

两层异构网络中基于分簇 DIA 的干扰消除算法

杜中涛¹, 解志斌^{1,2}

(1 江苏科技大学 电子信息学院, 江苏 镇江 212003; 2 英国华威大学 工程学院, 考文垂 CV4 7AL)

摘 要: 由 Femtocell 和 Macrocell 构成的两层异构网络可以有效提高系统容量, 但也引入了较为严重的干扰问题. 对此提出一种基于分簇的分布式干扰对齐 (Distribute Interference Alignment, DIA) 算法. 算法以图论中的边权值机制为基础, 以边权值最大化为准则对 Femtocell 网络进行分簇. 其次, 针对某一确定的簇, 选出对该簇产生干扰最强的宏用户并将其与该簇结合构成一个整体, 最后利用 DIA 技术对该整体进行跨层干扰消除. 所提算法在保证系统性能的同时, 有效满足了密集部署情况下的可行性条件要求. 仿真结果表明, 所提算法具有较好的信道容量性能, 适用于实际的两层异构网络.

关键词: 两层异构网络; 干扰对齐; 分布式干扰对齐; 分簇

中图分类号: TP31

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2015)07-0107-05

Interference Elimination Algorithm Based on Clustering DIA in Two-tier Heterogeneous Networks

DU Zhong-tao¹, XIE Zhi-bin^{1,2}

(1 School of Electronic and Information, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China;

2 College of Engineering, University of Warwick, Coventry CV4 7AL, U. K.)

Abstract: Two-tier heterogeneous networks composed of femtocell and macrocell can improve the system capacity effectively. A distributed IA algorithm is proposed based on clustering. The proposed algorithm achieves clustering of femtocell network, which based on the mechanism of the edge weights of graph theory and the criterion of maximum the edge weights. Moreover, the macrocell user, which causes the strongest interference, is selected to form a whole with a certain cluster. Finally, the DIA technology is used to eliminate the interference of the whole. The proposed algorithm guarantees the performance of femtocell network system, meets the requirements of the feasibility conditions of dense deployment case effectively. Simulation results show that the proposed algorithm has better performance of channel capacity and is suitable for the actual two-tier heterogeneous networks.

Key words: two-tier heterogeneous networks; interference alignment; distribute interference alignment; clustering

1 引言

随着通信技术的快速发展, 研究结果显示约有 50% 以上的语音业务和 70% 以上的数据业务均发生在室内, 而 45% 的家庭和 30% 的企业都面临着室内覆盖差的问题^[1]. 因此对于蜂窝网络运营商而言, 怎样提供良好的室内覆盖, 特别是针对语音之外的

图像、视频等多媒体业务显得尤为重要. 家庭基站 (Home eNodeB, HeNB), 在产业界又被称为飞蜂窝或毫微微蜂窝 (Femtocell), 它是一种应用在室内环境或其他小覆盖环境下的小型低功率蜂窝基站, 能够有效弥补室内覆盖差的问题并且为运营商提供数据速率更高、成本更低的有吸引力的业务^[2].

然而, 由 Femtocell 和 Macrocell 构成的两层异

收稿日期: 2014-09-10; 修回日期: 2014-10-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61401180, 11204109); 江苏省高校自然科学基金项目 (13KJB510007); 江苏高校优势学科建设工程项目资助课题

构网络存在较为严重的层内与层间干扰,已成为限制该系统通信效果的瓶颈问题.因此,如何消除和抑制这些复杂的干扰问题引起了学术界的广泛关注^[3].传统的干扰消除和抑制方法研究主要集中在频谱资源分配^[4]、功率控制^[5]以及多天线 Femtocell 自适应接入技术等方面.

干扰对齐(Interference Alignment, IA)技术是一种新型的干扰抑制技术,可以为系统提供最大的空间自由度(Degree of Freedom, DOF)^[6].通过对发送信号进行线性预编码,可以使来自其他发送端的干扰信号重叠于每一接收端的相同的信号子空间中,并使所需接收的信号投射到与该子空间相正交的信号空间上,此时接收端利用一个迫零滤波器就可以完成干扰抑制.文献^[7]中为了求得基站端 IA 预编码矩阵的闭式解,要求所有发射机均要知道全局的信道状态信(Channel State Information, CSI),这在实际系统中会带来巨大的开销.文献^[8]中提出一种 Femtocell 网络下机会式干扰对齐的方案,但该方案只适用于消除相邻的 Femtocell 和 Macrocell 之间的干扰,受 Femtocell 分布的影响较大.

为了达到密集部署条件下干扰对齐的目的,本文提出一种两层异构网络中基于分簇 DIA 的干扰消除算法.

2 系统模型

文中 $\text{span}(A)$ 表示矩阵 A 的列向量张成的空间; A^+ 代表矩阵 A 的共轭转置; $v_b[A]$ 表示矩阵 A 的 b 个最小特征值所对应的特征向量; H^{-1} 表示 H 的逆矩阵; I_b 代表 $b \times b$ 维的单位矩阵; $\text{rank}(A)$ 表示矩阵 A 的秩; $\text{tr}(A)$ 表示矩阵 A 的迹.

一个宏基站和 $L(L \geq 2)$ 个宏用户以及 $M(M \geq 2)$ 对飞蜂窝基站用户对构成的两层异构网络模型如图 1 所示,重点考虑宏用户和飞蜂窝用户对飞蜂窝基站侧的上行干扰.假设飞蜂窝基站和飞蜂窝用户是一一对应的,所有基站的接收天线数为 N_r ,所有用户的发送天线数为 N_t ,则在第 i 个飞蜂窝基站处的接收信号可以表示为

$$y_i = \sqrt{\omega_{ii}} \mathbf{H}_{ii} v_i s_i + \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^M \sqrt{\omega_{ij}} \mathbf{H}_{ij} v_j s_j + \sum_{k=1}^L \sqrt{\omega_{ik}} \mathbf{H}_{ik} v_{ok} s_{ok} + \mathbf{g}_i \quad (1)$$

式中, ω_{ij} 表示第 j 个飞蜂窝用户到第 i 个飞蜂窝基站之间的路径衰落系数,该路径衰落系数取决于用

户到飞蜂窝基站之间的距离 d_{ij} , 即有 $\omega_{ij} = d_{ij}^{-\alpha}$, α 表示路径损耗指数.定义 b 为发送信息流的个数, s_i, s_j 分别表示飞蜂窝用户 i, j 发射的 $b \times 1$ 维的信息向量, s_{ok} 表示宏用户发射的 $b \times 1$ 维的信息向量,与发送的信息向量对应的预编码分别为: $v_i, v_j, v_{ok} \in \mathbb{C}^{N_t \times b}$. 假设所有用户到第 i 个飞蜂窝基站的信道为瑞利平坦衰落,则用户到基站的信道增益可表示为 $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{N_r \times N_t}$. $\mathbf{g}_i \in \mathbb{C}^{N_r \times 1}$ 是基站接收到的均值为 0、方差为 σ^2 的加性高斯白噪声向量.

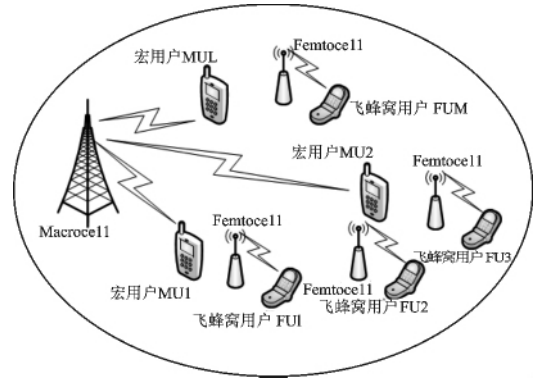


图 1 Femtocell 和 Macrocell 构成的两层异构网络

3 异构网络中基于分簇 DIA 的干扰消除

3.1 Femtocell 网络分簇

考虑到网络节点间的干扰强度与其距离直接相关,为此基于图论定义一个有序三元组,即 $G = (V, E, W)$, 其中 V 代表有限的飞蜂窝基站用户对集合, E 代表每个飞蜂窝基站用户对之间的边集合, W 表示每条边上权值的集合,若有 $M(M \geq 2)$ 对飞蜂窝基站用户对,则 $W = \{\omega_{ij}; i, j \in \{1, 2, \dots, M\}, i \leq j\}$, 且有

$$\omega_{ij} = \frac{\omega_{ij} p_{if}}{\omega_{ii} p_{if}} + \frac{\omega_{ji} p_{if}}{\omega_{jj} p_{if}}, \forall i, j, i \leq j. \quad (2)$$

式中, ω_{ij} 定义为每条边上的权值,权值越大表明相应两对飞蜂窝基站用户对具有较强的干扰. p_{if}, p_{jf} 分别表示飞蜂窝用户 i, j 的发射功率.假设所有飞蜂窝用户的发射功率大小相同,则式(2)可以简化为

$$\omega_{ij} = \frac{\omega_{ij}}{\omega_{ii}} + \frac{\omega_{ji}}{\omega_{jj}}, \forall i, j, i \leq j. \quad (3)$$

若将 M 对飞蜂窝基站用户对分成 Z 个簇,定义 Z 个簇的集合为 q , 且 $q = \{q(1), q(2), \dots, q(Z)\}$, 其中 $q(m)$ 是 q 集合中的第 m 个簇,且满足:

$$q(m) \subseteq M, \forall m, \quad (4)$$

$$q(m) \cap q(n) = \emptyset \quad m \neq n, \quad (5)$$

$$\sum_{m=1}^Z q(m) = M. \quad (6)$$

规定每个簇内飞蜂窝基站用户对的上限数量为 S , 即有

$$S \leq N_r + N_t - 1. \quad (7)$$

为了有效消除干扰,应尽可能将产生较强干扰的飞蜂窝基站用户对分为一簇.此时,可以边权值最大化为准则将所有飞蜂窝基站用户对进行分簇,即满足:

$$\Phi_m = \arg \max \sum_{m=1}^Z \left(\sum_{i,j \in q(m)} \omega_{ij} \right). \quad (8)$$

另外,从 $L (L \geq 2)$ 个宏用户中选择对该簇产生干扰最强的宏用户 l ,使其满足:

$$l = \arg \max_{l \in \{1,2,\dots,L\}} \text{tr}((\mathbf{H}_{l0})^H \mathbf{H}_{l0}). \quad (9)$$

3.2 基于分簇 DIA 的干扰消除

为了便于分析,可考虑由一个簇(假设有 2 对飞蜂窝基站用户对)和一个具有最强干扰的宏用户组成的两层跨层干扰信道模型,如图 2 所示,实线表示期望信号,虚线表示干扰信号.

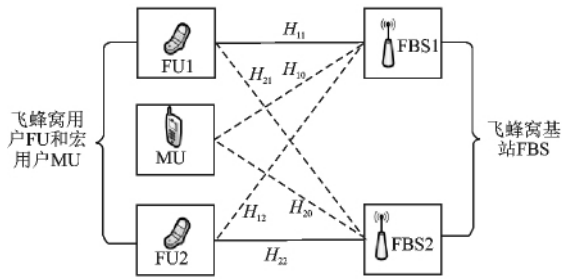


图 2 跨层干扰信道模型

假设在飞蜂窝基站 FBS1 处利用 IA 技术,则来自宏用户和其他飞蜂窝用户的干扰信号应对齐到相同的低维子空间中,即满足:

$$\text{span}(\mathbf{H}_{10}\mathbf{v}_0) = \text{span}(\mathbf{H}_{12}\mathbf{v}_2). \quad (10)$$

式中, \mathbf{v}_0 和 \mathbf{v}_2 分别对应宏用户 MU 的预编码向量和飞蜂窝用户 FU2 的预编码向量, \mathbf{H}_{10} 和 \mathbf{H}_{12} 分别表示宏用户 MU 到飞蜂窝基站 FBS1 处的信道增益以及飞蜂窝用户 FU2 到飞蜂窝基站 FBS1 处的信道增益.

由上述分析推广可知,假设给定的一般信道矩阵为 \mathbf{H}_{ij} ,则发送端的预编码矩阵 \mathbf{v}_j 和接收端的干扰抑制矩阵 \mathbf{u}_i 应满足:

$$\mathbf{v}_j: N_t \times b, \mathbf{v}_j^+ \mathbf{v}_j = \mathbf{I}_b, \quad (11)$$

$$\mathbf{u}_i: N_r \times b, \mathbf{u}_i^+ \mathbf{u}_i = \mathbf{I}_b. \quad (12)$$

若干扰信号对齐到 \mathbf{u}_i 的零空间,则必须满足以

下条件:

$$\mathbf{u}_i^+ \mathbf{H}_{ij} \mathbf{v}_j = 0, \forall i \neq j \quad (13)$$

$$\text{rank}(\mathbf{u}_i^+ \mathbf{H}_{ii} \mathbf{v}_i) = b \quad (14)$$

则期望信号可以通过一个 $b \times b$ 的满秩信道矩阵 $\overline{\mathbf{H}}_{ii}$ 被接收,即:

$$\overline{\mathbf{H}}_{ii} = \mathbf{u}_i^+ \mathbf{H}_{ii} \mathbf{v}_i. \quad (15)$$

此时,在接收端 i 处的信道容量可表示为

$$R_i = \log \left| \mathbf{I}_b + \frac{p_i}{d} \overline{\mathbf{H}}_{ii} \overline{\mathbf{H}}_{ii}^+ \right| \quad (16)$$

所提算法的主要步骤如下:

(1) 初始化 M, L ;

(2) 计算 $\omega_{ij} = \frac{\omega_{ij}}{\omega_{ii}} + \frac{\omega_{ji}}{\omega_{jj}}, \forall i, j, i \leq j$;

(3) 分为 Z 个簇: $q = \{q(1), q(2), \dots, q(Z)\}$,

满足 $\Phi_m = \arg \max \sum_{m=1}^Z \left(\sum_{i,j \in q(m)} \omega_{ij} \right)$;

(4) 选择宏用户: $l = \arg \max_{l \in \{1,2,\dots,L\}} \text{tr}((\mathbf{H}_{l0})^H \mathbf{H}_{l0})$;

(5) 由簇和宏用户构成一个整体,假设这个整体的用户数为 K ;

(6) 随机生成用户的预编码矩阵

$$\mathbf{v}_j: N_t \times b \quad \mathbf{v}_j^+ \mathbf{v}_j = \mathbf{I}_b;$$

(7) 开始迭代;

$$(8) \Phi_i = \sum_{j=1, j \neq i}^K \frac{p_j}{b_j} \mathbf{H}_{ij} \mathbf{v}_j \mathbf{v}_j^+ \mathbf{H}_{ij}^+;$$

$$(9) \mathbf{u}_i = \mathbf{v}_b [\Phi_i];$$

$$(10) \text{设置 } \overleftarrow{\mathbf{v}}_i = \mathbf{u}_i;$$

$$(11) \overleftarrow{\Phi}_j = \sum_{i=1, i \neq j}^K \frac{\overleftarrow{p}_i}{b_i} \overleftarrow{\mathbf{H}}_{ji} \overleftarrow{\mathbf{v}}_i \overleftarrow{\mathbf{v}}_i^+ \overleftarrow{\mathbf{H}}_{ji}^+;$$

$$(12) \overleftarrow{\mathbf{u}}_j = \mathbf{v}_b [\overleftarrow{\Phi}_j];$$

$$(13) \text{设置 } \mathbf{v}_i = \overleftarrow{\mathbf{u}}_i;$$

(14) 重复执行(8) ~ (13),直至收敛.

4 仿真结果及分析

本文考虑在一个宏基站覆盖区域内有 L 个宏用户以及 M 对飞蜂窝基站用户对构成的两层异构网络.飞蜂窝基站与飞蜂窝用户间是一一对应的,信道噪声是均值为 0,方差为 1 的高斯白噪声.

实验一:本实验对所提 Femtocell 网络分簇算法进行仿真,如图 3 所示.

本实验中假设两层异构网络覆盖区域半径为 50 米,随机分布 $M=12$ 对飞蜂窝基站用户对和 5 个宏用户,每一个小正方形代表一对飞蜂窝基站用户对,每一个小圆代表一个宏用户,根据准则式(8)可以将其分为 7 个簇(每一个虚线椭圆代表一个

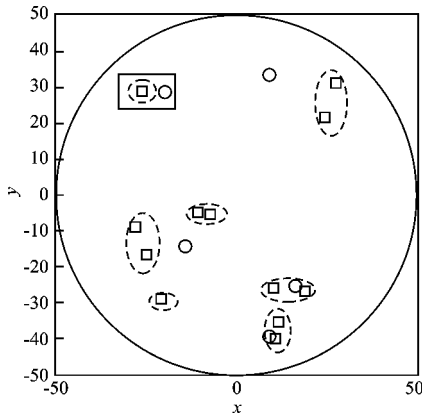


图3 Femtocell 网络分簇

簇),其中有 5 个簇分别包含 2 对飞蜂窝基站用户,另外 2 个簇分别包含 1 对飞蜂窝基站用户对.同时,通过式(9)可得到与不同簇产生最强干扰的宏用户,并与相应的簇形成一个新的整体,如图中的矩形所示(假设每一个整体之外的宏用户对该整体中的簇所产生的上行跨层干扰可以忽略不计).

由实验一,通过分簇可以得到简化的两层异构网络,在此基础上可对由每一个确定的簇和对该簇产生最强干扰的宏用户构成的整体进行跨层干扰消除.后续实验用 $(M,1)$ 表示每一个整体中有 M 对飞蜂窝基站用户对和一个宏用户.

实验二:本实验对不同飞蜂窝用户数的条件下系统信道容量随信噪比的变化情况进行了仿真,如图4所示.

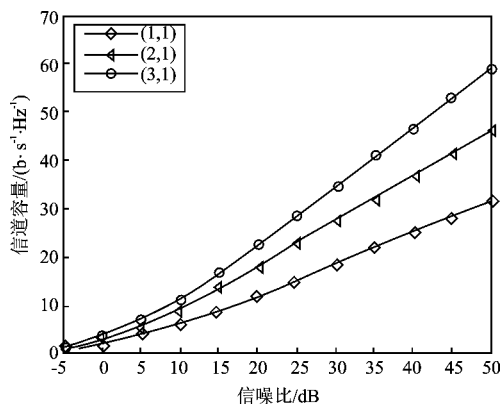


图4 信道容量在用户数不同情况下的变化曲线

本实验考虑当 $M=1$ 和 $M=2$ 时,所有飞蜂窝基站和用户的天线数均为2,当 $M=3$ 时,所有飞蜂窝基站和用户的天线数均为4的情况.由图4可知,系统的信道容量随着信噪比的增大而增大,且当信噪比一定时,飞蜂窝用户个数越多,系统的信道容量越大.

实验三:本实验对相同用户数下系统信道容量

随天线数的变化情况进行了仿真,如图5所示.

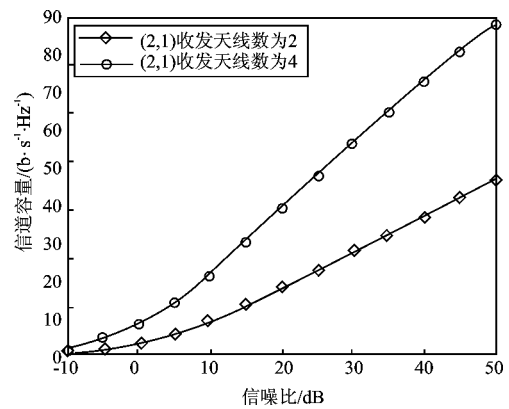


图5 信道容量在天线数不同情况下的变化曲线

当 $M=2$ 时,信道容量在天线数变化的条件下随信噪比的变化曲线.由图5可知,飞蜂窝基站和用户的收发天线数均为2的情况下系统所得的和容量明显低于收发天线数均为4的和容量,即天线数越多信道容量越大.

实验四:本实验对不同迭代数目条件下的系统信道容量的变化情况进行了仿真,如图6所示.

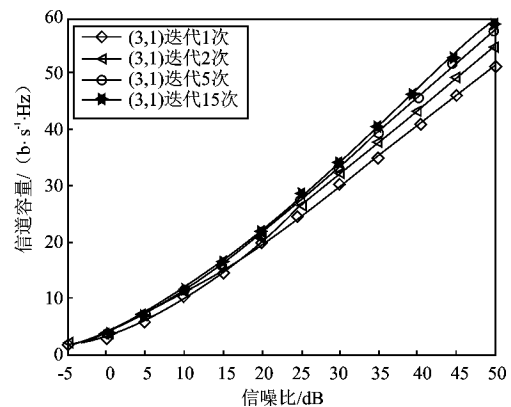


图6 信道容量在不同迭代数目条件下的变化曲线

当 $M=3$ 时,假设所有飞蜂窝基站和用户收发天线数均为4,图6中比较了在不同迭代数目条件下系统信道容量随信噪比的变化曲线.从图6可以看出,在用户数相同的情况下,当信噪比一定时,迭代的次数越多系统的信道容量越大.进一步分析可知,随着迭代次数的增加,系统信道容量的增幅越来越小,可见此时系统逐渐趋于收敛,而且在该系统中一般迭代15~20次左右就已经达到收敛,此时迭代次数继续增加不会再影响系统的信道容量.

实验五:本实验将所提的分簇DIA算法、随机分簇DIA算法以及分簇的经典IA算法的系统信道容量性能进行了分析对比,如图7所示.

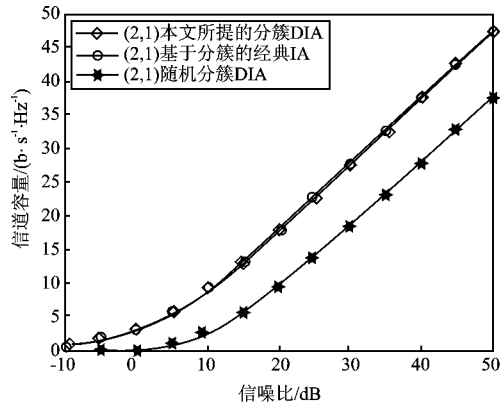


图 7 三种算法的系统容量随信噪比变化的对比曲线

在所有飞蜂窝基站和用户的天线数均为 2 的条件下,图 7 中比较了不同算法中系统信道容量随信噪比的变化曲线.由图 7 可知,与随机分簇 DIA 算法相比,本文所提的分簇 DIA 算法具有明显优势.与分簇的经典 IA 算法相比,所提算法在低信噪比区域系统信道容量略低于分簇的经典 IA 算法,但随着信噪比的增大所提算法和分簇的经典 IA 算法在系统信道容量上趋于一致.

5 结束语

针对 Femtocell 和 Macrocell 构成的两层异构网络中的干扰问题,本文提出了一种适用于 Femtocell 网络的分簇 DIA 的干扰消除算法,该算法基于图论的边权值理论来衡量 Femtocell 网络中基站用户对间的干扰强弱,从而以权值最大化为准则对 Femtocell 网络进行分簇.针对某一确定的簇,选出对该簇产生干扰最强的宏用户并将其与该簇结合构成一个整体,最后利用 DIA 技术对每一个这样的整体进行跨层干扰消除.所提算法有效满足了两层异构网络中干扰对齐可行性条件的降维求解要求,降低了系统实施复杂度.仿真结果显示,所提算法具有较好的系统性能,适用于实际的通信环境.

参考文献:

- [1] Zahir T, Arshad K, Nakata A, et al. Interference management in femtocells[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 15(1): 293-311.
- [2] Brett K, Jorma L, Behnaam A. Femtocell architectures with spectrum sharing for cellular radio networks [J]. International Journal of Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics, 2013, 5(1): 66-75.
- [3] 梁学俊,水利民,裴文江,等. TDD 无线异构网络中的干扰仿真与分析[J]. 微电子学与计算机, 2013, 30(4): 90-93.
- [4] Li L, Xu C Q, Tao M X. Resource allocation in open access OFDMA femtocell networks[J]. IEEE Wireless Communication Letters, 2012, 1(6): 625-628.
- [5] Pao W C, Chen Y F, Chan C Y. Power allocation schemes in OFDM-based femtocell networks [J]. Wireless Personal Communication, 2013, 69(4): 1165-1182.
- [6] Sungkyu J, Jungwoo L. Interference alignment and cancellation for the two-user X channels with a relay [C]// IEEE 24th International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications, 2013: 202-206.
- [7] Cadambe V R, Jafar S A. Interference alignment and degrees of freedom of the K user interference channel [J]. IEEE Transactions Inf Theory, 2008, 54(8): 3425-3441.
- [8] Tri M N, Quack T Q S, Hyundong S. Opportunistic interference alignment in MIMO femtocell networks [C]// IEEE International Symposium on Information Theory Proceeding. Cambridge: IEEE, 2012: 2631-2635.

作者简介:

杜中涛 男,(1989-),硕士.研究方向为无线通信、跨层网络干扰抑制.

解志斌 男,(1981-),博士,副教授.研究方向为信号处理、智能优化. E-mail: 1037642210@qq.com.

(上接第 106 页)

- [5] 高金加. 嵌入式处理器取指单元关键部件低功耗技术研究[D]. 杭州:浙江大学, 2012.
- [6] Kin J, Gupta M, Mangione-Smith W H. Filtering memory references to increase energy efficiency [J]. IEEE Transactions on Computers, 2000, 49(1): 1-15.
- [7] 孟建熠,严晓浪,葛海通,等. 基于指令回收的低功耗循环分支折合技术[J]. 浙江大学学报, 2010, 44(4): 632-638.
- [8] Zhang Y, Parikh D, Sankaranarayanan K, et al. Hot-Leakage: A temperature-aware model of subthreshold

and gate leakage for architects [EB/OL]. [2014-09-20]. <http://lava.cs.virginia.edu/HotLeakage>.

- [9] Shivakumar P, Jouppi N P. CACTI 3.0: An integrated cache timing, power, and area model [EB/OL]. [2014-09-20]. <http://www.hpl.hp.com/research/cacti/>

作者简介:

肖建青 男,(1985-),博士研究生.研究方向为微处理器设计. E-mail: yig-careen@126.com.