一个新的分散定步长功率控制算法

蔡 敏①② 王 伟①
①(大连理工大学信息与控制研究中心 大连 116023)
②(大连交通大学信息与计算科学教研室 大连 116028)

摘 要 功率控制是 CDMA 蜂窝移动通信系统的关键技术之一。该文考虑 CDMA 蜂窝移动系统，在假设系统信道增益时变、有界的情形下，把一个时变系统功率控制问题转化为具有确定信道增益功率控制问题。提出了一个分散定步长反馈调节功率控制算法，并证明了算法的收敛性。仿真结果表明算法是可行的。

关键词 无线通信，功率控制，信道增益，噪声，蜂窝系统
中图分类号: TN914.53 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2006)08-1382-04

A New Distributed Fixed-Step Power Control Algorithm

Cai Min①② Wang Wei①
①(*Research Center of Information and Control*, *Dalian University of Technology*, *Dalian* 116023, *China*)
②(*Dept. of Basic Science and Engineering*, *Dalian Jiaotong University*, *Dalian* 116028, *China*)

Abstract Power control is one of the key technologies for CDMA cellular mobile systems. In this paper, a distributed fixed-step power control algorithm is presented for CDMA cellular mobile systems. The power control problem of time-varying systems is converted to the power control problem with fixed-channel gain under the assumption that the system channel gain is time-varying and bounded. Convergence of the algorithm proposed in this paper is proved. Some simulations are given to show the effecicency of the algorithm.

Key words Wireless communication, Power control, Channel gain, Noise, Cellular system

1 引言

功率是无线通信系统一个重要和有限的资源。在保证服务质量的同时，使用户传输功率最小的功率控制算法已得到广泛研究。关于这类功率控制问题早期工作均归结为一个约束优化问题[1-3]。这些算法均为集中算法，要求系统全局参数(所有用户相对于匹配基站的增益等)已知。当系统容量增加时，这些算法的计算复杂性也在增加。基于上述原因，仅需局部链路增益和信干比(SIR)估计的分散功率控制算法被提出[4, 5]。对窄带蜂窝系统Zander[2]提出了使中断概率最小的最佳功率控制算法，将功率控制问题转化为求一个不可约矩阵特征值及相应特征向量问题，但此算法在寻求最佳中断移动台集合时运算量较大。为了降低运算复杂度，Wu[6]对一类大的、有限CDMA蜂窝移动系统提出了单步最佳删除算法(SORA)。此算法虽然大大降低了运算复杂度，但也是一个集中算法，仍需系统链路增益阵精确已知，因此上述算法很难应用于实际。本文考虑了链路增益的时变特性，在假设链路增益是时变、有界情形下，对一个大的、有限CDMA蜂窝移动系统提出了一个分散定步长功率控制算法。该算法是一个反馈调节算法，不需要链路增益精确知识。

2 系统模型

假设 CDMA 蜂窝系统有 N 个小区，Q 个激活移动用户，对每一个用户系统均匹配一对正交信道—上行链路(用户 $\to$ 基站)和下行链路(基站 $\to$ 用户)。由于上行链路与下行链路之间没有干扰，本文仅考虑上行链路功率控制问题，相应结果很容易被应用到下行链路情形。

在 t 时刻由第 k 个小区内第 m 个用户到第 q 个小区所属基站链路增益为 $G_{kmq}(t)$ 。利用文献[6]方法，定义映射：$(k,m)\to i\ (1\le i\le Q)$ 。其中

$$i=\sum_{n=1}^{k}L_{n-1}+m,\quad 1\le m\le L_k \tag{1}$$

这里 $L_0=0,\ L_n(n=1,\ 2,\cdots,N)$ 是小区 n 内移动用户数。

这样，第 k 个小区中第 i 个用户上行链路信干比可以简化为

$$\varGamma_i\left(\boldsymbol{p}^{(t)}\right)=\frac{G_{ik}(t)p_i^{(t)}}{\sum_{j\ne i}^{Q}G_{jk}(t)p_j^{(t)}+\eta_i^0} \tag{2}$$

其中 $p_i^{(t)}$ 是第 k 个小区中第 i 个用户在 t 时刻上行链路传输功率，η_i^0 是系统热噪声。

用 $G_{ik}(t)$ 除式(2)左边有

$$\varGamma_i\left(\boldsymbol{p}^{(t)}\right)=\frac{p_i^{(t)}}{\sum_{j\ne i}^{Q}W_{ij}^{(t)}p_j^{(t)}+\eta_i^{(t)}} \tag{3}$$

$$W_{ij}^{(t)}=\begin{cases}\dfrac{G_{jk}(t)}{G_{ik}(t)}, & i\ne j\\ 0, & i=j\end{cases};\qquad \eta_i^{(t)}=\frac{\eta_i^0}{G_{ik}(t)} \tag{4}$$

值得注意的是式(3)中 k 不是独立的，而是被 i 由式(1)中映射

2005-01-10 收到, 2005-07-18 改回
辽宁省高等学校学科拔尖人才资金(2003-54)和国家重大基础研究与发展规划项目(2002CB312200) 资助课题

唯一决定，$W_{ij}^{(t)}$ 是 t 时刻移动用户 j 到移动用户 i 所属基站归一化链路增益。因此，归一化上行链路增益矩阵 $\boldsymbol{W}^{(t)}=\left\{W_{ij}^{(t)}\right\}_{Q\times Q}$。此矩阵描述了系统在 t 时刻各用户与各基站之间链路增益，虽然各用户与各基站之间链路增益和系统热噪声是时变的，但由于受地理环境与物理环境限制，可以假定时变链路增益和系统热噪声在一个确定范围内变化。所以本文作如下假设：

假设 1

$$0\le \tilde{W}_{ij}\le W_{ij}^{(t)}\le \hat{W}_{ij},\quad 0\le \tilde{\eta}_i\le \eta_i^{(t)}\le \hat{\eta}_i \tag{5}$$

其中 $\hat{W}_{ij}$, $\tilde{W}_{ij}$ 是 $W_{ij}^{(t)}$ 上、下界；$\hat{\eta}_i$，$\tilde{\eta}_i$ 是 $\eta_i^{(t)}$ 上、下界。从而

$$\frac{p_i^{(t)}}{\sum\limits_{j\ne i}^{Q}\hat{W}_{ij}p_j^{(t)}+\hat{\eta}_i}\le \frac{p_i^{(t)}}{\sum\limits_{j\ne i}^{Q}W_{ij}^{(t)}p_j^{(t)}+\eta_i^{(t)}}\le \frac{p_i^{(t)}}{\sum\limits_{j\ne i}^{Q}\tilde{W}_{ij}p_j^{(t)}+\tilde{\eta}_i} \tag{6}$$

定义

$$\alpha_{ij}=\frac{\hat{W}_{ij}}{\tilde{W}_{ij}},\qquad \alpha_i=\max{}_j\left\{\alpha_{ij},\frac{\hat{\eta}_i}{\tilde{\eta}_i}\right\} \tag{7}$$

则 α_{ij}，α_i 均为常值，且有 $1\le\alpha_{ij}\le\alpha_i$。

3　定步长功率控制算法

3.1　功率控制算法

对于上节描述的蜂窝移动通信系统，我们定义新功率控制算法如下：每个移动单元 i 在 $t+1$ 时刻按如下规则调节传输功率

$$p_i^{(t+1)}=\begin{cases}\delta^{-\varepsilon}p_i^{(t)}, & \Gamma_i^{(t)}>\delta^{\varepsilon}\ r_i\\ \delta^{\varepsilon}\ p_i^{(t)}, & \Gamma_i^{(t)}<\delta^{-\varepsilon}\alpha_i^{-1}r_i\\ p_i^{(t)}, & \text{其它}\end{cases} \tag{8}$$

其中 $\delta>1$, ε 为步长调节参数($0<\varepsilon\le 1$)，α_i 由式(8)定义。

对于上述算法，每个移动单元信干比目标域为 $\left[\delta^{-\varepsilon}\alpha_i^{-1}r_i,\ \delta^{\varepsilon}r_i\right]$。如果用户 i 信干比处于此目标域之下，基站将告知移动用户提高自身功率标准。如果用户 i 信干比处于此目标域之上，基站将告知移动用户降低自身功率标准。目标域完全由信干比目标值、功率调节步长和增益上下界确定。由于考虑了链路增益的时变性质，提出算法更接近实际。为了给出算法收敛性，需要如下假设和引理。

假设 2　系统是上界可行的，即存在非负功率向量

$$\boldsymbol{p}^*=\left\{p_1^*,\ p_2^*\cdots\ p_Q^*\right\}^{\mathrm{T}},\ p_i^*>0,\ i=1,\ 2,\cdots,Q$$

使得

$$\frac{p_i^*}{\sum\limits_{j\ne i}^{Q}\tilde{W}_{ij}p_j^*+\tilde{\eta}_i}=r_i,\quad i=1,\ 2,\cdots,Q \tag{9}$$

引理 1　如果对每一个用户 i，存在一个功率向量 $\boldsymbol{p}^*$ 满足式(9)，则存在一个可以量化的功率向量 $\tilde{\boldsymbol{p}}=\left\{\tilde{p}_1,\tilde{p}_2,\cdots,\tilde{p}_Q\right\}$ 满足：

$$\delta^{-\varepsilon}\alpha_i^{-1}r_i\le\Gamma_i(\tilde{\boldsymbol{p}})\le\delta^{\varepsilon}r_i,\quad i=1,\ 2,\cdots,Q \tag{10}$$

证明　对于满足等式(9)的 $\boldsymbol{p}^*=\left\{p_1^*,\ p_2^*\ \cdots\ p_Q^*\right\}^{\mathrm{T}}$，利用算法式(8)，在某一时刻 $t>0$，总存在唯一离散的功率标准 $\tilde{p}_i$ $(i=1,2,\cdots,Q)$ 满足

$$\delta^{-\varepsilon/2}p_i^*\le\tilde{p}_i<\delta^{\varepsilon/2}p_i^*,\quad i=1,\ 2,\cdots,Q \tag{11}$$

则

$$\Gamma_i(\tilde{\boldsymbol{p}})\le\frac{\tilde{p}_i}{\sum\limits_{j\ne i}^{Q}\tilde{W}_{ij}\tilde{p}_j+\tilde{\eta}_i}\le\frac{p_i^*\delta^{\varepsilon/2}}{\sum\limits_{j\ne i}^{Q}\tilde{W}_{ij}p_j^*\delta^{-\varepsilon/2}+\tilde{\eta}_i}\le\delta^{\varepsilon}r_i \tag{12}$$

另一方面

$$\Gamma_i(\tilde{\boldsymbol{p}})\ge\frac{\delta^{-\varepsilon/2}p_i^*}{\sum\limits_{j\ne i}^{Q}\hat{W}_{ij}p_j^*\delta^{\varepsilon/2}+\hat{\eta}_i}\ \ge\delta^{-\varepsilon}\frac{p_i^*}{\sum\limits_{j\ne i}^{Q}\hat{W}_{ij}p_j^*+\hat{\eta}_i} \tag{13}$$

利用式(7)得

$$\hat{W}_{ij}=\tilde{W}_{ij}\alpha_{ij}\le\tilde{W}_{ij}\alpha_i,\quad \hat{\eta}_i\le\tilde{\eta}_i\alpha_i \tag{14}$$

所以

$$\Gamma_i(\tilde{\boldsymbol{p}})\ge\delta^{-\varepsilon}\alpha^{-1}\frac{p_i^*}{\sum\limits_{j\ne i}^{Q}\tilde{W}_{ij}p_j^*+\tilde{\eta}_i}=\delta^{-\varepsilon}\alpha_i^{-1}r_i \tag{15}$$

由式(12)和式(15)得：$\delta^{-\varepsilon}\alpha_i^{-1}r_i\le\Gamma_i(\tilde{\boldsymbol{p}})\le\delta^{\varepsilon}\ r_i,\ i=1,2,\cdots,Q$。

3.2　算法的收敛性证明

在本小节将讨论算法式(8)的收敛性，首先证明每一用户功率标准有上下界，然后证明其不是振荡周期的。说明功率状态序列 $\left\{\boldsymbol{p}^{(t)}\right\}$ 一定收敛到一固定点。

定理 1　如果假设 2 成立，则功率向量 $\boldsymbol{p}^{(t)}$ 一定有一个仅依赖于增益阵和初始功率向量的上下界。

证明　令 $\boldsymbol{p}^{(0)}=\left\{p_1^{(0)},p_2^{(0)},\cdots,p_Q^{(0)}\right\}$ 是初始功率向量，满足

$$p_i^{(0)}=\tilde{p}_i\delta^{k_i(0)\varepsilon},\quad i=1,\ 2,\cdots,Q \tag{16}$$

其中 $k_i(0)$ 是整数。

一般地，定义 $k_i(t)$ 满足

$$p_i^{(t)}=\tilde{p}_i\delta^{k_i(t)\varepsilon},\quad i=1,\ 2,\cdots,Q \tag{17}$$

由于 $k_i(t)$ 是整数，从而 $\left|k_i(t+1)-k_i(t)\right|\le 1$。令

$$K(t)=\max{}_i\left\{k_i(t),\ 0\right\} \tag{18}$$

下面分两种情形讨论：

情形 1　对移动用户 i，如果 $k_i(t)=K(t)$，利用式(19)有

$$\Gamma_i\left(\boldsymbol{p}^{(t)}\right)=\frac{p_i^{(t)}}{\sum\limits_{j\ne i}^{Q}W_{ij}^{(t)}p_j^{(t)}+\eta_i^{(t)}}=\frac{\tilde{p}_i\delta^{K(t)\varepsilon}}{\sum\limits_{j\ne i}^{Q}W_{ij}^{(t)}\tilde{p}_j\delta^{K(t)\varepsilon}+\eta_i^{(t)}}\ge\delta^{-\varepsilon}\alpha_i^{-1}r_i \tag{19}$$

由算法式(8)可知，用户 i 在第 $t+1$ 时刻功率将不增加，即 $k_i(t+1)\le k_i(t)=K(t)$。

情形 2　对移动用户 i，如果 $k_i(t)<K(t)$，则有

$$k_i(t+1)\le k_i(t)+1\le K(t) \tag{20}$$

显然，$K(t+1)=\max{}_i\left\{k_i(t+1),\ 0\right\}\le K(t)$，所以有

$$p_i^{(t)}=\tilde{p}_i\delta^{k_i(t)\varepsilon}\le\tilde{p}_i\delta^{K(0)\varepsilon} \tag{21}$$

说明功率向量 $\boldsymbol{p}^{(t)}$ 有上界。 证毕

类似地，若令 $K(t)=\min_i\{k_i(t),\ 0\}$，可以证明功率向量 $\boldsymbol{p}^{(t)}$ 有下界。

定理 1 表明功率向量 $p^{(t)}$ 的数量是有限的。如果功率状态序列 $\{\boldsymbol{p}^{(t)}\}$ 不收敛，一定是渐进周期的。即存在 $T_0>0$ 和 $T>1$，当 $t>T_0$，有

$$\boldsymbol{p}^{(t)}=\boldsymbol{p}^{(t+T)} \tag{22}$$

引理 2 如果 $p_j^{(m)}\ge\delta^x p_j^{(n)}$，$\varGamma_j\left(\boldsymbol{p}^{(r)}\right)<\delta^{-\varepsilon}\alpha_j^{-1}r_j$，其中 $r<m<n$，$x\ge\varepsilon$，则存在 $k\ne j$ 满足 $p_k^{(s)}\ge\delta^{x+\varepsilon}p_k^{(l)}$，其中 $r\le s<m\le l<n$。

证明 如果 $p_j^{(r)}<\delta^{-\varepsilon}p_j^{(m)}$，由于 $\varGamma_j\left(\boldsymbol{p}^{(r)}\right)<\delta^{-\varepsilon}\alpha_j^{-1}r_j$，根据算法式(8)，功率将增加。一定存在 $s\ (r<s<m)$ 使得

$$p_j^{(s)}=\delta^{-\varepsilon}p_j^{(m)},\quad \varGamma_j\left(\boldsymbol{p}^{(s)}\right)<\delta^{-\varepsilon}\alpha_j^{-1}r_j \tag{23}$$

如果 $p_j^{(r)}\ge\delta^{-\varepsilon}p_j^{(m)}$，取 $s=r$。所以总有 $s\ge r$ 使得

$$p_j^{(s)}\ge\delta^{-\varepsilon}p_j^{(m)} \tag{24}$$

因为 $p_j^{(m)}\ge\delta^x p_j^{(n)}$，一定存在 $l\ (m\le l<n)$ 满足：$p_j^{(l)}=\delta^{\varepsilon}p_j^{(n)}$，$\varGamma_j\left(\boldsymbol{p}^{(l)}\right)>\delta^{\varepsilon}\ r_j$ 所以

$$p_j^{(s)}\ge\delta^{-\varepsilon}p_j^{(m)}\ge\delta^{x-\varepsilon}p_j^{(n)}=\delta^{x-2\varepsilon}p_j^{(l)} \tag{25}$$

令

$$I_j\left(\boldsymbol{p}^{(t)}\right)=\sum_{k\ne j}^{Q}W_{jk}^{(t)}p_k^{(t)}+\eta_j^{(t)} \tag{26}$$

注意 $\varGamma_j\left(\boldsymbol{p}^{(s)}\right)<\delta^{-\varepsilon}\alpha_j^{-1}r_j$，$\varGamma_j\left(\boldsymbol{p}^{(l)}\right)>\delta^{\varepsilon}\ r_j$，并利用式(23)得

$$\delta^{\varepsilon}\ r_j<\frac{p_j^{(l)}}{I_j\left(\boldsymbol{p}^{(l)}\right)}\le\frac{p_j^{(s)}}{I_j\left(\boldsymbol{p}^{(l)}\right)\delta^{x-2\varepsilon}}<\frac{I_j\left(\boldsymbol{p}^{(s)}\right)\alpha_j^{-1}r_j\delta^{\varepsilon}}{I_j\left(\boldsymbol{p}^{(l)}\right)\delta^{x}} \tag{27}$$

则

$$\delta^x I_j\left(\boldsymbol{p}^{(l)}\right)<\alpha_j^{-1}\left(\sum_{k\ne j}^{Q}W_{jk}^{(s)}p_j^{(s)}+\eta_j^{(s)}\right)\le\sum_{k\ne j}^{Q}\alpha_j^{-1}\hat{W}_{jk}p_j^{(s)}+\alpha_j^{-1}\hat{\eta}_j \tag{28}$$

由式(7)得

$$\delta^x I_j\left(\boldsymbol{p}^{(l)}\right)=\delta^x\left(\sum_{j\ne k}^{Q}W_{jk}^{(l)}p_j^{(l)}+\eta_j^{(l)}\right)\ge\sum_{j\ne k}^{Q}\alpha_j^{-1}\hat{W}_{jk}\delta^x p_j^{(l)}+\alpha_j^{-1}\tilde{\eta}_j \tag{29}$$

由式(28)和式(29)得

$$\sum_{k\ne j}^{Q}\alpha_j^{-1}\hat{W}_{jk}\delta^x p_j^{(l)}+\alpha_j^{-1}\hat{\eta}_j\le\delta^x I_j\left(\boldsymbol{p}^{(l)}\right)<\sum_{k\ne j}^{Q}\alpha_j^{-1}\hat{W}_{jk}p_j^{(s)}+\alpha_j^{-1}\hat{\eta}_j \tag{30}$$

所以，一定存在 k 使得

$$p_k^{(s)}>\delta^x p_k^{(l)} \tag{31}$$

从而

$$p_k^{(s)}\ge\delta^{x+\varepsilon}p_k^{(l)} \tag{32}$$

证毕

定理 2 如果算法式(8)不收敛，功率向量序列一定不是渐进周期的。

证明 假设功率向量序列是渐进周期的，周期为 $T(T>1)$，则一定存在充分大 T_0，当 $t>T_0$ 时有 $\boldsymbol{p}^{(t)}=\boldsymbol{p}^{(t+T)}$。如果算法式(8)不收敛，则一定存在移动用户 i，使得 $p_i^{(m)}=\delta^{\varepsilon}p_i^{(t)}\ (t-m<T,\ m<t)$，从而 $p_i^{(m)}=\delta^{\varepsilon}p_i^{(t-T)}$。利用算法式(8)，一定存在 r 使得 $\varGamma_i\left(\boldsymbol{p}^{(r)}\right)<\delta^{-\varepsilon}\alpha_i^{-1}r_i$ $(t-T\le r<m)$。

由引理 2 可知存在一个用户 $j\ne i$ 使得 $p_j^{(s)}=\delta^{x+\varepsilon}p_j^{(l)}$ $(r\le s<m\le l<t,\ \ l-s<T)$。因此，对任意的实数 $x\ge\varepsilon$，存在一个用户 k 使得 $p_k^{(p)}=\delta^x p_k^{(q)}\ (q>p,\ q-p<T)$。由于算法中每一步迭代时功率标准的改变均为 δ 的 ε 整数倍次方，并且以 T 为上界，与 x 的任意性矛盾。所以以功率向量序列 $\{\boldsymbol{p}^{(t)}\}$ 一定不是渐进周期的， 证毕

利用定理 1 和定理 2 显然有定理 3。

定理 3 对于给定的时变系统式(3)和式(4)，如果假设 1 和假设 2 满足，则由算法式(8)定义的功率序列一定收敛于满足条件式(9)的固定点。

4 仿真实例

考虑一个具有 25 个基站、100 个用户的多小区 CDMA 蜂窝系统。每个基站位于小区中央，每个小区内均有一个移动台(用户)与最近的基站进行通信，移动台均匀分布于小区内。

在仿真过程中，仅考虑阴影衰减，忽略多径衰减，离散时变链路增益可表示为如下形式：

$$G_{ij}^{(t)}=\frac{10^{-A_{ij}^{(t)}/10}}{d_{ij}^{\alpha}} \tag{33}$$

其中 $A_{ij}^{(t)}$ 是均值为零、标准差为 σ 的高斯随机变量。d_{ij} 是第 i 个基站到第 j 个移动台的距离并假设为常数，α 是路径衰减指数。利用文献[7]中结论，$A_{ij}^{(t)}$ 能够被建模为如下的马尔可夫过程

$$A_{ij}^{(t+1)}=\rho A_{ij}^{(t)}+\sqrt{1-\rho^2}W^{(t)} \tag{34}$$

其中 ρ 为相关系数，$W^{(t)}$ 是一个服从正态分布的随机变量，而且均值为零、方差为 σ^2。

主要仿真参数选取如下：相关系数 $\rho=0.5$，系统热噪声 $\eta=10^{-13}\mathrm{W}$，信干比目标值 $r=7\mathrm{dB}$，路径衰减指数 $\alpha=4$，方差 $\sigma=1\mathrm{dB}$，步长 $\delta=1\mathrm{dB}$。图 1 给出了初始功率 $p_0=0\mathrm{dB}$、步长调节参数 $\varepsilon=0.4$ 时所有用户最大、最小信干比。

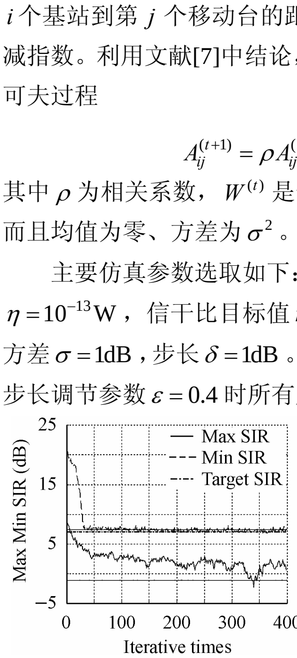

图 1 所有用户最大、最小信干比

Fig.1 The Max. Min SIR of all the users

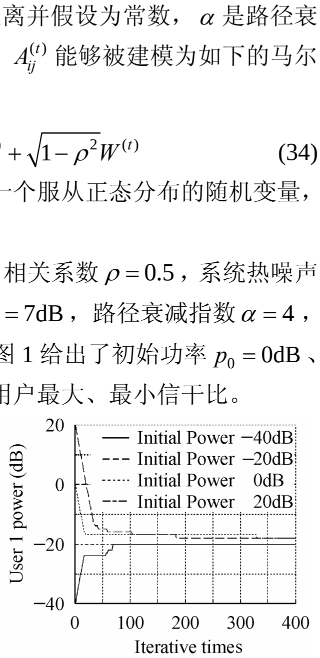

图 2 用户 1 功率收敛性 (ε=0.4)

Fig. 2 The power convergence of user 1(ε=0.4)

从上图中可以看出，对于不同初始功率值，所有用户信干比均位于确定的目标域之内，符合本文算法的结论。

图 2 给出了用户 1 在取不同初始值的情况下传输功率的收敛情况。可以看到，虽然初始功率不同，但对于不同用户的传输功率均收敛于固定点。

5　结束语

本文对一个大的有限 CDMA 蜂窝移动通信系统提出了一个新的分散定步长反馈调节功率控制算法。在假设时变链路增益具有上下界情形下，证明了文中提出算法的收敛性。本算法表明如果用户 i 信干比处于此目标域之下，基站将告知移动用户提高自身功率到下一个更高标准。如果用户 i 信干比处于此目标域之上，基站将告知移动用户降低自身功率到下一个更低标准。目标域完全由信干比目标值、功率调节步长和增益变化量确定。由于考虑了链路增益时变特性，本文算法更加接近实际。仿真结果表明算法是可行的。

参 考 文 献

[1] Grandhi S, Vijayan R, Goodman D, Zander J. Centralized power control in cellular systems. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 1993, 42(4): 466−468.

[2] Zander J. Performance of optimum transmitter power control in cellular radio systems. *IEEE Trans. Vehicular. Technology*, 1992, 41(1): 57−62.

[3] O'Neill D, Chiang D, Julian D, Boyd S. Optimal resource allocation with Q.S constraints in wireless cellular and Ad hoc networks, Working Paper, EE. Dept., Stanford University, 2002.

[4] Foschini G, Miljanic Z. A simple distributed autonomous power control algorithm and its convergence. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 1993, 42(4): 641−646.

[5] Chen S, Bambos N, Ppttie G. On distributed power control for radio networks, IEEE ICC94, Pittsburgh, USA, 1994: 1281−1285.

[6] Wu Qiang. Performance of optimum transmitter power control in CDMA cellular mobile systems. *IEEE Trans. on Vehicular. Technology*, 1999, 48(2): 559−575.

[7] Gudmundson M. Correlation model for shadow fading in a mobile radio systems. *Elec. Letters*, 1991, 27(23): 2145−2146.

蔡　敏：　男，1964 年生，在职博士生，研究方向为无线通信功率控制、网络控制.

王　伟：　男，1955 年生，教授，博士生导师，研究方向为网络控制、流程工业过程控制等.