

一种用于前向分组数据业务的新调度算法¹

王亚峰 杨大成

(北京邮电大学无线通信中心 北京 100876)

摘要: 该文通过分析前向分组数据业务中应用的各种调度算法的性能,指出调度算法的吞吐量和公平性之间必然存在着折衷关系。在满足给定的公平性要求的情况下,吞吐量累积分布函数曲线越靠近公平性准则,吞吐量越高。基于这个认识,该文提出一种新的调度算法,它可以通过调节参数来改变吞吐量和公平性曲线的关系。而且,从吞吐量和公平性曲线折衷的角度出发,可以比较容易地找出一种近似最优解。

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(2003)12-1669-07

A Novel Scheduling Algorithm for Forward Link Packet Data Service

Wang Ya-feng Yang Da-cheng

(Wireless Comm. Res. Center, Beijing Univ. of Posts and Telecomm., Beijing 100876, China)

Abstract Forward link packet data service scheduling algorithm is extensively researched and it is indicated that there is an exclusive relationship between the data throughput and fairness. Under certain fairness criteria, the closer the data throughput cumulative distribution functions to the fairness criteria, the higher the data throughput. Based on this judgment, here a new scheduling algorithm is proposed, which can change the relationship between the data throughput and fairness criteria through adjusting the parameters. Furthermore, with a view on the tradeoff between the data throughput and fairness, the asymptotic optimal approximation can be found quite easily.

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加,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,而 cdma2000 已经可以支持中速数据。为了在移动通信中提供支持高速分组数据传输的能力, Qualcomm 提出了 cdma2000 的演进版本 1x EV DO^[1], 又称 HDR(High Data Rate)。它是基于语音和数据业务优化的目标函数不同,语音追求的是厄兰(Erlang)最大化,而数据则是吞吐量最大化。因此, HDR 是专门针对数据业务的,它使用单独的载频来传输数据。不同于 1x 中针对语音业务的功率控制技术,这里采用了速率控制技术,每个时隙移动台测量一次导频 C/I(Carrier/Interference),以此来预测可以支持的最高传输速率,并通过反向的 DRC(Data Rate Control)信道向基站报告。基站根据各移动台反馈的信息,采用一定的调度算法,从请求传输的移动台中,选择一个用户,各用户以时分的方式传输数据。在此基础上, 3GPP2 又开始了 cdma2000 的另一个演进版本 1x EV DV(Data & Voice)的标准化工作,其中数据部分基本上与 HDR 相同,可以说它是一个 1x 语音和 HDR 数据相结合的产物。

¹ 2002-05-24 收到, 2002-10-17 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

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化, 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。但从下面的仿真结果可以看出, 这种算法的吞吐量却受到了很大的限制。为了同时兼顾系统吞吐量和公平性, Qualcomm 在 HDR 中提出了一种称为正比公平(Proportional fairness)的调度算法^[1-3]。

2 调度算法原理

如果在信道条件好时传输数据, 就可以提高传输速率, 减少编码冗余^[2,4]。1x EV DV 中采用了异步自适应递增冗余技术(Asynchronous Adaptive Incremental Redundancy, A²IR), 它结合了链路自适应(Link Adaptation, LA)和递增性冗余(Incremental Redundancy, IR), 其核心思想是通过不断调整数据传输方案使之适应时变的无线信道条件, 增大吞吐量^[4]。在初次发送时, 以高速率编码, 冗余度较小, 若未能正确解码, 则降低编码速率, 增大冗余度, 再次发送, 接收端将两次接收到的数据包合并解码, 增大纠错能力。我们后面的仿真就采用了 A²IR 技术, HDR 中有类似的技术, 性能上有差异, 但对比较算法的效果是一致的。

因此, 最大 C/I 算法就是在选择传输用户时, 只选择 C/I 最大的用户, 即让信道条件好的用户一直在传, 等其信道变差时, 再让其它信道变好的用户传, 这样就充分利用了多用户分集的效果。

如果在时刻 t 有 K 个用户同时请求传输数据, 此刻每个用户的 C/I 为 $(C/I)_k(t)$, 则最大 C/I 调度算法选中的用户为

$$k = \arg \max_{j=1, \dots, K} \{(C/I)_j(t)\} \quad (1)$$

正因为这样, 最大 C/I 算法的吞吐量是个极限值, 无论采用别的任何调度算法, 吞吐量都不可能超过它。但因为在移动通信中, 每个用户所处的位置不同, 其所接收的信号强度就不同。最大 C/I 算法必然更多地照顾了离基站较近的移动台。由于分组数据业务占有的资源很大, 不适合采用软切换技术, 没有同时与多个基站通信的宏分集增益。这将不可避免地使处于小区边缘的用户的 C/I 较低, 按照这种调度算法, 这些用户将长时间得不到服务机会, 即出现“饿死现象”, 因此, 这种调度算法被认为是最不公平的。

在考虑公平性时, 一般都把轮循算法作为衡量的标准。这种算法循环地调用每个用户, 就被调度上的概率而言, 每个用户是相同的。因此, 从占有系统资源的角度来看, 这种调度算法是最公平的。

上面两种调度算法, 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 的平均传输速率用 $R_k(t) (k = 1, \dots, K)$ 表示, 其请求传输的速率用 $DRC_k(t)$ 表示, 则被选中的用户为

$$k = \arg \max_{j=1, \dots, K} \left\{ \frac{DRC_j(t)}{R_j(t)} \right\} \quad (2)$$

若某一用户此刻没有数据要传输, 则 $DRC_k(t) = 0$ 。这里的平均速率 $R_k(t)$ 按下式更新:

$$R_k(t + \Delta t) = (1 - 1/T_c)R_k(t) + (1/T_c)CTRU_k \quad (3)$$

式中的 $CTRU_k$ 表示用户 k 当前传输速率。 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，我们在后面的仿真中也采用该值。

实际在仿真时，时间都折算成时隙，平均速率的更新都是每时隙一次。而 $CTRU_k$ 就用 $DRC_k(t)$ 代替，因此，上式就变成

$$R_k(i+1) = (1 - 1/T_c)R_k(i) + (1/T_c)DRC_k(i+1) \quad (4)$$

需要说明的是，如果用户没有传输数据，则上式中的 $DRC_k(i+1) = 0$ 。

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 $DRC_k(t)$ 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 长时间较低，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。可以说，正比公平算法是寻求系统的吞吐量最大化和各用户之间的公平性之间折衷的一种尝试。图 1- 图 3 可以帮助我们深入地理解这 3 种调度算法的实质。

这些图的横坐标是移动台所处位置到为其服务的基站的距离，纵坐标是各移动台的吞吐量，这里做了相对于所有移动台吞吐量平均值的归一化。

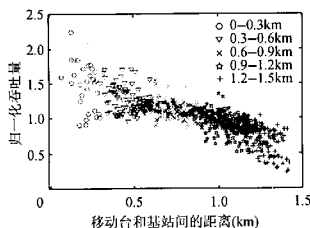


图 1 轮循算法归一化吞吐量和距离的散点图

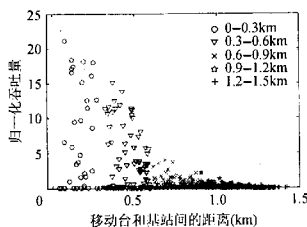


图 2 最大 C/I 算法归一化吞吐量和距离的散点图

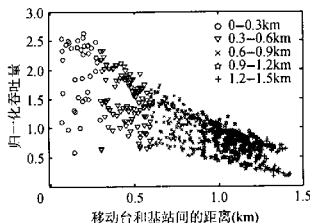


图 3 正比公平算法归一化吞吐量和距离的散点图

从图 1 中可以看出，由于轮循算法是从各用户中随机选取的，根本没有考虑到信道的影响，因此没有多用户分集的效果。在所有的吞吐量中，最高的也不超过平均吞吐量的 2.5 倍。而且，

由于各用户被选中的概率相等,所以随着距离的变长,吞吐量缓慢下降。这个差别不是由于机会不公平引起的,而是离基站远的用户的 C/I 较低,其请求传输的速率 $DRC_k(t)$ 本身比较低的原因。而图 2 是最大 C/I 调度算法,由于始终选择 C/I 最高的用户,所以离基站较近的用户得到的机会较多。可以很清楚的看到,这些用户的吞吐量远远高于所有用户的平均吞吐量,最高达 20 多倍。处于小区半径中间位置的用户,由于信道慢衰和快衰的影响,其 C/I 可能在一些时间会变高,因此也可以被调度上,但下降趋势很快。而小区边缘的用户,由于 C/I 为最大的概率很小,因此得到传输的机会很少,这就是图中显示的处于这些位置的移动台吞吐量大多接近于 0 的原因,这说明它显然是不公平的。图 3 是正比公平算法,由于该算法中一旦平均速率升高,则优先权就会降低,因此限制了靠近基站的用户的吞吐量变高,可以看出,这只比轮循算法高出一些,是 2.5 倍多,要远低于最大 C/I 算法。由于该算法在调度时,要考虑 C/I 的因素(由 $DRC_k(t)$ 反映),因此其吞吐量随距离的下降速度要比轮循算法快一些,但又受平均速率的限制,使得其下降速度比最大 C/I 小得多。关于这里的仿真方法和仿真环境的介绍,见下面的第 5 节。

3 公平性准则和累积分布函数曲线

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^[5]。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,以下简称公平性曲线,是用所有用户的平均吞吐量做归一化的。如果 $T_{\text{put}}(k)$ 表示用户 k 的吞吐量, $\text{avg}\{\}$ 表示求平均,则相对于所有用户平均吞吐量的归一化吞吐量 $\hat{T}_{\text{put}}(k)$ 为

$$\hat{T}_{\text{put}}(k) = \frac{T_{\text{put}}(k)}{\text{avg}_{j=1, \dots, K} \{T_{\text{put}}(j)\}} \quad (5)$$

准则由表 1 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。图 4 是上面提到的 3 种调度算法的公平性曲线。

从图 4 可以看出,轮循算法和正比公平算法都在准则的右侧,因此满足公平性要求,而最大 C/I 算法则不满足。同时,也可以看出,最大 C/I 算法的吞吐量是最大的,为 2131.50kbps,明显高于轮循算法(582.05kbps)和正比公平算法(846.22kbps)。这里的仿真环境见 5.1 节的介绍。对比吞吐量和累积分布函数曲线,不难发现,曲线下端越靠左的吞吐量越大。这是由于越往左,表示低吞吐量用户占的比例越大,也就是调度算法给信道条件差的用户的传输机会越少。这就启发我们,在满足公平准则的前提下,公平性曲线尽量向左靠近公平准则,这样的调度算法将是吞吐量和公平性折衷最好的。

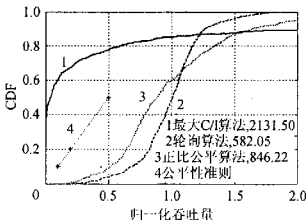


图 4 各种调度算法的归一化吞吐量累积分布函数曲线

(队列全满的 FTP 业务, 每扇区 20 个用户, 信道为 120kmph、单径 Rayleigh, 20% 的开销功率)

4 速率受限的最大 C/I 调度算法

通过上面几节的介绍, 我们知道, 最大 C/I 算法的吞吐量最大, 但不公平; 轮循算法公平性最好, 但吞吐量较小; 正比公平算法在吞吐量和公平性的折衷方面是一种尝试, 效果也是比较明显的, 在不违背公平性准则的前提下, 吞吐量比轮循算法有了很大的提高。但通过图 4 可以看出, 正比公平算法还远不是一种最佳的折衷方案, 其累积分布函数曲线离公平性准则之间还有一定的距离。同时, 就公平性本身而言, 保证每个用户的吞吐量达到一个最低限制也是很有必要的。否则, 尽管达到了公平性准则的要求, 但仍有部分用户得到很少的服务机会, 使其满足不了最低需要, 这仍然是不公平的。另外, 既然要满足公平性, 那么对信道好的用户的吞吐量也不能没有任何限制。在满足最小和最大吞吐量限制的前提下, 可以利用最大 C/I 算法来使系统吞吐量尽量最大。就是基于上面的思想, 我们提出了一种新的调度算法, 称做速率受限的调度算法。设传输速率的上限为 R_{th_max} , 下限为 R_{th_min} , 平均速率为 $R_k(t) \{k = 1, \dots, K\}$, 优先权指标函数 $p_k(t) \in [0, +\infty)$, 则该算法可表示为

$$p_k(t) = \begin{cases} +\infty, & R_k(t) < R_{th_min} \\ \max_{j=1, \dots, K} \{(C/I)_j(t)\}, & R_k(t) \in [R_{th_min}, R_{th_max}] \\ 0, & R_k(t) > R_{th_max} \end{cases} \quad (6)$$

这里的 $+\infty$ 实际是代表优先权最高, 仿真中用染色的方法置一个标志。设每扇区的 K 个数据用户组成的集合为 $U = \{1, 2, \dots, K\}$, 若 $\forall j \in U, p_k(t) < +\infty$, 则被选中用户为

$$k = \arg \max_{j \in U} \{p_j(t)\} \quad (7)$$

若 $\exists j \in U$, 使得 $p_k(t) = +\infty$, 则由所有满足此条件的 j 组成高优先权用户集合 $H = \{j | p_j(t) = +\infty, j \in U\}$, 此时将从集合 H 中随机选择一个用户即可。这里的平均速率的更新方法同正比公平算法, 见 (3) 式。

这种新的调度方法, 可以与前 3 种调度算法一样, 通过下面的散点图清楚地了解其本质, 图 5 速率上限取 250.0kbps, 下限取 15.0kbps, 满足公平准则, 公平性曲线见图 6。

从图 5 可以看出, 它的分布确实有些像正比公平算法, 随着移动台离基站距离的变远, 移动的吞吐量曲线比较缓慢地下降, 这就是为什么它满足公平性准则。但由于它毕竟利用了多用户分集作用, 即使其传输速率的上限受到限制, 最高吞吐量仍然保持在接近平均吞吐量 4.5 倍

的程度,这虽比最大 C/I 算法低了很多,但还是比正比公平算法的平均吞吐量将近 2 倍,这也就是为什么这种算法的吞吐量要比正比公平算法高的原因。

在这种算法中,选取不同的门限值,公平性和吞吐量之间的折衷是不同的,但满足公平性准则的前提下,归一化吞吐量累积分布函数曲线尽量靠近准则曲线,才能使吞吐量增大的原则是不变的。图 6 列出了几种不同门限值情况的分布曲线和吞吐量。

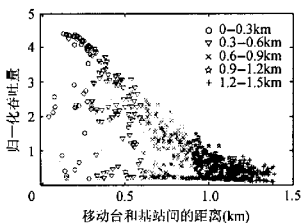


图 5 速率受限的最大 C/I 算法
归一化传输速率和距离散点图

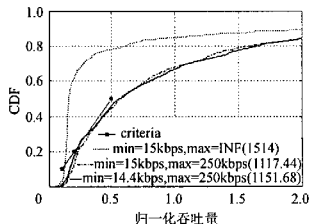


图 6 各种门限值下的公平性曲线和吞吐量

显然,增加速率上限,或减小速率下限,都将使曲线向左移动,即公平性降低,吞吐量增加,反之亦然。通过调节速率的上、下限,就可以得到不同的吞吐量和公平性曲线。因此,可以比较容易地得到吞吐量和公平性折衷的近似最优解。比如,速率上限取 250.0kbps,下限取 14.4kbps 时吞吐量为 1151.68kbps/sector,此时已经有些不能满足公平性准则,而上限不变,下限取 15.0kbps 时,就已经满足了公平性准则,此时吞吐量为 1117.44kbps/sector,因此,这个速率的上、下限是接近最优解的。

5 仿真平台和仿真结果

5.1 仿真平台

本仿真平台的具体参数如文献 [5] 中表 2.1.2-1 的规定。本文前面的仿真结果,都是基于每扇区 20 个 FTP (File Transfer Protocol) 业务的数据用户,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 2,表中的 FURP 为 Fractional UnRecovered Power,即不可恢复功率。

表 2 仿真中的信道模型

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

仿真采用 Monte Carlo 方法,每次仿真分若干互相独立的 drop,在每个 drop 移动台均匀分布在整个系统,下一个 drop 移动台位置重新按均匀分布确定,最后多个 drop 取平均。设仿真时间为 T ,总的 drop 数为 M ,各 drop 中的每扇区的数据用户数为 N ,用 $m = 1, 2, 3, \dots, M$ 表示各 drop, $n = 1, 2, \dots, N$ 表示各用户,由此第 m 个 drop 的第 n 个用户用 $user(m, n)$ 表示。让 $K(m, n)$ 表示每个用户 $user(m, n)$ 传输的分组个数, k 为其分组标号,则对用户 $user(m, n)$, $k = 1, 2, \dots, K(m, n)$, $B(m, n, k)$ 为 $user(m, n)$ 第 k 个分组含有的信息比特,如果在仿真结

束时某一分组没成功传输, $B(m, n, k) = 0$, 则每扇区的吞吐量按下式:

$$T_{\text{put_sector}} = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^{K(m,n)} B(m, n, k)}{MT} \quad (8)$$

计算. 每个用户 $\text{user}(m, n)$ 的吞吐量为

$$T_{\text{put_user}(m,n)} = \frac{\sum_{k=1}^{K(m,n)} B(m, n, k)}{T} \quad (9)$$

5.2 仿真结果

图 7 的仿真结果是各种调度算法的吞吐量的比较, 仿真条件如前面的介绍, 只是这里每扇区的用户数不同.

6 结 论

本文通过分析前向分组调度算法中的 3 种调度算法, 指出体现算法公平性的累积分布函数曲线和吞吐量之间存在着唯一的对应关系. 任何调度算法, 只要提高了系统的吞吐量, 就不可避免地损害了公平性. 在满足公平性准则的前提下, 要想提高系统吞吐量, 就应该尽量使累积分布函数曲线向左靠近该准则. 因此, 考虑到最大 C/I 算法确实由于很好地体现了多用户分集的效果, 其吞吐量是各种可能的算法中的一种极限, 但同时却不满足公平性的要求, 我们提出一种既可以较好地体现最大 C/I 算法的思想, 又满足公平性准则要求的新调度算法. 这种算法通过调节上、下界参数, 就可以比较容易地得到满足公平性的算法中吞吐量最大的近似最优解.

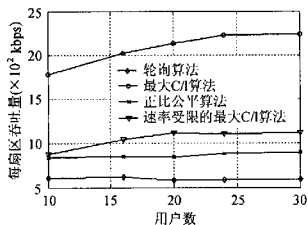


图 7 各种调度算法的吞吐量

参 考 文 献

- [1] Bender P, et al. CDMA/HDR: A bandwidth-efficient high-speed wireless data service for nomadic users. *IEEE Communications Magazine*, 2000, 38(7): 70-77.
- [2] 3GPP2, cdma2000 high rate packet data air interface specification, C. S0024, Version 2.0, October 27, 2000.
- [3] 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.
- [4] Khan F, Nanda S. Asynchronous Incremental Redundancy (IR) for 1xEV-DV concept proposal, 3GPP2 Simulation Ad hoc, September 20, 2000.
- [5] Zhou F. 1xEV-DV evaluation methodology (Rev.26), WG5 Evaluation AHG, May 9, 2001.

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 BUPT-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.