

宽带 CDMA 通信的主动式多用户动态检测方法

胡艳军, 朱近康, 顾 钧

(中国科学技术大学个人通信与扩频实验室, 合肥 230027)

摘 要: 本文针对适合未来大用户量、多媒体移动通信的宽带 CDMA 系统, 提出了一种根据不同业务需求及综合多址无线通信环境的动态 QoS 要求, 进行主动式多用户信号检测的方法. 通过对接收系统多用户检测器的动态配置, 以满足不同误码率(BER)及系统稳健性的要求, 获得最佳的系统和网络效率.

关键词: 多用户检测; 宽带 CDMA; 动态配置; 主动式

中图分类号: TN914. 5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2000) 11A-0018-05

Active Dynamic Multiuser Detection for WCDMA Communication Systems

HU Yarr jun, ZHU Jirr kang, GU Jun

(Personal Communication Network & Spread Spectrum Lab, University of Science and Technology of China, Box 4, Hf ei, Anhui 230027, China)

Abstract: To face the development of multimedia mobile communication with large number of users, a method of active dynamic multiuser detection for W-CDMA communication systems is proposed in this paper. It can reconfigure the detector dynamically according to different service requirement and integrated dynamic QoS of multi-access wireless channels. The active dynamic reconfiguration of multiuser detector can satisfy the requirements of various ranges of bit error rate and robustness.

Key words: multiuser detection; WCDMA; dynamic reconfiguration; active

1 引言

随着信息技术和通信技术突飞猛进的发展, 个人通信、多媒体信息业务、因特网等方面的应用日益广泛. 市场和用户需求的增加, 使移动通信成为当今通信发展的主流和最大市场. 同时, 由于社会信息化进程越来越快, 人们对信息交流的需要也越来越高, 仅仅通话已不能满足人们对信息交流的需要, 除话音外的各种多媒体信息将成为必不可少的通信业务, 研究和开发新一代个人化、多媒体化、全球化、智能化的移动通信系统是必然的. 面对频率资源越来越紧张, 通过技术的创新, 提高整个通信系统的容量, 扩大覆盖范围和增加网络的灵活性等成为围绕下一代移动通信研究的主题内容. 宽带 CDMA 以其频谱利用率高、系统容量大、频率管理容易、软切换、移动台发射功率低、信道的传输速率高等优点代表了新一代移动通信, 在未来的无线通信系统中必将扮演极为重要的角色. 但是, 由于在实际 CDMA 系统中扩频码很难做到完全正交, 以致于在用户量比较大时, 存在不可避免的严重的多址干扰, 从而极大地限制了多址用户数或者同样用户数下的通信质量. 要想真正消除干扰, 大幅度提高系统容量, 必须通过多用户检测. 但已取得的多用户检测的研究成果, 大多还没有能够很好地应用于实际系统中, 因为有的算法性能较好, 但是运算量大, 难于实现; 有的算法运算量可以接受, 但是性能不够好; 有的算法只能局限于特定的应用范围. 在实际应用时不得不在

性能和复杂度间进行折衷. 因此, 本文针对适合未来大用户量、多媒体移动通信的宽带 CDMA 系统, 提出了一种根据不同业务需求及综合多址无线通信环境的动态 QoS 要求, 动态地配置接收系统的多用户检测器, 从而进行主动式多用户信号检测的方法, 以达到不同的误码率(BER)及系统稳健性的要求, 获得最佳的系统和网络效率.

本文第二部分就多用户检测问题及其难解性进行了描述; 第三部分介绍了多用户检测 NPC 问题的求解方法及提出的主动式动态检测方法; 第四部分给出了模拟实验结果; 最后进行了总结.

2 多用户检测问题描述及其难解性

在 K 个用户通信的 CDMA 系统中, 到达接收机的信号为:

$$r(t) = \sum_{i=-M}^M \sum_{k=1}^K \sqrt{W_k(i)} b_k[i] S_k(t - iT_d - \tau_k) \cdot \cos(\omega_c t + \varphi_k) + n(t) \quad (1)$$

其中: $b_k(i) \in \{-1, 1\}$, $k = 1, \dots, K$; $i = -M, \dots, M$ 是用户 k 发送的第 i 个信息比特; $S_k(t)$ 为在间隔 $[0, T]$ 内用户 k 的归一化信号波形; $W_k(i)$ 为用户 k 在时隙内的接收能量; $n(t)$ 为高斯白噪声, 其功率谱密度为 σ^2 ; τ_k 、 φ_k 分别是用户 k 的信号时延和载波相位.

对于用户 k , 其匹配滤波器的输出为:

$$Y_k(i) = \sqrt{P_k(i)/2} b_k(i) T_b + \int_{-\infty}^{\infty} n(t) S_k(t - iT_d - \tau_k) dt \\ + \sqrt{2}/2 \sum_{j=1, j \neq k}^K \int \sqrt{P_j(i-1)} b_j[i-1] R(1) + \sqrt{P_j(i)} b_j[i] \\ \cdot R(0) + \sqrt{P_j(i+1)} b_j[i+1] R(-1) \quad (2)$$

匹配滤波器的输出写成矢量形式, 即 $Y = RWb + n$ (3)

这里 R 为 $K \times K$ 归一化信号互相关矩阵, 其元素是: $R_{k,j} = \int_0^T$

$$s_k(t - \tau_k) \tilde{s}_j(t + IT - \tau_j) dt, W(l) = \text{diag}(\sqrt{w_1(l)}, \dots, \sqrt{w_K(l)}), b = [b_1, b_2, \dots, b_K]^T \text{ 为信息比特矢量, } n \text{ 为噪声}$$

$$\text{矢量 } n = [n_1, n_2, \dots, n_m]^T.$$

式(2)中匹配滤波器的输出有三项, 第一项是待解调用户的信号输出, 也就是我们解调时所需要的数据信息; 第二项是由于信道噪声 $n(t)$ 引起的干扰, 而第三项就是系统中其它用户产生的多址干扰(MAI), 多用户检测就是为了去除此多址干扰。

多用户检测问题实际上就是如何从接收的信号中消除其它用户的多址干扰, 得到最佳判决输出结果。最优检测器就是从匹配滤波器的信号 Y 中选择最可能的数据矢量, 即对接收信号序列的整体进行处理, 采用最大似然序列准则找出一个接收信号序列, 使得给定输出序列的似然函数最大。因此, 根据文献[1], 可以通过求解以下优化问题得到要接收的用户信息。

问题(最优多用户检测):

$$b_{kopt} = \arg \left\{ \max_{b_k \in \{+1, -1\}^{2MK}} P[b_k(i) = b_k | r(t)] \right\} \\ = \arg \left\{ \max_{b_k \in \{+1, -1\}^{2MK}} \int 2y^T w b_k - b_k^T R w b_k \right\} \quad (4)$$

其中 b_k 为输出判决的矢量表示, 信息序列长度为 $2M$ 。

对于多用户检测问题, 含用户数 K 和接收用户信号信息序列长度 M 等多个变量, 求解其任何实例的算法即为多用户检测问题的“解”, 算法的时间需求可用问题实例的规模表示。当大用户量时, 则此问题的规模很大。显然, 要实现最优的多用户信号检测, 需要在矢量 b_k 的 2^{2MK} 个可能的组合中找出最优的 b_{kopt} , 它的运算量随着 K, M 的增加而呈指数增加。因为求解最优多用户检测问题的任何实例的算法时间复杂度都为指数时间复杂度函数, 根据 NP (Nondeterministic Polynomial) 完全性理论^[2], 最优多用户检测问题是非多项式确定的, 因此, 以消除 CDMA 通信中的多址干扰为目的多用户检测的优化问题是一个 NP 类问题。文献[3]中进一步证明了多用户检测的组合最优问题是一个 NPC(NP-Complete) 问题。

在计算的算法复杂度理论中, 如果一个问题困难到不能用多项式算法求解, 那么我们就认为这个问题是“难解的”。对一个算法, 不仅要问是否有收敛性的保证, 还必须考虑它的计算成本。如果计算成本随着问题规模的增加而增加的速度是指数式的, 则这种算法将被认为是在实际中难以接受的, 尤其无法满足实际实时性要求极高的通信系统应用的要求。因此, 作为 NPC 问题的最优多用户检测问题具有“难解性”, 随

着问题规模的增大, 其难解性也增大。

3 基于 NPC 问题求解的主动式多用户动态检测方法

多用户检测方法从理论上可真正有效地去除多址干扰, 但由于多用户检测问题是一个 NPC 问题, 其难解性决定了其算法复杂度较高。为解决最优多用户检测问题, 文献[1]提出对匹配滤波器组的输出, 采用 Viterbi 算法实现最佳检测, 它虽然可以完成多用户检测 NPC 问题的性能最佳求解, 实现多用户信号的最优序列检测问题, 获得近似于无多址干扰的单用户接收机的性能。但其算法复杂度为非多项式时间函数的指数时间算法。当此问题的规模增加时, 其复杂度以爆炸性的速率迅速增长, 因此, 这种“最佳检测器”虽然理论上从检测结果性能角度实现了“最佳”, 但从算法复杂度的角度来说, 则是在实际应用是无法实现和接受的。所以, “最佳检测器”仅是性能上的最佳求解, 而不是实际解决多用户检测 NPC 问题的最优方案。在此“最佳检测器”的基础上, 提出的一些改进的算法, 如宽度优先的树形搜索算法、改进前端和初判的算法、序贯检测法等对多用户检测问题进行了某些局部优化, 但随着用户量增加, 存在着重复运算、运算不收敛、迷失全局最优等一系列问题。因此, 人们正在尝试研究一系列次优化检测器, 力图在保持其原有的最优性能的前提下, 降低检测运算复杂度, 增加它们的实用性。

正因为最优多用户检测问题是一个 NPC 问题, 多用户检测算法的应用存在着性能和复杂度间的矛盾, 实际应用时, 不得不在性能和复杂度间进行折衷考虑。因此, 在努力研究新型优化算法的同时, 我们可利用现有的处理方法, 结合实际通信情况, 根据不同的实际通信需求, 采取主动式的策略, 进行宽带 CDMA 多用户通信的动态多用户检测。为此, 提出了一种主动式多用户动态检测的方法, 即根据不同的业务需求分别采取不同求解方法。

首先, 将此最优多用户检测 NPC 问题的求解从两个方面进行考虑: 即将 NPC 问题简化为 P 问题的近似求解和 NP 问题优化求解

3.1 多用户检测 NPC 问题的 P 类简化近似求解

为获得适合实际实时通信的低复杂度的多用户检测处理方法, 考虑将最优多用户检测问题从物理意义上简化近似为一个 P 类问题去求解, 这样就可获得多项式时间复杂度的算法。目前研究的大多数多用户检测算法^[4]如线性多用户检测器和非线性多用户检测器两大类正是这样。我们认为它们都是以牺牲性能为代价而将最优多用户检测这样一个 NP 问题简化近似为 P 类问题, 从而得到近似后 P 问题的解, 以换取算法复杂度的降低。

线性多用户检测方法都是对常规的匹配滤波器输出后的值加一个适当的线性变换, 再进行比特判决。此类多用户检测器的计算复杂度一般是随着用户数呈线性的增长, 呈多项式关系, 同步时性能很接近最优的方法, 其抗远近效应的性能往往能达到最佳。为提高该方法的稳健性、减小延时估计误差蔓延等而采用的分布式线性多用户检测方法, 如自适应滤波器

检测法、带反馈抵消的去相关方法、自适应盲检测法、卡尔曼滤波法、多址干扰统计处理方法等实质上是集中式算法的等价变换,其性能和集中式线性多用户检测完全一致。因此,我们将此类方法的算法复杂度统一表示为 $O(p(K))$, $p(K)$ 为关于用户数 K 的多项式。

非线性检测算法(也称减性干扰对消检测器)主要有级并行干扰对消检测器 MPIC、判决反馈检测器 DFD 和逐次干扰对消检测器 SIC,它们都是利用反馈方法来消除多址干扰。这类检测器的主要思想是在接收方重建出全部或部分干扰用户的信号,然后从总的信号中减去估计出的干扰用户信号以得到待解调的信号。研究表明,非线性多用户检测器也可用无限级线性干扰对消检测器来实现。所以,从单级检测器来看,两种类型检测器的复杂度是相同的。那么对多级来说,其算法复杂度可表示为: $O(M \cdot O(p(K)))$, M 为级数, $O(p(k))$ 为线性多用户检测器的算法复杂度。

基于以上考虑,在线性解相关多用户检测方法的基础上进行改进^[5],得到一种矩阵表达及线性方程组求解的方法的快速处理方法,保持并提高了解相关检测的性能,同时又使计算复杂度进一步降低。

我们对信号用矢量矩阵表示,各用户的发送信号可用矢量形式写成 $(b_1, b_2, \dots, b_K)^T$, 经向量对角化处理为 $K \times K$ 维

$$\begin{cases} b_1^{(m+1)} = (1 - \omega) b_1^{(m)} - \frac{\omega}{R_{11}} \left(R_{12} b_2^{(m)} + R_{13} b_3^{(m)} + \dots + R_{1K} b_K^{(m)} + z_1 - \sum_{i=1}^N c_{1i} d_i \right) \\ b_2^{(m+1)} = (1 - \omega) b_2^{(m)} - \frac{\omega}{R_{22}} \left(R_{22} b_1^{(m+1)} + R_{23} b_3^{(m)} + \dots + R_{2K} b_K^{(m)} + z_2 - \sum_{i=1}^N c_{2i} d_i \right) \\ \vdots \\ b_K^{(m+1)} = (1 - \omega) b_K^{(m)} - \frac{\omega}{R_{KK}} \left(R_{K1} b_1^{(m+1)} + R_{K2} b_2^{(m)} + \dots + R_{Kk-1} b_{k-1}^{(m+1)} + z_K - \sum_{i=1}^N c_{Ki} d_i \right) \end{cases} \quad (8)$$

先给 b_1, b_2, \dots, b_K 赋适当的初值,然后代入上面的方程组,进行松弛迭代计算。其中 m 为迭代次数, ω 为松弛迭代因子。在迭代过程时,若 $\text{sgn}(b^{(m)}) = \text{sgn}(b^{(m-1)})$, 则我们就以 $\text{sgn}(b^{(m)})$ 作为方程的解,否则,迭代继续进行。

其算法的复杂度取决于迭代收敛速度的快慢。其收敛速率 $v(R) = -\lg \rho(R)$, 其中 $\rho(R)$ 为相关矩阵 R 的谱半径, $\rho(R) \leq \|R\|$, $\|R\|$ 为矩阵 R 的范数,相当于算法最大复杂度为: $O(\|R\|)$ 。所以,当 K 较大时, $O(\|R\|)$ 远小于一般解相关方法的复杂度 $O(K^3)$ 。

3.2 最优多用户检测 NPC 问题优化求解

以上简化近似为 P 类问题求解方法考虑通信实时性要求,是在算法复杂度和性能之间折衷的处理,对某些要求通信质量高、误码率较小、稳健性较高的业务则不能满足要求。为寻求性能较好,同时又可实现的多用户检测方法,还必须从 NP 问题优化求解的角度去解决 NPC 问题。新型现代优化计算方法^[6]的不断出现及其在一些优化问题上的成功应用,说明很多实际优化问题难解性可利用现代新型 NP 难解问题的最优或近似解法去求解。如果能通过现代优化计算方法,从解决一般 NP 问题的优化方法出发,并结合通信的实际特点,对多用户检测 NPC 问题进行组合优化,降低其计算复杂度,则可获得更实用的方法。如解决 NP 问题的各种启发式算法为在

对角阵 $\text{diag}(b_1, b_2, \dots, b_K)$, 扩频调制相当于与扩频序列矩阵 $C_{K \times N}$ 相乘, K 为用户数, N 为扩频序列的长度。这样,发送端输出信号可用矩阵表示为:

$$A_{N \times 1} = \left[\sum_{i=1}^K b_i c_{i1}, \sum_{i=1}^K b_i c_{i2}, \dots, \sum_{i=1}^K b_i c_{iN} \right]^T \quad N \times 1 \quad (5)$$

到达接收机的信号为发端输出信号和信道噪声的迭加,表示为 $D_{N \times 1} = A_{N \times 1} + n_{N \times 1}$, 则匹配滤波器输出为:

$$Y = C_{K \times N} D_{N \times 1} = C_{K \times N} A_{N \times 1} + z_{K \times 1} \quad (6)$$

其中 $n_{N \times 1}$ 为高斯白噪声矢量, $z_{K \times 1} = C_{K \times N} n_{N \times 1}$ 。

异步情况下,即考虑每一个用户的信号的时延,则只需要将式(5)中的接收信号矩阵中的各元素在求和前根据不同的时延进行移位即可。

将式(3)写成: $RWb = Y - n$, 不妨设 W 为归一化信号功率对角单位阵,将式(6)代入之,则有:

$$Rb = C_{K \times N} D_{N \times 1} = C_{K \times N} A_{N \times 1} + z_{K \times 1} \quad (7)$$

利用式(7)左边矢量矩阵的各元素与右边矢量矩阵对应的各元素分别相等,就可建立线性方程组,这样就将多用户检测问题转换成求解 b 的线性方程组。

我们采用超松弛迭代法,并结合 CDMA 数字通信的特点将其迭代的判定条件进行改进,快速求解线性方程组:

可接受的计算费用内去寻找最好的解提供了思路。文献[7]就是尝试利用神经网络去求解具体多用户检测 NPC 问题。

基于此思想,我们将遗传算法和模拟退火法相结合,利用遗传方法适合多变量数值求解,可用其它算法求初始解的好的兼容性及模拟退火算法好的加速性,提出一种基于遗传模拟退火算法的优化处理方法。即对式(4)的问题,在规模为 N 的群体矢量空间 A 中,利用其最大似然函数为目标函数 $f(a_i) = 2y^T w a_i - a_i^T w R w a_i$, 采用文[6]中的遗传模拟退火算法思想进行求解进行群体搜索。将 A 中的任意一有限集 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_N\}$ 称为一种群体, N 为种群的规模。 A 中的任意一个元素 $a_i = [b_1 \ b_2 \ \dots \ b_K]$ 称为染色体(即问题中的参量), a_i 中的 $b_i = 1$ 或 -1 , 称为基因, K 为用户数。当来自匹配滤波器输出的一组矢量 $Y = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_K]$ 到达后,开始一轮优化检测。

在传统的遗传算法中,竞争是在子代中进行的,而子代和父代之间没有竞争,这样父代中的优良个体有可能丢失。有些算法通过直接将群体中的最优解放入下一代群体中来保存最优解,但这有可能引起早熟收敛的问题,即在进化群体中少数个体的适应函数值远大于其他个体,这样经过少数几次迭代后,这些个体就占据了整个群体,进化过程就提前收敛了。此外,由于遗传算法采用的是随机交叉和变异因子,交叉和变异后的个体并不一定都是优良个体,这会破坏原有的优良个体,

影响算法的性能. 因此, 本文的算法中通过退火法来减轻遗传算法的选择压力, 对所选交叉个体均实施交叉操作, 并且把交叉下降, 接收劣质解的概率也逐渐减小. 同时, 又利用退火法的爬山性能, 改善了遗传算法的性能, 提高了算法的收敛速度.

3.3 主动式多用户动态检测方法

根据以上最优多用户检测 NPC 问题的求解方法, 我们采取主动式的策略, 对不同的业务实时性及 QoS 要求, 动态地对接收系统的多用户检测方法进行再配置, 采用不同的多用户检测问题求解方法实现. 对于要求误比特率较小, 稳健性较高, 而非实时性要求的业务, 如数据业务信号的多用户检测问题, 可采用性能较好、复杂度相对较高的多用户检测问题的 NP 优化方法求解; 对一般 QoS 要求而实时性要求较高的语音通信业务, 其多用户检测问题采用简化成 P 类问题的近似求解. 我们设计的主动式多用户动态检测的处理模型如图 1 所示.

其基本思想就是: 通过对接收信号的主动式在线估计, 确定其不同的业务要求及 QoS, 根据用户的不同业务要求及性能要求, 动态配置而采取不同的多用户检测方法. 不同方法的求解结果都存贮在公共数据区中, 两种方法每完成一级处理, 进行一次各自数据区中数据的更新. 以数据业务用户和语音业务的处理为例: (1) 对数据业务用户, 匹配滤波器输出后采用性能较好而复杂度相对较高的 NPC 优化方法求解, 在求解过程中, 其中感兴趣数据用户的信息作为有用信息, 而其它用户(包括非数据业务用户和部分数据业务用户)的信息作为多址干扰加以消除. 因此, 为加速其优化速度, 减少算法复杂度, 在各级优化过程中对被看成多址干扰的非数据业务用户信息, 可直接利用在公共数据区中简化成 P 类问题的近似求解方法存贮的上一级的解作为值, 进行下一级的优化处理, 而不需要再去计算; (2) 对语音业务用户, 匹配滤波器输出后则采用复杂度较低、实时性较好而性能相对不是很好的简化 P 类问题的近似求解方法求解. 在此求解过程中, 其中感兴趣的话音业务用户的信息为有用信息, 而其它用户(包括非话音业务用户和部分话音业务用户)的信息作为多址干扰加以消除. 同样, 在此迭代过程中为加速其收敛速度, 减少计算时间, 在各级优化过程中对被看成多址干扰的非话音业务用户, 其计算值可利用公共数据区中存贮的 NPC 优化算法计算上一级的解代替, 进行下一级的计算处理.

对接收机而言, 不同的检测器性能对应着不同的 QoS 要求, 不同的业务、不同的误码率反映了不同的 QoS 要求, 通过对接收端不同检测方法再配置、处理, 获得不同误码率的接收性能, 也就获得了不同的 QoS. 也可用稳健性 $\bar{\eta}_k$ 来衡量检测器的性能^[8], 定义为:

$$\bar{\eta}_k = \inf_{E_{b,j} \neq E_{b,k}} \eta_k \quad (9)$$

又和变异后的子代同父代竞争, 不但有利于优良个体的保留, 同时防止了早熟收敛的问题. 随着进化过程的进行, 温度逐渐

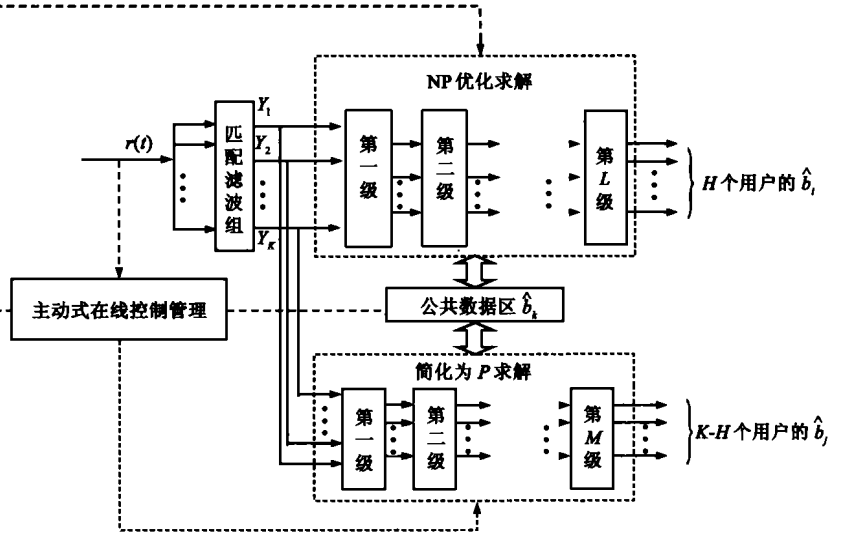


图 1 主动式动态多用户检测模型

这里, η_k 为渐进效率

$$\eta_k = \sup \left\{ 0 \leq r \leq 1; \lim_{\sigma \rightarrow 0} \frac{P_k(\sigma)}{Q(\sqrt{rE_k}/\sigma)} < \infty \right\} \quad (10)$$

式中: $P_k(\sigma)$ 为第 k 个用户在多用户环境下的误比特率, $Q(x) = \int_x^\infty (1/\sqrt{2\pi}) \exp(-x^2/2) dx$.

可见, 误比特率越小, 稳健性越好. 稳健性能反映了一个多用户接收机在严重的多址接入干扰下操作的能力.

4 主动式多用户动态检测方法的实验模拟结果

根据以上主动式动态检测方法, 对其简单的情况进行了实验模拟. 假设系统内有 10 个用户, 其中有的为数据业务用户, 有的为语音业务用户. 在接收中, 根据用户的业务不同, 动态地配置检测的方法, 对话音业务用户和数据业务用户分别采用上述的检测方法进行处理. 我们选择了一组长度为 255 的 Gold 扩频序列, 在理想功率控制下, 接收到的所有用户的信号能量相等. 假设各用户有一个随机时延, 且时延的长度不超过扩频码周期长度. 其中感兴趣的某一个数据业务用户和某一个话音业务用户的误比特率比较如图 2 所示.

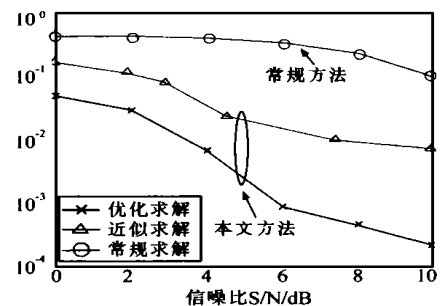


图 2 不同业务用户的误比特率

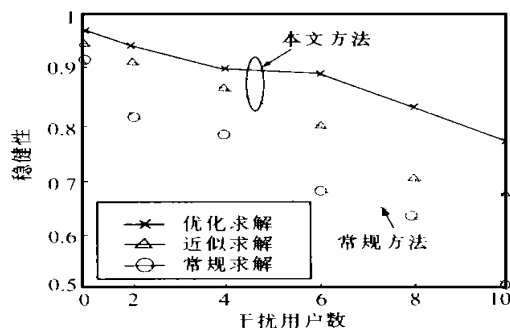


图3 稳健性能比较

从图2可见,从NPC问题优化的角度得到的优化求解多用户检测方法的性能优于简化近似为 P 问题的线性多用户检测方法的性能,即它们分别满足不同的QoS要求,具有不同的稳健性能,如图3所示。但是,前者在运行时需要较后者更长的时间,在本实验条件下,大约为5倍的关系,当用户数增大时,算法复杂度还会提高。因此,它们分别适合于实时性要求不同的业务。

5 结束语

以上针对未来大用户量的多媒体移动通信的WCDMA系统,围绕最优多用户检测问题的难解性及求解方法,提出了一种根据不同业务需求及综合多址无线通信环境的动态QoS要求,进行主动式多用户动态检测的方法。由此建立的系统可完成根据不同的QoS要求动态地配置系统的多用户检测器的功能,从而合理有效地利用资源。实验中只是以两种业务和两种求解方法为例进行了仿真,但其基本思想具有普遍意义。在此基础上,可针对不同的通信业务和特点,利用研究的不同方法进行各种多媒体业务的动态处理和配置。当然,其中算法的进一步优化、有效的在线估计与控制算法等还有待于进一步深入研究。

参考文献:

- [1] S. Verdú. Optimum multiuser asymptotic efficiency [J]. IEEE Trans. on Comm., 1986, COM-34(9): 890-897.
- [2] [美] M. R. Carey and D. S. Johnson 著, 张立昂, 沈泓, 毕源章译. 计算机和难解性 NP 完全性理论导引 [M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [3] S. Verdú. Computational complexity of optimum multiuser detection, Algorithmic [J], 1989, 4: 303-312.
- [4] 夏鹏飞, 李国清, 夏斌, 朱近康. CDMA 通信系统中的多用户检测 [J]. 现代电信科技, 1999, 3: 34-38.
- [5] Yanjun Hu, Jinkang Zhu and Jun Gu. A fast software method of decorrelating multiuser detector in W-CDMA system [C]. IEEE Fall VTC2000 Conference Proceedings, Boston, Sept. 2000.
- [6] 邢文训, 谢金星. 现代优化计算方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [7] B. Aazhang et al. Neural networks for multiuser detection in code division multiple access communications [J]. IEEE Trans. on Comm., 1992, COM-40(7): 1212-1222.
- [8] B. P. Paris. Finite precision decorrelating receivers for multiuser CDMA communication system [J]. IEEE Trans. Commun., 1996, 44(4): 496-507.

作者简介:



胡艳军 1967 年出生, 副教授。1989 年于安徽大学电子工程与信息科学系获工学学士, 1992 年于安徽大学电子工程与信息科学系获工学硕士学位, 并留校任教至今。1998 年进入中国科学技术大学电子工程与信息科学系在职攻读博士学位, 目前主要从事通信信号处理方面的研究。

朱近康 1943 年出生, 中国科学技术大学教授, 博导, 该校信息科学技术学院常务副院长。国家 863 计划通信主题个人通信专家组组长。专业方向是移动通信与无线通信, 扩频通信, 通信中的信号处理。

(上接第 17 页)

- [5] S. Miller, and S. C. Schwartz. Integrated spatial temporal detectors for asynchronous Gaussian multiple access channels [J]. IEEE Trans. Commun., 1995, COM-43(2/3/4): 396-411.
- [6] 陈宝林. 最优化理论与算法 [M]. 清华大学出版社, 1989.
- [7] P. Comon and G. H. Golub. Tracking a few extreme singular values and

vectors in signal processing [J]. Proc. IEEE, 1990, 78(8): 1327-1343.

- [8] Xiaodong Wang and H. V. Poor. Space time multiuser detection in multipath CDMA channels [J]. IEEE Trans. Signal processing, 1999, 47(9): 2356-2374.