文章编号: 1673-5196(2006)05-0108-04

CDMA 系统中的几种反向功率控制研究

黎锁平[1], 杨 扬[2]

(1. 兰州理工大学 理学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 计算机与通信学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 在简要介绍CDMA 系统中功率控制的作用和控制准则的基础上,讨论了反向功率控制的基本原理,从理论上分析了几种目前比较热门的CDMA 系统中的确定性反向功率控制算法及其性能特征,分析引进了一种改进的随机功率控制模型.

关键词: CDMA; 功率控制; 随机功率控制

中图分类号: TN929.533 **文献标识码**: A

Investigation of several uplink power control in CDMA system

LI Suo-ping[1], YANG Yang[2]

(1. School of Science, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China; 2. College of Computer and Communication, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

Abstract: Based on introducing briefly the function and rules of power control in CDMA system, the principles of uplink power control were discussed emphatically, several control algorithms of definite uplink power control used in popular CDMA system recently were analyzed theoretically, and an improved random power control model was analyzed and introduced.

Key words: CDMA; power control; stochastic power control

当面临移动用户的随机移动性和信道衰减的动态性时,蜂窝电话系统中的功率控制对于最小化用户的能量需求和保证一个稳定的或可接受的服务质量(QoS)是一个很重要的设计任务.在码分多址(CDMA)系统中这点尤其重要.频分多址(FDMA)系统和时分多址(TDMA)系统分别依据用户占用不同的频率和时隙来区别信号,而在CDMA 系统中,用户是以一个与给定的伪随机数字编码相关的宽带信号来区分.在这种上下文中,基站接收某一用户的信号,同时也接收到本小区所有其他用户的信号和其他小区用户到达该基站的信号,并把它们作为干扰或噪声,因为它们都减弱了区分和提取给定用户信号的解码过程.因此,单个用户发射功率的等级变得至关重要,该等级应能确保在基站侧的足够的信噪比.更确切地说,从一个用户发出的过量的信号功率将会变成对其他用户信号的干扰和加速蜂窝电话电池的消耗.相反,过低的信号功率将会导致不充分的QoS.事实上,当保持一个要求的QoS 时,严格的功率控制与CDMA 基站容纳尽可能多的用户能力是间接相关的.

由于"远近效应",CDMA 系统的容量主要受限于系统内各移动台间的干扰,因而,CDMA 系统是一个干扰受限系统.为了使系统容量达到最大,需使每个移动台的信号到达基站时都能达到保证通信质量所需的最小信噪比.功率控制就是为了克服"边缘效应"和"多址干扰",控制发射台的发射功率,减少相互间的干扰,实现最优通信质量而采取的一项技术.它在对接收机端的接收信号能量或解调信噪比指标进行评估的基础上,对无线信道中的衰落进行及时补偿,从而既维持了高质量的通信,又不对同一无线资源中的其他用户产生干扰.因此,在CDMA 系统中,功率控制被认为是所有关键技术的核心[1,2].

1 功率控制准则

功率控制准则指的是功率控制的基本依据,功率控制准则从原理上可以大致分为以下几种:功率

收稿日期: 2005-05-09

基金项目: 教育部"春晖计划"基金(Z2006-1-62006),甘肃省自然科学基金(ZS032-B25-031)

作者简介: 黎锁平(1965-),男,甘肃合水人,博士,教授.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

平衡准则、信噪比平衡准则,另外也有人提出误码率平衡准则.

1) 功率平衡准则.功率平衡是指在接收端收到的有用信号功率相等.对于反向链路,功率平衡的目标是使各个移动台到达基站的信号功率相等.对于前向链路,功率平衡的目标则是使基站到达各移动台的有用信号功率相等.

2) 信号干扰比SIR(signal to interface ratio)平衡准则.SIR 平衡是指在接收端收到的信号干扰比相等.对于反向链路,SIR 平衡的目标是使基站接收到的各个移动台信号干扰比SIR 相等.对于前向链路,SIR 平衡的目标是使各个移动台接收到的基站信号干扰比SIR 相等.

3) 误码率BER(bit error rate)平衡准则.在数字数据通信系统中,一般采用误码率BER 作为最佳标准,因此也有人提出所谓BER 平衡准则.然而误码率与接收信号的信干比之间并不存在一一对应关系,它与实际传输信道的性质有关,很难建立具体分析模型.

在实际功率控制系统中,比如IS-95 和 WCDMA 是采用SIR 平衡准则与误帧率FER 相结合的方法.即SIR 的门限即参考阀值是由FER 决定的,但是功率控制准则选用SIR 平衡准则.

2　反向功率控制基本原理

功率控制可分为前向功率控制和反向功率控制.其中,前向功率控制是对基站的发射功率进行控制,反向功率控制是对手机的发射功率进行控制.反向功率控制又叫上行链路功率控制,包括 3 个部分:开环功率控制、闭环功率控制和外环功率控制.

反向开环功率控制是移动台在呼叫建立时,根据接收到的基站的导频信号强度来衡量该用户与基站之间的传播损耗,从而确定发射功率的大小,使移动台的发射功率控制在一个范围内.如果移动台接收功率小,表明前向传输损耗较大,则认为反向链路损耗也大,于是就增大移动台的发射功率.反之则减小移动台的发射功率.

由于CDMA 系统中前向链路和反向链路的中心频率不同,相差 45 MHz,导致 2 个链路的传播损耗不对称.为了实现精确的功率控制,必须在开环功率控制的基础上采用闭环功率控制进行弥补.反向闭环功率控制是移动台在基站的协助下完成的.基站周期性地检测解调的反向业务信道的信号信噪比,将此信噪比与某一门限值做比较,当信噪比太低时指示移动台增加发射功率,当信噪比太高时指示移动台降低发射功率.而移动台根据收到的基站的功率控制指令调节相应的发射功率,调节步长一般为 1 dB.反向闭环功率控制是反向功率控制的核心(见图 1).

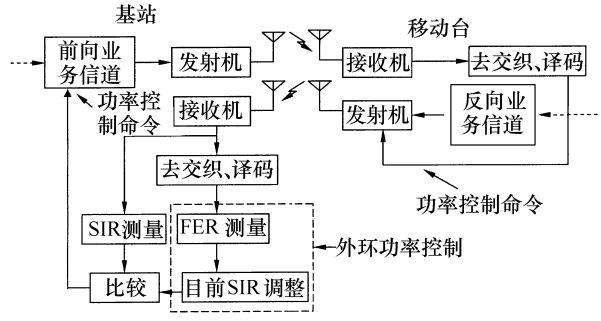

图 1　反向闭环功率控制原理

Fig.1　Principle of uplink closed loop power control

反向闭环功率控制中的信噪比门限可根据传播环境不同进行动态调整,这就是反向外环功率控制.因为在语音通信中,反映话音质量的是误帧率(FER)或误比特率(BER),基站根据接收到的用户信号的误帧率统计值来调整相应的信噪比门限大小,使得功率控制直接与通话质量相联系.

3　功率控制算法

扩频CDMA 系统是干扰受限系统,系统的容量主要受限于系统内部移动台的相互干扰,所以当控制每个移动台的信号到达基站时都达到所需的最小信噪比时,系统容量将会达到最大值,蜂窝CDMA 系统的性能将会有所提高.近年来,学术界围绕功率控制这个领域做了大量工作[3~8],研究出了各种功率控制算法.

3.1　基于干扰预测的功率控制

基于干扰预测的功率控制方法是利用当前时刻和以前若干时刻的干扰对下一时刻的干扰进行最佳预测,以此为基础来决定下一时刻的功率,从而使信干比更接近门限值.

假设系统由 K 个基站和 J 个移动用户组成,在基站 k 接收到的用户 i 的SIR 可以定义为

$$\Gamma_i \triangleq \frac{G_{ki} p_i / R_i}{(I_{\text{intra}} + I_{\text{inter}})/W + N_0} \qquad (i = 1, 2, \cdots, J) \tag{1}$$

式中:G_{ki} 是用户 i 和基站 k 之间的链路增益,R_i 是用户 i 发射的比特速率,W 是带宽,I_{intra} 是本小区其他用户对用户 i 的干扰功率,I_{inter} 是外小区用户对用户 i 的干扰功率,$\Gamma_i \geqslant \gamma_i$,$1 \leqslant i \leqslant J$,$\gamma_i$ 是某一业务所需的信干比门限.

功率控制的目标是使得用户 i 所发送的某一业

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

务的信干比等于信干比门限，即

$$\Gamma_i = \gamma_i \tag{2}$$

由此解出控制量：

$$p = \frac{\gamma_i}{W}\left(\frac{G_{ik}}{x + N_0 W}\right)^{-1}$$

式中 $x = \sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{J_k} G_{kj} p_{kj} + \sum_{\substack{m=1\\ m\neq k}}^{K}\sum_{j=1}^{J_m} G_{mj} p_{mj}$

那么 $n+1$ 时刻用户 i 的功率为

$$p_i(n+1) = \frac{\gamma_i}{W}\left(\frac{G_{ik}}{x(n+1) + N_0 W}\right)^{-1} \tag{3}$$

基于干扰预测的功率控制方法就是根据以前时刻和当前时刻的干扰对式(3)中的下一时刻的干扰 $x(n+1)$ 进行预测，预测值 $\hat{x} = \sum_{i=1}^{q} \hat{h}_i x_{n-i+1}$，其中权值 $\hat{h}$ 是预测系数. 此时：

$$p_i(n+1) = \frac{\gamma_i}{W}\left(\frac{G_{ik}}{\hat{x}(n+1) + N_0 W}\right)^{-1} \tag{4}$$

基于干扰预测的功率控制方法对传统的闭环反馈功率控制方法是一个改进，在传统的闭环反馈功率控制算法中存在一个普遍的问题：信号传播和处理需要一定的时间，因此当移动台收到基站的功率控制命令并对它的发射功率做相应调整时，干扰已经发生改变. 而一般的功率控制算法都假定干扰在一个控制周期内是不变的，根据当前时刻的干扰来决定下一时刻的功率，显然这与实际情况并不相符. 尤其是在通信终端高速运动的快衰落信道条件下，会带来较大的控制偏差. 而基于干扰预测的功率控制方法是根据现在和以前时刻的干扰对下一时刻的干扰进行预测，它不仅可以提高控制精度和收敛速度，增加系统的稳定性，而且可以增加系统的容量. 但是这种方法只考虑到了不同时刻多址干扰的动态性，而忽略了信道衰减的动态性和用户的随机移动性.

3.2 基于“载波平衡”的系统爱尔兰容量仿真

J. Viterbi[4] 在经过对大量基站接收信号的统计分析后，得出在实际(非理想、非精确)功率控制下基站接收信号的信噪比呈对数正态分布这一结论. J. Viterbi 所研究的 CDMA 系统中的爱尔兰容量是基于功率控制问题上的“载波平衡(load balance)”观点，这种观点反映的是功率控制问题上的基本静态和准静态观点. 本质上讲，在这种方法中，逐次抽样时间点上的功率控制被看作是逐点最佳化问题，假定在独立的时间点上的变量是统计独立的.

在这种算法中，定义拥塞为干扰功率与热噪声功率的比值超过某一门限，即

$$\frac{I_0 W}{N_0 W} > \frac{1}{\eta} \qquad (\eta < 1) \tag{5}$$

非精确功率控制下反向信道的拥塞率为

$$P_b \approx W\left\{\frac{\dfrac{(W/R)(1-\eta)}{\exp(\beta m_c)} - \rho(\lambda/\mu)(1+f)\alpha_c}{\sqrt{\rho(\lambda/\mu)(1+f)\alpha_c^4}}\right\} \tag{6}$$

式中：$x_i \triangleq 10\lg(E_{bi}/I_0)$，$m_c$ 和 σ_c^2 分别是 x_i 的均值和方差，$\alpha_c = \exp[(\beta\sigma_c^2)/2]$，$\beta = (\ln 10)/10$，$\lambda$ 为用户的到达率，$1/\mu$ 为平均服务时间，ρ 为话音激活因子，f 为小区间干扰因子，R 为数据率，η 为噪声与干扰比门限.

根据拥塞率与系统爱尔兰容量的关系，得到反向信道的爱尔兰容量为

$$\frac{\lambda}{\mu} = \frac{(W/R)(1-\eta)}{\rho(1+f)\exp(\beta m_c)} F(B, \sigma_c) \tag{7}$$

式中 $F(B,\sigma_c) = \frac{1}{\alpha_c}\left\{1 + \frac{\alpha_c^3 B}{2}\left[1 - \sqrt{1 + \frac{4}{\alpha_c^3 B}}\right]\right\}$

$$B = \frac{[Q^{-1}(P_b)]^2 \exp(\beta m_c)}{(W/R)(1-\eta)}$$

$$Q(x) = \frac{1}{2\pi}\int_x^{+\infty} \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) dy$$

根据式(7)对系统的爱尔兰容量进行仿真，找出爱尔兰容量最大的仿真算法.

3.3 载干比 CIR (carrier to interference ratio) 平衡算法

区内载干比平衡算法是指基站控制本小区所有链路的发射功率，使得该区所有链路的接收干扰信号比 $(I/C)_{ik}$ 相等，即 $(I/C)_{ik} = (C/I)_i$. 但是 CIR 平衡算法是一种分布式算法，它的目标是使每个通信链路上的最小 CIR 最大化. 在这种算法中需要一个全局标准化因数以使单个用户发射功率达到所需范围，因为这个因数必须根据全局信息计算，这就削弱了该算法的分布性，同时计算量也非常大. 因此也有人提出了一种分布式固定步长功率控制算法，它是一种简单的仅使用本地信息的反馈调整算法. 这种算法的目标不再是将最小 CIR 最大化，而是将所有链路的 CIR 维持在一个目标值之上. 另外，在该算法中，基站对移动台的功率设置仅可以增加或减少固定值，使该算法具有一定的收敛性.

3.4 随机功率控制算法

与上述几种算法不同，功率控制中还有一种随机功率控制算法. 一般的功率控制算法都假设用户信号经过长距离的传播后，其功率损失服从对数正态分布. 这种假设没有考虑传播环境的变化和用户的随机移动性，因此在不同时隙接收端收集到的数

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

据就不适用于这种假设中的对数正态分布的时不变特性.而随机功率控制方法使用的是多径衰落信道的随机模型,这种信道模型充分考虑了无线信道的各种衰减的动态性和用户的移动性,它的建模和分析使用了时间无关的和取决于衰减的无线模型,用 dBs 表示的功率损失动态模型是一个线性随机微分方程,它的性质模拟由于反射功率损失和电磁波长距离传播引起的功率损失而引起的功率衰减.

让 $x_i(t)$,$1\leqslant i\leqslant n$,表示第 i 个移动信号在 t 时刻的功率衰减(用 dBs 表示并且用自然对数来计算),让 $\alpha_i(t)=e^{x_i(t)}$ 代表相应的功率损失.通过下面的公式来模拟功率衰减动态性:

$$dx_i=-a_i(x_i+b_i)dt+\sigma_i dw_i \quad (1\leqslant i\leqslant n) \tag{8}$$

式中:n 代表移动用户的数量;$\{w_i,1\leqslant i\leqslant n\}$ 是 n 个独立的标准 Wiener 过程;a_i,b_i,$\sigma_i>0$.式(8)的第一项表示 x_i 对长期平均 b_i 的长期调节,a_i 是调整速度.

本文用计算机仿真验证了无线信道功率衰减随机模型的性能,仿真条件采用下列假设:系统包括两个用户,每个用户信道的功率衰减模型是对称的,$a_i=a=4$,$b_i=b=0.3$,$\sigma_i^2=\sigma^2=0.09$,即 $dx_i=-4(x_i+0.3)+0.3dw_i$,$i=1,2$,$t=1$ 为系统的初始时刻,此时 $x_1(1)=-0.28$,$x_2(1)=-0.31$.图 2 给出了无线信道噪声曲线,图 3 为功率衰减曲线.每次仿真生成的曲线都是随机的,图 2 和图 3 只是其中的一次仿真结果.

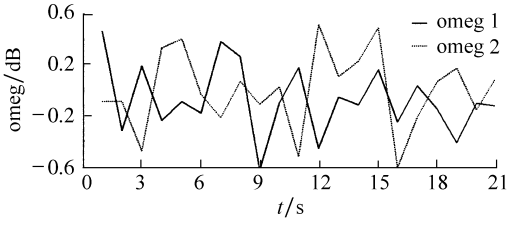

图 2　信道噪声

Fig.2　Noise of channel

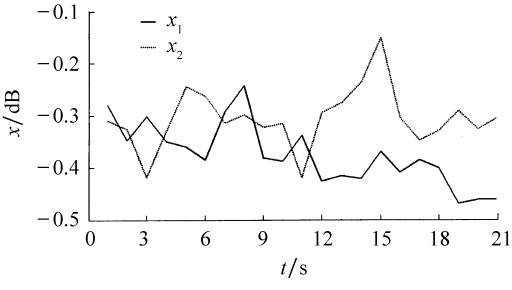

图 3　功率衰减

Fig.3　Power attenuation

从图中可以看出,随机信道模型能够较好地模拟无线信道的随机性,它提供了一种解决无线系统中的功率控制问题的新方法,弥补了传统功率控制方法对信道衰减动态性考虑不足的缺陷,使用随机信道模型能够更准确地调整发射台的发射功率,提高控制精度和收敛速度,从而增加系统容量.

4　结论

从移动通信系统的发展趋势来看,系统容量需求将不断扩大,无线资源会越来越紧张.系统干扰将严重地限制系统容量,而且也会导致环境问题.现有的功率控制方法精度较低,对系统容量的提高作用不是很大,因此今后的发展方向是结合现今的自适应控制理论和信息预测理论改良功率控制算法,提高功率控制的精度,使之更趋精密,同时尽量降低算法的复杂度.在功率控制算法中加入随机控制模型是一种新趋势,它能更准确地对无线系统中的发射功率进行控制.充分利用这个特点,发挥最优随机功率控制估计准确、反应快速的优势,将是 CDMA 系统功率控制算法的一个新方向.

功率控制的技术在实现上不能对理论和概念简单套用,通过仿真验证、现场实验等手段获得的实验数据,是指导算法在设备中应用的重要经验值,作者将对此进行深入的研究.

参考文献:

[1] 吴伟陵.移动通信中的关键技术[M].北京:北京邮电大学出版社,2000.

[2] 彭　林.第三代移动通信技术[M].北京:电子工业出版社,2003.

[3] 吕　玲,朱世华,汪勇刚.一种基于干扰预测的功率控制算法[J].西安交通大学学报,2001,35(6):577-580.

[4] VITERBI A M,VITERBI A J.Erlang capacity of a power-controlled CDMA system[J].IEEE Selected Areas in Communications,1993,11(6):892-900.

[5] 林福华,黄新宇,吴　越.一种 CDMA 系统反向功率控制的算法[J].通信学报,1998,19(10):59-63.

[6] 谭立军,李乐民.蜂窝 CDMA 系统的功率控制[J].电子科技大学学报,1994,23(1):1-7.

[7] SUN C W,WONG W S.A distributed fixed-step power control algorithm with quantization and active link quality protection[J].IEEE Transaction on Vehicular Technology,1999,48(2):553-562.

[8] KAMEN E W.Proceedings of the 38th IEEE Conference on Decision and Control[C].Phoenix:IEEE Control Systems Society,1999:4 947-4 952.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net