

下行信道质量受控反馈算法与调度算法的研究¹

张 欣 杨大成

(北京邮电大学 93 信箱 北京 100876)

摘 要 该文先介绍了在第三代移动通信技术体制 cdma2000 1xEV-DO/DV 中的下行信道质量反馈机制;然后提出了一种新的反馈控制算法,并结合一种综合考虑吞吐量和公平度的调度算法(正比公平调度算法)进行了分析与仿真。通过与未采用该策略的调度算法结果相比较,显示了新的算法在保持公平度的条件下能够提高系统吞吐量,同时减少了移动台的功耗。这种新的算法应用灵活,其策略对其它需要对共享资源调度的领域也有意义。

关键词 CDMA, 信道质量, 反馈, 调度算法

中图分类号 TN914.4

1 引言

为了在第三代移动通信技术体制 cdma2000 1x^[1] 的基础上提供更高的下行数据速率,先后提出了 1xEV-DO^[2] 和 1xEV-DV^[3],两者都在下行链路上采用了时分方式的高速数据信道,为了提供尽可能高的系统吞吐量,它们都要求移动台对下行信道质量进行测量或估计²,并以尽量小的延迟反馈给基站,基站根据这些信息采用某种调度算法选择移动台进行传输。下行信道质量的反馈策略包括很多方面,主要是信道估计或预测;下面将从反馈频度对调度算法性能的影响展开研究。

本文先简介 cdma2000 1xEV 中已有的或正在研究的信道质量反馈策略;然后提出一种受控的信道质量反馈算法方案并进行分析;最后结合 1xEV-DV 平台给出相应的仿真结果并进行性能比较。注意:以后本文所提到的“信道质量”除非特别说明,都指下行链路的,它由码分信道的 C/I 或者该 C/I 所能够支持的数据传输速率来表示,二者的关系受实际采用的编码方案和调制阶数影响。

2 已有的反馈机制

下面分别介绍 1xEV-DO 和 1xEV-DV 中所采用的下行信道质量反馈机制。对于 1xEV-DO,文献 [2] 中规定,接入终端 (Access Terminal, AT, 即移动台 MS) 根据测量的下行时分³导频的 C/I 估计出下行可以支持的数据速率,将此速率通过反向的“数据速率控制”(Data Rate Control, DRC)信道报告给接入点 (Access Point, AP, 即基站 BS)。DRC 信道报告 DRC 速率值的频率有 4 种: 600, 300, 150, 或 75 次/秒;而且每种频率又有非门控 (Nongated) 和门控 (Gated) 两种发送模式。这些都可以通过协议参数设置,但其灵活性是有限的,因为每次调整都需要消息的交互,开销大,实时性较差。

对于 1xEV-DV,在目前已提交 3GPP2 的 L3QS 空中接口联合提案^[3]中,反向用来反馈信道质量的信道是“反向信道质量指示信道”(Reverse channel quality indicator channel),它将测量到的前向导频信道的 C/I 以 800 次/秒的频率报告给基站。该提案中尚未提出 1xEV-DO 中类似的可以重新配置的模式作为选项。

3 受控信道质量反馈算法

3.1 基本出发点 通常,下行信道质量反馈的信息对于基站来说应当是越多越好,因为这样可以帮助基站对所有用户的无线环境进行综合分析,从而进行更合理的调度。但这些反馈信息中,有些可能导致自己未被调度上的信息看作是“冗余”的,当然它们是有用的,相当于告诉基站先不要向自己传输。在这方面有简化的余地。1xEV-DO 中的反馈机制已经有了一些改进,即:在一定的情况下连续地反馈,另一些情况下则减少反馈次数,但这还不够灵活。此外,还需

¹ 2001-10-22 收到, 2002-07-11 改回

² 事实上闭环功率控制也需要反馈,所不同的是它应用于速率基本恒定的信道,本文不对此重点研究。

³ 与 1xEV-DO 不同, 1xEV-DV 中下行采用的是时间连续的码分导频。

要一定的准则来判断在什么情况下需要反馈信道质量。下面提出的算法有了进一步的改进, 这种改进对于延长移动台电池使用时间和降低反向链路上的干扰有好处。

3.2 受控信道质量反馈算法描述 算法基本流程如下:

- (1) 移动台判断当前时隙 (slot) 内前向分组数据信道 (F-PDCH) 是否正在向自己传输数据。若是, 转向 (4); 否则继续下一步。
- (2) 移动台判断当前时隙内是否正在等待重传的 sub-packet。若是, 转向 (4); 否则继续下一步。
- (3) 移动台判断只要下面两个条件之一满足就转向 (4); 否则不向基站进行信道质量反馈, 直接转向 (5)。
 - (a) 当前准备向基站反馈的信道质量高于一定动态门限;
 - (b) 移动台连续空闲的时间超过一定 (动态) 门限;
- (4) 向基站反馈下行信道质量 (C/I), 以使基站采用正比公平调度算法^[4]进行调度。继续下一步。
- (5) 结束。

上面用到的一些术语 (如 F-PDCH, sub-packet 等) 同文献 [3] 中定义。对于流程第 (3) 步中的两个判断条件, 可以有很多灵活的选择, 研究余地较大。下面将第 (3) 步的条件 (a) 表示为

$$(C/I)_k^{\text{feedbk}}(t) > T_k(t) = (C/I)_k^{\text{avg}}(t) - T_{\text{adjust}}(\text{dB}) \quad (1)$$

其中 $(C/I)_k^{\text{feedbk}}(t)$ 等于在 t 时刻第 k 个移动台要向基站反馈的信道质量值, $k = 1, \dots, K$ 。 $T_k(t)$ 等于在 t 时刻第 k 个移动台控制信道质量反馈的门限值。 $(C/I)_k^{\text{avg}}(t)$ 等于移动台在一定时间窗口内测得的短期平均 C/I。 T_{adjust} 为控制 C/I 反馈门限的修正参数, 设它不随 t 或 k 变化。算法中还加入了对移动台持续空闲时间的限制, 这是为了保证一定的公平度, 但由于信道质量的动态变化较快且范围大, 当该门限取较大值 (如 $400\text{slot}=0.5\text{s}$, 大于快衰的相关时间) 时, 它的影响已经不明显。下面我们将研究重点放在 T_{adjust} 上。

3.3 文献 [5] 中的结论 下面先简介一下文献 [5] 中对正比公平调度算法的解释。令

$$(C/I)_k(t) = (C/I)_k^{\text{feedbk}}(t) = a_k b_k(t), \quad (\text{非分贝值}), \quad k = 1, \dots, K \quad (2)$$

其中 a_k 是用户 k 的 C/I 中与到基站距离有关的部分, 体现了路径损耗和阴影衰落。 $b_k(t)$ 是用户 k 的 C/I 中与快衰有关的部分, 其平方根服从 Rayleigh 或 Rice 分布。

假设 1 各移动台的 $b_k(t)$ 为独立同分布的并且在各 slot 间也独立, 同时与发送功率无关。

假设 2 数据速率与发送功率呈近似线性关系。

令 T_k^{thput} 为稳态情况下的用户 k 的吞吐量, 即一定时间窗内的平均数据速率。如文献 [5] 中说明的, 在前面两个假设的条件下, 对所有 k , T_k^{thput}/a_k 是相等的, 并且所有用户以渐进相等的时间百分比和平均功率接收数据。这个假设条件和结论在下面的分析中还要用到。注意: 根据假设 1, 由于 $b_k(t)$ 在各个 slot 间独立, 因此后面在时间平均的意义上将 $b_k(t)$ 写成 b_k 。

3.4 受控信道质量反馈算法的模型及分析 采用了受控的信道质量反馈后, 由于 (1) 式的限制, $(C/I)_k^{\text{feedbk}}(t) \leq T_k(t)$ 的用户 k 通常将不会被调度算法选中。将 (2) 式代入 (1) 式, 由于 $(C/I)_k^{\text{avg}}(t)$ 体现出的是路径损耗和慢衰, 在不影响分析的条件下可近似地由 a_k 来表示, 那么算法基本流程 (3) 中判决条件 (a) 简化为 $10 \log(b_k) > (-T_{\text{adjust}})(\text{dB})$; 若令 $T_d = 10^{-T_{\text{adjust}}/10}$, 则可写成

$$b_k > T_d \quad (3)$$

那么某基站收到了它所服务的移动台 (每基站平均 K 个) 反馈的 C/I 并进行了调度和传输的概率为

$$\begin{aligned} P_{BS-TX} &= P\{\text{基站服务区内至少有一个移动台反馈了 } C/I\} \\ &= 1 - P\{\text{基站服务区内没有一个移动台反馈了 } C/I\} \cong 1 - \prod_{k=1}^K P\{b_k \leq T_d\} \quad (4) \end{aligned}$$

其中用 “ $\cong$ ” 是因为忽略了其它判决是否反馈 C/I 的条件。后面的仿真结果说明这样近似是基本合理的。

进一步, 由于 b_k 独立同分布, 设 $r_k = \sqrt{b_k}$ 服从 Rayleigh 分布, 则各用户对应的概率密度函数都有如下的形式^[6](可忽略下标 k)

$$p(r) = \begin{cases} (r/\sigma^2) \exp[-r^2/(2\sigma^2)], & 0 \leq r \leq \infty \\ 0, & r < 0 \end{cases} \quad (5)$$

代入 (4) 式, 有

$$P_{BS-TX} \cong 1 - \left(\int_0^{\sqrt{T_d}} p(r) dr \right)^K = 1 - \{1 - \exp[-T_d/(2\sigma^2)]\}^K \quad (6)$$

下面, 先假设当前服务区内的数据用户移动台经历了相同的路径损耗和慢衰, 即

$$a_k = a, \quad k = 1, \dots, K \quad (7)$$

进一步假设数据传输速率与反馈的 C/I 成正比, 那么基站系统的平均吞吐量可以近似表达为

$$\begin{aligned} T_{BS}^{\text{thput}} &= c \cdot a \cdot P_{BS-TX} \cdot E(b_k | b_k > T_d) = c \cdot a \cdot P_{BS-TX} \cdot \frac{\int_{\sqrt{T_d}}^{\infty} b_k p(r) dr}{\int_{\sqrt{T_d}}^{\infty} p(r) dr} \\ &= c \cdot a \cdot P_{BS-TX} \cdot (T_d + 2\sigma^2) \end{aligned}$$

其中 c 为常数。将 (6) 式代入上式可得

$$T_{BS}^{\text{thput}} = c \cdot a \cdot (T_d + 2\sigma^2) \cdot \{1 - [1 - \exp(-T_d/(2\sigma^2))]\}^K \quad (8)$$

根据 (8) 式, 当 $c = a = \sigma^2 = 1$ 时, 在用户密度 K 变化时, Rayleigh 信道下, T_{adjust} 对系统吞吐量的影响分析结果如图 1 所示。当 T_{adjust} 趋于正无穷时, $P_{BS-TX} = 1$, 该算法就退化成普通的正比公平调度算法。图 1 说明选择适当的 T_{adjust} (或 T_d) 可以提高吞吐量。

当用户均匀分布在服务区时, 由于各用户向基站反馈 C/I 的概率只与 b_k 有关, 所采用的调度算法对每个用户也是一样的, 根据文献 [5] 中的分析, 那么每个用户传输的时间比例也将是一样的, 与 a_k 无关, 因此对于所有用户 k , T_k^{thput}/a_k 仍然是相等的。只是由于 T_d 的限制, 用户在接受服务时的 C/I 会以更高的概率等于一个较高的值, 因此系统吞吐量在 T_d 取适当值是会比单纯的正比公平算法高。也就是说, 当用户均匀分布在服务区时, (8) 式应改写为

$$T_{BS}^{\text{thput}} = c \cdot E(a_k) \cdot (T_d + 2\sigma^2) \cdot \{1 - [1 - \exp(-T_d/(2\sigma^2))]\}^K \quad (9)$$

设用户 k 到基站的距离为 d_k , 根据文献 [7, 8] 的附录 A 中对于路径损耗的定义, a_k 近似正比于 $d_k^{-4} 10^{-\xi_k/10}$, 其中 ξ_k 服从对数正态分布, 与其近场分量和远场分量相关系数为 50%, 标准差 $\sigma = 8.9\text{dB}$ 。那么根据文献 [7] 中相关推导, 有

$$E(a_k) = \frac{1}{K} \cdot c_0 \cdot E \int \int_S d^{-4}(x, y) 10^{-\xi/10} \kappa dA(x, y) \quad (10)$$

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 $(3\sqrt{3}/2)$ 。进一步, 由于 ξ 与位置无关, (10) 式可以写成

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

上式中各部分在服务区和 ξ 的分布确定的情况下, 都是与每扇区的平均用户数无关的定值, 因此可记 $\bar{a} = E(a_k)$, 则 (9) 式就变为

$$T_{\text{BS}}^{\text{thput}} = c \cdot \bar{a} \cdot (T_d + 2\sigma^2) \cdot \{1 - [1 - \exp(-T_d/(2\sigma^2))]^K\} \quad (12)$$

这说明了当用户均匀分布在服务区时, 根据文献 [5] 中的两个假设条件, 系统吞吐量的变化趋势应与用户经历相同的慢衰时应当基本一致。下面的仿真结果也显示了这一趋势。

4 仿真结果及讨论

4.1 仿真模型 仿真所采用的基本方法如文献 [8] 中所规定, 主要仿真参数如文献 [8] 中表 2.1.2-1 所示。快衰的信道模型如文献 [8] 中表 2.2.1-1 所示。需要说明的是, 这里仿真所采用的是 6×6 的小区部署模型, 球面展开, 数据在所有小区统计。每个小区分成 3 个扇区, 用户均匀分布于服务区中。没有语音移动台, 只有 FTP(File Transfer Protocol) 数据移动台。相应的公平度判断准则如文献 [8] 中 2.1.4 节所示。本文中仿真主要考虑下行数据信道的性能, 模型包括了所涉及到的反向控制信道。信道质量反馈暂不考虑延迟和差错。

仿真中所采用的链路级基本技术如文献 [3] 所定义。仿真平台对文献 [3] 中的异步自适应的递增冗余技术 (Asynchronous Adaptation Incremental Redundancy, 缩写为 A²IR) 的控制过程进行了充分的模拟。

4.2 仿真结果 以下各结果中若不特别说明, 信道模型都为文献 [8] 中的 Model A, 移动台运动速度为 3km/h 。

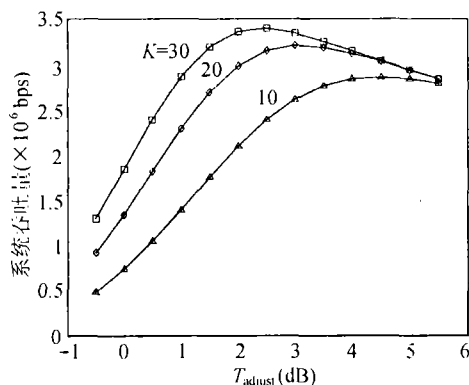


图 1 系统吞吐量与 C/I 反馈门限修正参数 T_{adjust} 的关系 (分析结果)

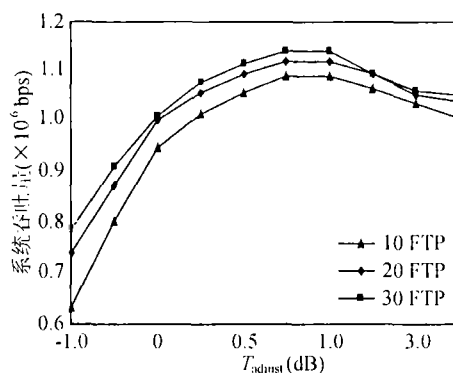


图 2 系统吞吐量与 C/I 反馈门限修正参数 T_{adjust} 的关系 (仿真结果)

图 2 显示了平均每个扇区基站一侧的吞吐量随 C/I 反馈门限修正参数 T_{adjust} 变化的情况, 各曲线分别对应了每扇区有 10 个, 20 个, 和 30 个 FTP 用户的情况, 也分别与图 1 中的 $K=10$, 20, 和 30 相对应; 两者相比, 对给定用户密度的情况下, 其变化趋势是吻合的, 这说明前面的分析是合理的。即, 选择适当的 T_{adjust} 将提高正比公平调度算法的吞吐量。

图 3 显示的是在每扇区 20 个 FTP 用户时, 移动台平均 C/I 反馈时间比例与其到基站距离的关系, 可以看出, 距离基站最近的和最远的移动台之间 C/I 反馈时间比例有些差异, 这是因为正比公平算法对平均 C/I 高的用户调度的机会多, 反馈时间的比例也相对较高。另外从图 3 还可以看出平均反馈时间比例受 T_{adjust} 的影响程度, 这一点在图 4 中也有体现。

图 4 中各曲线与图 3 中曲线一一对应, 显示了 C/I 反馈时间比例小于一定百分比 (见横坐标) 的移动台数量占总移动台数量的比例 (见纵坐标)。例如, 在 $T_{\text{adjust}}=3\text{dB}$ 时, 在低于 80% 的仿真时间内向基站进行了 C/I 反馈的移动台数量占总移动台数量的约 50%。从图 4 可以看出, 随着 T_{adjust} 的提高 (相当于 T_d 降低), 即 C/I 反馈门限降低, 反馈时间比例高的移动台的比例在增加。这些仿真结果都与前面的分析相吻合。

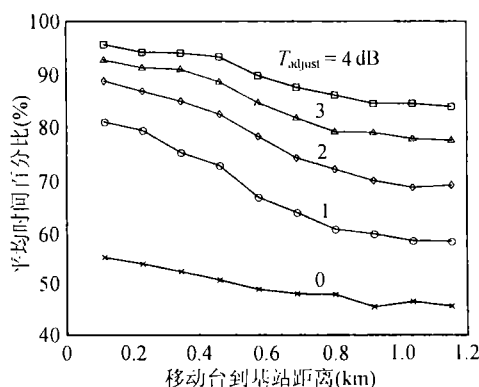


图 3 移动台反馈 C/I 的平均时间百分比与其到基站距离的关系

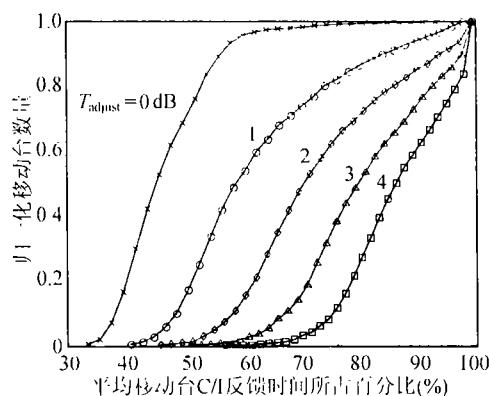


图 4 C/I 反馈时间百分比在移动台中的累积分布

系统吞吐量的提高对正比公平调度算法的公平度通常会产生负面影响, 但采用了受控 C/I 反馈时, 系统吞吐量增加时公平度仍然得到了保证, 如图 5 所示。其中, 图例的“NFTP”表示每扇区有 N 个 FTP 用户, “有”或“无”分别表示有或没有受控信道质量反馈, 它们对应的曲线在“判决准则”对应曲线的右侧表示满足公平度准则, 该准则规定了获得相对低吞吐量的用户比例不应超过一定限度, 参考图中曲线, 即归一化吞吐量低于 0.5, 0.2, 和 0.1 的用户的比例分别不超过用户总数的 50%, 20%, 和 10%。

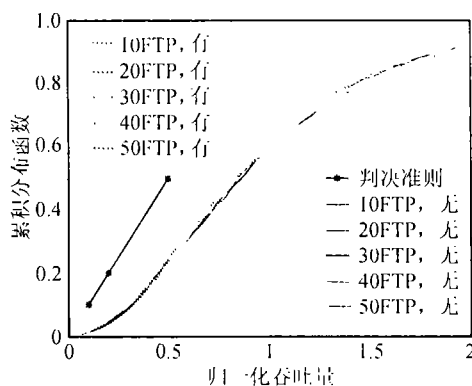


图 5 受控信道质量反馈对正比公平调度算法公平度的影响 (T_{adjust} 为 3dB)

5 结 论

本文提出了受控的信道质量反馈算法,并结合正比公平调度算法、在 cdma2000 1xEV-DV 的基础上对其性能进行了分析和仿真。该方法对于只有分组数据用户的情况,在保证正比公平调度算法的公平度条件下,充分利用多用户带来的分集效应,提高了系统的平均吞吐量,并能降低移动台的功耗以及反向链路上总的干扰。所提出的受控信道质量反馈算法应用方式灵活;它能较好地与正比公平调度算法兼容,与现有 1xEV-DO/DV 协议兼容,对移动台的要求宽松。该算法所采用的策略还可以应用到其它的需要反馈的、由调度算法在相互竞争的服务请求之间分配共享资源的技术中。

参 考 文 献

- [1] 3GPP2, Physical Layer Standard for cdma2000 Spread Spectrum Systems, C. S0002-A, Version 5.0.
- [2] 3GPP2, cdma2000 High Rate Packet Data Air Interface Specification, C. S0024, Version 2.0.
- [3] LG, LSI, Lucent, Qualcomm, and Samsung (L3QS), Updated Joint Physical Layer Proposal for 1xEV-DV, contribution 3GPP2-C50-20010611-009-L3QS-Updated-PL-Text.
- [4] A. Jalali, R. Padovani, R. Pankaj, Data throughput of CDMA-HDR, a high efficiency data rate personal communication wireless system, Proc. VTC2000-Spring, Tokyo, May, 2000, 1854-1858.
- [5] J. M. Holtzman, CDMA forward link waterfilling power control, Proc. VTC2000-Spring, Tokyo, May, 2000, 1663-1667.
- [6] T. S. Rappaport, Wireless Communications Principles and Practice, New Jersey, Prentice Hall, Inc., 1996, 172-174.
- [7] A. J. Viterbi, CDMA: Principles of Spread Spectrum Communication, Massachusetts, Addison-Wesley Publish Company, 1995, 178-182.
- [8] 3GPP2, 1xEV-DV Evaluation Methodology Addendum (V4), C50-20010709-021R1-1xEV-DV-Evaluation-Methodology-Addendum-V4.

A STUDY ON THE DOWNLINK CHANNEL QUALITY FEEDBACK CONTROL ALGORITHM AND SCHEDULING ALGORITHM

Zhang Xin Yang Dacheng

(PO Box 93, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract At first, in this paper, the feedback mechanisms of downlink channel quality for cdma2000 1xEV-DO/DV, a 3G technical proposal, are described briefly. Then a new feedback control algorithm is presented and integrated with proportional fair scheduling algorithm. The modified scheduling algorithm is studied by analysis and simulation. It is shown that this new algorithm can bring some significant improvements over the ordinary scheduler without feedback control in terms of system throughput, leaving no harm on fairness. In addition, the new algorithm will be helpful to reduce the power consumption of mobile terminals. The fundamental strategy underlying this new algorithm will be useful to other application fields where shared resources are needed to be scheduled.

Key words CDMA, Channel quality, Feedback, Scheduling algorithm

张 欣: 男, 1975 年生, 博士生, 现从事 CDMA 移动通信的研究。

杨大成: 男, 1951 年生, 教授, 博士生导师, 现从事移动通信系统的研究。