

多媒体 DS-CDMA 系统中基于效用函数的无线资源优化策略

牛志升, 王 兰, 段 翔

(微波与数字通信国家重点实验室, 清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘 要: 本文提出了一种 DS-CDMA 系统上行链路中基于效用函数 (utility function) 的无线资源分配策略. 在该模型的框架下, 我们提出了两种基于效用函数的无线资源分配算法: URRA-EF (Utility-based Radio Resource Allocation-Efficiency Focused) 和 URRA-UF (Utility-based Radio Resource Allocation-User Focused). URRA-EF 旨在追求系统资源的全局最优化, 而相比之下 URRA-UF 在用户公平性方面更有优势. 为避免非线性优化带来的过高的计算复杂度, 我们将基于效用函数的无线资源分配问题转换为一个市场模型, 这样资源的最优配置将以分布式的模式获得, 因此计算复杂度将大大降低. 仿真结果表明, 该策略与传统方式相比能够更灵活有效的配置无线多媒体 DS-CDMA 系统中的无线资源, 其性能提高是显著的.

关键词: 无线资源优化; DS-CDMA; 效用; 市场; 均衡

中图分类号: TM15 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 10-1594-06

Utility-Based Radio Resource Optimization for Multimedia DS-CDMA Systems

NIU Zhi-sheng, WANG Lan, DUAN Xiang

(State Key Lab on Microwave and Digital Commun., Dept. of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: We present a model based on utility functions for radio resource allocation (RRA) in multimedia DS-CDMA systems. We proposed two utility-based RRA algorithm, URRA-EF (Utility-based Radio Resource Allocation-Efficiency Focused) and URRA-UF (Utility-based Radio Resource Allocation-User Focused). The goal of URRA-EF is to achieve the resource optimization which maximizes the system overall utilities, while URRA-UF has its advantages on providing fairness to users. To avoid high computational complexity of solving nonlinear optimization problems, we reformulate the utility-based RRA problem as a market model so that the optimal resource allocation can be achieved in a distributed manner. Simulation results show that our algorithm is flexible and efficient for mobile multimedia DS-CDMA systems, and the improvement of performance is significant.

Key words: radio resource optimization; DS-CDMA; utility; market; equilibrium

1 引言

未来无线通信系统所面临的一个基本课题就是如何向有着日益增长的需求的多媒体业务提供服务质量 (QoS: Quality-of-Service) 保证. 虽然很多文献将 QoS 描述为一些客观的技术参数, 如带宽、延时和丢失率等^[1]. 服务质量实际上是用户的一种“感觉”. 因此一些研究者提出了基于效用函数的 QoS 研究构架. 效用 (utility) 在经济学中是指当一个消费者消费一件商品或服务时他所获得的福利 (welfare)^[2]. 在此处效用衡量用户或上层应用网络提供的服务的满意程度^[3]. 在基于效用函数的构架中, 用户或各种业务的 QoS 要求就被翻译成“软”目标, 即效用. 这样, QoS 要求就可以根据网络的负载和信道状况动态的调整. 然而由于大多数效用函数都是非线性的, 解决基于效用函数的 QoS 问题通常都需要较高的计算复杂度.

在无线通信系统中, 由于无线系统的带宽资源有限, 且存在信道状况不稳定, 信道增益随时间和位置变化等特点, 无线资源分配 (RRA: Radio resource allocation) 被认为是无线网络向多媒体业务提供服务质量保证的一个关键手段. 而在 CDMA 网络中, 功率控制技术被认为是 RRA 向用户提供 QoS 保证的主要技术, 因此近年来一些文献中提出了 CDMA 中基于效用的功率控制算法. (Mandayam) 等人在文[3]中基于非合作博弈模型提出一种分式的功率控制算法, 但这种算法并不是帕累托有效率的 (Pareto efficient)^[2]. 文献[4]通过引入成本 (cost) 改进了该算法, 提高了帕累托效率. 在文[5]中, 作者提出了一种基于效用的上行链路功率控制算法, 而在文[6]中, 作者提出了一种部分合作模式的下行链路 CDMA 系统的功率控制. 在上述文献中, 网络提供的 QoS 是用接收信干比 (SIR: signal-to-interference ratio) 来衡量的. 换言之, 在这些文献中 RRA 问题仅

收稿日期: 2003-06-09; 修回日期: 2004-07-08

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 60272021); 教育部优秀青年教师计划

被考虑为功率控制问题.而在直序列扩频 CDMA (DS-CDMA) 系统中,用户的发送速率可以通过改变扩频比的方式调整,因此也应视为可以控制和分配的无线资源.[7]就讨论了基于效用的速率控制策略,但仅适用于 TMDA 系统.因此目前对于 DS-CDMA 系统中基于效用函数的无线资源优化策略研究还很欠缺.

文章提出了一种多媒体 DS-CDMA 系统中基于效用函数无线资源分配 (URRA: utility-based radio resource allocation) 策略,该策略采用发射功率和发送速率联合分配的方式.在该模型的框架下,我们给出了两种基于效用函数的无线资源分配算法:URRA-EA (Utility-based Radio Resource Allocation Efficiency Focused) 和 URRA-UF (Utility-based Radio Resource Allocation User Focused). URRA-EF 旨在追求系统资源的全局最优化(即最大化系统总效用),而相比之下 URRA-UF 在用户公平性方面更有优势.为避免非线性优化问题带来的高计算复杂度,我们将基于效用函数的无线资源分配问题转换为一个市场模型,其中无线资源被看做是一种商品.由于市场将收敛于均衡价格,即商品供给等于需求.该均衡满足激励相容约束,这就是说,通过每个用户各自最大化自己的收益(效用减支代价)就能够得到最大化的系统总效用.这样,通过动态调整资源价格 (Price),最优的资源配置就能够以分布式的方式获得,从而大大降低算法的复杂度.

本文的结构安排如下:在第 2 节中,我们将描述效用函数和系统模型;第 3 节中我们将 URRA 问题转换为一个市场模型,从而最优资源配置能够以分布式的方式获得;第 4 节中综合上面几节的讨论,给出两种 URRA 算法的详细描述;仿真的数值结果在第 5 节中给出;最后,我们在第 6 节里简单的总结全文.

2 基于效用函数的无线资源分配问题系统模型

我们假设多媒体业务为“弹性”业务,即用户对于网络提供的 QoS 的满意程度是通过吞吐量来衡量的.因此,用户的效用函数可以用 $U_i(R_i)$ 来表示,其中 R_i 为分配给用户 i 的发送速率. $U_i(\cdot)$ 的形式必须经过仔细选择才能正确的反映满意程度的特性,如文献[5,6]中指出: $U_i(0) = 0$, $U_i(\cdot) = U_{\max} < +\infty$, 且为 R_i 的单调非降函数.其中,函数的最大值 U_{\max} 是用户 i 能够获得的最大效用,它取决于用户 i 的服务类型、支付的价格或优先级以及其它的因素.

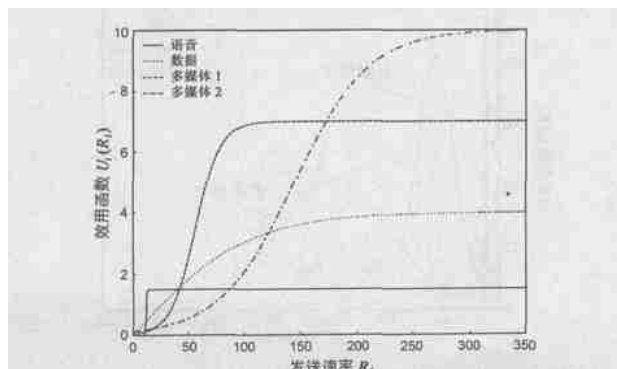


图 1 一些典型的语音、数据和多媒体业务的效用函数

一般来说,语音、数据和多媒体业务的效用函数的形式应该是不同的,如图 1 所示.对于语音业务,我们使用一个阶跃函数来表示它“硬”性的 QoS 要求.而数据业务的吞吐量越高用户的满意程度就越高,因此,我们可以采用一个单调增的凹函数来表示.多媒体业务介于两者之间,采用 S 型函数(如 Sigmoid 型函数^[5])较为合适.为了数学处理的方便,对于语音业务我们用陡峭的 S 型函数来代替阶跃函数(见图 1 中语音业务的曲线).需要说明的是,我们的策略并不仅限于上面提到的几种效用函数的形式.

我们考虑一个有 N 个用户的典型多媒体 DS-CDMA 蜂窝系统的小区.这里我们先考虑上行链路,实际上该模型通过简单的修改就可以应用于 DS-CDMA 系统的下行链路. R_i 表示第 i 个用户发送数据速率, P_i 表示传输功率, h_i 表示信道增益.设 $R = \{R_1, R_2, \dots, R_N\}$, $P = \{P_1, P_2, \dots, P_N\}$.同时, W 表示系统带宽, I_0 表示基站处接收到的背景噪声和干扰.根据[1],基站接收端关于用户 i 的 SIR 值为:

$$SIR_i = \frac{W}{R_i} \frac{h_i P_i}{h_i P_j + I_0}, \quad (i = 1, 2, \dots, N)$$

设 $P_{i\max}$ 是约定的用户 i 的传输功率上限, i 是该用户希望通过功率控制达到的目标 SIR 值.这样,无线资源优化问题就可以用如下通过选择 P 和 R 获取最大系统总效用的优化问题来描述:

$$(A) : \max_{P, R} \sum_{i=1}^N U_i(R_i) \quad s. t. \begin{cases} SIR_i = i \\ 0 \leq P_i \leq P_{i\max}, \quad (i = 1, 2, \dots, N) \end{cases} \quad (1)$$

显然,问题(A)是一个有着 $2N$ 个决策变量 (R 和 P) 非线性最优化问题.我们称问题(A)的最优解,也就是系统总效用的最优值,为系统最优资源配置.根据文献[9]中的结论,我们可知问题(A)中的约束条件与下式等价:

$$g_i(R_i) \leq \min_i \left(1 - \frac{g_i I_0}{h_i P_{i\max}} \right)$$

其中 g_i 是功率因子^[1],它是 R_i 的函数:

$$g_i = g_i(R_i) \triangleq 1 / \left(\frac{W}{R_i} + 1 \right), \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (2)$$

这样,问题(A)转换为如下问题:

$$(B) : \max_R \sum_{i=1}^N U_i(R_i) \quad s. t. \begin{cases} g_i(R_i) \leq T \\ T = \min_i \left\{ 1 - \frac{g_i I_0}{h_i P_{i\max}} \right\} \end{cases} \quad (3)$$

此处

问题(B)是与问题(A)的等价的系统模型,它有 N 个独立的决策变量 (R).一般来说,对于这样一个非线性优化问题,通过一般的算法(例如,最速下降法或梯度投影法^[8])找到最优解,计算将非常繁琐,通常需要数百次的迭代,因此不适合于实际系统实现.为了降低计算的复杂度,我们进一步将问题(B)转化为它的对偶问题,并用经济学的市场模型来描述.由于市场模型能够以分布式的方式收敛到最优化的资源分

配,这样就能够大大降低计算的复杂度,减小系统开销.

3 市场模型:通过分布式的模式获取最优资源配置

首先我们引用如下引理^[8],该引理告诉了我们一般最优化问题的最优化条件:

引理 1 设 f 和 h 为任意 $R^N \rightarrow R$ 的任意函数. 我们定义拉格朗日函数为:

$$L(X, \lambda) = f(X) - \lambda(h(X))$$

并定义拉格朗日最大化问题为:

$$X(\lambda) = \arg \max_X L(X, \lambda)$$

其中, $X = (x_1, x_2, \dots, x_N)^T$. 这样,拉格朗日最大化问题的解 $X(\lambda)$ 是下述最优化问题的全局最优解:

$$\max_X f(X) \quad s. t. \quad h(X) \leq h(X(\lambda))$$

在我们的问题中,我们设

$$f(R) = \sum_{i=1}^N U_i(R_i), \quad h(R) = \sum_{i=1}^N g_i(R_i)$$

那么,拉格朗日函数可以表示为:

$$\begin{aligned} L(R, \lambda) &= \sum_{i=1}^N U_i(R_i) - \sum_{i=1}^N \lambda_i g_i(R_i) \\ &= \sum_{i=1}^N \{U_i(R_i) - \lambda_i g_i(R_i)\} \end{aligned} \quad (4)$$

据引理 1,对于任意的 $\lambda_i \geq 0$, 设 $R(\lambda) = \arg \max_R L(R, \lambda)$, 那么它就是下述问题的最优解:

$$\max_R \sum_{i=1}^N U_i(R_i) \quad s. t. \quad \sum_{i=1}^N g_i(R_i) \leq \sum_{i=1}^N g_i(R_i(\lambda))$$

因此,如果能找到一个 λ^* 使得 $\sum_{i=1}^N g_i(R_i(\lambda^*)) = T$, 即得问题(B)的最优解. 如果该 λ^* 使得 $\left| T - \sum_{i=1}^N g_i(R_i(\lambda^*)) \right|$ 足够小,那么它就是问题(B)的解的一个良好近似.

下面仔细研究一下拉格朗日最大化问题 $\max_R L(R, \lambda)$. 由式(4)我们可将该问题分解为如下 N 个子问题:

$$\max_{R_i} \{U_i(R_i) - \lambda_i g_i(R_i)\}, (i=1, 2, \dots, N) \quad (5)$$

这表示问题(B)可以转化为它的对偶问题:

$$\begin{aligned} (C): \min F(\lambda) &= \min \left[T - \sum_{i=1}^N g_i(R_i(\lambda)) \right] \\ s. t. \quad R_i(\lambda) &= \arg \max_{R_i} \{U_i(R_i) - \lambda_i g_i(R_i)\} \end{aligned} \quad (6)$$

因为问题(C)是问题(B)的对偶问题,而(B)和(A)是等价的,因此,问题(C)的最优解就是(A)的最优解,即最优的资源配置.

由于功率因子 g_i 表示用户 i 占有的无线资源的份额^[1], 如果将无线资源看作一种商品,而 λ_i 看作这个商品的价格,问题(C)就可以用经济学中的市场模型来表示. 其中, T 表示了能够分配给用户的最大份额的资源,可以看作商品的供给;

另一方面, $g = \sum_{i=1}^N g_i(R_i)$ 表示用户占有的总资源,表示商

品的需求. 问题(C)的最优解 λ^* 满足 $F(\lambda^*) = T - \sum_{i=1}^N g_i$

$(R_i(\lambda^*)) = 0$, 也就是需求等于供给,此时商品的价格即为市场均衡价格,因此,问题(C)的最优解正是市场均衡. 根据文献^[2],市场能够通过分布式的模式收敛到均衡价格. 类似的,对于我们这里转化为市场模型的 URRA 问题,最优资源配置可以通过每个用户追求各自收益的最大化来分布式的获得. 具体过程是这样的:在问题(C)中, λ_i 指单位资源的价格,因此, $\lambda_i g_i$ 指的是用户 i 消费资源 g_i 的代价. 而式(5)可以看作用户追求自己的收益(效用减去代价)最大化. 这样,问题(C)的最优解,也就是最优资源配置,将通过各个用户分别追求各自的收益最大化的过程得到.

通过文献^[8]我们知道,式(5)的唯一最优解即可通过一阶条件 $|U_i(R_i) - \lambda_i g_i| = 0$ 得到,即 $U_i(R_i) = \lambda_i g_i(R_i)$. 如果我们定义用户 i 的特征函数 $f_i(R_i)$ 为:

$$f_i(x) = U_i(x) / g_i(x)$$

那么式(5)的解就可以表示为 $R_i = f_i^{-1}(\lambda_i)$, 或

$$R_i = f_i^{-1}(\lambda_i), (i=1, 2, \dots, N) \quad (7)$$

其中 $f_i^{-1}(\cdot)$ 是 $f_i(\cdot)$ 的反函数.

而要取得拉格朗日最大化问题的解,我们还要考虑如下约束:

引理 2 定义:

$$R_{ires} = \max_{R_i} \frac{U_i(R_i)}{g_i}, \quad R_{ires} = \arg \max_{R_i} \frac{U_i(R_i)}{g_i}$$

则对于任意的数据速率向量 R , 我们考虑 \tilde{R} :

$$\tilde{R}_i = \begin{cases} R_i, & \leq R_{ires} \\ 0, & \text{其余} \end{cases}$$

那么就有 $L(\tilde{R}, \lambda) > L(R, \lambda)$.

事实上,引理 2 给出了对(5)最优解的一个约束:当资源太贵的时候 ($\lambda_i > R_{ires}$) 用户 i 将不被分配任何资源,或者说,资源的价格已经高于用户能够承受的能力,用户将选择不消耗资源. 我们称 R_{ires} 为用户 i 的保留价格,它表示用户 i 使用无线资源时能接受的最大价格. 这样,子问题(5)的唯一最优解可以通过下式得到:

$$R_i(\lambda) = \begin{cases} f_i^{-1}(\lambda_i), & \leq R_{ires} \\ 0, & \text{其余} \end{cases} \quad (8)$$

图 2 给出了图 1 中各个业务类型对应的效用函数的特征函数 $f_i(R_i)$ 以及它们的 R_{ires} 和相应的 R_{ireq} .

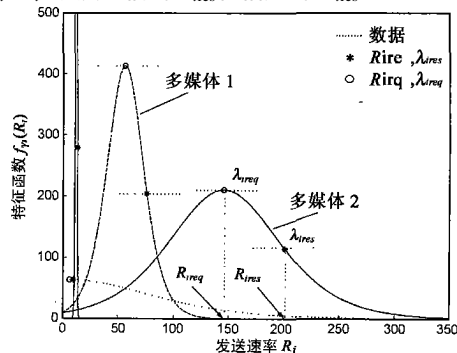


图 2 一些典型的语音、数据和多媒体业务的特征函数

基于上述讨论,我们可以提出一种基于效用函数的无线资源分配(URRA)算法.上式表示算法追求系统效用的最大化,我们称为侧重于系统效率(EF: efficiency-focused)的 URRA 算法,简称为 URRA-EF.注意在实际系统实现时 URRA-EF 算法将带来如下问题:由于存在最大发射功率限制,有时当用户遇到非常恶劣的信道条件时,为保证其他用户资源的正常配置,算法将自动提高资源价格使之超过部分用户的保留价格来切断用户(即用户将得到 0 发送速率).而当网络正处于重负载时,由于资源价格过高而导致用户无法接受而被切断的情况就有可能加剧.因此,部分用户可能会经历到“资源饥荒”状态,即常常得到 0 发送速率.为解决这种情况,我们提出另外一种改进的算法,旨在避免用户“资源饥荒”状态的过度发生.这种算法称为侧重用户(UF: user-focused)的 URRA 算法,简称 URRA-UF.在 URRA-UF 中,子问题(5)的解将由下式给出:

$$R_i(\cdot) = \begin{cases} f_i^{-1}(\cdot), & \leq i_{req} \\ R_{i_{req}}, & \text{其余} \end{cases} \quad (9)$$

其中, $R_{i_{req}}$ 是用户 i 事先约定的最小发送速率, i_{req} 是其对应的资源价格,如图 2 所示*.注意上式虽然不是式(5)的最优解(不满足引理 2),但上式保证了无论在什么情况下,用户 i 总可以分配到一个最小资源份额 $R_{i_{req}}$,这有效的避免了用户“资源饥荒”状态的发生.此时,必须引入接入控制策略(CAC: call admission control)以保证系统能够承受所有的被接入用户的最小资源份额.这里我们用 $g_{res} = \sum_{i=1}^N g_{ires}$ 作为系统负载的度量,因为如果用户 i 被接入,那么需要的是小资源份额就是 g_{ires} .由于 CAC 问题已超出本文的范围,故在此不再讨论.

表 1 仿真系统中四种业务的参数

业务类型	语音	数据	多媒体 1	多媒体 3
i (dB)	3	5	3	3
U_{max}	1.5	4	7	10
R_{ires} (Kbps)	13.22	9.47	80.00	200.9
$ires$	278.66	63.44	204.08	114.04
g_{ires}	$5.2e-3$	$6.0e-3$	0.029	0.074
R_{ireq} (Kbps)	12.0	6.31	56.19	145.68
$ireq$	$2.84e+3$	63.50	412.6	210.30
g_{ireq}	$4.8e-3$	$4.0e-3$	0.022	0.055

4 基于效用函数的无线资源分配策略算法

在本节中,我们将根据前面的讨论,详细的描述在称动多媒体 DS-CDMA 系统中针对上行链路的 URRA 算法.

首先,当有一个连接请求接入时,如果该连接被接入,则下列参数必须已知或在初始化过程中计算好:效用函数 $U_i(\cdot)$ 的形式、接收 SIR 的目标 i 和传输功率限制 $P_{i_{max}}$ 、保留价格 $ires$ 及对应的 R_{ires} (对于 URRA-UF 来说,则是 $ireq$ 和 R_{ireq}).然后下述过程将在每个 RRA 周期性的工作点上调用以进行无线资源分配:

(1) / 初始化 / 设 m 为迭代步数,初始化设 $m = 1$, 并给定 \wedge 和 $_$. 令 $_^{(1)} = 0.5(\wedge + _)$.

(2) / 更新 R_i / 对于 URRA-EF 算法,根据式(8)计算 $R_i^{(m)}$; 对于 URRA-UF 算法,根据式(9)计算 $R_i^{(m)}$.

(3) / 更新 g_i 和 T / 计算 $g_i^{(m)} = g_i(R_i^{(m)})$, $g^{(m)} = \sum_{i=1}^N g_i^{(m)}$, 且计算

$$T^{(m)} = \min_i \left\{ 1 - \frac{g_i^{(m)} I_0}{h_i P_{i_{max}}} \right\}$$

(4) / 调整资源价格 / 采用折半查找法[8], 如果 $g^{(m)} < T^{(m)}$, 则让 $_ = g^{(m)}$; 否则令 $_ = T^{(m)}$. 然后更新资源价格为 $_^{(m+1)} = 0.5(_ + _)$.

(5) / 中止条件 / 如果 $m = M$ 或者 $_ - _ \leq _$, 则停止, 否则令 $m = m + 1$ 并转到 2. 这里 $_$ 是搜索精度[8], M 是最大迭代次数. 根据仿真结果, $M = 6$ 就足够以使我们的算法收敛.

(6) / 资源分配归一化 / 计算资源归一化后分配给用户 i 的份额:

$$g_i = g_i^{(m)} \left/ \left(g^{(m)} + \frac{g_k^{(m)} I_0}{h_k P_{k_{max}}} \right) \right.$$

$$\text{此外 } k = \arg \min_i \left\{ 1 - \frac{g_i^{(m)} I_0}{h_i P_{i_{max}}} \right\}$$

通过归一化,下式得到满足: $g = \min_i \left\{ 1 - \frac{g_i I_0}{h_i P_{i_{max}}} \right\}$, 并且用户的最大传输功率将调整到 $P_{i_{max}}$. 这样,既没有浪费系统资源,又满足了传输功率的限制.

(7) / 功率和速率分配 / 通过分配给用户的系统资源份额计算用户 i 发送速率和发射功率分别为:

$$R_i = \left(\frac{W}{\frac{1}{g_i} - 1} \right), P_i = \frac{g_i}{h_i(1 - g)} I_0$$

根据引理 1 - 2 和及前面的讨论,可以得出下面的结论:

定理 1 本文中提出的适用于多媒体 DS-CDMA 系统的基于效用函数的无线资源分配策略的 URRA-EF 算法理论上能够收敛到最优资源配置.

如果采用一般的最优化算法则需要上百次的迭代过程才能收敛,而我们的算法可以通过分布式的调整资源价格,并获得最优的资源分配.和前者相比,计算复杂度就大大降低.

对于 URRA-UF 算法,虽不能从理论上保证能够收敛到系统最优配置,但仿真结果显示它也能获得一个较高的系统总效用,而且与 URRA-EF 相比在用户公平性方面会有优势.

5 仿真结果

我们仿真的 DS-CDMA 系统蜂窝小区半径为 1 千米,拥有全向天线的基站位于小区的.中心.数十个移动用户在小区中移动,移动速度服从 1 米/秒到 30 米/秒的均匀分布.他们的初始位置和运动方向是独立随机产生的.每个用户每隔一段

* 这里我们取 $R_{i_{req}}$ 为特征函数取到最大值的点,即 $i_{req} = \max_i R_i f_i(R_i)$, 或 $R_{i_{req}} = \arg \max_i R_i f_i(R_i)$.

时间随机的改变运动方向,这段时间服从均值为 6 秒的负指数分布. 这里我们不考虑越区切换的问题,当用户到达小区边界时,假设他们将被自动弹回.

我们考虑四种类型的业务:语音、数据和两种多媒体业务,它们的效用函数及特征函数分别如图 1 和图 2 所示. 表 1 给出了这些业务的参数. 假设系统带宽 w 设为 5.0MHz,背景干扰 I_0 设为 $2.5 \times 10^{-6}W$,用户终端的传输功率限制为 0.2W. 物理层采用的技术为:QPSK 调制, (511, 175, 46) 的 BCH 编码, 简单 ABQ 重传方案.

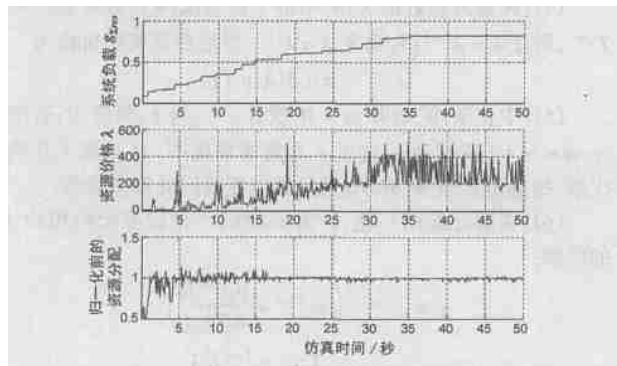


图 3 采用 URRA-EF 算法时系统负载和相应资源价格变化

我们仿真的实际时间是 60 秒. 图 3 清楚的显示了采用 URRA-EF 算法时系统负载和动态调整的资源价格之间的关系,并给出了归一化之前的资源配置情况(即 $g^{(m)} + (1 - T^{(m)})$). 从图中我们可以得到如下结论*:

⑧ 资源价格 随用户信道状况变化而变化. 图中资源价格变化非常剧烈,充分显示了无线信道的不稳定性. 当用户的信道条件相对来说较好的时候,用来对抗背景干扰的资源消耗的比较少. 从市场的观点来看,资源的供给增加了. 因此,为了让用户消费更多的资源,就降低了. 而当无线链路容量恶化时,供给减少,资源价格上升,用户则消费较少的资源.

⑨ 资源价格 随系统负载的变化而变化. 当系统负载增加时,在有限的无线资源条件下,系统为了同时为所有的用户提供服务,不得不通过提高资源价格的方式使每个用户减少资源的消费. 因此,随着系统负载(用 g_{res} 标识)的加重,也有增长的趋势.

⑩ 第三个子图显示了归一化之前的资源分配,他表明无论在任何系统负载或用户信道条件下,URRA-EF 算法都能够进行动态的自我调整,以获得合理的资源配置. 该图充分说明对于 URRA 算法,迭代次数 $M=6$ 基本上就可以收敛.

图 4 则详细显示了采用 URRA-EF 和 URRA-UF 算法时四种不同业务的用户在一次仿真过程中获得的效用轨迹,其中实线表示 URRA-EF 算法,虚线表示 URRA-EA 算法. 从该图中我们可以得到以下结论:

⑪ 当系统负载低时,所有业务的效用水平都接近它们能达到的最大效用 U_{max} . 然而,如果系统处于重载情况,各种业务的差别就比较明显了. 语音业务所获的效用水平基本保持不变,同时两种多媒体业务也保持在一个较高的水平上,而数据业务达到的性能则相去甚远,因为当系统负载增加时,它的

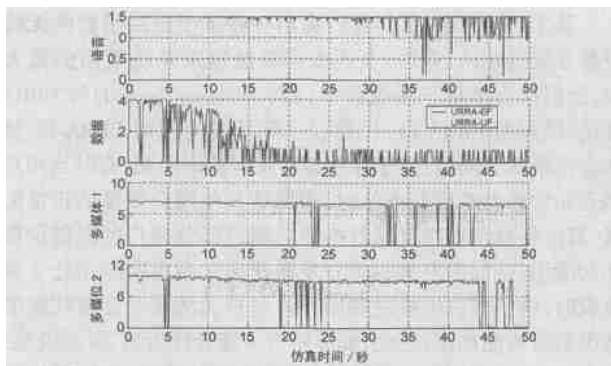


图 4 采用两种 URRA 算法时四种业务分别获得的效用值的仿真轨迹

效用几乎没有机会接近 U_{max} .

⑫ 当系统负载较大时,URRA-EF 算法将提高资源价格来迫使部分用户不使用无线资源,特别是对资源需求比较大的多媒体用户更容易经历“资源饥荒”. 只有这样,才能保证获得资源最优配置,即总效用最大化. 而 URRA-UF 算法虽然不能保证获得最优的资源配置,但很明显用户被切断的机会要小许多. 与 URRA-EF 算法相比,URRA-UF 算法更好的保证了用户的公平性.

下面我们来看在 DS-CDMA 系统中,我们所提出的两种 URRA 算法和 CDMA 系统中的 WRR 算法(简称 CDMA-WRR)算法(wireless round robin)及最优的全局迭代算法的性能比较. CDMA-WRR 采用的资源分配方式是:无论用户的信道状况如何,各用户均按照他所需求的发送速率发送数据. 显然 CDMA-WRR 算法没有考虑各个用户的信道状况和系统的负载情况. 而一般的最优化全局迭代算法是我们提出的算法的性能上界,但是其计算复杂度非常高,需要的迭代时间很长且不可控. 图 5 显示了几次仿真试验中采用几种算法所获得的系统总效用. 我们看到,两种 URRA 算法均比 CDMA-WRR 算法获得多达 30 - 40% 的系统总效用,这说明我们的算法能显著提高系统性能. 同时,两种算法获得的效用和最优的全局迭代算法相差很小,尤其是 URRA-EF 算法,

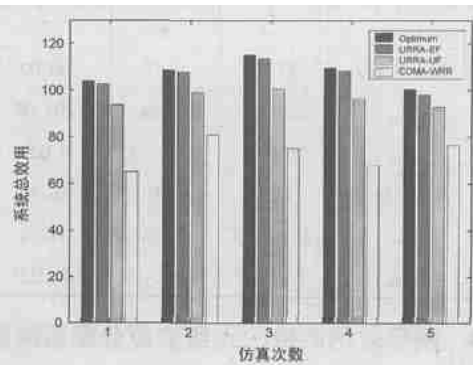


图 5 两种 URRA 算法和 CDMA-WRR 算法所获得的系统总效用的比较

可以说是很接近最优算法的性能. 而 URRA-EF 虽然比 URRA-UF 获得更多的系统总效用,但两者差距并不是很大,这说明 URRA-UF 以较小的系统总效用的代价换取了用户的公平性,

* 对于 URRA-EF 算法,曲线略有不同,但结论是相似的.

这是非常值得的。图 6 显示了各种类型的用户采用这几种 RRA 算法所获得的平均效用,该图同样显示了 URRA-EF 和 URRA-UF 算法与最优算法获得的平均效用相差很小;而在 CDMA-WRR 算法

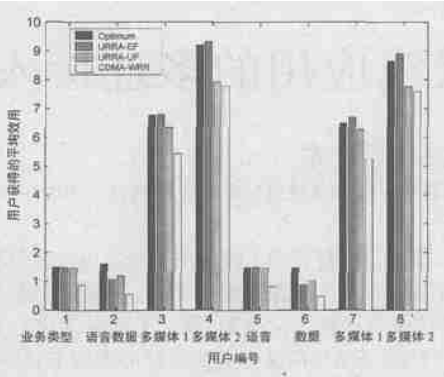


图 6 两种 URRA 算法和 CDMA-WRR 算法中不同用户业务获得的效用值的比较

相比,各种业务的用户所获得的效用均有所提高。尤其是数据用户,采用 CDMA-WRR 算法仅能获得很少量的资源,这对它们来说是极不公平的。

6 结语

在本文中,我们针对移动多媒体 DS-CDMA 网络提出了一种基于效用函数的无线资源分配 (URRA) 策略。在效用函数的框架下,我们将资源分配问题描述为一个优化模型,其目标是在发射功率受限且用户接收 SIR 满足要求的情况下,最大化系统的总效用,决策变量即为用户的发射功率和发送速率。我们提出了两种基于效用函数的无线资源分配算法 URRA-EA 和 URRA-UF。URRA-EF 旨在追求系统资源最大化,而 URRA-UF 则改进了 URRA-EF 算法在用户公平性方面的性能。为了避免非线性最优化问题带来的高复杂度,我们进一步将原始 URRA 问题转化为其对偶问题,即市场模型,该市场模型的均衡点即为系统资源的最优配置。通过每个用户最大化各自收益,市场达到均衡。因此,算法可以通过分布式的方式得到资源的最优化配置,这样就大大降低了计算的复杂度。

仿真结果显示,对于移动多媒体 DS-CDMA 系统,我们提出的 URRA-EF 和 URRA-UF 算法能够根据用户的 QoS 要求、信道状况和当前的系统负载,灵活有效地为用户动态的分配无线资源。两种算法均以较小的复杂度和较短的运算时间获得了接近最优全局迭代算法的性能,尤其是 URRA-EF 算法,获得的性能与最优算法相差无几。另外,两种算法获得的性能远远胜于 CDMA-WRR 算法,而 URRA-UF 算法则以较小的系统总效用的代价换得了更好的用户公平性。

参考文献:

- [1] M A Arad, A Leon-Garcia. Scheduled CDMA: A Hybrid Multiple Access for Wireless ATM Networks[A]. In Proc. 7th IEEE Int. Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Commun. (PIMC '96) [C]. Taipei, Taiwan, 1996.
- [2] [美] H. 范里安, 费方域等译. 微观经济学: 现代观点[M]. 上海人民出版社, 1994.
- [3] V Shah, N B Mandayam, D J Godman. Power Control for Wireless Data base on Utility and Pricing[A]. In Proc. Ninth IEEE Int. Symposium on

Personal, Indoor and Mobile Radio Commun. (PIMRC '98) [C]. vol. 3, 1998. 1427 - 1432.

- [4] D J Godman, N B Mandayam. Power control for wireless data [J]. IEEE Personal Commun. Feb. 2000, 7: 48 - 54
- [5] M Xiao, N B Shroff, E Chong. A utility-based power-control scheme in wireless cellular systems [J]. in IEEE/ACM Trans. Networking, April 2003, 11 (2): 210 - 221
- [6] J W Lee, R R Mazumdar, N B Shroff. Downlink Power Allocation for Multi-class DS-CDMA Wireless Networks[A]. in Proc. Thirteenth annual Joint Conf. IEEE Comput. and Commun. Soc. (INFOCOM '2002) [C]. 2002.
- [7] H Lin, W Wu, Y Ren, X Shan. A Time-scale Decomposition Approach to Optimize Wireless Packet Resource Allocation and Scheduling[A]. in Proc. 2002 Wireless Commun. and Networking Conf. (WCNC '2002) [C]. Vol. 2, Mar. 2002. 699 - 705
- [8] 《现代应用数学手册》编辑委员会, 现代应用数学手册: 运筹学与最优化理论卷[M]. 清华大学出版社, 1998.
- [9] X Duan, Z Niu, J Zheng. Capacity Analysis of Uplink and Downlink in Multimedia DS-CDMA Systems Based On Constraint Models[A]. To be appeared in Proc. IEEE 2003 Int. Conf. Commun. (ICC '2003) [C]. Alaska, USA, May. 2003.

作者简介:



牛志升 男, 1964 年 7 月出生, 清华大学电子工程系微波与数学通信国家重点实验室教授, 博士生导师, 北方交通大学兼职教授, 1985 年毕业于北方交通大学通信与控制系, 1986 年国家公派赴日留学, 并分别于 1989 年和 1992 年获日本丰桥技术科学大学的工学硕士和工学博士学位, 1992 ~ 1994 年就职于日本富士通研究所, 1994 年回清华大学任教至今, 其间 1997—1998 访问日立中央研究所, 主要研究方向包括: 宽带通信网络及其流量控制技术、宽带无线接入及其资源优化管理技术、移动因特网技术、以及平流层通信技术。



王 兰 女, 1979 年 3 月出生于湖北省武汉市, 大学本科就读于华中科技大学, 并于 2001 年获得学士学位, 此后于清华大学电子工程系通信与信息系统专业攻读博士学位, 目前的主要研究方向包括: 移动网络的服务质量控制, 无线网络的资源分配与调度、功率控制, 多用户 OFDM 系统的资源分配与管理等。



段 翔 男, 1979 年 12 月出生于湖南省长沙市, 大学本科就读于西安交通大学信息与通信工程系, 并于 1999 年获得学士学位, 此后于清华大学电子工程系通信与信息系统专业攻读博士学位, 目前的主要研究方向包括: 无线网络中的资源管理, 调度算法, 功率控制, 拥塞控制, 无线 ad hoc 网络等。