



多小区 OFDMA 系统中基于 POMDP 的干扰协调^{*}

魏 强, 杨 涛, 冯 辉, 胡 波
(复旦大学电子工程系 上海 200433)

摘 要: 对 OFDMA 系统中的干扰协调进行了研究, 提出了一种基于部分可观察马尔可夫决策过程理论的动态干扰协调算法。该算法结合干扰的统计模型和信道的信干噪比对边缘用户进行信道分配。仿真结果表明, 该算法能够有效地使边缘用户避开邻小区干扰, 而且不需要小区间交互, 节省了系统开销。另外, 利用粒子滤波法建立了 SINR 和干扰的似然关系, 不需要系统额外对干扰进行测量。

关键词: OFDMA 系统; 多小区; 小区间干扰协调; 部分可观察马尔可夫决策过程

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2013.04.009

Interference Coordination Based on POMDP in Multi-Cell OFDMA System

Wei Qiang, Yang Tao, Feng Hui, Hu Bo
(Department of Electronics Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: The inter-cell interference coordination (ICIC) of OFDMA system was studied, and a dynamic ICIC algorithm based on the theory of partially observable Markov decision process (POMDP) was proposed. The statistic model of interference and SINR of channel was combined to allocate channels for cell-edge user in this algorithm. Simulation results show that the proposed scheme can efficiently avoid interference for the cell-edge user. Since this algorithm avoids the coordination between cells, the system overhead is saved. Furthermore, a likelihood relation between SINR and interference was established by using particle filter, so there was no necessary for system to measure the interference.

Key words: OFDMA system, multi-cell, inter-cell interference coordination, partially observable markov decision process

1 引言

正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)技术因为其高频谱利用率和低码间干扰等特点,被认为是下一代通信系统(如 LTE 和 WiMAX),所采用的主要技术。在 OFDMA 系统中,为了实现最大系统吞吐量,希望使频率复用因子为 1 或者尽量接近 1,也就是使系统中

的所有小区可以使用相同的频带。这样,就带来了小区间的同频干扰问题。由于 OFDMA 系统中对小区内各子信道间的正交性有严格的要求,因此小区内干扰较小,影响系统性能的主要是小区间干扰。

对小区间干扰抑制或消除的研究已经有很多^[1],如传统的分簇技术^[2],以频率复用因子 3 为例,它将系统带宽划分为 3 段大小相同的频带,不同小区使用不同的频带,从

^{*} 国家自然科学基金资助项目(No.60972024),国家科技重大专项基金资助项目(No.2011ZX03003-001-02, No.2012ZX03001007-003, No.2013ZX03003006-003)



而消除小区间干扰,但是每个小区只能使用系统带宽的 $1/3$,对频带造成极大浪费。参考文献[3]介绍了一种部分频率复用(fractional frequency reuse, FFR)法,它将用户区分为中心用户和边缘用户,中心用户距离服务基站较近,受到干扰的影响小,所以不同小区可以使用相同的频带,而边缘用户受到影响较大,需要分配不同的频带以消除干扰。软频率复用(soft frequency reuse, SFR)^[4]法是 FFR 法的一种变形。它们都属于静态的干扰协调机制,该机制不但需要在系统初始化时对系统带宽进行预规划,而且对变化负载的适用性不足。动态干扰协调能够根据负载的分布调整频谱资源的分配。参考文献[5,6]利用最优化方法进行资源分配,但是要求基站间协调处理,增加了额外的信令开销。参考文献[7]利用去除掉主要干扰后的效用矩阵为边缘用户分配信道,但是该模型需要首先确定所有干扰值的大小,这在实际系统中并不能满足。

本文利用干扰信息的统计模型,设计了一种基于 POMDP (partially observable markov decision process, 部分可观察马尔可夫决策过程)的干扰协调策略。基于此策略,基站可以为边缘用户分配信道质量好且干扰存在概率小的信道,从而有效地提高边缘用户的服务质量。该策略利用实际系统中调度所需的信道状态信息作为观测值,利用粒子滤波法建立了观察值和干扰间的似然关系,结合小区自身的干扰统计模型为边缘用户进行信道分配,避免了不同小区的干扰,节省了系统开销。

2 系统及模型

建立一个如图 1 所示的下行的 OFDMA 多小区系统,该系统由 19 个正六边形的蜂窝小区组成,每个小区的中心有一个基站,每个基站配有一个功率为 P_k 的全向天线,系统采用同频组网方式。当用户处于小区中心时,距离服务基站较近,接收信号的信噪比较大,可以认为不受邻小区干扰的影响,而当用户处于小区的边缘时,受到邻小区信号干扰的影响较大。例如图 1 中,处于小区 1 中的边缘用户 UE_1 可能被小区 2~7 干扰(这取决于用户的位置)。

现在,假设小区中可以给边缘用户使用的信道数为 N ,每个信道的带宽为 W_b 。基站需要合理地给边缘用户选择其中的 L 个信道,从而避免来自邻小区的干扰。对于邻小区在这 N 个信道上的干扰情况,可以根据统计信息建立一个离散的马尔可夫过程,它包含 $M=2^N$ 个状态,其中,在时刻 t 的干扰状态可以表示为 $S(t)=[s_1(t), s_2(t), \dots, s_N(t)]$ 。 $s_i(t)$ 可

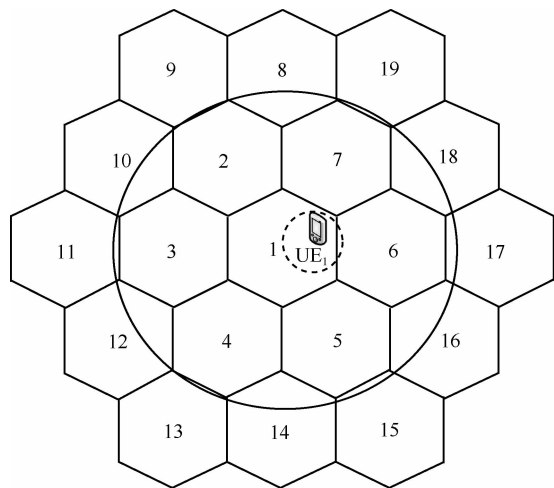


图 1 网络布局

以取 0,1 两个值, $s_i(t)=1$, 表示信道 i 存在来自邻小区的干扰; $s_i(t)=0$, 表示不存在来自邻小区的干扰。状态 $S(t)$ 的转移符合马尔可夫过程。笔者的目的就是利用该模型找到一种分配策略,不但使得边缘用户能够避开干扰,系统的频率复用因子尽量接近 1,而且使基站在分配资源时能够独立进行,从而减少基站间交互的信令开销。

策略的基本过程为,当一个边缘用户接入基站时,基站获得用户的信道状态信息,从而能够估计出该用户在每个信道上的信干噪比(SINR);然后基站利用该 SINR 和邻小区干扰的统计信息估计边缘用户现在所处的干扰状态 $S(t)$;继而根据干扰状态和 SINR 值为用户分配能够避开干扰且获得最大码率的信道。

3 POMDP 模型

本节主要介绍基于 POMDP 的干扰协调模型。可以看到第 2 节介绍的干扰协调可以被建模为一个 POMDP 问题,然后就可以通过分析 POMDP 得到干扰协调的结果。

3.1 POMDP 的组成

POMDP 模型可表示为六元组: $\langle S, A, O, T, \Omega, R \rangle$ 。其中 $S=\{Z_1, \dots, Z_M\}$, 表示状态集合,即小区所处的干扰状态的所有可能,当存在 N 个信道时,状态数 $|S|=M=2^N$; $A=\{A\}$ 表示行动集合,也就是基站为边缘用户选择的 L 个信道,可能的行动有 $|A|=C_N^L$ 个,最终目标就是确定其中哪一行动为最优行动; O 表示观察值集合,本文中观察值是每个信道 i 上的 SINR,元素 $\vec{o}(t)=[SINR_1(t), \dots, SINR_N(t)]$,其中 $SINR_i(t)$ 表示时刻 t 信道 i 上的 SINR; $T=\{p_{ij}\}$ 表示状态转移概率的集合,其中元素 p_{ij} 表示干扰状态从 Z_i 转移到 Z_j 的概率。在

OFDMA 系统中, 状态概率可以由基站从统计信息中学习 (即使未知, 问题也可以转化为转移概率未知的 POMDP 模型^[8], 本文不再讨论); Ω 表示观察似然概率的集合, 它建立了观察值与状态之间的关系, 其中元素 $\Omega(\vec{o}(t)|Z_j)$ 表示干扰状态为 Z_j 时观察到 $\vec{o}(t)$ 的似然概率, 它的计算采用粒子滤波的方法 (见 3.2 节); R 表示回报函数, 即在当前状态和行动下所取得的回报, 回报的定义有很多不同的方式, 这取决于设计目的, 它一般与系统状态和所选行动有关, 在干扰协调中, 是为了让边缘用户避开干扰, 同时能够获得较大的传输速率, 所以定义为:

$$R_{j,A}(t) = \sum_{i \in A} [1 - s_i(t)] c(i, t) \quad (1)$$

其中, j 表示现在所处的干扰状态 Z_j , $s_i(t)$ 表示行动中 所选信道 i 的取值, $c(i, t)$ 表示时刻 t 在第 i 个信道边缘用户所能获得的传输速率, 表达式为:

$$c(i, t) = W_B \log[1 + \text{SINR}_i(t)] \quad (2)$$

3.2 观察值和其似然概率

本文中, 观察值是边缘用户反馈给基站的所有信道上的 SINR。其中, 噪声就是边缘用户信道上的高斯白噪声, 而干扰来自与其相邻的 K 个小区。第 i 个信道上的 SINR 计算如下:

$$\text{SINR}_i(t) = \frac{P_{\text{tx}} |h_i(t)|^2}{|n(t)|^2 + \sum_{k \in K} \varepsilon_i^k P_{\text{tx}} |h_i^k(t)|^2} \quad (3)$$

其中, P_{tx} 表示所有基站的发送功率, $h_i(t)$ 表示服务基站与边缘用户之间第 i 个信道的信道增益, 这里假设它是瑞利信道, 方差为 $\sigma_{h_i}^2$; $n(t)$ 表示加性复高斯白噪声, 方差为 σ_n^2 ; $\sum_{k \in K} \varepsilon_i^k P_{\text{tx}} |h_i^k(t)|^2$ 表示边缘用户受到的干扰, 其中 $\varepsilon_i^k \in \{0, 1\}$ 用来指示有没有来自小区 k 的干扰, 如果 $\varepsilon_i^k=0$ 表示小区 k 中没有使用信道 i , 那么在第 i 个信道上小区 k 对边缘用户没有干扰; $h_i^k(t)$ 表示第 k 个小区的基站与边缘用户之间的信道增益, 它也是瑞利信道, 方差为 $\sigma_{h_i^k}^2$ 。很容易理解, 在相邻的 K 个小区中, 距离边缘用户最近的小区的干扰将会最强烈, 对边缘用户的影响最大^[9], 因此把它作为主要干扰, 忽略次要干扰。将主要干扰定义为 I , 那么 $\text{SINR}_i(t)$ 的表达式变为:

$$\text{SINR}_i(t) = \frac{P_{\text{tx}} |h_i(t)|^2}{|n(t)|^2 + \varepsilon_i^I P_{\text{tx}} |h_i^I(t)|^2} \quad (4)$$

为了使表达式更加直观, 令 $|I_i(t)| = P_{\text{tx}} |h_i^I(t)|^2$, 用 $I_i(t)$ 表示干扰信号。式(4)可以写为:

$$\text{SINR}_i(t) = \begin{cases} \frac{P_{\text{tx}} |h_i(t)|^2}{|n(t)|^2 + |I_i(t)|^2}, & \text{主干扰存在} \\ \frac{P_{\text{tx}} |h_i(t)|^2}{|n(t)|^2} = \text{SINR}_i(t), & \text{主干扰不存在} \end{cases} \quad (5)$$

观察值 $\vec{o}(t)$ 通过观察模型 $\Omega(\vec{o}(t)|Z_j)$ 决定对于干扰状态的判断, 是 POMDP 的关键部分, 笔者将通过粒子滤波法计算观察似然概率。假设现在的观察值为 $\vec{o}(t)$, 干扰状态为 Z_j , 首先取元素 $\vec{o}(t)$ 的倒数组成新的向量 $\vec{x}(t)$, 用 $p(\vec{x}(t)|Z_j)$ 代替 $p(\vec{o}(t)|Z_j)$, 可得到:

$$p(\vec{x}(t)|Z_j) = \iint p(\vec{x}(t)|\vec{h}(t), \vec{I}(t), Z_j) \cdot p(\vec{h}(t), \vec{I}(t)) d(\vec{h}(t), \vec{I}(t)) \quad (6)$$

信道之间空间独立, 所以 $\vec{h}(t)$ 和 $\vec{I}(t)$ 相互独立, 则 $p(\vec{h}(t), \vec{I}(t)) = p(\vec{h}(t)) \cdot p(\vec{I}(t))$, 那么式(6)可以变为:

$$\begin{aligned} p(\vec{x}(t)|Z_j) &= \iint p(\vec{x}(t)|\vec{h}(t), \vec{I}(t), Z_j) p(\vec{h}(t)) p(\vec{I}(t)) d\vec{h}(t) d\vec{I}(t) \\ &= \iint p(\vec{x}(t)|\vec{h}(t), \vec{I}(t), Z_j) p(\vec{h}(t)) d\vec{h}(t) p(\vec{I}(t)) d\vec{I}(t) \end{aligned} \quad (7)$$

对于这个双重积分的运算, 很难用闭合表达式表示出来, 因此以样本均值代替积分运算, 即粒子滤波法。其中, $\vec{h}(t)$ 和 $\vec{I}(t)$ 为两个方差不同的瑞利分布。首先, 产生 N 个服从 $p(\vec{I}(t))$ 分布的粒子 $\vec{I}_n$ 和 M 个服从 $p(\vec{h}(t))$ 分布的粒子 $\vec{h}_m$, 将它们作为已知样本代入式(7)中, 代替原来的积分运算, 如式(8)所示:

$$\begin{aligned} p(\vec{x}(t)|Z_j) &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \int p(\vec{x}(t)|\vec{h}(t), \vec{I}_n, Z_j) p(\vec{h}(t)) d\vec{h}(t) \\ &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left(\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M p(\vec{x}(t)|\vec{h}_m, \vec{I}_n, Z_j) \right) \end{aligned} \quad (8)$$

当 $\vec{h}_m, \vec{I}_n, Z_j$ 都确定时, 条件概率 $p(\vec{x}(t)|\vec{h}_m, \vec{I}_n, Z_j)$ 所服从的分布与 $|n(t)|^2$ 相同。 $n(t)$ 为复高斯白噪声, 所以 $|n(t)|^2$ 服从瑞利分布 $|n(t)|^2 \sim \text{Rayleigh}(\sigma_n)$, 那么 $|n(t)|^2$ 服从伽马分布 $|n(t)|^2 \sim \Gamma(1, 2\sigma_n^2)$ 。从伽马分布中得出似然值 $p(\vec{x}(t)|\vec{h}_m, \vec{I}_n, Z_j)$ 并代入式(8)中, 就可以计算出观察似然概率 $\Omega(\vec{o}(t)|Z_j)$ 。

3.3 充分统计量

对于一个 POMDP 模型来说, 潜在马尔可夫过程所处的内部状态未知。在时刻 t , 对于干扰状态的判断都是基于以往的决策和观察值, 估计结果用信度状态 $\mathbf{B}(t) = [b_1(t), \dots,$



$b_M(t)]$ 表示,其中,信度 $b_j(t)$ 表示在时刻 t 边缘用户处于干扰状态 Z_j 的概率。对于信度的更新可以由前一时刻的信度、干扰状态的转移概率和观察值共同确定,如式(9)所示:

$$b_j(t) = \eta \Omega(\bar{o}(t) | Z_j) \sum_{i=1}^M b_i(t-1) p_{i,j} \quad (9)$$

其中, η 为归一化常数, $\eta = \sum_{j=1}^M \Omega(\bar{o}(t) | Z_j) \sum_{i=1}^M b_i(t-1) p_{i,j}$ 。

同时,回报也需要做相应的调整,变为关于信度状态 $\mathbf{B}(t)$ 的函数,如式(10)所示:

$$r(\mathbf{B}(t), \mathbf{A}) = \sum_{j=1}^M b_j(t) R_{j,A}(t) \quad (10)$$

在参考文献[10]中已经证明,信度状态 $\mathbf{B}(t)$ 是设计时刻 t 最优行动 $\mathbf{A}(t)$ 的充分统计量。而一个 POMDP 过程的策略 π 是指在 T 个时刻中与 $\mathbf{B}(t)$ 相对应的所有行动 $\mathbf{A}(t)$ 所组成的序列,如式(11)所示:

$$\pi = [\mu_1, \dots, \mu_T] \quad (11)$$

其中 $\mu_t: \mathbf{B}(t) \rightarrow \mathbf{A}(t)$, 这里的行动 $\mathbf{A}(t)$ 也就是干扰协调中对边缘用户所分配的信道。这样,一个干扰协调问题就变成了一个有限长度的 POMDP 了。

4 基于 POMDP 的信道分配

在这一节,将介绍在 POMDP 框架下信道的分配策略问题,也就是求解 POMDP 的过程。

4.1 最优的信道分配策略

求解 POMDP 问题就是找到关于它的最优策略 π^* , 最优策略 π^* 是指使边缘用户在 T 个时刻中总回报的期望最大的策略,可用式(12)表示:

$$\pi^* = \arg \max_{\pi} E_{\pi} \left[\sum_{t=1}^T R_{j(t), A(t)} | \mathbf{B}(1) \right] \quad (12)$$

其中, E_{π} 表示在策略为 π 时的条件期望, $\mathbf{B}(1)$ 表示初始时刻的信度状态。

一般借助信度状态的效用函数来分析最优策略,基本思想是计算出每一个信度状态的效用值,然后通过状态效用值来选出每个信度状态中的最优行动^[1]。效用函数定义为:

$$V(\mathbf{B}(t)) = E \left[\sum_{t=1}^T r(\mathbf{B}(t), \mathbf{A}) | \pi, \mathbf{B}(t) \right] \quad (13)$$

粗略地说,一个信度状态的效用值是可能跟随它出现的所有状态序列的期望效用值,是一种“长期”总回报。最

优行动就是使期望效用最大的行动。在本文的 POMDP 框架中,效用值可以写为:

$$V(\mathbf{B}(t)) = \max_{\mathbf{A}} [r(\mathbf{B}(t), \mathbf{A}) + \sum_{i=1}^M b_i \sum_{j=1}^M p_{i,j} \int \Omega(\bar{o}(t+1) | Z_j) d\bar{o}(t+1) V(\mathbf{B}(t+1))] \quad (14)$$

信度状态 $\mathbf{B}(t)$ 的效用值是在该状态得到的立即回报加上在下一个信度状态的期望效用值,式(14)也被称为 Bellman 等式。通过求解 Bellman 等式得到最优行动。在式(14)中,下一信度状态的期望效用值与当前行动 $\mathbf{A}$ 无关,所以最优行动由立即回报决定,即最优行动就是使 $r(\mathbf{B}(t), \mathbf{A})$ 最大的行动。由此可知,在本文框架下,最优策略是一种贪婪策略。

4.2 简化模型

由上文可知,信度状态 $\mathbf{B}$ 的维数随着信道数 N 呈指数增长,当 N 很大时计算最优策略所需的计算量变得难以接受。为了解决这一问题,看一下当 N 个信道独立时,可以进行的一些简化运算。

用 ω_i 表示信道 i 上存在干扰的概率,因为信道独立, b_j 就可以用 ω_i 唯一地表示出来。例如,现在有两个信道 $i = \{1, 2\}$, 干扰状态就有 $\{00, 01, 10, 11\}$ 4 种可能,信度状态 $\mathbf{B}$ 的维数为 4。当状态 $Z_j = 10$ 时, $b_j = \omega_1 \cdot (1 - \omega_2)$, 其他 3 个信度的计算方式相同。所以,可以用 $\Phi = [\omega_1, \dots, \omega_N]$ 作为充分统计量来求解信道分配问题,而它的维数仅与信道数 N 成线性关系,这样可以大大简化计算量。

信道独立时,信道状态的转移也是独立的,用 α_i 表示信道 i 从状态 0 转移到状态 1 的概率,用 β_i 表示保持状态 1 不变的概率。那么关于信度状态 Φ 的更新变为:

$$\begin{aligned} \omega_i(t) &= \eta p(x_i(t) | s_i(t) = 1) [\omega_i(t-1) \beta_i + (1 - \omega_i(t-1)) \alpha_i], \\ \eta &= p(x_i(t) | s_i(t) = 1) [\omega_i(t-1) \beta_i + (1 - \omega_i(t-1)) \alpha_i] + \\ &\quad p(x_i(t) | s_i(t) = 0) [\omega_i(t-1) (1 - \beta_i) + (1 - \omega_i(t-1)) (1 - \alpha_i)] \end{aligned} \quad (15)$$

$\omega_i(t)$ 就是指时刻 t 信道 i 存在干扰 (即 $s_i = 1$) 的概率,为归一化常数, $x_i(t) = \frac{1}{\text{SINR}_i(t)}$ 为信道 i 的信干噪比的倒数。

当 $s_i = 1$ 时:

$$x_i(t) = \frac{|n(t)|^2 + |I(t)|^2}{P_{tx} |h(t)|^2} \quad (16)$$

$$p(x_i(t) | s_i = 1) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left(\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M p(x_i(t) | h_m, I_n, s_i = 1) \right) \quad (17)$$

式(17)需要干扰 $I(t)$ 和信道 $h(t)$ 分别产生粒子 I_n, h_m 。

当 $s_i=0$ 时,不存在干扰,所以:

$$x_i(t) = \frac{|n(t)|^2}{P_{\text{tx}} |h(t)|^2} \quad (18)$$

$$p(x_i(t) | s_i = 0) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N p(x_i(t) | h_n, s_i = 0) \quad (19)$$

这时只需要信道产生粒子 h_n 。

在时刻 t ,如果信道 i 被选择,能够获得的期望回报为 $(1-\omega_i)c(i, t)$ 。所以最优行动就是选择期望回报最大的 L 个信道分配给边缘用户。

$$A(t) = \arg \max_L ((1-\omega_i(t))c(i, t))$$

5 仿真结果及分析

仿真中考虑由 19 个蜂窝小区组成的下行 OFDMA 系统,小区半径为 1 km。系统的主要参数^[12]见表 1。

表 1 系统仿真参数

参数	取值	参数	取值
载波频率	2 GHz	系统带宽	10 MHz
小区数	19	小区半径	1 000 m
每个 RB 子载波数	12	子载波间隔	15 kHz
RB 数	52	基站发射功率	46 dBm
用户噪声系数	9 dB	白噪声密度	-174 dBm/Hz
路径损耗	128.1+37.6lb(d)	发/收天线数	1

用户随机出现在小区中,当用户与其服务基站的距离大于 600 m 时,将该用户定义为边缘用户。信道小尺度衰落模型为瑞利信道。

将利用 IoT(干扰水平)、SINR 分布图和边缘用户的平均吞吐量来评估干扰协调的效果。其中, $I_oT=(I+N)/N$,体现了系统内部的整体干扰均值;SINR 说明了用户的信道质量;吞吐量表明了用户的传输速率。在下文中,分别比较了复用系数(reuse)1、部分频率复用(FFR)和 POMDP 这 3 种方法的干扰控制情况。其中,复用系数 1 表示系统不经过干扰协调,所有小区使用相同频段;FFR 指为相邻小区的边缘用户分配不重叠的频段^[3];本文算法中,假设信道存在干扰的先验概率 $\omega_i=0.5$,转移概率 $\alpha_i=0.2$, $\beta_i=0.8$ 。

图 2 表示 3 种方法的 IoT 曲线。IoT 越小,系统的 SINR 具备越大的提升空间,系统能够以更大速率进行传输。从图中可以看出,FFR 方法在避免干扰方面效果最好,因为

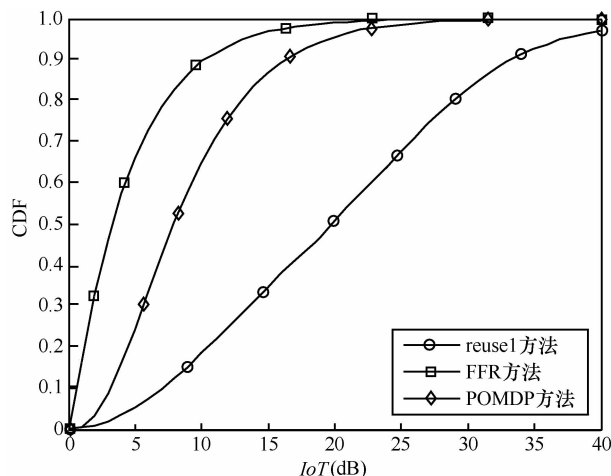


图 2 3 种方法的 IoT 分布

在该方法中不同小区的边缘用户所使用的频段是不重叠的;而当所有小区使用相同频段时,相对于不进行干扰协调的情况,POMDP 方法使干扰水平大大降低,干扰控制效果接近 FFR 方法。

图 3 为 3 种方法的 SINR 分布曲线。SINR 值越大,说明信道质量越好,信道具有越大的传输速率,对频谱资源的利用率也越高。从图中看出,POMDP 方法为边缘用户分配信道的 SINR 基本分布在大于 10 dB 的范围内,接近 FFR 方法。而且 POMDP 方法的曲线斜率最大,说明该方法能够更稳定地为边缘用户分配信道。

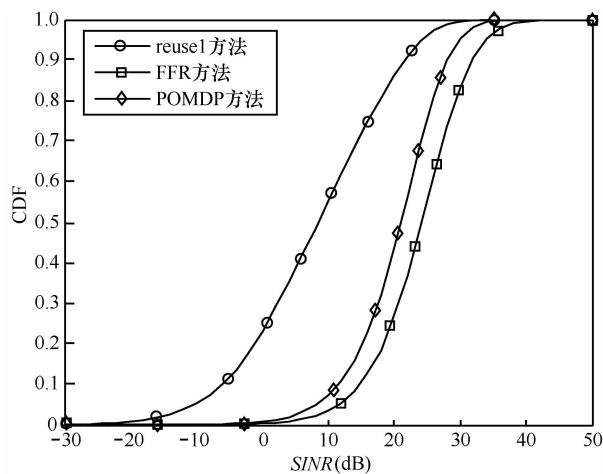


图 3 3 种方法的 SINR 分布

图 4 为边缘用户的平均吞吐量柱状图,虽然 FFR 方法使边缘用户获得的平均吞吐量最大,但是它可供边缘用户使用的信道少,总的系统吞吐量却最小。POMDP 方法使边缘用户平均吞吐量较大的同时,使系统吞吐量也接近频率复用因子为 1 的情况。

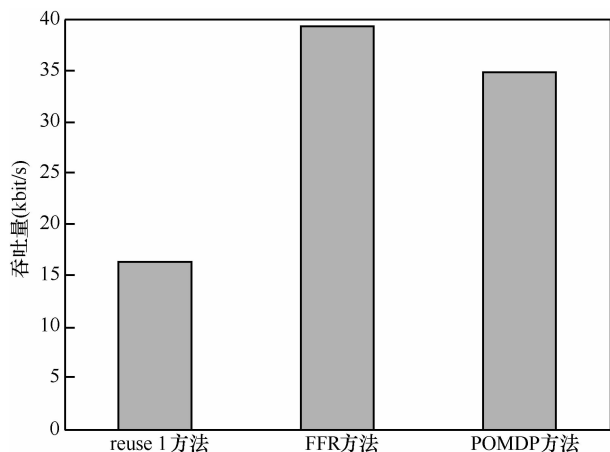


图4 边缘用户的平均吞吐量柱状图

6 结束语

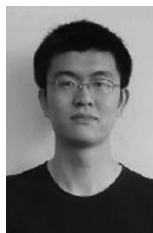
本文提出了一种以 POMDP 为模型的干扰协调策略,它可以使边缘用户在避开干扰的同时获得较高的传输速率。该模型利用信道的 SINR 和统计模型进行决策,不需要基站间的交互,减少了系统信令开销,简化后的模型,计算也更加简便。同时,文中还提出了一种利用粒子滤波进行干扰估计的方法。仿真结果表明,该策略在使系统频率复用因子接近 1 的同时,使边缘用户有效地避开了邻居小区的干扰,改善了边缘用户的服务质量。

参考文献

- 1 Boudreau G, Panicker J, Guo N, *et al.* Interference coordination and cancellation for 4G networks. *IEEE Commun Mag*, 2009, 47(4): 74~81
- 2 MacDonald V H. The cellular concept. *Bell Syst Tech J*, 1979, 58(1): 15~41
- 3 3GPP TSG RAN WG1 Meeting #44. R1-060689. System Simulation Results For Downlink Interference Coordination, 2006
- 4 3GPP TSG RAN WG1 Meeting #41. R1-050507. Soft Frequency Reuse Scheme for UTRAN LTE, 2005
- 5 Zhang H C, Yang Q H, Gao F F, *et al.* Distributed adaptive subchannel and power allocation for downlink OFDMA with inter-cell interference coordination. *IEEE Globecom 2010*, Miami, USA, 2010: 4316~4328
- 6 Quek T, Lei Z, Sun S. Adaptive interference coordination in multi-cell OFDMA systems. *IEEE 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Tokyo, Japan, 2009: 2380~2384
- 7 Rahman M, Yanikomeroglu H. Enhancing cell-edge performance: a downlink dynamic interference avoidance scheme with inter-cell coordination. *IEEE Transactions on Wireless Communication*, 2010, 9(4): 1414~1425

- 8 Murphy K. A survey of POMDP solution techniques. Technical Report, UC Berkeley, <http://www.cs.berkeley.edu/~murphyk/papers.html>, 2000
- 9 Liebl G, Moraes T M de, Gonzalez A, *et al.* Centralized interference coordination in relay-enhanced networks. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW 2012)*, Paris, France, 2012: 306~311
- 10 Smallwood R, Sondik E. The optimal control of partially observable Markov processes over a finite horizon. *Operations Research*, 1973: 1071~1088
- 11 Russell S, Norvig P. *Artificial Intelligence: a Modern Approach*, Second ed. Pearson Education, Inc, Upper Saddle River, NJ, 2003
- 12 Ikuno J C, Wrulich M, Rupp M. System level simulation of LTE networks. *Proceedings of IEEE VTC-Spring*, Taipei, Taiwan, China, 2010: 1~5

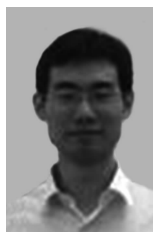
[作者简介]



魏强,男,复旦大学电子工程系硕士研究生,主要研究方向为 OFDMA 系统中的干扰协调等。



杨涛,男,复旦大学电子工程系副教授,主要研究方向为认知无线电、网络信息感知及融合、智能信号处理等。



冯辉,男,复旦大学电子工程系讲师,主要研究方向为分布式信号处理理论及应用、网络智能信息处理等。



胡波,男,复旦大学电子工程系教授,主要研究方向为数字图像处理算法研究、信息传输和数字通信、数字系统的设计与实现等。

(收稿日期:2013-02-28)