

认知无线电环境下 MIMO-OFDM 系统的无线资源管理

陈 东, 李建东, 李维英, 马 静

(西安电子科技大学综合业务网理论 and 关键技术国家重点实验室, 陕西西安 710071)

摘 要: 本文以 IEEE802.22 无线广域网标准为基础, 研究了认知无线电环境下 MIMO-OFDM 系统中分布式无线资源管理问题. 基于博弈理论分析, 文中首先证明了在全局容量最大化的博弈情况下分布式多用户信道功率分配是 Supermodular 博弈, 并给出了相应的分布式多用户信道功率分配算法, 并进一步给出了在认知无线电环境下 MIMO-OFDM 多用户子载波功率分配问题的解决方法. 仿真结果表明, 本文算法通过有限的重复博弈, 可以有效的提高网络容量.

关键词: 认知无线电; MIMO-OFDM; 无线资源管理; Supermodular 博弈

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 6A-060-04

Radio Resource Management for MIMO-OFDM System in Cognitive Radio Context

CHEN Dong, LI Jian-dong, LI Wei-ying, MA Jing

(State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: Based on IEEE802.22, the distributed radio resource management problem for MIMO-OFDM system in cognitive radio context is researched in this paper. The multiuser power and channel allocation problem to maximize the total capacity is proved to be a Supermodular game according to the game theory. A corresponding power and channel allocation algorithm is given and extended to the MIMO-OFDM system. Simulation results indicate that our method can achieve greater performance improvement in channel capacity with finite repeated game.

Key words: cognitive radio, MIMO-OFDM, radio resource management, supermodular game

1 引言

作为解决无线频谱资源紧张的新技术, 认知无线电 (Cognitive Radio)^[1] 正在日益受到人们的重视. 认知无线电技术通过无线频谱感知, 有效地利用时间和空间上的空闲频谱资源提供无线通信服务, 从而提高无线频谱的利用率. 伴随认知无线电技术的发展, 认知无线电技术的标准化进程逐渐得到开展. IEEE802.22^[2] 是第一个世界范围的以认知无线电为基础的无线区域网 (WRAN) 标准. 认知无线电环境下的无线资源管理是认知无线电技术研究的内容之一. 文献[3]中给出了由一组中心式网络构成的认知无线电网络的信道功率分配问题, 提出一种二相的信道功率分配策略用于提高系统的吞吐量, 然而该算法难以适应分布式信道功率分配的需求. 文献

[4]中提出了一种基于博弈理论的自适应信道分配算法以及相应的协议, 该算法并没有考虑到来自首要用户的干扰和对首要用户的干扰. 近年来, 多输入多输出 (Multiple Input Multiple Output, MIMO) 技术以其较高的频谱效率受到了广泛的关注. 作为选项, 多天线技术也被吸纳到 IEEE802.22 的草案中.

本文以 IEEE802.22 无线区域网标准为基础, 研究了在认知无线电环境下分布式多用户信道功率分配问题. 基于博弈理论分析证明了在全局容量最大化的博弈情况下, 分布式多用户信道功率分配是 Supermodular 博弈, 并给出了相应的分布式多用户信道功率分配算法. 结合 MIMO-OFDM 技术, 进一步给出了在认知无线电环境下 MIMO-OFDM 多用户子载波功率分配问题的解决方法. 文中最后给出了本文算法与非合作博弈情况下

收稿日期: 2007-06-14; 修回日期: 2007-10-08

基金项目: 国家杰出青年科学基金 (No. 60725105); 国家自然科学基金重大项目 (No. 60496316); 国家自然科学基金项目 (No. 60572146); 高等学校博士学科点专项科研基金 (No. 20050701007); 高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划; 教育部科学技术研究重点项目 (No. 107103)

信道功率分配的性能对比.

2 系统模型

图 1 所示的网络包含 M 个基站 (BS) 和 N 个固定用户终端 (CPE). 认知无线电中称频段的许可持有者为首要用户 (PU), 认知无线电用户为次要用户 (SU). 在图 1 网络中, 基站和用户终端均为次要用户.

假设存在 K 个可用的传输信道, 其中 $K < N$, 单个信道可以同时被多个次要用户共享. 假定 CPE 和 BS 在每信道的最大发射功率是受限的, 即次要用户 i 在信道上的发射功率 P_{ik} 必须小于一个有限值

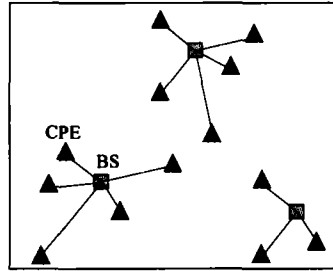


图 1 网络拓扑示意图

\bar{P} . 在 802.22 标准中, 相同区域内可以同时存在多个相邻或重叠的 WRAN. 由于有限的信道, 在网络同步基础上存在上述多用户共享信道的问题. 假设 WRAN 中所有基站在同一时段发送下行数据, 所有 CPE 在同一时段发送上行数据, 因此可以认为同一时刻存在 N 对收发信机. BS 之间存在通信链路可以实现周期性的数据交换, 如 802.22 中定义的基站间通信 (Inter-BS communication) 和共存信标协议.

根据香农公式, 收发信机对 i 之间的信道容量为

$$C_i = \sum_{k=1}^K \log_2(1 + \text{SINR}_{ik})$$

$$= \sum_{k=1}^K \log_2 \left(1 + \frac{P_{ik} G_{ii}}{\sum_{j=1, j \neq i}^N P_{jk} G_{ji} + N_{ik}} \right)$$

其中 P_{ik} 是第 i 个发射机在第 k 个信道的发射功率, G_{ij} 是第 i 个发射机与第 j 个接收机之间的传播损耗, N_{ik} 是第 i 个接收机在第 k 个信道处的噪声.

3 多用户信道功率分配的博弈分析

博弈理论是发展自微观经济学的一组用于解决用户间交互情况下决策和预测的数学工具^[5]. 利用博弈理论, 上述的功率和信道分配问题可以用下式表示

$$G = \langle \Omega, (S_i)_{i \in \Omega}, (u_i)_{i \in \Omega} \rangle$$

其中

- Ω 表示有限的参与到博弈中的用户集合, $\Omega = \{1, 2, \dots, I\}$.
- $(S_i)_{i \in \Omega}$ 是用户可行策略的集合. 其中 S_i 表示用户 i 的非空策略集合. 令 $s_i \in S_i$ 为用户 i 的一个策略, 而 $s_{-i} = [s_j]_{j \neq i}$ 表示除用户 i 以外其他所有用户的策略.
- $(u_i)_{i \in \Omega}$ 表示用户的效用函数的集合. 其中 $u_i: S$

$\rightarrow R$ 是将用户 i 的策略影射为实数的函数.

在上述博弈中, 每一对收发信机将选择其在每个信道的发射功率. 对于参与博弈的收发信机对 i 而言, 其策略可以表示为 $s_i = \{P_i^1, P_i^2, \dots, P_i^K\}$, 其中 P_i^k 表示用户 i 在信道 k 分配的发射功率. 通过效用函数 u_i 可以获得在其他用户的策略为 s_{-i} 的情况下, 用户 i 的策略 s_i 所获得的收益.

博弈理论认为每一个参与博弈的用户都是理性和贪婪的, 非协作情况下的效用函数可以定义为

$$U1: u_i(s) = u_i(s_i, s_{-i}) = C_i$$

效用函数 $U1$ 表示收发信机对 i 之间可以达到的容量. 因此 $U1$ 所导致的结果必然是每一个用户在每一个信道的分配功率均会为 \bar{P} .

定义

$$C_{-i} = \sum_{m=1, m \neq i}^N \sum_{k=1}^N \log_2 \left(1 + \frac{P_{mk} G_{mm}}{\sum_{j=1, j \neq i, m}^N P_{jk} G_{jm} + N_{mk}} \right)$$

表示收发信机对 i 不工作的情况下网络的总容量.

令

$$U2: u_i(s) = u_i(s_i, s_{-i}) = C_i - \left(C_{-i} - \sum_{n=1, n \neq i}^N C_n \right) \quad (1)$$

效用函数 $U2$ 同时考虑了收发信机对 i 发射所带来的自身容量的增加和网络中其他用户容量的损失. 因此 $U2$ 可以理解为协作情况下令全局容量最大化的效用函数.

3.1 多用户信道功率分配博弈的纳什均衡

策略博弈中用户通过独立的选择最优策略使其在其他用户策略的基础上达到自身效用函数最大. 如果该过程收敛, 那么所有用户的策略将收敛于纳什均衡点 (Nash Equilibrium). 已经证明策略博弈中存在一系列的博弈在采用最佳响应策略的时候是存在纳什均衡的. Supermodular 博弈^[6]的特征是该博弈过程中的效用函数具有差异递增的特点. 意味着在 Supermodular 博弈中存在纯策略的纳什均衡点, 即通过任意的初始策略, 只要采用最佳响应策略令每一步均使各自的效用函数增加, 就可以达到该均衡点.

在 $U2$ 协作情况下的博弈中, 由于用户 i 在每一个信道的发射功率 P_{ik} 约束于 $[0, \bar{P}]$, 因此用户 i 的策略空间是有限的. 对于任意的 $s, s' \in S_i$, 均有 $s \vee s' \in S_i$ 和 $s \wedge s' \in S_i$, 因此该策略空间是一个子格. 同时

$$u_i(s \vee s') + u_i(s \wedge s') = \sum_{k=1}^K \log_2 \left(1 + \frac{\max(P_{ik}, P_{ik'}) G_{ii}}{\sum_{j=1, j \neq i}^N P_{jk} G_{ji} + N_{ik}} \right) + \sum_{n=1, n \neq i}^N \sum_{k=1}^K \log_2 \left(1 + \frac{P_{nk} G_{nn}}{\sum_{j=1, j \neq i, n}^N P_{jk} G_{jn} + \max(P_{ik}, P_{ik'}) G_{in} + N_{nk}} \right)$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{k=1}^K \log_2 \left(1 + \frac{\min(P_{ik}, P_{ik}') G_{ii}}{\sum_{j=1, j \neq i}^N P_{jk} G_{ji} + N_{ik}} \right) \\
& + \sum_{n=1, n \neq i}^N \sum_{k=1}^K \log_2 \left(1 + \frac{P_{nk} G_{nn}}{\sum_{j=1, j \neq i, n}^N P_{jk} G_{jn} + \min(P_{ik}, P_{ik}') G_{in} + N_{nk}} \right) - 2C_{-i} \\
& = \sum_{k=1}^K \log_2 \left(1 + \frac{P_{ik} G_{ii}}{\sum_{j=1, j \neq i}^N P_{jk} G_{ji} + N_{ik}} \right) \\
& + \sum_{n=1, n \neq i}^N \sum_{k=1}^K \log_2 \left(1 + \frac{P_{nk} G_{nn}}{\sum_{j=1, j \neq i, n}^N P_{jk} G_{jn} + P_{ik} G_{in} + N_{nk}} \right) \\
& + \sum_{k=1}^K \log_2 \left(1 + \frac{P_{ik}' G_{ii}}{\sum_{j=1, j \neq i}^N P_{jk} G_{ji} + N_{ik}} \right) \\
& + \sum_{n=1, n \neq i}^N \sum_{k=1}^K \log_2 \left(1 + \frac{P_{nk} G_{nn}}{\sum_{j=1, j \neq i, n}^N P_{jk} G_{jn} + P_{ik}' G_{in} + N_{nk}} \right) - 2C_{-i} \\
& = u_i(s) + u_i(s')
\end{aligned}$$

因此效用函数 u_i 是 Supermodular 的, 进而效用函数 U_2 下的博弈为 Supermodular 博弈, 即在全局容量最大化的博弈情况下分布式多用户信道功率分配是 Supermodular 博弈, 存在纳什均衡点。

3.2 分布式多用户信道功率分配算法

定义基站间用于信道功率分配的报文为 PCH_ALLOC. 该报文中包含对应用户的所选择的信道功率分配结果. 同时每一个基站为所属该基站的 CPE 均维护一个信道功率分配表 (PCT). 在各 PCT 中记录每一次收到的 PCH_ALLOC 中包含的信道功率分配结果. 分布式多用户信道功率分配算法的流程如下:

(1) CPE n 所属的基站 m 根据其为 n 所维护的 PCT, 计算 CPE n 和基站 m 之间通信所使用的最优的信道功率分配结果, 即 $s_n = \arg \max u_n(s)$;

(2) 如果计算得到的新的信道功率分配结果 s_n 与其之前的信道功率分配结果不同, 那么构造 PCH_ALLOC 报文, 并通过基站间通信发送给所有其他基站. 否则跳至第 4 步;

(3) 接收到 PCH_ALLOC 报文的基站根据报文内容更新其所管理的所有 CPE 的 PCT;

(4) $n = n + 1$. 如果 $n = N$, 则 $n = 1$. 跳至第 1 步.

4 MIMO-OFDM 系统中多用户子载波功率分配

IEEE802.22 标准中采用了 OFDMA 接入方式, 在多天线情况下其多用户资源调度问题转换为 MIMO-OFDM 系统的多用户子载波功率分配问题. 为了降低复杂度, 802.22 中将若干个子载波捆绑为一个逻辑信道, 逻辑信道是子载波分配的最基本单位. 下面我们仅对子载波为分配基本单位的情况进行分析, 当分配单位

为逻辑信道时其分析过程与之类似.

4.1 问题描述

假设存在 K 个子载波, 其中 $K < N$, 每个子载波上都包含一对发射机和接收机. 每个发射机和接收机分别装备 N_t 和 N_r 根天线, 那么在第 k 个子载波上接收机 i 处对噪声归一化的接收信号可以表示为^[7]

$$Y_{ik} = \sqrt{\rho_{ik}} \mathbf{H}_{ik, ik} x_{ik} + \sum_{l=1, l \neq i}^L \sqrt{\eta_{ik, lk}} \mathbf{H}_{ik, lk} x_{lk} + \mathbf{w}_{ik}$$

其中 x_{ik} 和 x_{lk} 分别表示发射机 i 和 l 在第 k 个子载波上的 N_t 维发射信号向量, 假设发射信号向量为循环对称复高斯向量. ρ_{ik} 表示接收机 i 在第 k 个子载波上的接收信噪比, $\eta_{ik, lk}$ 表示接收机 i 在第 k 个子载波上的干噪比. $\mathbf{H}_{ik, ik}$ 和 $\mathbf{H}_{ik, lk}$ 分别表示第 i 和 l 个发射机与第 i 个接收机之间在第 k 个子载波上为 $N_r \times N_t$ 信道矩阵, 信道矩阵中的元素 h 相互独立并且服从均值为 0, 方差为 1 的复高斯分布. \mathbf{w}_{ik} 为零均值循环对称复高斯 N_r 维噪声向量, 我们假设 $E[\mathbf{w}_i \mathbf{w}_i^H] = \mathbf{I}$.

4.2 MIMO-OFDM 系统中分布式多用户子载波功率分配

第 k 个子载波上收发信机 i 链路的平均互信息量可以表示为

$$\begin{aligned}
I(x_{ik}, y_{ik}) &= E \{ \log_2 [\det(\mathbf{I}_{N_r} + \rho_{ik} \mathbf{H}_{ik, ik} \mathbf{S}_{ik} \mathbf{H}_{ik, ik}^H) \\
&\quad \times (\mathbf{I}_{N_r} + \sum_{l=1, l \neq i}^L \eta_{ik, lk} \mathbf{H}_{ik, lk} \mathbf{S}_{lk} \mathbf{H}_{ik, lk}^H)^{-1})] \}
\end{aligned}$$

其中 $\mathbf{S}_{ik} = E[x_{ik} x_{ik}^H]$ 表示 x_{ik} 的协方差矩阵, 满足 $\text{tr}(\mathbf{S}_{ik}) = 1$).

定义各用户的策略为 $s_i = \{P_i^1, P_i^2, \dots, P_i^K\}$, 其中 P_i^k 表示用户 i 在子载波 k 上分配的发射功率. 每个用户的策略将影响其所对应的 ρ_{ik} 和 $\eta_{ik, lk}$. 与式(1)类似, 可以构造效用函数为

$$\begin{aligned}
u_i(s) &= u_i(s_i, s_{-i}) \\
&= \sum_{k=1}^K I(x_{ik}, y_{ik}) - (C_{-i} - \sum_{n=1, n \neq i}^N \sum_{k=1}^K I(x_{nk}, y_{nk}))
\end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned}
C_{-i} &= \sum_{n=1, n \neq i}^N \sum_{k=1}^K E \{ \log_2 [\det(\mathbf{I}_{N_r} + \rho_{nk} \mathbf{H}_{nk, nk} \mathbf{S}_{nk} \mathbf{H}_{nk, nk}^H) \\
&\quad \times (\mathbf{I}_{N_r} + \sum_{l=1, l \neq i, n}^L \eta_{nk, lk} \mathbf{H}_{nk, lk} \mathbf{S}_{lk} \mathbf{H}_{nk, lk}^H)^{-1})] \} \quad (2)
\end{aligned}$$

考虑与到第 3 节所述内容的相似性, 3.2 节所给出的分布式多用户信道功率分配算法在这里依然适用. 然而式(2)复杂, 证明算法的收敛性比较困难, 因此我们通过仿真对其进行说明.

5 仿真与分析

仿真中考虑的网络模型包含 3 个 WRAN. 每个 WRAN 中包含 10 个 CPE. 3 个 BS 均匀的分布在 $30\text{km} \times$

30km 的方形区域内, 每个 CPE 到对应 BS 之间的距离服从 $[100\text{m}, 10\text{km}]$ 的均匀分布, 每发射机的发射功率的约束上限 \bar{P} 为 4W. 每接收机处的噪声功率服从均值为 -95.2dBm 的正态分布. MIMO-OFDM 系统中 $N_t = N_r = 2$. 定义子载波构成的逻辑信道数量为 4 个, 信道模型为 802.22 工作组所提出的 6 径信道模型^[8].

图 3 展示了所提 MIMO-OFDM 中多用户信道功率分配算法的收敛性. 为了确定该 supermodular 博弈可以收敛到纯策略纳什均衡, 保持同样的网络拓扑通过改变初始的策略来进行多次仿真. 可以看出在有限的次数之后 Supermodular 博弈收敛. 图 3 显示了具有不同初始状态的两仿真可以收敛到相同的均衡点的, 即纳什均衡.

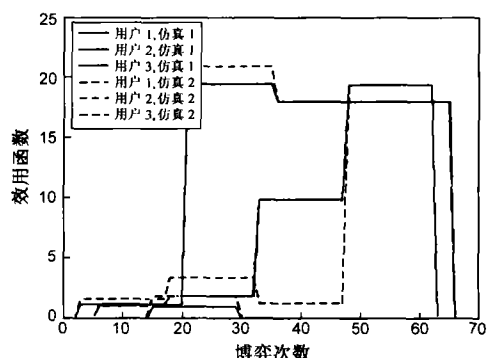


图 3 纳什均衡分析

图 4 给出了本文算法和第二节所提出的非协作情况功率分配算法之间的容量性能比较. 可以看出本文的算法可以达到更大的容量. 虽然仿真显示需要较多的迭代次数来收敛到纳什均衡点, 但实际操作中并不需要一直进行博弈知道达到纳什均衡点. 根据 Supermodular 博弈的特点, 可以在效用函数不再发生较大变化时就中止博弈, 这样虽然会存在一定的容量的损失, 但是却可以有效的降低信道功率分配的时间, 在一定程度上降低系统开销.

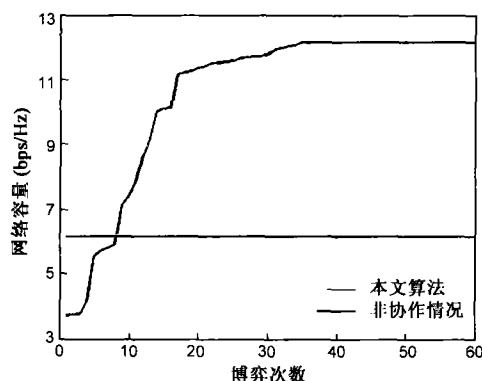


图 4 总容量

同时多次仿真表明, 在网络中 CPE 数量有限的场景中算法收敛需要的博弈次数通常小于 100, 考虑到

IEEE802.22 共存信标协议中每 CBP 报文的交换间隔约为 10ms, 算法可以在 1s 的时间内达到收敛. 随着网络中 CPE 数量的增加, 博弈次数以近似正比例增加, 因此为了满足实时性要求, 基站间的交互还需要借助于基站间通信 (Inter-BS communication).

6 结论

本文以 IEEE802.22 标准为基础, 基于博弈理论分析证明了在全局容量最大化的博弈情况下分布式多用户信道功率分配是 Supermodular 博弈, 给出了相应的分布式多用户信道功率分配算法, 并进一步给出认知无线电环境下 MIMO-OFDM 多用户子载波功率分配问题的解决方法. 仿真结果表明本文算法通过有限的重复博弈可以有效的提高网络容量.

参考文献:

- [1] Simon Haykin. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2): 201 - 220.
- [2] IEEE P802.22: 22TM/D0.1 Draft Standard for Wireless Regional Area Networks Part 22: Cognitive Wireless RAN Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) specifications: Policies and procedures for operation in the TV Bands [S].
- [3] Anh Tuan Hoang and Ying-Chang Liang, A two-phase channel and power allocation scheme for cognitive radio networks[A]. Proceedings of Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2006 IEEE 17th International Symposium on. Sept. 11 - 14 2006[C]. Helsinki, Finland: IEEE, 2006: 1 - 5.
- [4] Nie Nie, Cristina Comaniciu. Adaptive channel allocation spectrum etiquette for cognitive radio networks[J]. Mobile Networks and Applications. 2006, 11(6): 779 - 797
- [5] D Fudenberg, J Tirole. Game Theory[M]. Cambridge, MA: The MIT Press, 1991.
- [6] Topkis D M. Supermodularity and Complementarity [M]. Princeton: Princeton University Press, 1998.
- [7] R S Blum. MIMO capacity with interference[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2003, 21(5): 793-801.
- [8] IEEE. 22-05-0055-07-0000_WLAN_channel_Modeling.doc [DB/OL]. <http://www.ieee802.org/22/>. 2005 - 05

作者简介:

陈 东 男, 西安电子科技大学信息科学研究所博士研究生. 先后参加国家“863”计划项目、教育部重点项目、国家自然科学基金项目等多个科研项目. 已发表论文 6 篇, 其中收入 EI 检索 4 篇. 主要研究领域为移动通信技术、认知无线电技术等.

E-mail: dchen@mail.xidian.edu.cn

李建东 (见本期第 53 页)

次系统迭代的性能,标注为 MAP-idealIC(SI_5).理想 ICI 抵消是指检测器能够理想地减去所有的 ICI,信号模型(19)理想地减去 ICI 后变为 $\tilde{\mathbf{Z}}_n = \tilde{\mathbf{H}}_{nE} \mathbf{x}_{nE} + \tilde{\mathbf{w}}_n$, MAP-idealIC(SI_5)算法即是基于这个信号模型对 \mathbf{x}_{nE} 进行 5 次迭代 MAP 检测.从图 4 和图 3 我们发现和 MMSE-ISDIC(DIb_2 + SI5)检测算法相比,quasi-MAP-ISDIC(SI_5)检测算法在 10^{-5} 的 BER 上能够获得 3.2dB 的信噪比增益,并且距离使用理想 ICI 抵消的 MAP 检测算法的性能只有约 1.2dB.

5 结论

当 MIMO-OFDM 系统工作于频率选择性快衰落信道时,子载波正交性会受到破坏从而引入 ICI.ICI 的存在这将严重降低那些传统的用于检测准静止频率选择性衰落信道中的 MIMO-OFDM 检测算法的性能.本文将文献[2]针对 SISO-OFDM 系统提出的线性预处理思想扩展到 MIMO-OFDM 系统,由此得到一个适合于检测工作在快衰落信道中 MIMO-OFDM 的信号模型.基于这个新的信号模型,我们推广出一种 MMSE-ISDIC 检测算法,属于逐符号检测算法,同时提出一种 quasi-MAP-ISDIC 检测算法,属于联合检测算法.仿真结果表明在本文考虑的系统参数设定下本文中两种检测算法的性能均优于文献[8]中算法的性能,且 quasi-MAP-ISDIC 检测算法能够获得接近基于理想 ICI 抵消的 MAP 检测算法的性能.最后我们指出,虽然本文的研究是针对接收端和发射端均装备两个天线的 MIMO-OFDM 系统的,但是 MMSE-ISDIC 和 quasi-MAP-ISDIC 检测算法均可以扩展到其他天线数量配置的情况.

参考文献:

- [1] G D Golden, C J Foschini, R A Valenzuela, P W Wolniansky. Detection algorithm and initial laboratory results using V-BLAST space-time communication architecture [J]. IEEE Electronics Letters, 1999, 35(1): 14 - 15.
- [2] Philip Schniter. Low-complexity equalization of OFDM in doubly selective channels [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004, 52(4): 1002 - 1011.
- [3] Helmut Bolcskei, ETH Zurich. MIMO-OFDM wireless systems: basics, perspectives, and challenges [J]. IEEE Wireless Communications, 2006, 13(4): 31 - 37.
- [4] Inkyu Lee. Wireless OFDM systems with multiple transmit and receive antennas with bit-interleaved coded modulation [J]. IEEE Wireless Communications, 2006, 13(3): 80 - 87.
- [5] Yu Zhang, Huaping Liu. Frequency-domain corelative coding for MIMO-OFDM systems over fast fading channels [J]. IEEE Communications Letters, 2006, 10(5): 347 - 349.
- [6] Yang-Seok Choi, Peter J Voltz, Frank A Cassara. On channel estimation and detection for multicarrier signals in fast and selective rayleigh fading channels [J]. IEEE Transactions on Communications, 2001, 49(8): 1375 - 1387.
- [7] A Stamoulis, S N Diggavi, N Al-Dhahir. Inter-carrier interference in MIMO OFDM [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2002, 50(9): 2451 - 2464.
- [8] Won-Gyu Song, Jong-Tae Lim. Channel estimation and signal Detection for MIMO-OFDM with time varying channels [J]. IEEE Communications Letters, 2006, 10(7): 540 - 542.
- [9] Huaiyu Dai, Andreas F Molisch, H Vincent Poor. Downlink capacity of interference-limited MIMO systems with joint detection [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2004, 3(2): 442 - 453.
- [10] Bee L Yeap, Choong H Wong, Lajos Hanzo. Reduced complexity In-phase Quadrature-phase M-QAM turbo equalization using iterative channel estimation [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2003, 2(1): 2 - 10.
- [11] J H Winters. Optimum combining in digital mobile radio with cochannel interference [J]. IEEE Journal on Select Areas in Communications, 1984, 2(4): 528 - 539.
- [12] D Falconer, L S Ariyavisitakul, A Benyamini-Seeyar, B Eidson. Frequency domain equalization for single-carrier broadband wireless systems [J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(4): 58 - 66.

作者简介:



曹琲琲 男, 1976 年 3 月生于陕西西安. 2002 年在西安电子科技大学获得工学硕士学位, 现为在读博士研究生, 研究方向为无线通信. E-mail: f_f_cao@263.net



李建东 男, 1962 年 10 月生于江苏省阜宁县. 1982 年和 1985 年分别毕业于西北电讯工程学院本科和研究生班. 1990 年毕业于西安电子科技大学博士生班, 获工学博士学位. 现为西安电子科技大学教授. 2002 年 1 月 - 2003 年 1 月美国 Cornell 大学访问教授. 西安电子科技大学综合业务网理论和关键技术国家重点实验室主任、博士生导师. 国家杰出青年科学基金获得者, 总装部通信和信息安全专业专家组成员. E-mail: jdli@mail.xidian.edu.cn

杨家玮 男, 1946 年 3 月生于上海. 西安电子科技大学博士生导师, 教授. 研究方向为无线通信、移动通信等.