROS 算法能在优化系统分组时延性能和优化系统吞吐量性能之间保持良好的平衡和折衷,在平稳信道和非平稳信道的条件下都能获得比 M-LWDF 和 EXP-rule 算法更好的性能。

关键词 CDMA, 无线分组调度, 高速下行链路分组接入, 1xEV-DO, 服务质量, 模糊逻辑控制

中图分类号: TN914.53

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)04-0680-05

Packet Scheduling Supporting Real-Time Data Service over Wireless Fading Channels

Nie Bo-lin Li Le-min

(Key Lab of Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Networks,
University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract Wireless packet scheduling algorithms, which have been proposed for Quality of Service (QoS) for mobile users in cellular networks, depend on the fundamental idea that the service rate allocated to each user is proportional to a positive weight. Previous work on this problem has typically assumed that the channel conditions between the base station and the users are governed by a stationary stochastic process. However, such stationary assumption is not always reasonable and the study shows that the algorithms based on the stationary assumption, such as a popular algorithm known as M-LWDF, would have extremely poor performance over non-stationary channels. In this paper an opportunistic scheduling model is designed by means of fuzzy logic, which can exploit the time-vary nature of channel conditions to enhance system capacity while satisfying diverse QoS requirements. Simulations illustrate that this design can achieve better performance than previous algorithms under both stationary channel conditions and non-stationary channel conditions.

Key words CDMA, Wireless packet scheduling, High-Speed Downlink Packet Access (HSDPA), 1xEV-DO, QoS, Fuzzy logic control

1 引言

随着WCDMA中高速下行链路分组接入技术(HSDPA)^[1]和CDMA2000/1xEV-DO系统^[2]的发展完善,无线蜂窝网络在下行链路上支持实时数据业务的需求使得快速调度算法支持服务质量(QoS)的研究成为热点。在CDMA蜂窝通信系统中,分组调度可采用码分复用并行调度和时分复用串行调度两种方式。高比特速率的传输需要更低的每比特传输能量,因此,相对于码分调度而言,时分调度由于有更高的接收比特能量与干扰噪声谱密度之比(E_b/N_0)而更有优势^[3],HSDPA和1xEV-DO均考虑在下行链路上以时分复用方式为

主进行分组调度^[1, 2]。所以本文提出分组调度算法将基于时分复用方式,能够应用于HSDPA和1xEV-DO工程环境。

无线环境中接收信号强度的随机起伏变化(即衰落)从不同时间尺度上看,可分为由于路径损耗和阴影效应引起的大尺度慢变化和由于多径传播引起的具有Rice或Rayleigh分布统计特性的小尺度快变化。通过跟踪用户信道在小时间尺度上的快速变化,采用自适应调制编码(AMC)等链路自适应技术,使在短期意义上具有好的信道条件的用户可以得到更高频谱效率的编码调制组合^[4],从而无条件地提高用户的吞吐量。其中,调度算法控制着共享资源的分配,在很大程度上决定了整个系统的行为。对于非实时数据业务而言,高通公司所提出的Proportional Fair(PF)分组调度算法^[5]具有很好的应用前景。但对于实时数据业务,PF算法已不能满足要求,

2004-07-20 收到, 2005-10-28 改回

国家自然科学基金委员会与香港研究资助局联合科研基金(60218002)资助课题

因为分组调度算法除了要考考虑多用户分集(Multiuser diversity)^[6]所带来的增益,还要满足不同业务的服务质量。如何在满足用户服务质量的前提下,充分利用多用户分集所带来的增益,从而提高系统容量和频谱利用率,是一个好的调度算法应追求的目标。朗讯贝尔实验室提出了M-LWDF(Modified Largest Wait Delay First)和EXP-rule算法^[7-9],并从理论上证明它们具有吞吐最优性质(Throughput-optimal)。文献中在理论证明它们具有吞吐最优性质时,是在假设信道变化为平稳随机过程的前提下进行的,但在实际无线网络环境中,由于用户移动等因素引起的慢衰落变化将使得平均信道条件发生漂移,而不再是平稳随机过程^[10],在此情况下,通过仿真验证,M-LWDF和EXP-rule算法在时延性能上将发生不同程度的恶化(见4.2节仿真)。

本文提出一种基于模糊逻辑规则的分组调度算法,简称FROS(Fuzzy Rule based Opportunistic Scheduling)。FROS算法通过在系统吞吐性能和时延性能两者间的合理折衷,能支持不同的QoS需求,并且当用户由于移动等因素导致平均信道条件发生漂移时,通过设置合适的参数,FROS算法仍能保持良好的性能。本文第2节描述系统模型和业务QoS,第3节详细说明FROS算法,第4节通过仿真对FROS算法性能进行评估,并与文献中已有算法的性能作比较分析,第5节作总结。

2 系统模型和业务QoS说明

2.1 系统模型

研究一个多小区CDMA蜂窝通信系统在下行链路上采用时分复用的方式为不同移动用户传输分组数据。对于非实时业务和实时业务之间的竞争而言,系统资源必须优先分配给实时业务,而后的剩余资源再分配给非实时业务。因此,为了研究本文所提出算法对于支持实时业务服务质量的性能,考虑采用实时业务模型。假定某小区中基站为 N 个移动用户提供实时数据业务服务,每个用户接收一个数据流。基站内有 N 个缓存,分别对应不同的数据流。假定数据流在进入调度缓存之前,先采用令牌桶流量控制算法^[11]对每个用户的流量进行整形,这样既平滑了数据的突发,也避免了违规业务流对网络性能的不利影响,并且对业务流流量提供了简洁的描述。每个移动用户通过实时测量导频信号强度,获得当前信道质量,并通过上行专用控制信道将其反馈给基站。基站内的分组调度器根据获得的每个用户关于当前信道质量的反馈,做出调度决策。被调度用户在当前传输时间间隔内的服务速率推导如下。

假定扩频带宽为 W_B ,下行链路传输总功率固定为 P_T ,不采用快速功率控制¹⁾。用户 i 所需目标 E_b/N_0 为 δ_i ,分配

给用户 i 的功率为 $\phi_i P_T$, $\phi_i \in [0,1]$,满足 $\sum_{i=1}^N \phi_i = 1$ 。设 $R_i(t)$ 为用户 i 在当前时刻 t 所能支持的传输速率,则有

$$R_i(t) = \frac{W_B}{\delta_i} \frac{\phi_i P_T g_i(t)}{(1-\phi_i) f_i P_T g_i(t) + \eta + I_i}$$

行正交化因子, $f_i \in (0,1)$, η 为背景噪声功率, I_i 为外小区干扰, $g_i(t)$ 为用户 i 到本小区基站的传输增益。由于在下行链路上采用时分复用方式传输数据, $\phi_i = 1$,故有 $R_i(t) = (W_B/\delta_i)[(P_T g_i(t)/(\eta + I_i))]$,其中 $[P_T g_i(t)/(\eta + I_i)]$ 为用户 i 当前所经历的信干比(SIR)。令 $\Omega(t) = [P_T g_i(t)/(\eta + I_i)]$,表征用户 i 在 t 时刻的瞬时信道条件,则有 $R_i(t) = (W_B/\delta_i)\Omega(t)$ 。

本文中,传输增益 $g_i(t)$ 考虑路径损耗和由于多径传播引起的快衰落,为便于对算法的仿真性能分析,没有考虑阴影衰落。其中路径损耗模型采用Hata-like传播模型,路径损耗公式为 $L(t) = \alpha 10 \log(x(t))$ (dB), α 为路径损耗指数,取 $\alpha = 4$, x 为移动用户在 t 时刻与基站接收机间的距离,单位为千米。当移动台和基站之间存在可视传播路径(LOS)时,信道快衰落服从Rice分布,当不存在LOS时,信道快衰落服从Rayleigh分布。

在实际工程应用中,系统只支持离散的数据传输速率和固定长度的调度时间间隔。例如:CDMA2000/1xEV-DO系统可以支持的速率集合为 $\{38.4\text{kbps} \times 2^k, 921.6\text{kbps}, 1843.2\text{kbps} : k = 0, \dots, 6\}$,调度时间间隔为1.67ms的时隙长度。WCDMA/HSDPA系统也支持相似的速率集合,调度时间间隔为2ms。

2.2 业务QoS说明

实时数据业务的QoS可以采用两种方式定义^[8],一种是对时延进行限制,数学表达为 $\Pr\{W_i > T_i\} \leq \xi_i$ 。即用户 i 所接收分组的时延 W_i 大于门限 T_i 的概率应小于门限 ξ_i ,这是在统计意义上对分组时延进行限制。另一种QoS定义方式是对平均吞吐量进行限制,即用户 i 所获得的平均吞吐量 \mathcal{R}_i 不小于某一门限 r_i ,有 $\mathcal{R}_i \geq r_i$ 。本文中,由于在进入调度队列前先采用令牌桶模型对用户数据流进行整形,如果用户 i 有保证最小吞吐量 r_i 的需求,那么只需将令牌速率设置为 r_i 。这时只要保证了用户 i 所需的时延要求,则它的最小吞吐量 r_i 也将会同得到保证。

这里,我们将下文中将要用到但还未定义的符号做一说明。假定在 t 时刻用户 i 的分组排队等待时延为 $W_i(t)$,其瞬时信道条件用其所能支持的服务速率 $\mu_i(t)$ 表征, $\overline{\mu_i(t)}$ 为用户 i 在 t 时刻的前一个时间窗口 ω 内的平均服务速率,用以表征平均信道条件。

3 FROS 算法

3.1 问题分析

调度问题是一类组合最优化问题,但由于无线信道条件随机变化的复杂性,如果考虑用随机规划理论建模并在每个

¹⁾在高速下行链路上不采用快速功率控制可以更好地利用多用户分集增益,提高系统容量。实际系统中(如WCDMA/HSDPA和CDMA2000/1xEV-DO)在下行高速链路上采用固定功率或慢速功率控制。

调度时刻实时地搜索出全局最优解,对于工程实践来说是很困难的。因此,找到一个好的启发式算法是解决问题的途径。怎样在保证业务 QoS 和用户间某种程度公平性的前提下,充分利用多用户分集所带来的增益,从而提高频谱利用率,是无线调度算法的研究目标。文献[7-9]中提出了 M-LWDF 算法和 EXP-rule 算法,它们的基本思想是,为每个用户的数据流设置一个随信道条件和排队情况而变化的动态权值,在每个调度时刻,选择权值最大的数据流进行调度。

如果令 f_{SIR} 表征信道条件, f_{queue} 表征排队情况,那么调度算法的一般性描述为:

$$j = \arg \max_i G(f_{SIR}, f_{queue})$$

问题在于,怎样的动态权值 $G(f_{SIR}, f_{queue})$ 才是最优或者更接近最优的呢?因此,将对算法性能的要求和已有启发性知识很好的融入对 $G(f_{SIR}, f_{queue})$ 的构建中,找到一个更接近最优的函数 $G(f_{SIR}, f_{queue})$ 来作为调度决策的规则,是问题的关键。

3.2 模糊逻辑控制

模糊系统理论为从知识库向非线性映射的转换提供了一套系统的程序,且能严格证明模糊系统作为非线性映射具有万能逼近的性质^[12],这引发我们尝试用模糊逻辑控制来逼近调度算法所需要的非线性决策函数 $G(f_{SIR}, f_{queue})$ 。本文中,考虑采用 Takagi-Sugeno 模糊推理系统(简称 T-S 模型)^[13],其规则构造为: if x_1 is C_1^l , and x_2 is C_2^l , and... and x_n is C_n^l ; then $y^l = c_0^l + c_1^l x_1 + \dots + c_n^l x_n$ 。其中 x_1, \dots, x_n 为模糊变量, C_i^l 为模糊集, c_i^l 为常数, $l=1, 2, \dots, M$ (M 为总规则数)。当给定 T-S 模糊系统的输入 $x = (x_1, \dots, x_n)^T \in U \in R^n$ 时,其输出 $f(x) \in V \in R$ 可计算为^[13]

$$f(x) = \frac{\sum_l y^l \prod_{i=1}^n u_{C_i^l}(x_i)}{\sum_l \prod_{i=1}^n u_{C_i^l}(x_i)}$$

其中 $u_{C_i^l}(x_i)$ 为在模糊集 C_i^l 上的隶属度函数。为降低算法的计算复杂度,本文中采用零阶 S-K 系统,有 $c_1^l = c_2^l = \dots = c_n^l = 0$ 。系统仿真表明,零阶 S-K 系统已能较好地适合算法的需要。

3.3 FROS 设计原则

根据 3.1 节对问题的描述分析,考虑采用两个输入变量 (f_{SIR} 和 f_{queue}) 分别表征用户当前的瞬时信道条件和用户分组在队列中的排队情况,用一个输出变量 P_f 来表征用户的调度优先级。

对模糊变量 f_{SIR} 的定义,关系着能否充分利用多用户分集增益而提高系统容量。算法基于这样的考虑:尽量在每个用户的快衰落到达峰值的时候去调度它,即每个用户相对于它自身而言(而非相对于其它用户),信道条件越接近峰值,优先权值越高,令 $f_{SIR} = \mu_i(t) / \overline{\mu_i(t)}$ 可以达到这样的效果在定义模糊变量隶属度函数的时候,为了降低算法的计算复杂

性,我们选择简单的三角形和梯形隶属度函数。 f_{SIR} 隶属度函数的定义见图 1(a),根据仿真时采用的离散调度速率集合 $V = \{38.4\text{kbps} \times 2^k, 921.6\text{kbps}, 1843.2\text{kbps} : k = 0, \dots, 6\}$, f_{SIR} 隶属度函数中参数 Q_1 和 Q_2 设置为 $Q_1 = 4, Q_2 = 8$ 。

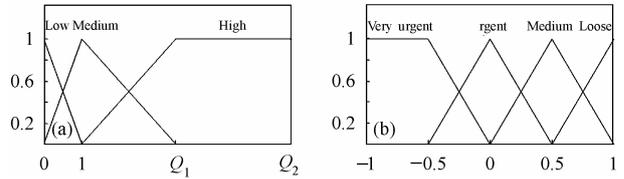


图 1 (a) f_{SIR} 的隶属度函数图 (b) f_{queue} 的隶属度函数图
Fig.1 (a) The membership function of f_{SIR}
(b) The membership function of f_{queue}

对于模糊变量 f_{queue} 的定义,关系着用户 QoS 的保证。我们采用如下定义:

$$f_{queue} = \begin{cases} \frac{T_i - W_i(t)}{T_i}, & W_i(t) \leq T_i \\ \frac{T_i - W_i(t)}{W_i(t)}, & W_i(t) > T_i \end{cases}$$

其隶属度函数见图 1(b)。

3.4 参数说明

模糊规则库的定义如表 1 所示,其中参数的确定基于如下考虑:

- (1) 为充分利用多用户分集增益,提高系统容量,在排队时延性能 f_{queue} 相同的情况下,信道条件 f_{SIR} 越好,优先权值越高。故表 1 规则 9-12 中, p_f 取值不妨分别设置为规则 5-8 中 p_f 取值的 K 倍($K > 1$),本文仿真中设置 $K = 4$ 。
- (2) 为保证 QoS,在信道条件 f_{SIR} 相同的情况下,排队时延性能 f_{queue} 越差,优先权值越高,故有 $p_1 < p_2 < p_3 < p_4$ 。

表 1 模糊系统规则库
Table 1 Fuzzy rule base

规则	f_{SIR}	f_{queue}	P_f
1	Low	Loose	0
2	Low	Medium	0
3	Low	Urgent	0
4	Low	Very urgent	0
5	Medium	Loose	$p_1 (= 1)$
6	Medium	Medium	p_2
7	Medium	Urgent	p_3
8	Medium	Very urgent	p_4
9	High	Loose	$K p_1$
10	High	Medium	$K p_2$
11	High	Urgent	$K p_3$
12	High	Very urgent	$K p_4$

- (3) 不妨初始化 $p_1 = 1$ 。在保证用户 QoS 的情况下,如果期望算法更强调各用户之间的公平性,可 $p_4 > K p_3 > p_3 > K p_2 > p_2 > K p_1$,仿真中设置 $p_2 = 8, p_3 = 64, p_4 = 512$ (记为参数组 1);在系统的业务量负荷接近系统容限甚至超载的情况下,这时我们期望调度算法能更优先考虑系统吞吐量的优化,从而在保证系统总体性能的情况下来保证每个用户的 QoS,这时考虑 $p_4 < K p_1$,仿真中设置 $p_2 = 1.1, p_3 = 1.2, p_4 = 1.3$ (记

为参数组 2)。结合 3.2 节所述公式，有

$$G(f_{SIR}, f_{queue}) = \frac{\sum_{i=1}^{12} P_i^l \cdot u_{CSIR}^l(f_{SIR}) \cdot u_{Cqueue}^l(f_{queue})}{\sum_{i=1}^{12} u_{CSIR}^l(f_{SIR}) \cdot u_{Cqueue}^l(f_{queue})}$$

。故 FROS 算

法下的调度规则为： $j = \arg \max_i \beta G(f_{SIR}, f_{queue})$ 。其中 β 为一个正数，鉴于 QoS 定义为统计意义上的时延保证(见 2.2 节)，我们令 $\beta = -\log(\xi_i)$ 。

4 仿真实验

4.1 仿真模型说明

我们在 OPNET 仿真工具(版本 10.0.A PL1) 中增加了支持 Rice/Rayleigh 衰落信道的功能模块，对本文第 2 节所描述的无线蜂窝系统进行建模，仿真了本文提出的算法以及 M-LWDF 和 EXP-rule 算法。

假定系统中有 4 个用户，初始时刻离基站的距离由远到近，它们以较慢的速度(2m/s)自由移动，这里先假定它们的移动只在自己位置附近(平均信道条件不发生明显改变)。它们在 1s 内的信道衰落情况如图 2 所示。系统调度时间间隔设为 2ms。每次仿真运行 90s。

4.2 FROS 算法与 M-LWDF, EXP-rule 算法的性能比较

4 个用户的业务 QoS 要求设置如表 2。

场景 1 在信道条件不发生明显漂移的情况下(采用 4.1 节所述的移动模型)，在表 2 所描述业务量的负荷下，在这里为了强调用户之间的公平性，可以考虑采用参数组 1。仿真果见图 3。由此可见，FROS 算法下系统总的分组时延性能略优于 EXP-rule，明显优于 M-LWDF。

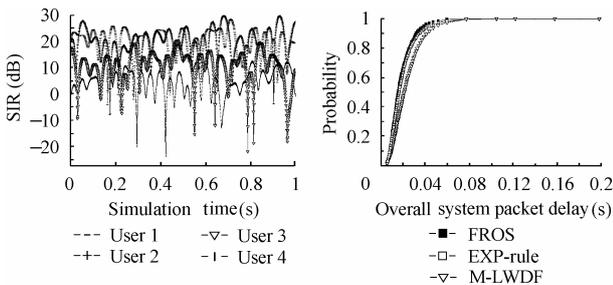


图 2 用户的信道衰落情况
Fig.2 ample path of channel fading

图 3 平稳信道条件下的系统分组时延累计分布
Fig.3 Cumulative Distribution of overall system packet delay over stationary wireless channels

表 2 各用户的 QoS 参数
Table 2 QoS parameters

	离基站 距离(m)	吞吐量 要求 r (kbps)	时延要求 T (ms)	时延 要求 ξ
用户 1	100	320	100	0.05
用户 2	100	320	100	0.05
用户 3	250	320	100	0.05
用户 4	500	320	100	0.05

场景 2 假定用户 1 以 32km/h 的速率向小区边缘移动，用户 4 以 32km/h 的速率向基站移动，45s 后停止移动。这里用户 1 和用户 4 的平均信道条件发生明显漂移，处于非平稳状态。此时对于用 $\mu_i(t)/\overline{\mu_i(t)}$ 来判断用户信道的相对状态就会发生一定程度的误判。因此，采用 $\mu_i(t)/\overline{\mu_i(t)}$ 来获得的多用户分集的增益比平稳信道条件下所获得的多用户分集增益少，系统的容量也会相应的减小。在此情况下，为了着重对系统总体性能的优化，我们采用参数组 2。由仿真结果(图 4(a)–图 4(c))知，相对于 M-LWDF 和 EXP-rule 算法，在 FROS 算法下系统的时延性能受到用户平均信道漂移的影响最小。FROS 算法下系统总的分组时延性能明显优于 M-LWDF 和 EXP-rule (见图 5)。

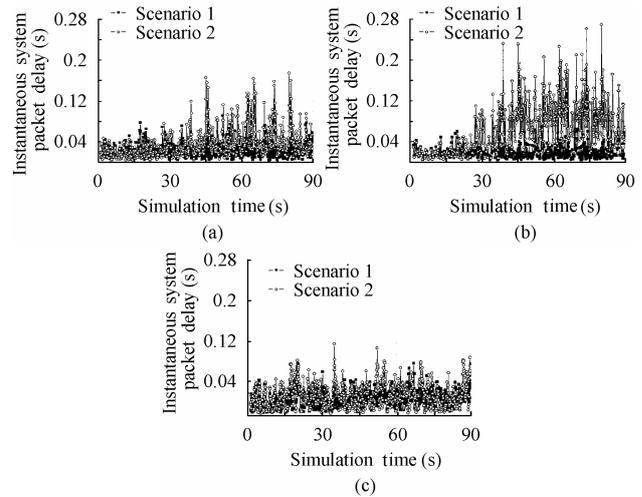


图 4 (a)平均信道条件漂移对 M-LWDF 算法的影响
(b)平均信道条件漂移对 EXP-rule 算法的影响
(c)平均信道条件漂移对 FROS 算法的影响

Fig.4 (a) Performance of M-LWDF under the influence of average-channel-condition drift
(b) Performance of EXP-rule under the influence of average-channel-condition drift
(c) Performance of FROS under the influence of average-channel-condition drift

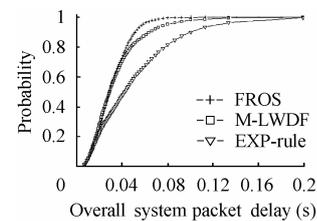


图 5 非平稳信道条件下的系统分组时延累计分布
Fig.5 Cumulative distribution of overall system packet delay over non-stationary wireless channels

5 结束语

本文所设计的无线分组调度算法，能在优化系统分组时延性能和优化系统吞吐量性能之间保持很好的平衡和折衷，算法性能优于文献中 M-LWDF 和 EXP-rule 算法，特别是在用户由于移动等因素引起平均信道条件为非平稳的情况下，FROS 算法的性能优势更加明显。在实际应用中，不同的调

度算法性能适合于不同的应用需求。FROS 算法能通过参数的直观调整, 达到不同的性能要求, 具有很好的灵活性。

在 FROS 算法中, 我们所建立的模糊推理系统模型的模糊规则本质上是在利用启发性知识对问题模型的特征进行解释的基础上预先获得的。如果结合神经网络技术的自学习功能, 自适应地确定隶属度函数的形状及自适应调整模糊规则中的可变参数值, 我们预见 FROS 算法的性能将会得到进一步的改善, 也将变得更加智能化, 以充分适应不同应用的需要, 这将作为我们今后的研究目标。

参 考 文 献

- [1] 3GPP Technical Report 25.848, Physical layer aspects of UTRA High Speed Downlink Packet Access, version 4.0.0, March 2001.
- [2] Qi Bi, Brown R, *et al.*. Performance of 1xEV-DO third-generation wireless high-speed data systems. *Bell Labs Technical Journal* 2003, 7(3): 97–107.
- [3] Shin Seokjoo, Yoon Yeomin, Kim Kiseon. Performance of the packet scheduling schemes in DS/CDMA systems. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, New Orleans, Louisiana, USA, Mar. 2003, vol. 4, no. 1: 1639–1644.
- [4] Holma H, Toskala A. WCDMA FOR UMTS – Radio Access for Third Generation Mobile Communication (second edition). England: John Wiley & Sons, 2001, Chapter 11.
- [5] Kolding T. Link and system performance aspects of proportional fair scheduling in WCDMA/HSDPA. *Vehicular Technology Conference*, 2003. VTC 2003-Fall. 2003 IEEE 58th, USA, October 2003, Vol. 3: 1717–1722.
- [6] Tse D. Multiuser Diversity in Wireless Networks, Stanford University, April 16, 2001, <http://www.eecs.berkeley.edu/~dtse/stanford416.ps>.
- [7] Shakkottai S, Stolyar A L. Scheduling algorithms for a mixture of real-time and non-real-time data in HDR. *Proceedings of the 17th International Teletraffic Congress - ITC-17*, Salvador da Bahia, Brazil, 24–28 September, 2001: 793–804.
- [8] Andrews M, Kumaran K, *et al.*. Providing quality of service over a shared wireless link. *IEEE Communications Magazine*. 2001, 39(2): 150–154.
- [9] Andrews M, Kumaran K, Ramanan K, Stolyar A L, Vijayakumar R, Whiting P. Scheduling in a queueing system with asynchronously varying service rates. *Probability in the Engineering and Informational Sciences*, Cambridge University Press, 2004: Vol.18:191–217.
- [10] Andrews M, Zhang Lisa. Scheduling over non-stationary wireless channels with finite rate sets. *Proceedings of IEEE INFOCOM '04*, Hong Kong, March 2004.
- [11] Stallings W 著, 齐望东等译. 高速网络与互联网—性能与服务质量, 第二版, 北京: 电子工业出版社, 第17章, 366页.
- [12] Wang L X. Fuzzy systems are universal approximators. *Proceedings of IEEE International Conf. on Fuzzy Systems*, San Diego, 1992: 1163–1170.
- [13] Tanaka K, Wang H. Fuzzy Control Systems Design and Analysis: A Linear Matrix Inequality Approach. England: John Wiley & Sons, 2001, Chapter 14, Chapter 2.

聂伯霖: 男, 1979年生, 硕士生, 研究方向为CDMA蜂窝通信系统中的资源管理。

李乐民: 男, 1932年生, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 研究方向为通信网, 包括宽带通信网、移动通信网。