

一种适用于 B3G 移动通信系统下行共享信道的调度算法

赵新胜, 鞠 涛, 尤肖虎

(东南大学移动通信国家重点实验室, 江苏南京 210096)

摘 要: 本文针对后三代(B3G)移动通信系统中的宽带无线信道特性和流媒体业务特征, 分析了可用于高速下行共享信道的各种传统分组调度算法, 提出面向流媒体业务能够提高系统吞吐量的基于优先级公平调度(Priority Based Fairness Scheduling, PBFS)算法. 该算法根据各移动用户收发信道质量和业务传输的 QoS 要求动态调整各用户的业务传输优先级, 确定下行共享信道的调度方案. 并给出该算法的简化形式 S-PBFS. 仿真结果表明, 与传统调度算法相比, S-PBFS 算法在数据包传输时延受限的条件下具有无线信道利用率高、实现复杂度低等特点.

关键词: B3G 移动通信系统; 下行共享信道; 流媒体; PBFS 算法; S-PBFS 算法

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2005)07-1173-04

A Scheduling Algorithm for Downlink Shared Channel in Beyond 3G Mobile Communications System

ZHAO Xir sheng, JU Tao, YOU Xiao hu

(National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China)

Abstract: Traditional packet scheduling algorithms for high speed downlink shared channel are investigated with the consideration of streaming services and wideband wireless channel in beyond 3rd generation mobile communication system. A Priority Based Fairness Scheduling (PBFS) algorithm is proposed for streaming services transmission and system throughput enhancement. The PBFS algorithm makes packet scheduling scheme in downlink shared channel based on the users' priorities, which are dynamically adjusted according to the quality of wireless channel and the QoS requirement of streaming services. Simplified PBFS (S-PBFS) is also derived. Simulation results show that the new scheduling algorithm has the benefits of lower complexity, higher wireless channel utilization efficiency under the constraint of transfer delay, compared to the traditional scheduling algorithms.

Key words: beyond 3G; downlink shared channel; PBFS algorithm; S-PBFS algorithm

1 引言

在第三代(3G)移动通信系统逐步进入产业化和应用的 同时, 后三代(Beyond 3G, B3G)移动通信技术已经成为 ITU-T、3GPP 等组织和各大相关公司的研究热点. B3G 移动通信系统空中接口的物理层将采用 MIMO、OFDM 等无线宽带技术使移动用户的峰值传输速率比 3G 系统提高 1~2 个量级, 并结合全 IP 网络技术可以随时随地为用户提供高速分组数据业务和多网融合能力^[1~2].

在 B3G 移动通信系统中, 包括流媒体在内的分组数据业务所占比例将超过业务总量的 80%. 流媒体业务是把连续数据或音频/视频信号进行信息压缩处理后存放于传送服务器上, 由服务器把数据传送到网络, 用户在客户端能够实时接收数据的一类新业务. 流媒体业务的传输速率需求在 10kbps~

100Mbps 之间动态变化, 同时与一般 IP 数据业务相比, 流媒体业务对传输时延的要求更加敏感^[1,3]. 因此需要使用灵活、高效的无线资源分配和管理方法来适应 B3G 移动通信系统的业务传输质量(QoS)要求和空中接口物理层各种高速传输技术的变化. 其中, 无线分组调度技术是面向无线用户的各种分组业务传输 QoS 需求, 合理地分配各种无线信道的资源, 提高移动通信系统无线信道利用率的有效方法.

本文在分析各种传统无线分组调度算法原理和性能的基础上, 针对 B3G 移动通信系统下行共享信道的分组业务调度要求, 提出了一种结合流媒体业务传输 QoS 需求和无线信道动态变化特性的无线分组调度算法——基于优先级公平调度(Priority-Based Fairness Scheduling, PBFS)算法. 本文的第二部分是各传统无线分组调度算法的性能分析与比较. 第三部分是基于优先级公平调度算法(PBFS)的推演和对算法的复杂

度优化过程,并给出可在系统中应用的简化算法(Simplified PBFS, S-PBFS).第四部分是 PBFS 算法、S-PBFS 算法和各种传统无线分组调度算法在 B3G 移动通信系统仿真平台中的仿真结果与性能比较.第五部分给出了结论.

2 传统的无线分组调度算法

为了有效地分配无线信道资源和提高系统服务质量(QoS),无线分组调度算法需要考虑下列准则:保证用户之间的公平性;动态适应无线链路变化;满足特定业务的 QoS 要求;提高系统吞吐量和无线信道利用率;限制功耗和降低系统复杂度等.下面介绍的传统无线分组调度算法能够较好地实现部分准则的要求,但是对于某些准则又存在明显的不足^[4,5].

Round Robin 算法根据业务到达顺序,循环分配信道资源给每个等待队列. Max C/I 算法根据信道状态为各等待队列进行排序,然后为信道状态最好的队列提供服务. M-LWDF 算法每次选择 $\beta_j W_j(t) C_j(t)$ 最大的队列 j 进行服务($W_j(t)$ 是队列 j 队首数据包的等待时间, $C_j(t)$ 是队列 j 对应用户的信道容量, β_j 为正数).表 1 是结合^[4,5]的结果,对上述三种算法在 B3G 移动通信系统中调度一般 IP 数据业务时的性能比较:

表 1 三种传统调度算法性能比较

	用户公平性	信道适应性	时延 QoS 保证	系统吞吐量	复杂度
Round Robin	好	差	差	低	小
Max C/I	差	好	差	高	较小
M-LWDF	较好	较好	较好	较高	较大

可以看出, Round Robin 算法能够很好地保障用户间的公平性,却不能动态适应无线链路变化,无线信道利用率不高. Max C/I 算法可在用户业务量接近无线信道容量时达到高的系统吞吐量,但在用户公平性方面表现最差,不具有实用性. M-LWDF 算法综合考虑信道状态和数据包等待时间这两个因素对性能的影响,在用户公平性、信道适应性、QoS 保障(吞吐量和时延)方面都有着较好的性能.

在 B3G 移动通信系统中调度算法的设计要求变得更加复杂:首先, B3G 移动通信系统主要承载的较大业务量是流媒体等分组数据业务,与传统 IP 数据业务相比,流媒体对数据包时延的要求更为严格.为了保障用户的 QoS 要求,调度算法需要充分考虑调度过程中各数据包时延的变化.其次,为了提高系统的峰值传输速率, B3G 移动通信系统需要开发频率更高的无线资源,由此会带来更加复杂的无线链路的变化情况^[1].为了增强信道适应性、充分利用信道资源提高系统吞吐量,调度算法应该增强适应无线链路变化的功能.第三,由于无线信道的变化与各用户业务传输需求的异步性^[6],调度算法还应该顾及各用户等待传输数据量的情况.在传输“流”的形式数据业务时,信道质量好的用户对应的等待数据量可能较少,仅调度该队列的数据业务在高速无线共享信道上传输就无法充分利用信道资源,造成系统的无线信道利用率降低.因此, B3G 移动通信系统需要寻找一种新的同时兼顾数据包的时延、信道状态变化和队列中等待数据量对调度方案影

响的下行共享信道调度算法.

3 基于优先级的公平调度(PBFS)算法

B3G 移动通信系统下行共享信道可以划分成多个大小固定的资源单元(如子载波上一个时隙),调度器在使用每个资源单元前可以综合分析信道状态、队列中等待数据量和数据包传输时延三方面因素对各用户调度优先级的影响来确定资源单元的调度方案.下文将分别研究调度优先级与相关因素的关系,并在此基础上得到各用户占用每个资源单元的调度优先级.

3.1 调度优先级与信道状态和等待数据量的关系

假设在每个资源单元内信道的状态不发生改变,调度器根据信道估计器的结果能够得到各用户业务等待队列对应下行信道的信噪比 $\gamma_i(t)$ ^[7,8],则下行信道的容量可以表示成(1)的形式^[9]

$$C = \int_{\gamma} B \log(1 + \gamma) p(\gamma) d\gamma \quad (1)$$

其中 $p(\gamma) = p(\gamma_i(t) = \gamma)$.由式(1)可得在每个资源单元内各用户对应的下行信道容量 $C_i(t)$ 为

$$C_i(t) = B \log(1 + \gamma_i(t)) \quad (2)$$

式(2)中的 $C_i(t)$ 也就是用户 i 在第 t 个资源单元能够正确传输信息的最大速度 $R_i(t)$.则 B3G 移动通信系统在每个资源单元内可以正确发送的数据最大量 $th_i(t)$ 取决于队列 i 当前对应信道的传输速度 $R_i(t)$ 和等待发送数据总量 $S_i(t)$

$$\begin{aligned} th_i(t) &= \min\{\tau \cdot R_i(t), S_i(t)\} \\ &= \min\{\tau \cdot B \log(1 + \gamma_i(t)), S_i(t)\} \end{aligned} \quad (3)$$

这里, τ 是每个资源单元的持续时间, B 是每个资源单元所分配的频率带宽.

为了提高系统的吞吐量,每次调度应该选择能够发送数据量最大的用户,即赋予该用户最高的调度优先级.根据文献^[10],调度优先级与发送数据量 $th_i(t)$ 的关系 $PRI_th_i(t)$ 为

$$\begin{aligned} PRI_th_i(t) &= \lambda \cdot th_i(t) \\ &= \lambda \cdot \min\{\tau \cdot B \log(1 + \gamma_i(t)), S_i(t)\} \end{aligned} \quad (4)$$

其中, λ 为正数.

3.2 数据包等待时间与调度优先级的关系

如果数据包在当前时刻没有得到服务,那么经过 Δt ($\Delta t \rightarrow 0$)后该数据包的优先级应该保持不变,因此调度优先级与数据包等待时间 $d(t)$ 的关系 $PRI_wait_i(t)$ 是^[11]

$$PRI_wait_i(t) = \begin{cases} m\alpha \cdot e^{-(D-d(t))/\alpha} & d(t) \leq D \\ 0 & d(t) > D \end{cases} \quad (5)$$

这里, D 为数据包有效期限, m 为正数, α 为数据包的平均等待时间.基于流媒体业务的特性,服务器对于超过有效期限 D 的流媒体数据包采取丢包处理,于是式(5)变成

$$PRI_wait_i(t) = m\alpha \cdot e^{-(D-d(t))/\alpha} \quad (6)$$

3.3 PBFS 算法

根据上文分析, B3G 移动通信系统下行共享信道的调度需要考虑信道状态、等待数据量和数据包时延三方面因素的影响.信道状态的好坏和等待数据量的大小主要决定系统在每个资源单元能够正确传送的数据量,数据包的时延情况用

来判断各用户之间的公平性. 并且当主要承载的业务是流媒体时, 各用户在每个资源单元能够传输的数据量与数据包等待时间可以认为是不相关的^[12]. 为了提高系统容量并且保证调度过程的公平性, 各用户的调度优先级 $PRI_i(t)$ 应该是关于发送数据量 $th_i(t)$ 和队首数据包等待时间 $d_i(t)$ 的函数

$$PRI_i(t) = F\{th_i(t), d_i(t)\} \quad (7)$$

其中 $F\{\cdot\}$ 是关于 $th_i(t)$ 和 $d_i(t)$ 的函数.

在确定各用户调度优先级的过程中, 当用户能够发送的数据量 $th_i(t)$ 大小相同或相近时, 调度优先级函数 $F\{th_i(t), d_i(t)\}$ 应该能够依据各队列队首数据包等待时间 $d_i(t)$ 区分不同用户的调度优先级 $PRI_i(t)$. 即 $PRI_i(t)$ 在 $th_i(t)$ 相同时的变化趋势是调度优先级关于 $d_i(t)$ 的函数 $PRI_wait_i(t)$

$$\frac{\partial PRI_i(t)}{\partial d_i(t)} = \alpha \cdot PRI_wait_i(t) \quad (8)$$

α 代表与 $d_i(t)$ 不相关的函数部分. 同理, 在各队首数据包等待时间 $d_i(t)$ 相同或相近时, $PRI_i(t)$ 的变化趋势应该是调度优先级关于 $th_i(t)$ 的函数

$$\frac{\partial PRI_i(t)}{\partial th_i(t)} = b \cdot PRI_th_i(t) \quad (9)$$

b 是与 $th_i(t)$ 不相关的函数部分.

综合式(8)和式(9)两式, 可以得到各队列在每个信道资源单元的调度优先级 $PRI_i(t)$

$$PRI_i(t) = \theta_1 \cdot PRI_th_i(t) \cdot PRI_wait_i(t) + \theta_0 \quad (10)$$

其中 θ_0 和 θ_1 是常数. 代入式(4)和式(6)并令 $\theta = \theta_1 \times \lambda \times m \times \alpha$ 可得各用户调度优先级 $PRI_i(t)$ 是

$$\begin{aligned} PRI_i(t) &= \theta_1 \cdot \lambda \cdot \min\{x \cdot B \log(1 + \gamma_i(t)), S_i(t)\} \\ &\quad \cdot m \alpha \cdot e^{-(D-d(t))/\alpha} + \theta_0 \\ &= \theta \cdot \min\{x \cdot B \log(1 + \gamma_i(t)), S_i(t)\} \cdot e^{-(D-d(t))/\alpha} + \theta_0 \end{aligned} \quad (11)$$

调度算法在调度过程中从优先级排序中查寻 $PRI_i(t)$ 最大的队列服务:

$$j = \arg \max_i \{PRI_i(t)\} \quad \forall i = 1, 2, \dots, N \quad (12)$$

N 为系统用户数目.

依照如上所述的基于优先级公平调度过程可保障各用户业务传输的公平性和对无线物理信道较大的利用率. 但在利用 PBFS 算法调度时, 计算各等待队列调度优先级 $PRI_i(t)$ 的过程包含对数和指数运算, 这些计算会大大增加算法的复杂度. 为了实现 B3G 移动通信系统对调度算法灵活、高效和低复杂度的要求, 在系统中应用时需要将 PBFS 算法进行简化.

3.4 简化 PBFS 算法(S PBFS)

式(11)涉及的复杂运算包括 $\tau \cdot B \cdot \log(1 + \gamma_i(t))$ 和 $e^{-(D-d(t))/\alpha}$ 两部分, 前者是为了计算在每个资源单元各用户能够传送的最大数据量, 后者是用来计算数据包等待时间与调度优先级的关系. 为了降低调度过程的运算复杂度, 需要使用相对简单的计算来代替 PBFS 算法中的对数和指数运算.

通过反馈获取的各用户下行信道的信噪比 $\gamma_i(t)$ 可被量化为有限个离散数值的集合, 可以预先计算各 $\gamma_i(t)$ 值对应的 $\tau \cdot B \cdot \log(1 + \gamma_i(t))$ 值存放在表格中, 在调度过程中使用查表

的方式直接把 $\gamma_i(t)$ 映射为 $\tau \cdot B \cdot \log(1 + \gamma_i(t))$ 值, 然后利用式(3)求出能够传输的最大数据量 $th_i(t)$.

各队列队首数据包等待时间的分布情况相对复杂, 如果采用查表的方式替换 $e^{-(D-d(t))/\alpha}$ 运算需要的表格非常大, 复杂的查表过程反而会增加调度算法的运算时间. 因此在 S-PBFS 算法中采用线性拟合的方法用线性函数运算代替指数运算, 式(6)变成

$$PRI_wait_i(t) = a_0 + a_1 \cdot (D - d(t)) \quad (13)$$

这里 a_0 和 a_1 是 $e^{-(D-d(t))/\alpha}$ 的线性拟合系数.

把 $th_i(t)$ 和式(13)代入式(11)并取 $\theta = 1, \theta_0 = 0$ 可以得到 S-PBFS 算法的队列调度优先级函数

$$PRI_S_i(t) = th_i(t) \cdot (a_0 + a_1 \cdot (D - d(t))) \quad (14)$$

与 PBFS 算法类似, S-PBFS 算法在调度时从优先级排序中查寻 $PRI_S_i(t)$ 最大的队列 j 服务

$$j = \arg \max_i \{PRI_S_i(t)\} \quad \forall i = 1, 2, \dots, N \quad (15)$$

N 为系统用户数目.

综合上文, S-PBFS 算法的步骤为:

- | |
|--|
| 第 1 步, 针对系统参数和业务要求, 生成查找表、计算线性拟合参数 |
| 第 2 步, 根据 $\gamma_i(t)$ 和 $S_i(t)$ 计算下一个无线资源单元各队列传输的最大数据 $th_i(t)$ |
| 第 3 步, 利用式(13)计算基于各队列队首数据包等待时间的队列调度优先级 |
| 第 4 步, 根据式(14)生成 S-PBFS 算法中各队列调度优先级并排序 |
| 第 5 步, 服务调度优先级最大的队列 |
| 重复第 2~5 步 |

图 1 S-PBFS 算法步骤

4 仿真结果与性能分析

本文利用 B3G 移动通信系统仿真平台对 PBFS 算法、S-PBFS 算法和各种传统无线分组调度算法进行仿真比较.

在系统仿真平台中, 无线物理信道的峰值传输速率为 100Mbps, 各用户与基站之间的无线物理信道是根据 OFDM-MIMO 系统在 Rayleigh 衰落信道条件下的仿真结果映射为 8 状态马尔可夫链(Markov Chain)形式, 通过下行共享信道传输的各用户业务均为可变比特速率(VBR)视频流, 各用户业务的到达过程服从泊松(Poisson)分布, 采用 IP 分组传送协议时的分组包长度服从 Gamma 分布. 仿真平台的参数设置如表 2 所示:

表 2 仿真平台参数设置

系统用户数目	仿真时间	用户移动速度	信道模型	业务模型	数据包有效期
64	10800 秒	5~250 km/h	8 状态 FSM C ^[8]	VBR 视频流 ^[12]	1 秒

图 2 给出了对 PBFS、M-LWDF、Round Robin 和 Max C/I 这四种算法在 B3G 移动通信系统中调度流媒体业务的系统吞

吞吐量累积分布函数曲线。结果表明, PBFS 的吞吐量的动态范围为 55–75Mbps, M-LWDF 的吞吐量动态范围为 52–66Mbps, Round Robin 的吞吐量动态范围为 37–53Mbps, Max C/I 的吞吐量动态范围为 25–45Mbps。反映出 PBFS 算法综合考虑流媒体的业务特征和 3G 移动通信系统的信道特性实现了最大系统传输吞吐量。Max C/I

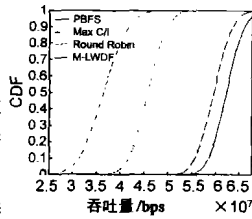


图2 四种算法的系统吞吐量比较

算法的系统吞吐量较低,是由于用户的移动性使各用户对基站的无线信道变化与业务到达过程具有很大的异步性,在数据包有效期设定为 1 秒时,Max C/I 算法不具有用户公平性,瞬时信道条件较差的用户流媒体业务数据包将被丢弃处理。

如 3.4 节所述,具有较高运算复杂度的 PBFS 调度算法可简化为 S-PBFS 调度算法,图 3 给出了 PBFS、S-PBFS 和 M-LWDF 三种算法在 3G 移动通信系统仿真平台中的调度流媒体业务的系统吞吐量累积分布函数曲线。结果表明, S-PBFS 算法对 PBFS 算法中的指数运算进行线性拟合处理后,产生的拟合误差使 S-PBFS 算法的系统吞吐量比 PBFS 算法降低,但相对 M-LWDF 算法仍有较大的提高。

图 4 给出了 S-PBFS、Max C/I、Round Robin 和 M-LWDF 四种调度算法的数据丢包率比较的累积分布函数曲线。结果表明, S-PBFS 算法的丢包率动态范围 0.05–0.6,具有最低的丢包率, M-LWDF 算法丢包率动态范围 0.1–0.8, Round Robin 较高, Max C/I 算法的丢包率最高。

仿真结果表明,针对 3G 移动通信系统承载流媒体业务特征和宽带无线信道特性设计的 PBFS 算法在相同条件下能够提高吞吐量减少数据包传输延时并保证用户间的公平性。S-PBFS 算法在降低计算复杂度的同时,获得与 PBFS 算法类似的性能,达到 3G 移动通信系统资源调度算法的设计要求。

5 结论

移动通信系统下行共享信道的调度算法需要同时兼顾数据包时延、等待业务量和信道状态变化对调度方案的影响。为了提高系统吞吐量、降低丢包率、保障用户间的公平性,本文在分析传统无线分组数据包调度算法的基础上结合流媒体业务特征提出了适合 3G 移动通信系统下行共享信道的 PBFS 算法,并在 PBFS 算法的基础上简化出适合 3G 通信系统实际应用的 S-PBFS 算法。仿真结果表明, S-PBFS 算法能够有效地提高系统吞吐量、减少数据丢包率,有利于 3G 通信系统整体性能的提高。同时,调度算法与功率控制、信道分配和切换控制等无线资源管理技术的联合优化设计也将提高移动通信系统的容量等性能。

参考文献:

- [1] 尤肖虎. 未来移动通信技术发展趋势与展望[J]. 电信技术, 2003, 6: 14–17.
- [2] Y S Kim, B J Jeong, J H Chung, et al. Beyond 3G: vision, require

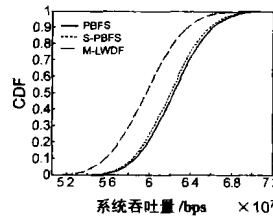


图3 PBFS、S-PBFS 和 M-LWDF 算法系统吞吐量比较

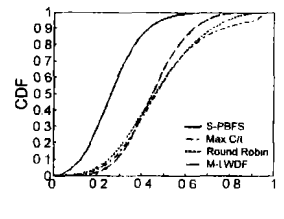


图4 四种算法的丢包率比较

- ments, and enabling technologies[J]. IEEE Communications Magazine, 2003, 41(3): 120–124.
- [3] 龚灼, 尹永杰. 流媒体技术综述[J]. 现代电信科技, 2003, 7: 12–18.
- [4] Zhao Xir sheng, Wu Xir hua, You Ai min. Preliminary Results of Radio Resource Management for GMG TDD-xDMA System[C]. WWRF# 9, 09_3_07. Zurich Switzerland, 2003.
- [5] 赵新胜. 后 3G 移动通信系统下行链路的分组调度算法研究和仿真[J]. 通信技术, 2004, 1: 39–41.
- [6] M Andrews, K Kumaran, K Ramanan, A Solyar, P Whiting. Providing quality of service over a shared wireless link[J]. IEEE Communications Magazine, 2001, 150–154.
- [7] S S Kulkarni, C Rosenberg. Opportunistic scheduling for wireless systems with multiple interfaces and multiple constraints[A]. Proceedings of the 8th international workshop on Modeling analysis and simulation of wireless and mobile systems[C]. San Diego CA USA, 2003, 11–19.
- [8] H S Wang, N Moayeri. Finite state markov channel: a useful model for radio communication channels[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1995, 44(1): 163–171.
- [9] A J Goldsmith, P P Varaiya. Capacity of fading channels with channel side information[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1997, 43(6): 1986–1992.
- [10] K Kim, H Kim, Y Han. A proportionally fair scheduling algorithm with QoS and priority in IEEE DOA. The 13th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications[C]. 2002, 5, 2239–2243.
- [11] J M Peha, F A Tobagi. A Cost based scheduling algorithm to support integrated services[A]. IEEE INFOCOM'91. Proceedings. Tenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Networking in the 90s[C]. 1991, 2, 741–753.
- [12] D P Heyman, A Tabatabai, T V Lakshman. Statistical analysis and simulation study of video teleconference traffic in ATM networks[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1992, 2(1): 49–59.

作者简介:

赵新胜 男, 1963 年 10 月生于安徽省, 东南大学无线电工程系移动通信国家重点实验室教授, 目前正致力于 3G 和未来移动通信系统的研究。E-mail: xszhao@seu.edu.cn.

鞠涛 男, 1979 年 1 月生于山东省, 现在东南大学无线电工程系移动通信国家重点实验室攻读硕士学位。

尤肖虎 男, 1962 年 8 月生于江苏省, 东南大学无线电工程系系主任, 移动通信国家重点实验室主任, 长江学者特聘教授, 博士生导师, 国家 863 计划未来移动通信总体专家组组长。