

# 广义分布式网络架构下的多用户联合干扰抑制

徐 璠<sup>1,2</sup>, 陶小峰<sup>1,2</sup>, 刘宝玲<sup>1,2</sup>, 张 平<sup>1,2</sup>

(1. 北京邮电大学电信工程学院, 北京 100876; 2. 北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室, 北京 100876)

**摘 要:** 针对广义分布式网络架构中相邻小区多用户干扰抑制的理论空白, 构建了干扰小区集合的系统模型, 继而提出两种该架构下可行的多用户联合干扰抑制算法. 其中, 交叉迭代联合检测 (CI-JD, Crossed Iterative Joint Detection) 算法利用多用户之间的逐级干扰消除, 可以在运算复杂度增加不多的情况下显著改善系统性能; 全局联合检测 (G-JD, Global Joint Detection) 算法通过对多用户信息的统一建模, 有效抑制了相邻小区用户间的干扰, 同时获得系统分集增益. 仿真结果验证了本文所述两种算法的可行性及有效性.

**关键词:** 广义分布式网络; 多用户干扰; 交叉迭代联合检测; 干扰消除; 全局联合检测

**中图分类号:** TN929.533 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 6A-141-05

## Multi-User Joint Interference Suppression in Generalized Distributed Network

XU Jin<sup>1,2</sup>, TAO Xiao-feng<sup>1,2</sup>, LIU Bao-ling<sup>1,2</sup>, ZHANG Ping<sup>1,2</sup>

(1. School of Telecommunication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

2. Key Laboratory of Universal Wireless Communications (BUPT), Ministry of Education, Beijing 100876, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of multi-user interference among neighbor cells under generalized distributed network, system model of interference cell set is established, followed by two proposed algorithms for multi-user joint interference suppression. In which, the Crossed Iterative Joint Detection (CI-JD) algorithm performs stepwise interference cancellation among multi-users and could improve the system performance effectively with a little extra complexity, while the Global Joint Detection (G-JD) algorithm builds a unified model with multi-users' information and could not only restrain multi-user interference but also obtain diversity gain in the process of detection. Simulation results validate the feasibility and significant effect of the two algorithms.

**Key words:** generalized distributed network; multi-user interference; crossed iterative joint detection; interference cancellation; global joint detection

### 1 引言

近年来,随着移动通信网络和技术不断发展,人们对高速率、高质量的业务需求与日俱增.目前,第三代移动通信系统(3G, 3rd Generation)已在世界范围内逐步商用,与此同时,针对第四代移动通信系统(4G, 4th Generation)的研究开发工作也在紧密进行.为解决更高载频(如 3.5GHz)引起的信号衰减过快、小区面积缩小等问题,许多学者针对新型网络架构进行了广泛深入的研究,其中,广义分布式网络<sup>[1-3]</sup>以其有效增加系统容量、减少小区切换等特点而备受关注,成为 4G 系统中极有可能采用的网络架构之一.在面向 4G 研发的“863”重大项目——“未来通用无线环境(FuTURE, Future Technologies for Universal Radio Environment)研究计划”中<sup>[4]</sup>,广义分布式网络作为 4G 试验系统的基本网络架构,充分展现出其在广域覆盖组网等方面的优势,并在试验网中得以应用验证.

与此同时,码分多址(CDMA, Code Division Multiple Access)作为一种基本的多址技术,目前已广泛应用于

3G 系统,其以码字区分用户的方式虽对数据业务的支持不具有特别的优势,但可有效进行同频组网,降低相邻基站间的干扰,因此,在针对 4G 的研发过程中,CDMA 多址方式与广义分布式网络架构的结合仍然值得进一步关注.

在 CDMA 系统中,由于多址干扰(MAI, Multiple Access Interference)与多径干扰(MPI, Multi-path Interference)的存在,传统的检测技术(如 RAKE 接收)无法获得理想的信号检测效果.在 Verdu<sup>[5]</sup>提出用于 CDMA 的最佳多用户检测器后,多种次优检测技术也陆续被提出,但都存在一定缺陷.1993 年, A. Klein, P. W. Baier 等人<sup>[6]</sup>提出联合检测,利用已知的信道特性与用户扩频码字进行数学建模以求解信号,是一种可同时消除 MAI 与 MPI 的检测技术<sup>[6,7]</sup>.

然而,上述研究大多集中于单小区单天线(阵)基站系统,针对多小区多天线(阵)TD-CDMA 系统,为克服相邻小区的多用户干扰,Weckerle 等人提出了基于干扰协方差矩阵的多级联合检测算法<sup>[8,9]</sup>.随着未来移动通信系统中广义分布式网络架构的逐渐应用,相邻小区(天

收稿日期:2006-05-08;修回日期:2008-01-17

基金项目:国家自然科学基金(No. 60496312, No. 60702051);国家 863 高技术研究发展计划(No. 2006AA01Z260, No. 2007AA01Z261);新世纪优秀人才支持计划(No. NCET-05-0116)

线或天线阵的覆盖区域)的同频同时多用户干扰问题会更加突出,成为关注的重点.本文针对此问题展开研究,首先构建广义分布式网络架构的干扰小区集合模型,随后提出两种可行的多用户联合干扰抑制算法,并给出相应的性能分析及复杂度分析.仿真结果表明,本文所述两种算法均可有效抑制分布式架构下相邻小区的多用户干扰,显著改善系统性能.

## 2 广义分布式网络架构

图 1 所示为 FuTURE 4G 系统中广义分布式网络架构的基本组网结构图.图中,地理位置相邻的多个小区中,天线(天线阵)间距为几十米到几十公里.每个接入点(AP, Access Point)通过光纤、同轴电缆等方式同时与多个小区中的天线(天线阵)相连,可以看成具有多个天线(天线阵)的基站.理论分析<sup>[1-3]</sup>表明,该架构具有集中式信号处理的特点,并在增加系统容量、减少小区间切换等方面具有较明显的优势,因此成为 FuTURE 4G 网络的基本特征之一.

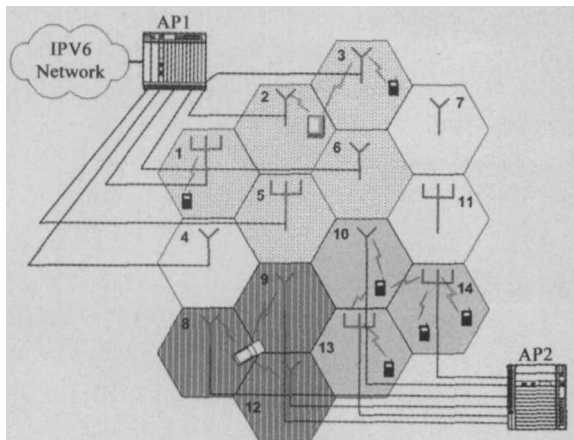


图 1 广义分布式网络架构的基本组网结构图

然而,在图 1 所示的网络架构中,当用户处于某个小区边缘时,会对其相邻小区的用户产生严重干扰.此时,目标小区中的天线(天线阵)不仅能接收到本小区用户的信号,同时也能接收到相邻小区边缘用户的信号(如图 1 中小区 10, 13, 14 所示),此干扰信号将会严重影响系统上行链路的性能.遗憾的是,目前没有文献涉及该情况下的多用户干扰分析,其必将导致这种在 4G 系统中极具潜力的分布式架构的应用缺乏必要的理论依据.本文为明确广义分布式网络架构下相邻小区多用户的干扰情况,特构建如下模型以展开分析(此处假定该系统严格同步).

设干扰小区集合(相互之间存在干扰的小区)中共有  $M$  个元素小区,各小区编号为  $m, m \in \{1, 2, \dots, M\}$ ,第  $m$  个元素小区内  $K_m$  有个用户与相邻小区的用户存在干扰.若以  $a_{n,k,m}$  表示小区  $n$  中的用户  $k$  到目标小区  $m$  的系统传输矩阵(该矩阵包含扩频码、多径信

道冲激响应、收发天线数及用户数据处理块长等信息,为简化描述,其具体构建方式在此不做赘述,可参考文献[10]), $s_{n,k}$ 表示小区  $n$  中用户  $k$  的发送信号, $n_m$ 表示小区  $m$  中均值为零、方差为  $\sigma^2$  的复高斯白噪声,则目标小区  $m$  中天线(天线阵)的接收信号可表示为:

$$r_m = \sum_{n=1}^M \sum_{k=1}^{K_n} a_{n,k,m} s_{n,k} + n_m \quad (1)$$

若进一步定义  $S_n = (s_{n,1}, s_{n,2}, \dots, s_{n,K_n})^T$  表示小区  $n$  中所有存在干扰的用户统一建模得到的发送信号, $A_{n,m} = (a_{n,1,m}, a_{n,2,m}, \dots, a_{n,K_n,m})$  表示小区  $n$  中所有存在干扰的用户到目标小区中天线(天线阵)的整体系统传输矩阵( $S_n$  和  $A_{n,m}$  的具体构建方式可参考文献[10]),则式(1)可改写为:

$$r_m = A_{m,m} S_m + \sum_{n=1, n \neq m}^M A_{n,m} S_n + n_m \quad (2)$$

由式(2)可知,由于广义分布式网络架构中相邻小区多用户干扰的存在,目标小区  $m$  中天线(天线阵)的接收信号共包含三部分:本小区用户的信号、相邻小区用户的干扰信号及加性高斯白噪声.其中,相邻小区用户的干扰信号会严重影响系统上行链路的性能,因而,是本文研究的重点.

## 3 分布式架构的多用户干扰抑制

本节基于广义分布式网络架构,利用其集中式信号处理的特点,提出了以下两种适用于该架构的多用户干扰抑制算法,即 3.1 节的交叉迭代联合检测(CI-JD, Crossed Iterative Joint Detection)算法和 3.2 节的全局联合检测(G-JD, Global Joint Detection)算法.

### 3.1 交叉迭代联合检测(CI-JD)

交叉迭代联合检测算法借鉴了 V-BLAST 系统中多天线干扰消除的思想<sup>[11,12]</sup>,将多用户干扰等效为多天线干扰,在 AP 端,利用传统的单小区联合检测与并行迭代干扰消除相结合的方式,通过多用户估计信号的传递及更新,逐步减小相邻小区用户对本小区用户的干扰,使广义分布式网络架构下的多用户联合检测结果趋于收敛,其算法示意图如图 2 所示.

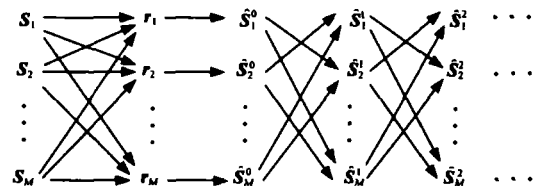


图 2 交叉迭代联合检测算法的示意图

结合本文第 2 节所述系统模型,CI-JD 算法的具体描述如下:

(1)初始化:

$$m = 1 \sim M \quad (3a)$$

$$\mathbf{G}_{m,m} = (\mathbf{A}_{m,m})^\dagger \quad (3b)$$

$$\hat{\mathbf{S}}_m^0 = \mathbf{G}_{m,m} \mathbf{r}_m \quad (3c)$$

$$m \leftarrow m + 1 \quad (3d)$$

(2) 交叉迭代:

$$l = 1 \sim L \quad (3e)$$

$$m = 1 \sim M \quad (3f)$$

$$\mathbf{r}_m^l = \mathbf{r}_m - \sum_{n=1, n \neq m}^M \mathbf{A}_{n,m} \text{gmap}(\hat{\mathbf{S}}_n^{l-1}) \quad (3g)$$

$$\hat{\mathbf{S}}_m^l = \mathbf{G}_{m,m} \mathbf{r}_m^l \quad (3h)$$

$$m \leftarrow m + 1 \quad (3i)$$

$$l \leftarrow l + 1 \quad (3j)$$

$$\hat{\mathbf{S}}_m^L = ((\hat{s}_{m,1}^L)^T, (\hat{s}_{m,2}^L)^T, \dots, (\hat{s}_{m,K_m}^L)^T)^T$$

其中,  $(\mathbf{g})^\dagger$  表示矩阵的广义逆,  $(\mathbf{g})^T$  表示向量的转置,  $\text{map}(\mathbf{g})$  表示星座映射,  $L$  为总的迭代次数。

显然, 该算法没有改变传统单小区联合检测的系统模型, 只针对每个小区各自的系统传输矩阵求逆(广义逆), 在初始阶段对各小区中多用户信号进行检测时, 容忍相邻小区干扰用户的影响, 此后, 通过相邻小区之间的并行迭代干扰消除逐步抑制多用户干扰, 提高检测的可靠性。分析表明, 当相邻小区的用户对本小区用户干扰不大时, 首次检测得到的本小区用户信息较为准确, 此时, 只进行少量次数的交叉迭代干扰消除即可获得精确的检测结果, 且由于干扰消除过程并不需要额外的矩阵求逆(广义逆)运算, 该算法可在复杂度增加不多的前提下显著改善系统性能。

### 3.2 全局联合检测(G-JD)

在广义分布式网络架构下, CI-JD 算法虽可逐步消除相邻小区的多用户干扰, 但其应用仍存在一定的局限性, 如, 若首次检测的结果不准确, 则容易在后续交叉迭代干扰消除过程中引入误差传播, 不便于获得理想的系统性能。

针对该问题, 考虑到广义分布式网络架构中 AP 端集中处理其所连接的所有天线(天线阵)上接收信号的特点, 对多个相邻小区中相互干扰的用户进行统一建模, 并在此基础上提出全局联合检测算法, 该算法的系统模型构建如下:

$$\mathbf{r}_C = \mathbf{A}_C \mathbf{S}_C + \mathbf{n}_C \quad (4)$$

其中,  $\mathbf{S}_C = ((S_1)^T, (S_2)^T, \dots, (S_M)^T)^T$  表示对干扰小区集合中所有元素小区统一建模后得到的多用户发送信号;  $\mathbf{r}_C = ((r_1)^T, (r_2)^T, \dots, (r_M)^T)^T$  表示在广义分布式网络架构下 AP 端集中式处理的等效接收信号;  $\mathbf{n}_C = ((n_1)^T, (n_2)^T, \dots, (n_M)^T)^T$  表示相应的等效加性高斯白噪声;  $\mathbf{A}_C$  为扩充后的多小区多用户系统传输矩阵, 其构建方式如下:

$$\mathbf{A}_C = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{1,1} & \mathbf{A}_{2,1} & \cdots & \mathbf{A}_{M,1} \\ \mathbf{A}_{1,2} & \mathbf{A}_{2,2} & \cdots & \mathbf{A}_{M,2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{A}_{1,M} & \mathbf{A}_{2,M} & \cdots & \mathbf{A}_{M,M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{1,1,1} & a_{1,2,1} & \cdots & a_{1,K_1,1} & a_{2,1,1} & \cdots & a_{M,K_M,1} \\ a_{1,1,2} & a_{1,2,2} & \cdots & a_{1,K_1,2} & a_{2,1,2} & \cdots & a_{M,K_M,2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{1,1,M} & a_{1,2,M} & \cdots & a_{1,K_1,M} & a_{2,1,M} & \cdots & a_{M,K_M,M} \end{bmatrix} \quad (5)$$

基于式(4)所述模型, 相邻小区中多用户信号的估计值可通过对  $\mathbf{A}_C$  的一次求逆(广义逆)过程而获得, 其求解表达式为:  $\hat{\mathbf{S}}_C = (\mathbf{A}_C)^\dagger \mathbf{r}_C$  (6)

全局联合检测算法的系统模型可看作传统单小区联合检测系统模型的扩充, 其充分反映了多小区多用户之间的信号传输关系。该算法将干扰用户与目标用户同等对待的方式, 可有效抑制相邻小区的多用户干扰, 且在干扰较强时对系统性能的改善更加显著。此外, 由于分布式天线(天线阵)的空间独立性, G-JD 算法中扩充系统模型的构建还可在多用户信号检测的同时获得一定的分集增益。

### 3.3 检测性能分析

本文 3.1 节和 3.2 节分别给出了两种广义分布式网络架构下多用户联合干扰抑制的算法, 为进一步分析其性能, 以第  $m$  个小区中第  $k$  个用户的信号检测为例, 分别考察两种算法的后验信号干扰噪声比(SINR, Signal to Interference and Noise Ratio), 并给出相应的解析表达式。

#### 3.3.1 CI-JD 算法

CI-JD 算法在初始检测阶段需容忍相邻小区的多用户干扰, 此时信号检测的 SINR 可表示为:

$$\gamma_{CI}^0 = \frac{P_{m,k}}{(\mathbf{G}_{m,m} (\sum_{n=1, n \neq m}^M \mathbf{A}_{n,m} P_n \mathbf{A}_{n,m}^H) \mathbf{G}_{m,m}^H)_{k,k} + (\mathbf{A}_{m,m}^H \mathbf{A}_{m,m})_{k,k}^{-1} \sigma^2} \quad (7)$$

其中,  $P_{m,k}$  表示第  $m$  个小区中第  $k$  个用户的信号平均发送功率,  $P_n = \text{diag}(P_{n,1}, P_{n,2}, \dots, P_{n,K_n})$ ,  $(\mathbf{g})_{k,k}$  表示矩阵中第  $k$  行第  $k$  列的元素。

由 3.1 节可知, CI-JD 算法通过多级交叉迭代干扰消除, 逐步抑制相邻小区的多用户干扰, 在第  $l$  次迭代时, 信号检测的 SINR 可表示为:

$$\gamma_{CI}^l = \frac{P_{m,k}}{(\boldsymbol{\Sigma}_l \boldsymbol{\Sigma}_l^H)_{k,k} + (\mathbf{A}_{m,m}^H \mathbf{A}_{m,m})_{k,k}^{-1} \sigma^2} \quad (8)$$

其中,  $\boldsymbol{\Sigma}_l = \mathbf{G}_{m,m} (\sum_{n=1, n \neq m}^M \mathbf{A}_{n,m} (\mathbf{S}_n - \text{map}(\hat{\mathbf{S}}_n^{l-1})))$ 。

#### 3.3.2 G-JD 算法

G-JD 算法将目标用户与干扰用户的信息囊括于同

一个扩充的系统矩阵,其信号检测的 SINR 可表示为:

$$\gamma_c = \frac{P_{m,k}}{(A_G^H A_G)^{-1}_{j,j} \sigma^2} \quad (9)$$

其中,  $j = \sum_{n=1}^{m-1} K_n + k$ .

### 3.4 运算复杂度分析

针对上述两种广义分布式网络架构下的多用户联合干扰抑制算法,本节将分析其各自的运算复杂度,并与传统的单用户联合检测进行比较.

假定采用广义分布式网络架构的 TDD 系统中各分布式小区有  $N_m (m = 1, 2, \dots, M)$  根天线,所有用户均为单天线配置,扩频码长为  $Q$ ,数据突发处理块长为  $B$ ,信道多径数为  $W$ .若以 Greville 迭代法求矩阵的广义逆为例进行分析,则传统单小区联合检测、交叉迭代联合检测及全局联合检测的运算复杂度如表 1 所示.

表 1 不同算法的运算复杂度比较

实数乘法	
JD	$\sum_{m=1}^M [Gre\_M(X_1(m), Y_1(m)) + Q\_M(X_1(m), Y_1(m))]$
CI-JD	$\sum_{m=1}^M [Gre\_M(X_1(m), Y_1(m)) + (L-1)gQ\_M(X_1(m), Y_1(m)) + Lg \sum_{n=1, n \neq m}^M Q\_M(Y_1(m), X_1(n))]$
G-JD	$Gre\_M(X_2, Y_2) + Q\_M(X_2, Y_2)$
实数加法	
JD	$\sum_{m=1}^M [Gre\_A(X_1(m), Y_1(m)) + Q\_A(X_1(m), Y_1(m))]$
CI-JD	$\sum_{m=1}^M [Gre\_A(X_1(m), Y_1(m)) + (L-1)gQ\_A(X_1(m), Y_1(m)) + Lg \sum_{n=1, n \neq m}^M [Q\_A(Y_1(m), X_1(n)) + 2Y_1(m)]]$
G-JD	$Gre\_A(X_2, Y_2) + Q\_A(X_2, Y_2)$

其中,  $Gre\_M(X, Y) = 6X^2Y - 2XY$

$$Gre\_A(X, Y) = 6X^2Y - 4XY - X^2$$

$$Q\_M(X, Y) = 4XY$$

$$Q\_A(X, Y) = 2X(2Y - 1)$$

$$X_1(m) = K_m B, Y_1(m) = N_m (BQ + W - 1)$$

$$X_2 = \left( \sum_{m=1}^M K_m \right) B, Y_2 = \left( \sum_{m=1}^M N_m \right) (BQ + W - 1)$$

### 4 仿真结果

为验证本文所述 CI-JD 算法和 G-JD 算法在改善相邻小区多用户干扰方面的作用,同时进一步评估广义分布式网络架构下不同多用户联合干扰抑制算法的性能,特设计如下仿真.

其中,为简单起见,考虑干扰小区集合中只有两个连接到同一 AP 的元素小区,且各小区中有且仅有一个与相邻小区存在干扰的用户,即  $M = 2, K_1 = 1, K_2 = 1$ . 针对可能出现的最差情况进行仿真,即相互干扰的用

户采用相同的 OVFSF 码扩频,然后以不同的扰码加扰.其他仿真参数如表 2 所示.

表 2 链路仿真参数

仿真参数	数值
载频	3.5GHz
带宽	1.6MHz
扩频系数	16
调制方式	QPSK
移动台车速	36km/h
信道模型/信道估计	4 径瑞利信道/理想信道估计
多用户干扰功率	20%
交叉迭代次数	4

图 3 给出了广义分布式网络架构下不同多用户联合干扰抑制算法的性能比较.

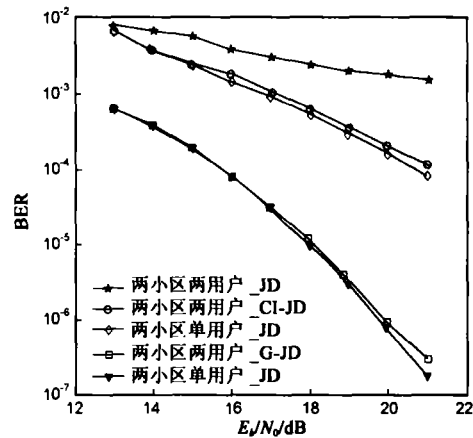


图 3 广义分布式网络架构下不同多用户联合干扰抑制算法的性能比较

根据图 3 所示仿真结果,该系统条件下,传统的单小区联合检测算法在误码率接近  $10^{-3}$  时,性能出现地板;而 CI-JD 算法与 G-JD 算法由于对相邻小区的多用户干扰均有较好的抑制作用,其性能随比特能量噪声比 ( $E_b/N_0$ ) 的增加而明显改善,其中 G-JD 算法的干扰抑制作用更胜一筹,在误码率达到  $10^{-4}$  时,其比 CI-JD 算法有约 5dB 的性能增益.

由图 3 还可看出,在两小区两用户的情况下,传统的单小区联合检测算法由于不能消除相邻小区的多用户干扰,使得系统性能较差;CI-JD 算法通过多用户之间的交叉迭代干扰消除,有效抑制了相邻小区用户的干扰,在迭代次数为 4 时,可逼近单小区(无多小区分集)单用户的系统性能,即相当于相邻小区中多用户干扰的影响可忽略;G-JD 算法相比于 CI-JD 算法,在同样情况下可获得更优的系统性能,因其充分利用了干扰用户的信息,且借助于分布式天线(天线阵)的空间独立性,在抑制相邻小区多用户干扰的同时,获得一定的分集增益,接近于分布式两小区单用户考虑分集接收时的系统性能.

综上,本节给出了广义分布式网络架构下,所提两

种多用户联合干扰抑制算法的性能比较,可以看出,CI-JD 算法与 G-JD 算法均能不同程度地抑制相邻小区的多用户干扰,显著提高系统性能.但在实际应用中,用户信号到达分布式天线(天线阵)的路径损耗与阴影衰落会有所不同,其中,路径损耗可等效为相应小尺度衰落信道功率的衰减,而阴影衰落将引起信道分布的改变,该情况下的仿真结果有待进一步研究.

## 5 结论

本文针对基于 CDMA 多址方式的广义分布式网络架构,利用其在 AP 处集中式信号处理的特点,从跨多个分布式天线(天线阵)的角度出发,构建了分布式多小区的多用户干扰模型,提出了两种适用于该架构的多用户联合干扰抑制算法.其中,CI-JD 算法通过多用户之间的并行交叉迭代干扰消除,逐步抑制相邻小区的多用户干扰;而 G-JD 算法通过对目标用户与干扰用户的统一建模,在抑制相邻小区多用户干扰的同时,一次性求解出所有用户的信息.

不失一般性,本文的研究成果也适用于采用 OFDMA 多址方式的广义分布式网络架构,为该架构在下一代移动通信系统中的进一步广泛应用提供了可靠的理论依据及解决办法.

## 参考文献:

- [1] 陶小峰,戴佐俊,唐超,等.广义蜂窝网络结构及切换模式——群小区及群切换[J].电子学报,2004,32(12A):114-117.  
Tao Xiaofeng, Dai Zuojun, Tang Chao, et al. Generalized cellular network infrastructure and handover mode-group cell and group handover[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(12A): 114-117. (in Chinese)
- [2] H J Kim, J P Linnartz. Virtual cellular network: a new wireless communications architecture with multiple access ports[J]. Wireless Personal Communications, 1999, 10(3): 287-307.
- [3] Zhou Shidong, Zhao Ming, Xu Xibin, et al. Distributed wireless communication system: a new architecture for future public wireless access[J]. IEEE Communication Magazine, 2003, 41(3): 108-113.
- [4] Yu Xiaohu, Chen Guoan, Chen Ming, et al. The FuTURE project in China[J]. IEEE Communications Magazine, 2005, 43(1): 70-75.
- [5] S Verdu. Minimum probability of error for asynchronous Gaussian multiple access channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1986, 32(1): 85-96.
- [6] A Klein, P W Baier. Linear unbiased data estimation in mobile radio systems applying CDMA[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1993, 11(7): 1058-1066.
- [7] A Klein, G K Kaleh, P W Baier. Zero forcing and minimum mean-square error equalization for multi-user detection in code-division multiple-access channels[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1996, 45(2): 276-287.
- [8] M Weckerle, A Papathanassiou. Performance analysis of multi-antenna TD-CDMA receivers with estimation and consideration of the interference covariance matrix[J]. International Journal of Wireless Information Networks, 1999, 6(3): 157-170.
- [9] M Weckerle, T Weber, P W Baier, J Oster. Space-time signal processing utilizing multi-step joint detection for the uplink of time division CDMA[A]. In Proc International Conference on Communication Technologies[C]. Beijing, China, 2000. 1330-1335.
- [10] 陶小峰,印海莹,徐璿,等.广义 MIMO 通用信道矩阵建模[J].北京邮电大学学报,2005,28(5):47-51.  
Tao Xiaofeng, Yin Haiying, Xu Jin, et al. Modeling of the generalized MIMO channel matrix[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2005, 28(5): 47-51. (in Chinese)
- [11] 刘宝玲,徐璿,陶小峰,等.基于广义分布式天线阵的 MIMO 检测[J].北京邮电大学学报,2005,28(5):38-41.  
Liu Baoling, Xu Jin, Tao Xiaofeng, et al. MIMO detection algorithm based on generalized distributed antenna array systems[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2005, 28(5): 38-41. (in Chinese)
- [12] 陶小峰,俞追专,秦海燕,等.V-BLAST 的并行译码[J].电子学报,2003,31(7):990-993.  
Tao Xiaofeng, Yu Zhuizhuan, Qin Haiyan, et al. Parallel detection algorithm of V-BLAST[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(7): 990-993. (in Chinese)

## 作者简介:



徐 璿 女,1981年2月生于山东青岛,北京邮电大学博士研究生.主要研究方向为宽带无线通信系统中的多天线技术、空时编码技术、OFDM 多载波技术及链路优化等.  
E-mail: maggiexu1981@gmail.com



陶小峰 男,1970年5月生于湖北黄冈,博士,北京邮电大学副教授,泛网无线通信教育部重点实验室(北京邮电大学)副主任,国家 863 计划通信技术主题 FuTURE 未来移动通信计划 TDD 特别工作组组长.主要研究方向为未来移动通信系统中的先进信号处理技术及新型网络架构. E-mail: taoxf@bupt.edu.cn