一种支持 QoS 的 WCDMA 混合神经网络反向链路功率控制算法

夏 巍,林亚平,何海珍
(湖南大学计算机与通信学院,湖南长沙 410082)

摘 要: 本文提出了一种混合神经网络反向链路功率控制算法,其外环控制采用 Adaline 神经网络模型,以不同业务的目标误帧率为指标,实时检测链路的误码状况,调整 SIR 目标值. 内环控制采用 Hopfield 神经网络模型,通过控制移动台的发射功率确保 SIR 达到该目标值. 与固定步长功率控制算法相比,该算法提高了控制精度和系统的稳定性,能够获得更高的通信质量. 仿真实验也验证了算法的有效性.

关键词: 功率控制; 神经网络; WCDMA; QoS; 误帧率
中图分类号: TN913 **文献标识码**: A **文章编号**: 0372-2112 (2005) 10-1853-04

QoS Guarantees for the Uplink Power Control of WCDMA Systems Using Hybrid Neural Network Techniques

XIA Wei, LIN Ya-ping, HE Hai-zhen
(Computer and Communication College, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract: This paper presents an uplink power control algorithm using hybrid neural network techniques. Based on the FER target criteria and CRC detection of wireless channel in real time, the Adaline out-loop controller adjusts the target SIR according to the FER need. The Hopfield inner-loop controller adjusts the mobile transmit power in order to keep the received uplink signal to interference ratio at the SIR target. Comparing with the conventional fixed-step approaches, this algorithm enhances control accuracy, improves the control system stability, and provides better QoS criteria. Simulations show the effectiveness of the algorithm.

Key words: power control; neural networks; WCDMA; quality of service (QoS); frame error ratio (FER)

1 引言

第三代移动通信系统的目标是能够支持话音、数据、移动多媒体等多种业务. 不同的业务有不同的服务质量 (QoS) 需求. 为解决"远近效应"而提出的功率控制技术,是增大系统容量,实现 QoS 控制的核心技术之一. 它通过控制移动台的发射功率,实时补偿无线信道中引入的衰落,使通信质量满足业务需求,达到规定的 FER/BLER/BER 值.

这些年,关于功率控制算法的研究较多[1],其目的都是要提高控制精度,增强算法的稳定性和鲁棒性,并通过有效地功率控制满足 QoS 需求. 文献[2]给出了一种固定步长和自适应步长的闭环功率控制方案,它利用 RAKE 接收机来跟踪路径衰落引起的功率变化. 文献[3]将模糊控制理论用于功率控制中,建立一系列模糊规则,通过可变的调整步长,对不同的通信环境作出灵敏的反应. 在总发射功率和移动台发射功率都受限制的情况下,文献[4]利用功率控制的补偿作用,达到要求的分组差错率 (PER). 针对 Rayleigh 衰落的信道,文献[5,6]研究了通过功率控制方式,解决在发射功率、中断概率、传输速率受限的约束条件下,寻求 SIR、时延、系统吞吐量的最优解.

本文提出的混合神经网络反向链路闭环功率控制算法,以智能控制理论为基础,从功率控制的角度去探讨 3G 移动网络的 QoS 控制问题.

2 WCDMA 系统固定步长反向功率控制算法

在 WCDMA 系统中影响系统容量和 QoS 指标主要是反向功率控制,它包括内环功率控制和外环功率控制[7].

内环功率控制通过估算 SIR 值,发出相应的功率调整命令 TPC (Transmit Power Control). 控制物理信道的发射功率,使接收端 SIR 收敛于目标值 SIR_{tar}. 内环功率控制算法为:

当 $SIR < SIR_{tar}$, TPC = 1, 信道功率增加 Δ_{TPC} (dB);

当 $SIR > SIR_{tar}$, TPC = 0, 信道功率减少 Δ_{TPC} (dB).

其中,Δ_{TPC} 为固定的功率步长,可以分别取为 0.5dB、1dB、2dB.

外环功率控制通过动态调整内环功控的 SIR 目标值,使通信质量满足 QoS 要求,达到规定的误帧率 FER、误块率 BLER、误码率 BER 值. 外环功率控制算法为:

当 $FER > RER_{tar}$, 提高 SIR_{tar} 一个事先确定的步长;

当 $FER < RER_{tar}$, 降低 SIR_{tar} 一个事先确定的步长.

该步长值可以取 0.3～0.5dB.

收稿日期:2004-12-15;修回日期:2005-06-09

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

在 WCDMA 系统中,高层数据传递到物理层后,都被映射到物理信道的无线帧中.每个物理帧帧长为 10ms,划分为 15 个等长的时隙,每一个时隙对应一个功率控制周期(0.625ms).通常内环功率控制的频率是 1.5KHz,外环功率控制的频率一般为 10～100Hz.

功率控制准则可以大致分为功率平衡准则和信噪比平衡准则两大主流.WCDMA 采用信噪比平衡准则,使基站接收到的各个移动台信号干扰比 SIR 相等.

3 混合神经网络功率控制算法

功率控制的效果直接取决于所采用的控制算法,算法的复杂程度和系统性能的提高往往是相互制约的.固定步长功率控制算法具有算法简便、容易实现的优点.但其控制过程较为粗糙,是一种典型的"乒乓"控制,偏离最优控制较远.

3.1 基本控制原理

本文提出的混合神经网络反向功率控制原理如图 1 示.外环控制器以累计的误帧率 FER 为指标,与业务需求的目标 FER_{tar} 进行比较,并实时检测当前通信链路的误码状况,共同为内环控制提供 SIR_{tar} 目标值.内环控制器则依据动态的 SIR_{tar} 目标值和即时检测的 SIR 值,用两者的偏差和偏差变化率,实施快速的功率控制,调整发射功率,跟踪链路增益的变化,补偿信号的衰落,满足通信质量的需求.

外环神经网络控制器 NN1 采用自适应的 Adaline 单层网络结构,其输入向量 $y(k)$ 为每帧数据的 CRC 校验结果,$y(k-p-1)$ 表示连续 p 帧的检测结果;网络输出 $a(k)$ 表示 SIR_{tar} 目标值.

内环神经网络控制器 NN2 采用了 Hopfield 递归网络结构,其网络向量 $d(k)$ 由实时 SIR 值与其动态目标值 SIR_{tar} 的偏差、偏差变化率以及移动台的发射功率增量构成.

3.2 外环控制算法

外环功率控制的目的在于提供所需要的服务质量 QoS,既不要太差,也不要更好.它以连续的数据帧检测结果为基础,实现对 SIR_{tar} 目标值的调整.外环控制步长 k 选为帧的长度.

外环控制器首先检测上行链路的每一个用户数据帧的"帧可靠性指示符",通过检验解码后的 CRC 校验结果,将每帧检测的结果 $y(k)$ 作为控制器的输入变量,有

$$y(k)=\begin{cases}0, & \text{CRC = OK}\\ 1, & \text{CRC = Error}\end{cases} \tag{1}$$

由于每个数据帧都要进行 CRC 检测,检验正确,维持原控制模式;否则,就增加 SIR_{tar} 值,提高发射功率.如果 CRC 检测连续出错,说明当前无线链路衰落严重,则应大幅度提高 SIR_{tar} 和发射功率.算法的学习过程,就是连接权值的调整过程.这里利用 FER 的统计值,与业务需求的目标值进行比较,改变权值,参与对 SIR_{tar} 的控制,满足通信质量的要求.

针对小区内的移动用户,用户 i 第 $k+1$ 帧的 SIR 门限值,以第 k 帧 SIR 门限值和连续几帧的误帧率检测结果为基础,按 ΔSIR 的步长进行调整.其 SIR 目标值调整公式为

$$SIR(k+1)_i = SIR(k)_i + \Delta SIR_i\{y(k),\cdots,y(k-p-1)\} \tag{2}$$

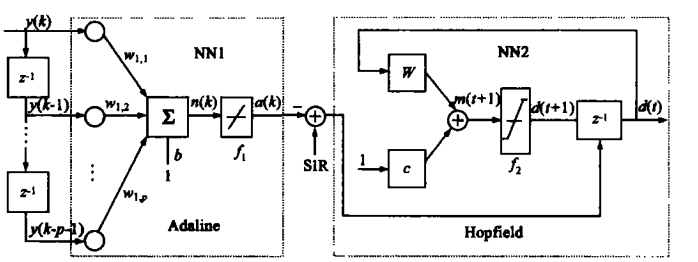

图 1 混合神经网络功率控制原理框图

其中 $\Delta SIR_i\{y(k),\cdots,y(k-p-1)\}$ 联系于神经网络 NN1 的输出 $a(k)$,有

$$a(k) = purelin(Wy+b) = \sum_{i=1}^{p} w_{1,i}y(k-i+1) + b \tag{3}$$

我们利用统计误帧率 FER 参与权值 W 修正的学习过程,定义统计误帧率 FER 满足业务需求(即 $FER \le FER_{tar}$)时的网络目标输出 $a = t_q$,将网络实际输出与目标输出进行比较,有

$$e_f(n) = a(n) - t_q \tag{4}$$

并用下式来估计其均方误差 $F(x)$

$$F(X) = e_f^2(n) \tag{5}$$

利用 LMS 算法对权值 W 和偏置向量 b 进行调整,它是基于负梯度最速下降的原则来减小网络的训练误差,可用矩阵记号表示为:

$$W(n+1) = W(n) + 2\alpha e_f(n)\,y^{\mathrm{T}}(n) \tag{6}$$

和

$$b(n+1) = b(n) + 2\alpha e_f(n) \tag{7}$$

式中 α 为学习速度.利用统计误帧率 FER 与目标值相关的网络输出差值,可以控制学习过程以及收敛速度.由于采用连续几帧进行控制,避免了随机错帧引起的控制波动.

3.3 内环控制算法

根据外环控制提供的 SIR_{tar} 目标值,内环控制器实时比较检测到的 SIR 值与目标 SIR_{tar} 之间的偏差,调整发射功率,使 SIR 尽快收敛于目标 SIR_{tar}.由于每个物理帧包含 15 个时隙,每个时隙都包含一个 TPC 功率控制命令,可以设定时隙长度 t 为内环控制步长.

Hopfield 神经网络模型的核心思想是通过网络输入向量对网络中的神经元进行初始化,然后利用递归层的反馈作用,使网络不断迭代直至收敛,并以 Lyapunov 函数来保证递归网络的稳定性.采用 Hopfield 模型进行内环功率控制,虽然不一定能得到单个用户的全局最优解,却能方便地实现局部最小,很快收敛于网络的稳定点,并取得足够好的性能指标.将该稳定状态作为目标函数的极小点,网络从初始状态向稳态收敛的过程就是优化计算的过程.网络达到了稳定状态,也就从整体上保证了各移动台发射功率的最小,系统的容量最大.

首先定义网络向量误差 $e(t)$ 和误差的变化量 $\Delta e(t)$.其中 $e(t)$ 为当前 SIR 与第 k 帧 SIR_{tar} 目标值之差,$\Delta e(t)$ 代表着当前误差的变化趋势,有

$$e(t) = SIR(t) - SIR_{tar}(k),\ \Delta e(t) = e(t) - e(t-1) \tag{8}$$

内环控制器根据 $e(t)$ 和 $\Delta e(t)$,调整功率控制增量,并通过前向链路传送到移动台,使之按照功率控制命令 TPC 调整信号发射功率.在 t 时隙,用户 i 下一时刻的发射功率可表示

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

为

$$P_i(t+1) = P_i(t) + \Delta P_i\{e(t), \Delta e(t)\} \quad (9)$$

针对 Hopfield 神经网络结构,可分别定义三个网络向量,它们是矩阵向量 $d(t)$ 的元素

$$d_1(t) = e(t),\ d_2(t) = \Delta e(t),$$
$$d_3(t) = \Delta P_i\{e(t), \Delta e(t)\} \quad (10)$$

由于移动用户的发射功率是受限制的,可选择对称饱和线性函数作为其传输函数,有

$$d(t+1) = satlins(W * d(t) + c) \quad (11)$$

网络的能量函数可选用 Lyapunov 函数

$$J(d(t)) = -\frac{1}{2} d^{\mathrm{T}}(t) W d(t) - c^{\mathrm{T}} d(t) \quad (12)$$

Hopfield 网络设计的关键在于改变权值矩阵 W 和偏置向量 c,使能量函数 $J(d(t))$ 能得到想要的最小化函数形式,这样就把需要求解的问题转化为二次函数的极小问题. 通过求解 Lyapunov 函数的最小值,使网络能量在每次迭代时都沿着负梯度方向变化,网络的能量将越来越小,最后达到稳定点.

当网络输出满足了 Lyapunov 意义下的稳定性时,有

$$\| d(t) \| < \varepsilon, (t > 0) \quad (13)$$

此时,SIR $\rightarrow$ SIR$_{tar}$, $P(t+1) \rightarrow P(t)$,神经网络达到了渐近稳定点.

如果在一个物理帧的 15 个时隙内,网络的输出仍不能收敛于稳定点,则可强制结束当前迭代程序,进入下一个内环控制过程.

4　系统仿真

本文通过计算机仿真来验证算法的性能. 无线信道模型中不仅考虑由阴影和衰落引起的慢衰落,还考虑由多径传播引起的快衰落,这里只考虑全速率传输. 慢衰落模型为:

$$L = r^{-\alpha} \cdot 10^{\xi/10} \quad (14)$$

其中 r 是基站与移动台之间的距离;α 是路径损耗指数;ζ 是均值为 0、方差为 σ 的正态分布高斯随机变量,即 $\zeta: N(0, \sigma^2)$. σ 和 α 的典型值分别为 8dB 和 4. 快衰落服从 Nakagami - m[8] 分布. 移动台允许的最大发射功率限制在 25dBm,初始发射功率设为 10dBm. 固定步长内环功率控制算法的功控步长为 1dB,外环控制的 SIR$_{tar}$ 控制步长为 0.5dB. 外环 Adaline 神经网络控制器的输入向量个数 $p = 4$,即选用连续五帧的 CRC 检测结果作为控制器的输入向量,减少随机差错引发的控制波动;用于连接权值和偏置向量的学习速度为 $\alpha = 0.1$. 内环 Hopfield 神经网络控制器的输出稳定范围值设为 $\varepsilon = 0.05$.

在进行仿真时,以衡量通信质量的目标误帧率 FER$_{tar}$ 为指标,分别比较本文的神经网络算法 NN_Algo 与传统固定步长控制算法 TR_Algo 的控制性能. 整个仿真时间为 150 秒,对应 15000 个数据帧;误帧率的统计长度为 100 帧统计一次;目标误帧率设为 6.3%.

图 2 给出了实际误帧率 FER 随时间的变化曲线,左边曲线对应于本文的算法,右边的曲线对应于固定步长算法. NN_Algo 曲线波动较小,呈现平稳态势,说明累计 FER 值在仿真的时间内基本都能满足目标值 FER$_{tar}$ 的要求,提供较高的 Qos 保障,而且更加稳定.

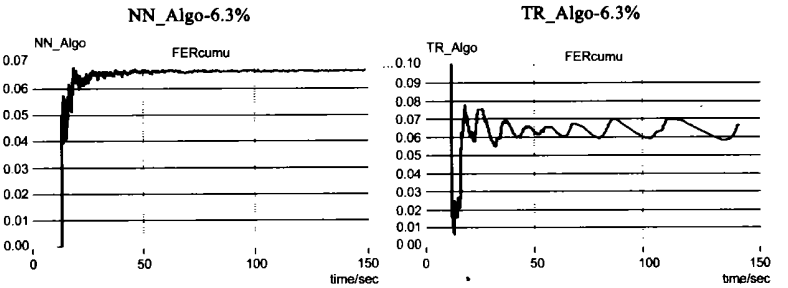

图 2　目标误帧率为 6.3% 时的 FER 变化比较

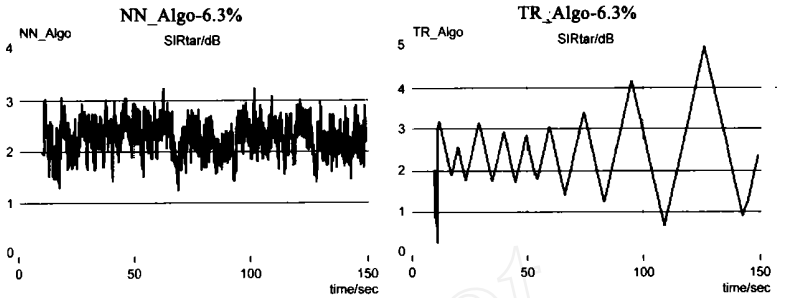

图 3　两种算法目标 SIRtar 值随时间变化曲线 (FERtar=6.3%)

图 3 给出了两种算法的 SIR$_{tar}$ 值变化曲线. 显然,NN_Algo 算法的外环输出值变化较快,振幅较小,可以灵敏地跟踪无线链路的增益变化,具有更好的响应速度和均匀性.

表 1 给出了 SIR$_{tar}$ 和发射功率 TxPower 的统计均值和方差. 较低的均值说明发射功率更低,对其他用户的干扰更小,系统容量更大. 而较低的方差值表示控制更加平稳.

表 1　SIR$_{tar}$ 及 TxPower 统计值

项目	算法	均值	方差
SIR$_{tar}$(dB)	NN_Algo	2.26	0.322
	TR_Algo	2.40	0.898
TxPower(dBm)	NN_Algo	-15.34	7.033
	TR_Algo	-12.68	7.679

由仿真结果可以看出,本文提出的控制算法,无论从误帧率以及 SIR$_{tar}$ 值的变化,还是从移动台发射功率的统计均值及方差,都有较大的改善,能够提供更高的通信质量指标.

5　结束语

反向功率控制是保证 WCDMA 系统通信质量的核心技术,本文提出的混合神经网络反向功率控制算法,其外环控制模块根据数据帧的实时检测结果,快速调整 SIR 目标值,满足不同无线环境下的 FER 要求. 内环神经网络控制模块则根据即时检测的 SIR 与其动态目标值之间的偏差和偏差变化率,快速调整移动台的发射功率. 仿真实验表明,该算法具有较强的稳定性,能够提供更大的系统容量.

参考文献:

[1] M Rintamaki, Kai Zenger, H Koivo. Self-tuning adaptive algorithms in

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

the power control of WCDMA systems[A]. In Proc 5th Nordic Signal Processing Symposium NORSIG-2002[C]. boat Hurtigruten, Norway, Oct. 2002.

[2] Lee C C, Steele R. Closed-loop power control algorithms for a cellular CDMA systems[J]. IEEE Proc Communications, 1996, 143(4): 231 - 239.

[3] 吕玲, 朱世华, 汪勇刚. 一种基于模糊逻辑的外环功率控制方法[J]. 通信学报, 2002, 23(2): 1 - 9.
LU Ling, ZHU Shi-Hua, WANG Yong-gang. A fuzzy outer-loop power control algorithm[J]. Journal of China Institute of Communications, 2002, 23(2): 1 - 9. (in Chinese)

[4] Kin K Leung, Li-Chun Wang. Controlling QoS by integrated power control and link adaptation in broadband wireless networks[J]. European Transactions on Telecommunications, 2000, 11(4): 383 - 393.

[5] Julian D, Chiang M, Oneil D. Robust and QoS constrained optimization of power control in wireless cellular networks[A]. Proc IEEE VTC Fall[C], Atlantic City, NJ: IEEE, Oct. 2001.

[6] Kandukuri S, Boyd S. Optimal power control in interference limited fading wireless channels with outage probability specifications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(1): 46 - 55.

[7] 3GPP TS 25.214 v3.5.0 (2000-12): Technical Specification Group Radio Access Network; Physical layer procedures (FDD)[S].

[8] Tan Christopher C, Norman C Beaulieu. Infinite series representations of the bivariate Rayleigh and Nakagami-m distributions[J]. IEEE Trans Commun, 1997, 45(10): 1159 - 1161.

作者简介:

夏 巍 男, 1963 年出生, 湖南长沙人, 湖南大学博士研究生, 研究方向为无线网络, 移动通信. E-mail: 13308404835@hn165.com.

林亚平 男, 1955 年出生于湖南邵阳, 现为湖南大学教授、博士生导师, 研究方向为计算机网络, 机器学习. E-mail: yplin@hnu.cn.

何海珍 男, 1964 年出生于湖南长沙, 现为湖南大学副教授, 主要从事计算机应用方面的研究.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net