

文章编号:1001-9081(2007)06-1293-05

## CDMA2000 1xEV-DO 系统前向链路调度算法

罗兴国,赵海波,唐晓梅

(信息工程大学 信息工程学院,河南 郑州 450002)

(zhb@mail.ndsc.com.cn)

**摘要:** CDMA2000 1xEV-DO 作为第三代移动通信技术 CDMA2000 的演进,主要用来提供高速数据传输服务。系统前向时分复用,并采用“机会主义”调度算法实现前向数据吞吐量的提高。在介绍了 1xEV-DO 系统的基本原理与前向调度模型的基础上,详细讨论了近年来提出的各种前向链路调度算法,并对算法的优缺点做了比较,指出了部分算法研究过程中的不足之处。最后概述了前向调度算法下一步的研究方向。

**关键词:** CDMA2000 1xEV-DO; 前向链路; 调度算法; 容量

**中图分类号:** TP393.04    **文献标识码:**A

## Scheduling algorithms of forward link for CDMA2000 1xEV-DO system

LUO Xing-guo, ZHAO Hai-bo, TANG Xiao-mei

(Department of Communication Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou Henan 450002, China)

**Abstract:** As the evolution of CDMA2000 that is one of the third generation mobile communication technologies, the CDMA2000 1xEV-DO mainly offers high-speed data service. It achieves great improvement of data throughput in the forward link through time-division multiplexing and opportunistic scheduling. This paper introduced the basic theory of the system and the model of forward link scheduling, then deeply analyzed various proposed scheduling algorithms on forward link in the past few years, and pointed out their respective advantages and disadvantages, finally outlined the further research emphasis of forward link scheduling.

**Key words:** CDMA2000 1xEV-DO; forward link; scheduling algorithm; throughput

## 0 引言

移动通信与互联网的普及使得人们对无线数据业务的需求日益增长,且数据业务向多样性、高速率的方向发展。尽管第三代移动通信技术 CDMA2000 1x 的承载能力已经有了很大的提高,但对于丰富多彩的多媒体业务还是存在空中接口上的瓶颈。为此,3GPP2 发布了 CDMA2000 1xEV-DO (High Rate Packet Data, HRPD) 的标准,1xEV 的意思是“Evolution”,表明是对 CDMA2000 1x 技术的发展,DO 的意思为 Data Optimized,表示该技术是对 CDMA2000 1x 技术在提供数据业务方面的一个有效的增强。1xEV-DO 利用互联网上数据业务传输上下行不对称和对实时性要求不高的特征,前向时分复用且采用“机会主义”调度算法,实现多用户分集,从而有效提高了系统的数据吞吐量<sup>[1]</sup>。相对于 CDMA2000 1x 的 153.6kbit/s, 1xEV-DO (Release A) 技术可以提供前向高达 3.1Mbit/s 的峰值数据传输速率。

无线信道的快速变化主要是由衰落引起的,而无线衰落又可分为快衰落和慢衰落。快衰落通常在 ms 级的水平,良好设计的通信系统可以跟踪无线环境的变化,且通过采用合适的调制编码方式,能够提高通信的效率。文献[2]从理论上也得出了如下结论:在信噪比(SNR)高的时候增加数据传输量而在 SNR 低的时候减少数据传输量,相对于使用变化的功率来传输恒定速率的数据可以得到更大的系统容量。CDMA2000 1x 中的作法是采用功率控制来对抗衰落,以达到

理想的功率电平,满足信号解调对信噪比的要求;而 1xEV-DO 转变了系统的设计思路,采用速率控制机制,并结合自适应调制编码,前向始终以最大功率发射,确保前向始终有最好的信道环境,而通过调度选择当前无线环境好的用户为其提供传输服务,提高了系统的前向容量,也使得调度成为影响系统容量与性能的重要部分。

## 1 CDMA2000 1xEV-DO 系统介绍

### 1.1 系统原理

1xEV-DO 的前向由导频信道、MAC 信道、控制信道和业务信道采用时分复用(TDM)的方式组成<sup>[3]</sup>。业务信道用来传输业务数据,由系统中的所有用户共享使用;控制信道用于广播系统开销消息以及发送寻呼消息;而 MAC 信道通过码分的方式将用于过载控制的反向活动指示、反向功率控制和辅助实现虚拟软切换的 DRClock 三个子信道复用在一起。在时间轴上,1xEV-DO 将前向信道分为长 1.67ms 的时隙,每个时隙由 2048 个码片构成,时隙结构如图 1 所示。

1xEV-DO 的前向始终以最大功率发射,当系统处于空闲状态时,前向仅发射导频和 MAC 信道,而当系统中的用户有数据需要传输时,业务信道以时隙为单位在不同用户之间通过调度分配使用。同一时刻,系统只向一个用户发射数据,避免了小区内的多用户干扰,而且采用了自适应调制编码以适应时变的信道,表 1 列出了系统前向采用的可变数据速率集。1xEV-DO 在反向引入数据速率控制信道(DRC),移动台根据

收稿日期:2006-12-21; 修订日期:2006-02-27

作者简介:罗兴国(1951-),男,重庆人,教授,博士生导师,主要研究方向:数字通信、移动通信、软件无线电; 赵海波(1978-),男,山西阳城人,博士研究生,主要研究方向:移动通信网的 QoS; 唐晓梅(1967-),女,湖北武汉人,副教授,主要研究方向:移动通信。

测量的载干比来向基站申请能够实现数据可靠接收的最大前向传输速率;基站中的调度程序根据终端申请的速率以及一段时间内的时隙分配情况来决定下一个时隙给哪一个移动台

使用。一般当移动台处于深衰落状态时,调度程序就不给它分配传输时隙或少分配传输时隙,而更多地为申请高传输速率的移动台服务,从而实现系统数据吞吐量的提高。

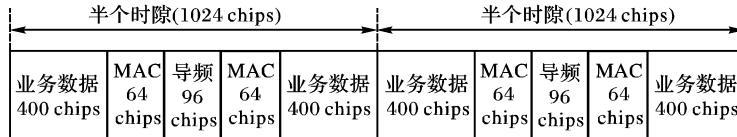


图 1 CDMA2000 1xEV-DO 前向信道时隙结构

表 1 CDMA2000 1xEV-DO 前向速率集

数据速率 (kbit/s)	时隙	分组大小 (bit)	码速率	调制方式
38.4	16	1024	1/5	QPSK
76.8	8	1024	1/5	QPSK
153.6	4	1024	1/5	QPSK
307.2	2	1024	1/3	QPSK
614.4	1	1024	1/3	QPSK
307.2	4	2048	1/3	QPSK
1228.8	1	2048	1/3	QPSK
921.6	2	3072	1/3	8PSK
1843.2	1	3072	1/3	8PSK
1228.8	2	4096	1/3	16QAM
2457.6	1	4096	1/3	16QAM

## 1.2 前向调度

由于 1xEV-DO 系统的前向为共享信道方式,任一时刻只有一个用户能够获得传输时隙,因此,基站处要为传送到每个用户的数据包提供缓存队列,队列的规则为先进先出(FIFO)。研究前向调度时,我们假定系统中  $N$  个用户在小区内均匀分布,对应于每个用户基站处都设有 FIFO 缓存队列,我们还假定系统中用户的数量在调度过程中固定不变,每个用户的数据包都缓存在各自的队列中,且不考虑缓存溢出情况。在这样的模型下,研究各种调度方法在提高系统容量,满足用户服务质量要求两个方面的性能。

调度的目的是多重的,从系统角度讲,由于无线资源的宝贵,因此首先要考虑的是充分利用无线资源,在 1xEV-DO 中就是提高系统前向的数据吞吐量。用户则注重最终的感受,这与用户的业务类型有很大关系,而不同业务类型对 QoS 的要求差别也较大。从服务质量的指标来看,主要包括数据传输速率、时延、抖动等方面。衡量调度算法好坏的标准并不是唯一的,一般从以下几个方面来衡量:系统容量、用户间的公平性、QoS、复杂度、适应能力。下面以两个最简单的调度算法为例进行说明。

最大载干比(maxC/I)算法完全不考虑公平性,其在每个调度时刻给 DRC 最高的用户分配传输时隙,从而使系统的数据吞吐量达到最大,但公平性极差,可能会导致部分用户长时间得不到传输服务,出现“饿死”现象,算法的适应能力也差。而公平性最好的轮转(Round Robin, RR)算法逐一为系统中的用户分配时隙,所有用户的响应时间一致,但系统不能获取多用户增益,没有利用无线信道好坏的信息,系统容量得不到提高,有悖于系统设计的初衷。通常,调度算法在公平性与容量优化之间都有不同的折衷。好的调度算法不仅要充分利用信道的状态信息,而且要能够满足一定的公平性要求。

## 2 调度算法

1xEV-DO 系统作为无线互联网的延伸<sup>[4]</sup>,早期主要用于

提供简单的下载服务,这些服务的共同特点是对时延不敏感,且用户关心的仅是实际感受到的平均下载速率,这导致算法调度的目标比较单一,就是最大化系统的数据吞吐量,并且适当考虑用户间的公平性。在这个背景下,最有效且应用最广泛的算法就是比例公平调度算法。

### 2.1 比例公平算法

比例公平调度(PFS)算法<sup>[5]</sup>引入了平均速率  $R$ ,在每个时隙为所有移动台计算并比较  $DRC/R$ ,选取其值最大的移动台为其提供数据传输。算法描述见表 2,其中  $r_i(t)$  为时隙  $t$  用户  $i$  申请的传输速率 DRC,而平均传输速率  $R$  为  $R_i(t)$ , $t_c$  为一固定时间常数,典型值为 1000 个时隙,1.67s。在  $R_i(t)$  的计算过程中,如果时隙  $t$  用户  $i$  未获得传输时隙时, $r_i(t)$  值取 0,否则就等于时隙  $t$  用户  $i$  的申请传输速率即 DRC 值。由于  $R$  的引入,当移动台在上一个时刻获得了传输时隙后,直接导致下一时刻  $R$  值的上升,其结果就是  $DRC/R$  的下降,再次获取传输时隙的机会变小。因此,PFS 在兼顾用户间相对公平的前提下,最大化了系统的数据吞吐量。值得指出的是,参数  $t_c$  的取值与用户可承受的最长未能接受服务的时间相关。考虑当某个用户的无线环境从很好的情况下突变为极差时,将会导致在一段时间内的 DRC 值都很低,而要重新获取传输时隙,只有等待平均速率  $R$  缓慢下降、 $DRC/R$  上升到一定程度时才有可能,这就会造成队列头部的数据包的时延过长。而且, $t_c$  越大,用户在分配时隙后, $R$  的变化幅度越小,算法对此用户的惩罚力度也小,就意味着算法更偏向于整体上信道状态好的用户。

比例公平调度算法的含义还在于:如果系统采用另外一种调度方法将某一用户的容量提高  $x\%$ ,则系统中其他用户在容量方面的损失之和要大于  $x\%$ <sup>[6]</sup>。文献[7]、[8]对 maxC/I, RR, PFS 三种调度算法在系统容量方面的性能进行了理论分析和仿真实验,结果表明:PFS 的平均吞吐量在 600 kbit/s ~ 800 kbit/s 之间,与应用系统的实际测试结果也基本一致。

PFS 是目前商用 1xEV-DO 系统中应用最广泛的调度算法,因此,对其的研究也不断深入,包括对算法特性的讨论<sup>[9~11]</sup>和对算法本身的改进<sup>[12,13,15,17,22,23,29]</sup>两个方面。PFS 算法的模型假定用户队列中的数据是无穷的,但实际情况并不是那样,文献[9]就从数学角度分析并证明了:在一定的数据到达过程中,PFS 是不稳定的,也就是说,对于队列中的数据包,PFS 并不能够保证所有的数据在有限的时间内被发送到移动台,而稳定的前提条件是,用户的 data 包到达过程和 DRC 的随机分布都是各态历经的。而文献[10]、[11]则从微分方程求解的角度进行了讨论并指出:不同 PFS 的调度过程对应于不同的凸效用函数,但都具备微分方程的渐近特性,调度的最终结果必然收敛于方程的平衡点。

尽管文献[12]、[13]提出的调度算法则以不同形式对 PFS 进行了改进,但调度的思想并没有改变,只是采用了不同

的处理方法在系统容量与用户公平性之间进行折衷与权衡,基本上属于一类。文献[12]在平均速率  $R$  的计算方法上做了改动,用 DRC 的一个指数函数来对  $R$  进行更新, $R_i(t+1) = (1 - 1/t_c) R_i(t) + f(r_i(t))/t_c, f(r_i(t)) = (r_i(t))^{(1-a)}$ 。在  $a = 0$  时,就是 PFS,当  $a > 0$  时,某用户获取传输时隙后, $R$  值上升较慢,在调度决策时对其的惩罚程度减弱,从而导致系统更多地为信道状态好、申请速率高的用户服务,用户间的不公平性增大;而在  $a < 0$  时,相反,公平性提高。该算法使得系统的前向调度更加灵活,从而可以根据使用环境的不同,在系统容量与公平性之间做出相应的调整。算法虽有指数运算,但由于 DRC 取值固定,因此可以用查表的方法来简化计算,实现并不复杂。

文献[13]认为 DRC 的平均值隐含着用户整体无线环境好坏的信息,在调度决策上将其考虑了进去,调度方法为: $j = \arg \max(r_i(t), \hat{r}_i(t))/R_i(t), \hat{r}_i(t+1) = (1 - 1/(at_c)) \hat{r}_i(t) + r_i(t)/(at_c)$ 。但作者认为实际意义不大,理由如下:DRC 的平均值是用户信道状态好坏的表现;而平均速率  $R$  则是经系统调度后用户实际感受的平均速率,从提高用户满意度的方面讲,我们关注的是平均速率  $R$ ;而要提高系统容量,调度需要的是 DRC 反映当前时刻用户信道状态的 DRC,换句话说,DRC 的平均值信息对于“机会主义”调度来说,是没有意义的。

## 2.2 基于速率的调度算法

PFS 对用户的 data 传输的保证是相对的,在传输速率上并没有确切的保证。这种调度在系统负载轻、用户数量较少的情况下,由于系统实现的前向传输速率很高,用户感受的数据速率依然较高。但当系统接入的用户数量增多时,系统的软特性就突显出来,用户感受到的传输速率时快时慢,因此,人们开始研究能够为用户提供数据传输速率相对固定的调度算法。实现方法可以分为两类:一类利用 PFS 中的平均速率  $R$ <sup>[14~17]</sup>;另一类则借助于虚拟令牌机制,将数据流的动态行为转换为决策变量<sup>[18,19]</sup>,实现对用户数据传输速率的保证。

文献[14]和[15]都利用了指数函数的非线性,将用户速率控制在目标速率附近。不同的是:文献[14]中的算法基于 maxC/I,而文献[15]中的动态目标调度(DTM)建立在 PFS 基础之上。算法描述见表 2,其中  $S$  为设定的目标速率,  $r_i(t)$ 、 $R_i(t)$  的定义同 PFS。当某用户的平均速率  $R_i(t)$  与设定的  $S$  相差过远时,指数项数值增大,被调度选中的可能性相应加大,以提高用户实际的传输数据速率;而当两者相差不大时,指数项数值趋近于 1,算法等同于 maxC/I,利用多用户分集,提高系统容量。如果将目标速率设定一个数据速率集,在计算决策等式时,选用各自的目标速率,就可以为系统内用户提供不同的速率保证,提高算法的灵活性。而 DTM 通过加权因子  $F_i(t)$  来改变 PFS 的调度特性。DTM 以所有用户的平均速率为目标,在限定的速率范围之内,尽量实现用户间的公平调度。当用户速率偏离目标速率时,通过指数或是负指数调高或是降低被选中的可能性。算法见表 2。其中,  $r_i(t)$ 、 $R_i(t)$  的定义同 PFS,  $F_i(t)$  为用户  $i$  在时刻  $t$  的调度加权因子。DTM 和文献[14]中的算法在思想上是一致的,文献[14]对用户速率的保证较灵活,而 DTM 速率控制更细致,公平性好一些,但算法复杂。文献[16]提出最小带宽保证的比例公平调度,算法采用线性规划方法,在保证用户最小传输速率的约束下,做出实现系统容量最大的调度选择。但由于涉及规划运算,算法实现复杂。而文献[17]将目标速率与平均速率的比值作为

PFS 算法的调度加权因子,算法虽然简单,但控制效果并不理想。

文献[18]、[19]虽然都采用了虚拟令牌机制,但实现方法也不尽相同。文献[18]中的算法监控用户虚拟令牌队列长度与目标速率的比值,并将其作为调度决策的输入变量,为此值最大的用户分配时隙。因为比值越大,用户的实际数据传输速率与目标速率相差越远,调度优先权应更高。通过为用户设定各自的目标速率,算法对传输速率的保证比较灵活。文献[19]从微分方程求解的角度出发,试图寻找优化系统容量的最佳效用函数,并结合令牌机制,利用指数函数的非线性,将用户的实际数据传输速率控制在预定的速率范围之内。

## 2.3 基于时延的调度算法

由于系统设计上的原因,1xEV-DO 对数据传送的时延是没有保证的。如何通过有效的调度来进行弥补,减小在无线接入过程中的时延,成为系统调度研究的热点。要提供时延保证,就必须获取用户数据包的时延信息,而利用时延信息的方式上,可以分为两类:文献[20~23]直接使用各队列头部分组的时延来做出调度决策;而文献[26~28]对此信息进行了转换,采用时延的一个函数或其他形式。

文献[20]提出了最大加权时延优先(LWDF)调度算法,算法描述见表 2。其中,  $Pr\{W_i > T_i\} \leq \delta_i$  为用户  $i$  对时延的概率要求,  $W_i$  为用户  $i$  队列头部数据分组的最大时延,  $T_i$  为用户  $i$  可以接受的最大时延,  $\delta_i$  为用户  $i$  可以接受的时延越界的最大概率。LWDF 对时延的保证最为简单直接,但是算法没有利用用户的状态信息 DRC,对系统容量的优化考虑不够。因此文献[21]提出了改进的 M-LWDF 算法,算法描述见表 2。由于系统的调度是一个随机逼近的过程,而且以概率的形式满足用户的时延要求,因此,算法并不保证所有用户的时延概率同时得以满足,而参数  $\gamma_i$  在其中的作用比较关键。文献[25]对这个问题进行了讨论,仿真结果表明:在  $\gamma_i = a_i/R_i$  时,调度的结果最佳。为避免算法的调度性能对参数的过多依赖,文献[22]在 PFS 的基础上进行改进,提出了指数(EXP)算法。算法对所有用户队列的加权时延进行平均,如果某一队列的时延与其他队列相比,时延超过一定水平后,决策等式中的指数项变大,从而将该用户获取传输时隙的可能性变大,如果所有队列的时延相差不大,则算法等同于 PFS。值得指出的是,尽管上述三种算法采用了不同的处理方法,但在相应的文献中都证明了算法是容量优化的,即:只要系统本身处于稳定区域内,算法经过相当长一段时间后能够使队列稳定,而不会出现队列无限增长的情况。文献[23]中的调度方法与 EXP 算法基本一致,只是在决策项中对 DRC/R 取了平方,调度相对更倾向于提高系统的容量。而文献[24]则用实例说明了:通过合理分配时隙,在利用信道状态提高系统容量的同时也可以满足用户的 QoS 需求,并且简单明了地叙述了 M-LWDF 算法的调度机制。

文献[26]通过引入时延的一个递减函数:效用函数,将满足用户的时延需求转换为对效用函数的控制与优化。与上述几种算法单独考虑各个用户时延的思想不同的是,该方法将调度的目标变换为优化系统所有分组的效用函数之和,也就使系统内所有用户总的时延最小。但效用函数与时延的函数关系是不确定,需要根据算法的应用环境进行仿真与验证,算法的适用性不强。

文献[27]提出了基于优先级的公平调度(PBFS)算法。该算法从数学的角度出发,分析了调度优先级与信道状态、数

据包等待时间和数据传送量的关系,经过数学推导与一定的简化,推演出了各分组数据流的调度优先级。算法存在两个问题,其一算法包含对数和指数运算,算法实现复杂;其二是对于数据包等待时间、数据传送量与调度优先级的关系,算法经定性分析后建立的数量关系,数学上并不严格,用于简化的

部分假设不合理。举例说明:分析调度优先级与数据包等待时间之间关系时,认为流媒体业务的数据包时延超过有效期限的,服务器采取丢包处理,从而对数量关系做出简化。这个分析是不正确的。因为在无线接入网的队列模型中,只是在内存容量不够的情况下进行丢包,而与数据包的时延无关。

表 2 典型调度算法比较

算法名称	调度算法描述	调度目标	复杂度	适用性
PFS	$j = \arg \max_i \frac{r_i(t)}{R_i(t)}$ $R_i(t+1) = (1 - \frac{1}{t_c}) \cdot R_i(t) + \frac{1}{t_c} \cdot r_i(t)$	系统容量	低	好
文献[15]中算法	$j = \arg \max_i r_i(t) \cdot \exp\left(\frac{S - R_i(t)}{1 + \sqrt{S}}\right)$ $j = \arg \max_i \frac{r_i(t)}{R_i(t)} \cdot F_i(t)$ $F_i(t+1) = F_i(t) + \frac{F_i^d(t)}{M}$ $R_{Darger}(t) = \frac{\sum R_i(t)}{N}$ $F_i^d(t) = \begin{cases} -e^{(R_i(t)-R_{\max})}, & R_{\max} < R_i(t) \\ -(R_i(t) - R_{Darger}), & R_{\min} < R_i(t) < R_{\max} \\ e^{(R_{\min}-R_i(t))}, & R_i(t) < R_{\min} \end{cases}$	传输速率	中	好
DTM		传输速率	高	差
LWD	$j = \arg \max_i a_i W_i(t)$ $a_i = -\log(\delta_i)/T_i$ $Pr\{W_i > T_i\} \leq \delta$	时延	高	中
M-LWDF	$j = \arg \max_i \gamma_i W_i(t) r_i(t)$ $r_i = a_i / R_i$	时延	高	差
EXP	$j = \arg \max_i \left( \frac{r_i(t)}{R_i(t)} \cdot \exp\left(\frac{a_i W_i(t) - \bar{a} \bar{W}}{1 + \sqrt{\bar{a} \bar{W}}}\right) \right)$ $\bar{a} \bar{W} = \frac{1}{N} \sum_i a_i W_i(t)$	时延	高	中

## 2.4 多 QoS 指标的调度算法

多媒体业务在移动网络中的开发与应用,促使调度不能仅仅满足单项 QoS 要求,而要综合考虑对数据业务在时延、速率等方面的要求。文献[28]通过对 PFS 中的决策等式进行加权,提出了同时支持时延、用户数据传输速率的调度算法。算法中的调度权重在即定的范围内,根据满足业务 QoS 的情况进行动态的调整,从而改变了 PFS 的调度特性。但算法存在两个问题:一是如何衡量业务的 QoS 状态,文中没有详细论述;二是如何合理确定权重的调整范围和权重调整的步阶。这些问题的解决与用户的具体业务类型有很大关系,需要深入研究,算法适用性不强。

无线网络的特点使得提供严格的 QoS 保证并不现实,那样做会大大降低系统的通信效率。因此,人们定义了概率 QoS 的观点,保证以一定的概率满足用户的 QoS 指标。文献[29]从信息论的角度出发,根据业务的概率 QoS 推算得出系统的有效容量,并引入资源分配和接纳控制机制,共同实现 QoS 有保证的调度。算法首先对当前系统的有效容量做出估计,由接纳控制机制决定是否接入新的用户,而对系统内业务的 QoS 主要由资源分配机制来保证,从而简化了调度本身的复杂度。

上述两种算法以不同的方法实现了支持 QoS 的分组调度,但这些算法都没有充分考虑业务 QoS 需求的多样性以及其对分组调度的影响。鉴于业务区分模型已被 3GPP2 组织确定为 CDMA2000 系统实现端到端 QoS 的原则<sup>[30]</sup>,文献[31]提出了一种与其紧密结合的算法。其思想是:依据文献[30]中各业务等级对不同 QoS 指标的定性要求,采用模糊决策的处理方法,将不同业务等级对各个 QoS 指标的要求量化为加权向量;接着采用不同的处理方法,就调度过程中数据流在满足各个 QoS 指标要求的程度进行量化;然后,对量化结果进行加权求和并排序,最后根据排序结果做出调度决策。

该算法考虑了时延、抖动、平均数据传输速率以及信道利用率四项,优点在于模型比较简单,处理形式单一,但是,业务等级对各 QoS 指标的要求的量化仍需进一步研究。此外,算法要获知数据流所属的业务等级,已经有了跨层设计的思想。

## 2.5 调度算法的新进展

采用通用的调度方法来保证新型业务的 QoS 有时是很困难的。以 1xEV-DO 系统近期研究的重点 VoIP 为例,由于话音与数据的业务特性相差很大,如话音需要严格的对称信道,对时延很敏感等。就要求系统的分组调度做出相应的调整,文献[32]在这方面做出了初步的探讨。传统的调度算法对时延仅提供概率上的保证,且由于调度动态过程的随机性,因此,无法满足话音对时延的严格要求。而文献[32]对系统的帧结构做了调整,将两个帧共 24 个时隙进行捆绑使用,按比例将部分时隙固定分配给 VoIP 业务数据流,而剩余时隙由其他非 VoIP 业务数据流通过竞争分配使用。前一部分时隙在所有 VoIP 用户中按 maxC/I 算法进行分配,而后者则按 PFS 算法进行分配。而对于视频流,等量数据包中的图像信息量是不相等的,文献[33]利用这个特性,在系统缓存不溢出的约束条件下,运用多目标优化的方法,寻找能够最大化信道利用率和数据包的图像信息量,且使缓存数据量最小的优化调度。但算法复杂度高,适用性不强。

近期,1xEV-DO Release A 标准已经颁布,技术上有大的跨越,如:新增对短数据分组的发送支持、同一物理层包可以包含两个用户的数据等<sup>[34]</sup>。针对上述情况,文献[35]提出双用户公平调度算法,其作法是根据 PFS 做出第一次用户选择,而对于另外一个用户,在所用的调制编码方式与前一用户的数据发送不冲突的前提下,选择申请数据传输速率最高的用户。调制编码不冲突,包括 Walsh 码资源,重传时隙两个方面。由于 1xEV-DO 采用了 HARQ,因此,实际操作还比较复杂。如果第一个用户的传输时隙提前完成,则第二个用户的

传输也将被中止;而在第一个用户重传时隙内,如第二个用户传输已结束,则还可以再次选择用户。

### 3 结语

CDMA2000 1xEV-DO 最具特色的技木是系统的前向调度,调度是提高系统容量的关键。从系统前向调度的输入信息上看,主要包括两类:一类是反映用户信道状态信息的申请速率 DRC;另一类是从系统分组调度的动态过程中获取的信息,如 PFS 中的平均速率 R、LWDF 中的数据包时延等等。对系统前向调度的研究是随着系统的应用和技术的进步而不断发展的,从时间上来看,最初算法调度的侧重点在于提高系统的容量,兼顾用户间的相对公平性,而随着系统承载实时业务的需要,调度要同时考虑系统容量和数据业务的 QoS,而对业务 QoS 的考虑从满足数据容量或者是时延的单项要求,进而发展到综合考虑多项 QoS 指标。

#### 参考文献:

- [1] BENDER P, BLACK P, GROB M, et al. CDMA/HDR: A bandwidth efficient high speed data service for nomadic users[ J]. IEEE Commun Mag, 2000, 38(3): 70 – 78.
- [2] GOLDSMITH AJ, VARAIYA PP. Capacity of fading channels with channel side information [ J]. IEEE Trans. Information Theory, 1997, 43(6): 1986 – 1992.
- [3] 3GPP2 C. S0024 v4.0. CDMA2000 high rate packet data air interface specification[ S]. March 2004.
- [4] PARRY R. CDMA2000 1xEV-DO[ J]. IEEE Potential, 2002: 10 – 13.
- [5] JALALI A, PADOVANI R, PANKAJ R. Data throughput of CDMA-HDR a high efficiency-high data rate personal communication wireless system[ A]. VTC'2000[ C]. 2000. 1854 – 1858.
- [6] KELLY F. Charging and rate control for elastic traffic[ J]. European Transactions on Telecommunications, 1997, 8: 27 – 33.
- [7] CHOI W, CHOI DH, LEE JC, et al. Throughput analysis of 1xEV-DO system with multi cells[ A]. ITC-CSCC2002[ C]. 2002. 1924 – 1927.
- [8] CHOI EH, CHIO W, ANDREWS JG. Throughput of the 1x EV-DO system with various scheduling algorithms[ A]. ISSSTA'2004[ C]. 2004. 359 – 363.
- [9] ANDREWS M. Instability of the proportional fair scheduling algorithm for HDR[ J]. IEEE Trans. Wireless Communications, 2004, 3(5): 1422 – 1426.
- [10] HOLTZMAN JM. Asymptotic analysis of proportional fair algorithm [ A]. PIMRC'2001[ C]. 2001, 2: F33 – F37.
- [11] KUSHNER HJ, WHITING PA. Convergence of proportional – fair sharing algorithms under general conditions[ J]. IEEE Trans. Wireless Communications, 2004, 3(4): 1250 – 1259.
- [12] YAMAGUCHI A, TAKEUCHI Y. Forward link packet scheduler for high speed packet data system[ A]. PIMRC'2001[ C]. 2001, 2: F21 – F24.
- [13] CHOI Y, HAN Y. A channel-based scheduling algorithm for CDMA2000 1xEV-DO system[ A]. PIMRC'2002[ C]. 2002. 2259 – 2263.
- [14] AKGUL F, SUNAY M. Efficient resource allocation for statistic QoS assurances in HDRbased wireless packet data[ A]. PIMRC'2004[ C]. 2004.
- [15] HUANG CY, SU HY, VITEBSKY S, et al. Scheduling for 1xEV-DO: third generation wireless high-speed data systems [ A]. VTC'2003[ C]. 2003, 3: 1710 – 1714.
- [16] HAHM S , LEE H , LEE J . A minimum - bandwidth guaranteed scheduling algorithm for data service in CDMA/HDR system[ A]. Human. Society@ Internet'2003[ C]. Seoul, Korea, 2003. 757 – 763.
- [17] KIM H, KIM K, HAN Y, et al. Aefficient scheduling algorithm for QoS in wireless packet data transmission[ A]. PIMRC'2002[ C]. 2002, 5: 2244 – 2248.
- [18] SHAKKOTTAI S, STOLYAR AL. Scheduling algorithms for a mixture of real – time and non-real-time data in HDR[ A]. ITC'2001[ C]. 2001. 793 – 804.
- [19] ANDREWS M, QIAN L, STOLYAR A. Optimal utility based multi-user throughput allocation subject to throughput constraints [ A]. INFOCOM'2005[ C]. 2005.
- [20] STOLYAR AL, RAMANAN K. Largest weighted delay first scheduling: large deviations and optimality[ J]. Annals of Applied Probability, 2001, 11(1): 1 – 48.
- [21] ANDREWS M, KUMARAN K, RAMANAN K, et al. Scheduling in a queueing system with asynchronously varying service rates[ R]. Bell Labs Technical Memorandum, 2000.
- [22] SHAKKOTTAI S, STOLYAR AL. Scheduling for multiple flows sharing a time-varying channel: the exponential rule[ J]. American Mathematical Society Translations, 2002, 207: 329 – 334.
- [23] SUNAY MO, EKSIM A. Fair scheduling for spectrally efficient multi-service wireless data provisioning[ J]. International Journal of Communication System, 2004, 17: 615 – 642.
- [24] ANDREWS M, KUMARAN K, RAMANAN K, et al. Providing quality of service over a shared wireless link[ J]. IEEE Commun Mag, 2001, 39(2): 150 – 154.
- [25] ANDREWS M, KUMARAN K, RAMANAN K, et al. CDMA data QoS scheduling on the forward link with variable channel conditions [ R]. Bell Labs Technical Memorandum, 2000.
- [26] LIU P, BERRY R, HONIG ML. Delay-sensitive packet scheduling in wireless networks[ A]. WCNC'2003[ C]. 2003, 3: 329 – 334.
- [27] 赵新胜, 鞠涛尤, 肖虎. 一种适用于 B3G 移动通信系统下行共享信道的调度算法[ J]. 电子学报, 2005, 33(7): 1173 – 1176.
- [28] KIM K, KIM H, HAN Y. A proportionally fair scheduling algorithm with QoS and priority in 1xEV-DO[ A]. PIMRC' 2002[ C]. 2002, 5: 2239 – 2243.
- [29] WU D, NEGI R. Utilizing multiuser diversity for efficient support of quality of service over a fading channel[ J]. IEEE Trans. Vehicular Technology[ J], 2005, 54(3): 1198 – 1206.
- [30] 3GPP2 S. R0079-0 v1.0. Support for end-to-end QoS stage 1 requirements[ S]. May 2004.
- [31] ZHAO HB, LUO XG, TANG XM. Forward scheduling with qualityof service guaranteed in CDMA2000 1xEV-DO [ A]. IEEE ISCIT'2005, 2005. 1132 – 136.
- [32] CHOI YJ, BAHK S. Scheduling for VoIP service in CDMA2000 1xEV-DO[ A]. ICC'2004[ C]. 2004, 3: 1495 – 1499.
- [33] OZCELEBI T, VITO FD, SUNAY O, et al. Optimal Cross-Layer Scheduling for Video Streaming over 1xEV-DO[ A]. to appear in VLB[ C]. 2005.
- [34] 3GPP2 C. S0024-A v2.0. CDMA2000 high rate packet data air interface specification[ S]. July 2004.
- [35] DOST S, SUNAY M, BHARGAVA V. A feasibility study of two user downlink transmission for IS-856 system[ A]. PIMRC'2004[ C], 2004, 3: 2029 – 2033.