

文章编号:1001-9081(2011)02-0313-04

doi:10.3724/SP.J.1087.2011.00313

## TD-SCDMA 集群系统中的联合功率控制

周 围,舒 鹏

(重庆邮电大学 移动通信重点实验室,重庆 400065)

(zhouwei1020@263.net; pengshu2008@126.com)

**摘要:** TD-SCDMA 集群系统中存在各种干扰,传统的功率控制算法无法消除来自集群群组间的用户干扰。采用了先用波束赋形进行主波瓣外干扰抑制,然后进行多群组联合检测来消除波瓣内群组间干扰,再联合功率控制的两步迭代算法来进一步消除集群中的干扰,从而降低了系统对功控的要求,提高了性能。仿真结果证明,该算法能有效降低系统发射功率和抑制干扰。

**关键词:** 码分多址;集群;功率控制;多用户检测;波束赋形

中图分类号: TN929.5 文献标志码:A

### Joint power control for trunking communication system in TD-SCDMA network

ZHOU Wei, SHU Peng

(Key Laboratory of Mobile Communication, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** The trunking systems based on TD-SCDMA network are limited by the interference that users create to each other. Conventional power control algorithm cannot eliminate adjacent group interference. The beamforming was used to suppress the interference outside the main lobe, the joint detection of multiple groups was conducted to remove both intra-group and inter-group Multiple Access Interference (MAI) in the lobe for the uplink receiver, then the two-step iterative power control algorithms were combined with joint detection to eliminate effectively the interference in the system, thus reducing system requirements on power control and improving the performance. The simulation results validate that the algorithm can effectively reduce the system transmission power and to suppress the interference.

**Key words:** Code Division Multiple Access (CDMA); trunking; power control; multiple user detection; beamforming

## 0 引言

分时码分多址(Time Division Code Division Multiple Access, TD-SCDMA)系统开展PTT(Push To Talk)业务,由于TD-SCDMA具备的上下行不对称时隙分配能力,可根据业务量分配上下行资源,这对半双工通信的集群系统非常有用<sup>[1]</sup>。

采用了CDMA技术的TD-SCDMA集群系统是自干扰系统,存在着多址干扰、边缘效应、远近效应和阴影效应。目前提高系统性能服务质量(Quality of Service, QoS)和容量的主要技术手段有功率控制(Power Control, PC)技术、多用户检测<sup>[2]</sup>(Multiple User Detection, MUD)技术和智能天线<sup>[2]</sup>

(Smart Antenna, SA)技术。

传统的单小区空时联合处理方法中通常将邻小区用户强干扰作为白噪声来处理,由于TD-SCDMA集群采用分时隙的物理层结构并且由于其信道占用方式的特殊性,群组内同频段、同时隙的用户数较少,要特别考虑群组间的强干扰。

本文依据用户的波束赋形增益和PN码相关性信息,首先用智能天线进行波束主瓣外的多用户干扰抑制;然后将主波瓣内的本群组和邻群组强干扰用户同时纳入空时联合处理系统矩阵进行处理,滤除本群组和邻群组多用户干扰;然后再联合检测和功率控制相结合进行迭代更新,可以降低发射功率,进一步提高系统性能。

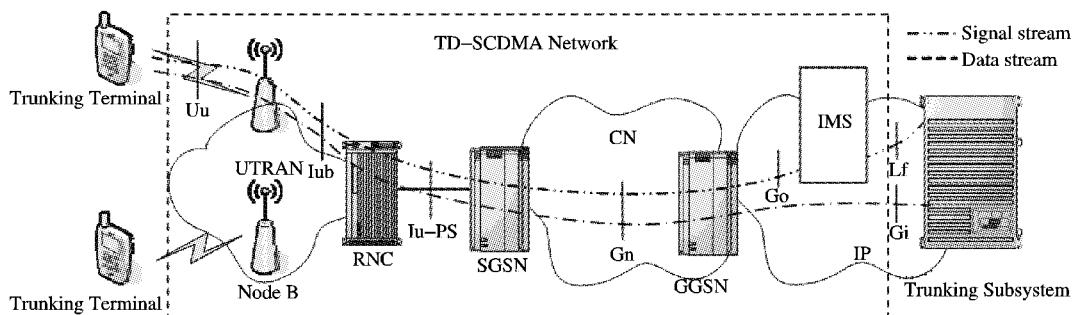


图1 基于TD-SCDMA标准的集群通信系统构架

收稿日期:2010-07-26;修回日期:2010-10-06。基金项目:国家863计划项目(2009AA011302);重庆市教委科研项目(KJ090513)。

作者简介:周围(1971-)男,重庆人,教授,博士,主要研究方向:无线移动通信系统、智能天线、空时二维处理; 舒鹏(1984-)男,湖北荆门人,硕士研究生,主要研究方向:数字移动通信、干扰抑制及信号处理。

## 1 智能天线的空域滤波

考虑到对所有的强干扰用户进行多用户检测需要较大的计算量及算法的复杂性, 波束赋形对期望用户具有较高的增益, 在其他方向的增益较小, 可以消减指定用户主瓣波束之外的多用户干扰, 在波束赋形之后再对波束主瓣内的干扰采用联合检测的方法进行处理。

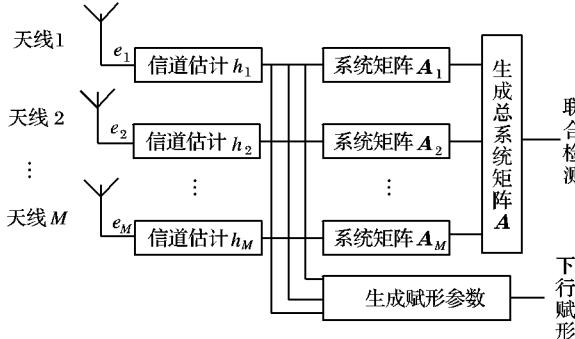


图 2 智能天线和联合检测相结合框图

智能天线以上均匀直线阵列为例<sup>[2]</sup>, 取第 1 个阵元为参考阵元。由移动用户发射到基站的上行链路, 第  $i$  个阵元的输出表示为离散向量形式为:

$$\mathbf{x}(n) = \mathbf{As}(n) + \mathbf{n}(n)$$

其中:

$$\mathbf{x}(n) = [x_1(n), \dots, x_M(n)]^T$$

$$\mathbf{s}(n) = [s_1(n), \dots, s_N(n)]^T$$

$$\mathbf{n}(n) = [n_1(n), \dots, n_M(n)]^T$$

$$\mathbf{A} = [a(\theta_1), \dots, a(\theta_N)]$$

$\mathbf{a}(\theta_i)$  是第  $i$  个信号的导引向量,  $\mathbf{a}(\theta_i) = [1, \exp(j\varphi), \dots, \exp[j(M-1)\varphi]]^T$ ,  $\varphi = \frac{2\pi d \sin(\theta_i)}{\lambda}$ 。

线性空域滤波器的输出信号为:

$$\mathbf{y}(n) = \mathbf{w}^H \mathbf{x}(n)$$

其中:  $\mathbf{w} = [w_1, w_2, \dots, w_M]^T$  是波束形成器的权向量;  $H$  表示共轭转置。则对应的幅度波束图为:

$$F(\theta) = |\mathbf{w}^H \mathbf{a}(\theta)| = \left| \sum_{m=1}^M \exp(j(m-1)(\varphi - \varphi_0)) \right| = \left| \frac{\sin\left[\left(\frac{M\pi d}{\lambda}\right)(\sin \theta - \sin \theta_0)\right]}{\sin\left[\left(\frac{\pi d}{\lambda}\right)(\sin \theta - \sin \theta_0)\right]} \right|$$

即波束会在  $\theta = \theta_0$  时取得最大值, 并且通过改变  $\theta_0$  的值可以改变波束的指向<sup>[2-4]</sup>。

波束赋形的目的是调节权矢量使输出端可以达到最大的信噪比。这可以通过在波束赋形输出端减小总的干扰同时保持期望用户信号增益来达到, 优化权矢量可以通过算法最陡下降优化的自适应迭代算法(如最小均方误差算法)来达到<sup>[2]</sup>:

$$\mathbf{y}(n) = \mathbf{w}^H(n) \mathbf{x}(n);$$

$$\mathbf{e}(n) = \mathbf{d}(n) - \mathbf{y}(n);$$

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \boldsymbol{\mu}(n) \mathbf{x}(n) \mathbf{e}^*(n)$$

其中  $\mathbf{d}(n)$  为训练序列或导频序列。

## 2 时域中基于信道估计的多群组联合检测

在 TD-SCDMA 系统中, 所使用的联合检测 (Joint Detection, JD) 算法就是一种线性算法。其物理意义是根据接收机接收到的总信号向量  $\mathbf{r}$  与系统矩阵  $\mathbf{A}$  估计出用户发送的数据向量  $\mathbf{d}$ , 其中  $\mathbf{A}$  由多个用户的扩频码以及信道冲激响应决定, 其目的是同时消除多址干扰 (Multiple Access Interference, MAI) 和码间干扰 (Inter-Symbol Interference, ISI), 从而消除干扰, 降低系统误码率。

### 2.1 多群组联合检测

由于同一个群组不同的用户的 midamble 码是由某个基本的 midamble 序列  $M_p$  循环移位得到的, 因此, 天线  $m$  上信道冲激响应估计值为:

$$\hat{\mathbf{h}}_0^{(m)} = IDFT(A_0^{-1} \cdot DFT(e_{mid}^{(m)}))$$

其中:  $e_{mid}^{(m)}$  为天线  $m$  所接收到的 midamble 序列, 长度为  $L$ ;  $A_0$  为对角阵, 第  $l$  个对角元素  $\lambda_{0l}$  为基本 midamble 序列  $M_p$  经过离散傅里叶变换 (Discrete Fourier Transform, DFT) 后的第  $l$  个分量:  $\lambda_{0l} = (DFT(M_p))_l, l = 1, \dots, L$ 。

在多群组空时联合处理系统中, 对于邻群组强干扰用户进行信道估计时, 只要将 Steiner 估计器中的基本 midamble 序列变化成邻群组对应的基本 midamble 序列, 就能得到相应的信道冲激响应。

将本群组活动用户和邻群组强干扰用户的信道冲激响应  $\hat{\mathbf{h}}^{(K,m)}$  依次排列为:

$$\hat{\mathbf{h}}^{(K,m)} = [\hat{\mathbf{h}}^{(1,m)^T}, \dots, \hat{\mathbf{h}}^{(K_0,m)^T}, \dots, \hat{\mathbf{h}}^{(K_0+K_1,m)^T}]^T$$

其中:  $1, \dots, K_0$  为本群组接入用户的信道冲激响应;  $(K_0 + 1), \dots, (K_0 + K_1)$  为邻群组强干扰信道冲激响应。

考虑了扩频码的复合信道冲激响应:

$$\hat{\mathbf{b}}^{(K,m)} = (\hat{\mathbf{b}}_1^{(K,m)}, \hat{\mathbf{b}}_2^{(K,m)}, \dots, \hat{\mathbf{b}}_{Q+w-1}^{(K,m)})^T = \hat{\mathbf{h}}^{(K,m)} \times \hat{\mathbf{c}}^{(K)}$$

那么天线  $m$  的接收信号可表示为<sup>[5,8]</sup>:

$$\mathbf{e}^{(m)} = \sum_{k=1}^{K_0} \mathbf{A}^{(K,m)} \mathbf{d}^{(k)} + \sum_{k=K_0+1}^{K_0+K_1} \mathbf{A}^{(K,m)} \mathbf{d}^{(k)} + \mathbf{n}^{(m)}$$

其中:  $K_0$  为本群组接入用户 RU 数;  $K_1$  为邻小区强干扰用户 RU 数。

$$\mathbf{V}^m = [\hat{\mathbf{b}}^{(1,m)}, \dots, \hat{\mathbf{b}}^{(k_0,m)}, \hat{\mathbf{b}}^{(k_0+1,m)}, \dots, \hat{\mathbf{b}}^{(k_0+k_b,m)}]$$

$$\mathbf{A}^m = \begin{bmatrix} \mathbf{V}^m & & \\ & \mathbf{V}^m & \\ & & \ddots \\ & & & \mathbf{V}^m \end{bmatrix}$$

多群组空时联合处理的系统矩阵  $\mathbf{A}$  定义为:

$$\mathbf{A} = (\mathbf{A}^{(1)^T}, \mathbf{A}^{(2)^T}, \dots, \mathbf{A}^{(M)^T})^T$$

### 2.2 算法分析

$$\hat{\mathbf{d}}_{ZF-BLE} = \mathbf{d} + (\mathbf{A}^H \mathbf{R}_n^{-1} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H \mathbf{R}_n^{-1} \mathbf{n}$$

ZF-BLE 所得到的估计值中不含 MAI 和 ISI, 但这是以放大噪声为代价的。特别地, 当系统噪声为加性高斯白噪声 (Additive White Gauss Noise, AWGN) 时, 即  $\mathbf{R}_n = \sigma^2 \mathbf{I}$ , 此时由 ZF-BLE 所得到的检测数据为:

$$\hat{\mathbf{d}}_{\text{ZF-BLE}} = (\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H \mathbf{e} \quad (1)$$

由于 ZF-BLE 的缺点是会导致对噪声的放大。MMSE-BLE 方案以最小化二次型  $Q(\hat{\mathbf{d}}) = E[(\mathbf{d} - \hat{\mathbf{d}})^H (\mathbf{d} - \hat{\mathbf{d}})]$  为准则, 得到的检测数据为:

$$\hat{\mathbf{d}}_{\text{MMSE-BLE}} = (\mathbf{A}^H \mathbf{R}_n^{-1} \mathbf{A} + \mathbf{R}_d^{-1})^{-1} \mathbf{A}^H \mathbf{R}_n^{-1} \mathbf{e} \quad (2)$$

式(1)、(2)中,  $\hat{\mathbf{d}}^{(i)}$  是由本群组  $K_0$  个 RU 和邻群组  $K_1$  个 RU 的第  $i$  个数据组成的, 可表示为:

$$\hat{\mathbf{d}}^{(i)} = (\hat{d}^{(1)}, \dots, \hat{d}^{(K_0)}, \dots, \hat{d}^{(K_0+K_1)})^T \quad (3)$$

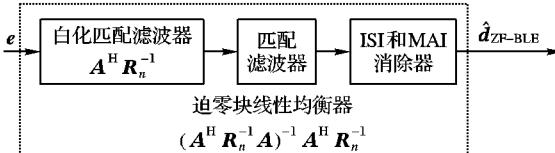


图3 ZF-BLE 结构框图

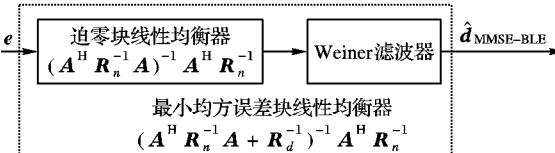


图4 MMSE-BLE 结构框图

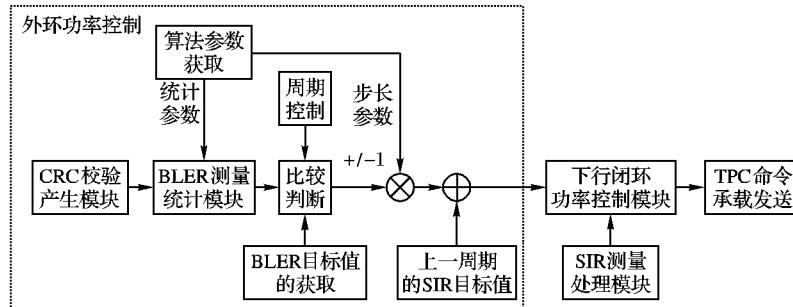


图5 外环功率控制过程(下行)

如果设  $p_j$  表示发射功率,  $b_j$  表示发射信息位,  $h_j$  表示用户  $j$  到基站  $i$  的上行链路增益,  $s_j(t)$  表示用户  $j$  的扩频码,  $\mathbf{n}$  表示信道噪声矢量,  $K$  表示用户数, 那么接收机的输入信号为:

$$r_i(t) = \sum_{j=1}^K \sqrt{P_j h_{ij}} b_j s_j(t) + \mathbf{n}$$

用  $c_i$  表示接收机的滤波器系数, 那么滤波器输出信号为:

$$y_i = \sum_{j=1}^K \sqrt{P_j h_{ij}} (c_i^T s_j) b_j(t) + \tilde{\mathbf{n}}_i$$

其中:  $\tilde{\mathbf{n}}_i = c_i^T \mathbf{n}$  为一高斯随机变量(AWGN), 均值为0, 方差为  $\sigma^2(c_i^T c_i)$ 。

那么用户  $i$  的信干比为:

$$SIR_i = \frac{p_i h_{ii} (c_i^T s_i)^2}{\sum_{j \neq i} p_j h_{ij} (c_i^T s_j)^2 + \sigma^2(c_i^T s_i)}$$

传统的单用户检测 CDMA 系统来说, 其接受检测器结构是恒定不变的  $c_i = s_i$ , 且具有归一化能量  $\int_0^{T_b} s_i^2(t) dt = 1$ , 系统只需要通过调整发射功率  $p_i$  来保证每个用户的  $SIR_i \geq r_i^*$  ( $r_i^*$  为目标信噪比), 此时的检测器相当于一个匹配滤波器, 这种检测器在只存在高斯白噪声时, 其性能是最佳的, 但由于 CDMA 系统中存在多址接入干扰, 此时这种检测器性能

与传统的单群组空时联合处理相比, 估测数据中增加了  $K_1$  个邻群组强干扰用户的数据。

式(2)可简化为:

$$\hat{\mathbf{d}}_{\text{MMSE-BLE}} = (\mathbf{A}^H \mathbf{A} + \sigma^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{A}^H \mathbf{e} \quad (4)$$

由上可看出算法的运算量主要集中在对  $(\mathbf{A}^H \mathbf{A} + \sigma^2 \mathbf{I})$  的求逆运算。仿真证明, 联合检测算法采用最小均方误差块线性均衡(Minimum Mean Square Error-Block Linear Equalization, MMSE-BLE)的方法性能较好<sup>[7]</sup>。

### 3 功率控制与联合检测相结合的算法

在采用了多用户检测器的CDMA系统中, 仍然需要功率控制技术来补偿信道衰落, 保证 QoS 要求并节省移动台功耗。目前, 功率控制可以分为集中或分布、同步或异步、迭代或非迭代, 以及发射功率受限或非受限等几类。这些功率控制方法都是基于距离的、基于信号强度的和基于信号干扰比(Signal-to-Interference Ratio, SIR)的, 其中基于 SIR 测量的功率控制算法可以达到比较好的系统性能故被广泛应用。如果将功率控制和多用户检测技术技术相结合, 可以降低多址干扰, 克服远近效应, 使系统性能得到很大的改善<sup>[7]</sup>。

两种方法的结合使用, 每次迭代过程既更新移动台发射功率同时也更新基站接收滤波器系数, 通过这两个参数的更新迭代来最大限度地抑制干扰。

就不是最佳的了。

对于基于联合检测的 CDMA 系统而言, 检测器结构  $c_i$  和发射功率  $p_i$  都是系统可以控制的资源, 只要找到最佳发射功率  $p_i$  以及检测器系数  $c_i$ , 使得在保证  $SIR_i \geq r_i^*$  的条件下, 用户的发射功率最小。由于基站的发射总功率是一定的, 此时系统容量就能达到最大值。

功率控制问题转化为数学模型<sup>[7]</sup>:

$$\begin{cases} \min \sum_{i=1}^N p_i \\ p_i \geq \frac{r_i^*}{h_{ii}} \left[ \frac{\sum_{j \neq i} p_j h_{ij} (c_i^T s_j)^2 + \sigma^2 (c_i^T c_i)}{(c_i^T s_i)^2} \right], i = 1, 2, \dots, N \\ p_i \geq 0 \\ c_i \in \mathbb{R}^G \end{cases}$$

算法的目标就是求解最优发射功率值和滤波器的系数, 该算法分为两个阶段。

1) 在当前的各用户的发射功率下, 寻找能够使得  $SIR_i$  最大的滤波器, 即能够最大限度地抑制干扰的滤波器, 根据最小均方差(Minimum Mean Square Error, MMSE)准则求出的系数如下:

$$c_i(n) = \frac{\sqrt{p_i(n)}}{1 + p_i(n)s_i^T A_i^{-1}(p(n))s_i} A_i^{-1}(p(n))s_i$$

其中:  $A_i(p(n)) = \sum_{j \neq i} p_j(n) h_{ij} s_j s_j^T + \sigma^2 I, i = 1, 2, \dots, K$ 。

2) 利用 1) 所得到的滤波器系数来调整下一次的发射功率, 在满足  $SIR_i \geq \gamma_i^*$  的条件下, 选择最小功率进行发射, 最后得到下一帧的发射功率为:

$$p_i(n+1) = \frac{\gamma_i^*}{h_{ii}} \frac{\sum_{j \neq i} p_j(n) h_{ij} (c_i^T(n)s_i)^2 + \sigma^2 (c_i^T c_i)}{(c_i^T(n)s_i)^2}$$

其中:  $i = 1, 2, \dots, K$ 。

该算法与传统功率控制算法相比, 更节省发射功率、收敛速度更快、收敛值更小, 并能使系统支持更多用户。进一步将联合优化模型扩展到多径衰落信道条件, 针对多速率、多 QoS 业务传输和用户做大发射功率受限的系统, 与基于传统定步长功率控制算法相比, 在误码率、总发射功率、收敛速度和系统容量方面有较大改善。

#### 4 仿真分析

仿真平台的主要参数: 接入方式 TD-SCDMA 集群, 频带宽度 1.6 MHz, 码片速率 1.28 Mchip/s, 时隙长度 0.625 ms, 扩频因子 16, 调制方式 QPSK, 扩频方式 OVSF, 波束形成算法 LMS, 检测算法 MMSE, 采样率 1/8 chip, 信道类型为 ITU3A  $v = 3 \text{ km/h}$ <sup>[6]</sup>。

仿真中, 用户数  $K$  为 8,  $0^\circ$  为期望方向,  $-20^\circ, -30^\circ, -40^\circ, -70^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 50^\circ$  为 7 个干扰所在方向, 采用 8 阵元均匀线阵天线接收, 采样点数 400, 信噪比为 20 dB, 波束赋形步长为 0.002。

从图 6 中可以看到, LMS 算法经过迭代趋于误差为 0, 有着良好的波束形成性能, 能在干扰信号到达方向形成较深零陷。

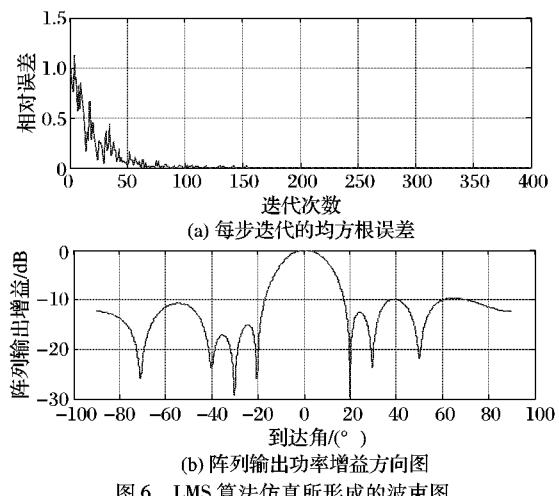


图 6 LMS 算法仿真所形成的波束图

图 7 所示为瑞利多径信道 ZF-BLE 与 MMSE-BLE 检测算法的性能曲线图, 信道估计采用传统的 Steiner 估计器。从图中可以看出随着信噪比的增大, MMSE-BLE 比 ZF-BLE 的误码率低, 这个是因为 MMSE-BLE 考虑了噪声的干扰, 但却增加了计算复杂度。

对比图 8、图 9, 变步长功控算法最终在接收端测得的 SIR 更接近  $SIR_{target}$ , 图 10 在未加功控 (NoPC) 及加了定步长功控 (DSPC) 和变步长功控 (ASPC) 后的 BER 与 SIR 的曲线, 可以看出功率控制对提高系统性能有明显改善, 这是因为虽然多用户检测从理论上可以完全抑制 ISI 和 MAI, 但在现实中必

须与功控结合才能更好抑制接收端功率不平衡, 提高系统性能。

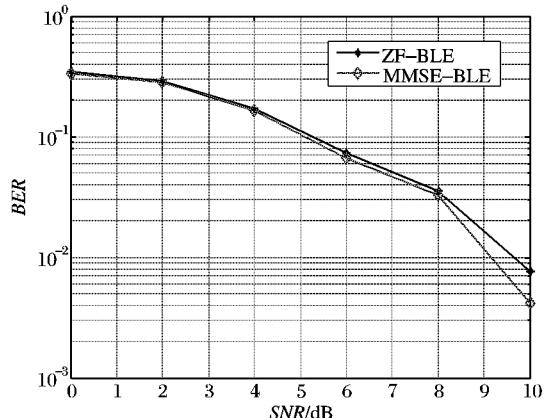


图 7 MMSE-BLE 与 ZF-BLE 的性能曲线图

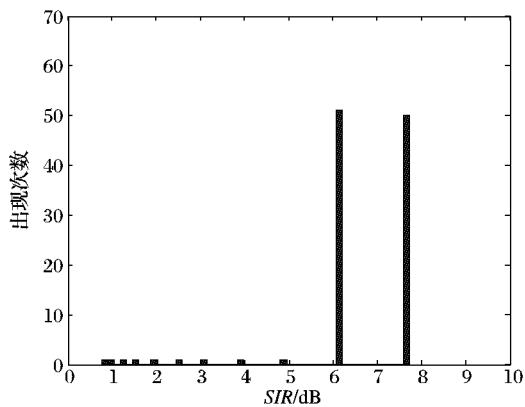


图 8 定步长功控的 SIR 分布图

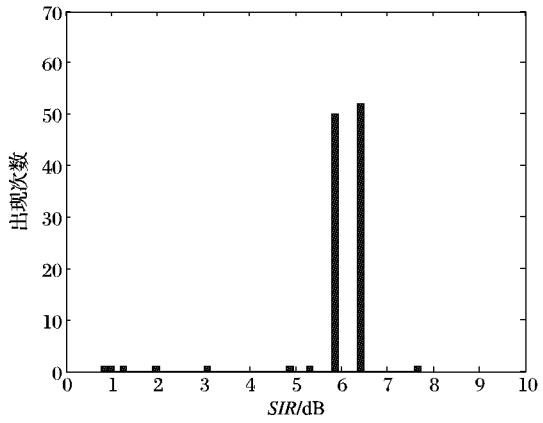


图 9 变步长功控的 SIR 分布图

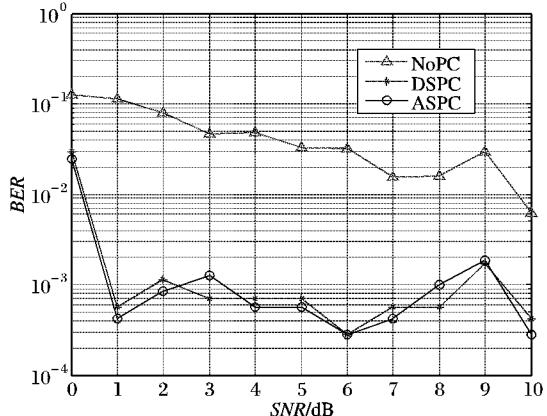


图 10 ITU3A 信道多用户检测 + 功率控制误比特率

(下转第 327 页)

节点出现的时间晚于 LEACH 协议,为了更好地说明 LEACH-ID 协议的优越性,根据节点死亡时间对照表绘制了网络生命周期柱状图,如图 4 所示。

表 2 节点死亡时间对照表

死亡节点	轮数	
	LEACH	LEACH-ID
第一个节点	372	463
半数节点	498	689
最后一个节点	576	771

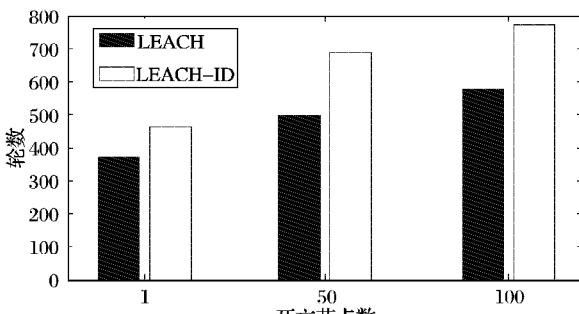


图 4 网络生命周期柱状图

## 4 结语

本文对 LEACH 协议进行了详细的分析并指出了其存在的问题,针对提出的问题进行了改进并提出了 LEACH-ID 协议。LEACH-ID 协议为每个节点分配一个临时 ID 号,根据最优簇头公式计算出最优簇头数,并且在簇的建立阶段对簇中成员数进行控制。在仿真实验中,将 LEACH-ID 协议与 LEACH 协议进行比较,结果显示 LEACH-ID 协议能有效延长网络的工作时间,在一定程度上延长了网络寿命并提高了网络能量的利用率,具有较强的实用性。

### 参考文献:

[1] 孙利民,李建中,陈渝,等.无线传感器网络[M].北京:清华大学出版社,2005.

(上接第 316 页)

## 5 结语

在具体实现中,需要考虑的问题是:

1)可以预先设定一个阈值,将计算出的邻组用户的信道冲激响应或者智能天线波束赋形权矢量归一化数值和阈值进行比较,即可分辨出强干扰用户,最终决定参与联合检测的邻群组强用户的数量。

2)目前的研究中一般都是假设基于 SIR 的功率控制是理想无误差的,事实并非如此。

3)目前的研究都假设基站已完全预知系统所有用户的扩频码字、定时信息和信道参数,而在快时变无线信道中,即便是本群组内各用户信息特征也会存在着估计误差<sup>[20]</sup>,需要考虑这些情况的影响。

4)有必要探索功率控制与基站下行波束赋形及检测进行联合参数优化分析其可能性和其对下行链路发射功率与容量的影响。

### 参考文献:

[1] 郑祖辉,陆锦华,丁锐,等.数字集群移动通信系统[M].北京:电子工业出版社,2008:10~124.

- 出版社,2005.
- [2] 宋文.无线传感器网络技术与应用[M].北京:电子工业出版社,2007:3~11.
- [3] ARICI T, ALTUNBASAK Y. Adaptive sensing for environment monitoring using wireless sensor networks[C]// Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2004: 2347~2352.
- [4] HEINZELMAN W B, CHANDRAKASAN A P. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660~670.
- [5] ZHANG WENYA, LIANG ZIZE, HOU ZENGGUANG, et al. A power efficient routing protocol for wireless sensor network[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2007: 20~25.
- [6] 纪超,徐家品. WSN 中 LEACH 协议簇头生成算法的改进[J]. 微计算机信息, 2008, 24(16): 253~256.
- [7] HEINZELMAN W R, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor network[C]// IEEE Proceedings of the Hawaii International Conference on system Science. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2000: 3005~3014.
- [8] RAVELOMANANA V. Optimal initialization and gossiping algorithms for random radio networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2007, 18(1): 17~28.
- [9] HANDY M J, HAASE M, TIMMERMANN D. Low energy adaptive clustering hierarchy with deterministic cluster-head selection[C]// Proceedings of the 4th IEEE Conference on Mobile and Wireless Communications Networks. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2002: 368~372.
- [10] 王国芳,李腊元,李春林. 无线传感器网络中基于能量约束的簇首多跳算法[J]. 传感技术学报, 2009, 22(7): 997~1001.
- [2] 金荣洪,耿军平,范瑜. 无线通信中的智能天线[M].北京:北京邮电大学出版社,2005:165~167.
- [3] ZHANG RUI, CHAI C C, LIANG YING-CHANG. Joint beamforming and power control for multiantenna relay broadcast channel with QoS constraints[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(2): 726~737.
- [4] RASHID-FARROKHI F, LIU K, TASSIULAS L. Transmit beamforming and power control for cellular wireless systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1998, 16(8): 1437~1450.
- [5] ZHENG DANYU, JIANG ZHENG, CHANG YONGYU, et al. A cell search scheme for TD-SCDMA using multi-cell joint detection [C]// IEEE 68th VTC. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2008:1~5.
- [6] 苏峰. TD-SCDMA 系统上行链路功率控制研究方案[D].西安:西北工业大学,2005.
- [7] 金晓晓. 第三代移动通信系统联合功率控制技术的研究[D].杭州:浙江工业大学,2005.
- [8] ZHOU HUAYU, TANG HUI, ZHANG QIN. Joint detection based on MMSE decision feedback equalization with interference cancellation[C]// Proceedings of NGMAST '09. Cardiff, Wales: [ s. n. ], 2009: 219~223.