

公平调度的分组调度算法设计

徐斌阳^① 蒲和平^② 李少谦^①

^①(电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室 成都 610054)

^②(电子科技大学应用数学学院 成都 610054)

摘要: 针对无线实时多媒体业务应用, 该文在算法 Exponential rule (Exp)基础上提出了一种增强调度公平性能的 Modified Exponential rule (MExp) 分组调度算法。通过理论分析和系统级仿真对算法性能进行了分析和验证。

关键词: 分组调度; 调度公平; QoS; 中断容量; Modified Exponential rule (MExp)

中图分类号: TN919.85

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)06-1462-04

Scheduling Algorithm Design for Enhanced Scheduling Fairness

Xu Bin-yang^① Pu He-ping^② Li Shao-qian^①

^①(National Key Lab of Communication, UESTC, Chengdu 610054, China)

^②(School of Applied Mathematics, UESTC, Chengdu 610054, China)

Abstract: A new packet scheduling algorithm Modified Exponential rule (MExp) is proposed for wireless real-time multimedia applications to provide enhanced scheduling fairness. The scheduling fairness of MExp is investigated through theoretical analysis and verified by system level simulation.

Key words: Packet scheduling; Scheduling fairness; QoS; Outage capacity; Modified Exponential rule (MExp)

1 引言

不同的无线业务类型有着各自 QoS 要求。从时间特性上看, 可将无线业务分为非实时业务和实时业务。相比较而言, 实时业务比非实时业务有着更严格的分组传输时间要求。通常认为, 实时业务有着较大的资源需求。现有文献对单一实时业务下的资源分配和 QoS 保证已作了较为成熟的研究。而对于实时多媒体业务应用, 除了保证单业务 QoS 以外, 为不同业务用户分配与之 QoS 要求成比例的资源份额成为有效利用无线资源的关键。这种分配的合理性程度体现在分组调度算法的调度公平性能上。已有文献对分组调度算法调度公平性能的研究多集中在业务吞吐量或者分组时延上, 如文献 [1, 2]等。而本文对调度公平性能的评估则是定义在业务 QoS 三维参数上, 它们是分组时延、丢包率(Packet Drop Rate, PDR)以及业务吞吐量。

以现有吞吐量最优的实时分组调度算法 Exponential rule (Exp)^[3]作为出发点, 本文通过改善其调度公平性能而提出一种新的分组调度算法 Modified Exponential rule (MExp), 以提高典型语音和视频应用场景下的系统容量和无线资源利用效率。

2 MExp 算法及调度公平性能分析

设 i, j 分别表示用户及业务会话类型; $\tilde{r}_i(t)$ 表示 t 时刻用户 i 的信道传输速率; $\bar{r}_{i,j}(t)$ 为用户 i 的 j 类业务会话在

统计时间间隔 T 内所获得的平均分组传输速率; r_j 表示 j 类业务会话的传输速率要求; $w_{i,j}(t)$ 为 t 时刻用户 i 的 j 类业务会话队列列首(HoL)分组的已等待时间; T_j 和 δ_j 分别表示 j 类业务会话分组的传输时延和丢包率界限。则在 Exp 分组调度算法中, 获得 t 时刻调度机会的分组队列为 $q_{\text{Exp}}(i, j)$ ^[3]:

$$q_{\text{Exp}}(i, j) = \arg \max_{i,j} \left\{ \alpha_j \frac{\tilde{r}_i(t)}{\bar{r}_{i,j}(t)} \exp \left[\frac{\alpha_j w_{i,j}(t) - \overline{AW}}{1 + \sqrt{\overline{AW}}} \right] \right\} \quad (1)$$

其中 $\alpha_j = -\log(\delta_j)/T_j$, $\overline{AW} = \frac{1}{C} \sum_i \sum_j \alpha_j w_{i,j}(t)$, C 为调度器内业务会话队列总数。

为了给不同的业务提供与 QoS 需求成比例的公平服务机会, 将分组传输时延限制引入 Exp, 并考虑业务对传输速率的要求, 得到一种新的 MExp 分组调度算法。该算法的调度策略可以用下式表示:

$$q_{\text{MExp}}(i, j) = \arg \max_{i,j} \left\{ \alpha_j r_j^2 \frac{\tilde{r}_i(t)}{\bar{r}_{i,j}(t)} \exp \left[\frac{w_{i,j}(t) - \varepsilon T_j}{T_j} \right] \right\} \quad (2)$$

其中 ε 为用于减小调度延时的算法参数, 取值区间为 [0,1]。

考虑一种调度缓冲区内存在两种类型的业务会话队列(表示为 Q_a 和 Q_b)的调度模型。这两种队列分别存放由业务源 S_a 和 S_b 产生的分组数据。两类业务源产生分组的数据率分别为 r_a 和 r_b , 其分组传输时延界限为 T_a 和 T_b , 对丢包率的要求分别是 δ_a 和 δ_b 。假定在调度开始时刻, 调度缓冲区内所有会话队列均获得期望业务吞吐量, 即 $\bar{r}_{i,j}(0) = r_j$, $j \in \{a, b\}$ 。并假定用户信道在调度周期内静止不变。采用瑞利衰落模型表征用户信道状态。由此, 可将用户信道状态

$h_i(t)$ 视为相互独立的随机过程, 且调度时刻 t_0 的信道状态随机变量 $h_i(t_0)$ 服从瑞利分布。

在实时业务的分组调度过程中, 若缓冲区内的同一类业务会话队列数目较大, 则该类业务会话队列HoL的分组等待时间 $w_{i,j}(t)$ 可用服从均匀分布的随机变量 w_j ¹⁾ 来近似描述。

即 w_j 的概率密度函数可由式(3)给出:

$$f_{w_j}(x) = \begin{cases} 1/T_j, & 0 \leq x \leq T_j \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (3)$$

并且, 信道状态随机变量 h_η ²⁾ 的概率密度函数为

$$f_{h_\eta}(x) = \begin{cases} \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), & x > 0 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (4)$$

对于 MExp 算法, 其调度优先级函数式(2)可用随机变量函数 ξ_j^I 描述,

$$\xi_j^I = \alpha_j r_j^2 \frac{\tilde{r}_\eta}{\tilde{r}_j} \exp\left(\frac{w_j - \varepsilon T_j}{T_j}\right) = \kappa_j \tilde{r}_\eta \exp\left(\frac{w_j - \varepsilon T_j}{T_j}\right) \quad (5)$$

其中 $\kappa_j = \alpha_j r_j^2 / \tilde{r}_j$, $j \in \{a, b\}$ 。则 Q_b 类业务队列在当前调度周期内所获得的调度机会可以用下式表示:

$$P_{\text{MExp}}\{t \mapsto Q_b\} = \Pr\{\xi_a^I \leq \xi_b^I\} = \Pr\left\{\frac{\kappa_a \tilde{r}_a}{\kappa_b \tilde{r}_b} \leq \exp\left(\frac{w_b}{T_b} - \frac{w_a}{T_a}\right)\right\} \quad (6)$$

令 $\kappa = \kappa_a / \kappa_b$, $\psi = \tilde{r}_a / \tilde{r}_b$ 和 $\phi_I = \exp(w_b/T_b - w_a/T_a)$ 。

根据 Shannon 定理,

$$\psi = \frac{\tilde{r}_a}{\tilde{r}_b} = \frac{\log_2(1+h_a)}{\log_2(1+h_b)} = \frac{\ln(1+h_a)}{\ln(1+h_b)} \quad (7)$$

其中信道带宽、发射功率和噪声功率均为归一化。

令 $\psi_\eta = \ln(1+h_\eta)$, $\eta \in \{a, b\}$, 则 ψ_η 的概率密度函数可表示为

$$f_{\psi_\eta}(x) = \begin{cases} \frac{e^x - 1}{\sigma^2} \exp\left[-\frac{(e^x - 1)^2}{2\sigma^2}\right], & x > 0 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (8)$$

当 h_η 处在低信噪比(SNR)状态时³⁾, 式(8)可以借助泰勒展开式由下式逼近:

$$f_{\psi_\eta}(x) = \begin{cases} \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), & x > 0 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (9)$$

于是, ψ 的概率密度函数为

$$f_\psi(x) = \begin{cases} \frac{2x}{(1+x^2)^2}, & x > 0 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (10)$$

根据式(3), 可得到 ϕ_I 的概率密度函数

$$f_{\phi_I}(x) = \begin{cases} (1+\ln x)/x, & e^{-1} \leq x < 1 \\ (1-\ln x)/x, & 1 \leq x < e \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

由于随机变量函数 ψ 和 ϕ_I 相互独立, 式(6)可以通过下式求解。

$$P_{\text{MExp}}\{t \mapsto Q_b\} = \Pr\{\kappa\psi \leq \phi_I\} = \int_{e^{-1}}^e \int_0^{y/\kappa} \frac{2x}{(1+x^2)^2} \cdot f_{\phi_I}(y) dx dy = \int_{e^{-1}}^1 \frac{y(1+\ln y)}{\kappa^2 + y^2} dy + \int_1^e \frac{y(1-\ln y)}{\kappa^2 + y^2} dy \quad (11)$$

对于 Exp 算法, 其调度优先级函数式(1)可以用随机变量函数 ξ_j^{II} 描述:

$$\xi_j^{\text{II}} = \alpha_j \frac{\tilde{r}_\eta}{\tilde{r}_j} \exp\left(\frac{\alpha_j w_j - c}{1 + \sqrt{c}}\right) = k_j \tilde{r}_\eta \exp\left(\frac{\alpha_j w_j - c}{1 + \sqrt{c}}\right) \quad (12)$$

其中 $k_j = \alpha_j / \tilde{r}_j$, $j \in \{a, b\}$ 且 $c = \overline{AW}$ 。

于是, Exp 调度算法为 Q_b 类业务队列分配的调度机会大小为

$$P_{\text{Exp}}\{t \mapsto Q_b\} = \Pr\{\xi_a^{\text{II}} \leq \xi_b^{\text{II}}\} = \Pr\left\{\frac{k_a}{k_b} \cdot \frac{\tilde{r}_a}{\tilde{r}_b} \leq \exp\left(\frac{\alpha_b w_b - \alpha_a w_a}{1 + \sqrt{c}}\right)\right\} \quad (13)$$

令 $k = k_a/k_b$, $\psi = \tilde{r}_a/\tilde{r}_b$, $\phi_{\text{II}} = \exp[(\alpha_b w_b - \alpha_a w_a)/(1 + \sqrt{c})]$, $p_j = \alpha_j/(1 + \sqrt{c})$, $j \in \{a, b\}$ 及 $\nu = 1 + \sqrt{c}$ 。

当 $T_b p_b \geq T_a p_a$ 时, 可得 ϕ_{II} 的概率密度函数为

$$f_{\phi_{\text{II}}}(x) = \begin{cases} (2\nu + \nu^2 \ln x)/6x, & e^{-2/\nu} \leq x < 1 \\ \nu/3x, & 1 \leq x < e^{1/\nu} \\ (3\nu - \nu^2 \ln x)/6x, & e^{1/\nu} \leq x < e^{3/\nu} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (14)$$

由于 ψ 和 ϕ_{II} 相互独立, 由式(10)和式(14), 计算式(13)可得

$$P_{\text{Exp}}\{t \mapsto Q_b\} = \Pr\{k\psi \leq \phi_{\text{II}}\} = \int_{e^{-2/\nu}}^{e^{3/\nu}} \int_0^{y/k} \frac{2x}{(1+x^2)^2} \cdot f_{\phi_{\text{II}}}(y) dx dy = \frac{\nu}{2} \left(\int_{e^{-2/\nu}}^1 \frac{y}{k^2 + y^2} dy + \int_{e^{1/\nu}}^{e^{3/\nu}} \frac{y}{k^2 + y^2} dy \right) + \frac{\nu}{3} \int_1^{e^{1/\nu}} \frac{y}{k^2 + y^2} dy + \frac{\nu^2}{6} \left(\int_{e^{-2/\nu}}^1 \frac{y \ln y}{k^2 + y^2} dy - \int_{e^{1/\nu}}^{e^{3/\nu}} \frac{y \ln y}{k^2 + y^2} dy \right) \quad (15)$$

一般地, 若缓冲区内有 M 个 Q_a 和 N 个 Q_b 类队列, 则这两类业务单个队列获得的调度机会比为

$$P\{t \mapsto q_a\} : P\{t \mapsto q_b\} = \frac{1 - P\{t \mapsto Q_b\}}{M} : \frac{P\{t \mapsto Q_b\}}{N} \quad (16)$$

考虑用户的业务 QoS 需求, 一个公平的调度机制当使得

$$\bar{P}\{t \mapsto q_a\} : \bar{P}\{t \mapsto q_b\} = f(\delta_a) \frac{r_a}{T_a} : f(\delta_b) \frac{r_b}{T_b} \quad (17)$$

其中 $f(\cdot)$ 应为非线性单调递增正值函数。在此, $f(\cdot)$ 取对数函数形式。于是, 式(17)变换成

$$\bar{P}\{t \mapsto q_a\} : \bar{P}\{t \mapsto q_b\} = -\log(\delta_a) \frac{r_a}{T_a} : -\log(\delta_b) \frac{r_b}{T_b} \quad (18)$$

考虑典型的语音^[4]和视频流^[5]多媒体应用, 其业务 QoS 参数如表 1 所示。由式(18)可得针对这两类实时业务应用的

¹⁾为简便起见, 时间标识和用户脚标均已省略, 如 w_j 表示 $w_{i,j}(t)$ 。

²⁾ h_η , \tilde{r}_η 及 ψ_η 中的 η 为 j 类业务队列的用户集合标识。

³⁾当 h_η 处于高SNR时, 随机变量 ψ 的概率密度求解异常复杂。本文选取 h_η 处于低SNR状态下的调度情形进行分析

表1 语音与视频业务 QoS 参数

业务类型	分组传输时延界限 T_j (ms)	丢包率界限 δ_j	业务传输速率要求 r_j (kbps)
语音	80	0.01	32
视频	280	0.001	144

公平调度机会比为

$$\bar{P}\{t \mapsto q_a\} : \bar{P}\{t \mapsto q_b\} \approx 0.4 : 0.6 \quad (19)$$

对于MExp调度算法, 将表1中的QoS参数代入式(11)和式(16)可以得到两类业务单个队列的调度机会比:

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{MExp}}\{t \mapsto q_{vo}\} : P_{\text{MExp}}\{t \mapsto q_{vi}\} &= 0.23 : 0.77, \\ &\text{当 } M : N = 1 : 1 \\ P_{\text{MExp}}\{t \mapsto q_{vo}\} : P_{\text{MExp}}\{t \mapsto q_{vi}\} &= 0.38 : 0.62, \\ &\text{当 } M : N = 1 : 2 \\ P_{\text{MExp}}\{t \mapsto q_{vo}\} : P_{\text{MExp}}\{t \mapsto q_{vi}\} &= 0.13 : 0.87, \\ &\text{当 } M : N = 2 : 1 \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

引用文献[6]提出的一种针对资源需求的公平指数(Fairness Index, FI)函数对算法的调度公平性能作定量评价。该公平指数函数为

$$f(x) = \frac{(\sum x_j)^2}{n \cdot \sum x_j^2}, \quad x_j = \begin{cases} a_j/d_j, & a_j < d_j \\ 1, & \text{其它} \end{cases} \quad (21)$$

在本文中, d_j 的含义为 j 类业务的调度机会需求, a_j 则为对应的分配所得。

由式(19), 式(20)及式(21)可以得到 MExp 算法在 3 种业务队列比例应用条件下获得的调度公平指数:

$$\left. \begin{aligned} FI_{\text{MExp}} &= 0.93, \text{ 当 } M : N = 1 : 1 \\ FI_{\text{MExp}} &= 0.999, \text{ 当 } M : N = 1 : 2 \\ FI_{\text{MExp}} &= 0.79, \text{ 当 } M : N = 2 : 1 \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

将表1中的业务QoS参数代入式(15)得到 $P_{\text{Exp}}\{t \mapsto Q_b\}$ 。对于所考虑的业务和调度模型, ν 的取值区间为 [1, 13], 相应 $P_{\text{Exp}}\{t \mapsto Q_b\}$ 的取值范围为 [0.01, 0.09]。将其代入式(16)可得两类业务单个队列所获得调度机会比的取值范围:

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{Exp}}\{t \mapsto q_{vo}\} : P_{\text{Exp}}\{t \mapsto q_{vi}\} &= 0.91 : 0.09 \sim 0.99 : 0.01, \\ &\text{当 } M : N = 1 : 1 \\ P_{\text{Exp}}\{t \mapsto q_{vo}\} : P_{\text{Exp}}\{t \mapsto q_{vi}\} &= 0.95 : 0.05 \sim 0.995 : 0.005, \\ &\text{当 } M : N = 1 : 2 \\ P_{\text{Exp}}\{t \mapsto q_{vo}\} : P_{\text{Exp}}\{t \mapsto q_{vi}\} &= 0.84 : 0.16 \sim 0.98 : 0.02, \\ &\text{当 } M : N = 2 : 1 \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

类似地, 由式(19), 式(21)及式(23)可以得到 Exp 算法在 3 种业务队列比例应用条件下获得的调度公平指数区间:

$$\left. \begin{aligned} FI_{\text{Exp}} &= 0.52 \sim 0.65, \text{ 当 } M : N = 1 : 1 \\ FI_{\text{Exp}} &= 0.51 \sim 0.58, \text{ 当 } M : N = 1 : 2 \\ FI_{\text{Exp}} &= 0.53 \sim 0.75, \text{ 当 } M : N = 2 : 1 \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

从所得的调度公平指数式(22)和式(24)上看, MExp 在 3 种业务应用比例条件下的调度公平性能均优于 Exp。

3 仿真环境

仿真系统由 19 个半径为 500m 的六边形小区构成。中心小区配置单位增益全向天线。外围 18 个小区被视为中心小区的干扰小区。移动用户在中心小区内均匀分布, 并以 5km/h 的恒定速率移动。每隔 5s, 用户以 0.3 的概率改变移动方向。新的移动方向在 $[-\pi/2, \pi/2]$ 内随机选取。

仿真中采用两类实时业务应用: 语音和视频传输。语音会话采用 ON/OFF 周期为指数分布的 ON/OFF 模型^[4]。其 ON 和 OFF 周期的平均持续时间分别为 1.0s 和 1.5s。视频流会话采用文献[5]中的视频业务模型。视频业务源的分组数据率为 144 kbps。两类业务的 QoS 参数由表1给出。

自由空间的传播损耗采用文献[7]中的模型:

$$L = 128.1 + 37.6 \lg R$$

其中 R 为以 km 为单位的基站及移动用户之间的距离, L 为以 dB 为单位的路径损耗。

阴影衰落的相关模型由式(25)给出^[6]:

$$\left. \begin{aligned} S &= C(d)S^* + \sqrt{1 - |C(d)|^2} N(0, \sigma) \\ C(d) &= e^{-\ln 2 \cdot d/d_{\text{cor}}} \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

式(25)中的 $C(d)$ 为阴影衰落的归一化自相关函数, d_{cor} 为解相关距离, 设为 20m。 d 为自上次计算开始用户的移动距离。阴影衰落设为均值为零标准差为 8dB 的对数正态分布。 S 为以 dB 为单位的阴影衰落数值, 其值与上一次计算所得的阴影衰落数值 S^* 相关。每个 HSDPA 传输时间间隔(Transmit Time Interval, TTI)内, S 数值更新一次。

快衰落采用单径 Jakes 谱模型^[9], 于每个 TTI 时间间隔更新一次。载频设为 2 GHz。

4 仿真结果及数值分析

在仿真的数值统计中, 将短期丢包率的中断概率为 5% 时的容量定义为单业务中断容量。在语音和视频多媒体业务应用情形下, 将其中任意一类业务达到业务中断容量时的系统容量视为系统中断容量。

图1给出了当语音和视频业务比分别为 $M:N=1:1$, $M:N=1:2$, $M:N=2:1$, 在短期 PDR 超过 0.01/0.001 的概率达到 5% 时, MExp 及 Exp 获得的最大业务接入容量分别为 {70/70, 48/48}, {39/78, 28/56} 和 {116/58, 74/37} 个语音/视频业务会话队列。此外, MExp 和 Exp 在系统中断容量处获得的系统吞吐量和语音/视频业务平均分组时延分别为 $M:N=1:1$ 时的 {10.4 Mbps, 7.2 Mbps} 和 {20.3ms/63.5ms, 3.7 ms/48.2 ms}, $M:N=1:2$ 时的 {11.4 Mbps, 8.2 Mbps} 和 {25.9 ms/75.4ms, 3.7 ms/48.7ms} 以及 $M:N=2:1$ 时的 {8.9Mbps, 5.7Mbps} 和 {17.2ms/37.4ms, 3.3ms/32.5ms}。

比较 MExp 和 Exp 获得的调度公平指数式(22)和式

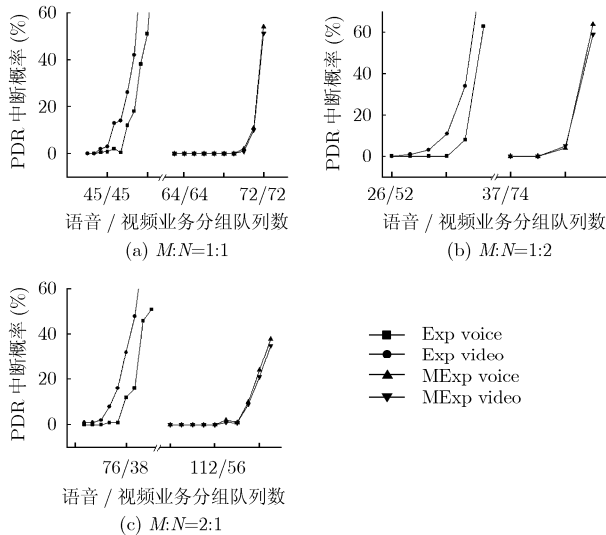


图1 MExp 和 Exp 算法在不同业务比例下的 PDR 中断容量

(24), 当 $M:N=1:1$, $M:N=1:2$, $M:N=2:1$, MExp 分别有 $\{0.28\sim 0.41, 0.42\sim 0.49, 0.04\sim 0.26\}$ 的调度公平指数提升; 从仿真的数据结果看, 在系统中断容量处, MExp 比 Exp 有 $\{22/22, 11/22, 42/21\}$ 个语音/视频业务会话队列的接入容量和 $\{3.2\text{ Mbps}, 3.2\text{ Mbps}, 3.2\text{ Mbps}\}$ 的系统容量增益。从理论分析结果来看, 在上述业务负载比例下, MExp 获得较高的调度公平指数, 意即其可为语音和视频业务提供更为合理的服务机会。从而, 在相同的系统资源条件下, MExp 能够比 Exp 接入更多的业务会话队列, 获得更高的系统吞吐量。由于系统接入容量的增加, MExp 获得的两种业务平均分组时延均高于 Exp。

此外, 从图1中可以看出在不同的业务负荷条件下, Exp 调度算法获得的视频业务 PDR 中断概率始终大于语音业务的中断概率, 且两种业务的 PDR 中断概率曲线变化趋势相差较大。将两种业务所得的调度机会式(23)同式(19)的理想值作比较可以发现, Exp 在 $M:N=1:1$, $M:N=1:2$ 及 $M:N=2:1$ 时为语音业务提供的调度机会比视频业务多出 $\{0.51\sim 0.59, 0.55\sim 0.6, 0.44\sim 0.58\}$ 。换言之, Exp 调度算法为语音业务提供了过多的服务机会而视频业务得到的服务机会不足, 导致视频类业务中断概率的升高。而对于 MExp 算法, 两种业务所得的服务机会得到了较好的平衡。在 $M:N=1:1$, $M:N=1:2$ 及 $M:N=2:1$ 时, 由于视频业务获得多于语音业务 $\{0.17, 0.02, 0.27\}$ 的调度机会, 从图1中可以看出, 语音业务 PDR 中断概率稍高于视频业务。但与 Exp 算法相比, MExp 算法中视频业务和语音业务的 PDR 中断概率曲线变化趋于重叠, 反映了 MExp 算法较好的调度公平性能。

5 结束语

针对典型的语音和视频实时多媒体业务无线应用, 本

文提出了一种在语音和视频业务应用条件下较 Exp 具有更佳调度公平性能的分组调度算法 MExp。本文的研究结果说明, 调度算法的调度公平性除了对用户 QoS 性能产生影响外, 同时还决定调度算法在资源分配上的合理程度, 从而影响算法系统级性能。在保证业务 QoS 要求前提下, 一个具有良好调度公平性能的分组调度算法是实现高系统性能和无线资源利用效率的基础之一。

参考文献

- [1] Ferng Hwei-Wen, Lee Chung-Fan, and Huang Jeng-Ji, *et al.* Designing a fair scheduling mechanism for IEEE 802.11 wireless LANs. *IEEE Communications Letters*, 2005, 9(4): 301-303.
- [2] Xu Liang, Shen Xuemin, and Mark J W. Dynamic fair scheduling with QoS constraints in multimedia wideband CDMA cellular networks. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2004, 3(1): 60-73.
- [3] Sanjay Shakkottai and Alexander L Stolyar. Scheduling for multiple flows sharing a time-varying channel-the exponential rule. Bell Laboratories Technical Report. Dec. 2000.
- [4] Sampath A and Holtzman J M. Access control of data in integrated voice/data CDMA systems: benefits and tradeoffs. *IEEE J. Select. Areas Commun.* 1997, 15(8): 1511-1526.
- [5] 1xEV-DV Evaluation Methodology-Addendum (V6), WG5 Evaluation AHG, July 25, 2001.
- [6] Jain R, Chiu DM, and Hawe W. A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared systems. TechReport DEC-TR-301, September 1984. Available: <http://www.cse.wustl.edu/jain/papers/ftp/airness.Pdf>.
- [7] ETSI Technical Report 101 112. Selection procedures for the choice of radio transmission technologies of the UMTS", UMTS TR 30.03, April 1998, V3.2.0.
- [8] Recommendation ITU-R M. 1225, Guideline for evolution of radio transmission technologies for IMT-2000.
- [9] Jakes W C. Microwave Mobile Communications. Piscataway, NJ IEEE Press, 1994: 11-76.

徐斌阳: 男, 1977年生, 博士, 研究方向为无线资源管理、QoS 保证机制、无线多媒体通信、频谱共享。

蒲和平: 男, 1958年生, 副教授, 研究方向为组合数学、微分动态系统。

李少谦: 男, 1957年生, 教授, 博士生导师, 主要研究领域包括无线通信系统理论、移动与个人通信、无线抗干扰技术、扩跳频技术等。