

CDMA 系统中的自适应反向闭环功率控制¹

戈 玲² 吴新余

(南京邮电学院电子工程系 南京 210003)

摘 要 在码分多址 (CDMA) 移动通信系统中, 反向链路功率控制对克服“远近效应”和增加系统容量是非常重要的。本文提出了一种基于改进的神经网络 (MNN) 的自适应闭环功率控制算法, 该方法平滑了移动信道衰落的影响, 使基站接收到的小区中所有用户的信号功率相等。仿真结果表明, 由于神经网络能够较好地识别反向链路的时变特性, MNN 功率控制方法比传统的固定步长功率控制方法取得了更好的控制性能和系统容量。

关键词 码分多址, 功率控制, 远近效应, 多径衰落, 中断率

中图分类号 TN914.5, TN929.5

1 引 言

CDMA 数字蜂窝移动通信系统具有抗干扰能力强、保密性好、容量大等优点, 越来越受到广泛的关注。但 CDMA 通信方式存在传输衰落、多址干扰和远近效应等问题, 其系统容量受限于系统内移动台的相互干扰。CDMA 存在的一个重要的问题是远近效应, 如果小区中的所有用户均以相同的功率发射, 则接收机接收到的远处的发射机的信号弱, 接收到的近处的发射机的信号强, 即出现远近效应问题。如果发射信号太小, 使得接收信号的信号干扰比 (SIR) 太小, 导致误码率增加, 通信质量下降; 反之, 发射功率太强, 会增加同频带内其它用户的干扰。如果每个移动台的信号到达基站时都达到最小所需的信噪比, 系统的容量将会达到最大。对发射信号的功率控制对解决远近效应问题和增加系统容量是非常重要的^[1,2]。

反向链路功率控制通过控制用户的发射信号功率, 以保证基站接收到的小区内的所有用户信号功率相等。它包括反向开环功率控制和反向闭环功率控制。对于传统的固定步长功率控制方法, 步长的取值存在控制精度与响应速度之间的矛盾。如果步长大, 控制速度快, 但控制精度难以控制; 如果步长小, 控制精度高, 控制速度则跟不上信号功率的变化。特别是快衰落时, 固定步长的功率控制方法不能提供准确的功率控制。现在已经提出了许多关于 CDMA 功率控制的新方法。文献 [3] 把模糊逻辑应用于 CDMA 功率控制, 取得了较好的效果, 但是模糊规则的确定需要事先知道移动衰落信道的特性。本文提出了一种能够学习信道特性的神经网络功率控制器, 全文组织如下: 第 2 节分析了通道模型, CDMA 系统模型和基于神经网络的功率控制系统在第 3 和第 4 节分别给出。第 5 节进行了仿真分析, 最后给出结论。

2 移动信道的分析

2.1 移动信道的传播特性

在移动通信中, 由于移动台的移动和无线媒质的特殊性, 在移动台和基站之间的传输路径不断变化, 引起接收信号的衰落和多径时延等效效应, 直接影响到通信的可靠性。无线接入的传输衰落包括路径损耗和阴影衰落引起的慢衰落以及多径传输引起的快衰落^[4]。

¹ 1998-10-26 收到, 1999-07-28 定稿

原邮电部预研基金资助项目

² 现在广东移动通信有限责任公司深圳公司工作

慢衰落是指接收信号的场强中值的缓慢变化。它的常用模型为 $L = Ar^{-\alpha} \cdot 10^{\xi/10}$ ，其中 r 是基站和移动台之间的距离， α 是路径损耗指数， ξ 是均值为 0，方差为 σ 的高斯随机变量， σ 和 α 的典型值为 8dB 和 4dB。

快衰落主要是由于发射波受当地散射体或自然障碍物的多径反射引起的。其衰落深度可以达到 20~30dB，最大衰落频率 F 为 $2v/\lambda$ ，其中 v 是移动台运动速度， λ 是载波波长。一般认为城市环境中的快衰落服从瑞利 (Rayleigh) 分布，由概率统计理论可知，瑞利分布的概率密度函数为 $p(r) = r/\sqrt{\bar{r}^2} \exp(-r^2/\bar{r}^2)$ ，其中 r 为快衰落信号的包络， \bar{r}^2 为快衰落信号的平均功率， $\sqrt{\bar{r}^2}$ 为 r 的均方根值。

2.2 衰落信道模型

贝尔实验室的 Jakes 提出了一种模拟移动通信衰落信道的技术，被称为 Jakes 模型^[5,6]。移动台与基站的相对运动引起接收电波的频率变化，称为多普勒频移，最大多普勒频移 $f_m = v_m/\lambda$ ，其中 v_m 是最高车速， λ 是载波波长， $\omega_m = 2\pi f_m$ 。瑞利衰落过程可以通过叠加 N 个复正弦曲线来近似，这组正弦曲线的频率和相位由特定的公式给出。定义 $N_0 = (1/2)(N/2 - 1)$ ，则衰落信号的复包络 $T(t)$ 可以表示如下：

$$T(t) = \frac{E_0}{\sqrt{2N_0 + 1}} [x_c + jx_s]$$

其中 x_c 和 x_s 分别是正交和同相部分，

$$x_c(t) = 2 \sum_{n=1}^{N_0} \cos \phi_n \cos \omega_n t + \sqrt{2} \cos \phi_N \cos \omega_m t$$

$$x_s(t) = 2 \sum_{n=1}^{N_0} \sin \phi_n \cos \omega_n t + \sqrt{2} \sin \phi_N \cos \omega_m t$$

其中 $\omega_n = \omega_m \cos(2\pi n/N)$ ， $n = 1, 2, \dots, N_0$ ； ϕ_N 是最大多普勒频率正弦曲线的初始相位； ϕ_n 是第 n 个多普勒频移正弦曲线的初始相位。振荡器的初始相位作为仿真初始化的一部分。本文 N_0 是 8， ϕ_N 是 0， $\phi_n = \pi n/(N_0 + 1)$ ， $n = 1, 2, \dots, N_0$ 。

3 蜂窝系统模型的分析

一个理想的蜂窝系统模型如图 1 所示。在仿真中，我们考虑 19 个小区的 CDMA 蜂窝无线系统，集中研究中间小区。在每个小区内，基站位于小区的中间，基站控制本小区移动台的发射功率。

对于小区中的某一通信用户来说，他要受到本小区内其它 $K - 1$ 个用户信号的干扰，还要受到来自别的小区的用户信号干扰以及噪声的影响，总的干扰功率如下所示：

$$I = \sum_{k=1}^{k_0-1} P_k^r(r_k) + \sum_{j=1}^6 \sum_{k=1}^{k_j^{(1)}} P_{jk}^r(r_{jk}) + \sum_{j=1}^{12} \sum_{k=1}^{k_j^{(2)}} P_{jk}^r(r_{jk}) + N_0 W$$

其中 $P_{jk}^r(r_{jk})$ 表示小区 j 中的移动台 k 对所研究的基站 (即图 1 中处于中心位置的基站) 的干扰功率， $k_j^{(n)}$ 表示所研究的基站周围第 n 层小区 j 中的移动台数目， k_0 表示所研究的小区内的移动台数目。等式右边第一项反映了本小区其它用户的干扰，第二、三项分别表示来自周围第一层和第二层小区的干扰，最后一项是噪声干扰。

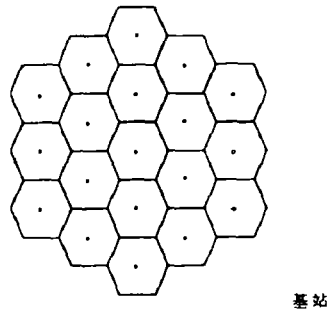


图 1 系统模型

对于周围第一层和第二层小区，其移动台对所研究的基站的干扰功率为

$$P_{jk}^r(r_{jk}) = P_{jk}G(j)_{ki}/G(j)_{kj}$$

其中 $G(j)_{kj}$ 和 $G(j)_{ki}$ 是小区 j 中用户 k 分别到基站 j 和基站 i 的链路增益。

因此 $P_{jk}/[G(j)_{kj}]$ 是小区 j 中用户 k 的发射功率。链路增益 G 可以用 2.1 节所描述的慢衰落模型表示。

系统容量是指系统所能够提供的可供同时通话的最大用户数。在 FDMA 及 TDMA 中，系统所能提供的信道数完全由系统的频带及信道间隔、每频道分割的时隙数确定的，是一个固定的数字。而在 CDMA 中，所有用户共享信道资源，CDMA 数字蜂窝系统的容量由话音激活率、扩频增益、信噪比等参数共同决定，容量没有硬性限制。

P_{out} (Outage Probability) 表示了不能同时满足一定通信质量的信噪比的概率，它与本小区与相邻小区的用户数相关，可以作为系统的性能量度，其表示如下：

$$P_{\text{out}} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n P_r \{ \text{SIR} < \text{SIR}_{\text{Th}} \}, \text{ 其中 } \text{SIR}_{\text{Th}} \text{ 是所需要的信扰比门限。}$$

对于某个移动终端，在基站接收到的 $\text{SIR} = P_r^s/I$ ，其中 P_r^s 是基站接收到的由所研究的移动终端发送的功率， I 是基站接收到的所有干扰移动终端传送的功率。

4 自适应闭环功率控制系统

快衰落的速度与移动台运动速度有很大关系。当移动台运动速度较快时，小步长的固定调整步长功控方案就不能满足实际需要。此问题可以通过增大调整步长或提高功率控制命令发送频率。如果提高功率控制命令发送频率，发送的比特数会大大提高，而过多地占用比特会影响话音质量。如调大步长，又会导致控制精度的下降。如果有一方案能够实时调整步长，当发射功率与所需发射功率相差较大时，步长增大，以提高控制速度；当两者相差较小时，自动减小步长，进行细调，那将能较好地满足各方面的需要。

4.1 功率控制系统模型

本设计利用神经网络来构成自适应反向闭环功率控制器 (MNNPC)，其模型如图 2 示。所有变量用分贝 (dB) 表示，基站控制本小区各个移动台的发射功率，各移动台使用不同的扩频码序列加以标识。MNNPC 的输入是接收功率与所希望接收到的功率之间的误差 e 以及误差的改变量 Δe ，输出是功率调整步长。MNNPC 根据误差 e 和误差变化 Δe ，自适应地调整功率控制的步长，该控制命令通过前向链路传送给移动台，移动台根据功率控制命令调整发射信号功率，跟踪链路增益的变化。

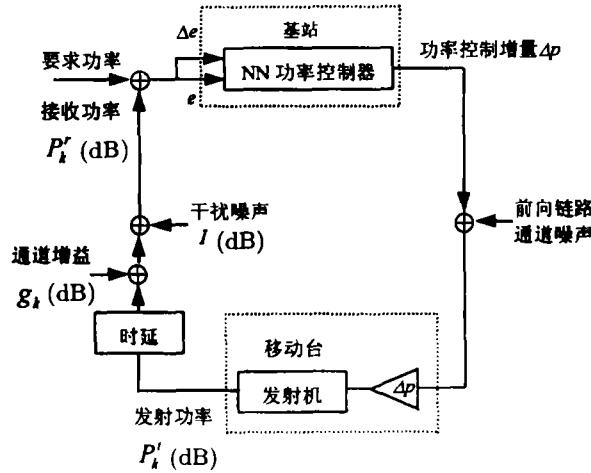


图 2 CDMA 自适应闭环功率控制系统模型

反向链路要受到传播损耗、阴影衰落和多径衰落的影响, 并有来自其它移动台的干扰和噪声, 总的干扰功率 I (dB) 是由本小区及相邻小区的信号干扰及噪声引起的, 具体分析如第 3 节所述。假设采样时间为 T_s , 在第 k 个采样时间, 基站接收的信号:

$$P_k^r = P_k^t + g_k + I \text{ (dB)}$$

其中链路增益 g_k (dB) = $L(n) \cdot S(n)$; $L(n)$ 和 $S(n)$ 分别表示长期衰落和短期衰落 (快衰落)。 $L(n)$ 是第 2 节中的慢衰落模型, $S(n)$ 表示由 Jake 模型构造的瑞利衰落模型。

本文假定所期望的功率 D 为 0dB。回路时延 T_d 包括功率测量时间, 正向和反向链路传播时延, 以及产生、传送和执行一个功率控制命令的时间 lT_p , 本文取 l 为 1。

MNNPC 的工作原理用公式表示如下:

$$\Delta p(k+1) = \text{MNN}\{e_k, \Delta e_k\}; \quad P_{k+1}^t = P_k^t + \Delta p(k+1).$$

4.2 神经网络功率控制器

多层感知器神经网络已经被广泛用于非线性映射问题, 但是它的训练和收敛速度都非常慢, 不适合于在线系统识别和自适应控制^[7]。本文采用了一种改进的局部反馈前向传播神经网络 (MNN), 它用一组中间节点存储中间状态, 隐层节点和中间节点之间有附加的权值, 图 3 给出了 MNN 的结构。输入节点是接收到的功率误差 e 以及误差的改变量 Δe , 输出节点表示功率控制增量 Δp 。神经网络功率控制器通过识别衰落信道的时变特性, 动态地调整功率控制增量, 力图使基站接收到的每个用户发射的功率相等。

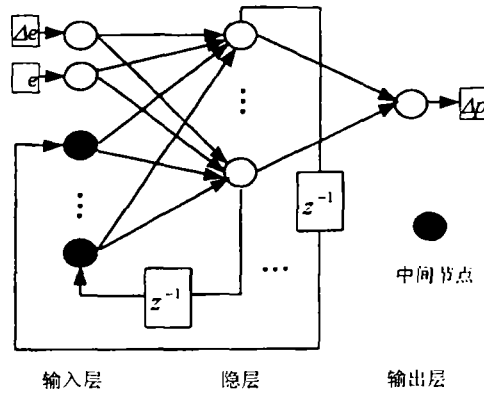


图 3 MNN 的结构

MNN 具有在线控制的优点。首先，通过离线训练获取信道的大致模型。然后，当 MNN 进行功率控制的同时，神经网络通过反传 (BP) 算法实时调整相应参数，更好地识别衰落信道的时变特性，可以用公式表示如下：

$$\Delta p(k) = \text{MNN}\{e_{k-1}, \Delta e_{k-1}, WV(k-1)\}$$

$$WV(k) = \text{BPNN}\{e_k, WV(k-1)\}$$

其中 WV 是 MNN 的权值，BPNN 表示权值学习的反传算法。在第 $(k-1)$ 个采样，MNN 给出了下一个采样时间的功率增量 $\Delta p(k)$ ，在第 k 个采样时间，根据误差用 BP 算法进行权值调整。

对于传统的神经网络识别方法，为了识别动态系统，需要许多过去时间间隔内的数据作为输入和输出。由于 MNN 的中间记忆神经元的信息存储和权值的动态调整，本系统只需要接收到的功率误差 $e(k)$ 和误差变化量 $\Delta e(k)$ 作为输入。这样就简化了神经网络的结构，加速了训练过程，从而使 MNN 更适合于非线性系统的在线控制。

众所周知具有足够多的隐层节点的单隐层神经网络能够拟合任何非线性函数^[8]。但是对于特定的问题需要选择具有最少权值和节点的优化结构，因为大量的参数或权值会增高计算复杂性和局部最小解的可能性。本文讨论了中间节点的数目对算法性能的影响。图 4 给出了功率控制误差与中间节点数 (n) 的关系曲线。可以看出中间节点数为 11 时误差较小。

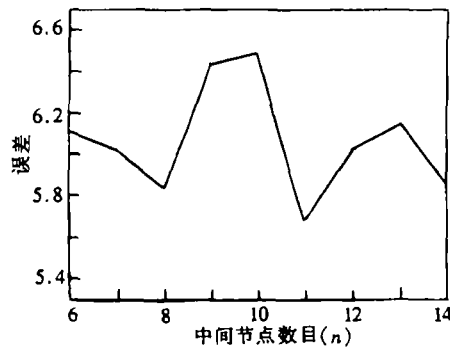


图 4 功率控制误差与中间节点数 (n) 的关系曲线

4.3 多模型功率控制系统

需要注意的是移动速度的巨大变化将导致信道特性的突然变化, 这将会严重影响控制性能。本文考虑了不同移动速度时的快衰落特性, 提出了多模型的功率控制系统。首先在实际应用中采集大量的能够反映信道时变特性的实验数据, 然后以这些数据作为神经网络训练的训练集, 离线训练出不同移动速度时的功率控制模型。误差的变化量 $\Delta e(k)$ 反应了快衰落的变化, 被用作切换的标志。多模型控制系统避免了移动信道突变带来的巨大瞬时误差, 能够更好地响应快衰落的出现。图 5 给出了多模型系统的工作原理。

```

如果  $\Delta e(k) < M1$ 
    切换到控制器 1
否则
    如果  $\Delta e(k) < M2$ 
        切换到控制器 2
    ...
    否则
        切换到控制器  $n$ 
结束
  
```

其中 $M1, M2, \dots$ 反映不同快衰落的门限。

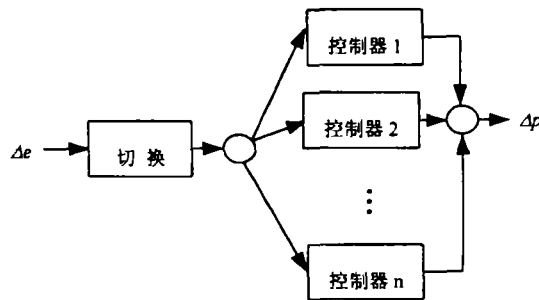


图 5 多模型功率控制系统的工作原理

5 仿真和试验结果分析

功率控制的目的在于平滑移动信道衰落的影响, 使基站接收到的小区中所有用户的信号功率相等。本文比较了 MNNPC 和固定步长功率控制系统的性能, 通过计算跟踪误差和中断率来比较控制质量。

假设扩频带宽为 1.25MHz, 数据传输率为 8 kbit/s, 这将带来大约 22dB 的处理增益。反向链路所需的 E_b/N_0 (每比特信息能量 / 干扰谱密度) 是 7dB, 则所需的信扰比门限 SIR_{Th} 是 -15dB。载波频率为 900 MHz, 移动台运动速度为 50km/h (13.9m/s), 则多普勒频移 f_m 是 41.6Hz。采样频率为 800Hz, 则采样时间 T_s 为 1.25ms。

跟踪误差 E_t 常常被用作控制系统的性能指标, 它可以表示为 $E_t = E(\sum_{t=1}^{150} e^2(t))$, 其中 E 是期望函数, $e(t)$ 是在采样时间 tT_s 的功率控制误差。图 6 给出了在时间间隔 $150T_s$ 内, MNNPC 和 1dB 功率控制系统的波形对比。明显可以看出 MNNPC 比 1dB 功率控制系统取得较小的稳态误差。仿真试验表明, MNNPC 的跟踪误差 E_t 是 5.67, 1dB 固定步长控制

器的跟踪误差 E_t 是 11.6。这表明 MNN 取得了更好的性能指标 E_t ，提高了功率控制的性能。

中断率常常用作系统容量的衡量标准，它可以通过计算接收信号的 SIR 低于 SIR_{Th} (-15dB) 的时间与总的时间的概率求得。图 7 给出了中断率与用户数的关系曲线。可以看出，随着用户数的增加，1dB 功率控制器和 MNNPC 的中断率都会增加，但是相同的用户数时，MNNPC 比 1dB 功率控制器取得较低的中断率，这意味着更高的系统容量和更好的通信质量。

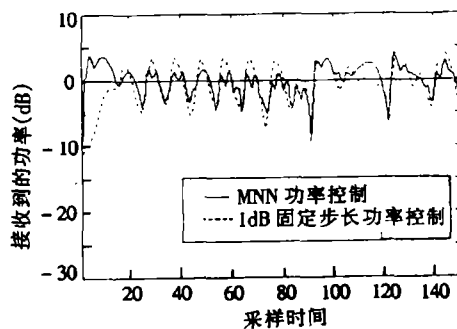


图 6 MNNPC 和 1dB 功率控制系统的波形对比

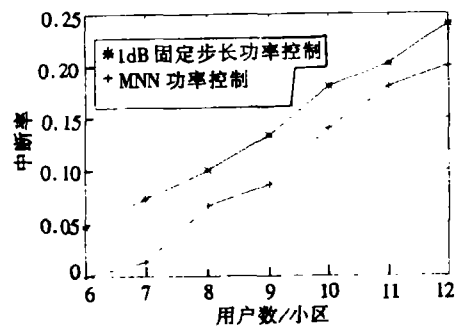


图 7 中断率与用户数的关系曲线对比

仿真结果表明，MNN 降低了跟踪误差 E_t 和中断率，平滑了功率控制的输出，取得较好的效果。这是因为 MNN 内在的识别反向信道时变特性的能力，较好地补偿了快衰落的影响。

6 小 结

因为 CDMA 是一个自干扰系统，反向链路功率控制对克服“远近效应”和增加系统容量是非常重要的。传统的固定步长的控制方法，存在控制精度与响应速度的矛盾。本文提出了一种基于神经网络的自适应闭环功率控制算法 (MNNPC)，该方法平滑了移动信道衰落的影响，使基站接收到的小区中的所有用户信号功率尽可能的相等。文中讨论了中间节点的数目对控制性能的影响，并考虑了闭环控制的时延。为了克服移动台运动速度的改变引起的移动信道的动态变化，本文提出了一种多模型的功率控制系统。仿真试验对跟踪误差 E_t 和中断率进行了对比分析，仿真结果表明，由于神经网络能够较好地识别反向链路的时变特性，MNNPC 比传统的固定步长功率控制方法取得了更好的控制性能和系统容量。

参 考 文 献

- [1] Savo Glisic, Branka Vucetic, Spread Spectrum CDMA Systems for Wireless Communications, Dedham, MA, Artech House, Inc., 1997, Ch.5, 211-262.
- [2] R. C. V. Macario, Cellular Radio Principles and Design, Great Britain, Antony Rowe Ltd, Second Edition, 1997, Ch2, 38-59.
- [3] Po-Pong Chang, Bor-chin Wang, Adaptive fuzzy power control for CDMA mobile systems, IEEE Trans. on Vehicular Technology, 1996, 45(2), 225-236.
- [4] Kaveh Pahlavan, A. H. Levesque, Wireless Information Networks, USA, John Wley & Sons Inc., 1995.

- [5] Y. P. Zhang, Y. Hwang, Measurements and Statistical Modeling of 900 MHz Radio Propagation Channels for Microcellular and Personal Communications in Tunnels, Wireless Personal Communications, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1998, 27-39.
- [6] W. C. Jakes(Ed.), Microwave Mobile Communications, New York, NY, Wiley, 1974.
- [7] X. M. Gao, X. Z. Gao, J. M. A. Trankanen, S. J. Ovaska, Power control for mobile DS/CDMA system using ELMAN neural network controller, in Proc. IEEE 47th Vehicular Technology Conference, Phoenix, Arizona, USA, 1997, 750-754.

ADAPTIVE CLOSE-LOOP POWER CONTROL ON THE REVERSE LINK FOR CDMA SYSTEM

Ge Ling Wu Xinyu

(Electronic Engineering Department of NUPT, Nanjing 210003)

Abstract Power control is of paramount important to combat the near-far problem and achieve high system capacity in CDMA cellular system. In this paper, a Modified Neural Network (MNN) based power controller is proposed to smoothen out the fast fading and keep the received signal power from each user constant at the base station. Simulation results show that MNN power controller achieves better control performance and system capacity than fixed-step controller due to the inherent ability of MNN to identify the fast time-varying characteristic of inverse channel.

Key words CDMA, Power control, Near-far problem, Multipath fading, Outage probability

戈 玲: 女, 1973 年生, 硕士, 现在广东移动通信有限责任公司深圳公司工作, 主要研究方向是移动通信, 网络技术, 智能通信技术.

吴新余: 男, 1939 年生, 教授, IEEE 高级会员, 现在主要研究方向是神经网络, 遗传算法, 模糊逻辑等在计算机和通信中的应用.