

前向分组数据业务中重传分组优先权的研究¹

王亚峰 杨大成

(北京邮电大学无线通信中心 北京 100876)

摘要: 该文研究了前向分组数据业务中应用的调度算法,在对常见的几种调度算法分析之后,提出一种新的调度算法。从理论和仿真两方面的性能分析显示,该算法通过适当改变重传分组的优先权,在保证满足公平性准则的前提下,提高了系统吞吐量,降低了平均分组时延,改善了分组时延分布。

关键词: 调度算法, 正比公平, 轮循算法, 最大 C/I 算法

中图分类号: TN919.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)02-0278-06

Retransmission Priority Scheduling Algorithm for Forward Link Packet Data Service

Wang Ya-feng Yang Da-cheng

(Wireless Communication Research Center,

Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract Forward link packet data service scheduling algorithm in mobile communication systems is researched in this paper. After analyzing a few kinds of familiar scheduling algorithms, a new scheduling algorithm is proposed. Both the theoretical analysis and the simulation results shows that this algorithm takes on several advantages. On the premise of satisfying the fairness criteria, it can increase the system throughput and decrease the average packet delay.

Key words Scheduling algorithm, Proportional fairness, Round robin, Maximum C/I algorithm

1 引言

随着人们对移动数据业务需求的不断增长,移动通信系统支持高速数据的能力也不断增强。IS95 只支持低速数据, cdma2000 可以支持中速数据,而 cdma2000 的演进版本 1x EV-DO(又称 HDR, High Data Rate) 和 1x EV-DV 则都具有很好的支持高速分组数据传输的能力。由于数据业务和话音业务的特点不同,数据业务系统采用了一些不同于话音业务系统的技术。差别之一就是速率控制代替了话音业务系统的功率控制。在 1x EV-DV 中,每个时隙移动台测量其载干比(C/I),通过 R-CQICH 信道反馈至基站,基站再综合考虑反馈的 C/I,可供分配的 Walsh 码,待传输数据队列的长度等确定最大可支持的数据速率^[1,2]。最后,按照所确定的速率,从所有请求传输的用户中,按照一定的调度算法选出其中的一个用户给予传输机会。HDR 中有类似的技术,只是速率预测在移动台端^[3-5]。

这里提到的基站根据各移动台的请求,从中选择一个用户传输的调度算法就是本文研究的重点。移动通信系统中,由于各移动台离基站的距离不同,接收信号的强度不同,如果只让信道条件好的用户传输数据,则系统吞吐量将达到最大,这种调度算法称作最大 C/I 算法。从系统吞吐量最大化的角度来说,这种调度算法是最优的,但它可能照顾不到一些处于小区边缘的用户,使他们长时间得不到服务,这就带来公平性问题。而轮循算法(Round robin)则不考虑信

¹ 2002-10-07 收到, 2003-04-16 改回
国家重点基础研究发展规划项目计划(973 计划)资助课题

道条件, 对所有请求服务的用户一视同仁, 每个用户接受服务的机会均等。因此, 从占有系统资源的角度看, 这种调度算法是最公平的, 但这种算法的吞吐量却受到了很大的限制。

2 正比公平调度算法和公平性准则

最大 C/I 算法和轮询算法, 分别是吞吐量最大化和公平性最佳的代表。为了做好吞吐量和公平性的折衷, Qualcomm 提出了一种称为正比公平的调度算法。简述其原理如下:

在时刻 t , 移动台 k 在时间窗 t 内的吞吐量用 $T_k(t) (k = 1, \dots, K)$ 表示, 其请求传输的速率用 $\text{DRC}_k(t)$ 表示, 则被选中的用户为

$$j = \arg \max_{k=1, \dots, K} \left\{ \frac{\text{DRC}_k(t)}{T_k(t)} \right\} \quad (1)$$

若某一用户此刻没有数据要传输, 则 $\text{DRC}_k(t) = 0$ 。 $T_k(t)$ 以时隙为单位更新如下:

如果移动台在 $i-1$ 时刻没有被调度上

$$T_k(i) = (1 - 1/T_c) \cdot T_k(i-1) \quad (2)$$

如果移动台在 $i-1$ 时刻被调度上

$$T_k(i) = (1 - 1/T_c)T_k(i-1) + (1/T_c)N_k(i-1) \quad (3)$$

式中的 $N_k(i-1)$ 表示用户 k 待传输队列满时的分组大小。 T_c 是时间常数, 表示滑动时间窗口的长度, 实际上反映了一个用户对接收不到数据传输的忍受能力, 较长的 T_c 将允许等待较长的时间直到该用户的信道质量变好, 这有利于系统吞吐量的提高, 但可能带来附加的延迟。文献 [3] 中 T_c 的取值为 1000 个时隙, 相当于 1.25s。

从上面的表示可以看出, 如果移动台信道条件较好, 其请求传输的速率 $\text{DRC}_k(t)$ 也较高, 就会使其优先权提高。如果一个用户因为信道条件较差, C/I 长时较低, 得不到传输机会, 则其平均速率就会减小。这同样会使其优先权提高, 获得传输机会。因此, 正比公平算法是寻求吞吐量和公平性两方面折中的一种尝试, 但就其性能而言, 还可以有所改进, 文中将要提到的改变重传分组优先权算法就有比正比公平算法更好的性能。

上面我们对公平问题做了直观的定性分析, 3GPP2 在鼓励提出各种新的调度算法的同时, 为了衡量各算法公平性确定了一个定量的准则^[1]。该准则是用各用户吞吐量归一化累积分布函数 (Cumulative Distribution Function, CDF) 曲线来表示的, 是用所有用户的平均吞吐量做归一化的。准则由表 1 中的 3 个点表示:

表 1 CDF 准则

归一化吞吐量	0.1	0.2	0.5
CDF	0.1	0.2	0.5

该准则实际是限制了吞吐量较低的用户占总用户数的比例, 比如低于 0.1 倍平均吞吐量的用户数不能超过总用户数的 10%。按照这个准则, 所有符合公平性的调度算法其公平性曲线都处于这 3 点连成的直线的右侧, 否则就是违反了公平性准则。

3 改变重传分组优先权算法

3.1 算法描述

设有两类用户, 第一类为初次传输用户, 第二类为重传用户, 对第一类用户, 按照正比公平算法, 其优先权为

$$P_k = \text{DRC}_k(t)/T_k(t) \quad (4)$$

式中的 $\text{DRC}_k(t)$ 是用户 k 在 t 时刻请求传输的速率, $T_k(t)$ 为用户 k 在时间窗 t 内的吞吐量。

对第二类用户, 在按正比公平算法计算出其优先权后, 再乘以一个系数 η , 作为其新的优先权, η 的取值如下

$$\eta = \begin{cases} 1, & \tilde{C}_k(t) \geq 1 \\ \tilde{C}_k(t), & \tilde{C}_k(t) < 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中的 $\tilde{C}_k(t) = (C/I)_k(t) / [\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (C/I)_j(t)]$ 表示归一化 C/I, $(C/I)_j(t)$ 表示用户 j 在时刻 t 的载干比, N 为小区内同时请求服务的数据用户数。然后, 从所有的用户中选取优先权最高的, 给予传输机会。

3.2 性能分析

下面将通过理论分析, 指出改变重传分组优先权算法将更容易选出 C/I 高的用户, 从而有利于吞吐量的提高。

由文献 [6] 可知, $(C/I)_k(t)$ 可以表示为下式:

$$(C/I)_k(t) = a_k \cdot b_k(t) \quad (6)$$

式中 a_k 是大尺度衰落分量, 它表示了用户 k 的 C/I 中与基站至移动台 k 之间距离有关的分量, 它在好几个时隙内保持不变。 $b_k(t)$ 是小尺度衰落分量, 其平方根是 Rayleigh 或 Rice 分布, 其值随时间快速变化。

假设: (1) 所有用户的 $b_k(t)$ 是独立同分布的随机变量, 并且独立于它们所接收到的总功率。 (2) 移动台的传输速率近似与接收的功率成正比。假设 (2) 在大多数情况下是成立的, 尽管采用了高阶调制后将不再准确, 但作为一阶近似, 该假设也是合理的。取 T_k 为用户 k 的稳定吞吐量 (即假设吞吐量窗口长度 $W \rightarrow \infty$, 实际中该窗口宽度要足够长以平滑掉信道的波动, 足够短以控制时延)。在这两个假设的基础上, 所有用户取得渐近相同的传输时间和发送功率。这也就是说, 对所有的用户 $a_k/T_k = c$, c 为常数, 这样, 用户 k 的优先权将独立于 a_k 。

设 X 是第一类用户中优先权最高的, Y 是第二类用户中优先权最高的, 则最终选择的用户必然是 X 或 Y 二者之一。有下面两种情况:

(1) 若 $T_X > T_Y$, 这时即使 $(C/I)_X > (C/I)_Y$, 但也可能 $P_X < P_Y$, 按照正比公平算法将选择用户 Y 。采用了我们提出的新算法之后,

(a) 如果 $(C/I)_Y \geq \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (C/I)_j$, 此时没有增益, 将依然选择用户 Y 。

(b) 如果 $(C/I)_Y < \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (C/I)_j$, 将有可能由于用户 Y 优先权的减小, 使用户 X 被选中, 即更有利于选出 C/I 高的用户。后面我们将证明这样的可能是存在的。

(2) 若 $T_X < T_Y$, 那么如果 $(C/I)_X > (C/I)_Y$, 则必然有 $P_X > P_Y$, 即正比公平算法本来就选取了 C/I 高的用户, 因此新算法对此没有增益。

接下来, 将证明即使 $(C/I)_Y/T_Y$ 是最大的, 但也存在 $(C/I)_Y < \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (C/I)_j$ 的可能。

由前面的假设, $(C/I)_Y/T_Y = a_Y b_Y / T_Y = c b_Y$, $Y = \arg \max_{j=1, \dots, N} \{b_j\}$, 所以上面的命题即证明下式成立:

$$P(a_k b_k < E[ab] | k = \arg \max_{j=1, \dots, N} \{b_j\}) > 0 \quad (7)$$

由于 a 和 b 是独立的, 所以令 $\tilde{a}_k = a_k / (E[a])$, $\tilde{b}_k = b_k / (E[b])$, 同时由于 \tilde{a}_k 和 \tilde{b}_k 也是独立的, 所以 \tilde{a}_k 的下标 k 可以去掉, 因此上式变为

$$P(\tilde{a} \tilde{b}_k < 1 | k = \arg \max_{j=1, \dots, N} \{\tilde{b}_j\}) > 0 \quad (8)$$

令 $c_k = 1/\tilde{b}_k$, $k = \arg \max_{j=1, \dots, N} \{\tilde{b}_j\}$, 则上式等价于

$$P(\tilde{a} < c_k) > 0 \tag{9}$$

设用户 k 到基站的距离为 d_k , 根据文献 [7] 中对于损耗的定义, a_k 近似正比于 $d_k^{-4} 10^{-\xi/10}$, 其中 ξ 服从均值为 0dB 的对数正态分布, 方差为 8~10dB. 那么根据文献 [8] 中相关推导, 有

$$E[a] = \frac{1}{K} \cdot c_0 \cdot E \iint_S d^{-4}(x, y) 10^{-\xi/10} \kappa dA(x, y) \tag{10}$$

其中 c_0 为正的常数, $d(x, y)$ 表示坐标为 (x, y) 的用户到基站的距离, S 为基站覆盖区域, κ 为用户密度, 它等于每小区平均用户数 K 除以 $3\sqrt{3}/2$. 由于 ξ 与位置无关, 式 (10) 可以写成:

$$E[a] = c_0 \cdot E(10^{-\xi/10}) \cdot \left[\frac{2}{3\sqrt{3}} \iint_S d^{-4}(x, y) dA(x, y) \right] \tag{11}$$

令 $u_k = d_k^{-4}/(E[a])$, 则 $\tilde{a}_k = u_k 10^{-\xi/10}$, 进一步假设 $v_k = 10 \lg u_k$, 即 $\tilde{a}_k = 10^{(v_k - \xi)/10}$, 因此 \tilde{a}_k 也是对数正态分布的, 其概率密度函数如下式:

$$f_a(x) = \frac{10}{\ln 10 \cdot \sqrt{2\pi}\sigma_a x} \exp \left\{ -\frac{[10 \lg(x) - \mu_a]^2}{2\sigma_a^2} \right\} \tag{12}$$

式中的 $\mu_a = E[v_k - \xi] = v_k$, $\sigma_a^2 = D[v_k - \xi] = \sigma^2$, 因此 σ_a 的取值也在 8~10dB 之间. 根据对数正态分布随机变量的性质, 要使式 (9) 成立, 只需证明该式中的 $c_k = 0$ 的概率为 0 即可, 即证明 $\tilde{b}_k \rightarrow \infty$ 的概率为 0.

对于 Rayleigh 信道

$$f_{\tilde{b}_k}(x) = \begin{cases} \exp(-x), & x > 0 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \tag{13}$$

对于 Rice 信道

$$f_{\tilde{b}_k}(x) = \begin{cases} (K + 1) \exp\{-K - (K + 1)x\} I_0(2\sqrt{K(K + 1)x}), & x > 0 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \tag{14}$$

从上面两个式子可以看出, 无论是 Rayleigh 信道, 还是 Rice 信道, 都有

$$\lim_{x \rightarrow \infty} f_{\tilde{b}_k}(x) = 0 \tag{15}$$

因此, 就可以证明前面的结论是正确的.

4 仿真结果及分析

对这种算法的性能, 可以从吞吐量, 分组时延和公平性等 3 个方面来讨论. 由于该算法实质上降低了信道条件不好的重传分组的优先权, 所以可以比较好地体现最大 C/I 算法的思想, 得到更好的多用户分集增益. 因此, 可以极大地提高系统的吞吐量. 对分组时延的分析, 有两方面, 一个是平均分组时延, 另一个是分组时延的分布. 由于吞吐量和公平性是两个互相矛盾的因素, 吞吐量的提高必然降低公平性, 但由于受到正比公平算法的约束, 从后面的仿真结果可以看出这种算法也是符合公平性准则的.

4.1 仿真平台

仿真平台的具体参数如文献 [1] 中表 2.2.2-1 的规定。FTP 业务模型采用的是数据队列全满的模型，没有业务到达过程。HTTP 业务模型采用的是一种简单的业务模型^[1]，具体参见表 2，其中的 MTU 是 Maximum Transfer Unit，即最大传输单元。业务信道的功率比例是 80%，信道模型为 Pedestrian A, 1 finger, 120kmph。这里的 Pedestrian A 如表 3，其中的 FURP 为 Fractional UnRecovered Power，即不可恢复功率。

表 2 HTTP 业务模型

过程	随机变量	参数
Packet call 大小	有截短的 Pareto 分布	$\alpha=1.1, k=4.5\text{kbyte}, m=2\text{Mbyte}, \mu=25\text{kbyte}$
Packet call 之间的时间间隔	几何分布	$\mu = 5\text{s}$
Packet 大小	由 MTU 大小确定	1500 octet
每个 Packet call 中的 Packet 数目	确定的	由 Packet call 大小和 Packet MTU 确定
Packet 之间的时间间隔	几何分布	$\mu = \text{MTUsize}/\text{peak link speed}$ $(1500\text{octet} \times 8)/2\text{Mbps} = 6\text{ms}$

表 3 仿真中的信道模型

Model	Finger1(dB)	Delay	FURP(dB)
Ped-A	-0.06	0.0	-18.8606

4.2 仿真结果及分析

表 4 列出了采用改变重传分组优先级算法后对吞吐量和平均分组时延的改善。由于 FTP 业务没有业务到达过程，所以只统计了吞吐量特性，不涉及时延。其中关于 HTTP 业务的部分，第 1 行是吞吐量，第 2 行是时延。最后一列分别列出了采用新算法后吞吐量增加的比例和时延减小的比例。可以看出，新算法在提高系统吞吐量的同时，减小了平均分组时延。

表 4 采用改变重传分组优先级算法后对吞吐量和平均分组时延的改善

业务类型	每扇区用户数	正比公平算法	改变重传分组优先级算法	改善的比例 (%)
FTP	10	668990(bps)	786462(bps)	17.56
	20	687773(bps)	808497(bps)	17.55
HTTP	44	692698(bps)	772322(bps)	11.49
	44	137.78(s)	122.76(s)	10.90

表 4 指出了平均分组时延的减小，下面的图 1 和图 2 是对采用新算法前后分组时延的分布的对比，从图可以看出，采用新算法后，使得 90% 以上的用户时延得到了减小。

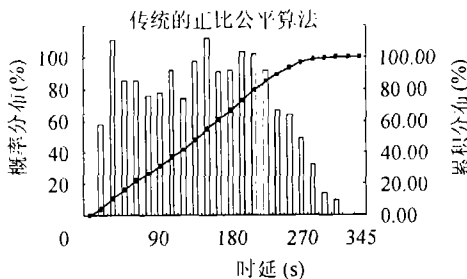


图 1 正比公平算法的时延分布

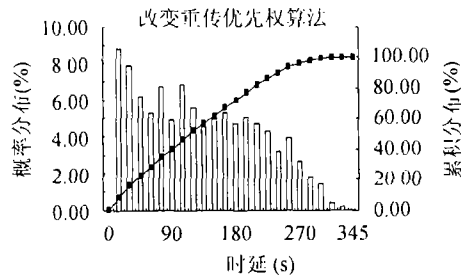


图 2 改变重传分组优先级算法的时延分布

最后来考察公平性, 看改变重传分组优先权算法是否满足 3GPP2 提出的公平性准则。由于受到业务到达过程的影响, HTTP 业务往往不能准确地反映调度算法的公平性, 图 3 给出的是 FTP 业务的公平性曲线。从图 3 中可以看到, 采用了新算法之后, 其 CDF 曲线依然位于公平性曲线的右侧, 所以是满足公平性的。

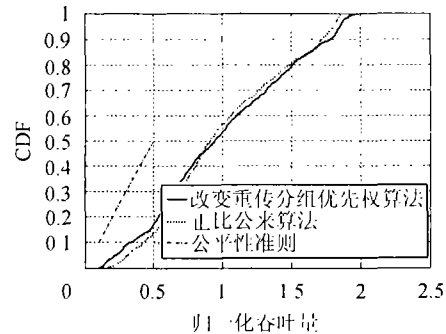


图 3 采用重传优先权的累积分布函数曲线

5 结论

调度算法是支持高速分组数据业务系统的一个特色, 目的是充分利用信道的时变特性, 得到多用户分集增益, 以提高系统的吞吐量。选取不同的调度算法, 对系统性能影响很大。本文在研究了前向分组数据业务中常见的几种调度算法之后, 提出一种新的调度算法。该算法通过适当地改变重传分组的优先权, 使调度算法更有可能选出信道条件好的用户, 从而较好地体现多用户分集的思想。同时, 又在整体上受到正比公平算法的制约, 它也是满足公平性要求的。因此, 该算法在保证满足公平性准则的前提下, 提高了系统的吞吐量, 降低了平均分组时延。而且从每个用户分组时延的分布也可以看出, 对绝大多数用户而言, 其分组时延也有不同程度的降低。

参 考 文 献

- [1] 3GPP2, 1xEV-DV evaluation methodology-Strawman (Rev.13), WG5 Evaluation Ad hoc, Feb 13, 2001
- [2] 3GPP2, Physical layer standard for cdma2000 spread spectrum systems(Release C), C.S0002-C, version 1.0, May 28, 2002.
- [3] P. Bender, *et al.*. CDMA/HDR: A bandwidth-efficient high-speed wireless data service for nomadic users. *IEEE Communications Magazine*, 2000, 38(7): 70-77.
- [4] 3GPP2, cdma2000 high rate packet data air interface specification, C.S0024, Version 2.0, Oct. 27, 2000.
- [5] Jalali A, Padovani R, Pankaj R. Data throughput of CDMA-HDR, a high efficiency data rate personal communication wireless system, VTC 2000-Spring, Tokyo, 2000: 1854-1858.
- [6] Holtzman J M. CDMA forward link waterfilling power control. Proc. VTC2000-Spring, Tokyo, 2000: 1663-1667.
- [7] Rappaport T S. *Wireless Communications Principles and Practice*. New Jersey: Prentice Hall, Inc., 1996, Ch.3
- [8] Viterbi A J. *CDMA: Principles of Spread Spectrum Communication*. Boston: Addison-Wesley Publish Company, 1995, Ch.6

王亚峰: 男, 1974 年生, 博士生, 主要从事 cdma2000 及其演进系统的系统级性能研究, 重点是调度算法。

杨大成: 男, 1951 年生, 教授, 博士生导师, 北京邮电大学电信工程学院无线中心主任, 北京邮电大学 BUP-T-QUALCOMM 联合研究中心中方首席专家, 原邮电部移动通信研究开发中心副主任, 中国电子学会高级会员, 主要从事 cdma2000 及其演进系统的系统性能研究的总体方案设计。