

## 一种用于 CDMA 反向链路的公共速率控制算法

高月红 张欣 杨大成  
(北京邮电大学电信工程学院 北京 100876)

**摘要:** 该文从实际应用角度出发, 提出了一种改进的 CDMA 系统反向链路公共速率控制算法。在该算法中, 分组数据业务移动台根据外环功率控制设置点的变化以及反向激活比特依概率控制其自身速率提高或降低。文中对概率取值进行了分析研究并构造了一种复杂度较低的次优解。经过系统级仿真, 并与已有的基于反向激活比特的速率控制算法相比较, 各项结果显示了改进后的算法能够保持用户服务质量(Quality of Service, QoS), 并从一定程度上提高了系统吞吐量和资源利用率。

**关键词:** CDMA; 反向链路; 速率控制; 外环功率控制; 反向激活比特

**中图分类号:** TN914.52

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2007)06-1314-05

## A Common Rate Control Algorithm of Reverse Link in CDMA System

Gao Yue-hong Zhang Xin Yang Da-cheng

(Telecommunication Engineering School, Beijing University of Posts & Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract:** This paper proposes an improved reverse link common rate control algorithm in CDMA system from practical utilization aspect. In this scheme, packet data service mobile controls its data rate to rise or decrease according to the change of Outer-Loop Power Control (OLPC) set point and Reverse Activity (RA) bit in a probabilistic manner. Analysis of probabilities is also presented in this paper and a sub-optimal and less complex solution is constructed. It is proved with system level simulation results that the improved scheme can enlarge system throughput and enhance resource utilization while maintaining Quality of Service (QoS) compared to existing algorithm only based on reverse active bit.

**Key words:** CDMA; Reverse link; Rate control; Outer-Loop Power Control (OLPC); Reverse Activity (RA) bit

### 1 引言

CDMA系统在提供传统语音业务的同时, 还可以提供高速率的分组数据业务。在这种多业务系统中, 要使用十分有限的无线资源支持高速数据传输, 无线资源管理就成为非常关键的环节, 这可以包括两个阶段: 第一阶段是针对新到达用户进行的接纳控制(Call Admission Control, CAC); 第二阶段包括针对已接入用户进行的功率控制、速率控制、切换和调度等。而功率控制和速率控制又是其中最为重要的两个组成部分<sup>[1-4]</sup>。在前向链路中, 基站能够通过分组调度器控制传输的功率和速率。对于反向链路, 基站也可以采用类似的方法控制各移动台的分组传输状况。但这种方法增加了基站与移动台之间的信令开销和时延。因此, 在反向链路中由每个移动台根据基站发出的一些简单控制信息进行资源控制的分布式算法与集中式算法相比, 具有一定的优势, 可以显著减少开销。

在 CDMA 系统中采用快速动态功率控制和速率控制对反向链路的负荷情况进行调节。在反向业务信道上, 传输的

数据速率受到反向的负荷水平、移动台的可用发射功率以及数据队列长度等因素的影响。基站可以通过发送广播或单播消息限制移动台的反向数据速率, 还可以根据反向负荷情况, 动态地通过前向发送的反向激活(Reverse Activity, RA)比特流, 调整反向数据速率的上限。文献[5]中提出的针对 CDMA 2000 1x EV-DO 系统的速率控制方法是: 当某一移动台检测到 RA 比特表明业务信道的干扰大于一定门限时, 它以一定的概率降低其速率, 或保持当前速率, 这样, 从系统整体上看, 反向链路负荷会降低。反之, 当移动台检测 RA 发现业务信道干扰较小时, 它以一定概率提高其速率, 或保持当前速率。文献[6]中给出的算法与文献[5]中的算法类似, 不同之处在于 RA 比特的设定规则及以概率提高或降低移动台的速率时考虑了内环功控的影响。RA 比特设置基于接收信号信噪比指示的中断率。当某一移动台检测到 RA 比特表明当前中断率较为严重时, 如果内环功控比特指示信道质量较差, 这时移动台以较大的概率降低速率; 如果内环功控比特表明信道质量较好, 这时移动台以较小的概率降低速率; 同样地, 当移动台检测到 RA 比特表明中断率较小时, 如果内环功控比特表明信道质量较差, 这时移动台以较小的

概率增加速率,否则以较大的概率增加速率。

本文在文献[5]和文献[6]的基础上,针对CDMA系统的特点,对速率控制算法进行了几项改进:第一,采用系统负载状况作为RA比特设置参照;第二,考虑到CDMA系统中FER是由外环功率控制(Outer-Loop Power Control, OLPC)调节的,因此,在依概率提高或降低移动台的速率时考虑了外环功率控制设置点的影响以保证用户的FER满足要求;最后,针对CDMA系统中数据用户传输速率的特点,通过系统最优化方程,改进了速率调整的概率取值,从而使系统性能得以显著改善。

文章第2节介绍了速率控制中两个重要参数的设置规则。第3节具体分析了速率控制方法,介绍了改进型概率取值的确定依据。在第4节中给出了系统级仿真条件、仿真结果及结果分析。

## 2 反向激活比特及OLPC设置点设置规则

下面介绍基站和移动台如何相互配合完成速率控制,以及其中所包含的反向激活(RA)比特设置和外环功率控制(OLPC)过程。

### 2.1 速率控制整体流程

在速率控制的过程中考虑了优先权分配、系统可用功率限制、数据队列信息等因素的影响。具体实现流程如下:

- (1) 每10帧的开始,由基站计算每个移动台的优先权;
- (2) 基站根据移动台的优先权确定可以分配给移动台的速率上限;
- (3) 在每1帧基站根据移动台的数据队列信息以及可用功率计算当前帧可支持的最大速率;
- (4) 由基站根据其所负责的移动台的当前速率更新各扇区容量,设置RA比特,并将RA比特设置广播到每个移动台;
- (5) 由移动台根据相应的速率控制算法确定下一周期的传输速率;
- (6) 若10帧已经结束,则返回到(1);若仅仅为1帧的结束,则返回(2)。

本文主要关注的是速率控制具体执行时的方法,因此接下来介绍第(5)步中下一帧传输速率的确定过程,而不介绍其它步骤中涉及的优先权、速率上限等参数的确定过程,有关信息参见文献[7]。

### 2.2 反向激活比特计算

反向链路负载为各个用户负载贡献之和,与用户的速率等参数密切相关。根据文献[4],反向链路负载因子定义为

$$\eta_{UL} = (1+i) \sum_{j=1}^N \frac{1}{1+W/[(E_b/N_0)_j \cdot R_j \cdot \nu_j]} \quad (1)$$

其中  $i = \frac{\text{其他小区干扰}}{\text{自身小区干扰}}$  为其他小区干扰与本小区干扰之比,

$E_b/N_0$  为每个用户比特的能量除以噪声功率谱密度,可以表

示为  $(E_b/N_0)_j = \frac{W}{\nu_j R_j} \cdot \frac{P_j}{I_{\text{total}} - P_j}$ , 式中  $W$  是码片速率,  $P_j$

是来自用户  $j$  的信号接收功率,  $\nu_j$  是用户  $j$  的激活因子,  $R_j$  是用户  $j$  的比特速率,  $I_{\text{total}}$  是基站处包括热噪声功率在内的总接收宽带内的功率。

当  $\eta_{UL}$  接近 1 时,相应的噪声恶化量接近于无穷且系统达到它的极限容量。通常为了保证一定的服务质量,系统负载要低于一个门限值  $\eta_{Th}$ 。当实际负载低于此门限时,表明目前系统仍有剩余资源供用户使用;反之,当实际负载高于门限时,表明目前系统负载较为严重,用户的服务质量可能恶化,需要采取一定的措施降低系统负载。因此,第  $t$  个周期内的反向激活比特设置规则如下:

$$\text{RAB}(t) = \begin{cases} 0, & \eta_{UL} < \eta_{Th} \\ 1, & \eta_{UL} \geq \eta_{Th} \end{cases} \quad (2)$$

### 2.3 外环功率控制设置点设置

CDMA2000 系统中闭环功率控制包含两个反馈环:外环(outer-loop)和内环(inner-loop)。外环功率控制主要是通过测量误帧率,并定时地根据目标误帧率来调节设置点(set point),将该设置点调大或调小以维持恒定的目标误帧率。

当反向帧解码失败,表明该用户的反向链路信道状况恶化,继续使用当前发射功率目标已不能满足误帧率要求,因此需要调高外环功率控制设置点;反之,当帧可以正确解码时降低外环功率控制设置点<sup>[8]</sup>。

## 3 速率控制算法

在基站完成 2.1 节的步骤(1)–步骤(4)中的操作后,由移动台根据其自身状况、已知的扇区负载状况和速率控制算法进行速率调整。定义  $RI = \{0, RI_{\min}, 2 \times RI_{\min}, \dots, RI_{\max}/2, RI_{\max}\}$  为速率前缀集,  $RI(t)$  为移动台在第  $t$  个周期内的速率前缀。

### 3.1 基于 RA 比特的速率控制算法

由于所有用户接收到的来自同一基站的 RA 比特是相同的,因此,若所有用户都只根据 RA 比特同时降低或升高速率,必将使得系统在轻载和过载间不停波动。也就是说,当用户接收到表明当前系统负载较轻的 RA 比特后,若所有移动台都同时升速率,将很可能导致系统过载,而用户在下一周期接收到系统过载指示比特后,同时降低速率又很可能导致系统即刻空闲,这种空闲接下来会再次引起系统过载。如此往复,系统负载状况不断波动,导致系统性能严重下降。因此,移动台以一定的概率调整速率,使系统负载在一定范围内调整,以避免系统出现较大的波动。

当移动台接收到的  $\text{RAB}(t)=1$  时,表明目前系统处于拥塞状态,移动台以概率  $p(RI(t))$  将当前速率等级降低一个等级作为下一个周期内的速率,或以概率  $1-p(RI(t))$  保持当前速率等级不变。当移动台接收到的  $\text{RAB}(t)=0$  时,以概率  $q(RI(t))$  将当前速率等级升高一个级别作为下个周期内的速

率, 或者以概率  $1-q(\text{RI}(t))$  保持当前速率。由于系统中存在最高速率和最低速率限制, 因此升降速率后不能超过这两个界限。

上述速率控制算法可以统一表示为

$$\text{RI}(t+1) = \begin{cases} \left. \begin{array}{l} \max(A-1, 0), \quad \text{以概率 } p(A) \text{ 成立} \\ A, \quad \text{以概率 } 1-p(A) \text{ 成立} \end{array} \right\} \\ \text{RAB}(t) = 1 \\ \left. \begin{array}{l} \min(A+1, \text{RI}_{\max}), \quad \text{以概率 } q(A) \text{ 成立} \\ A, \quad \text{以概率 } 1-q(A) \text{ 成立} \end{array} \right\} \\ \text{RAB}(t) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中  $A=\text{RI}(t)$ 。

### 3.2 基于 RA 比特和 OLPC 的速率控制算法

基于 RA 比特的速率控制算法只参考系统的负载状况, 而没有将各用户自身的不同信道条件考虑在内。加入外环功控设置点的变化可以很好的弥补这一不足, 使得速率控制的方法更加精确和完善。外环功率控制命令是根据反向链路帧是否正确解调进行设置的。降低设置点意味着该用户的信道状况良好, 应在系统资源仍有剩余时给予更多提升速率的机会, 或在系统拥塞时以较低的概率降速率; 升高设置点表示该用户信道状况恶化, 应以大概率降低速率或以小概率升速率。通过 OLPC 设置点的变化, 反映用户信道状况的改变趋势, 并根据该趋势将系统资源分配给条件更好的用户, 从而保证更加充分、合理和有效地利用有限的系统资源。

当  $\text{RAB}(t)=1$  时, 若用户外环功率控制设置点升高, 则  $\text{RI}(t+1)=\max(\text{RI}(t)-1, 0)$  以较大的概率  $P_d^{\text{upper}}$  成立, 或者  $\text{RI}(t+1)=\text{RI}(t)$  以概率  $1-P_d^{\text{upper}}$  成立; 若设置点降低, 则  $\text{RI}(t+1)=\max(\text{RI}(t)-1, 0)$  以较小的概率  $P_d^{\text{lower}}$  成立, 或者  $\text{RI}(t+1)=\text{RI}(t)$  以概率  $1-P_d^{\text{lower}}$  成立。

当  $\text{RAB}(t)=0$  时, 若用户外环功控设置点升高, 则  $\text{RI}(t+1)=\min(\text{RI}(t)+1, \text{RI}_{\max})$  以较小的概率  $P_i^{\text{lower}}$  成立, 或者  $\text{RI}(t+1)=\text{RI}(t)$  以概率  $1-P_i^{\text{lower}}$  成立; 若设置点降低, 则  $\text{RI}(t+1)=\min(\text{RI}(t)+1, \text{RI}_{\max})$  以较大的概率  $P_i^{\text{lower}}$  成立, 或者  $\text{RI}(t+1)=\text{RI}(t)$  以概率  $1-P_i^{\text{upper}}$  成立。

### 3.3 概率取值的最优化求解

文献[9]中给出了一种最优化 1xEV-DO 系统公平性和稳定性的模型和分析方法, 对系统中采用的基于 RA 比特的速率控制方法给出了与式(1)含义相同的另一个数学描述, 如下式所示:

$$\begin{aligned} R_i(t+1) = & \text{RAB}(t) [N_i(t+1) \geq p(R_i(t))] R_i(t) + \text{RAB}(t) \\ & \cdot [N_i(t+1) < p(R_i(t))] \left[ \frac{R_i(t)}{2} \vee R_{\min}(t) \right] \\ & + (1 - \text{RAB}(t)) [N_i(t+1) < q(R_i(t))] \\ & \cdot (2R_i(t) \wedge R_{\max}(t)) R_i(t) + (1 - \text{RAB}(t)) \\ & \cdot [N_i(t+1) \geq q(R_i(t))] R_i(t) \end{aligned} \quad (4)$$

其中  $R_i(t)$  代表第  $t$  个周期的速率,  $A \vee B$  表示取二者中较大的一项,  $A \wedge B$  表示取二者中较小的项,  $\{N_i(t+1), i=1, 2, \dots\}$  表示  $[0, 1]$  范围内的独立同分布的随机变量的样值,  $p$  和  $q$  分别表示降速率和升速率的概率。

文献[9]中提出了使得用户公平性最优以及满足系统稳定性的优化方程(文献[9]中式 6), 给出了使用分布式算法求解最优化方程的方法, 并指出文献[5]中给出的速率调整概率(表 1)满足该最优化方程的条件。从表 1 中可以看出, 不同速率对应的概率是不一样的, 这是因为不同速率等级之间速率跃迁的大小不同导致的。速率差别越大, 速率提升越难, 而速率降低则应越容易。因此, 表格中升速率概率  $q$  随速率前缀的增加而减小, 降速率概率  $p$  随速率前缀的增加而增大。文献[3]中分析了表 1 中概率取值的合理性。由于表 1 中的取值满足文献[9]的“命题 2”(即在速率调整对应的  $T/P$  升高值  $\Delta T_{\text{up}}(T) > 0$  和降低值  $\Delta T_{\text{down}}(T) < 0$  满足  $|\Delta T_{\text{up}}(T) / \Delta T_{\text{down}}(T)|$  是自变量  $T$  的单调递减函数时, RLMAC 算法逼进一个递增和严格凹的效用函数), 因此可以提供很好的公平性, 公平系数高达 0.9996。文献[6]中没有考虑速率不同对概率的影响, 而是在条件相同的情况下, 对所有用户采用相同的速率, 即将  $p_d^{\text{upper}}$  和  $p_i^{\text{upper}}$  都设置为 0.7, 将  $p_d^{\text{lower}}$  和  $p_i^{\text{lower}}$  设置为 0.3。

表 1 基于 RA 比特的速率转移概率

速率集	数据速率(kbps)	$q$	$p$
0	0	1	0
1	9.6	3/16	0
2	19.2	1/16	1/16
3	38.4	1/32	1/16
4	76.8	1/32	1/8
5	153.6	0	1

本文在文献[9]的基础上, 分析了采用 RA 比特和 OLPC 设置点共同控制速率时用户公平性和系统稳定性的最优化问题。定义  $U_i(\eta_i)$  为用户  $i$  的效用函数, 代表用户  $i$  在自身负载贡献为  $\eta_i$  时的满意度。系统的目标是使用户总满意度最大, 同时也要满足系统负载限制。因此, 系统最优化问题可以用式(5)表示:

$$\left. \begin{array}{l} \max \sum_{i=1}^N U_i(\eta_i) \\ \text{s.t. } \sum_{i=1}^N \eta_i \leq \eta_{\text{Tn}} \text{ 和 } \eta_i \geq 0 \end{array} \right\} \quad (5)$$

限制条件将系统负载状况控制在门限以内从而保证系统的稳定性。根据文献[9], 在效用函数  $U_i(\eta_i)$  为递增、可微、严格凹函数的条件下, 可以利用分布式算法求解方程的最优解。由于式(5)中效用函数及限制条件是自变量  $\eta_i$  的函数并且是通过功控环进行一系列迭代收敛之后获得的, 因此无法给出明确的闭式表达式, 从而求解最优解十分复杂。本文通过构造一种速率调整概率取值方案(表 2), 使其中的取值满足

文献[9]中的“命题 2”,进而说明此概率取值方案可以作为最优化问题的一个次优解。

表 2 基于 RA 比特和 OLPC 的速率转移概率

速率集	数据速率 (kbps)	$p_i^{upper}$	$p_i^{lower}$	$p_d^{upper}$	$p_d^{lower}$
0	0	1	1/2	0	0
1	9.6	1/4	1/8	1/32	0
2	19.2	1/8	1/16	1/8	1/32
3	38.4	1/16	1/32	1/8	1/32
4	76.8	1/16	1/32	1/4	1/16
5	153.6	1/16	1/32	1/2	1/16
6	307.2	0	0	1	1/8

## 4 系统级仿真及结果

### 4.1 仿真条件

系统级仿真采用的是时间驱动和快照法相结合的仿真方法<sup>[7]</sup>,基于CDMA 2000 1x EV-DV系统基础上实现。在仿真中采用 19 个小区(每小区 3 个扇区)包含wrap around过程的服务区模型。系统中语音用户和FTP数据用户并存,并且所有用户均匀地分布于每个小区中。表 3 给出了仿真中的主要系统参数。根据文献[7]制定的标准,负载门限设置为 0.45。采用表 2 中确定的速率调整概率。

表 3 系统仿真参数

参数	默认值
路径损耗公式	28.6+35lg(d) dB
载波频率	2 GHz
系统带宽	1.25 MHz
码片速率	1.2288 Mcps
热噪声功率谱密度	-174 dBm/Hz
负载门限	0.45
每时隙时间长度	1.25 ms
基站间间隔	2 km
BTS 的最大发射功率	43 dBm

### 4.2 仿真结果

本文给出了仅基于 RA 比特和基于 RA 比特及 OLPC 设置点的速率算法结果及比较。在仿真中固定选择一种速率控制算法,并在固定语音用户(分别为每扇区 5 个或 10 个),改变数据用户数(分别为每扇区 5 个, 10 个和 15 个)的情况下得到一组仿真结果。图 1 至图 3 给出了采用两种速率控制算法下的结果曲线图。

从图中可以看出,在语音用户个数固定的情况下,各项结果都是随着数据用户数的增加而增大。从图 1 中可以看出,在系统中数据用户以及语音用户数相同的情况下,采用 RA 比特和 OLPC 设置点共同进行速率调整得到的吞吐量大于只依据 RA 比特进行调整的结果。从图 2 中可以看出,在系

统中数据用户以及语音用户数相同的情况下,当系统负载较轻时,共同控制比 RA 比特单独控制的系统利用情况更加充分,而在系统负载较重时(例如每扇区 FTP 用户为 15 个时),共同控制的方法可以有效的将系统负载控制在门限值之内,而 RA 单独控制的系统负载已经超过了门限。图 3 给出了误帧率(Frame Error Rate, FER)的对比结果图。RA 比特和 OLPC 设置点共同控制方案下用户 FER 小于单独控制的情况,并且两种算法的 FER 都没有超过满足服务质量要求的 FER 上限 5%。

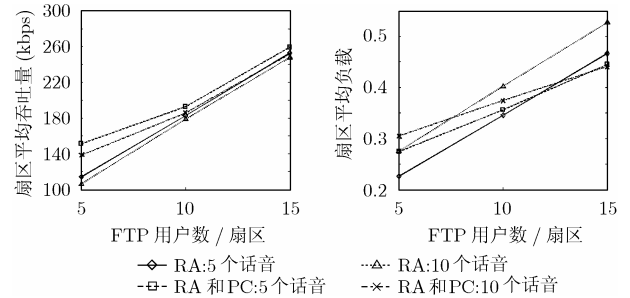


图 1 扇区平均吞吐量(kbps)

图 2 扇区平均负载

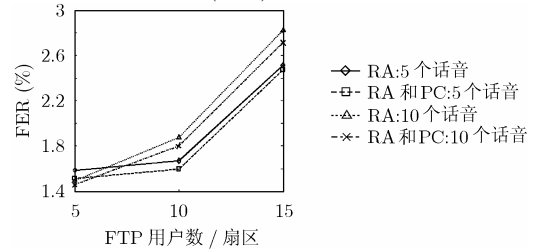


图 3 误帧率(%)

## 5 结束语

本文在文献[5,6]的基础上,提出了使用 RA 比特和 OLPC 设置点共同控制速率的一种改进型速率控制算法,并根据文献[9]中提出的分析方法,对速率控制过程中涉及的概率取值问题进行了分析研究,并在 CDMA2000 1xEV-DV 仿真平台上对改进的速率控制算法进行了模拟。系统级仿真结果证明,该方法对于语音和数据业务共存的混合型业务系统,能够在保证业务质量的前提下,提高系统的吞吐量,使系统的无线信道资源得以充分利用。

## 参考文献

- [1] Chulajata T and Kwon H M. Combinations of power controls for cdma2000 wireless communications system. Vehicular Technology Conference (VTC-Fall 2000), Boston, USA, 24-28 Sept. 2000, vol.2: 638-645.
- [2] Rintamäki M, Koivo H, and Hartimo I. Adaptive closed-loop power control algorithms for CDMA cellular communication systems. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2004, 53(6): 1756-1768.
- [3] Wu Qiang. Performance of optimum transmitter power control in CDMA cellular mobile systems. *IEEE Trans. on*

- Vehicular Technology*, 1999, 48(2): 571–575.
- [4] Dixit S, Guo Y, and Antoniou Z. Resource management and quality of service in third-generation wireless networks. *IEEE Communications Magazine*, 2001, 39(2): 125–133.
- [5] Chakravarty S, Pankaj R, and Esteves E. An algorithm for reverse traffic channel rate control for CDMA2000 high rate packet data systems. IEEE GLOBECOM '01, San Antonio, Texas, USA, 2001, vol. 6: 3733–3737.
- [6] Jeong Dong Geun and Jeon Wha Sook. Congestion control schemes for reverse link data transmission in multimedia CDMA systems. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2003, 52(6): 1489–1496.
- [7] 3GPP2. 1xEV-DV evaluation methodology (V13). C30-20030604-002, 2001.
- [8] Sampath A, Kumar S P, and Holtzman J M. On setting reverse link target SIR in a CDMA system, Vehicular Technology Conference (VTC-Spring 1997), Phoenix, USA, 4-7 May 1997, vol.2: 929–933.
- [9] Tinnakornsriruphap P and Lott C. On the fairness and stability of the reverse link MAC layer in cdma2000 1xEV-DO. IEEE International Conference on Communications (ICC 2004), Paris, France, 20–24 June, 2004, vol. 1: 144–148.
- 高月红: 女, 1981 年生, 博士生, 研究方向为移动通信系统中的无线资源管理和服务质量保证.
- 张 欣: 男, 1975 年生, 副教授, 硕士生导师, 现从事移动通信网系统技术方向的研究.
- 杨大成: 男, 1951 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究兴趣为移动通信系统中的理论和实现.