

基于实时业务挤占的 OFDMA 系统的无线资源分配方案

王 斌^{*①②} 付茂豹^① 王文霁^①

^①(南京邮电大学通信与信息工程学院 南京 210003)

^②(南京邮电大学宽带无线通信与传感网技术教育部重点实验室 南京 210003)

摘 要: 为了在实时业务和非实时业务共享无线资源的场景中增加系统吞吐量, 该文提出了一种基于实时业务挤占的无线资源分配方法, 该方案首先实施统一调度, 然后进行实时业务挤占过程。在保证对实时业务服务的情况下, 实时业务挤占的无线资源分配方案提高了多用户分集效果, 增加了系统的吞吐量。理论和仿真分析表明, 与已有的传统的实时业务和非实时业务共享无线资源的调度方案相比, 该方案能够提供更高的系统吞吐量和频谱效率。在实际应用中, 该方案具有一定的可行性和可操作性。

关键词: 无线通信; 比例公平调度; 资源分配; 吞吐量; 多用户分集

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)08-1956-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.01378

An Occupying Proportional Fair Scheduling Based on OFDMA for Wireless Resource Allocation

Wang Bin^{①②} Fu Mao-bao^① Wang Wen-nai^①

^①(College of Telecommunications & Information Engineering,

Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

^②(Key Lab of Broadband Wireless Communication and Sensor Network Technology,

Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: In order to improve the system throughput when the wireless resource are shared by real and no-real services, a new type proportional fairness scheme for real time services occupying no-real time services is proposed, which first carries out union proportional fair scheduling, and then follows the procedure of real-time service occupying no-real-time service. The packet scheduling not only can guarantee the resource allocation of real time services, but also acquire better multi-user diversity gain. Theoretical analysis and simulation show that the suggested scheme can effectively improve the system throughput and spectrum efficiency in comparison with the existing approaches.

Key words: Wireless communication; Proportional fair scheduling; Resource allocation; Throughput; Multi-user diversity

1 引言

作为新一代宽带无线通信系统的代表 LTE 和 WiMAX 已全面支持分组通信, 无线资源分组调度的重要性已经变得日益突出。无线资源分组调度方案与固定通信网中的分组调度方案有很大的区别, 主要是要考虑无线信道的时变特性和多用户分集的

效果。目前, 很多研究^[1-5] 已经对单业务的无线资源分配展开了研究, 这些算法主要是针对无线信道的特点来增加系统的吞吐量。

文献[6-10]考察了多业务场景的无线资源分配方案。文献[6]提出了一种 M-LWDF 算法, 它尽可能最大化地满足具有 QoS 要求的移动用户的数目, 但是该方案的系统容量受到很大限制。文献[7]提出了一种新奇的两层调度方案, 第 1 层的 FLS(Frame Level Scheduler, FLS)调度器确定在一帧内需要调度的实时业务数据量, 然后交给第 2 层的 PF(Proportional Fair, PF)调度器, 完成实时业务和非实时业务的共享资源调度, 这种方案在保证实时业务 QoS 的前提下提高了系统的容量。文献[8]将需

2011-12-26 收到, 2012-03-22 改回

国家科技重大专项(2011ZX03005-004-03), 江苏省高校自然科学基金基础研究重大项目(10KJA510037), 南京邮电大学引进人才项目(NY209002), 南京邮电大学宽带无线通信与传感网技术教育部重点实验室开放研究基金(NYKL201108)和江苏高校优势学科建设工程资助项目(信息与通信工程)资助课题

*通信作者: 王斌 wangbin7062@sohu.com

要周期性预留资源的业务看成睡眠业务，将为实时业务提供最小带宽保证的问题转化为最大化为睡眠业务提供睡眠时间的问题。文献[9,10]探讨了实时视频业务流的无线资源分配问题，方案将系统的吞吐量，QoS 限制和调度的公平性统一作为交叉层设计考虑的范畴，通过恰当的视频编码和 AMC 编码来提高系统的容量和保证业务的 QoS。

文献[6-10]虽然考虑了实时业务的资源分配，但是没有考虑时延抖动要求为 0 的苛刻实时业务(如：VoIP 和实时视频，这类业务在缓存中存储的时间为 0)与非实时业务共享资源的调度，本文将针对该问题展开讨论，主要贡献如下：

(1)通过理论推导，得到针对时延抖动为 0 的实时业务与非实时业务共享资源的在线调度方案—OPF(Proportional Fair scheduling for real-time service Occupying no- real-time service)。

(2)从理论上证明 OPF 方案是时延抖动为 0 的实时业务与非实时业务共享资源的所有调度方案中的最优解决方法。

(3)运用系统级仿真在 LTE 系统中对 OPF 方案展开性能评估。

2 基于实时业务挤占的无线资源分配方案

2.1 系统模型和相关定义

假定系统中有一个基站，并且它的小区内有多个移动用户，基站根据移动用户的信道质量指示符(Channel Quality Indicator, CQI)反馈确定用户的传输速率，系统内的相关参数定义如下： K 为每个小区内的用户数， $r_{im}(t)$ 为表示在 t 时隙，用户 i 在资源块 m (Resource Block, RB)上能获得的最大速率。 $I_{im}(t)$ 为当用户 i 选取资源块 m 时， $I_{im}(t) = 1$ ，否则 $I_{im}(t) = 0$ 。 $R_i(t+1)$ 为表示到 $t+1$ 时隙为止，用户 i 获得的平均速率，具体为

$$R_i(t+1) = (1-1/T)R_i(t) + (1/T) \cdot \sum_{m=1}^{N_{RB}} r_{im}(t+1)I_{im}(t+1) \quad (1)$$

其中 N_{RB} 是用户系统的资源块的总数。

2.2 OPF 资源调度的理论基础

OPF 算法的核心是用统一调度过程没有调度上的实时业务用户挤占非实时业务用户的资源(统一调度过程已经分配的资源)。调度分为统一调度过程和挤占过程，具体如下：

(1)统一调度过程：首先不区分实时业务和非实时业务，按照 PF 的方法进行调度。

(2)挤占过程：检查统一调度过程没有调度上的实时业务用户，用所述的实时业务用户按照挤占规

则占用非实时业务用户的资源(用统一调度过程已经分配的资源)。

首先给出统一调度过程中不区分实时业务和非实时业务的基于 OFDMA 系统的 PF 在线调度方案。

由文献[11]可知，PF 的调度问题可以表达为

$$\max \left\{ \lim_{t \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^K \ln(R_i(t)) \right\} \quad (2)$$

其中 $\ln(\cdot)$ 为以 e 为底的对数函数。

为了获得 PF 在 OFDMA 系统中的在线调度方法，本文首先考虑 $U(R(t)) = \sum_{i=1}^K \ln(R_i(t))$ 的变化量，即

$$U(R(t)) - U(R(t-1)) = \sum_{i=1}^K \ln(R_i(t)) - \sum_{i=1}^K \ln(R_i(t-1))$$

在较大时间窗口范围内，由于用户的平均吞吐量在一次调度时间范围内的变化量是非常小的，所以在 $x_0 = R_i(t-1)$ 处，运用泰勒公式对 $\ln(R_i(t))$ 进行展开，得到

$$\ln(R_i(t)) \approx \ln(R_i(t-1)) + (R_i(t) - R_i(t-1)) / R_i(t-1)$$

进而可以得到

$$\begin{aligned} U(R(t)) - U(R(t-1)) & \approx \sum_{i=1}^K (R_i(t) - R_i(t-1)) / R_i(t-1) \\ & = \sum_{i=1}^K \sum_{m=1}^{N_{RB}} ((r_{im}(t)I_{im}(t)) / R_i(t-1)) \end{aligned} \quad (3)$$

由式(3)可知，统一调度过程可以描述为

$$\max \left(\sum_{m=1}^{N_{RB}} \sum_{i=1}^K \left(\frac{r_{im}(t)I_{im}(t)}{R_i(t-1)} \right) \right) \quad (4)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^K I_{im}(t) = 1 \quad (5)$$

式(5)说明了在一个时隙内一个资源块只能分配给一个用户。

在统一调度过程中，有些实时业务用户没有被调度上，因此，必须采用挤占的方法来保证这些实时业务被调度上。

假设统一调度过程中，没有被调度上的实时业务用户(数目为 Q 个)构成的集合为 $\Phi = \{UE_{b_1}, \dots, UE_{b_Q}\}$ ；而在假设统一调度过程中，非实时业务用户分配到的资源块有 M 个($M \leq N_{RB}$)，它们构成的集合为 $\Omega = \{RB_{n_1}, RB_{n_2}, \dots, RB_{n_M}\}$ ，这些非实时业务用户在所述分配的资源块上对应的权重组成的集合为

$$\begin{aligned} P_{NRT} & = \{P_{n_1}, P_{n_2}, \dots, P_{n_i}, \dots, P_{n_M}\}, \\ P_{n_i} & = r_{ai,mi}(t) / R_{ai}(t-1) \end{aligned}$$

其中 $r_{ai,mi}(t)$ 为非实时用户 UE_{ai} 在所分配的资源块

RB_{ni}上获得的速率, $R_{ai}(t-1)$ 为用户 UE_{ai}的平均速率。

挤占过程的资源重新分配可以表示为

$$\begin{aligned} \min & \left(\sum_{m=n1}^{nM} \sum_{i=b1}^{bQ} \left(P_m - \frac{r_{im}(t)I_{im}(t)}{R_i(t-1)} \right) \right), \\ \text{s.t.} & \sum_{i=b1}^{bQ} I_{im}(t) = 1 \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)的主要思想是: 在统一调度过程中没有被调度上的实时业务用户对非实时业务占用的资源(已经调度上)进行抢占的调度过程要对统一调度过程的结果造成的影响最小。

需要特别指出的是: $P_m - \frac{r_{im}(t)I_{im}(t)}{R_i(t-1)} \geq 0$, 原

因是: P_m 是由统一调度过程的式(4)得到的, 它是所有用户选取资源块 m 的权重值中的最大的一个。

2.3 OPF 资源调度算法描述

OPF 资源调度算法的具体过程如表 1 和表 2 所示。

表 1 UE 在 RB 上的传输速率

	RB ₁	RB ₂	...	RB _N
UE ₁	r_{11}	r_{12}	...	r_{1N}
UE ₂	r_{21}	r_{22}	...	r_{2N}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
UE _K	r_{K1}	r_{K2}	...	r_{KN}

表 2 UE 在 RB 上的权重值

	RB ₁	RB ₂	...	RB _N
UE ₁	P_{11}	P_{12}	...	P_{1N}
UE ₂	P_{21}	P_{22}	...	P_{2N}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
UE _K	P_{K1}	P_{K2}	...	P_{KN}

步骤 1 假设基站在每个 TTI 都能获得 UE 的信道质量反馈报告(CQI 反馈), 信道质量报告的详细程度涵盖系统的所有频段。如表 1 所示, 根据 CQI 反馈计算每个 UE_i 在各个资源块 m 上所能获得的最大传输速率 $r_{im}(t)$ 。

步骤 2 由步骤 1 的结果计算 $P_{im}=r_{im}(t)/R_i(t-1)$ 形成表 2 的 2 维矩阵表中的权重值。

步骤 3 在表 2 的 2 维矩阵表中寻找 UE 和 RB 对应的最大权重值。

步骤 4 将所述的最大权重值对应的 RB 分配给相应的 UE。

步骤 5 删除所述的最大权重值对应的列 (RBs)。

步骤 6 对剩下的子矩阵重复步骤 3 到步骤 5 的过程, 直到所有的 RB 都被分配完毕。

步骤 7 获取非实时业务的调度结果, 非实时业务用户分配到的资源块有 M 个 ($M \leq N_{RB}$), 它们构成的集合为 $\Omega = \{RB_{n1}, RB_{n2}, \dots, RB_{nM}\}$, 这些非实时业务用户在所述分配的资源块上对应的权重组成的集合为

$$P_{RT} = \{P_{n1}, P_{n2}, \dots, P_{ni}, \dots, P_{nM}\}$$

步骤 8 检查 UE 集合中是否存在没有被调度的实时业务的用户, 将所述的这些用户组成集合 $\Phi = \{UE_{b1}, \dots, UE_{bQ}\}$ 。

步骤 9 将集合 Φ 中的用户在集合 Ω 的元素上计算权重 $M_{bj,ni}(t) = r_{bj,ni}(t)/R_{bj}(t-1)$, 然后计算抢占权重 $W_{bj,ni}(t) = P_{ni} - M_{bj,ni}$, 构成表 3 中的 2 维矩阵表, 行表示统一调度过程中分配给非实时业务的资源块, 列为统一调度过程中没有被调度上的实时业务用户。

表 3 实时业务的 UE 在 RB 上的抢占权重值

	RB _{n1}	RB _{n2}	...	RB _{nM}
UE _{b1}	$W_{b1,n1}$	$W_{b1,n2}$...	$W_{b1,nM}$
UE _{b2}	$W_{b2,n1}$	$W_{b2,n2}$...	$W_{b2,nM}$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
UE _{bQ}	$W_{bQ,n1}$	$W_{bQ,n2}$...	$W_{bQ,nM}$

步骤 10 在表 3 的 2 维矩阵表中寻找 UE 和 RB 对应的最小抢占权重值。

步骤 11 将所述的最小抢占权重值对应的 RB 分配给对应的 UE。

步骤 12 删除所述的最小抢占权重值对应的列 (RBs)。

步骤 13 对剩下的子矩阵重复步骤 10 到步骤 12 的过程, 直到所有的实时业务用户被服务完毕。

步骤 14 根据式(1)更新 UE 的平均速率。

3 OPF 方案的理论分析

本节将从理论上证明 OPF 无线调度算法能够更加有效地利用多用户分集效果, 在实时业务和非实时业务的共享资源调度中是资源利用最佳的方案。为了说明这一点, 下面首先证明在每个调度时隙 OPF 无线调度算法是最优的。

假设调度器 S 是 OPF 调度器, 调度器 F 是其他种类的支持实时业务和非实时业务的共享资源调度方案。在时隙 t 内, 两类调度器必须调度完毕的

拥有实时业务的用户的集合是 Ψ 。在时隙 t 内，对于调度器 S 而言，统一调度过程 S^T 调度完毕后，与第 m 个资源块配对的用户在该资源块上对应的权重是 P_m ，挤占调度过程 S^O 调度完毕后，与第 m 个资源块配对的用户在该资源块上对应的权重是 Q_m ；而对于调度器 F 来说，与第 m 个资源块配对的用户在该资源块上对应的权重是 J_m 。

由于调度器 F 在时隙 t 必须将集合 Ψ 内的拥有实时业务用户的数据调度完毕，所以调度器 F 必须首先调度集合 Ψ 内的用户，然后再去调度其它非实时业务的用户。由此可以推断出，统一调度过程 S^T 的多用户分集效果比调度系统 F 的多用户分集效果强，即，在统一调度过程 S^T 中，每个资源块能够服务的用户范围比调度系统 F 更大。

因此，由式(4)可知： $P_m \geq J_m$ 。

那么对于统一调度过程 S^T 而言

$$\sum_{m=1}^{N_{RB}} P_m \geq \sum_{m=1}^{N_{RB}} J_m \quad (7)$$

由于调度器 S 是调度器 F 的一个特例，并且由式(6)可知 $\sum_{m=1}^{N_{RB}} Q_m$ 最接近 $\sum_{m=1}^{N_{RB}} P_m$ ，因此有：

$$\sum_{m=1}^{N_{RB}} Q_m \geq \sum_{m=1}^{N_{RB}} J_m, \quad \text{即}$$

$$\left. \begin{aligned} & \sum_{m=1}^{N_{RB}} \sum_{i=1}^K ((r_{im}^S(t) I_{im}^S(t)) / R_i^S(t-1)) \\ & \geq \sum_{m=1}^{N_{RB}} \sum_{i=1}^K ((r_{im}^F(t) I_{im}^F(t)) / R_i^F(t-1)) \\ & \sum_{i=1}^K (R_i^S(t) - R_i^S(t-1)) / R_i^S(t-1) \\ & \geq \sum_{i=1}^K (R_i^F(t) - R_i^F(t-1)) / R_i^F(t-1) \\ & \sum_{i=1}^K \ln(R_i^S(t)) - \sum_{i=1}^K \ln(R_i^S(t-1)) \\ & \geq \sum_{i=1}^K \ln(R_i^F(t)) - \sum_{i=1}^K \ln(R_i^F(t-1)) \\ & \sum_{\tau=1}^t \left(\sum_{i=1}^K \ln(R_i^S(\tau)) - \sum_{i=1}^K \ln(R_i^S(\tau-1)) \right) \\ & \geq \sum_{\tau=1}^t \left(\sum_{i=1}^K \ln(R_i^F(\tau)) - \sum_{i=1}^K \ln(R_i^F(\tau-1)) \right) \\ & \sum_{i=1}^K \ln(R_i^S(t)) \geq \sum_{i=1}^K \ln(R_i^F(t)) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式(8)说明调度系统 S 的系统吞吐量比调度系统 F 的系统吞吐量要高。因此，对于采用 PF 方案的实时(时延抖动为 0)和非实时业务系统，OPF 调度方案的系统吞吐量无疑是最佳的。

4 OPF 资源分配的仿真分析

4.1 系统级仿真概述

系统仿真采用 19 个小区，中心为参考小区，周边两层为干扰小区。每个小区有 3 个扇区。仿真的评估是针对中心小区的一个扇区，仿真时长选取为 100 s(即 100000TTI)。仿真选取两类业务，一类是有时延容忍限度的视频业务，另一类是在缓存中排队时延为 0 的 VoIP 业务(到达就被服务)，仿真的具体参数表 4 所示。

表 4 仿真参数的设置

仿真参数名称	参数内容
仿真时长	100 s, 即: 100000 TTI
载波频率和带宽	中心频率 2.0 GHz, 带宽 5 MHz, 25 个 RB
热噪声密度	-174 dBm/Hz
接收机噪声值	9 dB
MIMO 天线配置	2×2
MIMO 天线模型	符合 SCM 模型
小区结构	19 个小区, 每个小区 3 个扇区
路损模型	$L = 128.1 + 37.6 \lg(d)$, d 是基站和 UE 之间的距离, 单位是 km
阴影衰落模型	对数正态分布, 方差为 10 dB
基站间的距离	500 m
基站的发射功率	43 dBm
有效信噪比算法	EESM 模型
VoIP 业务	50%用户为 VoIP 业务, 激活期 20 ms, 静默期为 160 ms, 激活期平均包长度 40 byte
Video 业务	50%用户为 Video 业务, 最小速率 64 kbit/s

在系统级仿真中，为了获得用户在资源块上的传输速率，首先要计算用户在每个子载波上的信干噪比，子载波的信干噪比为

$$\text{SINR} = (P_{tx} |h_0|^2) / \left(\sigma^2 + \sum_{l=1}^{\text{int}} P_{tx}^l |h_l|^2 \right) \quad (9)$$

式(9)中 $P_{tx} |h_0|^2$ 是用户在所述子载波上接收到的有用信号的功率， $\sum_{l=1}^{\text{int}} P_{tx}^l |h_l|^2$ 为用户在该子载波上接收到其它基站发射的干扰信号的总功率。

系统级仿真中的无线资源分配的最小单元是资源块(RB)，因此需要将子载波上的信噪比映射成为资源块上的等效信噪比。EESM(Exponential Effective SIR Mapping, EESM)方法可以将多个 OFDM 子载波上的 SINR 通过指数形式映射成资源块的等效的 SINR，等效 SINR 为

$$\gamma_{\text{eff}} = -\beta \ln \left((1/N) \sum_{k=1}^N e^{-(\gamma_k)/\beta} \right) \quad (10)$$

其中 β 为尺度因子。 γ_k 为第 k 个子载波上的 SINR 值。

在得到资源块上的等效信噪比 γ_{eff} 之后, 就可以通过 γ_{eff} 来估算资源块上传输的比特数, 具体过程可以参照文献[12]。

4.2 算法性能验证

为了从仿真的角度来验证 OPF 方案的性能, 采用的对比方案有 RF-PF(Real time service First for PF scheduling)。RF-PF 方案的特点是: 对实时业务先调度, 然后再对非实时业务调度。仿真过程中实时业务用户(VoIP 业务在缓存中排队时延为 0)和非实时业务用户(Video 业务)分别各占 50%, 仿真时长选取为 100 s(即 100000TTI)。仿真分别对 OPF 方案和 RF-PF 方案的系统平均吞吐量、丢包率和系统频谱利用率等 3 方面的性能展开研究。

如图 1 所示, OPF 方案的系统平均吞吐量明显优于 RF-PF 方案, 并且随着用户数的增加, 两种方案的系统平均吞吐量都呈上升趋势, 但是它们随着用户数的增加的上升速度是不一样的。从图中可以看出, 随着用户数的增加, OPF 方案的系统平均吞吐量的增幅高于 RF-PF 方案的系统平均吞吐量, 因此, OPF 方案的系统平均吞吐量明显要优于 RF-PF 方案。造成这种现象的原因是: OPF 无线调度算法能够更加有效地利用多用户分集效果, 并且这种多用户分集增益效果随着用户数的增加而更加明显。

如图 2 所示, OPF 方案的丢包率略高于 RF-PF

方案, 两种方案的丢包率的增加幅度随着用户数的增加而增加。但是, OPF 方案的丢包率在用户可以容忍的范围以内, 不会对用户的 QoS 要求造成严重影响。

图 3 所示, OPF 方案的频谱效率明显优于 RF-PF 方案, 并且随着用户数的增加, 两种方案的系统频谱效率都呈上升趋势, 但是它们随着用户数的增加的上升速度是不一样的。从图中可以看出, OPF 方案的频谱效率的增幅高于 RF-PF 方案, 明显优于 RF-PF 方案, 在一定程度上提升了资源利用率。造成这种现象的原因是: OPF 无线调度算法能够更加有效地利用多用户分集效果, 并且这种多用户分集增益效果随着用户数的增加而更加明显。

5 结论

本文首先从理论上推导出实时业务(缓存中排队时延为 0)和非实时业务共享资源在线方案——OPF, 它充分考虑了 OFDM 系统的多用户分集效果, 在保证为实时业务提供服务的基础之上, 进一步提高了系统的增益。理论分析表明, OPF 是同类方案中系统增益最大的一种, 仿真分析也说明 OPF 方案无论在系统增益和频谱效率上都比传统的 RF-PF 方案要优越。因此, 在实时业务和非实时业务共享资源的场景中, OPF 方案较传统方案具有更好的性能和实际应用前景。

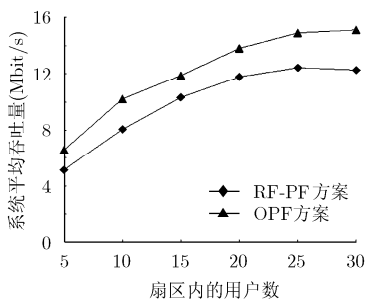


图 1 系统的平均吞吐量性能比较

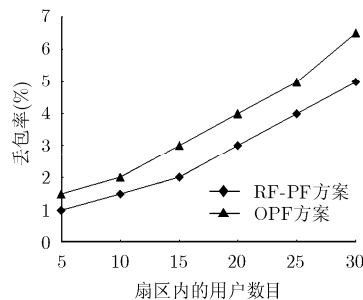


图 2 系统的丢包率性能比较

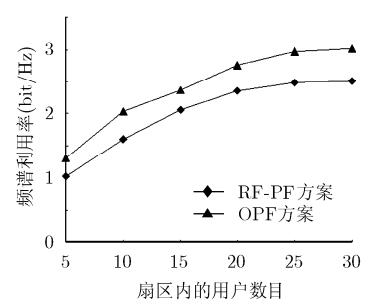


图 3 系统的频谱效率性能比较

参考文献

- [1] Kim Tae-joon and Lim Jong-Tae. Queuing analysis in a multiuser diversity system with adaptive modulation and coding scheme [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011, 60(1): 338-342.
- [2] Jung-Tsung T and Cruz R L. Opportunistic multicast scheduling for information streaming in cellular networks [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(6): 1776-1785.
- [3] Li Ming-ming, Wang Xiao-xiang, Zhang Hong-tao, et al. Resource allocation with subcarrier cooperation in OFDM-based wireless multicast system [C]. Proceedings of IEEE 64th Vehicular Technology Conference (VTC 2011), Budapest, Hungary, May 2011: 1-5.
- [4] Wu P H and Hu Y H. Optimal layered video IPTV multicast streaming over mobile WiMAX systems [J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2011, 13(6): 1395-1403.
- [5] Cui Tao, Lu Feng, Sethuraman V, et al. Throughput optimization in high speed downlink packet access (HSDPA)

- [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(2): 474-483.
- [6] Andrews M, Kumaran K, Ramanan K, *et al.* Providing quality of service over a shared wireless link [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2001, 39(2): 150-154.
- [7] Piro G, Grieco L A, Boggia G, *et al.* Two-level downlink scheduling for real-time multimedia services in LTE networks [J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2011, 13(5): 1052-1065.
- [8] Jun Yi, Poellabauer C, Hu X S, *et al.* Minimum bandwidth reservations for periodic streams in wireless real-time systems [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2011, 10(4): 479-490.
- [9] Luo Hai-yan, Ci Song, Wu Da-lei, *et al.* Quality-driven cross-layer optimized video delivery over LTE [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2011, 48(2): 102-109.
- [10] Jin-Yup H, Jinyoung O, Youngnam H, *et al.* Fair QoS-aware scheduling in dual-carrier HSDPA [C]. Proceedings of IEEE 64th Vehicular Technology Conference (VTC 2011), Budapest, Hungary, July 2011: 1-5.
- [11] Kim H and Han Y. A proportional fair scheduling for multicarrier transmission systems [J]. *IEEE Communication Letters*, 2005, 9(3): 210-212.
- [12] Technical Specification Group RAN, E-UTRA; physical layer procedures, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Tech. Rep. TS 36.213, Sept. 2011.
- 王 斌: 男, 1970 年生, 副教授, 研究方向包含低轨道卫星通信、LTE 移动通信、电信级以太网保护和高性能交换等方面。
- 付茂豹: 男, 1987 年生, 硕士生, 研究方向为 LTE 移动通信无线资源管理和干扰协调技术。
- 王文鼎: 男, 1966 年生, 教授, 目前研究方向为通信网与泛在融合技术。