

一种基于计费的 WCDMA 功率控制方法¹

魏蛟龙 张 驰 陈 恒

(华中科技大学电子与信息工程系 武汉 430074)

摘 要 在第三代移动通信系统中, 为了有效地提高系统容量和通信质量, 需要对无线资源如发射功率作合理的动态分配。该文通过研究 WCDMA 系统中上行链路的干扰情况, 推导得出 WCDMA 系统的容量与业务性能指标的关系, 通过定义网络资源份额, 将功率控制问题转换为总量小于 1 的网络资源份额的分配问题, 然后利用统一价格拍卖对网络资源份额进行最优配置, 使得发射功率这一重要无线资源合理地分配给对其评价最高的用户业务, 最后给出了上述算法的数值仿真。

关键词 宽带码分多址, 无线资源分配, 功率控制, 计费, 网络资源份额

中图分类号 TN914.4

1 引 言

在现代移动通信系统中, 为了有效地降低系统的干扰, 提高系统容量和通信质量, 需要对无线资源作合理的动态分配。发射功率是重要的无线资源, 为用户所共享, 功率控制是无线资源管理和分配的重要组成部分。

第三代移动通信系统的设计要求支持多媒体业务, 如声音、视频、图像和数据传输等。这些业务在传输速率、服务质量 (QoS)、延时要求和接入优先级等方面都有很大不同。多业务的引入使功率控制的研究面临新的挑战: 一是多媒体业务的引入会使宽带码分多址 (WCDMA) 系统中的网络拥塞现象十分普遍, 用户对网络无线资源的总需求大大超过了网络的供给, 网络资源成为了一种典型的稀缺资源, 同时为所有业务提供足够的资源是不现实的; 二是平均分配不再是合理和有效的, 系统应根据用户的不同需要, 为用户分配不同的功率, 以提高整个系统的容量和服务质量; 三是业务的多元化也促进了用户的多元化, 在商业性质的网络中不同的用户之间, 用户与网络之间在资源分配的问题上必然存在利益冲突, 过去那种假设用户间通过合作 (Cooperation) 来实现分配策略是不现实的。

如何更有效地分配稀缺资源, 从而最大限度地实现资源的潜在价值, 正是经济学研究的主题。这是我们在网络资源分配中引入经济学方法的内在理论根据。针对这种情况, 通过在用户、网络间建立市场机制, 利用价格杠杆来调节用户需求和控制资源分配, 从而优化系统效率和提高用户满意度^[1]。本文通过定义资源份额, 将功率与业务性能、用户对资源的占用联系起来, 利用价格机制来实现最优的功率控制。

在 CDMA 系统中通过计费来达到无线资源的有效配置, 是国外学术界研究的一个热点问题, 如文献 [2-5]。在这些文献中, 网络方都需先假定用户的效用函数的形式, 而且计费与用户的发射功率成正比。本文采用了与之不同的另一种思路和计费方法。在 4.3 节中我们将阐明新方法对这些文献中计费方法的优势。

2 WCDMA 系统模型

功率控制算法可以分为单小区和多小区进行讨论。由于多小区的功率控制分配问题极为复杂, 我们将以单小区为例进行讨论。又由于系统容量通常受上行链路限制, 所以我们仅考虑上行链路。

用户实际发送的功率与链路损耗、扩频带宽、各用户的信息速率、服务质量 (QoS) 要求有关。由于各个业务要求的 QoS 不同, 其平均误码率也不同, 而且这些业务基带信号占用的带宽

¹ 2002-04-02 收到, 2002-09-30 改回

湖北省自然科学基金 (No.99J041、No.2001ABB104) 资助

也各不相同, 而系统的扩频带宽是相同的。为了解决这一问题, 采用了两级扩频的方法, 此时不同业务的扩频增益不同。因此在理想功率控制条件下, 对于同类型的业务, 基站的接收功率应该相同, 对于不同类型的业务, 基站接收到的功率应该不同。WCDMA 的上行链路使用正交可变参数码 (OVSF) 编码。即使上行链路的不同信道使用的扩频增益和发送速率不相同, OVSF 码也能保证这些信道之间的正交性。

仅考虑单个小区, 该小区有若干用户。对每个用户, 系统支持具有不同的信息速率 (比特速率) 和 QoS (信干比) 要求的不同业务。设某一时刻小区中产生 M 个呼叫, 每个呼叫 i 的发送速率是 R_i , 平均信干比 (SIR) 要求是 α_i , 则呼叫 i 的实际 (SIR) $_i$ 为^[6]

$$(\text{SIR})_i = \frac{W}{R_i} \left[p_i / \left(\sum_{j \neq i}^M p_j + n_i \right) \right] \geq \alpha_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (1)$$

其中 p_i 是呼叫 i 到达基站的功率, W 是系统的扩频带宽, W/R_i 即为呼叫 i 的处理增益 (processing gain), n_i 是热噪声和外小区用户对呼叫 i 的干扰之和。

令 $\gamma_i = \alpha_i R_i$, 则 γ_i 表征呼叫 i 所需占用的网络资源; 将其归一化, 令 $s_i = \gamma_i / (\gamma_i + W)$, 则 s_i 表征呼叫 i 所需占用的网络资源份额 (share)。此时 (1) 式可写为

$$p_i \geq W \gamma_i \left(\sum_{j \neq i}^M p_j + n_i \right), \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (2)$$

将 p_i 看作未知量, 则 (2) 式可写成方程组的形式为

$$\left. \begin{aligned} (W/\gamma_1)p_1 - p_2 - \dots - p_M &\geq n_1 \\ -p_1 + (W/\gamma_2)p_2 - \dots - p_M &\geq n_2 \\ &\vdots \\ -p_1 - p_2 - \dots + (W/\gamma_M)p_M &\geq n_M \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

这是一个多元线性不等式方程组, 解此不等式组就可以获得具体的每个用户的功率分配值。

根据线性方程组理论, 我们较易得到: 当满足

$$\sum_{i=1}^M \frac{\gamma_i}{W + \gamma_i} < 1 \quad (4)$$

时, (3) 式有非负解为

$$p_i \geq \left(s_i / \left(1 - \sum_{i=1}^M s_i \right) \right) \left(\sum_{j \neq i}^M s_j (n_j - n_i) + n_i \right) \quad (5)$$

(4) 式即为单小区功率分配问题有解的充要条件, 该条件表明了需求 γ_i 与资源 (带宽 W) 之间的限制关系, 用 s_i 表示即为

$$\sum_{i=1}^M s_i < 1 \quad (6)$$

当该条件不满足时, 表明用户对网络资源的总需求超过了网络的供给, 这时网络产生了拥塞。在一个业务繁忙的 CDMA 系统中, 某一时刻到达的呼叫所要求的网络资源总份额往往大于

1, 多媒体业务的引入会使 WCDMA 系统中的网络拥塞现象十分普遍。如果系统没有呼叫接入控制, 那么没有一个功率向量可以满足所有用户的 QoS 要求, 新呼叫的接入只会降低所有用户的 QoS。系统的呼叫接入控制算法须从呼叫中选择一部分予以分配资源, 问题是如何有选择地满足呼叫请求, 从而使得资源使用最有效率。需要说明的是, 分配的网络资源总份额越大, 用户端的发射功率越大。在用户端最大发射功率受限的条件下, 可分配的网络资源份额是一个小于 1 的数值。其具体值需在工程实际中确定。本文后面的讨论中仍假定分配的网络资源份额为 1, 这不影响算法的有效性。

3 基于计费的呼叫接入控制算法

考虑一离散时间系统, 每经过 Δt 的时间间隔, 系统重新分配一次网络资源。称 Δt 为计费时区。呼叫请求只允许在分配时刻到达。假设某一次分配时到达的呼叫请求数目为 N , 每个呼叫请求提供如下参数: 呼叫 i 的发送速率 R_i , 平均 SIR 要求 α_i , 用户对呼叫 i 占用的单位资源份额所愿意支付的价格, 即支付意愿 (Willingness-to-pay) c_i 。首先将这 N 个呼叫按支付意愿从大到小排序, 当支付意愿相等时, 按所需资源份额从小到大排序。不失一般性, 设 $c_1 \geq c_2 \geq \dots \geq c_N$ 。则前 M 个呼叫请求被系统接纳, M 由下式给出:

$$M = \max \left\{ m \left| \sum_{i=1}^m s_i < 1 \right. \right\} \quad (7)$$

被接纳的呼叫 $j \in [1, \dots, M]$ 将被计费, 所收费用 f_j 为

$$f_j = s_j \cdot c_{M+1} \quad (8)$$

显然 M 满足条件 (4) 式。则呼叫 j 的发射功率 $\tilde{p}_j$ 为

$$\tilde{p}_j = p_j / h_j, \quad j = 1, 2, \dots, M \quad (9)$$

其中 h_j 为发出呼叫的用户到基站的路径增益 (path gain), p_j 由 (5) 式给出 (取等号)。

4 算法性能评价

4.1 资源分配的效率

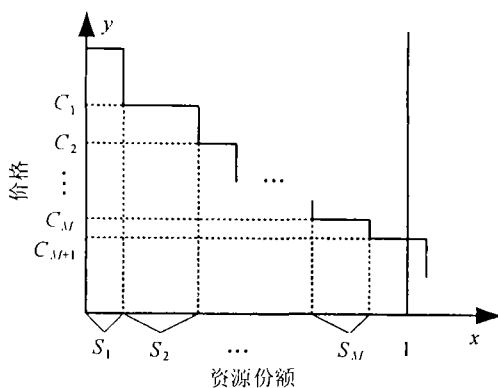


图 1 对资源份额的供给曲线和需求曲线

(7) 式可解释为将呼叫的支付意愿按从高到低排序, 依次在图 1 上绘成下降的台阶, 台阶高为单价 (支付意愿) c_i , 宽为所需份额 s_i 。此即为经济学中的用户对网络资源份额的需求曲线。供给曲线为垂直于 x 轴的直线, 位于 $x = 1$ 的左侧, 逼近 $x = 1$ 。(8) 式表明: 我们是根据点 $(\sum_{j=1}^M s_j, c_{M+1})$ 确定单位网络资源份额的价格, 而这正是需求曲线与供给曲线的交点, 对应的价格为市场出清价格 (Clear price), 依

据经济学的原理^[7], 此时的分配最有效率: 稀缺的网络资源份额分给了对其评价最高的用户 (呼叫), 每单位网络资源份额的价格等于其机会成本 (即系统将这一单位份额分给其他呼叫所能获

得的最大收益)。网络服务提供商的总收益为图 1 中的阴影面积。这一数据也为网络服务提供商进行下一步投资(扩容)提供了决策信息: 收益最高的小区其拥塞程度最大, 正是瓶颈所在。

4.2 出价的 Nash 均衡

由 (7) 式得到的市场出清价格 c_{M+1} , 可以达到资源最优配置。但这里有一个前提: 呼叫请求中的支付意愿 c_i 必须是真实的, 即 “ c_i = 用户对单位份额的真实评价”, 这样图 1 中的需求曲线才会是真实和准确的。在经济学中, (7), (8) 式给出的资源份额分配和定价方法称为统一价格拍卖 (Uniform-price auction); 用户通过呼叫请求向系统报告支付意愿, 称为出价 (Bidding), 用户是 “理性” 的, 则必然 “ $c_i \leq$ 用户对单位份额的真实评价”。用户的出价行为构成了一个非合作博弈^[8], 支付意愿是真实的, 其充要条件为 “讲真话” 是用户的占优策略 (Dominant strategy), 这一策略组合构成 Nash 均衡。统一价格拍卖的优点在于它是最简单的定价方式, 从而给系统带来的额外处理和计算负担最小。虽然 Wilson 以及 Back 与 Zender^[9] 曾证明, 统一价格拍卖的结果中可能存在这样的 Nash 均衡: 其中用户有意压低报价, 形成隐性串谋 (Implicit collusion)。但问题的关键在于使用统一价格拍卖的具体条件: 在第 3 节描述的 WCDMA 系统中, 我们只知道被分配的资源份额总量小于 1, 其具体值与到达的呼叫总数在拍卖前, 都是不可预知的, 更不会是用户的公共知识, 而这些都破坏了 Wilson 的结论赖以成立的条件。因而在此条件下, “讲真话” 的策略组合必然构成 Nash 均衡, 从而 4.1 节提出的效率必然得到保障。

关于不同的拍卖形式及其在网络资源分配中所表现的性质, 我们在文献 [10] 中已经给予了充分的讨论, 这里限于篇幅不再重复。

4.3 与其它计费方式的比较

在文献 [2-5] 中提出的计费方法有两个要点: (1) 整个系统的优化和计费策略的制定依赖于所有用户的效用函数。(2) 计费与用户的发射功率成正比: $f_j = \tilde{p}_j \cdot t$, 其中 t 为系统参数。

在 CDMA 系统中, 效用函数应采取何种形式是一个未解决的问题。效用函数只适合定性分析, 而不适合定量的优化。在上述文献中, 作者都需首先给每个用户假定一个具体的效用函数, 才能进行后续讨论。事实上, 所有用户的效用函数不可能是一样的, 而且这是用户的私有信息, 其它人当然包括网络方都不会知道。因而在现实中这种假定是不成立的, 据此利用收费进行的优化就没有了依据。在我们的方案中, 不需要对用户做出假设, 不存在这方面的问题。

针对用户的发射功率来收费既不现实也不合理。这是因为: (1) 决定发射功率的主要因素是从用户到基站的路径增益, 因而当用户距基站较远或衰落严重时, 就被迫付更多费用, 这显然对用户不公平。(2) 这种计费方式对用户不友好, 用户关心的是其业务的性能能否得到满足, 而系统却依据发射功率来计费, 发射功率与业务性能间的映射关系又不是单个用户所能决定的, 这使得用户难以做出决策。(3) 系统很难准确地测定用户的发射功率, 如果要用户报告其发射功率, 考虑到用户的报告值直接与其付费相关, 没有理由相信报告值是可靠的。(4) 用户及其对资源的需求处于动态变化中, 因而要达到网络资源最优配置, t 是一个变量。系统的麻烦在于如何确定最优的 t 值; 而用户则完全无法预测他要为一个业务支付多少。

在我们提出的计费方案中, 是针对用户占用的资源份额来计费, 依据资源份额的定义, 它直接与业务的性能 (发送速率、平均 SIN 要求) 相关, 因而对用户是友好的; 计费与路径增益无关, 因而对所有用户都是公平的。网络控制中只涉及到用户到达基站的功率, 这是系统可准确测定的。系统通过拍卖的形式制定价格, 价格自然会随需求波动而变化, 达到最优配置。用户的实际支付永远不会超过其支付意愿, 因而是可预测的。从而上述问题在我们的方案中都得到解决。

5 数值结果及分析

本文采用 LNBL (Lawrence Berkeley National Laboratory) 的网络研究组开发的网络仿真软件 NS (Network Simulator)^[11], 对上述算法进行仿真实验。假设系统有 3 种业务, 参数取值由表 1 给出:

表 1 业务参数

业务类型	传输速率 (kbps)	信干比要求 (dB)	占用的网络资源份额
I	32	5	0.0376
II	64	7	0.0986
III	128	9	0.2195

其中，系统扩频带宽为 4.096MHz。设各种业务出现的概率相等。呼叫的支付意愿在实数区间 $[0, 9]$ 上均匀分布。

作为对照，除了我们在上文提出的功率控制方案外，我们还给出了一个不基于计费的功率控制方案。在该方案中，系统随机地对呼叫请求排序，然后按 (7) 式给出 M 。理论上这种方案与按呼叫到达的先后次序分配资源这种目前通用的控制方法性能相同。

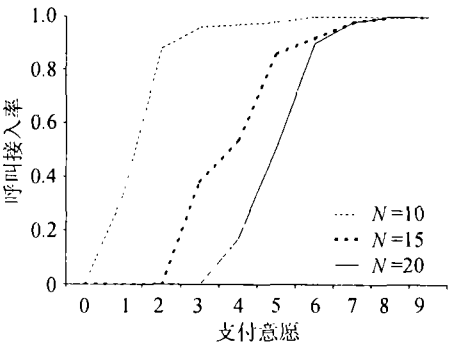


图 2 绘出了在不同的呼叫请求总数 N 下，呼叫接入率随支付意愿变化的曲线。可明显看出呼叫的接入率由其支付意愿决定：呼叫接入率随着呼叫的支付意愿加大而提高。表 2 给出了图 1 中的部分数据。比较无计时时平均接入率，可见用户可以通过提高支付意愿来使更有价值的业务有更多机会获得无线资源。

图 2 业务参数呼叫接入率与支付意愿的关系

表 2 不同的呼叫请求总数下的呼叫接入率

呼叫总数	支付意愿										无计时时 平均接入率
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
10	0.00	0.33	0.88	0.96	0.97	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	0.74
15	0.00	0.00	0.00	0.38	0.54	0.86	0.92	0.99	1.00	1.00	0.47
20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	0.51	0.90	0.99	1.00	1.00	0.35

表 3 给出了在呼叫请求总数 $N = 10$ 时，不同的呼叫类型，与其支付意愿相对应的接入率。可看出呼叫的接入率与呼叫类型无明显关系。呼叫的接入率主要由其支付意愿决定。从而本文提出的机制对不同业务类型也是公平的。

表 3 不同业务类型下的呼叫接入率

呼叫业务类型	支付意愿										无计时时 平均接入率
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
I	0.00	0.41	0.90	0.96	0.97	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	0.75
II	0.00	0.33	0.87	0.96	0.97	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	0.74
III	0.00	0.25	0.87	0.96	0.97	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	0.73

6 结 论

本文通过研究 WCDMA 系统中上行链路的干扰情况，推导得出 WCDMA 系统的容量与业务性能指标的关系。通过定义网络资源份额，将功率控制问题转换为总量小于 1 的网络资源份额的分配问题。然后利用统一价格拍卖对网络资源份额进行最优配置，使得发射功率这一重要无线资源合理地分配给对其评价最高的用户业务。在今后的工作中，我们将侧重于研究在这种计费机制下，用户应如何制定最优的策略，特别是用户要完成的业务需跨越多个计费时区时。

参 考 文 献

- [1] Zhang Chi, Wei Jiaolong, An economic model for QoS guarantee in the Internet, Proceedings of SPIE, Vol., 4556, September 2001, 116-121.
- [2] V. Shah, N. B. Mandayam, D.J. Goodman, Power control for wireless data based on utility and pricing, in Ninth IEEE International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications, Boston, USA, Sept. 1998, vol.3, 427-1432.
- [3] C. U. Saraydar, N. B. Mandayam, D. J. Goodman, Pareto efficiency of pricing-based power control in wireless data networks, in 1999 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, New Orleans, USA, Sept. 1999, vol.1, 231-235.
- [4] D. Goodman, N. Mandayam, Power control for wireless data, IEEE Personal Communications, 2000, 7(2), 48-54.
- [5] T. Alpcan, A game theoretical framework for variable rate flow control and CDMA uplink power control, [M. S. thesis], Urbana, University of Illinois, May 2001.
- [6] Shihua Zhu, J. W. Mark, Power distribution law and its impact on the capacity of multimedia multirate wideband CDMA systems, Technical Reports, CWC07, Center for Wireless Communications, University of Waterloo, 2000.
- [7] 茅于軾, 择优分配原理: 经济学和它的数理基础, 北京, 商务印书馆, 1998, 125-240.
- [8] D. Fudenberg, J. Tirole, Game Theory, Cambridge, MA: MIT Press, 1991, Chapter 1.
- [9] K. Back, J. F. Zender, Auctions of divisible goods: on the rationale for the treasury experiment, Review of Financial Studies, 1993, 6(4), 733-764.
- [10] Wei Jiaolong, Zhang Chi, Uniform-price auction for bandwidth allocation in the Internet, Journal of Electronics(China), 2002, 19(4), 408-414.
- [11] <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.

EFFICIENT POWER CONTROL VIA PRICING IN
WCDMA SYSTEMS

Wei Jiaolong Zhang Chi Chen Heng

(Dept. of Electron. and Info., Huazhong Univ. of Sci. and Tech., Wuhan 430074, China)

Abstract The transmit power is a major radio resource and requires careful planning and control if optimal system performance and maximal user capacity are to be achieved. In this paper, a new power control algorithm based on pricing is proposed in the context of third generation multimedia multirate Wideband CDMA (WCDMA) mobile communications. Firstly, the paper defines the multiplication of user's data rate and minimum required SIR as user's demand of network resource, and then derives the relationship between system capacity, transmit power and normalized demand called network resource share. By introducing uniform-price auction, the paper uses pricing to maximize the social benefit by making efficient allocations of transmit power, when demand exceeds supply which leads to congestion. In the end, numerical results are presented to validate the analytical results and the proposed power control algorithm.

Key words WCDMA, Radio resource allocation, Power control, Pricing, Network resource share

魏蛟龙: 男, 1965 年生, 在职博士生, 副教授, 现主要从事广域网拥塞控制、IP 网服务质量保障、人工智能与专家系统、故障诊断等方面的研究。

张 驰: 男, 1977 年生, 硕士生, 现主要研究领域为网络拥塞和流量控制。

陈 恒: 男, 1979 年生, 硕士生, 现主要研究领域为网络控制的仿真。